

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering
www.eee.uniwa.gr

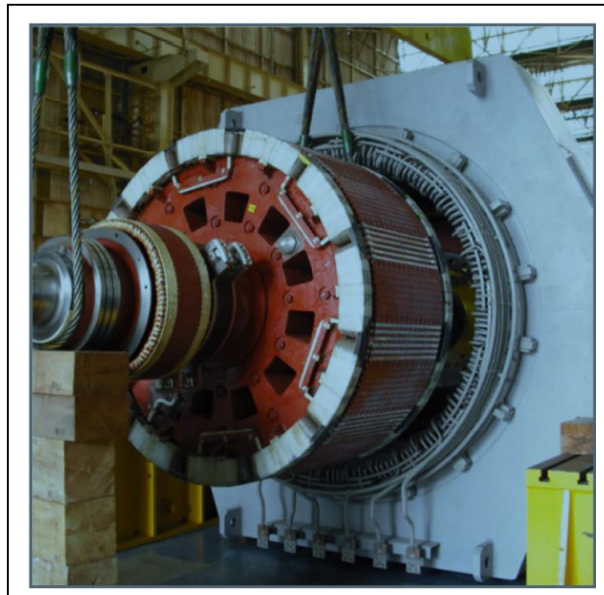
250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel: +30 210 538-1225, Fax: +30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας

Master of Science By Research in
Electrical & Electronics Engineering

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βελτιστοποιημένη σχεδίαση ηλεκτρικής γεννήτριας χαμηλών στροφών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες



Μεταπτυχιακός Φοιτητής : Άγγελος Π. Μοσχούδης, ΑΜ 0051
Επιβλέπων : Γεώργιος Ι. Τσεκούρας, Επίκουρος Καθηγητής

ΑΙΓΑΛΕΩ, Μάρτιος 2023

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering
www.eee.uniwa.gr

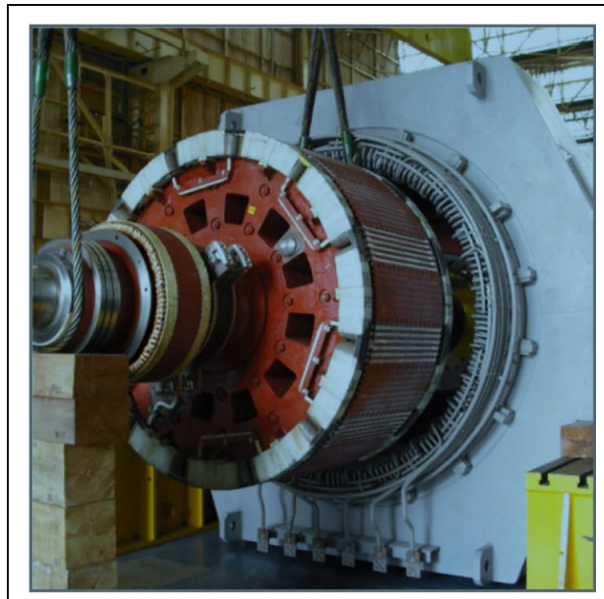
250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας

Master of Science By Research in
Electrical & Electronics Engineering

MSc Thesis

Optimal design based on finite elements for low rpm electric generator suitable for small hydroelectric power plants



Student: Moschoudis Angelos P., Registration Number 0051

MSc Thesis Supervisor: Tsekouras George J., Assistant Professor

ATHENS-EGALEO, March 2023

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων	Μέλος	Μέλος
Γεώργιος Ι. Τσεκούρας	Σταύρος Δ. Καμινάρης	Σάββας Γ. Βασιλειάδης
Επίκουρος Καθηγητής	Καθηγητής	Καθηγητής
Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών	Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών	Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
ΠΑΔΑ	ΠΑΔΑ	ΠΑΔΑ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Άγγελος Μοσχούδης του Παναγιώτη, με αριθμό μητρώου MSCRES- 0051 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας» του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



(Υπογραφή)

Άγγελος Μοσχούδης του Παναγιώτη

.....

Άγγελος Μοσχούδης του Παναγιώτη

Msc Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας

Σχολή Μηχανικών Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών

Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Άγγελος Μοσχούδης του Παναγιώτη,

Μάρτιος, 2023

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος μέλους ΔΕΠ, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

Αφιερώνεται στη Χάρη του Ταξιάρχη Μιχαήλ
που βρίσκεται στο Μανταμάδο της Λέσβου

Έχω Σε Προστάτην και Βοηθόν, Φύλακα
και Ρύστην της ψυχής μου της ταπεινής
Μιχαήλ Πρωτάρχα και ΜΕΓΑ ΤΑΞΙΑΡΧΑ
εν ώρα κινδύνου, Σύ μοι Βοήθησον

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα των Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής και ασχολείται με τη βελτιστοποιημένη σχεδίαση ηλεκτρικής γεννήτριας χαμηλών στροφών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για ΜΥΗΕ. Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία αυτή κρίνεται κατάλληλη για χρήση σε μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες. Για αυτό το λόγο έχει προβλεφθεί η χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της. Αρχικά, η προκαταρκτική σχεδίαση της γεννήτριας πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή των μεθόδων της κλασσικής σχεδίασης, ενώ τα αποτελέσματα της επιβεβαιώνονται με την υλοποίηση και την επίλυση πεδιακού προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Έπειτα, η σχεδίαση έχει βελτιστοποιηθεί με τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας.

Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο του θέματος, ενώ πραγματοποιείται η ανασκόπηση του πεδίου η οποία περιλαμβάνει τα Σ.Η.Ε., τις Α.Π.Ε. και τις υδροηλεκτρικές μονάδες.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρατίθενται οι βασικές αρχές σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών. Αναφέρονται τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά μεγέθη, ενώ παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι σχεδίασης, τα τυλίγματα και οι συνδεσμολογίες, οι κλάσεις των μονώσεων και οι μέθοδοι ψύξης τους.

Στο 3^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται η προκαταρκτική μελέτη ΜΥΗΕ (Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου). Σε αυτό το πλαίσιο αναγνωρίζονται και καταγράφονται οι συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, ενώ πραγματοποιούνται η προκαταρκτική χάραξη του έργου και η εκτίμηση του κόστους και της βιωσιμότητας του.

Στο 4^ο κεφάλαιο υλοποιείται η προκαταρκτική σχεδίαση της σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων. Υπολογίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της όπως τα μαγνητικά και τα ηλεκτρικά μεγέθη, οι γεωμετρικές διαστάσεις και ο βαθμός απόδοσης.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στην οποία εμπεριέχονται αρχές της διανυσματικής ανάλυσης.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρατίθενται οι βασικές αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο 7^ο κεφάλαιο επιχειρείται και επιτυγχάνεται η επιβεβαίωση της σχεδίασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο 8^ο κεφάλαιο η σχεδίαση βελτιστοποιείται με τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας, ενώ στο 9^ο κεφάλαιο γίνεται η μελέτη αποδόσεων γεννητριών και μετασχηματιστών κατά τη σχεδίαση ΜΥΗΕ.

Στο 10^ο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ

Βελτιστοποιημένη σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών χαμηλών στροφών για ΜΥΗΕ, Ηλεκτρική γεννήτρια έκτυπων πόλων χαμηλών στροφών, Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, Σχεδίαση σύγχρονων γεννητριών μικρών υδροηλεκτρικών μονάδων.

ABSTRACT

The present postgraduate thesis has been developed in the Department of Electrical and Electronic Engineers of the Engineering School of UNIWA and concerns with the study of a low RPM electric generator optimized design suitable for small hydroelectric power plants. According to the existing legislation this can be used suitably in small hydroelectric power plants. For this reason it has been predicted the rotor's low rotational speed. Primarily, the generator's preliminary design was carried out by applying classical electrical machines design methods, while the validation of the proposed design has been performed by numerical simulation of the generator's magnetic field problem by using the method of finite elements. Then, the design is optimized by using the method of sensitivity analysis.

In chapter 1 the theoretical framework of the subject is presented while the field's review is carried out in which the Power Systems, the Renewables Energy Sources and the hydroelectric power plants are included.

In chapter 2 the basic principals of the electrical machines design are listed. The electric and magnetic quantities are mentioned, while basic design parameters, the windings and their connections, insulation classes and cooling methods are presented.

In chapter 3 the preliminary design of a Small Hydro Electric Power Plant is carried out. In this context, the conditions prevailing in the area are recognized and recorded, while the preliminary projects design, the cost estimate and its viability are carried out.

In chapter 4 the preliminary design of the salient pole synchronous generator is implemented. The generator's basic features such as electric and magnetic quantities, geometrical dimensions and efficiency are calculated.

In chapter 5 an overview of electromagnetic fields in which basic principles of vector analysis are embedded is presented.

In chapter 6 basic principles of the finite element method are listed.

In chapter 7 the validation of the design is attempted and it is achieved by the use of finite element method.

In chapter 8 the design is optimized by using the method of sensitivity analysis, while in chapter 9 the performance of generators and transformers is studied during the design of a Small Hydro Electric Power Plant.

In chapter 10 the conclusions are listed.

KEYWORDS:

Optimized low rotational speed electrical machines design, Low rotational speed salient pole electric generator, Finite element method analysis, Synchronous generators design suitable for hydroelectric power plants

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα των Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής Με το πέρας της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας από τη θέση στην οποία βρίσκομαι επιθυμώ να εκφράσω ιδιαίτερα τις θερμές ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου εργασίας Επίκουρο Καθηγητή του ΠΑΔΑ κ. Γεώργιο Ι. Τσεκούρα για τις εύστοχες παρατηρήσεις του και τις συμβουλές του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της. Κυρίως όμως τον ευχαριστώ γιατί πίστεψε σε μένα ως άνθρωπο και ως επιστήμονα σε καιρούς δύσκολους και υπό αντίξοες συνθήκες.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τα μέλη της τριμελούς επιτροπής μου τους Καθηγητές του ΠΑΔΑ κ. Σταύρο Δ. Καμινάρη και κ. Σάββα Γ. Βασιλειάδη για την επιστημονική τους συνδρομή η οποία ήταν αναγκαία για την εκπόνηση της εργασίας μου.

Επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στην Καθηγήτρια του ΠΑΔΑ κ. Μαρία Ραγκούση για τη βοήθεια της σε οποιοδήποτε ζήτημα εμφανίστηκε καθώς και για τις άοκνες προσπάθειες που κατέβαλε για την άμεση επίλυση του καθόλη τη διάρκεια της θητείας της ως διευθύντριας του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή του ΠΑΔΑ κ Κωνσταντίνο Βουδούρη για την κατανόηση που επέδειξε σε ζητήματα που άπτονται των διοικητικών καθηκόντων του.

Επιθυμώ να εκφράσω πρόσθετες θερμές ευχαριστίες στους συναδέλφους κ. Χρήστο Θ. Κρασόπουλο Δρ Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών ΕΜΠ και κ. Νικόλαο Π. Θεοδωρακάτο υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ για την έμπρακτη πολυεπίπεδη στήριξη τους στην αναζήτηση της γνώσης.

Κλείνοντας αναλογίζομαι την υπομονή και τη στήριξη της οικογένειας μου του πατέρα μου, της μητέρας μου και της συζύγου μου. Τους ευχαριστώ θερμά και τους οφείλω ευγνωμοσύνη. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον πατέρα μου ο οποίος ήταν και παραμένει άριστος μηχανικός εξειδικευμένος στα αντικείμενα των κατασκευών ηλεκτρικών μηχανών και στις ναυπηγοεπισκευές. Εκείνος με μύησε στα μυστικά της εργασίας και στήριξε κάθε μου προσπάθεια μέχρι τώρα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

	Σελ.
ΕΙΣΑΓΩΓΗ: Αντικείμενο, ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση της εργασίας	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Θεωρητικό πλαίσιο του θέματος – Ανασκόπηση του πεδίου	43
1.1. Τι είναι Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας;	43
1.2. Η χρησιμοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	48
1.3. Τι είναι η υδροηλεκτρική μονάδα;	51
1.3.1. Το νερό : ένα ελεύθερο καύσιμο σχεδόν άνευ τέλους	51
1.3.2. Βασική αρχή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πτώση ύδατος	52
1.3.3. Γενική περιγραφή υδροηλεκτρικού έργου	53
1.3.4. Ροή ενέργειας	55
1.3.5. Διάκριση μικρών – μεγάλων υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	69
1.3.6. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με έμφαση στα μικρά έργα	71
1.4. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	73
1.5. Συμπεράσματα – προτεινόμενη δομή διπλωματικής εργασίας	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αρχές Σχεδίασης Ηλεκτρικών Μηχανών	85
2.1. Εισαγωγή	85
2.2. Συμπεριφορά κυκλωμάτων	86
2.3. Βασικές αρχές	90
2.3.1. Η ηλεκτρομαγνητική μηχανή	90
2.3.2. Επαγωγή και αλληλεπίδραση	90
2.3.3. Κατηγοριοποίηση ηλεκτρικών μηχανών	93
2.3.4. Τριφασικό διανυσματικό διάγραμμα	94
2.4. Ηλεκτρομαγνητικές μηχανές	95
2.4.1. Μετατροπή ενέργειας	95
2.4.2. Αρχές λειτουργίας	96
2.4.3. Περιελίξεις	98
2.4.4. Ροπή	100
2.4.5. Παραγωγή Η.Ε.Δ.	103
2.4.6. Ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών	104
2.5. Μαγνητικά κυκλώματα	104
2.5.1. Νόμοι των μαγνητικών κυκλωμάτων	104

2.5.2.	Απώλειες πυρήνα	105
2.5.3.	Μαγνητικά υλικά	108
2.5.4.	Υπολογισμός μαγνητικών κυκλωμάτων	110
2.5.5.	Ροή σκέδασης	119
2.5.6.	Επαγωγική αντίδραση φάσης	129
2.5.7.	Επαγωγική αντίδραση κινητήρα επαγωγής	130
2.5.8.	Επαγωγική αντίδραση ανά φάση σύγχρονης μηχανής	130
2.6.	Περιελίξεις επαγωγίμων	131
2.6.1.	Τύποι τυλιγμάτων μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος	131
2.6.2.	Τυλίγματα επαγωγίμων	131
2.6.3.	Τυλίγματα μονής στρώσης	137
2.6.4.	Τυλίγματα διπλής στρώσης	143
2.6.5.	Τυλίγματα κλασματικού αριθμού αυλάκων	145
2.6.6.	Τύποι τυλιγμάτων διπλής στρώσης	149
2.6.7.	Επιλογή περιέλιξης επαγωγίμου	150
2.6.8.	Ηλεκτρεγερτική δύναμη των τυλιγμάτων	154
2.6.9.	Η.Ε.Δ. τυλιγμάτων: Γενική περίπτωση	159
2.6.10.	Αρμονικές οδοντώσεων	168
2.6.11.	Αντίδραση επαγωγίμου	170
2.6.12.	Αγωγοί	176
2.6.13.	Μόνωση	181
2.7.	Εξαερισμός – Ψύξη	184
2.7.1.	Απαγωγή θερμότητας	184
2.7.2.	Ροή θερμότητας	185
2.7.3.	Εκθετική αύξηση της θερμοκρασίας / Καμπύλες χρόνου	192
2.7.4.	Συντελεστής Ψύξης	194
2.7.5.	Αύξηση θερμοκρασίας	195
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Προκαταρκτική Μελέτη Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου		199
3.1.	Εισαγωγή	199
3.2.	Αναγνώριση και καταγραφή συνθηκών περιοχής μελέτης	205
3.3.	Συλλογή υδρολογικών στοιχείων προς εκτίμηση πραγματικής παροχής, αξιοποιήσιμης παροχής & πλημμυρικής παροχής	215
3.4.	Προκαταρκτική χάραξη του έργου	225
3.5.	Διάταξη και διαστασιολόγηση έργου	228

3.6.	Υπολογισμός Παραγόμενης Ενέργειας	257
3.7.	Εκτίμηση κόστους αρχικής διάταξης ΜΥΗΕ	260
3.8.	Οικονομοτεχνική ανάλυση αρχικής διάταξης ΜΥΗΕ	260
3.9.	Επαναληπτική διαδικασία διαμόρφωσης διάταξης ΜΥΗΕ προς βελτιστοποίησή του	262
3.10.	Οριστικοποίηση διάταξης	269
3.11.	Έλεγχος κριτηρίων οικονομικής βιωσιμότητας	270
3.12.	Έλεγχος περιβαλλοντικών περιορισμών από περιβαλλοντική μελέτη	271
3.13.	Συμπεράσματα	277

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Προκαταρκτική Σχεδίαση Σύγχρονης Γεννήτριας Έκτυπων

	Πόλων	279
4.1.	Βασικές προδιαγραφές της σχεδίασης της γεννήτριας	279
4.2	Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης – θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης	280
4.3	Αναλυτική σχεδίαση σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων	284
4.3.1	Υπολογισμός βασικών γεωμετρικών διαστάσεων	284
4.3.2	Υπολογισμός ηλεκτρικών μεγεθών περιέλιξης στάτη	287
4.3.3	Υπολογισμός γεωμετρικών διαστάσεων στάτη	290
4.3.4	Υπολογισμός απωλειών στάτη	298
4.3.5	Υπολογισμός της ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας της αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής l_{slot} , της μαγνητικής αγωγιμότητας της ροής σκέδασης της αύλακας L_{slot} , του συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης της αύλακας $L_{slot\ leakage}$ και του συνολικού συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης των αυλάκων έκαστης φάσεως της περιέλιξης $L_{slots\ leakage\ per\ phase}$	305
4.3.6	Υπολογισμός της ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας $l_{overhang}$ και του συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης $L_{overhang\ leakage}$ των κεφαλών του τυλίγματος του στάτη	324
4.3.7	Υπολογισμός της μαγνητικής ροής σκέδασης του στάτη στις αύλακες $\Phi_{stator\ slot\ leakage}$, στις κεφαλές του τυλίγματος $\Phi_{stator\ overhang\ leakage}$, της συνολικής μαγνητικής ροής σκέδασης του στάτη $\Phi_{stator\ total\ leakage}$ και της αντίδρασης σκέδασης του στάτη ρ.υ. $X_{stator\ pu\ flux\ leakage}$	325
4.3.8	Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων διέγερσης όταν η μηχανή λειτουργεί εν κενώ ($At\ No\ load\ Excitations\ per\ Rotors\ pole$)	327
4.3.9	Υπολογισμός της εξωτερικής διαμέτρου του δρομέα $D_{external\ rotor}$	328

4.3.10	Υπολογισμός των διαστάσεων του πόλου του δρομέα	328
4.3.10.1	Υπολογισμός του ύψους του πηνίου της διέγερσης του πόλου του δρομέα $h_{rotor\ pole\ field\ coil}$ και του συνολικού ύψους του πόλου του δρομέα $h_{rotor\ pole\ total}$	330
4.3.11	Υπολογισμός του διακένου ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους του δρομέα στη βάση τους (στην πλευρά του άξονα της μηχανής) μετά την τοποθέτηση του τυλίγματος με τις μονώσεις του	334
4.3.12	Υπολογισμός του διακένου ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους κάτω από το πέδιλο του πόλου (στην πλευρά του διακένου) μετά την τοποθέτηση του τυλίγματος με τις μονώσεις του	335
4.3.13	Υπολογισμός του βάθους του ζυγώματος του δρομέα $d_{rotors\ yoke}$	335
4.3.14	Υπολογισμός της ωμικής πτώσης τάσης ανά φάση στην περιέλιξη του στάτη $V_{drop\ IR\ per\ phase}$ και της ωμικής αντίστασης έκαστης φάσης του στάτη ανά μονάδα $R_{phase\ stator\ pu}$	336
4.4	Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων του μαγνητικού κυκλώματος που απαιτούνται για τη λειτουργία της γεννήτριας εν κενώ	336
4.4.1	Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων του διακένου	337
4.4.2	Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων των οδοντώσεων του στάτη	339
4.4.3	Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων του ζυγώματος του στάτη	340
4.4.4	Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων διέγερσης για τους πόλους του δρομέα	341
4.4.5	Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων του ζυγώματος του δρομέα	343
4.5	Χάραξη της καμπύλης μαγνήτισης	344
4.6	Υπολογισμός της αναπτυσσόμενης τάσης του εναλλακτήρα $E_{g\ phase\ pu}$	348
4.7	Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων πλήρους φορτίου της διέγερσης ανά πόλο	349
4.8	Ρύθμιση της παραγόμενης τάσης της γεννήτριας	351
4.9	Σχεδίαση του πηνίου της διέγερσης	351
4.10	Υπολογισμός της ισχύος εξόδου και των απωλειών τριβών και ανεμισμού της γεννήτριας	355
4.11	Υπολογισμός της θερμοκρασίας του τυλίγματος της διέγερσης	356
4.12	Υπολογισμός της θερμοκρασίας του στάτη	357
4.13	Υπολογισμός του βαθμού απόδοσης της γεννήτριας	360

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανασκόπηση των Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων	361
5.1 Διανυσματική ανάλυση	361
5.1.1 Πράξεις ανάμεσα σε διανύσματα	361
5.1.2 Επικαμπύλιο ολοκλήρωμα και μαγνητική ροή διανυσματικού πεδίου	362
5.1.3 Διαφορικοί τελεστές	363
5.1.4 Ολοκληρωτικές σχέσεις	364
5.1.5 Διαφορικές σχέσεις	365
5.1.6 Έκφραση των διαφορικών τελεστών σε διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων	366
5.1.6.1 Καρτεσιανές συντεταγμένες	366
5.1.6.2 Κυλινδρικές συντεταγμένες	367
5.1.6.3 Σφαιρικές συντεταγμένες	367
5.1.7 Χρονική εξάρτηση	368
5.2 Ηλεκτρομαγνητικά πεδία	368
5.2.1 Ηλεκτρικό φορτίο και πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου	368
5.2.2 Ηλεκτρικό πεδίο μετατόπισης	369
5.2.3 Πεδίο πυκνότητας ρεύματος	369
5.2.4 Πεδίο πυκνότητας μαγνητικής ροής (μαγνητικής επαγωγής)	370
5.2.5 Πεδίο του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού	371
5.2.6 Ένταση μαγνητικού πεδίου	371
5.2.7 Ειδική ηλεκτρική δύναμη – Ηλεκτρικό πεδίο	372
5.2.8 Ηλεκτρική τάση και ηλεκτρεγερτική δύναμη (Η.Ε.Δ.)	374
5.3 Συμπεράσματα	375
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Βασικές αρχές της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων	377
6.1 Εισαγωγή	377
6.2 Πεδιακά προβλήματα με συνοριακές συνθήκες	378
6.2.1 Σημασία του διαφορικού τελεστή L	378
6.2.2 Συνοριακές συνθήκες	379
6.3 Κλασσικές μέθοδοι για την επίλυση προβλημάτων πεδίων	379
6.4 Η κλασσική μέθοδος υπολοίπου (Μέθοδος Galerkin)	381
6.5 Κλασσική μέθοδος των μεταβολών (Μέθοδος Rayleigh – Ritz)	382
6.5.1 Λύση πεδιακού προβλήματος με τη μέθοδο των μεταβολών	384
6.5.2 Ορισμός της τροποποιημένης μεθόδου των μεταβολών	383
6.5.3 Φυσικές συνοριακές συνθήκες	384

6.6	Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	385
6.6.1	Κατάτμηση της περιοχής	385
6.6.2	Επιλογή συνάρτησης παρεμβολής	386
6.6.3	Διατύπωση των εξισώσεων του συστήματος	386
6.6.4	Λύση του προβλήματος	387
6.7	Συμπεράσματα	388

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Επιβεβαίωση της σχεδίασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

		389
7.1	Εισαγωγή	389
7.1.1	Βήματα σχεδίασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	389
7.2	Σχεδίαση της γεωμετρίας της μηχανής	390
7.3	Τοποθέτηση υλικών κατασκευής στα διάφορα τμήματα της γεννήτριας	393
7.4	Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών σε όποια σημεία απαιτούνται	394
7.5	Ρύθμιση του μεγέθους του πλέγματος – Έλεγχος της πυκνότητας του πλέγματος	397
7.6	Ρύθμιση της ακρίβειας της επίλυσης – Προσομείωση	401
7.7	Λήψη – Επεξεργασία – Εκτίμηση των αποτελεσμάτων	401
7.8	Συμπεράσματα	405

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Βελτιστοποίηση της σχεδίασης της γεννήτριας με τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας και χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

		407
8.1	Εισαγωγή	407
8.2	Βελτιστοποίηση της σχεδίασης ως προς το μήκος της γεννήτριας L	412
8.3	Συμπεράσματα	437

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Μελέτη αποδόσεων γεννητριών και μετασχηματιστών κατά τη μελέτη σχεδίασης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού ροής με έναν υδροστρόβιλο

		439
9.1	Εισαγωγή	439
9.2	Προσδιορισμός απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων χαμηλών στροφών	439
9.3	Προσδιορισμός απόδοσης μετασχηματιστή	446
9.4	Πρακτική εφαρμογή	448

9.5	Συμπεράσματα	454
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: Συμπεράσματα		455
10.1	Βασικά συμπεράσματα εργασίας	455
10.2	Περιοχές για περαιτέρω διερεύνηση	459
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		461

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ

	Σελ.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Θεωρητικό πλαίσιο του θέματος – Ανασκόπηση του πεδίου	43
1.1. Κατάλληλες Περιοχές Ύψους Υδατόπτωσης ανά Τύπο Στροβίλου [Ξ5, Table 9.2 page 231]	64
1.2. Ειδικές Ταχύτητες για Διάφορους Τύπους Υδροστρόβιλων [Ξ5, Table 9.3 page 233]	68
1.3. Κατηγοριοποίηση των Υ.Η.Ε. κατά μέγεθος [Ξ5, Table 1.3 page 9]	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αρχές Σχεδίασης Ηλεκτρικών Μηχανών	85
2.1. Μαγνητικά Μεγέθη [Ξ59, page 174]	105
2.2. Απώλειες Μαγνητικής Λαμαρίνας σε W/kg για Συχνότητα 50 Hz [Ξ59, Table page 177]	107
2.3. Επιτρεπόμενες Τιμές Μαγνητικής Επαγωγής : W/m ² [Ξ59, page 179]	109
2.4. Βασικές Παράμετροι Σχεδίασης Ηλεκτρικών Μηχανών [Ξ59, page 179]	111
2.5. Συντελεστές Αρμονικών Μαγνητικής Επαγωγής στο Διάκενο [Ξ59, Table page 182]	114
2.6. Μεγέθη Τυλιγμάτων	139
2.7. Τύποι Ομόκεντρων Τυλιγμάτων σε Ημίκλειστες Αύλακες	141
2.8. Διάταξη Τμήματος Τυλίγματος 5 Πόλων Δεύτερου Παραδείγματος	148
2.9. Τύποι Πηνίων για Ηλεκτρικές Μηχανές Α.Σ.	153
2.10. Συντελεστές Κατανομής Αρμονικών Ανά Εύρος Φάσης	161
2.11. Συντελεστές Κατανομής Αρμονικών	163
2.12. Διάταξη Ομάδων Πηνίων για Κάθε Φάση Τμήματος Περιέλιξης 5 Πόλων Εναλλακτήρα 10 Πόλων	164
2.13. Διάταξη Τμήματος Τυλίγματος 5 Πόλων Εναλλακτήρα 10 Πόλων	167

2.14.	Ταξινόμηση Κλάσεων Μόνωσης Ηλεκτρικών Μηχανών	182
2.15.	Βασικές Παράμετροι Ψυκτικών Μέσων	189
2.16.	Τυπικές Τιμές Θερμικής Αντίστασης για Διάφορα Υλικά	191
2.17.	Βασικές Παράμετροι Θερμοκρασίας – Απαγωγής Θερμότητας	193
2.18.	Συντελεστής Ψύξης	195
2.19.	Όρια Αύξησης Θερμοκρασίας	196
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Προκαταρκτική Μελέτη Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου		199
3.1.	Δεδομένα μηνιαίων και ετήσιων βροχοπτώσεων [mm] μετεωρολογικού σταθμού στο Περτούλι από Εθνικό Αστεροσκοπείο	218
3.2.	Μετεωρολογικά δεδομένα στο Περτούλι από www.meteoblue.com & [E11, πιν. 9]	218
3.3.	Δεδομένα μηνιαίων και ετήσιων βροχοπτώσεων [mm] στο Γοργογύρι μετά από διόρθωση βροχοβαθμίδας πίνακα 2.1	219
3.4.	Ισοδύναμη παροχή σε m ³ /s που λαμβάνει η υδρολογική λεκάνη του σημείου υδροληψίας (Κεφαλοπόταμος) στο Γοργογύρι με βάση τα κατακρημνίσματα του πίνακα 2.3	221
3.5.	Αναμενόμενη επιφανειακή παροχή σε m ³ /s στο σημείο υδροληψίας (Κεφαλοπόταμος) στο Γοργογύρι με βάση την προσφερόμενη παροχή λόγω κατακρημνισμάτων του πίνακα 2.4	221
3.6.	Μέσες μηνιαίες παροχές Κεφαλοποτάμου σε m ³ /s για τα έτη 2000-2015 με μετρήσεις σταθμημέτρου από το ΙΓΜΕ (39,8667° N, 21,5667° E, υψόμετρο 300 m)	222
3.7.	Αξιοποιήσιμες μέσες μηνιαίες παροχές Κεφαλοποτάμου σε m ³ /s για τα έτη 2000-2015 με βάση τον πίνακα 2.6	223
3.8.	Συχνότητα υπέρβασης συνολικών και αξιοποιήσιμων μέσων μηνιαίων παροχών Κεφαλοποτάμου σε m ³ /s για τα έτη 2000-2015 με βάση τους πίνακες 2.6, 2.7	224
3.9.	Ετήσιες μέγιστες ημερήσιες παροχές Κεφαλοποτάμου σε m ³ /s για τα έτη 2000-2015	225
3.10.	Μέγιστη αναμενόμενη πλημμυρική παροχή με βάση τα δεδομένα του πίνακα 2.9 και την περίοδο επαναφοράς για διαφορετικά μοντέλα πλημμυροπαροχής	225
3.11.	Συνιστώμενες τιμές του συντελεστή εισροής C σχάρας ορεινής υδροληψίας [E7, Πίνακας 4.2 σελ 132]	229
3.12.	Διαστασιολόγηση διαμέτρου χαλυβωσολήνας	241
3.13.	Τεχνικά χαρακτηριστικά έργων πολιτικού μηχανικού για διαφορετικές παροχές κανονικής λειτουργίας του ΜΥΗΕ	264

3.14.	Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρομηχανολογικών έργων για διαφορετικές παροχές κανονικής λειτουργίας του ΜΥΗΕ	265
3.15.	Στοιχεία ελέγχου, παραγόμενη ενέργεια, κριτήρια και οικονομικά χαρακτηριστικά για διαφορετικές παροχές κανονικής λειτουργίας του ΜΥΗΕ	267
3.16.	Ενδεχόμενες αρνητικές επιπτώσεις του έργου κατά τη φάση κατασκευής [E11, πίνακα 28] και ίδια επεξεργασία	273-274
3.17.	Ενδεχόμενες αρνητικές επιπτώσεις του έργου κατά τη φάση λειτουργίας [E11, πίνακα 29] και ίδια επεξεργασία	275-276
3.18.	Ενδεχόμενα θετικά αποτελέσματα του έργου κατά τη φάση λειτουργίας [E11] και ίδια επεξεργασία	277

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Προκαταρκτική Σχεδίαση Σύγχρονης Γεννήτριας Έκτυπων

	Πόλων	279
4.1.	Διαστάσεις Αύλακας – Οδόντωσης Στάτη	297
4.2.α	Μαγνητική ροή, μαγνητική επαγωγή, ένταση του μαγνητικού πεδίου και αναγκαία αμπερελίγματα για τα διάφορα τμήματα του μαγνητικού κυκλώματος	345
4.2.β	Μαγνητική ροή, μαγνητική επαγωγή, ένταση του μαγνητικού πεδίου και αναγκαία αμπερελίγματα για τα διάφορα τμήματα του μαγνητικού κυκλώματος	346
4.2.γ	Μαγνητική ροή, μαγνητική επαγωγή, ένταση του μαγνητικού πεδίου και αναγκαία αμπερελίγματα για τα διάφορα τμήματα του μαγνητικού κυκλώματος	347

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανασκόπηση των Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Βασικές αρχές της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Επιβεβαίωση της σχεδίασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

7.1.	Ρυθμίσεις πλέγματος και υλικά στα διάφορα τμήματα της γεννήτριας	398
------	--	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Βελτιστοποίηση της σχεδίασης της γεννήτριας με τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας και χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων	407
8.1. Παράμετροι εισόδου της διαδικασίας βελτιστοποίησης	409
8.2. Παράμετροι εξόδου της διαδικασίας βελτιστοποίησης	409
8.3. Παράμετροι εξόδου της διαδικασίας βελτιστοποίησης	410
8.4. Παράμετροι εξόδου της διαδικασίας βελτιστοποίησης	411
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Μελέτη αποδόσεων γεννητριών και μετασχηματιστών κατά τη μελέτη σχεδίασης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού ροής με έναν υδροστρόβιλο	439
9.1. Υπολογισμός Ετήσιας Παραγόμενης Ενέργειας για Διαφορετικά Είδη Στροβίλων (Francis, Pelton), για Διαφορετικές Κατανομές Πιθανότητας (Ομοιόμορφη, Τριγωνική) με Σταθερές ή Μεταβλητές Αποδόσεις Γεννήτριας-Μετασχηματιστή	454
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: Συμπεράσματα	455

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

	Σελ
Εξώφυλλο: Κυλινδρικός δρομέας σύγχρονης γεννήτριας Μ.Υ.Ε. [Ξ20, Fig. 3, page 4]	1,2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Θεωρητικό πλαίσιο του θέματος – Ανασκόπηση του πεδίου	43
1.1. Τυπική διάταξη δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας	44
1.2. Χάρτης Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας [Ε3]	47
1.3. Διαδρομές ροής Α.Π.Ε. [Ξ3, Fig. 1.10]	48
1.4. Ποιοτική παρουσίαση Υδρολογικού κύκλου [Ε5, σχήμα 3.1 σελ 236]	52
1.5. Τομή τοξωτού φράγματος σκυροδέματος υδροηλεκτρικής εγκατάστασης λίμνης Πλαστήρα [Ε10, σχήμα 3.5.1.α.1-1 σελ. 94]	54
1.6. Τομή χωμάτινου φράγματος [Ε10, σχήμα 3.5.1.α.2-1 σελ. 95]	55
1.7. Μικτό ύψος πτώσης υδροηλεκτρικού σταθμού με ταμιευτήρα και υδροστρόβιλο αντιδράσεως τύπου Francis [Ξ5, Fig. 2.1 page 16]	57
1.8. Μικτό ύψος πτώσης υδροηλεκτρικού σταθμού φυσικής ροής ποταμού με στρόβιλο αντιδράσεως τύπου Francis [Ξ5, Fig. 2.2 page 17]	58

1.9.	Μικτό ύψος πτώσης υδροηλεκτρικού σταθμού φυσικής ροής ποταμού με στρόβιλο δράσεως τύπου Pelton [Ξ5, Fig. 2.3 page 17]	59
1.10.	Στοιχειώδες υδροηλεκτρικό σύστημα [Ξ5, Fig. 9.1 page 210]	61
1.11.	Διάγραμμα εφαρμογών υδροστροβίλων [Ξ6]	64
1.12.	Διαγράμματα εφαρμογών υδροστροβίλων μικρής ισχύος	65
1.12.α.	Στρόβιλοι ισχύος 1- 500 kW [Ξ5, Fig. 9.11.a page 232]	65
1.12.β.	Στρόβιλοι εταιρείας Ossberger [Ξ5, Fig. 9.11.b page 232]	65
1.13.	Δρομέας Στροβίλου Pelton [Ξ7, Fig. 9.8 page 328]	66
1.14.	Στροφέιο Στροβίλου Turgo [Ξ5, Fig. 10.7 page 253]	66
1.15.	Δρομέας Στροβίλου Francis [Ξ7, Fig. 9.16 page 337]	66
1.16.	Δρομέας Στροβίλου Kaplan [Ξ7, Fig. 9.17 page 337]	66
1.17.	Εγκατάσταση και Δρομέας Στροβίλου Πολύ Μικρού Ύψους Πτώσης (VLH) [Ξ5, Fig. 12.4 page 309]	67
1.18.	Απεικόνιση υδροστροβίλου δίνης σε περιβάλλον ANSYS [Ξ11, Fig. 6 page 3]	74
1.19.	Κυλινδρικός δρομέας σύγχρονης γεννήτριας Μ.Υ.Ε. [Ξ20, Fig. 3 page 4]	75
1.20.	Συνδέσεις περιέλιξης στάτη σύγχρονης γεννήτριας Υ.Η.Σ. [Ξ21, Fig.1 page 1]	76
1.21.	Διάταξη μονίμων μαγνητών στην επιφάνεια του δρομέα. [Ξ44, Fig. 4 page 713]	79
1.22.	Διάταξη σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών διπλής εκτυπότητας. [Ξ48, Fig. 1a page 3]	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αρχές Σχεδίασης Ηλεκτρικών Μηχανών **85**

2.1.	Μεταβατικά φαινόμενα σε κυκλώματα R-L σειράς [Ξ59, Fig. 1 page 3]	87
2.1.α.	Συνιστώσες μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης ρευμάτων κυκλώματος R-L	87
2.1.β.	Ρεύμα με πλήρη ασυμμετρία	87
2.1.γ.	Ρεύμα χωρίς μεταβατική συνιστώσα	87
2.2.	Κύκλωμα R-L σειράς με το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα [Ξ59, Fig. 2A page 4]	88
2.3.	Ισχύς εναλλασσομένου ρεύματος [Ξ59, Fig. 2B page 4]	89
2.4.	Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση [Ξ59, Fig. 3 page 7]	92
2.4.α.	Συνιστώσες πεδίου	92
2.4.β.	Συνιστάμενο πεδίο	92

2.4.γ.	Επίδραση αλλαγής της φοράς του ρεύματος	92
2.5.	Στοιχειώδης ηλεκτρική μηχανή [Ξ59, Fig. 4 page 8]	93
2.6.	Στοιχεία ηλεκτρομαγνητικών μηχανών [Ξ59, Fig. 5 page 9]	94
2.7.	Συμβατική τριφασική μηχανή [Ξ59, Fig. 6 page 10]	95
2.8.	Στοιχειώδεις ηλεκτρομαγνητικές μηχανές [Ξ59, Fig. 109 page 169]	97
2.9.	Μ.Ε.Δ. και αναπτυσσόμενη ροπή ηλεκτρομαγνητικών μηχανών [Ξ59, Fig. 110 page 170]	99
2.10.	Μ.Ε.Δ. επαγωγίμου μίας φάσης [Ξ59, Fig. 138 page 225]	101
2.11.	Αντίδραση επαγωγίμου τριών φάσεων [Ξ59, Fig. 139 page 226]	101
2.12.	Σύγχρονες και επαγωγικές μηχανές [Ξ59, Fig. 111 page 172]	103
2.13.	Καμπύλες μαγνητίσεως [Ξ59, Fig. 112 page 175]	106
2.14.	Απώλειες πυρήνα σε συχνότητα 50 Hz [Ξ59, Fig. 113 page 176]	107
2.15.	Ανοίγματα διάκενου - επιφάνειας [Ξ59, Fig. 114 page 180]	112
2.16.	Συντελεστής Carter για διάκενα [Ξ59, Fig. 115 page 181]	113
2.17.	Ανάλυση της κατανομής της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο [Ξ59, Fig. 116 page 183]	116
2.18.	Κατανομή μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο επαγωγικού κινητήρα [Ξ59, Fig. 117 page 185]	118
2.19.	Κυμάτωση μαγνητικής ροής οδοντώσεων [Ξ59, Fig. 136 page 223]	119
2.20.	Σκέδαση έκτυπων πόλων [Ξ59, Fig. 118 page 186]	120
2.21.	Σκέδαση επαγωγίμου [Ξ59, Fig. 119 page 188]	123
2.22.	Διαφορική ροή σκέδασης [Ξ59, Fig. 120 page 189]	124
2.23.	Σκέδαση αύλακας [Ξ59, Fig. 121 page 190]	125
2.24.	Επιδερμικό φαινόμενο αγωγών [Ξ59, Fig. 189 page 312]	128
2.25.α	Συντελεστής σκέδασης αύλακας [Ξ59, Fig. 122.a page 192]	129
2.25.β	Συντελεστής διαφορικής σκέδασης [Ξ59, Fig. 122.b page 192]	129
2.26.	Περιστροφική Η.Ε.Δ. στους αγωγούς και στα ελίγματα του επαγωγίμου [Ξ59, Fig. 123 page 197]	133
2.27.	Ομαδοποίηση φάσεων [Ξ59, Fig. 124 page 199]	136
2.28.	Μια φάση τριφασικής περιέλιξης [Ξ59, Fig. 125 page 200]	137
2.29.	Τυλίγματα μιας στρώσης [Ξ59, Fig. 126 page 202]	138
2.30.	Αλυσωτό τριφασικό τύλιγμα [E11, σχήμα 6.9.β σελίδα 152]	139
2.31.	Τύλιγμα με δύο επίπεδα μετωπικών συνδέσεων [E11, σχήμα 6.9.γ σελίδα 153]	140
2.32.	Παραδείγματα πηνίων για τυλίγματα μονής και διπλής στρώσης [Ξ59, Fig. 129 page 211]	140

2.33.	Τύποι αυλάκων για μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος [Ξ59, Fig. 130 page 212]	141
2.34.	Καλαθοτύλιγμα [Ξ60, Fig. 1 page 20]	142
2.35.	Τριφασικό καλαθοτύλιγμα [E11, σχήμα 6.10 σελίδα 154]	142
2.36.	Αναπτύγματα τριφασικών περιελίξεων δύο στρώσεων [Ξ59, Fig. 127 page 204]	144
2.37.	Βροχοειδή και κυματοειδή πηνία κλασματικού βήματος διπλής στρώσης [Ξ59, Fig. 128 page 208]	146
2.38.	Τριφασική περιέλιξη μονής στρώσης με 2 επίπεδα μετωπικών συνδέσεων τοποθετημένη σε ημίκλειστες αύλακες. Βήμα πηνίου 1-8-10-12	155
2.39.	Τριφασική περιέλιξη διπλής στρώσης, τοποθετημένη σε ανοικτές αύλακες με πηνία βροχοειδούς τυλίγματος, πολλών ελιγμάτων. [Ξ59, Fig. 131.b page 208]	156
2.40.	Τριφασική περιέλιξη διπλής στρώσης, τοποθετημένη σε ανοικτές αύλακες με πηνία βροχοειδούς τυλίγματος, πολλών ελιγμάτων. [Ξ61]	157
2.41.	Πηνίο αδαμαντοειδούς μορφής, πολλών ελιγμάτων, υψηλής τάσης, κατάλληλο για περιέλιξη διπλής στρώσης, τοποθετημένη σε ανοικτές αύλακες. [Ξ61]	158
2.42.	Κυματομορφή Η.Ε.Δ. που παράγεται από παραλληλόγραμμο διάκενο διέγερσης. [Ξ59, Fig. 132 page 215]	158
2.43.	Φασική Η.Ε.Δ. [Ξ59, Fig. 133.a page 216]	159
2.44.	Φασική Η.Ε.Δ. ομοιόμορφα κατανεμημένης περιέλιξης [Ξ59, Fig. 133.b page 217]	160
2.45.	Κλασματικό εύρος πηνίου. [Ξ59, Fig. 134 page 218]	162
2.46.	Συντελεστής κατανομής. [Ξ59, Fig. 135.a page 219]	163
2.47.	Συντελεστής εύρους πηνίου. [Ξ59, Fig. 135.b page 220]	164
2.48.	Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. [Ξ59, Fig. 137 page 224]	171
2.49.	Αντίδραση επαγωγίμου σε μηχανή έκτυπων πόλων.[Ξ59, Fig. 140 page 228]	175
2.50.	Συνεστραμμένοι αγωγοί αυλάκων. [Ξ59, Fig. 141 page 232]	178
2.51.	Αγωγοί κεφαλών τυλιγμάτων. [Ξ59, Fig. 142 page 234]	180
2.52.	Ακτινικός εξαερισμός. [Ξ59, Fig. 143.A page 239]	187
2.53.	Αξονικός εξαερισμός. [Ξ59, Fig. 143.B page 239]	188
2.54.	Συνδυασμένος ακτινικός αξονικός εξαερισμός.[Ξ59, Fig.143.C page 239]	188
2.55.	Εξαερισμός ολόκλειστων μηχανών. [Ξ59, Fig. 144 page 240]	188
2.56.	Εξαναγκασμένος εξαερισμός. [Ξ59, Fig. 145 page 242]	192

2.57.	Αύξηση της θερμοκρασίας / καμπύλες χρόνου. [Ξ59, Fig. 146 page 245]	194
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Προκαταρκτική Μελέτη Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου		199
3.1.	Γενική θέση Γοργούρι Τρικαίων Τρικάλων Θεσσαλίας [google map]	206
3.2.	Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας [E12]	208
3.3.	Γεωπληροφοριακός χάρτης Ρ.Α.Ε. στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων	211
3.4.	Γεωπληροφοριακός χάρτης Ρ.Α.Ε. στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων (μεγέθυνση)	211
3.5.	Προσδιορισμός υψομέτρου υδροληψίας στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω γεωπληροφοριακού χάρτη	212
3.6.	Προσδιορισμός υψομέτρου σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω γεωπληροφοριακού χάρτη (https://en-gb.topographic-map.com)	212
3.7.	Προσδιορισμός υδρολογικής λεκάνης από σημείο υδροληψίας στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω γεωπληροφοριακού χάρτη (https://en-gb.topographic-map.com)	213
3.8.	Προσδιορισμός υδρολογικής λεκάνης από σημείο υδροληψίας στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω google map σε τρισδιάστατη απεικόνιση	213
3.9.	Προσδιορισμός υδρολογικής λεκάνης από σημείο υδροληψίας στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω google map σε δισδιάστατη απεικόνιση και υπολογισμός εμβαδού της	214
3.10.	Προσδιορισμός υδρολογικής λεκάνης από σημείο υδροληψίας στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω γεωπληροφοριακού χάρτη της Ρ.Α.Ε. σε δισδιάστατη απεικόνιση και υπολογισμός εμβαδού της	214
3.11.	Χάρτης Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.) περιοχής Καλαμπάκας (υπ. Αριθμό 132 σε κλίμακα 1:50.000) που περιέχει Γοργούρι (εδώ σε σμίκρυνση)	215
3.12.	Προσδιορισμός υδρολογικής λεκάνης από σημείο υδροληψίας (κόκκινη γραμμή) στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω χάρτη Γ.Υ.Σ. περιοχής Καλαμπάκας	216
3.13.	Προσδιορισμός υψομέτρου σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων πλησίον της νοτιοδυτικής εισόδου του ομώνυμου χωριού μέσω γεωπληροφοριακού χάρτη (https://en-gb.topographic-map.com)	216
3.14.	Εναλλακτικές θέσεις σημείου υδροληψίας και σταθμού παραγωγής κατά την αριστερή όχθη στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω google map	217

3.15.	Χάραξη πολυγώνων Thiesen στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων για μετεωρολογικούς σταθμούς σε Περούλι, Τρίκαλα και Μουζάκι μέσω google map	217
3.16.	Χρονολογική καμπύλη μέσω μηνιαίων παροχών και αξιοποιήσιμων μέσω μηνιαίων παροχών στο Γοργούρι Τρικάλων σε σημείο υδροληψίας	222
3.17.	Καμπύλη διάρκειας μέσω μηνιαίων παροχών και αξιοποιήσιμων μέσω μηνιαίων παροχών στο Γοργούρι Τρικάλων σε σημείο υδροληψίας σε σχέση με το ποσοστό υπέρβασης για δεδομένα έτη 2000-2015	223
3.18.	Προσδιορισμός ισοϋψούς διώρυγας (κόκκινη γραμμή) από σημείο υδροληψίας στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω χάρτη Γ.Υ.Σ. περιοχής Καλαμπάκας (μεγέθυνση)	225
3.19.	Προσδιορισμός θέσεων δεξαμενής καθίζησης-διώρυγας-δεξαμενής φόρτισης-σωλήνα υπό πίεση από σημείο υδροληψίας ως σταθμό παραγωγής κατά την αριστερή όχθη στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω google map	225
3.20.	Προσδιορισμός θέσεων δεξαμενής καθίζησης-διώρυγας – δεξαμενής φόρτισης-σωλήνα υπό πίεση από σημείο υδροληψίας ως σταθμό παραγωγής κατά την αριστερή όχθη στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω google map	227
3.21.	Προσδιορισμός θέσεων δεξαμενής καθίζησης-δεξαμενής φόρτισης – σωλήνα υπό πίεση από σημείο υδροληψίας ως σταθμό παραγωγής με επιφανειακή όδευση κατά την αριστερή όχθη στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω google map	227
3.22.	Προσδιορισμός θέσεων δεξαμενής καθίζησης - δεξαμενής φόρτισης – σωλήνα υπό πίεση από σημείο υδροληψίας ως σταθμό παραγωγής με υπόγεια όδευση στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω google map	228
3.23.	Προσδιορισμός μήκους υδατορέματος από σημείο υδροληψίας ως σταθμό παραγωγής στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω google map	228
3.24.	Διάταξη και λεπτομέρειες στήριξης ορεινής υδροληψίας [E7, σχήμα 4.40]	229
3.25.	Σχηματική διαμόρφωση της ροής πάνω από (α) σχάρα με λάμες και (β) διάτρητο έλασμα [E7, σχήμα 4.41]	230
3.26.	Διαμόρφωση συλλεκτήριας διώρυγας ορεινής υδροληψίας [E7, σχήμα 4.42]	231
3.27.	Συντελεστής υπερχειλιστή καμπύλης στέψης με κατακόρυφη ανάντι παρειά [E7, σχήμα 4.16]	232
3.28.	(α) Ανεπιθύμητη και (β) ελεγχόμενη ανάπτυξη υδραυλικού άλματος [E7, σχήμα 4.26]	232

3.29.	Λεκάνη ηρεμίας με βάρθρα σε σειρά και συμπαγή αναβαθμό στην έξοδο, τύπου III του US Bureau of Reclamation κατάλληλη για $Fr_1 > 4,5$, $D_1 = y_1$, $D_2 = y_2$, $L_{III} = D_2 \cdot (2,4 + 0,073 \cdot (Fr_1 - 4,5))$ για $4,5 < Fr_1 < 10$, $L_{III} = D_2 \cdot 2,8$ για $Fr_1 > 10$, $h_3 = D_1 \cdot (1,30 + 0,164 \cdot (Fr_1 - 4,0))$, $h_4 = D_1 \cdot (1,25 + 0,056 \cdot (Fr_1 - 4,0))$ [E7, σχήμα 4.48γ]	233
3.30.	Υδραυλικό άλμα σε λεκάνη ηρεμίας [E8, σχήμα 4], όπου στη θέση του "y" έχει μπει η μεταβλητή "D" και του "c" η μεταβλητή "V"	233
3.31.	Τυπική διατομή φράγματος σε υπερχειλιστή	235
3.32.	Αρχή υπολογισμού μήκους δεξαμενής εξαμμωτή [E7, σχήμα 4.43β]	236
3.33.	Έργο ορεινής υδροληψίας με εξαμμωτή [E7, σχήμα 4.44β]	237
3.34.	Τυπική σχηματική διαμόρφωση και κύριες διαστάσεις δεξαμενής φόρτισης μικρού υδροηλεκτρικού [E7, σχήμα 4.52]	239
3.35.	Διάγραμμα επιλογής υδροστροβίλων από διάφορες εταιρείες (οριζόντιος άξονας: παροχή σε m^3/s , κατακόρυφος άξονας: διαθέσιμο υδραυλικό ύψος λειτουργίας σε m) [E7, σχήμα 5.29α]	242
3.36.	Διάγραμμα επιλογής υδροστροβίλων από την εταιρεία Voith [E9]	242
3.37.	Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Francis οριζοντίου άξονα με σπειροειδές κέλυφος της εταιρείας Toshiba [E7, σχήμα 5.33]	243
3.38.	Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Francis οριζοντίου άξονα κλειστού θαλάμου της εταιρείας Sorumsand [E7, σχήμα 5.35]	244
3.39.	Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Francis κατακόρυφου άξονα με ανοικτό θάλαμο της εταιρείας Voith [E7, σχήμα 5.38]	244
3.40.	Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton κατακόρυφου άξονα της εταιρείας IREM [E7, σχήμα 5.59]	245
3.41.	Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton κατακόρυφου άξονα της εταιρείας Bouvieur [E7, σχήμα 5.62]	245
3.42.	Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton οριζοντίου άξονα ενός ακροφυσίου της εταιρείας Voith [E7, σχήμα 5.64α]	246
3.43.	Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton οριζοντίου άξονα δύο ακροφυσίων της εταιρείας Voith [E7, σχήμα 5.64β]	246
3.44.	Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton οριζοντίου άξονα τεσσάρων ακροφυσίων της εταιρείας Voith [E7, σχήμα 5.64γ]	247
3.45.	Κύριες διαστάσεις τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton οριζοντίου άξονα δύο ακροφυσίων της εταιρείας Voith [E7, σχήμα 5.63]	248

3.46.	Τομή μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού Pelton οριζοντίου άξονα δύο ακροφυσίων [E7, σχήμα 7.4]	248
3.47.	Διάταξη μονάδας ισχύος ρυθμιστού στροφών υδροστροβίλου [E7, σχήμα 6.23]	251
3.48.	Χάρτης περιθωρίων διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για δήμο Τρικκαίων, Περιφερειακής Ενότητας Τρικάλων, Περιφέρειας Θεσσαλίας [E14]	257
3.49.	Καμπύλη διάρκειας παραγόμενης ισχύος για $Q_{κλ}=0,632 \text{ m}^3/\text{s}$, δηλαδή για παροχή κανονικής λειτουργίας που υπερβαίνει το 30% του χρόνου	259
3.50.	Καμπύλη διάρκειας παροχής προς αξιοποίηση και χρησιμοποιηθείσας παροχής για ηλεκτροπαραγωγή με $Q_{κλ}=0,632 \text{ m}^3/\text{s}$, δηλαδή για παροχή κανονικής λειτουργίας που υπερβαίνει το 30% του χρόνου	259
3.51.	Καθαρή παρούσα αξία μικρού υδροηλεκτρικού έργου με επιτόκιο προεξόφλησης 5% για ηλεκτροπαραγωγή με $Q_{κλ}=0,632 \text{ m}^3/\text{s}$, δηλαδή για παροχή κανονικής λειτουργίας που υπερβαίνει το 30% του χρόνου	262
3.52.	Μεταβολή ονομαστικής διαμέτρου χαλυβოსωλήνα DN και καθαρού υδραυλικού ύψους ως προς την επιλεχθείσα παροχή κανονικής λειτουργίας	264
3.53.	Ισχύς του στροβίλου, ενεργός ισχύς επιλεχθείσας γεννήτριας, φαινόμενη ισχύς επιλεχθέντος μετασχηματιστή, παραγόμενη ισχύς υδροηλεκτρικής μονάδας και μέγιστο επιτρεπτό μήκος εκτροπής φυσικής κοίτης ως προς την επιλεχθείσα παροχή κανονικής λειτουργίας	266
3.54.	Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, συντελεστής φορτίου και βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης υδροηλεκτρικής μονάδας ως προς την επιλεχθείσα παροχή κανονικής λειτουργίας	266
3.55.	Κόστος επένδυσης, διάρκεια απόσβεσης ως ατελές και ως πλήρες οικονομικό κριτήριο υδροηλεκτρικής μονάδας ως προς την επιλεχθείσα παροχή κανονικής λειτουργίας	268
3.56.	Καθαρή παρούσα αξία σε 8 έτη λειτουργίας και σε 20 έτη λειτουργίας, εσωτερικός βαθμός απόδοσης στα 20 έτη ανάκτησης κεφαλαίου και λόγος καθαρής παρούσας αξίας στα 20 έτη λειτουργίας προς το συνολικό κόστος επένδυσης υδροηλεκτρικής μονάδας ως προς την επιλεχθείσα παροχή κανονικής λειτουργίας	268
3.57.	Περιοχή Natura με χαρακτηρισμό ως «τόπο κοινοτικής σημασίας (SCI: Site of Community Importance)» και κωδικό GR1440002 «Κερκέτιο όρος (Κόζιακας)» [E15]	271
3.58.	Περιοχή Natura με χαρακτηρισμό ως «ζώνη ειδικής προστασίας (SPA: Special Protection Areas)» και κωδικό GR1440006 «Κορυφές όρου Κόζιακας» [E15]	272

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Προκαταρκτική Σχεδίαση Σύγχρονης Γεννήτριας Έκτυπων

	Πόλων	279
4.1	Απώλειες ισχύος πυρήνα υλικού M-43. [E15, σχήμα 1 σελίδα 37]	304
4.2	Ροή σκέδασης ρευματοφόρου αύλακας μιας ηλεκτρικής μηχανής και μαγνητική επαγωγή σκέδασης. Αριστερά διακρίνονται οι αγωγοί στην αύλακα. Η ρευματοφόρος περιοχή απεικονίζεται με διαγράμμιση και σε αυτήν υφίστανται τα αμπερελίγματα $z_Q \cdot I$ ή $N_{conductors\ per\ stator\ slot} \cdot I$. Στα δεξιά εμφανίζεται η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής σκέδασης της αύλακας ως συνάρτηση του ύψους της αύλακας h . Η συμπαγής γραμμή απεικονίζει τη μεταβολή χωρίς την επίδραση του επιδερμικού φαινομένου στην περιέλιξη ενώ, η διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύει την περίπτωση που λαμβάνει χώρα το επιδερμικό φαινόμενο. [E68, Fig 4.13, page 249]	307
4.3	Προτεινόμενη κωνική αύλακα γεννήτριας για τύλιγμα διπλής στρώσης με διαστάσεις	312
4.4	Τμήμα του αναπτύγματος τριφασικής περιέλιξης διπλής στρώσης της προτεινόμενης σχεδίασης της γεννήτριας. $Q = 120$ αύλακες, $q = 4$ αύλακες ανά πόλο και φάση, $m = 3$ φάσεις, $W = 10/12 \cdot \tau_p$ μέσο άνοιγμα του πηνίου, $W \tau_p \text{ ratio} = W/\tau_p = 10/12$, $\varepsilon = \varepsilon_{short\ pitching} = \text{parameter}$ $2/12 \cdot \tau_p$ παράμετρος σμίκρυνσης βήματος, $y = 10$ βήμα της περιέλιξης	319
4.5	Διανυσματικό διάγραμμα εισαγωγών και εξαγωγών των ρευμάτων στα τυλίγματα τριφασικής περιέλιξης	320
4.6	Απώλειες ισχύος ανά βαθμό Κελσίου αύξησης της θερμοκρασίας ανά cm^2 της εξωτερικής επιφάνειας του πηνίου διέγερσης του δρομέα σε συνάρτηση με την περιφερειακή του ταχύτητα [E63 Fig 13.10 page 797]	333
4.7	Ο συντελεστής Carter ως συνάρτηση του λόγου του ανοίγματος της αύλακας προς το μήκος του διακένου για ημίκλειστες και ανοικτές αύλακες και διάκενα αερισμού [E63 Fig 3.14 page 73]	338
4.8	Χαρακτηριστική $B = f(At/m)$ μαγνητικής λαμαρίνας υλικού M-400-50A (M-43)	339
4.9	Λεπτομέρεια χαρακτηριστικής $B = f(At/m)$ μαγνητικής λαμαρίνας υλικού M-400-50A (M-43)	340
4.10	Χαρακτηριστική μαγνήτισης $E_{phase\ pu} = f(At/m)$ της υπό σχεδίαση σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων	348
4.11	Χαρακτηριστική μεταβολής του συντελεστή διασταυρούμενης αντίδρασης $K_r = f(K_f = Pole\ arc/Pole\ pitch)$ [E63]	350
4.12	Διανυσματικό διάγραμμα προσδιορισμού των αμπερελιγμάτων διέγερσης πλήρους φορτίου	351

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανασκόπηση των Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων	361
5.1 Πράξεις ανάμεσα στα διανύσματα. [E16]	361
5.2 Συστήματα ορθογωνικών συντεταγμένων [E16].	
α) Καρτεσιανές, β) Κυλινδρικές και γ) Σφαιρικές συντεταγμένες	367
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Βασικές αρχές της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων	 377
6.1 Στοιχεία για την κατάτμηση της περιοχής.	
α) μια διάσταση τμήμα καμπύλης, β) δύο διαστάσεις τρίγωνο ή παρ/μο	
γ) τρεις διαστάσεις τριγωνικό πρίσμα, τετράεδρο ή συμπαγές παρ/μο	386
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Επιβεβαίωση της σχεδίασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	 389
7.1 Σχεδίαση άνω τμήματος σύγχρονης γεννήτριας δέκα έκτυπων πόλων	395
7.2 Στάτης και δρομέας της γεννήτριας	395
7.3 Αύλακες και οδοντώσεις του στάτη. Λεπτομέρεια του διάκενου	396
7.4 Τμήμα του στάτη, του διακένου και των έκτυπων πόλων του δρομέα	396
7.5 Τμήμα του στάτη, του διάκενου, των έκτυπων πόλων και του ζυγώματος του δρομέα ίσο με ένα πολικό βήμα	397
7.6 Πλέγμα της γεννήτριας που αφορά τον άξονα, το ζύγωμα και τους πόλους του δρομέα, το διάκενο και τον στάτη (29058 κόμβοι, 57644 στοιχεία)	399
7.7 Πλέγμα της γεννήτριας για την περιοχή των οδοντώσεων και του διάκενου (29058 κόμβοι, 57644 στοιχεία)	399
7.8 Πλέγμα της μηχανής για τμήμα του στάτη, του διακένου και των έκτυπων πόλων του δρομέα. (29058 κόμβοι, 57644 στοιχεία)	400
7.9 Πλέγμα της μηχανής για τμήμα του στάτη, του διάκενου, των έκτυπων πόλων και του ζυγώματος του δρομέα ίσο με ένα πολικό βήμα. (29058 κόμβοι, 57644 στοιχεία)	400
7.10 Αναπαράσταση του μαγνητικών γραμμών του πεδίου της γεννήτριας	402
7.11 Αναπαράσταση της μαγνητικής επαγωγής B της γεννήτριας	403
7.12 Αναπαράσταση της έντασης του μαγνητικού πεδίου H της γεννήτριας	403
7.13 Αναπαράσταση της πυκνότητας του ρεύματος J της γεννήτριας	404
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Βελτιστοποίηση της σχεδίασης της γεννήτριας με τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας και χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων	 407
8.1 Μεταβολή του όγκου του χαλκού του στάτη ως προς την παράμετρο του μήκους της σύγχρονης γεννήτριας	412

8.2	Μεταβολή του όγκου του χαλκού του δρομέα ως προς την παράμετρο του μήκους της σύγχρονης γεννήτριας	412
8.3	Μεταβολή του όγκου του χαλκού στο στάτη, στο δρομέα και συνολικά ως προς την παράμετρο του μήκους της σύγχρονης γεννήτριας	413
8.4	Μεταβολή του βάρους των τυλιγμάτων του στάτη του εναλλακτήρα ως προς την παράμετρο του μήκους του	413
8.5	Μεταβολή του βάρους των τυλιγμάτων του δρομέα του εναλλακτήρα ως προς την παράμετρο του μήκους του	414
8.6	Μεταβολή του βάρους του χαλκού που χρησιμοποιείται για την κατάσκευή των τυλιγμάτων του εναλλακτήρα ως προς την παράμετρο του μήκους του	414
8.7	Μεταβολή του όγκου του πυρήνα του στάτη του μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	415
8.8	Μεταβολή του όγκου του πυρήνα του δρομέα της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	415
8.9	Μεταβολή του όγκου του πυρήνα στο στάτη, στο δρομέα και συνολικά ως προς την παράμετρο του μήκους της σύγχρονης γεννήτριας	416
8.10	Μεταβολή του βάρους του πυρήνα του στάτη της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	416
8.11	Μεταβολή του βάρους του πυρήνα του δρομέα της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους του	417
8.12	Μεταβολή του βάρους του πυρήνα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των τυλιγμάτων της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	417
8.13	Μεταβολή του συνολικού βάρους της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	418
8.14	Μεταβολή της μέγιστης τιμής της αναπτυσσόμενης ροπής στο διάκενο της μηχανής πλευρά του δρομέα ως προς την παράμετρο του μήκους της	418
8.15	Μεταβολή της μέγιστης τιμής της αναπτυσσόμενης ροπής στη μέση του διακένου της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	419
8.16	Μεταβολή της μέγιστης τιμής της αναπτυσσόμενης ροπής στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του στάτη ως προς την παράμετρο του μήκους της	419
8.17	Μεταβολή της μέγιστης τιμής της αναπτυσσόμενης ροπής στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του δρομέα, του στάτη και στο μέσο του ως προς τη παράμετρο του μήκους της	420

8.18	Μεταβολή της μέγιστης ισχύος στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του δρομέα ως προς τη παράμετρο του μήκους της	420
8.19	Μεταβολή της μέγιστης ισχύος στη μέση του διάκενου της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	421
8.20	Μεταβολή της μέγιστης ισχύος στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του στάτη ως προς την παράμετρο του μήκους της	421
8.21	Μεταβολή της μέγιστης ισχύος στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του δρομέα, του στάτη και στο μέσο του ως προς τη παράμετρο του μήκους της	422
8.22	Μεταβολή της πυκνότητας της μέγιστης ισχύος στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του δρομέα ως προς τη παράμετρο του μήκους της	422
8.23	Μεταβολή της πυκνότητας της μέγιστης ισχύος στη μέση του διάκενου της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	423
8.24	Μεταβολή της πυκνότητας της μέγιστης ισχύος στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του στάτη ως προς την παράμετρο του μήκους της	423
8.25	Μεταβολή της πυκνότητας της μέγιστης ισχύος στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του δρομέα, του στάτη και στο μέσο του ως προς τη παράμετρο του μήκους της	424
8.26	Μεταβολή της ονομαστικής ροπής στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του δρομέα ως προς τη παράμετρο του μήκους της	424
8.27	Μεταβολή της ονομαστικής ροπής στη μέση του διάκενου της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	425
8.28	Μεταβολή της ονομαστικής ροπής στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του στάτη ως προς την παράμετρο του μήκους της	425
8.29	Μεταβολή της ροπής στο μέσο του διάκενου για διάφορες τιμές της γωνίας δ ως προς την παράμετρο του μήκους της	426
8.30	Μεταβολή της κυμάτωσης της ροπής στο μέσο του διάκενου για διάφορες τιμές της γωνίας δ ως προς την παράμετρο του μήκους της	426
8.31	Μεταβολή της ΗΕΔ της τάσης Α για διάφορες τιμές της γωνίας δ ως προς την παράμετρο του μήκους της	427
8.32	Μεταβολή της ΗΕΔ της τάσης Β για διάφορες τιμές της γωνίας δ ως προς την παράμετρο του μήκους της	427
8.33	Μεταβολή της ΗΕΔ της τάσης C για διάφορες τιμές της γωνίας δ ως προς την παράμετρο του μήκους της	428
8.34	Μεταβολή της τιμής της μαγνητικής επαγωγής του διάκενου που αντιστοιχεί σε ένα πόλο στο μέσο του για διάφορες τιμές της γωνίας δ έως προς την παράμετρο του μήκους της	428

8.35	Μεταβολή της αυτεπαγωγής ευθέως άξονα L_d της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	429
8.36	Μεταβολή της αυτεπαγωγής εγκάρσιου άξονα L_q της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	429
8.37	Μεταβολή της τιμής της αντίστασης του στάτη ανά φάση της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	430
8.38	Μεταβολή της ενεργούς τιμής της Η.Ε.Δ. της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	430
8.39	Μεταβολή των τιμών της θεμελιώδους συνιστώσας της ενεργούς τιμής της Η.Ε.Δ. της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	431
8.40	Μεταβολή των τιμών της θεμελιώδους συνιστώσας και των τεσσάρων πρώτων αρμονικών της ενεργούς τιμής της Η.Ε.Δ. της μηχανής στο ανά μονάδα σύστημα ως προς την παράμετρο του μήκους της	431
8.41	Τιμές της θεμελιώδους συνιστώσας και των τριών πρώτων αρμονικών περιττής τάξης για τιμή της μεταβλητής του μήκους της μηχανής ίσης με $L = 0,54 m$	432
8.42	Τιμές των τριών πρώτων αρμονικών περιττής τάξης για τιμή της μεταβλητής του μήκους της μηχανής ίσης με $L = 0,54 m$	432
8.43	Μεταβολή του συντελεστή ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της Η.Ε.Δ. της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	433
8.44	Μεταβολή της τιμής του μήκους κοπής του πυρήνα του στάτη, του δρομέα και της μηχανής συνολικά ως προς την παράμετρο του μήκους της	433
8.45	Μεταβολή των απωλειών χαλκού της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	434
8.46	Μεταβολή των απωλειών πυρήνα της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	434
8.47	Μεταβολή των απωλειών τριβών και ανεμισμού της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	435
8.48	Μεταβολή των συνολικών απωλειών της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	435
8.49	Μεταβολή των απωλειών χαλκού, πυρήνα, τριβών και ανεμισμού και των συνολικών απωλειών της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	436
8.50	Μεταβολή του βαθμού απόδοσης της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της	436

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Μελέτη αποδόσεων γεννητριών και μετασχηματιστών κατά τη μελέτη σχεδίασης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού ροής με έναν υδροστρόβιλο	439
9.1 Αναπαράσταση γωνιών μαγνητικού πεδίου στάτη, δρομέα και ισοδύναμων τυλιγμάτων αξόνων d και q μίας σύγχρονης γεννήτριας	441
9.2 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων - ρεύματων σε σύγχρονη γεννήτρια έκτυπων πόλων ($\theta_0 < 0^\circ$)	444
9.3 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού μετασχηματιστή	447
9.4 Απόδοση μετασχηματιστή, γεννήτριας, συστήματος μετασχηματιστή – γεννήτριας για τον υπό μελέτη υδροηλεκτρικό σταθμό ενός στροβίλου με χρήση στροβίλου Francis ή Pelton: (α) πλήρες διάγραμμα, (β) μεγέθυνση	450
9.5 Σφάλμα ενεργού ισχύος κατά τον υπολογισμό παραγόμενων ισχύων από μετασχηματιστή και γεννήτρια, για τον υπό μελέτη υδροηλεκτρικό σταθμό ενός στροβίλου με χρήση στροβίλου Francis or Pelton.	452
9.6 Εκατοστιαίο σφάλμα ενεργού ισχύος κατά τον υπολογισμό παραγόμενων ισχύων από μετασχηματιστή και γεννήτρια, για τον υπό μελέτη υδροηλεκτρικό σταθμό ενός στροβίλου με χρήση στροβίλου Francis ή Pelton: (α) πλήρες διάγραμμα, (β) μεγέθυνση.	453
9.7 Κατανομή πιθανότητας παροχής νερού κατά τη διάρκεια του έτους, όπου $f_p(q)$ είναι η συνάρτηση της πυκνότητας πιθανότητας, q_{max} η μέγιστη παροχή νερού ($= 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$).	453
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: Συμπεράσματα	455

Αντικείμενο, ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση της εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας έρευνας αποτελεί η σχεδίαση σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων κατάλληλη για Μ.Υ.Η.Ε. Αυτή η σχεδίαση θα πραγματοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας της. Στη συνέχεια παρατίθεται η διάρθρωση της εργασίας:

Θεωρητικό πλαίσιο του θέματος με ανασκόπηση του πεδίου. Σ.Η.Ε., Α.Π.Ε. υδροηλεκτρική μονάδα, αρχές ηλεκτροπαραγωγής από υδατοπτώσεις, διάκριση υδροηλεκτρικών μονάδων, πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα.

Διερεύνηση των αρχών σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών. Βασικές παράμετροι σχεδίασης. Μαγνητικά και ηλεκτρικά μεγέθη, τυλίγματα, συνδεσμολογίες, κλάσεις μόνωσης, μέθοδοι ψύξης.

Προκαταρκτική μελέτη ΜΥΗΕ. Αναγνώριση - καταγραφή των συνθηκών της περιοχής, συλλογή - εκτίμηση των υδρολογικών στοιχείων. Προκαταρκτική χάραξη του έργου, διαστασιολόγηση, υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας. Εκτίμηση κόστους, οικονομοτεχνική ανάλυση ΜΥΗΕ. Βελτιστοποίηση, οριστικοποίηση της διάταξης, έλεγχος περιβαλλοντικών κριτηρίων και κριτηρίων βιωσιμότητας.

Προκαταρκτική σχεδίαση σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων. Υπολογισμός ηλεκτρικών και μαγνητικών μεγεθών, θερμοκρασίας λειτουργίας και βαθμού απόδοσης.

Ανασκόπηση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, διανυσματικά ανάλυση. Βασικές αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Βασικές αρχές εφαρμογής πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις. Διαδικασία ανάλυσης με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Επίλυση σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών. Προσομείωση σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων. Βελτιστοποίηση με τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας και χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων Συμπεράσματα και περιοχές για περαιτέρω έρευνα.

Θεωρητικό πλαίσιο του θέματος – Ανασκόπηση του πεδίου

1.1. Τι είναι Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε.) είναι το σύνολο των απαραίτητων εγκαταστάσεων και των διατάξεων που περιέχουν για την τροφοδοσία των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια. Στο σχήμα 1.1 εμφανίζεται μία τυπική διάταξη ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας με τα στοιχεία από τα οποία απαρτίζεται στα διάφορα τμήματα του.

Για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία ενός Σ.Η.Ε. αυτό πρέπει να έχει μελετηθεί σωστά έτσι ώστε να ικανοποιεί τις παρακάτω απαιτήσεις [E1]:

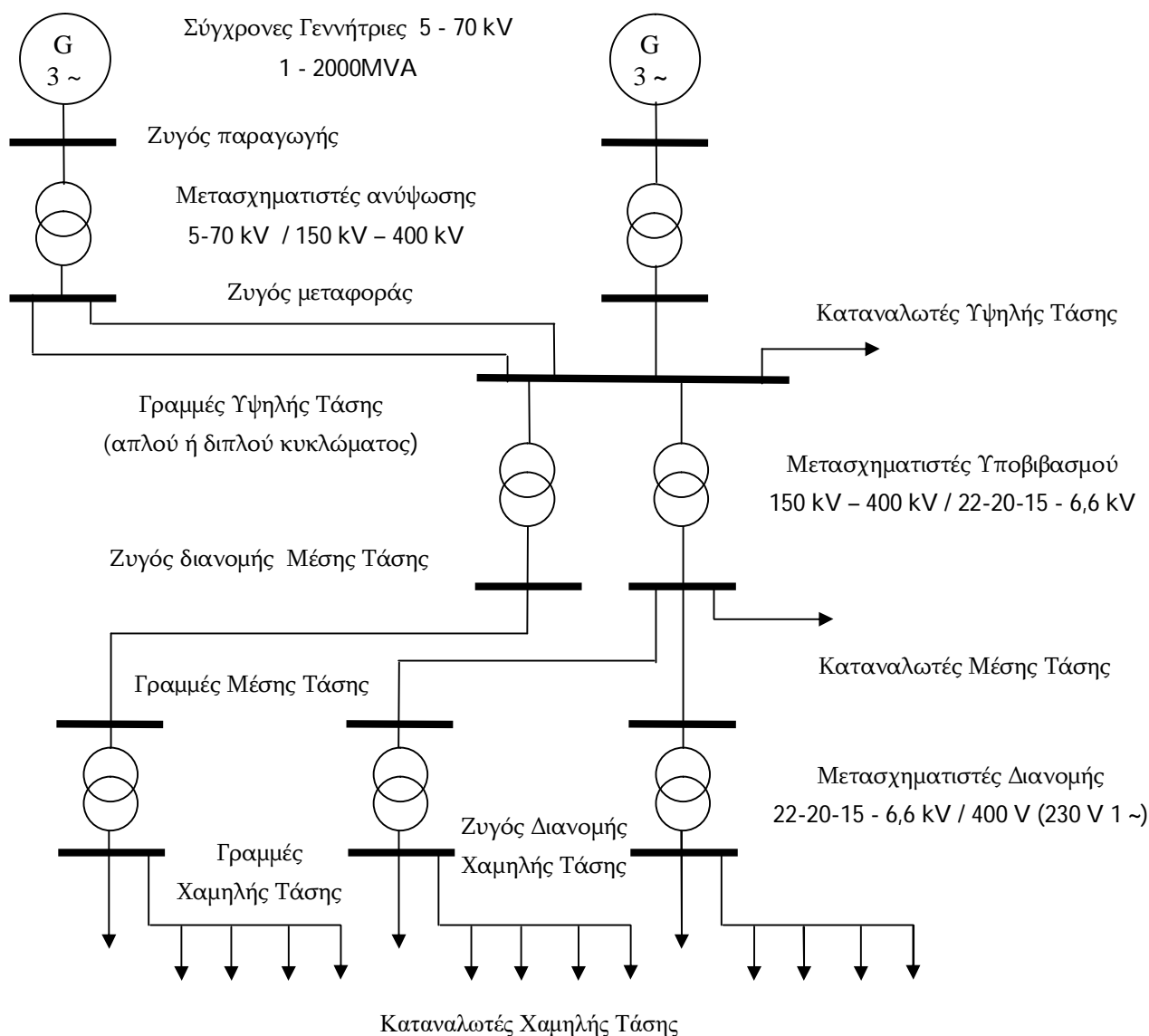
- Η ηλεκτρική ενέργεια να παρέχεται σε οποιαδήποτε γεωγραφική περιοχή υπάρχουν καταναλωτές
- Να καθίσταται δυνατή η κάλυψη της διαρκώς χρονικά μεταβαλλόμενης ζήτησης πραγματικής και άεργης ισχύος
- Οι παρακάτω βασικοί όροι ποιότητας ηλεκτρικού φορτίου να έχουν ικανοποιηθεί: 1) Σταθερή συχνότητα, 2) Σταθερή τάση, 3) Υψηλή αξιοπιστία τροφοδοσίας των καταναλωτών
- Η ενέργεια πρέπει να παρέχεται με το ελάχιστο δυνατό οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος

Από το ξεκίνημα της εμπορικής χρήσης της ηλεκτρικής ισχύος, προοδευτικά, τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της από τα σημεία παραγωγής έως τους τελικούς καταναλωτές έχουν μεγεθυνθεί και διασυνδεθεί μεταξύ τους. Αρχικά, το τυπικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνταν από μια ή περισσότερες ανεξάρτητες γεννήτριες συνδεδεμένες με ένα κατάλληλα προσαρμοσμένο ηλεκτρικό φορτίο. Το φορτίο αυτό αποτελούνταν από οικιακούς καταναλωτές, βιοτεχνίες και μικρές βιομηχανικές μονάδες και είχε διασπαρθεί σε μικρή σχετικά απόσταση από τη γεννήτρια. Για να εξυπηρετηθεί μεγαλύτερος αριθμός καταναλωτών η γεωγραφική επέκταση και η διασύνδεση ανάμεσα στα απομονωμένα συστήματα έχει εφαρμοστεί. Αυτή έχει παρακινηθεί από διάφορους τεχνικούς, κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες. Η επέκταση και διασύνδεση των Σ.Η.Ε. έχουν βασιστεί στις ακόλουθες κύριες τεχνικές παραμέτρους :

- Επίτευξη οικονομικών κλίμακας
- Βελτίωση του συντελεστή ζήτησης φορτίου
- Βελτιστοποίηση της αξιοπιστίας με την ομαδοποίηση εφεδρειών παραγωγής

Η επίτευξη οικονομικών κλίμακας σημαίνει ότι τα κόστη κατασκευής και λειτουργίας μιας μεγάλης μονάδας ηλεκτροπαραγωγής έχουν καταστεί χαμηλότερα, συγκρινόμενα

με εκείνα που αντιστοιχούν σε περισσότερες μικρότερες μονάδες της ίδιας συνολικής εγκατεστημένης ισχύος.



Σχήμα 1.1: Τυπική διάταξη δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

Ο συντελεστής ζήτησης φορτίου σχετίζεται με το λόγο του οποίου αριθμητής είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του φορτίου που οφείλεται στην πραγματική ισχύ που απορροφά από το Σ.Η.Ε. κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου, προς τη μέγιστη ζήτηση της ισχύος που αυτό απαιτεί σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Αυτό είναι ένα βασικό κριτήριο για την οικονομική βιωσιμότητα της παροχής υπηρεσιών ηλεκτρικού δικτύου, δεδομένου ότι το κόστος κατασκευής των υποδομών σχετίζεται με τη μέγιστη ποσότητα της παρεχόμενης ισχύος λαμβάνοντας υπόψη ότι τα έσοδα από τις πωλήσεις ηλεκτρικής ενέργειας σχετίζονται με την ποσότητα της ενέργειας που καταναλώνεται.

Η αύξηση της ικανότητας παροχής υπηρεσιών υψηλής αξιοπιστίας σε σχέση με το

κόστος τους αποτελεί τον τρίτο κύριο παράγοντα, που έχει οδηγήσει στη γεωγραφική επέκταση και τη διασύνδεση των Σ.Η.Ε. Η βασική ιδέα είναι ότι, όταν μια γεννήτρια δεν είναι διαθέσιμη για οποιονδήποτε λόγο, τότε το φορτίο να μπορεί να εξυπηρετηθεί από μια άλλη γεννήτρια που βρίσκεται σε διαφορετική περιοχή από αυτό. Για να καταστεί δυνατή η αντιμετώπιση έκτακτων αναγκών που οφείλονται σε απροσδόκητες απώλειες μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ή σε διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος, διατηρείται σε ετοιμότητα από τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας ή τους ανεξάρτητους διαχειριστές των Σ.Η.Ε. ένα περιθώριο στρεφόμενης εφεδρείας [E1]. Ένα Σ.Η.Ε. αποτελείται από τα τμήματα που παρατίθενται παρακάτω :

- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας
- Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται στους σταθμούς παραγωγής και στα αιολικά πάρκα των οποίων η λειτουργία βασίζεται σε κινητήριες μηχανές. Οι κινητήριες μηχανές έχουν κατηγοριοποιηθεί σε τρεις βασικές κατηγορίες. Στις θερμικές μηχανές στις οποίες η θερμότητα που παράγεται από την καύση ορυκτών καυσίμων ή την ελεγχόμενη σχάση πυρηνικών καυσίμων μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια (Ατμοστρόβιλοι, Αεριοστρόβιλοι, Μ.Ε.Κ). Στους υδροστρόβιλους οι οποίοι εκμεταλλεύονται τη δυναμική ενέργεια των υδάτινων ροών και των υδατοπτώσεων προκειμένου αυτή να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια. Στους ανεμοκινητήρες δίνεται τμήμα της κινητικής ενέργειας του ανέμου και μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια. Η μηχανική ενέργεια που έχει παραχθεί από τις κινητήριες μηχανές μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη χρήση γεννητριών.

Το επίπεδο της τάσης του δικτύου μεταφοράς καθορίζεται από την απόσταση ανάμεσα στα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής και τους καταναλωτές. Καθώς η απόσταση στην οποία εκτείνονται οι γραμμές μεταφοράς έχει αυξηθεί, έχει αυξηθεί και η σημασία των απωλειών θερμότητας πάνω σε αυτές. Η επιλογή υψηλής τάσης είναι επιθυμητή προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση των ρευμάτων της γραμμής. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των ωμικών απωλειών. Για τους λόγους αυτούς η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας έχει επιλεγεί να πραγματοποιείται με τριφασική εναλλασσόμενη υψηλή ή υπερ-υψηλή τάση, ενώ η κυματομορφή της πρέπει να έχει ημιτονοειδή μορφή [E2]. Οι τάσεις που έχουν εφαρμοστεί διεθνώς στις γραμμές μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος των Σ.Η.Ε. μέχρι σήμερα έχουν τις ακόλουθες πολικές τιμές : 66, 110, 132, 138, 150, 220, 275, 345, 400, 500 και 750 kV και με συχνότητα 50 Hz ή 60 Hz. Στην περίπτωση που η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να μεταφερθεί σε εξαιρετικά μεγάλες αποστάσεις (μεγαλύτερες από 1000 χιλιόμετρα) αλλά και σε ειδικές περιπτώσεις (υποθαλάσσιες διασυνδέσεις Σ.Η.Ε.) έχουν κατασκευαστεί γραμμές μεταφοράς Υψηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος (HVDC), οι οποίες λειτουργούν υπό τάση 400, 500 και 1000 kV.

Η διανομή ηλεκτρικής ισχύος αποτελεί το τμήμα εκείνο των υποδομών των Σ.Η.Ε. με τη βοήθεια του οποίου η ηλεκτρική ενέργεια παραλαμβάνεται από τα κυκλώματα μεταφοράς υψηλής τάσης προκειμένου αυτή να παραδοθεί στους καταναλωτές [E2].

Η διανομή με τη σειρά της έχει χωριστεί σε δύο τμήματα στην πρωτεύουσα και τη δευτερεύουσα διανομή. Η πρωτεύουσα διανομή αποτελεί το κομμάτι εκείνο του δικτύου στο οποίο συνδέονται οι μεγάλοι καταναλωτές. Σε αυτούς περιλαμβάνονται οι μεγάλες ενεργοβόρες βιομηχανίες (διυλιστήρια πετρελαιοειδών, χαλυβουργίες, ορυχεία, τσιμεντοβιομηχανίες). Σε αυτήν την περίπτωση η σύνδεση γίνεται κατευθείαν στο δίκτυο υψηλής τάσης, ενώ έχει υιοθετηθεί επίπεδο πολιτικής τάσεως με εύρος από 35 έως 150 kV. Η δευτερεύουσα διανομή έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτευχθεί η σύνδεση στο δίκτυο μέσης τάσης καταναλωτών μικρότερης ισχύος όπως οι ελαφρές βιομηχανίες, οι βιοτεχνίες και τα συγκροτήματα καταστημάτων, ενώ οι οικιακοί καταναλωτές συνδέονται στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Η πολιτική τάση του δικτύου σε αυτό το τμήμα τους έχει διαμορφωθεί σε ένα εύρος από 1 έως 35 kV για τη μέση τάση και 400 V για τη χαμηλή τάση.

Τα δίκτυα διανομής αποτελούνται από τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, τους υποσταθμούς υποβιβασμού της υψηλής τάσης σε μέση και της μέσης τάσης σε χαμηλή. Σήμερα στο ελληνικό σύστημα το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (Μ.Τ.) λειτουργεί με ονομαστική τάση πολιτικής τιμής 20 kV, ενώ εκείνο της χαμηλής τάσης (Χ.Τ.) με 400 V με συχνότητα 50 Hz. Η παρουσία τμημάτων του δικτύου Μ.Τ. τα οποία λειτουργούν υπό τάση 6,6 kV, 15 kV και 22 kV έχει περιοριστεί σε ορισμένες περιοχές του κέντρου της πόλης των Αθηνών και του Πειραιά [E2].

Στο σχήμα 1.2 [E3] εμφανίζεται το εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας. Σύμφωνα με αυτό, στον ηπειρωτικό χώρο υφίστανται τριφασικές γραμμές μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος απλού και διπλού κυκλώματος. Η πολιτική τιμή της τάσης λειτουργίας τους είναι 150 και 400 kV αντίστοιχα, ενώ έχουν κατασκευαστεί για συχνότητα 50 Hz. Συμπληρωματικά έχει επιτευχθεί η υποβρύχια διασύνδεση των νησιών του Ιονίου Πελάγους (Κέρκυρα, Λευκάδα, Ζάκυνθος και Κεφαλονιά) με την ηπειρωτική χώρα μέσω γραμμής η οποία λειτουργεί με τάση 150 kV, ενώ η Κέρκυρα διαθέτει και δεύτερη υποβρύχια σύνδεση με την Ηγουμενίτσα η οποία λειτουργεί με τάση 66 kV. Από την πλευρά του Αιγαίου Πελάγους έχει καταστεί λειτουργική σχετικά πρόσφατα η υποβρύχια διασύνδεση της Άνδρου με το εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα υπό τάση 150 kV, ενώ έχει προβλεφθεί να συνδεθούν σε αυτή και άλλα νησιά των Κυκλάδων όπως η Σύρος και η Τήνος. Ακόμη έχει υλοποιηθεί η υποβρύχια διασύνδεση της Κρήτης από τον νομό Λακωνίας με 2 τριφασικές γραμμές των 150 kV με συχνότητα 50 Hz ισχύος 200 MW έκαστη, ενώ έχει σχεδιαστεί και αναμένεται να υλοποιηθεί η υποβρύχια διασύνδεση της Κρήτης από την Αττική με 2 υποβρύχιες γραμμές HVDC μεταφορικής ισχύος 500 MW η κάθε μια. Η λειτουργία των γραμμών Υψηλής Τάσεως Συνεχούς Ρεύματος θα καταστεί δυνατή με τη χρήση της πλέον σύγχρονης τεχνολογίας μετατροπών ισοδύναμης πηγής τάσης VSC (Voltage Source Converter), ενώ το επίπεδο της τάσης λειτουργίας της πρόκειται να είναι 500 kV [E4].

Πρέπει να αναφερθεί ότι αυτή τη στιγμή η Κρήτη διαθέτει αυτόνομο σύστημα μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος με δύο επίπεδα τάσεων στα 66 και 150 kV αντίστοιχα, ενώ το αυτόνομο σύστημα μεταφοράς της Ρόδου λειτουργεί με τάση 66 kV. Επιπρόσθετα, έχει πραγματοποιηθεί υποθαλάσσια διασύνδεση Συνεχούς

Ρεύματος HVDC ανάμεσα στα εθνικά διασυνδεδεμένα συστήματα της Ελλάδας και της Ιταλίας, η οποία λειτουργεί υπό τάση 400 kV.

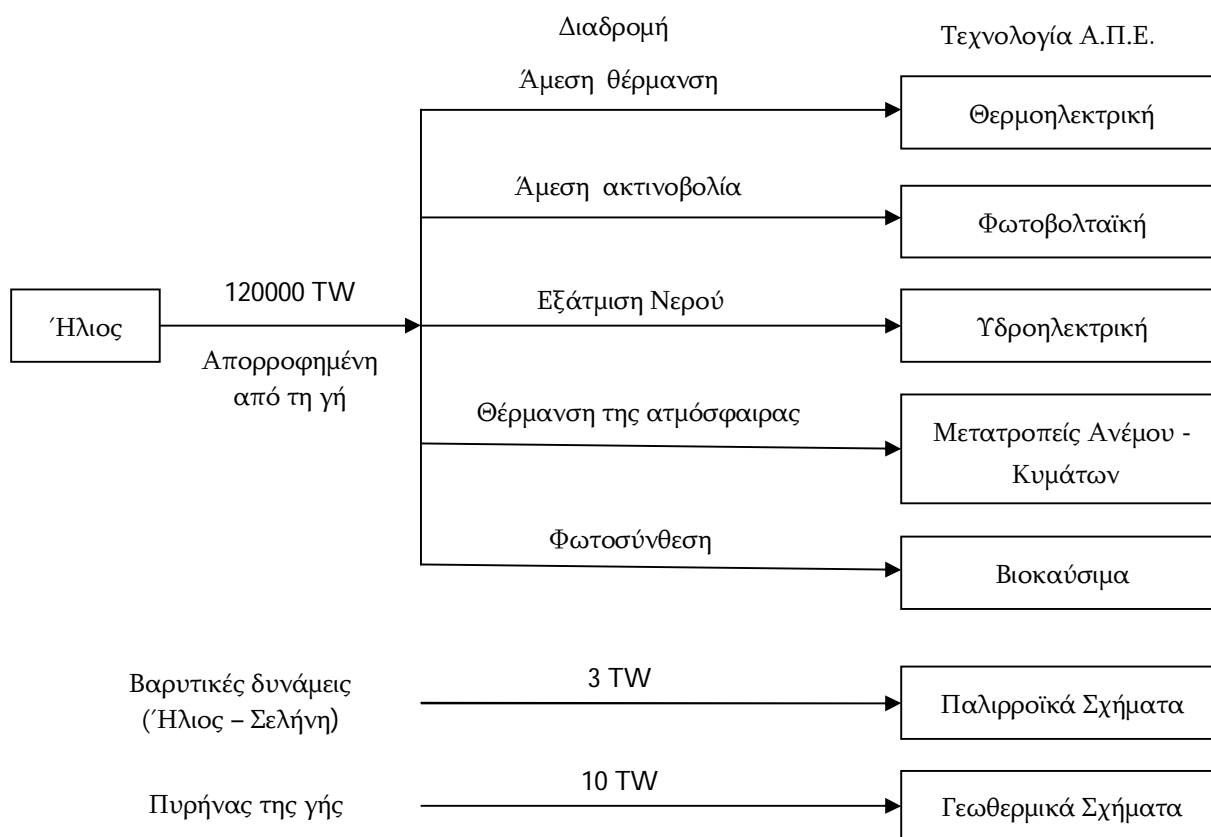


Σχήμα 1.2 Χάρτης Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας [E3]

1.2. Η χρησιμοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Σε κάθε μορφή ενέργειας η οποία δεν ρυπαίνει το περιβάλλον έχει αποδοθεί ο όρος ήπια μορφή ενέργειας. Κάθε πηγή ενέργειας η οποία θεωρητικά είναι ανεξάντλητη έχει κατηγοριοποιηθεί ως Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας (Α.Π.Ε.) [E5].

Στο σχήμα 1.3 εμφανίζεται μια επισκόπηση των κύριων γήινων ενεργειακών διαδρομών που δύνανται να αξιοποιηθούν για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές [E3]. Ο ήλιος αποτελεί την κύρια πηγή ανανεώσιμης ενέργειας με εύκολη πρόσβαση. Ο ρυθμός της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της



Σχήμα 1.3 : Διαδρομές ροής Α.Π.Ε. [E3, Fig. 1.10 page 14]

γης είναι κατά προσέγγιση 8000 φορές μεγαλύτερος από το μέσο όρο της παγκόσμιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας. Για τον τρέχοντα παγκόσμιο πληθυσμό αυτό ισοδυναμεί με την εκπληκτική μέση ισχύ των 20 MW ανά άτομο.

Αυτή η ροή ενέργειας μπορεί να προσεγγιστεί άμεσα με τη χρήση ηλιακής, θερμικής ή φωτοβολταϊκής τεχνολογίας ή έμμεσα με τη μορφή του ανέμου, των κυμάτων του νερού και των βιοκαυσίμων. Ακόμα δύο πηγές ενέργειας θεωρούνται συχνά σαν ανανεώσιμες από την άποψη της αιφορίας της φύσης τους : η ενέργεια στις παλίρροιες που προκαλείται από τα βαρυτικά πεδία του ήλιου και της σελήνης, η οποία μπορεί να

αξιοποιηθεί με τη χρήση παλιρροϊκών φραγμάτων ή με τη χρήση της τεχνολογίας των παλιρροϊκών ρευμάτων και η ενέργεια της γεωθερμίας από τον πυρήνα της γης, η οποία είναι προσβάσιμη σε ορισμένες τοποθεσίες μέσα από θερμές πηγές, θερμοπίδακες γκέιζερ και γεωτρήσεις.

Οι περισσότερες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας μετατρέπονται εύκολα σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια και η βιομάζα χρησιμοποιούνται και για την παροχή θερμότητας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατ' αρχή μπορούν να παρέχουν όλες τις διαθέσιμες υπηρεσίες ενέργειας από τις συμβατικές πηγές ενέργειας όπως: ψύξη, θέρμανση, ηλεκτρική ενέργεια και με κάποιες δυσκολίες και επιπρόσθετο κόστος καύσιμα που χρησιμοποιούνται στις μεταφορές. Έχουν το επιπρόσθετο πλεονέκτημα να είναι φυσικοί πόροι που έχουν κατανεμηθεί και μπορούν να παρέχουν ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς τη χρήση εκτενών δικτύων μεταφοράς ενέργειας. Δεν είναι πάντα απαραίτητο να μετατραπεί η ανανεώσιμη ενέργεια σε ηλεκτρική. Η θέρμανση του νερού από την ηλιακή ενέργεια και η άντληση του νερού με τη χρήση αιολικής ενέργειας αποτελούν παραδείγματα συστημάτων που λειτουργούν πολύ καλά χωρίς τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο η κύρια συνεισφορά των Α.Π.Ε. πρόκειται να είναι η κάλυψη των ολοένα αυξανόμενων αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια.

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί ο καλύτερος τρόπος εκμετάλλευσης των Α.Π.Ε. είναι η αξιοποίηση τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [Ε6]. Παρακάτω παρατίθενται οι τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνεται η μετατροπή αυτή.

- Η αιολική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη χρήση των ανεμογεννητριών. Αυτές απαρτίζονται από ένα ανεμοκινητήρα μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική. Έπειτα ανάμεσα σε αυτόν και τη γεννήτρια είτε μεταδίδεται απευθείας η περιστροφική κίνηση, είτε χρησιμοποιείται μειωτήρας στροφών. Η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια που δέχεται στον άξονα της σε ηλεκτρική. Η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος για την επίτευξη χαρακτηριστικών ποιότητας ισχύος σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Σ.Η.Ε στο οποίο πρόκειται να συνδεθεί είναι επιβεβλημένη. Όλη η διάταξη τοποθετείται στην κορυφή πύργου που διαθέτει κατάλληλο ύψος, προκειμένου να καταστεί δυνατή η καλύτερη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού της περιοχής τοποθέτησης της ανεμογεννήτριας.
- Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται με τη χρήση φωτοβολταϊκών γεννητριών (panel), τα οποία συνδέονται κατάλληλα μεταξύ τους για να επιτευχθεί η παραγωγή υψηλότερης τάσεως και ισχύος (Φ/Β πάρκο). Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε αυτήν την περίπτωση με την παρεμβολή κατάλληλων μετατροπέων (Ηλεκτρονικά ισχύος) είτε αποθηκεύεται σε συστοιχίες συσσωρευτών, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί όποτε απαιτηθεί, είτε τροφοδοτεί κατευθείαν το δίκτυο με το οποίο συνδέεται μέσω υποσταθμού.
- Με τη χρήση Μικρών Υδροηλεκτρικών Μονάδων καθίσταται δυνατή η εκμετάλλευση υδάτινων ρευμάτων, για τα οποία δεν απαιτείται η κατασκευή μεγάλων έργων απόθκευσης (π.χ. φράγματα).

- Έχει καταστεί δυνατή η μετατροπή της κινητικής ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων και των παλίρροιας σε ηλεκτρική μέσω κατάλληλων διατάξεων.
- Η θερμότητα των εσωτερικών στρωμάτων της γης ονομάζεται γεωθερμική ενέργεια και μπορεί να καταστεί εκμεταλλεύσιμη μέσω της μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια, εφόσον συντρέχουν οι κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες.
- Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη βιομάζα συνίσταται στη χρήση καυσίμων, τα οποία έχουν προκύψει μέσα από κατάλληλες επεξεργασίες των γεωργικών και δασικών υπολειμμάτων.

Ανεξάρτητα από τη μέθοδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. επιβάλλεται η ενσωμάτωση τους με τα Σ.Η.Ε. προκειμένου αυτή να καταστεί πλήρως εκμεταλλεύσιμη. Συγκεκριμένα η ενσωμάτωση σημαίνει τη σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο με τη δέουσα προσοχή έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία του συστήματος και ο έλεγχος της γεννήτριας, προκειμένου οι ενεργειακοί πόροι να αξιοποιούνται βέλτιστα. Η κατάλληλη ενσωμάτωση οποιασδήποτε ηλεκτρικής γεννήτριας σε ένα Σ.Η.Ε. απαιτεί τη γνώση των καθιερωμένων αρχών της επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού. Η διασύνδεση των γεννητριών που τροφοδοτούνται από Α.Π.Ε. είναι βασικά παρεμφερής με εκείνη των γεννητριών που τροφοδοτούνται από ορυκτά καύσιμα και βασίζεται στις ίδιες αρχές, με τη διαφορά ότι, οι Α.Π.Ε. συχνά είναι μεταβλητές και γεωγραφικά διασκορπισμένες.

Μια γεννήτρια που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές μπορεί να περιγραφεί είτε ως αυτόνομη, είτε ως διασυνδεδεμένη στο δίκτυο. Σε ένα απομονωμένο σύστημα μια γεννήτρια που παράγει ενέργεια από Α.Π.Ε. (είτε διαθέτει, είτε δεν διαθέτει άλλη εφεδρική γεννήτρια) καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης φορτίων. Σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα, η γεννήτρια που η λειτουργία της βασίζεται στις ανανεώσιμες πηγές, τροφοδοτεί με ισχύ ένα μεγάλο Σ.Η.Ε., το οποίο επίσης τροφοδοτείται από πολλές άλλες γεννήτριες. Εδώ η κρίσιμη διάκριση συνίσταται στο γεγονός ότι η ισχύς που εγχέεται από τις γεννήτριες των Α.Π.Ε. αποτελεί μόνο ένα μικρό κλάσμα της παραγόμενης ισχύος από το σύνολο των διασυνδεδεμένων γεννητριών του δικτύου. Η διάκριση ανάμεσα στις γεννήτριες που λειτουργούν αυτόνομα και σε εκείνες που έχουν διασυνδεθεί είναι χρήσιμη, αλλά δεν είναι πάντα ξεκάθαρη [Ξ3]. Μερικές φορές προκαλείται σύγχυση, όταν η λέξη δίκτυο χρησιμοποιείται για να αναφερθεί σε ένα σχετικά μικρό αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτό δεν είναι απαραίτητα λάθος, αλλά θα πρέπει να είναι σαφές ως προς την έκταση του δικτύου που αναφέρεται. Το σημείο του δικτύου στο οποίο συνδέεται μια γεννήτρια από την οποία παράγεται ηλεκτρική ενέργεια από Α.Π.Ε. αναφέρεται ως σημείο κοινής ζεύξης.

Οι γεννήτριες στις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από Α.Π.Ε. έχουν συνήθως μικρότερη ονομαστική ισχύ συγκρινόμενες με εκείνες των οποίων η λειτουργία βασίζεται στη χρήση ορυκτών ή πυρηνικών καυσίμων ή μεγάλων υδροηλεκτρικών μεταμιευτήρα. Οι ηλεκτρογεννήτριες μικρής ισχύος δεν συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς εξαιτίας του επιπρόσθετου κόστους των μετασχηματιστών υψηλής τάσης και του κατάλληλου διακοπτικού υλικού που απαιτούνται. Επιπρόσθετα, οι γραμμές μεταφο-

ράς ηλεκτρικής ενέργειας συχνά, βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση, καθώς η γεωγραφική θέση της γεννήτριας περιορίζεται από τη γεωγραφική διαθεσιμότητα της ανανεώσιμης πηγής. Επομένως, οι μικρές γεννήτριες πρέπει να συνδέονται στο δίκτυο διανομής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυτής της μορφής ονομάζεται διανεμημένη ή διεσπαρμένη παραγωγή. Είναι γνωστή επίσης ως ενσωματωμένη παραγωγή, επειδή έχει ενσωματωθεί στο δίκτυο διανομής. Σε ένα Σ.Η.Ε. με διανεμημένη παραγωγή, η ηλεκτρική ισχύς μπορεί να μεταφέρεται ανάμεσα σε δύο σημεία του δικτύου μέσω του συστήματος διανομής. Αυτό το ασυνήθιστο πρότυπο ροής έχει ορισμένες σοβαρές επιπτώσεις στην αποτελεσματική λειτουργία και προστασία του δικτύου διανομής.

1.3. Τι είναι η υδροηλεκτρική μονάδα;

Το εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του οποίου η λειτουργία βασίζεται στην εκμετάλλευση υδάτινων ρευμάτων ονομάζεται υδροηλεκτρική μονάδα. Η αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας του νερού επιτυγχάνεται με τη χρήση υδροστρόβιλων. Αρχικά πραγματοποιείται η μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική από τον υδροστρόβιλο και στη συνέχεια αυτή αποδίδεται στον άξονα της γεννήτριας με την οποία έχει συζευχθεί. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη γεννήτρια χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία καταναλωτών που βρίσκονται σε μικρή ή μεγάλη απόσταση από τη μονάδα. Με τον τρόπο αυτό έχει αποδεσμευθεί το σημείο παραγωγής της μηχανικής ενέργειας από τη γεωγραφική περιοχή που καταναλώνεται η ενέργεια που έχει παραχθεί [E7]. Αυτό είχε ως συνέπεια να επιτευχθεί η αύξηση της ισχύος των υδροηλεκτρικών εργοστασίων.

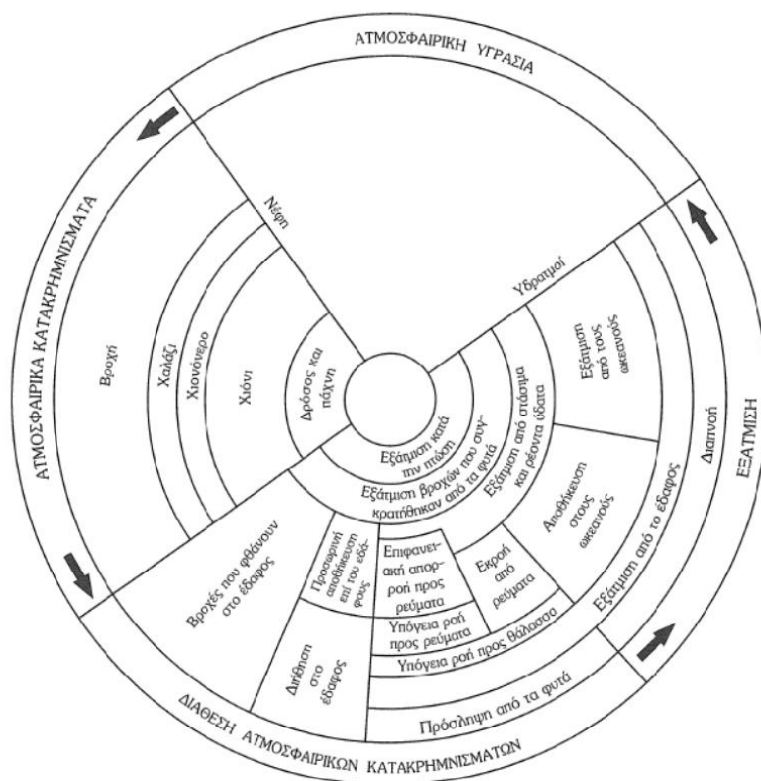
1.3.1. Το νερό : ένα ελεύθερο καύσιμο σχεδόν άνευ τέλους

Κατά τη διεξαγωγή του τρίτου παγκόσμιου συνεδρίου των Ηνωμένων Εθνών που πραγματοποιήθηκε το έτος 1997 στο Κιότο της Ιαπωνίας έχει αναγνωριστεί η ανάγκη της επείγουσας αντιμετώπισης του ζητήματος της κλιματικής αλλαγής. Γι' αυτό το λόγο έχουν υιοθετηθεί μια σειρά μέτρων στα οποία περιλαμβάνεται η μείωση των αερίων του θερμοκηπίου από τις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες σε ποσοστό από πέντε έως οκτώ τοις εκατό [E4]. Επιπρόσθετα, έχει προσδιοριστεί μια σειρά ενεργειών που αποσκοπεί στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Για να επιτευχθεί αυτή η προσπάθεια, ένα πολύ σημαντικό βήμα αποτελεί η παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε. Το νερό αποτέλεσε και αποτελεί τη βασική ανανεώσιμη πηγή που χρησιμοποιείται για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Η υδραυλική ενέργεια παρέχεται χωρίς κόστος από τη φύση, αλλά για να είναι δυνατή η εκμετάλλευση της απαιτείται η επένδυση σημαντικών κεφαλαίων [E8]. Ένας υδροηλεκτρικός σταθμός διαθέτει τρία βασικά πλεονεκτήματα: έχει μηδενικό κόστος καυσίμου, απαιτεί λιγότερο προσωπικό για τη λειτουργία του και έχει μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης από ένα θερμοηλεκτρικό σταθμό που διαθέτει την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Έχει όμως και το μειονέκτημα της στοχαστικής συμπεριφοράς παροχής νερού, το οποίο περιορίζεται σε περίπτωση ύπαρξης ταμιευτήρα.

1.3.2. Βασική αρχή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πτώση ύδατος

Ο όρος υδροηλεκτρική ενέργεια αναφέρεται στην παραγωγή μηχανικής ή ηλεκτρικής ισχύος που προκύπτει από τη χρήση του νερού. Η παραγόμενη ισχύς ενός υδροηλεκτρικού σταθμού, τις περισσότερες φορές, εξαρτάται από την ογκομετρική ροή του νερού που κινεί το στρόβιλο ή τους στρόβιλους του και από το ύψος της υδατόπτωσης [Ε5]. Όσο μεγαλύτερη είναι η ροή του νερού, τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς που παράγεται. Αντίστοιχα, όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος της υδατόπτωσης, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ισχύς που θα παραχθεί.



Σχήμα 1.4 : Ποιοτική παρουσίαση Υδρολογικού κύκλου [Ε5, σχήμα 3.1 σελ 236]

Για να πραγματοποιηθεί η εκμετάλλευση του νερού, αυτό πρέπει να βρίσκεται κάθε φορά στην κατάλληλη θέση, και να επιστρέφει σε αυτήν περιοδικά έτσι ώστε να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Η φύση διαθέτει μια περίπλοκη διεργασία ανακύκλωσης του νερού, η οποία ονομάζεται υδρολογικός κύκλος. Ο υδρολογικός κύκλος προκύπτει ως αποτέλεσμα της απορρόφησης της ηλιακής ενέργειας από την ατμόσφαιρα, και από αυτόν επιτυγχάνεται η μετακίνηση του νερού ανάμεσα σε αυτήν και την επιφάνεια της γης. Μια ποιοτική παρουσίαση του Υδρολογικού Κύκλου εμφανίζεται στο σχήμα 1.4, [Ε5, σχήμα 3.1 σελ. 236], από την οποία προκύπτει ότι μπορεί να χωρισθεί σε τρεις φάσεις: 1) Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, στα οποία περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων η βροχή, το χιόνι και το χαλάζι, 2) Εξάτμιση και 3) Διάφορες επιφανειακές απορροές του νερού και υπόγεια ύδατα.

Σύμφωνα με τον υδρολογικό κύκλο κατά την επιστροφή του νερού στην επιφάνεια της γης πραγματοποιείται η απορροή του από μεγαλύτερα υψόμετρα σε χαμηλότερα. Κατά τη διαδικασία αυτή χάνεται μέρος της δυναμικής ενέργειας που διαθέτει, η οποία αποδίδεται στην είσοδο των υδροστροβίλων με τη βοήθεια των οποίων μετατρέπεται σε αρχικά σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια σε ηλεκτρική από γεννήτριες που έχουν συζευχθεί με τους στροβίλους [E9].

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το νερό πραγματοποιείται με τη χρησιμοποίηση των αποθηκευμένων αποθεμάτων του που βρίσκονται στις φυσικές ή τεχνητές λεκάνες απορροής του, ή από την εκμετάλλευση της φυσικής ροής ενός ποταμού [E10]. Οι τεχνητές λεκάνες απορροής ονομάζονται ταμιευτήρες και η δημιουργία τους βασίζεται σε φράγματα που κατασκευάζονται στη ροή των ποταμών.

1.3.3. Γενική περιγραφή υδροηλεκτρικού έργου

Η μελέτη και η κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Υ.Η.Σ.) είναι σύνθετη και περίπλοκη, ενώ απαρτίζεται τόσο από έργα πολιτικού μηχανικού (έργα υποδομών), όσο και από αξιολογικά ηλεκτρομηχανολογικά έργα [E9]. Προκειμένου να διασφαλιστεί η λειτουργία του Υ.Η.Σ., η αναγκαία ποσότητα νερού πρέπει να συγκεντρωθεί και στη συνέχεια να διοχετευθεί στους υδροστροβίλους. Για τους λόγους αυτούς κατασκευάζονται τα έργα υποδομής. Ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός αποτελείται από τους υδροστροβίλους, τις γεννήτριες και τις διατάξεις ελέγχου και προστασίας τους. Το μεγαλύτερο τμήμα αυτών των διατάξεων εμπεριέχονται στους χώρους που στεγάζεται ο σταθμός.

Για να επιλεχθεί η καλύτερη λύση τόσο από κατασκευαστικής, όσο και από λειτουργικής άποψης εξετάζονται τρία σημαντικά κριτήρια: 1) Το συνολικό κόστος κατασκευής του έργου, 2) Η επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου και 3) Η μορφολογία του εδάφους.

Στα έργα του πολιτικού μηχανικού περιλαμβάνονται: 1) Το φράγμα, 2) Ο ταμιευτήρας, 3) Η σήραγγα εκτροπής, 4) Η υδροληψία, 5) Η διάταξη προσαγωγής και απαγωγής των υδάτων και 6) ο ΥΗΣ.

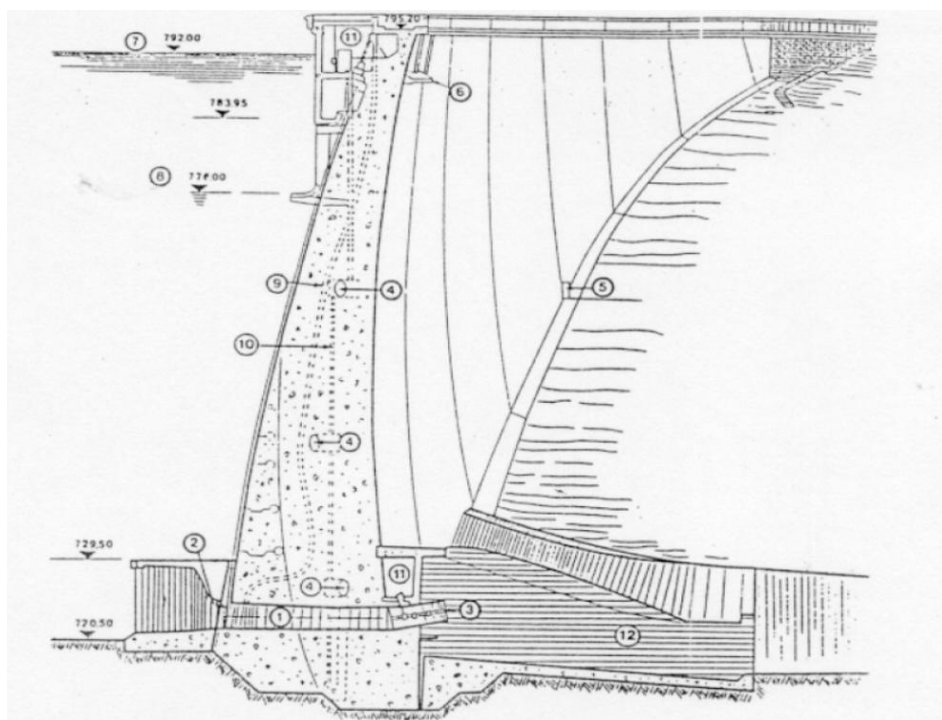
Το φράγμα κατασκευάζεται στην κοίτη του ποταμού για να δημιουργηθεί ο αναγκαίος χώρος αποθήκευσης για τον ταμιευτήρα και να διασφαλισθεί το αναγκαίο ύψος για την υδατόπτωση. Επιπρόσθετα, με τη δημιουργία του επιτυγχάνεται η τροφοδοσία του αγωγού προσαγωγής. Η αύξηση του ύψους του φράγματος προκαλεί την αύξηση της χωρητικότητας του ταμιευτήρα με την ταυτόχρονη αύξηση του ύψους πτώσης. Η δημιουργία ταμιευτήρα μεγαλύτερης χωρητικότητας προκαλεί την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από τον Υ.Η.Σ., αλλά και της εγκατεστημένης ισχύος του, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό η απεξάρτηση της ηλεκτροπαραγωγής από τις διακυμάνσεις της φυσικής ροής του ποταμού.

Όταν το φυσικό ύψος πτώσης είναι αρκετά μεγάλο, τότε η αύξηση του ύψους του φράγματος στοχεύει αποκλειστικά στην αύξηση του χώρου αποθήκευσης του νερού. Ακόμη έχει υπολογιστεί ότι, εάν το ύψος πτώσης διαμορφώνεται από το ύψος του

φράγματος, τότε αυτό συνεπάγεται αύξηση του κόστους κατασκευής του. Στην περίπτωση αυτή η δαπάνη κατασκευής του φράγματος κατά προσέγγιση ισοδυναμεί με το μισό της δαπάνης που απαιτείται για την κατασκευή ολόκληρου του έργου [E10].

Για να διασφαλιστεί η εύρυθμη λειτουργία του φράγματος είναι επιβεβλημένη ύπαρξη επιπρόσθετων κύριων έργων. Τα κυριότερα από αυτά παρατίθενται παρακάτω:

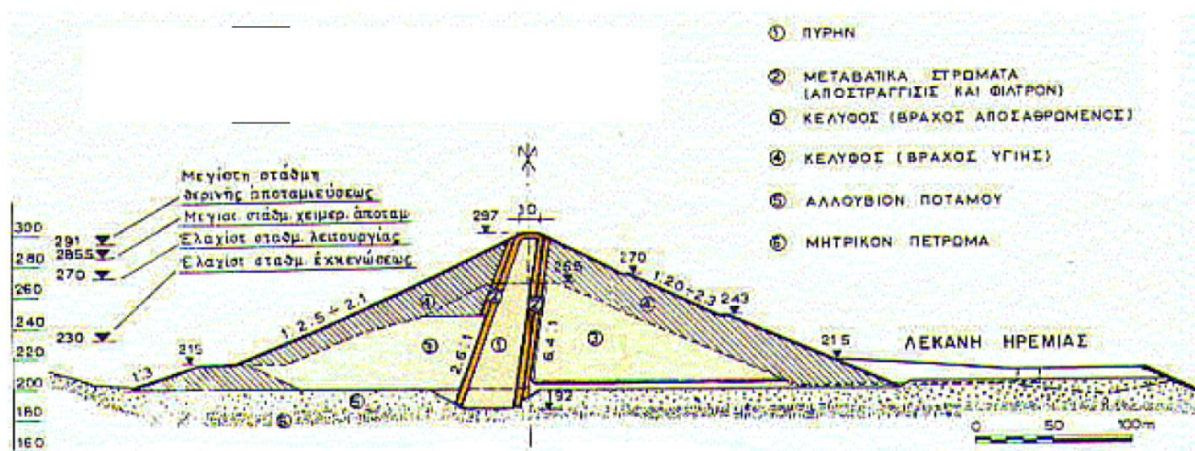
- Ο υπερχειλιστής, ο οποίος αποσκοπεί στη διοχέτευση της επιπρόσθετης παροχής σε περίπτωση πλημμύρας έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι η στάθμη του φράγματος δεν θα υπερβεί τη στέψη του
- Η σήραγγα εκτροπής μέσω της οποίας διοχετεύεται η φυσική παροχή του ποταμού κατά τη διάρκεια κατασκευής της τελευταίας φάσης του έργου.
- Ο εκκενωτής πυθμένα διαμέσου του οποίου πραγματοποιείται η εκκένωση του ταμιευτήρα, εφόσον απαιτείται η συντήρηση του ή το επιβάλλει έκτακτη ανάγκη.
- Η υδροληψία, η οποία αποτελεί το στόμιο εισόδου του αγωγού ή της σήραγγας προσαγωγής.



Σχήμα 1.5: Τομή τοξωτού φράγματος σκυροδέματος υδροηλεκτρικής εγκατάστασης λίμνης Πλαστήρα [E10, σχήμα 3.5.1.α.1-1, σελ. 94]

Ο τύπος του φράγματος καθορίζεται σε ένα βαθμό και από τη θέση του. Τα φράγματα κατατάσσονται σε δύο βασικούς τύπους: 1) Φράγματα βαρύτητας (χωμάτινα ή από σκυρόδεμα), 2) Τοξωτά φράγματα (με υλικό κατασκευής οπλισμένο σκυρόδεμα). Η τομή του τοξωτού φράγματος σκυροδέματος της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης λίμνης Πλαστήρα εμφανίζεται στο σχήμα 1.5 [E10, σχήμα 3.5.1.α.1-1, σελ. 94]. Ακόμη τα

χωμάτινα φράγματα υπάγονται στην ευρύτερη κατηγορία των γαιώδων φραγμάτων. Στην ίδια κατηγορία ανήκουν τα φράγματα λιθοριπής και τα μικτά φράγματα. Μια χαρακτηριστική τομή χωμάτινου φράγματος παρουσιάζεται στο σχήμα 1.6 [E10, σχήμα 3.5.1.α.2-1, σελ. 95].



Σχήμα 1.6: Τομή χωμάτινου φράγματος [E10, σχήμα 3.5.1.α.2-1, σελ. 95]

Ο κύριος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός των Υ.Η.Σ. απαρτίζεται από: α) Υδροστρόβιλους, β) Γεννήτριες, γ) Μετασχηματιστές, δ) Πίνακες παραλληλισμού γεννητριών με το δίκτυο, ε) Διατάξεις προστασίας και ελέγχου της λειτουργίας των υδροστρόβιλων, γεννητριών και μετασχηματιστών όπως οι ρυθμιστές ταχύτητας (governer) και οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης (A.V.R.), ενώ στο βοηθητικό εξοπλισμό κα τά κύριο λόγο υπάγονται: 1) Οι γερανογέφυρες, 2) Τα συστήματα κυκλοφορίας ελαίου και πα-ραγωγής πεπιεσμένου αέρα και άλλες διατάξεις.

1.3.4. Ροή ενέργειας

Ο όρος υδροισχύς αναφέρεται στην παραγωγή ισχύος, μηχανικής ή ηλεκτρικής με τη χρήση της ενέργειας των υδατοπτώσεων. Η διαθέσιμη ισχύς ενός υδροηλεκτρικού εργοστασίου εξαρτάται από την ογκομετρική ροή του νερού που κινεί το στρόβιλο και το κάθετο ύψος της υδατόπτωσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η παροχή του νερού, τόσο υψηλότερη θα είναι η παραγωγή ενέργειας. Παρόμοια, όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος της υδατόπτωσης, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η παραγωγή ενέργειας. Η μαθηματική σχέση ανάμεσα στο ύψος της υδατόπτωσης, στην ογκομετρική ροή του νερού και την παραγόμενη ισχύ αναφέρεται ως εξίσωση της ισχύος της οποίας θα συζητηθεί παρακάτω.

Η ογκομετρική ροή του νερού, διαθέτει μονάδες μέτρησης σε m^3/s στο διεθνές σύστημα (S.I.), ενώ το κάθετο ύψος της υδατόπτωσης μετριέται σε μέτρα m. Η δυναμική ενέργεια ενός σώματος που διαθέτει μάζα M , το οποίο πέφτει από ένα ύψος h εκφράζεται από τη σχέση (1.1) που παρατίθεται παρακάτω:

$$E = M \cdot g \cdot h \quad (1.1)$$

όπου g είναι η επιτάχυνση που οφείλεται στη βαρύτητα. Στο επίπεδο της θάλασσας, η τιμή της είναι $9,81 \text{ m/s}^2$. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρά το γεγονός ότι η τιμή της μειώνεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, επειδή η διακύμανση της είναι σχετικά μικρή, για πρακτικούς λόγους, συνήθως χρησιμοποιείται η τιμή $9,81 \text{ m/s}^2$ ανεξάρτητα από το ύψος που βρίσκεται το εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής. Επίσης είναι γνωστό από τη φυσική ότι η βασική μονάδα μέτρησης της ενέργειας είναι το Joule, ενώ η μάζα του νερού υπολογίζεται από το γινόμενο της πυκνότητας του ρ και του όγκου του V $M = \rho \cdot V$. Έτσι η ενέργεια μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση (1.2):

$$E = \rho \cdot V \cdot g \cdot h \quad (1.2)$$

Στη συνέχεια τα δύο μέλη της εξίσωσης διαιρούνται με το χρόνο t , οπότε προκύπτει η εξίσωση (1.3):

$$\frac{E}{t} = \rho \cdot \frac{V}{t} \cdot g \cdot h \quad (1.3)$$

Σημειώνεται ότι, ο λόγος E/t είναι η ισχύς P , η οποία μετριέται σε W , ενώ η χρονική μεταβολή του όγκου V/t αποτελεί την ογκομετρική ροή του νερού Q , η οποία αναφέρεται απλά ως ροή και μετριέται σε m^3/s . Τα παραπάνω μεγέθη αντικαθίστανται στην εξίσωση (1.3), οπότε η εξίσωση της ισχύος λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h \quad (1.4)$$

Σημειώνεται ότι το γινόμενο $\gamma = \rho \cdot g$ είναι το ειδικό βάρος του νερού, το οποίο ισούται με $9,81 \text{ kN/m}^3$. Σύμφωνα με τις αρχές της θερμοδυναμικής, όταν η ενέργεια μετατρέπεται από μία μορφή σε μία άλλη, θα υπάρξουν κάποιες απώλειες που βασίζονται στο βαθμό απόδοσης της διεργασίας μετατροπής ή του εξοπλισμού. Η υδροηλεκτρική ενέργεια παράγεται όταν η δυναμική ενέργεια της υδατόπτωσης αρχικά μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια, καθώς περιστρέφει το στρόβιλο. Ο άξονας του στρόβιλου με τη σειρά του κινεί τον άξονα της γεννήτριας, η περιστροφή της οποίας μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Όπως έχει αναφερθεί, ο υδροστρόβιλος είναι η κινητήρια μηχανή που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της ενέργειας του νερού σε μηχανική ενέργεια. Κατά τη διέλευση του νερού μέσα από τον αγωγό προσαγωγής και το στρόβιλο δημιουργούνται απώλειες τριβής, ενώ στη γεννήτρια υφίστανται ηλεκτρικές απώλειες. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής εξαρτάται από το βαθμό απόδοσης του αγωγού προσαγωγής, του στρόβιλου, της γεννήτριας και του μετασχηματιστή. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1.4) το ειδικό βάρος του νερού γ και λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης η εξίσωση της ισχύος λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

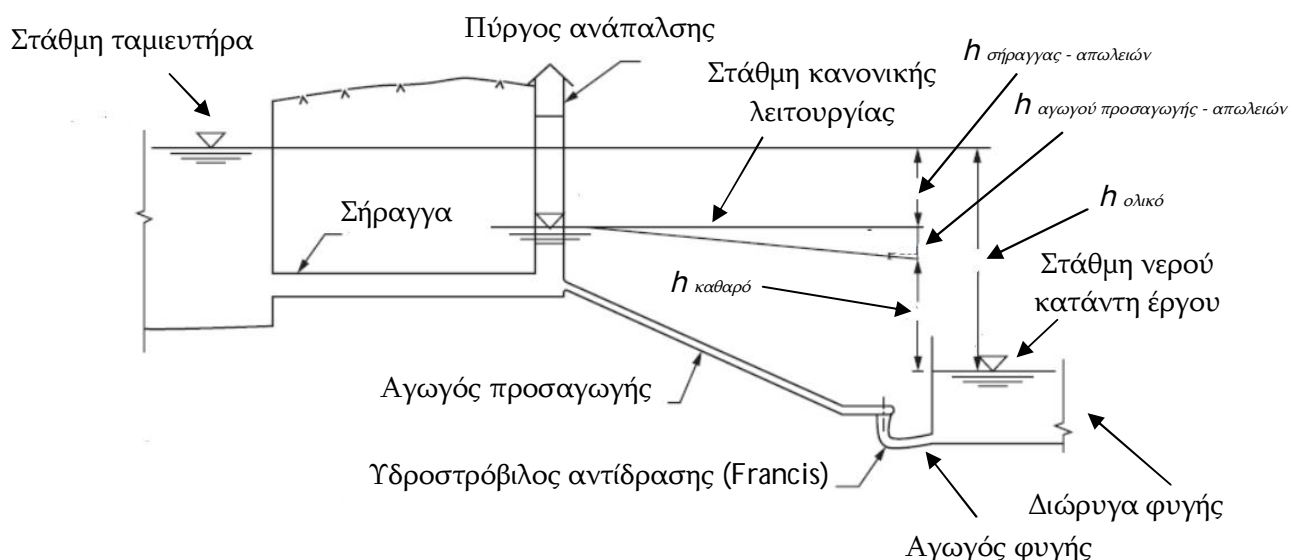
$$P = \gamma \cdot Q \cdot h \cdot \eta_o \quad (1.5)$$

Όπου η_o είναι ο συνολικός βαθμός απόδοσης (αγωγού προσαγωγής, στρόβιλου, γεννήτριας και μετασχηματιστή) και είναι μέγεθος αδιάστατο. Υπενθυμίζεται ότι επειδή η μονάδα μέτρησης της παραμέτρου γ είναι kN/m^3 , η ισχύς που υπολογίζεται από τη σχέση (1.5) μετριέται σε kW . Συχνά η εξίσωση ισχύος εκφράζεται και από τη σχέση (1.6).

$$P = Q \cdot g \cdot h \cdot \eta_o \quad (1.6)$$

Παρά το γεγονός ότι οι μονάδες μέτρησης των δύο μεταβλητών g και γ είναι διαφορετικές, επειδή η απόλυτη τιμή τους είναι η ίδια, αγνοώντας τη διακύμανση που οφείλεται στην υψομετρική διαφορά, η τιμή της ισχύος εξόδου παραμένει η ίδια και μετρείται σε kW. Συχνά στην υδροηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιούνται επίσης οι όροι ολικό και καθαρό ή ωφέλιμο ύψος υδατόπτωσης. Για στροβίλους δράσεως όπως οι Pelton ή οι Turgo, εφόσον τοποθετούνται σε ένα σταθμό φυσικής ροής ποταμού, το ολικό ύψος της υδατόπτωσης ($h_{ολικό}$) είναι η υψομετρική διαφορά από τη δεξαμενή προσαγωγής νερού έως το κέντρο του στροβίλου, ενώ στην περίπτωση που τοποθετούνται σε ένα έργο αποθήκευσης νερού (με ταμιευτήρα), η υψομετρική διαφορά θα υπολογιστεί από το επίπεδο της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα, πίσω από το φράγμα έως το κέντρο του στροβίλου. Για στροβίλους αντιδράσεως όπως οι Francis ή οι έλικες, στους οποίους εγκαθίστανται συχνά αγωγοί φυγής, χρησιμοποιείται το κατάντη επίπεδο ύδατος στην έξοδο του (το οποίο αναφέρεται επίσης ως επίπεδο ύδατος διώρυγας φυγής) αντί το κέντρο του στροβίλου.

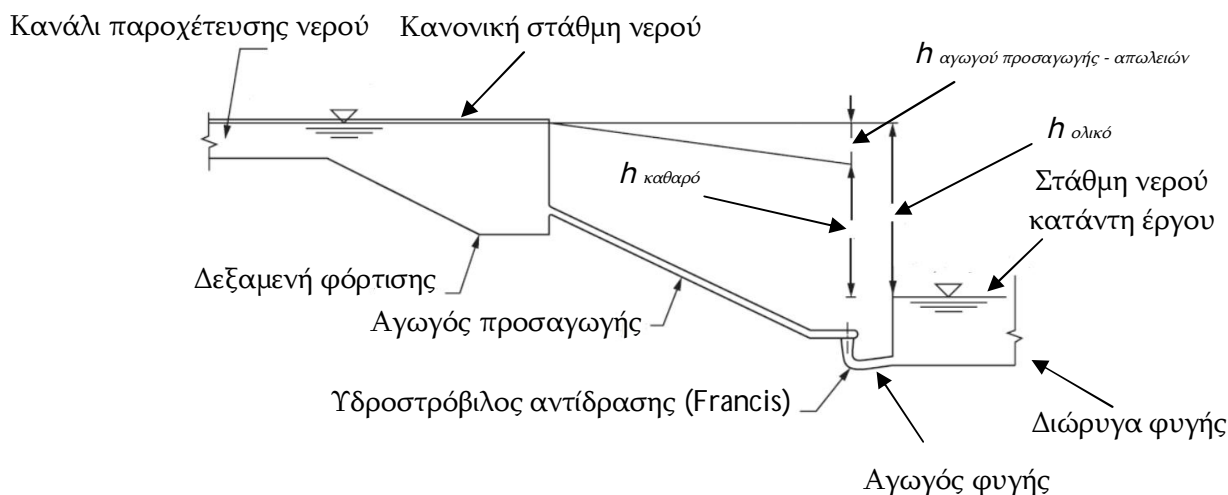
Το καθαρό ή ωφέλιμο ύψος της υδατόπτωσης $h_{καθαρό}$ είναι η πίεση κεφαλής (pressure head) στην είσοδο του δρομέα του στροβίλου. Κατά την κίνηση του νερού μέσα στον αγωγό προσαγωγής (ή μέσα από μία σήραγγα, στην περίπτωση ορισμένων Υ.Η.Σ. μεγάλης ισχύος) θα υπάρξουν ορισμένες απώλειες (πτώση πίεσης ή απώλεια υψομετρικής διαφοράς). Αυτές κατά κύριο λόγο οφείλονται στην τριβή που αναπτύσσεται ανάμεσα στο τρεχούμενο νερό και τα τοιχώματα του σωλήνα ή της σήραγγας, καθώς και στις κλίσεις που λαμβάνουν οι σήραγγες και οι αγωγοί προσαγωγής, προκειμένου να επιτευχθεί η ευθυγράμμισή τους με το στρόβιλο. Το ολικό και το καθαρό ύψος της υδατόπτωσης για ένα μεγάλο φράγμα υδροηλεκτρικού έργου με σήραγγα τροφοδοσίας εμφανίζεται στο σχήμα 1.7, ενώ τα αντίστοιχα μεγέθη για μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς, οι οποίοι εξοπλίζονται με υδροστρόβιλους αντίδρασης εμφανίζονται στα σχήματα 1.8 και 1.9 αντίστοιχα.



Σχήμα 1.7: Μικτό ύψος πτώσης υδροηλεκτρικού σταθμού με ταμιευτήρα και υδροστρόβιλο αντίδρασης τύπου Francis [Ξ5, Fig. 2.1 page 16]

Σύμφωνα με το σχήμα 1.7 παρατηρείτε ότι η στάθμη κανονικής λειτουργίας στον πύργο ανάπαλσης (surge shaft) θα είναι χαμηλότερη από εκείνη του ταμιευτήρα του φράγματος λόγω των υδραυλικών απωλειών στη σήραγγα. Αυτό αναφέρεται ως η υψομετρική απώλεια στη σήραγγα ($h_{\text{σήραγγας - απωλειών}}$). Καθώς η ροή του νερού μεταφέρεται προς τα κάτω στο στρόβιλο, μέσω του αγωγού προσαγωγής, υφίσταται περαιτέρω υδραυλικές απώλειες. Σε αυτήν την περίπτωση το ολικό ύψος της υδατόπτωσης προκύπτει από τη σχέση (1.7):

$$h_{\text{ολικό}} = h_{\text{σήραγγας}} + h_{\text{αγωγού προσαγωγής}} + h_{\text{καθαρό}} \quad (1.7)$$



Σχήμα 1.8: Μικτό ύψος πτώσης υδροηλεκτρικού σταθμού φυσικής ροής ποταμού με στρόβιλο αντιδράσεως τύπου Francis [Ξ5, Fig. 2.2 page 17]

Επειδή οι σήραγγες σπανίως χρησιμοποιούνται σε Μικρά Υδροηλεκτρικά Εργοστάσια (Μ.Υ.Ε.), στην αρχή του αγωγού προσαγωγής κατασκευάζεται μια δεξαμενή φόρτισης στη θέση του πύργου ανάπαλσης. Αν ένας στρόβιλος αντιδράσεως εγκατασταθεί στον Υ.Η.Σ., τότε το ολικό ύψος της υδατόπτωσης θα προκύψει από την υψομετρική διαφορά ανάμεσα στην κανονική στάθμη του νερού της δεξαμενής φόρτισης και στη στάθμη του νερού στη διώρυγα φυγής στα κατάντη του στροβίλου. Το καθαρό ή ωφέλιμο ύψος της υδατόπτωσης των υδραυλικών απωλειών προκύπτει αν από το ολικό ύψος της αφαιρεθεί το τμήμα εκείνο που αντιστοιχεί στις υδραυλικές απώλειες του αγωγού προσαγωγής ($h_{\text{αγωγού προσαγωγής}}$).

Αν ένας στρόβιλος δράσεως εγκατασταθεί σε ένα Μ.Υ.Ε., τότε το ολικό ύψος της υδατόπτωσης θα προκύψει από την υψομετρική διαφορά ανάμεσα στην κανονική στάθμη του νερού της δεξαμενής φόρτισης και το κέντρο του δρομέα του στροβίλου (ο δρομέας αποτελεί τον περιστρεφόμενο τροχό του στροβίλου). Σε ένα στρόβιλο δράσεως, μόλις ο πίδακας νερού προσπέσει πάνω στο δρομέα του στροβίλου πλέον, δεν θα είναι σε θέση να του προσδώσει περισσότερη ενέργεια. Σε αυτήν την περίπτωση το ωφέλιμο ύψος της υδατόπτωσης προκύπτει αν από το ολικό ύψος της αφαιρεθεί το τμήμα εκείνο που αντιστοιχεί στις υδραυλικές απώλειες του αγωγού προσαγωγής ($h_{\text{αγωγού προσαγωγής - απωλειών}}$).

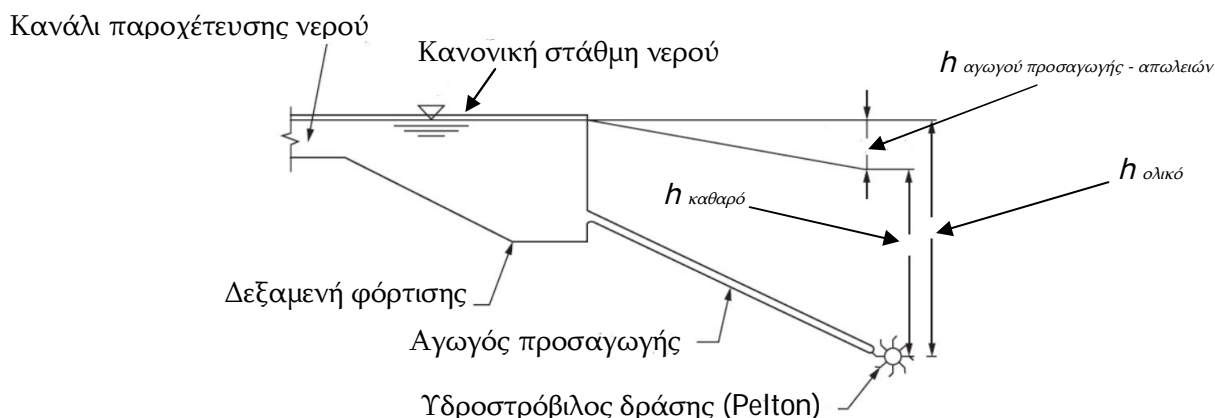
Με τη χρήση των μεταβλητών του ολικού ύψους υδατόπτωσης $h_{ολικό}$ και καθαρού ή ωφέλιμου ύψους υδατόπτωσης $h_{καθαρό}$ η εξίσωση της ισχύος μπορεί να λάβει τις ακόλουθες μορφές:

$$P = \gamma \cdot Q \cdot h_{ολικό} \cdot \eta_o \quad (1.8)$$

όπου η_o είναι ο συνολικός βαθμός απόδοσης στο οποίο συμπεριλαμβάνεται και ο βαθμός απόδοσης του αγωγού προσαγωγής.

$$P = \gamma \cdot Q \cdot h_{καθαρό} \cdot \eta_o \quad (1.9)$$

όπου η_o είναι ο συνολικός βαθμός απόδοσης στο οποίο δεν συμπεριλαμβάνεται ο βαθμός απόδοσης του αγωγού προσαγωγής. Η εφαρμογή της εξίσωσης (1.9) προτιμείται έναντι της εξίσωσης (1.8).



Σχήμα 1.9: Μικτό ύψος πτώσης υδροηλεκτρικού σταθμού φυσικής ροής ποταμού με στρόβιλο δράσεως τύπου Pelton [Ξ5, Fig. 2.3, page17]

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης προκύπτει από τους επιμέρους βαθμούς απόδοσης όλων των διατάξεων από τα οποία αποτελείται ο Υ.Η.Σ. και προκύπτει ανάλογα με την περίπτωση από τη χρήση της παρακάτω σχέσης (1.10):

$$\eta_o = \eta_{αγωγού \text{ προσαγωγής}} \cdot \eta_{υδροστροβιλου} \cdot \eta_{γεννήτριας} \cdot \eta_{μετασχηματιστή} \quad (1.10)$$

Σημειώνεται ότι ο βαθμός απόδοσης του αγωγού προσαγωγής μπορεί να παραληφθεί εφόσον για τον υπολογισμό της ισχύος χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (1.9).

Για Μ.Υ.Ε. ο βαθμός απόδοσης του αγωγού προσαγωγής κυμαίνεται από 90 % έως και 95 %. Για μεγαλύτερους Υ.Η.Σ. ο αγωγός προσαγωγής διαστασιολογείται έτσι ο βαθμός απόδοσης να είναι βέλτιστος, για δεδομένο μέγεθος του σταθμού παραγωγής μέσω οικονομοτεχνικής ανάλυσης.

Για Υ.Η.Ε. μέσης και μεγάλης ισχύος, ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 90 % ανάλογα με τον τύπο του εγκατεστημένου στροβίλου. Για Μ.Υ.Ε. εφόσον οι στρόβιλοι έχουν κατασκευαστεί από μικρές βιομηχανίες ο βαθμός απόδοσης μπορεί να είναι χαμηλότερος και να έχει τιμή λίγο μεγαλύτερη από 60 %, συνήθως όμως από 80 % έως 90 %.

Για Υ.Η.Ε. μέσης και μεγάλης ισχύος ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 95 %, ενώ για Μ.Υ.Ε. μπορεί να λαμβάνει ένα εύρος τιμών από 80 % έως 95 %.

Ανάλογα με το μέγεθος του μετασχηματιστή ο βαθμός απόδοσης του κυμαίνεται από 95 % έως 99 %.

Μερικές φορές σε απομονωμένα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής συνυπολογίζονται και οι απώλειες ισχύος πάνω στις γραμμές μεταφοράς. Στις περιπτώσεις που πρέπει να επιτευχθεί η διασύνδεση ενός Μ.Υ.Ε., οι γραμμές μεταφοράς που χρησιμοποιούνται σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο περιορισμός των απωλειών τους. Πάντως λαμβάνεται μέριμνα ώστε να μην υπερβαίνουν το 5 % της μεταφερόμενης ισχύος. Για την διασύνδεση μεγαλύτερων Υ.Η.Ε. η διαδικασία υπολογισμού των γραμμών μεταφοράς βασίζεται σε αναλυτικές μελέτες βελτιστοποίησης.

Στους υδροστρόβιλους η κινητική των υδατοροών και η δυναμική ενέργεια των υδατοπτώσεων μετατρέπονται σε περιστροφική μηχανική ενέργεια. Στο σχήμα 1.10 απεικονίζεται το παράδειγμα ενός απλοποιημένου υδροηλεκτρικού συστήματος. Σε αυτό, η δεξαμενή φόρτισης παρέχει νερό στον κεκλιμένο αγωγό προσαγωγής, ο οποίος το μεταφέρει σε ένα ακροφύσιο από το οποίο εξέρχεται με τη μορφή πίδακα. Η δυναμική ενέργεια της στήλης του νερού στον αγωγό προσαγωγής μετατρέπεται σε κινητική στο ακροφύσιο από το οποίο εξέρχεται υπό μορφή πίδακα υψηλής ταχύτητας. Αυτή η ενέργεια μεταφέρεται στο δρομέα του στροβίλου όταν ο πίδακας του νερού προσπίπτει στα σκαφίδια του και κατά τη διαδικασία αυτή χάνει την κινητική του ενέργεια.

Η εξίσωση του Bernoulli, η οποία βασίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας, δηλώνει ότι για ένα μη παχύρρευστο, ασυμπίεστο υγρό με σταθερή ροή, το άθροισμα της πίεσης, της κινητικής και της δυναμικής του ενέργειας ανά μονάδα όγκου είναι σταθερό σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος.

Η εξίσωση του Bernoulli αποτελεί ειδική μορφή της εξίσωσης του Euler, παράγεται κατά μήκος μιας ροής ρευστού και μπορεί να εκφραστεί από τρεις όρους όπως εμφανίζεται στην εξίσωση (1.11):

$$\text{Σταθερά} = \text{Ενέργεια της πίεσης} + \text{Κινητική Ενέργεια} + \text{Δυναμική Ενέργεια} \quad (1.11)$$

Με την προσθήκη των απωλειών τριβής $h_{\text{απωλειών}}$ στον αγωγό προσαγωγής, η εξίσωση του Bernoulli ανάμεσα στην επιφάνεια του αγωγού προσαγωγής, η οποία διαθέτει την ένδειξη "0", και την εισαγωγή του ακροφυσίου, η οποία διαθέτει την ένδειξη "1", λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{p_0}{\rho \cdot g} + \frac{v_0^2}{2 \cdot g} + z_0 = \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + h_{\text{απωλειών}} \quad (1.12)$$

όπου : p_0 η πίεση στην επιφάνεια της δεξαμενής φόρτισης = 0 στην ατμοσφαιρική πίεση

p_1 η υψομετρική πίεση στην είσοδο του ακροφυσίου

v_0 η ταχύτητα του νερού στη δεξαμενή φόρτισης = 0, διότι το νερό είναι σχεδόν ακίνητο

- v_1 η ταχύτητα του νερού στον αγωγό προσαγωγής ακριβώς πριν το ακροφύσιο
- z_0 το ύψος του νερού στην επιφάνεια της δεξαμενής φόρτισης
- z_1 το ύψος του κέντρου του ακροφύσιου
- $z_0 - z_1$ το ολικό διαθέσιμο ύψος, $H_{ολικό}$
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας
- $h_{απωλειών}$ οι υψομετρικές απώλειες λόγω τριβών στον αγωγό προσαγωγής
- $H_{καθαρό} = H_{ολικό} - h_{απωλειών}$ το καθαρό διαθέσιμο ύψος της υδατόπτωσης στο στρόβιλο μετά την αφαίρεση των απωλειών λόγω τριβής στον αγωγό προσαγωγής

μετά από αντικατάσταση των ανωτέρω παραμέτρων στην εξίσωση (1.12) αυτή λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

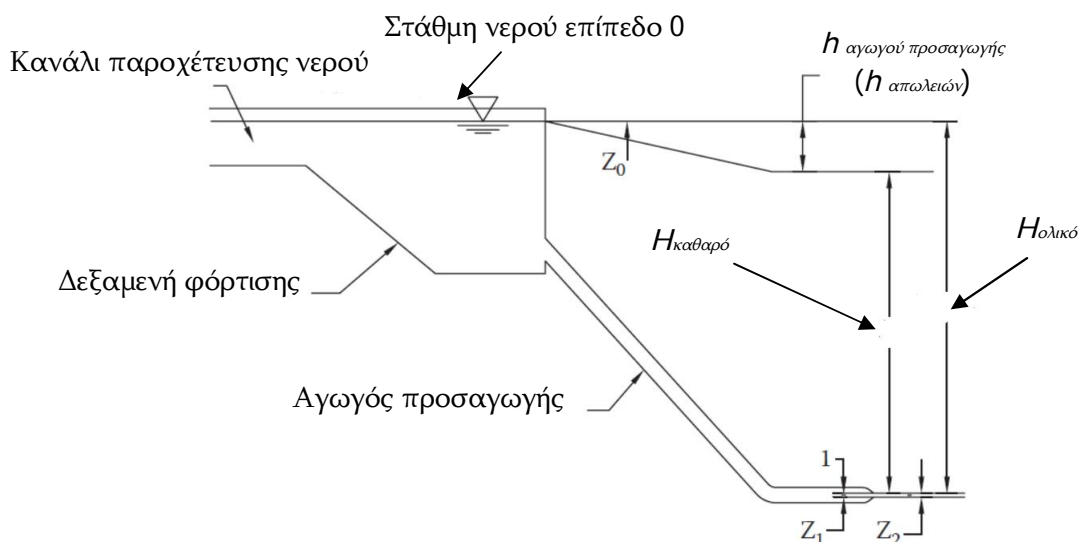
$$H_{καθαρό} = H_{ολικό} - h_{απωλειών} = \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad (1.13)$$

Μια παρόμοια εξίσωση με την (1.13), η οποία παρατίθεται στη συνέχεια, μπορεί να γραφεί με χρήση των μεταβλητών της εισαγωγής του ακροφύσιου και του πίδακα νερού που βγαίνει από αυτό ο οποίος φέρει την ένδειξη 2 στο σχήμα 1.10 :

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \quad (1.14)$$

Στην εξίσωση (1.14) όπου : $p_2 = 0$ διότι το σημείο 2 βρίσκεται υπό ατμοσφαιρική πίεση, v_2 είναι η ταχύτητα του πίδακα και $z_1 = z_2$. Μετά από αντικατάσταση προκύπτει η εξίσωση (1.15):

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (1.15)$$



Σχήμα 1.10: Στοιχειώδες υδροηλεκτρικό σύστημα [Ξ5, Fig. 9.1, page 210]

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των εφαρμογών της εξίσωσης Bernoulli προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση :

$$H_{καθαρ\acute{o}} = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (1.16)$$

Από την οποία προκύπτει ότι:

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{καθαρ\acute{o}}} \quad (1.17)$$

Το αποτέλεσμα της εφαρμογής της εξίσωσης του Bernoulli αποδεικνύει ότι, εφόσον οι απώλειες στο ακροφύσιο θεωρηθούν αμελητέες, όλη η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια κατά την έξοδο το νερού από το ακροφύσιο, εκτός από τις απώλειες στον αγωγό προσαγωγής. Γι' αυτή τη συγκεκριμένη διαμόρφωση, αυτή είναι η κινητική ενέργεια που μεταφέρεται στο δρομέα του στρόβιλου μέσω του υδάτινου πίδακα. Οι στρόβιλοι δράσεως όπως οι Pelton και οι Turgo, σχεδιάζονται έτσι ώστε να εξάγουν ενέργεια αποτελεσματικά από την ταχύτητα του υδάτινου πίδακα και να μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια.

Αν ένας στρόβιλος δράσεως μπορεί να επιτύχει βαθμό απόδοσης 100 % κατά τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του νερού σε μηχανική, τότε η μεταφερόμενη ενέργεια στο στρόβιλο μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$E = 0.5 \cdot m \cdot v^2 \quad (1.18)$$

Η διαθέσιμη ισχύς P που παρέχεται στο στρόβιλο είναι ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται η ενέργεια στο δρομέα του και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P = \frac{dE}{dt} = 0.5 \cdot \left(v^2 \cdot \frac{dm}{dt} + m \cdot \frac{dv^2}{dt} \right) \quad (1.19)$$

Από την εξίσωση (1.16) προκύπτει ότι: $v_2^2 = 2 \cdot g \cdot H_{καθαρ\acute{o}}$ και έτσι είναι μια σταθερά. Επομένως ο δεύτερος όρος της εξίσωσης μπορεί να αφαιρεθεί. Ο πρώτος όρος $\frac{dm}{dt}$, είναι ο ρυθμός μεταβολής της μάζας και ισούται με το γινόμενο $\rho \cdot Q$ όπου ρ είναι η πυκνότητα του νερού η οποία μετριέται σε kg/m^3 και Q είναι ο ρυθμός ροής του νερού η οποία μετριέται σε m^3/s . Η πυκνότητα του νερού λαμβάνεται ίση με $\rho = 1000 \text{ kg}/m^3$ και μετά από αντικατάσταση προκύπτει η εξίσωση της ισχύος που παρατίθεται παρακάτω, η οποία μετριέται σε W :

$$P = 1000 \cdot Q \cdot g \cdot H_{καθαρ\acute{o}} \quad (1.20)$$

Στην εξίσωση (1.20) αν συμπεριληφθεί η παράμετρος του βαθμού απόδοσης η_o του στρόβιλου και το αποτέλεσμα διαιρεθεί με την τιμή 1000, προκειμένου να μετατραπεί η μονάδα μέτρησης σε kW θα προκύψει η εξίσωση (1.6).

Στην πράξη υπάρχουν επιπρόσθετες απώλειες που προκύπτουν από τις τριβές και το στροβιλισμό, καθώς η πίεση του νερού μετατρέπεται στο ακροφύσιο σε ένα πίδακα

υψηλής ταχύτητας. Αυτό γενικά αντιμετωπίζεται με μία σταθερά C_v , η οποία εισάγεται στην εξίσωση (1.17), η οποία λαμβάνει τη μορφή:

$$v_2 = C_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{καθαρό}} \quad (1.21)$$

Διατίθεται μια σειρά τύπων στροβίλων με ένα ή περισσότερα σχέδια το κάθε ένα από τα οποία έχει προσαρμοστεί για μια συγκεκριμένη εφαρμογή και εξαρτάται από τα εκάστοτε διαθέσιμα χαρακτηριστικά του ύψους της υδατόπτωσης και της ροής του νερού της περιοχής που πρόκειται να εγκατασταθεί. Από την εξίσωση της ισχύος (1.6) γίνεται αντιληπτό ότι αυτή εξαρτάται από τις δύο παραμέτρους κλειδιά που είναι το ωφέλιμο ή καθαρό ύψος της υδατόπτωσης και η ροή του νερού. Η ισχύς εξόδου και η ταχύτητα για κάθε στρόβιλο μπορεί να υπολογισθεί από αυτές τις δύο παραμέτρους, καθώς και οι προδιαγραφές του στροβίλου που θα επιλεγεί.

Διατίθενται δύο μεγάλες κατηγορίες συμβατικών υδροστροβίλων: οι στρόβιλοι δράσεως και οι στρόβιλοι αντιδράσεως. Οι στρόβιλοι υδάτινων ρευμάτων και οι στρόβιλοι υδατοπτώσεων πολύ μικρού ύψους πτώσης κατατάσσονται σε μια τρίτη, σχετικά νέα κατηγορία αυξανόμενης σημασίας τα τελευταία χρόνια. Οι στρόβιλοι δράσεως χρησιμοποιούνται συνήθως σε περιοχές που διατίθεται μεγάλο ύψος υδατόπτωσης. Αρχικά η πίεση του νερού μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια εξαναγκάζοντας το νερό να διέλθει μέσω ενός ακροφύσιου. Αυτό προκαλεί την αύξηση της ταχύτητας του. Ο πίδακας του νερού, που διαθέτει υψηλή ταχύτητα εξέρχεται από το ακροφύσιο μεταφέροντας την ενέργεια και προσπίπτει στο στροφέιο του στροβίλου, το οποίο θέτει σε περιστροφή. Κατά τη διαδικασία αυτή, χάνεται το μεγαλύτερο μέρος της μεταφερόμενης ενέργειας. Το στροφέιο ενός στροβίλου δράσεως περιστρέφεται σε αέρα με κανονική ατμοσφαιρική πίεση.

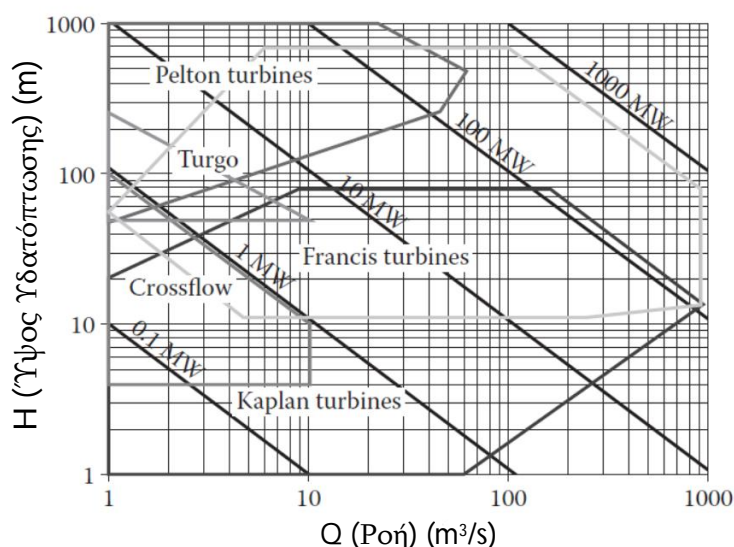
Οι βασικές κατηγορίες υδροστροβίλων δράσεως είναι οι Pelton (Σχήμα 1.13), οι Turgo (Σχήμα 1.14) και οι διασταυρούμενης ροής (Cross-flow), ενώ οι περισσότερο διαδεδομένες κατηγορίες υδροστροβίλων αντιδράσεως είναι οι Francis (Σχήμα 1.15), οι Kaplan (Σχήμα 1.16) και οι έλικες. Στον πίνακα 1.1 παρατίθενται τύποι στροβίλων που χρησιμοποιούνται για διαφορετικά ύψη υδατοπτώσεων. Από αυτόν προκύπτει ότι οι υδροστρόβιλοι τύπου Pelton χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλου ύψους υδατόπτωσης, ενώ από τους στροβίλους τύπου Kaplan και τύπου έλικα καλύπτεται η περιοχή χαμηλού ύψους υδατοπτώσεων. Από τους υδροστρόβιλους τύπου Francis, Banki – Mitchell και Turgo καλύπτονται οι περιοχές με μεσαίο ύψος υδατόπτωσης. Από τον πίνακα καθίσταται σαφές ότι οι περισσότεροι τύποι στροβίλων καλύπτουν μία ευρεία περιοχή υψών υδατόπτωσης. Ακόμη, πριν επιλεγεί ο στρόβιλος για μια συγκεκριμένη περιοχή, πρέπει να είναι γνωστή μια επιπρόσθετη παράμετρος εκτός από το ύψος της υδατόπτωσης, η ροή του νερού Q . Στο διάγραμμα εφαρμογών υδροστροβίλων του σχήματος 1.11 εμφανίζεται το ύψος της υδατόπτωσης και οι παροχές νερού που καλύπτονται από τους διάφορους τύπους των υδροστροβίλων. Για παράδειγμα από το διάγραμμα προκύπτει, ότι παρόλο που ο υδροστρόβιλος τύπου Pelton γενικά είναι κατάλληλος για εφαρμογές με μεγάλο ύψος υδατόπτωσης, μπορεί να μην είναι κατάλληλος, εφόσον ταυτόχρονα η περιοχή διαθέτει μεγάλη ροή (παροχή) νερού. Από τους στροβίλους τύ-

που Francis καλύπτεται ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών που αφορούν τόσο το ύψος της υδατόπτωσης, όσο και τη ροή (παροχή) νερού ενώ, από τους στροβίλους τύπου Kaplan καλύπτονται εφαρμογές υψηλής ροής του νερού με χαμηλό ύψος υδατόπτωσης.

Πίνακας 1.1 [Ξ5, Table 9.2 page 231]

Κατάλληλες Περιοχές Ύψους Υδατόπτωσης ανά Τύπο Στροβίλου

Τύπος Υδροστροβίλου	Ύψος Υδατόπτωσης H (m)	Τύποι Περιοχών που Καλύπτονται από το Ύψος Υδατόπτωσης
Υδάτινων Ρευμάτων και Πολύ Μικρού Ύψους Πτώσης (V.L.H.) (Σχήμα 1.17)	$0 < H < 5$	Μηδενικό ή Πολύ Χαμηλό
Kaplan και έλικας	$2 < H < 70$	Χαμηλό - Μεσαίο
Banki - Michell (Cross-flow)	$5 < H < 200$	Χαμηλό - Μεσαίο
Francis	$20 < H < 700$	Χαμηλό - Μεσαίο - Υψηλό
Turgo	$50 < H < 250$	Μεσαίο
Pelton	$50 < H < 2000$	Μεσαίο - Υψηλό - Πολύ Υψηλό



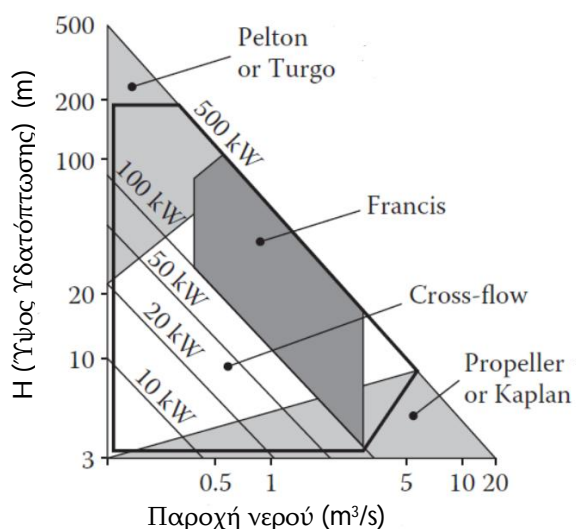
Σχήμα 1.11: Διάγραμμα εφαρμογών υδροστροβίλων [Ξ6]

Ακόμη, στα διαγράμματα εφαρμογών στροβίλων εμφανίζονται ύψη υδατοπτώσεων και παροχές νερού για διακριτές περιοχές ισχύων εξόδου. Για παράδειγμα, στο σχήμα 1.12.α εμφανίζεται ένα διάγραμμα επιλογής υδροστροβίλων που καλύπτει Μ.Υ.Ε. με ισχύ στην περιοχή από 1 έως 500 kW για διάφορους τύπους στροβίλων. Στο σχήμα 1.12.β εμφανίζεται το διάγραμμα του υδροστροβίλου Ossberger, της ομώνυμης εταιρείας κατασκευής στροβίλων, η οποία αποτελεί μια σχεδίαση Cross-flow, καθώς και τα διαγράμματα των στροβίλων τύπου Pelton και Kaplan που κατασκευάζονται από την ίδια

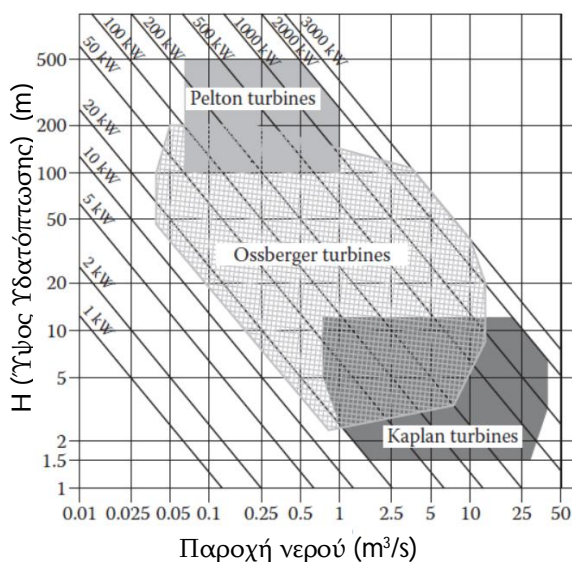
εταιρεία. Οι υδροστρόβιλοι τύπου Cross-flow της Ossberger διατίθενται για περιοχές με ύψη υδατόπτωσης έως 200 μέτρα και παροχές νερού έως 50 m³/s και από αυτούς καλύπτεται μεγαλύτερο εύρος περιοχών υψών υδατοπτώσεων και παροχών νερού, συγκρινόμενοι με τη μεγάλη πλειοψηφία των κατασκευαστών υδροστρόβιλων αυτού του τύπου.

Επίσης, η κατηγοριοποίηση των υδροστρόβιλων εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο το νερό ρέει μέσα στις μηχανές. Γενικά, στη βιβλιογραφία αναφέρονται οι παρακάτω κατηγορίες:

1. Υδροστρόβιλοι εφαπτομενικής ή αξονικής ροής στους οποίους το νερό ρέει εφαπτομενικά ως προς την περιστροφή του δρομέα τους. Το καλύτερο παράδειγμα αυτή της κατηγορίας αποτελεί ο στρόβιλος Pelton.
2. Υδροστρόβιλοι ακτινικής ροής. Η ροή του νερού πραγματοποιείται κατά μήκος της ακτίνας του δρομέα. Στις αρχικές σχεδιάσεις υδροστρόβιλων τύπου Francis εφαρμόζονταν η ακτινική ροή του νερού με φορά προς τα μέσα.
3. Υδροστρόβιλοι μικτής ή αλλιώς ακτινικής – αξονικής ροής. Το νερό εισάγεται στο δρομέα ακτινικά, ενώ η εξαγωγή του πραγματοποιείται κατά μήκος του άξονα του. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι σύγχρονες σχεδιάσεις υδροστρόβιλων τύπου Francis (Σχήμα 1.15).
4. Υδροστρόβιλοι αξονικής ροής, στους οποίους τόσο η εισαγωγή όσο και η εξαγωγή του νερού πραγματοποιούνται παράλληλα προς τον άξονα τους. Παραδείγματα υδροστρόβιλων αξονικής ροής αποτελούν οι στρόβιλοι τύπου Kaplan (Σχήμα 1.16) και οι στρόβιλοι έλικα.



Σχήμα 1.12.α: Στρόβιλοι ισχύος 1- 500 kW [Ε5, Fig. 9.11.a page 232]

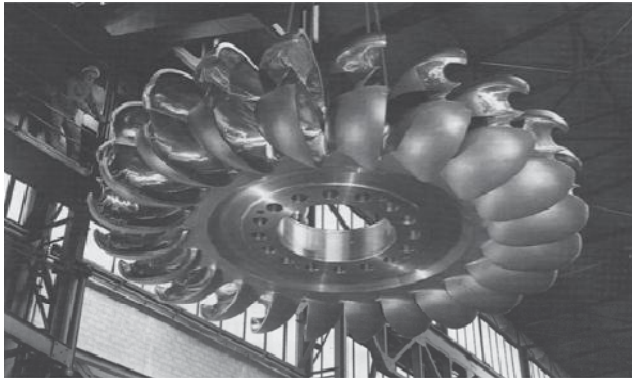


Σχήμα 1.12.β: Στρόβιλοι εταιρείας Ossberger [Ε5, Fig. 9.11.b page 232]

Σχήμα 1.12: Διαγράμματα εφαρμογών υδροστρόβιλων μικρής ισχύος

Όταν ο δρομέας ενός υδροστρόβιλου λειτουργεί έτσι ώστε μόνο ένα τμήμα του να βρέχεται από νερό υπό ατμοσφαιρική πίεση τότε, αυτός ονομάζεται υδροστρόβιλος δράσεως, ενώ όταν ο δρομέας βρέχεται πλήρως από νερό το οποίο βρίσκεται υπό πίεση τότε, αυτός ονομάζεται υδροστρόβιλος αντιδράσεως.

Οι υδροστρόβιλοι εφαπτομενικής ροής ταξινομούνται στην κατηγορία στροβίλων δράσεως, ενώ οι υδροστρόβιλοι ακτινικής ροής, μικτής ή ακτινικής – αξονικής ροής και αξονικής ροής κατατάσσονται στην κατηγορία των στροβίλων αντιδράσεως.

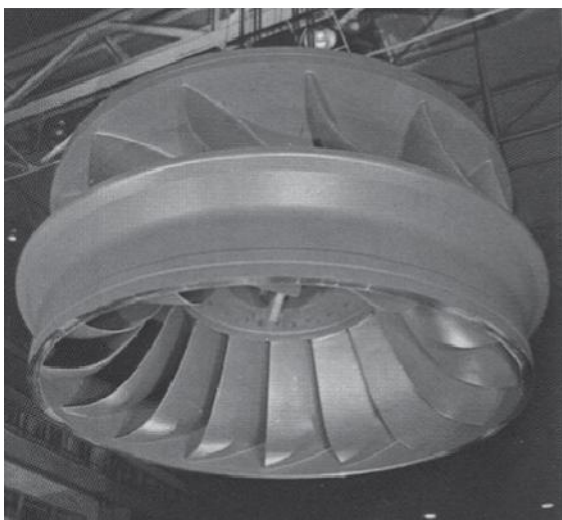


Σχήμα 1.13: Δρομέας Στροβίλου Pelton
[Ξ7, Fig. 9.8, page 328]

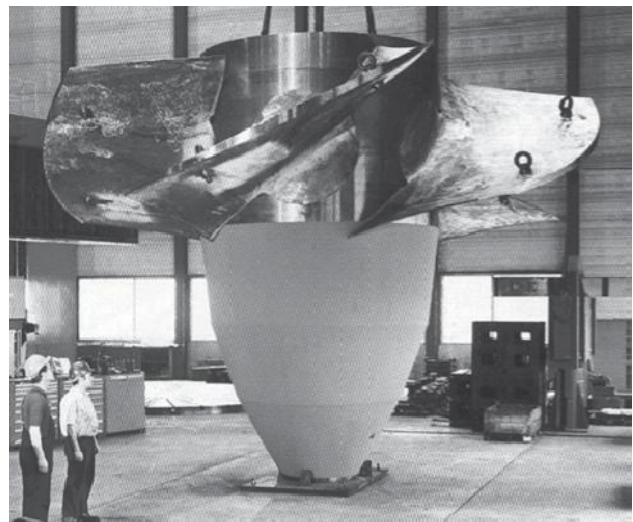


Σχήμα 1.14: Δρομέας Στροβίλου Turgo
[Ξ5, Fig. 10.7, page 253]

Η βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής στο διαθέσιμο ύψος της υδατόπτωσης αποτελεί επιπρόσθετα ένα τρίτο σημαντικό παράγοντα στην επιλογή ενός υδροστρόβιλου για μια συγκεκριμένη τοποθεσία παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η έκφραση ειδική ταχύτητα ενσωματώνει τις τρεις παραμέτρους: το ύψος της υδατόπτωσης, την ισχύ (η οποία ενσωματώνει την παράμετρο της παροχής του νερού μέσω της εξίσωσης της ισχύος) και την ταχύτητα περιστροφής σε ένα μόνο μέγεθος, σύμφωνα με το οποίο καθορίζεται η επιλογή του υδροστρόβιλου.



Σχήμα 1.15: Δρομέας Στροβίλου Francis
[Ξ7, Fig. 9.16, page 337]



Σχήμα 1.16: Δρομέας Στροβίλου Kaplan
[Ξ7, Fig. 9.17, page 337]

Κάθε στρόβιλος διαθέτει μια συγκεκριμένη ταχύτητα σε ένα δεδομένο ύψος υδατόπτωσης στην οποία επιτυγχάνει το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης επιτυγχάνεται όταν το νερό ρέει πιο ομαλά γύρω από τα πτερύγια του στρόβιλου και διέρχεται μέσα από αυτόν με αυτή την ταχύτητα. Εάν πρόκειται να αλλάξει το ύψος της υδατόπτωσης, πρέπει να αλλάξει και η βέλτιστη ταχύτητα, αλλά θα χρειαστεί να παραμείνει παρόμοιο το πρότυπο παροχής του νερού για να διατηρηθεί ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του στρόβιλου.

Ο λόγος της ειδικής ταχύτητας ως προς την ισχύ εκφράζει την ταχύτητα περιστροφής του γεωμετρικά όμοιου υδροστρόβιλου του οποίου το κανονικό σημείο λειτουργίας (βέλτιστο) έχει ύψος υδατόπτωσης μία μονάδα μήκους και ισχύ μία μονάδα ισχύος. Η ειδική ταχύτητα υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (1.22).

$$n_s = n \cdot \frac{\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (1.22)$$

όπου : n η ταχύτητα περιστροφής κανονικής λειτουργίας του στρόβιλου
 P η ισχύς εξόδου του στρόβιλου
 H το ωφέλιμο ή καθαρό ύψος της υδατόπτωσης

Η ταχύτητα περιστροφής κανονικής λειτουργίας του στρόβιλου έχει μονάδες μέτρησης Σ.Α.Λ.. Αν ληφθεί ως μονάδα μήκους το 1 m (μέτρο) τότε η μονάδα ισχύος θα ισούται με 1 kW [E7, σελ. 225], ενώ αν ως μονάδα μήκους θεωρηθεί το 1 ft (πόδι) τότε η μονάδα ισχύος θα ισούται με 1 HP (ίππο) [E8, σελ. 122].



Σχήμα 1.17: Εγκατάσταση και Δρομέας Στρόβιλου Πολύ Μικρού Ύψους Πτώσης (VLH) [E5, Fig. 12.4 page 309]

Η ειδική ταχύτητα που υπολογίζεται με την εισαγωγή των χαρακτηριστικών μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας για την πιθανή κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού έργου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διερευνηθεί ποιοι τύποι υδροστρόβιλων είναι οι πλέον κατάλληλοι. Από σχεδιαστική άποψη, κατά την επιλογή των υδροστρόβιλων είναι επιθυμητές μεγαλύτερες τιμές ειδικών ταχυτήτων, διότι για το ίδιο ύψος υδατόπτωσης και την ίδια ονομαστική ισχύ είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί στρόβιλος με μικρότερο μέγεθος και μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Οι στρόβιλοι που δύνανται να λειτουργήσουν αποδοτικά σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής διαθέτουν το επιπρόσθετο πλεονέκτημα

ότι η μετάδοση της κίνησης στους εναλλακτήρες με τους οποίους έχουν συζευχθεί μπορεί να επιτευχθεί με άμεση σύζευξη των αξόνων τους. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η δαπάνη κιβωτίων μετάδοσης, προκειμένου η ταχύτητα στην έξοδο τους να αυξηθεί ή η χρήση αργόστροφων εναλλακτών μεγάλου κόστους. Η γεωμετρία των στροβίλων αποτελεί παράγοντα που περιορίζει την επίτευξη του στόχου αυτού. Οι στρόβιλοι υψηλών ειδικών ταχυτήτων έχουν πολύπλοκες γεωμετρίες που έχουν αναπτυχθεί προσφάτως.

Είναι επιθυμητό η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής όλων των στροβίλων να λαμβάνει τιμές μέσα σε ένα περιορισμένο εύρος ζώνης. Σύμφωνα με αυτό τον περιορισμό, από την ειδική ταχύτητα ενός τύπου στροβίλου που υποδεικνύεται από το ύψος της υδατόπτωσης και τα χαρακτηριστικά της παροχής νερού της περιοχής στην οποία αυτός πρόκειται να εγκατασταθεί, θα προκύψει η επιλογή του πλέον κατάλληλου για να συζευχθεί με εναλλακτήρα χωρίς κιβώτιο μετάδοσης ή με κιβώτιο μετάδοσης ελάχιστων απαιτήσεων.

Στη σχέση υπολογισμού της ειδικής ταχύτητας των υδροστροβίλων το ωφέλιμο ύψος της υδατόπτωσης H βρίσκεται στον παρονομαστή, ενώ η ισχύς εξόδου του στροβίλου P βρίσκεται στον αριθμητή. Για το λόγο αυτό οι υδροστρόβιλοι με χαμηλές ειδικές ταχύτητες είναι κατάλληλοι για εφαρμογές μεγάλου ύψους υδατόπτωσης και μικρής παροχής νερού, ενώ εκείνοι που διαθέτουν υψηλές ειδικές ταχύτητες είναι κατάλληλοι για εφαρμογές σε περιοχές με χαμηλό ύψος υδατόπτωσης και μεγάλης παροχής νερού ή μεγάλης ισχύος. Ακόμη οι υδροστρόβιλοι που διαθέτουν μέση ειδική ταχύτητα είναι κατάλληλοι είτε για περιοχές με μεγάλο ύψος υδατόπτωσης και μεγάλη ισχύ εξόδου, είτε για περιοχές με μικρό ύψος υδατόπτωσης και μικρή ισχύ εξόδου.

Στον πίνακα 1.2 εμφανίζεται λίστα με τις διαθέσιμες περιοχές ειδικών ταχυτήτων για διαφορετικούς τύπους στροβίλων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με αυτόν οι υδροστρόβιλοι τύπου Pelton έχουν χαμηλή ειδική ταχύτητα, οι τύπου Turgo, Cross - flow και Francis διαθέτουν μέση ειδική ταχύτητα, ενώ οι τύπου έλικα και οι τύπου Kaplan έχουν τις υψηλότερες ειδικές ταχύτητες.

Πίνακας 1.2 [Ξ5, Table 9.3 page 233]

Ειδικές Ταχύτητες για Διάφορους Τύπους Υδροστρόβιλων	
Τύπος Υδροστρόβιλου	Ειδική Ταχύτητα n_s
Pelton	10 – 50
Turgo	20 – 70
Banki - Michell (Cross-flow)	20 – 80
Francis	80 – 400
Kaplan και έλικας	340 – 1200

Προκειμένου να καθορισθεί ο τύπος του στροβίλου που μπορεί να είναι κατάλληλος για μια ιδιαίτερη περιοχή παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, πρώτα υπολογίζεται η ειδική ταχύτητα με τη χρήση του ύψους της υδατόπτωσης, της ισχύος που πρόκειται να παραχθεί και της επιθυμητής ταχύτητας περιστροφής. Το πιθανό αποτέλεσμα που θα προκύψει από τον έλεγχο της υπολογισθείσας τιμής της ειδικής ταχύτητας με τα περιεχόμενα του πίνακα 1.2 είναι ότι ενδεχομένως να είναι κατάλληλοι για την περιοχή περισσότεροι από ένας τύπος υδροστροβίλου. Τότε ο μελετητής πρέπει να εξετάσει τα διαγράμματα εφαρμογών υδροστροβίλων των κατασκευαστών, προκειμένου ο τύπος των στροβίλων να περιοριστεί και να ελεγχθεί η διαθεσιμότητα τους από τους προμηθευτές. Εάν ο καταλληλότερος τύπος στροβίλου δεν είναι διαθέσιμος ή διατίθεται σε υψηλή τιμή, ο μελετητής μπορεί να δοκιμάσει άλλους τύπους στροβίλων, οι οποίοι διατίθενται από τους προμηθευτές ευκολότερα ή σε χαμηλότερο κόστος. Ο τύπος του στροβίλου που θα επιλεγεί για ένα έργο, ιδιαίτερα για υδροηλεκτρικά έργα μικρής εγκατεστημένης ισχύος, βασίζεται κυρίως στη διαθεσιμότητα και το κόστος του.

1.3.5. Διάκριση μικρών – μεγάλων υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στους Υ.Η.Σ. βασίζεται στις αρχές από τις οποίες διέπεται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του νερού αρχικά σε μηχανική από τους υδροστροβίλους και στη συνέχεια σε ηλεκτρική από τις γεννήτριες με τις οποίες αυτοί έχουν συζευχθεί. Οι ίδιες αρχές εφαρμόζονται σε όλες τις εγκαταστάσεις ανεξάρτητα από την κατηγοριοποίηση τους [E7]. Ο ορισμός ενός μικρού Υ.Η.Ε. μπορεί να χαρακτηριστεί αυθαίρετος από τεχνική άποψη και συνήθως ως μικρό χαρακτηρίζεται εκείνο που χρησιμοποιεί τυποποιημένο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό (ως προς το στρόβιλο και τη γεννήτρια). Η ταξινόμηση αυτή, η οποία διαφέρει μεταξύ των χωρών χρησιμοποιείται από τις κυβερνήσεις τους ως μια βάση για τις πολιτικές τους που αφορά την παροχή φορολογικών κινήτρων, τις επιδοτήσεις στην τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας και περιβαλλοντικούς κανονισμούς.

Για παράδειγμα στις Η.Π.Α. τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα έχουν προσδιοριστεί ως συστήματα ισχύος ίσης ή μικρότερης των 15 MW. Αυτό το όριο έχει υιοθετηθεί σύμφωνα με τη ρυθμιστική πράξη πολιτικής δημόσιων υπηρεσιών κοινής ωφέλειας περί ειδικού χειρισμού στην αδειοδότηση, τη χορήγηση δανείων, τα κίνητρα και άλλων μέτρων υποστήριξης ομοσπονδιακών και πολιτειακών προγραμμάτων η οποία, έχει θεσπιστεί το Νοέμβριο του 1978 [E8]. Σύμφωνα με πρόσφατη νομοθεσία των Η.Π.Α. το όριο αυτό έχει αυξηθεί και πλέον ανέρχεται στο επίπεδο των 30 MW. Στα κράτη μέλη της Ε.Ε. δεν υπάρχει ομοφωνία σχετικά με τον προσδιορισμό των Μ.Υ.Ε.. Σε ορισμένες χώρες όπως η Ελλάδα, η Πορτογαλία, η Ισπανία, η Ιρλανδία και το Βέλγιο έχει γίνει αποδεκτό το άνω όριο εγκατεστημένης ισχύος να είναι ίσο με 10 MW. Στην Ιταλία το όριο αυτό έχει προσδιοριστεί στο επίπεδο των 3 MW, ενώ στη Σουηδία στο 1.5 MW αντίστοιχα. Στη Γαλλία το όριο αυτό έχει θεσπιστεί πρόσφατα στο επίπεδο των 12 MW, όχι σαν ένα σαφώς προσδιορισμένο όριο της εγκατεστημένης ισχύος, αλλά ως τη μέγιστη τιμή της

εγκατεστημένης ισχύος για την οποία το δίκτυο έχει την υποχρέωση να αγοράζει ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από Α.Π.Ε. [Ξ4].

Στη διεθνή βιβλιογραφία υφίσταται η κατηγοριοποίηση των Υ.Η.Ε. που εμφανίζεται στον πίνακα 1.3. Ωστόσο, πρέπει να διατηρηθεί στη μνήμη μας ότι η ορολογία της κατηγοριοποίησης αυτής έχει εισαχθεί με σκοπό τον ποσοτικό προσδιορισμό του πεδίου εφαρμογής διαφορετικών έργων. Για αυτό το λόγο δεν πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στον κατηγοριοποίηση των Υ.Η.Ε. λαμβάνοντας ως κριτήριο μόνο την εγκατεστημένη ισχύ τους.

Πίνακας 1.3 [Ξ5, Table 1.3 page 9]

Κατηγοριοποίηση των Υ.Η.Ε. κατά μέγεθος

Κατηγορία Υ.Η.Ε.	Μέγεθος
micro	έως 100 kW
mini	100 – 1000 kW
Μικρό	1 – 10 MW
Μεσαίο	10 – 100 MW
Μεγάλο	> 100 MW

Οι βασικές διαφορές της ταξινόμησης κατά μέγεθος στη σχεδίαση και τη λειτουργία των υδροηλεκτρικών συστημάτων παρατίθενται παρακάτω:

1. Μικρο-υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε απομακρυσμένες αγροτικές κοινότητες. Οι κοινότητες που εξυπηρετούνται γενικά είναι πολύ απομακρυσμένες προκειμένου να τροφοδοτηθούν οικονομικά από το ηλεκτρικό δίκτυο. Η μηχανολογική σχεδίαση των μικρο-υδροηλεκτρικών συστημάτων τείνει να είναι απλή και τυποποιημένη όσο το δυνατόν περισσότερο για την εύκολη λειτουργία και τη συντήρησή τους από τις τοπικές κοινότητες με περιορισμένη έξωθεν τεχνική υποστήριξη.
2. Μίνι και μικρά Υ.Η.Ε.. Κατασκευάζονται προκειμένου να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε απομακρυσμένες πόλεις ή για να τροφοδοτηθεί με αυτή το ηλεκτρικό δίκτυο. Τα υδροηλεκτρικά έργα τα οποία πωλούν ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο σχεδιάζονται και κατασκευάζονται έτσι ώστε να είναι οικονομικά βιώσιμα και να παρέχονται χρηματικές αποδόσεις στους επενδυτές τους.
3. Μ.Υ.Ε. και ορισμένα υδροηλεκτρικά εργοστάσια μέσης ισχύος σχεδιάζονται ως παραποτάμια έργα ελεύθερης ροής. Στα έργα ελεύθερης ροής χρησιμοποιείται ένας υδατοφράκτης για να επιτευχθεί η εκτροπή του νερού στον αγωγό προσαγωγής, ενώ αυτό δεν αποθηκεύεται. Τείνουν να έχουν λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις συγκρινόμενα με τα έργα που διαθέτουν φράγματα και ταμιευτήρες.

4. Μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια, τα οποία συνήθως περιλαμβάνουν την κατασκευή ενός φράγματος, προκειμένου να επιτευχθεί η δημιουργία ενός ταμιευτήρα. Ορισμένοι ταμιευτήρες διαθέτουν μικρό μέγεθος και χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση νερού για να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη της ημερήσιας ή της εβδομαδιαίας αιχμής φορτίου. Άλλοι ταμιευτήρες διαθέτουν αρκετά μεγάλο μέγεθος, για να επιτευχθεί η αποθήκευση νερού των βροχοπτώσεων έτσι ώστε να είναι διαθέσιμο κατά τη διάρκεια των περιόδων ανομβρίας ή ξηρασίας μικρής ή μεγάλης διάρκειας. Συχνά εξυπηρετούνται πολλαπλές λειτουργίες από τους ταμιευτήρες, συμπεριλαμβανομένης της άρδευσης, του αντιπλημμυρικού ελέγχου και της αναψυχής, συμπληρωματικά με την τροφοδοσία νερού των Υ.Η.Σ.

1.3.6. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με έμφαση στα μικρά έργα

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί η χρήση εφαρμογών των Α.Π.Ε. στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτει αρκετά πλεονεκτήματα, ενώ οι τεχνολογίες που απαιτούνται για αυτές έχουν ωριμάσει και είναι αξιόπιστες. Ένα μεγάλο ποσοστό από αυτήν την ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από την εκμετάλλευση των υδάτινων αποθεμάτων. Επιπρόσθετα η κατασκευή μικρών υδροηλεκτρικών έργων (Μ.Υ.Ε.) αποτελεί μια πρόσφορη λύση που διαθέτει αρκετά πλεονεκτήματα συγκρινόμενη μεταξύ άλλων και με Υ.Η.Σ. μεγαλύτερης εγκατεστημένης ισχύος.

Για αυτό το λόγο κρίνεται σκόπιμη η αναφορά τόσο στα πλεονεκτήματα, όσο και στα μειονεκτήματα που έχουν οι υδροηλεκτρικές μονάδες γενικά με έμφαση στα μικρά έργα, διότι δεν υπάρχει έργο που να μη διαθέτει και μειονεκτήματα. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα των Υ.Η.Σ. παρατίθενται παρακάτω:

1. Πλεονεκτήματα Υ.Η.Σ.

- Στους Υ.Η.Σ. δεν καταναλώνονται ορυκτά καύσιμα των οποίων η ποσότητα είναι πεπερασμένη και δεν αντικαθίσταται, αλλά σε αυτούς αξιοποιείται μια ανανεώσιμη πηγή, η οποία καθίσταται συνεχώς διαθέσιμη από την ηλιακή ενέργεια μέσω του υδρολογικού κύκλου.
- Ουσιαστικά δεν προκαλείται ρύπανση από αυτούς και δεν απελευθερώνεται θερμότητα. Οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται από τη λειτουργία τους είναι αμελητέες, ενώ στις μικρές υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις μπορούν να εξαλειφθούν πλήρως.
- Ο χρόνος που απαιτείται για τη σχεδίαση και την κατασκευή των Μ.Υ.Ε. κυμαίνεται από 1 έως 2 έτη. Οι απαιτήσεις χορήγησης των αδειών που απαιτούνται είναι ελάχιστες, ο απαιτούμενος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός διατίθεται άμεσα και οι διαδικασίες κατασκευής είναι γνωστές.
- Τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια απαιτούν κάποιο είδος ελέγχου του νερού ο οποίος φτάνει έως και την πλήρη ρύθμιση της απόρριψης του στη λεκάνη απορροής. Επομένως αποτελούν ένα σημαντικό στοιχείο προκειμένου για τη διαχείριση των υδάτινων

πόρων μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η μείωση των πιθανών ζημιών που οφείλονται στις πλημμύρες. Όταν εμπλέκονται εγκαταστάσεις αποθήκευσης (ταμιευτήρες), τα νερά της πλημμύρας παρα-κρατούνται και επιτυγχάνεται η καλύτερη διοχέτευση τους στις γεωργικές καλλιέργειες, η ρύθμιση της ροής του ποταμού, η βελτίωση της πλοήγησης, η προστασία των αλιευμάτων και της άγριας πανίδας, η αναψυχή, η χρήση για την ύδρευση των δήμων και των χωριών της περιοχής και ο καλύτερος έλεγχος των λυμάτων.

- Οι Υ.Η.Σ. αποτελούν μια αξιόπιστη πηγή ηλεκτροπαραγωγής, η οποία υπόκειται στους υδρολογικούς περιορισμούς της περιοχής εγκατάστασής τους. Η απλότητα της κατασκευής των υδροστροβίλων και η αξιοπιστία τους καθιστά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας άμεσα διαθέσιμη όποτε απαιτηθεί. Επειδή δεν εμπλέκεται θερμότητα ο εξοπλισμός τους έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, η οποία κυμαίνεται από 30 έως 50 έτη ανάλογα με την κατασκευή τους, ενώ οι βλάβες είναι σπάνιες.
- Σε απομακρυσμένες περιοχές η χρήση σχετικά απλής τεχνολογίας λειτουργεί ως καταλύτης στην ενεργοποίηση παραγωγικών πηγών και τη δημιουργία βελτιωμένων οικονομικών ευκαιριών για τους κατοίκους της περιοχής.
- Χαρακτηρίζονται από την αξιοπιστία και την ευελιξία της λειτουργίας τους, ενώ επιτυγχάνεται η γρήγορη εκκίνηση και η διακοπή της λειτουργίας τους. Για τους προαναφερθέντες λόγους ανταποκρίνονται στις γρήγορες μεταβολές της ζήτησης φορτίου. Έτσι γίνονται ένα πολύτιμο τμήμα οποιουδήποτε μεγάλου Σ.Η.Ε., μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η συνολική αύξηση της οικονομίας, της απόδοσης και της αξιοπιστίας του συστήματος, αρκεί να υπάρχει ταμιευτήρας για τον ουσιαστικό έλεγχο της ροής.
- Διαθέτουν μια άριστη ικανότητα κάλυψης των φορτίων αιχμής του δικτύου. Στην είσοδο τους εισέρχεται χαμηλού κόστους υδραυλική ενέργεια, ενώ στην έξοδό τους λαμβάνεται ηλεκτρική ενέργεια υψηλής αξίας. Σε ένα μεγάλο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η εναλλακτική λύση στη διαχείριση φορτίων αιχμής μπορεί να είναι η χρήση ή η δαπανηρή επέκταση παλαιών σχετικά αναποτελεσματικών θερμικών μονάδων.
- Οι τεχνολογίες που απαιτεί η λειτουργία τους έχουν αναπτυχθεί καλά και έχουν αποδειχθεί στην πράξη, ενώ οι βαθμοί απόδοσης των υδροστροβίλων φτάνουν στο 90 %. Οι μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες διατίθενται σε ένα εύρος ισχύων από μερικές δεκάδες kW έως μερικά MW και έχουν τεθεί σε λειτουργία από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Ενώ ο εξοπλισμός τους πρέπει να τροποποιηθεί έτσι ώστε να προσαρμοστεί στα χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασής τους, για να επιτευχθεί μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης, σε γενικές γραμμές οι επιδόσεις τους ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των κατασκευαστών.
- Οι εγκαταστάσεις τους έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Κατά κανόνα τα φράγματα και οι διατάξεις ελέγχου τους δύνανται να λειτουργούν για ένα αιώνα ή περισσότερο, εφόσον υπόκεινται σε μικρής έκτασης εργασίες συντήρησης.

- Για τη λειτουργία τους απαιτείται ολιγάριθμο προσωπικό. Για ορισμένα μικρά έργα απαιτείται η παρουσία ενός μόνο τεχνικού για την επίβλεψη της λειτουργίας τους. Η ανεξαρτησία από τη χρήση καυσίμων μαζί με τη μεγάλη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού τους αποτελούν τους βασικούς παράγοντες εξαιτίας των οποίων οι Υ.Η.Σ. έχουν καταστεί ανθεκτικοί στον πληθωρισμό.
- Η κατασκευή των Μ.Υ.Ε. μπορεί να επιτύχει μέγιστη χρήση υλικών και εργατικού δυναμικού της περιοχής. Συνήθως στα Μ.Υ.Ε. απασχολείται μεγαλύτερο εργατικό δυναμικό κατοίκων της περιοχής στην οποία κατασκευάζονται συγκρινόμενα με τις εγκαταστάσεις των θερμοηλεκτρικών σταθμών στην κατασκευή των έργων πολιτικού μηχανικού.
- Οι φυσικοί πόροι που απαιτούνται για τη λειτουργία τους παραμένουν αναξιοποίητοι, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες όπου αυτές έχουν αξιοποιηθεί σε ποσοστό μικρότερο του 7 %.

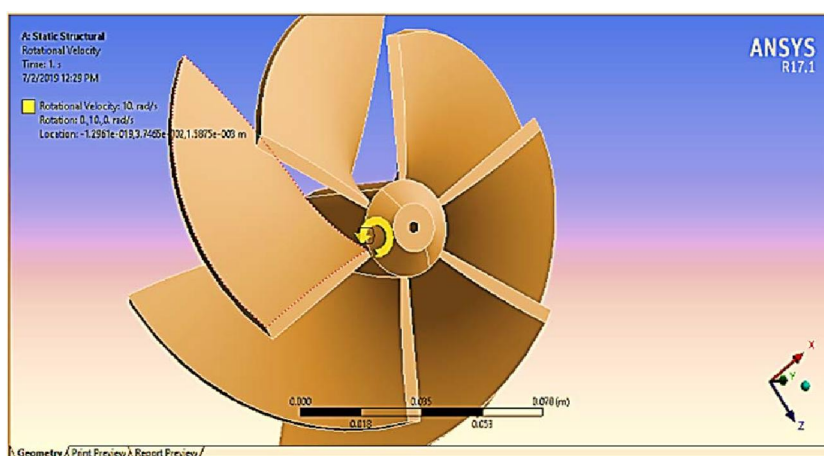
2. Μειονεκτήματα Υ.Η.Σ.

- Η μελέτη και η κατασκευή τους απαιτεί μεγάλα χρονικά διαστήματα της τάξης μεγέθους 5-10 ετών. Όμως αυτό αφορά κατά κύριο λόγο τα υδροηλεκτρικά έργα στα οποία περιλαμβάνεται η κατασκευή φράγματος και ταμιευτήρα, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται η εκτεταμένη συλλογή μετεωρολογικών και γεωλογικών δεδομένων. Για τα Μ.Υ.Ε. το κατασκευαστικό κόστος είναι σαφώς χαμηλότερο, διότι δεν απαιτείται η κατασκευή φράγματος και ταμιευτήρα οπότε δεν υπάρχει αυτό το μειονέκτημα.
- Η στοχαστική συμπεριφορά της παροχής του νερού αποτελεί το μοναδικό σοβαρό μειονέκτημα των υδροηλεκτρικών έργων, ειδικά των μικρών. Αυτή εξαρτάται άμεσα από τις βροχοπτώσεις και τις χιονοπτώσεις που πραγματοποιούνται στην περιοχή εγκατάστασης του Υ.Η.Σ. κατά τη διάρκεια του έτους.
- Προκειμένου να διασφαλιστεί η αναγκαία παροχή νερού οι Υ.Η.Σ. κατασκευάζονται σε περιοχές που έπειτα από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη μεγάλης ποσότητας ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Από αυτά διασφαλίζεται η αυξημένη παροχή υδάτων, η οποία είναι αναγκαία για την εύρυθμη λειτουργία των Υ.Η.Ε. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι κατάλληλες περιοχές βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τους καταναλωτές. Επομένως είναι υποχρεωτική η κατασκευή γραμμών μεταφοράς μεγάλου μήκους, προκειμένου να μεταφερθεί η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στα σημεία που αυτή καταναλώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους κατασκευής ενός Υ.Η.Ε.

1.4. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Σήμερα έχουν διερευνηθεί όλα τα κατασκευαστικά μέρη από τα οποία απαρτίζεται ένα Υ.Η.Ε. Παρόλα αυτά υπάρχουν ακόμα αντικείμενα τα οποία είτε δεν έχουν διερευνηθεί αρκετά, είτε είναι δυνατή η περαιτέρω διερεύνηση τους με διαφορετικό τρόπο προσέγγισης. Το τμήμα εκείνο των Υ.Η.Ε. έργων που πρόκειται να διερευνηθεί στην παρούσα εργασία αφορά τη μελέτη, τη σχεδίαση και την κατασκευή της γεννήτριας.

Η ανάπτυξη ανεξάρτητων Σ.Η.Ε. τα οποία βασίζονται στην ηλεκτροπαραγωγή που προέρχεται από την εκμετάλλευση υδάτινων ρευμάτων από Μ.Υ.Ε. περιλαμβάνει την ικανοποίηση διάφορων απαιτήσεων [Ξ9]. Η χρήση συμβατικού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού στην κατασκευή πολύ μικρών υδροηλεκτρικών εργοστασίων έχει αποδειχθεί ακριβή και αντισυμβατική, για αυτόν το λόγο έχουν διερευνηθεί διεξοδικά καινούριες σχεδιάσεις έτσι ώστε να επιτευχθεί η ικανοποιητική μείωση του κόστους αυτού [Ξ10]. Μια πολλά υποσχόμενη ιδέα από την οποία ικανοποιούνται αυτές οι προδιαγραφές αποτελεί ένα Μ.Υ.Ε. στο οποίο η μετάδοση της κίνησης από το στρόβιλο γίνεται άμεσα χωρίς να παρεμβάλλεται κιβώτιο μετάδοσης. Ένα από τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας αποτελεί η χρήση υδροστροβίλων δίνης (Vortex turbines) της εταιρείας Whirpool σε υδροηλεκτρικά έργα πολύ μικρής ισχύος και εξαιρετικά χαμηλού ύψους υδατόπτωσης [Ξ11]. Η απεικόνιση της σχεδίασης αυτού του στροβίλου στο περιβάλλον λογισμικού ANSYS, εμφανίζεται στο σχήμα 1.18.



Σχήμα 1.18: Απεικόνιση υδροστροβίλου δίνης σε περιβάλλον ANSYS [Ξ11, Fig. 6, page3]

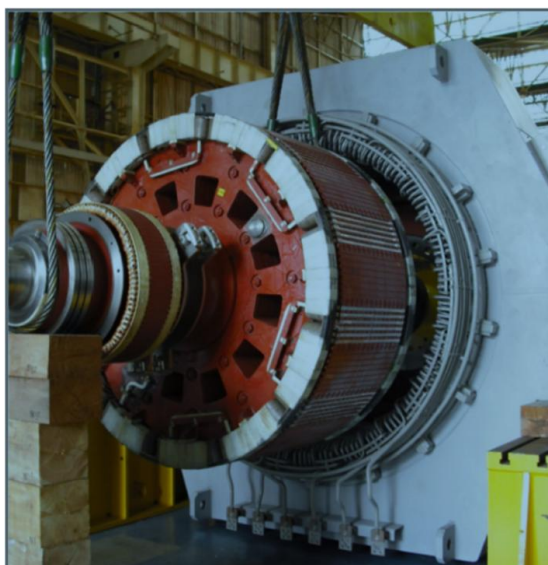
Επιπρόσθετα, η χρήση υδροστροβίλων τύπου Cross-Flow έχει διερευνηθεί σε εφαρμογές πολύ μικρής ισχύος [Ξ12]. Προκειμένου να επιτευχθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχουν υλοποιηθεί εφαρμογές οι οποίες βασίζονται στη χρήση των υδάτινων απόβλητων των πόλεων [Ξ13]. Στη σχεδίαση και την κατασκευή πολύ μικρής ισχύος Υ.Η.Σ. έχει επιτευχθεί η ενεργή συμμετοχή προπτυχιακών και μεταπτυχιακών φοιτητών, γεγονός το οποίο είχε ως αποτέλεσμα να αποκτηθεί πολύτιμη εμπειρία στο αντικείμενο [Ξ14]. Η σχεδίαση ευφών συστημάτων διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας έχει επιτευχθεί προκειμένου να επιτευχθεί η ρύθμιση της παραγόμενης τάσης και η διαχείριση των μεταβολών του φορτίου σε δίκτυα τα οποία τροφοδοτούνται από πολύ μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς [Ξ15]. Ακόμη έχει διερευνηθεί η χρήση καταδυόμενων γεννητριών σε Μ.Υ.Ε. στα πρότυπα των καταδυόμενων αντλιών [Ξ16]. Αυτές οι εφαρμογές όμως ενέχουν υψηλό ρίσκο μιας και ελλοχεύει ο κίνδυνος εισροής υδάτων σε περίπτωση βλάβης. Η ενδελεχής μελέτη των μετεωρολογικών δεδομένων που επικρατούν μιας περιοχής σε βάθος χρόνου έχουν ως αποτέλεσμα την κατασκευή Μ.Υ.Ε με υψηλούς βαθμούς απόδοσης με το μικρότερο δυνατό κατασκευαστικό κόστος [Ξ17- Ξ18].

Η χρήση των Α.Π.Ε. στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι πάντα απροβλημάτιστη. Ένα ουσιαστικό πρόβλημα που εμφανίζεται σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση

ηλεκτροπαραγωγής από αιολικά πάρκα είναι οι διακυμάνσεις της συχνότητας του δικτύου από τις προδιαγραφές του. Αυτό είναι ένα πρόβλημα που μπορεί να επιλυθεί με την τοποθέτηση ενός κατάλληλου Σ.Α.Ε. κλειστού βρόχου το οποίο ανιχνεύει τις μεταβολές και δίνει τις κατάλληλες εντολές στους ρυθμιστές ταχύτητας (governor) των υδροστροβίλων στους Υ.Η.Σ. Με τις εκάστοτε κατάλληλες ρυθμίσεις στην ταχύτητα των γεννητριών με τις οποίες έχουν συζευχθεί επιλύεται το πρόβλημα αυτό [Ξ19].

Για να επιτευχθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στους Υ.Η.Σ. είναι αναγκαία η χρήση γεννητριών στις οποίες η παρεχόμενη μηχανική ενέργεια στον άξονα τους από τους υδροστροβίλους θα μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Ανάλογα με τη σχεδίαση τους αυτές κατηγοριοποιούνται στις ακόλουθες βασικές κατηγορίες 1) Σύγχρονες γεννήτριες έκτυπων πόλων, 2) Σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών, 3) Ασύγχρονες γεννήτριες.

Οι σύγχρονες γεννήτριες έκτυπων πόλων (Salient Pole Synchronous Generator (SPSG)) αποτελούν τις πλέον δοκιμασμένες και εύρωστες ηλεκτρικές μηχανές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις ιδιαίτερα σε εκείνες που ο υδροστρόβιλος διαθέτει ταχύτητα περιστροφής ίση ή μεγαλύτερη από 600 R.P.M. έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες που αφορούν τη μετατροπή υφιστάμενων έκτυπων πόλων σε δρομείς κυλινδρικού δρομέα [Ξ20]. Στο σχήμα 1.19 εμφανίζεται η μορφή του δρομέα μετά τη μετατροπή του.



Σχήμα 1.19: Κυλινδρικός δρομέας σύγχρονης γεννήτριας Μ.Υ.Ε. [Ξ20, Fig. 3, page 4]

Οι σύγχρονες γεννήτριες έκτυπων πόλων σε πολλές εφαρμογές διατίθενται με τριφασικά τυλίγματα υψηλής τάσης. Για να μειωθεί τόσο το κατασκευαστικό κόστος, όσο και το κόστος συντήρησής τους, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των εξωτερικών συνδέσεων της περιέλιξης τους [Ξ21]. Στο σχήμα 1.20 εμφανίζονται οι συνδέσεις της περιέλιξης του στάτη της γεννήτριας.

Το επίπεδο της φαινόμενης ισχύος μιας σύγχρονης μηχανής προκύπτει από το επίπεδο της παραγόμενης ονομαστικής της τάσεως και από την ονομαστική ένταση του

ρεύματος γραμμής που πρέπει να παρέχει στο δίκτυο. Όταν η φαινομένη ισχύς της μηχανής υπερβαίνει σε μέγεθος τα 100 kVA η συνδεσμολογία του στάτη πρέπει να είναι δημιουργεί ικανό αριθμό παράλληλων κλάδων. Ένα τύλιγμα που διαθέτει παράλληλους κλάδους εμφανίζει δυσκολίες στην υλοποίηση της συνδεσμολογίας του [Ξ22].



Σχήμα 1.20: Συνδέσεις περιέλιξης στάτη σύγχρονης γεννήτριας Υ.Η.Σ. [Ξ21, Fig. 1, page 1]

Αυτή τη στιγμή υπάρχουν σε λειτουργία πολλά Υ.Η.Ε. τα οποία έχουν κατασκευαστεί εδώ και αρκετές δεκαετίες. Πολλές φορές η κατάσταση των μονώσεων των γεννητριών τους δεν είναι καλή, οπότε μια αναβάθμιση τους η οποία θα επιτευχθεί με την αλλαγή της περιέλιξης που φέρουν είναι επιβεβλημένη. Η περιέλιξη του στάτη αποτελεί το βασικότερο παράγοντα που λαμβάνεται υπόψη στην περίπτωση αναβάθμισης παλαιών σύγχρονων γεννητριών που χρησιμοποιούνται σε Υ.Η.Σ. Το κύριο μέλημα που αφορά τη σχεδίαση των πηνίων της περιέλιξης του στάτη αποτελεί η μέριμνα για αναβάθμιση της κλάσης των μονώσεων τους έτσι ώστε να αντέχουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας, ταυτόχρονα με την επίτευξη της μείωσης των απωλειών χαλκού σε αυτά [Ξ23, Ξ24].

Μια ακόμη πηγή απωλειών των σύγχρονων γεννητριών είναι οι απώλειες πυρήνα. Ο υπολογισμός τους κατά τη φάση της σχεδίασης αποτελεί μια περίπλοκη διαδικασία στα αποτελέσματα της οποίας εμφανίζονται αποκλίσεις εφόσον συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιούνται στο δοκίμιο της μηχανής μετά την κατασκευή του. Για το λόγο αυτό κατά την διεξαγωγή των μελετών η γεωμετρία των πυρήνων μοντελοποιείται και η συμπεριφορά τους αναλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [Ξ25]. Οι απώλειες πυρήνα ανήκουν σε δύο κατηγορίες στις απώλειες δινορρευμάτων και στις απώλειες υστέρησης. Από τις απώλειες δινορρευμάτων ή απώλειες Eddy προκαλούνται απώλειες θερμότητας στους πυρήνες των ηλεκτρικών μηχανών. Αυτές είναι ιδιαίτερα εμφανείς στους πυρήνες του έκτυπου πόλου του δρομέα της γεννήτριας. Για την αντιμετώπιση τους εφαρμόζονται μοντέλα της γεωμετρίας του έκτυπου πόλου των οποίων πραγματοποιείται η προσομοίωση με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων [Ξ26].

Πολλές φορές οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί κατασκευάζονται ως αντλησιοταμιευτικοί. Στην περίπτωση αυτή εφόσον τα ύδατα έχουν χρησιμοποιηθεί μια φορά και έχει παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια, η απορροή τους καταλήγει σε ένα ταμιευτήρα που βρίσκε-

ται σε χαμηλότερο επίπεδο. Οπότε σε αυτήν την περίπτωση αντιστρέφεται η λειτουργία τους και λειτουργούν ως σύγχρονοι κινητήρες (αντλίες) με τη βοήθεια των οποίων πραγματοποιείται η επαναπροώθηση του νερού στο επίπεδο που βρισκόταν πριν, προκειμένου να επιτευχθεί η επαναχρησιμοποίηση του [Ε27]. Η επίτευξη της τροφοδοσίας των σύγχρονων μηχανών από το δίκτυο και η λειτουργία τους ως κινητήρων επιτυγχάνεται με τη χρήση μετατροπέων. Σε αυτήν την περίπτωση επιτελείται η διερεύνηση της επίδρασης της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας στο βαθμό απόδοσης της γεννήτριας [Ε28].

Όπως έχει προαναφερθεί ένα σημαντικό πρόβλημα στη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών γενικά και των σύγχρονων γεννητριών ειδικά είναι η απαγωγή της αναπτυσσόμενης θερμότητας από τα ενεργά μέρη της και η διατήρηση της θερμοκρασίας σε επιτρεπτά επίπεδα. Τα ενεργά μέρη της μηχανής είναι ο πυρήνας και τα τυλίγματα. Διατίθενται διάφοροι μέθοδοι απαγωγής της θερμοκρασίας. Συνοπτικά αναφέρονται η χρήση φυσικής και εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα, η χρήση νερού, αλλά και υδρογόνου. Έχει ήδη πραγματοποιηθεί η διερεύνηση και άλλων μεθόδων, οι οποίες αποδείχθηκε ότι είναι εξίσου αποτελεσματικές. Μια από αυτές είναι η μέθοδος ψύξης με εξάτμιση που εφαρμόστηκε σε μονάδα Υ.Η.Σ. ισχύος 400 MW του εργοστασίου της περιοχής LiJiaXia της Κίνας [Ε29].

Κατά τη λειτουργία των γεννητριών των Υ.Η.Σ. εμφανίζονται διάφορα σφάλματα για τα οποία πρέπει να ληφθεί μέριμνα για την αντιμετώπιση τους. Αυτή περιλαμβάνει την προμήθεια και σύνδεση κατάλληλων διατάξεων προστασίας, οι οποίες θα ενεργοποιηθούν μόλις το σφάλμα ανιχνευθεί, προκειμένου να αποφευχθούν ζημιές στη μηχανή. Μια συνηθισμένη περίπτωση σφάλματος μπορεί να συμβεί κατά τη σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται παραλληλισμός και, προκειμένου να επιτευχθεί, πρέπει να πληρούνται συγκεκριμένες συνθήκες. Αν ο παραλληλισμός πραγματοποιηθεί, ενώ δεν πληρούνται όλες οι αναγκαίες προϋποθέσεις τότε η συμπεριφορά της γεννήτριας πρέπει να διερευνηθεί έτσι, ώστε να πραγματοποιηθεί η κατάλληλη ρύθμιση των διατάξεων προστασίας. Η διερεύνηση πραγματοποιείται με τη χρήση ενός κυκλωματικού μοντέλου του τυλίγματος διέγερσης της γεννήτριας, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την παρατήρηση φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία στο δρομέα της μηχανής, τα οποία παρατηρούνται δύσκολα [Ε30].

Στη μεγάλη πλειοψηφία των σύγχρονων γεννητριών έκτυπων πόλων χρησιμοποιούνται τυλίγματα αποσβέσεως. Αυτά τοποθετούνται σε ειδικά διαμορφωμένες αύλακες που βρίσκονται στα πέδιλα των πόλων του δρομέα. Η σύνδεσή τους έχει τη μορφή κλωβού. Κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της μηχανής οι παρακάτω λειτουργίες επιτελούνται από τα τυλίγματα αποσβέσεως: 1) Κατά την τροφοδοσία συμμετρικών και ασύμμετρων φορτίων βελτιώνεται η κυματομορφή της τάσεως. Ουσιαστικά καταστέλλονται οι αρμονικές, 2) Περιορίζεται η ασυμμετρία της τριφασικής εναλλασσόμενης τάσης υπό συνθήκες ασύμμετρης φόρτισης. Δηλαδή καταστέλλεται η συνιστώσα αρνητικής ακολουθίας της τάσης και 3) Μειώνεται η θερμοκρασία λειτουργίας στο πέδιλο του έκτυπου πόλου [Ε31,Ε32].

Στην πράξη η θερμότητα που παράγεται από τις απώλειες δινορρευμάτων μπορεί να οδηγήσει στη διακοπή του τυλίγματος απόσβεσης, και το τύλιγμα απόσβεσης αποτελεί ένα βασικό στοιχείο για τη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας των γεννητριών [Ε33]. Το πρότυπο των ρευμάτων του τυλίγματος απόσβεσης και των ράβδων (μπάρες) διασύνδεσης του στη μεταβατική κατάσταση παρέχει περιεκτική γνώση για τις ηλεκτρομαγνητικές επιδόσεις του και τη δυνητική βελτίωση της σχεδίασης τους [Ε34]. Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στα χαρακτηριστικά σχεδίασης των τυλιγμάτων απόσβεσης, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί στο βαθμό απόδοσης και την ποιότητα της ισχύος [Ε35, Ε36-Ε37].

Εξαιτίας της εκκεντρότητας που εμφανίζεται ανάμεσα στο δρομέα και το στάτη η οποία οφείλεται στα ρουλεμάν (σφαιροτριβείς) αναπτύσσεται στο διάκενο μαγνητική δύναμη. Η τιμή της μαγνητικής δύναμης αυτής εξαρτάται από τη διαμόρφωση του δρομέα και μπορεί να επιδεινωθεί ανάλογα με τον αριθμό των πόλων και τη σχεδίαση της σφήνας του δρομέα [Ε38].

Ακόμη στη διεθνή βιβλιογραφία εμφανίζονται μελέτες σχεδίασης σύγχρονων γεννητριών έκτυπων πόλων οι οποίες βασίζονται σε περιελίξεις που διαθέτουν τυλίγματα κατασκευασμένα από υπεραγωγούς υψηλής θερμοκρασίας (High-Temperature Superconductors) [Ε39]. Μέσω των μελετών που πραγματοποιούνται πάνω στη χρήση υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας στοχεύουν στην αύξηση της πυκνότητας ισχύος των σύγχρονων μηχανών (kW/kg).

Η εφαρμογή της τεχνολογίας λειτουργίας συνεχόμενης υπερφόρτισης μεγάλων σύγχρονων γεννητριών Υ.Η.Σ. έχει εφαρμοστεί επιτυχώς τα τελευταία χρόνια. Αυτή βασίζεται κυρίως στην ανακατασκευή του στάτη [Ε40, Ε41]. Σε γενικές γραμμές εφόσον η γεννήτρια έχει συμπληρώσει 30-40 έτη λειτουργίας πραγματοποιείται γενική επιθεώρηση και συντήρηση, ενώ η περιέλιξη του στάτη αντικαθίσταται. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αρχική διαμόρφωση της περιέλιξης με τη χρήση αγωγών, μονωτικών και βερνικιών νέας τεχνολογίας. Σε αυτήν την περίπτωση αυξάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας του στάτη (ουσιαστικά μεταπίπτει σε ανώτερη κλάση μόνωσης) και με αυτό τον τρόπο μπορεί να δεχθεί υψηλότερη ηλεκτρική φόρτιση και να εξυπηρετήσει για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα φορτίο μεγαλύτερο από το ονομαστικό του. Επιπρόσθετα, εφόσον ο αριθμός των αυλάκων του στάτη και οι διαστάσεις τους το επιτρέπουν, συμπληρωματικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια καινούρια διαμόρφωση της περιέλιξης.

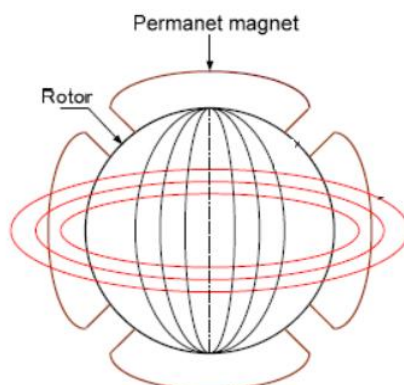
Προκειμένου να επιτευχθεί η μελέτη των χαρακτηριστικών μια σύγχρονης μηχανής απαιτείται η χρήση κώδικα. Ο κώδικας μπορεί ενίοτε να βρίσκεται ενσωματωμένος σε ένα πρόγραμμα ή να έχει γραφεί από το χρήστη σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού. Προκειμένου αυτός να καταστεί περισσότερο εύχρηστος σε κάποιες περιπτώσεις κατασκευάζεται ένα γραφικό περιβάλλον διεπαφής με το χρήστη (Graphical User Interface) [Ε42,Ε43].

Για να επιτευχθεί η ανάλυση των γεωμετρικών παραμέτρων σχεδίασης, επιλέγονται οι τιμές της ηλεκτρικής και της μαγνητικής φόρτισης στα διάφορα τμήματα μιας γεννή-

τριας εφαρμόζεται η ανάλυση της με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται η χρήση του κατάλληλου μοντέλου για τη μηχανή [Ε40].

Η επόμενη κατηγορία γεννητριών που χρησιμοποιείται σε Υ.Η.Σ. είναι οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών (Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)). Αυτός ο τύπος γεννητριών ομοιάζει κατασκευαστικά με τις σύγχρονες γεννήτριες έκτυπων πόλων, διότι η κατασκευή του στάτη είναι πανομοιότυπη. Η ουσιαστική διαφορά τους έγκειται στην κατασκευή του δρομέα. Στην περίπτωση αυτή οι έκτυποι πόλοι με τα τυλίγματα τους αντικαθίστανται από κατάλληλα διαμορφωμένους μόνιμους μαγνήτες, οι οποίοι έχουν υπολογιστεί έτσι ώστε να δημιουργείται το αναγκαίο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο. Όταν οι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του δρομέα θεωρείται ότι ο συντελεστής κάλυψης του πολικού βήματος είναι ίσος με τη μονάδα. Ο λόγος ανάμεσα στην επιφάνεια των μόνιμων μαγνητών και το διάκενο λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα και ορίζεται ως συντελεστής συγκέντρωσης μαγνητικής ροής [Ε44]. Η διάταξη των μόνιμων μαγνητών στην επιφάνεια του δρομέα για μια τετραπολική μηχανή εμφανίζεται στο σχήμα 1.21.

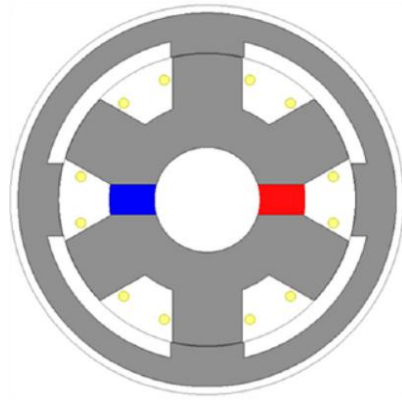
Το πάχος του μαγνήτη αποτελεί μια βασική παράμετρο σχεδίασης των σύγχρονων γεννητριών μόνιμων μαγνητών. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να θεωρηθεί ένα ελάχιστο πάχος του μαγνήτη, προκειμένου να αποφευχθεί η απομαγνήτιση του [Ε45].



Σχήμα 1.21: Μόνιμοι μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα. [Ε44, Fig. 4, page 713]

Τα βασικά πλεονεκτήματα της σχεδίασης σύγχρονων γεννητριών μόνιμων μαγνητών είναι οι μικρότερες διαστάσεις, το μικρότερο βάρος, η ευκολία της συντήρησής τους και η μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος εις βάρος του κόστους του [Ε46].

Μια ακόμη επιλογή αποτελεί η σχεδίαση σύγχρονων γεννητριών μόνιμων μαγνητών, οι οποίοι τοποθετούνται στο εσωτερικό του πέλδου έκτυπου πόλου [Ε47]. Επιπρόσθετα από άποψη σχεδίασης έχει διερευνηθεί η κατασκευή σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών διπλής εκτυπότητας. Στην περίπτωση αυτή τόσο οι μόνιμοι μαγνήτες όσο και τα τυλίγματα παραγωγής της εναλλασσόμενης τάσης τοποθετούνται στο στάτη, ενώ ο δρομέας δεν φέρει μαγνήτες ή τυλίγματα και περιστρέφεται εξωτερικά [Ε48]. Η διάταξη του δρομέα εμφανίζεται στο σχήμα 1.22.



Σχήμα 1.22: Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών διπλής εκτυπότητας [Ξ48, Fig. 1a, page 3]

Οι ασύγχρονες γεννήτριες αποτελούν την τελευταία κατηγορία γεννητριών οι οποίες χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπαραγωγή κυρίως πολύ μικρών Υ.Η.Ε. κάτω του 1 MVA. Η βασική τους σχεδίαση έλκει την καταγωγή της από τους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα. Σε αυτήν την περίπτωση ο δρομέας πρέπει να περιστρέφεται από τον υδροστρόβιλο με ταχύτητα μεγαλύτερη της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Επιπρόσθετα πρέπει να χρησιμοποιηθεί συστοιχία πυκνωτών κατάλληλα συνδεσμολογημένη, προκειμένου να παρέχει την άεργο ισχύ που απαιτείται για τη διέγερση της [Ξ49]. Ακόμη, επιβάλλεται η χρήση διάταξης ηλεκτρονικών ισχύος για τη σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο.

Μια παραλλαγή της προαναφερθείσας σχεδίασης αποτελεί η σχεδίαση διπλής τροφοδότησης στο στάτη, η οποία περιλαμβάνει 2 ανεξάρτητα τυλίγματα στο στάτη. Αυτά τροφοδοτούνται ξεχωριστά μέσω μετατροπέα [Ξ50, Ξ51, Ξ52].

Για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή σχεδίαση μιας γεννήτριας ακολουθούνται συγκεκριμένες διαδικασίες. Αρχικά χρησιμοποιούνται οι τύποι της κλασικής σχεδίασης των ηλεκτρικών μηχανών οι οποίοι έχουν προέλθει και από τη συσσωρευμένη εμπειρία κατασκευαστών κατά το παρελθόν. Αφού έχουν επιλεγεί οι τιμές των βασικών μεγεθών της διαστασιολόγησης οι οποίες αναφέρονται στα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά όπως: ονομαστική τάση, συχνότητα, ισχύς, ηλεκτρική φόρτιση των τυλιγμάτων στάτη και δρομέα (εφόσον η σχεδίαση το απαιτεί) υπολογίζονται οι βασικές γεωμετρικές διαστάσεις όπως είναι το μήκος, και η εξωτερική και εσωτερική διάμετρος στάτη. Στη συνέχεια να επιτευχθεί η επιβεβαίωση των στοιχείων που έχουν υπολογισθεί. Για να καταστεί δυνατή η επιβεβαίωση γίνεται χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων [Ξ53, Ξ54]. Υλοποιείται η γεωμετρική σχεδίαση της μηχανής και τοποθετούνται σε κάθε τμήμα της τα υλικά, τα ελίγματα και τα ρεύματα από τα οποία διαρρέονται με τη χρήση κατάλληλου προγράμματος.

Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη σχεδίαση εφόσον πραγματοποιηθεί η επιβεβαίωση είτε θα πραγματοποιηθεί μια εκτεταμένη ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων της μηχανής είτε θα πρέπει να εφαρμοστεί κάποιος αλγόριθμος βελτιστοποίησης [Ξ55]. Και στις δύο περιπτώσεις πρέπει να χρησιμοποιηθεί λογισμικό. Στις περισσότερες περιπτώσεις επιδιώκεται η μείωση του όγκου και επομένως του βάρους της μηχανής, με

ταυτόχρονη μείωση των απωλειών και των αρμονικών της παραγόμενης τάσης [Ε56, Ε57, Ε58]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους κατασκευής και του κόστους λειτουργίας της γεννήτριας.

1.5. Συμπεράσματα – προτεινόμενη δομή διπλωματικής εργασίας

Η προτεινόμενη δομή της υφιστάμενης διπλωματικής εργασίας παρατίθεται παρακάτω:

1. Αρχές σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών

- Βασικές αρχές και νόμοι σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών
- Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών
- Σχεδίαση μαγνητικού κυκλώματος
- Ροή σκέδασης
- Αντίσταση
- Κύριες διαστάσεις περιστρεφόμενης μηχανής
- Μόνωση ηλεκτρικής μηχανής
- Ψύξη ηλεκτρικής μηχανής
- Συμπεράσματα

2. Δομή και λειτουργία σύγχρονης γεννήτριας

- Γενικά περί σύγχρονης γεννήτριας και δομής της
- Αρχή λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας
- Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα
- Λειτουργία σύγχρονης μηχανής κυλινδρικού δρομέα
- Ισοδύναμο κύκλωμα και λειτουργία σύγχρονης γεννήτριας με δρομέα έκτυπων πόλων
- Χαρακτηριστικές ανοικτού κυκλώματος και βραχυκυκλώματος
- Μόνιμη και μεταβατική συμπεριφορά γεννητριών
- Δοκιμές γεννητριών
- Δομή γεννητριών
- Συμπεράσματα

3. Κλασσικός σχεδιασμός σύγχρονης γεννήτριας

- Τυποποίηση
- Απαιτήσεις γεννήτριας
- Ονομαστικά μεγέθη και διαστάσεις
- Προκαταρκτική σχεδίαση
- Διαδικασία σχεδίασης μέσω παραδείγματος
- Περιορισμοί θορύβου
- Καταπονήσεις από υπερτάσεις και μονώσεις
- Συμπεράσματα

4. Βασικές αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

- Εισαγωγή
- Πεδιακά προβλήματα με συνοριακές συνθήκες
- Κλασσική μέθοδος επίλυσης πεδιακού προβλήματος
- Κλασσική μέθοδος υπολοίπου – Μέθοδος Galerkin
- Κλασσική μέθοδος απόκλισης – Μέθοδος Rayleigh – Ritz
- Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

5. Βασικές αρχές εφαρμογής πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις

- Εισαγωγή
- Γραμμική παρεμβολή συνάρτησης φ
- Εφαρμογή της μεθόδου απόκλισης
- Περιγραφή απλών ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων
- Συμπεράσματα

6. Διαδικασία ανάλυσης με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

- Εισαγωγή
- Μείωση του πεδιακού προβλήματος σε δύο διαστάσεις
- Συνοριακές συνθήκες
- Υπολογισμοί μετά την επίλυση
- Συμπεράσματα

7. Επίλυση σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών

- Εισαγωγή στις μαγνητικές μηχανές
- Αναλυτική μελέτη μαγνητικής μηχανής
- Ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων
- Εισαγωγή στις σύγχρονες γεννήτριες με τύλιγμα διέγερσης
- Υπολογισμός των χαρακτηριστικών μη φόρτισης σύγχρονων γεννητριών με τύλιγμα διέγερσης
- Υπολογισμός επαγωγικής αντίδρασης ευθέως άξονα
- Υπολογισμός επαγωγικής αντίδραση εγκάρσιου άξονα
- Υπολογισμός συντελεστών επαγωγής
- Φαινόμενο κορεσμού
- Υπολογισμός συντελεστών αυτεπαγωγής
- Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών
- Εισαγωγή στις σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών
- Υπολογισμός αντιροπής
- Συμπεράσματα

8. Προσομείωση σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων

- Ανάπτυξη γεωμετρικού μοντέλου

- Μελέτη πεδιακής συμπεριφοράς γεννήτριας
 - Κυκλωματική συμπεριφορά σύγχρονης γεννήτριας
 - Μεθοδολογία βελτιστοποίησης
 - Συμπεράσματα
9. Τεχνικές βελτιστοποίησης
- Εισαγωγή
 - Εφαρμογή
 - Συμπεράσματα
10. Συμπεράσματα και περιοχές για περαιτέρω έρευνα
- Γενικά συμπεράσματα - Περιοχές για περαιτέρω έρευνα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αρχές Σχεδίασης Ηλεκτρικών Μηχανών

2.1. Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος απαρτίζονται από τις σύγχρονες γεννήτριες, τους μετατροπείς και τους κινητήρες, τους μετασχηματιστές και τους επαγωγικούς κινητήρες. Η ευρεία εφαρμογή των ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος μπορεί να ειπωθεί ότι οφείλεται στην ετεροπολική διάταξη και στο μετασχηματιστή.

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι ιδιαίτερα χρήσιμη λόγω της ευκολίας με την οποία μπορεί να διανεμηθεί και να μετατραπεί σε άλλες επιθυμητές μορφές. Σήμερα, η κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μηχανική μορφή είτε άμεση (όπως στους υδραυλικούς ταμιευτήρες αποθήκευσης ή στους ποταμούς) ή από τη χημική ενέργεια ή την πυρηνική ενέργεια μέσω της θερμότητας. Μια αξιόπιστη άμεση μέθοδος μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική πραγματοποιείται με τη χρήση της μηχανικής δύναμης που αναπτύσσεται όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Η κίνηση ενός αγωγού μέσα στο μαγνητικό πεδίο ενός πόλου έχει ως επακόλουθο αποτέλεσμα την αναστροφή της πολικότητας οδηγεί στην παραγωγή μιας επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Η.Ε.Δ.), η οποία αλλάζει πρόσημο (π.χ. κατεύθυνση) σύμφωνα με την αλλαγή στη μαγνητική πολικότητα : συνοπτικά, μια εναλλασσόμενη Η.Ε.Δ. Έτσι όλες οι συνήθεις ηλεκτρικές μηχανές εντάσσονται στην κατηγορία των μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος.

Η ευρύτερη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας επέβαλε την ανάπτυξη των συστημάτων μεταφοράς και διανομής της. Απαιτείται η ύπαρξη συστημάτων μεταφοράς προκειμένου: α) Να επιτρέψει την οικονομική εκμετάλλευση των φυσικών πηγών ενέργειας (π.χ. υδατοπτώσεις ή ταμιευτήρες αποθήκευσης νερού ή πεδία εξόρυξης άνθρακα) οι οποίοι βρίσκονται πολύ μακριά από τα κέντρα ζήτησης ενέργειας (π.χ. μεγάλα έργα, βιομηχανικές περιοχές ή πόλεις), β) Να καταστήσει δυνατή τη συγκέντρωση των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής σε μερικούς μεγάλους σταθμούς που έχουν τοποθετηθεί ευνοϊκά ως προς τις φυσικές πηγές ενέργειας, γ) Να επιτραπεί η διασύνδεση των δικτύων ή των περιοχών διανομής για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία, η οικονομία και αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές.

Μια υψηλή τάση είναι επιθυμητή για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ισχύος, προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση των απωλειών θερμότητας $I^2 \cdot R$ και να περιοριστεί η ποσότητα του υλικού των αγωγών. Αφετέρου, για διάφορους λόγους που συνδέονται με την ασφάλεια και την ευκολία, για τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται ένα πολύ χαμηλότερο επίπεδο τάσης. Με τη χρήση μετασχηματιστών η διαδικασία καθίσταται εύκολη και από οικονομική άποψη δυνατή.

Έτσι το γεγονός ότι η ηλεκτροπαραγωγή αποτελεί μια εγγενή παραγωγή Η.Ε.Δ. εναλλασσόμενου ρεύματος, συνδυαζόμενη με το πλεονέκτημα του μετασχηματισμού της εναλλασσόμενης τάσης, παρέχει το βασικό λόγο για την ευρεία ανάπτυξη των Σ.Η.Ε. εναλλασσόμενου ρεύματος. Η παράλληλη ανάπτυξη των κινητήρων καθώς και άλλων μεθόδων αξιοποίησης ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος αποτέλεσε ένα φυσιολογικό επακόλουθο.

Σε καμμία περίπτωση δεν πρέπει να υποτεθεί ότι το Σ.Η.Ε. εναλλασσόμενου ρεύματος αντιπροσωπεύει μια τελειότητα. Εκτός από την υπεροχή των κινητήρων συνεχούς ρεύματος σε ορισμένες εφαρμογές, ιδιαίτερα όπου επιθυμείται ο έλεγχος της ταχύτητας, ήδη έχουν εξελιχθεί και τεθεί σε λειτουργία συστήματα μεταφοράς που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης. Ωστόσο, ενώ είναι βέβαιο ότι αναμένονται μικρές ή μεγάλες αλλαγές στην παραγωγή και στη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι πολύ πιθανό ότι οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος θα παραμείνουν σημαντικές συνιστώσες της παραγωγής, των εφαρμογών και της χρησιμοποίησης της ηλεκτρικής ενέργειας.

2.2. Συμπεριφορά κυκλωμάτων

Εάν εφαρμοστεί μια τάση u σε ένα κύκλωμα αντίστασης R και αυτεπαγωγής L σύνδεσης σειράς θα διαρρέεται από ένα ρεύμα i , το οποίο μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση (2.1).

$$v = R \cdot i + L \cdot (di/dt) \quad (2.1)$$

Εάν η u είναι μια σταθερή συνεχή τάση V , το ρεύμα μόνιμης κατάστασης λαμβάνει τιμή $I = V/R$, διότι $di/dt = 0$ λόγω της έλλειψης αλλαγών, αλλά όποτε οι συνθήκες αλλάζουν (π.χ. μέσω της διακοπής και αποκατάστασης της τροφοδοσίας ή με την αλλαγή των παραμέτρων) η νέα μόνιμη κατάσταση επιτυγχάνεται μέσω μιας μεταβατικής κατάστασης. Τότε, το στιγμιαίο ρεύμα μπορεί να γραφεί σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$i = i_s + i_t \quad (2.2)$$

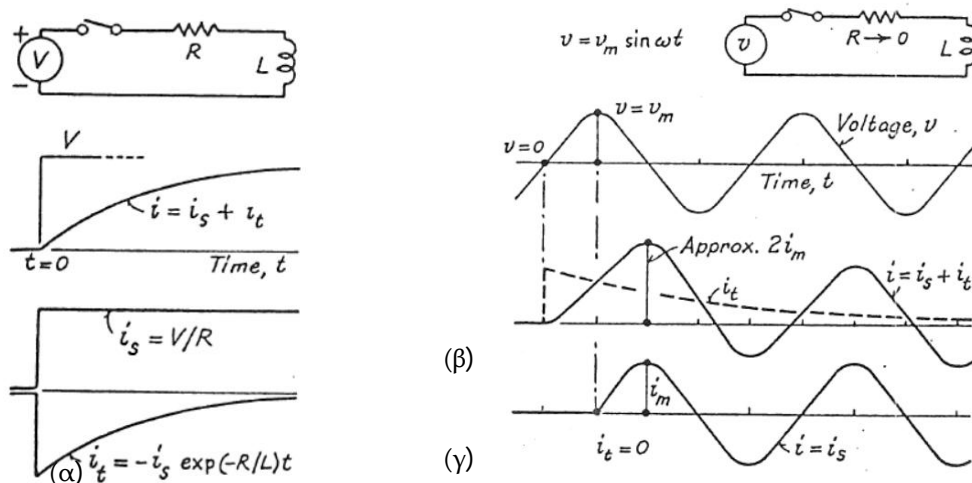
όπου i_s είναι το τελικό ρεύμα μόνιμης κατάστασης και i_t είναι η προσωρινή μεταβατική συνιστώσα. Η εξίσωση της μεταβατικής συνιστώσας του ρεύματος i_t στο πεδίο του χρόνου εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους του κυκλώματος, και για το κύκλωμα R - L σύνδεσης σειράς που έχει επιλυθεί είναι η εκθετική συνάρτηση (2.3)

$$i_t = i_0 \cdot e^{(-R/L) \cdot t} \quad (2.3)$$

Στο σχήμα 2.1.α εμφανίζονται οι συνιστώσες μόνιμης, μεταβατικής κατάστασης και το συνολικό ρεύμα που προκύπτει για μια αρχικοποίηση της μεταβατικής κατάστασης, όταν η τάση τροφοδοσίας είναι ίση με V . Επειδή το ρεύμα τη χρονική στιγμή που κλείνει ο διακόπτης ($t = 0$) είναι μηδενικό (και στη συνέχεια δεν μπορεί να αυξηθεί γρηγορότερα από το λόγο V/L), τότε αρχικά η συνιστώσα του ρεύματος μόνιμης κατάστασης i_s πρέπει να ακυρωθεί από τη μεταβατική συνιστώσα i_t σύμφωνα με την εξίσωση (2.4).

$$i = i_s + i_t = i_s - i_s \cdot e^{(-R/L) \cdot t} = (V/R) \cdot [1 - e^{(-R/L) \cdot t}] \quad (2.4)$$

Αυτή αποτελεί μια πολύ γνωστή περίπτωση εφαρμογής στην πράξη της διακοπής και αποκατάστασης της τροφοδοσίας κυκλωμάτων διέγερσης συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 2.1: Μεταβατικά φαινόμενα σε κυκλώματα R-L σειράς [Ξ59, Fig. 1, page 3]:

- α) Συνιστώσες μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης ρευμάτων κυκλώματος R-L,
- β) Ρεύμα με πλήρη ασυμμετρία, γ) Ρεύμα χωρίς μεταβατική συνιστώσα

Εάν η ημιτονοειδής τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος έχει γενική μορφή που περιγράφεται από την εξίσωση $v = v_m \cdot \sin \omega t$, τότε το ρεύμα μόνιμης κατάστασης έχει και αυτό ημιτονοειδή μορφή και προκύπτει από τη σχέση $i_s = (v_m/Z) \cdot \sin(\omega t - \theta)$, όπου Z είναι η σύνθετη αντίσταση και υπολογίζεται από τη σχέση $Z = \sqrt{(R^2 + \omega^2 \cdot L^2)}$, ενώ η γωνία θ υπολογίζεται από τη σχέση $\theta = \tan^{-1}(X_L/R)$. Αν υποθεθεί ότι κατά τη διάρκεια της μεταβολής της τάσης τροφοδοσίας αυτή αποκαθίσταται τη χρονική στιγμή $t = t_0$, το ρεύμα μόνιμης κατάστασης για αυτή τη στιγμή θα υπολογισθεί από τη σχέση $(v_m/Z) \cdot \sin(\omega t_0 - \theta)$. Όμως στην πράξη το ρεύμα ισούται με μηδέν, έτσι αρχικά πάλι η μεταβατική συνιστώσα του ρεύματος i_t αναιρεί τη συνιστώσα του ρεύματος μόνιμης κατάστασης i_s . Αυτό έχει ως επακόλουθο την εκθετική μείωση της μεταβατικής συνιστώσας του ρεύματος i_t όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Επομένως, το ρεύμα που προκύπτει μετά το κλείσιμο του διακόπτη τροφοδοσίας υπολογίζεται από το άθροισμα των ρευμάτων $i = i_s + i_t$ και μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση (2.5):

$$i = (v_m/Z) \cdot [\sin(\omega t - \theta) - \sin(\omega t_0 - \theta) \cdot e^{(-R/L) \cdot (t-t_0)}] \quad (2.5)$$

Συνήθως, στα κυκλώματα των ηλεκτρικών μηχανών η τιμή της ωμικής αντίστασης των τυλιγμάτων R λαμβάνει πολύ μικρότερες τιμές από εκείνη της επαγωγικής αντίδρασης X . Επομένως κατά προσέγγιση ισχύει ότι $Z \approx X$ και $\theta \approx 90^\circ$. Για αυτές τις συνθήκες ο υπολογισμός του ρεύματος μπορεί να πραγματοποιηθεί από τη σχέση (2.6).

$$i \approx (v_m/X) \cdot [-\cos \omega t + \cos \omega t_0 \cdot e^{(-R/L) \cdot (t-t_0)}] \quad (2.6)$$

Εφόσον η τάση τροφοδοτηθεί στο κύκλωμα όταν λαμβάνει μηδενική τιμή ($t_0 = 0, \pi/\omega, 2\pi/\omega, \dots$), ο μεταβατικός όρος έχει τη μέγιστη τιμή του η οποία είναι ίση με v_m/X και το ρεύμα που προκύπτει ξεκινά από μηδενική τιμή με πλήρη ασυμμετρία όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.β. Στην αντίθετη περίπτωση εάν ο διακόπτης κλείσει τη

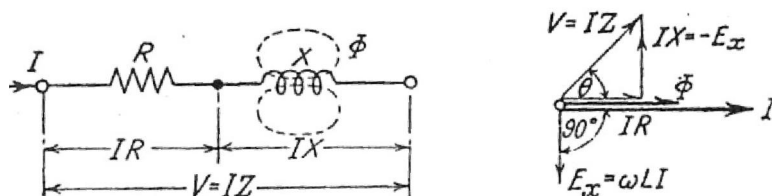
χρονική στιγμή που λαμβάνει η τάση τη μέγιστη τιμή, το προκύπτουν ρεύμα επιτυγχάνει τη μόνιμη κατάσταση στιγμιαία χωρίς να υπάρχει μεταβατική συνιστώσα όπως εμφανίζεται στο σχήμα 2.1.γ. Παρατηρείται ότι η κυματομορφή του ρεύματος του σχήματος 2.1.β έχει σχεδόν διπλάσιο πλάτος από ότι εκείνη του σχήματος 2.1.γ. Αυτό αποτελεί ένα παράδειγμα του φαινομένου του διπλασιασμού. Από ενδιάμεσες στιγμές μεταγωγής αποδίδεται μερική ασυμμετρία, με μικρότερες μεταβατικές συνιστώσες.

Μόνιμες και μεταβατικές καταστάσεις: Συνηθίζεται η θεωρία κυκλωμάτων να αναπτύσσεται στη μόνιμη κατάσταση, με τη χρήση μιγαδικής αλγεβρικής ανάλυσης και διανυσματικών διαγραμμάτων. Η εξέταση των μεταβατικών καταστάσεων απαιτεί την επιστροφή σε πιο βασικές έννοιες.

Συμβάσεις μόνιμης κατάστασης: Ένας φασιθέτης τάσης V , ο οποίος έχει μέτρο V και σχεδιάζεται σε μια αυθαίρετη γωνία α ενός ορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων μπορεί να περιγραφεί σύμφωνα με την εξίσωση (2.7).

$$V = [V] \angle \alpha = V_1 + j V_2 = V \cdot (\cos \alpha + j \sin \alpha) = V \cdot e^{j\alpha} \quad (2.7)$$

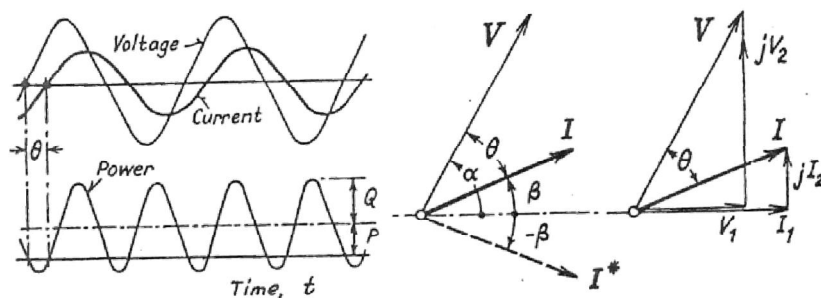
Στο σχήμα 2.2 ένα κύκλωμα συνδεσμολογίας σειράς το οποίο αποτελείται από μια ωμική αντίσταση R και μια επαγωγική αντίδραση $j\omega L = jX$. Όταν σε αυτό εφαρμοστεί μια ενεργός (rms) τιμή τάσης V , τότε θα διαρρέεται από ένα ρεύμα I έτσι ώστε να ισχύει $V = I \cdot (R + jX) = I \cdot Z$. Ο τελεστής της σύνθετης αντίστασης $Z = Z \angle \theta = \sqrt{(R^2 + X^2)} \cdot \angle \arctan(X/R)$ δεν αντιπροσωπεύει μια ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη ποσότητα. Εάν η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα ισούται με $I = I \angle \beta$, τότε το μέτρο της υπολογίζεται από τη σχέση $I = (V/Z)$, ενώ η γωνία θ ορίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στις γωνίες α και β : $\theta = \alpha - \beta$



Σχήμα 2.2: Κύκλωμα R-L σειράς με το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα [E59, Fig. 2A, page 4]

Η τάση μπορεί να θεωρηθεί ως το μιγαδικό άθροισμα των συνιστωσών $I \cdot R$ και $I \cdot X$. Η τελευταία είναι η συνιστώσα που αντιτίθεται στην E_x (η αναπτυσσόμενη Η.Ε.Δ. της αυτεπαγωγής στην L) της οποίας η στιγμιαία τιμή υπολογίζεται από τη σχέση: $e_x = -L \cdot (di/dt)$. Η μαγνητική ροή Φ του πηνίου είναι ανάλογη προς το ρεύμα, εάν μπορούν να αγνοηθούν τα φαινόμενα του κορεσμού, και αναπαρίσταται από ένα διάνυσμα που βρίσκεται σε φάση με το ρεύμα. Τότε το διάνυσμα της αναπτυσσόμενης Η.Ε.Δ. E_x καθυστερεί ως προς αυτό κατά γωνία θ ίση με $\pi/2$. Η ενεργός τιμή της μαγνητικής ροής, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, αλλά η μέγιστη τιμή της συνήθως αποτελεί μια πρακτική μέτρηση του βαθμού του μαγνητικού κορεσμού.

Ισχύς: Η στιγμιαία ισχύς σε ένα μονοφασικό κύκλωμα μεταβάλλεται με συχνότητα διπλάσια από εκείνη της τάσης τροφοδοσίας του δικτύου. Γενικά είναι ασύμμετρη ως προς τον άξονα του χρόνου έτσι ώστε να μην μπορεί να αναπαρασταθεί σε ένα διάγραμμα που περιέχει την τάση V και το ρεύμα I . Σύμφωνα με το σχήμα 2.3 η μέση τιμή της καμπύλης ισχύος/χρόνου αποτελεί τη μέση τιμή απορρόφησης ισχύος P (watts) για την οποία το εναπομείναν εναλλασσόμενο τμήμα έχει ένα πλάτος άεργης ισχύος Q (VAR) (άεργα Volt Amperes).



Σχήμα 2.3 : Ισχύς εναλλασσόμενου ρεύματος [Ξ59, Fig. 2B, page 4]

Εάν η τάση αναπαρίσταται με τη μορφή $V = V\angle\alpha$ και η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος με τη μορφή $I = I\angle\beta$, τότε το γινόμενο $V \cdot I = V \cdot I\angle\alpha + \beta$ δεν σχετίζεται με την ισχύ P . Η ισχύς μπορεί να υπολογισθεί από την τάση V και το συζυγή μιγαδικό αριθμό της τιμής του ρεύματος I , ο οποίος παριστάνεται συγκεκριμένα από το μέγεθος $I^* = I\angle -\beta$ οπότε ο υπολογισμός της φαινομένης ισχύος πραγματοποιείται με τη χρήση της σχέσης: $V \cdot I^* = V\angle\alpha \cdot I\angle -\beta = V \cdot I\angle\alpha - \beta = V \cdot I\angle\theta = V \cdot I(\cos\theta + jsin\theta) = P + jQ$

Η μέση τιμή της πραγματικής ισχύος προκύπτει από τη σχέση: $P = V \cdot I \cdot \cos\theta$ και η άεργος ισχύς ή ο μέγιστος ρυθμός αποθήκευσης ενέργειας στις επαγωγικές αντιδράσεις του κυκλώματος υπολογίζεται από τη σχέση: $Q = V \cdot I \cdot \sin\theta$. Με την τάση V να προηγείται του ρεύματος I , όπως στα κυκλώματα επαγωγικής συμπεριφοράς, η γωνία θ και η άεργος ισχύς Q είναι θετικές. Εναλλακτικά μπορεί να ληφθεί το γινόμενο της έντασης του ρεύματος I με το συζυγή μιγαδικό αριθμό της τάσης V οπότε για ένα επαγωγικό κύκλωμα θα προκύψει η σχέση: $V^* \cdot I = P - jQ$, το οποίο δεν συνηθίζεται.

Επομένως με γνωστή την τάση $V = V\angle\alpha$ και το ρεύμα $I = I\angle\beta$ το μόνο που απαιτείται είναι να ληφθεί το γινόμενο τους $S = V \cdot I$ από το οποίο προκύπτει η φαινομένη ισχύς και στη συνέχεια αυτό αν πολλαπλασιαστεί με το συνημίτονο ή με το ημίτονο της γωνίας της διαφοράς φάσης ανάμεσα στην τάση και το ρεύμα του κυκλώματος έτσι ώστε να προκύψει η πραγματική ή η άεργος ισχύς αντίστοιχα. Δηλαδή $P = S \cdot \cos\theta$ και $Q = S \cdot \sin\theta$, έτσι ώστε $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$. Εάν είναι γνωστή η καρτεσιανή μορφή της τάσης $V = V_1 + jV_2$ και του ρεύματος $I = I_1 + jI_2$, η διαδικασία περιλαμβάνει τη λήψη των ζευγών των συνιστωσών για την πραγματική ισχύ και τη λήψη των εγκάρσιων συνιστωσών για την άεργο ισχύ σύμφωνα με τις σχέσεις: $P = V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2$ και $Q = V_2 \cdot I_1 - V_1 \cdot I_2$. Το αποτέλεσμα για την άεργο ισχύ προκύπτει θετικό εάν η τάση V προηγείται του ρεύματος I .

Τιμές ανά μονάδα. Οι υπολογισμοί και οι συγκρίσεις των επιδόσεων των μηχανών συνήθως εκφράζονται στο ανά μονάδα σύστημα. Η ονομαστική τάση λαμβάνεται ίση με 1.0 ανά μονάδα τάσης (1 p.u. ή 100 τοις εκατό), ενώ το ρεύμα πλήρους φορτίου ισούται με 1.0 ανά μονάδα ρεύματος. Το γινόμενο τους ισούται με 1.0 ανά μονάδα ισχύος (π.χ. πλήρους φορτίου). Το πλεονέκτημα της χρήσης των τιμών ανά μονάδα είναι το γεγονός ότι δεν απαιτείται προσαρμογή των τιμών για τα γινόμενα τους, ενώ η χρήση ποσοστιαίων τιμών απαιτεί τη διαίρεση των τιμών που προκύπτουν από τα γινόμενα με το 100.

Λαμβάνεται μια γεννήτρια συνδεδεμένη κατά αστέρα η οποία διαθέτει φαινομένη ισχύ 1200 kVA, ονομαστική πολική τάση 3.3 kV και αντίσταση τυλίγματος ανά φάση στο στάτη ίση με 0.18 Ω. Η τιμή μονάδας της φασικής τάσης είναι 1.9 kV, ενώ η τιμή μονάδας του ρεύματος φάσης είναι 210 A. Η πτώση τάσης πλήρους φορτίου $I \cdot R = 210 \times 0.18 = 38 \text{ V}$, η οποία αντιστοιχεί σε τιμή 0.02 ανά μονάδα (ή 2 %) της τιμής των 1.9 kV. Έτσι, η τιμή της αντίστασης ισούται με 0.02 ανά μονάδα (per unit). Εάν το ρεύμα μειωθεί στο ήμισυ του ρεύματος φορτίου τότε, η πτώση τάσης θα προκύψει ίση με $0.5 \text{ α. μ.} \times 0.02 \text{ α. μ.} = 0.01 \text{ α. μ.}$. Εφόσον τα μεγέθη έχουν εκφραστεί ως ποσοστό επί τοις εκατό $50 \times 2 = 100$ τότε, απαιτείται η διαίρεση με το 100 για να προκύψει σωστή τιμή της πτώσης τάσης, η οποία ισούται με 1 τοις εκατό της ονομαστικής τιμής της φασικής τάσης.

2.3. Βασικές αρχές

2.3.1. Η ηλεκτρομαγνητική μηχανή

Για τάσεις οι οποίες αναπτύσσονται και χρησιμοποιούνται από κανονικές διατάξεις, οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι πολύ ασθενείς. Αφετέρου, ακόμα και με την ύπαρξη μικρών σχετικά ρευμάτων μπορεί να παραχθεί μια σημαντική μηχανική δύναμη από ηλεκτρομαγνητικά μέσα, κατά συνέπεια οι συνήθεις ηλεκτρικές μηχανές που χρησιμοποιούνται ως κινητήρες ή γεννήτριες είναι ηλεκτρομαγνητικές σχεδιάσεις. Μόνο στους μετασχηματιστές και στις γεννήτριες υψηλής τάσης υφίσταται το ηλεκτροστατικό πεδίο και τα αποτελέσματά του, τα οποία εκτός από τα ζητήματα των μονώσεων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όσο αφορά και τη δευτερογενή επίδραση τους στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των συσκευών αυτών.

2.3.2. Επαγωγή και αλληλεπίδραση

Υπάρχουν δύο αρχές που σχετίζονται και διαμορφώνουν τα θεμέλια πάνω στα οποία βασίζονται όλες οι ηλεκτρομαγνητικές μηχανές από τις οποίες πραγματοποιείται η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και το αντίστροφο. Αυτές είναι α) ο νόμος της επαγωγής και β) ο νόμος της αλληλεπίδρασης.

Νόμος της επαγωγής. Η βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη μιας ηλεκτρεγερτικής δύναμης είναι η ύπαρξη κατάλληλα συζευγμένων ηλεκτρικών και μαγνητικών κυκλωμάτων. Το άθροισμα των γινομένων της μαγνητικής επαγωγής με το σύνολο των ελιγμάτων του κυκλώματος ονομάζεται συνολική πεπλεγμένη ροή, της οποίας η μετα-

βολή προκαλεί την ανάπτυξη Η.Ε.Δ. εξ' επαγωγής στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Η Η.Ε.Δ. αυτή υφίσταται μόνο όταν λαμβάνει χώρα η μεταβολή, και έχει μέγεθος ανάλογο προς το ρυθμό μεταβολής ως προς το χρόνο. Η στιγμιαία τιμή της Η.Ε.Δ. προκύπτει από τη σχέση (2.8) όπου, λ είναι η πεπλεγμένη ροή η οποία έχει μονάδες μέτρησης Weber - ελίγματα και έχει μονάδες μέτρησης Volt, ενώ το αρνητικό πρόσημο της δηλώνει ότι έχει φορά τέτοια ώστε να αντιτίθεται στη μεταβολή (αιτία) που τη δημιουργεί.

$$e = -(d\lambda/dt) \quad (2.8)$$

Έτσι, αν το ηλεκτρικό κύκλωμα είναι απομονωμένο, και ο αριθμός των μαγνητικών γραμμών που σχηματίζονται από αυτό και ορισμένα εξωτερικά παραγόμενα μαγνητικά πεδία μειωθεί, τότε η επαγόμενη Η.Ε.Δ. θα παράγει ένα ηλεκτρικό ρεύμα στο κλειστό κύκλωμα, το οποίο με τη σειρά του παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο υπερτίθεται με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο που τείνει να αντισταθμίσει την παραμόρφωσή του (deficiency). Ο νόμος της επαγωγής γενικά, χρησιμοποιείται στην απλοποιημένη του μορφή σύμφωνα με τη εξίσωση (2.9).

$$e = -N_c \cdot (d\Phi/dt) \quad (2.9)$$

Εδώ η παράμετρος N_c αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ελιγμάτων στο ηλεκτρικό κύκλωμα που εμπλέκονται πλήρως από τη μαγνητική ροή Φ της δοθείσας μαγνητικής επαγωγής B . Για αυτό το σκοπό η μαγνητική ροή Φ μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες: α) μια αμοιβαία ή λειτουργική συνιστώσα, και β) μια συνιστώσα διαρροής.

Συνεπώς η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος παραγωγής Η.Ε.Δ. σε ένα κύκλωμα (προκειμένου αυτή να παράγει ένα ρεύμα και έτσι να επιτρέπει την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας) είναι να παρέχει ένα μαγνητικό πεδίο συζευγμένο με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, και να αλλάζει τον αριθμό των συζευγμένων μαγνητικών γραμμών $\lambda = N_c \cdot \Phi$. Για λόγους απλοποίησης, αν ληφθεί υπόψη ότι το ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελείται από ένα πηνίο που διαθέτει N_c ελίγματα, τότε η μεταβολή των μαγνητικών γραμμών σύζευξης μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους.

- α) Να υποθεθεί ότι τιμή της μαγνητικής ροής είναι σταθερή και ότι το πηνίο μπορεί να κινείται μέσα στο μαγνητικό πεδίο (σχετική κίνηση μαγνητικού πεδίου και πηνίου),
- β) Να υποθεθεί ότι το πηνίο είναι σταθερό ως προς το μαγνητικό πεδίο, ενώ το μαγνητικό πεδίο μπορεί να μεταβάλλει την τιμή του (μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο),
- γ) Να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα και οι δύο μεταβολές: π.χ. το πηνίο μπορεί να κινείται μέσα σε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

Στην προαναφερθείσα περίπτωση α) μπορεί να εφαρμοστεί ο κανόνας της τομής των μαγνητικών γραμμών. Η αναπτυσσόμενη Η.Ε.Δ. σε ένα αγωγό μήκους l μέτρων μπορεί να υπολογισθεί από το ρυθμό με τον οποίο τέμνει τις μαγνητικές γραμμές ενός μαγνητικού πεδίου πυκνότητας B (Wb/m^2), όταν κινείται με μια ταχύτητα u (m ανά sec) με θετικές γωνίες προς την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής σύμφωνα με την εξίσωση (2.10).

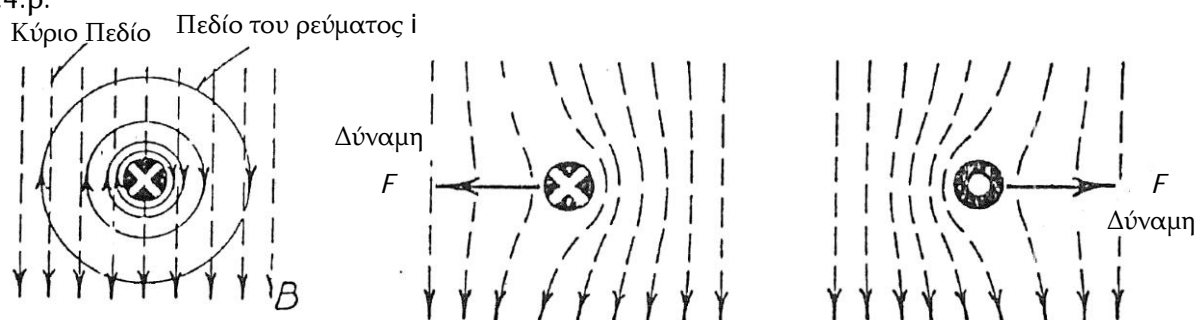
$$e = B \cdot l \cdot u \quad (2.10)$$

Αυτή αναφέρεται ως η Η.Ε.Δ της περιστροφής. Πάντα συνδέεται με τη μετατροπή της ενέργειας που πραγματοποιείται ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική μορφή. Στη περίπτωση β) η αναπτυσσόμενη Η.Ε.Δ. στα άκρα ενός πηνίου υπολογίζεται άμεσα από την εξίσωση (2.9) όπως η Η.Ε.Δ. που προκύπτει από τη μεταβολή της μαγνητικής ροής ή από το μετασχηματισμό. Δεν εμπλέκεται καμμία κίνηση και δεν υφίσταται μετατροπή ενέργειας. Στην περίπτωση γ) αναπτύσσεται Η.Ε.Δ. από δύο τρόπους και θα εξεταστεί διεξοδικά αργότερα.

Νόμος της αλληλεπίδρασης. Όταν ένας αγωγός μήκους l μέτρων διαρρέεται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα έντασης i αμπέρ και βρίσκεται κάθετα εντός μαγνητικού πεδίου το οποίο διαθέτει μαγνητική επαγωγή B (Wb/m^2), τότε αναπτύσσεται πάνω του μια μηχανική δύναμη της οποίας το μέτρο υπολογίζεται από τη σχέση (2.11), έχει διεύθυνση κάθετη προς την ένταση του ρεύματος και το μαγνητικό πεδίο ενώ, οι μονάδες μέτρησης του είναι Νt.

$$F = B \cdot l \cdot i \quad (2.11)$$

Στο σχήμα 2.4.α η μαγνητική επαγωγή B αναπαριστά την πυκνότητα ενός αυθεντικού μαγνητικού πεδίου. Η εισαγωγή ενός ρευματοφόρου αγωγού εισάγει ταυτόχρονα ένα νέο μαγνητικό πεδίο. Το αυθεντικό πεδίο και το πεδίο του ρευματοφόρου αγωγού συνδυάζονται για να σχηματιστεί ένα συνιστάμενο πεδίο, το οποίο εμφανίζεται στο σχήμα 2.4.β.



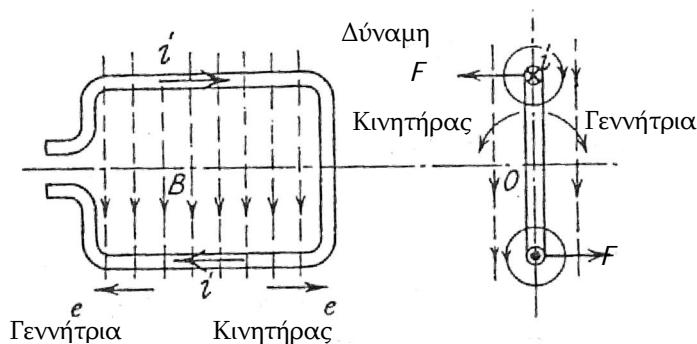
Σχήμα 2.4 : Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση [Ξ59, Fig. 3, page 7] : α) Συνιστώσες πεδίου, β) Συνιστάμενο πεδίο, γ) Επίδραση αλλαγής της φοράς του ρεύματος

Η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου που υπάρχει στην πράξη γύρω από τον αγωγό δεν είναι ίση με B . Το πεδίο έχει πυκνότητα μεγαλύτερη από B στη μια πλευρά και μικρότερη στην άλλη. Η παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου αποτελεί ένα βασικό χαρακτηριστικό στην παραγωγή μηχανικής δύναμης.

Γεννήτριες και κινητήρες. Σε μια γεννήτρια παράγεται μια Η.Ε.Δ. από την κίνηση ενός πηνίου μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Το παραγόμενο από την Η.Ε.Δ. ρεύμα αλληλεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο, προκειμένου να παραχθεί μια μηχανική δύναμη, η οποία αντιτίθεται στην κίνηση του πηνίου, και ενάντια στην οποία η ουσιώδης κίνηση πρέπει να διατηρηθεί. Επομένως, η ηλεκτρική ισχύς παράγεται από τη μηχανική ισχύ που παρέχεται.

Σε ένα κινητήρα μπορεί να υποθεθεί ότι ένας αγωγός ή ένα πηνίο βρίσκεται μέσα σε

ένα μαγνητικό πεδίο. Εάν το πηνίο τροφοδοτείται με ρεύμα, αναπτύσσεται μια μηχανική δύναμη εξαιτίας της οποίας το πηνίο θα κινηθεί. Άμεσα αυτή η σχετική κίνηση πραγματοποιείται ανάμεσα στο πηνίο και το μαγνητικό πεδίο, ωστόσο επάγεται μια Η.Ε.Δ. η οποία αντιτίθεται προς το ρεύμα. Επομένως, προκειμένου το ρεύμα και η σχετιζόμενη κίνηση του κινητήρα να διατηρηθεί, είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί στο πηνίο μία ικανοποιητική τάση από μια εξωτερική πηγή, προκειμένου να αντισταθμιστεί η επαγόμενη Η.Ε.Δ. Για αυτό το λόγο ο κινητήρας απαιτεί ηλεκτρική ισχύ, προκειμένου να παράγει μια αντίστοιχη ποσότητα μηχανικής ισχύος. Οι διευθύνσεις της μαγνητικής ροής, της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος και της κίνησης κατά τη λειτουργία γεννήτριας ή κινητήρα παρατίθενται στο σχήμα 2.5. Το πηνίο είναι ελεύθερο να κινηθεί γύρω από τον άξονα Ο. Εμφανίζονται οι συνιστώσες των πεδίων, η κατεύθυνση της αναπτυσσόμενης δύναμης, και οι φορές περιστροφής για τις λειτουργίες κινητήρα και γεννήτριας. Η φορά της αναπτυσσόμενης Η.Ε.Δ. είναι τέτοια ώστε να διατηρηθεί το ρεύμα στη λειτουργία γεννήτριας και να μειωθεί στη λειτουργία κινητήρα. Η λειτουργία είναι αναστρέψιμη π.χ. η ίδια διάταξη μπορεί να λειτουργήσει είτε ως κινητήρας, είτε ως γεννήτρια.



Σχήμα 2.5: Στοιχειώδης ηλεκτρική μηχανή [Ξ59, Fig. 4, page 8]

Μετασηματιστές. Στο μετασηματιστή αναπτύσσονται ηλεκτρομηχανικές δυνάμεις, αλλά δεν τους επιτρέπεται να παράγουν κίνηση. Συνεπώς, δεν ενδιαφέρει η μηχανική ισχύς και υφίστανται μόνο η ανάπτυξη των Η.Ε.Δ. των μετασηματιστών.

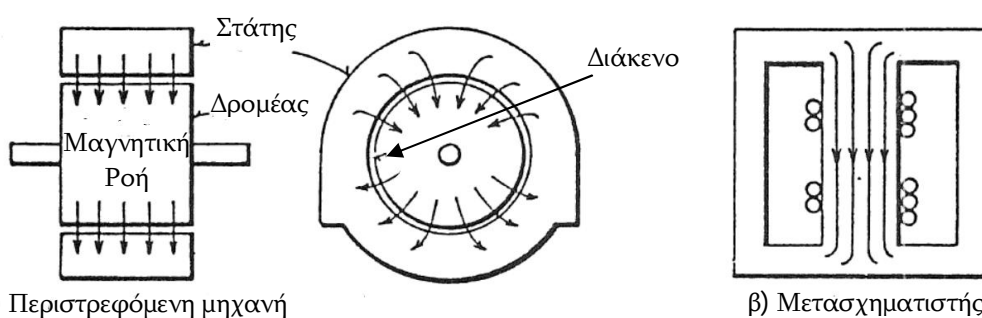
2.3.3. Κατηγοριοποίηση ηλεκτρικών μηχανών

Εφαρμόζονται οι αρχές της παραγράφου 2.3.2, όπως εμφανίζονται στο σχήμα 2.6.

α) **Περιστρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές** Δύο μαγνητικά στοιχεία: το ένα ακίνητο (στάτης) και ένα άλλο κινούμενο (δρομέας ο οποίος διαθέτει τη δυνατότητα της σχετικής περιστροφής ως προς το στάτη) διαχωρίζονται από ένα στενό διάκενο δακτυλιοειδούς μορφής σύμφωνα με το σχήμα 2.6.α. Συνήθως ο στάτης αποτελεί το εξωτερικό τμήμα για λόγους μηχανολογικής ευκολίας. Κάθε τμήμα φέρει ένα ή περισσότερα τυλίγματα και, προκειμένου να επιτευχθεί η σύζευξη τους, μια αμοιβαία μαγνητική ροή διασχίζει το διάκενο. Η περιστροφή του δρομέα προκαλεί την εξ επαγωγής ανάπτυξη Η.Ε.Δ και την ηλεκτρομηχανική μετατροπή ισχύος μέσω της αλληλεπίδρασης των αναπτυσσόμενων ροπών.

β) **Μετασχηματιστές** Ο μετασχηματιστής (ρυθμιστής επαγωγής), στον οποίο η σχετική θέση των στοιχείων πρέπει να είναι ρυθμιζόμενη, είναι πανομοιότυπος με το σχήμα 2.6.α. Για τον κανονικό στατό μετασχηματιστή δεν απαιτείται η ύπαρξη διάκενου, έτσι η μαγνητική ροή αναπτύσσεται σε ένα κλειστό μαγνητικό κύκλωμα σύμφωνα με το σχήμα 2.6.β. Παρά τις κατασκευαστικές διαφορές, υφίστανται μόνο διαφορές δευτερεύουσας σημασίας ανάμεσα στους διάφορους τύπους ηλεκτρικών μηχανών, οι οποίες προκύπτουν από:

1. Το είδος του Σ.Η.Ε. συνεχούς ή εναλλασσομένου ρεύματος στο οποίο η μηχανή πρόκειται να συνδεθεί και
2. Το είδος της σύνδεσης που πραγματοποιείται ανάμεσα στις περιελίξεις των ηλεκτρικών μηχανών και τα Σ.Η.Ε.: π.χ. περιελίξεις των οποίων τα τυλίγματα ανά φάση διατίθενται με λήψεις ή συλλέκτες με ψήκτρες.



α) Περιστρεφόμενη μηχανή

β) Μετασχηματιστής

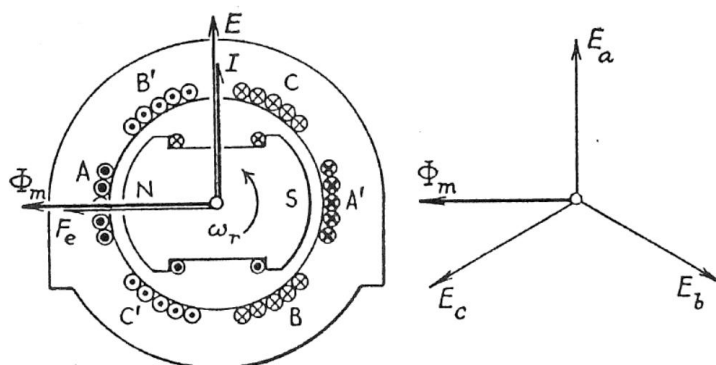
Σχήμα 2.6 : Στοιχεία ηλεκτρομαγνητικών μηχανών [Ξ59, Fig. 5, page 9]

2.3.4. Τριφασικό διανυσματικό διάγραμμα

Η μαγνητική ροή Φ σε μια μηχανή εναλλασσομένου ρεύματος προκύπτει από ένα ρεύμα έντασης I , από το οποίο αναπαρίσταται η συνδυασμένη μαγνητεγερτική δύναμη (Μ.Ε.Δ.) όλων των τυλιγμάτων που έχουν συζευχθεί με το μαγνητικό κύκλωμα. Η Η.Ε.Δ. E αναπτύσσεται σε μια περιέλιξη στην οποία η μαγνητική ροή Φ μεταβάλλεται ημιτονοειδώς και καθυστερεί 90° ως προς το διάνυσμα του ρεύματος. Η διανυσματική σχέση είναι η ίδια που ισχύει ανάμεσα στα μεγέθη I , Φ και E_x όπως αναπαρίσταται στο σχήμα 2.2.

Για τριφασικές μηχανές στη μόνιμη κατάσταση με ισορροπημένη φόρτιση το διανυσματικό διάγραμμα σχεδιάζεται με την τάση και το ρεύμα της φάσης A , αλλά με τη μαγνητική ροή Φ_m κοινή για όλες τις φάσεις. Η φάση A λαμβάνεται χωρίς φορτίο όταν ο άξονας της μαγνητικής ροής Φ_m διέρχεται από το κέντρο της φάσης: αυτή είναι η στιγμή που η μαγνητική σύζευξη λαμβάνει μηδενική τιμή, ενώ η επαγόμενη Η.Ε.Δ. E_a μεγιστοποιείται. Η μαγνητική ροή Φ_m είναι λογικό να σχεδιαστεί κατά μήκος του άξονα του πόλου, και για να διατηρηθεί η χρονική εγκάρσια σχέση, η E_a πρέπει να σχεδιαστεί σε θετικές γωνίες (καθυστέρησης, βραδυπορείας) ως προς τη μαγνητική ροή Φ_m , όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.7. Έτσι για αυτή τη στιγμή η E_a βρίσκεται στον άξονα της Μ.Ε.Δ. της φάσης A . Η μέγιστη τιμή του ρεύματος I_a , εφόσον αυτό βρίσκεται σε φάση με τη μέγιστη τιμή της Η.Ε.Δ. E_a , πρέπει να σχεδιαστεί στον άξονα της φάσης A . Όπως φαίνε-

ται από τις τελείες και τους σταυρούς, αυτός θα είναι ο άξονας της στιγμιαίας Μ.Ε.Δ. όλου του επαγωγίμου (στην περίπτωση μας του στάτη). Οι αγωγοί της φάσης Α παράγουν ροπή αλληλεπίδρασης με τη μαγνητική ροή Φ_m , η οποία αντιστοιχεί στην ισχύ $E_a \cdot I_a$.



Σχήμα 2.7 : Συμβατική τριφασική μηχανή [Ξ59, Fig. 6, page 10]

Έτσι, το διάνυσμα της μαγνητικής ροής συμπίπτει με τον άξονα του πόλου στη λειτουργία της μηχανής εν κενώ, ή με τον άξονα της προκύπτουσας Μ.Ε.Δ. στη λειτουργία της υπό φορτίο. Το διάνυσμα της Η.Ε.Δ. E_a έπεται του διανύσματος της μαγνητικής ροής Φ_m κατά γωνία 90° , και το διάνυσμα του ρεύματος I_a έχει την κατεύθυνση (φορά) του άξονα της φάσης Α.

Συμμετρικές συνιστώσες. Η αναπτυσσόμενη Η.Ε.Δ. από την ηλεκτρική μηχανή του σχήματος 2.7 έχει τη θετική ακολουθία φάσεων Α-Β-С. Με την ασύμμετρη φόρτιση, οι ασύμμετρες τάσεις και τα ασύμμετρα ρεύματα μπορούν να αναλυθούν σε συμμετρικές συνιστώσες με θετική, αρνητική και μηδενική ακολουθία φάσεων. Η συμπεριφορά των ηλεκτρικών μηχανών σε συνθήκες αστάθειας (unbalanced) μπορεί στη συνέχεια να συζητηθεί με όρους αυτών των συμμετρικών συνιστωσών.

2.4. Ηλεκτρομαγνητικές μηχανές

2.4.1 Μετατροπή ενέργειας

Όλες οι ηλεκτρομαγνητικές μηχανές αποτελούν παραλλαγές ενός κοινού συνόλου θεμελιωδών αρχών, οι οποίες εφαρμόζονται παρόμοια σε μηχανές συνεχούς και εναλλασσομένου ρεύματος, σε γεννήτριες και κινητήρες, κατά τη λειτουργία τους στη μόνιμη και στη μεταβατική κατάσταση. Μια ηλεκτρομαγνητική μηχανή πραγματοποιεί τη ζεύξη ενός Σ.Η.Ε. (όπως ένα δίκτυο τροφοδοσίας) με ένα μηχανικό σύστημα (μια κινητήρια μηχανή ή ένα μηχανικό φορτίο) παρέχοντας ένα αναστρέψιμο μέσο ροής ενέργειας στο κοινό ή αμοιβαίο μαγνητικό πεδίο τους. Η ενέργεια αποθηκεύεται στο αμοιβαίο μαγνητικό πεδίο και απελευθερώνεται ως μηχανικό έργο. Ένας ρευματοφόρος αγωγός ο οποίος βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο υπόκειται σε μια μηχανική δύναμη και κατά την κίνηση του παράγει έργο και μια αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (Α.Η.Ε.Δ.). Με αυτόν τον τρόπο η δύναμη-κίνηση μετατρέπεται σε ή από τάση-ρεύμα.

Στις κανονικές μηχανές, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6.α, υφίστανται διακεκριμένα τυλίγματα. Το ένα από αυτά (το τύλιγμα πεδίου) διεγείρει τη δρώσα μαγνητική ροή το άλλο (η περιέλιξη του επαγωγίμου) αναπτύσσει περιστρεφόμενες Η.Ε.Δ. και μηχανική ροπή. Η εξίσωση ισορροπίας για τη ροή ενέργειας σε ένα κινητήρα δίνεται από τη σχέση (2.12). Σε αυτή ισχύει ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται στην είσοδο του κινητήρα w_e ισούται με το άθροισμα την μηχανικής ενέργειας που παρέχει στην έξοδο του στο μηχανικό φορτίο w_m και την αποθηκευμένη ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο w_f .

$$w_e = w_m + w_f \quad (2.12)$$

Για τη γεννήτρια αρκεί μόνο η εναλλαγή των ηλεκτρικών και των μηχανικών όρων. Οπότε η σχέση (2.12) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$w_m = w_e + w_f \quad (2.13)$$

Οι απώλειες χαλκού και πυρήνα, καθώς και η μη ωφέλιμη ενέργεια που αποθηκεύεται στα πεδία διαρροής, εισάγονται όλες στο ισοζύγιο ενέργειας, αλλά, εάν αυτές υπολογιστούν ξεχωριστά, η βασική διαδικασία μετατροπής ενέργειας παραμένει η ίδια. Οι παραπάνω εξισώσεις για ευκολία δύνανται να γραφούν με όρους ισχύος όπου η ηλεκτρική ισχύς ισούται με $p_e = dw_e/dt$, και η μηχανική ισχύς ισούται με $p_m = dw_m/dt$. Οπότε η εξίσωση για τον κινητήρα λαμβάνει τη μορφή (2.14), ενώ για τη γεννήτρια τη μορφή (2.15).

$$p_e = p_m + dw_f/dt \quad (2.14)$$

$$p_m = p_e + dw_f/dt \quad (2.15)$$

Ο όρος της μηχανικής ισχύος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τις αλλαγές στην αποθηκευμένη κινητική ενέργεια, που πραγματοποιούνται όποτε η ταχύτητα της μηχανής (και των μηχανολογικών εξαρτημάτων της) μεταβάλλεται.

2.4.2 Αρχές λειτουργίας

Τα φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με τη διαδικασία μετατροπής της ενέργειας είναι:

1. Η Η.Ε.Δ. εκ περιστροφής e_r , που αναπτύσσεται από την κίνηση των αγωγών μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση (2.10).
2. Η μεταβαλλόμενη Η.Ε.Δ. ή Η.Ε.Δ. του μετασχηματιστή e_p , η οποία προκαλείται από την αλλαγή των μαγνητικών ζεύξεων σε ένα κύκλωμα.
3. Η μηχανική δύναμη που αναπτύσσεται σε ένα ρευματοφόρο αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα έντασης i και το μαγνητικό πεδίο μέσα στο οποίο βρίσκεται, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση (2.11).
4. Η μηχανική δύναμη που αναπτύσσεται σε φερομαγνητικά υλικά τείνει να τα ευθυγραμμίσει με ένα μαγνητικό πεδίο, ή να τα μετακινήσει σε ένα ισχυρότερο.

Διπολικές μηχανές. Ένα σύστημα μαγνητικού πεδίου από τη φύση του διαθέτει δύο πόλους, και η στοιχειώδης ηλεκτρική μηχανή αποτελείται από ένα βόρειο και ένα νότιο

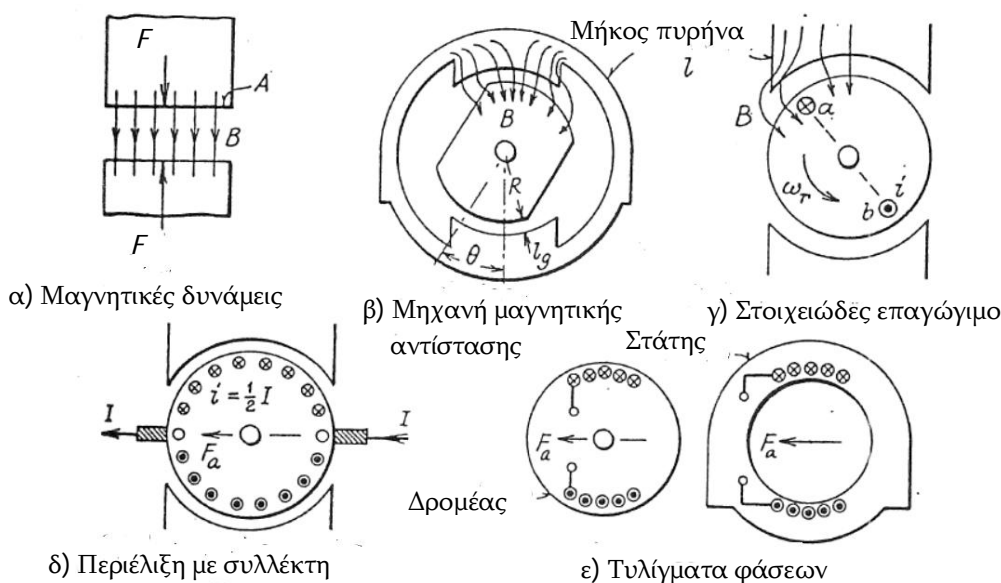
μαγνητικό πόλο. Οι ηλεκτρικές μηχανές που διαθέτουν 4, 6, 8 ή περισσότερους πόλους (ή γενικά, p ζεύγη πόλων) μπορούν να θεωρηθούν ως απλές επαναλήψεις των διπολικών μηχανών. Η αντιμετώπιση που παρατίθεται αναπτύχθηκε βασιζόμενη στη βασική μοναδιαία διπολική μηχανή.

Κινητήρες μεταβλητής αντίστασης. Η μαγνητική έλξη ανάμεσα σε φερομαγνητικές επιφάνειες εμβαδού A κατά μήκος των οποίων διατηρείται ένα μαγνητικό πεδίο πυκνότητας B υπολογίζεται από τη σχέση $F = 1/2 \cdot B^2 \cdot A / \mu_0$. Η έκφραση προέρχεται από το ρυθμό μεταβολής της πυκνότητας της μαγνητικής ενέργειας στο διάκενο $1/2 \cdot B^2 / \mu_0$. Ένα σύστημα σαν αυτό εμφανίζεται στο σχήμα 2.8.α και αποτελεί μια στοιχειώδη ηλεκτρομαγνητική μηχανή. Η ίδια αρχή εφαρμόζεται στην περίπτωση της περιστρεφόμενης μηχανής μεταβλητής αντίστασης που εμφανίζεται στο σχήμα 2.8.β. Εάν υποθεθεί ότι ο δρομέας έχει ακτίνα R , το αξονικό μήκος του πυρήνα είναι l και η μαγνητική ροή Φ ληφθεί υπόψη όπως περιορίζεται εντός των ορίων γωνίας θ στο στενό διάκενο ακτινικού μήκους l_g προκύπτει η τιμή της μαγνητικής ενέργειας στα δύο διάκενα η οποία, υπολογίζεται από τη σχέση (2.16). Σε αυτήν την περίπτωση η αναπτυσσόμενη ροπή προκύπτει από την εξίσωση (2.17).

$$w_f = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot B^2 \cdot A \cdot l_g / \mu_0 \right) = B^2 \cdot l \cdot R \cdot \theta \cdot l_g / \mu_0 \quad (2.16)$$

$$T = dw_f / d\theta = B^2 \cdot l \cdot R \cdot l_g / \mu_0 \quad (2.17)$$

Ο δρομέας (επαγωγίμο) τείνει να ευθυγραμμιστεί με τον άξονα του μαγνητικού πεδίου, και αυτός είναι ένας απλός κινητήρας. Εάν υποθεθεί ότι η μαγνητική επαγωγή ισούται με $B = 1 \text{ Wb/m}^2$, το μήκος $l = 0.02 \text{ m}$, η ακτίνα $R = 0.03 \text{ m}$ και το μήκος του διακένου $l_g = 2 \text{ mm}$: η αναπτυσσόμενη ροπή προκύπτει ίση με 1 Nm . Η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί αναπτύσσοντας ροπή αντίστασης. Μια ανάλογη ροπή μπορεί να εμφανιστεί σε σύγχρονες μηχανές έκτυπων πόλων.



Σχήμα 2.8 : Στοιχειώδεις ηλεκτρομαγνητικές μηχανές [Ξ59, Fig. 109, page 169]

Ηλεκτρικές μηχανές με τυλίγματα επαγωγίμου. Οι συνήθεις ηλεκτρικές μηχανές δεν βασίζονται στις ροπές αντίστασης, αλλά στις βασικές αρχές λειτουργίας 1-3 που αναφέρονται παραπάνω. Αν θεωρηθεί ότι μια ηλεκτρική μηχανή περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω_r , και αναπτύσσει ροπή T , τότε η μηχανική ισχύς που προκύπτει υπολογίζεται από τη σχέση: $p_m = T \cdot \omega_r$, ενώ η ηλεκτρική ισχύς προκύπτει ίση με $p_e = e \cdot i$, όπου e είναι η Α.Η.Ε.Δ. που οφείλεται στην αντίδραση του αμοιβαίου μαγνητικού πεδίου. Στην περίπτωση αυτή για κάθε στιγμή η ηλεκτρική ισχύς προκύπτει από τη σχέση (2.18):

$$e \cdot i = T \cdot \omega_r + dw_f/dt \quad (2.18)$$

Εάν ο αγωγός a του επαγωγίμου που εμφανίζεται στο σχήμα 2.8.γ περιστρέφεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο χρονικά σταθερής μαγνητικής ροής τοπικής πυκνότητας B , τότε σύμφωνα με την εξίσωση (2.10), η Η.Ε.Δ. είναι πλήρως περιστροφική και θα υπολογιστεί από την εξίσωση (2.19).

$$e_r = B \cdot l \cdot u = B \cdot l \cdot \omega_r \cdot R \quad (2.19)$$

Η εφαπτομενική δύναμη που ασκείται στον αγωγό σύμφωνα με την εξίσωση (2.11) είναι ίση με $F = B \cdot l \cdot i$, ενώ η ροπή υπολογίζεται από τη σχέση $T = B \cdot l \cdot i \cdot R$. Έτσι για κάθε στιγμή ισχύει η σχέση (2.20), διότι $dw_f/dt = 0$. Αυτή η απλή ισοδυναμία ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος είναι χρήσιμη και σημαντική.

$$e_r \cdot i = T \cdot \omega_r \quad (2.20)$$

Θεωρείται ότι οι δύο αγωγοί a και b από τους οποίους αποτελείται το επαγωγίμο που δίνεται στο σχήμα 2.8.γ. μπορούν να συνδεθούν εν σειρά προκειμένου να σχηματιστεί ένα έλιγμα (στροφή). Τότε, το ίδιο ρεύμα ρέει διαμέσου και των δύο αγωγών, αλλά με αντίθετη κατεύθυνση. Υπό την προϋπόθεση ότι οι αγωγοί έχουν τοποθετηθεί διαμετρικά (π.χ. το έλιγμα έχει πλήρες βήμα), οι αναπτυσσόμενες ροπές πάντα θα προστίθενται. Ένα ακόμη βήμα αποτελεί η χρήση περισσότερων εν σειρά συνδεδεμένων ελιγμάτων, από τα οποία σχηματίζεται μια περιέλιξη, προκειμένου να καταληφθεί από αυτή ο διαθέσιμος χώρος γύρω από την επιφάνεια του επαγωγίμου. Το ρεύμα στην περιέλιξη του επαγωγίμου φυσικά, θα παράγει τη δική του Μ.Ε.Δ. και τη δική του μαγνητική ροή (η οποία ονομάζεται αντίδραση επαγωγίμου). Η συνολική μαγνητική ροή της μηχανής προκύπτει από τις μαγνητεγερτικές δυνάμεις (Μ.Ε.Δ.) όλων των ρευματοφόρων περιελίξεων, είτε αυτές βρίσκονται στο στάτη, είτε στο δρομέα, αλλά η ροπή προκύπτει από εκείνη τη συνιστώσα της συνολικής μαγνητικής ροής κατά τη θετική φορά διαγραφής των γωνιών ως προς τον άξονα της Μ.Ε.Δ. της περιέλιξης του επαγωγίμου (δρομέας στις μηχανές D.C., και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων στάτης στις μηχανές A.C.).

2.4.3 Περιελίξεις

Ένα τύλιγμα το οποίο έχει σχεδιαστεί για τη διέγερση συνεχούς ρεύματος προκειμένου να παρέχει τη μαγνητική ροή του πεδίου λειτουργίας / εργασίας είναι συνήθως συγκεντρωμένο. Γενικά, για να αναπτυχθεί μια μαγνητική ροή λειτουργίας / εργασίας εναλλασσομένου ρεύματος το τύλιγμα θα είναι διανεμημένο, προκειμένου να μειωθεί η

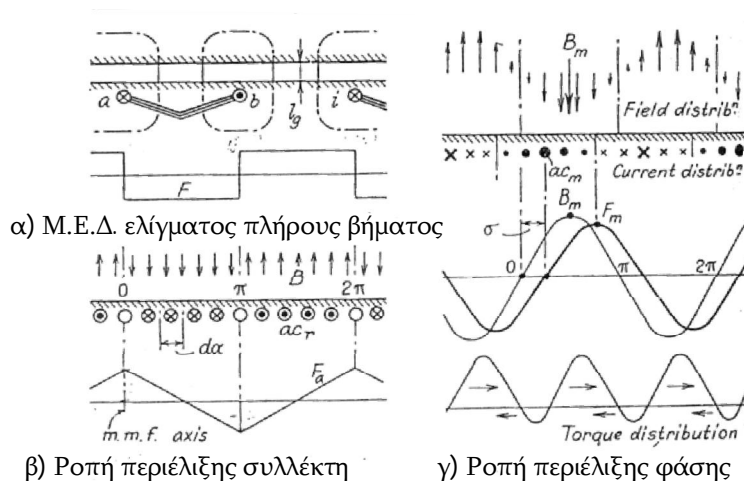
αντίδραση σκέδασης του (leakage reactance). Οι περιελίξεις των επαγωγίμων διακρίνονται σε περιελίξεις τύπου συλλέκτη (d.c.) και σε περιελίξεις τύπου φάσεων (a.c.).

Οι περιελίξεις τύπου συλλέκτη εμφανίζονται στο σχήμα 2.8.δ. Από τα ελίγματα πλήρους βήματος σχηματίζεται μια συμμετρικά διανεμημένη περιέλιξη. Το ρεύμα εισέρχεται και εξέρχεται από την περιέλιξη μέσω διαμετρικά σταθερά τοποθετημένων ψήκτρων, και διαχωρίζεται ισότιμα στους δύο παράλληλους κλάδους που σχηματίζονται. Οι ψήκτρες περιλαμβάνουν ανάμεσα τους ένα σταθερό αριθμό αγωγών σε κάθε κλάδο, ενώ διατηρούν πάντα τις ίδιες κατευθύνσεις ρευμάτων και τις ίδιες σχετικές θέσεις ανεξάρτητα από την ταχύτητα του δρομέα. Ένας συγκεκριμένος αγωγός διέρχεται κυκλικά από μια ζώνη αγωγών σε μια άλλη, αλλά το ρεύμα του αναστρέφεται από τη διεργασία της μεταγωγής, καθώς κινείται κάτω από μια ψήκτρα. Επομένως, η Μ.Ε.Δ. του επαγωγίμου (εδώ του δρομέα) πάντοτε συμπίπτει με τον άξονα της ψήκτρας.

Οι περιελίξεις τύπου φάσεων εμφανίζονται στο σχήμα 2.8.ε. Αυτός ο τύπος διαθέτει ξεχωριστές εξωτερικές συνδέσεις. Εάν η περιέλιξη βρίσκεται στο δρομέα, το ρεύμα και η αναπτυσσόμενη Μ.Ε.Δ. της περιστρέφονται με αυτόν, και οι εξωτερικές συνδέσεις της πρέπει να πραγματοποιηθούν μέσω δακτυλίων. Δύο (ή τρία) τέτοια τυλίγματα με δύο (ή τρία) ρεύματα φάσεων παράγουν μια συνισταμένη Μ.Ε.Δ., η οποία περιστρέφεται ως προς αυτά.

Περιελίξεις του στάτη και του δρομέα. Βασικά δεν παίζει ρόλο ποια από τις λειτουργίες της διέγερσης ή του επαγωγίμου έχει ανατεθεί στο στάτη και ποια στο δρομέα, παρόλο που στην πράξη για λόγους ευκολίας μια περιέλιξη με συλλέκτη σχεδόν πάντα χρησιμοποιείται στο δρομέα.

Μ.Ε.Δ. των περιελίξεων. Η μαγνητική ροή σε μια μηχανή προκύπτει από τις ατομικές συνεισφορές όλων των τυλιγμάτων της. Ένα ηλεκτρικό ρεύμα έντασης i σε ένα έλιγμα πλήρους βήματος το οποίο περιλαμβάνει τους αγωγούς a και b , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9.α, παράγει μια συνολική Μ.Ε.Δ. i γύρω από οποιαδήποτε κλειστή διαδρομή η



Σχήμα 2.9 : Μ.Ε.Δ. και αναπτυσσόμενη ροπή ηλεκτρομαγνητικών μηχανών [Ξ59, Fig. 110, page 170]

οποία ζευγνύει το έλιγμα και διασχίζει τα δύο διάκενα. Σε μια συμμετρική μηχανή η Μ.Ε.Δ. διαιρείται ισότιμα ανάμεσα στα δύο διάκενα έτσι, ώστε η Μ.Ε.Δ. ανά πόλο να προκύπτει από τη σχέση $F_a = \frac{1}{2} \cdot i$. Εφόσον η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα αγνοηθεί, αυτή η Μ.Ε.Δ. θα δαπανηθεί κατά μήκος του διακένου l_g στην παραγωγή μιας μαγνητικής επαγωγής σε κάθε πολικό βήμα, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$B = \mu_o \cdot H = \mu_o \cdot F_a / l_g = \mu_o \cdot \frac{1}{2} \cdot i / l_g \quad (2.21)$$

Μια διανεμημένη περιέλιξη θα δώσει μια διανεμημένη Μ.Ε.Δ. Μια τέτοια περίπτωση για μια περιέλιξη συλλέκτη εμφανίζεται στο σχήμα 2.9.β.

2.4.4 Ροπή

Σε μια περιέλιξη δεν αναπτύσσεται μια ροπή από τη δική της μαγνητική ροή, εκτός από την περίπτωση εκείνη κατά την οποία η μαγνητική ασυμμετρία εισάγει μια συνιστώσα μαγνητικής αντίστασης. Η περιέλιξη πρέπει να βρίσκεται μέσα σε μια δεύτερη μαγνητική ροή (μαγνητικό πεδίο).

Περιέλιξη με συλλέκτη. Στο σχήμα 2.9.β εμφανίζεται ένα ανάπτυγμα διαγράμματος μιας περιέλιξης συλλέκτη, το οποίο είναι διατεταγμένο έτσι, ώστε να επιτευχθεί μέγιστη ροπή. Η φορά όλων των ρευμάτων έχει δοθεί, έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση, ενώ όλα βρίσκονται εντός πεδίου μαγνητικής πυκνότητας B της ίδιας πολικότητας, το οποίο έχει δηλωθεί εναλλακτικά, ενώ ο άξονας της Μ.Ε.Δ. της περιέλιξης έχει μετατοπισθεί κατά γωνία $\pi/2$ από τα κέντρα των μαγνητικών πόλων του τυλίγματος της διέγερσης.

Αν θεωρηθεί ότι οι αμπεραγωγοί ανά ακτίνιο στην επιφάνεια του δρομέα (στην περίπτωση αυτή στο επαγωγίμο) είναι ac_r . Αυτός είναι ο αριθμός των αγωγών που περιλαμβάνονται εντός γωνίας ενός ακτινίου (rad) του δρομέα ο οποίος έχει πολλαπλασιαστεί με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος i που διαρρέει τον κάθε έναν από τους αγωγούς. Περαιτέρω, το πεδίο θεωρείται ότι έχει μια ομοιόμορφη πυκνότητα B . Οι αμπεραγωγοί που αντιστοιχούν σε μια στοιχειώδη γωνία da προκύπτουν ίσοι με $ac_r \cdot da$, η στοιχειώδης δύναμη που ασκείται σε αυτούς είναι ίση με $dF = B \cdot l \cdot ac_r \cdot da$ και η στοιχειώδης ροπή που αναπτύσσεται προκύπτει ίση με $dT = B \cdot l \cdot R \cdot ac_r \cdot da$ όπου R είναι η τιμή της ακτίνας και l είναι το αξονικό μήκος του πυρήνα του δρομέα. Η αναπτυσσόμενη ροπή για ολόκληρη τη γωνία της περιφέρειας του δρομέα, η οποία είναι ίση με 2π , υπολογίζεται σύμφωνα με τη εξίσωση (2.22).

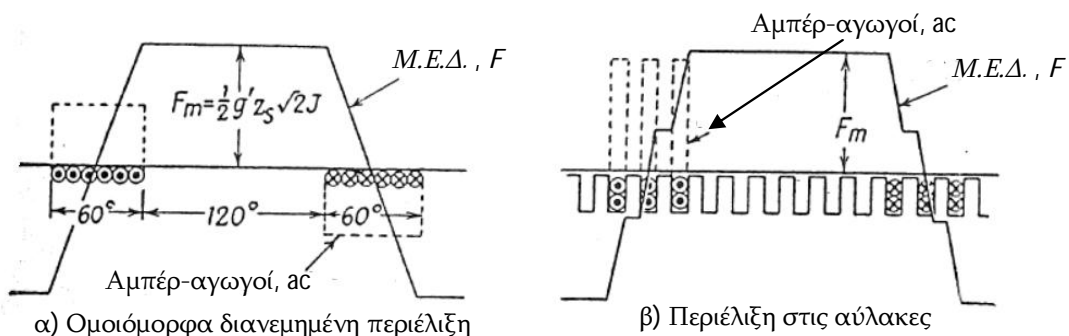
$$T = 2 \cdot \pi \cdot B \cdot l \cdot R \cdot ac_r \quad (2.22)$$

Η έκφραση αυτή μπορεί να τεθεί σε άλλους όρους. Μια κοινή μορφή χρησιμοποιεί τη μαγνητική ροή ανά πόλο $\Phi = \pi \cdot R \cdot l \cdot B$, ενώ, εάν το ρεύμα εισόδου ληφθεί ίσο με I , και ο συνολικός αριθμός των αγωγών ίσος με Z , όπου $I \cdot Z = 2 \cdot \pi \cdot ac_r$ από την οποία προκύπτει ότι: $T = I \cdot Z \cdot \Phi / \pi$. Εναλλακτικά, με τη χρήση της μαγνητικής ροής Φ και της μαγνητεγερτικής δύναμης (Μ.Ε.Δ.) ανά πόλο $F_a = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot ac_r$, η αναπτυσσόμενη ροπή υπολογίζεται από τη σχέση (2.23):

$$T = (4/\pi) \cdot \Phi \cdot F_a \quad (2.23)$$

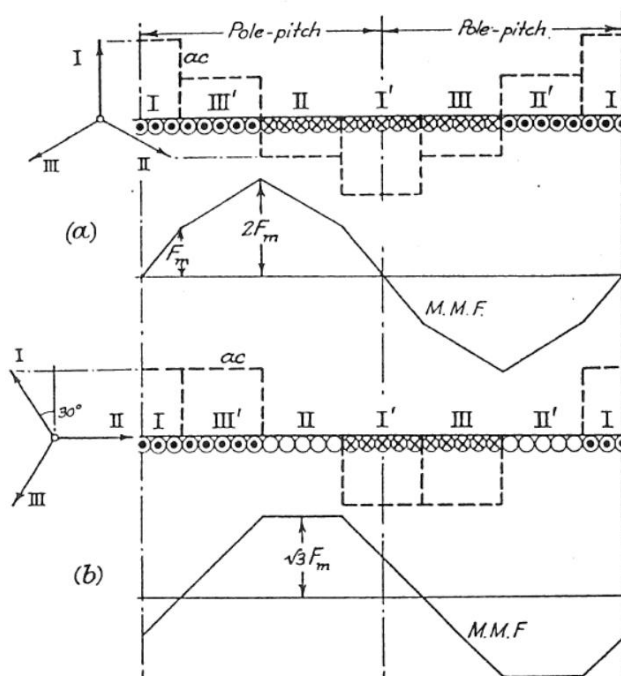
Αυτές οι εκφράσεις εφαρμόζονται άμεσα σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος. Επίσης, εάν οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής Φ και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος I είναι ενεργές (rms), μέσω αυτών δίνεται η έννοια της παλλόμενης (αλλά μιας κατεύθυνσης) ροπής μιας μονοφασικής μηχανής συλλέκτη. Εάν η μαγνητική ροή και το ρεύμα του δρομέα (του επαγωγίμου) έχουν μια χρονική μετατόπιση (διαφορά φάσης), απαιτείται ένας επιπρόσθετος συντελεστής, ο οποίος ονομάζεται συντελεστής ισχύος.

Περίελιξη φάσης. Από τις κυματομορφές των Μ.Ε.Δ. στα σχήματα 2.10 και 2.11 προκύπτει χονδρικά ότι η διανομή τους είναι ημιτονοειδής. Μια σημαντική περίπτωση σχετική με τους σύγχρονους και τους επαγωγικούς κινητήρες αφορά τη ροπή που αναπτύσσεται από ένα ημιτονοειδές διανεμημένο ρεύμα σε μια ημιτονοειδή διανεμημένη μαγνητική ροή όπως, αυτή που εμφανίζεται στο σχήμα 2.9.γ.



α) Ομοιόμορφα διανεμημένη περίελιξη
β) Περίελιξη στις αύλακες
Σχήμα 2.10: Μ.Ε.Δ. επαγωγίμου μίας φάσης [Ξ59, Fig. 138, page 225]

Όπου η παράμετρος g' είναι ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση, z_s είναι ο αριθμός των αγωγών ανά αύλακα και I είναι το ρεύμα του αγωγού.



Σχήμα 2.11: Αντίδραση επαγωγίμου τριών φάσεων [Ξ59, Fig. 139, page 226]

Αν θεωρηθεί ότι η πυκνότητα της ροής του μαγνητικού πεδίου, η οποία υπολογίζεται από το κέντρο του πόλου υπολογίζεται από τη σχέση: $B = B_{max} \cdot \cos\alpha$, και η κατανομή του ρεύματος στο επαγωγίμο η οποία μετρείται σε αμπέρ-αγωγούς ανά ακτίνο προκύπτει από τη σχέση: $ac_r = ac_m \cdot \sin(\alpha - \sigma)$. Με αυτές τις εξισώσεις αναπαρίσταται η χωρική κατανομή. Συγκεκριμένα θεωρείται ότι καμμία από τις δύο παραμέτρους, ούτε η μαγνητική επαγωγή B , ούτε ο αριθμός των αμπέρ-αγωγών ac δεν μεταβάλλονται χρονικά ενώ, η γωνία σ εμφανίζεται στο σχήμα 2.9.γ). Για μια στοιχειώδη γωνία da το ρεύμα προκύπτει ίσο με $ac_r \cdot da$ και βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο το οποίο έχει πυκνότητα μαγνητικής ροής ίση με B . Η ροπή που αναπτύσσεται στο στοιχειώδες ρεύμα προκύπτει από τη σχέση (2.24).

$$dT = B_{max} \cdot \cos\alpha \cdot l \cdot R \cdot ac_m \cdot \sin(\alpha - \sigma) \cdot da \quad (2.24)$$

Η συνολική ροπή αποτελεί το διπλάσιο του ολοκληρώματος της σχέσης (2.24) στο τμήμα ενός πόλου (άκρα ολοκλήρωσης από της γωνίας α από 0 έως π), οπότε θα υπολογιστεί από τη σχέση (2.25), αγνοώντας ένα αρνητικό πρόσημο το οποίο, δείχνει ότι η ροπή δρα έτσι ώστε να μειωθεί η γωνία σ . Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία ροπής σ ,

$$T = -\pi \cdot B_{max} \cdot ac_m \cdot l \cdot R \cdot \sin\sigma \quad (2.25)$$

τόσο μεγαλύτερη είναι η αναπτυσσόμενη ροπή, έως ότου η γωνία λάβει τιμή ίση με $\sigma = \pi/2$, οπότε επιτυγχάνετε η μέγιστη τιμή της ροπής όταν, η κατάσταση είναι συγκρίσιμη με εκείνη που εμφανίζεται στο σχήμα 2.9.β).

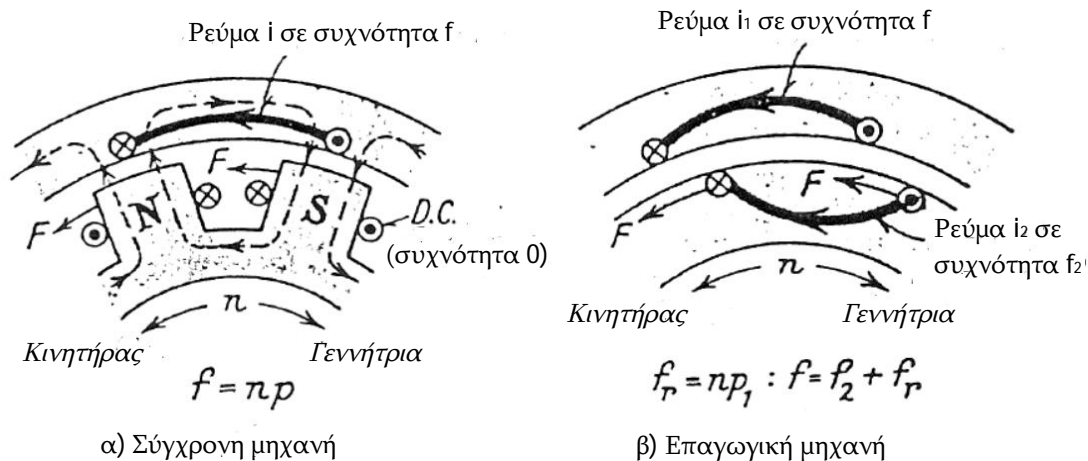
Επειδή η ροή ανά πόλο υπολογίζεται από τη σχέση: $\Phi = (2/\pi) \cdot B_{max} \cdot l \cdot R$ λόγω ημιτονοειδούς κατανομής και η Μ.Ε.Δ. λαμβάνει τιμή ίση με: $F_a = ac_m$, προκύπτει η παρακάτω εναλλακτική μορφή της εξίσωσης (2.25):

$$T = (\pi/2) \cdot \Phi \cdot F_a \cdot \sin\sigma \quad (2.26)$$

Συνθήκες για τη ροπή. Η διατήρηση της ροπής σε μια δοθείσα μηχανή επηρεάζεται από τη μορφή των ρευμάτων (εναλλασσόμενο ή συνεχές) του στάτη και του δρομέα. Εδώ απαιτείται η εξέταση μόνο των πολυφασικών σύγχρονων και επαγωγικών μηχανών.

Σύγχρονη μηχανή, σχήμα 2.12.α. Το επαγωγίμο το οποίο συνήθως τοποθετείται στο στάτη, διαθέτει τυλίγματα φάσεων, τα οποία διαρρέονται από ρεύματα συχνότητας f , ενώ το σύστημα του πεδίου διεγείρεται από συνεχές ρεύμα. Εάν πρέπει να διατηρείται ροπή μιας κατεύθυνσης, οι αναστροφές της πολικότητας των ρευμάτων των φάσεων, οι οποίες πραγματοποιούνται κάθε μισό κύκλο πρέπει να συγχρονιστούν με την κίνηση του πεδίου των πόλων. Συνεπώς, ο δρομέας μπορεί να έχει μόνο μια ταχύτητα, τη σύγχρονη ταχύτητα για την οποία η γωνιακή του ταχύτητα προκύπτει ίση με $\omega_r = 2 \cdot \pi \cdot f$, η οποία μετρείται σε rad/sec ή $n = f$, η οποία μετρείται σε R.P.S. (στροφές ανά δευτερόλεπτο). Έτσι, ο δρομέας σε μια διπολική μηχανή πρέπει να στρέφεται με μια περιστροφή ανά κύκλο του ρεύματος φάσης. Εφόσον η μηχανή διαθέτει p ζεύγη πόλων το όρισμα εφαρμόζεται για κάθε ζεύγος πόλων και η σύγχρονη ταχύτητα προκύπτει ίση με $n = f/p$ R.P.S.

Επαγωγική μηχανή, σχήμα 2.12.β. Ο στάτης είναι όμοιος με εκείνο της σύγχρονης μηχανής και διαρρέεται από ρεύματα συχνότητας f , αλλά τα τυλίγματα του δρομέα ανά φάση παρέχονται με ρεύματα οποιασδήποτε συχνότητας f_2 . Σε μια διπολική μηχανή η οποία περιστρέφεται με μια γωνιακή ταχύτητα ω_r (rad/sec), ή $n = \omega_r/2\pi = f_r$ με μονάδες μέτρησης περιστροφές ανά δευτερόλεπτο (R.P.S.) η ροπή μπορεί να διαθέτει μια κατεύθυνση μόνο εφόσον ισχύει η σχέση: $f = f_2 + f_r$. Για να αφεθεί η ταχύτητα να είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη, τότε προοδευτικά ο δρομέας ολισθαίνει προς τα πίσω



Σχήμα 2.12 : Σύγχρονες και επαγωγικές μηχανές [E59, Fig. 111, page 172]

από τη θέση που θα καταλάμβανε εάν ήταν σε σύγχρονη λειτουργία. Αλλά η ροπή θα παραμείνει μιας κατεύθυνσης (unidirectional), εάν το ρεύμα του δρομέα προοδευτικά υφίσταται μια εναλλαγή στη συχνότητα του ίση με: $f_2 = f - f_r$. Σε μια μηχανή που διαθέτει p_1 ζεύγη πόλων η μόνη αλλαγή από τις συνθήκες λειτουργίας της διπολικής μηχανής είναι ότι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα πλέον θα είναι ίση με: $n = f_r/p_1$ αντί της $n = f_r$.

2.4.5 Παραγωγή Η.Ε.Δ.

Η περιστροφική Η.Ε.Δ. e_r που αναπτύσσεται σε ένα έλιγμα του επαγωγίμου προκύπτει από την πυκνότητα της μαγνητικής ροής και του μαγνητικού πεδίου εντός του οποίου οι αγωγοί του βρίσκονται οποιαδήποτε στιγμή. Μια επιπρόσθετη, παλμική Η.Ε.Δ. ή Η.Ε.Δ. μετασχηματιστή e_p , εμφανίζεται στο έλιγμα εάν η μαγνητική ροή μεταβάλλεται, παρέχοντας ένα μέσο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανάμεσα στο στάτη και το δρομέα. Η γενική μορφή της εξίσωσης της Η.Ε.Δ. οδηγεί στην έκφραση (2.27).

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\left(\frac{\partial\Phi}{\partial\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} + \frac{\partial\Phi}{\partial t}\right) = -\left(\frac{\partial\Phi}{\partial\alpha} \cdot \omega_r + \frac{\partial\Phi}{\partial t}\right) = e_r + e_p \quad (2.27)$$

Επειδή ισχύει ότι: $\partial\Phi/\partial\alpha = 2 \cdot B \cdot l \cdot R$ ο όρος αντιπροσωπεύει την κατανομή της μαγνητικής ροής (flux distribution) B . Σε ένα μετασχηματιστή εμφανίζεται μόνο η συνιστώσα e_p , στις πολυφασικές σύγχρονες και επαγωγικές μηχανές το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο μειώνει την Η.Ε.Δ. e στον όρο e_r , τουλάχιστον στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

2.4.6 Ανάλυση Ηλεκτρικών Μηχανών

Η προσέγγιση που έχει επιλεγεί είναι να αναπτυχθεί ένα φυσικό μοντέλο για κάθε ηλεκτρική μηχανή, και έπειτα να διατυπωθεί η συμπεριφορά του σύμφωνα με τις παραμέτρους της ηλεκτρεγερτικής δύναμης, της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος, της μαγνητικής ροής και της ροπής. Η μεθοδολογία είναι περιεκτική, αλλά έχουν εισαχθεί συγκεκριμένες τεχνικές περιορισμένης εφαρμογής όπου η χρήση τους έχει καθιερωθεί ή είναι επιθυμητή στην πράξη.

Ισοδύναμα κυκλώματα. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η αναπαράσταση των ρευμάτων και των τάσεων σε μια ηλεκτρική μηχανή, μπορούν να επινοηθούν μοντέλα ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Με τη χρήση τέτοιων ισοδύναμων κυκλωμάτων διευκρινίζεται η κατασκευή των διανυσματικών διαγραμμάτων καθώς και η κατασκευή διαγραμμάτων γεωμετρικών τόπων, ενώ είναι σχεδόν απαραίτητα για τη μελέτη των μεταβατικών φαινομένων. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι τα συστήματα που αναπαρίστανται συνήθως δυναμικά από μηχανολογικής άποψης, με κεκαλυμμένη κινητική ενέργεια η οποία δεν είναι σαφής στα ισοδύναμα κυκλώματα. Ακόμη, δεν είναι εφαρμόσιμες όλες οι κοινές μέθοδοι ανάλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων (όπως το θεώρημα της αμοιβαιότητας), και είναι απαραίτητο να δοθεί κάποια προσοχή στην ερμηνεία.

2.5 Μαγνητικά Κυκλώματα

2.5.1 Νόμοι των μαγνητικών κυκλωμάτων

Εδώ παρατίθεται η συνήθης προσέγγιση της ανάλυσης στη σχεδίαση μαγνητικών κυκλωμάτων με ιδιαίτερη αναφορά στις ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος. Θεωρούνται τα παρακάτω μεγέθη και οι μονάδες τους που παρατίθενται στον πίνακα 2.1.

Για λόγους απλότητας στην πράξη τα μαγνητικά κυκλώματα χωρίζονται σε τμήμα-τα αυθαίρετα, κατά μήκος των οποίων η μαγνητική επαγωγή θεωρείται ομοιόμορφη. Για κάθε τμήμα ισχύει η σχέση (2.28), ενώ η συνολική Μ.Ε.Δ. υπολογίζεται από τη σχέση (2.29) για μια σειρά τμημάτων κάθε ένα από τα οποία διαθέτει μήκος $l_1, l_2 \dots$ κ.ο.κ. κατά μήκος των οποίων είναι αναγκαίες διεγέρσεις της μορφής $at_1, at_2 \dots$ κ.ο.κ. αμπερελιγμάτων ανά μέτρο μήκους.

$$\Phi \cdot R_m = B \cdot A \cdot \frac{l}{A \cdot \mu} = (B/\mu) \cdot l = H \cdot l = at \cdot l \quad (2.28)$$

$$F = A \cdot T = (at_1) \cdot l_1 + (at_2) \cdot l_2 + \dots \quad (2.29)$$

Για τον αέρα και όλα τα μη μαγνητικά υλικά ισχύει : $\mu_r = 1$, $B = \mu_o \cdot H$ και η σχέση (2.30) η οποία, έχει μονάδες μέτρησης αμπερελίγματα ανά μέτρο.

$$H = at = (B/\mu_o) \approx 800.000 \cdot B \quad (2.30)$$

Στην πράξη από τις καμπύλες μαγνητίσεως πραγματοποιείται η συσχέτιση της μαγ-

νητικής επαγωγής με τη Μ.Ε.Δ. η οποία δίνεται σε μονάδες μέτρησης αμπερελίγματα ανά μέτρο, προκειμένου να επιτευχθεί ο γρήγορος προσδιορισμός των αμπερελιγμάτων διέγερσης που απαιτούνται. Αυστηρά, κάθε δείγμα διαθέτει τη δική του καμπύλη μαγνητίσεως, αλλά είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται μια μέση καμπύλη για κάθε κατηγορία μαγνητικού υλικού. Στο σχήμα 2.13 δίνετε η αναπαράσταση τυπικών καμπύλων μαγνητίσεως.

Πίνακας 2.1 [Ξ59, page 174]

Μαγνητικά Μεγέθη		
Σύμβολο -Τύπος	Μέγεθος μαγνητικού κυκλώματος	Μονάδες Μέτρησης
Φ	Μαγνητική ροή	Weber
A	Εμβαδόν διαδρομής μαγνητικής ροής	m ²
l	Μήκος διαδρομής μαγνητικής ροής	m
$B = \Phi/A$	Μαγνητική επαγωγή	Wb/m ²
$H = \alpha \cdot t$	(Ένταση μαγνητικού πεδίου)	At/m
$F = A \cdot T$	Μ.Ε.Δ. (συνολικά αμπερελίγματα)	At
$\mu = \mu_r \cdot \mu_o$	Μαγνητική διαπερατότητα υλικού	-
$\mu_o = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	Μαγνητική διαπερατότητα του κενού	Henry/m
μ_r	Σχετική μαγνητική διαπερατότητα	
$R_m = l/A \cdot \mu$	Μαγνητική αντίσταση	At/Weber
$Y_m = \mu \cdot A/l$	Μαγνητική αγωγιμότητα	Weber/At
λ	Συντελεστής μαγνητικής αγωγιμότητας	-
ν	Συντ/στής ροής σκέδασης	-
p	Ειδική απώλεια πυρήνα (specific core loss)	Watt/kg
f	Συχνότητα	cycles/sec (Hz)

2.5.2 Απώλειες πυρήνα

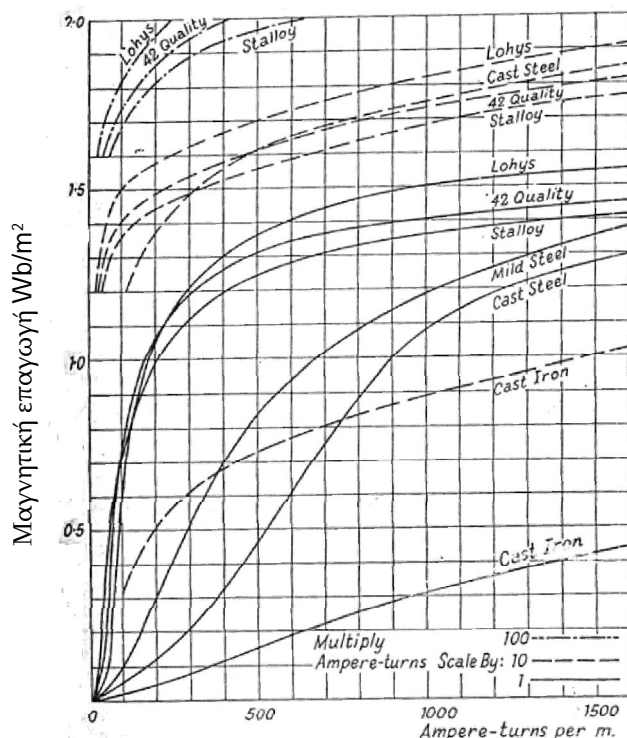
Αν η μαγνητική ροή διέρχεται μέσα από σίδηρο ή χάλυβα σε ένα μαγνητικό κύκλωμα, τότε αυτή μεταβάλλεται, ενώ παράγονται απώλειες υστέρησης και δινορρευματών (ρευματών Eddy).

Στην περίπτωση που η μαγνήτιση είναι εναλλασσόμενη αυτές υπολογίζονται με όρους της μέγιστης τιμής μαγνητικής επαγωγής B_m και της ενεργούς τιμής της μαγνητικής επαγωγής B . Επομένως οι απώλειες υστέρησης υπολογίζονται από τη σχέση (2.31), ενώ οι απώλειες δινορρευματών από τη σχέση (2.32) αντίστοιχα.

$$p_h = k_h \cdot f \cdot B_m^x \quad (2.31)$$

Οι μονάδες μέτρησης και στις δύο περιπτώσεις είναι W/kg. Ο συντελεστής k_e είναι αριθμητικός, ο συντελεστής k_h εξαρτάται από τα μοριακά χαρακτηριστικά του χάλυβα, και κατά πόσο ο μαγνητισμός είναι παλμικός (π.χ. μεταβάλλεται σε μέγεθος κατά μήκος ενός σταθερού άξονα) ή περιστροφικός (π.χ. να οφείλεται σε μια σταθερή μαγνητική ροή η οποία περιστρέφεται και αλλάζει την κατεύθυνση της στο υλικό. Ο εκθέτης x της μέγιστης τιμής της μαγνητικής επαγωγής στις απώλειες υστέρησης μπορεί να λαμβάνει τιμές από 0,5 έως και 2,3, ενώ γενικά για συνήθεις τιμές της μαγνητικής επαγωγής λαμβάνει τιμές από 1,5 έως και 2.

$$p_e = k_e \cdot t^2 \cdot f^2 \cdot B^2 / \rho \quad (2.32)$$



Σχήμα 2.13 : Καμπύλες μαγνητίσεως [Ξ59, Fig. 112, page 175]

Το πάχος t του ελασματοποιημένου υλικού αποτελεί έναν παράγοντα των απωλειών δινορρευμάτων. Από την εξίσωση (2.32) προκύπτει ότι οι απώλειες δινορρευμάτων μπορούν να μειωθούν με τη χρήση φύλλων πυρήνα με μικρότερο πάχος, και υλικό κατασκευής, το οποίο διαθέτει μεγαλύτερη αντίσταση ρ .

Επειδή οι εξισώσεις (2.31) και (2.32) βασίζονται σε μια απλοποίηση των πραγματικών καταστάσεων, εάν εφαρμοστούν σε περιπτώσεις όπου η συχνότητα δεν είναι συνηθισμένη, τα ελάσματα έχουν μεγάλο πάχος ή η χρονική μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής δεν είναι ημιτονοειδής, τότε είναι αναξιόπιστες.

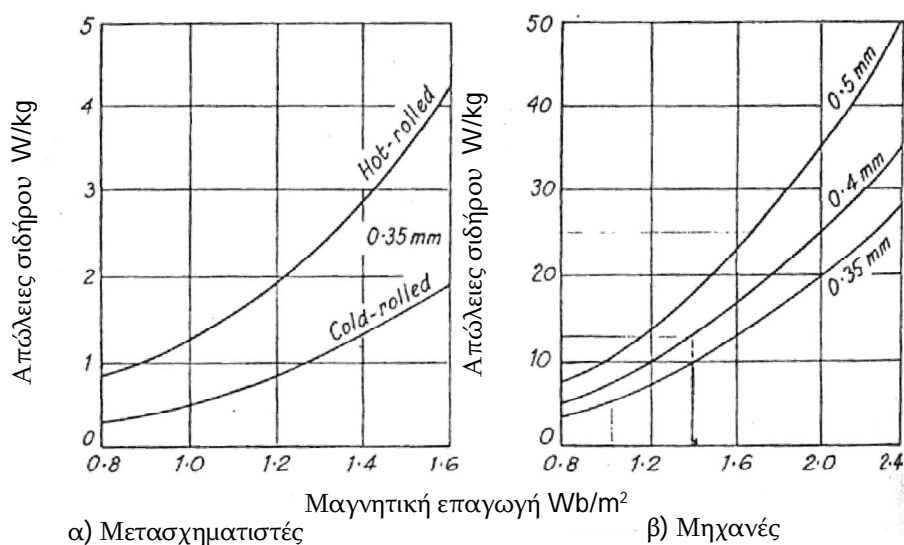
Γενικά, οι απώλειες πυρήνα εκτιμώνται από καμπύλες, οι οποίες βασίζονται σε εργαστηριακές δοκιμές προετοιμασμένων δειγμάτων. Στον πίνακα 2.2 παρατίθενται οι τυπικά εγγυημένες μέγιστες τιμές απωλειών πυρήνα για φύλλα λαμαρίνας διάφορων υλικών στα οποία περιλαμβάνονται και ειδικά υλικά χαμηλών απωλειών, των οποίων οι καμπύλες μαγνητίσεως B/at εμφανίζονται στο σχήμα 2.13. Οι πραγματικές απώλειες

που εμφανίζονται σε ένα ενσωματωμένο πυρήνα κατά κανόνα είναι μεγαλύτερες από εκείνες που προέκυψαν από την αξιολόγηση των δειγμάτων λόγω των επιπτώσεων της διάτρησης (η οποία σκληραίνει σημαντικά τις άκρες του ελάσματος), τα βραχυκυκλώματα ανάμεσα στα ελάσματα που οφείλονται στη διάτρηση, την αντίδραση του επαγωγισμού και τη δυσκολία του υπολογισμού τους. Προκειμένου να ληφθούν υπόψη αυτές οι αυξήσεις, οι καμπύλες των απωλειών πυρήνα που δίνονται από τους σχεδιαστές τροποποιούνται και ελέγχονται με σχήματα δοκιμών. Στο σχήμα 2.14 εμφανίζονται τυπικές καμπύλες απωλειών πυρήνων στις οποίες έχουν ληφθεί υπόψη οι ανωτέρω αυξήσεις.

Πίνακας 2.2 [Ξ59, Table page 177]

Απώλειες Μαγνητικής Λαμαρίνας σε W/kg για συχνότητα 50 Hz

B_{max} (Wb/m ²)	1		1,3	
Πάχος λαμαρίνας (mm)	0,35	0,5	0,35	0,5
Lohys	2,90	3,57	4,80	5,88
42 quality	1,93	2,25	3,30	3,81
Stalloy	1,40	1,63	2,35	2,77
Super Stalloy	1,08	-	1,89	-



Σχήμα 2.14 : Απώλειες πυρήνα σε συχνότητα 50 Hz [Ξ59, Fig. 113, page 176]

Επιφανειακές και παλμικές απώλειες πυρήνα. Όταν οι επιφάνειες του στάτη και του δρομέα βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, όπως σε έναν επαγωγικό κινητήρα, παράγονται επιπρόσθετες απώλειες από τις γρήγορες μεταβολές που υφίσταται η μαγνητική αντίσταση του τοπικού διάκενου, καθώς οι οδοντώσεις του στάτη και του δρομέα διέρχονται μεταξύ τους. Περαιτέρω απώλειες μπορεί να παραχθούν από τις αρμονικές των μαγνητικών πεδίων που οφείλονται στις αύλακες. Και τα δύο αυτά είδη απωλειών ουσιαστικά, περιορίζονται στις επιφάνειες του διακένου ή τον κορμό των οδοντώσεων, ωστόσο μπορεί να είναι εκπληκτικά μεγάλες, ενώ η εκτίμησή τους πραγματοποιείται

δύσκολα. Ένας κινητήρας επηρεάζεται από τις απώλειες πυρήνα, διότι από αυτές παράγεται μια μαγνητική έλξη, η οποία είναι ανάλογη της τριβής. Όπου είναι πιθανό οι παλμικές συχνότητες των οδοντώσεων να είναι μεγάλες χρησιμοποιείται πυριτιούχος χάλυβας υψηλής ποιότητας.

Εκτιμήσεις σχεδίασης. Στην πράξη, βρέθηκε ότι κατά προσέγγιση οι απώλειες πυρήνα είναι ανάλογες με το τετράγωνο της μαγνητικής επαγωγής (ή ακόμα και με τον κύβο), ενώ λαμβάνουν τιμές πάνω από $1,2 \text{ Wb/m}^2$.

Οι απλές εκφράσεις των εξισώσεων (2.31) και (2.32) δεν είναι εφαρμόσιμες σε ηλεκτρικές μηχανές στις οποίες οι απώλειες πυρήνα μεταβάλλονται με τη συχνότητα. Όμως, δεν είναι ευπαθείς σε μια άμεση ανάλυση σαν αυτή η οποία βασίζεται σε ημιτονοειδείς παλμούς εξαιτίας της πολύ σύνθετης κατανομής και της μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής στα διάφορα τμήματα των μηχανών. Η εμπειρία συνιστά ότι οι συνολικές απώλειες πυρήνα στις ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος είναι κατά προσέγγιση ανάλογες με $f^{1.1}$.

2.5.3 Μαγνητικά υλικά

Μια χονδρική ταξινόμηση για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα μαγνητικά κυκλώματα των ηλεκτρικών μηχανών πραγματοποιείται σύμφωνα με τη μαγνητική ροή που φέρουν, δηλαδή αν αυτή είναι παλμική (pulsating) ή σταθερή. Στις περισσότερες περιπτώσεις το μαγνητικό κύκλωμα αποτελεί μέρος της μηχανολογικής δομής και για αυτό το λόγο οι μηχανολογικές ιδιότητες είναι σημαντικές.

Ελασματοποιημένα υλικά. Σε όλες τις περιπτώσεις μεταβαλλόμενης ροής, το μαγνητικό υλικό πρέπει να είναι ελασματοποιημένο. Προκειμένου να ικανοποιηθεί αυτή η ανάγκη, έχουν αναπτυχθεί φύλλα μαγνητικού χάλυβα.

Στη σχεδίαση ενός μαγνητικού κυκλώματος, η εναλλασσόμενη μαγνητική ροή απαιτείται να παραχθεί στον ελάχιστο δυνατό χώρο με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες. Επομένως, οι δύο σημαντικές μαγνητικές ιδιότητες είναι η μαγνητική διαπερατότητα και οι συντελεστές απωλειών.

Η μαγνητική διαπερατότητα είναι ένα μέγεθος το οποίο δεν παρέχει πληροφορίες άμεσα, επειδή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή της μαγνητικής επαγωγής B . Ο σχεδιαστής ενδιαφέρεται περισσότερο για τις μαγνητεγερτικές δυνάμεις (Μ.Ε.Δ.) που απαιτούνται για να παραχθούν οι δοθείσες τιμές της μαγνητικής επαγωγής παρά για το λόγο $\mu = B/H$. Για αυτό το λόγο πραγματοποιείται η χρήση στατικών καμπυλών B/at όπως εκείνες του σχήματος 2.13.

Συχνά, είναι σημαντική η περιοχή κορεσμού ενός υλικού, διότι δίνει μια ένδειξη της μέγιστης τιμής της μαγνητικής επαγωγής που μπορεί να συνεισφέρει το υλικό.

Συγκριτικά, ο καθαρός σίδηρος που χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως υλικό για την κατασκευή των φύλλων λαμαρίνας των ηλεκτρικών μηχανών έδωσε τη θέση του στα κράματα χάλυβα. Το κύριο συστατικό του κράματος είναι το πυρίτιο (σε ποσοστό έως 5 %), αυξάνει τη μαγνητική διαπερατότητα σε χαμηλές τιμές της μαγνητικής επαγωγής

(αλλά τη μειώνει στις υψηλές τιμές), μειώνει τις απώλειες υστέρησης και με την αύξηση της αντίστασης μειώνονται οι απώλειες δινορρευμάτων. Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε πυρίτιο, τόσο καλύτερος είναι ο χάλυβας μαγνητικά από την άποψη των απωλειών, αλλά οι ιδιότητες είναι ευμετάβλητες ιδιαίτερα μετά από την επεξεργασία τους που περιλαμβάνει εργασίες όπως η διάτρηση, η διάτμηση, η κάμψη και άλλες. Ως κανόνας ο εκθέτης x που βρίσκεται στη σχέση (2.31) από την οποία υπολογίζονται οι απώλειες υστέρησης λαμβάνει τιμές από 1,5 έως 1,6 για τιμή της μαγνητικής επαγωγής $B = 1 \text{ Wb/m}^2$, η τιμή αυτή αυξάνεται σε 2,2 όταν η μαγνητική επαγωγή γίνει ίση με $B = 1.5 \text{ Wb/m}^2$ και μειώνεται ξανά λαμβάνοντας τιμή ίση με 0,8 για τιμή της μαγνητικής επαγωγής ίσης με $B = 2 \text{ Wb/m}^2$. Αυτές οι τιμές είναι τυπικές για κράματα πυριτιούχου χάλυβα περιεκτικότητας 4,5 %. Η μείωση της τιμής του εκθέτη x σε υψηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής οφείλεται στο μαγνητικό κορεσμό, και έχει ως αποτέλεσμα το εμβαδό του βρόχου υστέρησης να παραμείνει σταθερό για τιμές της μαγνητικής επαγωγής ίσης ή μεγαλύτερης από εκείνη του μαγνητικού κορεσμού. Η αντίσταση ενός πυριτιούχου χάλυβα περιεκτικότητας 4,5 % μπορεί να είναι τάξης μεγέθους ίσης με $60 \mu\Omega/\text{cm}$, και μικρότερη για χαμηλότερες περιεκτικότητες πυριτίου μέχρι και την τιμή των $12 - 14 \mu\Omega/\text{cm}$ συγκριτικά για καθαρό σίδηρο.

Η εισαγωγή του πυριτίου έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η αντοχή των κραμάτων χάλυβα σε εφελκυσμό, αλλά ταυτόχρονα να μειωθεί η ολκιμότητα τους, καθιστώντας τη διάτρηση ή τη διάτμηση τους προοδευτικά δυσκολότερη. Ένας χάλυβας με περιεκτικότητα πυριτίου μεγαλύτερη από 5 % μπορεί να είναι πολύ σκληρός και εύθραυστος για να χρησιμοποιηθεί εύκολα.

Στους μετασχηματιστές, η χρήση φύλλων χάλυβα ψυχρής εξέλασης προσανατολισμένων κόκκων παρέχει σημαντικές μειώσεις στις απώλειες πυρήνα και στη μαγνητεγερτική δύναμη μαγνητίσεως. Επίσης, έχει δυνατότητες στις περιστρεφόμενες μηχανές, αλλά είναι δύσκολο να διευθετηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να χρησιμοποιηθεί επαρκώς η ιδιότητα του προσανατολισμού.

Όπου οι απώλειες πυρήνα δεν είναι σημαντικές (όπως στις μηχανές συνεχούς ρεύματος χαμηλής συχνότητας) χρησιμοποιείται σίδηρος χαμηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο. Παρόμοια με τους επαγωγικούς κινητήρες, όπου το ρεύμα μαγνητίσεως πρέπει να διατηρηθεί χαμηλό. Σε ηλεκτρικές μηχανές μεγάλης ισχύος, ιδιαίτερα στους στροβιλο-εναλλακτήρες, όπου η ψύξη της μηχανής καθίσταται ένα ειδικό πρόβλημα εξαιτίας του μεγέθους της, χρησιμοποιείται χάλυβας χαμηλών απωλειών, όπως ένα κράμα πυριτιούχου χάλυβα με περιεκτικότητα 2 %. Αυτό το κράμα ή ένα κράμα μεγαλύτερης περιεκτικότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ολόκληστους κινητήρες, προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση των συνολικών απωλειών.

Υλικά για σταθερές μαγνητικές ροές. Σε αυτήν την κατηγορία η μαγνητική διαπερατότητα είναι σημαντική, και η στατική χαρακτηριστική καμπύλη B/at παρέχει ένα κριτήριο για την επιλογή του υλικού. Ωστόσο, μηχανολογικές εκτιμήσεις μπορεί να συνεπάγονται την τροποποίηση των μαγνητικών ιδιοτήτων από την ανάγκη να συμπεριληφθούν κράματα υλικών από τα οποία αυξάνεται η μηχανολογική αντοχή, αλλά

μειώνεται η μαγνητική διαπερατότητα. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση της χρήσης χυτού ή σφυρηλατημένου χάλυβα για υψηλές περιστροφικές ταχύτητες.

Χυτά. Χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σταθερών μερών ηλεκτρικών μηχανών (π.χ. ζυγώματα), τα οποία δεν υπόκεινται σε μεγάλες μηχανικές καταπονήσεις. Για περιστρεφόμενα μέρη αυξάνεται η περιεκτικότητα σε άνθρακα σε βάρος της μαγνητικής διαπερατότητας.

Οι μαγνητικές ιδιότητες του χυτοσίδηρου είναι φτωχές, αλλά έχει σημειωθεί σημαντική ανάπτυξη στην κατασκευή χυτοσιδήρου.

Ένα κράμα χυτοσίδηρου, το οποίο διαθέτει περιεκτικότητα 10 % σε νικέλιο και 5 % σε μαγγάνιο, αποτελεί σχεδόν αμαγνητικό υλικό ($\mu_r \approx 1.1$) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν είναι επιθυμητό να αποφευχθεί η διακλάδωση ενός μαγνητικού πεδίου.

Σφυρήλατα υλικά. Οι σφυρηλατημένοι χάλυβες χρησιμοποιούνται εκτενώς στην κατασκευή των δρομέων των στροβιλο-εναλλακτήρων, ο δρομέας σφυρηλατείται και κατεργάζεται από μια ράβδο που έχει χυτευθεί. Είναι απόλυτα απαραίτητη μια υψηλή μηχανική αντοχή. Επίσης, οι δακτύλιοι σύσφιξης είναι σφυρήλατοι ενώ, κατασκευάζονται από χάλυβα ή αμαγνητικό κράμα χάλυβα που περιέχει χρώμιο, νικελ και μαγγάνιο. Στον πίνακα 2.3 εμφανίζονται οι επιτρεπόμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής για διάφορα τμήματα ηλεκτρικών μηχανών.

Πίνακας 2.3 [E59, page 179]

Επιτρεπόμενες Τιμές Μαγνητικής Επαγωγής : Wb/m^2

Υλικό μηχανής	Τμήμα μηχανής		
	Οδοντώσεις	Πυρήνας	Μετασχημαπιστές
Ελάσματα πυρήνα (50 Hz)	1,8 – 2,1	0,7 – 1,1	1,0 – 1,55
	Πόλοι	Ζυγώματα κλπ	
Χυτοχάλυβας	1,9	1,5	
Χυτοσίδηρος		0,7	
Μαγνητική Ροή	Εναλλασσόμενη	Σταθερή	
Αεροδιάκενο	0,6	1,1	

2.5.4 Υπολογισμός μαγνητικών κυκλωμάτων

Με την προϋπόθεση ότι διατίθενται οι καμπύλες B/at για τα υλικά που χρησιμοποιούνται, το μαγνητικό κύκλωμα διαιρείται σε βολικά τμήματα, τα οποία συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα μεταξύ τους, για κάθε τμήμα υπολογίζεται η τιμή της μαγνητικής επαγωγής για ένα δεδομένο σύνολο συνθηκών, και βρίσκονται οι αντίστοιχες τιμές των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο at , οι οποίες πολλαπλασιάζονται με το μήκος κάθε κομματιού. Από την άθροιση των αμπερελιγμάτων που απαιτούνται από όλα τα τμήματα που

συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά προκύπτει ο συνολικός αριθμός των αμπερελιγμάτων που απαιτούνται. Ορισμένα τμήματα του μαγνητικού κυκλώματος από τα οποία σχηματίζονται φυσικοί τομείς (π.χ. από το διάκενο ή τις οδοντώσεις), αποτελούν αρκετά περίπλοκα μαγνητικά προβλήματα, για τα οποία έχουν αναπτυχθεί ειδικές μέθοδοι, όπως αυτές που παρατίθενται παρακάτω. Θεωρούνται οι βασικές παράμετροι σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών που παρατίθενται στον πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4 [Ξ59, page 179]

Βασικές Παράμετροι Σχεδίασης Ηλεκτρικών Μηχανών

Σύμβολο	Παράμετρος	Μονάδες Μέτρησης
L	Μήκος πυρήνα	m
L_i	Καθαρό μήκος σιδήρου στον πυρήνα	m
l_g	Μήκος διακένου	m
Y	Πολικό βήμα	m
y_s	Βήμα αύλακας	m
w_o	Άνοιγμα αύλακας	m
n_d	Αριθμός διακένων αερισμού	
w_d	Πλάτος των διακένων αερισμού	m

Αεροδιάκενο. Το διάκενο οριοθετείται και στις δυο πλευρές του από επιφάνειες σιδήρου εκ των οποίων μπορεί η μια ή και οι δύο να διαθέτουν οδοντώσεις, οι οποίες παρέχονται με ανοίγματα διακένων ή έχουν κωνική μορφή, με τέτοιο τρόπο, ώστε να καθίσταται δύσκολο να ληφθεί μια ακριβής εκτίμηση της μαγνητικής αντίστασης του διακένου ή ο αριθμός των αμπερελιγμάτων που απαιτούνται, προκειμένου να μεταφερθεί μια δεδομένη τιμή μαγνητικής ροής διαμέσου του. Γενικά το πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση των αναλυτικών αποτελεσμάτων του Carter. Στο σχήμα 2.15.α, η παρουσία των αυλάκων ή των διάκενων αυξάνει τη μαγνητική αντίσταση του διακένου και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μαγνητική ροή να περιοριστεί ή να <<συμβιβαστεί>> σε ένα βαθμό, ο οποίος εξαρτάται από το πλάτος του ανοίγματος και το μήκος του διακένου. Η μαγνητική αγωγιμότητα του διακένου πάνω από το βήμα της αύλακας y_s ανά μέτρο αξονικού μήκους της είναι μικρότερη αν αγνοηθούν οι αύλακες (σχήμα 2.15.β), αλλά μεγαλύτερη από εκείνη που προέκυψε από την υπόθεση ότι από τα τμήματα των αυλάκων δεν μεταφέρεται μαγνητική ροή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15.γ. Το σμικρυνόμενο ενεργό πλάτος του βήματος της αύλακας προκύπτει από τη σχέση (2.33).

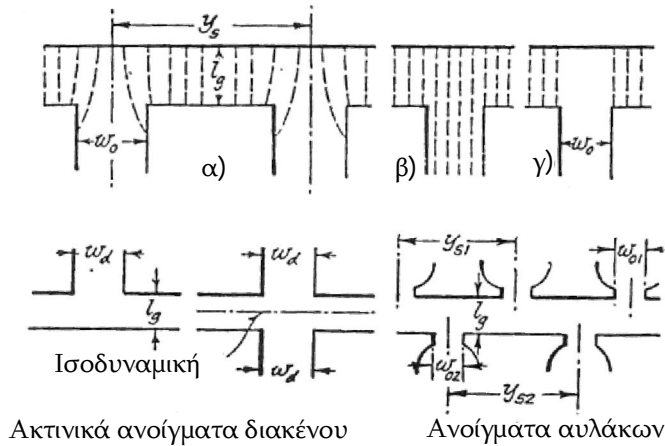
$$y'_s = y_s - k_o \cdot w_o \quad (2.33)$$

Όπου k_o είναι μια συνάρτηση του λόγου w_o/l_g , η οποία λαμβάνεται από τις καμπύλες των συντελεστών του Carter που παρατίθενται στο σχήμα 2.16 και w_o είναι το άνοιγμα της αύλακας.

Όμοια, τα ακτινικά διάκενα σύμφωνα με το σχήμα 2.15 μπορούν να υπολογισθούν με τη σμίκρυνση του αξονικού μήκους L της επιφάνειας του διακένου σε L' σύμφωνα με τη σχέση (2.34).

$$L' = L - k_d \cdot n_d \cdot w_d \quad (2.34)$$

Όπου ο συντελεστής k_d είναι μια συνάρτηση του λόγου (w_d/l_g), η οποία λαμβάνεται από τις καμπύλες των συντελεστών του Carter που παρατίθενται στο σχήμα 2.16 και w_d είναι το άνοιγμα του διάκενου αερισμού. Εάν, όπως συχνά συμβαίνει στην πράξη, τα διάκενα στο στάτη και στο δρομέα συμπίπτουν τότε, το κεντρικό επίπεδο του διακένου μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μια ισοδυναμική επιφάνεια και εφαρμόζεται η εξίσωση (2.34), αλλά με το συντελεστή k_d να λαμβάνεται από το λόγο ($w_d/\frac{1}{2} \cdot l_g$). Για αυτό θα ήταν προφανώς λάθος να σμικρυνθεί κάθε ένα διάκενο αερισμού ξεχωριστά.



Σχήμα 2.15 : Ανοίγματα διάκενου - επιφάνειας [Ξ59, Fig. 114, page 180]

Σε ορισμένες περιπτώσεις και οι δύο πλευρές του διακένου διαθέτουν αύλακες. Ένας πιο βολικός τρόπος μέσω του οποίου αντιμετωπίζονται αυτές οι περιπτώσεις είναι να θεωρηθεί ότι το μήκος του διακένου l_g θα επιμηκυνθεί και θα λάβει τιμή ίση με l'_g για να ληφθεί υπόψη η αυξημένη μαγνητική αντίσταση του διακένου που οφείλεται στα ανοίγματα των αυλάκων. Τότε εφαρμόζονται οι ακόλουθες εκφράσεις, και ο συντελεστής του Carter λαμβάνεται από την καμπύλη του σχήματος 2.16 για ανοικτές ή ημί-κλειστες αύλακες ανάλογα με την περίπτωση.

$$l'_g = k_g \cdot l_g \quad (2.35)$$

$$\begin{cases} k_{g1} = \frac{y_{s1}}{y_{s1} - k_{o1} \cdot w_{o1}} \\ k_{g2} = \frac{y_{s2}}{y_{s1} - k_{o2} \cdot w_{o2}} \end{cases} \Rightarrow k_g = k_{g1} \cdot k_{g2} \quad (2.36)$$

Οι διάφορες ποσότητες που εμφανίζονται στο σχήμα 2.15: k_{o1} και k_{o2} είναι συναρτήσεις των λόγων w_{o1}/l_g και w_{o2}/l_g αντίστοιχα, και προκύπτουν από το σχήμα 2.16.

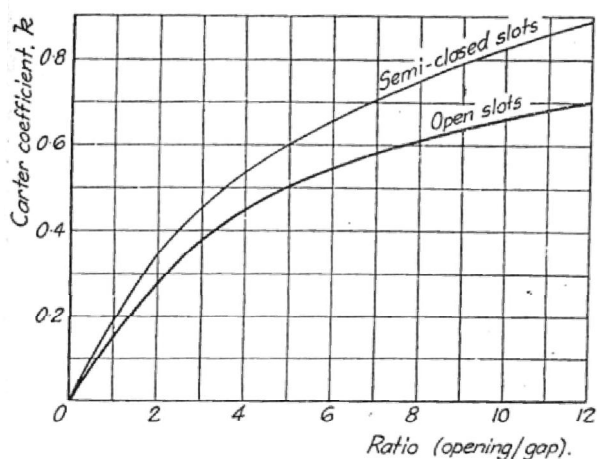
Τα αμπερελίγματα του διακένου για ένα έκτυπο πόλο υπολογίζονται από την εξίσωση (2.37).

$$A \cdot N_g = 800.000 \cdot k_g \cdot B_g \cdot l_g \quad (2.37)$$

όπου: l_g είναι το μήκος του διακένου στο κέντρο του πόλου, B_g είναι η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής του διακένου (στο ίδιο σημείο) και ο συντελεστής $k_g = (L/L') \times$

(y_s/y'_s) λαμβάνει υπόψη τα ανοίγματα των αυλάκων και των διακένων αερισμού. Εδώ, τιμή της μαγνητικής επαγωγής του διακένου B_g μπορεί να ληφθεί ως η μέση τιμή της μαγνητικής επαγωγής \bar{B} πολλαπλασιασμένη με το λόγο (πολικό βήμα / πολικό τόξο). Στις περιπτώσεις που υφίστανται μεγάλα διάκενα μπορεί να θεωρηθεί ότι, το πολικό τόξο επεκτείνεται για παράδειγμα κατά $4l_g$ προκειμένου να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της θυσάνωσης.

Κατανομή μαγνητικής επαγωγής διακένου. Μερικές φορές αποτελεί πλεονέκτημα η εκτίμηση του περιεχομένου των αρμονικών συνιστωσών της κατανομής της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Μια μέθοδος που δίνει μια τέτοια εκτίμηση για τις περιττές αρμονικές (οι άρτιες υπό κανονικές συνθήκες δεν εμφανίζονται) απεικονίζεται στο σχήμα



Σχήμα 2.16: Συντελεστής Carter για διάκενα [Ξ59, Fig. 115, page 181]

2.17.α. Το περίγραμμα του μισού πολικού τόξου έχει σχεδιαστεί σε μεγάλη κλίμακα και το ήμισυ του πολικού βήματος του στάτη έχει διαιρεθεί σε έξι τμήματα, με το σημείο μηδέν να τοποθετείται στον άξονα που υφίσταται ανάμεσα στους πόλους, ενώ το σημείο μηδέν τοποθετείται στο κέντρο του πόλου. Από κάθε σημείο της διαίρεσης σχεδιάζεται μια μαγνητική γραμμή η οποία, εξέρχεται και εισέρχεται από τις επιφάνειες του σιδήρου κάθετα, χρησιμοποιώντας ως βοήθημα για τη σχεδίαση μαγνητικών γραμμών τους κανόνες των καμπυλόγραμμων τετραγώνων. Τότε υποτίθεται ότι η μαγνητική επαγωγή στο κέντρο του πόλου, όπου το μήκος του διακένου είναι l_g είναι 100, και ότι στα υπόλοιπα σημεία η μαγνητική επαγωγή είναι $100 \cdot l_g/l$, όπου l είναι το μήκος των μαγνητικών γραμμών που έχουν σχεδιαστεί. Ένα διάγραμμα των αποτελεσμάτων (β), εμφανίζει μια θετική τιμή στο σημείο 0. Αυτή πρέπει να είναι μηδενική, έτσι σχεδιάζεται μια ευθεία γραμμή παράλληλα προς τον άξονα της μαγνητικής επαγωγής B από το σημείο 0 κάτω στη μηδενική τιμή στο σημείο εκείνο από το οποίο ξεκινά το επίπεδο του πόλου. Η πραγματική τιμή της μαγνητικής επαγωγής λαμβάνεται ως η τεταγμένη ανάμεσα στην ευθεία γραμμή και το αυθεντικό διάγραμμα της μαγνητικής επαγωγής B με την υπόθεση ότι η ροή που αφαιρέθηκε αποτελεί ένα αποτέλεσμα του γειτονικού πόλου, ο οποίος διαθέτει την αντίθετη πολικότητα. Τώρα μπορεί να αναλυθεί η καθαρή καμπύλη, που υποδεικνύεται από τις τιμές $b_0 (= 0)$, b_1 , $b_2 \dots b_5$, $b_6 (= 100)$. Οι συντελεστές των αρμονικών και της θεμελιώδους παρατίθενται παρακάτω.

$$B_1 = 0.086 \cdot b_1 + 0.167 \cdot b_2 + 0.236 \cdot b_3 + 0.289 \cdot b_4 + 0.323 \cdot b_5 + 0.167 \cdot b_6$$

$$B_3 = 0.236 \cdot b_1 + 0.333 \cdot b_2 + 0.236 \cdot b_3 + 0.000 \cdot b_4 - 0.236 \cdot b_5 - 0.167 \cdot b_6$$

$$B_5 = 0.323 \cdot b_1 + 0.167 \cdot b_2 - 0.236 \cdot b_3 - 0.289 \cdot b_4 + 0.086 \cdot b_5 + 0.167 \cdot b_6$$

$$B_7 = 0.323 \cdot b_1 - 0.167 \cdot b_2 - 0.236 \cdot b_3 + 0.289 \cdot b_4 + 0.086 \cdot b_5 - 0.167 \cdot b_6$$

Μπορεί να πραγματοποιηθεί μια καλύτερη προσέγγιση εάν το ήμισυ του πολικού βήματος διαιρεθεί σε δώδεκα τμήματα. Οι συντελεστές για αυτήν την περίπτωση παρατίθενται στον πίνακα 2.5.

Και στις δύο περιπτώσεις η εξίσωση της κατανομής της μαγνητικής ροής προκύπτει από τη σχέση (2.38) ενώ, η μέση και η ενεργός (rms) τιμή της προκύπτουν από τις σχέσεις (2.39) και (2.40) αντίστοιχα.

$$B = B_1 \cdot \sin\theta + B_3 \cdot \sin3\theta + B_5 \cdot \sin5\theta + B_7 \cdot \sin7\theta \quad (2.38)$$

$$\bar{B} = (2/\pi) \cdot \left(B_1 + \frac{1}{3} \cdot B_3 + \frac{1}{5} \cdot B_5 + \frac{1}{7} \cdot B_7 \right) \quad (2.39)$$

$$B_{rms} = \sqrt{\left[\frac{1}{2} \cdot (B_1^2 + B_3^2 + B_5^2 + B_7^2) \right]} \quad (2.40)$$

Πίνακας 2.5 [Ξ59, Table page 182]

Συντελεστές Αρμονικών Μαγνητικής Επαγωγής στο Διάκενο

Αρμονική	Συντελεστής					
	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
B_1	0.022	0.043	0.064	0.083	0.102	0.118
B_3	0.064	0.118	0.154	0.167	0.154	0.118
B_5	0.115	0.161	0.154	0.083	-0.022	-0.118
B_7	0.132	0.161	0.064	-0.083	-0.165	-0.118
	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}
B_1	0.132	0.144	0.154	0.161	0.165	0.083
B_3	0.064	0.000	-0.064	-0.118	-0.154	-0.083
B_5	-0.165	-0.144	-0.064	0.043	0.132	0.083
B_7	0.022	0.144	0.154	0.043	-0.102	-0.083

Εφαρμογή : Ένα διάγραμμα μαγνητικής επαγωγής έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, και διαθέτει τη μορφή που εμφανίζεται στο σχήμα 2.17.β, ενώ αποδίδει τις ακόλουθες τιμές: $b_1 = 10$, $b_2 = 31$, $b_3 = 68$, $b_4 = 100$, $b_5 = 100$, $b_6 = 100$. Μετά από αντικατάσταση των τιμών αυτών στις σχέσεις υπολογισμού της θεμελιώδους συνιστώσας και των αρμονικών που παρατίθενται παραπάνω για την περίπτωση που η καμπύλη χωρίζεται σε έξι σημεία, προκύπτουν οι ακόλουθες συνιστώσες:

$$B_1 = 0.086 \cdot 10 + 0.167 \cdot 31 + 0.236 \cdot 68 + 0.289 \cdot 100 + 0.323 \cdot 100 + 0.167 \cdot 100 \Rightarrow$$

$$B_1 = 0.86 + 5.177 + 16.048 + 28.9 + 32.3 + 16.7 \Rightarrow B_1 = 99.99 \%$$

$$B_3 = 0.236 \cdot 10 + 0.333 \cdot 31 + 0.236 \cdot 68 + 0.000 \cdot 100 - 0.236 \cdot 100 - 0.167 \cdot 100$$

$$B_3 = 2.36 + 10.323 + 16.048 + 0.0 - 23.6 - 16.7 \Rightarrow B_3 = -11.57 \%$$

$$B_5 = 0.323 \cdot 10 + 0.167 \cdot 31 - 0.236 \cdot 68 - 0.289 \cdot 100 + 0.086 \cdot 100 + 0.167 \cdot 100$$

$$B_5 = 3.23 + 5.177 - 16.048 - 28.9 + 8.6 + 16.7 \Rightarrow B_5 = -11.24 \%$$

$$B_7 = 0.323 \cdot 10 - 0.167 \cdot 31 - 0.236 \cdot 68 + 0.289 \cdot 100 + 0.086 \cdot 100 - 0.167 \cdot 100$$

$$B_7 = 3.23 - 5.177 - 16.048 + 28.9 + 8.6 - 16.7 \Rightarrow B_7 = 2.8 \%$$

οι οποίες έχουν σχεδιαστεί στο σχήμα 2.17.γ. Η μέση και η ενεργός τιμή της μαγνητικής επαγωγής θα υπολογιστούν μετά από αντικατάσταση των παραμέτρων στις σχέσεις (2.39) και (2.40) αντίστοιχα.

$$\bar{B} = (2/\pi) \cdot \left[99.99 + \frac{1}{3} \cdot (-11.57) + \frac{1}{5} \cdot (-11.24) + \frac{1}{7} \cdot 2.8 \right] \Rightarrow \bar{B} = 60.024 \%$$

$$B_{rms} = \sqrt{\left\{ \frac{1}{2} \cdot [99.99^2 + (-11.57)^2 + (-11.24)^2 + 2.8^2] \right\}} \Rightarrow B_{rms} = 71.645 \%$$

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η επίδραση των αρμονικών είναι αμελητέα στην ενεργό τιμή της μαγνητικής επαγωγής. Επιπρόσθετα, η μέγιστη τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής είναι σχεδόν η ίδια με τη μέγιστη πραγματική τιμή της μαγνητικής επαγωγής. Αυτό όμως δεν ισχύει πάντα.

Η μέθοδος που έχει περιγραφεί μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες περιπτώσεις ιδιαίτερα στην κατανομή της μαγνητικής ροής που οφείλεται στη Μ.Ε.Δ. του εγκάρσιου άξονα μιας μηχανής έκτυπων πόλων.

Οδοντώσεις: πραγματική και φαινομένη μαγνητική επαγωγή. Η πραγματική ή ενεργός μαγνητική επαγωγή οφείλεται στην πραγματική μαγνητική ροή η οποία διέρχεται διαμέσου μιας οδόντωσης. Η φαινομένη μαγνητική επαγωγή οφείλεται στη συνολική μαγνητική ροή που πρέπει να διέλθει διαμέσου μιας οδόντωσης. Επειδή τμήμα της μαγνητικής ροής διέρχεται διαμέσου των αυλάκων η πραγματική τιμή της μαγνητικής επαγωγής είναι πάντα μικρότερη από τη φαινομένη τιμή της.

Η μαγνητική ροή που εισέρχεται σε ένα επαγωγίμο από το διάκενο ακολουθεί διαδρομές κυρίως στον πυρήνα. Όπου η μαγνητική επαγωγή της οδόντωσης είναι υψηλή, η Μ.Ε.Δ. επαρκεί για να παραχθεί μια υπολογίσιμη μαγνητική επαγωγή στις αυλάκες και στα διάκενα αερισμού. Κατά συνέπεια μια εκτίμηση της μαγνητικής επαγωγής της οδόντωσης που βασίζεται μόνο στο εμβαδόν της περιοχής της οδόντωσης είναι λανθασμένη. Αποκαλώντας αυτήν τη φαινομένη τιμή της μαγνητικής επαγωγής B'_t και την πραγματική τιμή της μαγνητικής επαγωγής B_t , η σχέση (2.41) επιτρέπει να ληφθεί η πραγματική τιμή της μαγνητικής επαγωγής καθώς και η αντίστοιχη μαγνητεγερτική δύναμη ανά μέτρο, η οποία εκφράζεται σε αμπέρ-ελίγματα.

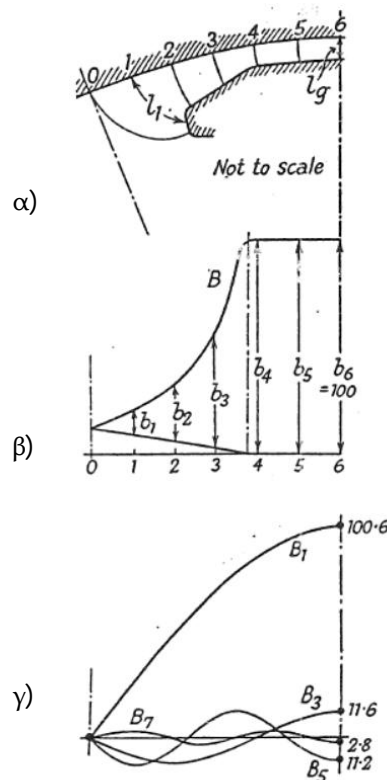
$$B'_t = B_t + \mu_o \cdot at \cdot (K - 1) \quad (2.41)$$

Ο δεύτερος όρος στην εξίσωση (2.41) αναφέρεται στο σχετικό σύνολο της μαγνητικής ροής που μεταφέρεται από το μη σιδηρομαγνητικό τμήμα της μαγνητικής διαδρομής. Ο

συντελεστής αύλακας K λαμβάνεται από την εξίσωση (2.42) και πρέπει να προσδιοριστεί για κάθε τμήμα που έχει ληφθεί.

$$K = \frac{\text{Συνδυασμένο τμήμα σιδήρου και αέρα}}{\text{Καθαρό τμήμα σιδήρου}} \quad (2.42)$$

Κατά τον υπολογισμό του τμήματος σιδήρου πρέπει να ενσωματωθεί ο συντελεστής χώρου του ελασματοποιημένου υλικού, ο οποίος κατά προσέγγιση λαμβάνεται ίσος με 0,9 (συντελεστής σιδήρου). Στην πράξη ο συντελεστής αύλακας K μπορεί να λαμβάνει τιμές κατά προσέγγιση από 1,5 για μηχανές που δεν διαθέτουν διάκενα αερισμού έως και 4 για τις βάσεις των οδοντώσεων των δρομέων στροβίλο-εναλλακτών.



Σχήμα 2.17: Ανάλυση της κατανομής της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο [Ξ59, Fig. 116, page 183]

Κωνικές οδοντώσεις. Οι αύλακες που έχουν διανοιχτεί στα φύλλα του πυρήνα των ηλεκτρικών μηχανών έχουν σχήμα ορθογωνίου έτσι, ώστε οι οδοντώσεις να είναι κωνικές. Οι υψηλές τιμές του κορεσμού στις οδοντώσεις καθιστούν αναγκαία μια προσεκτική εκτίμηση των αμπερελιγμάτων της διέγερσης. Εκτός από τις αναλυτικές μεθόδους, η απλούστερη αντιμετώπιση του προβλήματος πραγματοποιείται μέσω της γραφικής μεθόδου ή μέσω της μεθόδου των τριών σημείων (Μέθοδος Simpson).

α) Γραφική μέθοδος. Από τη γνωστή τιμή της μαγνητικής ροής ανά οδόντωση, η μαγνητική επαγωγή υπολογίζεται για ένα αριθμό τμημάτων κατά μήκος της οδόντωσης από την κορυφή προς τη βάση της πραγματοποιώντας εάν είναι απαραίτητο διορθώσεις για την πραγματική τιμή της μαγνητικής επαγωγής B_t σύμφωνα με την προανα-

φερθείσα μέθοδο. Από μια κατάλληλη καμπύλη B/at σχεδιάζονται οι αντίστοιχες τιμές των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο και από αυτές προκύπτει η μέση τιμή τους (π.χ. από την εμβαδομέτρηση της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη). Αυτή η μέση τιμή, εφόσον πολλαπλασιαστεί με το μήκος της οδόντωσης, δίνει τα αναγκαία αμπερελίγματα της διέγερσης. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για τις οδοντώσεις των δρομέων των στροβιλο-εναλλακτών, και είναι απαραίτητη για δύσκολες περιπτώσεις όπου η ακρίβεια είναι σημαντική.

β) Μέθοδος των τριών σημείων. Για περιπτώσεις οδοντώσεων με απλή μορφή οι οποίες, έχουν μικρή κωνικότητα, μπορεί να εφαρμοστεί ο κανόνας του Simpson στις τιμές των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο at που έχουν ληφθεί για τρία ισαπέχοντα τμήματα. Αν αυτές οι τιμές των αμπερελιγμάτων είναι αντίστοιχα οι at_1 , at_2 και at_3 , τότε η μέση τιμή τους θα υπολογιστεί από τη σχέση (2.43). Αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι η καμπύλη που σχετίζει τα αμπερελίγματα ανά μέτρο at με το μήκος της οδόντωσης είναι παραβολική.

$$at = \frac{1}{6} \cdot (at_1 + 4 \cdot at_2 + at_3) \quad (2.43)$$

γ) Μαγνητική επαγωγή στο ένα τρίτο του μήκους της οδόντωσης η οποία, μετρείται από τη στενότερη πλευρά της. Για οδοντώσεις μικρής κωνικότητας, οι οποίες βρίσκονται σε χαμηλό μαγνητικό κορεσμό μπορεί να είναι αρκετό να βρεθεί η τιμή της μαγνητικής επαγωγής $B_{t\ 1/3}$ στο ένα τρίτο του μήκους της οδόντωσης. Αυτή η απόσταση θα μετρηθεί από το στενότερο άκρο της οδόντωσης, ενώ οι υπολογισμοί της βασίζονται στην υπόθεση ότι αυτή η τιμή της μαγνητικής επαγωγής (με την αντίστοιχη τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο at) ισχύει σε όλο το μήκος της οδόντωσης.

δ) Μέθοδος ολοκλήρωσης. Μια ακριβής πρακτική μέθοδος, η οποία χρησιμοποιεί παράγοντες που λαμβάνονται με γραφική ολοκλήρωση, μπορεί να εφαρμοστεί σε όλο το εύρος των τιμών της μαγνητικής επαγωγής και σε όλες τις αναλογίες οδοντώσεων και ανοιγμάτων (διακένων).

Ρεύμα μαγνητίσεως. Η συνολική διέγερση που πρέπει να παρέχεται από το τύλιγμα διέγερσης προκύπτει από το άθροισμα των αμπερελιγμάτων για τα διάφορα μέρη ενός μαγνητικού κυκλώματος που συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά. Το ρεύμα με το οποίο πρόκειται να τροφοδοτηθεί το τύλιγμα διέγερσης εξαρτάται από τον αριθμό των ελιγμάτων της περιέλιξης και από τον τρόπο σύμφωνα με τον οποίο έχει κατανεμηθεί. Η απλούστερη περίπτωση είναι εκείνη ενός συγκεντρωμένου τυλίγματος, το οποίο είναι πλήρως (ή σχεδόν πλήρως) συζευγμένο με τη συνολική μαγνητική ροή που παράγεται, όπως στην περίπτωση των ηλεκτρικών μηχανών έκτυπων πόλων ή των μετασχηματιστών. Για αυτήν την περίπτωση, εάν απαιτούνται συνολικά αμπερελίγματα ίσα με $A \cdot N$, τότε το τύλιγμα που διαθέτει αριθμό ελιγμάτων N_p απαιτείται να διαρρέεται από ένα ρεύμα έντασης $I = A \cdot N / N_p$. Οι περιπτώσεις που είναι περισσότερο περίπλοκες δεν εξετάζονται μέχρις ότου ληφθούν υπόψη όλες οι λεπτομέρειες της περιέλιξης και θα αναφέρονται μόνο τα αποτελέσματα.

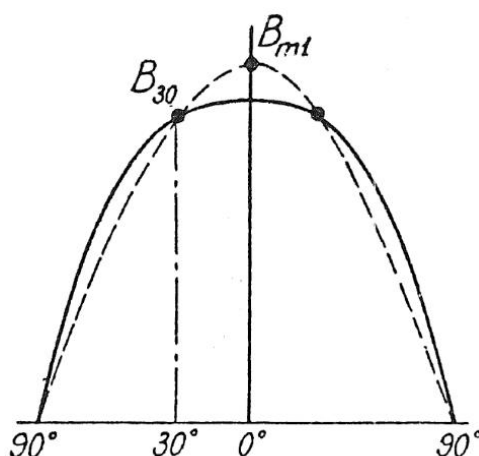
Για τριφασικά ομοιόμορφα κατανομημένα τυλίγματα με διασπορά 60° ανά φάση τα οποία διαρρέονται από ημιτονοειδή εναλλασσόμενα ρεύματα, η καμπύλη της μαγνητεγερτικής δύναμης (Μ.Ε.Δ.) διαθέτει κατά προσέγγιση ημιτονοειδές σχήμα σύμφωνα με το σχήμα 2.19, και έχει μια μέγιστη τιμή F_α η οποία σχετίζεται με την ενεργό τιμή του ρεύματος μαγνητίσεως ανά φάση μέσω της εξίσωσης (2.44) και έχει μονάδες μέτρησης αμπερελίγματα ανά πόλο.

$$F_\alpha = 1,35 \cdot I \cdot N_{ph} \cdot K_w / p \quad (2.44)$$

Στην περίπτωση των επαγωγικών κινητήρων η κατανομή της μαγνητικής ροής διαφέρει από την ημιτονοειδή μορφή και ο μαγνητικός κορεσμός της οδόντωσης προκαλεί μια έντονη πεπλατυσμένη (επιπεδοποίηση) στην κυματομορφή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο σύμφωνα με το σχήμα 2.18. Έτσι, η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής B_{max} δεν εξαρτάται από τις τιμές της Η.Ε.Δ., των ελιγμάτων και της συχνότητας. Για μέτριο κορεσμό του μαγνητικού κυκλώματος, η πεπλατυσμένη καμπύλη της μαγνητικής επαγωγής μπορεί να θεωρηθεί ότι απαρτίζεται από μια θεμελιώδη συνιστώσα και μια υπερτιθέμενη τρίτη αρμονική. Η τελευταία θα επηρεάσει ελάχιστα την Η.Ε.Δ. έτσι, ώστε οι υπολογισμοί οι οποίοι βασίζονται στην τιμή B_{30° , η οποία είναι η τιμή της μαγνητικής επαγωγής σε μια γωνία ίση με 30° από το κέντρο του πόλου (που είναι συνηθισμένη στην πραγματική πεπλατυσμένη κατανομή και στην θεμελιώδη συνιστώσα από την οποία εξαρτάται η Η.Ε.Δ.), θα δώσουν αποτελέσματα πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές για υπολογισμούς στην πράξη. Έτσι, η τιμή της μαγνητικής επαγωγής σε γωνία 30° από το κέντρο του πόλου θα υπολογιστεί από τη σχέση (2.45), όπου A είναι το εμβαδόν διαμέσου του οποίου διέρχεται, η θεμελιώδης συνιστώσα της μαγνητικής ροής Φ_1 . Το ενεργό ρεύμα μαγνητίσεως εκφρασμένο σε αμπερελίγματα της διέγερσης $A \cdot N_{30^\circ}$ για την τιμή της μαγνητικής επαγωγής B_{30° προκύπτει από την εξίσωση (2.46).

$$B_{30^\circ} = B_{max1} \cdot \cos 30^\circ = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (\Phi_1 / A) \cdot (\sqrt{3} / 2) = 1,36 \cdot (\Phi_1 / A) \quad (2.45)$$

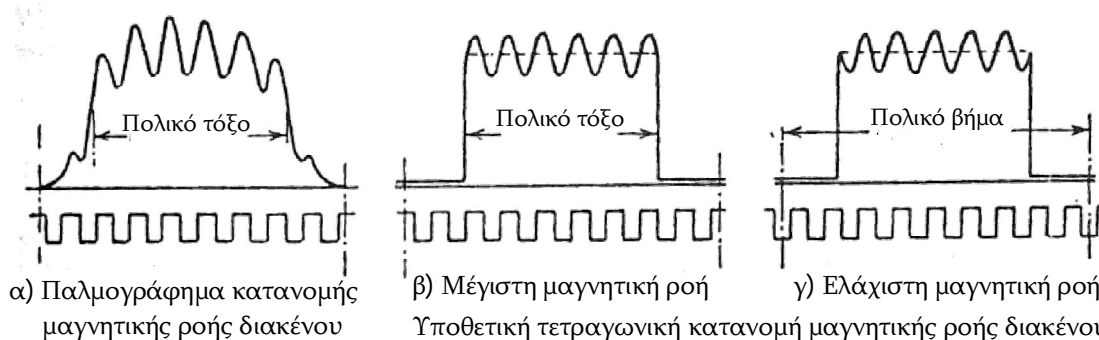
$$I = p \cdot A \cdot N_{30^\circ} / (1,35 \cdot K_w \cdot N_{ph} \cdot \cos 30^\circ) = p \cdot A \cdot N_{30^\circ} / (1,17 \cdot K_w \cdot N_{ph}) \quad (2.46)$$



Σχήμα 2.18: Κατανομή μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο επαγωγικού κινητήρα [Ξ59, Fig. 117, page 185]

2.5.5 Ροή σκέδασης

Η ροή σκέδασης σε μη χρήσιμες διαδρομές μαγνητικών κυκλωμάτων επηρεάζει το μαγνητικό πεδίο της διέγερσης στην περίπτωση των ηλεκτρικών μηχανών, οι οποίες διεγείρονται από συνεχή τάση, και την επαγωγική αντίδραση των τυλιγμάτων εναλλασσομένου ρεύματος. Η εκτίμηση της πραγματοποιείται πάντα με δυσκολία εξαιτίας της σύνθετης γεωμετρίας των μαγνητικών διαδρομών της σκέδασης και γενικά δεν μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των επαγωγικών κινητήρων εξαρτώνται στενά από τη ροή σκέδασης, έτσι, ώστε οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται, προκειμένου να υπολογισθούν, να ελέγχονται προσεκτικά έναντι των δεδομένων που προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές.



Σχήμα 2.19 : Κυμάτωση μαγνητικής ροής οδοντώσεων [Ξ59, Fig. 136, page 223]

Η μαγνητική ροή ανά μονάδα μέτρησης της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος (αμπέρ) που διαρρέει ένα πηνίο που διαθέτει αριθμό ελιγμάτων ίσο με N_x , και περιβάλλει μια μαγνητική διαδρομή, η οποία έχει μαγνητική αντίσταση ίση με $R_{m x}$, υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (2.47) όπου: $Y_{m x} = 1/R_{m x} = \mu \cdot A_x/l_x$ είναι η μαγνητική αγωγιμότητα της διαδρομής της μαγνητικής ροής, η οποία διαθέτει ενεργό εμβαδόν A_x και μήκος l_x .

$$\Phi_x = N_x/R_{m x} = N_x \cdot Y_{m x} \quad (2.47)$$

Η επαγωγή σκέδασης είναι η πεπλεγμένη ροή, η οποία έχει μονάδες μέτρησης Weber ελίγματα ανά αμπέρ (Weber-turns/Ampere). Για ένα πηνίο, το οποίο έχει N_x ελίγματα αυτή, προκύπτει από τη σχέση (2.48) και έχει μονάδα μέτρησης το Henry. Εάν το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο εναλλάσσεται με μια συχνότητα f , αυτό θα έχει μια αντίδραση σκέδασης, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση (2.49) και μετριέται σε Ωμ.

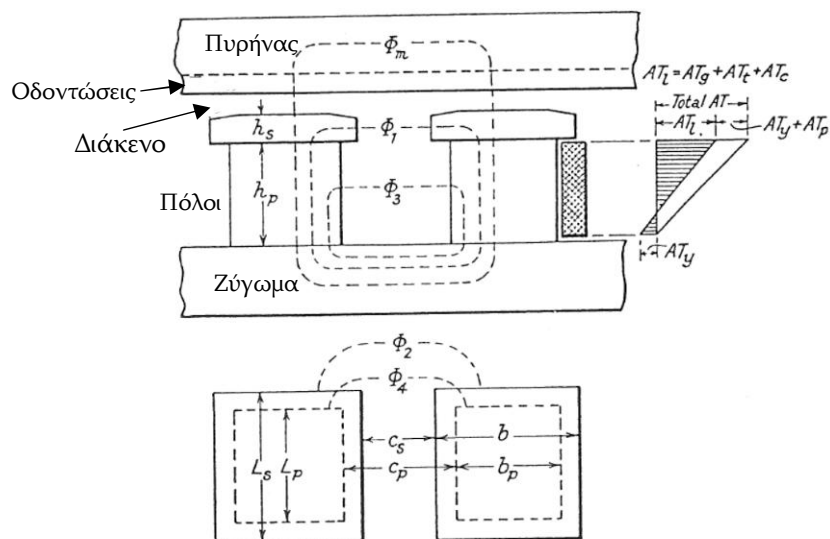
$$N_x \cdot \Phi_x = N_x^2 \cdot Y_{m x} \quad (2.48)$$

$$X_x = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_x^2 \cdot Y_{m x} \quad (2.49)$$

Η δυσκολία στην εφαρμογή της εξίσωσης (2.49) βρίσκεται στην εκτίμηση της τιμής της μαγνητικής αγωγιμότητας $Y_{m x}$. Είναι σύνηθες να υποθεθεί ότι από εκείνα τα τμήματα της διαδρομής της ροής σκέδασης τα οποία βρίσκονται στο σίδηρο θα απαιτηθεί ένα αμελητέο ποσοστό της Μ.Ε.Δ. του πηνίου, ισοδύναμο με την υπόθεση ο σίδηρος διαθέτει άπειρη μαγνητική διαπερατότητα.

Στη συνέχεια η προσοχή περιορίζεται στα μη μαγνητικά υλικά (ή τον αέρα) από τα οποία απαρτίζονται τα τμήματα της διαδρομής της μαγνητικής ροής και γίνεται μια προσπάθεια, προκειμένου να προβλεφθεί το γεωμετρικό πρότυπο της ροής σκέδασης, χρησιμοποιώντας τις επιφάνειες σιδήρου ως ισοδυναμικές επιφάνειες. Τότε, με διάφορες γεωμετρικές προσεγγίσεις η διαδρομή της μαγνητικής ροής που αποτελείται από αέρα διαιρείται σε κατάλληλα τμήματα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα για τα οποία μπορεί να υπολογισθεί ο λόγος A_x/l_x (ο συντελεστής μαγνητικής αγωγιμότητας). Τώρα, η συνολική μαγνητική αγωγιμότητα των τμημάτων της διαδρομής της ροής σκέδασης, τα οποία βρίσκονται στον αέρα, έχει προσδιορισθεί και οι εξισώσεις (2.47) και (2.49) έχουν εκτιμηθεί. Η μαγνητική αγωγιμότητα υπολογίζεται από τη σχέση (2.50) και το πρόβλημα της ροής σκέδασης και της επαγωγής σκέδασης εκφυλίζεται στον προσδιορισμό του συντελεστή μαγνητικής αγωγιμότητας λ_x . Θα παρατηρηθεί ότι η απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα μ γίνεται μ_0 διότι λαμβάνονται υπόψη διαδρομές οι οποίες περιέχουν μόνο μη μαγνητικά υλικά.

$$Y_{m x} = \mu_0 \cdot A_x / l_x = \mu_0 \cdot \lambda_x \quad (2.50)$$



Σχήμα 2.20 : Σκέδαση έκτυπων πόλων [Ξ59, Fig. 118, page 186]

Στο σχήμα 2.20 όπου: h_p το ύψος του πόλου, h_s το ύψος του πέλδου του πόλου, b_p το πλάτος του πυρήνα του πόλου, b το πλάτος του πόλου με τα τυλίγματα, L_p το μήκος του πυρήνα του πόλου (βάθος), L_s το μήκος του πόλου με τα τυλίγματα (βάθος), c_p η απόσταση ανάμεσα στους πυρήνες δύο διαδοχικών πόλων, c_s η απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς πόλους μετά την τοποθέτηση των τυλιγμάτων σε αυτούς.

Η ροή σκέδασης ανά αμπέρ εξαρτάται από τη διάταξη και τη γεωμετρία ενός τυλίγματος, και όχι από τη χρήση της ηλεκτρικής μηχανής στην οποία ανήκει. Ωστόσο, η επίδραση της σκέδασης στη λειτουργία εξαρτάται από τον τύπο της ηλεκτρικής μηχανής. Στις σύγχρονες μηχανές (και στις μηχανές συνεχούς ρεύματος επίσης), η ροή σκέδασης της διέγερσης παραμένει ακίνητη σε σχέση με το τύλιγμα της διέγερσης και υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας δεν υπάρχει Η.Ε.Δ. αυτεπαγωγής που αναπτύσσεται

από τη ροή σκέδασης. Στον επαγωγικό κινητήρα τα ρεύματα του δρομέα μεταβάλλονται, και με αυτό τον τρόπο παράγεται μια Η.Ε.Δ. της αντίδρασης σκέδασης, η ισοδύναμη της οποίας εμφανίζεται στην περιέλιξη του στάτη ως τμήμα της συνολικής Η.Ε.Δ. που οφείλεται στην αντίδραση σκέδασης. Μια περίληψη των σημαντικότερων περιπτώσεων πρακτικών εφαρμογών δίνεται παρακάτω.

1. Σκέδαση των έκτυπων πόλων. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται προσεγγιστικά. Οι περισσότεροι εναλλακτικές έκτυπων πόλων χαμηλής ταχύτητας συνηθισμένου μεγέθους, έχουν μεγάλο αριθμό πόλων σε μια μεγάλη διάμετρο, οι άξονες των πόλων είναι σχεδόν παράλληλοι και έτσι καθίσταται δυνατή η εφαρμογή μιας απλούστερης μεθόδου.

Η ροή σκέδασης χωρίζεται στα τμήματα από τα οποία απαρτίζεται και εμφανίζονται στο σχήμα 2.20. Στα αμπερελίγματα $I \cdot N_l$ από τα οποία παράγεται η ροή σκέδασης κατά τη λειτουργία εν κενώ περιλαμβάνονται τα αμπερελίγματα του διακένου $I \cdot N_g$, των οδοντώσεων $I \cdot N_t$, και του πυρήνα $I \cdot N_c$. Κατά προσέγγιση από τα αμπερελίγματα σκέδασης $I \cdot N_l$ παράγονται οι μαγνητικές ροές Φ_1 και Φ_2 , ενώ από αμπερελίγματα σκέδασης που είναι ίσα με $\frac{1}{2} I \cdot N_l$ παράγονται οι μαγνητικές ροές Φ_3 και Φ_4 . Λαμβάνοντας ότι η σκέδαση ανάμεσα στις απέναντι πλευρές (facing sides) γίνεται σε ευθείες γραμμές, και ότι ανάμεσα σε παράλληλες πλευρές (Φ_2 και Φ_4) γίνεται σαν ευθείες γραμμές συν δύο τεταρτοκύκλια, η εκτίμηση προκύπτει με τη χρήση των παρακάτω σχέσεων (2.51) και (2.52).

Σκέδαση ανάμεσα στα πέδιλα των πόλων, ανά πόλο,

$$\begin{aligned} \Phi_{sl} &= 2 \cdot \Phi_1 + 4 \cdot \Phi_2 \\ &= 2 \cdot \mu_o \cdot I \cdot N_l \cdot \frac{L_s \cdot h_s}{c_s} + 4 \cdot \mu_o \cdot I \cdot N_l \cdot \frac{h_s}{\pi} \cdot \log h \frac{c_s + \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot b}{c_s} \Rightarrow \\ \Phi_{sl} &= \mu_o \cdot I \cdot N_l \cdot \left[2 \cdot \frac{L_s \cdot h_s}{c_s} + 2,94 \cdot h_s \cdot \log_{10} \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi \cdot b}{c_s} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.51)$$

Σκέδαση ανάμεσα στους πόλους, ανά πόλο.

$$\begin{aligned} \Phi_{pl} &= 2 \cdot \Phi_3 + 4 \cdot \Phi_4 \Rightarrow \\ \Phi_{pl} &= \mu_o \cdot I \cdot N_l \cdot \left[\frac{L_p \cdot h_p}{c_p} + 1,47 \cdot h_p \cdot \log_{10} \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi \cdot b_p}{c_p} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.52)$$

Η ροή σκέδασης ανάμεσα στα πέδιλα των πόλων Φ_{sl} γενικά θα είναι της τάξης $20 \cdot I \cdot N_l \cdot 10^{-8}$, ενώ η ροή σκέδασης ανάμεσα στους πόλους Φ_{pl} στις περισσότερες περιπτώσεις κατά προσέγγιση θα είναι της τάξης $80 \cdot I \cdot N_l \cdot 10^{-8}$. Έτσι η μαγνητική ροή στο πίσω μέρος των πέδινων των πόλων είναι η κύρια μαγνητική ροή Φ (η οποία διασχίζει το διάκενο) $+ 20 \cdot I \cdot N_l \cdot 10^{-8}$, ενώ η μαγνητική ροή στη ρίζα του πόλου (δίπλα στο ζύγωμα) υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση (2.53).

$$\Phi + (20 + 80) \cdot I \cdot N_l \cdot 10^{-8} = \Phi + I \cdot N_l \cdot 10^{-6} \quad (2.53)$$

2. Σκέδαση μη έκτυπων πόλων. Εάν οι δακτύλιοι συγκράτησης των μετωπικών συν-

δέσεων της περιέλιξης έχουν κατασκευαστεί από μαγνητικό μέταλλο, τότε ο μη έκτυπος πόλος του δρομέα της στροβιλο-γεννήτριας διαθέτει αξιοσημείωτη σκέδαση της οποίας το σύνολο εξαρτάται από την τιμή της μαγνητικής επαγωγής κορεσμού του υλικού, ενώ για την επαγωγή θα φτάσει αυτό το σύνολο σε όλες τις κανονικές περιπτώσεις. Ένα σοβαρό μειονέκτημα της σκέδασης είναι ότι αυξάνει τον κορεσμό του πυρήνα και των οδοντώσεων του δρομέα (ιδιαίτερα σε διπολικές μηχανές). Οι μεγάλες μοντέρνες μηχανές έχουν ένα σημαντικό λόγο μήκους/διαμέτρου, μέσω αυτού η σκέδαση καθίσταται λιγότερο σημαντική. Επιπρόσθετα, έχει αναπτυχθεί ένα σχετικά μη μαγνητικό κράμα μαγνησιούχου χάλυβα για τους δακτυλίους συγκράτησης των μετωπικών συνδέσεων της περιέλιξης το οποίο, μειώνει σημαντικά τη σκέδαση και παρεμπιπτόντως τις διανεμημένες απώλειες φορτίου.

3. Σκέδαση επαγωγίμου. Η μαγνητική ροή που διαπερνά ένα επαγωγίμο καθορίζεται από τη διαμόρφωση των τμημάτων του μαγνητικού κυκλώματος και των τυλιγμάτων, και από τα ρεύματα από τα οποία διαρρέονται. Για λόγους ευκολίας, η συνολική υπάρχουσα μαγνητική ροή υποδιαιρείται στην κύρια ή χρήσιμη ροή, η οποία συνεισφέρει στη μετατροπή ενέργειας, και τη ροή σκέδασης, η οποία συνεισφέρει μόνο στην αναστρέψιμη αποθήκευση ενέργειας και παρέχει στη συσχετισμένη περιέλιξη τις ιδιότητες της επαγωγής σκέδασης και της αντίδρασης σκέδασης. Έτσι η πραγματική ροή, με όλα τα ηλεκτρομαγνητικά αποτελέσματά της θεωρείται ως η υπέρθεση της ωφέλιμης μαγνητικής ροής και της ροής σκέδασης. Η κάθε μια έχει να παίξει το δικό της ρόλο στη λειτουργία της μηχανής. Αλλά μόνο στην περίπτωση των άκρων των τυλιγμάτων της περιέλιξης που εξέχουν από τον πυρήνα (μετωπικές συνδέσεις τυλιγμάτων) (*overhang or end windings*) η ροή σκέδασης μπορεί να είναι πραγματικά διακεκριμένη ως μια ξεχωριστή οντότητα. Μέσα στη μάζα του επαγωγίμου η ροή σκέδασης και η πραγματική ροή είναι εκείνες οι οποίες υπερτίθενται, και με αυτόν τον τρόπο παράγεται η πραγματική κατανομή της συνολικής μαγνητικής ροής.

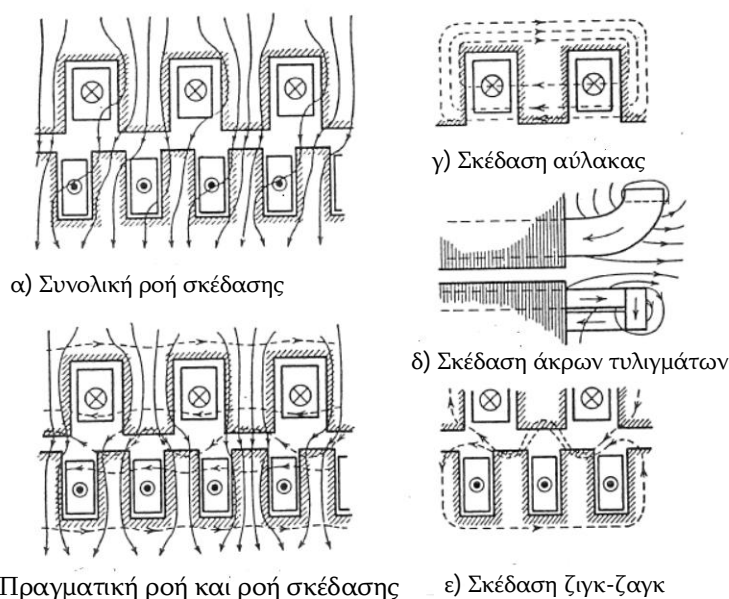
Στο σχήμα 2.21.α εμφανίζεται ένα διάκενο το οποίο οριοθετείται σε κάθε πλευρά του από μια μάζα σιδήρου, η οποία διαθέτει αύλακες. Εντός των αυλάκων τοποθετούνται αγωγοί, οι οποίοι διαρρέονται από κατάλληλα ρεύματα. Στην περίπτωση του επαγωγικού κινητήρα τα ρεύματα στις δύο περιελίξεις είναι ικανά έτσι ώστε να αποδοθεί κατά προσέγγιση μια ισοδυναμία των αμπερελιγμάτων ανά πόλο με αντίθετες μαγνητικές δυνάμεις. Οι μαγνητικές γραμμές της συνολικής μαγνητικής ροής κατά προσέγγιση είναι όπως υποδεικνύονται στο σχήμα 2.21.α. Στο σχήμα 2.21.β η μαγνητική ροή έχει αναλυθεί στις συνιστώσες της πραγματικής μαγνητικής ροής και της μαγνητικής ροής σκέδασης, ενώ από την άθροιση τους προκύπτει η συνολική μαγνητική ροή σε κάθε σημείο, όπως αυτή εμφανίζεται στο σχήμα 2.21.α. Τότε η πραγματική μαγνητική ροή είναι εκείνη η οποία ζευγνύει (*links*) τα τυλίγματα στις δύο πλευρές του διακένου, ενώ οι μαγνητικές γραμμές από τις οποίες ζευγνύεται το άλλο γειτονικό τύλιγμα αλλά όχι και τα δύο τυλίγματα (στάτη - δρομέα) απαρτίζουν τη ροή σκέδασης. Οι δύο κύριες φυσικές υποδιαιρέσεις της ροής σκέδασης είναι: 1) η ροή σκέδασης που οφείλεται στα άκρα των τυλιγμάτων (μετωπικές συνδέσεις τυλιγμάτων), η οποία εμφανίζεται στο σχήμα 2.21.δ και 2) η ροή σκέδασης της περιφέρειας του διακένου που υποδεικνύεται από

τις διακεκομμένες γραμμές στο σχήμα 2.21.β, και προκαλείται από την επίδραση του σωληνοειδούς των δύο αντιτιθέμενων συνόλων αμπερελιγμάτων σε συνδυασμό στο διάκενο. Για τη διευκόλυνση του υπολογισμού μπορεί να πραγματοποιηθεί μια περαιτέρω υποδιαίρεση της δεύτερης περίπτωσης, δηλαδή οι συνιστώσες αύλακας και ζιγκ-ζαγκ. Ένα επιπρόσθετο αποτέλεσμα το οποίο ονομάζεται διαφορική ή αρμονική σκέδαση, παρά το γεγονός ότι έχει διαφορετική προέλευση, έχει ένα αποτέλεσμα συγκρίσιμο με εκείνο της ροής σκέδασης.

1. Η ροή σκέδασης που οφείλεται στις μετωπικές συνδέσεις των τυλιγμάτων είναι μια πραγματική, ανεξάρτητη ροή σκέδασης και όχι μια αυθαίρετη συνιστώσα μιας σύνθετης μαγνητικής ροής. Η τιμή της εξαρτάται από τη διάταξη των άκρων των τυλιγμάτων και την εγγύτητα τους σε μεταλλικές μάζες – ιδιαίτερα φερομαγνητικές – όπως φλάντζες πυρήνων και καπάκια κινητήρων ή γεννητριών. Αυτή η ροή εμφανίζεται στο σχήμα 2.21.δ.

2. α) Η ροή σκέδασης των αύλακων διασχίζει τους αγωγούς από τη μια οδόντωση στην επόμενη. Είναι σε φάση με το ρεύμα για όλους τους αγωγούς σε μια δοθείσα ομάδα (πηνίο) φάσης, και εξαρτάται μόνο από το μέγεθος του ρεύματος, αγνοώντας το μαγνητικό κορεσμό και εμφανίζεται στο σχήμα 2.21.γ

β) Η ροή σκέδασης ζιγκ-ζαγκ εξαρτάται από το μήκος του διακένου και από τη σχετική θέση των δύο συνόλων των κορυφών των οδοντώσεων. Τείνει να έχει μορφή ζιγκ-ζαγκ εγκάρσια με το διάκενο αξιοποιώντας τη σχετικά υψηλή μαγνητική αγωγιμότητα των κορυφών των οδοντώσεων, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 2.21.ε.



Σχήμα 2.21 : Σκέδαση επαγωγισμού [Ξ59, Fig. 119, page 188]

Διαφορική σκέδαση. Αυτή αποτελεί ένα αποτέλεσμα της διαφοράς ανάμεσα στην κατανομή των αγωγών ή την κατανομή των ρευμάτων στις δύο πλευρές του διακένου. Θεωρείται το σχήμα 2.22.α, όπου δύο τυλίγματα με πανομοιότυπες κατανομές έχουν ένα λόγο ελιγμάτων 2:1. Είναι προφανές ότι εάν το ένα από αυτά, το πρωτεύον διεγερθεί και το άλλο, το δευτερεύον, είναι ανοικτοκυκλωμένο, ο λόγος των Η.Ε.Δ. θα προκύ-

ψει ίσος με 2:1. Εάν το δευτερεύον δεν διαθέτει αύλακες, η ροή σκέδασης που οφείλεται στις άκρες των τυλιγμάτων και η ροή σκέδασης ζιγκ-ζαγκ είναι μηδενικές και είναι βραχυκυκλωμένο, πρέπει να διαρρέεται από ένα ρεύμα I_2 τέτοιο ώστε οι συνολικές ροές σκέδασης να είναι μηδενικές, και για αυτό το λόγο πρέπει να ισχύει: $I_2 : I_1 = 2 : 1$. Αν θεωρηθεί τώρα ότι τα δύο τυλίγματα είναι διανεμημένα όπως στο σχήμα 2.22.β, με ένα λόγο ελιγμάτων 2:1 όπως προηγουμένως, αλλά με διαφορετικές κατανομές αγωγών. Ο λόγος των Η.Ε.Δ. όταν έχει διεγερθεί το πρωτεύον, ενώ το δευτερεύον είναι ανοικτοκυκλωμένο δεν θα είναι πλέον ίσος με 2:1, διότι η Η.Ε.Δ. εξαρτάται από την κατανομή των αγωγών. Περαιτέρω, στο βραχυκύκλωμα του δευτερεύοντος κάτω από τις ίδιες συνθήκες όπως προηγουμένως, οι συνολικές ροές σκέδασης του δευτερεύοντος πρέπει να είναι ίσες με μηδέν, π.χ.

$$[3 \cdot (8 \cdot 2y) + 1 \cdot (8 \cdot 2y + 4 \cdot 2y)] \cdot I_1 - [3 \cdot (4 \cdot 2y) + 1 \cdot (4 \cdot 2y + 1 \cdot 2y)] \cdot I_2 = 0 \Rightarrow$$

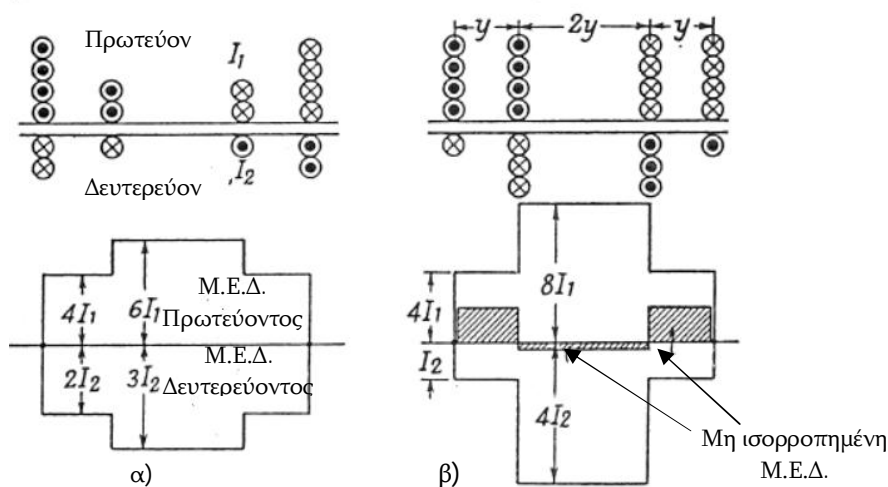
$$72y \cdot I_1 - 34y \cdot I_2 = 0 \Rightarrow I_2 = (72/34) \cdot I_1$$

ο οποίος είναι ένας λόγος διαφορετικός από το 2. Ωστόσο, οι ροές σκέδασης του πρωτεύοντος είναι:

$$[4 \cdot (8 \cdot 2y) + 4 \cdot (8 \cdot 2y + 4 \cdot 2y)] \cdot I_1 - [4 \cdot (4 \cdot 2y) + 4 \cdot (4 \cdot 2y + 1 \cdot 2y)] \cdot I_2 = 0 \Rightarrow$$

$$160y \cdot I_1 - 72y \cdot I_2 = 0 \Rightarrow \left. \begin{array}{l} 160y \cdot I_1 - 72y \cdot I_2 = 0 \\ I_2 = (72/34) \cdot I_1 \end{array} \right\} \Rightarrow$$

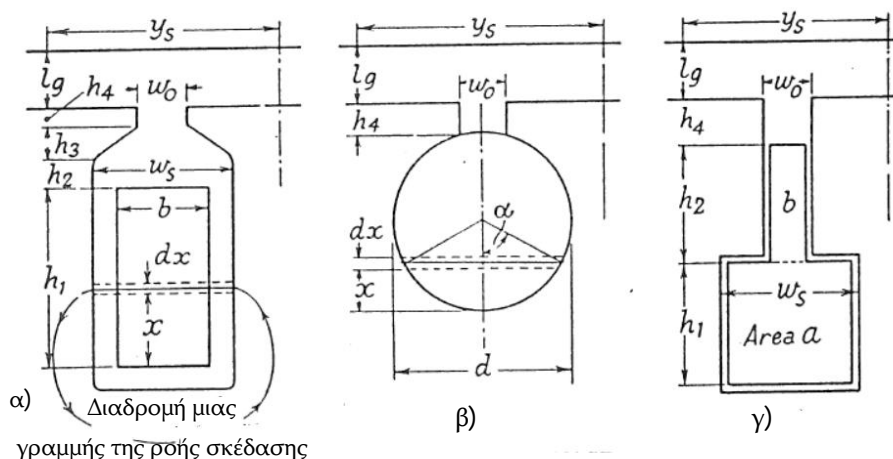
$$[160 - (72^2/34)]y \cdot I_1 = 7.5y \cdot I_1$$



Σχήμα 2.22 : Διαφορική ροή σκέδασης [Ξ59, Fig. 120, page 189]

Έτσι, ενώ η κατανομή της μαγνητικής ροής που προκύπτει πρέπει να δίνει μηδενική Η.Ε.Δ. στο δευτερεύον, αυτό δεν συμβαίνει έτσι στο πρωτεύον, παρά το γεγονός ότι ζευγνύει και τα δύο τυλίγματα. Η καθαρή μαγνητική ροή δρα ως ροή σκέδασης, και ονομάζεται διαφορική ή αρμονική ροή σκέδασης. Μια εναλλακτική προσέγγιση πραγματοποιείται από την ανάλυση των αρμονικών συνιστωσών των κατανομών των Μ.Ε.Δ. Η διαφορική ροή σκέδασης κυρίως είναι το αποτέλεσμα των αρμονικών χώρου

ανώτερης τάξης, και για κανονικά τυλίγματα μπορεί να είναι αρκετά μικρές έτσι ώστε να αμελούνται. Σε ένα δρομέα κλωβού, τα ρεύματα σε κάθε σημείο μπορούν να εξισορροπήσουν τα ρεύματα του στάτη ή του πρωτεύοντος που βρίσκονται στην απέναντι πλευρά της επιφάνειας του διακένου έτσι ώστε, η διαφορική ροή σκέδασης να εξαφανιστεί, εκτός για αυτές τις αρμονικές των οποίων το πολικό βήμα είναι συγκρίσιμο με το βήμα της αύλακας.



Σχήμα 2.23: Σκέδαση αύλακας [Ξ59, Fig. 121, page 190]

4. Σκέδαση αύλακας. Προκειμένου να υπολογισθεί η ειδική μαγνητική αγωγιμότητα μιας ημίκλειστης ορθογώνιας αύλακας σύμφωνα με το σχήμα 2.23.α πραγματοποιούνται οι ακόλουθες παραδοχές:

- α) Το ρεύμα που διαρρέει τις αύλακες – αγωγούς διανέμεται ομοιόμορφα πάνω στη διατομή τους.
- β) Η ροή σκέδασης που παράγεται από το ρεύμα μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί μια ευθεία διαδρομή κατά μήκος της αύλακας και γύρω από το σίδηρο στη βάση της. Αυτή η παραδοχή αποτελεί χονδρική προσέγγιση.
- γ) Η μαγνητική αντίσταση της διαδρομής έχει θεωρηθεί συγκεντρωμένη στο τμήμα της αύλακας.

Στη συνέχεια η ορθογώνια αύλακα του σχήματος 2.23.α διαιρείται σε τέσσερα τμήματα κάθε ένα από τα οποία διαθέτει ύψος h_1 , h_2 , h_3 και h_4 αντίστοιχα. Το ύψος h_1 της αύλακας καταλαμβάνεται από τους χάλκινους αγωγούς, το h_2 από τις μονώσεις της αύλακας, το h_3 από τη σφήνα και το h_4 αποτελεί το χείλος της οδόντωσης.

Ο συντελεστής μαγνητικής αγωγιμότητας ανά μέτρο του αξονικού μήκους της αύλακας είναι ο λόγος (εμβαδόν/μήκος) της διαδρομής. Για αυτή τη μαγνητική αγωγιμότητα μπορεί να θεωρηθεί ένας αριθμός παράλληλων τμημάτων, δηλαδή (h_2/w_s) για το τμήμα πάνω από τον αγωγό, $(2 \cdot h_3/(w_s + w_o))$ για το τμήμα της σφήνας, και (h_4/w_o) για το χείλος της οδόντωσης. Το ύψος της αύλακας που καταλαμβάνεται από τον αγωγό πρέπει να αντιμετωπιστεί διαφορετικά. Όλη η ροή σκέδασης πάνω από τον αγωγό τη ζευγνύει συνολικά. Ωστόσο, η ροή σκέδασης εντός του ύψους x , ζευγνύει μόνο το

κάτω τμήμα του αγωγού, και συνεισφέρει στην επαγωγή μόνο αυτού του τμήματος. Περαιτέρω, αυτή η ροή σκέδασης διαθέτει χαμηλότερη πυκνότητα από ότι εκείνη στο τμήμα h_2 , καθώς μόνο ένα κλάσμα (x/h_1) του ρεύματος είναι διαθέσιμο για να παρέχει τη Μ.Ε.Δ. για αυτή τη ροή.

Σε ύψος x , ανά αμπερ σε ολόκληρο τον αγωγό, για μοναδιαίο μήκος μηχανής το ρεύμα που ζευγνύεται από μια ροή σκέδασης η οποία διέρχεται διαμέσου της στοιχειώδους διαδρομής d_x είναι (x/h_1) αμπερ, και η ροή σκέδασης αντίστοιχα λαμβάνει την τιμή σύμφωνα με τη σχέση (2.54).

$$d\Phi_x = \mu_o \cdot (x/h_1) \cdot (d_x/w_s) \quad (2.54)$$

και ζευγνύει μόνο το τμήμα (x/h_1) του αγωγού, έτσι ώστε η ενεργός τιμή της επαγωγής να προκύπτει από την εξίσωση (2.55).

$$d\Phi_x \cdot N_x = \mu_o \cdot (x/h_1)^2 \cdot (d_x/w_s) \quad (2.55)$$

Έτσι, το τμήμα του συντελεστή μαγνητικής αγωγιμότητας του αγωγού υπολογίζεται από την εξίσωση (2.56).

$$\int_0^{h_1} \frac{x^2}{h_1^2 \cdot w_s} \cdot d_x = \frac{h_1}{3 \cdot w_s} \quad (2.56)$$

Μετά από την πρόσθεση των συντελεστών των παράλληλων τμημάτων, προκύπτει η ειδική μαγνητική αγωγιμότητα αύλακας (specific slot permeance) ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής, η οποία θα υπολογιστεί από τη σχέση (2.57).

$$\lambda_s = \frac{h_1}{3 \cdot w_s} + \frac{h_2}{w_s} + \frac{2 \cdot h_3}{(w_s + w_o)} + \frac{h_4}{w_o} \quad (2.57)$$

Η συνολική μαγνητική αγωγιμότητα της αύλακας για ένα μήκος πυρήνα L_s (καθαρό ή ενεργό) θα προκύψει από το γινόμενο των παραμέτρων που εμφανίζονται στη σχέση (2.58).

$$\lambda_{s \text{ ολικό}} = \mu_o \cdot L_s \cdot \lambda_s \quad (2.58)$$

Επειδή ο συντελεστής λ λαμβάνεται από αναλογίες, δεν επηρεάζεται από τις μονάδες μέτρησης (π.χ. χιλιοστά ή ίντσες) στις οποίες δίνονται οι παράμετροι του ύψους h και του ανοίγματος w .

Με τον ίδιο τρόπο, αντιμετωπίζεται μια στρογγυλή αύλακα, όπως αυτή εμφανίζεται στο σχήμα 2.23.β. Μια τέτοια αύλακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις ράβδους του κλωβού (cage bars) του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα, και μπορεί να υποθεθεί ότι ο αγωγός γεμίζει τον κυκλικό χώρο. Λαμβάνοντας υπόψη ξανά ότι οι γραμμές της μαγνητικής ροής σκέδασης διέρχονται (διασχίζουν) σε ευθεία και εγκάρσια την αύλακα από τις θετικές γωνίες προς το κέντρο της, το μήκος μιας στοιχειώδους διαδρομής μήκους d_x θα υπολογιστεί από τη σχέση $d_x = d \cdot \sin\alpha$, ενώ το x θα προκύψει ίσο με $x = \frac{1}{2} \cdot d \cdot (1 - \cos\alpha)$. Η αναλογία (ο λόγος) του εμβαδού ενός τμήματος ύψους x με ολόκληρο το εμβαδόν του κυκλικού τομέα προκύπτει ίσος με $(2 \cdot \alpha - \sin 2\alpha)/2 \cdot \pi$. Ο συντελεστής

της ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας του τμήματος της αύλακας προκύπτει από τη σχέση (2.59) η οποία είναι ανεξάρτητη της διαμέτρου.

$$\int_0^d \frac{(2\alpha - \sin^2 2\alpha)^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot \frac{dx}{d \cdot \sin \alpha} = \frac{1}{16 \cdot \pi^2} \int_0^{2\pi} (2\alpha - \sin 2\alpha)^2 \cdot d(2\alpha) = 0,623 \quad (2.59)$$

Η τιμή που λαμβάνεται γενικά είναι ίση με 0,66. Έτσι, προκύπτει η σχέση (2.60) μέσω της οποίας υπολογίζεται η τιμή της ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας αύλακας κυκλικής μορφής σύμφωνα με το σχήμα 2.23.γ, η οποία είναι κατάλληλη για δρομείς επαγωγικών κινητήρων.

$$\lambda_s = 0,66 + \frac{h_4}{w_o} \quad (2.60)$$

Για μια στρογγυλή αύλακα η οποία δεν περιέχει αγωγούς, ή περιέχει ένα αγωγό ο οποίος δεν διαρρέεται από ρεύμα, ο συντελεστής μαγνητικής αγωγιμότητας προκύπτει από τη σχέση (2.61).

$$\int_0^d \frac{dx}{d \cdot \sin \alpha} = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cdot \frac{d \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha}{d \cdot \sin \alpha} = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{2\pi} d\alpha = 1,57 \quad (2.61)$$

Ένα διαφορετικό σχήμα αύλακας, το οποίο βρίσκεται σε δρομείς επαγωγικών κινητήρων, είναι εκείνο που εμφανίζεται στο σχήμα 2.23.γ το οποίο χρησιμοποιείται με αγωγούς επιδερμικού φαινομένου σύμφωνα με το σχήμα 2.24. Η ρευματική κατανομή έχει σχεδιαστεί μη ομοιόμορφη κατά την εκκίνηση και στις χαμηλές ταχύτητες, όταν η συχνότητα του δρομέα προσεγγίζει εκείνη των ρευμάτων του στάτη, π.χ. 50 Hz. Για την κατάσταση λειτουργίας σε κανονικές ταχύτητες η συχνότητα είναι αρκετά χαμηλή έτσι ώστε, να υποθεθεί ότι υφίσταται ομοιόμορφη κατανομή ρευμάτων και ο συντελεστής μαγνητικής αγωγιμότητας να υπολογίζεται από τη σχέση (2.62).

$$\lambda_s = \frac{1}{(a+b)^2} \cdot \left[\frac{h_1}{w_s} \cdot \frac{a^2}{3} + \frac{h_2}{w_o} \cdot \left(a^2 + a \cdot b + \frac{b^2}{3} \right) \right] + \frac{h_4}{w_o} \quad (2.62)$$

Το συνολικό τμήμα του αγωγού είναι $(a+b)$, το κατώτερο τμήμα του a και το ανώτερο τμήμα του b μοιράζονται το ρεύμα σε αναλογία όπως το εμβαδόν τους. Για την εκκίνηση, το ρεύμα ουσιαστικά περιορίζεται στο τμήμα b : η εκτίμηση της μαγνητικής αγωγιμότητας είναι μάλλον περίπλοκη, και μια εμπειρική έκφραση της δίνεται από τη σχέση (2.63).

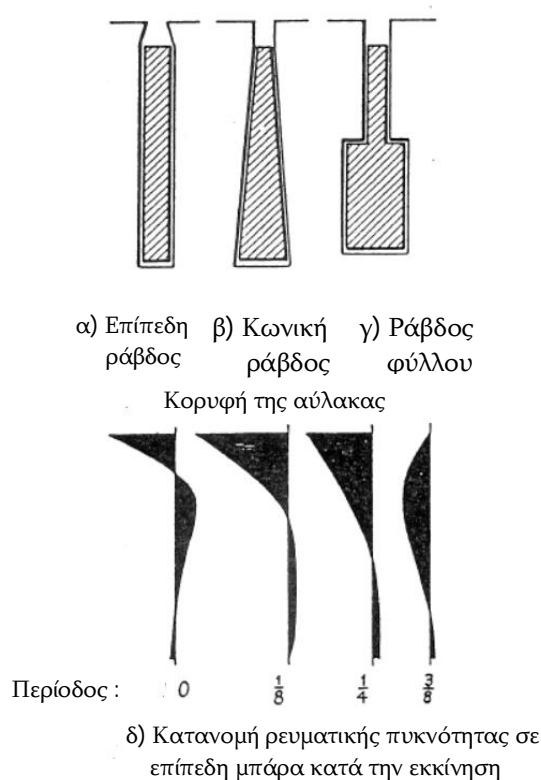
$$\lambda_s = \left(\frac{h_1}{2 \cdot w_s} + \frac{h_2}{3 \cdot w_o} + \frac{h_4}{w_o} \right) \quad (2.63)$$

Η επίδραση του κλασματικού βήματος (chording). Το κλασματικό βήμα του τυλίγματος του στάτη ή του δρομέα, επηρεάζει το συντελεστή τυλίγματος K_w . Επίσης επηρεάζεται η σκέδαση, διότι ορισμένες αύλακες εμπεριέχουν αγωγούς των οποίων τα ρεύματα ανήκουν σε διαφορετικές φάσεις. Η ενεργός σκέδαση μαγνητικής αγωγιμότητας μειώνεται κατά ένα συντελεστή k_s , ο οποίος εμφανίζεται στο σχήμα 2.25.α.

5. Σκέδαση μετωπικών συνδέσεων (κεφαλών) τυλίγματος (Overhang leakage). Το πρόβλημα της σκέδασης των μετωπικών συνδέσεων του τυλίγματος δεν αντιμετωπίζεται με την εφαρμογή θεωρητικών μεθόδων, διότι αυτές αποτυγχάνουν πλήρως στην επίλυση του. Για το λόγο αυτό μόνο οι απλοί εμπειρικοί μαθηματικοί τύποι έχουν δικαιολογηθεί. Έχουν προταθεί πολλοί, ενώ από τους περισσότερους σχεδιαστές μπορεί να πραγματοποιηθεί μια εκτίμηση κατάλληλη για τις μηχανές με τις οποίες έχουν εξοικειωθεί. Η σκέδαση πρέπει να σχετισθεί με κάποιο τρόπο με το μήκος των μετωπικών συνδέσεων των τυλιγμάτων (κεφαλές τυλιγμάτων) και τα σχήματά τους, τους τύπους των τυλιγμάτων, την απόσταση μεταξύ των άκρων της περιέλιξης του στάτη και του δρομέα, και την εγγύτητα των μαγνητικών περιβλημάτων. Αλλά προκειμένου να περιλαμβάνονται όλες αυτές οι συναρτήσεις αυτό θα ήταν εξαιρετικά περίπλοκο. Μια μορφή έκφρασης αποτελεί η εξίσωση (2.64) που παρατίθεται παρακάτω.

$$L_o \cdot \lambda_o = k_s \cdot Y^2 / \pi \cdot y_s \quad (2.64)$$

όπου η παράμετρος k_s αποτελεί το συντελεστή σκέδασης αύλακας, ο οποίος εξαρτάται από το λόγο (εύρος πηνίου / πολικό βήμα) και θα υπολογιστεί από τη γραφική παράσταση του σχήματος 2.25.α, η παράμετρος Y είναι το πολικό βήμα και η παράμετρος y_s είναι το βήμα της αύλακας σύμφωνα με τον πίνακα 2.4 της σελίδας 93.



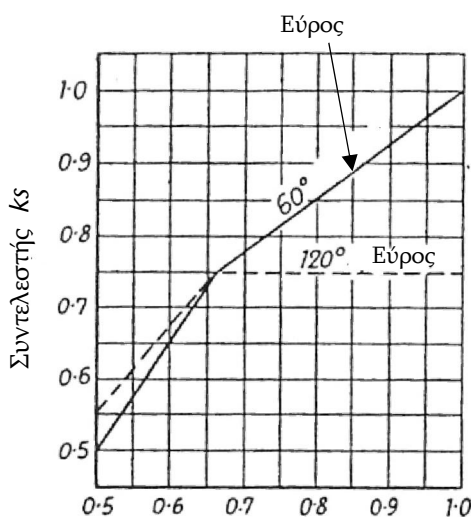
Σχήμα 2.24 : Επιδερμικό φαινόμενο αγωγών [Ξ59, Fig. 189, page 312]

6. Σκέδαση ζιγκ-ζαγκ. Στο σχήμα 2.21.ε εμφανίζεται ότι η σκέδαση ζιγκ - ζαγκ εξαρτάται από τα σχετικά πλάτη των οδοντώσεων, των ανοιγμάτων των αυλάκων και του διακένου. Μια έκφραση (από τις πολλές) που δίνει την επαγωγική αντίδραση ανά φάση που οφείλεται στη σκέδαση ζιγκ-ζαγκ σε όρους αντίδρασης προσφέρεται από την κύ-

ρια μαγνητική ροή. Στους επαγωγικούς κινητήρες η επαγωγική αντίδραση κατά προσέγγιση προκύπτει ίση με $x_m \approx V/I_m$, όπου V είναι η εφαρμοζόμενη τάση και I_m είναι το ρεύμα μαγνητίσεως ανά φάση σε κάθε περίπτωση. Τότε η απαιτούμενη επαγωγική αντίδραση ανά φάση προκύπτει από την εξίσωση (2.65), ενώ σε κάθε περίπτωση οι μονάδες μέτρησης της είναι Ω ανά φάση.

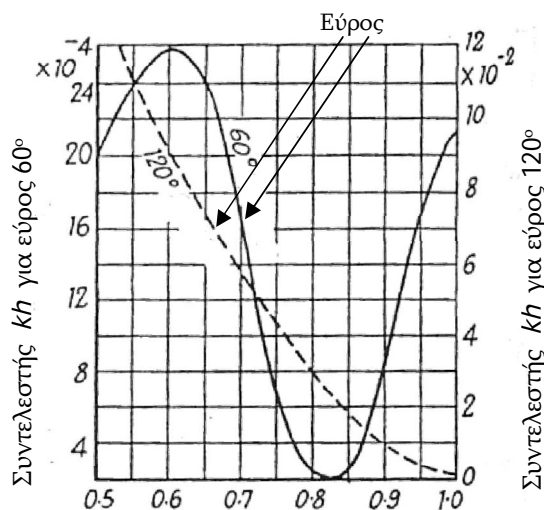
$$x_x = \frac{5}{6} \cdot x_m \cdot \left[\frac{1}{g_1^2} + \frac{1}{g_2^2} \right] \quad (2.65)$$

όπου: $g_1 = S_1/(2 \cdot p)$ και $g_2 = S_2/(2 \cdot p)$ είναι ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο.



Αναλογία (Εύρος πηνίου / Πολικό βήμα)

Σχήμα 2.25.α: Συντελεστής σκέδασης αύλακας [Ξ59, Fig. 122.a, page 192]



Αναλογία (Εύρος πηνίου / Πολικό βήμα)

Σχήμα 2.25.β: Συντελεστής διαφορικής σκέδασης [Ξ 59, Fig. 122.b, page 192]

7. Διαφορική σκέδαση. Μια έκφραση για τη διαφορική σκέδαση, τη σκέδαση ζώνης, ή την αρμονική σκέδαση παρέχεται από την εξίσωση (2.66).

$$x_h = x_m \cdot (k_{h1} + k_{h2}) \quad (2.66)$$

όπου οι τιμές των συντελεστών k_h προκύπτουν από τη γραφική παράσταση του σχήματος 2.25.β. Αυτή η επαγωγική αντίδραση αγνοείται για μηχανές με τυλίγματα κλωβού.

2.5.6 Επαγωγική αντίδραση φάσης

Η επαγωγική αντίδραση μια φάσης η οποία διαθέτει αριθμό ελιγμάτων ανά ζεύγος πόλων ανά φάση ίσο με $g' \cdot z_s$, μήκος αγωγών L και έχει τιμή ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας λ σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.49) και (2.50) θα υπολογισθεί από τη σχέση (2.67) που παρατίθεται παρακάτω και μετριέται σε Ω .

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_x^2 \cdot Y_{m_x} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (g' \cdot z_s)^2 \cdot \mu_o \cdot 2 \cdot L \cdot (\lambda/g') \quad (2.67)$$

Όπου g' είναι ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση και z_s είναι ο αριθμός των αγωγών ανά αύλακα. Επειδή το μήκος του ελίγματος περιλαμβάνει δύο αγωγούς, και η

ροή σκέδασης πρέπει να διασχίσει g' αύλακες αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο τη μαγνητική αντίσταση. Εάν τα ελίγματα σε όλα τα ζεύγη πόλων συνδέονται σε σειρά τότε ο αριθμός των ελιγμάτων ανά ζεύγος πόλων και ανά φάση προκύπτει ίσος με N_{ph}/p , όπου N_{ph} είναι ο αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση και p είναι ο αριθμός των ζευγών των πόλων, ενώ η επαγωγική αντίδραση ανά φάση θα υπολογισθεί σύμφωνα με τη σχέση (2.68) και θα έχει μονάδες μέτρησης Ω (Ω).

$$X = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_o \cdot p \cdot (N_{ph}/p)^2 \cdot L \cdot (\lambda/g') = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_o \cdot (N_{ph}^2/p \cdot g') \cdot L \cdot \lambda \Rightarrow$$

$$X = 15.8 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot (N_{ph}^2/p \cdot g') \cdot L \cdot \lambda \quad (2.68)$$

2.5.7 Επαγωγική αντίδραση κινητήρα επαγωγής

Η συνολική επαγωγική αντίδραση ανά φάση ενός επαγωγικού κινητήρα σε ανηγμένη στο στάτη προκύπτει από την εξίσωση (2.69).

$$X_1 = x_1 + x'_2 = x_{s1} + x'_{s2} + x_o + x_z + x_h \quad (2.69)$$

όπου: x_{s1} είναι η επαγωγική αντίδραση της αύλακας του στάτη, η οποία προκύπτει από τη χρήση του καθαρού μήκους πυρήνα L_s στην εξίσωση (2.68) και την κατάλληλη μαγνητική αγωγιμότητα από τις εξισώσεις (2.57)-(2.63).

x_{s2} ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση αύλακας δρομέα, η οποία έχει υπολογισθεί όπως και η x_{s1} . Για να αναχθεί σε μέγεθος του στάτη πολλαπλασιάστηκε με το λόγο $(K_{w1}^2 \cdot S_1 / K_{w2}^2 \cdot S_2)$. Στο λόγο αυτό όπου K_{w1} είναι ο συντελεστής τυλίγματος του στάτη, S_1 είναι ο αριθμός των αυλάκων του στάτη, K_{w2} είναι ο συντελεστής τυλίγματος του δρομέα και S_2 είναι ο αριθμός των αυλάκων του δρομέα

x_o επαγωγική αντίδραση άκρων τυλίγματος (μετωπικών συνδέσεων) από την εξίσωση (2.64).

x_z επαγωγική αντίδραση ζιγκ-ζαγκ από την εξίσωση (2.65).

x_h διαφορική επαγωγική αντίδραση από την εξίσωση (2.66).

Για υπολογισμούς των επιδόσεων του κινητήρα από ένα ισοδύναμο κύκλωμα, είναι αρκετά επαρκές να θεωρηθεί ότι: $x_1 = x'_2 = \frac{1}{2} \cdot X_1$. Εναλλακτικά η συνολική επαγωγική αντίδραση μπορεί να διαιρεθεί σε αντίστροφες αναλογίες του αριθμού των αυλάκων, δίνοντας $x_1/x'_2 = g_2/g_1 = S_2/S_1$. Επειδή η ροή σκέδασης – εκτός από τη σκέδαση της αύλακας – είναι ένα αποτέλεσμα του συνδυασμού των ρευμάτων του στάτη και του δρομέα, δεν είναι δυνατό να διαχωριστεί σε ανεξάρτητες συνεισφορές.

2.5.8 Επαγωγική αντίδραση ανά φάση σύγχρονης μηχανής

Για μια σύγχρονη μηχανή η ροή σκέδασης απαιτείται να είναι γνωστή, προκειμένου να αξιολογηθεί η ρύθμιση της τάσης της. Για αυτό το σκοπό δεν είναι απαραίτητη μια ακριβής εκτίμηση. Ωστόσο, η επαγωγική αντίδραση εισέρχεται σε πολλά προβλήματα πολύ μεγαλύτερης πολυπλοκότητας, όπως είναι η συμπεριφορά βραχυκύκλωσης και η

αποτελεσματικότητα των τυλιγμάτων απόσβεσης που τοποθετούνται στο πρόσωπο του πόλου. (Δεν είναι δυνατό εδώ, να αναπαρασταθούν με ακρίβεια αυτά τα σημαντικά θέματα που έχουν απασχολήσει για πολλά χρόνια τους σχεδιαστές ηλεκτρικών μηχανών). Προκειμένου να υπολογισθεί η ρύθμιση της τάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απλοποιημένη μαθηματική σχέση που παρατίθεται παρακάτω. Η ροή σκέδασης προκύπτει από τη σχέση (2.70).

$$\Phi_l = \Phi_s + \Phi_o \quad (2.70)$$

όπου Φ_s είναι η ροή σκέδασης της αύλακας και Φ_o είναι η ροή σκέδασης των άκρων των τυλιγμάτων για πλήρες φορτίο ρεύματος ανά αγωγό $I_{αγωγοῦ}$. Λαμβάνοντας ως βάση την εξίσωση (2.47), και αφού γραφεί η παράμετρος Λ_x ως $2 \cdot \mu_o \cdot L_s \cdot \lambda_s$ η μέγιστη τιμή της ροής σκέδασης που σχετίζεται με τα τμήματα της αύλακας ενός πηνίου που διαθέτει N_c ελίγματα προκύπτει από τη σχέση (2.71).

$$\Phi_x = \sqrt{2} \cdot I_{αγωγοῦ} \cdot N_c \cdot 2 \cdot \mu_o \cdot L_s \cdot \lambda_s \quad (2.71)$$

Για μια ομάδα πηνίων g'' της ίδιας φάσης, τα ελίγματα από τα οποία παράγεται η ροή σκέδασης τώρα είναι $g'' \cdot N_c$, αλλά η ροή σκέδασης πρέπει να διασχίσει g'' αύλακες και το μήκος της διαδρομής της στο διάκενο είναι g'' . Έτσι, η ροή σκέδασης της αύλακας προκύπτει από τη σχέση (2.72).

$$\Phi_s = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \mu_o \cdot I_{αγωγοῦ} \cdot N_c \cdot L_s \cdot \lambda_s \quad (2.72)$$

Όμοια, η ροή σκέδασης των κεφαλών των τυλιγμάτων (των μετωπικών συνδέσεων) θα υπολογιστεί από τη σχέση (2.73).

$$\Phi_o = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \mu_o \cdot I_{αγωγοῦ} \cdot N_c \cdot L_o \cdot \lambda_o \quad (2.73)$$

όπου οι παράμετροι λ_s , και $L_o \cdot \lambda_o$ προκύπτουν από τις εξισώσεις (2.57) – (2.64).

Δεν υπάρχει ροή σκέδασης ζιγκ-ζαγκ σε μια κανονική σύγχρονη μηχανή έκτυπων πόλων, διότι το πρόσωπο του πόλου είναι μια ισοδυναμική επιφάνεια στον εγκάρσιο άξονα, και δεν εμφανίζεται καθόλου στις συνιστώσες ρευμάτων ευθύ άξονα.

2.6 Περιελίξεις επαγωγίμων

2.6.1 Τύποι τυλιγμάτων μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος

Βασικό χαρακτηριστικό μιας ηλεκτρικής μηχανής αποτελεί το ηλεκτρικό κύκλωμα ή περιέλιξη του επαγωγίμου στην οποία επάγεται η δρώσα Η.Ε.Δ. Όταν απαιτείται διέγερση συνεχούς ρεύματος για το μαγνητικό κύκλωμα, μια περαιτέρω απαίτηση αποτελεί η ύπαρξη ενός τυλίγματος διέγερσης.

2.6.2 Τυλίγματα επαγωγίμων

Η περιέλιξη του επαγωγίμου εναλλασσομένου ρεύματος μπορεί να οριστεί ως μια περιέλιξη στην οποία κατά τη σχετική κίνηση ως προς ένα ετεροπολικό μαγνητικό πεδίο

αναπτύσσονται ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις σε ένα αριθμό τμημάτων ή φάσεων. Οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις είναι ίσες κατά μέτρο και κατάλληλα τοποθετημένες στις χρονικά μεταβαλλόμενες σχέσεις των φάσεων. Συνήθως, η περιέλιξη απαρτίζεται από μικρές ομάδες αγωγών, οι οποίες τοποθετούνται κυκλικά στην περιφέρεια του επαγωγίμου, και συνδέονται μεταξύ τους μέσω των άκρων τους, προκειμένου να σχηματιστεί το ανεξάρτητο τυλίγμα μιας φάσης ανεξάρτητης από άλλα τυλίγματα όμοιων φάσεων.

Η περιέλιξη εναλλασσομένου ρεύματος διαφέρει από τις περιελίξεις ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος με συλλέκτη στο ότι δεν απαιτείται η μεταγωγή και συνήθως δεν προκύπτει ζήτημα ζυγοστάθμισης. Οι κλειστές συνδέσεις και ο συλλέκτης των τυλιγμάτων του επαγωγίμου συνεχούς ρεύματος είναι απαραίτητες έτσι ώστε η αναπτυσσόμενη Η.Ε.Δ. ανάμεσα στις ψήκτρες του συλλέκτη να έχει ως αποτέλεσμα μια ολοκλήρωση του κύματος της μαγνητικής ροής ανάμεσα σε αντίστοιχα σημεία στην επιφάνεια του σπλισμού έτσι, ώστε στην πράξη η παραγόμενη Η.Ε.Δ. να προκύπτει σταθερή, παρόλο που οι αγωγοί που συμβάλλουν στην ανάπτυξη της αντικαθίστανται συνεχώς από άλλους. Ωστόσο, από τις περιελίξεις εναλλασσομένου ρεύματος πρέπει να παράγεται μια εναλλασσόμενη Η.Ε.Δ., η οποία να αντιστοιχεί στην πραγματική κατανομή χώρου της εναλλαγής της μαγνητικής ροής των πόλων βόρειου-νότιου στο διάκενο. Έτσι, οι περιελίξεις αναλύονται σε ανεξάρτητες ομάδες φάσεων και στην πράξη δύνανται να περιορισθούν σε ένα μόνο αγωγό ή έλιγμα σε κάθε φάση.

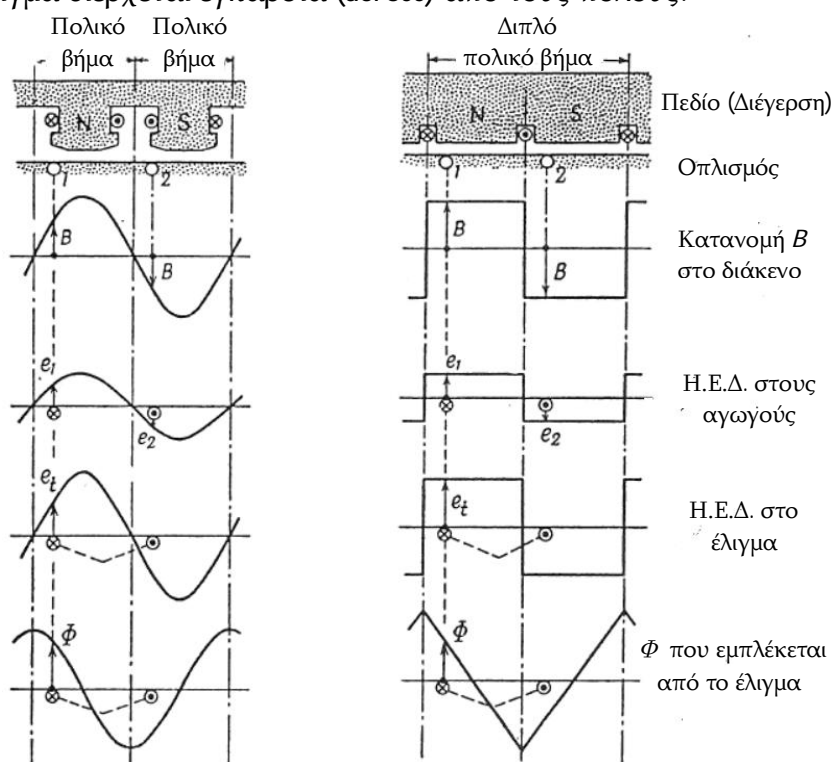
Σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος η παραγόμενη Η.Ε.Δ. καθορίζεται από τη συνολική μαγνητική ροή ανά πόλο, ανεξάρτητα από τη χωρική κατανομή της. Όμως, οι μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος πρέπει να διαθέτουν μια κατανομή της μαγνητικής ροής τέτοια, ώστε να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο ένα ημιτονοειδές κύμα προκειμένου να παρέχει την καλύτερη δυνατή ημιτονοειδή Η.Ε.Δ. από μια δοθείσα μαγνητική ροή ανά πόλο.

Αγωγοί, ελίγματα και πηνία. Θεωρείται ένας αγωγός μήκους l μέτρων, ο οποίος κινείται πλευρικά με μια σταθερή ταχύτητα u , η οποία μετριέται σε m/sec μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο διαθέτει μαγνητική επαγωγή B η οποία μετριέται σε Wb/m². Τότε η αναπτυσσόμενη Η.Ε.Δ. στα άκρα του θα υπολογιστεί από τη σχέση (2.74) και θα διαθέτει μονάδες μέτρησης σε Volt.

$$e = B \cdot l \cdot u \quad (2.74)$$

Εάν θεωρηθεί ότι η μαγνητική ροή κατανέμεται ημιτονοειδώς στο χώρο, η Η.Ε.Δ. αυξάνεται και μειώνεται με τη μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής B μέσα στην οποία κινείται, και αντιστρέφεται όταν αντιστρέφεται η πολικότητα της μαγνητικής ροής: π.χ. είναι μια εναλλασσόμενη Η.Ε.Δ.. Στο σχήμα 2.26.α εμφανίζεται ένα διπλό πολικό βήμα μιας μηχανής στην οποία η χωρική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής πάνω στην περιφέρεια του διακένου είναι ημιτονοειδής. Ένας αγωγός (1), στη θέση που εμφανίζεται διαθέτει μια Η.Ε.Δ. ανάλογη με τη μαγνητική επαγωγή B που υφίσταται μέσα στο χώρο που κινείται. Ένας δεύτερος αγωγός, (2) ο οποίος έχει μετατοπισθεί κατά ένα πολικό βήμα από τον αγωγό (1) κινείται μέσα σε χώρο μαγνητικής επαγωγής, η οποία διαθέτει το ίδιο μέτρο, αλλά αντίθετη πολικότητα. Επομένως, οι στιγμιαίες τιμές των

Η.Ε.Δ. των δύο αγωγών e_1 και e_2 είναι ίσες κατά μέτρο, αλλά αντίθετης κατεύθυνσης. Αν θεωρηθεί ότι οι αγωγοί ενώνονται μεταξύ τους στο ένα άκρο για να σχηματιστεί ένα έλιγμα, τότε οι σιγμιαίες Η.Ε.Δ. τους e_1 και e_2 προστίθενται και με αυτό τον τρόπο προκύπτει η Η.Ε.Δ. του ελίγματος e_t . Αυτή σχεδιάζεται στο σχήμα 2.26.α σύμφωνα με τη θέση του αγωγού (1). Εναλλακτικά, η Η.Ε.Δ. του ελίγματος μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας την εξίσωση (2.9) : $e_t = -(d\Phi/dt)$, η οποία μετριέται σε Volt και βασίζεται στο ρυθμό της μεταβολής της συζευγμένης μαγνητικής ροής. Στην τελευταία γραφική παράσταση του σχήματος 2.26.α έχει σχεδιαστεί η μαγνητική ροή Φ που εμπλέκεται από το έλιγμα, σύμφωνα με τη θέση του ελίγματος όπως ορίζεται από τον αγωγό (1). Όταν ο αγωγός (1) βρίσκεται στον αριστερό άξονα του μαγνητικού ουδέτερου, το έλιγμα εμπλέκει όλη τη μαγνητική ροή ενός βόρειου πόλου. Από τη σύγκριση ανάμεσα στις γραφικές παραστάσεις της Η.Ε.Δ. του ελίγματος e_t και της μαγνητικής ροής Φ διαφαίνεται ότι η πρώτη πραγματικά προκύπτει από τον αρνητικό ρυθμό μεταβολής της δεύτερης, καθώς το έλιγμα διέρχεται εγκάρσια (across) από τους πόλους.



α) Ημιτονοειδής B στο διάκενο β) Τετραγωνική B στο διάκενο

Σχήμα 2.26 : Περιστροφική Η.Ε.Δ. στους αγωγούς και στα ελίγματα του επαγωγίμου [Ξ59, Fig. 123, page 197]

Επαγόμενες Η.Ε.Δ. Θεωρείται ότι η ημιτονοειδώς κατανεμημένη μαγνητική ροή ανά πόλο λαμβάνεται ίση με Φ . Η μέση τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο υπολογίζεται από τη σχέση: $B_{ave} = \Phi/Y \cdot L$, ενώ η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο θα υπολογιστεί από τη σχέση: $B_{max} = (\pi/2) \cdot \Phi/Y \cdot L$, όπου η παράμετρος Y είναι το πολικό βήμα και η παράμετρος L είναι το μικτό μήκος της μηχανής. Για μια ταχύτητα περιστροφής ίση με n η οποία, μετριέται σε R.P.sec, η περιφερειακή ταχύτητα με την οποία κινείται ένας αγωγός προκύπτει από τη σχέση: $u = \pi \cdot D \cdot n = 2 \cdot p \cdot Y \cdot n$ και έχει

μονάδες μέτρησης m/sec για ένα αριθμό ζευγών πόλων ίσο με p και ένα πολικό βήμα ίσο με Y το οποίο, μετριέται σε μέτρα (m). Σε αυτήν την περίπτωση η μέγιστη τιμή της Η.Ε.Δ. ενός αγωγού υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (2.75), ενώ μετριέται σε Volt.

$$e_{max} = B_{max} \cdot L \cdot u = (\pi/2) \cdot (\Phi/(Y \cdot L)) \cdot L \cdot 2 \cdot p \cdot Y \cdot n = \pi \cdot \Phi \cdot p \cdot n \quad (2.75)$$

Από τη σχέση (2.75) μετά από την αντικατάσταση το γινομένου του αριθμού των ζευγών των πόλων με την ταχύτητα περιστροφής σε R.P.sec, $f = p \cdot n$ προκύπτει η σχέση (2.76) με τη χρήση της οποίας υπολογίζεται η ενεργός τιμή της Η.Ε.Δ.

$$E = (\pi/\sqrt{2}) \cdot f \cdot \Phi = 2,22 \cdot f \cdot \Phi \quad (2.76)$$

Προκειμένου για ένα έλιγμα, η αναπτυσσόμενη Η.Ε.Δ. προκύπτει διπλάσια από την τιμή που υπολογίζεται από την εξίσωση (2.76), ενώ για ένα πηνίο, το οποίο διαθέτει N_c συγκεντρωμένα ελίγματα, η ενεργός τιμή της Η.Ε.Δ. του πηνίου υπολογίζεται μέσω της σχέσης (2.77) και έχει μονάδες μέτρησης Volt.

$$E_{coil} = 4,44 \cdot f \cdot N_c \cdot \Phi \quad (2.77)$$

Από την άποψη της ροής ζεύξης, από το σχήμα 2.25.α φαίνεται ότι η μαγνητική ροή που εμπλέκεται από ένα έλιγμα είναι ίση με $\Phi \cdot \cos\omega t$, ενώ η αναπτυσσόμενη Η.Ε.Δ. ενός πηνίου που διαθέτει N_c ελίγματα προκύπτει από τη σχέση (2.78).

$$e_{coil} = -N_c \cdot \frac{d}{dt} (\Phi \cdot \cos\omega t) = \omega \cdot N_c \cdot \Phi \cdot \sin\omega t \quad (2.78)$$

Η μέγιστη τιμή προκύπτει ίση με: $\omega \cdot N_c \cdot \Phi = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_c \cdot \Phi$, ενώ η ενεργός τιμή δίνεται από τη διαίρεση με $\sqrt{2}$, οπότε προκύπτει ξανά η εξίσωση (2.77), η οποία έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω.

Εφόσον στο παράδειγμα που έχει συζητηθεί η Η.Ε.Δ. του αγωγού και του ελίγματος είναι ημιτονοειδείς κυματομορφές, μπορεί να επιτευχθεί η αναπαράσταση τους με περιστρεφόμενα διανυσματικά διαγράμματα, τα οποία θα περιστρέφονται κάθε φορά για κάθε κίνηση των αγωγών διαμέσου ενός διπλού πολικού βήματος.

Από το σχήμα 2.26.β προκύπτουν οι αναπτυσσόμενες Η.Ε.Δ. για μια τετραγωνική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής του διάκενου. Σε γενικές γραμμές η ανάλυση πραγματοποιείται με ανάλογο τρόπο εκτός από την εξίσωση (2.77), η οποία δεν μπορεί να εφαρμοστεί και οι αναπτυσσόμενες Η.Ε.Δ. δεν μπορούν να αναπαρασταθούν με διανυσματικά διαγράμματα, εάν προηγουμένως δεν έχουν αναλυθεί στη θεμελιώδη και στις ημιτονοειδείς αρμονικές συνιστώσες τους.

Συνδέσεις. Στην πράξη οι αγωγοί που βρίσκονται σε γειτονικές αύλακες στην πλευρά του διακένου, βρίσκονται διατεταγμένοι συνολικά σε ζεύγη σειρών, έτσι, ώστε να σχηματίζονται ελίγματα. Ένα πηνίο μπορεί να διαθέτει ένα ή περισσότερα ελίγματα. Από τις συνδέσεις μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η ζεύξη των αγωγών σχηματίζονται τα άκρα σύνδεσης των τυλιγμάτων ή στη μάζα οι κεφαλές σύνδεσης των τυλιγμάτων (μετωπικές συνδέσεις). Όταν οι πλευρές των πηνίων βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους ίση ακριβώς με ένα πολικό βήμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.26, λέγεται ότι τα πηνία αυτά είναι πλήρους βήματος. Το βήμα ενός πηνίου μπορεί να είναι μεγαλύτερο ή -

πιο συχνά – μικρότερο από ένα πολικό βήμα. Σε αυτήν την περίπτωση περιγράφεται ως μερικού ή κλασματικού βήματος (short or chorded pitch).

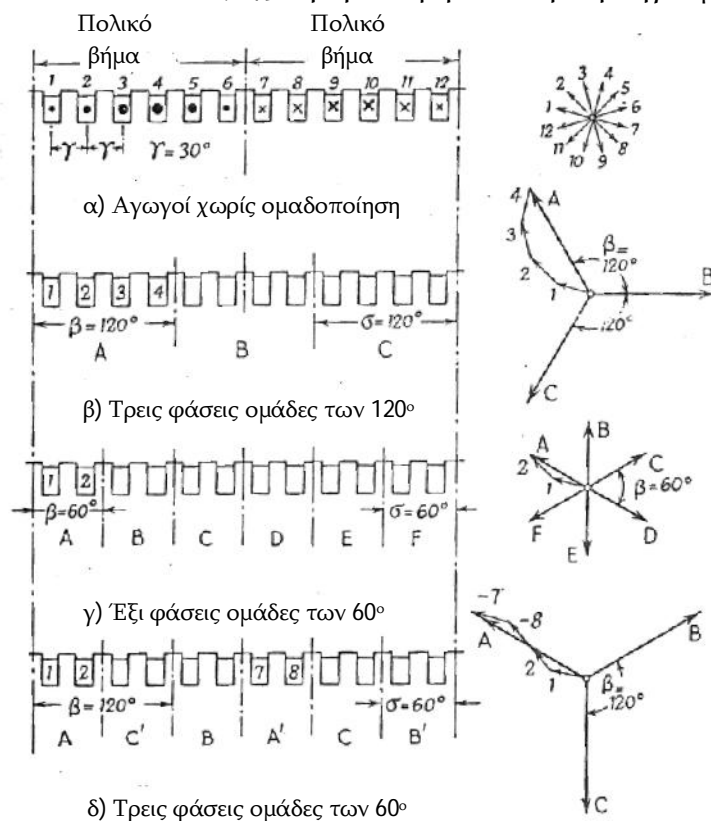
Περιέλιξις. Σχεδόν σε κάθε περίπτωση, οι αύλακες στις οποίες τοποθετούνται τα πηνία έχουν διατρηθεί ομοιόμορφα γύρω από την επιφάνεια του διακένου του επαγωγίμου. Το πρόβλημα της περιέλιξης συνίσταται στο γεγονός ότι τα πηνία που τοποθετούνται σε πολλές αύλακες πρέπει κατάλληλα να διευθετηθούν και να συνδεθούν μεταξύ τους έτσι ώστε να επιτευχθεί η ομαδοποίηση των φάσεων που απαιτείται ανάλογα με το είδος του τυλίγματος. Σε μια περιέλιξη μιας στρώσης κάθε πλευρά ενός πηνίου καταλαμβάνει μια ολόκληρη αύλακα, ενώ σε μια περιέλιξη διπλής στρώσης μια πλευρά ενός πηνίου τοποθετείται στην άνω θέση (άνω στρώση) σε μια πρώτη αύλακα, ενώ η άλλη καταλαμβάνει τη χαμηλότερη θέση (κάτω στρώση) σε μια δεύτερη αύλακα, η οποία βρίσκεται σε απόσταση ίση ή μικρότερη με ένα πολικό βήμα από την πρώτη. Η εμφάνιση μιας περιέλιξης μπορεί να αλλάξει πολύ από τη χρήση διάφορων σχημάτων σύνδεσης των άκρων της (μετωπικές συνδέσεις, κεφαλές τυλιγμάτων), αλλά αυτά αποτελούν παραδείγματα ενός αριθμού τρόπων σύνδεσης των αγωγών εν σειρά, χωρίς να επηρεάζεται η ομαδοποίηση τους από ηλεκτρική άποψη.

Φάσεις. Οι απαιτήσεις μιας περιέλιξης εναλλασσομένου ρεύματος είναι ότι θα πρέπει να παράγει ένα συμμετρικό N - φασικό σύστημα ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων πανομοιότυπου μέτρου, σχήματος κυματομορφής και συχνότητας, το οποίο θα έχει διαφορά φάσης ίση με $\beta = 2 \cdot \pi / N$ ηλεκτρικά ακτίνια. Αυτό διασφαλίζεται υιοθετώντας πανομοιότυπα τυλίγματα για όλες τις ομάδες των φάσεων, και τοποθετώντας τις ομάδες με μια αποτελεσματική χωρική κατανομή ίση με $2 \cdot \pi / N$ ηλεκτρικά ακτίνια.

Η πιο συνηθισμένη κατανομή των τυλιγμάτων των φάσεων είναι εκείνη στην οποία το εύρος έκαστης φάσης λαμβάνεται ίσο με το λόγο $\sigma = \pi / N$ π.χ. $1 / N$ ενός πολικού βήματος. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι μια ακολουθία ζωνών φάσης A-C-B -A-C-B στο διπλό πολικό βήμα μιας τριφασικής μηχανής.

Στο σχήμα 2.27.α εμφανίζεται μια διευθέτηση των αγωγών σε δώδεκα αύλακες με ένα διαγραμματικό ανάπτυγμα ενός διπλού πολικού βήματος. Εμφανίζονται τα αντίστοιχα διανυσματικά διαγράμματα των Η.Ε.Δ. των αγωγών, ενώ έχει υποτεθεί ότι η μαγνητική επαγωγή του διακένου έχει κατανεμηθεί ημιτονοειδώς. Στο σχήμα 2.27.β έχει πραγματοποιηθεί μια τριφασική ομαδοποίηση σε ζώνες φάσεων. Κάθε ζώνη διαθέτει ένα εύρος γωνίας 120° , και η άθροιση των Η.Ε.Δ. των αγωγών θα αποδώσει τριφασικές Η.Ε.Δ., οι οποίες έχουν μετατοπισθεί χρονικά κατά γωνία 120° . Θα φανεί ότι οι φασικές Η.Ε.Δ. που έχουν προκύψει είναι μικρότερες από το αριθμητικό άθροισμα των συνιστωσών των Η.Ε.Δ. Αυτό είναι το αποτέλεσμα που προέκυψε από το γεγονός ότι το τύλιγμα έχει διανεμηθεί στις αύλακες και δεν είναι συγκεντρωμένο. Στο σχήμα 2.27.γ εμφανίζεται μια ομαδοποίηση για έξι φάσεις με ένα εύρος κατανομής 60° . Η ομαδοποίηση σύμφωνα με το σχήμα 2.27.β δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια τριφασική περιέλιξη μονής στρώσης, ούτε θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η ομαδοποίηση του σχήματος 2.27.γ για τύλιγμα έξι φάσεων, διότι η υποδιαίρεση της περιέλιξης δεν αφήνει περαιτέρω ελεύθερους αγωγούς σε απόσταση ενός πολικού βήματος μεταξύ τους έτσι, ώστε να

επιτευχθεί η συγκρότηση των αγωγών επιστροφής. Αλλά το σχήμα 2.27.γ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τρεις φάσεις εάν οι ζώνες D,E και F αποτελέσουν το συμπλήρωμα των A,B και C. Αυτή η διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 2.27.δ, όπου οι ζώνες των φάσεων έχουν διευθετηθεί με αυτόν τον τρόπο, ενώ η ακολουθία των φάσεων A,B,C επιτυγχάνεται με επαναγραμματισμό (re-lettering). Οι ζώνες των φάσεων ακολουθούν με τη σειρά A, C', B, A', C, B' όπως έχει ήδη αναφερθεί στην προηγούμενη παράγραφο.

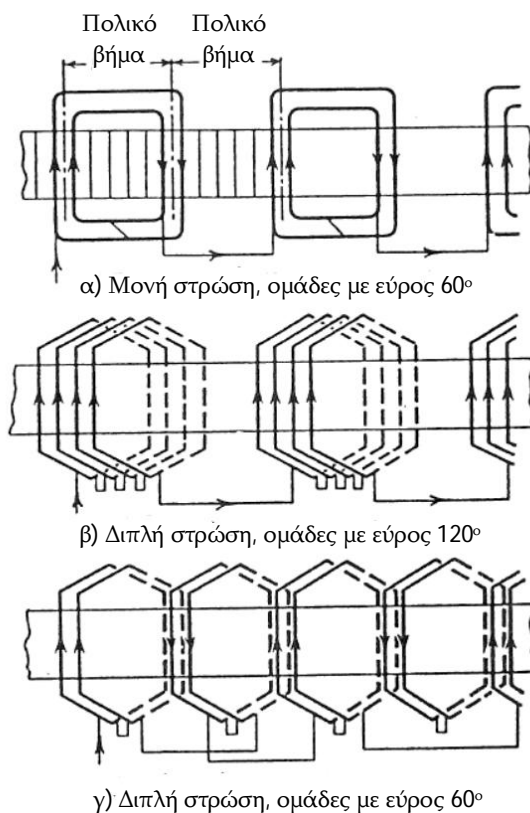


Σχήμα 2.27 : Ομαδοποίηση φάσεων [Ξ59, Fig. 124, page 199]

Συνδέσεις ανάμεσα στις ομάδες των πηνίων. Στις μετωπικές συνδέσεις (κεφαλές) των τυλιγμάτων περιλαμβάνονται οι συνδέσεις των άκρων της περιέλιξης από τις οποίες οι αγωγοί διαμορφώνονται σε ελίγματα. Επιπρόσθετα, στις ζεύξεις που πραγματοποιούνται στα άκρα των συνδέσεων της περιέλιξης περιλαμβάνονται: οι συνδέσεις ανάμεσα στα πηνία, οι συνδέσεις ανάμεσα στις ομάδες των πηνίων και οι παράλληλες συνδέσεις ανάμεσα στις ομάδες πηνίων της ίδιας φάσης. Γενικά, όπου απαιτούνται από τις περιελίξεις υψηλά ρεύματα και χαμηλές Η.Ε.Δ. οι ομάδες των πηνίων δεν συνδέονται εν σειρά, αλλά χωρίζονται σε τμήματα κάθε ένα από τα οποία περιέχει τον ίδιο αριθμό παρόμοιων ομάδων πηνίων. Στη συνέχεια τα τμήματα αυτά παραλληλίζονται με τη χρήση κατάλληλων συνδέσεων.

Παραδείγματα συνδέσεων πηνίων και ομάδων πηνίων παρατίθενται στο σχήμα 2.28, για τμήμα μιας φάσης τυπικής τριφασικής περιέλιξης, δηλαδή ανά επιμέρους διάγραμμα αναφέρονται οι ακόλουθες περιπτώσεις: α) ομάδες πηνίων τυλίγματος μονής στρώσης με εύρος κατανομής 60°, β) ομάδες πηνίων τυλίγματος διπλής στρώσης με εύρος κατανομής 120° και γ) ομάδες πηνίων τυλίγματος διπλής στρώσης με εύρος κα-

τανομής 60°. Για παράδειγμα μια περιέλιξη της περίπτωσης γ σε μια μηχανή δεκαέξι πόλων μπορεί να διαθέτει ένα, δύο, τέσσερα, οκτώ, ή ακόμα και δεκαέξι παράλληλα κυκλώματα ανά φάση εφόσον πραγματοποιηθεί η κατάλληλη πρόβλεψη. Ο αριθμός των κυκλωμάτων προκύπτει από τη διαίρεση του αριθμού των πόλων με τον αριθμό των ομάδων ανά κύκλωμα.



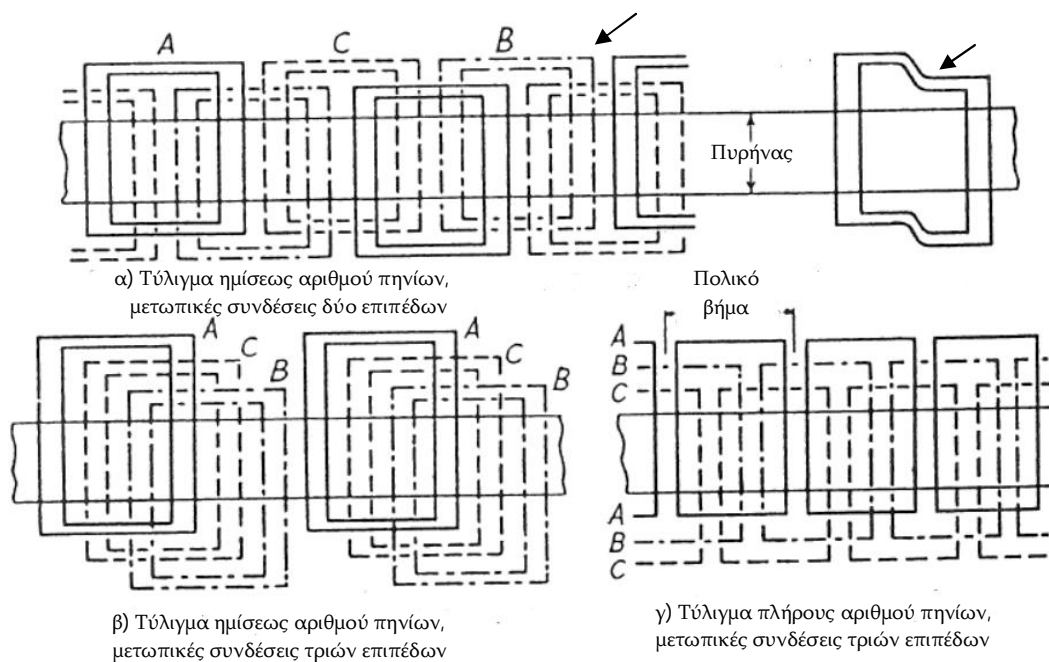
Σχήμα 2.28 : Μια φάση τριφασικής περιέλιξης [Ξ59, Fig. 125, page 200]
Έξι αύλακες ανά πόλο, πλήρες βήμα (ενεργό) εύρος πηνίου. Στην περιέλιξη διπλής στρώσης η κάτω στρώση αναπαρίσταται με διακεκομμένες

2.6.3 Τυλίγματα μονής στρώσης

Από την επισκόπηση του σχήματος 2.28.α προκύπτει ότι από τα τυλίγματα μονής στρώσης για μια ή περισσότερες φάσεις θα απαιτηθεί η ύπαρξη μιας σχεδίασης των μετωπικών συνδέσεων τους (των κεφαλών τους) (overhang) τέτοια ώστε να μπορεί να επιτραπεί στις συνδέσεις των άκρων τους να διαταχθούν σε ανεξάρτητες στρώσεις ή επίπεδα. Για μια τριφασική περιέλιξη οι κεφαλές των τυλιγμάτων δύνανται να διευθετηθούν σε δύο ή τρία επίπεδα (δύο ή τρεις στρώσεις) σύμφωνα με το σχήμα 2.29, ενώ μια γενική άποψη τριφασικής περιέλιξης μονής στρώσης με 2 επίπεδα μετωπικών συνδέσεων τοποθετημένη σε ημίκλειστες αύλακες παρατίθεται στο σχήμα 2.38.

Τα τυλίγματα μιας στρώσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: 1) Εκείνα στα οποία τα πηνία από τα οποία απαρτίζεται ένα ζεύγος ομάδων πηνίων φάσης σε παρακείμενα πολικά βήματα είναι ομόκεντρα. Τα τυλίγματα αυτά αποτελούνται από αριθμό πηνίων ανά φάση ίσο με το ήμισυ του αριθμού των πόλων της ηλεκτρικής μηχανής (unbifur-

cated or half coiled), και 2) Εκείνα στα οποία κάθε ομάδα πηνίων χωρίζεται σε δύο σύνολα ομόκεντρων πηνίων. Κάθε σύνολο μοιράζεται τις πλευρές των επιστροφών των πηνίων του με εκείνες μιας άλλης ομάδας στην ίδια φάση. Τα τυλίγματα αυτά χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι αποτελούνται από αριθμό πηνίων ανά φάση ίσο με τον αριθμό των πόλων της ηλεκτρικής μηχανής (bifurcated or whole coiled). Τα τυλίγματα α) και β) που εμφανίζονται στο σχήμα 2.29 είναι τυλίγματα ημίσεως αριθμού πηνίων (μερικές φορές ονομάζονται ομόκεντρα), το πρώτο αποτελεί τύλιγμα συνεχούς διάταξης αλυσίδας (continuous chain arrangement), ενώ το δεύτερο αποτελεί τύλιγμα ασυνεχούς διάταξης αλυσίδας (broken chain arrangement). Οι δύο προαναφερθέντες τύποι ανήκουν στην κατηγορία των αλυσωτών τυλιγμάτων ή αλυσοτυλιγμάτων. Τα αλυσωτά τυλίγματα αποτελούνται από μια μόνο ομάδα ανά ζεύγος πόλων και ανά φάση. Συνεπώς, είναι συγκεντρωμένα τυλίγματα μιας στρώσεως. Για να καταστεί δυνατό τα άκρα των ομάδων να προσπερνούν το ένα το άλλο, χρησιμοποιούνται ομάδες σε δύο διαφορετικά σχήματα και μεγέθη. Αυτό επηρεάζει τον αριθμό των επιπέδων (στρώσεων) των μετωπικών συνδέσεων που απαιτούνται για να διευθετηθούν τα άκρα των τυλιγμάτων. Συγκεκριμένα η κατασκευή των αλυσοτυλιγμάτων προϋποθέτει την ύπαρξη δύο επιπέδων μετωπικών συνδέσεων. Μια τυπική διάταξη τριφασικού αλυσοτυλιγματος και των μετωπικών συνδέσεων του εμφανίζεται στα σχήματα 2.30 και 2.31 αντίστοιχα.



Σχήμα 2.29 : Τυλίγματα μιας στρώσης [Ξ59, Fig. 126, page 202]

$$g' = 2 \text{ \u0391\u03c5\u03bb\u03b1\u03ba\u03b5\u03c2 \u03b1\u03bd\u03ac \u03c0\u03cc\u03bb\u03bf \u03ba\u03b1\u03b9 \u03c6\u03ac\u03c3\u03b7, \u03bc\u03b5 \u03b5\u03c5\u03c1\u03bf\u03c2 } 60^\circ$$

Το τύλιγμα γ) που εμφανίζεται στο σχήμα 2.29 είναι ένα τύλιγμα πλήρους αριθμού πηνίων ανά φάση (ή διαχωρισμένο ομόκεντρο τύλιγμα) για το οποίο απαιτείται η διάταξη των μετωπικών συνδέσεων σε τρία επίπεδα (στρώσεις).

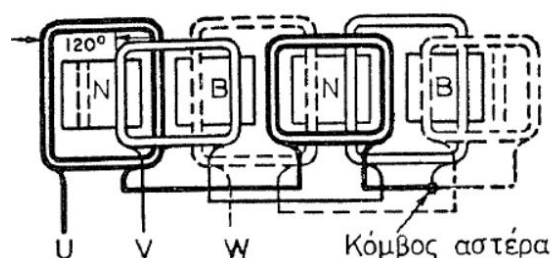
Σημείωση: Το πηνίο ειδικής κατασκευής (cranked coil) που εμφανίζεται στο σχήμα 2.29 είναι ένα πηνίο που διαθέτει ειδικά διαμορφωμένα άκρα έτσι ώστε να επιτρέπει και στα

δύο άκρα του να διέρχονται από τη μια στρώση των μετωπικών συνδέσεων του τυλίγματος στην άλλη προκειμένου να καταστεί δυνατή η κατασκευή της περιέλιξης αυτού του τύπου και η συνδεσμολογία της.

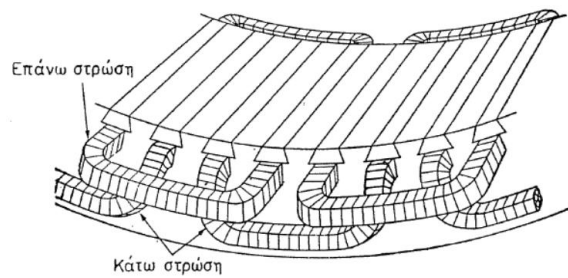
Οι βασικές παράμετροι σχεδίασης τυλιγμάτων παρατίθενται στον πίνακα 2.6 που ακολουθεί.

Πίνακας 2.6

Μεγέθη Τυλιγμάτων		
Σύμβολο -Τύπος	Παράμετρος σχεδίασης τυλίγματος	Μονάδες Μέτρησης
S	Συνολικός αριθμός αυλάκων σε επαγωγίμο με ομοιόμορφα κατανεμημένες αύλακες	
C	Αριθμός πηνίων	
e	Η.Ε.Δ. αγωγού	Volt
e_t	Η.Ε.Δ. ελίγματος	Volt
p	Αριθμός ζευγών πόλων	
$\gamma = 2 \cdot \pi \cdot p/S$	Βήμα αύλακας	rad
N	Αριθμός φάσεων	
$g = S/2 \cdot p$	Αριθμός αυλάκων ανά πόλο	
$g' = S/2 \cdot p \cdot N$	Αριθμός αυλάκων ανά πόλο και φάση	
σ	Ηλεκτρική γωνία εύρους ομάδας φάσης	rad
$\beta = 2 \cdot \pi/N$	Ηλεκτρική γωνία ανάμεσα στις Η.Ε.Δ. διαδοχικών φάσεων	rad
S_{ab}, S_{ac}	Αριθμός αυλάκων ανάμεσα σε δοθέντα σημεία στις φάσεις AB, AC	



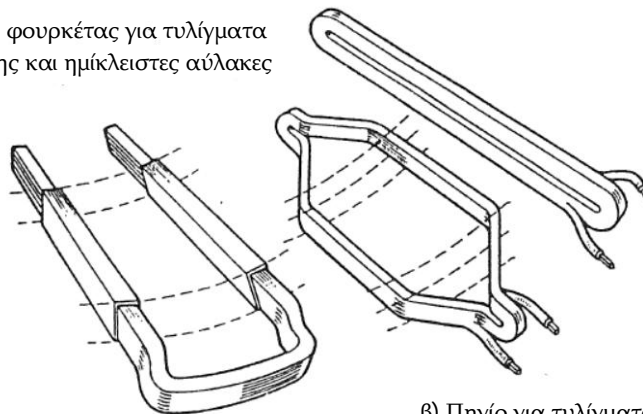
Σχήμα 2.30 : Αλυσωτό τριφασικό τύλιγμα [E11, σχήμα 6.9.β, σελίδα 152]



Σχήμα 2.31 : Τύλιγμα με δύο επίπεδα μετωπικών συνδέσεων
[Ε11, σχήμα 6.9.γ, σελίδα 153]

Σήμερα όπου χρησιμοποιούνται τυλίγματα μιας στρώσης, αυτά διαθέτουν πηνία διαμορφωμένα σε σχήμα φουρκέτας όπως αυτά εμφανίζονται στο σχήμα 2.32.α και τοποθετούνται στη μηχανή μέσω ημίκλειστων αύλακων σύμφωνα με το σχήμα 2.33, ενώ στη συνέχεια λυγίζονται στα ελεύθερα άκρα τους προκειμένου να ενωθούν έλιγμα με έλιγμα. Διαθέτουν το πλεονέκτημα ότι τα σημαντικά τμήματα του πηνίου τα οποία τοποθετούνται στις αύλακες μπορούν να μονωθούν προσεκτικά πριν αυτό εισαχθεί στο επαγωγίμο (armature), καθώς και ότι η περιέλιξη βρίσκεται μέσα σε αύλακες οι οποίες διαθέτουν ένα στενό άνοιγμα, η χρήση του οποίου μειώνει τα αμπερελίγματα διέγερσης του διακένου, τις απώλειες των οδοντώσεων και το θόρυβο.

α) Πηνίο τύπου φουρκέτας για τυλίγματα μονής στρώσης και ημίκλειστες αύλακες

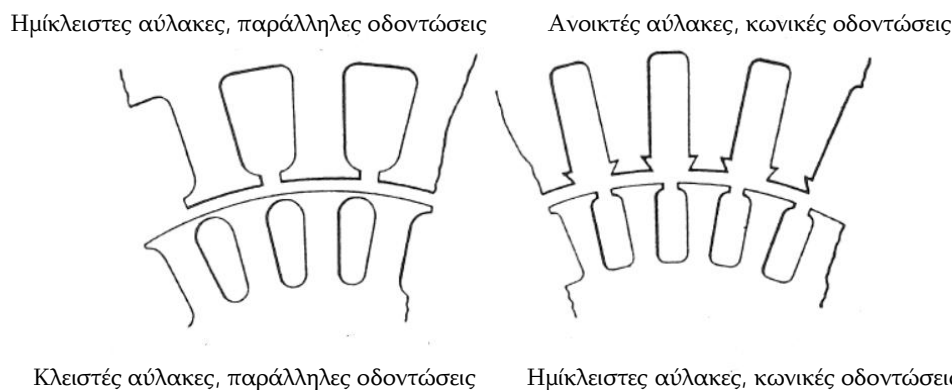


β) Πηνίο για τυλίγματα διπλής στρώσης και ανοικτές αύλακες

Σχήμα 2.32 : Παραδείγματα πηνίων για τυλίγματα μονής και διπλής στρώσης [Ε59, Fig. 129, page 211]

Βασικό χαρακτηριστικό μιας ηλεκτρικής μηχανής αποτελεί το ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο είναι η περιέλιξη του επαγωγίμου στην οποία επάγεται η δρῶσα Η.Ε.Δ. Στις μηχανές Συνεχούς Ρεύματος το επαγωγίμο βρίσκεται στο δρομέα, ενώ στις μηχανές Εναλλασσομένου Ρεύματος στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων αυτό βρίσκεται στο στάτη. Όταν απαιτείται διέγερση συνεχούς ρεύματος για το μαγνητικό κύκλωμα, μια περαιτέρω απαίτηση αποτελεί η ύπαρξη ενός τυλίγματος διέγερσης. Η σύνδεση των μεμονωμένων αγωγών συνήθως επιτυγχάνεται με τη εφαρμογή συγκόλλησης μέσω ηλεκτρικής αντίστασης προκειμένου να σχηματιστεί το τελικό πηνίο, και στη συνέχεια

πρέπει κάθε έλιγμα να μονωθεί κατάλληλα πάνω στη συγκόλληση του άκρου. Η διαδικασία αυτή είναι ακριβή, και το κόστος της λαμβάνεται υπόψη, προκειμένου να επιλεχθεί η χρήση τυλιγμάτων διπλής στρώσης έναντι εκείνων της μιας στρώσης.



Σχήμα 2.33 : Τύποι αυλάκων για μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος [Ξ59, Fig. 130, page 212]

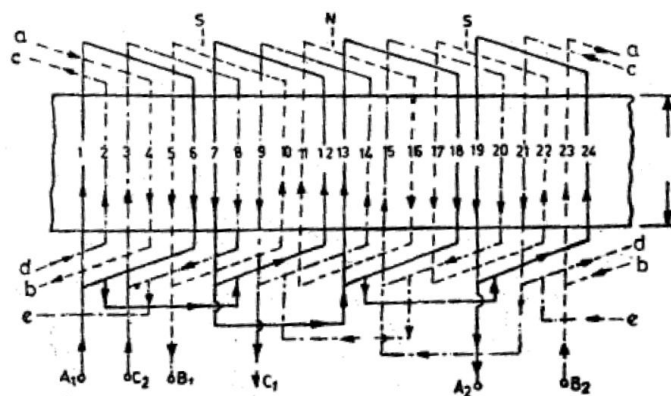
Η αναφορά στο σχήμα 2.29 και στον πίνακα 2.7 που παρατίθεται στη συνέχεια θα καταστήσει ξεκάθαρο το πρότυπο των συνηθισμένων μορφών τυλιγμάτων μιας στρώσης. Σε κάθε περίπτωση το ενεργό εύρος του πηνίου ισοδυναμεί με το πλήρες βήμα.

Πίνακας 2.7

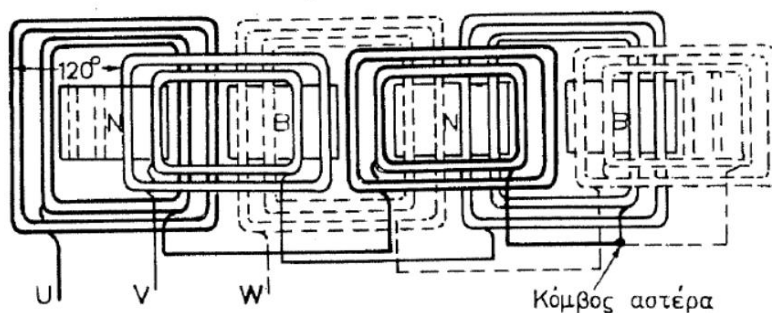
Τύποι Ομόκεντρων Τυλιγμάτων σε Ημίκλειστες Αύλακες

Τύπος	Επίπεδα Μετωπικών συνδέσεων	Χρήση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αριθμός πηνίων φάσης = Αριθμός πόλων / 2 Συνεχούς αλυσίδας	2	Πολυπολικές μηχανές με $g' = 2$ ή 3	Όμοιες ομάδες πηνίων, τοποθέτηση από εναλλακτικά άκρα	Απαιτούνται 4 πολικά βήματα για επανάληψη του πρότυπου όταν ρ περιττός χρήση ειδικού πηνίου*
Αριθμός πηνίων φάσης = Αριθμός πόλων / 2 Ασυνεχούς αλυσίδας	3	Μηχανές με διαιρούμενους στάτες όταν ρ άρτιος για αποφυγή εγκάρσιων συνδέσεων πηνίων	Ασυνεχής μορφή επιτρέπει εύκολη διαίρεση. Επαναλαμβάνεται κάθε δεύτερο πολικό βήμα	Ακανόνιστα άκρα περιέλιξης. Προκαλούν μεταβαλλόμενη ροή σκέδασης μετωπικών συνδέσεων και απώλειες δινορρευμάτων στα καλύμματα των άκρων
Αριθμός πηνίων φάσης = Αριθμός πόλων	3	Μεγάλες μηχανές όπου $g' \geq 4$	Επαναλαμβάνεται κάθε δεύτερο πολικό βήμα Μειωμένο πλάτος άκρων τυλίγματος	Απαιτούνται 3 τύποι ομάδων πηνίων

Πολλές φορές για επαγωγικούς κινητήρες μικρής ισχύος, χρησιμοποιείται μια διάμρφωση περιέλιξης μιας στρώσης με πηνία σταθερού εύρους, τα οποία κατασκευάζονται από αγωγούς κυκλικής διατομής. Αυτό το είδος τυλίγματος ονομάζεται καλαθοτύλιγμα (mush winding). Σε αυτήν την περίπτωση κάθε πηνίο κατασκευάζεται σε καλούπι τραπεζοειδούς σχήματος με τέτοιο τρόπο ώστε η μια πλευρά του να διαθέτει μικρότερο μήκος από την άλλη. Στην περιέλιξη τα σύρματα τοποθετούνται ξεχωριστά στις αύλακες, πρώτα η πλευρά του πηνίου που διαθέτει το μικρότερο μήκος (τα σύρματα αναδύονται κάτω από τις πλευρές μεγάλου μήκους άλλων πηνίων που τοποθετούνται σε παρακείμενες αύλακες), και έπειτα η πλευρά του πηνίου που διαθέτει το μεγαλύτερο μήκος. Στην περιφέρεια του επαγωγίμου της μηχανής οι μακριές και οι κοντές πλευρές τοποθετούνται στις αύλακες εναλλάξ, ενώ τα πηνία διαθέτουν σταθερό βήμα με ακέραιο αριθμό αυλάκων ανά πόλο και φάση. Αναπτύγματα καλαθοτυλιγμάτων εμφανίζονται στα σχήματα 2.34 και 2.35.



Σχήμα 2.34 : Καλαθοτύλιγμα [Ξ60, Fig. 1, page 20]



Σχήμα 2.35 : Τριφασικό καλαθοτύλιγμα [E11, σχήμα 6.10, σελίδα 154]

Ο αριθμός των πηνίων σε ένα τύλιγμα μιας στρώσης ισούται με το ήμισυ του αριθμού των διαθέσιμων αυλάκων, διότι κάθε πλευρά του πηνίου καταλαμβάνει πλήρως μια αύλακα. Οπότε σύμφωνα με τα δεδομένα που παρατίθενται στον πίνακα 2.6 ισχύει:

$$C = S/2 \quad (2.79)$$

2.6.4 Τυλίγματα διπλής στρώσης

Οι περιελίξεις των επαγωγίμων σχεδόν όλων των σύγχρονων γεννητριών και κινητήρων, καθώς και των περισσότερων επαγωγικών κινητήρων, οι οποίοι έχουν ισχύ μεγαλύτερη από μερικούς ίππους, κατασκευάζονται με τυλίγματα διπλής στρώσης.

Τα τυλίγματα που διαθέτουν ακέραιο αριθμό αυλάκων ανά πόλο (σε αυτά ο αριθμός g είναι ακέραιος) ονομάζονται τυλίγματα ακέραιου αριθμού αυλάκων. Ωστόσο, είναι σύνηθες η παράμετρος g να λαμβάνει κλασματικές τιμές και οι διατάξεις περιελίξεων σαν αυτές (στις οποίες ο αριθμός των αυλάκων S δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του αριθμού των πόλων $2p$) ορίζονται ως τυλίγματα κλασματικού βήματος. Αυτά διαθέτουν ορισμένα πλεονεκτήματα τα οποία παρατίθενται στην επόμενη ενότητα. Σε όλες τις περιπτώσεις ο αριθμός των πηνίων ισούται με τον αριθμό των αυλάκων σύμφωνα με τη σχέση (2.80).

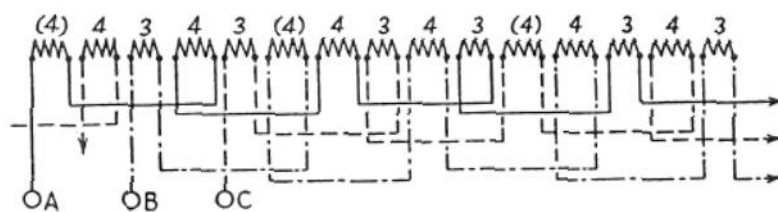
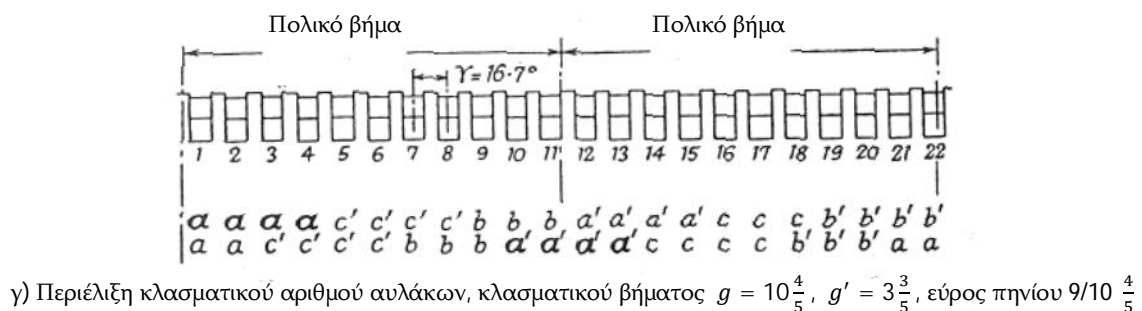
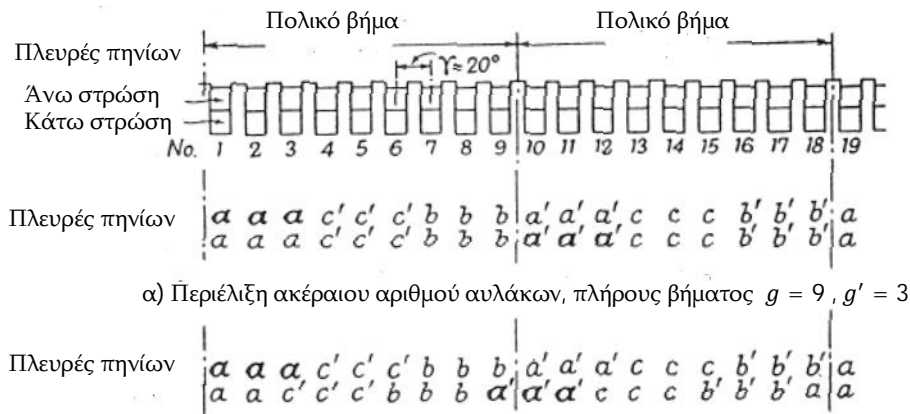
$$C = S \quad (2.80)$$

Τυλίγματα ακέραιου αριθμού αυλάκων. Στα σχήματα 2.36.α και 2.36.β εμφανίζονται ορισμένες βασικές διατάξεις τριφασικών περιελίξεων ακέραιου αριθμού αυλάκων. Με τα γράμματα υποδεικνύονται αγωγοί που αντιστοιχούν με τις φάσεις Α, Β και C ενός τριφασικού επαγωγίμου. Από τα γράμματα που έχουν διαταχθεί κάθετα προσδιορίζονται οι αγωγοί που τοποθετούνται μέσα στην ίδια αύλακα. Η γωνιακή απόσταση που μεσολαβεί ανάμεσα σε διαδοχικές αύλακες αποτελεί το γωνιακό βήμα της αύλακας συμβολίζεται με γ και μετριέται σε rad. Τα πηνία έχουν διαμορφωθεί εκ των προτέρων, ενώ όλα διαθέτουν το ίδιο άνοιγμα.

Στο σχήμα 2.36.α εμφανίζεται ένα τυλίγμα που διαθέτει $g = 9$ αύλακες ανά πόλο, $g' = 3$ αύλακες ανά πόλο και φάση, και πηνία πλήρους βήματος. Το βήμα της αύλακας προκύπτει ίσο με $\gamma = 2\pi/18$ rad ή 20° μοίρες. Κάθε ζώνη φάσης επεκτείνεται σε τρία βήματα αύλακας έτσι, ώστε το εύρος μιας φάσης να ισούται με $\sigma = 60^\circ$. Οι αγωγοί της φάσης b τοποθετούνται σε γωνία 120° , ενώ οι αγωγοί της φάσης c σε γωνία 240° προς τα δεξιά ως προς τη φάση a. Από αυτή τη διάταξη προκύπτει ότι η ηλεκτρική γωνία ανάμεσα στις θέσεις δύο διαδοχικών φάσεων καθώς και των αντίστοιχων παραγόμενων Η.Ε.Δ. ισούται με $\beta = 2\pi/3 = 120^\circ$. Τα πηνία είναι πλήρους βήματος, η γωνία τους ισούται με π rad ή 180° μοίρες, ενώ κάθε αύλακα περιέχει πλευρές πηνίων που ανήκουν σε μια μόνο φάση.

Προκειμένου η ποσότητα χαλκού που χρησιμοποιείται στις συνδέσεις των άκρων να μειωθεί και να επιτευχθεί η μείωση ή η καταστολή συγκεκριμένων αρμονικών στις ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις των φάσεων, τα πηνία της περιέλιξης μπορεί να διαθέτουν κλασματικό βήμα (chorded pitch) ή μερικό βήμα (short pitched). Μια περιέλιξη αυτής της μορφής εμφανίζεται στο σχήμα 2.36.β. Αυτό διαθέτει $g = 9$ αύλακες ανά πόλο, $g' = 3$ αύλακες ανά πόλο και φάση και γωνία $\beta = 120^\circ$, όπως προηγουμένως, αλλά το εύρος του πηνίου είναι 8 αύλακες αντί των 9 που διαθέτει το ανάπτυγμα τους σχήματος 2.36.α. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ένα εύρος πηνίου (ή βήμα πηνίου) ίσο με $8/9$ του πολικού βήματος, π.χ. 160° . Τώρα σε αυτήν την περίπτωση ορισμένες αύλακες καταλαμβάνονται από πλευρές πηνίων διαφορετικών φάσεων. Το κλασματικό βήμα μειώ-

νει την αναπτυσσόμενη Η.Ε.Δ. ανά φάση. Το βήμα του πηνίου σπάνια γίνεται μικρότερο από τα $2/3$ του πολικού βήματος, διότι σε αυτή την περίπτωση καθίσταται αναγκαία η χρήση επιπρόσθετων ελιγμάτων η οποία αντισταθμίζει την εξοικονόμηση χαλκού η οποία επιτυγχάνεται στις κεφαλές των τυλιγμάτων από την υιοθέτηση του κλασματικού βήματος.



Σχήμα 2.36 : Αναπτύγματα τριφασικών περιελίξεων δύο στρώσεων [Ξ59, Fig. 127, page 204]

Τυλίγματα κλασματικού αριθμού αυλάκων. Σε αυτά τα τυλίγματα οι τιμές των αυλάκων ανά πόλο g και των αυλάκων ανά πόλο και φάση g' έχουν κλασματικές τιμές. Συνήθως η τιμή των αυλάκων ανά πόλο και φάση g' είναι ένα κλάσμα του οποίου ο αριθμητής είναι μεγαλύτερος ή ίσος με τον παρονομαστή (improper fraction) όπως: $\frac{7}{5}, \frac{23}{7}$ κλπ ή γενικά όπως αυτή προκύπτει από τη σχέση (2.81). Σύμφωνα με αυτή σε ένα τμήμα της μηχανής που απαρτίζεται από $2 \cdot p'$ πόλους συνολικά αντιστοιχούν S' αύλακες, και S'/N αύλακες για κάθε μια από τις N φάσεις όπου ο λόγος S'/N είναι

$$g' = S' / (2 \cdot p' \cdot N) \quad (2.81)$$

ακέραιος αριθμός. Έτσι από το κλάσμα $\frac{7}{5}$ αναπαρίστανται 7 αύλακες ανά φάση οι οποίες κατανέμονται σε 5 πολικά βήματα. Σε μια τριφασική μηχανή αυτό σημαίνει ότι απαιτούνται 21 αύλακες για κάθε τμήμα των 5 πόλων, 42 για κάθε τμήμα των 10 πόλων και ούτω καθεξής. Τα τυλίγματα όλων των φάσεων πρέπει να διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται ηλεκτρική και μαγνητική ισορροπία, η οποία απαιτεί την άθροιση των Η.Ε.Δ. των αγωγών στο ίδιο σύνολο για κάθε φάση, με μια διαφορά φάσης ανάμεσα στα διανύσματα των φασικών Η.Ε.Δ. ακριβώς ίση με 120° .

Στο σχήμα 2.36.γ εμφανίζεται το ανάπτυγμα υπό μορφή διαγράμματος μιας περιέλιξης κλασματικού αριθμού αυλάκων για ένα διπλό πολικό βήμα. Από αυτό καθίσταται εμφανές ότι τα πηνία της δεν μπορούν να διαθέτουν το πλήρες εύρος των 180° ηλεκτρικών μοιρών, καθώς και ότι οι φάσεις είναι ασύμμετρες. Βέβαια η συμμετρία διασφαλίζεται στο εύρος του πλήρους τμήματος των πόλων (το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι $2 \cdot p' = 5$), μετά από το οποίο το σύνολο της διάταξης επαναλαμβάνεται για το επόμενο τμήμα των πόλων, $2 \cdot p'$, εάν υπάρχει.

Το εύρος του πηνίου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαθέτει αξιοσημείωτη ελευθερία. Αυτό που εμφανίζεται στο σχήμα 2.36.γ καταλαμβάνει 9 αύλακες σε ένα σύνολο $g = 10\frac{4}{5}$ αύλακες ανά πόλο το οποίο αποτελεί το ισοδύναμο από $g' = 3\frac{3}{5}$ αύλακες ανά πόλο και φάση. Παρά το γεγονός ότι αυτός ο αριθμός δεν υπάρχει στην πράξη, μέσω αυτού αναπαρίσταται ο μέσος αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση στο τμήμα που στην περίπτωση αυτή απαρτίζεται από 5 πόλους.

2.6.5 Τυλίγματα κλασματικού αριθμού αυλάκων

Η προφανής πολυπλοκότητα που έχει περιγραφεί παραπάνω διαθέτει θεωρητικά πλεονεκτήματα, και στην κατασκευή της ενισχύεται από επιθυμητές απλουστεύσεις οι οποίες παρατίθενται στη συνέχεια:

1. Απλή, αλλά αποτελεσματική, καταστολή των αρμονικών υψηλών συχνοτήτων των αυλάκων.
2. Τη χρήση ενός συνολικού αριθμού αυλάκων στο επαγωγίμο, ο οποίος δεν αποτελεί απαραίτητα ένα πολλαπλάσιο του αριθμού των πόλων.

Έτσι, ένας συγκεκριμένος αριθμός αυλάκων για τις οποίες υπάρχει εξοπλισμός επεξεργασίας κοπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα εύρος ηλεκτρικών μηχανών, οι οποίες περιστρέφονται με διαφορετικές ταχύτητες. Αυτό έχει ως επακόλουθο την εξοικονόμηση του κόστους του εξοπλισμού που απαιτείται για την κατασκευή και τη σχεδίαση των ηλεκτρικών μηχανών, γεγονός το οποίο έχει ιδιαίτερη αξία, όπου μπορεί να απαιτηθεί ένα ευρύ φάσμα αριθμού πόλων όπως στις σύγχρονες μηχανές.

Οι κλασματικές αύλακες είναι εφικτές στην πράξη μόνο με τυλίγματα διπλής στρώσης. Επιπρόσθετα με τη χρήση τους περιορίζεται ο αριθμός των παράλληλων κλάδων του τυλίγματος, διότι προκειμένου να σχηματιστεί ένα τμήμα της περιέλιξης απαιτείται η εν σειρά σύνδεση ομάδων πηνίων που βρίσκονται σε πολλούς διαφορετικούς πόλους

ανά φάση. Εφόσον το αρχικό τμήμα της περιέλιξης σχηματιστεί, το τύλιγμα επαναλαμβάνει το πρότυπο αυτό, προκειμένου να σχηματιστεί ένα δεύτερο τμήμα, το οποίο μπορεί να παραλληλισθεί με το πρώτο.

Οι απλούστερες περιπτώσεις περιελίξεων κλασματικών αυλάκων είναι εκείνες για τις οποίες ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο g είναι ένας ακέραιος αριθμός συν το ήμισυ της μονάδας. Από τα τυλίγματα αυτά χρησιμοποιούνται ομάδες πηνίων που εναλλάσσονται και διαφέρουν μεταξύ τους κατά ένα πηνίο. Έτσι με ένα αριθμό αυλάκων ανά πόλο ίσο με $g = 7\frac{1}{2}$ (ή με ένα αριθμό αυλάκων ανά πόλο και φάση ίσο με $g' = 2\frac{1}{2}$), στις διαδοχικές ομάδες φάσεων τριφασικής περιέλιξης εύρους 60° θα περιέχονται 2 και 3 αύλακες αντίστοιχα ενώ, οι δύο ομάδες φάσεων, οι οποίες τοποθετούνται ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους και συνδέονται εν σειρά θα αποτελέσουν το βασικό επαναλαμβανόμενο τμήμα. Ο αριθμός των τμημάτων καθορίζεται από το συνολικό αριθμό των πόλων στο επαγώγιμο, ο οποίος ισούται με $2 \cdot p$.

Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 2.6.4, όταν ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση g' εκφράζεται σύμφωνα με την εξίσωση (2.81) ελαχιστοποιημένος στους όρους χαμηλότερης τάξης του, τότε ο λόγος S'/N αναπαριστά τον αριθμό των αυλάκων και των πηνίων ανά φάση στο βασικό τμήμα των $2 \cdot p'$ πόλων του τυλίγματος. Έτσι για ένα αριθμό αυλάκων ανά πόλο και φάση $g' = 2\frac{3}{4} = 11/4$, υφίστανται 11 πηνία ανά φάση τα οποία έχουν διανεμηθεί ανάμεσα σε 4 διαδοχικούς πόλους, και στις τέσσερις ομάδες πηνίων μπορεί να περιέχονται 3, 3, 3 και 2 πηνία συνδεδεμένα εν σειρά. Φυσικά, το βασικό τμήμα των $2 \cdot p'$ πόλων πρέπει να είναι ένας παράγοντας (factor) του συνολικού αριθμού των πόλων $2 \cdot p$, και, εφόσον ο συνολικός αριθμός των παράλληλων κλάδων που απαιτούνται ισούται με a , το γινόμενο $2 \cdot a \cdot p'$ πρέπει να είναι επίσης ένας παράγοντας του συνολικού αριθμού των πόλων $2 \cdot p$.

Εφαρμογή 1^η

Μια τριφασική μηχανή διαθέτει 16 πόλους, 108 αύλακες και εύρος φάσης 60° . Αυτή διαθέτει : $g' = S/2 \cdot p \cdot N = 108/16 \cdot 3 = 9/4 \Rightarrow g' = 2\frac{1}{4}$ αύλακες ανά πόλο και φάση. Οι ομαδοποιήσεις σε κάθε φάση στο βασικό τμήμα των 4 πόλων προκύπτουν σύμφωνα με την ακολουθία : 3 – 2 – 2 – 2 πηνία. Η μηχανή χωρίζεται σε 4 βασικά τμήματα των 4 πόλων έκαστο τα οποία μπορεί να συνδεθούν εν σειρά, ή εφόσον υλοποιηθεί η κατάλληλη σύνδεση να σχηματίσουν 2 ή 4 παράλληλα κυκλώματα (κλάδους).

Εφαρμογή 2^η

Μια τριφασική μηχανή διαθέτει 10 πόλους, 108 αύλακες, ενώ διαθέτει :

$$g' = S/2 \cdot p \cdot N = 108/10 \cdot 3 = 18/5 \Rightarrow g' = 3\frac{3}{5} \text{ αύλακες ανά πόλο και φάση.}$$

Οι ομαδοποιήσεις σε κάθε φάση προκύπτουν σύμφωνα με την ακολουθία :

4 – 4 – 4 – 3 – 3 πηνία, ενώ το βασικό τμήμα θα καλύπτει 5 πολικά βήματα. Αυτή η διάταξη επιτρέπει μόνο 2 δυνατές συνδεσμολογίες. Τη δημιουργία ενός κυκλώματος τα δυο τμήματα του οποίου θα συνδέονται εν σειρά, οπότε υπάρχει 1 παράλληλος κλάδος ή τη δημιουργία ενός κυκλώματος τα δύο τμήματα του οποίου θα συνδέονται παράλληλα οπότε υπάρχουν 2 παράλληλοι κλάδοι.

Απαιτήσεις συμμετρίας. Από τις περιελίξεις κλασματικού αριθμού αυλάκων πρέπει να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις της συμμετρίας των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων. Σε κάθε φάση πρέπει να εφαρμόζεται η ίδια ακολουθία των ομάδων και από τις ομάδες πρέπει να καταλαμβάνονται αύλακες που έχουν επιλεχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνονται οι απαιτούμενες διαφορές φάσης ανάμεσα στα διανύσματα των αναπτυσσόμενων Η.Ε.Δ. σύμφωνα με τη σχέση : $\beta = 2 \cdot \pi / N$.

Θεωρείται ότι $S_{ab}, S_{ac} \dots$ είναι η μετατόπιση ανάμεσα σε μια δοθείσα αύλακα της φάσης A και όμοιες αύλακες των φάσεων B και C ... η οποία μετρείται σε βήματα αύλακας. Τότε, με ένα γωνιακό βήμα αύλακας ίσο με: $\gamma = 2 \cdot \pi \cdot p / S$ το οποίο μετρείται σε ηλεκτρικά ακτίνια (rad) (π.χ. η συνολική ηλεκτρική γωνία που αντιστοιχεί στα p ζεύγη πόλων διαιρεμένη με το συνολικό αριθμό των αυλάκων σύμφωνα με τη σχέση (2.82) ή τη σχέση (2.83))

$$S_{ab} \cdot \gamma = 2\pi / N \quad (2.82)$$

$$S_{ab} \cdot \gamma = 2\pi / N + x \cdot \pi \quad (2.83)$$

προκύπτει η θέση της αύλακας που απαιτείται στη φάση B, με την παράμετρο x να λαμβάνει οποιαδήποτε θετική ακέραια τιμή. Από την προηγούμενη έκφραση η "πολικότητα" π.χ. η θετική κατεύθυνση της Η.Ε.Δ. της ομάδας στην οποία βρίσκεται η αύλακα της φάσης B θα είναι η ίδια όπως εκείνη στη φάση A. Το ίδιο ισχύει από τη δεύτερη έκφραση σύμφωνα με την εξίσωση (2.83) εάν η παράμετρος x λαμβάνει άρτιες τιμές. Δηλαδή εάν $x = 0, 2, 4, 6, 8 \dots$. Αλλά εάν η παράμετρος x λαμβάνει περιττές τιμές $x = 1, 3, 5, 7, 9 \dots$ τότε οι πολικότητες θα είναι αντίθετες. Αυτό πρέπει να επιτρέπεται προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι συνδέσεις στις φάσεις. Με παρόμοιο τρόπο προκύπτουν οι εξισώσεις (2.84) και (2.85) που παρατίθενται στη συνέχεια.

$$S_{ac} \cdot \gamma = 4\pi / N \quad (2.84)$$

$$S_{ac} \cdot \gamma = 4\pi / N + x \cdot \pi \quad (2.85)$$

και ούτω καθεξής για τις υπόλοιπες από τις N συνολικά φάσεις.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μια περιέλιξη κλασματικού αριθμού αυλάκων μπορεί να χωριστεί σε βασικά τμήματα κάθε ένα από τα οποία θα περιέχει $2 \cdot p'$ πόλους και S' αύλακες έτσι ώστε, να προκύπτουν για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα τμήματα οι κατάλληλες τιμές των μετατοπίσεων ανάμεσα σε μια δοθείσα αύλακα συγκεκριμένης φάσης και όμοιες αύλακες των υπόλοιπων φάσεων της περιέλιξης οι οποίες μετρούνται σε βήματα αύλακας S_{ab}, S_{ac} . Λαμβάνοντας υπόψη για λόγους ευκολίας ότι ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση προκύπτει από τη σχέση $g' = S / 2 \cdot p \cdot N = S' / 2 \cdot p' \cdot N = \pi / N \cdot \gamma$, τα διαστήματα S_{ab}, S_{ac} ανάμεσα στις αύλακες υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (2.86).

$$S_{ab} = g' \cdot (N \cdot x + 2) \quad (2.86. \alpha)$$

$$S_{ac} = g' \cdot (N \cdot x + 4) \quad (2.86. \beta)$$

Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό και των υπόλοιπων διαστημάτων προκύπτουν με τον ίδιο τρόπο. Όταν επιλεχθεί μια κατάλληλη τιμή για τη μεταβλητή x από τις παραπάνω

εξισώσεις, θα προκύπτουν ακέραιοι αριθμοί, εκτός από τις περιπτώσεις εκείνες που ο αριθμός των πόλων $2 \cdot p'$ είναι ένα πολλαπλάσιο του αριθμού των φάσεων N . Όταν ο όρος $2 \cdot p'$ στη σχέση $g' = S'/2 \cdot p' \cdot N$ της οποίας ο αριθμητής λαμβάνει τιμές ίσες ή μεγαλύτερες από τον παρονομαστή ελαχιστοποιηθεί στους όρους χαμηλότερης τάξης του, θα προκύψει πολλαπλάσιος του αριθμού των φάσεων και επομένως σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι δυνατή η κατασκευή ενός συμμετρικού τυλίγματος.

Στα τριφασικά τυλίγματα ($N = 3$) η ομαδοποίηση της φάσης B βρίσκεται σε απόσταση S'/N αύλακες από εκείνη της φάσης A όταν ο αριθμός των πόλων ισούται με $2 \cdot p' = 2,5,8,11 \dots$ και η ομαδοποίηση της φάσης C βρίσκεται σε απόσταση $2 \cdot (S'/N)$ αύλακες από τη φάση A όταν ο αριθμός των πόλων ισούται με $2 \cdot p' = 4,7,10,13 \dots$, ενώ αυτές οι αποστάσεις εναλλάσσονται.

Όταν οι αρχές (ή ανάλογα με την πολικότητα τα τέλη) των διάφορων φάσεων έχουν καθοριστεί, απομένει η διαδοχική συμπλήρωση των παρόμοιων ομάδων σε κάθε φάση από αυτά τα σημεία. Τότε θα έχουν τοποθετηθεί σωστά τα πηνία σε όλες τις υπόλοιπες αύλακες. Η ακολουθία των ομάδων αυλάκων (4-4-4-3-3 αύλακες όπως εκείνη που προέκυψε στο 2^ο παράδειγμα που παρατέθηκε παραπάνω) καθορίζεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή συμμετρία στην περιέλιξη. Ένα τμήμα της περιέλιξης το οποίο απαρτίζεται από 5 πόλους, όπως αυτό που παρατίθεται στο 2^ο παράδειγμα, μπορεί να αναπαρασταθεί σύμφωνα με τον πίνακα 2.8.

Πίνακας 2.8

**Διάταξη Τμήματος Τυλίγματος 5 Πόλων
Δεύτερου Παραδείγματος**

Παράμετροι					
Φάση A	(+4)	-4	+4	-3	+3
Φάση B	+3	(-4)	+4	-4	+3
Φάση C	-4	+3	-3	(+4)	-4
Πολικό βήμα	1 ^ο	2 ^ο	3 ^ο	4 ^ο	5 ^ο

Τα σχήματα δείχνουν τον αριθμό των αυλάκων που περιέχουν τις πλευρές των πηνίων που τοποθετούνται στην άνω στρώση σε κάθε ομάδα πηνίων με την κατάλληλη πολικότητα, οι αριθμοί μέσα στις παρενθέσεις εισάγονται πρώτοι από τις εκφράσεις που έχουν προκύψει για τα διαστήματα ανάμεσα στις αύλακες S_{ab} και S_{ac} . Ένα ανάπτυγμα του τμήματος των 5 πόλων εμφανίζεται στο σχήμα 2.36.δ. Το διάγραμμα δύο πολικών βημάτων εμφανίζεται στο σχήμα 2.36.γ, οι πλευρές των πηνίων της κάτω στρώσης που βρίσκονται στην αριστερή πλευρά του πολικού βήματος αντιστοιχούν στη διάταξη των πλευρών των πηνίων της άνω στρώσης του 5^{ου} πολικού βήματος στον πίνακα 2.8.

Εύρος πηνίου. Όταν έχει αποφασιστεί η ομαδοποίηση της άνω στρώσης των πλευρών των πηνίων, ακολουθεί η ομαδοποίηση της αντίστοιχης κάτω στρώσης των πλευρών των πηνίων εκείνων που ανήκουν στην ίδια ακολουθία ομάδας, αλλά τοποθετού-

νται μετατοπισμένα ως προς τις ομάδες των άνω στρώσεων σε απόσταση ίση με το βήμα της περιέλιξης ή το εύρος του πηνίου. Το εύρος του πηνίου μπορεί να είναι ίδιο για όλα τα πηνία της περιέλιξης, και επειδή ο αριθμός των αυλάκων g είναι κλασματικός, το εύρος δεν μπορεί να ισούται με το πλήρες βήμα. Έτσι για ένα αριθμό αυλάκων ανά πόλο $g = 7\frac{1}{2}$ μπορεί να καταλαμβάνει ένα άνοιγμα εύρους από την 1^η έως και την 9^η αύλακα (8 βήματα αύλακας) ή από την 1^η έως και την 8^η αύλακα (7 βήματα αύλακας). Το πρώτο είναι μεγαλύτερο, ενώ το δεύτερο είναι μικρότερο από το πολικό βήμα των $7\frac{1}{2}$ βημάτων αύλακας. Το εύρος που έχει επιλεγεί είναι σχεδόν αμετάβλητο περισσότερο βραχύ παρά μακρύ. Με ένα αριθμό αυλάκων ανά πόλο ίσο με $g = 7\frac{1}{2}$ ένα εύρος 7 αυλάκων καταλαμβάνει το 88.9 % του πλήρους βήματος, ενώ για ένα εύρος 6 αυλάκων προκύπτει ότι το πηνίο καταλαμβάνει το 80 % του πλήρους βήματος. Όπως έχει ήδη παρατηρηθεί το κλασματικό βήμα διαθέτει πλεονεκτήματα από τεχνική άποψη όπως η μείωση της χρήσης χαλκού στις μετωπικές συνδέσεις των τυλιγμάτων και η καταστολή των αρμονικών της αναπτυσσόμενης Η.Ε.Δ. και της Μ.Ε.Δ.

2.6.6 Τύποι τυλιγμάτων διπλής στρώσης

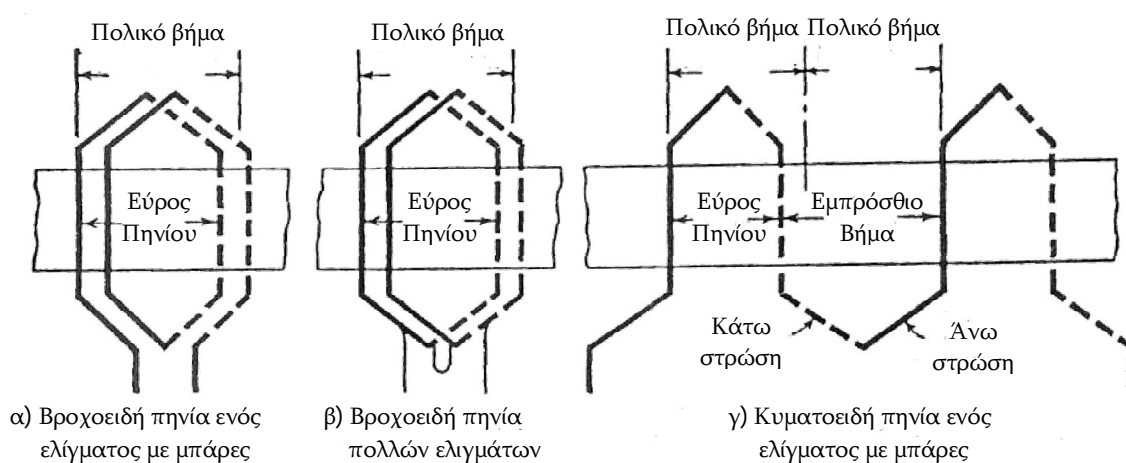
Ένα πηνίο σε μια περιέλιξη διπλής στρώσης αναπαριστά όλο το σύνολο των αγωγών που περιέχονται σε μια στρώση αύλακας σε συνεργασία με τα όμοια σύνολα που βρίσκονται στην άλλη στρώση μιας άλλης αύλακας. Επομένως ο αριθμός των πηνίων είναι ο ίδιος με τον αριθμό των αυλάκων: $C = S$.

Οι μετωπικές συνδέσεις ενός τυλίγματος διπλής στρώσης μπορούν να έχουν μια ποικιλία σχημάτων, η οποία εξαρτάται από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση της μετάβασης από τη θέση της άνω στρώσης στη θέση της κάτω στρώσης της αύλακας. Βασικά υπάρχουν μόνο δύο τύποι μετωπικών συνδέσεων. Αυτές είναι η βροχοειδής σύνδεση και η κυματοειδής σύνδεση, οι οποίες χρησιμοποιούνται στα βροχοειδή (lap) και στα κυματοειδή (wave) τυλίγματα αντίστοιχα. Τα πηνία μπορούν να απαρτίζονται από ένα ή περισσότερα ελίγματα. Στην προαναφερθείσα περίπτωση για την κατασκευή των πηνίων ενός ελίγματος απαιτείται η ύπαρξη ενός μόνο αγωγού σε κάθε στρώση, αλλά γενικά αυτός διαθέτει μορφή ελάσματος (μπάρας σχήματος παραλληλογράμμου), προκειμένου αφενός να διευκολυνθεί η κάμψη του πηνίου στα άκρα της περιέλιξης και αφετέρου να μειωθούν οι απώλειες δινορρευμάτων. Από τα πηνία αυτά σχηματίζονται περιελίξεις ράβδων (κατασκευή τυλίγματος με μπάρες), και συνήθως βρίσκονται σε μηχανές χαμηλής τάσης με υψηλά ρεύματα φάσης. Η επιλογή του πηνίου εξαρτάται τον αριθμό των ελιγμάτων ανά φάση που απαιτούνται, προκειμένου να παραχθεί η Η.Ε.Δ., το ονομαστικό ρεύμα και ο εφικτός αριθμός των παράλληλων κυκλωμάτων.

Στο σχήμα 2.37.α εμφανίζεται μια ομάδα πηνίων, η οποία αποτελείται δύο πηνία βροχοειδούς τυλίγματος ενός ελίγματος κατασκευασμένο με μπάρες (ραβδόμορφους αγωγούς σχήματος παραλληλογράμμου), στο σχήμα 2.37.β εμφανίζεται μια ομάδα πηνίων, η οποία αποτελείται δύο πηνία βροχοειδούς τυλίγματος τα οποία αποτελούνται από πολλά ελίγματα το καθένα και στο σχήμα 2.37.γ αναπαρίσταται η σχεδίαση δύο

πηνίων κυματοειδούς τυλίγματος κατασκευασμένα με μπάρες. Στα πηνία που χρησιμοποιούνται στα κυματοειδή τυλίγματα δεν χρησιμοποιούνται πολλά ελίγματα, διότι η σύνδεση των πηνίων των βροχοειδών τυλιγμάτων επιτυγχάνεται ευκολότερα.

Η σύνδεση των πηνίων βροχοειδούς τυλίγματος σε ομάδες πραγματοποιείται όπως υποδεικνύεται στα σχήματα 2.28.β και 2.28.γ. Η σύνδεση πηνίων σε κυματοειδή τυλίγματα με μπάρες δεν είναι τόσο απλή, επειδή μετά από την ολοκλήρωση της τοποθέτησης των ομάδων των πηνίων στις αύλακες του επαγωγίμου που βρίσκονται διανεμημένες στην περιφέρεια του (π.χ. μετά από την εν σειρά συνδεσμολογία αριθμού πηνίων ίσων με τον αριθμό ενός ζεύγους πόλου p), υπό κανονικές συνθήκες η περιέλιξη πρέπει να κλείσει στο σημείο που έχει τοποθετηθεί το πρώτο πηνίο. Προκειμένου αυτό να αποφευχθεί, γίνεται μια σύνδεση έτσι ώστε να συνεχιστεί το τύλιγμα στη δεύτερη πλευρά του πηνίου της πρώτης ομάδας, και ούτω καθεξής μέχρι όλες οι πλευρές των πηνίων των ομάδων πηνίων που εναλλάσσονται σε κάθε στρώση να έχουν περιελιχθεί πλήρως.



Σχήμα 2.37 : Βροχοειδή και κυματοειδή πηνία κλασματικού βήματος διπλής στρώσης [Ξ59, Fig. 128, page 208]

Κατασκευάζεται ένα άλλο ανεξάρτητο κυματοτύλιγμα για να χρησιμοποιηθεί το εναπομείναν ήμισυ της φάσεως. Τότε τα δυο τμήματα μπορούν να συνδεθούν εν σειρά ή παράλληλα έτσι ώστε να σχηματιστεί το πλήρες τύλιγμα της φάσης.

Όταν χρησιμοποιούνται κυματοτύλιγματα κλασματικής αύλακας, το πρόβλημα είναι περίπλοκο εξαιτίας του γεγονότος ότι έχουν απομείνει απομονωμένα πηνία μετά την πλήρη κάλυψη της περιφέρειας του επαγωγίμου κατά την τοποθέτηση των πηνίων, οπότε καθίσταται αναγκαία η χρήση ειδικών ακροδεκτών.

2.6.7 Επιλογή περιέλιξης επαγωγίμου

Μια τριφασική περιέλιξη προσδιορίζεται από τις παρακάτω παραμέτρους:

1. Τύπος πηνίου : ομόκεντρα, βροχοειδή, κυματοειδή.
2. Μορφή μετωπικών συνδέσεων : αδαμαντοειδής, πολλών επιπέδων, καλαθοτυλίγματος.

3. Στρώσεις : μονή, διπλή.
4. Τύπος αύλακας : ανοικτή, κλειστή, ημίκλειστη.
5. Συνδεσμολογίες : αστέρας (σύγχρονες μηχανές), τρίγωνο (επαγωγικοί κινητήρες)
για τις περισσότερες περιπτώσεις
6. Εύρος φάσης (κατανομή) : 60° , 120°
7. Αριθμός αυλάκων : ακέραιος, κλασματικός
8. Βήμα πηνίου (εύρος) : πλήρες βήμα, κλασματικό βήμα
9. Συνδεσμολογία κυκλωμάτων : εν σειρά ή παράλληλη
10. Αριθμός ελιγμάτων πηνίων : ένα έλιγμα, πολλά ελίγματα

Τα χαρακτηριστικά των πιο συνηθισμένων τυλιγμάτων αναγράφονται με πλάγια γραφή. Ορισμένοι από τους πολλούς τύπους πηνίων παρατίθενται στον πίνακα 2.9

Περιέλξεις πηνίων με πολλά ελίγματα. Για τις ηλεκτρικές μηχανές που έχουν μικρό αριθμό πόλων και χαμηλές τιμές μαγνητικής ροής ανά πόλο απαιτείται ένας σχετικά μεγάλος αριθμός ελιγμάτων ανά φάση. Αυτό ισχύει επίσης και για τις μηχανές υψηλής τάσεως. Απαιτούνται πηνία με πολλά ελίγματα, και η επιλογή βρίσκεται ανάμεσα στα βροχοειδή τυλίγματα διπλής στρώσης και στα τυλίγματα μονής στρώσης. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα βροχοειδή τυλίγματα διπλής στρώσης τοποθετούνται σε ανοικτές αύλακες, όπου η καλή μόνωση τους είναι ουσιώδης. Σε μηχανές χαμηλής τάσεως και μικρής ισχύος οι αγωγοί τοποθετούνται μέσα σε αύλακες που διαθέτουν στενό άνοιγμα και έχουν επενδυθεί με κατάλληλα μονωτικά υλικά, τα οποία αποτελούν την κύρια μόνωση τους. Τα τυλίγματα μιας στρώσης σπάνια χρησιμοποιούνται σε μηχανές μεγάλης ισχύος εκτός από την περίπτωση της χρήσης ημίκλειστων αυλάκων και πηνίων τύπου φουρκέτας.

Το τύλιγμα διπλής στρώσης που τοποθετείται σε ανοικτές αύλακες σε σύγκριση με το τύλιγμα μονής στρώσης, το οποίο τοποθετείται σε ημίκλειστες αύλακες διαθέτει τα παρακάτω πλεονεκτήματα :

1. Η περιέλιξη απαρτίζεται από πηνία τα οποία είναι όλα όμοια μεταξύ τους, η κατασκευή τους είναι ευκολότερη, ενώ το κόστος κατασκευής τους είναι χαμηλότερο.
2. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί κλασματικός αριθμός αυλάκων.
3. Λαμβάνονται τυλίγματα κλασματικού (ή μερικού) βήματος.

Σε αντίθεση με αυτά το τύλιγμα μονής στρώσης συγκρινόμενο με το τύλιγμα διπλής στρώσης διαθέτει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1. Ύψηλότερο βαθμό απόδοσης και πιο αθόρυβη λειτουργία εξαιτίας των στενότερων ανοιγμάτων των αυλάκων.
2. Καλύτερη αξιοποίηση του χώρου στις αύλακες, η οποία οφείλεται στην εξάλειψη των μονώσεων που υφίστανται ανάμεσα στις στρώσεις.

Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι η σύγχρονη πρακτική ευνοεί τα τυλίγματα διπλής στρώσης εκτός από τις περιπτώσεις εκείνες στις οποίες τα ανοίγματα των αυλάκων θα ήταν μεγάλα συγκρινόμενα με το μήκος του διακένου, όπως στους επαγωγικούς κινητήρες υψηλής τάσης.

Περιελίξεις με μπάρες (ράβδους). Στις εφαρμογές εκείνες στις οποίες είναι απαραίτητη η χρήση πηνίων ενός ελίγματος, όπως στους στροβιλο-εναλλακτήρες ή στις μηχανές χαμηλής τάσης μεγάλου αριθμού πόλων, η επιλογή βρίσκεται ανάμεσα στα βροχοειδή τυλίγματα διπλής στρώσης, των οποίων τα πηνία κατασκευάζονται με μπάρες ή στα κυματοτυλίγματα. Τα πηνία και των δύο κατηγοριών κατασκευάζονται με μπάρες, τοποθετούνται σε ημίκλειστες αύλακες, κάμπτονται, προκειμένου να διαμορφωθεί η άλλη πλευρά τους όταν το τμήμα του αγωγού διαθέτει μέτριες διαστάσεις. Όμως οι μπάρες μεγάλων διαστάσεων που χρησιμοποιούνται στα πηνία των στροβιλο-εναλλακτών πρέπει να έχουν διαμορφωθεί πλήρως πριν την τοποθέτησή τους στις ανοικτές αύλακες του επαγωγισμού.

Το βροχοειδές τύλιγμα κλασματικού βήματος με μπάρες διαθέτει το πλεονέκτημα των βραχύτερων μετωπικών συνδέσεων στην πλευρά της συνδεσμολογίας του σε σχέση με το κυματοειδές τύλιγμα με μπάρες, ενώ είναι πιο κατάλληλο σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η χρήση πολλών παράλληλων κλάδων. Τα είδη των πηνίων που χρησιμοποιούνται στις περιελίξεις ηλεκτρικών μηχανών παρατίθενται στον πίνακα 2.9.

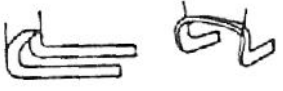
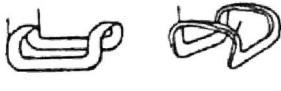
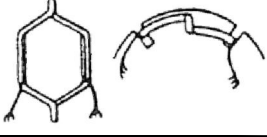
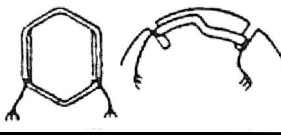
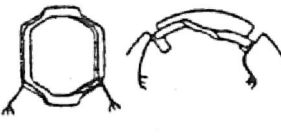


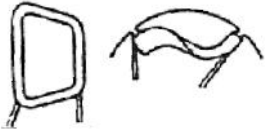
Κατασκευή πηνίων. Στο σχήμα 2.32.α παρατίθεται μια άποψη ενός πηνίου ομόκεντρης περιελίξης μιας στρώσης που δείχνει το γενικό σχήμα του πριν τοποθετηθεί σε ένα ζεύγος αυλάκων του στάτη. Στα σχήματα 2.32.β και 2.41 εμφανίζονται τα στάδια της κατασκευής ενός πηνίου αδαμαντοειδούς σχήματος πολλών ελιγμάτων κατάλληλου για τυλίγματα διπλής στρώσης, το οποίο ανήκει στην κατηγορία εκείνων των πηνίων που κατασκευάζονται με καλούπι και διαμορφώνονται με τράβηγμα (pulled coils). Όταν ένα πηνίο σαν αυτό δεν είναι πολύ βαρύ, μπορεί να περιελιχθεί πάνω σε δύο πείρους σαν επίπεδος βρόχος. Έπειτα τα τμήματα του πηνίου που τοποθετούνται μέσα στις αύλακες σφίγγονται κατάλληλα σε μια μηχανή και τραβιούνται ξεχωριστά έτσι ώστε να δημιουργηθεί ανάμεσα τους το εύρος του πηνίου που απαιτείται. Πηνία διπλής στρώσης που διαθέτουν μεγαλύτερο όγκο πρέπει να κατασκευάζονται σε καλούπια, και τα τμήματα των κεφαλών τους (μετωπικές συνδέσεις) πρέπει να λυγίζονται έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια γωνία ανάμεσα σε αυτά και τα τμήματα τους, τα οποία τοποθετούνται στις αύλακες για να σχηματιστεί ένα περίπλοκο πρότυπο πηνίου, το οποίο ονομάζεται πηνίο ενελιγμένου σχήματος (involute shape). Όταν συναρμολογούνται στο στάτη οι μετωπικές συνδέσεις (κεφαλές) του τυλίγματος εμφανίζεται μια κωνική επιφάνεια κατάλληλη για να επιτευχθεί η στήριξη του τυλίγματος.

Αύλακες. Σε μηχανές πολύ μικρής ισχύος, χρησιμοποιούνται στρογγυλοί αγωγοί με μικρότερες διαμέτρους, ενώ εάν χρησιμοποιούνται κωνικές αύλακες όπως εμφανίζονται στο σχήμα 2.33, βελτιώνεται το σχήμα της οδόντωσης. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις εκτός από τις προαναφερθείσες χρησιμοποιούνται αύλακες παράλληλων πλευρών (σταθερού πλάτους). Φυσικά για την κατασκευή περιελίξεων με ορθογώνιους αγωγούς

(μπάρες) απαιτείται η χρήση αυλάκων που εφοδιάζονται με αύλακες ορθογώνιου σχήματος. Τα ανοίγματα των αυλάκων χρησιμεύουν, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολική σκέδαση των αυλάκων, αλλά από αυτά προκαλείται μια ενεργή επιμήκυνση της μαγνητικής διαδρομής κατά μήκος του διακένου και για αυτό το λόγο στους επαγωγικούς κινητήρες μικρής ισχύος ενίοτε χρησιμοποιούνται αύλακες σήραγγας (tunnel slots). Οι ανοικτές αύλακες (π.χ. εκείνες που έχουν άνοιγμα ίσο με το πλάτος της αύλα-

Πίνακας 2.9 [Ξ59, page 210]

Τύποι Πηνίων για Ηλεκτρικές Μηχανές Α.С. και D.C.

Τύπος Πηνίου	Σχήμα Πηνίου	Χαλκός	Τρόπος Περιέλιξης	Χρήση-Όρια Τάσης	Τύπος αύλακας
Ομόκεντρο Περαστό στις αύλακες		Ταινία, Τετράγωνος	Με χρήση μηχανής	Στάτες μεγάλων μηχανών AC Οποιαδήποτε	Ημίκλειστη
Ομόκεντρο Τοποθετούμενο στις αύλακες		Ταινία, Τετράγωνος	Με χρήση καλουπιού	Στάτες μεγάλων μηχανών AC Οποιαδήποτε	Ανοικτή
Αδαμαντοειδής		Στρογγυλός, Ταινία, Λωρίδα	Με χρήση καλουπιού, Διαμόρφωση με τράβηγμα	Δρομείς D.C. Στάτες A.C. 3300 V	Ανοικτή
Ομόκεντρο αδαμαντοειδής		Ταινία	Με χρήση καλουπιού	Δρομείς D.C. Στάτες A.C. 600 V	Ανοικτή
Βραχεία αδαμαντοειδής ή οκτάγωνο		Στρογγυλός, Λωρίδα	Με χρήση καλουπιού, Διαμόρφωση εκ των προτέρων	Δρομείς D.C. Δρομείς A.C. 600 V	Ανοικτή
Πολυπολικό ή εξάγωνο		Στρογγυλός, Ταινία	Με χρήση καλουπιού	Δρομείς D.C. Δρομείς A.C. 600 V	Ανοικτή
Ενδειλιγμένος (Involute)		Λωρίδα	Διαμόρφωση εκ των προτέρων	Δρομείς D.C. Δρομείς A.C. 600 V	Ανοικτή
Καλαθοτύλιγμα (Mush)		Στρογγυλός	Με χρήση καλουπιού	Δρομείς A.C. Στάτες A.C. 440 V	Ημίκλειστη

ας) πρέπει να χρησιμοποιούνται όπου είναι επιθυμητό η κατασκευή των πηνίων να ολοκληρωθεί έξω από το επαγωγίμο και έπειτα να πραγματοποιηθεί η τοποθέτηση τους στις άυλακες του.

Παραδείγματα. Οι εικόνες τυπικών περιελίξεων μονής και διπλής στρώσης ηλεκτρικών μηχανών μέσης ισχύος παρατίθενται στα σχήματα 2.38, 2.39 και 2.40 αντίστοιχα.

2.6.8 Ηλεκτρεγερτική δύναμη των τυλιγμάτων

Όπως έχει συζητηθεί σύμφωνα με το σχήμα 2.26, κάθε αγωγός σε μια περιέλιξη αναπτύσσει μια Η.Ε.Δ., η οποία αναπαράγει τη χρονική μεταβολή της χωρικής κατανομής της μαγνητικής επαγωγής μέσα στην οποία κινείται. Η μαγνητική ροή στο διάκενο ποτέ δεν κατανέμεται ακριβώς σύμφωνα με το ιδανικό ημιτονοειδές σχήμα, ιδιαίτερα στις μηχανές έκτυπων πόλων και σε εκείνες που διαθέτουν πολύ μικρά διάκενα και υψηλό κορεσμό των οδοντώσεων. Στο στροβιλο-εναλλακτήρα, ο οποίος συγκριτικά διαθέτει μεγαλύτερο διάκενο και κυλινδρικό δρομέα αναπτύσσεται μαγνητική ροή της οποίας η κατανομή προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια την ημιτονοειδή κατανομή.

Η Η.Ε.Δ. μιας πλήρους φάσης αναπαριστά την άθροιση των Η.Ε.Δ. ενός αριθμού ομάδων φάσεων με διανεμημένους αγωγούς και, μια φάση όπως αυτή συχνά συσχετίζεται με μια δεύτερη φάση σε σύνδεση αστέρα έτσι ώστε να προκύψει μια πολική τάση. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι πάντα να παράγει μια φασική (ή πολική) Η.Ε.Δ. της οποίας η μορφή να προσεγγίζει πολύ περισσότερο την ημιτονοειδή κυματομορφή από ό,τι επιτυγχάνεται από τις Η.Ε.Δ. των μεμονωμένων αγωγών. Αυτό το αποτέλεσμα για μια μηχανή έκτυπων πόλων εμφανίζεται στο σχήμα 2.42 για την οποία, σαν παράδειγμα, ένα πολικό τόξο b ίσο με τα $2/3$ του πολικού βήματος Y μπορεί να παράγει την κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο που εμφανίζεται στο σχήμα 2.42.β η οποία προσεγγίζει εκείνης ενός σμικρμένου τετραγωνικού παλμού. Η Η.Ε.Δ. e που αντιστοιχεί σε ένα αγωγό, παρατίθεται στο σχήμα 2.42.γ. Στην κυματομορφή του αναπαράγει την κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Μια ομάδα πηνίων πλήρους βήματος, η οποία κατανέμεται σε ένα εύρος 60° δίνει τη φασική Η.Ε.Δ. E_{ph1} , ενώ το "σκαλοπάτι" που οφείλεται στην Η.Ε.Δ. των αγωγών αγνοείται σύμφωνα με το σχήμα 2.42.δ. Αυτή η φασική Η.Ε.Δ. αφαιρείται από εκείνη της επόμενης φάσης, E_{ph2} , και με αυτό τον τρόπο προκύπτει η πολική Η.Ε.Δ. E_t η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 2.42.στ. Μια άλλη μέθοδος με την εφαρμογή της οποίας εξάγεται το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει από την εφαρμογή της ανάλυσης Fourier στην αρχική καμπύλη της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 2.17, προκύπτει η σχέση (2.87).

$$B = B_1 \cdot \sin\theta + B_3 \cdot \sin 3\theta + \dots + B_n \cdot \sin n\theta \quad (2.87)$$

Έτσι μια μηχανή μπορεί να θεωρηθεί ότι απαρτίζεται από "θεμελιώδη" τμήματα $2p$ πόλων μαζί με οικογένειες αρμονικών πόλων $6p, 10p \dots 2np$, ενώ από όλες προκύπτουν ανεξάρτητες κατανομές μαγνητικής ροής σύμφωνα με το σχήμα 2.17.γ. Τόσο από τις θεμελιώδεις όσο και από τις αρμονικές συνιστώσες των μαγνητικών ροών των πόλων αναπτύσσονται Η.Ε.Δ. αντίστοιχης συχνότητας στους αγωγούς, αλλά η ανα-

λογία των αρμονικών στις κυματομορφές των φασικών και πολικών Η.Ε.Δ. μειώνεται με την ομαδοποίηση.

Το μέγεθος της θεμελιώδους συνιστώσας της Η.Ε.Δ. μιας φάσης επηρεάζεται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

1. Τη θεμελιώδη συνιστώσα Φ_1 της μαγνητικής ροής ανά πόλο Φ .
2. Την κατανομή των φάσεων λαμβάνοντας υπόψη - εάν χρησιμοποιούνται - τις επιδράσεις του κλασματικού αριθμού αυλάκων.
3. Το εύρος των πηνίων.

Παρόμοια επηρεάζονται οι αρμονικές των Η.Ε.Δ. μιας φάσης από τις παραμέτρους που παρατίθενται στη συνέχεια:

1. Τις αρμονικές συνιστώσες της μαγνητικής ροής.
2. Όμοια με τη δεύτερη περίπτωση των θεμελιωδών συνιστωσών της Η.Ε.Δ. φάσης.
3. Όμοια με την τρίτη περίπτωση των θεμελιωδών συνιστωσών της Η.Ε.Δ. φάσης.
4. Τη συνδεσμολογία της περιέλιξης κατά αστέρα ή τρίγωνο.
5. Τη μεταβαλλόμενη μαγνητική αντίσταση του διακένου η οποία οφείλεται στις αύλακες του στάτη και αυξάνει τις κυματώσεις που οφείλονται στις οδοντώσεις.



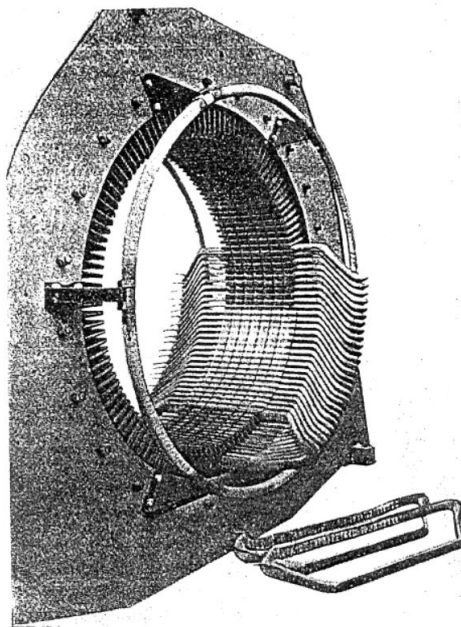
Σχήμα 2.38 : Τριφασική περιέλιξη μονής στρώσης με 2 επίπεδα μετωπικών συνδέσεων τοποθετημένη σε ημίκλειστες αύλακες. Βήμα πηνίου 1-8-10-12

Από τις παραμέτρους 1-4 τροποποιούνται τα πλάτη των αρμονικών των Η.Ε.Δ., οι οποίες προκύπτουν από την κατανομή της μαγνητικής ροής, αλλά η πέμπτη παράμετρος εισάγει ανεξάρτητα επιπρόσθετες αρμονικές, οι οποίες συνήθως είναι τέτοιας τάξης, ώστε να λαμβάνονται υπόψη ως πιθανές αιτίες πρόκλησης παρεμβολών στα κυκλώματα τηλεφωνίας. Οι κυματώσεις που οφείλονται στις οδοντώσεις εξετάζονται ανεξάρτητα στην παράγραφο 2.6.10.

Ημιτονοειδής μαγνητική ροή διακένου. Προκειμένου να επιτευχθεί η εισαγωγή των διαφόρων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της Η.Ε.Δ. μιας

φάσης, αρχικά θεωρείται ότι εμφανίζεται μόνο η θεμελιώδης συνιστώσα της μαγνητικής ροής. π.χ. θεωρείται ότι η κατανομή της κατανομής της μαγνητικής ροής στο διάκενο είναι ημιτονοειδής. Σε ένα πηνίο πλήρους βήματος το οποίο διαθέτει N_c ελιγμάτα και κινείται μέσα σε πεδίο μαγνητικής ροής ανά πόλο ίσης με Φ_1 με ένα ρυθμό τέτοιο ώστε να αναπτύσσεται μια Η.Ε.Δ. συχνότητας f , η ενεργός τιμή της αναπτυσσόμενης Η.Ε.Δ. υπολογίζεται από τη σχέση (2.88) και μετριέται σε Volt.

$$E_c = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_c \cdot \Phi_1 = 4.44 \cdot f \cdot N_c \cdot \Phi_1 \quad (2.88)$$

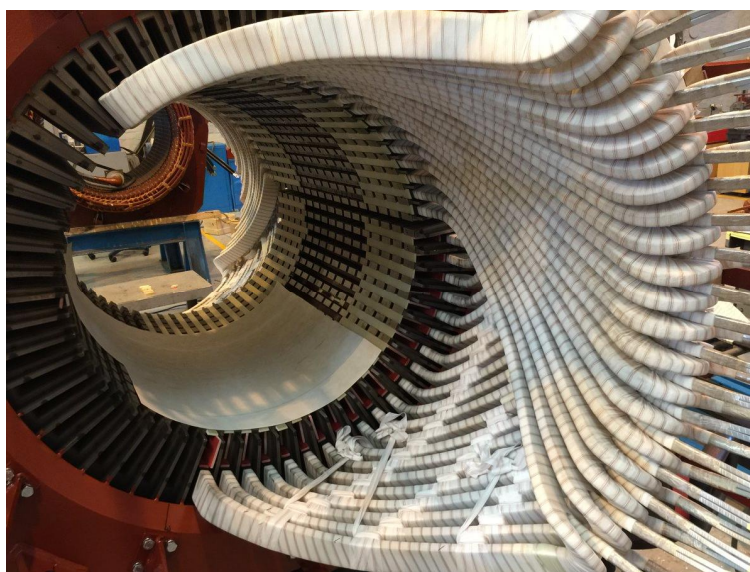


Σχήμα 2.39 : Τριφασική περιέλιξη διπλής στρώσης, τοποθετημένη σε ανοικτές αύλακες με πηνία βροχοειδούς τυλίγματος, πολλών ελιγμάτων. [Ξ59, Fig. 131.b, page 208]

Συντελεστής κατανομής τυλίγματος. Μια φάση περιλαμβάνει ένα αριθμό πηνίων τα οποία, συνδέονται εν σειρά και επεκτείνονται από ένα σημείο σε ένα άλλο καλύπτοντας ένα τόξο στην περιφέρεια του επαγωγίμου του οποίου το άνοιγμα ισούται με σ ηλεκτρικά ακτίνια. Η Η.Ε.Δ. μιας φάσης προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα των ανεξάρτητων συνιστωσών της, οι οποίες είναι οι Η.Ε.Δ. που αναπτύσσονται από τα πηνία της. Τα πηνία έκαστης φάσης έχουν υποστεί αμοιβαία γωνιακή μετατόπιση, η οποία αντιστοιχεί σε μια μετατόπιση στο πεδίο του χρόνου κατά γωνία ψ . Από τη γωνία αυτή περιγράφεται η ηλεκτρική μετατόπιση που υφίσταται ανάμεσα σε διαδοχικά πηνία (π.χ. πηνία που συνδέονται μεταξύ τους εν σειρά). Τα ηλεκτρικώς διαδοχικά πηνία μπορούν να τοποθετούνται σε διαδοχικές αύλακες, σε αυτήν την περίπτωση ισχύει ότι : $\psi = \gamma$ αυτή είναι η ηλεκτρική γωνία του βήματος της αύλακας. Αυτό αποτελεί χαρακτηριστικό μιας περιέλιξης μιας στρώσης. Ωστόσο, τα ηλεκτρικώς διαδοχικά πηνία μπορούν να μετατοπίζονται σχεδόν κατά ένα διπλό πολικό βήμα όπως γίνεται σε μια περιέλιξη κλασματικού αριθμού αυλάκων διπλής στρώσης. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι : $\psi < \gamma$.

Υποτίθεται ότι, μια φάση η οποία περιλαμβάνει m αριθμό πηνίων πλήρους βήματος ($a, b, c, \dots m$), στην οποία οι αναπτυσσόμενες Η.Ε.Δ. ($e_a, e_b, \dots e_m$) είναι (φυσιολογικά) ίσες, αλλά μετατοπισμένες στο πεδίο του χρόνου (in time-phase) κατά τη γωνία ψ . Σε αυτή την περίπτωση η φασική Η.Ε.Δ. προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων των m πηνίων σύμφωνα με το σχήμα 2.43. Είναι ξεκάθαρο ότι κατά τον υπολογισμό των γωνιών μετατόπισης ψ , η φασική Η.Ε.Δ. προκύπτει μικρότερη από το αριθμητικό άθροισμα των Η.Ε.Δ. των πηνίων κατά ένα συντελεστή. Αυτός υπολογίζεται από το λόγο των διανυσματικών αθροισμάτων προς τα αριθμητικά αθροίσματα των Η.Ε.Δ. των πηνίων σύμφωνα με την εξίσωση (2.89).

$$k_m = \frac{\text{Διανυσματικό άθροισμα}}{\text{Αριθμητικό άθροισμα}} \quad (2.89)$$



Σχήμα 2.40 : Τριφασική περιέλιξη διπλής στρώσης, τοποθετημένη σε ανοικτές αύλακες με πηνία βροχοειδούς τυλίγματος, πολλών ελιγμάτων. [Ε61]

Ο συντελεστής k_m ονομάζεται συντελεστής πλάτους ή συντελεστής κατανομής του τυλίγματος. Η τιμή του υπολογίζεται από τη σχέση (2.90) σύμφωνα με το σχήμα 2.43,

$$\frac{\sum_a^m e}{m \cdot e} = k_{m1} = \frac{\sin \frac{1}{2} m \cdot \psi}{m \cdot \sin \frac{1}{2} \cdot \psi} \quad (2.90)$$

και η φάση m πηνίων πλήρους βήματος παράγει την ενεργό τιμή της Η.Ε.Δ. σύμφωνα με τη σχέση (2.91), ενώ προκειμένου αυτή να υπολογισθεί κατευθείαν για το συνολικό αριθμό ελιγμάτων που συνδέονται εν σειρά ανά φάση τίθεται $N_{ph} = m \cdot N_c$ στην εξίσωση (2.91), οπότε προκύπτει η εξίσωση (2.92).

$$E_{ph1} = 4.44 \cdot m \cdot N_c \cdot k_{m1} \cdot f \cdot \Phi_1 \quad (2.91)$$

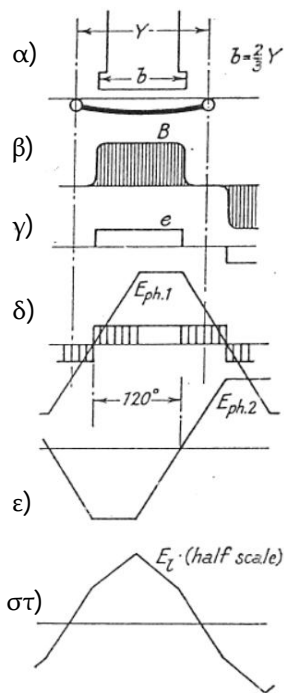
$$E_{ph1} = 4.44 \cdot N_{ph} \cdot k_{m1} \cdot f \cdot \Phi_1 \quad (2.92)$$



Σχήμα 2.41 : Πηνίο αδαμαντοειδούς μορφής, πολλών ελιγμάτων, υψηλής τάσης, κατάλληλο για περιέλιξη διπλής στρώσης, τοποθετημένη σε ανοικτές αύλακες. [Ξ61]

Εάν μια περιέλιξη μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει διανεμηθεί ομοιόμορφα σε ένα εύρος γωνίας ίσης με $\sigma = m \cdot \psi$ (μια προσέγγιση, η οποία επιτρέπεται από τη λοξότητα των αυλάκων ή από τα τυλίγματα κλασματικού βήματος), τότε η διανυσματική άθροιση περιορίζεται στο τόξο ενός κύκλου, σύμφωνα με το σχήμα 2.44, του οποίου το άθροισμα είναι η χορδή. Ως εκ τούτου, προκύπτει η σχέση (2.93).

$$k_{m1} = \frac{\sin \frac{1}{2} \cdot \sigma}{\frac{1}{2} \cdot \sigma} \quad (2.93)$$



Σχήμα 2.42 : Κυματομορφή Η.Ε.Δ. που παράγεται από παραλληλόγραμμο διάκενο διέγερσης. [Ξ59, Fig. 132, page 215]

Για ένα εύρος φάσης ίσο με 60° ο συντελεστής κατανομής προκύπτει ίσος με $k_{m1} = 0,955$ ενώ, για ένα εύρος φάσης ίσο με $\sigma = 120^\circ$ αυτός προκύπτει ίσος με $k_{m1} = 0,827$. Επειδή ο συντελεστής κατανομής επηρεάζει άμεσα την αναπτυσσόμενη Η.Ε.Δ. ανά φάση, είναι προφανές ότι η έξοδος για ένα δοθέν ρεύμα επαγωγίμου θα προκύψει ίση με $0,955/0,827 = 1,15$ φορές τόσο με το στενό όσο και με το ευρύ φάσμα.

Συντελεστής εύρους πηνίου. Εάν το εύρος του πηνίου (βήμα) δεν καλύπτει ένα πλήρες πολικό βήμα, τότε οι Η.Ε.Δ. των αγωγών στις δύο πλευρές ενός πηνίου δεν προστίθενται άμεσα, αλλά σχηματίζουν μια άθροιση διανυσμάτων των οποίων η διαφορά φάσης προκύπτει ίση με ε , η γωνία με την οποία το εύρος του πηνίου αναχωρεί από την τιμή πλήρους βήματος του η οποία ισούται με π . Το διανυσματικό άθροισμα μειώνεται κατά το συντελεστή εύρους πηνίου από την τιμή του πλήρους βήματος σύμφωνα με τα σχήματα 2.45.α και 2.45.β.

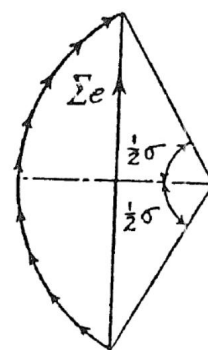
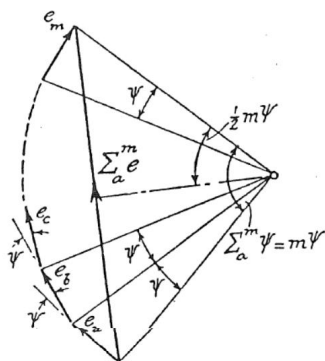
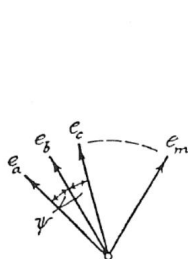
$$k_{e1} = \cos \frac{1}{2} \varepsilon \quad (2.94)$$

Η θεμελιώδης συνιστώσα της φασικής Η.Ε.Δ. γράφεται λαμβάνοντας τη μορφή της σχέσης (2.95) και μετρείται σε Volt.

$$E_{ph1} = 4,44 \cdot k_{m1} \cdot k_{e1} \cdot f \cdot N_{ph} \cdot \Phi_1 \quad (2.95)$$

2.6.9 Η.Ε.Δ. τυλιγμάτων : Γενική περίπτωση

Λαμβάνοντας τώρα μια περισσότερο γενική άποψη της φασικής Η.Ε.Δ. και των συντελεστών τυλίγματος της, πρέπει να συζητηθεί η επίδραση της μη ημιτονοειδούς κατανομής της μαγνητικής ροής.



Σχήμα 2.43 : Φασική Η.Ε.Δ. [Ξ59, Fig. 133.a, page 216]

Σχήμα 2.44 : Φασική Η.Ε.Δ. ομοιόμορφα κατανεμημένης περιέλιξης [Ξ59, Fig. 133.b, page 217]

Συντελεστής κατανομής. Όταν αριθμός πηνίων ίσος με m αναφέρεται στο προαναφερθέν σχήμα, όπως συνηθίζεται, μια ομάδα φάσης, τότε $m = g'$ (ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση) και $\sigma = m \cdot \psi$ είναι η γωνία του εύρους φάσης. Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής κατανομής για τη θεμελιώδη συνιστώσα λαμβάνει τη μορφή:

$$k_{m1} = \frac{\sin \frac{1}{2} \cdot \sigma}{g' \cdot \sin \frac{1}{2} (\sigma/g')} \quad (2.96)$$

Επειδή οι αρμονικές των πόλων της νιοστής τάξης αρμονικών χώρου διαθέτουν ένα βήμα ίσο μόνο με το $1/n$ του θεμελιώδους πολικού βήματος, οι φασικές γωνίες ψ των αρμονικών των Η.Ε.Δ. θα προκύψουν n φορές μεγαλύτερες και αναλογικά με την εξίσωση (2.96) ο συντελεστής κατανομής για τη νιοστή αρμονική υπολογίζεται από τη σχέση (2.97).

$$k_{mn} = \frac{\sin \frac{1}{2} \cdot n \cdot \sigma}{g' \cdot \sin \frac{1}{2} (n \cdot \sigma/g')} \quad (2.97)$$

Είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η επίδραση των κλασματικών αυλάκων. Όταν ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση ισούται με: $g' = S'/2 \cdot p' \cdot N$, τότε θα βρεθεί ένα ανάπτυγμα στοιχειώδους τμήματος της περιέλιξης το οποίο αποτελείται από $2 \cdot p'$ πόλους, το οποίο θα περιέχει S'/N πηνία τοποθετημένα σε S'/N αύλακες ανά φάση και θα κατανέμονται ομοιόμορφα σε ένα εύρος σ ηλεκτρικών ακτινίων. Σε αυτήν την περίπτωση ο συντελεστής κατανομής για την αρμονική νιοστής τάξης υπολογίζεται από τη σχέση (2.98).

$$k_{mn} = \frac{\sin \frac{1}{2} \cdot n \cdot \sigma}{(S'/N) \cdot \sin \frac{1}{2} (n \cdot N \cdot \sigma/S')} \quad (2.98)$$

Για παράδειγμα, λαμβάνεται τριφασική περιέλιξη $N = 3$, με εύρος $\sigma = 60^\circ$ ανά φάση και $g' = 2 \frac{1}{2}$ αύλακες ανά πόλο και φάση των οποίων η τιμή υπολογίζεται παρακάτω.

$$g' = \frac{S'}{2 \cdot p' \cdot N} = \frac{S'/N}{2 \cdot p'} = \frac{5}{2}$$

Το στοιχειώδες τμήμα της περιέλιξης που αποτελείται από $2 \cdot p' = 2$ πολικά βήματα στα οποία υπάρχουν $S'/N = 5$ πηνία ή αύλακες ανά φάση και $S' = 15$ αύλακες γενικά. Η ενεργή γωνιακή μετατόπιση των πηνίων προκύπτει ίση με $60^\circ/5 = 12^\circ$, ενώ ο συντελεστής κατανομής των πηνίων για τη θεμελιώδη συνιστώσα δίνεται από τη σχέση $k_{m1} = \sin 30^\circ / (5 \cdot \sin 6^\circ) = 0.956$.

Στις περιπτώσεις που ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση προκύπτει $g' > 5$ είναι θεμιτό να θεωρηθεί ότι υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή, η οποία δίνει το αποτέλεσμα που εμφανίζεται στο σχήμα 2.44, για το οποίο προκύπτει ότι ο συντελεστής κατανομής των πηνίων για τη θεμελιώδη και τη νιοστή αρμονική υπολογίζονται από τις σχέσεις (2.99) και (2.100) αντίστοιχα.

$$k_{m1} = \frac{\sin \frac{1}{2} \cdot \sigma}{\frac{1}{2} \cdot \sigma} \quad (2.99)$$

$$k_{mn} = \frac{\sin \frac{1}{2} \cdot n \cdot \sigma}{\frac{1}{2} \cdot n \cdot \sigma} \quad (2.100)$$

Στον πίνακα 2.10 που παρατίθεται παρακάτω εμφανίζονται οι τιμές που προκύπτουν από τις εξισώσεις (2.99) και (2.100) για τη θεμελιώδη συνιστώσα και για τις αρμονικές κατώτερης τάξης, για τις πιο συνηθισμένες τιμές εύρους φάσης. Μια μηδενική τιμή υποδηλώνει ότι το διάνυσμα τόξου κλείνει στον εαυτό του και δεν αφήνει καμμία συνισταμένη.

Πίνακας 2.10

Συντελεστές Κατανομής Αρμονικών Ανά Εύρος Φάσης

Αριθμός Φάσεων N	Εύρος φάσης, σ	k_{m1}	k_{m3}	k_{m5}	k_{m7}	k_{m9}
3 ή 6	60°	0.955	0.637	0.191	-0.136	-0.212
3 ή 1	120°	0.827	0.000	-0.165	0.118	0.000
2	90°	0.900	0.300	-0.180	-0.129	0.100
1	180°	0.637	-0.212	0.127	-0.091	0.071

Το εύρος των 120° καταστέλλει την 3^η αρμονική, και όλες τις άλλες των οποίων η τάξη είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του αριθμού 3. Ο λόγος για αυτό συνδέεται με το γεγονός ότι το ενεργό εύρος της φάσης σε μια αρμονική 3^{ης} τάξης είναι τριπλάσιο από το ενεργό εύρος της θεμελιώδους συνιστώσας: $3 \times 120^\circ = 360^\circ$, και η Η.Ε.Δ. στους ακροδέκτες ενός τυλίγματος η οποία καλύπτει ένα πλήρες διπλό πολικό βήμα 3^{ης} αρμονικής είναι μηδέν.

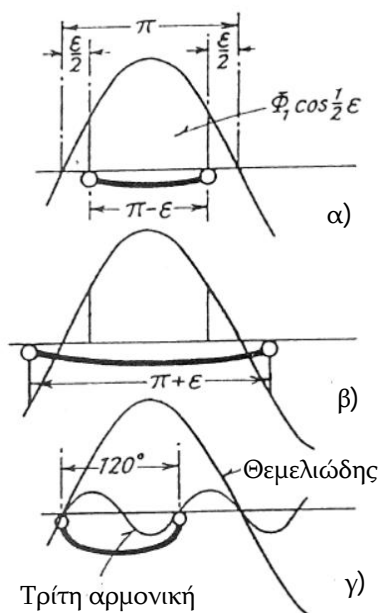
Είναι ενδιαφέρον να σημειωθούν οι συντελεστές κατανομής για τις αρμονικές συνιστώσες μιας περιέλιξης για ένα συνηθισμένο εύρος $\sigma = 60^\circ$ μιας περιέλιξης η οποία διανέμεται σε άπειρο χώρο. Αυτές εμφανίζονται στο σχήμα 2.46 (με διακεκομμένες και πλήρεις γραμμές). Οι συντελεστές των αρμονικών ανώτερης τάξης είναι μικροί, και εκτός από τις πολύ έντονες αρμονικές της μαγνητικής ροής που εμφανίζονται στο διάκενο, οι Η.Ε.Δ. στις οποίες προκαλούν αύξηση θα είναι ακόμα μικρότερες. Η καμπύλη δίνει τιμές οι οποίες δεν εφαρμόζονται σε τυλίγματα ακέραιου αριθμού αυλάκων, γιατί μπορεί να αποδειχθεί ότι για ένα ακέραιο αριθμό αυλάκων ανά πόλο, π.χ. αν $g = \text{ακέραιος}$, οι συντελεστές κατανομής των αρμονικών των τάξεων $n = 6 \cdot A \cdot g' \pm x$, όπου ο συντελεστής A μπορεί να είναι ο οποιοσδήποτε ακέραιος 0,1,2,3... και η μεταβλητή x είναι οποιοσδήποτε περιττός αριθμός, είναι οι ίδιες με εκείνες των τάξεων του x . Έτσι, αν ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση είναι $g' = 3$ και ο συντελεστής $A = 1$, τότε οποιαδήποτε αρμονική Η.Ε.Δ. των τάξεων 18 ± 1 π.χ. η 17^η ή η 19^η θα έχουν τους ίδιους συντελεστές κατανομής όπως εκείνοι της θεμελιώδους. Τώρα σε αυτή την περίπτωση η διάταξη των 18 αυλάκων ανά ζεύγος πόλων δημιουργεί μια μαγνητική ροή ικανή να παράγει αρμονικές 17^{ης} και 19^{ης} τάξης οι οποίες θα εξεταστούν στην παράγραφο 2.6.10. Αυτές οι αρμονικές μπορεί να εμφανιστούν έντονα στη φασική Η.Ε.Δ.

εκτός και αν λαμβάνονται προφυλάξεις όπως η στρέβλωση (λοξότητα) των αυλάκων ή η αντικατάσταση του κλασματικού από ακέραιο αριθμό αυλάκων. Οι σταυροί που συνδέονται με τη διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 2.46 δείχνουν πως επαναλαμβάνονται οι συντελεστές κατανομής για αρμονικές ανώτερης τάξης όπου ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο είναι ακέραιος. Στην περίπτωση που εμφανίζεται, ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο ισούται με $g = 9$, ενώ ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση ισούται με $g' = 3$. Οι γραμμές στο σχήμα 2.46 εισάγονται για να επιτευχθεί η κατάλληλη σύνδεση των σημείων για κάθε περίπτωση. Δεν έχουν καμμία άλλη σημασία.

Συντελεστής εύρους πηνίου. Όπως έχει ήδη συζητηθεί, η χρήση μερικού ή κλασματικού βήματος σε μια περιέλιξη μειώνει την Η.Ε.Δ. της, ενώ οι κατάλληλοι συντελεστές για τη θεμελιώδη συνιστώσα και τις αρμονικές υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (2.94) και (2.101).

$$k_{en} = \cos \frac{1}{2} n \cdot \varepsilon \quad (2.101)$$

Για παράδειγμα, για ένα εύρος πηνίου που ισούται με τα $2/3$ ενός πολικού βήματος, η διαφορά φάσης του προκύπτει ίση με $\varepsilon = \pi/3 = 60^\circ$, και ο συντελεστής $k_{e1} = \cos \frac{1}{2} \varepsilon = \cos 30^\circ = 0.866$. Για την 3^η αρμονική προκύπτει $k_{e3} = \cos \frac{1}{2} 3 \cdot 60^\circ = \cos 90^\circ = 0$. Έτσι, όλες οι αρμονικές 3ης τάξης (και οι τριπλάσιες τους) εξαλείφονται από τις Η.Ε.Δ. των πηνίων και της φάσης. Αυτό εμφανίζεται διαγραμματικά στο σχήμα 2.45.γ, όπου είναι προφανές ότι οποιαδήποτε αρμονική της Η.Ε.Δ. 3^{ης} τάξης παράγεται στον ένα αγωγό θα εξισορροπηθεί από τον άλλο. Γενικά, όταν το βήμα ενός πηνίου σμικρυνθεί λίγο ή περισσότερο κατά ένα συντελεστή π/n ή $(3\pi/n, 5\pi/n, \dots)$ ανάλογα με την περίπτωση δεν εμφανίζεται καμμία αρμονική n τάξης στην Η.Ε.Δ. του πηνίου.



Σχήμα 2.45 : Κλασματικό εύρος πηνίου. [E59, Fig. 134, page 218]

Η ενεργός φασική τιμή της Η.Ε.Δ. θα υπολογιστεί από τη σχέση:

$$E_{ph} = \sqrt{(E_{ph1}^2 + E_{ph3}^2 + \dots + E_{phn}^2)} \quad (2.107)$$

Για όλες τις συνήθεις περιπτώσεις αυτή είναι δυσδιάκριτη από τη θεμελιώδη συνιστώσα E_{ph1} . Περαιτέρω, όπως η εφαρμογή στην παράγραφο 2.5.4 υποδηλώνει ότι η θεμελιώδης συνιστώσα της μαγνητικής ροής Φ_1 μόνο ελαφρά διαφέρει από τη συνολική μαγνητική ροή ανά πόλο Φ έτσι, ώστε η εξίσωση (2.102) που παρατίθεται παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με τις δύο τιμές της μαγνητικής ροής (τη θεμελιώδη και τη συνολική) για να υπολογισθεί με μια μικρή ανακρίβεια η ενεργός τιμή της φασικής Η.Ε.Δ.

Η πολική τιμή της Η.Ε.Δ. σε μια συνδεσμολογία αστέρα προκύπτει ίση με $E_{line} = \sqrt{3} \cdot E_{ph}$, ενώ η φασική τάση υπολογίζεται όπως έχει προαναφερθεί από τη σχέση (2.107), αλλά παραλείποντας όλες τις τιμές των αρμονικών 3^{ης} τάξης.

Εφαρμογή. Ένας εναλλακτήρας που κινείται από υδροστρόβιλο χαμηλής ταχύτητας περιστροφής διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: 3750 kVA, 10000 V, 3 φάσεις, 50 Hz, 10 πόλους, ενώ το επαγωγίμο του (στάτης) εφοδιάζεται με 144 αύλακες στις οποίες τοποθετείται περιέλιξη διπλής στρώσης, με πηνία αδαμαντοειδούς μορφής και 2 X 5 αγωγούς ανά αύλακα. Το εύρος του πηνίου είναι 12 βήματα αύλακας. Η μαγνητική επαγωγή ανά πόλο είναι 0.116 Wb/m² και λαμβάνεται ως διανεμημένη σύμφωνα με την εφαρμογή της παραγράφου 2.5.4. Να σχεδιαστεί η περιέλιξη και να υπολογισθεί η φασική Η.Ε.Δ.

Περιέλιξη. Η γωνία της αύλακας υπολογίζεται από τη σχέση: $\gamma = 2 \cdot \pi \cdot p/S = 10 \cdot \pi/144 = 0.218 \text{ rad} = 12 \frac{1}{2}^\circ$ μοίρες, ενώ ο κλασματικός αριθμός αυλάκων ανά πόλο και φάση προκύπτει:

$$g' = S/2 \cdot N \cdot p = 144/3 \cdot 10 = 144/30 = 24/5 \Rightarrow g' = 4 \frac{4}{5}$$

Συνεπώς, εάν το τύλιγμα διαχωριστεί σε 2 στοιχειώδη τμήματα των 5 πόλων έκαστο, σε κάθε ένα από αυτά θα υφίστανται 24 ανά φάση και ανά τμήμα ή συνολικά 72 αύλακες ανά τμήμα. Στη συνέχεια θα υπολογιστεί η απόσταση ανάμεσα στις αρχές της φάσης A και της φάσης B.

$$S_{ab} = g' \cdot (3 \cdot x + 2) = 4 \frac{4}{5} \cdot (3 \cdot 1 + 2) \Rightarrow S_{ab} = 24 \text{ αύλακες}$$

αντίστοιχα η απόσταση ανάμεσα στις αρχές της φάσης A και της φάσης C προκύπτει

$$S_{ac} = g' \cdot (3 \cdot x + 4) = 4 \frac{4}{5} \cdot (3 \cdot 2 + 4) \Rightarrow S_{ac} = 48 \text{ αύλακες}$$

Προκειμένου να επιδειχθεί η διάταξη των ομάδων πηνίων 5,5,5,5 και 4 για κάθε φάση, μπορεί να σχεδιασθεί ο πίνακας 2.12 που παρατίθεται στη συνέχεια. Οι αύλακες έχουν αριθμηθεί με τη σειρά 1^η, 2^η, 3^η, ..., 72^η, με τις αντίστοιχες γωνίες τους 0°, 12,5°, 25°, ..., τιμές μεγαλύτερες των 180° μειώνονται κατά 180° ή τα ακέραια πολλαπλάσια αυτών. Στη συνέχεια οι πλευρές των πηνίων της φάσης A κατανέμονται σε αύλακες με γωνίες από 0° έως 60° μοίρες (χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η τιμή των 60° μοιρών), η φάση B

από γωνία 120° μοίρες και η φάση C από 60°. Τα γράμματα a, b, c που τοποθετούνται μέσα σε αγκύλες είναι εκείνα που έχουν ήδη υπολογισθεί από τις τιμές $S_{ab} = 24$ και $S_{ac} = 48$ άυλακες αντίστοιχα. π.χ. στην 1^η άυλακα τοποθετείται η φάση A, στην 25^η η φάση B ($1 + S_{ab}$), στην 49^η η φάση C ($1 + S_{ac}$). Η ακολουθία των ομάδων των πηνίων από κάθε σημείο εκκίνησης, φαίνεται να είναι 5-5-5-4-5. Από τις άυλακες που καταλαμβάνονται από τη φάση A καλύπτεται η γωνία από 0° έως 57,5° μοίρες με βήματα 2,5° έτσι, ώστε η περιέλιξη να διανεμηθεί ομοιόμορφα με μια γωνία 2,5° μοιρών ανάμεσα στις Η.Ε.Δ. των πηνίων. Στον πίνακα 2.13 παρατίθεται η περιέλιξη και οι πολικότητες της.

Πίνακας 2.12

**Διάταξη Ομάδων Πηνίων για Κάθε Φάση Τμήματος
Περιέλιξης 5 Πόλων Εναλλακτήρα 10 Πόλων**

Παράμετροι															
Αριθμός άυλακας	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Γωνία σε μοίρες	0	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	100	112,5	125	137,5	150	162,5	175
Φάση	[a]	a	a	a	a	c	c	c	c	c	b	b	b	b	b
Αριθμός άυλακας	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
Γωνία σε μοίρες	7,5	20	32,5	45	57,5	70	82,5	95	107,5	120	132,5	145	157,5	170	
Φάση	a	a	a	a	a	c	c	c	c	[b]	b	b	b	b	
Αριθμός άυλακας	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Γωνία σε μοίρες	2,5	15	27,5	40	52,5	65	77,5	90	102,5	115	127,5	140	152,5	165	177,5
Φάση	a	a	a	a	a	c	c	c	c	c	b	b	b	b	b
Αριθμός άυλακας	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	
Γωνία σε μοίρες	10	22,5	35	47,5	60	72,5	85	97,5	110	122,5	135	147,5	160	172,5	
Φάση	a	a	a	a	[c]	c	c	c	c	b	b	b	b	b	
Αριθμός άυλακας	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	
Γωνία σε μοίρες	5	17,5	30	42,5	55	67,5	80	92,5	105	117,5	130	142,5	155	167,5	
Φάση	a	a	a	a	a	c	c	c	c	c	b	b	b	b	

Οι αντίστοιχες πλευρές των πηνίων στην κάτω στρώση τοποθετούνται σε άυλακες που βρίσκονται σε απόσταση 12 βημάτων άυλακας προς τα δεξιά των αντίστοιχων τμημάτων πηνίων της άνω στρώσης.

Πίνακας 2.13

**Διάταξη Τμήματος Τυλίγματος 5 Πόλων
Εναλλακτήρα 10 Πόλων**

Παράμετροι					
Φάση Α	[+5]	-5	+5	-4	+5
Φάση Β		+5	[-5]	+5	-5
Φάση Γ	-5	+4	-5	[+5]	-5
Πολικό βήμα	1°	2°	3°	4°	5°

Η.Ε.Δ. Η συνολική μαγνητική επαγωγή ανά πόλο ισούται με $0,116 \text{ Wb/m}^2$. Με την ανάλυση που εμφανίζεται στο σχήμα 2.17 θα είναι αρκετό να γίνει αποδεκτή αυτή η γραφική παράσταση ως η θεμελιώδη συνιστώσα της μαγνητικής ροής Φ_1 . Η τρίτη αρμονική της μαγνητικής ροής θα αγνοηθεί, καθώς δεν παράγει κανένα αποτέλεσμα στην πολική Η.Ε.Δ. Από την εξίσωση (2.98) για το συντελεστή κατανομής προκύπτει:

$$k_{mn} = \frac{\sin \frac{1}{2} \cdot (n \cdot 60^\circ)}{24 \cdot \sin \frac{1}{2} (n \cdot 60^\circ / 24)} = \frac{\sin \frac{1}{2} \cdot (n \cdot 60^\circ)}{24 \cdot \sin \frac{1}{2} (n \cdot 2.5^\circ)}$$

Από τη σχέση αυτή για τη θεμελιώδη συνιστώσα, την 5^η και την 7^η αρμονική προκύπτουν αντίστοιχα: $k_{m1} = 0,954$, $k_{m5} = 0,191$, $k_{m7} = -0,137$

Το εύρος του πηνίου προκύπτει: $12 / \left(3 \cdot 4 \frac{4}{5}\right) = 4 / 4 \frac{4}{5} = 5/6$ του πολικού βήματος το οποίο αντιστοιχεί σε $180^\circ \cdot 5/6 = 150^\circ$. Η γωνία σμίκρυνσης του βήματος προκύπτει ίση με 30° . Από την εξίσωση (2.94) για τη θεμελιώδη και από την εξίσωση (2.101) για τις αρμονικές συνιστώσες προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$k_{en} = \cos \frac{1}{2} \cdot (n \cdot 30^\circ) = \cos(n \cdot 15^\circ)$$

Από τη σχέση αυτή, προκύπτουν οι συντελεστές της Η.Ε.Δ. για τη θεμελιώδη συνιστώσα την 5^η και την 7^η αρμονική αντίστοιχα: $k_{e1} = 0,966$, $k_{e5} = 0,259$, $k_{e7} = -0,259$. Επίσης αυτοί οι αριθμοί μπορούν να ληφθούν από το σχήμα 2.46. Σύμφωνα με αυτό υπολογίζονται οι συντελεστές τυλίγματος που παρατίθενται παρακάτω,

$$K_{w1} = k_{m1} \cdot k_{e1} = 0,954 \cdot 0,966 = 0,925$$

$$K_{w5} = k_{m5} \cdot k_{e5} = 0,191 \cdot 0,259 = 0,0496$$

$$K_{w7} = k_{m7} \cdot k_{e7} = -0,137 \cdot -0,259 = 0,0354$$

Προφανώς, η διάταξη της περιέλιξης είχε ως αποτέλεσμα το απαιτούμενο υλικό για την κατασκευή της να μειωθεί σύμφωνα με το συντελεστή αρμονικών της Η.Ε.Δ. Η θεμελιώδης συνιστώσα υπολογίζεται με τη χρήση της εξίσωσης (2.102), ενώ οι αρμονικές συνιστώσες υπολογίζονται από την εξίσωση (2.106), αφού αυτή λάβει τη γενική μορφή της εξίσωσης (2.108).

$$E_{ph1} = 4,44 \cdot 0,925 \cdot 50 \cdot 240 \cdot 0,116 = 5750 \text{ V}$$

Οι τιμές της θεμελιώδους συνιστώσας και των αρμονικών συνιστωσών της μαγνητικής επαγωγής λαμβάνονται από την εφαρμογή της παραγράφου 2.5.4.

$$E_{phn} = E_{ph1} \cdot \frac{K_{wn} \cdot B_n}{K_{w1} \cdot B_1} \quad (2.108)$$

$$E_{ph5} = 5750 \cdot \frac{0,0496 \cdot 11,24}{0,925 \cdot 99,99} = 5750 \cdot \frac{0,5575}{92,49} \Rightarrow E_{ph5} = 34,66 \text{ V}$$

$$E_{ph7} = 5750 \cdot \frac{0,0354 \cdot 2,8}{0,925 \cdot 99,99} = 5750 \cdot \frac{0,09912}{92,49} \Rightarrow E_{ph7} = 6,16 \text{ V}$$

Αυτές οι αρμονικές της φασικής Η.Ε.Δ. αμελούνται και η αναπτυσσόμενη Η.Ε.Δ. του εναλλακτήρα έχει φασική τιμή $E_{ph} = 5750 \text{ V}$ και για αυτήν προκύπτει ότι η πολική τάση του εναλλακτήρα σε σύνδεση αστέρα ισούται με $E_{line} = 10000 \text{ V}$

2.6.10 Αρμονικές οδοντώσεων

Επιπρόσθετα με την Η.Ε.Δ. που παράγεται στα τυλίγματα από τις αρμονικές χώρου, οι οποίες κινούνται με την ίδια σχετική ταχύτητα ως προς τους αγωγούς, όπως και η θεμελιώδης συνιστώσα, μπορεί να παράγονται ορισμένες αρμονικές τάσης, οι οποίες ανήκουν σε ιδιαίτερα ανεπιθύμητες τάξεις και οφείλονται στην επίδραση των ανοιγμάτων των αυλάκων μέσα στις οποίες τοποθετούνται οι αγωγοί. Αυτή η επίδραση επιδεινώνεται όταν τα ανοίγματα των αυλάκων είναι μεγάλα συγκρινόμενα με το πλάτος της οδόντωσης και το μήκος του διακένου, διότι από αυτές τις παραμέτρους επηρεάζεται η μαγνητική αγωγιμότητα του διακένου, στις μεταβολές της οποίας οφείλονται οι αρμονικές. Οι κυματώσεις στην κυματομορφή της μαγνητικής επαγωγής οι οποίες προκαλούνται από τη μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης από σημείο σε σημείο στο διάκενο έχουν τη μορφή που υποδεικνύεται από το παλμογράφημα του σχήματος 2.19.α, αλλά είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, αφού οι κυματώσεις οφείλονται στις αύλακες, δεν κινούνται ως προς τους αγωγούς, αλλά γλιστρούν πάνω (glide over) στην καμπύλη κατανομής της μαγνητικής επαγωγής πάντα αντίθετα από τις αύλακες και τις οδοντώσεις που τις προκαλούν.

Διακύμανση της συνολικής μαγνητικής αγωγιμότητας του διακένου. Εάν υποθεθεί ότι η κυματομορφή της θεμελιώδους συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής έχει τετραγωνική (rectangular) μορφή (όπως στις μηχανές έκτυπων πόλων, εφόσον δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της θυσάνωσης) και η κυμάτωση της μαγνητικής επαγωγής η οποία είναι καθαρά ημιτονοειδής υπερτίθεται σε αυτή, η συγκεκριμένη περίπτωση στην οποία το πολικό τόξο καλύπτει ένα ακέραιο αριθμό βήματος αυλάκων προσαναξημένο κατά το ήμισυ του βήματος της αύλακας θα αποδώσει μια συνολική μαγνητική επαγωγή η οποία θα μεταβάλλεται ανάμεσα σε δύο μέγιστες τιμές όπως αυτές εμφανίζονται στα σχήματα 2.19.β και 2.19.γ αντίστοιχα, και σε αυτά εμπεριέχεται η συνολική μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής ενός πλήρους κύκλου της κυμάτωσης. Η συχνότητα της διακύμανσης της μαγνητικής επαγωγής θα αντιστοιχεί στο ρυθμό με τον οποίο το

πρόσωπο του πόλου διασχίζεται από τις αύλακες π.χ. $2 \cdot g \cdot f$ κύκλοι ανά δευτερόλεπτο. Τώρα αυτή η σταθερή κυμάτωση μπορεί να θεωρηθεί ως δύο κύματα της θεμελιώδους χωρικής κατανομής τα οποία περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα $2 \cdot g \cdot \omega$, το ένα με κατεύθυνση προς τα εμπρός και ένα προς τα πίσω, όπου η παράμετρος $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ αντιστοιχεί στη σύγχρονη ταχύτητα. Οι συνιστώσες των πεδίων θα διαθέτουν σχετικές ταχύτητες ως προς την περιέλιξη του επαγωγίμου οι οποίες υπολογίζονται από τη σχέση $(2g \pm 1) \cdot \omega$ και εκεί θα δημιουργήσει αρμονικές στις Η.Ε.Δ. των οποίων οι συχνότητες υπολογίζονται από τη σχέση $(2g \pm 1) \cdot f$ και οι μονάδες μέτρησης τους είναι κύκλοι ανά δευτερόλεπτο. Αλλά αυτή είναι μόνο μια δευτερεύουσα αιτία της κυμάτωσης των οδοντώσεων.

Διακύμανση του ρεύματος του δρομέα. Η πρωταρχική αιτία της κυμάτωσης των οδοντώσεων προέρχεται από την επαγωγή στα κυκλώματα του δρομέα, τα οποία διαρρέονται από ρεύματα των οποίων η συχνότητα υπολογίζεται από τη σχέση: $2gf$. Από τα ρεύματα αυτά διαρρέονται οι μπάρες (ράβδοι) των τυλιγμάτων απόσβεσης που έχουν τοποθετηθεί κατάλληλα στους πόλους μιας σύγχρονης μηχανής έκτυπων πόλων, οι σφήνες που τοποθετούνται στις αύλακες των δρομέων των στροβιλο-εναλλακτών, οι οποίες κατασκευάζονται από ορείχαλκο ή μπρούντζο, και (σε μικρότερο βαθμό) τα κύρια τυλίγματα διέγερσης του δρομέα.

Η μαγνητική αγωγιμότητα του διακένου στην επιφάνεια του στάτη διαθέτει κυματοειδή διαστήματα, και οι μεταβολές από τη μέση τιμή της μπορούν να αναπαρίστανται προσεγγιστικά μέσω μιας ημιτονοειδούς διακύμανσης, η οποία δίνεται από τη σχέση: $\lambda_1 \cdot \sin 2g\theta$. Η θεμελιώδης Μ.Ε.Δ. του δρομέα επενεργεί στην εσωτερική διάμετρο του στάτη, περιστρέφεται ως προς τις αύλακες του στάτη και μπορεί να γραφεί για ένα δεδομένο σημείο σύμφωνα με την εξίσωση: $F_1 \cdot \sin(\theta - \omega t)$. Η μαγνητική επαγωγή στην επιφάνεια του στάτη θα διαθέτει μια θεμελιώδη συνιστώσα, η οποία αντιστοιχεί στη μέση τιμή της μαγνητικής αγωγιμότητας, μαζί με μια υπερτιθέμενη κυμάτωση, η οποία οφείλεται στη διακύμανση και δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_1 \cdot F_1 \cdot \sin 2g\theta \cdot \sin(\theta - \omega t)$$

Αυτή αναλύεται στις δύο συνιστώσες της που περιστρέφονται αντίθετα και λαμβάνει τη μορφή:

$$\frac{1}{2} \cdot \lambda_1 \cdot F_1 \cdot \{\cos[(2g - 1) \cdot \theta + \omega t] - \cos[(2g + 1) \cdot \theta - \omega t]\}$$

Αυτές οι κυματώσεις της μαγνητικής επαγωγής μεταβάλλονται σε ένα βήμα αύλακας ανάλογα με τη θέση του ως προς το στάτη και ανάλογα με το χρόνο με μια γωνιακή κυκλική συχνότητα ω . Έτσι δεν μπορούν να συνεισφέρουν στην Η.Ε.Δ. στη συχνότητα κυμάτωσης της οδόντωσης.

Ωστόσο, τα ίδια δύο κύματα έχουν διαφορετικές σχετικές ταχύτητες ως προς το δρομέα. Οποιοδήποτε σημείο καθορίζεται από μια γωνία θ στο στάτη θα απαιτεί να καθοριστεί από μια γωνία $\theta + \omega t$ με αναφορά ως προς το δρομέα. Με την πραγματοποίηση αυτή της αντικατάστασης η σχέση λαμβάνει τη μορφή:

$$\frac{1}{2} \cdot \lambda_1 \cdot F_1 \cdot \{\cos[(2g - 1) \cdot \theta + 2g\omega t] - \cos[(2g + 1) \cdot \theta + 2g\omega t]\}$$

Καθώς αυτά τα κύματα της μαγνητικής επαγωγής έχουν μια σχετική ταχύτητα ως προς το δρομέα, η οποία ισούται με $2g\omega$, σε οποιοδήποτε από τα κλειστά κυκλώματα του δρομέα που διαθέτουν κατάλληλο βήμα θα αναπτύσσονται ρεύματα συχνότητας ίσης με $2gf$. Από αυτά τα ρεύματα μια μεταβολή της Μ.Ε.Δ. συχνότητας ίσης με $2gf$ υπερτίθεται στη συνισταμένη Μ.Ε.Δ. του πόλου. Η Μ.Ε.Δ. αυτή αναλύεται σε δυο συνιστώσες που περιστρέφονται αντίθετα με σχετική ταχύτητα ως προς το δρομέα ίση με $2g\omega$ και, επομένως με σχετική ταχύτητα ίση με $2g\omega \pm \omega = (2g \pm 1) \cdot \omega$ ως προς το στάτη, τότε στο στάτη αναπτύσσονται Η.Ε.Δ. με συχνότητες ίσες με $(2g + 1) \cdot f$ και $(2g - 1) \cdot f$ αντίστοιχα. Από αυτές απαρτίζονται οι κύριες κυματώσεις των οδοντώσεων.

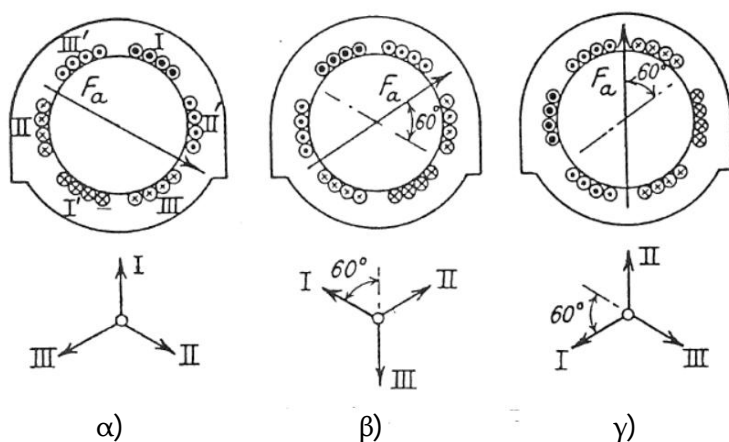
Στις προαναφερθείσες έχουν ληφθεί υπόψη μόνο οι θεμελιώδεις συνιστώσες της μεταβολής της μαγνητικής αγωγιμότητας της αύλακας λ_1 και της Μ.Ε.Δ. του δρομέα F_1 . Μπορεί να προκύψει περαιτέρω επίδραση της κυμάτωσης εξαιτίας των αρμονικών της καθεμίας από τις προαναφερθείσες παραμέτρους. Μπορεί να παραχθεί αρκετά δυσάρεστη κυμάτωση από τη δεύτερη αρμονική της μαγνητικής αγωγιμότητας των αυλάκων.

Η καταστολή των κυματώσεων των αυλάκων επιτυγχάνεται με την εφαρμογή των παρακάτω μεθόδων: 1) Με τη στρέβλωση του πυρήνα του στάτη (αυλάκων και οδοντώσεων), 2) Μετατοπίζοντας την κεντρική γραμμή των ράβδων (μπαρών) απόσβεσης σε διαδοχικά πέδιλα των πόλων, 3) Συμψηφίζοντας τα πέδιλα των έκτυπων πόλων σε διαδοχικά ζεύγη πόλων: αυτά αναφέρονται στη μείωση της κυμάτωσης που οφείλεται άμεσα στη διακύμανση της μαγνητικής αγωγιμότητας των αυλάκων. Οι επιπτώσεις των αρμονικών στη μορφή του μαγνητικού πεδίου πραγματοποιείται με την εφαρμογή των ακόλουθων μεθόδων: 4) Διαμορφώνοντας τα πέδιλα των πόλων έτσι ώστε το μέγιστο μήκος του διακένου να προκύπτει κατά προσέγγιση ίσο με το διπλάσιο του ελάχιστου μήκους του στις μηχανές έκτυπων πόλων και 5) Η χρήση σφηνών που έχουν κατασκευαστεί από κράματα χάλυβα-μπρούντζου στις αύλακες των δρομέων των στροβιλοεναλλακτών.

2.6.11 Αντίδραση επαγωγισμού

Η μαγνητική ροή που υπάρχει πραγματικά στο διάκενο μιας μηχανής οφείλεται στις μαγνητεγερτικές δυνάμεις (Μ.Ε.Δ.) όλων των τυλιγμάτων που ζευγνύονται από αυτή. Κατά τη λειτουργία εν κενώ με μηδενικό ρεύμα επαγωγισμού η μαγνητική ροή παράγεται μόνο από τα αμπερελίγματα του τυλίγματος διέγερσης αλλά, όταν το ρεύμα διαρρέει το επαγωγίμο, η αντίδραση του επαγωγίμου, η οποία αναφέρεται διαφορετικά ως η επίδραση της Μ.Ε.Δ. του επαγωγίμου, αποτελεί ένα σημαντικό δεύτερο παράγοντα στον προσδιορισμό της συνισταμένης μαγνητικής ροής. Επειδή η περιέλιξη του επαγωγίμου απαρτίζεται από πηνία των οποίων τα πηνία κατά προσέγγιση έχουν εύρος ίσο με ένα πολικό βήμα, η αντίδραση του θα παράγει βόρειους και νότιους μαγνητικούς πόλους, οι οποίοι θα εναλλάσσονται.

Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός τριφασικού επαγωγίμου είναι ότι οι πόλοι που παράγονται από αυτό περιστρέφονται. Στο σχήμα 2.48 εμφανίζεται ένας αριθμός στοιχειωδών σταθερών τριφασικών διπολικών επαγωγίμων στα οποία φέρονται τυλίγματα φάσης με μικρό εύρος. Αυτά έχουν διαταχθεί κατάλληλα με ένα φασικό βήμα το οποίο ισούται με $2\pi/3$ έτσι, ώστε να κατασκευαστούν φάσεις με απόσταση ανάμεσα τους ίση με 120° . Θεωρείται αυθαίρετα ότι η θετική κατεύθυνση του ρεύματος στις τρεις φάσεις είναι προς τα επάνω (αυτή εμφανίζεται από μια τελεία που τοποθετείται στο κέντρο των κύκλων μέσω των οποίων αναπαρίστανται οι αγωγοί) τότε θεωρώντας ότι: α) η ένταση του ρεύματος θα κατανεμηθεί σύμφωνα με τη θετική μέγιστη τιμή στη φάση I-I', και το ήμισυ της αρνητικής μέγιστης τιμής στις φάσεις II-II' και III-III'. Σε ένα επόμενο στιγμιότυπο β), χρονικά μετατοπισμένο κατά 60° αργότερα (κατά $1/6$ της περιόδου), τα ρεύματα στις φάσεις I-I' και II-II' θα έχουν τιμές ίσες με το ήμισυ της μέγιστης θετικής τιμής και το ρεύμα στη φάση III-III' θα έχει πλέον αυξηθεί στη μέγιστη αρνητική του τιμή. Ο μαγνητικός άξονας ή η κατεύθυνση της συνισταμένης Μ.Ε.Δ. έχει προχωρήσει κατά 60° στην περίπτωση β) σε σύγκριση με την περίπτωση α) η οποία αντιστοιχεί ακριβώς με την πρόοδο στη φάση του χρόνου. Με παρόμοιο τρόπο, στην περίπτωση γ) εμφανίζεται μια περαιτέρω πρόοδος της Μ.Ε.Δ. κατά 60° , η οποία αντιστοιχεί σε μια περαιτέρω πρόοδο της φάσης του χρόνου κατά το $1/6$ της περιόδου. Προφανώς, σε όλες τις περιπτώσεις, η κατανομή των ρευμάτων είναι πανομοιότυπη, και το μέτρο (magnitude) της Μ.Ε.Δ. θα είναι το ίδιο. Έτσι, η συνισταμένη Μ.Ε.Δ. περιστρέφεται σε συγχρονισμό με τη μεταβολή του ρεύματος φάσης, ολοκληρώνοντας τη διέλευση ενός πλήρους διπλού πολικού βήματος ανά κύκλο.



Σχήμα 2.48: Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. [Ξ59, Fig. 137, page 224]

Θα είναι λάθος να υποθεθεί από το σχήμα 2.48 ότι η περιστρεφόμενη Μ.Ε.Δ. διατήρησε μια σταθερή τιμή ανάμεσα στα διαστήματα των 60° , ούτε καν ότι η περιστροφική της ταχύτητα ήταν ομοιόμορφη σε αυτό το διάστημα. Στο σχήμα 2.11 στο οποίο, έχει αναπτυχθεί το επαγωγίμο και λαμβάνεται ένα χρονικό διάστημα 30° μοιρών, στην πραγματικότητα εμφανίζονται τα δύο σχήματα στα οποία περιορίζεται η κατανομή της Μ.Ε.Δ. Αλλά, δεν είναι δύσκολο να αποδειχθεί ότι η θεμελιώδης συνιστώσα της Μ.Ε.Δ. υπολογίζεται ως μια σειρά αρμονικών Fourier, παραμένει σταθερή και περιστρέφεται με ομοιόμορφη ταχύτητα. Αυτό αποτελεί ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα, και δείχνει ότι

με μια προσέγγιση η οποία βρίσκεται κοντά στην πραγματικότητα η Μ.Ε.Δ. του επαγωγίμου μπορεί να θεωρηθεί ως μια σταθερή και ομοιόμορφα περιστρεφόμενη ποσότητα.

Μέγεθος της αντίδρασης του επαγωγίμου. Η αντίδραση του επαγωγίμου μιας ομοιόμορφα κατανεμημένης φάσης αντιστοιχεί σε ένα γεωμετρικό σχήμα τραπεζίου, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 2.10 για ένα εύρος φάσης 60° μοιρών. Ανά πόλο, το εύρος που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του χρονικά μεταβαλλόμενου ρεύματος θα ισούται με F_m , ενώ η αντίστοιχη σειρά Fourier υπολογίζεται από τη σχέση (2.109),

$$F = \frac{4}{\pi} \cdot F_m \cdot \cos \omega t \cdot \left[\sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{\sin \frac{1}{2} \cdot n \cdot \sigma}{\frac{1}{2} \cdot n \cdot \sigma} \right) \cdot \sin nx \right] \quad (2.109)$$

όπου το ρεύμα μεταβάλλεται ημιτονοειδώς σύμφωνα με τον όρο $\cos \omega t$ και σ είναι το εύρος της φάσης. Ο όρος που βρίσκεται εντός των παρενθέσεων θα αναγνωρισθεί ως ο συντελεστής κατανομής k_{mn} από την εξίσωση (2.100).

Στην πράξη, η κατανομή της περιέλιξης σε αύλακες και η υποδιαίρεση της περιέλιξης σε σύνολα αγωγών-αυλάκων έχει ως αποτέλεσμα η κυματομορφή της Μ.Ε.Δ. να λαμβάνει τη μορφή του σκαλοπατιού σύμφωνα με το σχήμα 2.10.β. Το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει τη θεμελιώδη συνιστώσα και τις αρμονικές κατώτερης τάξης, παρόλο που θα τροποποιήσει τις ανώτερες αρμονικές στη σειρά Fourier που αναφέρεται.

Προκειμένου να επιτευχθεί η άθροιση των Μ.Ε.Δ. τριών φάσεων σαν αυτές του σχήματος 2.11 πρέπει να ληφθεί υπόψη η χρονική μετατόπιση των ρευμάτων τους και η χωρική μετατόπιση των αξόνων τους. Επομένως, για τις φάσεις I-I', II-II' και III-III' προκύπτει:

$$F_I = \frac{4}{\pi} \cdot F_m \cdot \cos \omega t \cdot \left[\sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n} \cdot k_{mn} \cdot \sin nx \right]$$

$$F_{II} = \frac{4}{\pi} \cdot F_m \cdot \cos \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \cdot \left[\sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n} \cdot k_{mn} \cdot \sin n \left(x - \frac{2}{3} \pi \right) \right]$$

$$F_{III} = \frac{4}{\pi} \cdot F_m \cdot \cos \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) \cdot \left[\sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n} \cdot k_{mn} \cdot \sin n \left(x - \frac{4}{3} \pi \right) \right]$$

Η προκύπτουσα Μ.Ε.Δ. θα υπολογιστεί από τη σχέση (2.110) που παρατίθεται στη συνέχεια.

$$F_a = F_I + F_{II} + F_{III} \Rightarrow$$

$$F_a = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot F_m \cdot \left[k_{m1} \cdot \sin(x - \omega t) + \frac{1}{5} \cdot k_{m5} \cdot \sin(5x - \omega t) - \frac{1}{7} \cdot k_{m7} \cdot \sin(7x - \omega t) \dots \right]$$

Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι η Μ.Ε.Δ. διαθέτει μια σταθερή θεμελιώδη συνιστώσα, και αρμονικές 5^{ης}, 7^{ης}, 11^{ης}, 13^{ης}, ή $(6m \pm 1)$ τάξεως όπου, η παράμετρος m είναι οποιοσδήποτε θετικός ακέραιος αριθμός. Απουσιάζουν όλες οι αρμονικές 3^{ης} τάξης. Επίσης οι αρμονικές κινούνται με ταχύτητες αναλογικά αμοιβαίες με την τάξη τους. Εκείνες των οποίων η τάξη ισούται με $(6m + 1)$ κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση όπως εκείνη του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου και, εκείνων των οποίων η τάξη έχει τιμή $(6m - 1)$ κινούνται με αντίθετη κατεύθυνση από εκείνη του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου.

Η μυτερή καμπύλη που εμφανίζεται στο σχήμα 2.11.α προκύπτει για μια γωνία $\sigma = 60^\circ$ τη χρονική στιγμή $\omega t = 0$, ενώ από την εξίσωση (2.110) προκύπτει η μέγιστη τιμή της.

$$\hat{F}_1 = \frac{18}{\pi^2} \cdot F_m \cdot \left[1 + \frac{1}{25} + \frac{1}{49} + \dots \right] = 2 \cdot F_m$$

ενώ η καμπύλη με την επίπεδη κορυφή που εμφανίζεται στο σχήμα 2.11.β προκύπτει τη χρονική στιγμή $\omega t = \pi/6$ και έχει εύρος που υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\hat{F}_2 = \frac{18}{\pi^2} \cdot F_m \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left[1 + \frac{1}{25} + \frac{1}{49} + \dots \right] = \sqrt{3} \cdot F_m$$

Οι αρμονικές είναι γενικά (αν και όχι πάντα), αμελητέας σημασίας έτσι, επιτρέπεται η χρήση μόνο του όρου της θεμελιώδους συνιστώσας. Εάν I είναι ενεργός τιμή του ρεύματος ανά αγωγό, το οποίο διαρρέει τους z_s αγωγούς καθεμίας από τις g' άυλακες ανά πόλο και φάση, τότε από το σχήμα 2.10 προκύπτει:

$$F_m = \frac{1}{2} \cdot g' \cdot z_s \cdot (\sqrt{2}) \cdot I$$

και το πλάτος της θεμελιώδους της αντίδρασης του επαγωγίμου υπολογίζεται από την εξίσωση (2.110) και έχει μονάδες μέτρησης αμπέρ-ελίγματα ανά πόλο. Επειδή ισχύει ότι:

$$F_a = \frac{6}{\pi} \cdot k_{m1} \cdot F_m = \frac{6}{\pi} \cdot k_{m1} \cdot \frac{1}{2} \cdot g' \cdot z_s \cdot (\sqrt{2}) \cdot I = 1,35 \cdot k_{m1} \cdot g' \cdot z_s \cdot I$$

$I \cdot N_{ph} = J \cdot g' \cdot z_s \cdot p$ η παραπάνω εξίσωση μπορεί να λάβει την ακόλουθη μορφή:

$$F_a = (1,35 \cdot k_{m1} \cdot I \cdot N_{ph})/p$$

και οι μονάδες μέτρησης είναι αμπέρ-ελίγματα ανά πόλο. Όταν χρησιμοποιείται μια περιέλιξη διπλής στρώσης μερικού (σμικρυνμένου) βήματος, κάθε στρώση παράγει μια παρόμοια κατανομή Μ.Ε.Δ., αλλά αυτές έχουν μετατοπιστεί μεταξύ τους κατά τη γωνία σμίκρυνσης ε (chording angle). Η άθροιση οδηγεί στην εισαγωγή του συντελεστή εύρους του πηνίου έτσι, ώστε τελικά ο θεμελιώδης όρος της αντίδρασης του επαγωγίμου σε μια τριφασική περιέλιξη να λάβει τη μορφή της εξίσωσης (2.111) και να έχει μονάδες μέτρησης αμπέρ-ελίγματα ανά πόλο.

$$F_a = (1,35 \cdot I \cdot N_{ph} \cdot k_{m1} \cdot k_{e1})/p = (1,35 \cdot I \cdot N_{ph} \cdot K_{w1})/p \quad (2.111)$$

Ισοδύναμα κυκλώματα διέγερσης της αντίδρασης του επαγωγίμου. Στη σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος είναι απαραίτητο να υπολογιστεί πόσα από τα αμπέρ-ελίγματα της διέγερσης είναι ισοδύναμα σε μια δοθείσα αντίδραση

του επαγωγίμου. Αν η περιέλιξη διέγερσης είναι η ίδια μια τριφασική περιέλιξη, όπως στον επαγωγικό κινητήρα, είναι απαραίτητο να γραφεί μόνο η παρακάτω εξίσωση:

$$(1,35 \cdot I_1 \cdot N_1 \cdot K_{w1})/p = (1,35 \cdot I_2 \cdot N_2 \cdot K_{w2})/p \quad \text{ή} \quad (I_1 \cdot N_1 \cdot K_{w1}) = (I_2 \cdot N_2 \cdot K_{w2})$$

όπου K_{w1} και K_{w2} είναι τα γινόμενα του συντελεστή κατανομής και του συντελεστή εύρους πηνίου για τις περιελίξεις 1 και 2 αντίστοιχα.

Εάν το τύλιγμα της διέγερσης είναι μονοφασικού τύπου και διαρρέεται από συνεχές ρεύμα διέγερσης, το πρόβλημα γίνεται πιο περίπλοκο, και σε κάθε περίπτωση θα είναι δυνατή η εύρεση του ισοδύναμου κυκλώματος διέγερσης εκείνης της συνιστώσας της ημιτονοειδούς κατανεμημένης αντίδρασης του επαγωγίμου, η οποία είναι ομοαξονική με τα κέντρα των πόλων της διέγερσης, π.χ. την αντίδραση ευθέως άξονα του επαγωγίμου.

Αντίδραση ευθέως άξονα (Direct Axis). Στις ηλεκτρικές μηχανές μη έκτυπων πόλων, ή κυλινδρικού δρομέα, (π.χ. σε ένα στροβιλο-εναλλακτήρα), η περιέλιξη της διέγερσης είναι κατανεμημένη σε αύλακες και δίνει μια καμπύλη τραπεζοειδούς μορφής για την Μ.Ε.Δ., η οποία μοιάζει με εκείνη του σχήματος 2.10.β η οποία οφείλεται στη διέγερση συνεχούς ρεύματος και επομένως διαθέτει σταθερό εύρος. Για αυτήν την περίπτωση αρκεί να εξισωθούν η θεμελιώδης συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου και οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις (Μ.Ε.Δ.) του επαγωγίμου.

Για σύγχρονες μηχανές έκτυπων πόλων, σύμφωνα με το σχήμα 2.49 η μέθοδος της εξίσωσης των Μ.Ε.Δ. δεν ισχύει, διότι το διάκενο δεν είναι ομοιόμορφο σε μήκος πάνω στο πολικό βήμα και τα πηνία της διέγερσης είναι συγκεντρωμένα γύρω από τους πόλους. Το ισοδύναμο του κυκλώματος διέγερσης της αντίδρασης του επαγωγίμου στον ευθύ άξονα μπορεί να καθοριστεί μόνο στη βάση της ισότητας ανάμεσα στις θεμελιώδεις μαγνητικές επαγωγές, οι οποίες παράγονται ξεχωριστά από τη διέγερση και το επαγωγίμο στο διάκενο. Μια μέθοδος σχεδίασης και ανάλυσης της μαγνητικής επαγωγής έχει ήδη αναφερθεί στο σχήμα 2.17. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται έτσι, με τιμές του λόγου $b/Y = (\text{πολικό τόξο}/\text{πολικό βήμα})$ ανάμεσα σε 0.65 και 0.75 δίνουν κατά προσέγγιση την εξίσωση (2.112) για το πεδίο της διέγερσης που αντιστοιχεί στη συνιστώσα του ρεύματος του επαγωγίμου I , η οποία προκαλεί την αντίδραση του επαγωγίμου στον ευθύ άξονα. Οι μονάδες μέτρησης της εξίσωσης (2.112) είναι αμπερέλιγματα ανά πόλο.

$$F_{ad} = (1,07 \cdot I \cdot N_{ph} \cdot k_{m1} \cdot k_{e1})/p = (1,07 \cdot I \cdot N_{ph} \cdot K_{w1})/p \quad (2.112)$$

Αντίδραση εγκάρσιου άξονα (Quadrature Axis). Η συνιστώσα της κυματομορφής της Μ.Ε.Δ. του επαγωγίμου, η οποία είναι ομοαξονική με τον άξονα ανάμεσα στους πόλους μιας μηχανής έκτυπων πόλων θα παράγει μαγνητική ροή στο μαγνητικό κύκλωμα, η οποία είναι ανεπηρέαστη από το ρεύμα στο τύλιγμα της διέγερσης. Συνεπώς, δεν υπάρχει ισοδύναμο κύκλωμα της διέγερσης για την αντίδραση του επαγωγίμου στον εγκάρσιο άξονα F_{aq} . Το διάκενο ανάμεσα στους πόλους εμφανίζει μια σημαντικά μεγαλύτερη μαγνητική αντίσταση από ότι εμφανίζει το πολύ μικρότερο διάκενο που υφίσταται ανάμεσα στα πέδιλα των πόλων και το στάτη έτσι, ώστε η κατανομή της μαγνητικής επα-

γωγής στον εγκάρσιο άξονα να διαθέτει μια μεγάλη χωρική 3^η αρμονική. Η συνηθισμένη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του επαγωγίμου κατά αστέρα αποτρέπει την εμφάνιση οποιασδήποτε αντίστοιχης 3^η αρμονικής της Η.Ε.Δ. στην πολική τάση της μηχανής. Ωστόσο, η θεμελιώδης συνιστώσα (of cross flux), αν και είναι μικρή συγκρινόμενη με την αντίστοιχη Μ.Ε.Δ. του ευθέως άξονα, μπορεί να δημιουργήσει μια Η.Ε.Δ. θεμελιώδους συχνότητας στην περιέλιξη του επαγωγίμου, και έτσι δίνει μια αντίδραση εγκάρσιου άξονα, η οποία διαθέτει τη φύση μιας καθαρής αντίδρασης σκέδασης. Η αντιμετώπιση που διαθέτει τη μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται με τη σχεδίαση της μαγνητικής επαγωγής, αλλά αυτή και άλλες προσεγγίσεις είναι εκτός του αντικειμένου της παρούσης εργασίας.



α) Συνιστώσες της αντίδρασης του επαγωγίμου β) Αντίδραση ευθέως άξονα γ) Αντίδραση εγκάρσιου άξονα

Σχήμα 2.49 : Αντίδραση επαγωγίμου σε μηχανή έκτυπων πόλων. [Ξ59, Fig. 140 page 228]

Συνιστώσες ακολουθίας φάσεων. Το σύνολο της προηγούμενης αναφοράς σχετίζεται με την αντίδραση του επαγωγίμου, η οποία παράγεται από κανονικά ρεύματα θετικής ακολουθίας. Σε συνθήκες σφάλματος, ή ασύμμετρης φόρτισης, ή της εσκεμμένης εφαρμογής ασύμμετρων τάσεων στο επαγωγίμο, τότε αυτό θα διαρρέεται από ρεύματα αρνητικής (και σε ορισμένες περιπτώσεις) μηδενικής ακολουθίας. Κάθε ένα θα παράγει μια αντίστοιχη αντίδραση του επαγωγίμου.

Όταν στα τυλίγματα του επαγωγίμου μιας τριφασικής μηχανής εμφανίζονται ρεύματα αρνητικής ακολουθίας, αναπτύσσεται μια Μ.Ε.Δ. η οποία περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα προς μια κατεύθυνση αντίθετη από εκείνη με την οποία περιστρέφεται η Μ.Ε.Δ. που παράγεται από το σύστημα των πόλων. Κατά συνέπεια, από τη μαγνητική επαγωγή αρνητικής ακολουθίας επάγονται στο τύλιγμα διέγερσης Η.Ε.Δ. διπλάσιας συχνότητας. Σε μια μηχανή έκτυπων πόλων, η μαγνητική ροή δεν θα είναι σταθερή, εξαιτίας της μεταβλητής μαγνητικής αγωγιμότητας του διακένου που εμφανίζεται σε αυτό, καθώς διέρχεται διαδοχικά από τον ευθύ και τον εγκάρσιο άξονα. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στην περίπτωση που η μηχανή διαθέτει ελασματοποιημένα πρόσωπα πόλων, ενώ δεν διαθέτει τυλίγματα απόσβεσης. Αυτά έχουν μια επίδραση αντιστάθμισης και τείνουν να κάνουν τη μηχανή ισοδύναμη με μια κατασκευή κυλινδρικού δρομέα. Το φαινόμενο φυσικά συνοδεύεται από σημαντικές απώλειες ισχύος στο πρόσωπο του πόλου και στα τυλίγματα απόσβεσης.

Από τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας, τα οποία είναι συμφασικά στο πεδίο του χρόνου και στις τρεις φάσεις δεν παράγεται μαγνητική επαγωγή στο διάκενο.

2.6.12 Αγωγοί

Σχεδόν πάντα το υλικό των αγωγών που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μηχανές είναι ο χαλκός. Η αντίσταση συνεχούς ρεύματος των αγωγών (ωμική αντίσταση) μπορεί να υπολογιστεί από διαγράμματα για τυπικό χαλκό που έχει ανοπτηθεί, του οποίου η ειδική αντίσταση ανά μέτρο μήκους και ανά τετραγωνικό χιλιοστό διατομής ισούται με $\rho = 1/58 \Omega$ σε θερμοκρασία 20°C . Ο θερμοκρασιακός συντελεστής της αντίστασης ισούται με $1/234.5$ ανά βαθμό κελσίου σε θερμοκρασία 0°C . Έτσι, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση για θερμοκρασία ίση με 75°C , η αντίσταση ενός κομματιού χαλκού που έχει μήκος 1 μέτρο και εμβαδόν διατομής 1mm^2 προκύπτει ίση με $0,021 \Omega$.

$$\frac{1}{58} \cdot \frac{234.5 + 75}{234.5 + 20} = 0.021 \Omega$$

Εάν ένας αγωγός λειτουργεί με μια πυκνότητα ρεύματος ίση με $\delta \text{ A/mm}^2$, οι απώλειες θερμότητας ανά μέτρο μήκους (m) και ανά τετραγωνικό χιλιοστό εμβαδού διατομής (mm^2) προκύπτει ίση με $\rho \cdot \delta^2$, ενώ οι απώλειες ανά κιλό χαλκού W/kg υπολογίζονται από τη σχέση (2.113).

$$p_{cu} = (1000 \cdot \rho \cdot \delta^2)/8.9 \quad (2.113)$$

Η ανωτέρω εξίσωση στην περίπτωση που η θερμοκρασία ισούται με 75°C λαμβάνει τιμή ίση με $2,36 \cdot \delta^2$ και έχει μονάδες μέτρησης W/kg .

Απώλειες δινορρευμάτων (ρευμάτων Eddy). Όταν ένα πεπερασμένο τμήμα αγωγού βρίσκεται εντός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, καθίσταται η θέση των επαγόμενων Η.Ε.Δ., οι οποίες προκαλούν παρασιτικά κυκλοφορούντα ρεύματα ακριβώς παρόμοια με εκείνα που κυκλοφορούν στα χαλύβδινα ελάσματα κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Οι επιπρόσθετες απώλειες από αυτήν την αιτία μπορεί να είναι πολύ μεγάλες εάν δεν ληφθούν κατάλληλες προφυλάξεις. Το προφανές βήμα, κατ' αναλογία με το μαγνητικό κύκλωμα, είναι η χρήση παράλληλων αγωγών, προκειμένου να επιτευχθεί η διατομή που απαιτείται. Αυτοί τοποθετούνται κατά τη διεύθυνση των θετικών γωνιών ως προς το παρασιτικό πεδίο (disturbing field), προκειμένου οι ροές σκέδασης να είναι λογικά χαμηλές.

Τα παρασιτικά ρεύματα Eddy (δινορρεύματα) σε έναν απομονωμένο αγωγό, τα οποία οφείλονται στο δικό του μαγνητικό πεδίο ονομάζονται επιδερμικό φαινόμενο. Αυτά οφείλονται στην αυτεπαγωγή των κεντρικών τμημάτων του αγωγού, η οποία υπερβαίνει εκείνη των εξωτερικών τμημάτων του. Συνεπώς η επαγωγική αντίδραση του κεντρικού τμήματος του αγωγού είναι μεγαλύτερη και επομένως το ρεύμα ρέει ευκολότερα στα εξωτερικά στρώματα του αγωγού. Αλλά, οποιαδήποτε απόκλιση από την ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος αυξάνει τις ωμικές απώλειες ισχύος $I^2 \cdot R$. Μια εναλλακτική εξήγηση είναι ότι η μεγαλύτερη τιμή της επαγόμενης Η.Ε.Δ. που οφείλεται στην αυτεπαγωγή στα μεσαία τμήματα του αγωγού προκαλεί κυκλοφορούντα ρεύματα, τα οποία υπερτίθενται στο κύριο ρεύμα και με αυτόν τον τρόπο αυξάνονται οι ωμι-

κές απώλειες ισχύος $I^2 \cdot R$, οι οποίες ονομάζονται και απώλειες συνεχούς ρεύματος (d.c.).

Γράφοντας το λόγο των απωλειών δινορρευμάτων προκύπτει η παρακάτω σχέση (2.114):

$$K_d = \frac{\text{Ενεργές απώλειες } I^2 \cdot R}{\text{Απώλειες d. c. } I^2 \cdot R} = 1 + \frac{\text{Απώλειες Eddy } I^2 \cdot R}{\text{Απώλειες d. c. } I^2 \cdot R} \quad (2.114)$$

Οπότε, οι ενεργές απώλειες σε μια δοθείσα περίπτωση βρίσκονται από τον υπολογισμό των απωλειών συνεχούς ρεύματος (d.c.) (π.χ. εκείνων των απωλειών που θα συνέβαιναν εάν το ρεύμα είχε κατανομηθεί ομοιόμορφα πάνω στην επιφάνεια της διατομής του αγωγού και δεν υπάρχει επίδραση διανεμημένων πεδίων (no stray field effect)) και τον πολλαπλασιασμό τους με τον συντελεστή K_d . Μπορεί να αποδειχθεί ότι ο συντελεστής απωλειών βασίζεται στη γεωμετρία του αγωγού, τη συχνότητα διακύμανσης του ρεύματος ή της μαγνητικής ροής και την αντίσταση του αγωγού. Οι απώλειες δινορρευμάτων των χαλύβδινων ελασμάτων σύμφωνα με την εξίσωση (2.32) φαίνεται να λαμβάνεται από μια έκφραση στην οποία εκπροσωπούνται αυτές οι ποσότητες.

Αγωγοί στις αύλακες. Η συνήθης υπόθεση για την κατανομή της μαγνητικής ροής των αυλάκων είναι εκείνη που εμφανίζεται στο σχήμα 2.23, το οποίο δίνεται σε σχέση με τον υπολογισμό της αντίδρασης σκέδασης για τις διάφορες μορφές των αυλάκων. Το ερώτημα που εξετάζεται τώρα έχει τεθεί στην πράξη από την άνιση αυτεπαγωγή που παράγεται από την κατανομή της μαγνητικής ροής των αυλάκων, όπως έχει ήδη εξεταστεί σύμφωνα με την εξίσωση (2.64).

Η αρχική λύση για τις απώλειες δινορρευμάτων, οι οποίες οφείλονται στα μαγνητικά πεδία, μπορεί να εφαρμοστεί με τη χρήση γραφικών ή της εξίσωσης (2.115). Σύμφωνα με αυτήν υπολογίζεται ο συντελεστής απωλειών ενός συμπαγούς αγωγού, ο οποίος διαθέτει βάθος h , του οποίου η τιμή μετριέται σε cm.

$$K_d = 1 + \frac{4}{45} \cdot (a \cdot h)^4 \quad (2.115)$$

Ο συντελεστής απωλειών στην p στρώση μιας αύλακας που περιέχει m στρώσεις κάθε μια από τις οποίες διαθέτει βάθος h με τιμή της παραμέτρου $p = 1$ στη βάση της αύλακας και $p = m$ στην κορυφή της θα υπολογισθεί σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$K_{dp} = 1 + \frac{p \cdot (p - 1)}{3} \cdot (a \cdot h)^4 \quad (2.116)$$

Η μέση τιμή του συντελεστή απωλειών μιας αύλακας η οποία διαθέτει m στρώσεις θα υπολογισθεί από τη σχέση (2.117), ενώ η παράμετρος a υπολογίζεται από τη σχέση (2.118).

$$K_{d \text{ ave}} = 1 + \left(\frac{m^2}{9} \right) \cdot (a \cdot h)^4 \quad (2.117)$$

$$a = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{b \cdot f}{\rho \cdot w_s \cdot 10^9}} \approx \sqrt{\frac{\text{πλάτος χαλκού}}{\text{πλάτος αύλακας}}} \quad (2.118)$$

Ο λόγος (πλάτος χαλκού/πλάτος αύλακας) απεικονίζεται στο σχήμα 2.23.α από την αναλογία b/w_s , ρ είναι η ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού με μονάδες μέτρησης Ω/cm^3 (Ω για ένα κύβο 1 cm) και f είναι η συχνότητα. Η προσέγγιση της παραμέτρου a στην εξίσωση (2.118) έχει πραγματοποιηθεί για συχνότητα $f = 50 \text{ Hz}$ και για χάλκινους αγωγούς, ενώ οι εξισώσεις (2.115), (2.116) και (2.117) ισχύουν εφόσον $a \cdot h < 0.7$.

Στην πράξη, είναι ασυνήθιστο να υφίσταται τιμή του γινομένου $a \cdot h > 0.7$, καθώς η συχνότητα λειτουργίας ισούται με $f = 50 \text{ Hz}$. Σε διαφορετική περίπτωση θα προέκυπταν υπερβολικές απώλειες. Σε μια αύλακα πλάτους 8 mm στην οποία εμπεριέχεται συμπαγής αγωγός πλάτους 6 mm και βάρους 25 mm ο συντελεστής απωλειών προκύπτει από την εξίσωση (2.115) και λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

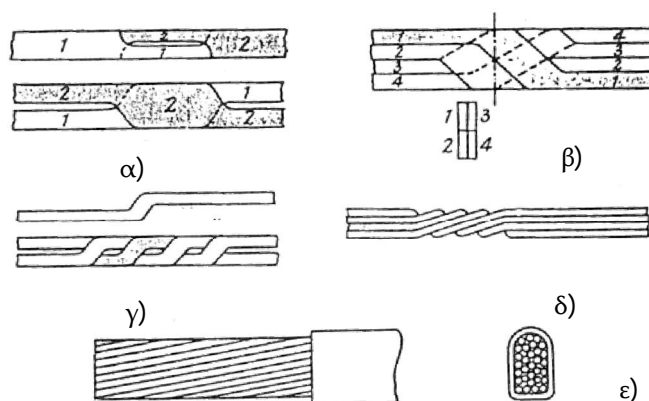
$$K_d = 1 + \frac{4}{45} \cdot \left[\left(\sqrt{\frac{6}{8}} \right) \cdot 2,5 \right]^4 \Rightarrow K_d = 2,95$$

Από την οποία προκύπτει ότι οι πραγματικές απώλειες είναι σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερες από τις απώλειες d.c. $I^2 \cdot R$ που έχουν υπολογισθεί. Συνεπώς από οικονομικής άποψης η χρήση ενός αγωγού σαν αυτόν καθίσταται αδιανόητη. Ακόμη, η τιμή του γινομένου $a \cdot h$ για αυτήν την περίπτωση προκύπτει ίση με 2.16.

Όταν το ρεύμα που πρόκειται να διέλθει μέσα από ένα αγωγό απαιτεί μια μεγάλη διατομή, καθίσταται ουσιώδης η υποδιαίρεση του σε κλώνους (παράλληλοι αγωγοί) κάθε ένας από τους οποίους πρέπει να καταλαμβάνει μικρό βάθος, προκειμένου να αποφευχθούν οι απώλειες δινορρευμάτων και η αναπτυσσόμενη από αυτές θερμότητα. Η μικρότερη διάσταση του βάρους του αγωγού πρέπει ταυτόχρονα να επιτυγχάνει τιμή του συντελεστή απωλειών όσο το δυνατόν πλησιέστερη της μονάδας. Τώρα οι δοθείσες εξισώσεις υπολογισμού των συντελεστών απωλειών ισχύουν μόνο εφόσον οι υποδιαίρεσεις δεν συνδέονται παράλληλα με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται η δημιουργία διαδρομών για τα δινορρεύματα ανάμεσα στους κλώνους. Σε διαφορετική περίπτωση, θα απωλεσθεί σχεδόν ολοκληρωτικά η χρησιμότητα των υποδιαίρεσεων. Φυσικά, μια παράλληλη συνδεσμολογία είναι ουσιώδης, προκειμένου να επιτευχθεί η κατανομή του ρεύματος στον αγωγό. Η παράλληλη συνδεσμολογία πρέπει να επιτευχθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να διασφαλιστεί η πλήρης ισορροπία ανάμεσα στις ανεξάρτητες υποδιαίρεσεις του αγωγού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με το στρίψιμο (twisting) ή την αντιμετάθεση (transposition) των αγωγών.

Συνεστραμμένοι αγωγοί αύλακων. Αυτοί οι αγωγοί έχουν τις στρώσεις τους αντιμεταθετημένες (transposed) ή συνεστραμμένες στην αύλακα, προκειμένου να επιτευχθούν συμμετρικά μήκη έτσι, ώστε κάθε υποδιαίρεση να καταλαμβάνει όλες τις δυνατές θέσεις ανά στρώση για το ίδιο μήκος της αύλακας. Σε ένα πυρήνα στροβιλο-εναλλακτήρα μεγάλου μήκους, η συστροφή των αγωγών μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κάθε αύλακα δύο ή τρεις φορές. Το αποτέλεσμα είναι να επιτευχθεί η εξίσωση των Η.Ε.Δ. που οφείλονται στα δινορρεύματα σε όλους τους κλώνους του αγωγού και, να επιτραπεί ο παραλληλισμός των στρώσεων στα άκρα τους χωρίς να παραχθούν κυκλοφορούντα δινορρεύματα ανάμεσα στις στρώσεις. Εμφανίζεται σημαντική εφευρετικότητα στη σχεδίαση

της συστροφής, η οποία πρέπει να διευθετηθεί στο διαθέσιμο χώρο της αύλακας, ενώ απαιτεί γενικά να επιτευχθεί τοπικά μια μείωση της διατομής κάθε στρώσης. Στο σχήμα 2.50 εμφανίζονται τυπικές συστροφές, ενώ στα σχήματα 2.50.α, β, γ και δ η διασταύρωση επιτυγχάνεται με την ειδική διαμόρφωση των αγωγών. Στο σχήμα 2.50.ε η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η δομή της ακτινικής αναχώρησης (radical departure). Συνίσταται στη χρήση συναρμολογήσεων ελαφρά μονωμένων στρογγυλών αγωγών που απαρτίζονται από συμπιεσμένους κλώνους για τις αύλακες. Οι κλώνοι (strands) τοποθετούνται με μια ειδική διαδικασία σε ομόκεντρες ελικοειδείς στρώσεις. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ένας υψηλός βαθμός υποδιαίρεσης και κάποια προσέγγιση σε μια ομοιομορφία των αναπτυσσόμενων Η.Ε.Δ. στους διάφορους κλώνους που οφείλονται στα δινορρεύματα. Ο αγωγός πρέπει να συνδεθεί στα άκρα του σε κατάλληλες λωρίδες (ταινίες) που βρίσκονται στις κεφαλές των τυλιγμάτων. Ο συντελεστής απωλειών μπορεί να έχει τάξη μεγέθους 1.5 και δεν είναι εύκολα δυνατός ο υπολογισμός του.



Σχήμα 2.50 : Συνεστραμμένοι αγωγοί αυλάκων. [Ξ59, Fig. 141, page 232]

Η αντιμετάθεση στους συνδετήρες των κεφαλών του τυλίγματος αποτελεί μια μέθοδο, η οποία καθιστά μια στρώση τυλίγματος ικανή να καταλαμβάνει όλες τις πιθανές θέσεις των αυλάκων όπου αυτό διευκολύνεται. Απαραίτητη είναι μια σχέση ανάμεσα στον αριθμό των στρώσεων και τον αριθμό των αυλάκων ανά φάση. Αυτή η αντιμετάθεση επιτυγχάνεται αυτόματα στα τυλίγματα αδαμαντοειδούς μορφής και στα καλαθοτυλίγματα, καθώς σε αυτά οι αγωγοί της άνω στρώσης μιας πλευράς πηνίου γίνονται οι αγωγοί της κάτω στρώσης ενός άλλου πηνίου. Αυτό μπορεί να είναι ικανοποιητικό για όλες τις μηχανές, αλλά στις ηλεκτρικές μηχανές μεγαλύτερης ισχύος η συστροφή των αγωγών στις αύλακες πρέπει να συνδυαστεί με την αντιμετάθεση των κεφαλών του τυλίγματος έτσι ώστε οι απώλειες δινορρευμάτων να διατηρούνται εντός των ορίων των προδιαγραφών.

Αγωγοί στις κεφαλές του τυλίγματος. Το πρόβλημα της εκτίμησης των απωλειών δινορρευμάτων στους αγωγούς των κεφαλών του τυλίγματος είναι ιδιαίτερα δύσκολο, καθώς δεν μπορεί να εκτιμηθεί εύκολα το πεδίο σκέδασης ούτε ως προς το μέγεθος ούτε ως προς την κατεύθυνση του. Θεωρείται το σχήμα 2.51.α, στο οποίο απεικονίζεται μια τυπική περίπτωση. Η πραγματική κατανομή του μαγνητικού πεδίου που πρόκειται να

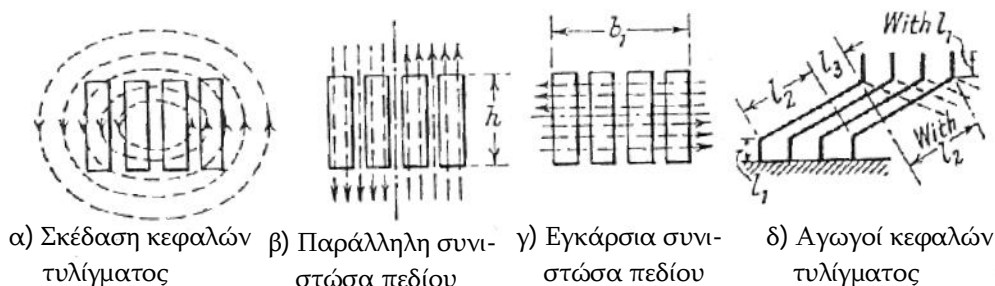
αναλυθεί επιλύεται κατά προσέγγιση σε πεδία παράλληλα και εγκάρσια ως προς τους αγωγούς, όπως εμφανίζεται στα σχήματα 2.51.β και 2.51.γ. Επειδή ο συντελεστής απωλειών δινορρευμάτων είναι ανάλογος προς το συντελεστή h^4 (όπου h είναι το βάθος του αγωγού), το παράλληλο πεδίο συχνά μπορεί να αγνοηθεί. Το μήκος της διαδρομής της ροής σκέδασης που εμφανίζεται στο σχήμα 2.51.γ έχει υποθεθεί ότι ισούται με $b_1 + h$, ενώ η κεφαλή του τυλίγματος θεωρείται ότι εμπεριέχεται σε μια φανταστική αύλακα πλάτους $b_1 + h$ και βάθους $h/2$. Στην περίπτωση αυτή η παράμετρος a θα υπολογισθεί από τη σχέση (2.119).

$$a = \sqrt{\frac{n \cdot b}{b_1 + h}} \quad (2.119)$$

η οποία ισχύει για συχνότητα ίση με 50 περιόδους, όπου n είναι ο αριθμός των κλώνων που βρίσκονται ο ένας δίπλα στον άλλο σε μια ομάδα πηνίων, b είναι το πάχος του κλώνου και b_1 είναι το συνολικό πλάτος των n κλώνων. Σύμφωνα με τον τύπο της περιέλιξης, ερμηνεύονται κατάλληλα τα διάφορα μεγέθη. Έτσι, σε ένα καλαθοτύλιγμα, όπως αυτό που εμφανίζεται στο σχήμα 2.51.δ, το μήκος των κεφαλών του μπορεί να ληφθεί στα τρία τμήματα ίσο με l_1 , l_2 και l_3 αντίστοιχα, ενώ ο αριθμός των κλώνων που βρίσκονται ο ένας δίπλα στον άλλο ισούται με $n = 1$ κλώνος για το τμήμα μήκους l_1 , $n = 2/3$ του αριθμού των κλώνων που βρίσκονται ο ένας δίπλα στον άλλο σε μια ομάδα πηνίων για το τμήμα μήκους l_2 και $n =$ συνολικός αριθμός κλώνων σε μια ομάδα πηνίων φάσης για το τμήμα μήκους l_3 . Από αυτές τις παραμέτρους προκύπτει ο συντελεστής απωλειών για τις κεφαλές των τυλιγμάτων σύμφωνα με την εξίσωση (2.120).

$$K_d = \frac{K_{d1} \cdot l_1 + K_{d2} \cdot l_2 + K_{d3} \cdot l_3}{l_1 + l_2 + l_3} \quad (2.120)$$

Μετασηματιστές. Εφαρμόζεται η ίδια μέθοδος όπως έχει εφαρμοστεί για τους αγωγούς των αυλάκων. Ο συντελεστής απωλειών δινορρευμάτων για τους μετασηματιστές υπολογίζεται θεωρώντας ότι κάθε πηνίο διαθέτει μήκος L_c και εμπεριέχεται σε μια "αύλακα" μήκους L . Το βάθος του αγωγού h αντικαθίσταται από την παράμετρο b , και ο συντελεστής απωλειών υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (2.117). Όμως, σε αυτή την περίπτωση η παράμετρος a θα υπολογισθεί από τη σχέση: $a = \sqrt{(L_c/L)}$.



Σχήμα 2.51 : Αγωγοί κεφαλών τυλιγμάτων. [Ξ59, Fig. 142, page 234]

2.6.13 Μόνωση

Μπορεί να λεχθεί με μια δόση αλήθειας ότι η μόνωση, ή το διηλεκτρικό κύκλωμα, των ηλεκτρικών μηχανών αποτελεί το πιο αδύναμο τμήμα τους. Τα μονωτικά υλικά είναι ουσιαστικά μη μεταλλικά υλικά, και αποτελούνται από μια μεγάλη ποικιλία συστατικών. Αυτά μπορεί να είναι οργανικά ή ανόργανα, φυτικά ή ορυκτά ή μπορεί να έχουν ζωική προέλευση. Ακόμη μπορεί να διαθέτουν ομοιόμορφη ή ετερογενή υφή, και είναι φυσικά ή τεχνητά. Ένα ιδανικό διηλεκτρικό υλικό πρέπει να διαθέτει:

1. Υψηλή διηλεκτρική αντοχή, ιδιαίτερα στις υψηλές θερμοκρασίες.
2. Καλή θερμική αγωγιμότητα.
3. Σταθερότητα, ιδιαίτερα στις υψηλές θερμοκρασίες.
4. Καλές μηχανικές ιδιότητες όπως: ευκολία κατεργασίας και εφαρμογής, ανθεκτικότητα σε αστοχίες από δονήσεις, τριβές ή κάμψεις.
5. Να μην προσελκύει την υγρασία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτόν τον κατάλογο κριτηρίων υπερισχύουν οι εκτιμήσεις της θερμοκρασίας. Τόσο ο χαλκός όσο και ο σίδηρος, που αποτελούν τα κύρια εναπομείναντα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών, μπορούν να εργαστούν σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι συνηθίζεται σήμερα, χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις έτσι, ώστε οι απώλειες να μπορούν να αυξηθούν, ενώ οι ποσότητες των υλικών μπορούν να μειωθούν. Ωστόσο, το χαρακτηριστικό εκείνο που περιορίζει τις επιδόσεις των μηχανών είναι οι μονώσεις, οι οποίες στη σημερινή τους αιχμή της τεχνολογίας μπορούν να υποστούν φθορές σε σχετικά μέτριες θερμοκρασίες. Έτσι, η αύξηση της θερμοκρασίας και επομένως η σχεδίαση των μηχανών περιορίζονται σχεδόν αποκλειστικά από τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τις μονώσεις.

Τα διεθνή πρότυπα και συγκεκριμένα η 13η Έκδοση (5-2017) του πρότυπου IEC-60034-1 της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (International Electrotechnical Commission) διαμορφώνει μια κατάλληλη ταξινόμηση των κλάσεων μόνωσης των ηλεκτρικών μηχανημάτων και συσκευών. Η κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών βασίζεται πάνω σε αυτή την ταξινόμηση, η οποία εμφανίζεται συνοπτικά στον πίνακα 2.14.

Οι τιμές αυτές βασίζονται σε μια διάρκεια ζωής 20 ετών κάτω από μέσες συνθήκες λειτουργίας. Η διάρκεια ζωής ενός μονωτικού υλικού είναι στενά συνδεδεμένη με τη θερμοκρασία θερμού σημείου που καλύπτει τη θερμοκρασία λειτουργίας της περιέλιξης.

Το κόστος των μονώσεων μιας ηλεκτρικής μηχανής μπορεί να αποτελεί ένα σημαντικό ποσοστό του συνολικού της κόστους. Για ηλεκτρικές μηχανές μεγάλης ισχύος η επιλογή των μονωτικών υλικών είναι ιδιαίτερα ακριβής και, μερικές φορές μπορεί να βρεθεί ότι ένα ακριβό υλικό διαθέτει οικονομικό πλεονέκτημα έναντι ενός φθηνότερου υλικού, διότι αυτό διαθέτει υψηλότερη ηλεκτρική και μηχανική αντοχή. Ακόμη, ένα υλικό σαν αυτό διαθέτει ανώτερη τιμή αντίστασης για την παρακολούθηση υψηλότερης θερμικής αγωγιμότητας και μικρότερο χρόνο επεξεργασίας. Η συμπεριφορά του υλικού πρέπει να είναι προσεκτικά προβλέψιμη, διότι οι βλάβες μπορεί να είναι πολύ δαπανηρές.

Οι αλλαγές στις μονώσεις ηλεκτρικών μηχανών μικρής ισχύος έτσι, ώστε να καταστεί δυνατή η εκμετάλλευση των νεότερων εξελίξεων στην έρευνα και την παραγωγή μονωτικών υλικών, συχνά μπορεί να πραγματοποιηθεί γρήγορα, διότι η σχεδίαση των μονώσεων είναι σχετικά απλή. Σε αυτό το πεδίο έχει επιτευχθεί σημαντική πρόοδος τις τελευταίες δύο δεκαετίες.

Υλικά. Στη συνέχεια παρατίθενται μερικές σημειώσεις στο διαθέσιμο εύρος των μονώσεων των ηλεκτρικών μηχανών.

Η μίκα (ο μαρμαρυγίας) στην αρχική της κατάσταση ως ορυκτό, αλλά και στην περίπτωση που έχει τη μορφή τμημάτων φύλλων είναι δύσκολο να υποστεί επεξεργασία. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται στη μορφή φύλλων τα οποία συγκολλούνται με τη χρήση κατάλληλων υλικών όπως η γομαλάκα (ζωική ρητίνη, η οποία παράγεται από ένα έντομο), η πίσσα ή ο συνθετικός πολυεστέρας.

Πίνακας 2.14

Ταξινόμηση Κλάσεων Μόνωσης Ηλεκτρικών Μηχανών

Κλάση	Μονωτικά Υλικά	Μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία
<i>Y</i>	Βαμβάκι, μετάξι, χαρτί, ξύλο, κυτταρίνη, φίμπερ χωρίς εμποτισμό σε βερνίκι ή εμβαπτισμό σε μονωτικό λάδι	90°C
<i>A</i>	Τα υλικά της κλάσης <i>Y</i> εμποτισμένα με φυσικές ρητίνες, εστέρες κυτταρίνης, μονωτικά λάδια, πλαστικοποιημένο ξύλο, βερνικωμένο χαρτί, μεμβράνη όξινης κυτταρίνης κλπ	105°C
<i>E</i>	Σμάλτα συνθετικής ρητίνης, πολυστρωματικά φύλλα χαρτιού και βαμβακιού με συγκόλληση φορμαλδεΰδης κλπ	120°C
<i>B</i>	Μίκα, ίνες γυαλιού, αμίαντος κλπ με κατάλληλες συγκολλητικές ουσίες, μηχανίτης (built-up mica), πολυστρωματικά υλικά βασισμένα στις ίνες γυαλιού και τον αμίαντο	130°C
<i>F</i>	Τα υλικά της κλάσης <i>B</i> με υλικά συγκόλλησης μεγαλύτερων θερμοκρασιακών αντοχών	155°C
<i>H</i>	Πολυστρωματικά υλικά που περιέχουν ίνες γυαλιού που έχουν συγκολληθεί με κατάλληλες ρητίνες σιλικόνης (πυριτιούχες), μηχανίτης	180°C
<i>C</i>	Μίκα, κεραμικά υλικά, γυαλί, χαλαζίας και αμίαντος χωρίς υλικά συγκόλλησης ή με ρητίνες σιλικόνης ανώτερης θερμοκρασιακής αντοχής	> 180°C

Micafolium είναι μια ταινία που αποτελείται από φύλλα μίκας τα οποία αποξηραίνονται και συνενώνονται με χαρτί. Η ταινία αυτή μπορεί να τυλιχθεί στους αγωγούς με το χέρι και έπειτα να υποστεί έλαση και συμπίεση ανάμεσα σε θερμαινόμενες πλάκες, προκειμένου το υλικό να στερεοποιηθεί και να αποκλεισθεί ο αέρας.

Ινώδες γυαλί κατασκευάζεται από υλικό ελεύθερο από μεταλλικά οξειδία αλκαλίων (σόδα ή ποτάσα), από τα οποία μπορεί να σχηματισθεί μια επιφανειακή επικάλυψη που θα προσβάλλει τα πυριτικά άλατα του γυαλιού. Το γυαλί δεν απορροφά ογκομετρικά υγρασία, αλλά μπορεί να την προσελκύσει μέσω της τριχοειδούς δράσης ανάμεσα στα λεπτά υαλονήματα. Οι ταινίες και τα ρούχα που υφαινούνται από συνεχείς κλώνους νημάτων διαθέτουν υψηλή αντίσταση, θερμική αγωγιμότητα και αντοχή σε εφελκυσμό έτσι ώστε να σχηματίζεται μια καλή μόνωση της κατηγορίας Β. Ο συντελεστής χώρου είναι καλός, αλλά το υλικό είναι ευπαθές σε βλάβες απόξεσης. Η πολύ μέτρια ελαστικότητα του μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση βερνικωμένων ταινιών κόβοντας την ταινία με κλίση (λοξά). Η λεπτή κάλυψη από γυαλί και μετάξι διατίθεται για σύρματα κατάλληλα για πηνία διέγερσης ή καλαθοτυλίγματα ενώ, το βερνίκωμα τους είναι απαραίτητο προκειμένου να καταστούν ανθεκτικά στην απόξεση.

Ο αμιάντος έχει χαμηλή μηχανική αντοχή, ακόμη και όταν έχει υφανθεί με ίνες βαμβακιού και, μόνο περιστασιακά μπορεί να ανταγωνιστεί με τις ίνες γυαλιού. Τα φύλλα αμιάντου στα οποία εμπεριέχονται συνθετικές ρητίνες έχουν καλή μηχανική αντοχή και θερμική αντίσταση. Τα σύρματα αμιάντου και οι ταινίες επικάλυψης έχουν ελαστικότητα και αντίσταση απόξεσης, αλλά ο συντελεστής χώρου είναι κάπως χαμηλός.

Υφασμένες ταινίες βαμβακερών ινών οι οποίες κατασκευάζονται από ακετυλιωμένο βαμβάκι. Αυτές έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί εδώ και αρκετό καιρό, έχουν αξιοσημείωτη αντίσταση στη θερμοκρασία, ενώ είναι πολύ λιγότερο υγροσκοπικές από τα συνηθισμένα βαμβακερά υλικά.

Πολυαμίδια. Από τα υλικά αυτά, όπως το νάιλον, κατασκευάζονται ταινίες υψηλής μηχανικής αντοχής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χώρου, η οποία προκύπτει από το μικρό τους πάχος. Η μεμβράνη (film) που αποτελείται από νάιλον είναι μια από τις λίγες πλαστικές μεμβράνες η οποία διαθέτει επαρκή αντίσταση στη θερμοκρασία και στο σχίσμο.

Σμάλτα (εμαγιέ) συνθετικής ρητίνης. Αυτά ανήκουν στην κατηγορία του οξικού βινυλίου ή του νάιλον. Δίνουν ένα εξαιρετικά ομαλό φινίρισμα και έχουν εφαρμοστεί σε καλαθοτυλίγματα, ενώ γενικά σε όλα τα τυλίγματα έχει επιτευχθεί σημαντική βελτίωση στους χρόνους κατασκευής της περιέλιξης και στο μέσο μήκος του ελίγματος. Τα βερνίκια τα οποία απαρτίζονται από τα ίδια βασικά υλικά προσφέρουν καλή συγκράτηση της περιέλιξης.

Υλικά επένδυσης αυλάκων. Για το σκοπό αυτό στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν διάφορα σύνθετα υλικά βασικό συστατικό των οποίων υπήρξε η μίκα, αλλά αυτή καταστρέφεται εύκολα κατά τη διαμόρφωση. Αρχικά για κινητήρες μικρής ισχύος είχε βρεθεί ικανοποιητική η χρήση βαμβακερού πανιού δύο στρώσεων το οποίο έχει βερνικωθεί, ενώ για κινητήρες μεγαλύτερης ισχύος χρησιμοποιούνταν υλικό τριών στρώσεων. Στη

συνέχεια τα υλικά αυτά παραγκωνίστηκαν αρχικά από το υλικό Prespan Triflexil και στη συνέχεια από το υλικό Mylar. Αμφότερα τα υλικά αυτά διαθέτουν σαφώς καλύτερη μηχανική και θερμοκρασιακή αντοχή έναντι των προγενέστερων και καλύπτουν τις προδιαγραφές της κλάσης B και των κατώτερων της. Προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη θερμοκρασιακή και μηχανική αντοχή των μονώσεων στις αύλακες πλέον έχουν υιοθετηθεί το Nomex και το Sandwich. Το πρώτο αποτελεί ίνα της εταιρείας Dupont, η οποία είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών (έως και 200° C), ενώ διαθέτει μέτρια αντοχή στις μηχανικές καταπονήσεις. Το δεύτερο υλικό αποτελεί συνδυασμό Mylar και Nomex σε στρώσεις. Ο επικρατέστερος συνδυασμός είναι Nomex – Mylar – Nomex και διαθέτει αντοχή σε χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας (έως 155° C) και πολύ καλή μηχανική αντοχή.

Ξύλο. Το ξύλο στην μορφή των συμπιεσμένων φύλλων που έχουν εμποτιστεί σε συνθετική ρητίνη έχει αποδειχθεί ως στιβαρό και ακριβές υλικό για υλικά συσκευασίας, για υποστηρίγματα πηνίων και διαχωριστήρες που τοποθετούνται ανάμεσα στα ελίγματα ομάδων πηνίων που βρίσκονται σε διαδοχικές αύλακες. Εάν οι ηλεκτρικές ιδιότητες του δεν είναι επαρκείς, προτιμούνται φύλλα χαρτιού φαινολικών ενώσεων, παρόλο που το κόστος τους είναι μεγαλύτερο.

Οι σιλικόνες είναι ημι-ανόργανα υλικά με μια βασική δομή η οποία αποτελείται από άτομα πυριτίου και οξυγόνου που εναλλάσσονται. Είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στη θερμότητα και ως συνδετικά υλικά στις μονώσεις της κλάσης H επιτρέπουν τη συνεχή λειτουργία με θερμοκρασίες ίσες ή μεγαλύτερες των 180° C. Ακόμα και όταν αποσυντίθενται από υπερβολικές θερμοκρασίες, το υπόλειμμα είναι το μονωτικό πυρίτιο. Οι σιλικόνες είναι αδιάβροχες και αντιδιαβρωτικές ενώ, έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε μετασχηματιστές χωρίς ορυκτέλαια, κινητήρες έλξης κινητήρες μύλων (τροφίμων και τσιμέντου) καθώς και σε μικροκινητήρες αεροσκαφών οι οποίοι λειτουργούν σε ένα εύρος θερμοκρασίας τυλίγματος από -40° C έως +200° C. Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα στη λειτουργία υψηλής θερμοκρασίας είναι η ανώτερη θερμική αγωγιμότητα, η οποία βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας από τους αγωγούς και διευκολύνει την απαγωγή της.

2.7 Εξαερισμός – Ψύξη

2.7.1 Απαγωγή θερμότητας

Οι απώλειες που παράγονται στον πυρήνα και στους αγωγούς των ηλεκτρικών μηχανών μετατρέπονται σε θερμότητα η οποία, αυξάνει τη θερμοκρασία των διαφόρων μερών τους. Η παρουσία του ατμοσφαιρικού αέρα και (επίσης στις περισσότερες περιπτώσεις) ενός συστήματος ψύξης ή εξαερισμού τείνει να μειώσει τη θερμοκρασία της μηχανής. Η αύξηση της θερμοκρασίας στην πράξη εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ των συνθηκών ψύξης και της ποσότητας της παραγόμενης θερμότητας. Η τελική θερμοκρασία επιτυγχάνεται όταν οι ρυθμοί παραγωγής και απαγωγής θερμότητας είναι ίσοι.

Ένα θερμό σώμα αποβάλλει τη θερμότητα του με την εκπομπή ακτινοβολίας, με τη μεταβίβαση και τη μεταγωγή θερμότητας. Στις ηλεκτρικές μηχανές το μεγαλύτερο μέρος

της θερμότητας απάγεται μέσω ενός συνδυασμού μεταγωγής και μεταβίβασης θερμότητας ο οποίος υποβοηθείται ως ένα βαθμό από την ακτινοβολία της που επιτυγχάνεται από την εξωτερική τους επιφάνεια. Εν συντομία, ένα ρεύμα ψυχρού αέρα διέρχεται μέσα από τη μηχανή έτσι ώστε να απομακρύνει την αναπτυσσόμενη θερμότητα από αυτήν ενώ, η διαδικασία απομάκρυνσης των ρευμάτων μεταγωγής απαντάται σημαντικά έτσι ώστε ο αέρας να απορροφά αποδοτικά τη θερμότητα. Πειράματα έχουν αποδείξει ότι μια τραχιά επιφάνεια αποβάλλει πιο εύκολα τη θερμότητα συγκρινόμενη με μια λεία επιφάνεια ενώ, οι υψηλές ταχύτητες αέρα είναι απαραίτητες για την επίτευξη στροβιλισμού αντί της γραμμικής ροής αέρα.

Η εκτίμηση της ψύξης μια μηχανής, ιδιαίτερα μιας μηχανής μεγάλης ισχύος, αποτελεί ένα ζήτημα μεγάλης σημασίας καθώς, η βαθμονόμηση της μηχανής βασίζεται στη διατήρηση του κατάλληλου εξαερισμού. Δυστυχώς, ο εξαερισμός απέχει πολύ από το να είναι μια ακριβής επιστήμη. Στην πράξη, μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν σαν μια τέχνη της οποίας ο σχεδιαστής είναι ο εκθέτης.

2.7.2 Ροή θερμότητας

Στις περιστρεφόμενες μηχανές, η θερμότητα απάγεται κυρίως με τη μεταγωγή της στον αέρα που κυκλοφορεί. Για μηχανές μικρής ισχύος, η φυσική ψύξη βασίζεται στη μεταγωγή και την ακτινοβολία της θερμότητας η οποία, όταν τα πλαίσια είναι ανοιχτά υποβοηθείται από τα τυχαία ρεύματα αέρα που δημιουργούνται από την κίνηση των περιστρεφόμενων μερών της. Αποτελεί κοινή πρακτική η τοποθέτηση ενός ανεμιστήρα στο δρομέα για να αυξήσει τα ρεύματα του αέρα. Στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφράγματα προκειμένου ο αέρας να κατευθυνθεί καλύτερα.

Για ηλεκτρικές μηχανές μεγαλύτερης ισχύος, οι μάζες του πυρήνα γίνονται πολύ μεγάλες για να ψύχονται επαρκώς από τις εξωτερικές τους επιφάνειες, και σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να χρησιμοποιούνται ακτινικά και αξονικά διάκενα ταυτόχρονα με κατάλληλα μέσα για την παροχή αέρα ψύξεως στις νέες επιφάνειες που εκτίθενται. Σε μια από τις δυσκολότερες περιπτώσεις, τον στροβιλο-εναλλακτήρα ο οποίος διαθέτει ένα εξαιρετικά τεράστιο πυρήνα που απαιτεί ένα πολύ περίπλοκο σύστημα ψύξεως διακένων προκειμένου όλα τα τμήματα του πυρήνα του να διατηρούνται σε θερμοκρασίες μέσα στα όρια που επιβάλλονται από τη μόνωση.

Τύποι περιβλήματος. Το σχεδιάγραμμα του εξαερισμού είναι στενά συνδεδεμένο με τον τύπο του περιβλήματος του κινητήρα. Οι διάφοροι τύποι των περιβλημάτων περιγράφονται παρακάτω:

Ανοιχτής βάσης. Σε αυτή τα άκρα του στάτη και του δρομέα βρίσκονται σε ελεύθερη επαφή με τον εξωτερικό αέρα του περιβάλλοντος, ο δρομέας φέρεται σε ρουλεμάν βάσης τα οποία προσαρμόζονται στις βάσεις που τοποθετούνται στα περιβλήματα των μηχανών.

Υποστήριγμα ανοικτού άκρου (Οδηγό άκρο άξονα). Σε αυτή την περίπτωση τα ρουλεμάν σχηματίζουν τμήμα των καπακιών των άκρων της μηχανής τα οποία βρίσκονται τοποθετημένα στο περίβλημα του στάτη. Η προαναφερθείσα διάταξη αποτελεί μια

συνηθισμένη κατασκευή κατάλληλη για ηλεκτρικές μηχανές μικρού και μεσαίου μεγέθους. Σε αυτές ο αέρας βρίσκεται σε συγκριτικά ελεύθερη επαφή με το στάτη και το δρομέα μέσα από τα ανοίγματα.

Προστατευμένα ή με καλύμματα άκρων με προστατευμένα ανοίγματα. Η προστασία στα καλύμματα μπορεί να παρέχεται με πλέγμα ανοίγματος διαστάσεων $\frac{1}{4}$ της ίντσας ή με πλέγμα που διαθέτει ανοίγματα μικρότερων διαστάσεων. Στην τελευταία περίπτωση η ηλεκτρική μηχανή θεωρείται ως κλειστού τύπου (totally enclosed).

Προστασία έναντι σταγόνων, πιτσιλίσματος νερού ή προστασία έναντι πτώσης νερού υπό πίεση (ρίψη με μάνικα). Αυτή αποτελεί μια σχεδίαση ηλεκτρικής μηχανής της οποίας τα ανοίγματα αερισμού που βρίσκονται στα καλύμματα των άκρων (καπάκια) έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αποκλείεται η εισροή τρεχούμενων υδάτων ή βρωμιάς (μάκας) ή πιδάκων υγρών.

Εξαερισμός μέσω σωληνώσεων ή διακένων αερισμού. Αυτή η κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών διατίθεται με καλύμματα άκρων (καπάκια) κλειστά εκτός από τα ανοίγματα για τις φλάντζες που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των σωληνώσεων κατά μήκος των οποίων κυκλοφορεί ο ψυχρός αέρας.

Ολόκλειστες ηλεκτρικές μηχανές, όπου ο εσώκλειστος αέρας δεν διαθέτει καμμία σύνδεση με τον αέρα του περιβάλλοντος ενώ, σε αυτή την περίπτωση η ηλεκτρική μηχανή δεν είναι απαραίτητα αεροστεγής. Η ολόκλειστη κατασκευή μπορεί να σχετίζεται με ένα εσωτερικό ανεμιστήρα δρομέα, έναν εξωτερικό ανεμιστήρα, ψύξη ύδατος ή εξαερισμό κλειστού κυκλώματος αέρα στον οποίο ο αέρας κυκλοφορεί σε ένα ψυγείο και επιστρέφει στη μηχανή.

Αδιάβροχες ή υδατοστεγείς ηλεκτρικές μηχανές, όπως ορίζεται.

Αντικρηκτικού τύπου, για χρήση σε ορυχεία.

Σαν γενικός κανόνας ισχύει ότι, όσο δυσκολότερος είναι ο εξαερισμός τόσο χαμηλότερη πρέπει να είναι η βαθμονόμηση μιας δοθείσας ηλεκτρικής μηχανής.

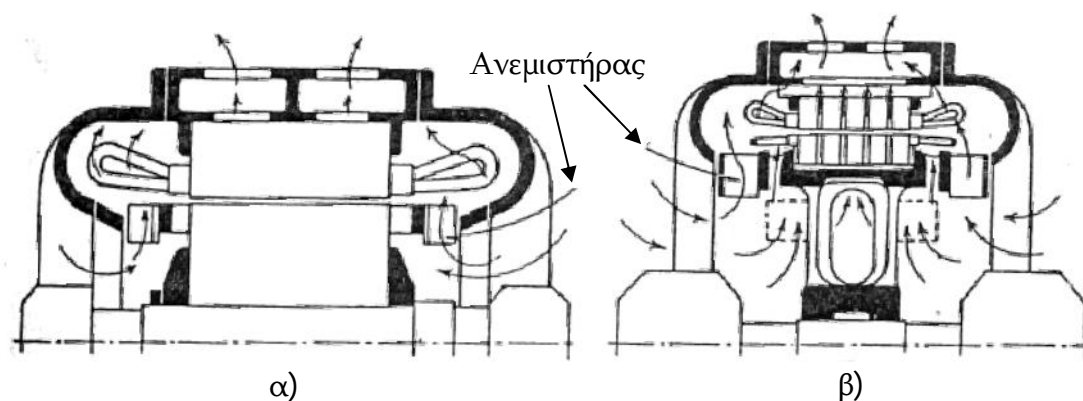
Κύκλωμα αέρα ψύξης. Η διεύθυνση της διαδρομής του αέρα ψύξης εξαρτάται από το μέγεθος της ηλεκτρικής μηχανής (ο μεγαλύτερος πυρήνας απαιτεί περισσότερες υποδιαίρεσεις και περισσότερο περίτεχνες διευθετήσεις για τη διανομή του αερίου) και τον τύπο της.

Ακτινικός αερισμός. Αυτός χρησιμοποιείται συνήθως διότι, η κίνηση του δρομέα προκαλεί φυσική φυγόκεντρη κίνηση του αέρα η οποία, αυξάνεται όπως απαιτείται από τους ανεμιστήρες του δρομέα. Στο σχήμα 2.52.α εμφανίζεται μια τυπική μέθοδος κατάλληλη για ηλεκτρικές μηχανές ισχύος μικρότερης από 20 ίππους. Τα υποστηρίγματα των άκρων έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα έτσι ώστε, ο αέρας να οδηγείται πάνω από τις κεφαλές των τυλιγμάτων και το πίσω μέρος του πυρήνα και τα διαφράγματα έχουν τοποθετηθεί έτσι ώστε να βελτιωθεί η απόδοση του ανεμιστήρα. Για μηχανές μεγαλύτερης ισχύος, είναι απαραίτητη η υποδιαίρεση του πυρήνα σύμφωνα με το σχήμα 2.52.β και, οι διαδρομές του αέρα διαμέσου των ακτινικών διακένων αερισμού είναι παράλληλες ως προς εκείνες οι οποίες έχουν τοποθετηθεί εγκάρσια προς τους φορείς θερμότητας

των κεφαλών των τυλιγμάτων. Είναι δυνατό να επιτευχθεί ένας υψηλός ρυθμός απαγωγής θερμότητας στο διάκενο που υφίσταται ανάμεσα στην ομαλή οπή των στατών και των δρομέων – εκτός και αν αυτό το διάκενο είναι πολύ μικρό – λόγω των υψηλών ταχυτήτων του αέρα που συνοδεύονται από στροβιλισμό.

Αξονικός αερισμός. Η χρήση του είναι κατάλληλη για ηλεκτρικές μηχανές μέσης ισχύος και υψηλών ταχυτήτων. Στην πράξη, η συμπαγής κατασκευή του δρομέα έκτυπων πόλων και η περιορισμένη κατασκευή του πρώτου τμήματος του που περιλαμβάνει τον άξονα της γεννήτριας και το ζύγωμα πάνω στο οποίο εδράζονται οι πυρήνες των πόλων με τα πέδιλα και τα τυλίγματα τους (rotor spider), είναι απαραίτητη για την αποφυγή αδικαιολόγητων φυγόκεντρων δυνάμεων όμως, δυσχεραίνει την παροχή επαρκών διαδρομών αέρα προς τα ακτινικά διάκενα αερισμού. Περαιτέρω, η τάση στη σχεδίαση είναι να επιτευχθεί η αύξηση του μήκους των πυρήνων και να περιοριστεί η διάμετρος του πυρήνα προκειμένου να περιοριστεί το κατασκευαστικό κόστος των ηλεκτρικών μηχανών. Στο σχήμα 2.53 εμφανίζεται μια μέθοδος εφαρμογής αξονικού εξαερισμού σε μια μηχανή μικρής ισχύος η οποία διαθέτει απλή κατασκευή πυρήνων. Προκειμένου να αυξηθεί η επιφάνεια ψύξης, μπορεί να διανοιχθούν οπές στα φύλλα της λαμαρίνας του πυρήνα έτσι ώστε, να σχηματιστούν διάκενα διέλευσης στα οποία πραγματοποιείται σημαντική απαγωγή θερμότητας. Αυτό βελτιώνει σημαντικά την ψύξη αλλά, απαιτεί μια μεγαλύτερη διάμετρο πυρήνα για το απαραίτητο αυξημένο βάθος πυρήνα.

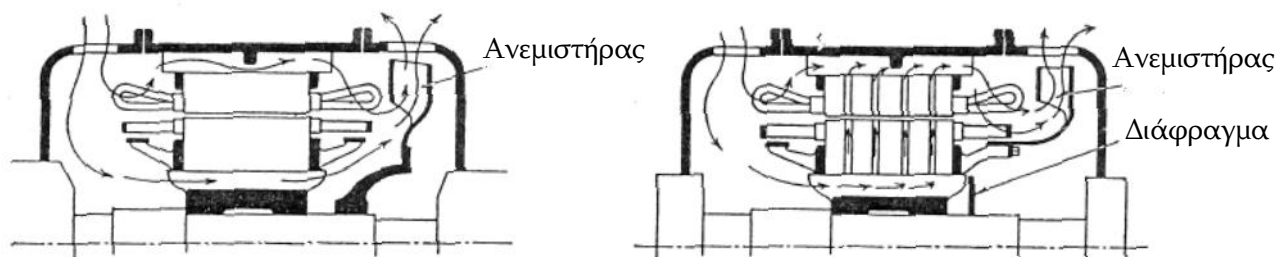
Συνδυασμένος ακτινικός και αξονικός αερισμός. Η πρώτη εφαρμογή του πραγματοποιήθηκε σε στροβιλο-εναλλακτήρες μικρής ισχύος ενώ, χρησιμοποιείται για ηλεκτροκινητήρες μεγάλης ισχύος. Στο σχήμα 2.54 εμφανίζεται η διάταξη ενός επαγωγικού κινητήρα ο οποίος ψύχεται μέσω συστήματος μικτού εξαερισμού. Ο αέρας εισέρχεται στο ένα άκρο, και ενθαρρύνεται να διέλθει μέσα από τα διάκενα αερισμού προκειμένου να εξαχθεί από το άκρο του δρομέα στο οποίο τοποθετείται ο ανεμιστήρας. Ο ανεμιστήρας που έχει προσαρμοστεί στο δρομέα αποβάλλει τον αέρα.



Σχήμα 2.52 : Ακτινικός εξαερισμός. [Ξ59, Fig. 143.A page 239]

Εξαερισμός πολλαπλών εισόδων. Όταν μια μηχανή διαθέτει μεγάλο μήκος πυρήνα υπάρχει μια τάση να υφίσταται μια έλλειψη αέρα στα ακτινικά διάκενα αερισμού που βρίσκονται στο κέντρο του. Με τη χρήση του συστήματος πολλαπλών εισόδων καθί-

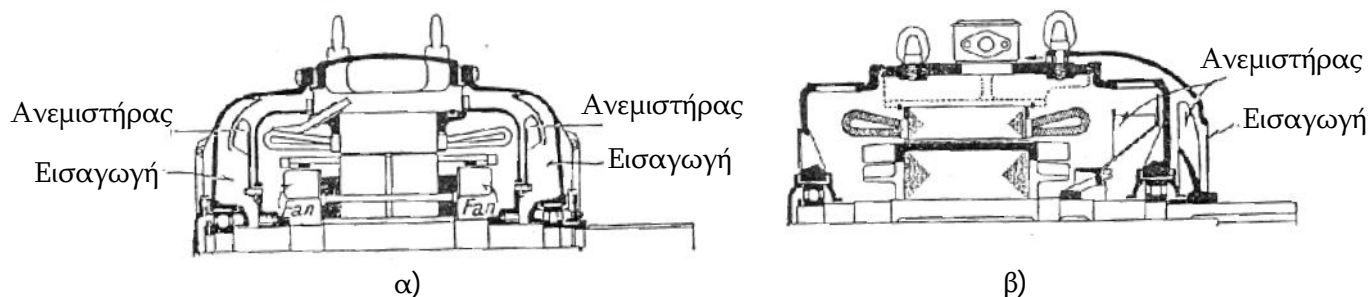
σταται δυνατή η κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών με πυρήνες μεγάλου μήκους ενώ, ταυτόχρονα επιτυγχάνεται αποτελεσματική ψύξη στο κέντρο του. Το πλαίσιο του στάτη υποδιαιρείται σε ξεχωριστά κυκλώματα αέρα τα οποία τροφοδοτούνται παράλληλα.



Σχήμα 2.53: Αξονικός εξαερισμός. [Ξ59, Fig. 143.B page 239]

Σχήμα 2.54: Συνδυασμένος ακτινικός αξονικός εξαερισμός. [Ξ59, Fig. 143.C page 239]

Η ψύξη ολόκλειστων ηλεκτρικών μηχανών παρουσιάζει ένα ιδιαίτερο πρόβλημα που συνίσταται στο γεγονός ότι στο εσωτερικό της μηχανής μπορεί να μη διαθέτει σύνδεση αέρα με τον εξωτερικό χώρο που την περιβάλλει. Στο σχήμα 2.55 εμφανίζονται δύο μέθοδοι ψύξης με ανεμιστήρα. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 2.55.α ένας ανεμιστήρας που προσαρμόζεται στον άξονα της μηχανής και βρίσκεται εξωτερικά ως προς τα λειτουργικά της τμήματα φυσάει αέρα πάνω από το σκελετό της μηχανής διαμέσου ενός χώρου που βρίσκεται ανάμεσα στο κύριο προστατευτικό περίβλημα (housing) και σε ένα λεπτό κάλυμμα. Η εσωτερική κυκλοφορία του αέρα επιτυγχάνεται μέσω ενός εσωτερικού ανεμιστήρα και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η αποφυγή της διαβάθμισης της θερμοκρασίας κατά μήκος του διάκενου. Στο σχήμα 2.55.β ένας εσωτερικός ανεμιστήρας κυκλοφορεί τη θερμότητα στο σκελετό της μηχανής. Επίσης πραγματοποιείται εμφύσηση του αέρα πάνω από το εξωτερικό μέρος του περιβλήματος της μηχανής έτσι ώστε να βελτιωθεί η αποβολή της θερμότητας.



Σχήμα 2.55 : Εξαερισμός ολόκλειστων μηχανών. [Ξ59, Fig. 144 page 240]

Εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα. Αυτή η μέθοδος ψύξης χρησιμοποιείται σε μηχανές μεγαλύτερης ισχύος η οποία, απαιτεί αρκετούς τόνους αέρα ψύξης ανά ώρα και, επιτρέπει τον καθαρισμό του αέρα μέσω κατάλληλων φίλτρων. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η απόφραξη των διακένων αερισμού η οποία σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να συμβεί εξαιτίας των μεγάλων όγκων αέρα. Σε μια διάταξη ενός επαγωγικού κινητήρα μεγάλης ισχύος, τα καλύμματα των άκρων (καπάκια) είναι αεροστεγή και, ο

αέρα από ένα εξωτερικό ανεμιστήρα εισέρχεται από ένα διάκενο. Σε ηλεκτρικές μηχανές υψηλών ταχυτήτων μπορεί να είναι ικανοποιητική η χρήση ανεμιστήρων που τοποθετούνται στους δρομείς τους. Ο αέρας φιλτράρεται ή ξεπλένεται με ένα ψεκασμό νερού, έπειτα διέρχεται μέσα από πλημμυρισμένες επιφάνειες καθαρισμού για να κατακαθίσουν οι ρύποι. Στη συνέχεια ξηραίνεται διερχόμενος μέσα από μια σειρά ξηρών πλακών καθαρισμού.

Ένα πληρέστερο μέσο διασφάλισης καθαρού αέρα ψύξης αποτελεί το σύστημα ψύξης κλειστού κυκλώματος, όπως χρησιμοποιείται στους στροβίλο-εναλλακτήρες σύμφωνα με το σχήμα 2.56. Ο θερμός αέρας από τη μηχανή διέρχεται μέσω ενός υδρόψυκτου ψυγείου ενώ, στη συνέχεια επιστρέφεται στη μηχανή μέσω ενός φυγοκεντρικού ανεμιστήρα.

Πίνακας 2.15

Βασικές Παράμετροι Ψυκτικών Μέσων

Σύμβολο	Παράμετρος Ψυκτικού Μέσου	Μονάδες Μέτρησης
P	Απώλειες που πρέπει να απαχθούν	kW
θ_i	Θερμοκρασία εισαγωγής ψυκτικού μέσου	°C
θ	Αύξηση θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου	°C
Q	Όγκος	
H	Βαρομετρικό ύψος	mm στήλης υδραργύρου
p	Πίεση	

Η ειδική θερμότητα του ξηρού αέρα σε σταθερή πίεση προκύπτει ίση με 0.2375, και 1 κιλό ξηρού αέρα διαθέτει όγκο ίσο με $0.775 \cdot [(\theta_i + 273)/273] \cdot 760/H$ m³. Επειδή 1 kW = 240 calogie ανά δευτερόλεπτο, αυτή η απώλεια αυξάνει τη θερμοκρασία του $240/237.5 = 1.01$ kg ξηρού αέρα κατά 1 °C ανά δευτερόλεπτο. Επομένως για μια απώλεια ισχύος που ισούται με P kW προκύπτει:

$$Q = \frac{1.01}{\theta} \cdot P \cdot 0.775 \cdot \frac{\theta_i + 273}{273} \cdot \frac{760}{H} \Rightarrow$$

$$Q = 0.78 \cdot \frac{P}{\theta} \cdot \frac{\theta_i + 273}{273} \cdot \frac{760}{H} \quad (m^3/sec) \quad (2.121)$$

Η ισχύς του ανεμιστήρα για ένα όγκο αέρα που ισούται με Q και μετριέται σε m³/sec ο οποίος βρίσκεται υπό πίεση ίση με p N/m² ισούται με $p \cdot Q$ W ενώ, η ισχύς του ανεμιστήρα προκύπτει από τη σχέση (2.122).

$$P_{fan} = (p \cdot Q/n \cdot 10^3) \quad (kW) \quad (2.122)$$

με ένα βαθμό απόδοσης ίσο με n . Τυπικές τιμές για την ψύξη εναλλακτήρα είναι : πίεση ίση με $p = 1000 \div 10000$ (N/m²) = $10 \div 20$ (gr/cm²), ή μεγαλύτερη σε ολόκλειστες μηχανές, θερμοκρασίες $\theta = 20^\circ C$, $\theta_i = 25^\circ C$ και, βαθμός απόδοσης $n = 0.2 \div 0.4$. Με αυτές τις τιμές ο όγκος αέρα που απαιτείται κατά προσέγγιση προκύπτει ίσος με $0.85/P \cdot \theta$ (m³/sec).

Σε ορισμένες περιπτώσεις ηλεκτρικών μηχανών πολύ μεγάλης ισχύος των οποίων ο εξαερισμός πραγματοποιείται με τη χρήση κλειστού κυκλώματος, όταν απαιτείται χαμηλός ανεμισμός (π.χ. στις σύγχρονες μηχανές) μπορεί να χρησιμοποιηθεί το υδρογόνο ως ψυκτικό μέσο. Η ειδική θερμότητα του σε σταθερή πίεση ισούται με 3.4 και 1 κιλό ξηρού αερίου καταλαμβάνει όγκο που προκύπτει ίσος με $11.3 \cdot [(\theta_i + 273)/273] \cdot 760/H \text{ m}^3$. Προκειμένου να απορροφηθούν απώλειες ισχύος που απάγονται υπό μορφή θερμότητας ίσες με $P \text{ kW}$, ο όγκος του αέρα που απαιτείται προκύπτει από τη σχέση (2.123).

$$Q = 0.8 \cdot \frac{P}{\theta} \cdot \frac{\theta_i + 273}{273} \cdot \frac{760}{H} \quad (\text{m}^3/\text{sec}) \quad (2.123)$$

η οποία είναι σχεδόν η ίδια με εκείνη του αέρα. Αλλά το υδρογόνο διαθέτει μόλις το 1/14 της πυκνότητας του αέρα και επομένως προκαλεί πολύ λιγότερες απώλειες ανεμισμού. Επιπρόσθετα, επειδή η θερμική αγωγιμότητα του υδρογόνου είναι πάνω από έξι φορές μεγαλύτερη από εκείνη του αέρα, επιτυγχάνεται καλύτερη κατανομή θερμότητας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής (π.χ. $H = 1000$) προκειμένου να αποφευχθεί η διαρροή του αέρα και η παραγωγή ενός εκρηκτικού μίγματος. Σαν μια σύγκριση λαμβάνοντας τον αέρα ίσο με τη μονάδα σε κάθε περίπτωση, οι σχετικές παράμετροι για το υδρογόνο είναι: θερμική αγωγιμότητα 6.7, πυκνότητα 0.07, ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση 14.3, χωρητικότητα θερμότητας 0.996 και θερμική αγωγιμότητα 1.5.

Για να επιτευχθεί η ψύξη του αέρα σε μηχανές που διαθέτουν κλειστό κύκλωμα ψύξης ή η ψύξη των μετασχηματιστών λαδιού απαιτείται μια ποσότητα υγρού που υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (2.124).

$$Q = 0.24 \cdot P/c_p \cdot \theta \quad (\text{λίτρα}/\text{sec}) \quad (2.124)$$

Η ειδική θερμότητα του νερού είναι $c_p = 1$ και του ορυκτελαίου $c_p = 0.35 \div 0.5$.

Ροή θερμότητας στο αέριο ψύξης. Η κυκλοφορία του ψυκτικού αερίου έχει εξεταστεί και εάν έχει σχεδιαστεί κατάλληλα το σύστημα εξαερισμού, θα απορρίψει τη θερμότητα που αναπτύσσεται χωρίς να απαιτηθεί επιπρόσθετος όγκος αερίου. Η εσωτερική ροή της θερμότητας, από τα τμήματα εκείνα της μηχανής στα οποία παράγεται προς τις επιφάνειες ψύξεως από τις οποίες μεταφέρεται στο αέριο, είναι σημαντικό να καθοριστούν οι θερμοκρασίες των θερμών σημείων και οι θερμοκρασίες στις οποίες θα υποβληθούν τα μονωτικά υλικά. Αυτό το πρόβλημα καθίσταται πολύ περίπλοκο από τη φύση της μηχανής και όπως σε άλλες πτυχές της σχεδίασης, ο σχεδιαστής βασίζεται σε εμπειρικές σταθερές οι οποίες υποστηρίζονται από θεωρητική ανάλυση και αποτελέσματα δοκιμών. Μια αύξηση της θερμοκρασίας 50°C ενός θερμού σημείου μπορεί να προκύψει από μια αύξηση θερμοκρασίας 11°C στο ψυκτικό μέσο, 25°C ανάμεσα στην επιφάνεια των πηνίων και του αερίου και 14°C ανάμεσα στο θερμό σημείο και την επιφάνεια των πηνίων.

Στην απλούστερη μορφή της, η ροή θερμότητας μειώνεται σε απλή αγωγιμότητα από τα θερμά σημεία της μηχανής προς τις επιφάνειες ψύξης, μέσω μετάλλων ή και των μονώσεων ενώ οι τελευταίες έχουν μακράν τις μεγαλύτερες θερμικές αντιστάσεις. Για τις βαθμονομημένες μηχανές με μικρή διάρκεια λειτουργίας, μια επιπλοκή αποτελεί η θερμι-

κή ικανότητα της θερμικής διαδρομής αλλά, αυτή δεν έχει βαρύτητα μετά την επίτευξη των συνθηκών μόνιμης λειτουργίας όπως και στις βαθμονομημένες μηχανές συνεχούς διάρκειας λειτουργίας.

Αν θεωρηθούν απλά γεωμετρικά σχήματα και συμμετρικές γραμμές θερμικής ροής, μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί η διαφορά θερμοκρασίας που απαιτείται ανάμεσα σε δύο επιφάνειες προκειμένου να επιτευχθεί η αγωγή της θερμότητας από τη μια επιφάνεια στην άλλη με ένα ρυθμό που έχει δοθεί. Η θερμότητα που απάγεται ανά τετραγωνικό μέτρο (m^2) εμβαδού διαδρομής κατά μήκος μιας διαδρομής μήκους x μέτρων (m), πάχους σε ένα υλικό το οποίο διαθέτει θερμική αντίσταση ρ_i με μονάδες μέτρησης $^{\circ}C / W \cdot m^3$ για μια διαφορά θερμοκρασίας $0^{\circ} C$ υπολογίζεται από τη σχέση (2.125).

$$p_d = \theta / x \cdot \rho_i \quad (W/m^2) \quad (2.125)$$

Τυπικές τιμές της θερμικής αντίστασης για διάφορα υλικά παρατίθενται στον πίνακα 2.16. ενώ, παρατηρούμε ότι οι μεταβολές των τιμών διαθέτουν σχετικά μεγάλο εύρος.

Πίνακας 2.16

Τυπικές Τιμές Θερμικής Αντίστασης για Διάφορα Υλικά

Υλικό	ρ_i ($^{\circ}C / W \cdot m^3$)	Υλικό	ρ_i ($^{\circ}C / W \cdot m^3$)
Χαλκός	0.0026	Χαρτί	7.5
Φύλλο χάλυβα		Πεπιεσμένο χαρτί	8
Κατά μήκος του ελάσματος	0.02	Μικανίτης	8
Διαμέσου του ελάσματος	0.05 ÷ 0.1	Βαμβάκι (Ξηρό)	17
Μαρμαρυγίας (Μίκα)	3	Αέρας	20
Αμίαντος	4	Λάδι	8
Υφασμα	4		

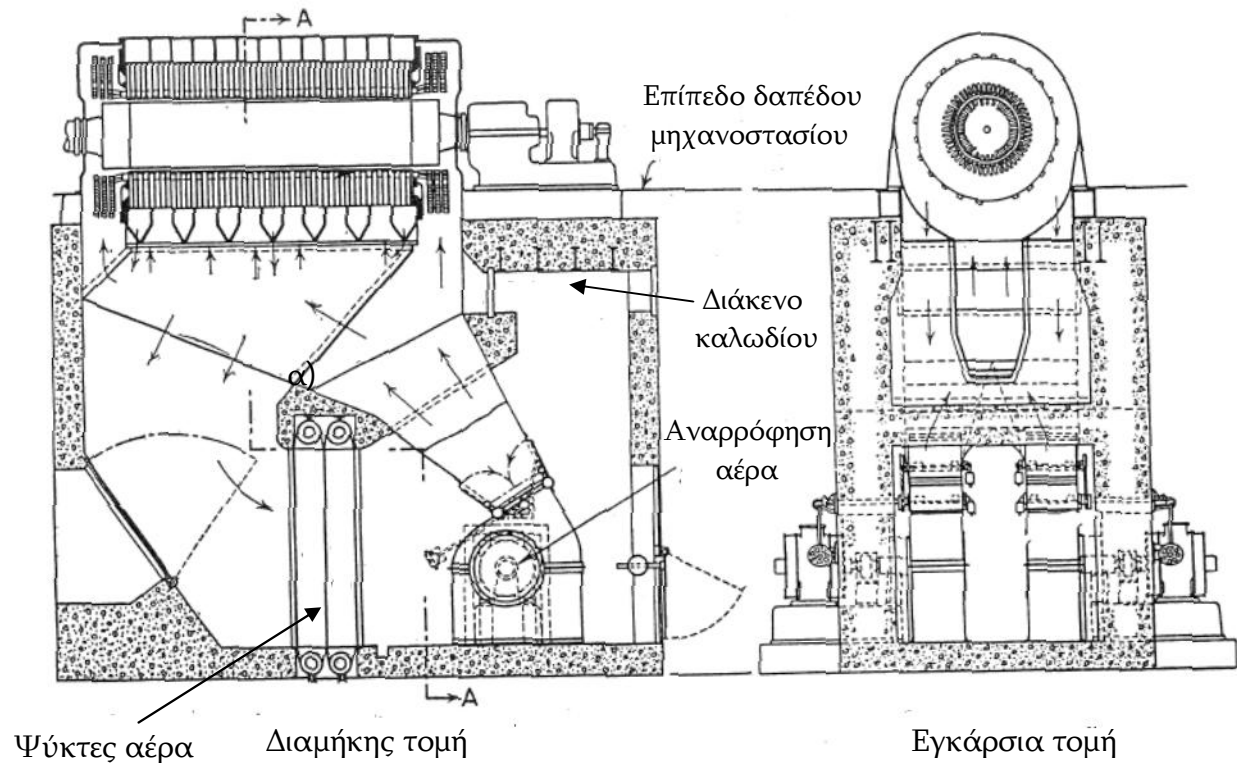
Η παρουσία θυλάκων αερίου θα αυξήσει σαφώς την κλίση της θερμοκρασίας (temperature gradient) ανάμεσα σε ένα μονωμένο αγωγό και την αύλακα του και, πρέπει να αποφευχθεί αυστηρά για αυτόν καθώς και για άλλους λόγους.

Σε μια μάζα που αποτελείται από πρεσαριστά τμήματα, η θερμότητα ρέει πιο εύκολα κατά τη διεύθυνση του μήκους της από ότι ανάμεσα από τα ελάσματα από τα οποία απαρτίζεται. Αυτό είναι καλό, διότι το αέριο παραλαμβάνει θερμότητα ευκολότερα από τις άκρες παρά από τις επίπεδες επιφάνειες. Αν μια δεσμίδα πρεσαριστών ελασμάτων διαθέτει πάχος w το οποίο μετριέται σε μέτρα (m) και ψύχεται και στις δύο πλευρές της τότε, η θερμότητα θα ρέει από το κέντρο της προς τα έξω. Η θερμότητα που διέρχεται κανονικά ως προς τη ροή από ένα στοιχειώδες πάχος dx το οποίο βρίσκεται σε απόσταση x μέτρων από το κέντρο της δεσμίδας των ελασμάτων ισούται με $p_x \times 1 \times 1$ ανά τετραγωνικό μέτρο και η στοιχειώδης διαφορά θερμοκρασίας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (2.126). Όπου p είναι η θερμότητα που παράγεται ανά κυβικό μέτρο του υλικού και ανά δευτερόλεπτο (m^3/sec). Επομένως, η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο κέντρο και μια από τις δύο πλευρές θα υπολογιστεί σύμφωνα με τη σχέση (2.127).

$$d\theta = p \cdot x \cdot \rho_i \cdot dx \quad (2.126)$$

$$\theta = p \cdot \rho_i \cdot \int_0^{w/2} x \cdot dx = p \cdot \rho_i \cdot w^2 / 8 \quad (2.127)$$

Σε όρους των ειδικών απωλειών του πυρήνα ρ_i οι οποίες μετρούνται σε W/kg και λαμβάνοντας το ειδικό βάρος ίσο με 7500, η θερμότητα p που παράγεται μπορεί να αντικατασταθεί από την τιμή $7.5 \cdot \rho_i$. Επιπρόσθετα, για ροές θερμότητας που διέρχονται κατά μήκος και διαμέσου των ελασμάτων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές της θερμικής αντίστασης για διάφορα υλικά που περιλαμβάνονται στον πίνακα 2.16



Σχήμα 2.56: Εξαναγκασμένος εξαερισμός. [Ξ59, Fig. 145 page 242]

2.7.3 Εκθετική αύξηση της θερμοκρασίας / Καμπύλες χρόνου

Εύκολα μπορεί να αποδειχθεί ότι ένα ομογενές σώμα αναπτύσσει θερμότητα στο εσωτερικό του με σταθερό ρυθμό ενώ, η θερμότητα απάγεται από αυτό με ένα ρυθμό ανάλογο της αύξησης της θερμοκρασίας του. Επιπρόσθετα, αυτό θα έχει μια μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας του η οποία θα είναι ευθέως ανάλογη με τη θερμότητα που αναπτύσσεται στη μονάδα του χρόνου και αντιστρόφως ανάλογη προς την απαγωγή της ανά βαθμό κελσίου αύξησης της θερμοκρασίας και ανά δευτερόλεπτο. Από την ψυχρή εκκίνηση η τελική σταθερή αύξηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται εκθετικά.

Αν υποθεθεί ότι μια μηχανή έχει επιτύχει μετά από παρέλευση χρόνου t δευτερολέπτων μια αύξηση της θερμοκρασίας ίση με θ . Σε ένα στοιχειώδη χρόνο ίσο με dt πραγματοποιείται μια στοιχειώδης αύξηση της θερμοκρασίας ίση με $d\theta$ ενώ, η στοιχειώδης θερμότητα που αναπτύσσεται προκύπτει από το γινόμενο $p \cdot dt$, η στοιχειώδης θερμότητα

τητα που αποθηκεύεται προκύπτει ίση με $G \cdot c_p \cdot d\theta$. Επιπρόσθετα, η στοιχειώδης θερμότητα που απάγεται αποδίδεται από το γινόμενο $S \cdot \theta \cdot \lambda \cdot dt$. Οι δύο τελευταίες παράμετροι αθροίζονται προκειμένου να προκύψει η συνολική στοιχειώδης θερμότητα που αναπτύσσεται σύμφωνα με τη σχέση (2.128) ή η σχέση (2.129).

$$G \cdot c_p \cdot d\theta + S \cdot \theta \cdot \lambda \cdot dt = p \cdot dt \quad (2.128)$$

$$\frac{d\theta}{dt} + \theta \cdot \frac{S \cdot \lambda}{G \cdot c_p} = \frac{p}{G \cdot c_p} \quad (2.129)$$

Πίνακας 2.17

Βασικές Παράμετροι Θερμοκρασίας – Απαγωγής Θερμότητας

Σύμβολο	Παράμετρος	Μονάδες Μέτρησης
p	Αναπτυσσόμενη θερμοκρασία	J / sec ή W
G	Βάρος ενεργών τμημάτων της μηχανής	kg
c_p	Ειδική θερμότητα	J / kg °C
S	Επιφάνεια ψύξης	m ²
λ	Ειδική απαγωγή θερμότητας	J / sec · m ² επιφάνειας · °C διαφορά θερμοκρασίας επιφάνειας περιβ/ντος ψυκτικού μέσου
$c = 1/\lambda$	Συντελεστής ψύξης	
θ	Αύξηση θερμοκρασίας	°C
θ_m	Τελική σταθερή αύξηση θερμοκρασίας	°C
t	Χρόνος	sec
τ	Σταθερά χρόνου θέρμανσης	sec
τ'	Σταθερά χρόνου ψύξης	sec

Η ανωτέρω διαφορική εξίσωση (2.129) επιλύεται με όρια $\theta = 0$ όταν $t = 0$ και, $\theta = \theta_m = p/S \cdot \lambda$ όταν $t = \infty$, και με αυτό τον τρόπο προκύπτει η παρακάτω έκφραση που εμφανίζεται στη σχέση (2.130).

$$\theta = \theta_m \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.130)$$

όπου: η παράμετρος τ ονομάζεται σταθερά χρόνου θέρμανσης και υπολογίζεται από τη σχέση (2.131).

$$\tau = G \cdot c_p / S \cdot \lambda \quad (2.131)$$

Για βαθμονομήσεις μηχανών σύντομης διάρκειας λειτουργίας η σταθερά χρόνου είναι σημαντική διότι καθορίζει τον αρχικό ρυθμό της αύξησης της θερμοκρασίας τη χρονική στιγμή $t = 0$ ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση (2.132).

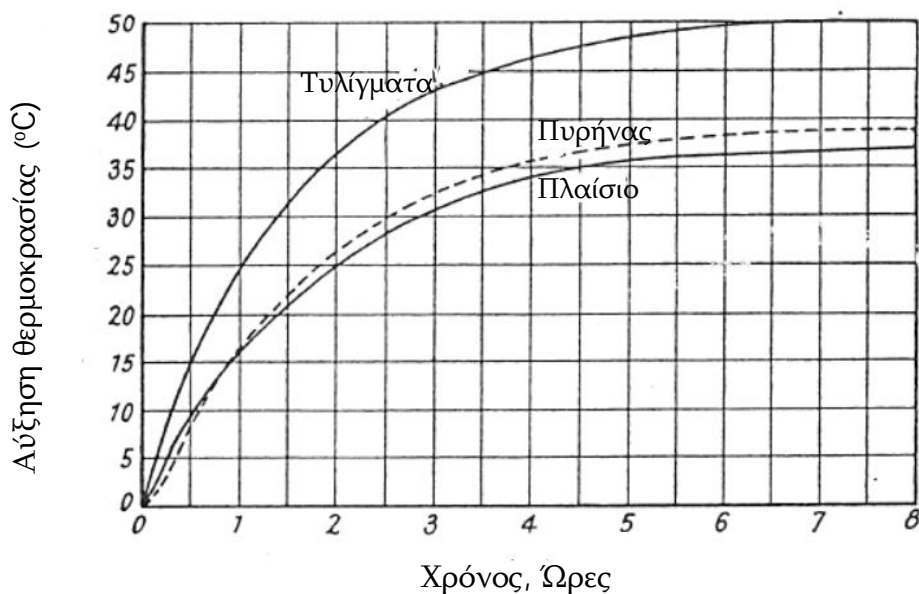
$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{t=0} = \frac{\theta_m}{\tau} \quad (2.132)$$

Εάν ερμηνευθεί με ένα άλλο τρόπο, η σταθερά τ είναι ο χρόνος στον οποίο η αύξηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνει το 0.632 της μέγιστης τιμής της θ_m , επειδή όταν ισχύει

$t = \tau$ η θερμοκρασία θ , υπολογίζεται από την εξίσωση (2.130) και προκύπτει ίση με $\theta = \theta_m \cdot (1 - \varepsilon^{-1}) = 0.632 \cdot \theta_m$.

Στο σχήμα 2.57 εμφανίζονται τυπικές καμπύλες αύξησης θερμοκρασίας / χρόνου που λαμβάνονται για ένα επαγωγικό ολόκλειστο κινητήρα μικρής ισχύος. Η εκθετική καμπύλη που βρίσκεται πλησιέστερα στη θερμοκρασία του πλαισίου θα έχει μια τελική αύξηση της θερμοκρασίας η οποία κατά προσέγγιση θα ισούται με 38°C και, φτάνει τιμή ίση με $0.632 \cdot \theta_m = 24^\circ\text{C}$ σε χρόνο περίπου ίσο με 6000 sec, ή 1 ώρα και 40 λεπτά ο οποίος, αποτελεί τη σταθερά του χρόνου θέρμανσης. Η τελική άνοδος της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων κατά προσέγγιση προκύπτει ίση με 52.5°C ενώ, το 0.632 της μέγιστης τιμής της η οποία προκύπτει ίση με 33°C επιτυγχάνεται κατά προσέγγιση σε χρονική περίοδο ίση με 1 ώρα και 30 λεπτά.

Φυσικά, αποτελεί μια υπέρ-απλούστευση η θεώρηση μιας μηχανής σαν ένα ομογενές σώμα. Στην πράξη αποτελείται από αρκετά τμήματα, κάθε ένα από τα οποία διαθέτει ένα χαρακτηριστικό εμβαδόν επιφάνειας, μια χαρακτηριστική θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα και ένα χαρακτηριστικό ρυθμό παραγωγής θερμότητας. Η αύξηση της θερμοκρασίας των διαφορετικών τμημάτων ή ακόμα και των διάφορων σημείων του ίδιου τμήματος μπορεί να προκύψει πολύ άνιση ιδιαίτερα στη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών με διακοπτόμενο φορτίο αλλά και στις περιπτώσεις εκείνες που αυτές διαθέτουν ισχυρό σύστημα ψύξης. Είναι απαραίτητο να πραγματοποιούνται εκτιμήσεις των θερμοκρασιών των θερμών σημείων στη σχεδίαση των ηλεκτρικών μηχανών έτσι ώστε, να καταστεί δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας των διάφορων τμημάτων τους με τη βοήθεια εμπειρικών μεθόδων.



Σχήμα 2.57: Αύξηση της θερμοκρασίας / καμπύλες χρόνου. [Ξ59, Fig. 146 page 245]

2.7.4 Συντελεστής Ψύξης

Για ηλεκτρικές μηχανές που έχουν βαθμονομηθεί για συνεχή λειτουργία, η καμπύλη της αύξησης της θερμοκρασίας είναι σχετικά ασήμαντη. Η τελική αύξηση της θερμο-

κρασίας θ_m αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα. Με την υπόθεση ότι η ψύξη με μεταφορά, αγωγιμότητα και ακτινοβολία είναι ανάλογη με την αύξηση της θερμοκρασίας τότε, ισχύει η σχέση (2.133).

$$\theta_m = p/S \cdot \lambda = c \cdot p/S \quad (2.133)$$

όπου : $c = 1/\lambda$ είναι ο συντελεστής ψύξης

Η εφαρμογή της εξίσωσης (2.133) μπορεί να γίνει με ασφάλεια μόνο όταν υπάρχει επαρκής αιτιολόγηση η οποία προέρχεται από τη διεξαγωγή κατάλληλων δοκιμών. Η μορφή της έκφρασης του συντελεστή ψύξης c εξαρτάται από την ταχύτητα κυκλοφορίας του αερίου ψύξης, την ταχύτητα του τμήματος που πρέπει να ψυχθεί, και τον τύπο της επιφάνειας από την οποία η θερμότητα πρέπει να απαχθεί.

Οι τυπικές τιμές του συντελεστή ψύξης c με όρους της ταχύτητας του τμήματος που μας ενδιαφέρει u και, η οποία μετρείται σε m/sec καθώς και του εμβαδού της επιφάνειας S το οποίο μετρείται σε m^2 παρατίθενται στον πίνακα 2.18.

Πίνακας 2.18 [Ξ59, Table page 246]

Συντελεστής Ψύξης			
Τμήμα	Συντελεστής Ψύξης c	Ταχύτητα Περιστροφής u	Σημειώσεις
Κυλινδρικές επιφάνειες του στάτη ή του δρομέα	$\frac{0.03 \text{ έως } 0.05}{1 + 0.1 \cdot u}$	Σχετική περιφερειακή ταχύτητα	Χαμηλότερες τιμές για εξαναγκασμένη ψύξη
Τμήμα πίσω από τον πυρήνα του στάτη	0.025 έως 0.04	0	
Περιστρεφόμενα πηνία διέγερσης	$\frac{0.08 \text{ έως } 0.12}{1 + 0.1 \cdot u}$	Περιφερειακή ταχύτητα επαγωγίμου	Βασισμένη στην συνολική επιφάνεια των πηνίων
	$\frac{0.06 \text{ έως } 0.08}{1 + 0.1 \cdot u}$		Βασισμένη μόνο στην εκτιθέμενη επιφάνεια των πηνίων
Διάκενα αερισμού στους πυρήνες	$\frac{0.08 \text{ έως } 0.2}{u}$	Ταχύτητα αέρα στα διάκενα	u λαμβάνεται ως $\frac{1}{10}$ της περιφερειακής ταχύτητας του πυρήνα

2.7.5 Αύξηση θερμοκρασίας

Η αύξηση της θερμοκρασίας των τμημάτων μιας ηλεκτρικής μηχανής μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια των παρακάτω μεθόδων:

1. Θερμόμετρο το οποίο εφαρμόζεται στην επιφάνεια του τμήματος. Αυτό δίνει τη θερμοκρασία της επιφάνειας μόνο σε ένα σημείο.
2. Ενσωματωμένος ανιχνευτής θερμοκρασίας (θερμο-ζεύγος ή πηνίο αντίστασης), το οποίο δίνει τη θερμοκρασία σε ένα εσωτερικό σημείο.
3. Αντίσταση η οποία, εμπλέκει τη μέτρηση της αντίστασης της ηλεκτρικής μηχανής τόσο σε ψυχρή όσο και σε θερμή κατάσταση εκτιμώντας τη μέση αύξηση με τη χρήση του θερμοκρασιακού συντελεστή της αντίστασης. Αυτή η διαδικασία διατίθεται μόνο για τα τυλίγματα.

Πίνακας 2.19 [Ξ59, Table page 247]

Όρια Αύξησης Θερμοκρασίας

Τμήμα	Μέθοδος Μέτρησης Θερμοκρασίας	Αύξηση Θερμοκρασίας °C		
		Κλάση Μόνωσης		
		A	B	H
Περιέλιξη στάτη				
Ονομαστική τάση < 1 kV	Θερμόμετρο	55	75	
Ονομαστική τάση 1 ÷ 16,5 kV				
Ισχύς < 5000 HP ή kVA	Αντίσταση	60	80	
Μήκος πυρήνα < 1 m				
	Ενσωματωμένος			
Ισχύς < 5000 HP ή kVA	ανιχνευτής	60	80	
Μήκος πυρήνα > 1 m	θερμοκρασίας (Ε.Α.Θ.)			
Ισχύς > 5000 HP ή kVA	Ε.Α.Θ.	-	80	
Τυλίγματα διέγερσης				
Έκτυποι πόλοι μιας στρώσης	Αντίσταση	65	90	
Άλλοι τύποι τυλιγμάτων	Αντίσταση	60	85	
Στροβίλο-εναλλακτήρων	Αντίσταση	65	90	
Τυλίγματα δρομέα				
Συνδεδεμένα σε συλλέκτη ή δακτυλίδια	Θερμόμετρο	55	75	
Βραχυκυκλωμένου δρομέα	Θερμόμετρο	65	90	
Συλλέκτες	Θερμόμετρο	55	65	
Δακτυλίδια	Θερμόμετρο	60	70	
Πυρήνες σε επαφή με μονωμένα τυλίγματα	Θερμόμετρο	Ίδια με εκείνα των τυλιγμάτων		
Βραχυκυκλωμένα τυλίγματα χωρίς μόνωση		Τιμές που δεν είναι ζημιογόνες		
Πυρήνες που δεν έρχονται σε επαφή με μονωμένα τυλίγματα				

Αυτές οι μέθοδοι δίνουν αποτελέσματα τα οποία δεν αναφέρονται στο ίδιο πράγμα και παρέχουν διαφορετικές βάσεις για την εκτίμηση των θερμοκρασιών των θερμών σημείων. Εάν ένας ενσωματωμένος ανιχνευτής θερμοκρασίας μπορεί να τοποθετηθεί κατά την κατασκευή της μηχανής σε ένα σημείο στο οποίο η εμπειρία δείχνει ότι η θερμοκρασία είναι μέγιστη τότε, αυτός θα δώσει μια ένδειξη της θερμοκρασίας του θερμού σημείου. Ωστόσο, στην πράξη το πρόβλημα των μονώσεων δεν επιτρέπει την τοποθέτηση των ανιχνευτών θερμοκρασίας αρκετά κοντά στους αγωγούς των τυλιγμάτων.

Βαθμονόμηση. Μια ηλεκτρική μηχανή υπό κανονικές συνθήκες βαθμονομείται σε μια θερμική βάση αύξησης της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τα Βρετανικά πρότυπα κανονισμών αναγνωρίζονται τρεις βαθμονομήσεις οι οποίες, πραγματοποιούνται σύμφωνα με τα φορτία τα οποία δύνανται να εξυπηρετηθούν από τη μηχανή χωρίς να πραγματοποιηθεί υπέρβαση των ορίων της αύξησης θερμοκρασίας τα οποία έχουν οριστεί όπως εμφανίζονται στον πίνακα 2.19 για τις διάφορες κλάσεις μόνωσης.

Οι ηλεκτρικές μηχανές κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις περιόδους λειτουργίας τους στις κατηγορίες που παρατίθενται παρακάτω:

- 1. Μέγιστη Συνεχόμενη Λειτουργία (Μ.Σ.Λ.).** Σε αυτή την κατηγορία λειτουργίας ορίζεται το φορτίο στο οποίο η μηχανή μπορεί να λειτουργεί για απεριόριστο χρονικό διάστημα. Μια μηχανή που ανήκει σε αυτή την κατηγορία δεν είναι ικανή για παρατεταμένη υπερφόρτωση αλλά, μπορεί να παρέχει σημαντική στιγμιαία υπερφόρτιση χωρίς να υποστεί βλάβη. Η λειτουργία αναγνωρίζεται για όλες τις γεννήτριες και τους κινητήρες που διαθέτουν μέγεθος που υπερβαίνει την ισχύ των 0.75 kW ή των 0.75 kVA ή του 1 HP ανά 1000 R.P.M.
- 2. Συνεχόμενη Λειτουργία που Επιτρέπει Υπερφόρτιση (Σ.Λ.Ε.Υ.).** Αυτή η κατηγορία λειτουργίας εφαρμόζεται μόνο σε κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος (D.C.) και σε επαγωγικούς κινητήρες ισχύος από 1 έως και 50 HP ανά 1000 R.P.M. και επιτρέπει 25 % υπερφόρτιση ροπής για περιορισμένες χρονικές περιόδους καθώς και υπερβάσεις ροπής για χρονικές περιόδους πολύ μεγαλύτερες των 15 δευτερολέπτων.
- 3. Λειτουργία Μικρής Χρονικής Διάρκειας (Λ.Μ.Χ.Δ.).** Αυτή είναι η ισχύς εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής στην οποία αυτή μπορεί να λειτουργεί για χρονική διάρκεια 1 ήμισής ώρας χωρίς να υπερβαίνει τα όρια που έχουν καθοριστεί για την άνοδο της θερμοκρασίας σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

Η μέγιστη συνεχόμενη λειτουργία και η συνεχόμενη λειτουργία που επιτρέπει υπερφόρτιση εξαρτώνται από την ψύξη αλλά, οι λειτουργίες μικρής χρονικής διάρκειας σε μεγάλο βαθμό είναι ένα θέμα θερμικής χωρητικότητας. Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι οι χρονικές λειτουργίες έχουν μόνο έμμεση σύνδεση με τον τύπο λειτουργίας μιας μηχανής. Μέσω αυτών επιτυγχάνεται μόνο η διαμόρφωση μιας συμβατικής μεθόδου αναπαράστασης της ικανότητας φόρτισης τους.

Προκαταρκτική Μελέτη Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου

3.1. Εισαγωγή

Όπως ήδη έχει προαναφερθεί οι ηλεκτρογεννήτριες που συνδέονται με τους υδροστροβίλους παρουσιάζουν τις εξής διαφοροποιήσεις έναντι των αντίστοιχων μονάδων των κλασικών θερμικών μονάδων:

- ❖ Είναι αργόστροφες λόγω της σύνδεσής τους με τους υδροστροβίλους περιορίζοντας την περιστροφική τους ταχύτητα σε μερικές εκατοντάδες στροφές το λεπτό, με συνέπεια η διαμόρφωσή τους να είναι συνήθως έκτυπων πόλων, ώστε να αποφευχθεί η χρήση κιβωτίου μετάδοσης.
- ❖ Στην περίπτωση που εμφανιστεί σφάλμα κατά την λειτουργία τους τότε, ενεργοποιούνται οι διατάξεις προστασίας τους έτσι ώστε, να επιτευχθεί η απόρριψη των ηλεκτρικών φορτίων που εξυπηρετούνται από αυτές. Εξαιτίας του γεγονότος ότι ο υδροστροβίλος συνήθως διαθέτει πολύ μικρότερη πολική ροπή αδράνειας έναντι των θερμικών κινητήριων μηχανών παρουσιάζει μεγάλες υπερταχύνσεις και μεγάλες ταχύτητες φυγής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι δρομείς των γεννητριών κατά τη διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων να περιστρέφονται με ταχύτητες που βρίσκονται εντός μιας περιοχής εύρους που κυμαίνεται από 180 % έως 280 % της ονομαστικής τους τιμής ενώ, για τις θερμικές μονάδες το αντίστοιχο μέγεθος δεν υπερβαίνει το 130 %. Επιπρόσθετα, για το λόγο αυτό, στα ανοικτοκυκλωμένα άκρα των τυλιγμάτων του στάτη αναπτύσσονται Η.Ε.Δ. με τιμή μεγαλύτερη από την ονομαστική με αποτέλεσμα να καταπονούνται οι μονώσεις τους ενώ, ταυτόχρονα αναπτύσσονται μεγάλες μηχανικές τάσεις.

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, η εύρεση τυποποιημένων ηλεκτρογεννητριών καθίσταται δύσκολη ακόμη και για υδροηλεκτρικές μονάδες μικρής ισχύος επομένως, απαιτείται η ειδική σχεδίαση των ηλεκτρογεννητριών. Προκειμένου αυτή η ειδική σχεδίαση να επιτευχθεί χρειάζεται να έχει γίνει μια ουσιαστική προμελέτη – εκτίμηση των μεγεθών της ηλεκτρογεννήτριας και του τρόπου φόρτισής της. Με τον τρόπο αυτό θα γίνει οικονομοτεχνικά ο βέλτιστος σχεδιασμός της λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος λειτουργίας της.

Ειδικότερα τα βήματα που ακολουθούνται σε επίπεδο αναγνωριστικής μελέτης είναι τα εξής [E7, παρ. 10.2, σελ. 406]:

1. **Αναγνώριση της περιοχής:** Αρχικά θα πραγματοποιηθεί μια πρώτη εκτίμηση της διάταξης και της χωροθέτησης του έργου. Έπειτα θα υλοποιηθεί η καταγραφή των δυσκολιών εκείνων εξαιτίας των οποίων μπορεί να ματαιωθεί η κατασκευή του έργου. Σε αυτές περιλαμβάνονται τόσο οι οικονομικές δυσκολίες που πρόκειται να αντιμετωπίσει το έργο κατά την κατασκευή των υποδομών του όσο και κοινωνικά και περιβαλλοντικά θέματα που σχετίζονται με αυτό. Επιπρόσθετα, ιδιαίτερη προ-

σοχή πρέπει να δοθεί στις γεωλογικές δυσκολίες αλλά και σε άλλες ανταγωνιστικές χρήσεις του νερού, όπως είναι η ύδρευση και η άρδευση. Εκτός από τον προσδιορισμό του σημείου κατασκευής της υδροηλεκτρικής μονάδας και την τοποθέτηση του σημείου υδροληψίας πρέπει να ακολουθηθεί μια συγκεκριμένη διαδικασία μέσω της οποίας θα καταστεί δυνατός ο προσδιορισμός των κύριων χαρακτηριστικών του μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί μια προκαταρκτική χάραξη του έργου σε γεωγραφικό χάρτη ή σε αεροφωτογραφίες με κλίμακα 1:50.000 και 1:5.000. Από αυτή προκύπτουν όλα τα υπόλοιπα κύρια χαρακτηριστικά όπως είναι η διαθέσιμη υδραυλική πτώση, η χάραξη διώρυγας (εφόσον υπάρχει) και η χάραξη του αγωγού προσαγωγής ενώ, θα πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των μηκών για τα προαναφερθέντα τμήματα.

2. **Συλλογή υπαρχόντων υδρολογικών στοιχείων:** Πραγματοποιείται η συλλογή και η αξιολόγηση των υπαρχόντων υδρολογικών δεδομένων, με έμφαση στις χρονοσειρές της παροχής. Αν τα διαθέσιμα στοιχεία δεν επαρκούν, τότε εφαρμόζονται μοντέλα εκτίμησης από την ίδια ή κάποια γειτονική λεκάνη απορροής ή μοντέλα υπολογισμού παροχής μέσω κατακρημνίσεων, τα οποία έχουν μεγαλύτερες αβεβαιότητες. Τα αντίστοιχα δεδομένα μπορούν να βρεθούν από τη Διεύθυνση Υδροηλεκτρικών Έργων της Δ.Ε.Η. ή τη Δ.Ε.Η. Ανανεώσιμων Πηγών, την Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (πρώην Ι.Γ.Μ.Ε.), το Υπουργείο Γεωργίας, τις Περιφέρειες, την Ε.Μ.Υ. και το Κ.Α.Π.Ε. Βασικό στόχο αποτελεί η εκτίμηση των ακόλουθων παραμέτρων:

- Της πραγματικής παροχής του υδατορέματος
- Της ελάχιστης παροχής του υδατορέματος
- Της παροχής συντήρησης προκειμένου να επιτευχθεί η κάλυψη των σχετικών περιβαλλοντικών περιορισμών
- Της αξιοποιήσιμης παροχής για το μικρό υδροηλεκτρικό έργο
- Της πλημμυρικής παροχής για τα σημεία ενδιαφέροντος

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την αναγνωριστική φάση χρησιμοποιούνται συχνά οι μαρτυρίες των κατοίκων της περιοχής σχετικά με τις πλημμυρικές στάθμες.

3. **Προκαταρκτική χάραξη του έργου:** Η χάραξη των έργων προσπέλασης στη θέση της υδροληψίας και του υδροηλεκτρικού σταθμού γίνεται σε χάρτη κλίμακας 1:5.000 με 1:50.000, ενώ εκτιμάται η απόσταση από την πλησιέστερη γραμμή διανομής (συνήθως μέσης τάσης), που θα μπορούσε να συνδεθεί με την έξοδο της υδροηλεκτρικής μονάδας. Τέτοιοι χάρτες δίνονται από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ) ή από εξειδικευμένες τοπογραφικές βάσεις δεδομένων ArcGIS.

4. **Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας:** Ακολούθως υπολογίζεται η ετήσια παραγόμενη ενέργεια για διάφορες τιμές της ονομαστικής παροχής και άρα της ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος και για την εγκατάσταση ενός ή περισσότερων υδροστροβίλων προσδιορίζοντας επιπλέον το συντελεστή φορτίου και το βαθμό ενεργειακής

αξιοποίησης της μικρής υδροηλεκτρικής μονάδας. Στην περίπτωση αυτόνομου ηλεκτρικού δικτύου χρειάζεται να μελετηθεί η εξασφάλιση επάρκειας ισχύος και ενέργειας υπό ικανοποιητικές συνθήκες αξιοπιστίας και ποιότητας ισχύος. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση αναπτυσσόμενου αυτόνομου ηλεκτρικού δικτύου από πλευράς ηλεκτρικού φορτίου η οικονομική βιωσιμότητα μίας μικρής υδροηλεκτρικής μονάδας είναι χειρότερη από εκείνη μίας αντίστοιχης μονάδας σ' ένα ισχυρό διασυνδεδεμένο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει διότι ενδέχεται να μην μπορεί να διατεθεί όλη η παραγόμενη ενέργεια από τη μονάδα κατά τα πρώτα χρόνια λειτουργίας της, εξαιτίας της μικρής ζήτησης φορτίου καθώς και της υπερδιαστασιολόγησης της προκειμένου να μπορεί να καλύψει τη μελλοντική ζήτηση φορτίου.

5. **Υπολογισμός κόστους επένδυσης:** Υλοποιείται για τις διάφορες τιμές της ονομαστικής παροχής και της εγκατεστημένης ισχύος, που βασίζεται σε προσεγγιστικές συσχετίσεις και την εμπειρία από παρόμοια έργα που έχουν ήδη κατασκευαστεί. Η πιο αναλυτική οικονομοτεχνική ανάλυση δεν είναι απαραίτητη, καθώς τα υπό διαμόρφωση στοιχεία της μονάδας μεταβάλλονται διαρκώς.
6. **Επαναληπτική διαδικασία:** Το 4^ο και το 5^ο βήμα επαναλαμβάνονται για διάφορες τιμές της ονομαστικής παροχής και πλήθος υδροστροβίλων, ώστε να εκτιμηθεί η βέλτιστη τιμή της, το πλήθος και η βέλτιστη τιμή της εγκατεστημένης ισχύος στροβίλων.
7. **Προτάσεις χρηματοδότησης του έργου:** Σε ένα πραγματικό έργο με βάση τα ταμειακά διαθέσιμα, το συνολικό επενδυτικό πρόγραμμα της επιχείρησης και τις δυνατότητες τραπεζικής δανειοδότησης διαμορφώνονται δυνατές οικονομικές προτάσεις, ώστε να βρεθεί η καταλληλότερη από πλευράς οικονομικής αξιολόγησης.
8. **Περιβαλλοντική προ-μελέτη:** Γίνεται καταγραφή των δυνατών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τρόπων αντιμετώπισής τους, ώστε να είναι δυνατή η άμεση και γρήγορη αδειοδότηση του έργου.
9. **Σύνταξη έκθεσης αναγνωριστικής φάσης:** Καταγράφονται τα προηγούμενα βήματα με έμφαση στην οικονομοτεχνική ανάλυση και την καταγραφή των σημείων που πρέπει να διερευνηθούν. Επίσης, το συμπέρασμά της πρέπει είναι η πρόταση ή μη της εκπόνησης της προκαταρκτικής μελέτης.

Στην περίπτωση προκαταρκτικής μελέτης καθορίζεται η βέλτιστη διάταξη από οικονομοτεχνική άποψη. Αυτή θα προκύψει μέσω της κατάλληλης διαστασιολόγησης των επιμέρους τμημάτων του έργου καθώς και της επιλογής του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Η υλοποίηση της επιτυγχάνεται εξετάζοντας τις περισσότερα υποσχόμενες από τις διάφορες εναλλακτικές λύσεις που έχουν προκύψει από την αναγνωριστική φάση. Το τμήμα της χρηματοδοτικής ανάλυσης του έργου γίνεται λεπτομερώς αναλύοντας και την ευαισθησία διάφορων οικονομοτεχνικών παραμέτρων. Τα βήματά της είναι τα εξής [E7, παρ. 10.3, σελ. 408]:

1. **Επανακαθορισμός της διάταξης του έργου:** Κατά τη φάση αυτή μπορεί να υπάρξει μικρή μετατόπιση της θέσης υδροληψίας, του σημείου τοποθέτησης της δεξαμενής

φόρτιση ή και της θέσης της υδροηλεκτρικής μονάδας σε σχέση με την αναγνωριστική φάση, προς αύξηση της ασφάλειας ή και τον περιορισμό του κατασκευαστικού κόστους ή των κατασκευαστικών προβλημάτων.

2. **Καταγραφή συνθηκών περιοχής:** Προκειμένου να επιτευχθεί η ακριβής χωροθέτηση του έργου με τα υποέργα από τα οποία απαρτίζεται αυτά, αποτυπώνονται τοπογραφικά σε κλίμακα 1:200 ή 1:500 σε μια ζώνη πλάτους 200 m γύρω από τον άξονα του. Με αυτή τη διαδικασία προσδιορίζονται με μεγάλη ακρίβεια το μήκος των έργων προσαγωγής και η υδραυλική πτώση. Σε επόμενο στάδιο πραγματοποιούνται τυχούσες τροποποιήσεις της διάταξης των έργων οι οποίες οφείλονται κυρίως σε κατασκευαστικούς λόγους και έπειτα χαράσσεται η μηκοτομή των έργων προσαγωγής. Πραγματοποιείται η επεξεργασία των γεωλογικών στοιχείων της περιοχής τα οποία, προέρχονται από γεωλογικούς χάρτες. Έπειτα, γίνεται η εκτέλεση όσων τοπικών γεωλογικών ερευνών είναι αναγκαίες από ειδικευμένο γεωλόγο εστιάζοντας σε εκείνες που αφορούν στη φύση και την ποιότητα του εδάφους έδρασης των έργων, προσπαθώντας να αποφευχθούν περιοχές με αστάθειες ή κατολισθήσεις. Οι υποδείξεις της γεωλογικής έκθεσης μπορούν να οδηγήσουν σε επαναχάραξη του έργου και της διαδρομής της διώρυγας προσαγωγής ή του αγωγού προσαγωγής, τα οποία λόγω του μεγάλου μήκους τους είναι πιο πιθανό να συναντήσουν ακατάλληλα εδάφη. Στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τα φράγματα που κατασκευάζονται έχουν μικρό ύψος ενώ, δεν απαιτείται ο σχηματισμός ταμιευτήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η γεωλογική μελέτη να είναι περιορισμένη. Σε αντίθεση, στα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα απαιτείται η κατασκευή φραγμάτων μεγάλου ύψους ενώ, απαιτείται ο σχηματισμός ταμιευτήρα. Συνεπώς, τόσο το φράγμα, όσο και ο ταμιευτήρας που σχηματίζεται απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή, διότι για φράγματα ύψους μεγαλύτερου των 10 m απαιτείται πρακτικά αναλυτική διερεύνηση της στεγανότητας της λεκάνης ανάντι του φράγματος.
3. **Συμπλήρωση και επιβεβαίωση των υδρολογικών στοιχείων.** Κατά την εκπόνηση της προκαταρκτικής μελέτης απαιτείται η συμπλήρωση των υδρολογικών στοιχείων και των χρονοσειρών παροχής στη θέση υδροληψίας. Οι χρονοσειρές αυτές συμπληρώνονται σε σχέση με τις αρχικές με κατάλληλη δειγματοληψία ή με ειδικά υδρολογικά μοντέλα. Προκειμένου να χαραχθεί η αντίστοιχη καμπύλη διάρκειας παροχής, χρησιμοποιούνται οι βροχοπτώσεις ή τα υδρολογικά στοιχεία γειτονικής λεκάνης απόρροης με παρόμοια σύνθεση με την εξεταζόμενη. Στα πλαίσια αυτά εκτιμώνται οι ακόλουθες παράμετροι:
 - Η ελάχιστη παροχή που πρέπει να υπάρχει στην κοίτη του ποταμού κάθε χρονική στιγμή για οικολογικούς και περιβαλλοντικούς λόγους.
 - Η πλημμυρική παροχή των τελευταίων εκατό ετών τουλάχιστον για τη διαστασιολόγηση του εκχειλιστή.
 - Η στάθμη του νερού του ποταμού στη θέση κατασκευής του σταθμού της υδροηλεκτρικής μονάδας, για την ορθή κατασκευή του αγωγού φυγής και τη μη έκθεση του σταθμού σε πλημμυρικά φαινόμενα στα κατόντι του.

Ο συνδυασμός της εκτίμησης των ανωτέρω παραμέτρων οδηγεί στην επιλογή και την αρχική διαστασιολόγηση του φράγματος και της λεκάνης απορροής.

4. **Διάταξη και διαστασιολόγηση του έργου:** Η ονομαστική παροχή λειτουργίας καθορίζεται μέσα από ένα πλήθος τιμών της ενώ, από αυτή θα προκύψει η εγκατεστημένη ισχύς της μονάδας. Ο προσδιορισμός των μεγεθών που έχουν προαναφερθεί συμπαρασύρει τα υπόλοιπα βήματα της διαστασιολόγησης του έργου τα οποία αναφέρονται παρακάτω:

- Τη διαστασιολόγηση της διώρυγας και του αγωγού προσαγωγής
- Τον υπολογισμό της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης
- Την επιλογή του τύπου και της ονομαστικής ισχύος του υδροστροβίλου ο οποίος θα επιτευχθεί καθορίζοντας την καμπύλη του ολικού βαθμού απόδοσης
- Την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα του υδροστροβίλου
- Τη διερεύνηση για τη χρησιμότητα της ύπαρξης κιβωτίου μετάδοσης ανάμεσα στον υδροστροβίλο και τη γεννήτρια.
- Τον τύπο της γεννήτριας και την ταχύτητα περιστροφής της.

Στην περίπτωση εκείνη που υπάρχει η δυνατότητα επιλογής διαφορετικών τύπων υδροστροβίλων στο εκάστοτε ονομαστικό σημείο λειτουργίας τότε, αυτές οι επιλογές πρέπει να εξεταστούν ξεχωριστά. Επιπρόσθετα, εξετάζεται και η εγκατάσταση ενός ή περισσότερων υδροστροβίλων ενώ, ως προς τη γεννήτρια θα επιλεγεί ο τύπος της (σύγχρονη ή ασύγχρονη).

5. **Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας:** Για καθεμία δυνατή λύση του προηγούμενου βήματος υπολογίζεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά έτος με βάση τα υδρολογικά στοιχεία.

6. **Εκτίμηση κόστους έργου:** Για κάθε μία δυνατή λύση του 4^{ου} βήματος προσδιορίζεται το συνολικό κόστος του έργου όπως διαμορφώνεται από τη διαστασιολόγηση των επιμέρους τμημάτων του. Αυτό προκύπτει είτε εμπειρικά με βάση τις συσχετίσεις από τα προηγούμενα παρεμφερή έργα που έχουν κατασκευαστεί είτε με αναλυτική κοστολόγηση. Προκειμένου να υλοποιηθεί η προαναφερθείσα αναλυτική κοστολόγηση του έργου λαμβάνονται υπόψη τα κόστη των επιμέρους τμημάτων του:

- Των μελετών
- Των έργων πολιτικού μηχανικού
- Του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού
- Της ελαχιστοποίησης αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Της σύνδεσης με το δίκτυο μεταφοράς ή διανομής ανάλογα με την εφαρμογή

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον υπολογισμό του κόστους σύνδεσης του έργου διότι, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι τόσο υψηλό που να κάνει την επένδυση απαγορευτική.

7. **Οικονομοτεχνική ανάλυση:** Για καθεμία δυνατή λύση του 4^{ου} βήματος πραγματοποιείται η οικονομική ανάλυση βιωσιμότητας και ο έλεγχος της οικονομικής ευαισθησίας της επένδυσης. Από αυτή προκύπτει η βέλτιστη λύση μέσω οικονομικών κριτηρίων, όπως της καθαρής παρούσας αξίας, του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης και της διάρκειας αποπληρωμής. Σ' αυτό το βήμα τελικά προσδιορίζονται η ονομαστική παροχή, η υδραυλική πτώση, ο τύπος και το πλήθος των υδροστροβίλων, ο τύπος και το πλήθος των γεννητριών. Στις επόμενες φάσεις (με-έτες εφαρμογής και κατασκευής του έργου) μπορούν να εμφανιστούν πρόσθετες δυσκολίες που καλύπτονται από τις απρόβλεπτες δαπάνες.
8. **Οριστικοποίηση διάταξης:** Από το 7^ο βήμα οριστικοποιείται η διάταξη και αποτυπώνονται σε σχέδια τα έργα που προτείνονται να υλοποιηθούν.
9. **Λεπτομερής ανάλυση κόστους:** Η εκτίμηση του κόστους του έργου γίνεται πλέον αθροίζοντας τα κόστη των επιμέρους τμημάτων έργου και εξοπλισμού. Αναλύεται χρηματοδοτικά το έργο και μελετάται η ευαισθησία των διάφορων παραμέτρων, π.χ. κόστος πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας.
10. **Σύνταξη χρονοδιαγράμματος εκτέλεσης έργων:** Για το χρονικό προγραμματισμό εκτέλεσης των έργων λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα υλοποίησης ή μη ορισμένων εργασιών κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών λόγω ιδιαίτερων συνθηκών.
11. **Σύνταξη προκαταρκτικής μελέτης:** Στη σχετική έκθεση περιλαμβάνονται τα τεχνικά σχέδια, οι υπολογισμοί και οι αναλύσεις, ενώ σε κάθε περίπτωση πρέπει να υπάρχει το συμπέρασμα αν το έργο είναι οικονομοτεχνικά βιώσιμο ή όχι.

Ακολούθως μπορούν να υλοποιηθούν οι φάσεις της μελέτης εφαρμογής, των αδειοδοτήσεων, της κατασκευής και της λειτουργίας, οι οποίες επί της παρούσης εργασίας δεν ενδιαφέρουν, αφού ο στόχος εδώ είναι η ορθή σχεδίαση ηλεκτρογεννήτριας για συγκεκριμένη μικρή υδροηλεκτρική μονάδα. Οπότε είτε πρέπει να γίνει η αναγνωριστική μελέτη και η προκαταρκτική μελέτη ως το 7^ο βήμα, είτε να υλοποιηθεί η ακόλουθη υβριδική μελέτη:

1. *Αναγνώριση & καταγραφή συνθηκών περιοχής – εύρεση σημείου υδροληψίας και σημείου τοποθέτησης σταθμού ηλεκτροπαραγωγής.*
2. *Συλλογή υδρολογικών στοιχείων προς εκτίμηση πραγματικής παροχής, αξιοποιήσιμης παροχής, πλημμυρικής παροχής στα σημεία ενδιαφέροντος.*
3. *Προκαταρκτική χάραξη του έργου με έμφαση σε διώρυγα και αγωγό προσαγωγής.*
4. *Διάταξη και διαστασιολόγηση του έργου με χρήση της ονομαστικής παροχής με έμφαση στη διατομή της διώρυγας και του αγωγού προσαγωγής, τον τύπο και το πλήθος του υδροστροβίλου & της ηλεκτρογεννήτριας και λοιπών ηλεκτρομηχανολογικών στοιχείων & έργων πολιτικού μηχανικού (διαστασιολόγηση υδροληψίας, εκχειλιστή / υπερχειλιστή, δεξαμενής καθίζησης / εξαμμωτή (εφόσον υπάρχει), δεξαμενής φόρπισης, διώρυγας / αγωγού φυγής).*

5. Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας με βάση την εκάστοτε ονομαστική παροχή και με έλεγχο περιορισμών σχετικών με το συντελεστή φορτίου και το βαθμό αξιοποίησης.
6. Εκτίμηση κόστους έργου με βάση ημι-εμπειρικές σχέσεις κόστους.
7. Οικονομοτεχνική ανάλυση μέσω οικονομικών κριτηρίων, όπως της καθαρής παρούσας αξίας, του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης, της διάρκειας αποπληρωμής.
8. Επαναληπτική διαδικασία προς βελτιστοποίηση εξετάζοντας ένα σύνολο δυνατών λύσεων επαναλαμβάνοντας τα βήματα 4 ως 7.
9. Οριστικοποίηση διάταξης με βάση τα αποτελέσματα του 8^{ου} βήματος.
10. Έλεγχος κριτηρίων οικονομικής βιωσιμότητας του έργου, περιβαλλοντικών περιορισμών από περιβαλλοντικής μελέτης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του 9^{ου} βήματος και εφόσον ικανοποιούνται τα στοιχεία του 10^{ου} βήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί η σχεδίαση της γεννήτριας.

3.2. Αναγνώριση και καταγραφή συνθηκών περιοχής μελέτης

Στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας πρόκειται να πραγματοποιηθεί η μελέτη ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου για τον ποταμό Κεφαλοπόταμο ο οποίος βρίσκεται στην τοπική κοινότητα Γοργογυρίου της δημοτικής ενότητας Κόζιακα του δήμου Τρικκαίων της περιφερειακής ενότητας Τρικάλων της περιφέρειας Θεσσαλίας, όπως αυτός εμφανίζεται στο σχήμα 3.1. Συγκεκριμένα βρίσκεται σε γεωγραφικό μήκος 21,587° E (ανατολικά), γεωγραφικό πλάτος 39,545° N (βόρεια), σε μέσο υψόμετρο από τη μέση στάθμη θάλασσας 206 m, διαθέτει συνολικό εμβαδόν 10.153 m² και 483 κατοίκους με βάση την απογραφή του 2011. Η ονομασία του χωριού οφείλεται στην ύπαρξη πολλών δριστελών (δριστέλλο ή ντριστελλο ή μαντάνι είναι νεροτριβή- βιολογικό πλυντήριο από φυσικά υλικά για πλύση ρούχων, χαλιών και κάθε είδους υφάσματος χωρίς απορρυπαντικό μόνο με νερό) και λόγω του τρόπου λειτουργίας τους προέκυψε η ονομασία τους [E12, ενότητα 3.2, σελ. 54-55].

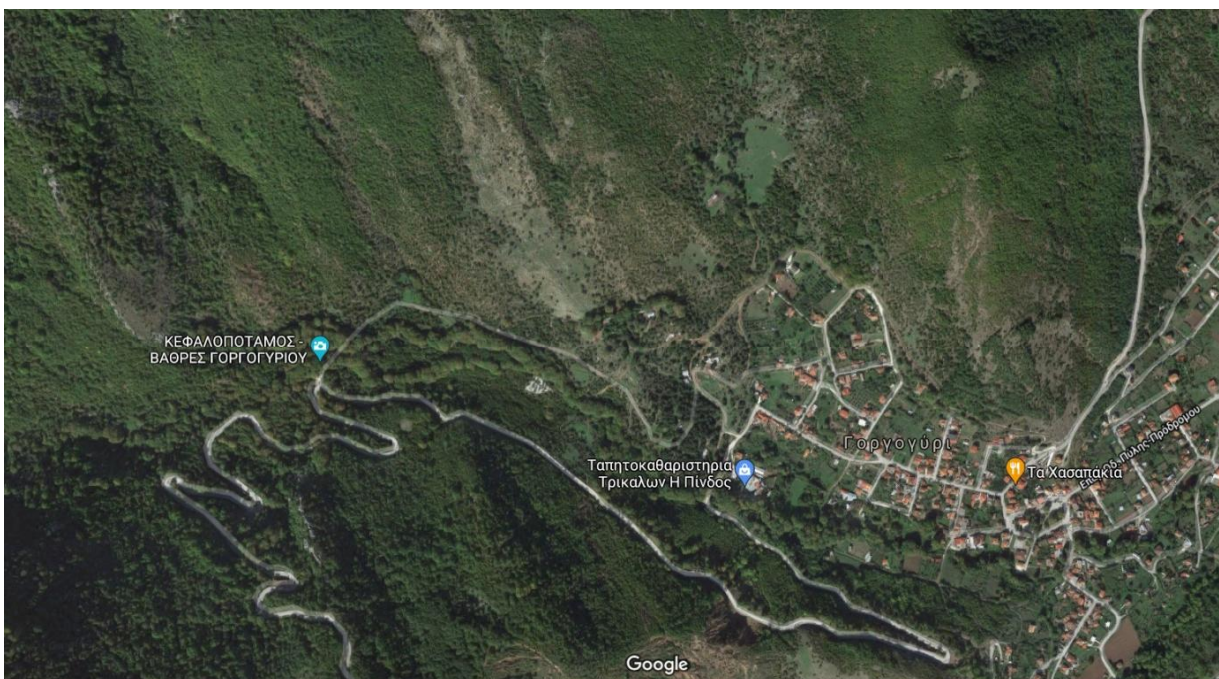
Ως προς το φυσικό περιβάλλον της περιοχής διαπιστώνονται συνοπτικά τα εξής:

- **Από πλευράς γεωλογίας:** Ανήκει στη γεωτεκτονική ζώνη Ωλόνου-Πίνδου, στην Υπερπινδινή υποζώνη με μεταβατικά ιζήματα μεταξύ της ζώνης της Πίνδου και της Υποπελαγονικής ζώνης. Οι ζώνες αυτές απαρτίζονται από διάφορα στρώματα πετρωμάτων και ιζημάτων τα οποία κατατάσσονται σε γεωλογικές περιόδους ανάλογα με τη χρονική στιγμή που έχει εκτιμηθεί ότι επήλθε ο σχηματισμός τους. Συγκεκριμένα στην περιοχή ενδιαφέροντος ανά γεωλογική περίοδο εμφανίζονται: Από τη *Μέση Τριαδική* αλπικοί δολομίτες και ασβεστόλιθοι, από την *Άνω Τριαδική* πελαγικοί ασβεστόλιθοι με παρεμβολές αργιλο-ψαμμιτικών και ηφαιστειοιζηματογενών υλικών και κετατόλιθοι, από την *Ιουράσια* ιζήματα βαθιάς θάλασσας, κερατόλιθοι, ραδιολαρίτες, άργιλοι, ψαμμίτες και πελαγικοί ασβεστόλιθοι σε μια ζώνη πάχους περί των 150-200 m, από τη *Μέση* και την *Ανώτερη Κρητιδική* έχουν αναπτυχθεί

οφιολιθικές μάζες και πεγαλικοί πλακοειδείς ασβεστόλιθοι με πυριτικές ενστρώσεις πάχους περί των 500 m, από την *Τριτογενή* (σημερινή ονομασία *Παλαιογενής*) δεύτερο στρώμα φλύσχη που πτυχώνεται για την τελική επικάθιση των μολασσοικών ολιγοκαινικών ιζημάτων της μεσοελληνικής αύλακας.

Στα στρώματα της ζώνης Ωλονού-Πίνδου εκδηλώθηκε η μοναδική πτύχωση κατά το *Κάτω Ολιγόκαινο* ή κατά το *Ηώκαινο*, την οποία ακολούθησε η προς τα δυτικά επώθηση της υπό μορφή τεκτονικού καλύμματος, ενώ παράλληλα έγινε η λεπίωση των στρωμάτων της με κατεύθυνση από τα ανατολικά προς τα δυτικά δημιουργώντας συνεχείς επαναλήψεις των στρωμάτων της ζώνης με αύξηση του φαινομενικού τους πάχους.

Στην ευρύτερη περιοχή του Γοργογυρίου κυριαρχεί η οροσειρά του Κόζιακα. Αυτή αποτελείται από εναλλαγές ασβεστόλιθων και ραδιολαριτών και έχει επιπτεύσει προς τα δυτικά το φλύσχη της Πίνδου. Στην περιοχή εμφανίζονται εναλλαγές ψαμμιτών, ασβεστιτικών, ψαμμιτικών και αργιλικών σχιστόλιθων με φακοειδείς ενστρώσεις κροκαλοπαγών ποικίλης λιθολογικής σύστασης και πάχους. Επιπρόσθετα, αυτή βρίσκεται σε επαφή στα ανατολικά με οφιόλιθους, ενώ στο σύνολό της διασχίζεται από ρήγματα ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ διευθύνσεων. Η τελευταία στρώση, δηλαδή οι μολασσοικοί σχηματισμοί της μεσοελληνικής αύλακας, δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον.

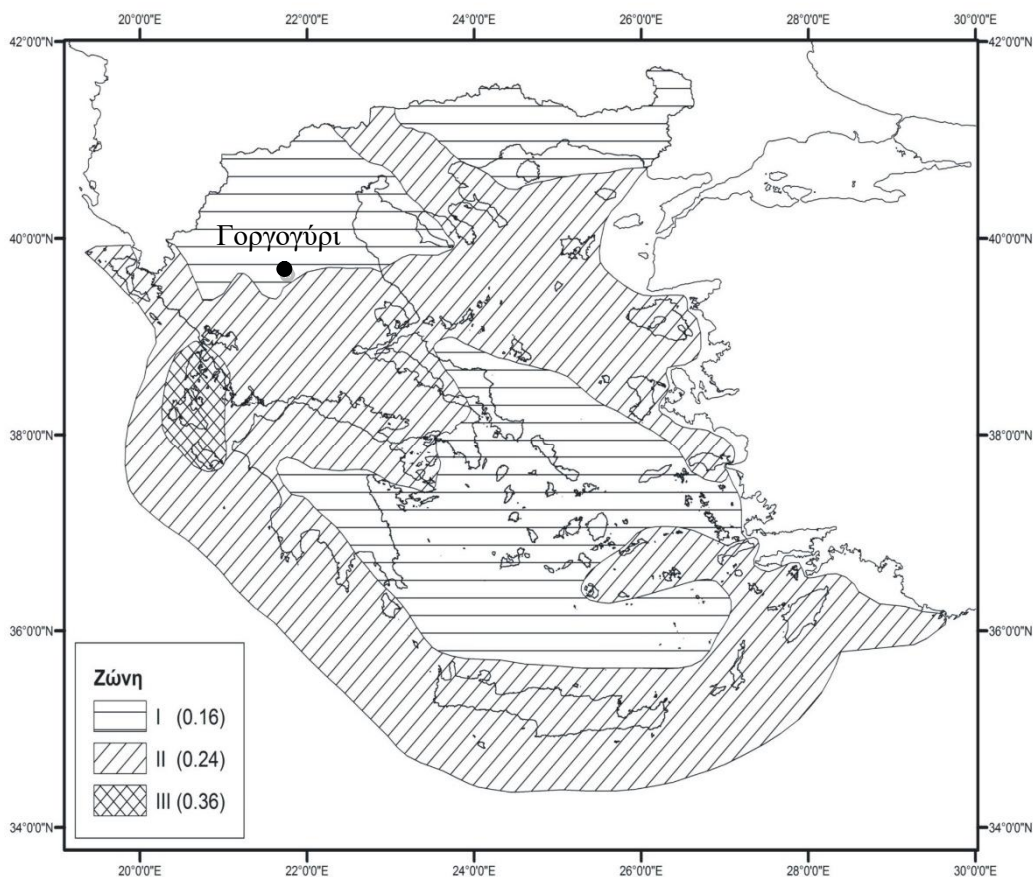


Σχήμα 3.1: Γενική θέση Γοργογύρι Τρικκαίων Τρικάλων Θεσσαλίας [googlemap]

- **Από πλευράς υδρογεωλογίας:** Αυτή επηρεάζεται τόσο από τους λιθολογικούς σχηματισμούς, όσο και από την τεκτονική διαμόρφωση (λέπια και επιπτεύσεις). Το αποτέλεσμα είναι η υπέρθεση υδροπερατών και αδιαπέρατων σχηματισμών, η διαμόρφωση τοπικών επιπέδων βάσης και ενδεχομένως η υδραυλική επικοινωνία μεταξύ σχηματισμών που ανήκουν σε διαφορετικές ενότητες. Επιπρόσθετα, είναι πιθανή η δημιουργία περίπλοκων υδρογεωλογικών συνθηκών. Μετά από εξέταση των

γεωλογικών σχηματισμών προέκυψε ότι, ο φλύσχης και οι μολασσοί σχηματισμοί είναι υδατοστεγείς. Αντίθετα οι κατακερματισμένοι ψαμμίτες μπορούν να αναπτύξουν υδροφορία στο εσωτερικό τους, ειδικά αν τα τμήματά τους είναι επιφανειακά. Στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται πηγές υπερχειλίσης και επαφής μεταξύ αργιλικών σχιστόλιθων και ψαμμιτών. Στους ασβεστόλιθους εμφανίζονται μεγάλες διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά τους οι οποίες, εξαρτώνται από τον κατακερματισμό και την καρστικοποίηση τους και μπορούν να οδηγήσουν σε υδροφορίες. Η ύπαρξη διαφόρων στρωματολογικών αδιαπέρατων σχηματισμών μορφής στεγανών διαφραγμάτων και το μικρό πάχος των μακροπερατών σχηματισμών οδηγούν σε μη ανάπτυξη αξιόλογου υδροφόρου ορίζοντα. Το φαινόμενο αυτό ενισχύεται από την ύπαρξη πολλών καρστικών πηγών μικρής παροχής ή εποχιακής συμπεριφοράς λόγω των ανωτέρω υδατοστεγανών στρωμάτων. Η υδατοστεγανότητα αυτή ευνοεί πολύ την επιφανειακή απορροή.

- **Από πλευράς σεισμικότητας:** Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό η περιοχή μελέτης ανήκει στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας I (χαμηλή σεισμικότητα). Όμως, κατά τα τελευταία 400 χρόνια έχουν παρουσιαστεί σεισμοί της τάξης μεγέθους των 6,5 Richter στην περιοχή των Μετεώρων, των 7,0 Richter στους Σοφάδες του Νομού Καρδίτσας, των 6,8 Richter στο Βελεστίνο του Νομού Μαγνησίας και των 6,3 Richter στη Λάρισα.
- **Από πλευράς κατολισθήσεων.** Από τους γεωλογικούς σχηματισμούς, ανομοιογενή υλικά με έντονα τεκτονική καταπόνηση, όπως ο φλύσχης, οι σχιστόλιθοι και τα ιζήματα της ζώνης μετάβασης, επιτρέπουν την επίδραση της διάβρωσης και της αποσάθρωσης, με συνέπεια να υπάρχει κίνδυνος κατολίσθησης. Έχουν αναφερθεί κατολισθήσεις που πραγματοποιήθηκαν το έτος 1980 οι οποίες, συνοδεύονταν από κινήσεις εδάφους τοπικής σημασίας και ερπυσμό στο δεξιό πρηνές του Κεφαλοπόταμου [E12, παρ. 3.3.6 σελ. 62].
- **Από πλευράς κλίματος:** Η ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας παρουσιάζει τη βασική κλιματική συμπεριφορά της Μεσογειακής λεκάνης. Στο Γοργογύρι κυριαρχεί το ηπειρωτικό κλίμα με κύρια χαρακτηριστικά του το θερμό και ξηρό καλοκαίρι και τον βροχερό χειμώνα με σημαντική χιονόπτωση. Ακόμη, αρκετοί μήνες διακρίνονται ως ψυχροί και υγροί ενώ, υπάρχει μεγάλη θερμοκρασιακή διακύμανση και χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Επιπρόσθετα, στην περιοχή επικρατούν κυρίως δυτικοί, βορειοδυτικοί και βόρειοι άνεμοι, αρκετά ασθενείς έντασης 1-2 Beaufort κατά το 50% του χρόνου ενώ, οι άνεμοι που έχουν ένταση μεγαλύτερη από 6 Beaufort σπανίζουν [E12, παρ. 3.4.3 σελ. 63-64 και παρ 3.4.4 σελ. 65]. Τα κύρια μετεωρολογικά δεδομένα μπορούν να επιβεβαιωθούν από τους κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς του Περτουλίου (39,53853° N, 21,46445° E, υψόμετρο 1170 m), του Μουζακίου (39,43115° N, 21,66175° E, υψόμετρο 175m) και της Καρδίτσας (39,55857° N, 21,76247° E, υψόμετρο 163 m).



Σχήμα 3.2: Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας [E13].

➤ **Από πλευράς υδατικών πόρων.** Η ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος διαρρέεται από τους ποταμούς Πορταϊκό και Πάμισο. Αμφότεροι είναι παραπόταμοι του ποταμού Πηνειού της Θεσσαλίας και ανήκουν στη λεκάνη απορροής του. Στο Γοργογύρι βρίσκεται ένας από τους δύο βασικούς παραποτάμους του Πορταϊκού, ο Κεφαλοπόταμος Γοργογυρίου ενώ, στο Ξυλοπάρικο εντοπίζεται το δεύτερο βασικό υδατόρεμα της περιοχής. Αυτός οφείλεται στον καρστικό σχηματισμό του Κόζιακα, ο οποίος απαρτίζεται από λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους των οποίων το εμβαδόν είναι της τάξης μεγέθους των διακοσίων τετραγωνικών χιλιομέτρων. Ο σχηματισμός αυτός αποφορτίζεται μέσω πηγών προς το ανατολικό τμήμα της θεσσαλικής πεδιάδας. Οι σημαντικότερες από αυτές τις πηγές βρίσκονται στη Γκούρα, στο Γοργογύρι και στο Ξυλοπάρικο ενώ, η μέση παροχή τους ισούται με $1,0 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Στη λεκάνη απορροής ενδιαφέροντος ανάντη και κατόντη του προγραμματιζόμενου σημείου υδροληψίας αφαιρείται ένα ποσοστό ίσο με το 5-10 % από το συνολικό δυναμικό της προκειμένου αυτό να χρησιμοποιηθεί για διάφορες χρήσεις όπως : ύδρευση, άρδευση και βιοτεχνική χρήση [E12, παρ. 3.4.5 σελ. 66-67].

➤ **Από πλευράς χλωρίδας.** Η ευρύτερη περιοχή ανήκει στην παραμεσογειακή λοφώδη-υποορεινή ζώνη βλάστησης η οποία αποτελεί άμεση προέκταση της ευμεσογειακής ζώνης βλάστησης. Η συγκεκριμένη ζώνη περιλαμβάνει δάση που αποτελούνται από

ξηρόφυλλα φυλλοβόλα και πλατύφυλλα δέντρα καθώς και δρυοδάση. Ειδικά η περιοχή του Γοργουρίου και ανάντι καλύπτεται στο μεγαλύτερο τμήμα της από δασώδη και θαμνώδη βλάστηση (κυρίως δυτικά του οικισμού), βοσκοτόπους και γεωργικές καλλιέργειες. Στα μεγαλύτερα υψόμετρα κυριαρχεί η ζώνη δασών οξυάς-ελάτης και ορεινών παραμεσογειακών κωνοφόρων με χαρακτηριστικό είδος την υβριδογενή ελάτη σε σχηματισμούς αμιγών, συμπαγών συστάδων σε υψόμετρα άνω των οκτακοσίων μέτρων. Στην περιοχή του έργου κυριαρχούν πλάτανοι της Ανατολής, ενώ χαμηλότερα υψομετρικά κυριαρχεί η παραμεσογειακή ζώνη βλάστησης με φυλλοβόλες πλατύφυλλες ή άμισχες δρύες ανάλογα με το αν υπάρχει μικρή ή μεγάλη υγρασία αντίστοιχα. Η υπόλοιπη βλάστηση είναι κατά κύριο λόγο ποώδης και λιγότερο θαμνώδης λόγω της εντατικής άσκησης της ελεύθερης κτηνοτροφίας [E12, ενότητα 3.5, σελ. 67-69].

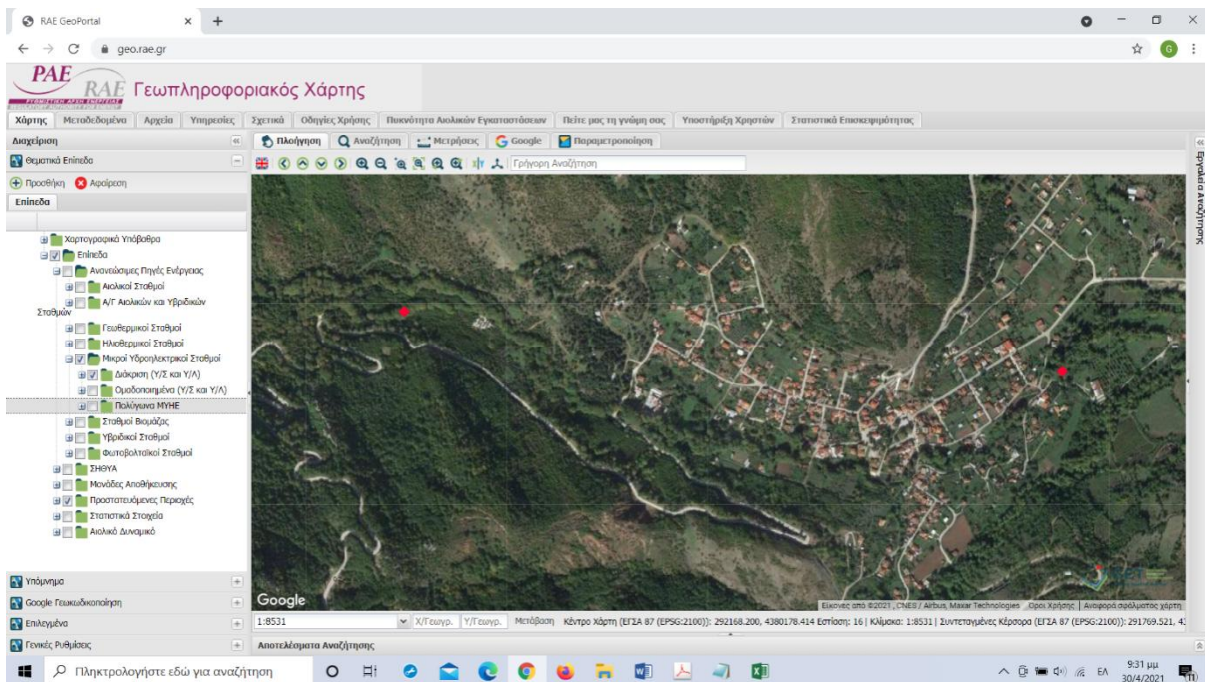
- **Από πλευράς πανίδας:** Τα μεγάλα θηλαστικά που συναντώνται στις ορεινές περιοχές του Κόζιακα και λιγότερο στις πεδινές εκτάσεις και στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι ο λύκος, το ζαρκάδι, το αγριογούρουνο, η βίδρα, η αρκούδα, η νυφίτσα, ο ασβός, ο λαγός, ο σκίουρος, η αλεπού, το κουνάβι και ο σκαντζόχοιρος. Υπάρχει απουσία αρπακτικών πουλιών, ενώ άλλα είδη πουλιών που συναντώνται στην ευρύτερη περιοχή είναι ο ασπροπάρης, το όρνιο, ο χρυσαετός, η κάργια, ο κόρακας, η καρκάξα. Ειδικά στο Γοργογύρι βρίσκει κανείς τρυγόνια, μπεκάτσες, φάσσες, τσίχλες, αγριοπερίστερα, καρδερίνες, κίσσες, δενδροτσοπανάκους, βλάχους, σπουργίτες, κότσυφες, πελαργούς, σαΐνια, πέρδικες και φασιανούς λόγω εκτροφής θηραμάτων, ενώ αγριόχηνες, αγριόπαπιες και νερόκοτες βρίσκονται μόνο σε βάλτους. Με βάση σχετικές παρατηρήσεις κατοίκων δεν ενδιαιτούν ψάρια στον Κεφαλοπόταμο, ενώ γύρω από τους οικισμούς και στις γεωργικές εκτάσεις συναντώνται σαύρες, φίδια, τρωκτικά και χελώνες [E12, ενότητα 3.6, σελ. 69-70].
- **Από πλευράς χρήσεων γης:** Το Γοργογύρι αποτελείται από 4.500 στρέμματα δασών, 3.400 στρέμματα καλλιεργούμενης γης (κυρίως ζαχαρότευτλα, μηδική και καλαμπόκι), 1.700 στρέμματα βοσκοτόπων και 600 στρέμματα οικιστικής έκτασης [E12, ενότητα 3.7, σελ. 71].
- **Από πλευράς παραγωγικών δραστηριοτήτων.** Στην περιοχή ενδιαφέροντος έχει αναπτυχθεί η γεωργία με την καλλιέργεια καλαμποκιού, ζαχαρότευτλων, κτηνοτροφικών φυτών και λιγότερο επιτραπέζιων ντοματών και φασολακίων, και η κτηνοτροφία με αιγοπρόβατα, χοιροειδή και πουλερικά και λιγότερο με μελίσσια και όνους. Η μεταποίηση είναι περιορισμένη πέρα των υδροτριβείων που χρησιμοποιούνται για το πλύσιμο φλοκατών [E12, ενότητα 3.8, σελ. 71-72].
- **Από πλευράς δικτύων υποδομής:** Περιβάλλεται από οδικούς άξονες καλής βατότητας, μέτριας οριζοντιογραφίας και γεωμετρικών στοιχείων και μεγάλο πλήθος αγροτικών δρόμων και χωματόδρομων. Υπάρχει στην ευρύτερη περιοχή ισχυρό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας των 400 kV (τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος), ενώ είναι αρκετά αναπτυγμένο το δίκτυο μέσης τάσης για τη σύνδεση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης καλύπτονται ικανοποιητικά

μέσω γεωτρήσεων, πηγαίων υδάτων μέσω δεξαμενών και εσωτερικών δικτύων διανομής. Αντίθετα υπάρχουν σημαντικές ελλείψεις από πλευράς διαχείρισης λυμάτων (ανυπαρξία δικτύου και συστήματος επεξεργασίας λυμάτων – χρήση οικιακών βόθρων) και απορριμμάτων (χρήση χωματερών) [E12, ενότητα 3.9, σελ. 72-73].

- **Από πλευράς κατάστασης περιβάλλοντος:** Στο οικιστικό τμήμα του Γοργογυρίου δεν υπάρχουν σημαντικά προβλήματα ρύπανσης και θα μπορούσαν να βελτιωθούν ακόμη περισσότερο οι περιβαλλοντικές συνθήκες, αν γινόταν κατάλληλη η διάθεση / επεξεργασία των οικιακών λυμάτων, των αποβλήτων των χοιροτροφείων και των οικιακών απορριμμάτων, αν περιοριζόταν η εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων για αρδευτικούς σκοπούς και η χρησιμοποίηση λιπασμάτων, αν δεν επιτρεπόταν η χρησιμοποίηση χρωστικών ουσιών και απορρυπαντικών κατά τη λειτουργία των υδροτριβείων, ειδικά κατά το καλοκαίρι λόγω μειωμένης παροχής νερού [E12, ενότητα 3.10, σελ. 73].

Με τη βοήθεια του γεωπληροφοριακού χάρτη της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.) έχει επιλεγεί μικρό υδροηλεκτρικό έργο στα δυτικά του Γοργογυρίου Κεφαλοποτάμου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Η θέση της υδροληψίας είναι ο αριστερός κόμβος με συντεταγμένες (39,550168° N, 21,574474° E, υψόμετρο 353 m), ενώ η θέση της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο δεξιός κόμβος (39,59491164° N, 21,592661° E, υψόμετρο 168 m). Οι θέσεις είναι πιο ξεκάθαρες στο σχήμα 3.4, ενώ στα σχήματα 3.5 και 3.6 εντοπίζονται τα αντίστοιχα υψόμετρα μέσω του δωρεάν ως προς χρήση γεωγραφικού χάρτη στη διεύθυνση <https://en-gb.topographic-map.com> με ρύθμιση στην εντολή Open Topo Map, όπου καταγράφονται και οι ισουψείς καμπύλες του τοπογραφικού χάρτη, όπως και τα υδατορέματα. Φαίνονται ότι τα αντίστοιχα υψόμετρα είναι 1160 ft στην υδροληψία, δηλαδή 1160*0,3048 m=353,568 m, και 550 ft στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή 550*0,3048 m=167,64 m. Ακολούθως η λεκάνη απορροής μπορεί να προσδιορισθεί μελετώντας ανάντι του σημείου υδροληψίας τα όριά της με βάση τις κορυφογραμμές που την περικλείουν, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7, μέσω σχεδιαστικού προγράμματος (π.χ. paint).

Εναλλακτικά η λεκάνη απορροής μπορεί να προσδιορισθεί με οπτική παρατήρηση της τρισδιάστατης απεικόνισης της περιοχής στο google map ανάντι του σημείου υδροληψίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8 και να χαραχθεί μία κλειστή γραμμή κατάλληλα. Ακολούθως πραγματοποιείται η δισδιάστατη προβολή από την οποία προκύπτουν μικροδιαφορές στο σχήμα 3.9 σε σχέση με την απεικόνιση του σχήματος 3.7. Τα αποτελέσματα του σχήματος 3.9 είναι πιο περιορισμένα από του σχήματος 3.7 (λόγω της μη καλής ευκρίνειας του τελευταίου δεν ήταν εύκολη η χάραξη του υδροκρίτη). Από το σχήμα 3.9 προσδιορίζεται εύκολα ότι το αντίστοιχο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης είναι 3,23 km² με ένα ενδεικτικό μέσο υψόμετρο περίπου στα 1100 m, καθώς κυριαρχούν τα μεγάλα υψόμετρα τόσο στα σχήματα 3.8 και 3.9, όσο και τα αντίστοιχα τμήματά τους στο σχήμα 3.7.

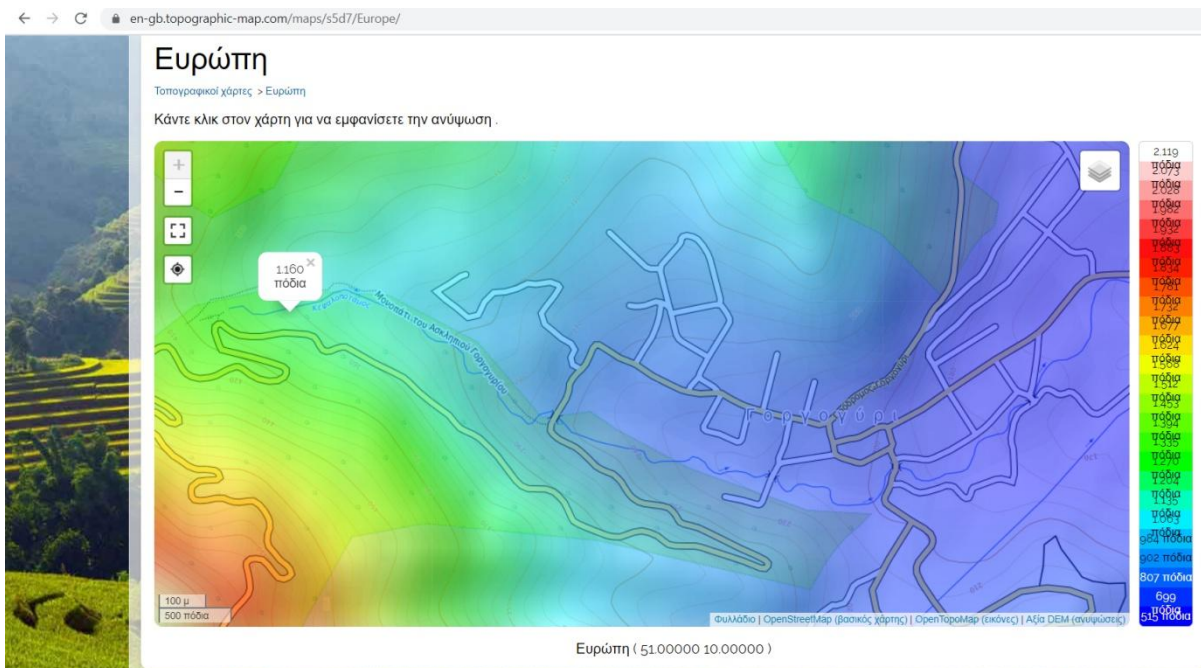


Σχήμα 3.3: Γεωπληροφοριακός χάρτης P.A.E. στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων.

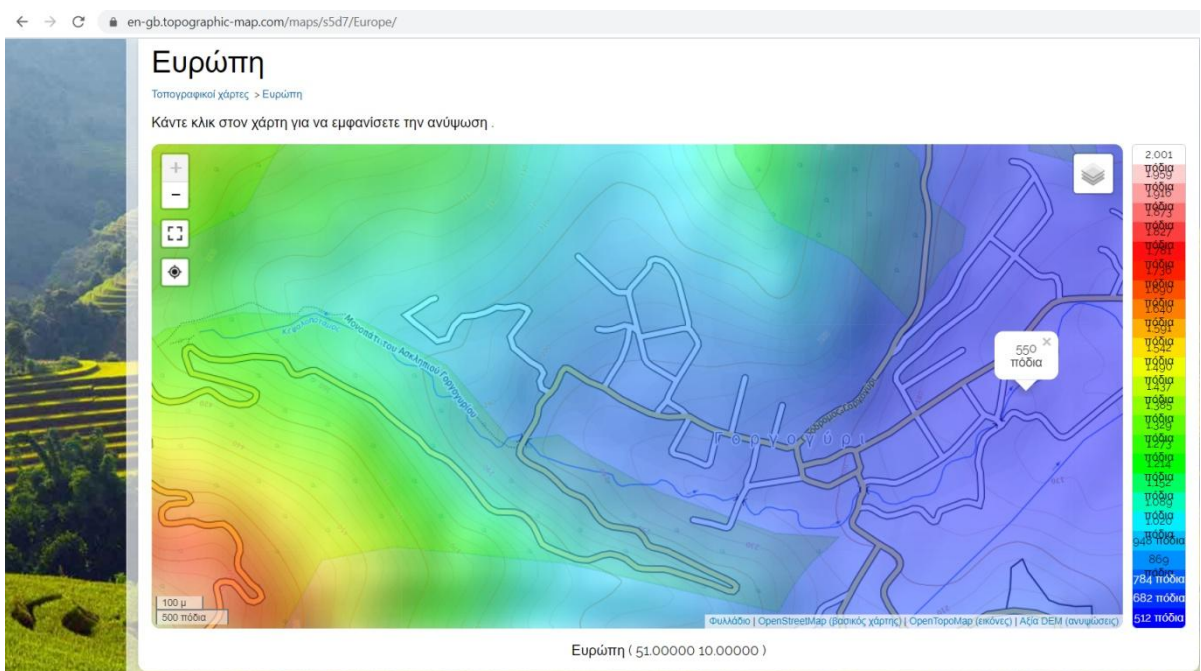


Σχήμα 3.4: Γεωπληροφοριακός χάρτης P.A.E. στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων (μεγέθυνση).

Αν η ίδια διαδικασία υπολογισμού του εμβαδού γίνει μέσω του γεωπληροφοριακού χάρτη της P.A.E. επιλέγοντας τις «Μετρήσεις» και στη συνέχεια «Μέτρηση εμβαδού» δημιουργώντας με διαδοχικά κλικ ένα πολύγωνο με αρχή και τέλος τη θέση υδροληψίας του σταθμού και έχοντας ως οδηγό την επιφάνεια του Google Earth ή του en-gb.topographic-map.com, τότε εμφανίζεται στο χάρτη το πολύγωνο και στο κέντρο του το εμβαδόν ίσο με 3,71 km², όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10. Έχει απόκλιση από την τιμή του σχήματος 3.9 λόγω της δυσκολίας ακριβούς μεταφοράς του υδροκρίτη στο γεωπληροφοριακό χάρτη της P.A.E..



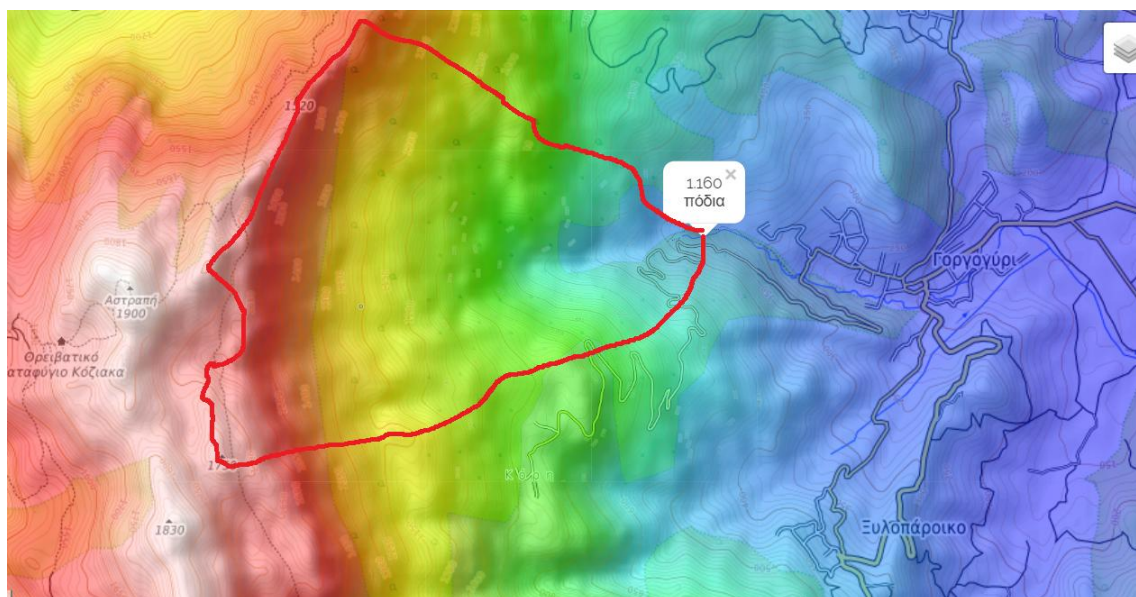
Σχήμα 3.5: Προσδιορισμός υψομέτρου υδροληψίας στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων μέσω γεωπληροφοριακού χάρτη (<https://en-gb.topographic-map.com>).



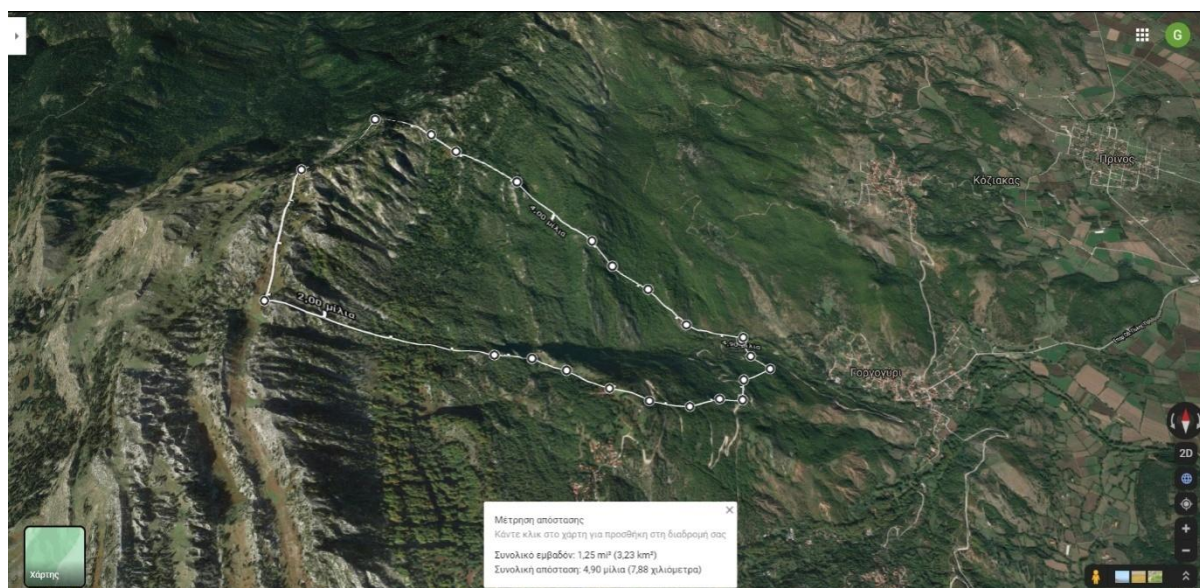
Σχήμα 3.6: Προσδιορισμός υψομέτρου σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων μέσω γεωπληροφοριακού χάρτη (<https://en-gb.topographic-map.com>).

Εναλλακτικά μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τους χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού κλίμακας 1:50000, όπως φαίνεται ο αντίστοιχος χάρτης του σχήματος 3.11. Σε αυτούς τους χάρτες, αν και παλαιοί, υπάρχουν χαραγμένα τα υδατορέματα και προσδιορίζεται πιο εύκολα η υδρολογική λεκάνη, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12 προσεγγίζοντας σε ικανοποιητικό βαθμό του σχήματος 3.9. Επίσης φαίνεται πιο καθαρά η συ-

μετοχή ενός τμήματος του όρους Κόζιακα στα δυτικά λόγω της διαμόρφωσης των τοπικών ρεμάτων. Ωστόσο το εμβαδόν της υδρολογικής λεκάνης είναι της τάξης των 3,4 km².

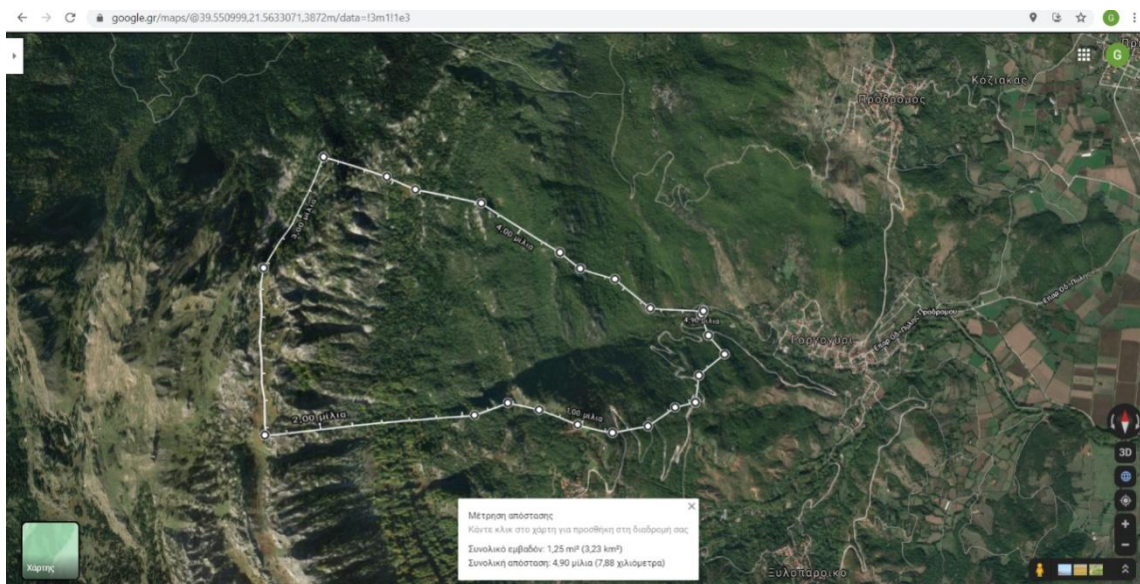


Σχήμα 3.7: Προσδιορισμός υδρολογικής λεκάνης από σημείο υδροληψίας στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων μέσω γεωπληροφοριακού χάρτη (<https://en-gb.topographic-map.com>).

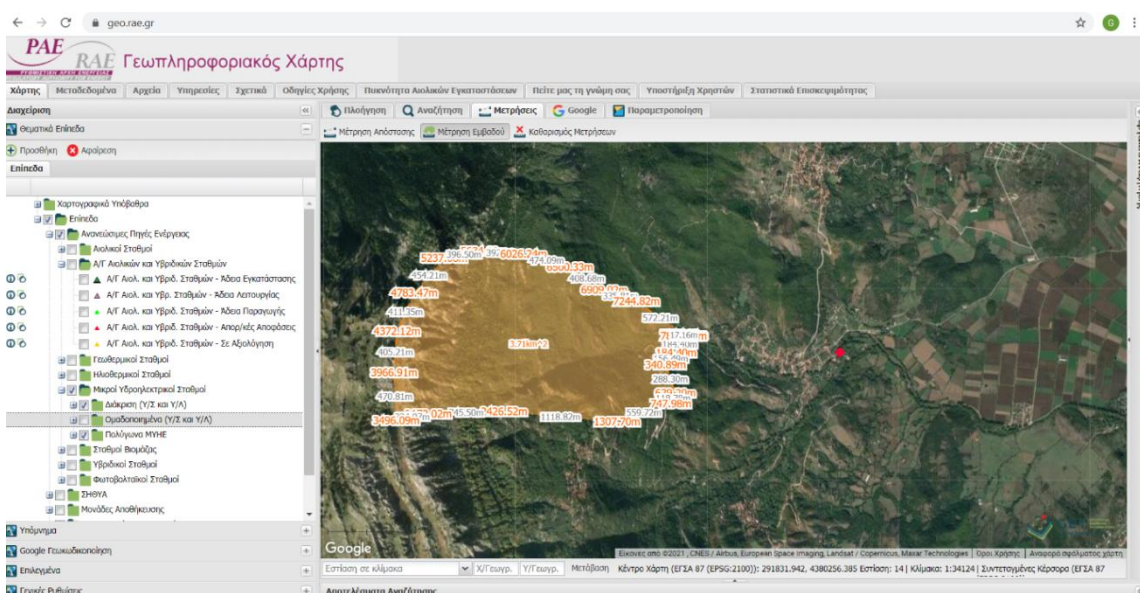


Σχήμα 3.8: Προσδιορισμός υδρολογικής λεκάνης από σημείο υδροληψίας στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων μέσω google map σε τρισδιάστατη απεικόνιση.

Το σημείο υδροληψίας έχει επιλεγεί σε αρχική θέση υδροληψίας απορριπτέας διαδικασίας αδειοδότησης, χαμηλότερα από το σημείο «Βάθρες Γοργογυρίου» που είναι περιοχή φυσικού κάλλους. Το σημείο σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει τοποθετηθεί πάλι σε αντίστοιχη θέση της προαναφερθείσας αδειοδότησης προς τα κατά



Σχήμα 3.9: Προσδιορισμός υδρολογικής λεκάνης από σημείο υδροληψίας στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων μέσω google map σε διδιάστατη απεικόνιση και υπολογισμός εμβαδού της.



Σχήμα 3.10: Προσδιορισμός υδρολογικής λεκάνης από σημείο υδροληψίας στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων μέσω γεωπληροφοριακού χάρτη της P.A.E. σε διδιάστατη απεικόνιση και υπολογισμός εμβαδού της.

κατάντη του ποταμού στην ανατολική έξοδο του χωριού εξασφαλίζοντας μία αρχική υψομετρική διαφορά της τάξης των 185 m. Θα μπορούσε κανείς να τον τοποθετήσει σε κοντινότερη απόσταση στη νοτιοδυτική είσοδο του χωριού επιτυγχάνοντας τη μη μείωση της διαθέσιμης παροχής στα ταπητοκαθαριστήρια η «Πίνδος» (αν και η χρήση τους είναι πολύ μικρό ποσοστό) και τον περιορισμό σε ενόχληση των ιδιοκτησιών του χωριού χάνοντας όμως ένα μεγάλο μέρος της υψομετρικής διαφοράς (άνω του 50%), καθώς θα επιτύγχανε κανείς υψόμετρο σταθμού παραγωγής τα 871 ft, δηλαδή 265 m, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13, οπότε η υψομετρική διαφορά θα ήταν της τάξης των 87

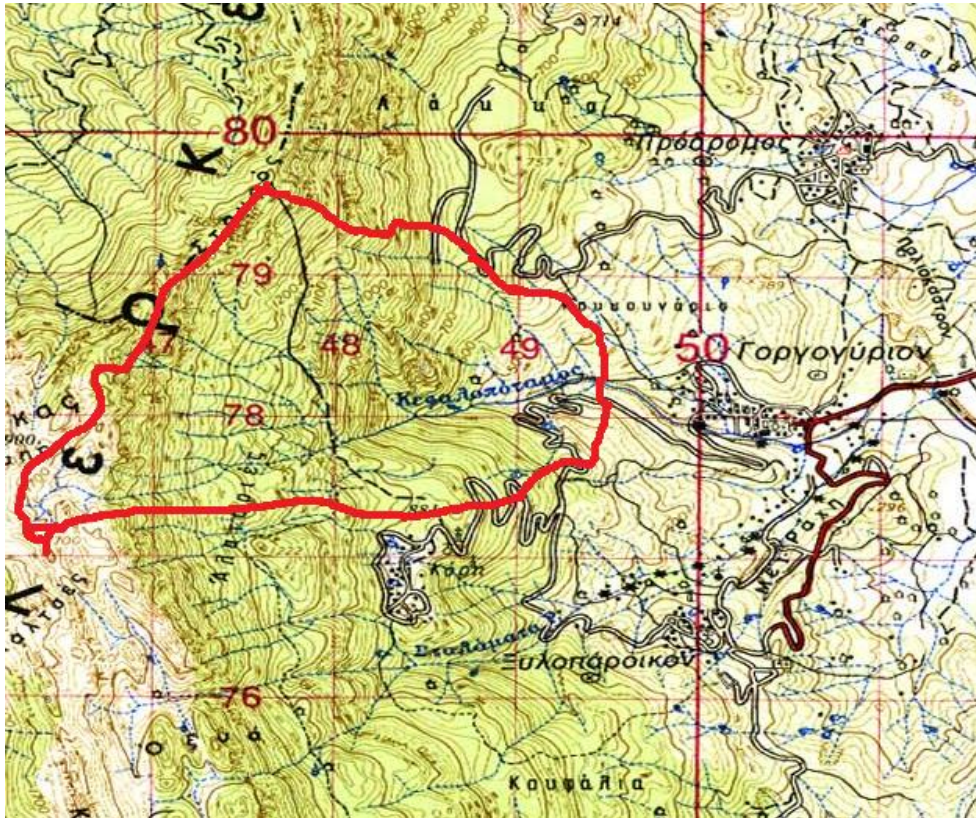
η. Επιπλέον το σύνολο των έργων θα γινόταν μέσα στη δασώδη έκταση στα νοτιοδυτικά του χωριού και το συνολικό μήκος του σωλήνα θα ήταν στα 550 m, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14. Ωστόσο όμως λόγω σημαντικού περιορισμού της διαθέσιμης υδραυλικής ισχύος δεν εξετάζεται περαιτέρω.



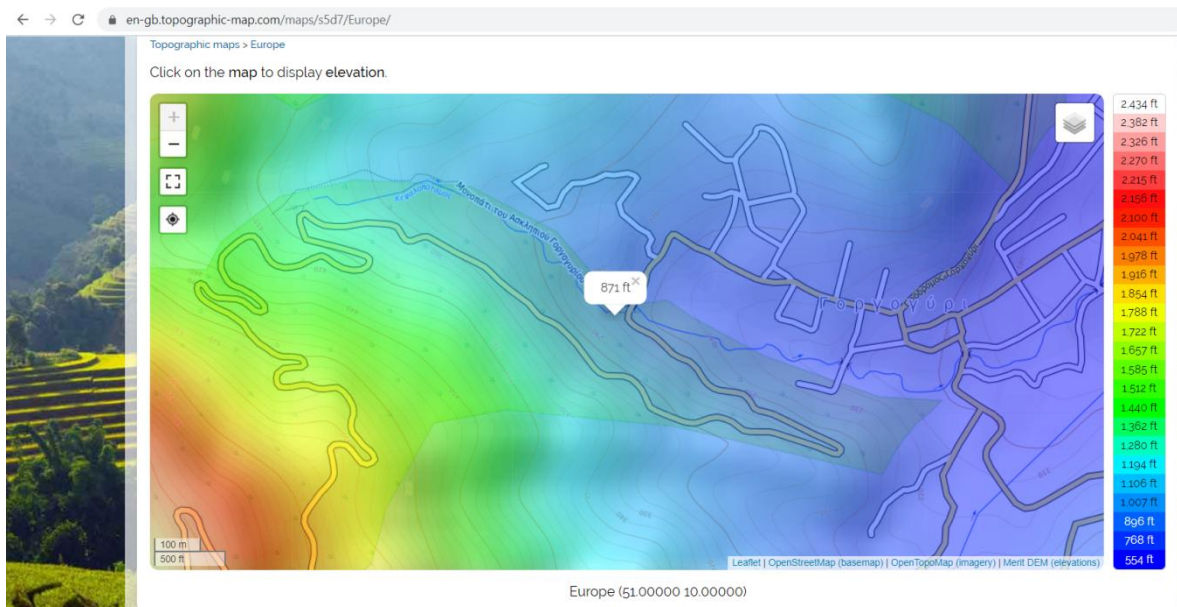
Σχήμα 3.11: Χάρτης Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.) περιοχής Καλαμπάκας (υπ. Αριθμό 132 σε κλίμακα 1:50.000) που περιέχει Γοργογύρι (εδώ σε σμίκρυνση).

3.3. Συλλογή υδρολογικών στοιχείων προς εκτίμηση πραγματικής παροχής αξιοποιήσιμης παροχής & πλημμυρικής παροχής

Η πραγματική παροχή μπορεί να εκτιμηθεί είτε μέσω των μηνιαίων κατακρημνισμάτων αρκετά προσεγγιστικά, είτε μέσω μετρήσεων. Στην πρώτη περίπτωση συλλέγονται μέσω μετεωρολογικών σταθμών τα αντίστοιχα δεδομένα. Στο σχήμα 3.15 καταγράφονται οι τρεις πιο κοντινοί μετεωρολογικοί σταθμοί στο Γοργογύρι Τρικάλων (Περτούλι, Μουζάκι, Τρίκαλα). Θα έπρεπε να σχεδιαστεί και ο σταθμός της Καλαμπάκας που είναι στα βόρεια- βορειανατολικά σε μεγάλη όμως απόσταση, όπου όμως θα μίκρυναν πολύ ο σχετικός χάρτης και δε θα φαινόταν η περαιτέρω επεξεργασία. Επιπλέον δεν εμπλέκεται τελικά στους υπολογισμούς.



Σχήμα 3.12: Προσδιορισμός υδρολογικής λεκάνης από σημείο υδροληψίας (κόκκινη γραμμή) στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων μέσω χάρτη Γ.Υ.Σ. περιοχής Καλαμπάκας.



Σχήμα 3.13: Προσδιορισμός υψόμετρου σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων πλησίον της νοτιοδυτικής εισόδου του ομώνυμου χωριού μέσω γεωπληροφοριακού χάρτη (<https://en-gb.topographic-map.com>).

Στη συνέχεια χαράσσονται οι αποστάσεις των μετεωρολογικών σταθμών (μαύρες γραμμές) και τοποθετούνται οι μεσοκάθετες τους (κόκκινες γραμμές) για το σχηματισμό

Πίνακας 3.1

**Δεδομένα μηνιαίων και ετήσιων βροχοπτώσεων [mm] μετεωρολογικού
σταθμού στο Περτούλι από Εθνικό Αστεροσκοπείο**

(σε κίτρινο φόντο τιμές που δεν υπάρχουν ή οφείλονται σε εσφαλμένες μετρήσεις,
ο υπολογισμός των μέσων τιμών έγινε χωρίς αυτές)

Έτος	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Ετήσιο Σύνολο
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	186,8	229,4	
2009	211,8	148,0	226,6	107,8	54,8	51,4	45,6	33,2	35,0	353,8	180,0	333,4	1781,4
2010	196,6	285,4	127,6	72,2	116,0	62,4	68,4	11,8	167,6	333,0	0,0	25,2	1466,2
2011	0,0	0,0	157,6	111,5	143,6	99,0	0,4	52,2	74,2	120,7	14,6	160,0	933,8
2012	95,0	224,6	109,2	326,8	155,0	12,6	24,8	45,0	76,8	354,0	182,1	304,8	1910,7
2013	341,4	221,0	293,0	84,0	109,3	38,0	0,6	1,2	69,2	63,6	293,4	130,4	1645,1
2014	128,8	75,8	186,8	157,4	32,1	62,2	21,4	28,4	111,2	193,0	118,7	223,4	1339,2
2015	264,2	232,1	164,0	91,4	50,4	144,0	43,8	89,6	197,0	164,6	235,5	20,4	1697,0
2016	242,0	196,4	196,4	43,2	221,6	38,6	48,8	105,4	305,6	193,6	286,2	7,0	1884,8
2017	150,6	129,8	111,4	44,4	89,2	59,0	93,8	21,4	143,2	74,6	300,0	300,8	1518,2
2018	127,6	376,6	271,6	50,4	90,2	101,0	66,2	41,8	31,6	44,0	291,0	109,0	1601,0
Μέσες τιμές	195,3	210,0	184,42	108,91	106,22	66,82	41,38	43	121,14	205,66	208,83	189,96	1681,6

Πίνακας 3.2

Μετεωρολογικά δεδομένα στο Περτούλι από www.meteoblue.com & [E12, πιν. 9, σελ. 64]

(σε κίτρινο φόντο εσφαλμένες τιμές που παρατηρεί ο συγγραφέας)

Έτος	Μέση μέγιστη θερμοκρασία [°C]	Μέση ελάχιστη θερμοκρασία [°C]	Μέσο ετήσιο ύψος βροχής [mm]	Μέσο ετήσιο ύψος χιονόπτωσης [mm]	Μέσο ετήσιο ύψος κατακρημνισμάτων [mm]
2008	27,5	-14,0	1220,0	250,0	1470,0
2009	31,5	-13,5	1370,0	181,5	1551,5
2010	32,5	-13,5	1151,5	273,0	1424,5
2011	27,5	-18,0	1186,7	326,0	1390,3
2012	34,5	-12,0	769,9	90,0	886,9
2013	32,5	-16,0	877,4	265,5	1142,9
2014	31,5	-8,5	989,0	210,0	1199,0
2015	29,5	-13,0	1112,5	233,0	1345,5
2016	35,0	-15,0	1008,5	180,0	1188,5
2017	31,5	-16,0	959,2	587,5	1346,7
2018	27,5	-14,0	1220,0	250,0	1470,0

Χρησιμοποιώντας τα μετεωρολογικά δεδομένα του πίνακα 3.1 ως πιο πλήρη και επειδή διαφέρει η υψομετρική θέση του σταθμού μέτρησης στο Περτούλι (1170 m) με το μέσο υψόμετρο της υδρολογικής λεκάνης (1100 m), διορθώνονται οι τιμές των μέσων

μηνιαίων κατακρημνίσεων αφαιρώντας τις αντίστοιχες βροχοβαθμίδες ανά μήνα για την υδρολογική λεκάνη Αλή Εφέντη που ανήκει η λεκάνη Γοργογυρίου σύμφωνα με το [Ε14, πιν. 08 σελίδας 70] και προκύπτουν οι μέσες μηνιαίες και ετήσιες κατακρημνίσεις σε υδρολογική λεκάνη σημείου υδροληψίας Γοργογυρίου του πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3

Δεδομένα μηνιαίων και ετήσιων βροχοπτώσεων [mm] στο Γοργογύρι μετά από διόρθωση βροχοβαθμίδας πίνακα 3.1.

Έτος	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Ετήσιο Σύνολο
Βροχοβαθμίδα [mm/100m]	9,9	10,3	7,9	7,5	5,9	1,8	1,1	1,8	3,3	9,5	12,1	16,4	87,2
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	178,3	217,9	
2009	204,9	140,8	221,1	102,6	50,7	50,1	44,8	31,9	32,7	347,2	171,5	321,9	1720,4
2010	189,7	278,2	122,1	67,0	111,9	61,1	67,6	10,5	165,3	326,4	-	-	-
2011	-	-	152,1	106,3	139,5	97,7	-0,4	50,9	71,9	114,1	6,1	148,5	-
2012	88,1	217,4	103,7	321,6	150,9	11,3	24,0	43,7	74,5	347,4	173,6	293,3	1849,7
2013	334,5	213,8	287,5	78,8	105,2	36,7	-0,2	-0,1	66,9	57,0	284,9	118,9	1584,1
2014	121,9	68,6	181,3	152,2	28,0	60,9	20,6	27,1	108,9	186,4	110,2	211,9	1278,2
2015	257,3	224,9	158,5	86,2	46,3	142,7	43,0	88,3	194,7	158,0	227,0	8,9	1636,0
2016	235,1	189,2	190,9	38,0	217,5	37,3	48,0	104,1	303,3	187,0	277,7	-4,5	1823,8
2017	143,7	122,6	105,9	39,2	85,1	57,7	93,0	20,1	140,9	68,0	291,5	289,3	1457,2
2018	120,7	369,4	266,1	45,2	86,1	99,7	65,4	40,5	29,3	-	282,5	-	-
Μέσες τιμές	188,4	202,8	178,9	103,7	102,1	65,6	40,6	41,7	118,8	199,0	200,4	178,5	1620,6

Με βάση το εμβαδόν της επιφάνειας της υδρολογικής λεκάνης που είναι ίσο με 3,4 km² εκτιμάται το σύνολο των κατακρημνισμάτων που πέφτουν σε αντίστοιχη υδρολογική λεκάνη του σημείου υδροληψίας στο Γοργογύρι, όπως καταγράφεται στον πίνακα 3.4, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_{\pi} \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{h[mm]/1000 \cdot A[km^2] \cdot 1000000}{t_{\pi}[\etaμέρες] \cdot 24 \cdot 3600} = \frac{h[mm] \cdot A[km^2]}{t_{\pi}[\etaμέρες] \cdot 86,4} \quad (3.1)$$

Όπου Q_{π} είναι η παροχή της περιόδου υπό μελέτη χρονικής διάρκειας t_{π} με συνολικό ύψος κατακρημνισμάτων h για υδρολογική λεκάνη εμβαδού A .

Ένα μέρος της συνολικής παροχής Q_{π} που κατακρημνίζεται μεταφέρεται σε αναμενόμενη επιφανειακή παροχή Q_{ε} που διέρχεται από το σημείο υδροληψίας που ανέρχεται σε ποσοστό απορροής α_{ε} , το οποίο για μία δασώδη περιοχή με έντονη κλίση ανέρχεται σε 40%, οπότε η αναμενόμενη επιφανειακή παροχή καταγράφεται στον πίνακα 3.5 και δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{\varepsilon} \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{\alpha_{\varepsilon}[\%]}{100\%} \cdot Q_{\pi} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (3.2)$$

Ωστόσο, οι αντίστοιχες τιμές υπολείπονται σημαντικά έναντι των πραγματικών παροχών που δίνονται από το ΕΑΓΜΕ (πρώην ΙΓΜΕ) με σταθμήμετρο (39,8667° N, 21,56 67° E, υψόμετρο 300 m), όπως φαίνονται στον πίνακα 3.6 [Ε12, πιν.12, σελ.76]. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη καρστικού γεωλογικού υποβάθρου και τη μεταφορά νερών από άλλες λεκάνες απορροής στη λεκάνη υπό μελέτη με τη μορφή πηγών – υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα (βλ. ενότητα 3.2 περί υδατικών πόρων). Βέβαια η υδρολογική λεκάνη του σημείου υδροληψίας αφορά σε υψόμετρο των 353 m, ενώ οι μετρήσεις του πίνακα 3.6 έχουν γίνει σε ύψος 300 m. Όμως η διαφορά αναμένεται να είναι μηδαμινή, διότι λόγω του έντονου αναγλύφου μεταξύ των δύο κοντινών αυτών σημείων δε φαίνεται να υπάρχει κάποιο ρέμα που να εισέρχεται σε Κεφαλοπόταμο σύμφωνα με το σχήμα 3.12.

Πίνακας 3.4

Ισοδύναμη παροχή σε m³/s που λαμβάνει η υδρολογική λεκάνη του σημείου υδροληψίας (Κεφαλοπόταμος) στο Γοργογύρι με βάση τα κατακρημνίσματα του πίνακα 3.3.

Έτος	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Ετήσιο Σύνολο
Πλήθος ημερών 2008	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,234	0,277	-
2010	0,260	0,198	0,281	0,135	0,064	0,066	0,057	0,041	0,043	0,441	0,225	0,409	0,185
2011	0,241	0,391	0,155	0,088	0,142	0,080	0,086	0,013	0,217	0,414	-	-	-
2012	-	-	0,193	0,139	0,177	0,128	0,000	0,065	0,094	0,145	0,008	0,189	-
2013	0,112	0,306	0,132	0,422	0,192	0,015	0,031	0,056	0,098	0,441	0,228	0,372	0,199
2014	0,425	0,300	0,365	0,103	0,134	0,048	0,000	0,000	0,088	0,072	0,374	0,151	0,171
2015	0,155	0,096	0,230	0,200	0,036	0,080	0,026	0,034	0,143	0,237	0,145	0,269	0,138
2016	0,327	0,316	0,201	0,113	0,059	0,187	0,055	0,112	0,255	0,201	0,298	0,011	0,176
2017	0,298	0,266	0,242	0,050	0,276	0,049	0,061	0,132	0,398	0,237	0,364	-0,006	0,197
2018	0,182	0,172	0,134	0,051	0,108	0,076	0,118	0,026	0,185	0,086	0,382	0,367	0,157
2018	0,153	0,519	0,338	0,059	0,109	0,131	0,083	0,051	0,038	-	0,371	-	-
Μέσες τιμές	0,239	0,285	0,227	0,136	0,130	0,086	0,052	0,053	0,156	0,253	0,263	0,227	0,175

Ακολουθώντας στο σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η χρονολογική καμπύλη μέσω μηνιαίων τιμών παροχής, όσο και των αξιοποιήσιμων μέσω μηνιαίων τιμών παροχής, οι οποίες έχουν προκύψει αν αφαιρεθούν από τις μέσες μηνιαίες παροχές η οικολογική παροχή, που προκύπτει με βάση το Ν.49828/2008 (ΦΕΚ 2464B/2008) σύμφωνα με τα οποία πρέπει να εκλαμβάνεται το μεγαλύτερο από τα εξής:

- το 30% της μέσης παροχής των θερινών μηνών Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου,
- το 50% της μέσης παροχής του Σεπτεμβρίου,
- τα 30 l/s.

Πίνακας 3.5

Αναμενόμενη επιφανειακή παροχή σε m³/s στο σημείο υδροληψίας (Κεφαλοπόταμος) στο Γοργούρι με βάση την προσφερόμενη παροχή λόγω κατακρημνισμάτων του πίνακα 3.4.

Έτος	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Ετήσιο Σύνολο
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,094	0,111	-
2009	0,104	0,079	0,112	0,054	0,026	0,026	0,023	0,016	0,017	0,176	0,090	0,163	0,074
2010	0,096	0,156	0,062	0,035	0,057	0,032	0,034	0,005	0,087	0,166	-	-	-
2011	-	-	0,077	0,056	0,071	0,051	0,000	0,026	0,038	0,058	0,003	0,075	-
2012	0,045	0,122	0,053	0,169	0,077	0,006	0,012	0,022	0,039	0,176	0,091	0,149	0,080
2013	0,170	0,120	0,146	0,041	0,053	0,019	0,000	0,000	0,035	0,029	0,150	0,060	0,068
2014	0,062	0,039	0,092	0,080	0,014	0,032	0,010	0,014	0,057	0,095	0,058	0,108	0,055
2015	0,131	0,126	0,080	0,045	0,023	0,075	0,022	0,045	0,102	0,080	0,119	0,005	0,071
2016	0,119	0,106	0,097	0,020	0,110	0,020	0,024	0,053	0,159	0,095	0,146	-0,002	0,079
2017	0,073	0,069	0,054	0,021	0,043	0,030	0,047	0,010	0,074	0,035	0,153	0,147	0,063
2018	0,061	0,208	0,135	0,024	0,044	0,052	0,033	0,021	0,015	-	0,148	-	-
Μέσες τιμές	0,096	0,114	0,091	0,054	0,052	0,034	0,021	0,021	0,062	0,101	0,105	0,091	0,070

Η μέση παροχή των θερινών μηνών Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου είναι στα 0,2077 m³/s, η μέση παροχή του Σεπτεμβρίου στα 0,1779 m³/s, οπότε η οικολογική παροχή ανέρχεται σε 0,089 m³/s = max {30% · 0,2077 = 0,06232, 50% · 0,1779 = 0,0889, 0.03} και οι αξιοποιήσιμες μέσες μηνιαίες παροχές καταγράφονται στον πίνακα 3.7.

Έπειτα πραγματοποιείται η καμπύλη διάρκειας παροχής που προκύπτει από τις αντίστοιχες τιμές των χρονολογικών καμπύλων παροχής με φθίνουσα κατάταξη των αρχικών τιμών παροχών, όπως καταγράφονται στο σχήμα 3.17 και στον πίνακα 3.8.

Ως προς την πλημμυρική παροχή καταγράφονται οι μέγιστες ημερήσιες παροχές στην αντίστοιχη θέση και με εφαρμογή της πιθανοτικής κατανομής Gumbel κατά το [E7, παρ.2.3.3] προκύπτει η μέγιστη αναμενόμενη πλημμυρική παροχή $Q_{\pi-G}$ ως εξής:

$$Q_{\pi-G} \left[\frac{m^3}{s} \right] = \bar{Q}_{max} \left[\frac{m^3}{s} \right] + K \cdot s_{max} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (3.3)$$

Όπου \bar{Q}_{max} είναι η μέση τιμή των μέγιστων ετήσιων παροχών, όπως εμφανίζονται στον πίνακα 3.9, m το πλήθος τους, s_{max} η αντίστοιχη τυπική απόκλιση των μέγιστων ετήσιων παροχών και K η παράμετρος που ορίζεται από την κατανομή Gumbel:

$$K = \frac{Y_n - Y_L}{S_L} \quad (3.4)$$

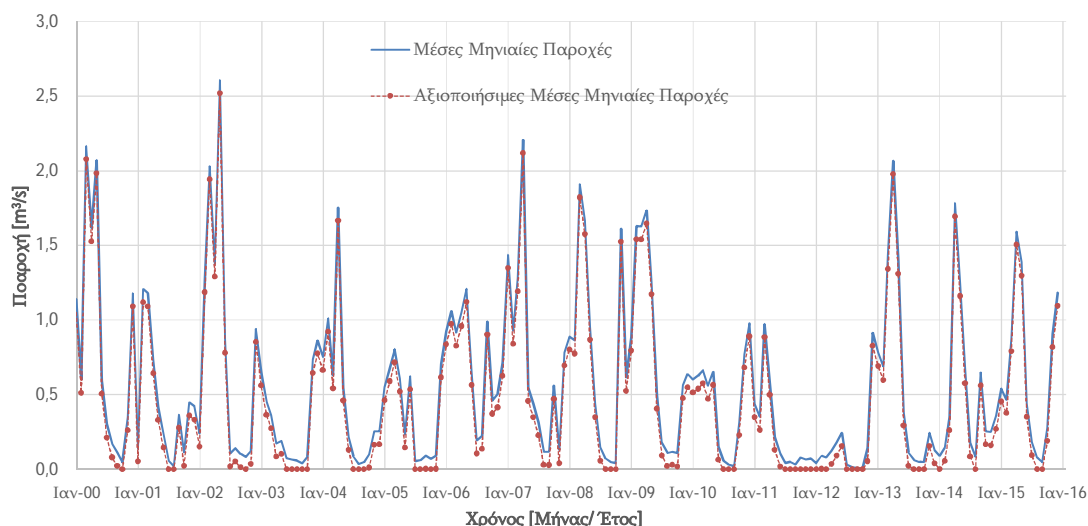
Όπου Y_L και S_L είναι οι παράμετροι της κατανομής Gumbel. Αυτές προσδιορίζονται μέσω πινάκων [E7, πίνακας 2.5, σελ. 53] με βάση το πλήθος των μετρήσεων m ενώ, η παράμετρος Y_n υπολογίζεται από την περίοδο επαναφοράς T σύμφωνα με τη σχέση (3.5):

$$Y_n = -\ln \left[\ln \left(\frac{T-1}{T} \right) \right] \quad (3.5)$$

Πίνακας 3.6

Μέσες μηνιαίες παροχές Κεφαλοποτάμου σε m³/s για τα έτη 2000-2015 με μετρήσεις σταθμημέτρου από το ΙΓΜΕ (39,8667° N, 21,5667° E, υψόμετρο 300 m)

Έτος	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Μέση Σταθμισμένη Παροχή
2000	1,140	0,601	2,167	1,616	2,073	0,595	0,300	0,169	0,112	0,044	0,349	1,180	0,866
2001	0,142	1,208	1,180	0,731	0,418	0,235	0,059	0,020	0,366	0,112	0,448	0,421	0,439
2002	0,240	1,275	2,031	1,380	2,608	0,868	0,108	0,142	0,103	0,082	0,125	0,942	0,824
2003	0,650	0,453	0,363	0,173	0,191	0,076	0,066	0,059	0,040	0,083	0,734	0,865	0,312
2004	0,752	1,011	0,631	1,755	0,550	0,219	0,087	0,034	0,048	0,100	0,254	0,255	0,471
2005	0,552	0,679	0,805	0,609	0,233	0,624	0,055	0,062	0,091	0,070	0,092	0,705	0,379
2006	0,926	1,062	0,916	1,048	1,210	0,654	0,194	0,225	0,992	0,461	0,503	0,715	0,739
2007	1,438	0,928	1,281	2,207	0,546	0,437	0,316	0,119	0,117	0,561	0,130	0,784	0,737
2008	0,891	0,864	1,910	1,665	0,956	0,439	0,147	0,072	0,049	0,042	1,612	0,614	0,769
2009	0,884	1,630	1,628	1,736	1,262	0,495	0,179	0,110	0,118	0,108	0,564	0,638	0,773
2010	0,602	0,628	0,665	0,559	0,654	0,153	0,056	0,031	0,021	0,318	0,770	0,980	0,452
2011	0,438	0,352	0,973	0,589	0,218	0,107	0,043	0,050	0,032	0,080	0,066	0,072	0,251
2012	0,041	0,092	0,079	0,125	0,181	0,245	0,033	0,015	0,011	0,006	0,143	0,916	0,158
2013	0,782	0,687	1,432	2,067	1,398	0,382	0,112	0,063	0,050	0,048	0,244	0,129	0,615
2014	0,090	0,144	0,350	1,783	1,249	0,664	0,175	0,084	0,650	0,255	0,249	0,358	0,504
2015	0,543	0,467	0,880	1,594	1,386	0,440	0,182	0,078	0,047	0,279	0,908	1,185	0,666
Μέσες τιμές	0,632	0,755	1,081	1,227	0,946	0,415	0,132	0,083	0,178	0,166	0,449	0,672	

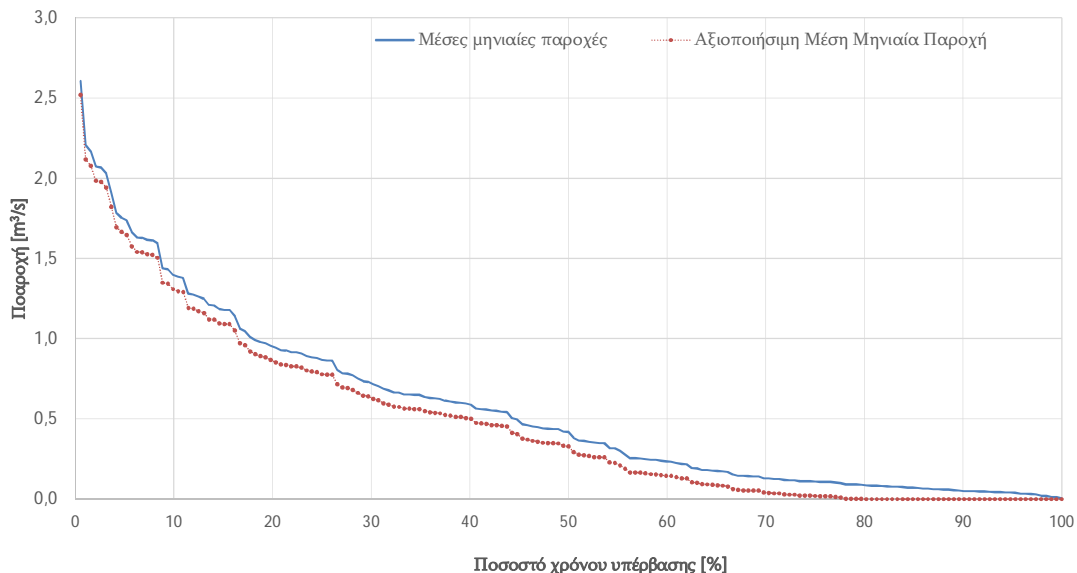


Σχήμα 3.16: Χρονολογική καμπύλη μέσων μηνιαίων παροχών και αξιοποιήσιμων μέσων μηνιαίων παροχών στο Γοργούρι Τρικάλων σε σημείο υδροληψίας.

Πίνακας 3.7

Αξιοποιήσιμες μέσες μηνιαίες παροχές Κεφαλοποτάμου σε m^3/s
για τα έτη 2000-2015 με βάση τον πίνακα 3.6.

Έτος	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Μέση Σταθμισμένη Παροχή
2000	1,051	0,512	2,078	1,527	1,984	0,506	0,211	0,080	0,023	0,000	0,260	1,091	0,781
2001	0,053	1,119	1,091	0,642	0,329	0,146	0,000	0,000	0,277	0,023	0,359	0,332	0,358
2002	0,151	1,186	1,942	1,291	2,519	0,779	0,019	0,053	0,014	0,000	0,036	0,853	0,736
2003	0,561	0,364	0,274	0,084	0,102	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,645	0,776	0,233
2004	0,663	0,922	0,542	1,666	0,461	0,130	0,000	0,000	0,000	0,011	0,165	0,166	0,390
2005	0,463	0,590	0,716	0,520	0,144	0,535	0,000	0,000	0,002	0,000	0,003	0,616	0,297
2006	0,837	0,973	0,827	0,959	1,121	0,565	0,105	0,136	0,903	0,372	0,414	0,626	0,650
2007	1,349	0,839	1,192	2,118	0,457	0,348	0,227	0,030	0,028	0,472	0,041	0,695	0,648
2008	0,802	0,775	1,821	1,576	0,867	0,350	0,058	0,000	0,000	0,000	1,523	0,525	0,689
2009	0,795	1,541	1,539	1,647	1,173	0,406	0,090	0,021	0,029	0,019	0,475	0,549	0,684
2010	0,513	0,539	0,576	0,470	0,565	0,064	0,000	0,000	0,000	0,229	0,681	0,891	0,377
2011	0,349	0,263	0,884	0,500	0,129	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,178
2012	0,000	0,003	0,000	0,036	0,092	0,156	0,000	0,000	0,000	0,000	0,054	0,827	0,098
2013	0,693	0,598	1,343	1,978	1,309	0,293	0,023	0,000	0,000	0,000	0,155	0,040	0,535
2014	0,001	0,055	0,261	1,694	1,160	0,575	0,086	0,000	0,561	0,166	0,160	0,269	0,415
2015	0,454	0,378	0,791	1,505	1,297	0,351	0,093	0,000	0,000	0,190	0,819	1,096	0,582
Μέσες τιμές	0,546	0,666	0,992	1,138	0,857	0,326	0,057	0,020	0,115	0,093	0,362	0,585	



Σχήμα 3.17: Καμπύλη διάρκειας μέσων μηνιαίων παροχών και αξιοποιήσιμων μέσων μηνιαίων παροχών στο Γοργογύρι Τρικάλων σε σημείο υδροληψίας σε σχέση με το ποσοστό υπέρβασης για δεδομένα έτη 2000-2015.

Εναλλακτικά μία πιο απλή προσεγγιστική σχέση υπολογισμού της μέγιστης πλημμυρικής παροχής $Q'_{\pi-G}$ για περίοδο επαναφοράς T είναι η ακόλουθη [E7, σχέση (2.16), σελ 54]:

$$Q'_{\pi-G} \left[\frac{m^3}{s} \right] = \bar{Q}_{max} \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot (1 + 0,80 \cdot \log T) \quad (3.6)$$

Οπότε για τιμή της μέσης παροχής που ισούται με $\bar{Q}_{max} = 7,745 \text{ m}^3/\text{s}$, της τυπικής απόκλιση $s_{max} = 2,822 \text{ m}^3/\text{s}$, πλήθος $m = 16$, παράμετροι Y_L και S_L ίσες με 0,516 και 1,032 αντίστοιχα, προκύπτει ότι με βάση την περίοδο επαναφοράς, όπως καταγράφεται και στον πίνακα 3.10, ότι η μέγιστη αναμενόμενη πλημμυρική παροχή ανέρχεται στα $26,3 \text{ m}^3/\text{s}$ στα 1000 έτη για το μοντέλο με τα δυσμενέστερα αποτελέσματα.

Πίνακας 3.8

Συχνότητα υπέρβασης συνολικών και αξιοποιήσιμων μέσων μηνιαίων παροχών
Κεφαλοποτάμου σε m^3/s για τα έτη 2000-2015 με βάση τους πίνακες 3.6, 3.7.

Συχνότητα υπέρβασης	Μέσες μηνιαίες παροχές [m^3/s]	Αξιοποιήσιμες μέσες μηνιαίες παροχές [m^3/s]	Συχνότητα υπέρβασης	Μέσες μηνιαίες παροχές [m^3/s]	Αξιοποιήσιμες μέσες μηνιαίες παροχές [m^3/s]	Συχνότητα υπέρβασης	Μέσες μηνιαίες παροχές [m^3/s]	Αξιοποιήσιμες μέσες μηνιαίες παροχές [m^3/s]	Συχνότητα υπέρβασης	Μέσες μηνιαίες παροχές [m^3/s]	Αξιοποιήσιμες μέσες μηνιαίες παροχές [m^3/s]
0	2,608	2,519	26	0,864	0,775	51	0,367	0,278	76	0,108	0,019
1	2,239	2,150	27	0,787	0,698	52	0,359	0,270	77	0,104	0,015
2	2,088	1,999	28	0,773	0,684	53	0,350	0,262	78	0,094	0,005
3	2,040	1,951	29	0,740	0,651	54	0,328	0,239	79	0,091	0,002
4	1,824	1,735	30	0,721	0,632	55	0,306	0,217	80	0,088	0,000
5	1,744	1,655	31	0,696	0,607	56	0,267	0,178	81	0,083	0,000
6	1,647	1,558	32	0,673	0,584	57	0,255	0,166	82	0,081	0,000
7	1,623	1,534	33	0,660	0,571	58	0,248	0,159	83	0,079	0,000
8	1,606	1,517	34	0,653	0,564	59	0,243	0,154	84	0,075	0,000
9	1,436	1,347	35	0,648	0,559	60	0,235	0,146	85	0,072	0,000
10	1,396	1,307	36	0,631	0,542	61	0,224	0,135	86	0,066	0,000
11	1,368	1,279	37	0,624	0,535	62	0,217	0,128	87	0,063	0,000
12	1,274	1,186	38	0,609	0,520	63	0,191	0,102	88	0,059	0,000
13	1,250	1,161	39	0,601	0,512	64	0,181	0,092	89	0,056	0,000
14	1,208	1,119	40	0,590	0,501	65	0,176	0,087	90	0,051	0,000
15	1,181	1,092	41	0,562	0,473	66	0,170	0,081	91	0,049	0,000
16	1,151	1,062	42	0,555	0,466	67	0,149	0,060	92	0,048	0,000
17	1,053	0,964	43	0,548	0,459	68	0,143	0,054	93	0,045	0,000
18	1,000	0,911	44	0,524	0,435	69	0,142	0,053	94	0,043	0,000
19	0,977	0,888	45	0,484	0,395	70	0,130	0,041	95	0,041	0,000
20	0,950	0,861	46	0,458	0,369	71	0,125	0,036	96	0,034	0,000
21	0,927	0,838	47	0,446	0,357	72	0,119	0,030	97	0,032	0,000
22	0,916	0,827	48	0,439	0,350	73	0,116	0,027	98	0,021	0,000
23	0,905	0,816	49	0,436	0,347	74	0,112	0,023	99	0,015	0,000
24	0,884	0,795	50	0,398	0,309	75	0,110	0,021	100	0,006	0,000
25	0,868	0,779									

Πίνακας 3.9

Ετήσιες μέγιστες ημερήσιες παροχές Κεφαλοποτάμου σε m³/s για τα έτη 2000-2015

Έτος	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Μέγιστη ημερήσια πλημμυρική παροχή [m ³ /s]	10,835	6,040	13,040	4,325	8,775	4,025	6,050	11,035
Έτος	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Μέγιστη ημερήσια πλημμυρική παροχή [m ³ /s]	9,550	8,680	4,900	4,865	4,580	10,335	8,915	7,970

Πίνακας 3.10

Μέγιστη αναμενόμενη πλημμυρική παροχή με βάση τα δεδομένα του πίνακα 3.9 και την περίοδο επαναφοράς για διαφορετικά μοντέλα πλημμυροπαροχής.

Περίοδος επαναφοράς [έτη]	50	100	1000	10000
Εκτίμηση πλημμυρικής παροχής κατά Gumbel [m ³ /s]	17,00	18,91	25,22	31,52
Προσεγγιστική εκτίμηση πλημμυρικής παροχής κατά [E7] [m ³ /s]	18,27	20,14	26,33	32,53

3.4. Προκαταρκτική χάραξη του έργου

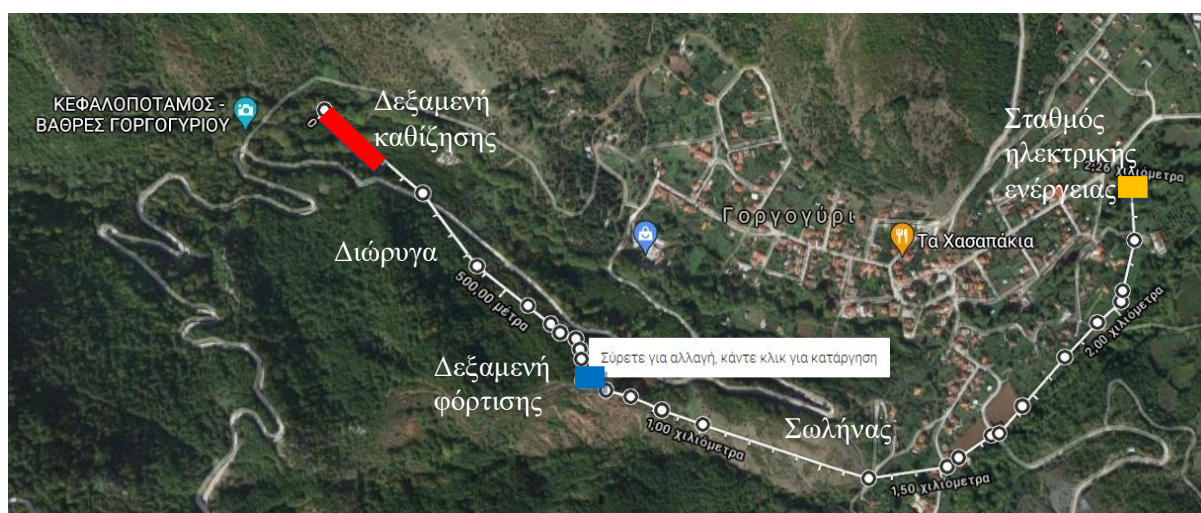
Για να πραγματοποιηθεί η χάραξη του έργου λαμβάνεται υπόψη ότι η θέση υδροληψίας βρίσκεται περίπου στην ισοϋψή των 550 m, οπότε πάνω στην αντίστοιχη ισοϋψή με πολύ μικρή κλίση της τάξης του 1% τοποθετείται η διώρυγα προσαγωγής νερού από τη δεξαμενή καθίζησης / εξαμμωτή (η οποία διαθέτει τυπικό μήκος περί των 25 με 35 m με-τά το σημείο υδροληψίας) προς τη δεξαμενή φόρτισης. Η δυνατότητα τοποθέτησης της φαίνεται στο σχήμα 3.18 με την κόκκινη γραμμή.



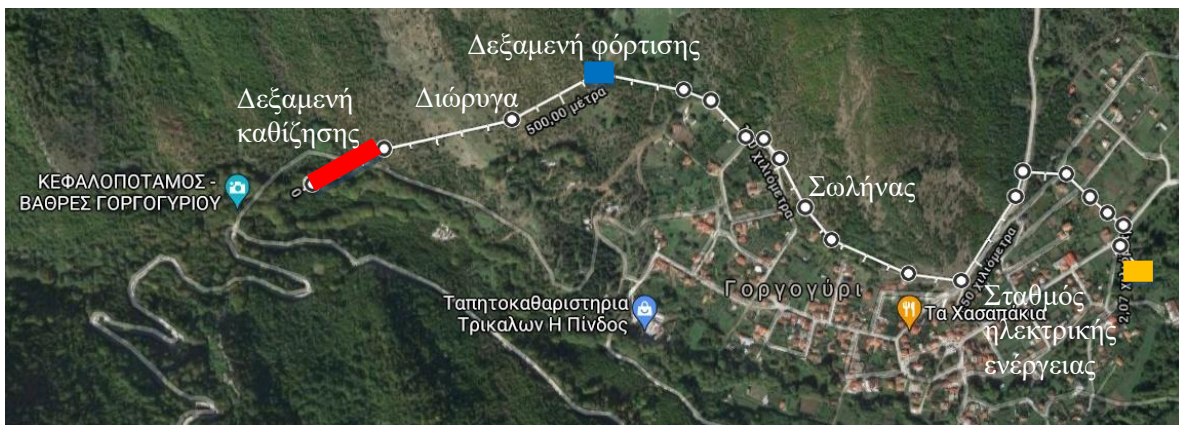
Σχήμα 3.18: Προσδιορισμός ισοϋψούς διώρυγας (κόκκινη γραμμή) από σημείο υδροληψίας στην περιοχή Γοργούρι Τρικάλων μέσω χάρτη Γ.Υ.Σ. περιοχής Καλαμπάκας (μεγέθυνση)

Υφίστανται οι ακόλουθες δυνατότητες χάραξης:

- **Στην αριστερή όχθη με διώρυγα.** Σύμφωνα με το σχήμα 3.19 το μήκος της διώρυγας ανέρχεται περίπου στα 650 m με κλίση 1% περνώντας κάτω από επαρχιακό δρόμο μία φορά, ενώ το μήκος του σωλήνα υπό πίεση στα 1600 m με πέντε διαβάσεις κάτω από το οδικό δίκτυο, ενώ στα υπόλοιπα τμήματα είναι επίγειο – εμφανές. Υπάρχει μία διάβαση σωλήνα από παραπόταμο / ρέμα Κεφαλοπόταμου στην αριστερή του όχθη. Για τη δεξαμενή καθίζησης πρέπει να διαμορφωθεί ο αγωγός απομάκρυνσης φερτών υλικών προς τον Κεφαλοπόταμο, ενώ για τη δεξαμενή φόρτισης ο αγωγός υπερχειλίσης / φερτών υλικών πρέπει να οδεύσει κατάλληλα σε πλησιέστερο παραπόταμο του Κεφαλοπόταμου. Η χάραξη της διώρυγας περνά μέσα από το νοτιοδυτικό δάσος του Κεφαλοπόταμου με πυκνή βλάστηση που ενδεχομένως να προσθέσει σημαντική ποσότητα φερτών υλικών, κυρίως φύλλων κτλ.
- **Στη δεξιά όχθη με διώρυγα.** Σύμφωνα με το σχήμα 3.20 το μήκος της διώρυγας ανέρχεται περίπου στα 500 m με κλίση 1%, ενώ το μήκος του σωλήνα υπό πίεση στα 1600 m με πέντε διαβάσεις κάτω από το οδικό δίκτυο, ενώ στα υπόλοιπα τμήματα είναι επίγειο – εμφανές. Υπάρχουν μία διάβαση διώρυγας και μία διάβαση σωλήνα από παραποτάμους / ρέματα Κεφαλοπόταμου στη δεξιά του όχθη. Για τη δεξαμενή καθίζησης πρέπει να διαμορφωθεί ο αγωγός απομάκρυνσης φερτών υλικών προς τον Κεφαλοπόταμο, ενώ για τη δεξαμενή φόρτισης ο αγωγός υπερχειλίσης / φερτών υλικών πρέπει να οδεύσει κατάλληλα σε πλησιέστερο παραπόταμο του Κεφαλοπόταμου. Επιπλέον γεωλογικά έχει αναφερθεί ερπυσμός στο δεξιό πρηνές του Κεφαλοπόταμου, ενώ σε πορεία του σωλήνα στο βόρειο-βορειοανατολικό τμήμα του Γοργογυρίου σύμφωνα με το σχήμα 3.20 συναντάται επιφανειακή ρηγματώση του εδάφους λόγω παρελθοντικού φαινομένου κατολίσθησης, που είναι επίφοβο για το νέο τεχνικό έργο. Οπότε παρά τη συντομότερη διαδρομή είναι πιο προβληματική χάραξη σε σχέση με την όδευση στην αριστερή όχθη.

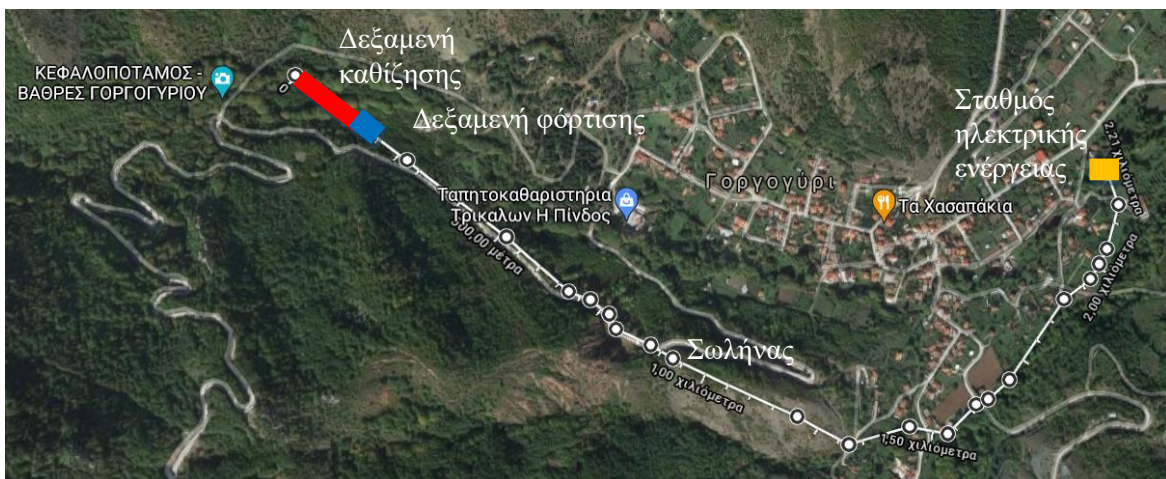


Σχήμα 3.19: Προσδιορισμός θέσεων δεξαμενής καθίζησης - διώρυγας - δεξαμενής φόρτισης - σωλήνα υπό πίεση από σημείο υδροληψίας ως σταθμό παραγωγής κατά την αριστερή όχθη στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων μέσω google map.



Σχήμα 3.20: Προσδιορισμός θέσεων δεξαμενής καθίζησης – διάρρυγας – δεξαμενής φόρτισης – σωλήνα υπό πίεση από σημείο υδροληψίας ως σταθμό παραγωγής κατά την δεξιά αριστερή όχθη στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων μέσω google map.

- **Υπέργεια όδευση χωρίς διάρρυγα:** Σύμφωνα με το σχήμα 3.21 το μήκος του υπέργειου σωλήνα υπό πίεση ανέρχεται στα 2200 m με πέντε διαβάσεις κάτω από το οδικό δίκτυο. Για το ενιαίο σύμπλεγμα δεξαμενής καθίζησης και δεξαμενής φόρτισης διαμορφώνεται ο αγωγός απομάκρυνσης φερτών υλικών προς τον Κεφαλοπόταμο. Βέβαια η όδευση του σωλήνα υπό πίεση κατά τη συντομότερη διαδρομή οδηγεί σε μεγαλύτερη επέμβαση στο φυσικό περιβάλλον κοντά στο ποταμό, όχι όμως συνολικά.

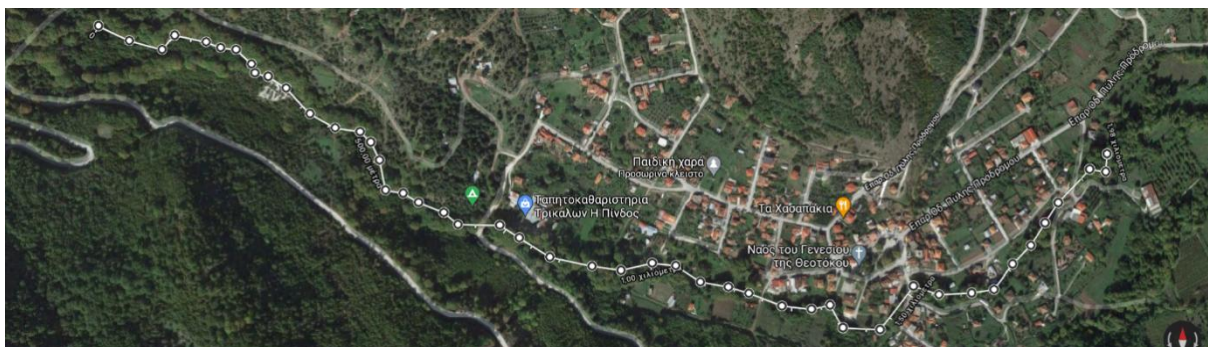


Σχήμα 3.21: Προσδιορισμός θέσεων δεξαμενής καθίζησης – δεξαμενής φόρτισης – σωλήνα υπό πίεση από σημείο υδροληψίας ως σταθμό παραγωγής με επιφανειακή όδευση κατά την αριστερή όχθη στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων μέσω google map.

- **Υπόγεια όδευση χωρίς διάρρυγα:** Σύμφωνα με το σχήμα 3.22 το μήκος του σωλήνα υπό πίεση ανέρχεται στα 1840 m εκ των οποίων τα 1200 m υπόγεια κάτω από το οδικό δίκτυο του Γοργογυρίου. Για το ενιαίο σύμπλεγμα δεξαμενής καθίζησης και δεξαμενής φόρτισης διαμορφώνεται ο αγωγός απομάκρυνσης φερτών υλικών προς τον Κεφαλοπόταμο. Είναι η πιο σύντομη όδευση με κλειστό αγωγό, οπτικά έχει τη μικρότερη παρέμβαση, αλλά η τοποθέτηση υπόγειου αγωγού κάτω από οδόστρωμα οδηγεί σε πολλαπλάσιο κόστος κατασκευής.



Σχήμα 3.22: Προσδιορισμός θέσεων δεξαμενής καθίζησης – δεξαμενής φόρτισης – σωλήνα υπό πίεση από σημείο υδροληψίας ως σταθμό παραγωγής με υπόγεια όδευση στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων μέσω google map.



Σχήμα 3.23: Προσδιορισμός μήκους υδατορέματος από σημείο υδροληψίας ως σταθμό παραγωγής στην περιοχή Γοργογύρι Τρικάλων μέσω google map.

➤ **Μήκος φυσικής κοίτης μεταξύ υδροληψίας και σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας:** Σύμφωνα με το σχήμα 3.23 το μήκος της φυσικής κοίτης του Κεφαλοπόταμου μεταξύ υδροληψίας και σταθμού παραγωγής ανέρχεται περίπου στα 1990 m ($\approx (1980^2 + 185^2)^{0.5}$) λαμβάνοντας υπόψη σ' όλες τις περιπτώσεις και την υψομετρική διαφορά μεταξύ υδροληψίας - σταθμού.

Οπότε με βάση τα ανωτέρω η πιο πολλά υποσχόμενη λύση είναι η υπέργεια όδευση κλειστού αγωγού χωρίς διώρυγα, αν και φαινομενικά ακριβότερη λόγω μεγαλύτερου μήκους κλειστού αγωγού, αλλά πιο ασφαλής ως λύση από πλευράς φερτών υλικών.

3.5. Διάταξη και διαστασιολόγηση έργου

Η αρχική διαστασιολόγηση του έργου πραγματοποιείται για παροχή που αντιστοιχεί σε συχνότητα υπέρβασης 30% (συνήθεις τιμές από 30% ως 50%), δηλαδή τίθεται ότι η ονομαστική παροχή $Q_{κλ}$ είναι 0,630 m³/s με διαθέσιμο ύψος $H_{δ}$ 180 m (έχουν αφαιρεθεί 5 m διότι, υψομετρική διαφορά ίση με 1 ως 2 m θα χαθεί στον εξαμωτή και τη δεξαμενή φόρτισης λόγω ροής ελεύθερου αγωγού ενώ, λόγω διαθέσιμου υδραυλικού ύψους θα επιλεγεί στρόβιλος δράσης (Pelton-Turgo), που έχει επιπλέον υδραυλικές απώλειες της τάξης των 3 m μεταξύ ακροφυσίου τροφοδοσίας και αγωγού φυγής).

Τα βασικά τμήματα του έργου που απαιτείται να εκτιμηθούν παρατίθενται παρακάτω:

- **Έργο υδροληψίας:** Θα υλοποιηθεί μία ορεινή υδροληψία με σχάρες, όπως αυτή εμφανίζεται στα σχήματα 3.24 και 3.25, με λάμες πάχους $t = 20 \text{ mm}$ και απόσταση $s = 15 \text{ mm}$. Αυτό θα έχει ως συνέπεια ο συντελεστής μορφής $s' = s/(s + t)$ να προκύψει ίσος με 0,4286. Οπότε, η εισερχόμενη παροχή Q_v στην υδροληψία με σχάρα από λάμες υπολογίζεται από τη σχέση (3.7):

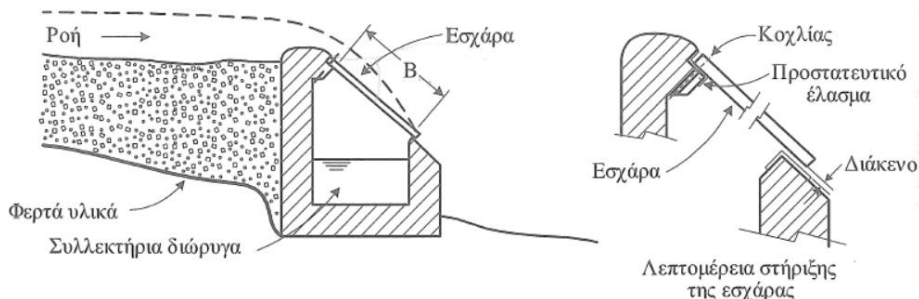
$$Q_v = C' \cdot s' \cdot L_{\Sigma} \cdot B_{\Sigma} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H'_o} \quad (3.7)$$

Ο συντελεστής C' αποτελεί το διορθωμένο συντελεστή εισροής ο οποίος λαμβάνεται από τις τιμές του πίνακα 3.11 για ορθογωνική μορφή λάμας, κλίση σχάρας $I = 0,2$, συντελεστή μορφής σχάρας $s' = 0,4286$. Αφού ληφθεί υπόψη κατάλληλη τιμή του συντελεστή διόρθωσης αυτός προκύπτει ίσος με $C' = 0,38856$. Επιπρόσθετα στη σχέση (3.7) οι παράμετροι L_{Σ} και B_{Σ} αποτελούν το μήκος και το πλάτος της σχάρας αντίστοιχα ενώ, η παράμετρος H'_o αποτελεί τη διορθωμένη ολική ενέργεια του νερού ανάντι. Προκειμένου αυτή να υπολογισθεί, αρχικά υπολογίζεται η αρχική ολική ενέργεια του νερού ανάντι H_o σύμφωνα με τη σχέση (3.8) η οποία είναι η βασική σχέση του υπερχειλιστή και στη συνέχεια λαμβάνεται μια τυπική τιμή του συντελεστή διόρθωσης ίση με το 90 % της αρχικής ολικής ενέργειας.

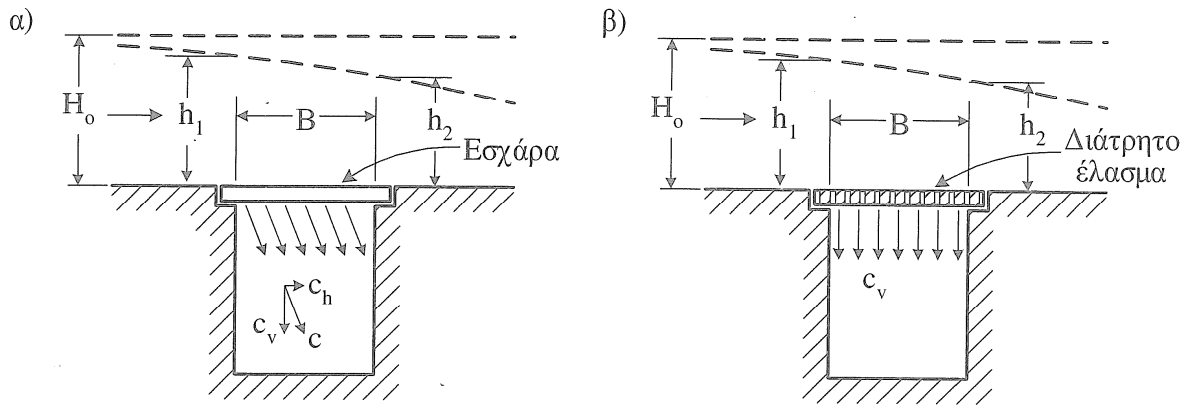
$$Q = C \cdot L_{\Sigma} \cdot H_o \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_o} \quad (3.8)$$

Πίνακας 3.11 [E7, Πίνακας 4.2 σελ 132]

Συνιστώμενες τιμές του συντελεστή εισροής C σχάρας ορεινής υδροληψίας		Συντελεστής μορφής σχάρας $s' = s/(s + t)$			
Μορφή λάμας	Κλίση σχάρας I	0,30	0,40	0,50	0,60
Τραπεζοειδής	0,0	0,52	0,48	0,44	0,40
	0,2	0,48	0,44	0,40	0,38
Ορθογωνική	0,0	0,46	0,42	0,39	0,36
	0,2	0,44	0,40	0,36	0,34



Σχήμα 3.24: Διάταξη και λεπτομέρειες στήριξης ορεινής υδροληψίας [E7, σχήμα 4.40 σελ. 130].



Σχήμα 3.25: Σχηματική διαμόρφωση της ροής πάνω από (α) σχάρα με λάμες και (β) διάτρητο έλασμα [E7, σχήμα 4.41 σελ. 131].

Από τη σχέση (3.8) με δεδομένη την παροχή λειτουργίας προσαυξημένη κατά ένα ποσοστό α_Q ίσο με 15% (λόγω δυνατότητας υπέρβασης για στροβίλους δράσης) προκύπτει ότι η εξίσωση (3.9) μέσω της οποίας υπολογίζεται η αρχική ολική ενέργεια του νερού ανάντι.

$$H_o = \left(\frac{(1 + \alpha_Q) \cdot Q_{κλ}}{C \cdot L_{\Sigma} \cdot \sqrt{2} \cdot g} \right)^{2/3} \quad (3.9)$$

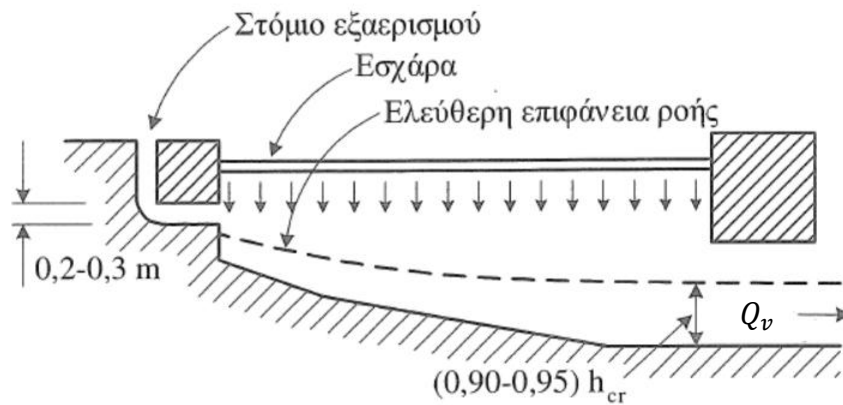
Λαμβάνεται η σχέση (3.7) η οποία επιλύεται ως προς την παράμετρο του πλάτους της σχάρας B_{Σ} ενώ, ταυτόχρονα προσαυξάνεται η παράμετρος της παροχής κανονικής λειτουργίας ($Q_{κλ}$). Από αυτή τη διαδικασία προκύπτει η σχέση (3.10) στην οποία αντικαθίστανται η παράμετρος του μήκους της σχάρας $L_{\Sigma} = 4 \text{ m}$ και η παράμετρος του ύψους της ολικής ενέργειας ανάντι η οποία έχει υπολογισθεί και προέκυψε ίση με 0,18847 m. Τελικά προκύπτει η τιμή του πλάτους της σχάρας η οποία είναι ίση με $B_{\Sigma} = 0,5962 \Rightarrow B_{\Sigma} \simeq 0,60 \text{ m}$.

$$B_{\Sigma} = \frac{(1 + \alpha_Q) \cdot Q_{κλ}}{C' \cdot s' \cdot L_{\Sigma} \cdot \sqrt{2} \cdot g \cdot H'_o} \quad (3.10)$$

Η διαμόρφωση της ορεινής υδροληψίας κάτω από τη σχάρα είναι της μορφής του σχήματος 3.26, όπου το κρίσιμο ύψος h_{cr} για ορθογωνική διατομή δίνεται από τη σχέση (3.11):

$$h_{cr} = \sqrt[3]{\frac{((1 + \alpha_Q) \cdot Q_{κλ})^2}{g \cdot B_{\Sigma}^2}} \quad (3.11)$$

Δηλαδή στην παρούσα περίπτωση το κρίσιμο ύψος προκύπτει ίσο με $h_{cr} = 0,35 \text{ m}$. Στην περίπτωση που η κλίση της σχάρας I ληφθεί ίση με 0,2 τότε αυτή, για πλάτος βάσης $B_{\Sigma} = 0,60 \text{ m}$ προκαλεί χαμηλότερη στάθμη υδροληψίας κατά 0,12 m. Λαμβάνοντας το αναγκαίο ύψος του στομίου εξαερισμού ίσο με 0,30 m και το κρίσιμο ύψος που έχει ήδη υπολογισθεί προκύπτει από ορεινή υδροληψία μία μείωση του διαθέσιμου υδραυλικού ύψους κατά 0,80 m.



Σχήμα 3.26: Διαμόρφωση συλλεκτήριας διώρυγας ορεινής υδροληψίας [Ε7, σχήμα 4.42 σελ 132].

➤ **Έργο υπερχειλίσης:** Όσο νερό δεν εισέλθει εντός της σχάρας που λειτουργεί με την παροχή κανονικής λειτουργίας $Q_{κλ}$ προσαυξημένη κατά 15% θα υπερχειλίσει. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα το νερό που εισέρχεται στη σχάρα προκύπτει από τη σχέση: $Q_v = (1 + \alpha_Q) \cdot Q_{κλ} = 1,15 \cdot Q_{κλ}$. Η υπερχειλίση αυτή του νερού θα πραγματοποιηθεί εν μέρει από τη διατομή της ορεινής υδροληψίας και κατά το μεγαλύτερο μέρος της από το κυρίως έργο υπερχειλίσης. Για αυτό το λόγο η βύθισή του P που εμφανίζεται στο σχήμα 3.27 πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ολική ενέργεια του νερού ανάντι της υδροληψίας H_o . Συγκεκριμένα πρέπει να είναι έστω υπερδιπλάσια, δηλαδή ίση με 0,40 m, με μήκος σχάρας ίσο με $L_v = 6$ m ενώ, πρέπει να διαθέτει την ικανότητα να αντιμετωπίσει μόνη της την πλημμυρική παροχή, χωρίς τη συμμετοχή της υπερχειλίσης της υδροληψίας. Αυτό γίνεται λόγω δυνατότητας ύπαρξης θυροφράγματος ανάντι της τελευταίας (κλασική διάταξη Θεοδωριανών), ώστε να οδηγείται το νερό στην τελευταία για την υδροληψία. Οπότε, η διερχόμενη παροχή Q_π συνδέεται με το υδροστατικό ύψος H_D , δηλαδή της διαφοράς στάθμης της ροής του υπερχειλιστή και της στέψης του υπερχειλιστή μέσω της σχέσης (3.12):

$$Q_\pi = C_D \cdot L_v \cdot H_D^{3/2} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \quad (3.12)$$

Όπου C_D είναι ο αδιάστατος συντελεστής παροχής που μπορεί να δίνεται είτε μέσω του σχήματος 3.27, είτε προσεγγιστικά μέσω της σχέσης:

$$C_D = 0,40 + 0,05 \cdot H_D / P \quad (3.13)$$

Οπότε θέτοντας δοκιμαστικά τιμές στην παράμετρο του υδροστατικού ύψους H_D υπολογίζεται μέσω των σχέσεων (3.11) και (3.12) ότι η εξυπηρετούμενη πλημμυρική παροχή των 26,33 m³/s απαιτεί ύψος 1,431 m, δηλαδή συνολικά από τον πυθμένα τα πλευρικά τοιχώματα του υπερχειλιστή πρέπει να ανέρχονται τουλάχιστον στα 1,85 m, δηλαδή πρακτικά στα 2,00 m. Η ίδια ανύψωση υλοποιείται και σε πλευρικά τοιχώματα ορεινής υδροληψίας (το ένα είναι κοινό με του υπερχειλιστή). Σημειώνεται ότι η διαστασιολόγηση του υπερχειλιστή ελάχιστα επηρεάζεται από την παροχή κανονικής λειτουργίας του υδροηλεκτρικού.

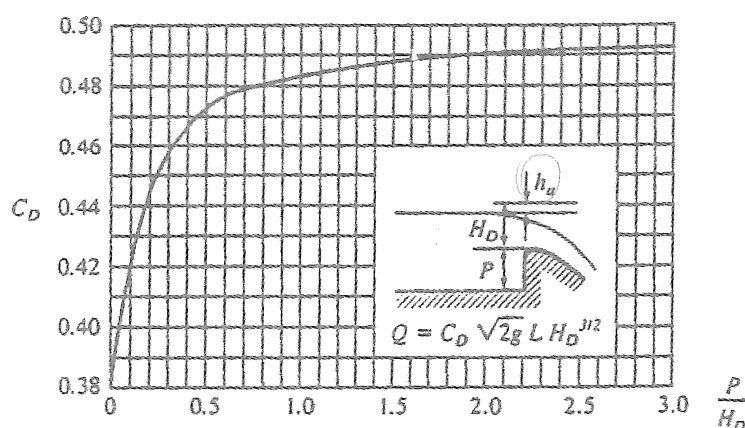
➤ **Έργο λεκάνης ηρεμίας:** Η ροή του νερού μετά τη στέψη του υπερχειλιστή λαμβάνει υψηλές τιμές ταχύτητας με ταυτόχρονη μετατροπή της ροής από υποκρίσιμη σε υπερκρίσιμη, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.28. Για να προστατευθεί από τη διάβρωση στον πόδα του φράγματος υπάρχει μία λεκάνη ηρεμίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.29.

Για να διαστασιολογηθεί αναλυτικά με βάση σχετικές σχέσεις σχήματος 3.29, χρειάζεται να υπολογιστεί ο αριθμός Froude στον πόδα του φράγματος. Συγκεκριμένα αν το ύψος του φράγματος ως τον πυθμένα του υπερχειλιστή είναι $\Delta h = 2,00 \text{ m}$, τότε η ενέργεια του ως προς τον πόδα του φράγματος στη στέψη του υπερχειλιστή (αγνοώντας τις υδραυλικές απώλειες) υπολογίζεται από τη σχέση (3.14).

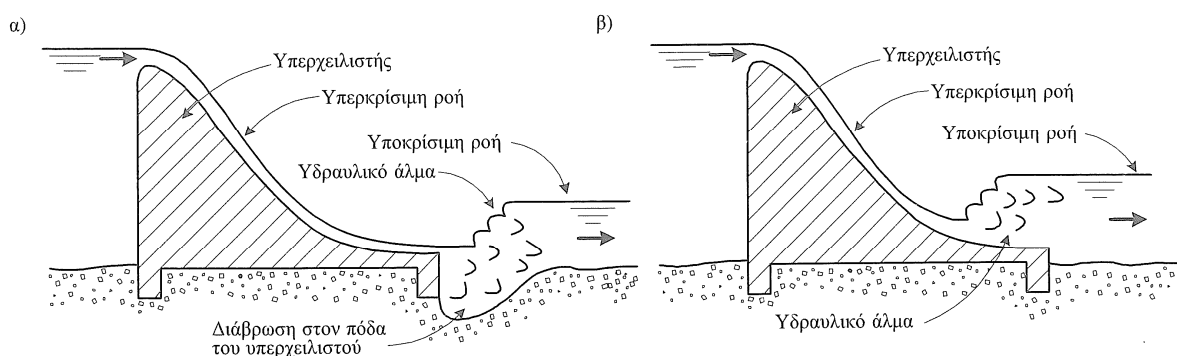
$$E_{\pi} = h_{\pi} + \frac{1}{2 \cdot g} \cdot c_o^2 = \Delta h + P + H_D + \frac{1}{2 \cdot g} \cdot c_o^2 \quad (3.14)$$

Όπου η ταχύτητα του νερού ανάντι του υπερχειλιστή c_o προκύπτει από τη σχέση (3.15).

$$c_o = \frac{Q_{\pi}}{L \cdot (P + H_D)} \quad (3.15)$$



Σχήμα 3.27: Συντελεστής υπερχειλιστή καμπύλης στέψης με κατακόρυφη ανάντι παρειά [E7, σχήμα 4.16 σελ. 110].



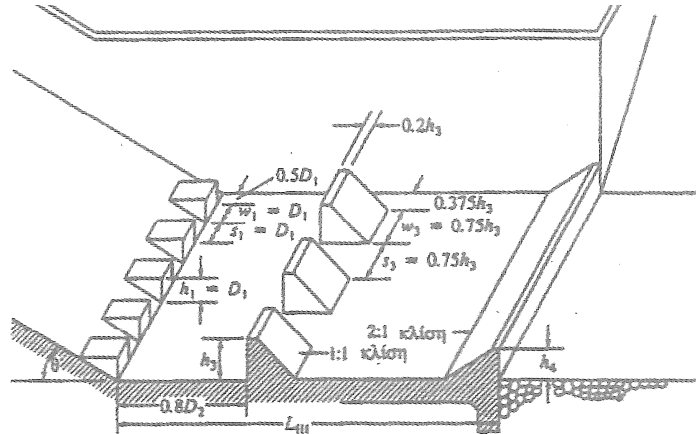
Σχήμα 3.28: (α) Ανεπιθύμητη και (β) ελεγχόμενη ανάπτυξη υδραυλικού άλματος [E7, σχήμα 4.26 σελ. 118].

Για τη ροή στον πόδα του υπερχειλιστή του σχήματος 3.30 με αμετάβλητη την ενέργεια της ροής ισχύει η εξίσωση (3.16).

$$E_{\pi} = E_1 = y_1 + \frac{1}{2 \cdot g} \cdot c_1^2 \quad (3.16)$$

Όπου από την αρχή της συνέχειας ισχύει ότι:

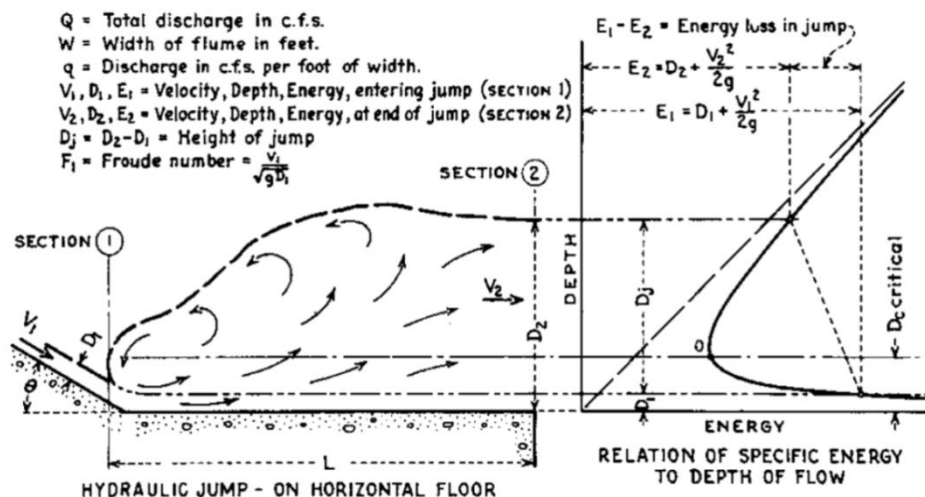
$$c_1 = \frac{Q_{\pi}}{L \cdot y_1} \quad (3.17)$$



Σχήμα 3.29: Λεκάνη ηρεμίας με βάρθρα σε σειρά και συμπαγή αναβαθμό στην έξοδο, τύπου III του US Bureau of Reclamation κατάλληλη για $F_{r1} > 4,5$, $D_1 = y_1$, $D_2 = y_2$, $L_m = D_2 \cdot [2,4 + 0,073 \cdot (F_{r1} - 4,5)]$ για $4,5 < F_{r1} < 10$, $L_m = D_2 \cdot 2,8$ για $F_{r1} > 10$, $h_3 = D_1 \cdot [1,30 + 0,164 \cdot (F_{r1} - 4,0)]$, $h_4 = D_1 \cdot [1,25 + 0,056 \cdot (F_{r1} - 4,0)]$ [E7, σχήμα 4.48γ].

Ο αντίστοιχος αριθμός Froude είναι ίσος με:

$$F_{r1} = \frac{c_1}{\sqrt{g \cdot y_1}} \quad (3.18)$$



Σχήμα 3.30: Υδραυλικό άλμα σε λεκάνη ηρεμίας, όπου στη θέση του "y" έχει μπει η μεταβλητή "D" και του "c" η μεταβλητή "V" [E62, Fig 4].

Για πλημμυρική παροχή ίση με $26,33 \text{ m}^3/\text{s}$, η ταχύτητα του νερού ανάντι του υπερχειλιστή προκύπτει ίση με $c_o = 2,397 \text{ m/s}$ ενώ, το συνολικό ύψος είναι ίσο με $E_\pi = 4,123 \text{ m}$, οπότε επαναληπτικά υπολογίζεται ότι το βάθος y_1 στον πόδα του φράγματος είναι $0,04466 \text{ m}$ με ταχύτητα $8,946 \text{ m/s}$ και αριθμό Froude F_{r1} ίσο με $13,516$ δηλαδή, πρόκειται για υπερκρίσιμη ροή. Οπότε είναι δυνατή η ανάπτυξη υδραυλικού άλματος.

Από την αρχή της συνέχειας ισχύει ότι:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \rho \cdot c_1 \cdot y_1 = \rho \cdot c_2 \cdot y_2 \quad (3.19)$$

Από την αρχή της διατήρησης ορμής ισχύει η σχέση (3.20) ενώ, από την αρχή της διατήρησης δυνάμεων ισχύει η σχέση (3.21).

$$\sum F_x = \dot{m}_2 \cdot c_2 - \dot{m}_1 \cdot c_1 \quad (3.20)$$

$$\sum F_x = p_1 \cdot y_1 - p_2 \cdot y_2 = \rho \cdot g \cdot \frac{y_1}{2} \cdot y_1 - \rho \cdot g \cdot \frac{y_2}{2} \cdot y_2 \quad (3.21)$$

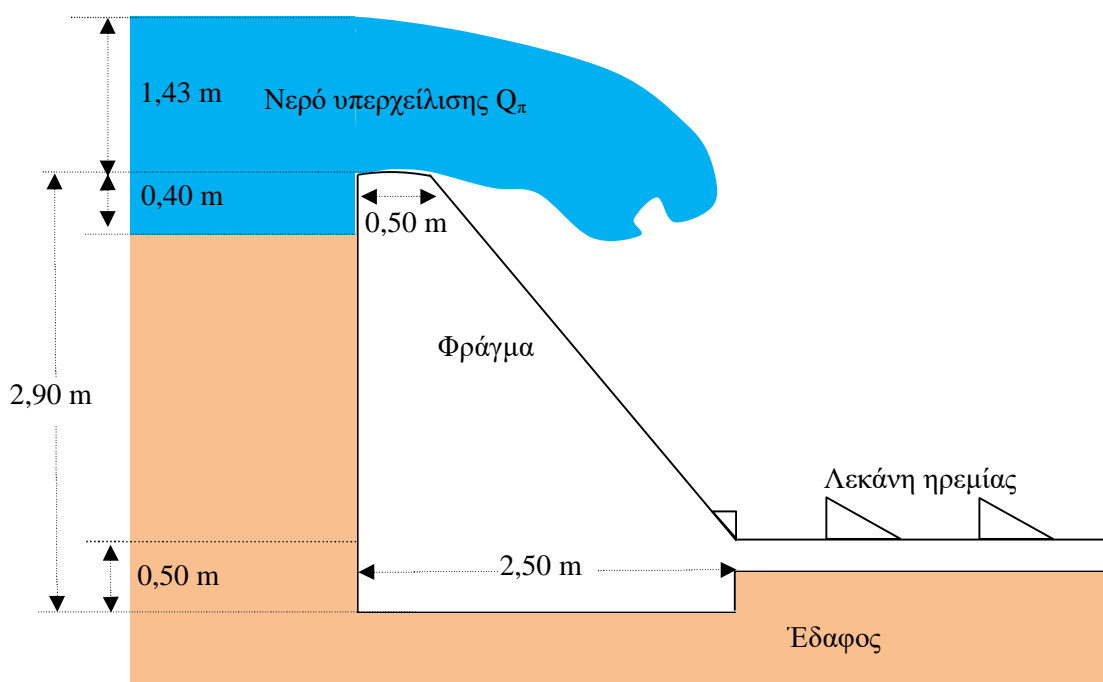
Από το συνδυασμό των σχέσεων (3.18) ως (3.21) προκύπτει το βάθος της υποκρίσιμης ροής η οποία, υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (3.22).

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot F_{r1}^2} - 1 \right) \quad (3.22)$$

Στην παρούσα περίπτωση το υποκρίσιμο βάθος y_2 είναι ίσο με $0,832 \text{ m}$ ενώ, η αντίστοιχη ταχύτητα c_2 υπολογίζεται μέσω της σχέσης (3.20) και προκύπτει ίση με $0,480 \text{ m/s}$. Ο αριθμός Froude F_{r2} μέσω της σχέσης (3.18) προέκυψε ίσος με $0,168$ δηλαδή, η ροή είναι υποκρίσιμη. Η αντίστοιχη ενέργεια ροής προκύπτει ίση με $E_2 = 0,843 \text{ m}$, δηλαδή οι αντίστοιχες απώλειες στη λεκάνη ηρεμίας ανέρχονται σε $3,280 \text{ m}$, τιμή η οποία αποτελεί ποσοστό $79,5\%$ της αρχικής ενέργειας ροής. Τα τοιχώματα της λεκάνης ηρεμίας πρέπει να είναι τουλάχιστον $0,832 \text{ m}$, πρακτικά $0,90 \text{ m}$. Το αντίστοιχο μήκος της λεκάνης δεν θα καλύπτει μόνο τον υπερχειλιστή ($6,0 \text{ m}$), αλλά και την ορεινή υδροληψία ($4,0 \text{ m}$), δηλαδή συνολικά 10 m . Η λεκάνη ηρεμίας δεν επηρεάζεται πρακτικά από την παροχή υδροληψίας.

- **Έργο φράγματος:** Το φράγμα βαρύτητας κατασκευάζεται από άοπλο σκυρόδεμα (ελαφρώς οπλισμένο με πλέγμα $\Phi 8$ ανά 10 σε βάθος 5 cm και διαμήκη οπλισμό $\Phi 12$ ανά $0,40 \text{ m}$ άνευ υπολογισμών). Αυτό θα έχει συνολικό μήκος περί τα 11 m και θα απαρτίζεται από τα παρακάτω τμήματα : Υδροληψία με μήκος 4 m , Υπερχειλιστή με μήκος 6 m και τρία τοιχώματα. Θα διαθέτει σχήμα τραπεζίου του οποίου η μικρή βάση διαθέτει κατάλληλη κύρτωση στο ύψος της στέψης ίσης με $0,50 \text{ m}$ ενώ, η μεγάλη βάση σε επίπεδο πυθμένα κατάντι θα ισούται με $2,50 \text{ m}$. Επιπρόσθετα, το ύψος στην περιοχή του υπερχειλιστή είναι $2,40 \text{ m}$, στην περιοχή της υδροληψίας $2,00 \text{ m}$, διαθέτει κεκλιμμένη βάση $0,83 \text{ m}$ με κλίση προς τα κατάντι 14° καθώς και μία βάση θεμελίωσης της οποίας το βάθος ισούται με $0,50 \text{ m}$, το πλάτος είναι ίσο με $2,50 \text{ m}$ και έχει υποστεί κατάλ-

ληλη διαμόρφωση η οποία περιλαμβάνει οδοντώσεις. Ακόμη έχει ελεγχθεί για όσα αφορούν τις παραμέτρους της ανατροπής, της ολίσθησης, και των τάσεων σε σύνηθες αργιλικό συνεκτικό έδαφος ή σε αμμοχάλικο θεωρώντας μόνο την πλημμυρική παροχή στα ανάντι. Η διερεύνηση της κατασκευής υπό συνθήκες σεισμού έχει πραγματοποιηθεί. Αυτή έχει υλοποιηθεί λαμβάνοντας ονομαστική παροχή λειτουργίας η οποία έχει προσαυξηθεί κατά 15%. Θεωρώντας υδροστατική πίεση σε ύψος 0,20 m στα ανάντι και αγνοώντας το νερό που φεύγει από την υπερχειλίση / υδροληψία υπέρ της ασφαλείας προκύπτει ότι καλύπτονται σε όλες τις περιπτώσεις οι σχετικές απαιτήσεις. Η τυπική διατομή φαίνεται στο σχήμα 3.31 και δεν επηρεάζεται πρακτικά από την τελική επιλογή παροχής λειτουργίας.



Σχήμα 3.31: Τυπική διατομή φράγματος σε υπερχειλιστή.

- **Έργο εξαμμωτή:** Με τη βοήθειά του επιτυγχάνεται η αφαίρεση αιωρούμενων σωματιδίων από τη ροή του νερού των οποίων η διάμετρος είναι μικρότερη από 15 mm. Το όριο αυτό τίθεται από το διάκενο στη σχάρα ενώ, τα προαναφερθέντα σωματίδια απομακρύνονται μέσω καθίζησης. Εάν η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων $C_{στ}$ είναι πολύ υψηλή, π.χ. 5 kg/m³, και είναι επιθυμητή η απομάκρυνση κόκκων άμμου διαστάσεων ως 0,2 mm των οποίων, η ταχύτητα κατακάθισης σε θερμοκρασία 25°C ισούται με $w_k = 20 \text{ mm/s}$ τότε, η ταχύτητα του νερού c μέσα στον εξαμμωτή / δεξαμενή καθίζησης πρέπει να είναι μικρότερη της κρίσιμης ταχύτητας που δίνεται από τη σχέση:

$$c_{cr} \approx 10 \cdot w_k \cdot R_H^{1/6} \quad (3.23)$$

Όπου R_H είναι η υδραυλική ακτίνα, δηλαδή το πηλίκο του εμβαδού της βρεχόμενης επιφάνειας $A_{βρ}$ προς την περίμετρο της επιφάνειας αυτής $P_{βρ}$.

$$R_H = \frac{A_{\beta\rho}}{P_{\beta\rho}} \quad (3.24)$$

Η ταχύτητα του νερού c μέσα στον εξαμμωτή προσδιορίζεται μέσω του πηλίκου της παροχής που λαμβάνεται ίση με την παροχή κανονικής λειτουργίας $Q_{κλ}$ προσαυξημένη κατά α_Q (εδώ 15%) προς το εμβαδό της βρεχόμενης επιφάνειας $A_{\beta\rho}$:

$$c = \frac{(1 + \alpha_Q) \cdot Q_{κλ}}{A_{\beta\rho}} \quad (3.25)$$

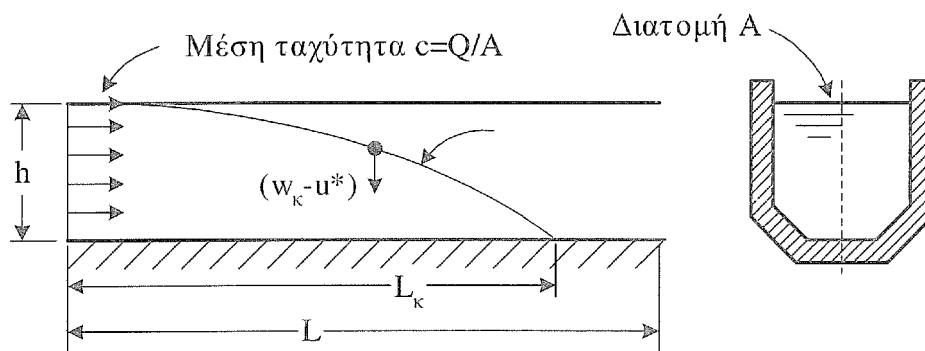
Πειραματικά αποδεικνύεται ότι η πραγματική ταχύτητα κατακάθισης είναι μικρότερη της w_k κατά την ταχύτητα τριβής u^* που εκφράζει το επίπεδο τύρβης μέσα στη ροή και ουσιαστικά είναι η τετραγωνική ρίζα της διατμητικής τάσης προς την πυκνότητα του ρευστού και μέσω των εξισώσεων Manning και Chezy καταλήγει κανείς στην ακόλουθη μορφή μέσω της παραμέτρου Strikler K :

$$u^* = \frac{c}{K} \cdot \frac{\sqrt{g}}{R_H^{1/6}} \quad (3.26)$$

Επόμενως το στερεό σωματίδιο που εισέρχεται στον εξαμμωτή από το υψηλότερο σημείο της ροής ελεύθερης επιφάνειας κατακάθεται σταδιακά με ταχύτητα ίση με $(w_k - u^*)$. Επομένως, πρέπει να διανύσει απόσταση $h_{εξ}$ σε χρόνο ίσο με $t_k = h_{εξ} / (w_k - u^*)$. Οπότε η ελάχιστη απόσταση κατά την οριζόντια διεύθυνση L_k της δεξαμενής εξαμμωτή είναι ίση με το γινόμενο της ταχύτητας c με το χρονικό διάστημα κατακάθισης t_k :

$$L_k = c \cdot t_k = c \cdot \frac{h_{εξ}}{(w_k - u^*)} \quad (3.27)$$

Δηλαδή το πραγματικό μήκος της δεξαμενής $L_{εξ}$ κατακάθισης πρέπει να είναι μεγαλύτερο του L_k , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.32. Συνήθως η διατομή του εξαμμωτή είναι τραπεζοειδής, ενώ αρκετές φορές ορθογωνική. Στην παρούσα περίπτωση μπορεί να συνδυαστεί με την ορεινή υδροληψία, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.33.



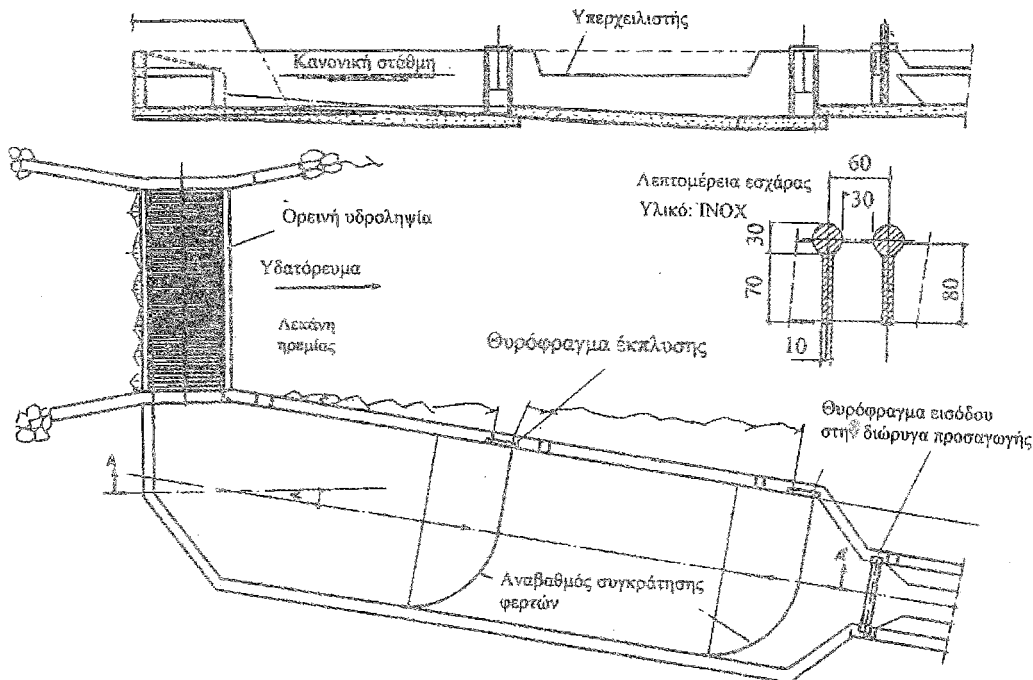
Σχήμα 3.32: Αρχή υπολογισμού μήκους δεξαμενής εξαμμωτή [E7, σχήμα 4.43β].

Επιπλέον, οι συσσωρευόμενοι κόκκοι πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να απομακρύνονται. Με δεδομένα τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων $C_{στ}$ και την παροχή λειτουργίας του εξαμμωτή υπολογίζεται η στερεοπαροχή των

σωματιδίων $\dot{m}_{\sigma\tau}$ και στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα των σωματιδίων $\rho_{\sigma\tau}$ και το βαθμό συμπύκνωσης $\beta_{\sigma\tau}$ βρίσκεται η παροχή όγκου των στερεών $Q_{\sigma\tau}$ που κατακάθονται:

$$\dot{m}_{\sigma\tau} = (1 + a_Q) \cdot Q_{κλ} \cdot C_{\sigma\tau} \quad (3.28)$$

$$Q_{\sigma\tau} = \frac{\dot{m}_{\sigma\tau}}{\beta_{\sigma\tau} \cdot \rho_{\sigma\tau}} \quad (3.29)$$



Σχήμα 3.33: Έργο ορεινής υδροληψίας με εξαμμωτή [E7, σχήμα 4.44β].

Λαμβάνοντας υπόψη την επιφάνεια του πυθμένα της δεξαμενής εξαμμωσης $A_{\text{πυθ}_\varepsilon\xi}$ και το πάχος συσσωρευμένων υλικών $h_{\sigma\tau}$ που επιτρέπεται να συγκεντρωθούν, τότε υπολογίζεται από το αντίστοιχο γινόμενο ο μέγιστος όγκος συσσωρευμένων υλικών $V_{\sigma\tau}$, ο οποίος δεν πρέπει να ξεπεραστεί από τα φερτά υλικά που συγκεντρώνονται σε χρόνο $t_{\sigma\tau_εκπλ}$ μεταξύ δύο διαδοχικών εκπλύσεων με βάση τη μέγιστη παροχή όγκου των στερεών $Q_{\sigma\tau}$, δηλαδή:

$$t_{\sigma\tau_εκπ} = \frac{V_{\sigma\tau}}{Q_{\sigma\tau}} = \frac{A_{\text{πυθ}_\varepsilon\xi} \cdot h_{\sigma\tau}}{Q_{\sigma\tau}} \quad (3.30)$$

Με βάση την ορθογωνική διατομή του σχήματος 3.33 το καθαρό πλάτος $B_{\varepsilon\xi}$ είναι ίσο με 3,0 m, το βάθος $h_{\varepsilon\xi}$ 1,5 m, με τοιχώματα πάχους από οπλισμένο σκυρόδεμα 20 cm και κλίση πυθμένα 2%. Επομένως, προκύπτει ότι το εμβαδόν της βρεχόμενης επιφάνειας είναι $A_{\beta\rho} = 4,5 \text{ m}^2$, η βρεχόμενη περίμετρος 6,0 m και η υδραυλική ακτίνα $R_H = 0,75 \text{ m}$. Ακολούθως η κρίσιμη ταχύτητα c_{cr} υπολογίζεται μέσω της σχέσης (3.23) και προκύπτει ίση με 0,191 m/s ενώ, η ταχύτητα του νερού c μέσα στον εξαμμωτή υπολογίζεται μέσω της σχέσης (3.25) ίση με 0,161 m/s και η ταχύτητα τριβής u^* μέσω της σχέσης (3.26) ίση με 8,82 mm/s. Οπότε, η ελάχιστη απόσταση L_k της δεξαμενής εξαμμωτή μέσω της

σχέσης (3.27) υπολογίζεται ίση με 21,597 m και στην πράξη επιλέγεται το μήκος της $L_{εξ}$ ίσο με 22 m. Με δεδομένη την υψηλή συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων $C_{στ}$ που τέθηκε ίση με 5 kg/m^3 , την πυκνότητα των σωματιδίων $\rho_{στ} = 2600 \text{ kg/m}^3$, το βαθμό συμπύκνωσης $\beta_{σν,στ} = 0,50$ και ένα τυπικό μέγιστο πάχος συσσωρευμένων υλικών $h_{στ} = 0,20 \text{ m}$, προσδιορίζονται οι ακόλουθες παράμετροι: α) η στερεοπαροχή των σωματιδίων μέσω της σχέσης (3.28) $\dot{m}_{στ} = 3,622 \text{ kg/s}$, β) η παροχή όγκου των στερεών μέσω της σχέσης (3.29) $Q_{στ} = 2,787 \text{ l/s}$, γ) ο μέγιστος όγκος συσσωρευμένων υλικών $V_{στ} = 13,2 \text{ m}^3$ και δ) ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών εκπλύσεων $t_{στ,εκπ} = 1,31 \text{ ώρες}$ για τη μέγιστη δυνατή παροχή. Αν λειτουργεί σε μικρότερες παροχές ή αν η στερεοπαροχή είναι μικρότερη, τότε ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών εκπλύσεων μπορεί να επιμηκυνθεί.

➤ **Έργο δεξαμενής φόρτισης.** Σκοπός της είναι η απρόσκοπτη τροφοδοσία του αγωγού πτώσης και των υδροστροβίλων κατά την εκκίνηση τους. Στην παρούσα περίπτωση με βάση τον πίνακα 4.4 του [E7] για μέγιστη παροχή λειτουργίας $0,723 \text{ m}^3/\text{s}$ (η παροχή ονομαστικής λειτουργίας έχει προσαυξηθεί κατά 15%) επιλέγεται δεξαμενή φόρτισης παροχής $1 \text{ m}^3/\text{s}$ με διαστάσεις $A=1,9 \text{ m}$, $D=1,0 \text{ m}$, $G=1,5 \text{ m}$, $H=0,4 \text{ m}$, $I=0,9 \text{ m}$, $J=0,35 \text{ m}$, $K=1,6 \text{ m}$, πάχος ράβδων εσχάρας 45 mm , διάκενο ράβδων 25 mm , πλάτος ράβδων 5 mm , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.34. Στην περίπτωση που ο εξαμμητός έχει κλειστή οροφή, τότε η σχάρα παραλείπεται.

➤ **Επιλογή σωλήνα προσαγωγής.** Για την επιλογή σωλήνα υπό πίεση από τη δεξαμενή φόρτισης προς το στρόβιλο λαμβάνονται υπόψη τα εξής στοιχεία: α) η πίεση λειτουργίας, όπου στην παρούσα περίπτωση η υδροστατική πίεση είναι 180 m (ήδη υπάρχει απώλεια $1,2 \text{ m}$), οπότε είναι απαιτητός σωλήνας τουλάχιστον 25 bar (θεωρώντας μία υπερπίεση της τάξης του 40% σε περίπτωση απόρριψης φορτίου), β) το υλικό λόγω της υψηλής πίεσης και της υπέργειας όδευσης να είναι χάλυβας, γ) η ταχύτητα του νερού να μην ξεπερνά τα $4,0 \text{ m/s}$, δ) οι συνολικές υδραυλικές απώλειες να είναι της τάξης του 5%, αλλά σε καμία περίπτωση να μην ξεπερνά το 10% του διαθέσιμου υδραυλικού ύψους.

Οι γραμμικές απώλειες δh_{linear} δίνονται από τη σχέση των Darcy-Weisbach μέσω της ταχύτητας του νερού μέσα στο σωλήνα c , του μήκους του σωλήνα L (στην παρούσα περίπτωση λαμβάνεται ίσο με 2200 m), της εσωτερικής διαμέτρου D_{int} , και του αδιάστατου συντελεστή γραμμικών απωλειών λ :

$$\delta h_{linear} = \lambda \cdot \frac{L}{D_{int}} \cdot \frac{c^2}{2 \cdot g} \quad (3.31)$$

Η ταχύτητα του νερού μέσα στο σωλήνα c συνδέεται με την ονομαστική παροχή λειτουργίας $Q_{κλ}$ και το πραγματικό εμβαδόν της διατομής του σωλήνα A_{real} ως εξής:

$$c = \frac{Q_{κλ}}{A_{real}} \quad (3.32)$$

Όπου για την περίπτωση κυκλικής διατομής με εσωτερική διάμετρο D_{int} ίση με την εξωτερική διάμετρο D_{out} ελαττωμένη κατά το διπλάσιο του πάχους των τοιχωμάτων του σωλήνα t_b το εμβαδόν είναι ίσο με:

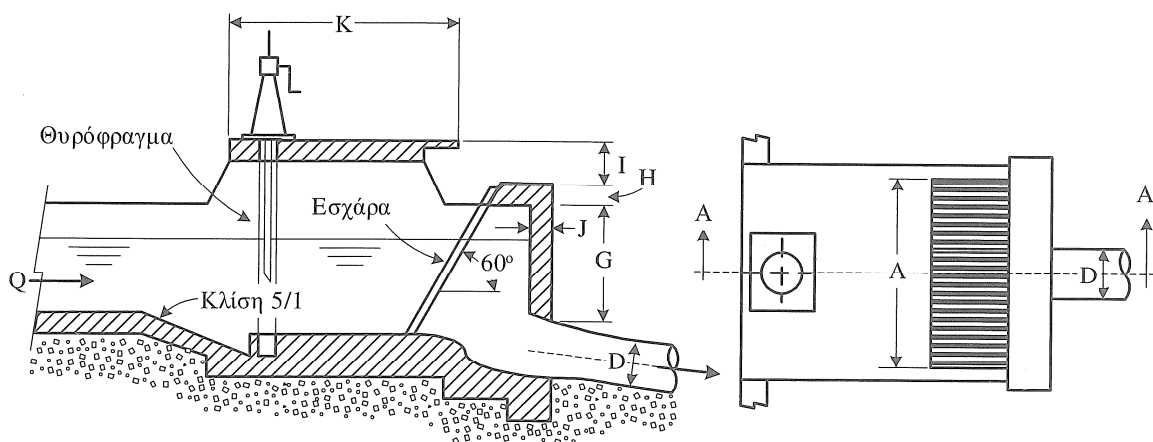
$$A_{real} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{in}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{out} - 2 \cdot t_b)^2 \quad (3.33)$$

Ο συντελεστής γραμμικών απωλειών λ υπολογίζεται με τη σειρά του επαναληπτικά μέσω της σχέσης Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{R_e \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon_s}{3,71} \right) \quad (3.34)$$

Όπου ε_s είναι η τραχύτητα του χαλυβωσλήνα (στην παρούσα περίπτωση ίσο με 0,1 mm), R_e ο αριθμός Reynolds που συνδέεται με την ταχύτητα του νερού, την κινηματική συνεκτικότητα ν (ίση με 10^{-6} m²/s) και την υδραυλική διάμετρο της διατομής D_H που στον κλειστό κυκλικό αγωγό υπό πίεση ταυτίζεται με την εσωτερική διάμετρο D_{int} :

$$R_e = \frac{c \cdot D_H}{\nu} \quad (3.35)$$



Σχήμα 3.34: Τυπική σχηματική διαμόρφωση και κύριες διαστάσεις δεξαμενής φόρτισης μικρού υδροηλεκτρικού [E7, σχήμα 4.52].

Το απαιτούμενο πάχος του χαλυβωσλήνα e προκύπτει από το άθροισμα τριών όρων που εκφράζουν το αναγκαίο πάχος e_0 λόγω της αναπτυσσόμενης ορθής τάσης εξαιτίας της εσωτερικής πίεσης, το πάχος e_1 λόγω ανομοιομορφίας πάχους του ελάσματος κατά την κατασκευή με τυπική τιμή 0,5 mm, το πάχος e_2 λόγω ανοχής για την ενδεχόμενη φθορά ή διάβρωση με τυπική τιμή 1 mm. Ειδικά για το e_0 ισχύει ότι:

$$e_0 = \frac{D_{out} \cdot p_{in-out}}{2 \cdot k_2 \cdot \frac{\sigma_{\varepsilon\pi}}{k_1}} \quad (3.36)$$

Όπου p_{in-out} είναι η εσωτερική πίεση ως προς την εξωτερική υπό την προϋπόθεση ότι η εσωτερική είναι μεγαλύτερη της εξωτερικής, αλλιώς δεν ισχύει η σχέση (3.36), $\sigma_{\varepsilon\pi}$ η επιτρεπόμενη τάση του χάλυβα που λαμβάνεται από πίνακες ή από πρότυπα, π.χ. πίνακας 4.5 του [E7], k_1 ο συντελεστής ασφαλείας ως προς την επιτρεπόμενη τάση του χάλυβα με τυπική τιμή 1,7, k_2 ο συντελεστής ασφαλείας ως προς την αντοχή της ραφής με τυπική τιμή 0,7 ως 0,9 για συγκολλητούς σωλήνες και 1,0 για σωλήνες άνευ ραφής. Επιπλέον για να είναι ικανός ο σωλήνας να αναλάβει τις φορτίσεις και να έχει

επαρκή ακαμψία κατά τη μεταφορά και την τοποθέτησή του, πρέπει το πάχος του τοιχώματος e να ικανοποιεί και τα εξής κριτήρια:

$$e = e_0 + e_1 + e_2 > 2,5 \cdot D_{out} [\text{m}] + 1,25 [\text{mm}] \quad (3.37)$$

$$e = e_0 + e_1 + e_2 > \frac{D_{out} [\text{mm}] + 508 [\text{mm}]}{400} \quad (3.38)$$

Ως προς το τελικά επιλεγόμενο πάχος του χαλυβოსωλήνα επιλέγεται η αμέσως μεγαλύτερη τυποποιημένη τιμή του πίνακα 4.7 του [E7] με βάση την υπολογισθείσα τιμή e . Επιπλέον υπάρχουν οι τοπικές απώλειες δh_{local} , οι οποίες προσδιορίζονται μέσω της ακόλουθης σχέσης και του συντελεστή απωλειών εντοπισμένης αντίστασης ζ :

$$\delta h_{local} = \zeta \cdot \frac{c^2}{2 \cdot g} \quad (3.39)$$

Ο συντελεστής εντοπισμένης αντίστασης ζ εξαρτάται από το εκάστοτε εμπλεκόμενο εξάρτημα και το είδος των τοιχωμάτων, π.χ. η παρούσα διάταξη απαρτίζεται ενδεικτικά από ένα στόμιο εισόδου από τη δεξαμενή φόρτισης που δεν προεξέχει σε αυτήν με στρογγυλεμένες ακμές με τυπική τιμή 0,25, 22 στροφές ακτίνας καμπυλότητας $r/D = 2$ μέσης μέγιστης γωνίας 90° με λεία επιφάνεια με τυπική τιμή 0,14, δύο σφαιρικές βάνες πλήρους ανοίγματος με τυπική τιμή 0,05, μία συστολή με στρογγυλεμένες άκρες με τυπική τιμή 0,02, οπότε συνολικά ο αντίστοιχος συντελεστής είναι 3,45.

Μελετώνται τεχνικά οι τυποποιημένοι σωλήνες από DN 8 ως DN 3000, για τους οποίους αρχικά προσδιορίζονται από τις σχέσεις (3.36) ως (3.38) το αναγκαίο πάχος τους, όπου ως DN150 καλύπτονται από το πάχος των τυποποιημένων για πίεση 25 bar, από DN 200 ως DN 1000 υπάρχει προσαύξηση του πάχους τοιχώματος μέσα σε τυποποιημένες διαστάσεις του πίνακα 4.7 του [E7] και για DN 1200 ως DN 3000 χρειάζεται ιδιαίτερη διαμόρφωση τοιχώματος (είναι πέρα από τις τυποποιημένες διαστάσεις πάχους). Ακολούθως ελέγχεται το κριτήριο της ταχύτητας, δηλαδή να είναι μικρότερη των 4 m/s, από το οποίο απορρίπτονται όλες οι διατομές από DN 400 και μικρότερες, ενώ η πρώτη διατομή που ικανοποιεί το ποσοστιαίο όριο των συνολικών απωλειών $\pi_{\nu\delta\rho}$ να μη ξεπερνά το 10% (δηλαδή το σύνολο των υδραυλικών απωλειών του σωλήνα και των εξαρτημάτων του προς το διαθέσιμο υδραυλικό ύψος των 180 m) είναι η διατομή των DN 600 με πάχος τοιχώματος 8,74 mm, η οποία είναι και η προτεινόμενη διατομή. Ο υπολογισμός του συντελεστή γραμμικών απωλειών γίνεται υποθέτοντας αρχική τιμή 0,001 και πραγματοποιώντας 5 επαναλήψεις. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα καταγράφονται συνοπτικά σε πίνακα 3.12.

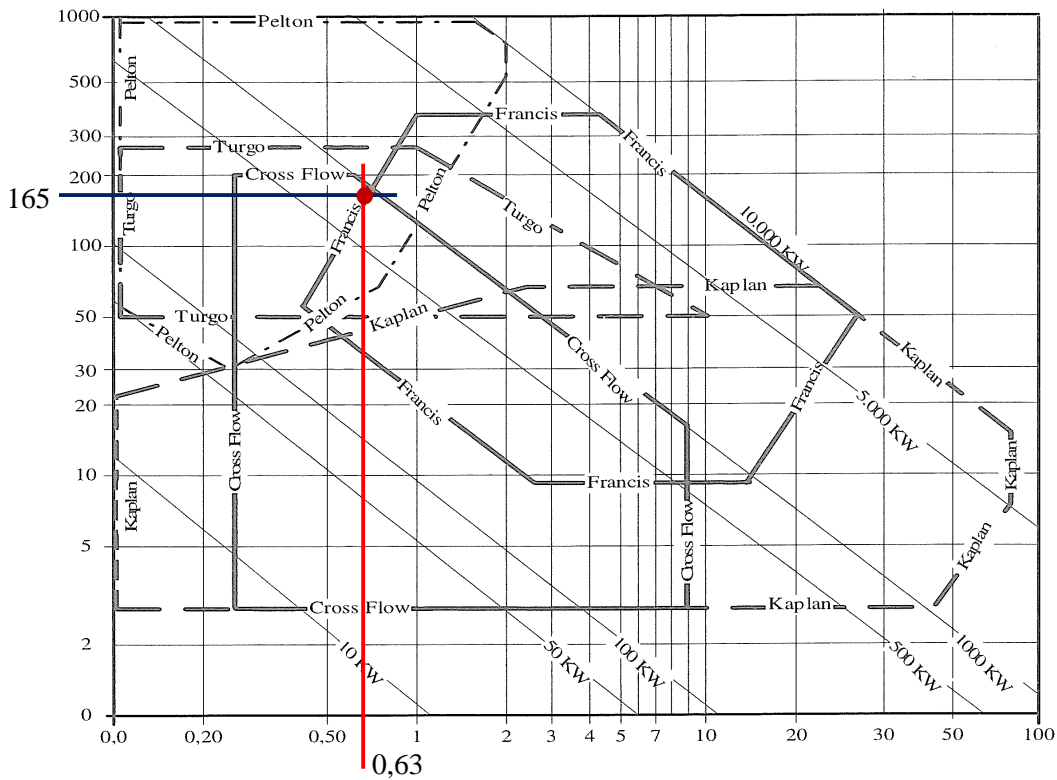
Πίνακας 3.12

Διαστασιολόγηση διαμέτρου χαλυβοσωλήνα

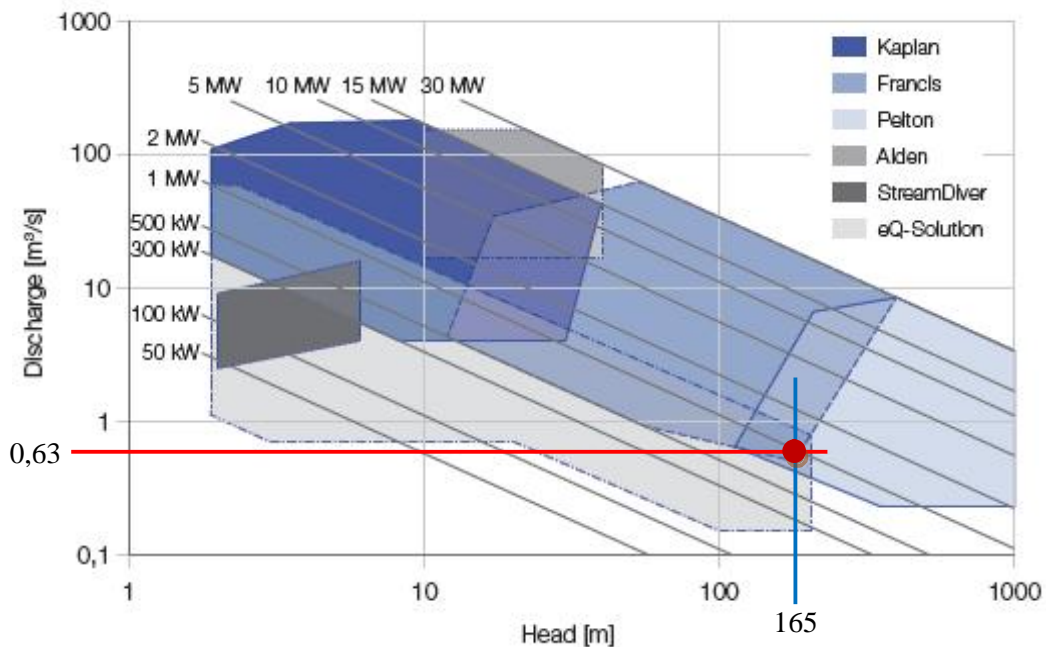
DN [mm]	D_{out} [mm]	e_o [mm]	e [mm]	t_b [mm]	D_{in} [mm]	c [m/s]	R_e [-]	λ [-]	δh_{linear} [m]	δh_{local} [m]	$\pi_{\nu\delta\rho}$ [%]
8	13,5	0,148	1,648	1,6	10,3	7561,3	77881622	0,0374943	23337147703	10053461	>100
10	17,2	0,188	1,688	1,8	13,6	4337,0	58983875	0,0342210	5307202839	3307569	>100
15	21,3	0,233	1,733	2,0	17,3	2680,2	46368827	0,0317213	1477028980	1263223	>100
20	26,9	0,294	1,794	2,0	22,9	1529,7	35029725	0,0291397	333868755	411455	>100
25	33,7	0,369	1,869	2,0	29,7	909,41	27009451	0,0270185	84362112	145425	>100
32	42,4	0,464	1,964	2,0	38,4	544,01	20890122	0,0251436	21728957	52040	>100
40	48,3	0,529	2,029	2,3	43,7	420,06	18356538	0,0242737	10989985	31027	>100
50	60,3	0,660	2,160	2,3	55,7	258,56	14401808	0,0227606	3063207	11756	>100
65	76,1	0,833	2,333	2,6	70,9	159,58	11314255	0,0213955	861705	4478	>100
80	88,9	0,973	2,473	3,2	82,5	117,86	9723402	0,0206026	388974	2443	>100
100	114,3	1,251	2,751	3,2	107,9	68,90	7434483	0,0193095	95265	834,8	>100
125	139,7	1,529	3,029	3,6	132,5	45,69	6054194	0,0184093	32526	367,1	>100
150	168,3	1,842	3,342	3,6	161,1	30,91	4979396	0,0176203	11717	168,0	>100
200	219,1	2,398	3,898	4,0	211,1	18,00	3800003	0,0166340	2863,0	56,98	>100
250	273	2,988	4,488	4,5	264,0	11,51	3038563	0,0159103	895,21	23,29	>100
300	323,9	3,545	5,045	5,56	312,78	8,200	2564680	0,0154192	371,65	11,82	>100
350	355,6	3,892	5,392	5,56	344,48	6,760	2328671	0,0151630	225,54	8,035	>100
400	406,4	4,448	5,948	6,35	393,70	5,175	2037543	0,0148380	113,19	4,710	65,501
500	508,0	5,560	7,060	7,14	493,72	3,291	1624768	0,0143713	35,348	1,904	20,696
600	609,6	6,672	8,172	8,74	592,12	2,288	1354760	0,0140803	13,958	0,921	8,266
700	711,2	7,784	9,284	9,52	692,16	1,674	1158953	0,0138949	6,311	0,493	3,780
800	812,8	8,896	10,396	10,31	792,18	1,278	1012624	0,0137853	3,188	0,287	1,931
900	914,0	10,003	11,503	11,91	890,18	1,012	901144	0,0137295	1,772	0,180	1,085
1000	1016,0	11,119	12,619	12,7	990,60	0,817	809793	0,0137104	1,037	0,118	0,641
1200	1220,0	13,352	14,852	14,9	1190,2	0,566	673988	0,0137480	0,415	0,0564	0,262
1400	1420,0	15,541	17,041	17,1	1385,8	0,418	578857	0,0138443	0,195	0,0307	0,126
1600	1620,0	17,730	19,230	19,3	1581,4	0,321	507260	0,0139731	0,102	0,0181	0,067
1800	1820,0	19,919	21,419	21,5	1777,0	0,254	451424	0,0141194	0,057	0,0113	0,038
2000	2020,0	22,107	23,607	23,7	1972,6	0,206	406662	0,0142748	0,0345	0,0075	0,023
2200	2220,0	24,296	25,796	25,8	2168,4	0,171	369941	0,0144342	0,0217	0,0051	0,015
2400	2420,0	26,485	27,985	28,0	2364,0	0,144	339332	0,0145943	0,0143	0,0036	0,010
2600	2620,0	28,674	30,174	30,2	2559,6	0,122	313401	0,0147533	0,0097	0,0026	0,007
2800	2820,0	30,863	32,363	32,4	2755,2	0,106	291152	0,0149100	0,0068	0,0020	0,005
3000	3020,0	33,052	34,552	34,6	2950,8	0,092	271852	0,0150640	0,0049	0,0015	0,004

➤ **Επιλογή στροβίλου & αγωγού φυγής:** Με βάση τα διαγράμματα για ονομαστική τιμή παροχής νερού ίσης με $0,630 \text{ m}^3/\text{s}$ και καθαρού υδραυλικού ύψους υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας $165,1 \text{ m}$ προκύπτει από το σχήμα 3.35, που αφορά διάφορους κατασκευαστές ότι, οι κατάλληλοι υδροστροβίλοι είναι τύπου Pelton, Turgo και οριακά Francis και Cross Flow. Ομοίως από το αντίστοιχο διάγραμμα της εταιρείας Voith του σχήματος 3.36, προτείνονται στροβίλοι τύπου Pelton και οριακά Francis ή eQ-solution.

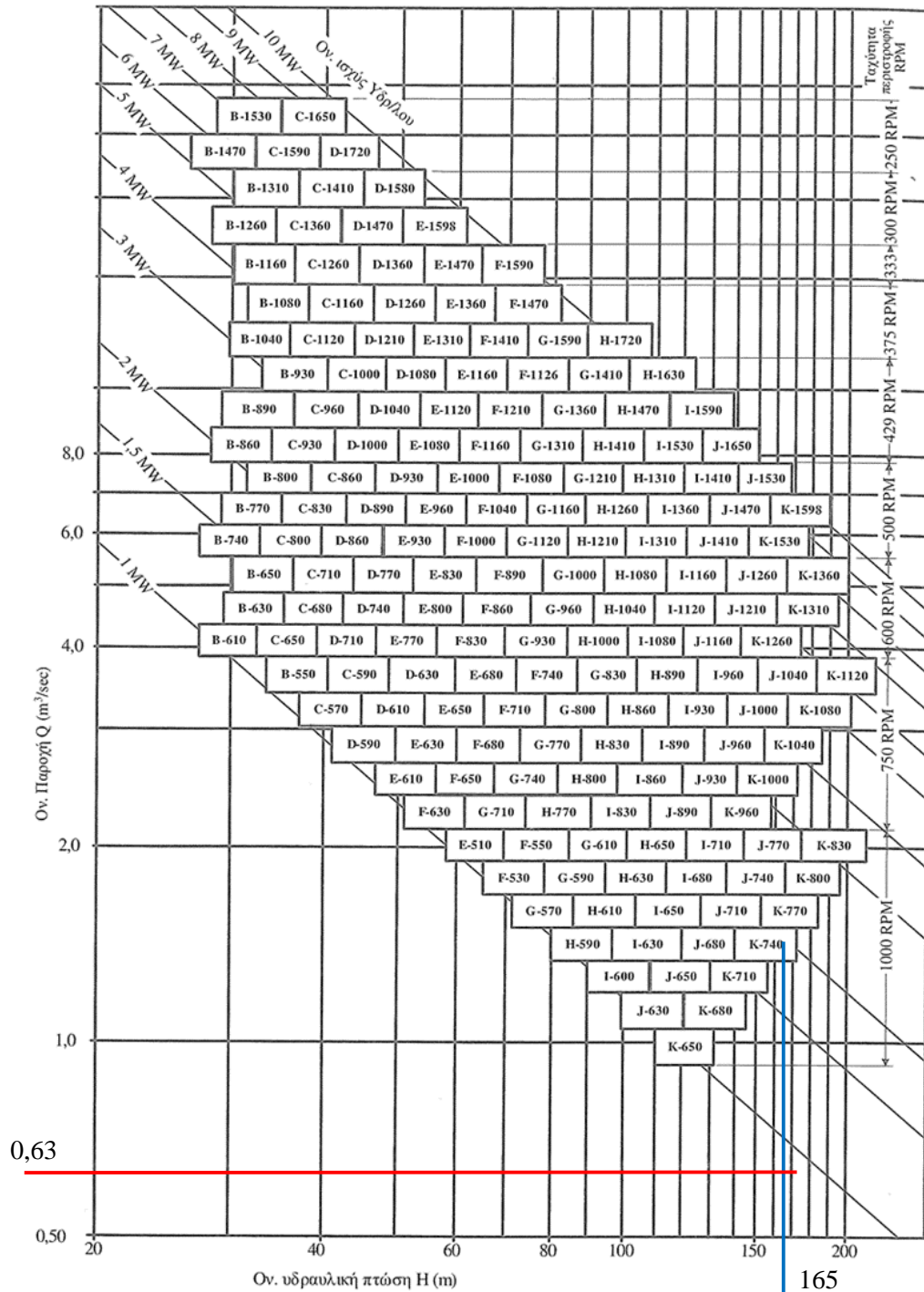
Από το εγχειρίδιο [E7] για υδροστροβίλους τύπου Francis οριζοντίου άξονα σπειροειδούς κελύφους της εταιρείας Toshiba προκύπτει ότι δεν υπάρχει κάποιος κατάλληλος λόγω μικρής ονομαστικής παροχής λειτουργίας $Q_{κλ}$, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.37. Ομοίως παρατηρούνται και για τις εταιρείες Sogumand με Francis κλειστού θαλάμου και Voith με Francis ανοικτού θαλάμου, όπως φαίνονται στα σχήματα 3.38 και 3.39 αντίστοιχα (δεν καλύπτουν διαθέσιμο υδραυλικό ύψος).



Σχήμα 3.35: Διάγραμμα επιλογής υδροστροβίλων από διάφορες εταιρείες (οριζόντιος άξονας: παροχή σε m^3/s , κατακόρυφος άξονας: διαθέσιμο υδραυλικό ύψος λειτουργίας σε m) [E7, σχήμα 5.29.α].



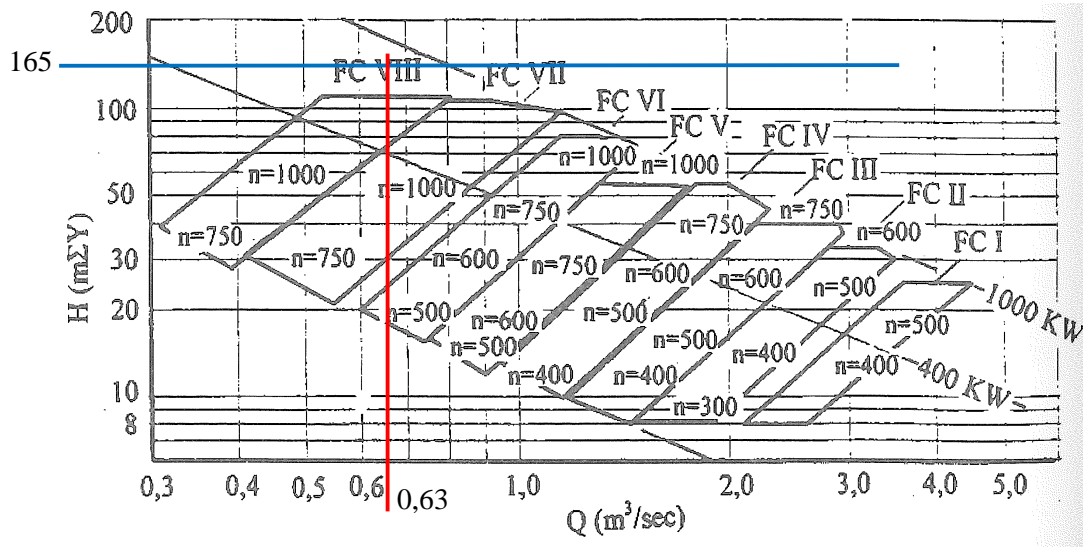
Σχήμα 3.36: Διάγραμμα επιλογής υδροστροβίλων από την εταιρεία Voith. [E9, fig , page]



Σχήμα 3.37: Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Francis οριζοντίου άξονα με σπειροειδές κέλυφος της εταιρείας Toshiba [E7, σχήμα 5.33].

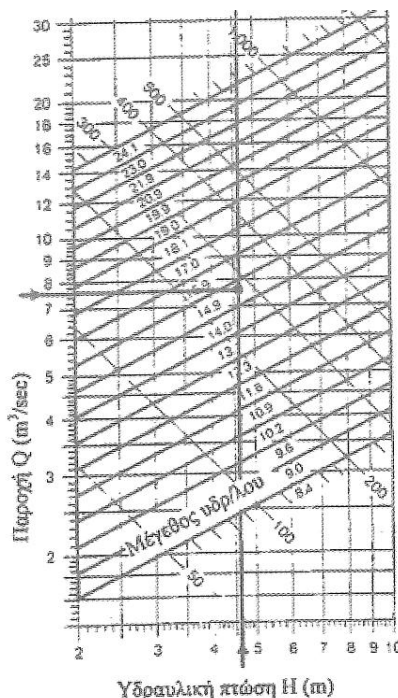
Ως προς τους στροβίλους Pelton με βάση το [E7] οι στροβίλοι της εταιρείας IREM έχουν μέγιστο υδραυλικό ύψος λειτουργίας 150 m και παροχή ως 100 l/s, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.40, οπότε δεν είναι κατάλληλοι. Αντίστοιχα οι υδροστροβίλοι

της εταιρείας Bouvier δεν είναι κατάλληλοι λόγω περιορισμένης ονομαστικής παροχής, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.41. Η εταιρεία Voith για την περίπτωση ενός ακρο

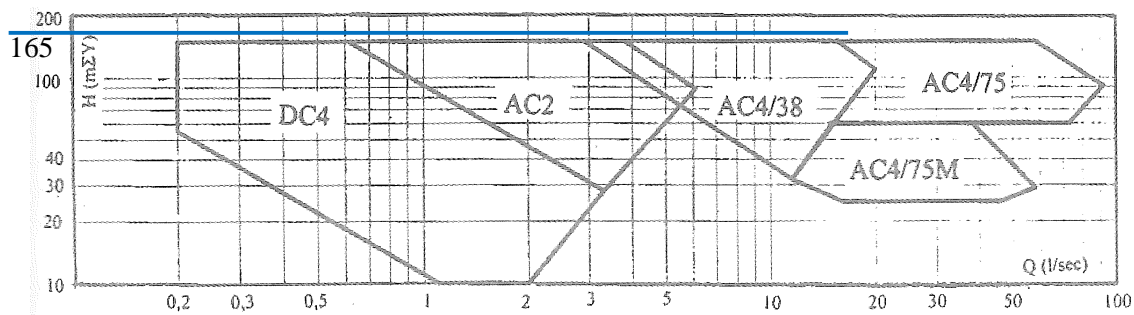


Σχήμα 3.38: Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Francis οριζοντίου άξονα κλειστού θαλάμου της εταιρείας Sogumsand [E7, σχήμα 5.35].

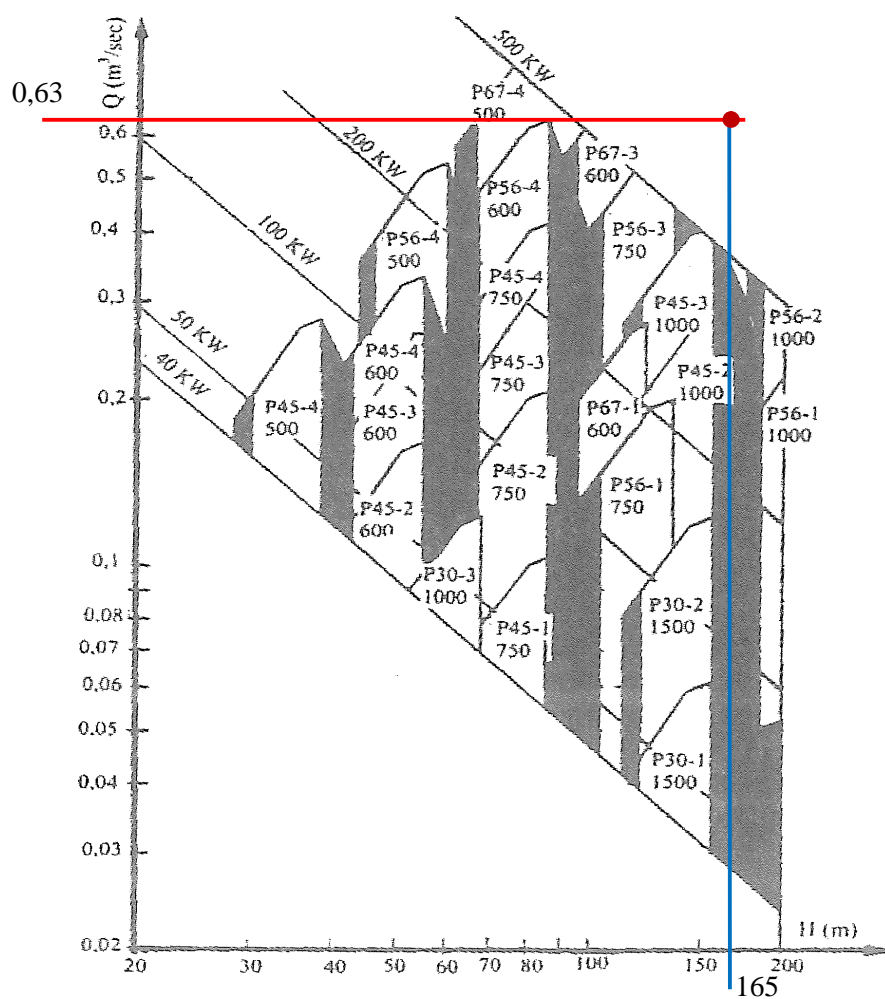
φυσίου δεν διαθέτει στρόβιλο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.42 ενώ, στην περίπτωση δύο ακροφυσίων υπάρχει στρόβιλος τύπου «a» μεγέθους «7» με 600 Σ.Α.Λ., όπως φαίνεται στο σχήμα 3.43, ή τεσσάρων ακροφυσίων τύπου «b» μεγέθους «5» με 750 Σ.Α.Λ., όπως φαίνεται στο σχήμα 3.44.



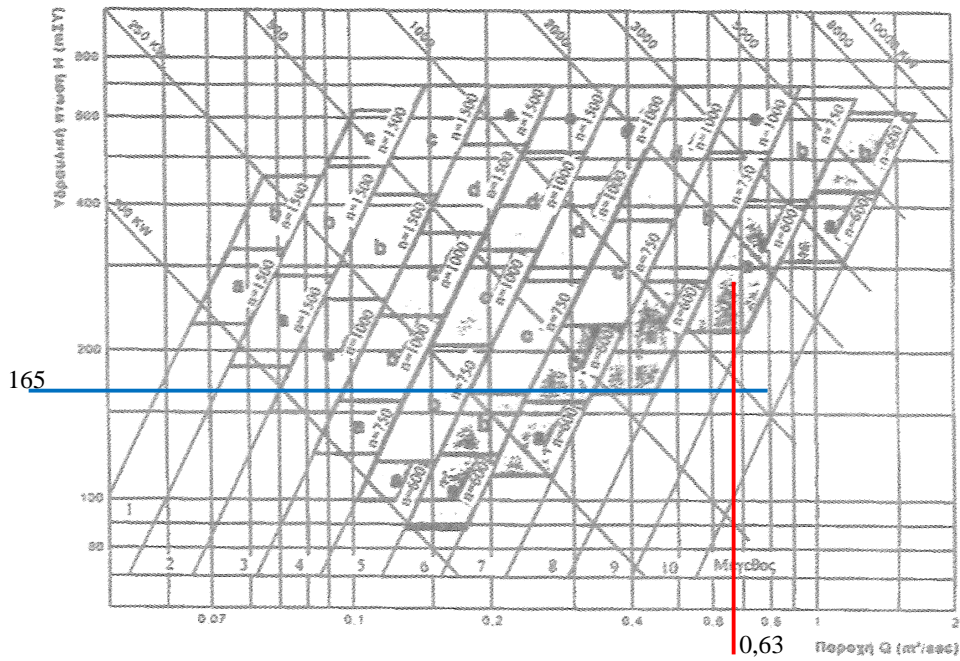
Σχήμα 3.39: Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Francis κατακόρυφου άξονα με ανοικτό θάλαμο της εταιρείας Voith [E7, σχήμα 5.38].



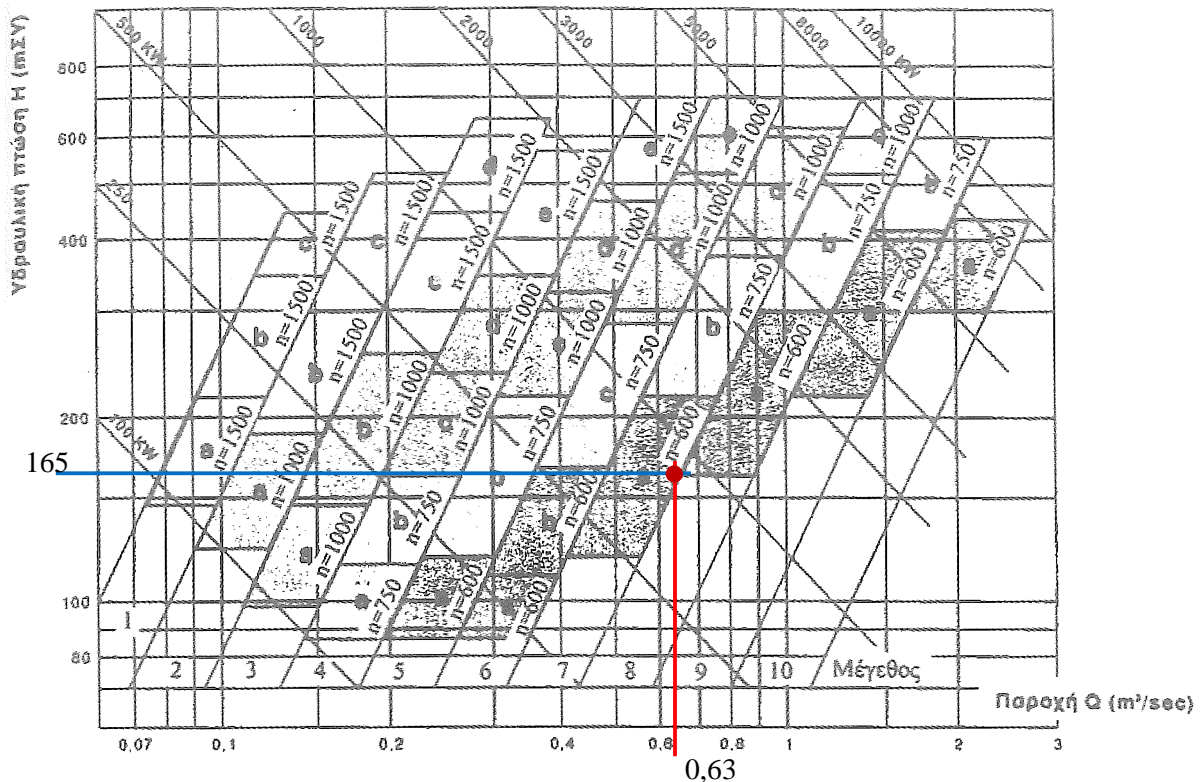
Σχήμα 3.40: Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton κατακόρυφου άξονα της εταιρείας IREM [E7, σχήμα 5.59].



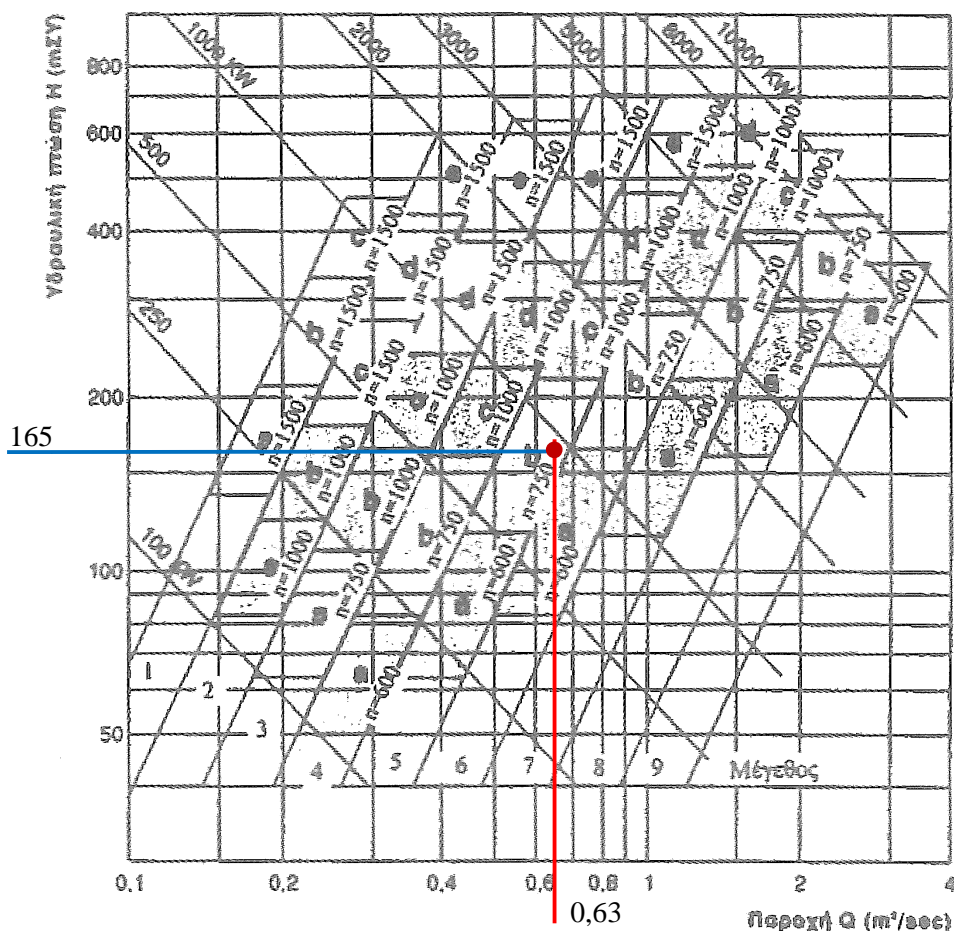
Σχήμα 3.41: Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton κατακόρυφου άξονα της εταιρείας Bouvier [E7, σχήμα 5.62].



Σχήμα 3.42: Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton οριζοντίου άξονα ενός ακροφυσίου της εταιρείας Voith [E7, σχήμα 5.64.α].



Σχήμα 3.43: Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton οριζοντίου άξονα δύο ακροφυσίων της εταιρείας Voith [E7, σχήμα 5.64β].

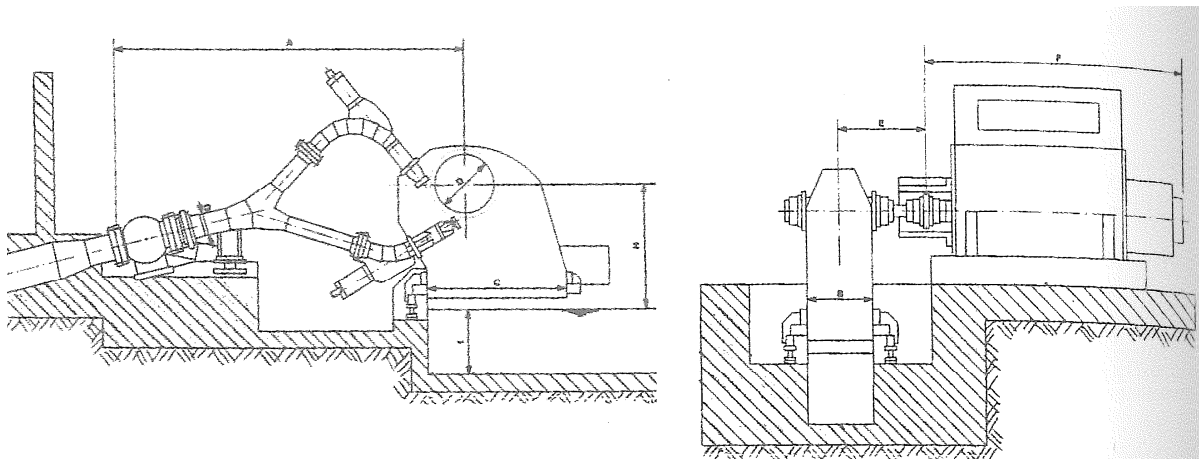


Σχήμα 3.44: Διάγραμμα περιοχής λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton οριζοντίου άξονα τεσσάρων ακροφυσίων της εταιρείας Voith [E7, σχήμα 5.64γ].

Ως προς τους στροβίλους Cross Flow με βάση το [E7] διατίθενται στρόβιλοι της εταιρείας Hitachi με μέγιστο υδραυλικό ύψος λειτουργίας τα 100 m, ενώ οι αντίστοιχοι της εταιρείας IREM είναι περιορισμένοι τόσο ως προς την παροχή στα 400 l/s, όσο και ως προς το ύψος φτάνοντας στα 30 m, οπότε δεν είναι κατάλληλοι. Ως προς τους στροβίλους Turgo με βάση το [E7] δεν διατίθενται πολλά τεχνικά δεδομένα, ενώ επιπλέον υστερούν ως προς την απόδοση και ως προς τον όγκο σε σχέση με τους Pelton, οπότε, εφόσον υπάρχει κατάλληλος στρόβιλος Pelton, θα χρησιμοποιηθεί αυτός.

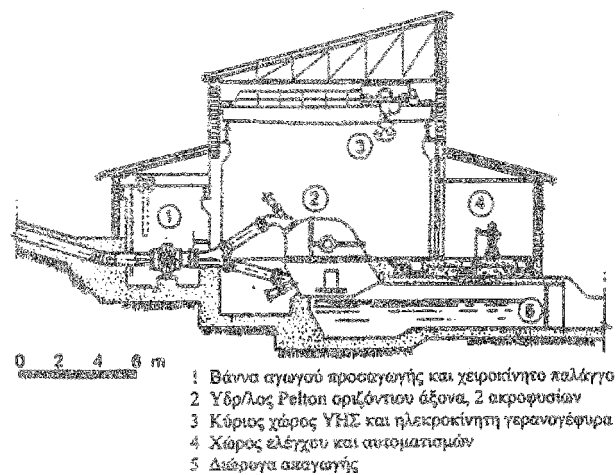
Στην παρούσα περίπτωση επιλέγεται ο στρόβιλος είδους Pelton της εταιρείας Voith δύο ακροφυσίων υποτύπου «α» μεγέθους «7» με 600 Σ.Α.Λ., σύμφωνα με το σχήμα 3.43. Προτιμήθηκε έναντι των τεσσάρων ακροφυσίων λόγω της απλούστερης κατασκευής του. Η δομή του παρουσιάζεται στο σχήμα 3.45 με τις ακόλουθες διαστάσεις με βάση τον πίνακα 5.8 του [E7] $D=970$ mm, $A=6100$ mm, $B=1200$ mm, $C=2450$ mm, $E=1350$ mm, $F=3700$ mm, $G=500$ mm, $H=2300$ mm, $I=1200$ mm. Ως προς το βαθμό απόδοσης λόγω έλλειψης δεδομένων λαμβάνεται τυπικά η ελάχιστη τυπική τιμή ίση με 0,88, η οποία παραμένει σταθερή ως παροχή 15% ανά ακροφύσιο. Επειδή ο συγκεκριμένος στρόβιλος διαθέτει 2 ακροφύσια, μπορεί να λειτουργήσει από το $15\%/2 = 7,5\%$

(με το ένα ακροφύσιο) ως το 115% (με τα δύο ακροφύσια) της ονομαστικής του παροχής.



Σχήμα 3.45: Κύριες διαστάσεις τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton οριζοντίου άξονα δύο ακροφυσίων της εταιρείας Voith [E7, σχήμα 5.63].

Επιπλέον επισημαίνεται ότι ο αγωγός φυγής έχει αρχικές διαστάσεις πλάτους $B=1200$ mm και βάθους $I=1200$ mm, ενώ η απόσταση μεταξύ του μέσου του οριζοντίου άξονα (κάτω άκρο διαθέσιμου υδραυλικού ύψους) και της άνω πλημμυρικής στάθμης νερού του Κεφαλοποτάμου είναι τουλάχιστον $H+I=3500$ mm = 3,5 m, οπότε μαζί με το 1,2 m υδραυλικού ύψους που είναι οι απώλειες επί της υδροληψίας- εξαμωτή- δεξαμενή φόρτισης, προκύπτει 4,7 m απώλειες υδραυλικού ύψους που είναι αρκετά κοντά στα 5,0 m, που είχαν υποτεθεί αρχικά, έχοντας ένα επιπλέον περιθώριο 0,30 m. Η αντίστοιχη διάωρυγα φυγής έχει μήκος περίπου 10 m, όπως φαίνεται στο ενδεικτικό σχήμα 3.46 διαμόρφωσης του σταθμού.



Σχήμα 3.46: Τομή μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού Pelton οριζοντίου άξονα δύο ακροφυσίων [E7, σχήμα 7.4].

Από την αντίστοιχη ανάλυση υδραυλικής ανοικτών αγωγών η ταχύτητα του νερού μέσα σε διάωρυγα για την ονομαστική παροχή λειτουργίας είναι 8,21 m/s με ύψος νερού 0,079 m, όταν η στάθμη οριζοντίου άξονα και πυθμένα διάωρυγα φυγής 3,50 m με πλάτος 1,20 m. Αν η διάωρυγα φυγής έχει υπερχειλιστή ύψους 1,0 m από τον πυθμένα,

τότε μπορεί να εξασφαλιστεί στάθμη ύδατος στο 1,0 m, η ροή ύδατος γίνεται με ταχύτητα 7,01 m/s με ύψος νερού 0,0749 m πλέον του 1,0 m, με συνθήκες κρίσιμης ροής ($Fr=8,18>1$). Ωστόσο το τελευταίο εξασφαλίζει δυνατότητα 1,30 m υψομετρική διαφορά μεταξύ της στάθμης κανονικής λειτουργίας και της στάθμης του ποταμού, το οποίο συνεπαγεται ότι μπορεί να αυξηθεί κατά το αντίστοιχο μέγεθος η πλημμυρική στάθμη από την πλευρά του ποταμού. Από την άλλη η κρίσιμη ροή απαιτεί την κατά-σκευή μίας μικρής διάταξης μορφής λεκάνης ηρεμίας προς περιορισμό της ταχύτητας ροής και τη μετάβαση σε υποκρίσιμη ροή. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται η συμβολή του κατασκευαστή του στροβίλου ως προς τη δώρυγα φυγής.

Συνοψίζοντας ως προς το στρόβιλο η ονομαστική του ισχύς $P_{nom-str}$ είναι ίση με 901,118 kW για την κανονική παροχή λειτουργίας $Q_{κλ}$ 0,632 m³/s και αντίστοιχο ύψος $H_{κλ}$ 165,1 m με τυπικό βαθμό απόδοσης η_{str} 0,88 σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_{nom-str} = \eta_{str} \cdot \rho \cdot g \cdot Q_{κλ} \cdot H_{κλ} \quad (3.40)$$

Όπου $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ είναι η πυκνότητα του νερού και $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ είναι η επιτάχυνση του νερού. Λόγω ύπαρξης δύο ακροφυσίων η παροχή κυμαίνεται από 7,5% ως 115% της παροχής κανονικής λειτουργίας. Αυτή αντιστοιχεί σε 0,04743 m³/s ως 0,7273 m³/s ενώ τα αντίστοιχα υδραυλικά ύψη είναι από 179,916 m ως 160,295 m. Αυτά που αντιστοιχούν σε εύρος τιμών 97,47% ως 108,97% του ύψους κανονικής λειτουργίας το οποίο βρίσκεται μέσα στα τυπικά όρια 85% ως 125% που δίνονται από τον πίνακα 5.2 του [E7]. Το αντίστοιχο εύρος ισχύος κυμαίνεται ενδεικτικά από 73,648 kW ως 1006,12 kW, αν και στην πραγματικότητα θα είναι ελαφρώς μειωμένο λόγω του μικρότερου βαθμού απόδοσης του στροβίλου από το βαθμό απόδοσης σε κανονική λειτουργία.

- **Επιλογή γεννήτριας:** Με βάση τις οδηγίες του [E7] για ισχύ μονάδας ως 1 MW επιλέγεται ασύγχρονη τριφασική γεννήτρια δέκα πόλων με σύγχρονη ταχύτητα 600 R.P.M. η οποία ζευγνύεται άμεσα με υδροστρόβιλο, ενδεικτικού τύπου 500, ενεργού ισχύος 880 kW, πολικής τάσης 380 V, ρεύματος γραμμής 1532 A, συχνότητας 50 Hz, 604 R.P.M. με ροπή 1448 Nm, ροπή αδρανείας 130,2 kg/m², βάρος 5.915 kr από την ιταλική εταιρεία Marelli [E7 – έκδοση 2021, παράρτημα 1]. Οπότε ο επαγωγικός συντελεστής ισχύος είναι ίσος με 0,8727 ($=880\text{kW}/\sqrt{3}\cdot 380\text{V}\cdot 1532\text{A}$). Ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης προσδιορίζεται μέσω γραμμικής παρεμβολής από τον πίνακα 6.5 του [E7], προκύπτει ίσος με 0,9325 και θεωρείται σταθερός στα διάφορα επίπεδα φορτίσεων, αν και στην πραγματικότητα μειώνεται η απόδοση κατά 10% σε φορτίο ίσο με το 25% του ονομαστικού. Αν ήταν σύγχρονη γεννήτρια, ο αναγκαίος επαγωγικός συντελεστής ισχύος θα ήταν 0,90 και θα επιλεγόταν αντίστοιχα σύγχρονη τριφασική γεννήτρια δέκα πόλων με σύγχρονη ταχύτητα 600 R.P.M. για άμεση ζεύξη με υδροστρόβιλο, ενδεικτικού τύπου 630, με φαινόμενη ισχύ 1020 kVA, πολική τάση 380 V, συχνότητα 50 Hz, ροπή αδρανείας 188 kg/m², βάρος 6.500 kr από την εταιρεία Marelli [E7 – έκδοση 2021, παρ.1]. Ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης θα ήταν 0,9664 με βάση τον πίνακα 6.2 του [E7] και θεωρείται σταθερός στα διάφορα επίπεδα φορτίσεων, αν και μεταβάλλεται κατά το σχήμα 6.5 του [E7]. Επιλέγοντας όμως την ασύγχρονη γεννήτρια και με δεδομένη την ονομαστική ισχύ $P_{nom-str}$ υπολογίζονται

η ονομαστική παραγόμενη ενεργός ισχύς $P_{nom-gen-str}$ της γεννήτριας με βαθμό απόδοσης η_{gen} η οποία προκύπτει ίση με 840,29 kW και η ονομαστική παραγόμενη φαινόμενη ισχύς $S_{nom-gen-str}$ της γεννήτριας με επαγωγικό συντελεστή ισχύος $\cos\phi_{gen}$ η οποία προκύπτει ίση με 962,87 kVA σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$P_{nom-gen-str} = \eta_{gen} \cdot P_{nom-str} \quad (3.41)$$

$$S_{nom-gen-str} = \frac{P_{nom-gen-str}}{\cos\phi_{gen}} \quad (3.42)$$

Με βάση τα εύρη λειτουργίας του στροβίλου με τα δύο ακροφυσία με παροχή που κυμαίνεται από 7,5% ως 115% της παροχής κανονικής λειτουργίας προκύπτει το εύρος ενεργού ισχύος να κυμαίνεται ενδεικτικά από 68,678 kW ως 938,21 kW, αντίστοιχα της φαινόμενης ισχύος από 78,696 ως 1075,07 kVA, αν και στην πραγματικότητα θα είναι ελαφρώς μειωμένα λόγω των μικρότερων βαθμών απόδοσης του στροβίλου και της γεννήτριας σε διαφορετικά φορτία σε σχέση με το βαθμό απόδοσης σε κανονική λειτουργία του στροβίλου και το ονομαστικό βαθμό απόδοσης γεννήτριας.

➤ **Επιλογή μετασχηματιστή:** Με βάση τα αποτελέσματα των σχέσεων (3.41) και (3.42) και τον πίνακα 6.10 του [E7] επιλέγεται ένας μετασχηματιστής λαδιού 380V / 20kV φαινόμενης ισχύος 1000 kVA που καλύπτει τις ανάγκες φαινόμενης ισχύος 959,21 kVA [E7]. Ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης προσδιορίζεται μέσω γραμμικής παρεμβολής από τον πίνακα 6.10 του [E7] ίσος με 0,98822 και θεωρείται σταθερός στα διάφορα επίπεδα φορτίσεων, αν και στην πράξη μεταβάλλεται π.χ. 98,80% για φόρτιση ίση με το 100% της ονομαστικής, 99,02% για φόρτιση ίση με το 75% της ονομαστικής, 99,08% για φόρτιση ίση με το 50% της ονομαστικής με επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0,90. Επιλέγοντας τον ανωτέρω μετασχηματιστή, με δεδομένα την ονομαστική παραγόμενη ενεργό ισχύ $P_{nom-gen-str}$ και ονομαστική παραγόμενη φαινόμενη ισχύ $S_{nom-gen-str}$ της γεννήτριας υπολογίζονται η ονομαστική παραγόμενη ενεργός ισχύς $P_{nom-tran-gen-str}$ και η ονομαστική παραγόμενη φαινόμενη ισχύς $S_{nom-tran-gen-str}$ του μετασχηματιστή με βαθμό απόδοσης η_{gen} ίση με 830,40 kW και 951,53 kVA σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$P_{nom-tran-gen-str} = \eta_{tran} \cdot P_{nom-gen-str} \quad (3.43)$$

$$S_{nom-tran-gen-str} = \eta_{tran} \cdot S_{nom-gen-str} \quad (3.44)$$

Με βάση τα εύρη λειτουργίας του στροβίλου με τα δύο ακροφυσία με παροχή που κυμαίνεται από 7,5% ως 115% της παροχής κανονικής λειτουργίας προκύπτει ότι το εύρος ενεργού ισχύος κυμαίνεται ενδεικτικά από 67,869 ως 927,16 kW, αντίστοιχα της φαινόμενης ισχύος από 77,768 ως 1062,41 kVA. Στην πραγματικότητα όμως θα είναι ελαφρώς μειωμένα λόγω των μικρότερων βαθμών απόδοσης του στροβίλου και της γεννήτριας σε διαφορετικά φορτία σε σχέση με το βαθμό απόδοσης σε κανονική λειτουργία του στροβίλου και το ονομαστικό βαθμό απόδοσης γεννήτριας.

➤ **Επιλογή συστήματος ρυθμιστή στροφών.** Πρόκειται για μία μονάδα ελέγχου με την οποία ρυθμίζεται η λειτουργία των ακροφυσίων στους στροβίλους Pelton και κατ' επέκταση η παραγόμενη ενεργός ισχύς των ασύγχρονων γεννητριών. Στην περίπτωση σύγχρονων γεννητριών ρυθμίζουν επιπλέον και τη διέγερση των γεννητριών και κατ' επέκταση την παραγόμενη άεργο ισχύ για την περίπτωση του διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η αναγκαία ροπή W που αναπτύσσει ο ρυθμιστής στροφών υδροστροβίλου του σχήματος 3.47 δίνεται από τη σχέση:

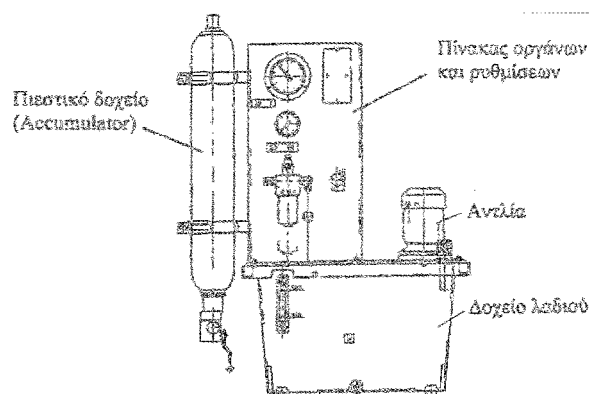
$$W = 0,00011 \cdot z \cdot d_o^3 \cdot H_{max} + z \cdot \left(d_o + \frac{d_o^3 \cdot H_{max}}{6000} \right) [kp \cdot m] \quad (3.45)$$

Όπου H_{max} είναι η μέγιστη τιμή της υδραυλικής πτώσης (στην παρούσα περίπτωση 180 m), z ο αριθμός των ακροφυσίων, d_o η διάμετρος της δέσμης νερού υπό την ονομαστική ισχύ, η οποία υπολογίζεται μέσω της αντίστοιχης μέσης ταχύτητας c_e της κυκλικής δέσμης νερού κατά την εξ ολοκλήρου μετατροπή της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης κανονικής λειτουργίας $H_{κλ}$ (στην εφαρμογή αυτή 165,1 m) σε κινητική με συντελεστή φ λόγω απωλειών ακροφυσίου 97% και μέσω της παροχής νερού κανονικής λειτουργίας ανά ακροφύσιο $Q_{κλ}/z$ (εδώ έχουμε $0,630/2 = 0,315 \text{ m}^3/\text{s}$) σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$c_e = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{κλ}} \quad (3.46)$$

$$\frac{Q_{κλ}}{z} = c_e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_o^2 \Rightarrow d_o = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{κλ}}{\pi \cdot z \cdot c_e}} \quad (3.47)$$

Οπότε η μέση ταχύτητα της κυκλικής δέσμης νερού στο ακροφύσιο ισούται με $c_e = 55,207 \text{ m/s}$, η διάμετρος της δέσμης νερού προκύπτει $d_o = 0,085236 \text{ m}$ και η ροπή $W = 0,17 \text{ kpm}$. Οπότε σύμφωνα με τον πίνακα 6.12 χρειάζεται το μέγεθος ρυθμιστή στροφών τύπου 1 με τη μικρότερη ροπή (62,2 kpm) με πίεση λειτουργίας 10,55 bar, παροχή αντλίας 0,05 l/s, ισχύ αντλίας 373 W, όγκο δοχείου 15,1 lt, όγκο ελαϊολεκάνης 106 lt.



Σχήμα 3.47: Διάταξη μονάδας ισχύος ρυθμιστού στροφών υδροστροβίλου [E7, σχήμα 6.23].

➤ **Έλεγχος μέγιστου επιτρεπόμενου μήκους τμήματος φυσικής κοίτης υδατορέματος από το οποίο εκτρέπεται το νερό με τον αγωγό προσαγωγής:** Σύμφωνα με τα όσα προβλέπονται στην Υπουργική Απόφαση 196978/2011 με τίτλο «Συμπλήρωση και εξειδίκευση τεχνικών και λοιπών λεπτομερειών και κριτηρίων χωροθέτησης Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων που προβλέπεται στο Ειδικό πλαίσιο χωροταξικού σχεδιασμού και αιερόφορου ανάπτυξης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας», άρθρο 3, παράγραφος β, το μέγιστο επιτρεπόμενο οριζοντιογραφικό μήκος $L_{max-φκ}$ της εκτροπής της φυσικής κοίτης του υδατορέματος από το σημείο υδροληψίας ως το σημείο επαναφοράς του νερού στη φυσική κοίτη (έξοδος αγωγού φυγής) σε km δίνεται σε συνάρτηση με την ενεργό ισχύ εξόδου του σταθμού P_{unit} σε MW, το οποίο ταυτίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις με την ονομαστική παραγόμενη ενεργό ισχύς $P_{nom-tran-gen-str}$ στην έξοδο του μετασχηματιστή, με την απαιτούμενη οικολογική παροχή $Q_{οικ-απαιτ}$ για τη διατήρηση των κατάντι οικοσυστημάτων στη θέση υδροληψίας που σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να είναι μικρότερη από τα μεγέθη του ΕΠΧΣΑΑ-ΑΠΕ, άρθρου 16, παράγραφος 3ε, και με την οικολογική παροχή που πραγματικά δίνεται $Q_{οικ-πραγμ}$ με πρωτοβουλία του κύριου του έργου από την υδροληψία κατά τη λειτουργία του έργου αυτού:

$$\text{Αν } P_{unit} \leq 0,3 \text{ MW, τότε } L_{max-φκ} = 0,25 \text{ km} \quad (3.48)$$

$$\text{Αν } 0,3 \text{ MW} < P_{unit} \leq 15 \text{ MW,}$$

$$\text{τότε } L_{max-φκ} = 0,25 + \left[1,4 - 0,4 \cdot \left(\frac{Q_{οικ-απαιτ}}{Q_{οικ-πραγμ}} \right)^2 \right] \cdot \frac{11,2 \cdot (P_{unit} - 0,3)}{5 + (P_{unit} - 0,3)} \text{ [km]} \quad (3.49)$$

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή έχουμε $Q_{οικ-απαιτ} = Q_{οικ-πραγμ} = 0,088969 \text{ m}^3/\text{s}$, $P_{unit} = 0,8304 \text{ MW} > 0,3 \text{ MW}$ υπολογίζεται με βάση τη σχέση (3.49) ότι το μέγιστο επιτρεπόμενο οριζοντιογραφικό μήκος $L_{max-φκ}$ της εκτροπής της φυσικής κοίτης είναι 1,324 km που υπολείπεται από το αντίστοιχο φυσικό μήκος της κοίτης του ποταμού που ανέρχεται στα 1,99 km, δηλαδή η υπάρχουσα λύση δε συμμορφώνεται με την ανωτέρω υπουργική απόφαση. Για να ικανοποιηθεί, θα έπρεπε να αυξηθεί η εγκατεστημένη ισχύς.

➤ **Έλεγχος μεταβατικών φαινομένων.** Τα μεταβατικά φαινόμενα αφορούν τη φάση της εκκίνησης ή ελεγχόμενου κρατήματος της μονάδας, που όμως σε μεγάλο βαθμό είναι ελεγχόμενο από τον άνθρωπο ή το σύστημα αυτομάτου ελέγχου, οπότε μπορεί να γίνει σταδιακά, χωρίς να υπάρχει κάποιο ουσιαστικό πρόβλημα, και τη φάση μη ελεγχόμενης κράτησης της μονάδας, π.χ. απόρριψη φορτίου εκ μέρους του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, με συνέπεια από τη μία πλευρά να υπερταχύνεται ο στρόβιλος μέχρι την ταχύτητα φυγής του (φθάνοντας σε ταχύτητες περίπου διπλάσιες των ονομαστικών) καταπονώντας μηχανικά και ηλεκτρικά την ηλεκτρογεννήτρια (για οικονομοτεχνικούς λόγους θεωρείται ανεκτή μία υπερτάχυνση ως το +60% της ονομαστικής ταχύτητας, αν και οι ηλεκτρογεννήτριες κλασικών προδιαγραφών φτάνουν μόλις στο +30%), από την άλλη πλευρά να αναπτύσσεται ένα υδραυλικό πλήγμα μέσα στους αγωγούς νερού υπό πίεση, που είναι τόσο πιο δυσμενές, όσο πιο γρήγορα εξελίσσεται το υδραυλικό μεταβατικό φαινόμενο. Διότι για να περιορίσει κανείς την υπερτάχυνση

της γεννήτριας, πρέπει να κλείσει γρήγορα τη βάννα προσαγωγής νερού στο στρόβιλο, το οποίο όμως οδηγεί στην ανάπτυξη έντονων μεταβατικών φαινομένων με τη μορφή υπερπίεσεων στον αγωγό προσαγωγής. Η σχετική μελέτη είναι αρκετά επίπονη και στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται ένας στοιχειώδης έλεγχος.

Με βάση το [E7, έκδοση 2021] κατά τη μελέτη του υδραυλικού πλήγματος θεωρώντας τη στήλη ύδατος συμπαγή με δεδομένα το μήκος κλειστού αγωγού υπό πίεση L , την αρχική ταχύτητα ροής στη μέγιστη παροχή λειτουργίας c_{max} (που συνδέεται με την παροχή κανονικής λειτουργίας $Q_{κλ}$ προσαυξημένη κατά a_Q και το εμβαδόν της επιφάνειας ροής του κλειστού σωλήνα A_{real}), τη διαθέσιμη υψομετρική διαφορά H_δ , το χρόνο χειρισμού για πλήρη μηδενισμό της παροχής t_c που είναι και η παράμετρος του συστήματος ελέγχου, υπολογίζονται η υπερπίεση επί του αγωγού δH και ο χρόνος επιτάχυνσης της στήλης νερού T_w , δηλαδή το χρόνο που απαιτείται για την επιτάχυνση της μάζας του νερού υπό την επίδραση της πίεσης που ασκεί η διαθέσιμη υψομετρική διαφορά H_δ μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$c_{max} = \frac{(1 + a_Q) \cdot Q_{κλ}}{A_{real}} \quad (3.50)$$

$$\delta H = \frac{L \cdot c_{max}}{g \cdot t_c} \quad (3.51)$$

$$T_w = \frac{L \cdot c_{max}}{g \cdot H_\delta} \quad (3.52)$$

Στην παρούσα περίπτωση για μήκος κλειστού αγωγού L ίσο με 2200 m, παροχή κανονικής λειτουργίας $Q_{κλ}$ ίση με 0,632 m³/s προσαυξημένη κατά a_Q ίσο με 15%, για διάτομή αγωγού $\Phi 600$, διαθέσιμη υψομετρική διαφορά H_δ ίση με 180 m για να περιοριστεί η υπερπίεση δH στα 72 m, δηλαδή στο 40% που έχει υποτεθεί αρχικά, ο χρόνος χειρισμού t_c πρέπει να είναι τουλάχιστον 8,2 s, ενώ ο χρόνος επιτάχυνσης της στήλης νερού T_w είναι ίση με 3,278 s. Όμως αυτή η ανάλυση δεν είναι πλήρης.

Κατά τη μελέτη του υδραυλικού πλήγματος θεωρώντας τη στήλη ύδατος συμπιεστή και τον αγωγό ελαστικό [E7, έκδοση 2021] αρχικά μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής μέσα στο νερό α λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα του νερού ρ , το συντελεστή συμπιεστότητας του νερού k , το μέτρο ελαστικότητας του υλικού κατασκευής του αγωγού του νερού E , την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα D_{out} και το επιλεγμένο πάχος τοιχώματος σωλήνα t_b ως εξής:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot \left(\frac{1}{k} + \frac{D_{out}}{E \cdot t_b} \right)}} \quad (3.53)$$

Στην παρούσα περίπτωση για πυκνότητα νερού ρ ίση με 1000 kg/m³, συντελεστή συμπιεστότητας νερού k ίσο με 2,19 GPa, μέτρο ελαστικότητας του χαλυβοσωλήνα E ίσο με 210 GPa, εξωτερική διάμετρο του σωλήνα $\Phi 600$ ίση με $D_{out} = 0,6096$ m και

επιλεγμένο πάχος τοιχώματος σωλήνα ίσο με $t_b = 0,00874 \text{ m}$ βρίσκεται η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής μέσα στο νερό ίση με $a = 1125,975 \text{ m/s}$ έναντι της ταχύτητας διάδοσης της διαταραχής μέσα στο νερό σε άκαμπτο σωλήνα που είναι θεωρητικά περί των 1480 m/s .

Τη στιγμή που η βάννα αρχίζει να κλείνει, στη θέση αυτή προκαλείται διαταραχή η οποία κινείται προς τα ανάντι, φτάνει στη δεξαμενή φόρτισης και ανακλάται και επιστέφει στη βάννα με ταχύτητα α , οπότε ο αναγκαίος χρόνος T για να διατρέξει η διαταραχή τον αγωγό και να επιστρέψει στο αρχικό της σημείο είναι ίσος με:

$$T = \frac{2 \cdot L}{\alpha} \quad (3.54)$$

Δηλαδή στην παρούσα περίπτωση είναι ίσος με $3,908 \text{ s}$. Αν ο χρόνος χειρισμού της βάννας t_c είναι μεγαλύτερος από το χρόνο T , τότε ο χρόνος χειρισμού της βάννας είναι «αργός», αλλιώς είναι «γρήγορος». Στην περίπτωση γρήγορου χειρισμού αναπτύσσεται μία υπερπίεση δH_{max} λόγω των ανακλάσεων ίση με:

$$\delta H_{max} = \frac{a \cdot c_{max}}{g} \quad (3.55)$$

Η τελευταία είναι ανεξάρτητη της αρχικής διαθέσιμης υψομετρικής διαφοράς H_δ . Ακολουθώς προσδιορίζεται η αδιάστατη παράμετρος ρ_H , η οποία εκφράζει το πόσο ο αγωγός είναι εκτεθειμένος στις υπερπίεσεις λόγω υδραυλικού πλήγματος:

$$\rho_H = \frac{\delta H_{max}}{2 \cdot H_o} = \frac{a \cdot c_{max}}{2 \cdot g \cdot H_o} \quad (3.56)$$

Η παράμετρος ρ_H σε συνδυασμό με το λόγο t_c/T προσδιορίζουν το λόγο της μέγιστης υπερπίεσης δH_v στη βάννα προς τη διαθέσιμη υψομετρική διαφορά H_δ σύμφωνα με το σχήμα 6.31 του [E7, έκδοση 2021]. Στην παρούσα περίπτωση η υπερπίεση λόγω των ανακλάσεων είναι ίση με $\delta H_{max} = 302 \text{ m}$, η αδιάστατη παράμετρος ίση με $\rho_H = 0,839$ και λόγω της απαίτησης της υπερπίεσης στη βάννα δH_v να είναι μικρότερη του 40% της H_δ , προκύπτει ότι ο λόγος t_c/T πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 3,5 τουλάχιστον, δηλαδή στην παρούσα περίπτωση ο χρόνος χειρισμού t_c πρέπει να είναι μεγαλύτερος των $13,678 \text{ s}$, πρακτικά των 14 s .

Για την περίπτωση μελέτης των μεταβατικών φαινομένων επί του υδροστροβίλου τύπου Pelton καταρχήν τοποθεείται μηχανισμός περιστροφής εκτροπέα για την πλήρη εκτροπή της δέσμης νερού σε χρόνο t_{c1} , δε μεταβάλλεται όμως η παροχή στον αγωγό, οπότε αυτή μπορεί να γίνει αρκετά αργά και ανεξάρτητα του χρόνου εκτροπής. Το χρονικό διάστημα t_m για την εν κενώ επιτάχυνση της μονάδας από τη στάση μέχρι τις ονομαστικές στροφές n_N υπό την ονομαστική ισχύ του στροβίλου $P_{nom-str}$ δίνεται από τη σχέση:

$$t_m = \frac{I \cdot \omega_N^2}{P_{nom-str}} \Rightarrow t_m [s] = \frac{1}{91190} \cdot \frac{I [kg \cdot m^2] \cdot (n_N [\Sigma. A. \Lambda.])^2}{P_{nom-str} [kW]} \quad (3.57)$$

Όπου I η ροπή αδράνειας του συστήματος στροβίλου-γεννήτριας και σφονδύλου, αν υπάρχει. Η πολική ροπή της γεννήτριας I_G δίνεται είτε από τον κατασκευαστή, όπως

στην παρούσα περίπτωση που είναι ίσος με $I_G = 130,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, είτε από την προσεγγιστική σχέση με βάση την ονομαστική φαινόμενη ισχύ της $S_{nom-gen-str}$ και την ονομαστική της ταχύτητα n_G :

$$I_G [\text{kg} \cdot \text{m}^2] = 15000 \cdot \left(\frac{S_{nom-gen-str} [\text{kVA}]}{(n_G [\Sigma. \text{A. A.}])^{1.5}} \right)^{1,23} \quad (3.58)$$

Η πολική ροπή του στροβίλου I_T δίνεται είτε από τον κατασκευαστή, είτε από την προσεγγιστική σχέση με βάση την ονομαστική ισχύ του $P_{nom-str}$ και την ονομαστική του ταχύτητα n_T :

$$I_T [\text{kg} \cdot \text{m}^2] = 985,7 \cdot \left(\frac{P_{nom-str} [\text{kW}]}{(n_T [\Sigma. \text{A. A.}])^{1.5}} \right)^{1,25} \quad (3.59)$$

Η υπερτάχυνση του στροβίλου κατά την απόρριψη φορτίου δn_T ως προς την ονομαστική του ταχύτητα n_T εξαρτάται από τη ροπή αδρανείας I , την ονομαστική ισχύ του $P_{nom-str}$, τον απαιτούμενο χρόνο t_{c1} για την πλήρη εκτροπή της δέσμης νερού και την παραμέτρο k που λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή των συνθηκών κατά τη διάρκεια κλεισίματος εκτροπής, η οποία, αν αναμένει πρώτα την ολοκλήρωση της υλοποίησης της κίνησης του μηχανισμού εκτροπής και ακολούθως του κλεισίματος της βελόνης ή της αντίστοιχης βάνας εισόδου του αγωγού σε χρόνο t_c , τότε λαμβάνεται ίση με 0,5, διότι, δεν επηρεάζεται ο στρόβιλος από τον αγωγό. Οπότε, από τις αντίστοιχες σχέσεις που συνδέουν τη γωνιακή επιτάχυνση του στρεφόμενου συστήματος με τη μετατροπή κινητικής ενέργειας στρεφόμενων μαζών προκύπτει τελικά ότι:

$$\frac{\delta n_T [\Sigma. \text{A. A.}]}{n_T [\Sigma. \text{A. A.}]} = \sqrt{1 + 182,378 \cdot \frac{k \cdot P_{nom-str} [\text{W}] \cdot t_{c1} [\text{s}]}{I [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \cdot (n_T [\Sigma. \text{A. A.}])^2}} - 1 \quad (3.60)$$

Επιπλέον για λόγους ευαισθησίας και ευστάθειας του ρυθμιστή υδροστροβίλου προτείνεται για τον υδροστρόβιλο Pelton να ισχύει:

$$t_m [\text{s}] > 2,5 \cdot T_w [\text{s}] \quad (3.61)$$

Στην παρούσα περίπτωση υπολογίζονται η πολική ροπή του στροβίλου η οποία είναι ίση με $I_T = 29,931 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, η πολική ροπή του συστήματος η οποία ισούται με $I = 160,131 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, το χρονικό διάστημα t_m για την εν κενώ επιτάχυνση της μονάδας ως την ονομαστική της ισχύ 0,704 s, η υπερτάχυνση του στροβίλου είναι ίση με +55% για την ονομαστική παροχή λειτουργίας και +60% για τη μέγιστη παροχή λειτουργίας για χρόνο εκτροπής δέσμης νερού 1 s ικανοποιώντας οριακά την απαίτηση υπερτάχυνσης ως +60%. Ωστόσο δεν ικανοποιείται το κριτήριο της σχέσης (3.60), όπου το χρονικό διάστημα t_m των 0,704 s, υστερεί σημαντικά έναντι των 2,5 φορές του χρόνου επιτάχυνσης της στήλης νερού T_w (ίσου με 3,278 s), δηλαδή των 8,195 s. Η αντιμετώπιση του τελευταίου μπορεί να γίνει με μια από τις παρακάτω μεθόδους: α) με την ειδική σχεδίαση του συστήματος αυτόματου ελέγχου, ή β) με την αύξηση της διατομής του αγωγού σωλήνα, ή γ) με την αύξηση της πολικής ροπής αδρανείας δια της προσθήκης σφονδύλου ή δ) με το συνδυασμό των ανωτέρω. Ζητήματα υπο-

πιέσεων στο στρόβιλο δε τίθενται λόγω δομής του ίδιου – στρόβιλος δράσης με λειτουργία υπό ατμοσφαιρική πίεση.

Κατά τη μελέτη γραμμικού ανοίγματος της βάνας θεωρώντας τη στήλη ύδατος συμπίεστη και τον αγωγό ελαστικό [E7, έκδοση 2021] με χρόνο ανοίγματος t_0 μεγαλύτερο του T , δηλαδή κατά την περίπτωση αργού μεταβατικού φαινομένου, η ελάχιστη πίεση που αναπτύσσεται στη θέση της βάνας H_{min} υπολογίζεται μέσω των σχέσεων:

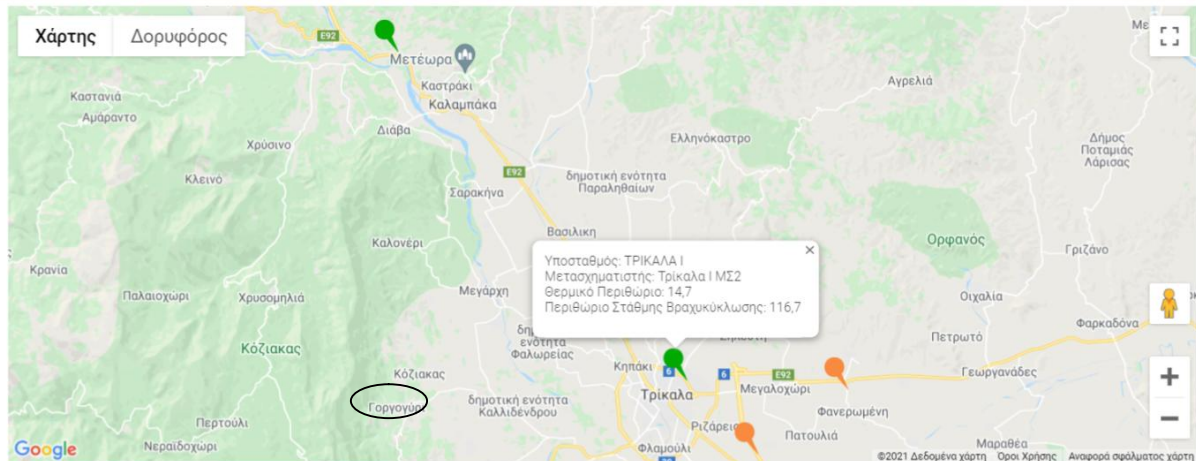
$$m = \frac{c_{max} \cdot L}{g \cdot H_{\delta} \cdot t_0} \quad (3.62)$$

$$H_{min} = H_{\delta} \cdot \left(-m + \sqrt{1 + m^2}\right)^2 \quad (3.63)$$

Δηλαδή για χρόνο ανοίγματος της βάνας 30 s στη μέγιστη παροχή λειτουργίας (115% της παροχής κανονικής λειτουργίας) η αντίστοιχη πίεση στη βάνα ανέρχεται στα 144,726 m, δηλαδή στο 80% της διαθέσιμης υψομετρικής διαφοράς H_{δ} , χωρίς να δημιουργείται κάποιο πρόβλημα στη μηκοτομή του αγωγού με πιέσεις χαμηλότερης της ατμοσφαιρικής.

Οπότε συνοψίζοντας για να περιοριστούν οι υπερπίεσεις και οι υποπίεσεις του σωλήνα προσαγωγής και η υπερτάχυνση του στρόβιλου μέσα στα προβλεπόμενα όρια, χρειάζεται η βάνα προσαγωγής και η βελόνα του ακροφυσίου να ανοίγουν από το μηδενικό φορτίο στο πλήρες σε χρόνο 30s το ελάχιστο, να κλείνουν σε χρόνο 14 s το ελάχιστο, να εκτρέπει τη δέσμη ύδατους ακροφυσίου σε 1 s το μέγιστο, ενώ, είναι απαιτητό ιδιαίτερο σύστημα αυτόματου ελέγχου ή επαναδιαστασιολόγηση του μηχανικού μέρους, προκειμένου να είναι κατάλληλα ευαίσθητο το αντίστοιχο σύστημα ελέγχου σε διακυμάνσεις φορτίου ή αλλαγής σημείου λειτουργίας.

- **Διασύνδεση με το δίκτυο διανομής:** Λόγω του μεγέθους ισχύος της μονάδας υδροηλεκτρικής ενέργειας (άνω των 100 kW και κάτω των 8 MW) συνδέεται με το δίκτυο μέσης τάσης. Στην περιοχή Γοργογυρίου υπάρχει δίκτυο μέσης τάσης λόγω του ομώνυμου χωριού. Με βάση τα δεδομένα εκ μέρους του Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε. ως προς τη δυνατότητα απορρόφησης ισχύος από σταθμούς Α.Π.Ε. και Σ.Η.Θ.Υ.Α. τα οποία βρίσκονται σε λειτουργία, με σύμβαση και με οριστική προσφορά, στην περιφέρεια Θεσσαλίας, στην περιφερειακή ενότητα Τρικάλων, στο δήμο Τρικκαίων υπάρχουν πέντε υποσταθμοί, που μπορούν να το εξυπηρετήσουν: α) «Καλαμπάκας ΜΣ1» με θερμικό όριο 28,9 MVA και στάθμη βραχυκύκλωσης 21,1 MVA, β) «Τρικάλων ΚΥΤ ΜΣ2» με θερμικό όριο 35,5 MVA και στάθμη βραχυκύκλωσης 26,5 MVA, γ) «Τρίκαλα Ι ΜΣ1» με θερμικό όριο 14,9 MVA και στάθμη βραχυκύκλωσης 100,9 MVA, δ) «Τρίκαλα Ι ΜΣ2» με θερμικό όριο 14,7 MVA και στάθμη βραχυκύκλωσης 116,7 MVA, ε) «Τρίκαλα ΙΙ ΜΣ1» με θερμικό όριο 20,5 MVA και στάθμη βραχυκύκλωσης 14,5 MVA. Άλλοι δύο, «Τρίκαλα ΙΙ ΜΣ2» και «Τρίκαλα ΚΥΤ ΜΣ1», έχουν επί του παρόντος διαθέσιμη μηδενική στάθμη βραχυκύκλωσης. Οπότε υπάρχει η δυνατότητα διασύνδεσης με κάποιον από τους διαθέσιμους υποσταθμούς, όπου οι πιο κοντινοί είναι των Τρικάλων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.48.



Σχήμα 3.48: Χάρτης περιθωρίων διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για δήμο Τρικαίων, Περιφερειακής Ενότητας Τρικάλων, Περιφέρειας Θεσσαλίας [E14].

3.6. Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας

Με βάση τις αξιοποιήσιμες μέσες παροχές σε ετήσιο επίπεδο, όπως έχουν παρουσιαστεί στον πίνακα 3.8 και το σχήμα 3.17 πραγματοποιείται ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας με τις εξής παραδοχές:

- Ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου, της γεννήτριας και του μετασχηματιστή παραμένουν αμετάβλητοι και πέρα του σημείου λειτουργίας κανονικής παροχής.
- Το εύρος λειτουργίας του στροβίλου Pelton κυμαίνεται από 7,5% (λόγω ύπαρξης δύο ακροφυσίων) ως 115% της παροχής κανονικής λειτουργίας.
- Οι υδραυλικές απώλειες σε σημεία πέρα της παροχής κανονικής λειτουργίας προσδιορίζονται με τη βοήθεια αυτού του σημείου θεωρώντας ότι ο συντελεστής γραμμικών απωλειών λ παραμένει αμετάβλητος. Οπότε από το συνδυασμό των σχέσεων (3.31), (3.32) και (3.39) προκύπτει ότι οι συνολικές υδραυλικές απώλειες δh_{local} για την τυχούσα παροχή Q εξαρτώνται από τις συνολικές υδραυλικές απώλειες στο κανονικό σημείο λειτουργίας $\delta h_{local}(Q_{κλ})$ που έχει ήδη υπολογιστεί στην παρούσα περίπτωση ίσο με 14,9 m και τον κατάλληλο λόγο του τετραγώνου παροχών:

$$\delta h_{total}(Q) = \delta h_{linear}(Q) + \delta h_{local}(Q) = \delta h_{total}(Q_{κλ}) \cdot \frac{Q^2}{Q_{κλ}^2} \quad (3.64)$$

- Η παραγόμενη ενεργός ισχύς της μονάδας P_{unit} για κάθε ανηγμένη χρονική στιγμή τ_i της καμπύλης διάρκειας παροχών με δεδομένη τη χρησιμοποιούμενη παροχή Q_{x-i} δίνεται ως εξής:

$$P_{unit}(Q_{x-i}) = \eta_{tran} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{str} \cdot \rho \cdot g \cdot Q_{x-i} \cdot (H_{\delta} - \delta h_{total}(Q_{x-i})) \quad (3.65)$$

- Για κάθε ανηγμένη χρονική στιγμή τ_i της καμπύλης διάρκειας παροχών υπάρχει η αξιοποιήσιμη παροχή Q_{a-i} που δίνεται από το σχήμα 3.17, η οποία σχετίζεται με τη χρησιμοποιούμενη παροχή Q_{x-i} του στροβίλου ως εξής: αν η Q_{a-i} είναι μικρότερη

του 7,5% της παροχής κανονικής λειτουργίας $Q_{κλ}$, τότε η χρησιμοποιούμενη παροχή Q_{x-i} μηδενίζεται και όλη η αξιοποιήσιμη παροχή Q_{a-i} μένει ανεκμετάλλευτη. Αν η αξιοποιήσιμη παροχή Q_{a-i} είναι μεταξύ του 7,5% και 115% της παροχής κανονικής λειτουργίας $Q_{κλ}$, τότε γίνεται η εκμετάλλευση όλης της αξιοποιήσιμης παροχής Q_{a-i} , δηλαδή η χρησιμοποιούμενη παροχή Q_{x-i} ταυτίζεται με την αξιοποιήσιμη παροχή Q_{a-i} . Αν η αξιοποιήσιμη παροχή Q_{a-i} είναι μεγαλύτερη του 115% της παροχής κανονικής λειτουργίας $Q_{κλ}$, τότε η χρησιμοποιούμενη παροχή Q_{x-i} ταυτίζεται με το 115% της παροχής κανονικής λειτουργίας $Q_{κλ}$ και η υπόλοιπη παροχή της Q_{a-i} μένει ανεκμετάλλευτη, δηλαδή ποσότητα ίση με $Q_{a-i} - 1,15 \cdot Q_{κλ}$.

Οπότε αν το χρονικό διάστημα μελέτης του ανηγμένου έτους χωριστεί σε N_T ενδιάμεσα διαστήματα έχοντας τα σημεία $0, 1, 2, \dots, N_T$, τότε η αντίστοιχη συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια E , ο ετήσιος αξιοποιούμενος όγκος νερού V_x και ο ετήσιος μέγιστος δυνατός αξιοποιήσιμος όγκος νερού V_a υπολογίζονται μέσω αριθμητικής ολοκλήρωσης ως εξής:

$$E = \sum_{i=0}^{N_T-1} \frac{P_{unit}(Q_{x-(i+1)}) + P_{unit}(Q_{x-i})}{2} \cdot \frac{\tau_{i+1}(\%) - \tau_i(\%)}{100\%} \quad (3.66)$$

$$V_x = \sum_{i=0}^{N_T-1} \frac{Q_{x-(i+1)} + Q_{x-i}}{2} \cdot \frac{\tau_{i+1}(\%) - \tau_i(\%)}{100\%} \quad (3.67)$$

$$V_a = \sum_{i=0}^{N_T-1} \frac{Q_{a-(i+1)} + Q_{a-i}}{2} \cdot \frac{\tau_{i+1}(\%) - \tau_i(\%)}{100\%} \quad (3.68)$$

Ακολούθως υπολογίζεται ο συντελεστής φορτίου $\Sigma. \Phi.$, δηλαδή το πηλίκο της παραγόμενης ενέργειας E του υδροηλεκτρικού κατά τη διάρκεια του έτους προς την ενέργεια που θα παρήγαγε αν λειτουργούσε συνεχώς επί ένα έτος με την ονομαστική ισχύ της μονάδας, δηλαδή την ισχύ της μονάδας με την παροχή κανονικής λειτουργίας:

$$\Sigma. \Phi. = \frac{E[MWh]}{P_{unit}(Q_{κλ})[MW] \cdot 8760h} \quad (3.69)$$

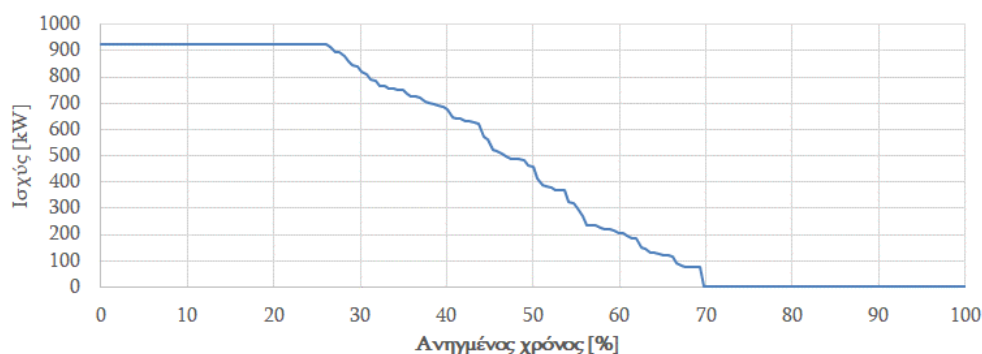
Οι συνήθεις τιμές του συντελεστή φορτίου είναι 0,70 με 0,80 για τα μικρά υδροηλεκτρικά και 0,25 με 0,50 για τα μεγάλα.

Επιπλέον υπολογίζεται ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης $\beta_{εα}$, δηλαδή το πηλίκο του αξιοποιούμενου όγκου νερού V_x προς το δυνατό αξιοποιήσιμο όγκο νερού V_a , που εκφράζει τον όγκο του νερού που αξιοποιήθηκε τελικά σε σχέση με το αρχικά διαθέσιμο:

$$\beta_{εα} = \frac{V_x}{V_a} \quad (3.70)$$

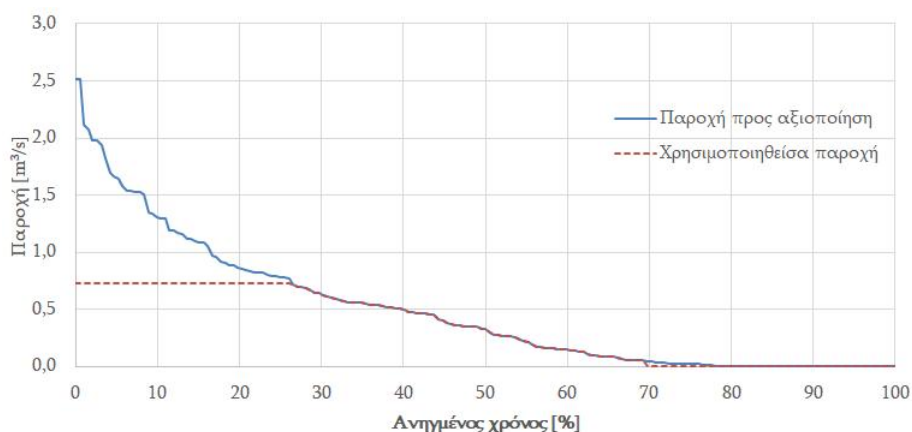
Ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης πρέπει να είναι μεγαλύτερος ή ίσος με 0,75 σύμφωνα με την κείμενη ελληνική νομοθεσία, για να επιτραπεί η ανάπτυξη της αντίστοιχης μικρής υδροηλεκτρικής μονάδας.

Στην παρούσα περίπτωση η συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια E είναι ίση με 3928,022 MWh, ο ετήσιος αξιοποιούμενος όγκος νερού είναι ίσος με $V_x = 10.780 m^3$ και ο δυνατός αξιοποιήσιμος όγκος νερού ισούται με $V_\alpha = 15.336,071 m^3$, ενώ ο συντελεστής φορτίου ανέρχεται στο 0,5420 που είναι μικρότερος των συνήθων τιμών των μικρών υδροηλεκτρικών και ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης στο 0,703, δηλαδή υπολείπεται του νομοθετικού ορίου 0,75. Στο σχήμα 3.49 παρουσιάζεται η καμπύλη διάρκειας παραγόμενης ισχύος από το μικρό υδροηλεκτρικό, από το οποίο φαίνεται καθαρά ότι λειτουργεί στη μέγιστη δυνατή παραγωγή το 26,0% του χρόνου, ενώ δε λειτουργεί το 30,7% του χρόνου.



Σχήμα 3.49: Καμπύλη διάρκειας παραγόμενης ισχύος για $Q_{κλ}=0,632 m^3/s$, δηλαδή για παροχή κανονικής λειτουργίας που υπερβαίνει το 30% του χρόνου.

Στο σχήμα 3.50 καταγράφονται αντίστοιχα οι παροχές που μπορούν να αξιοποιηθούν και αυτές που τελικά χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή. Γίνεται φανερό ότι η χρησιμοποιηθείσα παροχή ξεπερνά την παροχή κανονικής λειτουργίας κατά 15% λόγω της δυνατότητας υπερφόρτισης του στρόβιλου από πλευράς παροχής κατά 15%. Αντίστοιχα κοντά στο 69% του ανηγμένου χρόνου η χρησιμοποιηθείσα παροχή μηδενίζεται, καθώς μειώνεται κάτω από 7,5% της παροχής κανονικής λειτουργίας, με την οποία μπορεί να λειτουργήσει ο στρόβιλος Pelton με το ένα εκ των δύο ακροφυσίων.



Σχήμα 3.50: Καμπύλη διάρκειας παροχής προς αξιοποίηση και χρησιμοποιηθείσας παροχής για ηλεκτροπαραγωγή με $Q_{κλ}=0,632 m^3/s$, δηλαδή για παροχή κανονικής λειτουργίας που υπερβαίνει το 30% του χρόνου.

3.7. Εκτίμηση κόστους αρχικής διάταξης ΜΥΗΕ

Με βάση το [E7, έκδοση 2021] μπορεί σε επίπεδο προμελέτης να προσδιοριστεί το ειδικό κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού C_{EM-kW} σε €/kW σε συνάρτηση με τον τύπο του υδροστροβίλου, την ονομαστική του ισχύ $P_{nom-str}$ kW και την καθαρή υδραυλική πτώση υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας $H_{κλ}$ σε m από τη σχέση:

$$C_{EM-kW} = a \cdot P_{nom-str}^b \cdot H_{κλ}^c \quad (3.71)$$

Όπου για την περίπτωση του στροβίλου Pelton οι παράμετροι a , b , c λαμβάνουν τις ακόλουθες τιμές: $a = 21597$, $b = -0,364$, $c = -0,10$. Παρά το γεγονός ότι οι τιμές δίνονται για το έτος 2012, από τότε μέχρι σήμερα έχει μειωθεί ελάχιστα ο πληθωρισμός συνολικά, οπότε θεωρούνται ίδιες (ειδικά για την παραμέτρο a). Το συνολικό κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού αυξάνεται 15% λόγω του κόστους εγκατάστασης και θέσης του σε λειτουργία, οπότε για την περίπτωση z ίδιων μονάδων ονομαστικής ισχύος $P_{nom-str}$ η καθεμία προκύπτει το συνολικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού ενός μικρού σταθμού υδροηλεκτρικής ενέργειας ίσο με:

$$C_{EM} = 1,15 \cdot C_{EM-kW} \cdot P_{nom-str} \cdot z^{0,95} \quad (3.72)$$

Το συνολικό κόστος της επένδυσης ανέρχεται τελικά σε:

$$C_{tot} = S \cdot C_{EM} + C_{γπ} \quad (3.73)$$

Όπου S είναι ο συντελεστής θέσης που εκφράζει το λόγο του συνολικού κόστους προς το ηλεκτρομηχανολογικό κόστος που λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες του έργου, με τυπική τιμή 2,86, αν θεωρηθεί ότι τα ηλεκτρομηχανολογικά καλύπτουν το 35% του συνολικού κόστους της επένδυσης χωρίς πρόσθετα έργα υποδομής. Το κόστος έργων υποδομής $C_{γπ}$ περιλαμβάνει κόστη, όπως το κόστος υποσταθμού και επέκτασης γραμμών μέσης τάσης, έργα οδοποιίας. Στην παρούσα περίπτωση τίθεται ίσο με 250.000 € για το κόστος υποσταθμού και μικρού μήκους γραμμής διανομής ηλεκτρικής ενέργειας θεωρώντας ότι θα συνδεθεί σε κοντινή απόσταση με το δίκτυο διανομής μέσης τάσης του Γοργογυρίου.

Συγκεντρωτικά το ειδικό κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού ανέρχεται σε 1090,6 €/kW, το συνολικό κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε 1.125.920 € και το συνολικό κόστος της επένδυσης σε 3.466.915 €

3.8. Οικονομοτεχνική ανάλυση αρχικής διάταξης ΜΥΗΕ

Το συνολικό κόστος της επένδυσης ισομοιράζεται τυπικά C_{tot} σε δύο έτη πριν την έναρξη λειτουργίας. Θεωρείται ότι η επένδυση γίνεται από ίδια κεφάλαια χωρίς δάνειο, για να μην επιβαρυνθεί ο τρόπος οικονομικής αξιολόγησης του έργου με πρόσθετες παραμέτρους, όπως ποσοστό επένδυσης που καλύπτει το δάνειο, επιτόκιο δανεισμού κτλ. Από τη στιγμή της λειτουργίας η εταιρεία πουλάει την ετήσια παραγόμενη ενέργεια E με τιμή πώλησης c_{kWh} ίση με 0,09 €/kWh λόγω του ότι το μικρό υδροηλεκτρικό έργο έχει ισχύ μικρότερη από 3 MW, από την οποία προκύπτουν τα ακαθάριστα έσοδά του, που

αν μειωθούν κατά ένα ποσοστό π_μ της τάξης του 15% (έξοδα λειτουργίας, μισθοδοσίας, ασφαλειών, φόρων κτλ), απομένουν τα καθαρά ετήσια έσοδα μετά τους φόρους C_{inc} :

$$C_{inc} = (1 - \pi_\mu) \cdot E \cdot c_{kWh} \quad (3.74)$$

Η τυπική διάρκεια ζωής της επένδυσης T_δ είναι ίση με 20 έτη με σταθερό επιτόκιο προεξόφλησης i τυπικά ίσο με 5%. Επομένως, η καθαρή παρούσα αξία NPV με αναγωγή σήμερα που ξεκινά η κατασκευή του έργου ως προς τη χρονική στιγμή έναρξης λειτουργίας του έτους t είναι ίση με:

$$NPV(t) = -\frac{C_{tot}}{2 \cdot (1 + i)} - \frac{C_{tot}}{2 \cdot (1 + i)^2} + \sum_{n=3}^{t+2} \frac{C_{inc}}{(1 + i)^n} \quad (3.75)$$

Τυπικά ο ιδιώτης επιθυμεί η απόσβεση του έργου να γίνει μέσα σε 5 με 8 έτη από την έναρξη λειτουργίας, ενώ για μία δημοτική επιχείρηση μπορεί να ολοκληρωθεί οριακά στο τέλος της διάρκειας ζωής της επένδυσης, το οποίο σημαίνει ότι η καθαρή παρούσα αξία στην αντίστοιχη χρονική στιγμή έχει γίνει θετική και παραμένει θετική. Οι πληρωμές θεωρούνται ότι γίνονται στο τέλος του εκάστοτε έτους.

Ο χρόνος απόσβεσης / η διάρκεια αποπληρωμής ως ατελές κριτήριο $T_{\alpha\pi-\alpha}$ σε έτη προκύπτει από την εύρεση της χρονικής στιγμής κατά την οποία η καθαρή παρούσα αξία της σχέσης (3.75) μηδενίζεται χωρίς όμως την επίδραση του επιτοκίου προεξόφλησης (δηλαδή για $i = 0$), οπότε σ' αυτήν την περίπτωση προκύπτει ότι:

$$T_{\alpha\pi-\alpha} = \frac{C_{tot}}{C_{inc}} \quad (3.76)$$

Εναλλακτικά, ο χρόνος απόσβεσης / η διάρκεια αποπληρωμής ως πλήρες κριτήριο $T_{\alpha\pi-\pi}$ σε έτη προκύπτει από την εύρεση της χρονικής στιγμής κατά την οποία η καθαρή παρούσα αξία της σχέσης (3.75) μηδενίζεται λαμβάνοντας υπόψη όμως την επίδραση του επιτοκίου προεξόφλησης, δηλαδή:

$$NPV(T_{\alpha\pi-\pi}) = -\frac{C_{tot}}{2 \cdot (1 + i)} - \frac{C_{tot}}{2 \cdot (1 + i)^2} + \sum_{n=3}^{T_{\alpha\pi-\pi}+2} \frac{C_{inc}}{(1 + i)^n} = 0 \quad (3.77)$$

Σε αυτή την περίπτωση τυπικά ο ιδιώτης επιθυμεί ο αντίστοιχος χρόνος απόσβεσης να είναι μικρότερος ή ίσος των 5 με 8 ετών από την έναρξη λειτουργίας, ενώ μία δημοτική επιχείρηση της τυπικής διάρκειας ζωής της επένδυσης T_δ , δηλαδή τα 20 έτη.

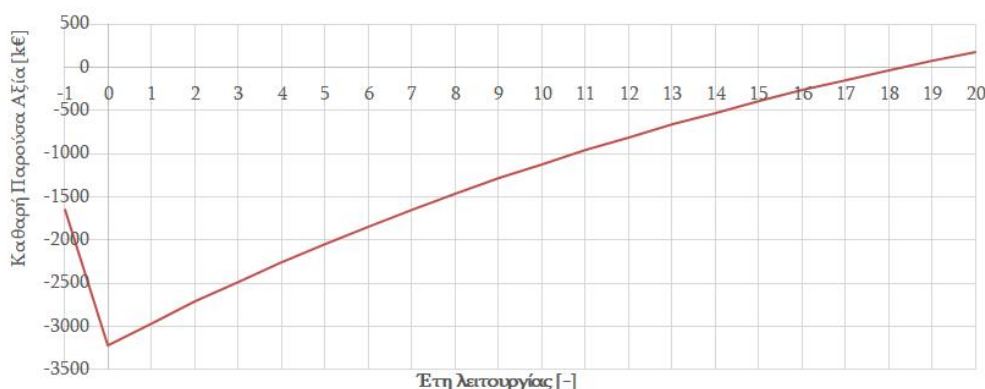
Αντίστοιχα ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης IRR είναι εκείνο το επιτόκιο προεξόφλησης στο οποίο η καθαρή παρούσα αξία με αναγωγή σήμερα που ξεκινά η κατασκευή του έργου ως την περίοδο ανάκτησης κεφαλαίου T_{IRR} έτη μετά από την έναρξη λειτουργίας μηδενίζεται. Δηλαδή είναι ίση με:

$$0 = -\frac{C_{tot}}{2 \cdot (1 + IRR)} - \frac{C_{tot}}{2 \cdot (1 + IRR)^2} + \sum_{n=3}^{T_{IRR}+2} \frac{C_{inc}}{(1 + IRR)^n} \quad (3.78)$$

Τυπικά για τον ιδιώτη η χρονική περίοδος T_{IRR} ορίζεται 8 έτη, ενώ για τη δημοτική επιχείρηση είναι 20 έτη βρίσκοντας αντίστοιχα τα επιτόκια $IRR_{i\delta}$ και $IRR_{\delta\epsilon}$. Σε περίπτωση

που η συνάρτηση της καθαρής παρούσας αξίας είναι μία αύξουσα συνάρτηση συνεχώς μετά την έναρξη λειτουργίας της μονάδας, η επένδυση θεωρείται βιώσιμη, αν το επιτόκιο προεξόφλησης είναι μικρότερο από τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης.

Συγκεντρωτικά η καθαρά παρούσα αξία ανέρχεται σε -1.461.617 € μετά από 8 έτη λειτουργίας και σε 173.449 € μετά από 20 έτη λειτουργίας, η διάρκεια αποπληρωμής / απόσβεσης ως ατελές κριτήριο ανέρχεται σε 11,54 έτη και ως πλήρες κριτήριο σε 18,34 έτη. Η συμπεριφορά της καθαρής παρούσας αξίας σε συνάρτηση με τα έτη λειτουργίας καταγράφεται στο σχήμα 3.51. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης για 8 έτη ανάκτησης δεν προσδιορίζεται (μικρότερο από 0%), ενώ για 20 έτη ανάκτησης βρίσκεται ίσο με 5,59%.



Σχήμα 3.51: Καθαρή παρούσα αξία μικρού υδροηλεκτρικού έργου με επιτόκιο προεξόφλησης 5% για ηλεκτροπαραγωγή με $Q_{κλ}=0,632 \text{ m}^3/\text{s}$, δηλαδή για παροχή κανονικής λειτουργίας που υπεβαίνει το 30% του χρόνου.

Για κάθε οικονομικό κριτήριο για μία ιδιωτική επιχείρηση δεν προτείνεται να υλοποιηθεί η συγκεκριμένη επένδυση. Αντίθετα στην περίπτωση μίας δημοτικής επιχείρησης θα μπορούσε να υλοποιηθεί οριακά.

3.9. Επαναληπτική διαδικασία διαμόρφωσης διάταξης ΜΥΗΕ προς βελτιστοποίησή του

Ακολουθως επαναλαμβάνεται η διαδικασία των παραγράφων 2.5 ως 2.8 για διαφορετικές τιμές της παροχής κανονικής λειτουργίας. Αυτή θα κυμανθεί από το 5% ως 50% με αρχικό βήμα 5% και έπειτα με έμφαση στην περιοχή τιμών 15% ως 30% με βήμα 1%, στα οποία ερευνάται από τη μια πλευρά αν καλύπτονται τα κριτήρια του βαθμού ενεργειακής αξιοποίησης και του μέγιστου επιτρεπόμενου μήκους τμήματος φυσικής κοίτης υδατορέματος από το οποίο εκτρέπεται το νερό με τον αγωγό προσαγωγής, και από την άλλη τα οικονομικά κριτήρια βιωσιμότητας της επένδυσης. Στον πίνακα 3.12 καταγράφονται ανά παροχή κανονικής λειτουργίας $Q_{κλ}$ που αντιστοιχεί σε ανηγμένο χρόνο υπέρβασης ίσο με τ οι παράμετροι που παρατίθενται παρακάτω ανά τμήμα του έργου: α) τα στοιχεία της υδροληψίας (μήκος L_S , πλάτος B_S) για δεδομένη γωνία 14° , β) του φράγματος (μήκος $L_{φρ}$, πλάτος στέψης 0,40 m, πλάτος βάσης $B_{φρ}$, ύψος πάνω από τη βάση $h_{φρ}$ πέρα της βάσης πάχους 0,50 m), γ) του εξαμωτή (μήκος $L_{εξ}$, πλάτος $B_{εξ}$, βάθος $h_{εξ}$), δ) του τύπου δεξαμενής φόρτισης ανάλογα με το μέγεθος της μέγιστης εξυ-

πηρετούμενης παροχής (τύπου I για φόρτιση $1 \text{ m}^3/\text{s}$ με διαστάσεις $A = 1,9 \text{ m}$, $D = 1,0 \text{ m}$, $G = 1,5 \text{ m}$, $H = 0,4 \text{ m}$, $I = 0,9 \text{ m}$, $J = 0,35 \text{ m}$, $K = 1,6 \text{ m}$, πάχος ράβδων εσχάρας 45 mm , διάκενο ράβδων 25 mm , πλάτος ράβδων 5 mm , και τύπου II για φόρτιση $2 \text{ m}^3/\text{s}$ με διαστάσεις $A = 2,3 \text{ m}$, $D = 1,2 \text{ m}$, $G = 1,7 \text{ m}$, $H = 0,5 \text{ m}$, $I = 1,1 \text{ m}$, $J = 0,40 \text{ m}$, $K = 1,8 \text{ m}$, πάχος ράβδων εσχάρας 50 mm , διάκενο ράβδων 25 mm , πλάτος ράβδων 5 mm με βάση τα σχετικά του σχήματος 3.34), του σωλήνα προσαγωγής (ονομαστική διάμετρος χαλυβωσλήνα σε DN, πάχος t_b και καθαρό υδραυλικό ύψος στην παροχή κανονικής λειτουργίας $H_{κλ}$). Τα έργα του υπερχειλιστή και της λεκάνης ηρεμίας δε μεταβάλλονται ουσιαστικά. Στον πίνακα 3.14 καταγράφονται ανά παροχή κανονικής λειτουργίας $Q_{κλ}$ τα στοιχεία του στροβίλου είδους Pelton ενδεικτικά από την εταιρεία Voith (τύπος, ονομαστική ισχύς $P_{nom-str}$, ονομαστικές στροφές ανά λεπτό $n_{nom-str}$), της γεννήτριας της εταιρείας Magelli των 50 Hz (είδος {μπορεί να είναι σύγχρονη «Σ» ή ασύγχρονη «ΑΣ», τύπος, πολιική τάση $V_{nom-gen}$, ενεργός ονομαστική ισχύς $P_{nom-gen}$, φαινόμενη ονομαστική ισχύς $S_{nom-gen}$ για τις σύγχρονες μηχανές ή ονομαστική ροπή $T_{nom-gen}$ για τις ασύγχρονες, επαγωγικός συντελεστής ισχύος $\cos\varphi_{nom-gen}$, όπου σε ασύγχρονους ζητείται, σε σύγχρονους παράγεται, ονομαστικές στροφές ανά λεπτό $n_{nom-gen}$), του μετασχηματιστή λαδιού (ονομαστική φαινόμενη ισχύς $S_{nom-tran}$, τάση πρωτεύοντος $V_{nom 1}$, τάση δευτερεύοντος $V_{nom 2}$), της τυπικής ενεργού ισχύος της μονάδας υδροηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται $P_{nom unit}$, η οποία στην περίπτωση ενός υδροστροβίλου ταυτίζεται με $P_{nom-tran-gen-str}$ και του μέγιστου επιτρεπόμενου οριζοντιογραφικού μήκους $L_{max-φκ}$ της εκτροπής της φυσικής κοίτης του υδατορέματος από το σημείο υδροληψίας ως το σημείο επαναφοράς του νερού στη φυσική κοίτη (έξοδος αγωγού φυγής), το οποίο πρέπει να είναι μικρότερο από $1,99 \text{ km}$. Ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών λόγω επιλογής στροβίλου Pelton είναι παντού ίδιου τύπου. Στον πίνακα 3.14 καταγράφονται ανά παροχή κανονικής λειτουργίας $Q_{κλ}$ ο χρόνος ανοίγματος t_o και κλεισίματος t_c της βάνας προσαγωγής, ο χρόνος λειτουργίας εκτροπής δέσμης ύδατος t_{c1} , η ικανοποίηση ή όχι κριτηρίου ευαισθησίας και ευστάθειας του ρυθμιστή υδροστροβίλου κατά τη σχέση (3.59), τα στοιχεία της ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας E , του συντελεστή φόρτισης $\Sigma \cdot \Phi$, του βαθμού ενεργειακής αξιοποίησης $\beta_{εα}$, του συνολικού κόστους της επένδυσης C_{tot} , του χρόνου απόσβεσης επένδυσης ως ατελές κριτήριο $T_{απ-α}$, του χρόνου απόσβεσης επένδυσης ως πλήρες κριτήριο $T_{απ-π}$, της οικονομικής βιωσιμότητας του έργου για ιδιωτική επιχείρηση (καθαρή παρούσα αξία στα 8 έτη λειτουργίας $NPV_8 > 0$ βαθμός εσωτερικής απόδοσης IRR_8 με περίοδο ανάκτησης κεφαλαίου 8 έτη $> 5 \%$), της οικονομικής βιωσιμότητας του έργου για δημοτική επιχείρηση (καθαρή παρούσα αξία στα 20 έτη λειτουργίας $NPV_{20} > 0$, βαθμός εσωτερικής απόδοσης IRR_{20} με περίοδο ανάκτησης κεφαλαίου 20 έτη $> 5 \%$). Τα οικονομικά μεγέθη έχουν υπολογιστεί με τις παραδοχές της παραγράφου 3.8.

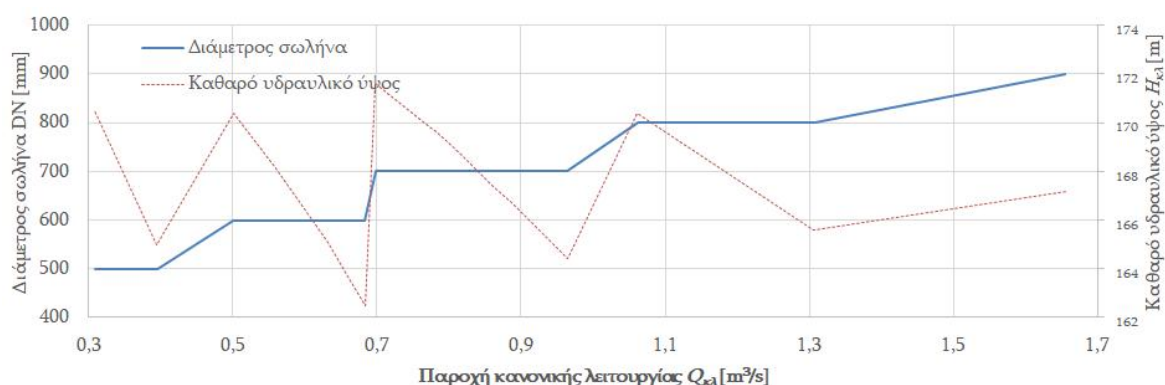
Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του πίνακα 3.13 σε σχέση με την παροχή κανονικής λειτουργίας παρατηρείται μία σταδιακή αύξηση της διαμέτρου του χαλυβωσλήνα λόγω της χρήσης του κριτηρίου περιορισμού των υδραυλικών απωλειών κάτω από το 10% , όπως άλλωστε φαίνεται και στο σχήμα 3.52, καθώς το κριτήριο της ταχύτητας δεν ενεργοποιείται στην παρούσα περίπτωση. Αν το καθαρό διαθέσιμο ύψος πάει

να πέσει κάτω από τα 162 m, αλλάζει η διατομή του σωλήνα. Στα υπόλοιπα στοιχεία έργων πολιτικού μηχανικού οι μεταβολές είναι πιο μικρές

Πίνακας 3.13

Τεχνικά χαρακτηριστικά έργων πολιτικού μηχανικού για διαφορετικές παροχές κανονικής λειτουργίας του ΜΥΗΕ.

α/α	Υδρολογικά δεδομένα		Υδροληψία		Φράγμα			Εξαμμοτής			Δεξαμενή φόρτισης	Χαλυβοσωλήνας		
	τ [%]	$Q_{κλ}$ [m ³ /s]	L_{Σ} [m]	B_{Σ} [m]	$L_{φρ}$ [m]	$B_{φρ}$ [m]	$h_{φρ}$ [m]	$L_{εξ}$ [m]	$B_{εξ}$ [m]	$h_{εξ}$ [m]	Τύπος [-]	DN [mm]	t_b [mm]	$H_{κλ}$ [mm]
1	5	1,655	7,00	0,80	14,00	2,50	2,50	32,00	6,00	1,60	II	900	11,91	167,2
2	10	1,306	6,00	0,75	13,00	2,50	2,45	30,00	5,00	1,60	II	800	10,31	165,6
3	15	1,092	5,50	0,70	12,50	2,50	2,45	28,00	4,50	1,50	II	800	10,31	169,8
4	16	1,062	5,30	0,70	12,30	2,50	2,45	27,50	4,40	1,50	II	800	10,31	170,4
5	17	0,964	4,80	0,70	11,70	2,50	2,45	26,50	4,10	1,50	II	700	9,52	164,4
6	18	0,911	4,60	0,70	11,60	2,50	2,45	26,00	3,90	1,50	II	700	9,52	166,0
7	19	0,888	4,50	0,70	11,50	2,50	2,45	25,00	3,90	1,50	I	700	9,52	166,7
8	20	0,861	4,50	0,70	11,50	2,50	2,40	24,50	3,80	1,50	I	700	9,52	167,4
9	21	0,838	4,30	0,70	11,30	2,50	2,40	24,50	3,70	1,50	I	700	9,52	168,1
10	22	0,827	4,20	0,70	11,20	2,50	2,40	24,00	3,70	1,50	I	700	9,52	168,4
11	23	0,816	4,20	0,70	11,20	2,50	2,40	23,50	3,70	1,50	I	700	9,52	168,7
12	24	0,794	4,10	0,70	11,10	2,50	2,40	23,50	3,60	1,50	I	700	9,52	169,3
13	25	0,779	4,00	0,70	11,00	2,50	2,40	24,00	3,50	1,50	I	700	9,52	169,7
14	26	0,775	4,00	0,70	11,00	2,50	2,40	24,00	3,40	1,50	I	700	9,52	169,8
15	27	0,698	4,00	0,65	11,00	2,50	2,40	23,50	3,20	1,50	I	700	9,52	171,6
16	28	0,684	4,00	0,65	11,00	2,50	2,40	22,50	3,20	1,50	I	600	8,74	162,5
17	29	0,651	4,00	0,65	11,00	2,50	2,40	23,00	3,00	1,50	I	600	8,74	164,1
18	30	0,632	4,00	0,60	11,00	2,50	2,40	22,00	3,00	1,50	I	600	8,74	165,1
19	35	0,559	4,00	0,56	11,00	2,50	2,40	19,00	3,00	1,40	I	600	8,74	168,2
20	40	0,501	3,60	0,55	10,50	2,50	2,40	19,00	2,70	1,40	I	600	8,74	170,4
21	45	0,395	3,00	0,55	10,00	2,50	2,40	16,00	2,50	1,20	I	500	7,14	165,0
22	50	0,309	2,50	0,55	9,50	2,50	2,40	14,00	2,30	1,00	I	500	7,14	170,5



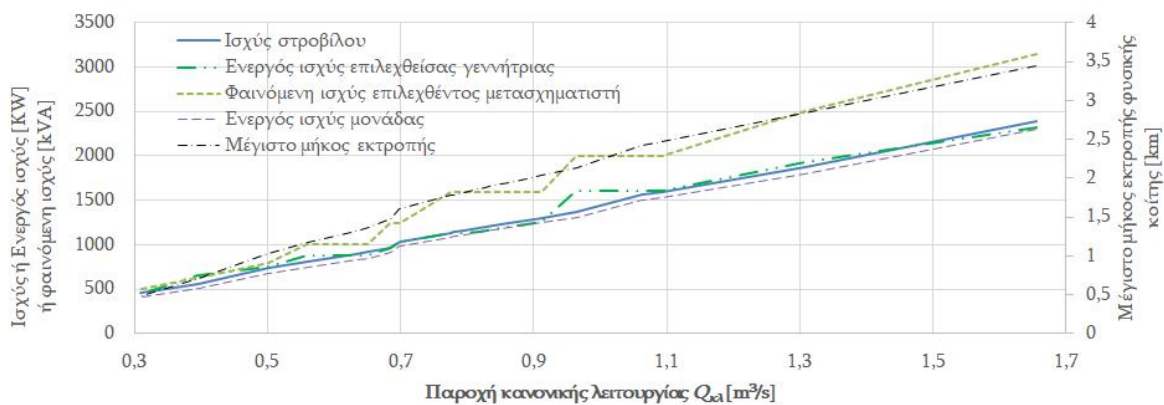
Σχήμα 3.52: Μεταβολή ονομαστικής διαμέτρου χαλυβοσωλήνα DN και καθαρού υδραυλικού ύψους ως προς την επιλεχθείσα παροχή κανονικής λειτουργίας.

Πίνακας 3.14

**Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρομηχανολογικών έργων
για διαφορετικές παροχές κανονικής λειτουργίας του ΜΥΗΕ.**

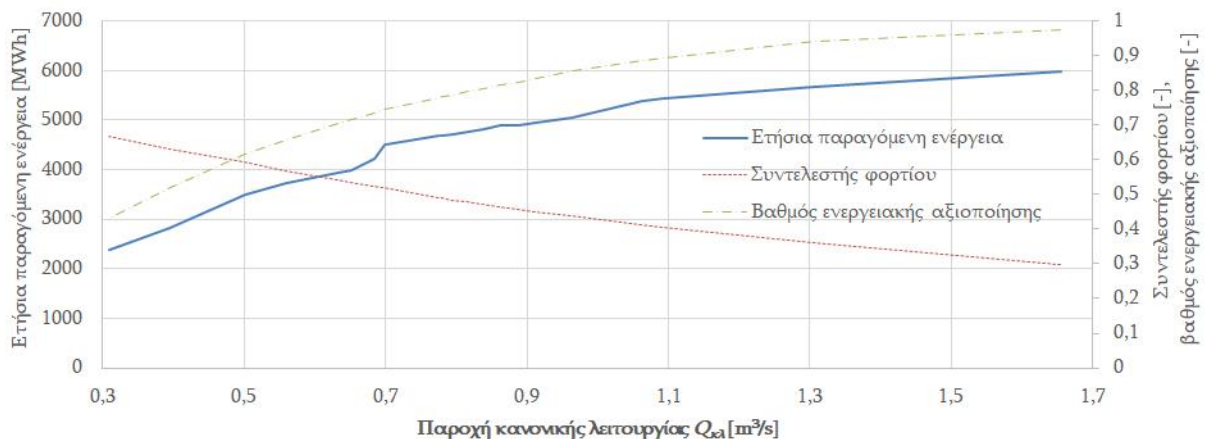
α/α	Υδροστρόβιλος				Γεννήτρια					Μετασχηματιστής			Σταθμός		
	Τύπος [-/ακροφύσια]	$P_{nom-str}$ [kW]	$n_{nom-str}$ [R.P.M.]	Είδος [-]	Τύπος	$V_{nom-gen}$ [V]	$P_{nom-gen}$ [kW]	$S_{nom-gen}$ [kVA] ή $T_{nom-gen}$ [Nm]	$cos\phi_{nom-gen}$	$n_{nom-gen}$ [R.P.M.]	$S_{nom-tran}$ [kVA]	V_{nom1} [V]	V_{nom2} [kV]	$P_{nom-unit}$ [kW]	$L_{max-φκ}$ [km]
1	8«a»/ 4	2387,6	600	Σ	710	380	2319	2580	0,899	600	3150	380	20	2301	3,451
2	7«a»/ 4	1867,4	600	Σ	710	380	1936	2420	0,800	600	2500	380	20	1797	2,830
3	7«a»/ 4	1600,3	600	Σ	710	380	1608	2010	0,800	600	2000	380	20	1537	2,472
4	7 «a»/4	1562,1	600	Σ	710	380	1608	2010	0,800	600	2000	380	20	1498	2,414
5	7 «a»/4	1367,8	600	Σ	710	380	1608	2010	0,800	600	2000	380	20	1312	2,136
6	8 «a»/2	1305,7	600	Σ	630	380	1264	1420	0,890	600	1600	380	20	1251	2,040
7	8 «a»/2	1277,1	600	Σ	630	380	1236	1420	0,871	600	1600	380	20	1224	1,996
8	8 «a»/2	1244,5	600	Σ	630	380	1205	1420	0,848	600	1600	380	20	1192	1,946
9	8 «a»/2	1216,3	600	Σ	630	380	1177	1420	0,829	600	1600	380	20	1165	1,902
10	8 «a»/2	1201,9	600	Σ	630	380	1163	1420	0,819	600	1600	380	20	1152	1,880
11	8 «a»/2	1188,5	600	Σ	630	380	1150	1420	0,810	600	1600	380	20	1139	1,859
12	8 «a»/2	1161,2	600	Σ	630	380	1136	1420	0,800	600	1600	380	20	1113	1,816
13	8 «a»/2	1140,9	600	Σ	630	380	1136	1420	0,800	600	1600	380	20	1093	1,784
14	8 «a»/2	1135,9	600	Σ	630	380	1136	1420	0,800	600	1600	380	20	1088	1,776
15	8 «a»/2	1034,3	600	Σ	630	380	1040	1300	0,800	600	1250	380	20	989	1,607
16	8 «a»/2	959,1	600	Σ	630	380	968	1210	0,800	600	1250	380	20	918	1,481
17	7«a»/ 2	921,7	600	ΑΣ	500	380	880	14448	0,873	604	1000	380	20	849	1,358
18	7«a»/ 2	897,7	600	ΑΣ	500	380	880	14448	0,873	604	1000	380	20	830	1,324
19	7 «a»/2	810,9	600	ΑΣ	500	380	880	14448	0,873	604	1000	380	20	748	1,170
20	7 «a»/2	737,1	600	ΑΣ	500	380	750	12340	0,862	604	800	380	20	671	1,024
21	6 «c»/2	562,2	750	ΑΣ	500	380	650	10717	0,851	604	630	380	20	511	0,703
22	5 «b»/2	454,7	750	ΑΣ	450	380	450	8239	0,873	605	500	380	20	406	0,483

Από τη μελέτη των πινάκων 3.13 και 3.14 προκύπτει για το συγκεκριμένο υδροηλεκτρικό έργο ότι για παροχές πάνω από 0,5 m³/s επιλέγεται στρόβιλος των 600 Σ.Α.Λ., πάνω από 0,95 m³/s ο στρόβιλος έχει 4 ακροφύσια, και πάνω από 0,68 m³/s επιλέγεται τυποποιημένη σύγχρονη γεννήτρια, καθώς αναπτύσσεται ισχύς άνω των 1 MW. Επιπλέον, το αναγκαίο μέγιστο μήκος εκτροπής φυσικής κοίτης του ποταμού εξασφαλίζεται πάνω από 0,89 m³/s. Στο σχήμα 3.53 καταγράφονται ενδεικτικά η παραγόμενη ισχύς του στροβίλου, η ενεργός ισχύς της επιλεχθείσας γεννήτριας, η φαινόμενη ισχύς του επιλεχθέντος μετασχηματιστή, η παραγόμενη ενεργός ισχύς της υδροηλεκτρικής μονάδας, καθώς και το μέγιστο επιτρεπτό μήκος εκτροπής φυσικής κοίτης στην παρούσα περίπτωση σε συνάρτηση με την παροχή κανονικής λειτουργίας.



Σχήμα 3.53: Ισχύς του στροβίλου, ενεργός ισχύς επιλεχθείσας γεννήτριας, φαινόμενη ισχύς επιλεχθέντος μετασχηματιστή, παραγόμενη ισχύς υδρολεκτρικής μονάδας και μέγιστο επιτρεπτό μήκος εκτροπής φυσικής κοίτης ως προς την επιλεχθείσα παροχή κανονικής λειτουργίας.

Από τη μελέτη των ενεργειακών μεγεθών του πίνακα 3.15 προκύπτει για το συγκεκριμένο υδροηλεκτρικό έργο ότι η συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια και ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης είναι αύξουσες συναρτήσεις σε σχέση με την παροχή κανονικής λειτουργίας, ενώ αντίστοιχα ο συντελεστής φορτίου μειώνεται αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.54. Το όριο του 0,75 και άνω για το βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης επιτυγχάνεται για παροχές πάνω από 0,775 m³/s. Ως προς τις ρυθμίσεις του αυτόματου ρυθμιστή και της διάταξης εκτροπής δέσμης ακροφυσίου δεν υπάρχουν ουσιαστικές μεταβολές, παρά μόνο ότι είναι απαιτητό σε όλες τις περιπτώσεις να μελετηθεί ιδιαίτερος το σύστημα αυτομάτου ελέγχου από πλευράς ευαισθησίας και ευστάθειας.



Σχήμα 3.54: Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, συντελεστής φορτίου και βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης υδρολεκτρικής μονάδας ως προς την επιλεχθείσα παροχή κανονικής λειτουργίας.

Από τη μελέτη των οικονομικών μεγεθών του πίνακα 3.15 προκύπτει για το συγκεκριμένο υδροηλεκτρικό έργο ότι το αρχικό κόστος επένδυσης είναι αύξουσα συνάρτηση σε σχέση με την παροχή κανονικής λειτουργίας, το οποίο είναι και λογικό, διότι αυξάνεται η αντίστοιχη εγκατεστημένη ισχύς. Όμως ο ελάχιστος χρόνος απόσβεσης, είτε με το ατελές, είτε με το πλήρες κριτήριο, επιτυγχάνεται για παροχές περί των 0,7 m³/s. Για

ιδιωτική εταιρεία όμως σε καμία περίπτωση δεν είναι βιώσιμο το έργο, καθώς ο πραγματικός χρόνος αποπληρωμής φτάνει τα 17 έτη έναντι των επιδιωκόμενων 5 με 8 ετών, ενώ για τη δημοτική επιχείρηση οι επιτρεπτές παροχές είναι από 0,5 ως 1,1 m³/s, ώστε να περιορίζεται ο χρόνος αποπληρωμής κάτω από τα 20 έτη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.55

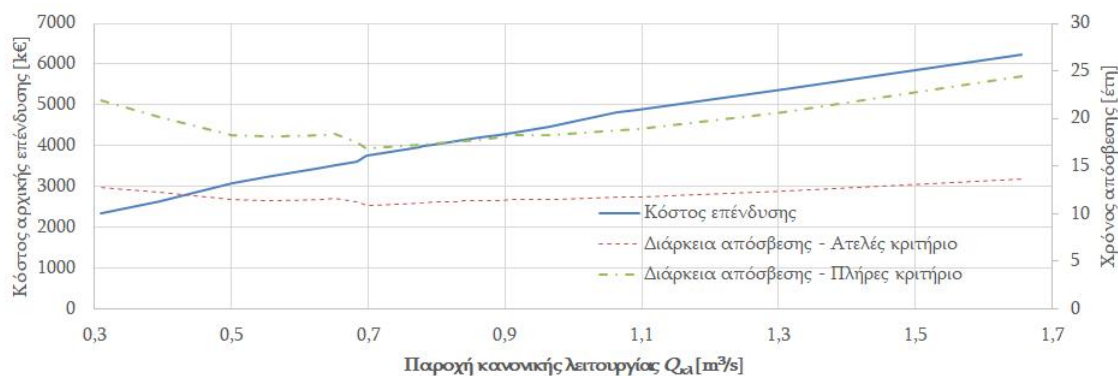
Πίνακας 3.15

Στοιχεία ελέγχου, παραγόμενη ενέργεια, κριτήρια και οικονομικά χαρακτηριστικά για διαφορετικές παροχές κανονικής λειτουργίας του ΜΥΠΕ.

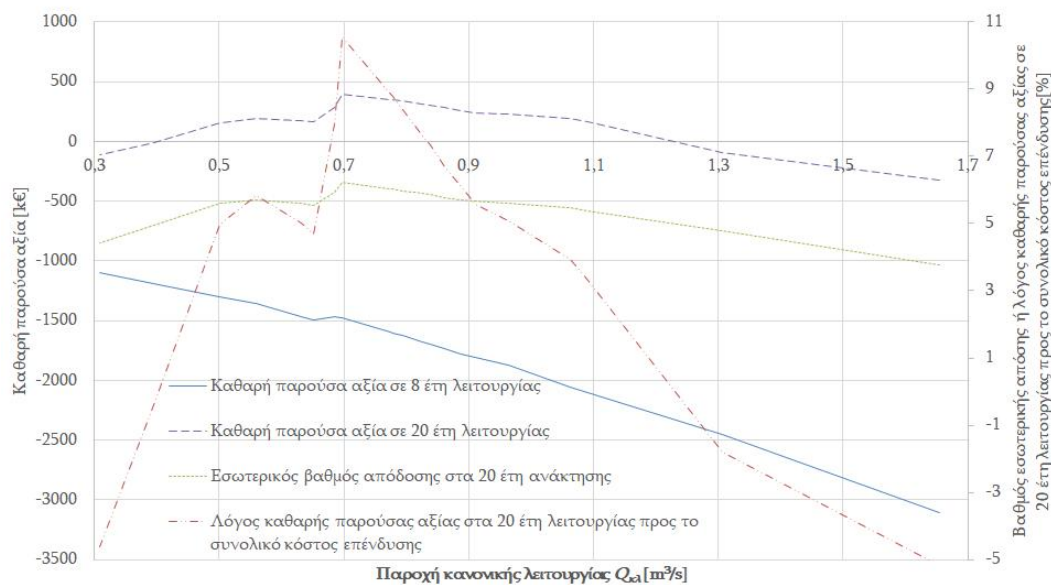
α/α	Σύστημα Ελέγχου				Παραγωγή Ενέργειας				Οικονομικά Στοιχεία					
	t_0 [s]	t_c [s]	t_{c1} [s]	Κριτήριο Ευστάθειας [-]	E [MWh]	$\Sigma \cdot \Phi$	$\beta_{\epsilon\alpha}$ [-]	C_{tot} [κ€]	$T_{\alpha\pi-\alpha}$ [Έτη]	$T_{\alpha\pi-\pi}$ [Έτη]	NPV_8 [κ€]	IRR_8 [%]	NPV_{20} [κ€]	IRR_{20} [%]
1	35	14	1,3	OXI	5994,4	0,2974	0,9764	6235	13,6	24,5	-3109	<0	-322,0	3,78
2	35	15	1,5	OXI	5666,7	0,3601	0,9406	5374	12,4	20,7	-2455	<0	-96,3	4,78
3	35	12	1,5	OXI	5437,9	0,4039	0,8941	4883	11,7	18,9	-2101	<0	162,2	5,39
4	35	16	1,1	OXI	5392,5	0,4110	0,8866	4811	11,7	18,7	-2055	<0	190,0	5,47
5	30	15	1,2	OXI	5055,0	0,4397	0,8575	4457	11,5	18,3	-1876	<0	227,1	5,60
6	30	14	1,2	OXI	4935,3	0,4503	0,8337	4330	11,5	18,2	-1812	<0	241,9	5,66
7	30	14	1,3	OXI	4894,0	0,4566	0,8245	4271	11,4	18,0	-1776	<0	260,8	5,72
8	30	14	1,3	OXI	4885,9	0,4639	0,8143	4204	11,3	17,7	-1735	<0	281,7	5,78
9	30	13	1,3	OXI	4809,4	0,4711	0,8059	4145	11,3	17,6	-1697	<0	304,8	5,86
10	30	12	1,3	OXI	4787,1	0,4745	0,8013	4115	11,2	17,6	-1679	<0	313,4	5,89
11	30	12	1,3	OXI	4766,2	0,4778	0,7969	4087	11,2	17,5	-1662	<0	321,6	5,92
12	30	12	1,4	OXI	4723,4	0,4846	0,7879	4029	11,2	17,4	-1628	<0	338,3	5,98
13	30	12	1,4	OXI	4690,5	0,4897	0,7811	3987	11,1	17,2	-1603	<0	349,7	6,03
14	25	12	1,4	OXI	4682,1	0,4910	0,7794	3976	11,1	17,2	-1596	<0	352,5	6,04
15	25	12	1,4	OXI	4497,9	0,5189	0,7444	3757	10,9	16,8	-1475	<0	396,9	6,23
16	30	14	1,4	OXI	4214,7	0,5243	0,7361	3611	11,2	17,5	-1467	<0	287,8	5,93
17	30	14	0,95	OXI	3979,4	0,5349	0,7158	3523	11,6	18,4	-1491	<0	165,5	5,55
18	30	14	1,0	OXI	3936,8	0,5412	0,7044	3475	11,5	18,3	-1465	<0	173,8	5,59
19	30	12	1,0	OXI	3725,3	0,5688	0,6560	3260	11,4	18,1	-1360	<0	190,6	5,69
20	30	11	1,0	OXI	3488,1	0,5933	0,6148	3079	11,5	18,3	-1298	<0	153,7	5,59
21	30	14	1,1	OXI	2825,1	0,6313	0,5198	2639	12,2	20,2	-1187	<0	-10,6	4,95
22	25	12	0,75	OXI	2380,9	0,6687	0,4293	2331	12,8	21,9	-1099	<0	-107,9	4,44

Στα ίδια συμπεράσματα καταλήγει κανείς αν μελετήσει την καθαρή παρούσα αξία για 8 έτη λειτουργίας για την ιδιωτική εταιρεία και για 20 έτη λειτουργίας για τη δημοτική επιχείρηση, όπου στην πρώτη περίπτωση είναι διαρκώς αρνητικά με αυξητικές τιμές κατά απόλυτη τιμή όσο αυξάνεται η παροχή κανονικής λειτουργίας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι επιτρεπτές παροχές με θετική καθαρή παρούσα αξία είναι πάλι από 0,5 ως 1,1 m³/s με μέγιστη τιμή τα 397 κ€ στα 0,698 m³/s, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.56.

Ομοίως κατά τη μελέτη του εσωτερικού βαθμού απόδοσης με περίοδο ανάκτησης κεφαλαίου 8 έτη βγαίνει διαρκώς αρνητικό το επιτόκιο, ενώ με περίοδο ανάκτησης 20 έτη βγαίνει άνω του 5% πάλι για παροχές κανονικής λειτουργίας 0,5 ως 1,1 m³/s με μέγιστη τιμή το 6,23% στα 0,698 m³/s, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.57. Αν μελετηθεί και ο λόγος της καθαρής παρούσας αξίας στα 20 έτη λειτουργίας προς το κόστος κατασκευής της μονάδας, ως ένας είδος λόγου οφέλους προς κόστος, διαπιστώνεται ότι ο λόγος αυτός είναι θετικός για 0,5 ως 1,1 m³/s με μέγιστη τιμή στα 0,698 m³/s, καθώς σ' αυτήν την τιμή για κάθε επενδυόμενη χρηματική μονάδα θα αποσβέσει κάποιος το κεφάλαιό του και θα κερδίσει επιπλέον ένα ποσοστό 10,56%.



Σχήμα 3.55: Κόστος επένδυσης, διάρκεια απόσβεσης ως ατελές και ως πλήρες οικονομικό κριτήριο υδρολεκτρικής μονάδας ως προς την επιλεχθείσα παροχή κανονικής λειτουργίας.



Σχήμα 3.56: Καθαρή παρούσα αξία σε 8 έτη λειτουργίας και σε 20 έτη λειτουργίας, εσωτερικός βαθμός απόδοσης στα 20 έτη ανάκτησης κεφαλαίου και λόγος καθαρής παρούσας αξίας στα 20 έτη λειτουργίας προς το συνολικό κόστος επένδυσης υδρολεκτρικής μονάδας ως προς την επιλεχθείσα παροχή κανονικής λειτουργίας.

Η λύση που ικανοποιεί πρακτικά όλα τα κριτήρια, τόσο νομοθετικά, όπως το μέγιστο μήκος εκτροπής φυσικής κοίτης ποταμού και του βαθμού ενεργειακής αξιοποίησης, όσο και οικονομικά κριτήρια, όπως μέγιστη δυνατή καθαρή παρούσα αξία ή μέγιστος δυνατός βαθμός απόδοσης, οδηγεί στη λύση με παροχή κανονικής λειτουργίας 0,888 m³/s με αύξοντα αριθμό 7 στους πίνακες 3.13 ως 3.15 με ανηγμένο χρόνο υπέρβασης ίσο με 19%.

3.10. Οριστικοποίηση διάταξης

Με βάση τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου ως προς τα έργα του πολιτικού μηχανικού προσδιορίστηκαν τα εξής στοιχεία:

- Υδροληψία: μήκος 4,5 m, πλάτος 0,70 m με γωνία κλίσης ως προς το πλάτος 14°,
- Φράγμα: μήκος 11,50 m, πλάτος στέψης 0,40 m, πλάτος βάσης 2,50 m, ύψος 2,45 m επιπλέον της βάσης πάχους 0,50 m,
- Υπερχειλιστής: μήκος 6,00 m, πλευρικά τοιχώματα 2,00 m, βύθιση μπροστά από τον υπερχειλιστή 0,45 m,
- Λεκάνη ηρεμίας: μήκος 2,40 m, πλάτος 11,00 m (υπερχειλιστής- υδροληψία – πάχος ενδιάμεσου τοιχώματος υπερχειλιστή – υδροληψίας), πλευρικά τοιχώματα 0,90 m,
- Εξαμμωτής: μήκος 25,00 m με ορθογωνική διατομή πλάτους 3,90 m, βάθους 1,50 m,
- Τύπος δεξαμενής φόρτισης: ίδια στοιχεία με αρχικά - για φόρτιση 1 m³/s,
- Χαλυβοσωλήνας προσαγωγής: ονομαστική διάμετρος DN 700 με πάχος 9,52 mm, πίεση λειτουργίας 25 bar, καθαρό υδραυλικό ύψος σε παροχή κανονικής λειτουργίας 166,7 m.

Ως προς τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό προσδιορίστηκαν τα εξής στοιχεία για την υδροηλεκτρική μονάδα παραγόμενης ισχύος υπό παροχή κανονικής λειτουργίας ίσης με 1224 kW:

- στροβίλος είδους Pelton, ενδεικτικά της εταιρείας Voith, δύο ακροφυσίων με σύστημα εκτροπής, υποτύπου «a» μεγέθους «8» με ονομαστική ισχύ 1277,1 kW, 600 Σ.Α.Λ., με τις ακόλουθες διαστάσεις κατά το σχήμα 2.45: D=950 mm, A=6500 mm, B=1300 mm, C=2600 mm, E=1450 mm, F=4000mm, G=550 mm, H=2400mm, I=1300mm, με τυπικό βαθμό απόδοσης 0,88 και εύρος λειτουργίας από 7,5% ως το 115%, με αγωγή φυγής 1,30 m x 1,30 m και κατόπιν διευρυνόμενος με μικρή λεκάνη ηρεμίας,
- σύγχρονη τριφασική γεννήτρια δέκα πόλων με σύγχρονη ταχύτητα 600 Σ.Α.Λ. για άμεση ζεύξη με υδροστρόβιλο, ενδεικτικού τύπου 630 από την εταιρεία Marelli, με φαινόμενη ισχύ 1420 kVA, πολική τάση 380 V, συχνότητα 50 Hz, ροπή αδρανείας 260 kg/m², βάρος 9.500 kp με μέγιστη ενεργό ισχύ 1236 kW και επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0,871 λόγω τρόπου λειτουργίας της (προκειμένου να μη γίνει μετάβαση σε μεγαλύτερη γεννήτρια των 2 MVA), τυπική συνδεσμολογία αστέρα γειωμένου μέσω κατάλληλης σύνθετης αντίστασης,

- τριφασικός μετασχηματιστής λαδιού 1600 kVA, 50 Hz, τάση πρωτεύοντος 380V, τάση δευτερεύοντος 20 kV, τυπικής συνδεσμολογίας τριγώνου – τριγώνου,
- αυτόματος ρυθμιστής στροφών τύπου 1 με ροπή 62,2 kNm, πίεση λειτουργίας 10,55 bar, παροχή αντλίας 0,05 l/s, ισχύ αντλίας 373 W, όγκο δοχείου 15,1 l, όγκο ελαϊολεκάνης 106 l [E7], με ελάχιστο χρόνο ανοίγματος και κλεισίματος της βάνας προσαγωγής 30 s και 14 s αντίστοιχα, μέγιστο χρόνο λειτουργίας εκτροπής δέσμης ύδατος 1,3 s και με ιδιαίτερη μελέτη του συστήματος αυτόματου ελέγχου από πλευράς ευαισθησίας και ευστάθειας του ρυθμιστή.

Ως προς τα ενεργειακά και νομοθετικά χαρακτηριστικά ισχύουν τα εξής:

- η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ίση με 4894 MWh,
- ο συντελεστής φορτίου είναι ίσος με 0,4566, που είναι σχετικά μικρός,
- ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης είναι ίσος με 0,8245 καλύπτοντας ικανοποιητικά το νομοθετικό όριο του 0,75,
- το κριτήριο του μήκους εκτροπής της φυσικής κοίτης του ποταμού από την υδροληψία στον αγωγό φυγής καλύπτεται οριακά (το όριο είναι 1996 m έναντι του πραγματικού μήκους 1990 m).

3.11. Έλεγχος κριτηρίων οικονομικής βιωσιμότητας

Ως προς τα οικονομικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου έργου προκύπτουν συνοπτικά τα εξής:

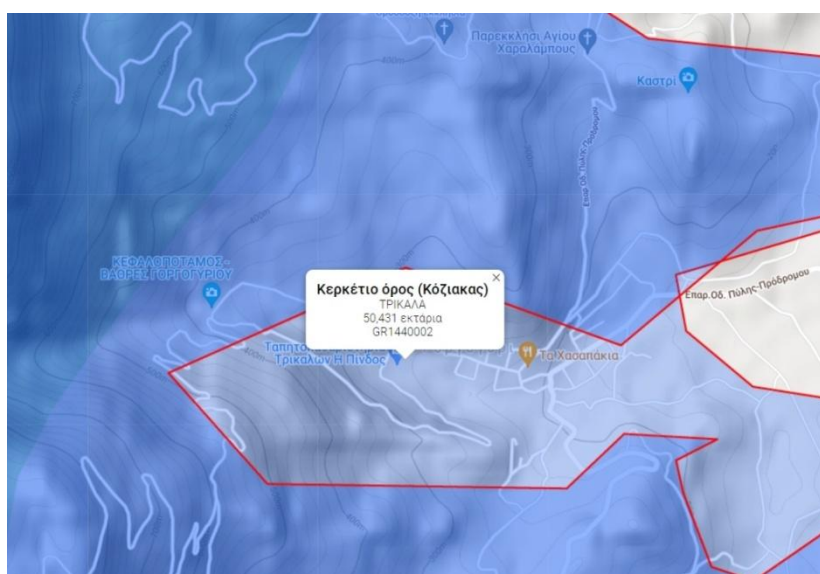
- το συνολικό κόστος της επένδυσης ανέρχεται σε 4.271.413 €
- ο χρόνος απόσβεσης επένδυσης ως ατελές κριτήριο είναι ίσος με 11,4 έτη,
- ο χρόνος απόσβεσης επένδυσης ως πλήρες κριτήριο είναι ίσος με 18,0 έτη για επιτόκιο αναγωγής 5%,
- δεν είναι οικονομικά βιώσιμο για μία ιδιωτική εταιρεία, καθώς η καθαρή παρούσα αξία στα 8 έτη λειτουργίας είναι αρνητική και ίση με 1.776.344 € και με αρνητικό βαθμό εσωτερικής απόδοσης με περίοδο ανάκτησης κεφαλαίου 8 έτη, ο χρόνος απόσβεσης είναι πολύ μεγαλύτερος των 8 ετών,
- είναι οριακά οικονομικά βιώσιμο για μία δημοτική επιχείρηση, καθώς η καθαρή παρούσα αξία στα 20 έτη λειτουργίας είναι θετική και ίση με 260.826 € και με βαθμό εσωτερικής απόδοσης για περίοδο ανάκτησης κεφαλαίου 20 έτη ίσο με 5,72% μεγαλύτερο του επιτοκίου αναγωγής 5%. Επιπλέον ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης είναι 18 έτη, μικρότερος από τα 20 έτη, ενώ για κάθε επενδυόμενη χρηματική μονάδα θα αποσβέσει κάποιος το κεφάλαιό του και θα κερδίσει επιπλέον ένα ποσοστό 5,61% μετά από 20 έτη λειτουργίας.

Θα μπορούσε να βρεθεί και λύση με καλύτερα οικονομικά χαρακτηριστικά, αλλά περιορίζεται κυρίως από το νομοθετικό κριτήριο του μήκους εκτροπής της φυσικής κοίτης του ποταμού από την υδροληψία στον αγωγό φυγής.

3.12. Έλεγχος περιβαλλοντικών περιορισμών από περιβαλλοντική μελέτη

Η περιοχή στην οποία βρίσκεται το έργο ανήκει τυπικά σε περιοχή Natura με χαρακτηρισμό ως «τόπο κοινοτικής σημασίας (SCI: Site of Community Importance)» και κωδικό GR1440002 «Κερκέτιο όρος (Κόζιακας)», όπως φαίνεται στο σχήμα 3.57, ενώ δυτικά η υδρολογική λεκάνη ανήκει τυπικά σε περιοχή Natura με χαρακτηρισμό ως «ζώνη ειδικής προστασίας (SPA: Special Protection Areas)» και κωδικό GR1440006 «Κορυφές όρου Κόζιακας», όπως φαίνεται στο σχήμα 3.58. Βέβαια η τελευταία δεν εμπλέκεται στο υδροηλεκτρικό έργο επί της ουσίας, πέρα της υδροληψίας-φράγματος-διάταξης υπερχειλίσης-λεκάνης ηρεμίας-εξαμμωτή-δεξαμενή φόρτισης.

Στην παρούσα περίπτωση σύμφωνα με την Υπουργική Απόφαση ΔΙΠΑ/ΟΙΚ. 37674/2016, η οποία κωδικοποίησε την Υπουργική Απόφαση 1958/2012 με τίτλο «Κατάταξη των δημοσίων και ιδιωτικών έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες και υποκατηγορίες» το υπάρχον έργο ανήκει τυπικά στην κατηγορία «Α2» με βάση το είδος και το μέγεθος του, το είδος και την ποσότητα ρύπων και επιδράσεων στο περιβάλλον, τη δυνατότητα πρόληψης παραγωγής ρύπων, τους κινδύνους ατυχήματος και την προστασία του περιβάλλοντος, δηλαδή σε αυτά που ενδέχεται να προκαλέσουν σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα είναι ένας συνδυασμός έργων ηλεκτροπαραγωγής (υδροληψία – φράγμα - υπερχειλιστής, εξαμμωτής, δεξαμενή φόρτισης, λεκάνη ηρεμίας, σωλήνας προσαγωγής, σταθμός παραγωγής, διώρυγα φυγής) και συνοδευτικών έργων (οδοποιία, επέκταση δικτύου διανομής ή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας).

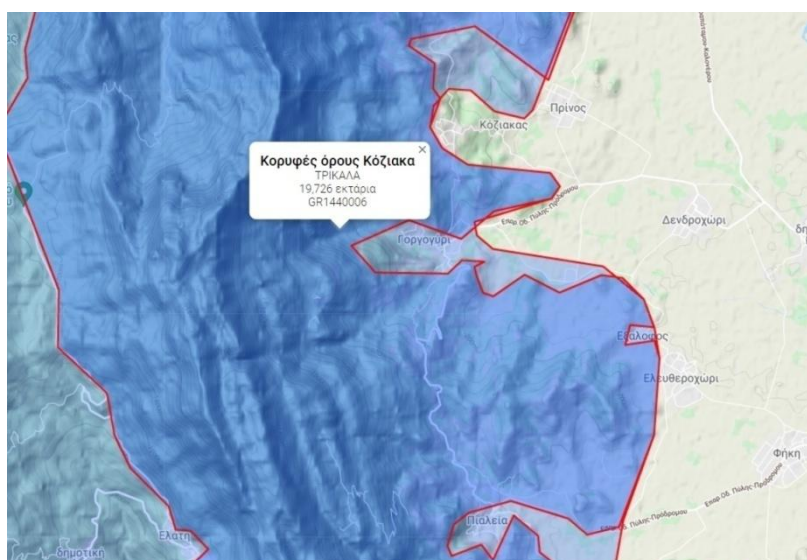


Σχήμα 3.57: Περιοχή Natura με χαρακτηρισμό ως «τόπο κοινοτικής σημασίας (SCI: Site of Community Importance)» και κωδικό GR1440002 «Κερκέτιο όρος (Κόζιακας)» [E15].

Με βάση τη Υ.Α. ΔΙΠΑ/ΟΙΚ. 37674/2016 τα υδροηλεκτρικά έργα ανήκουν στην 10^η ομάδα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Το συγκεκριμένο έργο βρίσκεται σε περιοχή Natura με ισχύ μονάδας 1,22 MW έναντι του ορίου των 15 MW, μήκος αγωγού εκτροπής μικρότερου των 4 km, με πρακτικά μηδενικό όγκο λεκάνης κατάκλυσης έναντι του ορίου 10.000.000 m³, με λεκάνη απορροής τη φυσική λεκάνη απορροής του ίδιου ποτα-

μού που γίνεται η υδροληψία, οπότε ανήκει στην υποκατηγορία «Α2». Ως προς τα βασικά συνοδά έργα ισχύουν τα εξής:

- **Φράγμα:** Ανήκει στα υδραυλικά έργα με εμβαδόν λεκάνης απορροής περί των 3,8 km² (μικρότερο των 25 km² εντός περιοχής Natura), με ύψος φράγματος άνω της βάσης 2,45 m (μεταξύ 1,5 m και 5,0 m), με αποδεδειγμένη μη ύπαρξη ιχθυοπανίδας ανάντι του φράγματος ως 1km και κατάντι του φράγματος ως 2 km, οπότε τυπικά χαρακτηρίζεται ως έργο κατηγορίας Β.
- **Ταμιευτήρας:** Ανήκει τυπικά στα υδραυλικά έργα. Το ύψος του φράγματος (άνω της βάσης η οποία βρίσκεται εντός του εδάφους) είναι 2,45 m, μικρότερο των 5 m, και ο όγκος του νερού εντός του στοιχειώδους ταμιευτήρα είναι της τάξης ορισμένων κυβικών μέτρων, μικρότερος των 2000 m³, εντός περιοχής Natura. Οπότε ο ταμιευτήρας δεν κατηγοριοποιείται.
- **Υδροληψία:** Στην περίπτωση εκτροπής νερού για την υδροληψία υδροηλεκτρικών έργων όταν αυτό επιστρέφεται στο ίδιο υδατόρεμα ή σε υδατόρεμα στο οποίο συμβάλλει, τότε τα στοιχεία περιορισμού υδροληψίας των υδραυλικών έργων γύρω από τον εκτρεπόμενο όγκο δεν εφαρμόζονται. Οπότε η υδροληψία δεν κατηγοριοποιείται.



Σχήμα 3.58: Περιοχή Natura με χαρακτηρισμό ως «ζώνη ειδικής προστασίας (SPA: Special Protection Areas)» και κωδικό GR1440006 «Κορυφές όρου Κόζιακας» [E15].

Οπότε συνολικά το έργο ανήκει στην υποκατηγορία Α2, η οποία είναι η μεγαλύτερη υποκατηγορία από αυτές που ελέγχθηκαν.

Στους πίνακες 3.16 και 3.17 καταγράφονται οι ενδεχόμενες αρνητικές συνέπειες κατά τις φάσεις κατασκευής και λειτουργίας του μικρού υδροηλεκτρικού έργου αντίστοιχα με βάση τη σχετική μελέτη του [E11], οι οποίες όμως δεν είναι μη αντιμετωπίσιμες ή απαγορευτικές ως προς την πραγματοποίηση του έργου. Αντίστοιχα στον πίνακα 3.18 καταγράφονται συνοπτικά τα θετικά αποτελέσματα της λειτουργίας του μικρού υδροηλεκτρικού.

Πίνακας 3.16

Ενδεχόμενες αρνητικές επιπτώσεις του έργου κατά τη φάση κατασκευής
[E11, πίνακας 28] και ίδια επεξεργασία.

α/α	Παράμετρος	Επιπτώσεις	Χαρακτήρας επιπτώσεων	Μέτρα αντιμετώπισης
1	Έδαφος	Τοπικές υπερκαλύψεις επιφανειακού στρώματος εδάφους σε χώρους εκτέλεσης έργων, χώρους κατάληψης έργων για υποβοήθηση κατασκευής και απόθεσης περίσσειας υλικών εκσκαφής	Προσωρινός, μέχρι ολοκλήρωση κατασκευής	Διάθεση πλεοναζόντων αδρανών υλικών σε κοντινό λατομείο ή σε χώρο διάθεσης απορριμμάτων πλησίον Γοργογυρίου εκτός περιοχής Natura
		Φαινόμενα διάβρωσης σε περιοχή χωματουργικών εργασιών κατά τις βροχοπτώσεις	Προσωρινός και μικρή πιθανότητα εκδήλωσης λόγω μικρού διαστήματος εκσκαφής, μικρού μεγέθους όγκου εκσκαφών	Όχι ιδιαίτερα μέτρα, παρά μόνο σε περίπτωση εκδήλωσης των φαινομένων
		Αλλαγή μορφολογίας εδάφους λόγω κατασκευής κτισμάτων	Μόνιμος, αλλά μικρός	Υδροληψία είναι ορεινού τύπου (περιορισμένο μέγεθος) Φράγμα – υπερχειλιστής - λεκάνη ηρεμίας με κατάλληλη διαστασιολόγηση βοηθούν και αντιπλημμυρικά Εξαμμωτής-δεξαμενή φόρτισης-σωλήνας μπορούν να διαμορφωθούν είτε υπόγεια, είτε με περιορισμένες επιπτώσεις σε έδαφος Σταθμός μικρού μεγέθους, όχι μεγαλύτερος από συνηθισμένη κατοικία περιοχής
2	Αέρας	Μικρές εκπομπές αερίων ρύπων και σκόνης από μηχανήματα / οχήματα / εργασίες εργοταξίου	Προσωρινός, μέχρι ολοκλήρωση κατασκευής	Τήρηση μέτρων υπάρχουσας νομοθεσίας. Διαβροχή περιοχής κατασκευής για κατακράτηση αιωρούμενης σκόνης
3	Νερό	Μεταβολές στο ρυθμό απορρόφησης νερού, στο ρυθμό απόπλυσης εδάφους, στις οδεύσεις αποστράγγισης λόγω μεταβολής της υδατικής συμπεριφοράς του Κεφαλοποτάμου μεταξύ υδροληψίας και αγωγού φυγής	Μόνιμος, τοπικός χαρακτήρας λόγω του μικρού μήκους επέμβασης	Χρήση ύδατος οικολογικής παροχής και αναξιοποίητου ύδατος
		Μεταβολή στην ποιότητα του νερού (αύξηση θολότητας) κατά την κατασκευή υδραυλικών έργων	Προσωρινός, μέχρι ολοκλήρωση κατασκευής, μικρός λόγω περιορισμένου όγκου έργων	Διεξαγωγή των εργασιών υδραυλικών έργων σε συμπιεσμένο χρονικό διάστημα για περιορισμό επιπτώσεων
4	Χλωρίδα	Αφαίρεση υπάρχουσας χλωρίδας σε σημεία υλοποίησης τεχνικών έργων	Μόνιμος, τοπικός χαρακτήρας λόγω του μικρού μήκους επέμβασης, δεν απειλούνται είδη υπό εξαφάνιση	Επιλογή σημείων θέσεων υδροληψίας, φράγματος κτλ. με όσο το δυνατό περιορισμένες επεμβάσεις στο περιβάλλον Αποκατάσταση μέρους απωλειών με υπογειοποίηση τμημάτων του έργου όπου είναι δυνατό να γίνει
		Παρενόχληση των ευαίσθητων ειδών ως προς τη σκόνη	Προσωρινός, μέχρι ολοκλήρωση κατασκευής Αναστρέψιμες επιπτώσεις	Όχι ιδιαίτερα μέτρα Ανανέωση πληθυσμού από τη φύση

Πίνακας 3.16 Συνέχεια

Ενδεχόμενες αρνητικές επιπτώσεις του έργου κατά τη φάση κατασκευής [E11, πίνακας 28] και ίδια επεξεργασία.

α/α	Παράμετρος	Επιπτώσεις	Χαρακτήρας επιπτώσεων	Μέτρα αντιμετώπισης
5	Πανίδα	Μέρος πανίδας χαμηλότερων βαθμίδων (έντομα κα.) ενδεχόμενες να θανατωθεί λόγω περιορισμένων οδών διαφυγής	Μόνιμη Μερικώς αναστρέψιμη	Απομάκρυνση ειδών, π.χ. χελωνών κα., μέσω ανθρώπινης επέμβασης Ανανέωση πληθυσμού από τη φύση
		Απομάκρυνση πανίδας με υψηλή κινητικότητα (π.χ. αλεπούδων) από τη ζώνη κατασκευής λόγω όχλησης από θόρυβο και ανθρώπινη παρουσία	Προσωρινός, μέχρι ολοκλήρωση κατασκευής Αναστρέψιμη σε μεγάλο βαθμό	Όχι ιδιαίτερα μέτρα
6	Θόρυβος	Αύξηση υπάρχουσας στάθμης θορύβου λόγω χρήσης / κίνησης μηχανημάτων και βαρέων οχημάτων	Παροδικός	Τήρηση μέτρων που επιβάλλονται από την ισχύουσα νομοθεσία προς περιορισμό της στάθμης θορύβου σε χαμηλότερα επίπεδα από τα επιτρεπτά όρια
		Έκθεση εργατικού δυναμικού και γειτονικών κατοίκων σε υψηλό θόρυβο	Παροδικός	Τήρηση μέτρων που επιβάλλονται από την ισχύουσα νομοθεσία προς περιορισμό της στάθμης θορύβου σε χαμηλότερα επίπεδα από τα επιτρεπτά όρια
7	Χρήσεις γης	Δεν αλλάζει επί της ουσίας η χρήση γης	-	-
8	Φυσικοί πόροι	Χρήση υλικών κατασκευής	Παροδικός	Πέρα ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού λοιπά υλικά (π.χ. αδρανή) μπορούν να προέλθουν από την ίδια ή γειτονική περιοχή
9	Κίνδυνοι ανώμαλων καταστάσεων	Δεν υπάρχουν κίνδυνοι εκρήξεων ή διαφυγής επικίνδυνων ουσιών λόγω ατυχήματος ή ανώμαλων συνθηκών	-	-
10	Πληθυσμός- Κατοικία	Επεμβάσεις σε οικιστικό περιβάλλον	Ελάχιστος	Η κατασκευή σταθμού και σωλήνα πλησίον οικιών δεν ενοχλεί επί της ουσίας
11	Μεταφορές	Πρόσθετη κίνηση τροχοφόρων σε περιοχή εργασιών	Προσωρινός	Ρύθμιση κυκλοφορίας σε είσοδο – έξοδο οικισμού για λόγους οδικής ασφάλειας Λόγω υφισταμένου δικτύου όχι νέα έργα οδοποιίας Αντισταθμιστικά μπορεί να γίνει βελτίωση οδικών αξόνων
12	Ενέργεια	Μικρή πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας κατά τη φάση κατασκευής	Παροδικός	-
13	Κοινή ωφέλεια	-	-	-
14	Ανθρώπινη υγεία	-	-	-
15	Αισθητική	Έντονη παρουσία ανθρώπου και δραστηριοτήτων κατά την εκτέλεση εργασιών	Προσωρινός	-
16	Αναψυχή	-	-	-
17	Πολιτιστική κληρονομιά	-	-	-

Με βάση τα προαναφερθέντα το μικρό υδροηλεκτρικό έργο θα προκαλέσει κατά τη φάση κατασκευής και λειτουργίας του περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες γενικά είναι ελεγχόμενες, ενώ τα οφέλη του πέρα των οικονομικών και ενεργεια-

κών είναι επίσης σημαντικά, διότι μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη της περιοχής και στο μερικό έλεγχο πλημμυρικών φαινομένων.

Πίνακας 3.17

**Ενδεχόμενες αρνητικές επιπτώσεις του έργου κατά τη φάση λειτουργίας
[E11, πίνακας 29] και ίδια επεξεργασία.**

α/α	Παράμετρος	Επιπτώσεις	Χαρακτήρας επιπτώσεων	Μέτρα αντιμετώπισης
1	Εδαφος	Φαινόμενα διάβρωσης της κοίτης του ποταμού μετά τον αγωγό φυγής στροβίλου	Μόνιμος	Διατήρηση της ταχύτητας ροής σε μικρές τιμές υπό οποιεσδήποτε συνθήκες Διαμόρφωση μικρής λεκάνης ηρεμίας
		Μικρές αλλαγές στη μορφολογία του εδάφους & στα ανώτερα εδαφικά στρώματα	Μόνιμος, αλλά μικρός	Υδροληψία είναι ορεινού τύπου (περιορισμένο μέγεθος) Φράγμα – υπερχειλιστής - λεκάνη ηρεμίας με κατάλληλη διαστασιολόγηση βοηθούν και αντιπλημμυρικά Εξαμμοτής-δεξαμενή φόρτισης-σωλήνας μπορούν να διαμορφωθούν είτε υπόγεια, είτε με περιορισμένες επιπτώσεις σε έδαφος Σταθμός μικρού μεγέθους, όχι μεγαλύτερος από συνηθισμένη κατοικία περιοχής
2	Αέρας	-	-	-
3	Νερό	Επίδραση στην παροχή νερού από την υδροληψία ως την επιστροφή του νερού μέσω του αγωγού φυγής στην κοίτη του ποταμού	Μόνιμος	Χρήση ύδατος οικολογικής παροχής και αναξιοποίητου ύδατος
		Μεταβολή παροχής υπόγειων νερού λόγω παρεμπόδισης εμπλουτισμού τους από την κατακράτηση μεγάλου τμήματος παροχής ποταμού για ενεργειακή αξιοποίηση μεταξύ υδροληψίας -αγωγού φυγής	Μόνιμος, τοπικός χαρακτήρας λόγω του μικρού μήκους επέμβασης	Χρήση ύδατος οικολογικής παροχής και αναξιοποίητου ύδατος Χρήση υπόγειων υδάτων λόγω καρστικού αναγλύφου που δεν επηρεάζονται
		Μεταβολές στο ρυθμό απορρόφησης νερού, στο ρυθμό απόπλυσης εδάφους, στις οδεύσεις αποστράγγισης λόγω μεταβολής της υδατικής συμπεριφοράς Κεφαλοποτάμου μεταξύ υδροληψίας και αγωγού φυγής	Μόνιμος, τοπικός χαρακτήρας λόγω του μικρού μήκους επέμβασης	Χρήση ύδατος οικολογικής παροχής και αναξιοποίητου ύδατος
4	Χλωρίδα	Επίδραση σε παραποτάμια βλάστηση, κυρίως σε υδρόφιλα είδη που επηρεάζονται από ροή ποταμού, όπως αναπαραγωγή τους Μικρή υποβάθμιση	Αναστρέψιμος	Χρήση ύδατος οικολογικής παροχής και αναξιοποίητου ύδατος Προσαρμογή σε νέες συνθήκες Ενδεχόμενη διάταξη ποτίσματος στάγδην σε συγκεκριμένα φυτά / δέντρα
5	Πανίδα	Μικρή υποβάθμιση ως προς τη βιολογική ποικιλότητα, διότι ορισμένα υδρόφιλα έντομα, υδρόβια ή / και παρυδάτια πουλιά δεν προσαρμόζονται σε νέες συνθήκες	Μόνιμος, τοπικός χαρακτήρας λόγω του μικρού μήκους επέμβασης	Χρήση ύδατος οικολογικής παροχής και αναξιοποίητου ύδατος
6	Θόρυβος	Εκπομπή θορύβου από λειτουργία ηλεκτρομηχανολικού εξοπλισμού	Μόνιμος, τοπικός χαρακτήρας μόνο σε σταθμό	Μελέτη και χρήση ηχομόνωσης κατά την κατασκευή σταθμού
7	Χρήσεις γης	-	-	-
8	Φυσικοί πόροι	-	-	-

Πίνακας 3.17 Συνέχεια

Ενδεχόμενες αρνητικές επιπτώσεις του έργου κατά τη φάση λειτουργίας

[E11, πίνακας 29] και ίδια επεξεργασία.

α/α	Παράμετρος	Επιπτώσεις	Χαρακτήρας επιπτώσεων	Μέτρα αντιμετώπισης
9	Κίνδυνοι ανώμαλων καταστάσεων	-	-	-
10	Πληθυσμός-Κατοικία	-	-	-
11	Μεταφορές	-	-	-
12	Ενέργεια	-	-	-
13	Κοινή ωφέλεια	-	-	-
14	Ανθρώπινη υγεία	-	-	-
15	Αισθητική	Αλλοίωση του τοπίου μεταξύ υδροληψίας και αγωγού φυγής λόγω μειωμένης παροχής νερού	Μόνιμος	Κατάλληλη φύτευση με αυτόχθονα είδη προς βελτίωση της αισθητικής του τοπίου στις κοίτες του Κεφαλοποτάμου μεταξύ υδροληψίας και αγωγού φυγής Έργα υδροληψίας-φράγματος-υπερχειλιστή-λεκάνη ηρεμίας-εξαμμωτή-δεξαμενής φόρτισης με μικρά ύψη και μεγέθη για περιορισμό αλλοίωσης τοπίου Σωλήνας προσαγωγής όπου είναι δυνατό υπόγειος ή οπτικά κρυμμένος με κατάλληλη φύτευση Σταθμός ενταγμένος σε τοπική αρχιτεκτονική Τακτική – ετήσια συντήρηση υδροληψίας ανάντι φράγματος με απομάκρυνση χονδρόκοκκων φερτών υλών και ομοιόμορφη διάστρωση κοίτης ποταμού για εξασφάλιση ομαλής ροής
16	Αναψυχή	-	-	-
17	Πολιτιστική κληρονομιά	-	-	-

Πίνακας 3.18

Ενδεχόμενα θετικά αποτελέσματα του έργου κατά τη φάση λειτουργίας [E11] και ίδια επεξεργασία.

α/α	Παράμετρος	Αποτελέσματα	Χαρακτήρας αποτελεσμάτων	Τρόπος επίτευξης
1	Έδαφος	Περιορισμός φαινομένων διάβρωσης της κοίτης του ποταμού κατάντι φράγματος – υπερχειλιστή –λεκάνη ηρεμίας	Μόνιμος	Ορθή σχεδίαση υπερχειλιστή-λεκάνη ηρεμίας, περιορισμός ταχύτητας ροής υπό συνθήκες πλημμύρας
2	Αέρας	Μείωση εκπομπών ρύπων (ενδεικτικές τιμές μείωσης 3904 tn CO ₂ /έτος, 24,4 tn SO ₂ /έτος)	Μόνιμος, όσο λειτουργεί το έργο	Ορθή λειτουργία μικρού υδροηλεκτρικού έργου
3	Νερό	Προστασία έναντι πλημμύρας	Μόνιμος	Ορθή σχεδίαση υπερχειλιστή-λεκάνη ηρεμίας, ελεγχόμενη διαχέτευση πλημμυρικής παροχής, μείωση ταχύτητας ροής
4	Φυσικοί πόροι	Μείωση κατανάλωσης συμβατικών καυσίμων κατά 341,6 tn/έτος	Μόνιμος, όσο λειτουργεί το έργο	Ορθή λειτουργία μικρού υδροηλεκτρικού έργου
5	Ενέργεια	Ενίσχυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μέσω καταναμημένης παραγωγής	Μόνιμος, όσο λειτουργεί το έργο	Ορθή λειτουργία μικρού υδροηλεκτρικού έργου
6	Αναψυχή	Αύξηση τουριστικής ανάπτυξης περιοχής	Μόνιμος, όσο λειτουργεί το έργο	Μέσω εκπαιδευτικών εκδρομών για μικρό υδροηλεκτρικό έργο και αειρόφορο ανάπτυξη περιοχής
7	Πληθυσμός-Κατοικία	Μικρή αύξηση του πληθυσμού	Μόνιμος, όσο λειτουργεί το έργο	Λόγω τουριστικής ανάπτυξης και λειτουργίας μονάδας (1 τεχνικός / εργάτης)
8	Δήμος	Οικονομικά οφέλη	Μόνιμος, όσο λειτουργεί το έργο	Πώληση ενέργειας – εκμετάλλευση έργου πέρα 20 ετίας, μοχλός κοινωνικής – οικονομικής αναζωογόνησης περιοχής

3.13. Συμπεράσματα

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας της οποίας ζητείται ο βέλτιστος σχεδιασμός έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- σύγχρονη τριφασική σε εναλλασσόμενο δίκτυο των 50 Hz,
- σύγχρονη ταχύτητα 600 R.P.M. για άμεση ζεύξη με υδροστρόβιλο, δηλαδή με δέκα πόλους και εκ των πραγμάτων μορφής δρομέα εκτύπων πόλων,
- ονομαστική πολική τάση της τάξης μεγέθους ίσης ή μεγαλύτερης των 400 V.
- παραγόμενη ονομαστική ενεργός ισχύς 1236 kW με δυνατότητα υπερφόρτισης ως 12% επί της ονομαστικής ενεργού ισχύος (1385 kW),
- φαινόμενη ονομαστική ισχύς τουλάχιστον 1420 kVA για επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0,871, αλλά με αρχικό στόχο 1545 kVA με επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0,80,
- ροπή αδρανείας δρομέα 260 kg/m² τουλάχιστον, για να βοηθήσει την ευσταθή λειτουργία του συστήματος αυτομάτου ελέγχου,
- βάρος μικρότερο των 9.500 kp, για να είναι φθηνότερο από τις υπάρχουσες τυποποιημένες μηχανές,

- ονομαστικός βαθμός απόδοσης 96,80% τουλάχιστον και σχεδόν επιπεδοποιημένη καμπύλη απόδοσης (άνω του 70% για φορτίση μηχανής 20% και κάτω), για να είναι ισάξια ή καλύτερη από τις υπάρχουσες τυποποιημένες μηχανές,
- μέγιστη ταχύτητα μηχανικής περιστροφής 960 Σ.Α.Λ. λόγω αναπτυσσόμενης ταχύτητας φυγής +60% της ονομαστικής,
- τυπική συνδεσμολογία τυλιγμάτων στάτη σε αστέρα γειωμένο μέσω κατάλληλης σύνθετης αντίστασης.

Ιδανικά η αντίστοιχη υπό σχεδίαση γεννήτρια πρέπει να έχει τη βέλτιστη ενεργειακή συμπεριφορά με περιορισμό των απωλειών της σε σχέση με την παραγόμενη καμπύλη ενέργειας από την υπό σχεδίαση υδροηλεκτρική μονάδα λαμβάνοντας υπόψη τα κόστη κατασκευής και συντήρησής της μέσα στο χρονικό διαστήμα ανάκτησης κεφαλαίου

Προκαταρκτική Σχεδίαση Σύγχρονης Γεννήτριας Έκτυπων Πόλων

4.1. Βασικές προδιαγραφές της σχεδίασης της γεννήτριας

Αρχικά θα πραγματοποιηθεί η βασική διαστασιολόγηση της γεννήτριας. Προκειμένου να υλοποιηθεί αυτή πρέπει να επιλεχθεί ο τύπος και η ισχύς εξόδου της. Από τη βασική διαστασιολόγηση θα καθοριστεί το είδος και η διάταξη των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της.

Οι βασικές προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιούνται από την ηλεκτρογεννήτρια εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της μηχανικής ισχύος και της ταχύτητας με την οποία περιστρέφεται η κινητήρια μηχανή της. Αυτά έχουν υπολογισθεί διεξοδικά στο Κεφάλαιο 3 της παρούσης. Συγκεκριμένα έχει υπολογισθεί ότι ο υδροστρόβιλος με τον οποίο πρόκειται να ζευχθεί περιστρέφεται με ονομαστική ταχύτητα περιστροφής ίσης με 600 R.P.M. ενώ, μπορεί να παρέχει στην έξοδο του ισχύ τόση ώστε η γεννήτρια να εξυπηρετεί ηλεκτρικά φορτία ισχύος ίσης ή ελαφρά μεγαλύτερης των 1250 kW. Οι βασικές προδιαγραφές αφορούν δυο βασικές λειτουργικές καταστάσεις :

- Τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η οποία στοχεύει στη μεγιστοποίηση της παρεχόμενης ενέργειας. Βασικό κριτήριο σχεδίασης σε αυτή την κατάσταση είναι η θερμική ισορροπία της γεννήτριας.
- Τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση θα εξεταστεί η λειτουργία της γεννήτριας για ένα μικρό χρονικό διάστημα το οποίο απαιτείται προκειμένου ο υδροστρόβιλος να επανέλθει στη μόνιμη κατάσταση έπειτα από μια απότομη και ξαφνική μεταβολή ενός μεγέθους του. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί η μεταβολή της ταχύτητας με την οποία περιστρέφεται ο άξονας του. Λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας του φαινομένου δεν μεταβάλλεται σημαντικά η θερμοκρασία των τυλιγμάτων της γεννήτριας και για το λόγο αυτό επιτρέπεται η περιορισμένη υπερφόρτιση της.

Λαμβάνοντας υπόψη τα μεγέθη του υδροστρόβιλου και ως αφετηρία τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας που έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 3.13 επιλέγονται τα ονομαστικά μεγέθη της γεννήτριας που παρατίθενται παρακάτω έτσι ώστε, να επιτευχθεί η βέλτιστη σχεδίαση της.

- Σύγχρονη τριφασική γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης και συχνότητας 50 Hz.
- Ταχύτητα περιστροφής ίση με 600 R.P.M. και άμεση ζεύξη του άξονα της με τον υδροστρόβιλο χωρίς παρεμβολή κιβωτίου μετάδοσης προκειμένου, η διάταξη να διαθέτει αυξημένη αξιοπιστία. Από αυτή καθώς και από τη συχνότητα της τάσης εξόδου προκύπτει ότι ο δρομέας θα εφοδιαστεί με δέκα έκτυπους πόλους.
- Ονομαστική πολική τάση ίση με 690 V και σύνδεση των τυλιγμάτων του στάτη κατά αστέρα.

- Ονομαστική φαινομένη ισχύ ίση με 1482,5 kVA με επαγωγικό συντελεστή ισχύος ίσο με 0,85
- Παραγόμενη ονομαστική πραγματική ισχύ 1260 kW με δυνατότητα υπερφόρτισης έως 11,5 % επί της παραγόμενης πραγματικής ισχύος (1405 kW).

4.2. Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης – θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης

Η διαστασιολόγηση της γεννήτριας θα πραγματοποιηθεί σύμφωνα με ορισμένες τυπικές τιμές βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών. Στη συνέχεια παρατίθενται αυτά τα μεγέθη καθώς και οι βασικές σχέσεις υπολογισμού τους [E15].

α) Ειδική μαγνητική φόρτιση B_{Ave}

Η τιμή της ειδικής μαγνητικής φόρτισης εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων της γεννήτριας και το εμβαδόν της επιφάνειας του διακένου. Αυτή θα υπολογισθεί από την σχέση (4.1).

$$B_{Ave} = \frac{P \cdot \Phi_{per\ pole}}{\pi \cdot D_{internal\ stator} \cdot L} \quad (4.1)$$

όπου : P	ο αριθμός των πόλων
$\Phi_{per\ pole}$	η μαγνητική ροή ανά πόλο σε Weber (Wb)
$D_{internal\ stator}$	η εσωτερική διάμετρος του στάτη σε μέτρα (m)
L	το μήκος του πυρήνα του στάτη σε μέτρα (m)

Οι τυπικές τιμές του μεγέθους αυτού κυμαίνονται από 0,5 ÷ 0,6 Tesla (Wb/m^2) και περιορίζονται από τα φαινόμενα του κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα του στάτη και της σκέδασης των οδοντώσεων.

Η τιμή της ειδικής μαγνητικής φόρτισης έχει ιδιαίτερη σημασία για τη σχεδίαση των ηλεκτρικών μηχανών διότι από αυτή εξαρτάται η ικανότητα ανάπτυξης της ροπής στον άξονα και της ισχύος στην έξοδο τους. Μια αυξημένη τιμή της ειδικής μαγνητικής φόρτισης στο διάκενο της γεννήτριας θα έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλής ροπής και την παραγωγή υψηλής ισχύος. Το τίμημα της επίτευξης των προαναφερθέντων είναι η αύξηση των απωλειών του πυρήνα του στάτη. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο όταν οι οδοντώσεις του στάτη βρίσκονται στον κορεσμό.

β) Ειδική ηλεκτρική φόρτιση ac

Η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης εξαρτάται από την ενεργό τιμή των αμπερ-ελιγμάτων ανά μέτρο που υφίστανται στην περιφέρεια του διακένου της γεννήτριας. Το μέγεθος αυτό υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.2).

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_s \cdot I}{\pi \cdot D} \quad (4.2)$$

Οι μονάδες μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης είναι τα αμπερ-ελίγματα ανά μέτρο (AE/m) ενώ, η τιμή της εξαρτάται από το μέγεθος της μηχανής, την ταχύτητα με

την οποία περιστρέφεται ο δρομέας της και τη μέθοδο ψύξεως. Οι τιμές του μεγέθους αυτού για σχεδιάσεις σύγχρονων μηχανών λαμβάνονται μέσα στο εύρος της περιοχής από $15000 \div 45000 \text{ AE}/m$.

Η ικανότητα παραγωγής ροπής της υπό σχεδίαση γεννήτριας καθορίζεται από την ειδική ηλεκτρική φόρτιση σε συνδυασμό με την ειδική μαγνητική φόρτιση. Επιπρόσθετα αυτή επιδρά αφενός μεν στη τιμή των απωλειών χαλκού και αφετέρου στη τιμή της επαγωγικής αντίδρασης των τυλιγμάτων του στάτη.

γ) *Ενεργός τιμή της αναπτυσσόμενης Η.Ε.Δ. ανά φάση*

Η ενεργός τιμή της αναπτυσσόμενης Η.Ε.Δ. ανά φάση υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.3) η οποία προκύπτει από τη σχέση (2.102).

$$E_{ph} = 4,44 \cdot f \cdot N_{ph} \cdot K_W \cdot \Phi_{per\ pole} \quad (4.3)$$

όπου : f η συχνότητα της αναπτυσσόμενης τάσης σε Hz
 N_{ph} ο αριθμός των εν σειρά συνδεδεμένων ελιγμάτων ανά φάση
 K_W ο συντελεστής τυλίγματος
 $\Phi_{per\ pole}$ η μαγνητική ροή ανά πόλο σε Weber (Wb)

δ) *Φαινόμενη ισχύς εξόδου της γεννήτριας*

Η φαινόμενη ισχύς εξόδου της γεννήτριας υπολογίζεται από τη σχέση (4.4) .

$$S = 3 \cdot E_{ph} \cdot I_{ph} \quad (4.4)$$

όπου : E_{ph} η τιμή της αναπτυσσόμενης Η.Ε.Δ. ανά φάση σε Volt (V)
 I_{ph} η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα έκαστης φάσης σε αμπέρ (A)

Επιπρόσθετα, η ισχύς εξόδου του εναλλακτήρα ως συνάρτηση των δύο βασικών μεγεθών της διαστασιολόγησης του – της ειδικής μαγνητικής φόρτισης και της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης – θα υπολογισθεί σύμφωνα με τη σχέση (4.5)

$$S = K' \cdot D^2 \cdot L \cdot n \quad (4.5)$$

όπου : K' ο συντελεστής εξόδου
 D η διάμετρος του διάκενου σε μέτρα (m)
 L το μήκος του πυρήνα του στάτη σε μέτρα (m)
 n είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της μηχανής μετρούμενη σε Σ.Α.Δ.

Επιπρόσθετα ο συντελεστής εξόδου υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$K' = 11 \cdot B_{Ave} \cdot ac \cdot K_W \cdot 10^{-3} \quad (4.6)$$

όπου : B_{Ave} η ειδική μαγνητική φόρτιση σε (Wb/m^2)
 ac η ειδική ηλεκτρική φόρτιση σε (AE/m)
 K_W ο συντελεστής τυλίγματος

ε) Οριακή τάση διακένου

Η οριακή τάση του διακένου αποτελεί βασικό μέγεθος της μηχανικής αντοχής της γεννήτριας και δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή των 10 tn/cm^2 . Προκειμένου να προσδιοριστεί αυτό το μέγεθος αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η φυγόκεντρος δύναμη που αναπτύσσεται στο δρομέα σύμφωνα με τη σχέση που ακολουθεί:

$$F = m \cdot \omega_{rm}^2 \cdot R \quad (4.7)$$

όπου : m είναι η ισοδύναμη μάζα του δρομέα στην περιφέρεια του
 ω_{rm} η μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα
 R η ακτίνα του δρομέα

Στη συνέχεια υπολογίζεται το εμβαδόν του διακένου από τη σχέση (4.8).

$$A = \pi \cdot D \cdot L \quad (4.8)$$

Η οριακή τάση του διακένου προκύπτει από το λόγο της αναπτυσσόμενης φυγόκεντρης δύναμης στο δρομέα με το εμβαδόν του διακένου σύμφωνα με τη σχέση (4.9).

$$\text{Οριακή Τάση Διακένου} = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot \omega_{rm}^2 \cdot R}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (4.9)$$

στ) Πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος

Η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος αποτελεί ένα κρίσιμο μέγεθος της γεννήτριας διότι, από αυτή καθορίζονται οι απώλειες χαλκού στα τυλίγματα της. Από τις αυξημένες τιμές της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος προκαλείται η αύξηση των απωλειών χαλκού καθώς και της θερμοκρασίας της μηχανής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη θερμική καταπόνηση των μονωτικών και των σιδηρομαγνητικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της. Επομένως, πρέπει να ληφθεί μέριμνα έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ικανοποιητική ψύξη της μηχανής. Σε διαφορετική περίπτωση υφίσταται ο κίνδυνος γήρανσης των μονωτικών υλικών η οποία δύναται να μειώσει τη προσδόκιμη διάρκεια ζωής της γεννήτριας ή να προκαλέσει την καταστροφή της.

Εάν η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος j λαμβάνει τιμή ίση ή μικρότερη από εκείνη των 5 A/mm^2 τότε, απαιτείται η υιοθέτηση διάταξης εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα ενώ, μπορεί να αποφευχθεί η χρήση άλλου μέσου ψύξης για τη γεννήτρια.

ζ) Επιφάνεια του διακένου

Ο προσδιορισμός της ελάχιστης επιφάνειας του διακένου πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη επιθυμητή ροπή διακένου. Θεωρείται ότι για να παραχθεί η μέγιστη ροπή πρέπει η ηλεκτρική γωνία των πεδίων στάτη και δρομέα να είναι ίση με 90° ηλεκτρικές μοίρες. Στην πράξη αυτό ισχύει για τις σύγχρονες γεννήτριες κυλινδρικού δρομέα ενώ, για τις σύγχρονες γεννήτριες έκτυπων πόλων η μέγιστη ροπή παράγεται σε γωνία ελαφρά μικρότερη από εκείνη των 90° ηλεκτρικών μοιρών. Σε κάθε περίπτωση το εμβαδόν του διακένου θα προκύψει από την τιμή της επαπτομενικής πίεσης στο διάκενο.

η) Αναλογία διαστάσεων D και L

Η διαστασιολόγηση της γεννήτριας κατά κύριο λόγο αφορά τον προσδιορισμό της εσωτερικής διαμέτρου του πυρήνα του στάτη και του μήκους του. Η επίδοση, η απόδοση και η μηχανική αντοχή της μηχανής εξαρτώνται από την διαστασιολόγηση του διακένου της.

Για όσα αφορούν την επίδοση από τη σχέση (4.5) προκύπτει ότι οι μηχανές που διαθέτουν μεγάλη διάμετρο διακένου υπερτερούν σε επιδόσεις διότι η φαινόμενη ισχύς εξόδου των εναλλακτών αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο της διαμέτρου του διακένου τους.

Η αυξημένη επίδοση που επιτυγχάνεται στην περίπτωση που η διάμετρος του διακένου είναι μεγαλύτερη από το μήκος της μηχανής δεν διασφαλίζει πάντοτε την επίτευξη ενός ικανοποιητικού βαθμού απόδοσης. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση της διαμέτρου του διακένου προκαλεί μια αύξηση του μέσου μήκους των ελιγμάτων των πηνίων που τοποθετούνται στο στάτη της γεννήτριας. Η αύξηση του μέσου μήκους των ελιγμάτων σε αυτή την περίπτωση αφορά εκείνα τα τμήματα των πηνίων τα οποία τοποθετούνται έξω από τις άυλακες και χρησιμεύουν για να κλείσει το ηλεκτρικό κύκλωμα (πρόσθιες και οπίσθιες μετωπικές συνδέσεις της περιέλιξης). Γίνεται αντιληπτό ότι, τα τμήματα αυτά συμβάλλουν περισσότερο στην αύξηση των απωλειών χαλκού από ότι το τμήμα των πηνίων που βρίσκεται εντός των αυλάκων. Επομένως η αυξημένη διάμετρος του διακένου προκαλεί αύξηση των απωλειών χαλκού του στάτη.

Στην περίπτωση που η υπό σχεδίαση μηχανή διαθέτει μεγάλο μήκος πυρήνα για την κατασκευή της απαιτείται πυρήνας με μεγάλο όγκο και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών πυρήνα. Συνεπώς δεν είναι αρκετή από μόνη της για να επιτευχθεί η υψηλή επίδοση της γεννήτριας. Υποχρεωτικά η αυξημένη επίδοση πρέπει να συνοδεύεται και από την επίτευξη του βέλτιστου βαθμού απόδοσης.

Η διαστασιολόγηση του διακένου και η μηχανική αντοχή του δρομέα εξαρτώνται άμεσα από την ταχύτητα περιστροφής του. Οι γεννήτριες των οποίων οι δρομείς περιστρέφονται με χαμηλές ταχύτητες σχεδιάζονται έτσι ώστε να διαθέτουν αυξημένη διάμετρο. Στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής η τιμή της διαμέτρου του δρομέα περιορίζεται από την οριακή τάση του διακένου. Στην περίπτωση αυτή πρέπει υποχρεωτικά να αυξηθεί η τιμή του μήκους της μηχανής προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ισχύς στην έξοδο της.

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά μεγέθη που πρέπει να διέπουν τη λειτουργία μιας μηχανής καθορίζονται οι βασικές διαστάσεις της. Ένα κρίσιμο μέγεθος που εξετάζεται είναι ο λόγος του αξονικού μήκους του πυρήνα του στάτη προς το πολικό βήμα (τ_p ή Y) και χρησιμοποιείται για τη διαστασιολόγηση ηλεκτρικών μηχανών μικρής και μέσης ισχύος. Αρχικά επιλέγεται η μορφή των έκτυπων πόλων που θα τοποθετηθούν στη περιφέρεια του δρομέα και έπειτα επιλέγεται ο λόγος L/τ_p . Ο λόγος αυτός στην περίπτωση που επιλεγεί η γεννήτρια να κατασκευαστεί με τραπεζοειδείς έκτυπους πόλους λαμβάνει τιμές σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση [Ε63]:

$$\frac{\text{Μικτό αξονικό μήκος του πυρήνα του στάτη}}{\text{Πολικό Βήμα}} = \frac{L}{\tau_p} = \frac{L}{\frac{\pi \cdot D}{P}} = 0,8 \text{ έως } 3 \quad (4.10)$$

Για ηλεκτρικές μηχανές μικρής και μέσης ισχύος ισχύουν οι παρακάτω τιμές του λόγου $\frac{L}{\tau_p}$ [Ε64] :

$$\frac{L}{\tau_p} = 1,5 \text{ έως } 2 \quad \text{Προκύπτει σχεδίαση με ελάχιστο κόστος κατασκευής}$$

$$\frac{L}{\tau_p} = 1 \text{ έως } 1,5 \quad \text{Προκύπτει σχεδίαση με καλό συντελεστή ισχύος}$$

$$\frac{L}{\tau_p} = 1,5 \quad \text{Προκύπτει σχεδίαση με καλό βαθμό απόδοσης}$$

$$\frac{L}{\tau_p} = 1 \quad \text{Προκύπτει ισορροπημένη σχεδίαση}$$

θ) Μήκος του διακένου l_g

Το μήκος του διακένου σε συνδυασμό με τις άλλες δύο βασικές διαστάσεις της γεννήτριας προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της. Αυτό πρέπει να έχει το ελάχιστο δυνατό μήκος η επίτευξη του οποίου θα καταστεί δυνατή από την ακρίβεια της μηχανολογικής κατασκευής και ειδικότερα από τα έδρανα και τους σφαιροτριβείς (ρουλεμάν) που θα χρησιμοποιηθούν.

4.3 Αναλυτική σχεδίαση σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων

Σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 4.1 η σύγχρονη γεννήτρια που πρέπει να σχεδιαστεί διαθέτει τις ακόλουθες προδιαγραφές. Σημειώνεται ότι τα μεγέθη που αντιστοιχούν σε αυτές είναι τα ονομαστικά.

- Αριθμός φάσεων $m = 3$
- Πολική τάση 690 V
- Σύνδεση τυλιγμάτων στάτη κατά αστέρα Y
- Συχνότητα παραγόμενης τάσεως 50 Hz
- Σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής δρομέα $n_s = 600 \text{ R. P. M.}$
- Φαινομένη ισχύ εξόδου $S = 1482,5 \text{ kVA}$
- Συντελεστή ισχύος 0,85 επαγωγικό

4.3.1 Υπολογισμός βασικών γεωμετρικών διαστάσεων

Προκειμένου να επιτευχθεί η σχεδίαση του εναλλακτήρα πραγματοποιείται ο καθορισμός των βασικών παραμέτρων σχεδίασης που παρατίθενται στη συνέχεια :

- Η περιέλιξη του στάτη θα υλοποιηθεί σε 2 στρώσεις
- Για το λόγο αυτό ο συντελεστής τυλίγματος λαμβάνεται ίσος με $K_W = 0,955$
- Η ειδική μαγνητική φόρτιση στο διάκενο λαμβάνεται ίση με $B_{ave} = 0.5 \text{ Wb/m}^2$
- Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση λαμβάνεται ίση με $ac = 31000 \text{ AE/m}$
(Αμπερελίγματα ανά μέτρο της περιφέρειας του διακένου)
- Πλάτος διακένων αερισμού $w_{ducts} = b_{stator\ ventilation\ ducts} = 0,01 \text{ m}$ έκαστο
- Αριθμός διακένων αερισμού $n_{ducts} = 4$ τεμάχια
- Συντελεστής σιδήρου του πυρήνα $K_{Fe} = 0,9$
- Άνοιγμα αύλακας $Slots\ opening = b_{stator\ slot\ opening} b_1 = 7 \text{ mm}$.

Στη συνέχεια θα υπολογισθεί ο συντελεστής εξόδου από τη σχέση (4.6) μετά από την αντικατάσταση των ανωτέρω τιμών.

$$K' = 11 \cdot 0,5 \cdot 31000 \cdot 0,955 \cdot 10^{-3} \Rightarrow K' = 162,83$$

Επιπρόσθετα υπολογίζεται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε στροφές ανά δευτερόλεπτο (Σ.Α.Δ.) ενώ, το γινόμενο των βασικών γεωμετρικών διαστάσεων θα υπολογισθεί από την επίλυση της σχέσης (4.5) λαμβάνοντας υπόψη τη φαινομένη ισχύ εξόδου.

$$n_{s \Sigma.A.A.} = \frac{n_{s \Sigma.A.A.}}{60} = \frac{600}{60} \Rightarrow n_{s \Sigma.A.A.} = 10 \text{ R. P. s.}$$

$$S = K' \cdot D^2 \cdot L \cdot n \Rightarrow \left. \begin{array}{l} D^2 \cdot L = \frac{S}{K' \cdot n_{s \Sigma.A.A.}} \\ S = 1482,5 \text{ kVA} \\ K' = 162,83 \\ n_{s \Sigma.A.A.} = 10 \text{ R. P. s.} \end{array} \right\} \Rightarrow D^2 \cdot L = 0,91046 \text{ m}^3 \quad (4.11)$$

Προκειμένου να επιτευχθεί ο υπολογισμός του μικτού αξονικού μήκους του πυρήνα του στάτη και της εσωτερικής του διαμέτρου του αρχικά, υπολογίζεται ο αριθμός των πόλων του εναλλακτήρα. Αυτός θα πραγματοποιηθεί από την κατάλληλη επίλυση της σχέσης (4.12), μέσω της οποίας υπολογίζεται η συχνότητα της παραγόμενης τάσεως της γεννήτριας.

$$f = \frac{P \cdot n_s}{120} \quad (4.12)$$

όπου : P είναι ο αριθμός των πόλων της σύγχρονης γεννήτριας

n_s είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της η οποία, μετριέται σε Σ.Α.Λ.

$$\left. \begin{array}{l} P = \frac{f \cdot 120}{n_s} \\ f = 50 \text{ Hz} \\ n_s = 600 \text{ Σ. Α. Λ.} \end{array} \right\} \Rightarrow P = 10$$

Συνεπώς, η γεννήτρια θα διαθέτει δέκα έκτυπους πόλους ενώ, επιλέγεται η μορφή τους να είναι τραπεζοειδής. Έπειτα επιλέγεται η τιμή του λόγου του μικτού αξονικού μήκους του πυρήνα του στάτη προς το πολικό βήμα σύμφωνα με τη σχέση (4.10). Συγκεκριμένα ο λόγος L/τ_p λαμβάνεται ίσος με 1,5. Αυτή η τιμή βρίσκεται εντός των ορίων επίτευξης από τη σχεδίαση καλού βαθμού απόδοσης, καλού συντελεστή ισχύος και σχετικά μικρού κόστους κατασκευής. Επομένως η σχέση (4.10) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$\left. \begin{array}{l} L = 1,5 \cdot \frac{\pi \cdot D}{P} \\ P = 10 \end{array} \right\} \Rightarrow L \simeq 0,47124 \cdot D \quad (4.13)$$

Από το συνδυασμό της σχέσης (4.11) με τη σχέση (4.13) προκύπτει η τιμή της εσωτερικής διαμέτρου του στάτη.

$$(4.11) \xrightarrow{(4.13)} D_{internal\ stator} \simeq \sqrt[3]{1,93205} \Rightarrow D_{internal\ stator} = 1,245\ m$$

Το μικτό μήκος του πυρήνα του στάτη θα υπολογιστεί από τη σχέση (4.13) μετά την αντικατάσταση σε αυτή της τιμής της εσωτερικής διαμέτρου του στάτη. Κρίνεται σκόπιμο εδώ να αναφερθεί ότι το μικτό μήκος του πυρήνα του στάτη περιλαμβάνει το καθαρό μήκος του πυρήνα και το συνολικό μήκος των διακένων αερισμού.

$$L = 0,587\ m$$

Το καθαρό μήκος του πυρήνα του στάτη υπολογίζεται από τη σχέση (4.14). Αυτό λαμβάνεται υπόψη προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομείωση και η επιβεβαίωση της μηχανής με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis Validation). Το μικτό μήκος του πυρήνα του στάτη λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό των αντιστάσεων του στάτη και του δρομέα ενώ, από αυτές υπολογίζονται οι απώλειες χαλκού στο στάτη και στο δρομέα αντίστοιχα.

$$L_{net} = L - (n_{ducts} \cdot b_{stator\ ventilation\ ducts}) \quad (4.14)$$

όπου : L το μικτό μήκος του πυρήνα του στάτη σε m

n_{ducts} ο αριθμός των διακένων αερισμού

$b_{stator\ ventilation\ ducts}$ το πλάτος των διακένων αερισμού σε m

Για να επιτευχθεί η καλύτερη απαγωγή της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας στα τυλίγματα και στον πυρήνα της μηχανής έχει επιλεχθεί η κατασκευή της να περιλαμβάνει την τοποθέτηση τεσσάρων διακένων αερισμού πλάτους ενός εκατοστού του μέτρου (0,01 m) έκαστο. Επομένως το καθαρό μήκος του πυρήνα του εναλλακτήρα προκύπτει ίσο με

$$L_{net} = 0,547\ m$$

ενώ, το μήκος των ελασμάτων του πυρήνα υπολογίζεται από τη σχέση (4.15) και προκύπτει ίσο με $L_i = 0,492\ m$.

$$L_i = K_{Fe} \cdot L_{net} \quad (4.15)$$

Για να πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός του μήκους του διακένου της μηχανής αρχικά πρέπει να υπολογιστεί το πολικό βήμα. Ο προσδιορισμός του πολικού βήματος Y ή τ_p πραγματοποιείται σύμφωνα με τη σχέση (4.16) [Ξ 63], η παράμετρος αυτή μετριέται σε μέτρα και προκύπτει ίση με $Y = \tau_p = 0,3911\ m$.

$$Y = \tau_p = \frac{\pi \cdot D_{internal\ stator}}{P} \quad (4.16)$$

όπου : P ο αριθμός των πόλων της σύγχρονης γεννήτριας

Εν συνεχεία το μήκος του διακένου υπολογίζεται από τη σχέση (4.17). Ο συντελεστής που περιέχει λαμβάνεται ίσος με $L_{gap\ \tau_p\ ratio} = 0,0141$. Για αυτή την τιμή της παραμέτρου το μήκος του διακένου προκύπτει ίσο με $L_{gap} = 0,0055\ m$.

$$L_{gap} = (0,013 \div 0,018) \cdot \tau_p \quad (4.17)$$

Για να υπολογισθεί η ταχύτητα της περιφέρειας του δρομέα θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (4.18). Σε αυτή η εξωτερική διάμετρος του δρομέα λαμβάνεται ίση με την εσωτερική διάμετρο του στάτη κατά προσέγγιση ($D_r \simeq D_{internal\ stator}$). Η προσέγγιση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί διότι το μήκος του διακένου συγκρινόμενο με την εσωτερική διάμετρο του στάτη είναι πολύ μικρό. Μετά από αντικατάσταση των τιμών των παραμέτρων προκύπτει ότι η τιμή της ταχύτητας της περιφέρειας του δρομέα ισούται με $u = 39,11\ m/sec$.

$$u = \pi \cdot D_r \cdot n_{s\ \Sigma.A.\Delta.} \quad (4.18)$$

4.3.2 Υπολογισμός ηλεκτρικών μεγεθών περιέλιξης στάτη

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της σχεδίασης, τα τυλίγματα του στάτη πρόκειται να συνδεσμοποιηθούν κατά αστέρα. Επομένως, η Η.Ε.Δ. ανά φάση θα υπολογιστεί από τη σχέση (4.19). Επειδή η πολική τάση της γεννήτριας (Η.Ε.Δ.) έχει προδιαγραφεί ίση με $690\ V$ προκύπτει ότι η φασική τάση της ισούται με $E_{ph} = 398,37\ V$.

$$E_{ph} = \frac{V_{line\ to\ line}}{\sqrt{3}} \quad (4.19)$$

Ο υπολογισμός των ελιγμάτων που απαιτούνται ανά φάση για το τύλιγμα του στάτη θα πραγματοποιηθεί μέσω της σχέσης (4.3) η οποία επιλύεται ως προς τον αριθμό των ελιγμάτων και λαμβάνει τη μορφή της σχέσης (4.20). Έπειτα θα υπολογισθεί η τιμή της μαγνητικής ροής ανά πόλο. Αυτή προκύπτει από την επίλυση της σχέσης (4.1) και λαμβάνει τη μορφή της σχέσης (4.21). Μετά από αντικατάσταση των τιμών των παρα-

$$N_{ph} = \frac{E_{ph}}{4,44 \cdot f \cdot K_W \cdot \Phi_{per\ pole}} \quad (4.20)$$

$$\Phi_{per\ pole} = B_{Ave} \cdot A = B_{Ave} \cdot \frac{\pi \cdot D_{internal\ stator} \cdot L}{P} \quad (4.21)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Phi_{per\ pole} = B_{Ave} \cdot \frac{\pi \cdot D_{internal\ stator} \cdot L}{P} \\ B_{Ave} = 0,5\ Wb/m^2 \\ D_{internal\ stator} = 1,245\ m \\ L = 0,587\ m \\ P = 10 \end{array} \right\} \Rightarrow \Phi_{per\ pole} = 0,115\ Wb$$

μέτρων προκύπτει ότι η τιμή της μαγνητικής ροής ανά πόλο ισούται με $\Phi_{per\ pole} = 0,115\ Wb$ ενώ, μετά την αναγκαία στρογγυλοποίηση ο αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση υπολογίζεται ίσος με $N_{ph} = 16$. Στη συνέχεια για τη τιμή των ελιγμάτων ανά φάση που έχει προκύψει υπολογίζεται η αναθεωρημένη τιμή της μαγνητικής ροής ανά πόλο σύμφωνα με τη σχέση (4.20) η οποία προκύπτει ίση με $\Phi_{per\ pole\ revised} = 0,117\ Wb$. Ακόμη, κάθε έλιγμα αποτελείται από δύο αγωγούς. Επομένως ο αριθμός των αγωγών ανά φάση προκύπτει ίσος με $N_{conductors\ per\ phase} = 32$.

Ο αριθμός των αυλάκων του στάτη συμβολίζεται με S ή Q και υπολογίζεται από τη σχέση (4.22). Ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση λαμβάνεται ίσος με $q = 4$ οπότε ο αριθμός των αυλάκων του στάτη υπολογίζεται ίσος με $Q = 120$.

$$Q = m \cdot q \cdot P \quad (4.22)$$

όπου : m ο αριθμός των φάσεων του τυλίγματος του στάτη
 q ή g' ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση
 P ο αριθμός των πόλων της σύγχρονης γεννήτριας

Ο αριθμός των αυλάκων του στάτη που έχει υπολογιστεί πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες συνθήκες [Ξ 63]:

- α) Οι αμπεραγωγοί ανά αύλακα δεν πρέπει να υπερβαίνουν τους 1500
- β) Το βήμα της αύλακας το οποίο συμβολίζεται με γ ή τ_s και εξαρτάται από τον αριθμό των αυλάκων πρέπει να λαμβάνει ανάλογα με την περίπτωση τις παρακάτω τιμές:
 1. Για μηχανές χαμηλής τάσης $\tau_s \leq 3,5\ cm$
 2. Για μηχανές με τάση εξόδου έως και 6 kV $\tau_s \leq 5,5\ cm$
 3. Για μηχανές με τάση εξόδου έως και 15 kV $\tau_s \leq 7,5\ cm$

Για να ελεγχθεί η ικανοποίηση της πρώτης συνθήκης αρχικά θα υπολογιστεί το ονομαστικό ρεύμα γραμμής του εναλλακτήρα. Από την επίλυση της σχέσης (4.23) αυτό προκύπτει ίσο με $I_{line} = 1240,47\ A$. Έπειτα από τη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων της περιέλιξης του στάτη θα καθοριστεί το ονομαστικό ρεύμα φάσης ενώ, από τον αριθμό των παράλληλων κλάδων του τυλίγματος θα προσδιοριστεί το ρεύμα έκαστου κλάδου και μέσω αυτού το ρεύμα που διαρρέει έκαστη αύλακα. Τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται κατά αστέρα. Η τιμή του ρεύματος φάσης υπολογίζεται από την σχέση (4.24) και προκύπτει ίση με $I_{phase} = 1240,47\ A$.

$$S = \sqrt{3} \cdot I_{line} \cdot V_{line\ to\ line} \quad (4.23)$$

$$\left. \begin{array}{l} I_{line} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{line\ to\ line}} \\ S = 1482,5 \cdot 10^3\ VA \\ V_{line\ to\ line} = 690\ Volts \end{array} \right\} \Rightarrow I_{line} = 1240,47\ A$$

$$I_{line} = I_{phase} \quad (4.24)$$

Για να υπολογισθεί ο αριθμός των αγωγών ανά αύλακα πρέπει να επιλεγεί ο αριθμός των πηνίων από τα οποία αποτελείται έκαστη φάση και να επιλεγεί η συνδεσμολογία

τους. Επειδή έχει επιλεχθεί η κατασκευή του τυλίγματος του στάτη να πραγματοποιηθεί σε δύο στρώσεις ενώ, ο αριθμός των πόλων της μηχανής έχει υπολογισθεί και προέκυψε ίσος με $P = 10$ η κατασκευή του τυλίγματος θα πραγματοποιηθεί με χρήση δέκα πηνίων σε κάθε φάση $N_{stator\ coils\ per\ phase} = P = 10$. Προκειμένου να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση των απωλειών χαλκού του στάτη και, να καταστεί δυνατή η βέλτιστη διαμόρφωση της περιέλιξης κατά την τοποθέτηση της στις αύλακες επιλέγεται η μικτή συνδεσμολογία των πηνίων έκαστης φάσης [E15].

Η συνδεσμολογία αυτή θα υλοποιηθεί διατάσσοντας τα δέκα πηνία κάθε φάσης σε πέντε παράλληλους κλάδους $N_{stator\ parallel\ branches} = 5$. Κάθε κλάδος θα αποτελείται από δύο πηνία $N_{stator\ coils\ per\ parallel\ branch} = 2$ τα οποία θα συνδέονται μεταξύ σε σειρά. Ο συνολικός αριθμός των πηνίων παραμένει ο ίδιος αλλά η φασική τάση παράγεται στα άκρα κάθε κλάδου. Επομένως ο συνολικός αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση πρέπει να ισούται με το συνολικό αριθμό των ελιγμάτων των δύο πηνίων ανά κλάδο τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά. Τα ελιγματα ανά πηνίο του στάτη προέκυψαν ίσα με $N_{per\ stator\ coil} = 8$ ενώ, έχουν υπολογισθεί σύμφωνα με τη σχέση (4.25).

$$N_{per\ stator\ coil} = \frac{N_{ph}}{N_{stator\ coils\ per\ parallel\ branch}} \quad (4.25)$$

Ο αριθμός των αγωγών ανά φάση είναι διπλάσιος από τον αριθμό των ελιγμάτων. Δηλαδή έκαστο έλιγμα αποτελείται από δύο αγωγούς. Οπότε από τη σχέση (4.26) προκύπτει ο αριθμός των αγωγών ανά πηνίο ίσος με $N_{per\ stator\ coil\ conductors} = 16$.

$$N_{per\ stator\ coil\ conductors} = 2 \cdot N_{per\ stator\ coil} \quad (4.26)$$

Το τύλιγμα τοποθετείται σε δύο στρώσεις και ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση λαμβάνεται ίσος με $q = 4$. Συνεπώς από το πηνίο καταλαμβάνεται το ήμισυ από οκτώ αύλακες το οποίο είναι ισοδύναμο με 4 πλήρεις αύλακες. Ο αριθμός των αγωγών ανά αύλακα υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.27) και προκύπτει ίσος με $N_{conductors\ per\ stator\ slot} = 4$.

$$N_{conductors\ per\ stator\ slot} = \frac{N_{per\ stator\ coil\ conductors}}{q} \quad (4.27)$$

Επειδή η συνδεσμολογία του τυλίγματος του στάτη ανά φάση έχει επιλεχθεί να αποτελείται από 5 παράλληλους κλάδους γίνεται αντιληπτό ότι, το ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα έκαστης φάσης θα κατανεμηθεί σε κάθε κλάδο της. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα που διαρρέει κάθε κλάδο να ισούται με το ρεύμα που διαρρέει κάθε ένα από τους αγωγούς που τοποθετούνται στις αύλακες [E15]. Στην υπό μελέτη σχεδίαση η τιμή του ρεύματος έκαστου αγωγού ίση προκύπτει ίση με $I_{stator\ conductor} = 248,1\ A$ σύμφωνα με τη σχέση (4.28). Οι αμπεραγωγοί ανά αύλακα υπολογίζονται από τη σχέση (4.29) και η τιμή τους προέκυψε ίση με $N_{Ampere\ Conductors\ per\ Slot\ Parallel} = 992,4 \leq 1500$. Συνεπώς ικανοποιείται η πρώτη συνθήκη.

$$I_{stator\ conductor} = I_{stator\ winding\ per\ branch} = \frac{I_{phase}}{N_{stator\ parallel\ branches}} \quad (4.28)$$

$$N_{\text{Ampere Conductors per Slot Parallel}} = I_{\text{stator conductor}} \cdot N_{\text{conductors per stator slot}} \quad (4.29)$$

Στο επόμενο βήμα θα υπολογισθεί το μέγεθος των αγωγών που θα χρησιμοποιηθεί για να κατασκευαστεί η περίελιξη του στάτη. Η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος λαμβάνεται ίση με $j_{\text{stator winding}} = 4,6 \text{ A/mm}^2$ έτσι ώστε η ψύξη της γεννήτριας να μπορεί να επιτευχθεί μέσω μιας διάταξης εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα απλής κατάσκευής ενώ, από αυτή θα προσδιοριστεί η διατομή των αγωγών σύμφωνα με τη σχέση (4.30). Μετά την επίλυση της και την αντικατάσταση των μεγεθών το εμβαδόν διατομής του αγωγού προκύπτει ίσο με $S_{\text{conductor stator winding parallel}} = 53,93 \text{ mm}^2$.

$$j_{\text{stator winding}} = \frac{I_{\text{stator conductor}}}{S_{\text{conductor stator winding parallel}}} \quad (4.30)$$

όπου : $I_{\text{stator conductor}}$ η ένταση του ρεύματος αγωγού η οποία μετρείται σε Ampere
 $S_{\text{conductor stator winding parallel}}$ το εμβαδόν διατομής του αγωγού σε mm^2

$$\left. \begin{array}{l} S_{\text{conductor stator winding parallel}} = \frac{I_{\text{stator conductor}}}{j_{\text{stator winding}}} \\ I_{\text{stator conductor}} = 248,1 \text{ A} \\ j_{\text{stator winding}} = 4,6 \text{ A/mm}^2 \end{array} \right\} \Rightarrow S_{\text{conductor stator winding parallel}} = 53,93 \text{ mm}^2$$

Για να επιτευχθεί η υπολογισθείσα διατομή των αγωγών επιλέγεται η χρήση αγωγών κυκλικής διατομής οι οποίοι απαρτίζονται από κλώνους, (συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα) διατίθενται σε τυποποιημένη διάμετρο και κατασκευάζονται από χαλκό. Η τυποποιημένη καθαρή διάμετρος των αγωγών-κλώνων που επιλέγονται ισούται με $d_{\text{stators net per conductor strand}} = 1,60 \text{ mm}$ ενώ, κατασκευάζονται έτσι ώστε το εξωτερικό τμήμα της περιφέρειας τους να καλύπτεται από μόνωση σμάλτου διπλής επένδυσης. Έπειτα υπολογίζονται διαδοχικά το καθαρό εμβαδόν διατομής έκαστου κλώνου σύμφωνα με τη σχέση (4.31) και ο αριθμός των κλώνων (strands) που απαιτούνται για να επιτευχθεί η διατομή του αγωγού σύμφωνα με τη σχέση (4.31.α). Η διατομή έκαστου κλώνου προκύπτει ίση με $S_{\text{net per stators conductor strand}} = 2,01 \text{ mm}^2$ ενώ, απαιτούνται $N_{\text{stator parallel conductor strands}} = 27$ παράλληλοι αγωγοί-κλώνοι για να επιτευχθεί.

$$S_{\text{net per stators conductor strand}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{stators net per conductor strand}}^2}{4} \quad (4.31)$$

$$N_{\text{stator parallel conductor strands}} = \frac{S_{\text{conductor stator winding parallel}}}{S_{\text{net per stators conductor strand}}} \quad (4.31. \alpha)$$

4.3.3 Υπολογισμός γεωμετρικών διαστάσεων στάτη

Για να ολοκληρωθεί η προκαταρκτική σχεδίαση του εναλλακτήρα επιπρόσθετα πρέπει να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των υπόλοιπων γεωμετρικών διαστάσεων του στάτη.

➤ **Εύρεση βήματος αύλακας – έλεγχος ισχύος δεύτερης συνθήκης**

Αρχικά, μέσω της σχέσης (4.32) θα υπολογισθεί το βήμα της αύλακας γ ή τ_s για να ελεγχθεί η δεύτερη συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται από τον αριθμό των αυλάκων του στάτη Q . Μετά από την αντικατάσταση των τιμών των μεγεθών προκύπτει η τιμή του βήματος της αύλακας ίση με $\tau_s = 3,26 \text{ cm} \leq 3,5 \text{ cm}$. Παρατηρείται ότι αυτή βρίσκεται εντός των ορίων για μηχανές χαμηλής τάσης. Επομένως, ικανοποιείται και η δεύτερη συνθήκη.

$$\tau_s = \frac{\pi \cdot D_{\text{internal stator}}}{Q} \quad (4.32)$$

➤ **Υπολογισμός του πλάτους της αύλακας του στάτη**

Για να επιτευχθεί ο προσδιορισμός του πλάτους της αύλακας πρέπει πρώτα να υπολογισθεί το πλάτος της οδόντωσης. Αρχικά υπολογίζεται η τιμή του πολικού τόξου από τη σχέση (4.33). Για να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός αυτής της παραμέτρου πρέπει να επιλεχθεί η τιμή του λόγου K_f (πολικό τόξο / πολικό βήμα). Το εύρος τιμών που λαμβάνει αυτή η παράμετρος για έκτυπους πόλους μορφής τραπεζίου κυμαίνεται από 0,65 έως και 0,75. Στην παρούσα σχεδίαση επιλέγεται η τιμή του λόγου $K_f = 0,70$. Μετά την επίλυση της σχέσης (4.33) αυτή λαμβάνει τη μορφή της σχέσης (4.34) από την οποία προκύπτει ότι η τιμή του πολικού τόξου ισούται με 0,2738 m.

$$K_f = \frac{\text{Pole Arc}}{\tau_p} \quad (4.33)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Pole Arc} = K_f \cdot \tau_p \\ K_f = 0,70 \\ \tau_p = 0,3911 \text{ m} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Pole Arc} = 0,2738 \text{ m} \quad (4.34)$$

Έπειτα θα πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός του αριθμού των οδοντώσεων ανά πολικό τόξο από τη σχέση (4.35). Αυτός προκύπτει περίπου ίσος με 8,4 ενώ, μετά από την αναγκαία στρογγυλοποίηση λαμβάνει τιμή ίση με 8.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Teeth per Pole Arc} = \frac{\text{Pole Arc}}{\tau_s} \\ \text{Pole Arc} = 0,2738 \text{ m} \\ \tau_s = 0,0326 \text{ m} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Teeth per Pole Arc} \approx 8,4 \quad (4.35)$$

➤ **Προσδιορισμός του πλάτους της οδόντωσης**

Η τιμή του πλάτους της οδόντωσης θα υπολογισθεί από τη σχέση (4.37) η οποία προκύπτει από την επίλυση της σχέσης (4.36) μέσω της οποίας υπολογίζεται η τιμή της μαγνητικής επαγωγής στις οδοντώσεις του στάτη $B_{\text{stator tooth}} \text{ (Wb/m}^2\text{)}$. Στη σχέση (4.36) χρησιμοποιείται η αναθεωρημένη τιμή της μαγνητικής ροής ανά πόλο $\Phi_{\text{revised}} = 0,117 \text{ Wb}$ ενώ, η τιμή της μαγνητικής επαγωγής στην οδόντωση λαμβάνεται ίση με $B_{\text{stator tooth}} = 1,5 \text{ Wb/m}^2$. Μετά από την αναγκαία στρογγυλοποίηση προκύπτει η τιμή του πλάτους της οδόντωσης $b_{\text{stator tooth main body}} = 0,0198 \text{ m}$

$$B_{stator\ tooth} = \frac{\Phi_{per\ pole\ revised}}{b_{stator\ tooth\ main\ body} \cdot L_i \cdot Teeth\ per\ Pole\ Arc} \quad (4.36)$$

όπου : $b_{stator\ tooth\ main\ body}$ το πλάτος της οδόντωσης σε m

L_i το μήκος των ελασμάτων του πυρήνα m

$\Phi_{per\ pole\ revised}$ η αναθεωρημένη μαγνητική ροή ανά πόλο σε Wb

$$\left. \begin{aligned} b_{stator\ tooth\ main\ body} &= \frac{\Phi_{per\ pole\ revised}}{B_{stator\ tooth} \cdot L_i \cdot Teeth\ per\ Pole\ Arc} \quad (4.37) \\ \Phi_{per\ pole\ revised} &= 0,117\ Wb \\ B_{stator\ tooth} &= 1,5\ Wb/m^2 \\ L_i &= 0,492\ m \\ Teeth\ per\ Pole\ Arc &= 8 \end{aligned} \right\} \Rightarrow b_{stator\ tooth\ main\ body} \approx 0,0198\ m$$

Στη συνέχεια ο στάτης, επιλέγεται να κατασκευαστεί με οδοντώσεις σταθερού πλάτους σε όλο το μήκος τους. Η επιλογή αυτή έχει ως αποτέλεσμα η μορφή των αυλάκων που θα προκύψει να είναι τραπεζοειδής. Το μέγιστο επιτρεπόμενο πλάτος της αύλακας στην πλευρά της εσωτερικής διαμέτρου του στάτη υπολογίζεται από τη σχέση (4.38) και προκύπτει ίσο με $b_{slot\ max\ permittable\ widthwise\ D_{internal\ stator}} = 0,0128\ m$.

$$b_{slot\ max\ permittable\ widthwise\ D_{internal\ stator}} = \tau_s - b_{stator\ tooth\ main\ body} \quad (4.38)$$

Για να υπολογισθεί το εμβαδόν της αύλακας πρέπει να προσδιοριστεί το ύψος της. Ο υπολογισμός του ύψους της αύλακας προϋποθέτει να υπολογισθεί το ελάχιστο εμβαδόν της έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η τοποθέτηση του τυλίγματος και των μονώσεων του μέσα σε αυτή. Αρχικά υπολογίζεται το εμβαδόν διατομής έκαστου αγωγού με τη μόνωση που φέρει εξωτερικά στην περιφέρεια του σύμφωνα με τη σχέση (4.31). Επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί στον αγωγό-κλώνο μόνωση σμάλτου διπλής στρώσης. Το πάχος της μόνωσης λαμβάνεται ίσο με $d_{insulation\ thickness\ per\ stator\ conductor\ strand} = 0,07\ mm$. Επομένως η εξωτερική διάμετρος έκαστου αγωγού-κλώνου με τη μόνωση του προκύπτει ίση με $d_{external\ per\ insulated\ stator\ conductor\ strand} = 1,67\ mm$ ενώ, το εμβαδόν διατομής του ισούται με $S_{per\ insulated\ stator\ conductor\ strand} = 2,19\ mm^2$. Για να επιτευχθεί η αναγκαία διατομή απαιτούνται 27 αγωγοί-κλώνοι παράλληλα συνδεδεμένοι επομένως, η μικτή διατομή υπολογίζεται ίση με $S_{per\ insulated\ stator\ conductor} = 59,13\ mm^2$. Επειδή το τυλίγμα θα υλοποιηθεί σε δύο στρώσεις, ο απαιτούμενος αριθμός αγωγών έχει υπολογιστεί και κάθε στρώση αποτελείται από $N_{conductors\ per\ layer\ per\ stator\ slot} = N_{conductors\ per\ stator\ slot}/2 = 2$. Συνεπώς, το εμβαδόν των μονωμένων αγωγών που τοποθετούνται σε κάθε στρώση της αύλακας υπολογίζεται από την εξίσωση (4.39) και προκύπτει ίσο με $S_{insulated\ conductors\ per\ stator\ slots\ layer} = 118,26\ mm^2$. Η τιμή του εμβαδού των αγωγών που έχει υπολογισθεί για κάθε στρώση προσαυξάνεται κατά 10 % προκειμένου να υπάρχει διαθέσιμος χώρος στην αύλακα για την τοποθέτηση των μονώσεων της. Το ελάχιστο διαθέσιμο εμβαδόν της αύλακας ($A_{stator\ slot\ min}$) υπολογίζεται από τη σχέση (4.40) και ο συντελεστής πλήρωσης της λαμβάνεται ίσος με $K_{fill\ slot} =$

0,60. Πραγματοποιούνται οι αναγκαίοι υπολογισμοί και προκύπτει ότι το ελάχιστο διαθέσιμο εμβαδόν της αύλακας ισούται με $A_{stator\ slot\ min} = 433,62\ mm^2$.

$$S_{insulated\ conductors\ per\ stator\ slots\ layer} = N_{conductors\ per\ layer\ per\ stator\ slot} \cdot S_{insulated\ conductors\ per\ stator\ slots\ layer} \quad (4.39)$$

$$K_{fill\ slot} = \frac{2 \cdot \left(1,10 \cdot S_{insulated\ conductors\ per\ stator\ slots\ layer} \right)}{A_{stator\ slot\ min}} \quad (4.40)$$

➤ Προσδιορισμός του βάθους της αύλακας του στάτη

Το βάθος της αύλακας του στάτη καθορίζεται από τρεις παραμέτρους: το πάχος των μονώσεων που τοποθετούνται μέσα στην αύλακα, το βάθος της αύλακας που καταλαμβάνεται από τους αγωγούς ($h_{stator\ slot\ Cu}$) και τις ανοχές της αύλακας.

Διακρίνονται τρία σημεία της αύλακας στα οποία τοποθετούνται οι μονώσεις της. Η βάση, η κορυφή και κατά προσέγγιση η μέση της η οποία είναι το σημείο στο οποίο τοποθετείται ο διαχωριστήρας ανάμεσα στις δύο στρώσεις του τυλίγματος. Συγκεκριμένα στη βάση της αύλακας επιλέγεται να τοποθετηθεί μόνωση τέτοια ώστε αυτή να διαθέτει την αναγκαία θερμική και μηχανική αντοχή. Το πάχος αυτής λαμβάνεται ίσο με $h_{stator\ slot\ bottom\ insulation} = 0,5\ mm$. Προκειμένου να βελτιωθεί η μηχανική αντοχή της επιλέγεται να απαρτίζεται από δύο τμήματα μονωτικών κάθε ένα από τα οποία θα διαθέτει τυποποιημένο πάχος $0,25\ mm$. Στην κορυφή και στη μέση της αύλακας (διαχωριστήρας) το πάχος των μονώσεων που προτείνεται ισούται με $0,35\ mm$. Επομένως, το πάχος των μονώσεων στα σημεία αυτά προκύπτει ίσο με $h_{stator\ slot\ middle\ insulation} = h' = 0,35\ mm$ και $h_{stator\ slot\ top\ insulation} = 0,35\ mm$ αντίστοιχα. Οι ανοχές ως προς το ύψος της αύλακας λαμβάνονται ίσες με $h_{stator\ slot\ tolerance} = 2,8\ mm$ και το ύψος της σφήνας επιλέγεται ίσο με $h_{stator\ wedge} = 5\ mm$.

Το βάθος της αύλακας που καταλαμβάνεται από τους αγωγούς υπολογίζεται από τη σχέση (4.44). Αρχικά απαιτείται να υπολογιστεί ο αριθμός των μεμονωμένων αγωγών της αύλακας ο οποίος θα πραγματοποιηθεί από τη σχέση (4.41). Σε αυτή ο αριθμός των αγωγών της αύλακας έχει ήδη προσδιοριστεί όμως, για να επιτευχθεί η αναγκαία διατομή ανά αγωγό σύμφωνα με την πυκνότητα του ρεύματος που έχει υιοθετηθεί ο κάθε ένας από αυτούς πρέπει να αποτελείται από αριθμό παράλληλα συνδεδεμένων αγωγών – κλώνων (strands) ίσο με $N_{stator\ Parallel\ Conductor\ Strands} = 27$. Συνεπώς, ο αριθμός των μεμονωμένων αγωγών που πρέπει να τοποθετηθεί μέσα στην αύλακα προκύπτει ίσος με $N_{individual\ conductors\ per\ slot} = 108$.

$$N_{individual\ conductors\ per\ slot} = N_{conductors\ per\ stator\ slot} \cdot N_{stator\ Parallel\ Conductor\ Strands} \quad (4.41)$$

Ο αριθμός των στρώσεων των αγωγών στην αύλακα και για τις δύο στρώσεις του τυλίγματος υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.43) ενώ, ο αριθμός των μεμονωμένων αγωγών ανά στρώση κατά το πλάτος της αύλακας υπολογίζεται από τη σχέση (4.42). Για να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός λαμβάνονται υπόψιν οι μονώσεις που τοποθετούνται εντός της αύλακας και συγκεκριμένα κατά το πλάτος αυτής. Στη βάση της αύ-

➤ **Εύρεση πλάτους της μεγάλης βάσης της αύλακας**

Στη συνέχεια θα υπολογισθεί το πλάτος b_2 στη βάση της αύλακας (μεγάλη βάση). Αρχικά, υπολογίζεται η διάμετρος του στάτη στο σημείο αυτό σύμφωνα με τη σχέση (4.47) και προκύπτει ίση με $D_{stator\ in\ slot\ base\ b_2} = 1359\ mm$.

$$D_{stator\ in\ slot\ base\ b_2} = D_{internal\ stator} + 2 \cdot h_{stator\ tooth} \quad (4.47)$$

Επειτα, υπολογίζεται το βήμα της αύλακας σύμφωνα με τη σχέση (4.48) λαμβάνοντας υπόψιν τον αριθμό των αυλάκων ο οποίος ισούται με $Q = 120$. Αυτό προκύπτει ίσο με $y_{stator\ slot\ base\ b_2} = 35,58\ mm$. Επειδή τόσο το βήμα της αύλακας όσο και το πλάτος της είναι πολύ μικρότερα από τη διάμετρο του στάτη στη βάση της αύλακας (35,58 mm έναντι 1359 mm, σχέση 1:38) αρχικά αυτά λαμβάνονται κατά προσέγγιση ίσα με ευθύγραμμα τμήματα ενώ, στην πράξη είναι μήκη τόξων. Επομένως, το πλάτος της μεγάλης βάσης της αύλακας υπολογίζεται από τη σχέση (4.49) και προκύπτει ίσο με $b_{stator\ slot\ base\ b_2} = 15,78\ mm$.

$$y_{stator\ slot\ base\ b_2} = \frac{\pi \cdot D_{stator\ in\ slot\ base\ b_2}}{Q} \quad (4.48)$$

$$b_{stator\ slot\ base\ b_2} = y_{stator\ slot\ base\ b_2} - b_{stator\ tooth\ main\ body} \quad (4.49)$$

➤ **Εύρεση πλάτους της μικρής βάσης της αύλακας**

Παρακάτω παρατίθεται ο υπολογισμός του πλάτους b_4 στο σημείο της αύλακας που αρχίζει η περιοχή της σφήνας (μικρή βάση). Πρώτα υπολογίζεται η διάμετρος του στάτη στο σημείο αυτό σύμφωνα με τη σχέση (4.50). Αυτή προκύπτει ίση με $D_{stator\ in\ slot\ upper\ base\ b_4} = 1261\ mm$. Το βήμα της αύλακας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.51) και η τιμή του προκύπτει ίση με $y_{stator\ slot\ upper\ base\ b_4} = 33,01\ mm$ ενώ, ο υπολογισμός του πλάτους της μικρής βάσης της αύλακας πραγματοποιείται μέσω της εξίσωσης (4.52) και λαμβάνει την τιμή $b_{stator\ slot\ upper\ base\ b_4} = 13,21\ mm$.

$$D_{stator\ in\ slot\ upper\ base\ b_4} = D_{internal\ stator} + 2 \cdot (h_{stator\ tooth\ lip} + h_{wedge}) \quad (4.50)$$

$$y_{stator\ slot\ upper\ base\ b_4} = \frac{\pi \cdot D_{stator\ in\ slot\ upper\ base\ b_4}}{Q} \quad (4.51)$$

$$b_{stator\ slot\ upper\ base\ b_4} = y_{stator\ slot\ upper\ base\ b_4} - b_{stator\ tooth\ main\ body} \quad (4.52)$$

➤ **Εύρεση υπόλοιπων διαστάσεων οδόντωσης**

Η οδόντωση χωρίζεται σε τρία τμήματα : α) την περιοχή του χείλους της οδόντωσης, β) την περιοχή της σφήνας και γ) τον κορμό της οδόντωσης. Το μέγιστο επιτρεπόμενο πλάτος της αύλακας στην εσωτερική διάμετρο του στάτη έχει υπολογισθεί και προέκυψε ίσο με $b_{slot\ max\ permissible\ widthwise\ D_{internal\ stator}} = 0,0128\ m$. Σε αυτό το σημείο η οδόντωση διαθέτει σχήμα τραπεζίου δηλαδή, είναι πεπλατυσμένη ενώ, η αύλακα στο χείλος διαθέτει άνοιγμα $b_{stator\ slots\ opening\ b_1} = 7\ mm$. Επομένως, για την εσωτερική διάμετρο του στάτη και κατά προσέγγιση για όλο το ύψος του χείλους της οδόντωσης $h_{stator\ tooth\ lip} = 3\ mm$ η τιμή του πλάτους της οδόντωσης είναι μεγαλύτερη από το

πλάτος $b_{stator\ tooth\ main\ body} = 19,8\ mm$ που έχει υπολογιστεί. Το πλάτος αυτό αντιστοιχεί στο πλάτος του κορμού της οδόντωσης. Το πλάτος της οδόντωσης για το τμήμα του χείλους του στάτη προκύπτει ίσο με $b_{stator\ tooth\ in\ lip} = 25,6\ mm$ σύμφωνα με τη σχέση (4.53).

$$b_{stator\ tooth\ in\ lip} = b_{stator\ tooth\ main\ body} + \left(b_{slot\ max\ permissible\ widthwise\ D_{internal\ stator}} - b_{stator\ slot\ opening\ b1} \right) \quad (4.53)$$

Στην περιοχή της σφήνας η οδόντωση διαθέτει επιπρόσθετο πλάτος. Συγκεκριμένα εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας υφίστανται δύο τριγωνικές περιοχές. Οι κάθετες πλευρές των τριγώνων αυτών είναι: α) το ύψος της σφήνας $h_{wedge\ triangle\ height} = 5\ mm$, β) το ήμισυ του επιπρόσθετου πλάτους της οδόντωσης που υφίσταται στην περιοχή του χείλους. Προκειμένου αυτό να υπολογισθεί χρησιμοποιείται η σχέση (4.54) και προκύπτει ίσο με $b_{extra\ stator\ teeth\ in\ wedge} = 2,9\ mm$.

$$b_{extra\ stator\ teeth\ in\ wedge} = \left(b_{slot\ max\ permissible\ widthwise\ D_{internal\ stator}} - b_{stator\ slot\ opening\ b1} \right) / 2 \quad (4.54)$$

Το τμήμα του κορμού της οδόντωσης διαθέτει πλάτος ίσο με $b_t = 19,8\ mm$ το οποίο έχει ήδη υπολογισθεί ενώ, το ύψος του υπολογίζεται από τη σχέση (4.55) και λαμβάνει τιμή ίση με $h_{stator\ tooth\ main\ body} = 54\ mm$.

$$h_{stator\ tooth\ main\ body} = h_{stator\ tooth} - h_{stator\ tooth\ lip} \quad (4.55)$$

Ο λόγος του βάθους προς το πλάτος της αύλακας υπολογίζεται από τη σχέση (4.56) και προκύπτει ίσος με $Depth\ to\ width\ slots\ ratio = 4,45$.

$$Depth\ to\ width\ slots\ ratio = \frac{h_{stator\ tooth}}{b_{slot\ max\ permissible\ widthwise\ D_{internal\ stator}}} \quad (4.56)$$

➤ **Εύρεση του βάθους του ζυγώματος του πυρήνα του στάτη**

Προκειμένου να υπολογισθεί το βάθος του ζυγώματος του πυρήνα του στάτη αρχικά, θα προσδιοριστεί η τιμή της μαγνητικής ροής σε αυτό σύμφωνα με τη σχέση (4.57). Αυτή προκύπτει ίση με $\Phi_{stator\ yoke} = 0,0585\ Wb$.

$$\Phi_{stator\ yoke} = \frac{\Phi_{per\ pole\ revised}}{2} \quad (4.57)$$

Έπειτα, η μαγνητική επαγωγή στο ζύγωμα λαμβάνεται ίση με $B_{stators\ yoke} = 1,1\ Wb/m^2$ ενώ, το μήκος των ελασμάτων του πυρήνα έχει ήδη υπολογισθεί από τη σχέση (4.15) και προέκυψε ίσο $L_i = 0,492\ m$. Το βάθος του ζυγώματος του στάτη προκύπτει ίσο με $d_{stators\ yoke} = 0,111\ m$ μετά από αντικατάσταση των τιμών στη σχέση (4.58).

$$d_{stators\ yoke} = 1.024 * \frac{\Phi_{stator\ yoke}}{(B_{stators\ yoke} \cdot L_i)} \quad (4.58)$$

Οι διαστάσεις της αύλακας και της οδόντωσης του στάτη αναφέρονται συνοπτικά στον πίνακα 4.1 που παρατίθεται στη συνέχεια.

Πίνακας 4.1

Διαστάσεις Αύλακας – Οδόντωσης Στάτη

Σύμβολο	Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες Μέτρησης
	Υψος		
$h_1 = h_{stator\ tooth\ lip}$	Χείλος οδόντωσης	3	mm
$h_2 = h_{stator\ wedge}$	Σφήνα	5	mm
$h_3 = h_{stator\ slot\ top\ insulation} + h_{stator\ slot\ tolerance}$	Μονώσεις κλείσιμο της αύλακας και ανοχές	3,15	mm
$h_{42} = h_{stator\ slot\ Cu} / 2$	Τύλιγμα άνω στρώσης	22,5	mm
$h' = h_{stator\ slot\ middle\ insulation}$	Μονώσεις στη μέση της αύλακας	0,35	mm
$h_{41} = h_{stator\ slot\ Cu} / 2$	Τύλιγμα κάτω στρώσης	22,5	mm
$h_4 = h_{stator\ slot\ Cu} + h'$	Τύλιγμα δύο στρώσεων με ενδιάμεση μόνωση	45,35	mm
$h_5 = h_{stator\ slot\ bottom\ insulation}$	Μονώσεις βάσης αύλακας	0,5	mm
$h_{stator\ tooth}$	Οδόντωση του στάτη	57	mm
$h_{stator\ tooth\ main\ body}$	Κύριο σώμα οδόντωσης στάτη	54	mm
$h_{wedge\ triangle\ height} = h_{stator\ wedge}$	Τριγώνου σφήνας	5	mm
	Πλάτος		
$b_{stator\ tooth\ in\ lip}$	Οδόντωσης στο χείλος	25,6	mm
$b_{extra\ stator\ teeth\ in\ wedge}$	Πρόσθετο τμήμα τριγώνου στη σφήνα	2,9	mm
$b_t = b_{stator\ tooth\ main\ body}$	Κύριου σώματος οδόντωσης	19,8	mm
$b_{slot\ max\ permissible\ widthwise\ D_{internal\ stator}}$	Μέγιστο επιτρ στην εσωτερική διάμετρο	12,8	mm
$b_{stator\ slot\ opening\ b1}$	Άνοιγμα της αύλακας	7	mm
$b_{stator\ slot\ upper\ base\ b4}$	Μικρής βάσης αύλακας	13,21	mm
$b_{stator\ slot\ base\ b2}$	Μεγάλης βάσης αύλακας	15,78	mm
Depth to width slots ratio	Λόγος πλάτους – βάθους αύλακας	4,45	

Προκειμένου να υπολογισθεί η εξωτερική διάμετρος του στάτη θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (4.59). Σύμφωνα με αυτή προκύπτει ότι η εξωτερική διάμετρος του στάτη ισούται με $D_{external\ stator} = 1,581\ m$.

$$D_{external\ stator} = D_{internal\ stator} + 2 * (h_{stator\ tooth} + d_{stators\ yoke}) \quad (4.59)$$

4.3.4 Υπολογισμός απωλειών στάτη

Οι απώλειες του στάτη χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: α) στις μεταβλητές απώλειες οι οποίες μεταβάλλονται με τη μεταβολή του φορτίου β) στις απώλειες σιδήρου ή πυρήνα

➤ Υπολογισμός απωλειών χαλκού του στάτη

Προκειμένου να επιτευχθεί ο υπολογισμός των απωλειών χαλκού του στάτη πρέπει να υπολογισθεί η αντίσταση έκαστης φάσης του τυλίγματος και η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που τη διαρρέει.

Για να υπολογισθεί η τιμή της αντίστασης αρχικά υπολογίζεται η τιμή του μέσου μήκους του ελίγματος του στάτη σύμφωνα με τη σχέση (4.60). Το μικτό μήκος του πυρήνα

$$L_{average\ stators\ coil\ turn\ length} = 2 * [L + (a \cdot \tau_p)] \quad (4.60)$$

όπου : L το μικτό μήκος του πυρήνα του στάτη σε m

a ο συντελεστής της ομάδας πηνίου

τ_p το πολικό βήμα σε m

να του στάτη έχει υπολογισθεί από τη σχέση (4.13) και προέκυψε ίσο με $L = 0,587\ m$ ενώ, το πολικό βήμα έχει υπολογισθεί από τη σχέση (4.16) και προέκυψε ίσο με $\tau_p = 0,3911\ m$.

Ακόμη το γινόμενο $a \cdot \tau_p$ αφορά το μήκος των αγωγών προκειμένου να υλοποιηθούν οι πρόσθιες και οι οπίσθιες μετωπικές συνδέσεις της μηχανής. Δηλαδή είναι τα τμήματα εκείνα της περιέλιξης τα οποία βρίσκονται εκτός των αυλάκων του πυρήνα του στάτη, προεξέχουν από αυτές και χρησιμοποιούνται για να κλείσει το κύκλωμα των πηνίων [E15].

Η τιμή του συντελεστή a εξαρτάται από το τη μορφή των πηνίων από τα οποία απαρτίζεται έκαστη ομάδα του τυλίγματος. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις [E65]:

α) Για την περιέλιξη της οποίας τα πηνία από τα οποία απαρτίζεται η ομάδα έχουν το ίδιο βήμα τότε ο συντελεστής λαμβάνει τιμές: $a = 1,5 \div 1,75$.

β) Για την περιέλιξη της οποίας τα πηνία από τα οποία απαρτίζεται η ομάδα έχουν διαφορετικό βήμα δηλαδή τα πηνία της ομάδας τοποθετούνται ομοκεντρικά τότε ο συντελεστής λαμβάνει τιμές: $a = 1,75 \div 2$.

Στην προκειμένη περίπτωση έχει επιλεχθεί η περιέλιξη να πραγματοποιηθεί με ομάδες πηνίων που διαθέτουν το ίδιο βήμα. Η επιλογή αυτή διαθέτει το πλεονέκτημα να απαιτεί λιγότερο χαλκό για την κατασκευή του τυλίγματος. Επιπρόσθετα, διασφαλίζει-

ται ότι το μέσο μήκος του ελίγματος του στάτη θα είναι μικρότερο και αυτό με τη σειρά του έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό των απωλειών χαλκού του στάτη. Επομένως, η τιμή του συντελεστή λαμβάνεται ίση με $a = 1,75$ και το μέσο μήκος του ελίγματος του στάτη υπολογίζεται ίσο με $L_{average\ stators\ coil\ turn\ length} = 2,543\ m$.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η περιέλιξη του στάτη θα υλοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται 5 παράλληλοι κλάδοι κάθε ένας από τους οποίους αποτελείται από 2 πηνία εν σειρά συνδεδεμένα. Στα άκρα των 2 πηνίων αναπτύσσεται η ονομαστική φασική τάση ενώ, προκειμένου αυτή να παραχθεί απαιτούνται εν σειρά συνδεδεμένα ελίγματα ίσα με $N_{ph} = 16$. Στη συνέχεια θα υπολογίζεται το μέσο μήκος των ελιγμάτων ανά κλάδο και ανά φάση σύμφωνα με τη σχέση (4.61) το οποίο προκύπτει ίσο με $L_{total\ per\ path\ per\ phase} = 40,688\ m$.

$$L_{total\ per\ path\ per\ phase} = L_{average\ stators\ coil\ turn\ length} * N_{ph} \quad (4.61)$$

Η τιμή της αντίστασης της περιέλιξης του στάτη όταν αυτή λειτουργεί υπό ονομαστικό φορτίο υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία της. Αυτή καθορίζεται από την κλάση των μονώσεων της. Επιλέγεται η γεννήτρια να ανήκει στην κλάση μονώσεων της κατηγορίας F η οποία αντιστοιχεί σε μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας ίση με $155^{\circ}\ C$ στην οποία συμπεριλαμβάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Εάν η τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (ambient temperature) ληφθεί ίση με $20^{\circ}\ C$ τότε η δυνατότητα περαιτέρω αύξησης της θερμοκρασίας της μηχανής ανέρχεται σε $135^{\circ}\ C$. Επειδή το υλικό που έχει επιλεγεί για την κατασκευή των τυλιγμάτων είναι ο χαλκός (Cu) η ειδική αντίσταση του στην θερμοκρασία των $155^{\circ}\ C$ είναι $\rho_{Cu\ 155^{\circ}\ C} = 0,0267\ \Omega \cdot mm^2/m$. Σύμφωνα με αυτή, αρχικά θα υπολογιστεί η αντίσταση του τυλιγματος του στάτη για κάθε κλάδο έκαστης φάσης από τη σχέση (4.62). Αυτή προκύπτει ίση με $R_{155^{\circ}\ C\ per\ branch\ per\ stators\ phase} = 0,02\ \Omega$. Στη συνέχεια υπολογίζεται τιμή της αντίστασης της περιέλιξης του στάτη ανά φάση από τη σχέση (4.63). Αυτή προκύπτει ίση με $R_{155^{\circ}\ C\ per\ stators\ phase} = 0,004\ \Omega$.

$$R_{155^{\circ}\ C\ per\ branch\ per\ stators\ phase} = \frac{\rho_{Cu\ 155^{\circ}\ C} \cdot L_{total\ per\ path\ per\ phase}}{N_{Stator\ Parallel\ Conductor\ Strands} \cdot S_{net\ per\ stators\ conductor\ strand}} \quad (4.62)$$

$$R_{155^{\circ}\ C\ per\ stators\ phase} = \frac{R_{155^{\circ}\ C\ per\ branch\ per\ stators\ phase}}{N_{stator\ parallel\ branches}} \quad (4.63)$$

Ο υπολογισμός των απωλειών χαλκού στο στάτη πραγματοποιείται μέσω της εξίσωσης (4.64) ενώ, η τιμή τους προκύπτει ίση με $P_{Cu\ stator\ power\ losses} = 18465,2\ W$.

$$P_{Cu\ stator\ power\ losses} = 3 * (I_{phase})^2 * R_{155^{\circ}\ C\ per\ stators\ phase} \quad (4.64)$$

➤ Υπολογισμός απωλειών χαλκού του στάτη που οφείλονται στα δινορρεύματα Eddy

Οι τύποι της περιέλιξης του στάτη διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή των αγωγών που χρησιμοποιούνται για την υπολοΐηση τους η οποία προκύπτει από τον συνδυασμό των αυλάκων και των οδοντώσεων.

Στην πρώτη κατηγορία οι αύλακες του στάτη κατασκευάζονται με σταθερό πλάτος ενώ, οι οδοντώσεις του έχουν μεταβλητό πλάτος (κωνική μορφή). Το σταθερό πλάτος των αυλάκων επιτρέπει την τοποθέτηση αγωγών ορθογωνικής διατομής (μπάρες). Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει η δυνατότητα της επίτευξης καλύτερου επιπέδου μονώσεων έτσι ώστε η παραγόμενη τάση της μηχανής να έχει τιμή μεγαλύτερη από 1000 V (τυλίγματα μέσης τάσης).

Στη δεύτερη κατηγορία οι αύλακες του στάτη κατασκευάζονται με μεταβλητό πλάτος (κωνική μορφή αυλάκων) ενώ, οι οδοντώσεις έχουν σταθερό πλάτος. Αυτός ο συνδυασμός της γεωμετρίας αυλάκων οδοντώσεων επιτρέπει την τοποθέτηση αγωγών κυκλικής διατομής εντός τους και σε αυτή την περίπτωση η παραγόμενη τάση από τις μηχανές δεν υπερβαίνει τα 1000 V (τυλίγματα χαμηλής τάσης).

Στη συνέχεια παρατίθενται οι σχέσεις υπολογισμού των συντελεστών απωλειών. Αυτές δίνονται για υποδιαιρεμένους αγωγούς (τυλίγματα με παράλληλους κλώνους strands) και ισχύουν υπο την προϋπόθεση ότι οι υποδιαιρέσεις των αγωγών δεν συνδέονται παράλληλα με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται η δημιουργία διόδων ανάμεσα στα ελάσματα του πυρήνα του στάτη τέτοιων ώστε να επιτρέπεται η διέλευση δινορρευμάτων μέσα από αυτές. Σε αντίθετη περίπτωση η χρησιμότητα της υποδιαίρεσης χάνεται σχεδόν ολοκληρωτικά [Ξ66].

Γενικά για την περίπτωση που η περιέλιξη του στάτη κατασκευάζεται με μπάρες, υποδιαιρεμένους αγωγούς και υπο την προαναφερθείσα προϋπόθεση η τιμή του μέσου συντελεστή απωλειών υπολογίζεται από τη σχέση (4.65).

$$\text{Average Loss Coefficient} = 1 + (\alpha \cdot h_c)^4 \cdot \frac{m^2}{9} \quad (4.65)$$

$$\text{όπου : } \alpha = \sqrt{\frac{\text{πλάτος του χαλκού στην αύλακα}}{\text{πλάτος της αύλακας}}}$$

h_c είναι το βάθος του αγωγού μετρούμενο σε cm

m είναι ο αριθμός των αγωγών που τοποθετούνται στο βάθος των αυλάκων

Οι απώλειες χαλκού του στάτη που οφείλονται στα δινορρεύματα υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση (4.66).

$$P_{\text{stators Eddy current Cu losses}} = (\text{Average Loss Coefficient} - 1) \cdot P_{\text{Cu stator power losses}} \quad (4.66)$$

Επειδή η περιέλιξη του στάτη της γεννήτριας έχει επιλεγεί να κατασκευαστεί με αγωγούς κυκλικής διατομής οι συνδέσεις των υποδιαίρεσεων των αγωγών επιτρέπουν τη διέλευση δινορρευμάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι απώλειες χαλκού του στάτη που οφείλονται στα δινορρεύματα να είναι μηδενικές $P_{\text{stators Eddy current Cu losses}} = 0 \text{ W}$.

➤ Υπολογισμός των συνολικών απωλειών χαλκού του στάτη

Οι συνολικές απώλειες χαλκού στο στάτη απαρτίζονται από δύο συνιστώσες: α) από τις απώλειες χαλκού του στάτη και β) από τις απώλειες χαλκού του στάτη που

οφείλονται στα δινορρέυματα Eddy ενώ, υπολογίζονται από τη σχέση (4.67). Η τιμή τους προκύπτει ίση με $P_{stators\ total\ Cu\ power\ losses} = 18465,2\ W$.

$$P_{stators\ total\ Cu\ power\ losses} = P_{Cu\ stator\ power\ losses} + P_{stators\ Eddy\ current\ Cu\ losses} \quad (4.67)$$

➤ **Υπολογισμός των διανεμημένων απωλειών (stray losses) στα τυλίγματα του στάτη**

Οι διανεμημένες απώλειες στα τυλίγματα του στάτη λαμβάνονται κατά προσέγγιση ίσες με το 15 % των συνολικών απωλειών χαλκού του στάτη, υπολογίζονται από τη σχέση (4.68) και προκύπτουν ίσες με $P_{stray\ losses} = 2769,78\ W$.

$$P_{stray\ losses} = 0,15 * (P_{Cu\ stator\ power\ losses} + P_{stators\ Eddy\ current\ Cu\ losses}) \quad (4.68)$$

➤ **Υπολογισμός των απωλειών πυρήνα (σιδήρου) του στάτη (stator core losses)**

Για να επιτευχθεί ο υπολογισμός των απωλειών πυρήνα στο στάτη είναι αναγκαίο να υπολογισθούν οι απώλειες πυρήνα στα διάφορα τμήματα του. Ο πυρήνας του στάτη αποτελείται από δύο βασικά τμήματα τις οδοντώσεις και το ζύγωμα. Οι οδοντώσεις παρεμβάλλονται ανάμεσα σε διαδοχικές αύλακες ενώ, το ζύγωμα είναι το τμήμα εκείνο του πυρήνα που εκτείνεται από τη βάση των αυλάκων και των οδοντώσεων έως την εξωτερική διάμετρο του στάτη. Για κάθε ένα τμήμα του πυρήνα αρχικά υπολογίζεται ο όγκος και έπειτα το βάρος του. Για τον υπολογισμό του βάρους χρησιμοποιείται η τιμή του ειδικού βάρους του πυρήνα. Επιλέγεται ο πυρήνας του στάτη να κατασκευαστεί από ελάσματα πάχους 0,5 mm του υλικού M-43 (M400-50A). Αμφότερα τα τμήματα του στάτη (οδοντώσεις και ζύγωμα) κατασκευάζονται από το υλικό αυτό το οποίο έχει ειδικό βάρος $Stators\ Core\ Teeth\ Yoke\ Specific\ Weight = 7,7 \cdot 10^{-3}\ kg/cm^3$. Έπειτα, προσδιορίζεται η τιμή της μαγνητικής επαγωγής για κάθε τμήμα.

▪ **Υπολογισμός του εμβαδού του πυρήνα κάθε τμήματος της οδόντωσης του στάτη**

Η οδόντωση του πυρήνα του στάτη χωρίζεται σε βασικά τμήματα ενώ, για κάθε ένα από αυτά πρέπει να υπολογισθεί το εμβαδόν του.

1. Υπολογισμός του εμβαδού του κύριου σώματος του πυρήνα της οδόντωσης του στάτη

Το εμβαδόν του κύριου σώματος του πυρήνα της οδόντωσης του στάτη υπολογίζεται από τη σχέση (4.69) και προκύπτει ίσο με $S_{stator\ tooth\ main\ body} = 10,69\ cm^2$.

$$S_{stator\ tooth\ main\ body} = h_{stator\ tooth\ main\ body} \cdot b_{stator\ tooth\ main\ body} \quad (4.69)$$

2. Υπολογισμός του εμβαδού του πυρήνα στην περιοχή της σφήνας της οδόντωσης του στάτη

Ο υπολογισμός του εμβαδού του πυρήνα στην περιοχή της σφήνας της οδόντωσης του στάτη πραγματοποιείται σύμφωνα με τη σχέση (4.70) και αυτό προκύπτει ίσο με $S_{stator\ tooth\ wedge} = 0,145\ cm^2$.

$$S_{stator\ tooth\ wedge} = 2 \cdot (0,5 \cdot h_{stator\ wedge} \cdot b_{extra\ stator\ teeth\ in\ wedge}) \quad (4.70)$$

3. Υπολογισμός του εμβαδού του παραλληλόγραμμου τμήματος του πυρήνα στην περιοχή του χείλους της οδόντωσης του στάτη

Ο υπολογισμός του εμβαδού του πυρήνα στην περιοχή του χείλους της οδόντωσης του στάτη απαρτίζεται από δύο τμήματα. Αρχικά, θα υπολογισθεί το εμβαδόν του πρώτου τμήματος το οποίο αντιστοιχεί σε εμβαδόν παραλληλογράμμου ίσο με $S_{stator\ tooth\ lip\ rectangular}$, υπολογίζεται από την εξίσωση (4.72) και σε αυτό περιλαμβάνεται και επιπρόσθετο τμήμα το οποίο έπειτα θα αφαιρεθεί. Από την εξίσωση (4.71) υπολογίζεται το πλάτος του τμήματος του χείλους της οδόντωσης του στάτη που προκύπτει ίσο με $Lip\ part\ width = 45,4\ mm$. Το εμβαδόν του πρώτου τμήματος του πυρήνα του στάτη στην περιοχή της σφήνας της οδόντωσης που αντιστοιχεί σε παραλληλόγραμμο προκύπτει ίσο με $S_{stator\ tooth\ lip\ rectangular} = 1,362\ cm^2$.

$$Lip\ part\ width = b_{stator\ tooth\ main\ body} + b_{stator\ tooth\ in\ lip} \quad (4.71)$$

$$S_{stator\ tooth\ lip\ rectangular} = h_{stator\ tooth\ lip} \cdot Lip\ part\ width \quad (4.72)$$

4. Υπολογισμός του εμβαδού του πυρήνα στην περιοχή του κυκλικού τομέα του χείλους της οδόντωσης του στάτη (βρίσκεται στην πλευρά του διάκενου)

Αρχικά, θα υπολογισθεί η ακτίνα της εσωτερικής διαμέτρου του στάτη σύμφωνα με την εξίσωση (4.73). Αυτή προέκυψε ίση με $R_{internal\ stator} = 0,6225\ m$.

$$R_{internal\ stator} = D_{internal\ stator}/2 = 0,6225\ m \quad (4.73)$$

Έπειτα υπολογίζονται διαδοχικά : α) η γωνία του πόλου σύμφωνα με την εξίσωση (4.74) η οποία προκύπτει ίση με $theta\ pole = 36^\circ$, β) ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο μετά από την επίλυση της εξίσωσης (4.75) ο οποίος προκύπτει ίσος με $Slots\ per\ pole = 12$, γ) η γωνία που αντιστοιχεί σε μια αύλακα και μια οδόντωση σύμφωνα με την εξίσωση (4.76) προκύπτει ότι ισούται με $\theta_{1\ slot\ 1\ tooth} = theta\ 1\ slot\ 1\ tooth = 3^\circ$ μοίρες, δ) η γωνία που αντιστοιχεί στο άνοιγμα της αύλακας στην πλευρά του διάκενου προκύπτει ίση με $\theta_{slots\ opening} = thetaslots\ opening = 0,6443^\circ$ μοίρες σύμφωνα με την εξίσωση (4.77) και ε) η γωνία της οδόντωσης στην εσωτερική διάμετρο του στάτη (στην πλευρά του διάκενου) προκύπτει ίση με $\theta_{tooth\ in\ stators\ internal\ Diameter} = theta\ tooth\ in\ stators\ internal\ diameter = 2,3557^\circ$ μοίρες σύμφωνα με την εξίσωση (4.78).

$$theta\ pole = 360^\circ/P \quad (4.74)$$

$$Slots\ per\ pole = Q/P \quad (4.75)$$

$$Q_p = theta\ 1\ slot\ 1\ tooth = 360^\circ/Q = theta\ pole/Slots\ per\ pole \quad (4.76)$$

$$theta\ slots\ opening = 2 \cdot \sin^{-1}(Slots\ opening/(2 \cdot R_{internal\ stator})) \quad (4.77)$$

$$theta\ tooth\ stators\ int\ diam = theta\ 1\ slot\ 1\ tooth - theta\ slots\ opening \quad (4.78)$$

Ο υπολογισμός του εμβαδού του πυρήνα στην περιοχή της σφήνας της οδόντωσης του στάτη πραγματοποιείται σύμφωνα με τη σχέση (4.79) και προκύπτει ίσο με $S_{stator\ tooth\ circle\ area\ segment} = 0,0224\ cm^2$.

$$S_{\text{stator tooth circle area segment}} = \frac{(R_{\text{internal stator}})^2}{2} \cdot \left[\frac{(\pi \cdot \text{theta tooth})}{180} - \sin\left(\frac{\text{theta tooth}}{\text{stators int diam}}\right) \right] \quad (4.79)$$

5. Υπολογισμός του εμβαδού του πυρήνα στην περιοχή του του χείλους της οδόντωσης του στάτη (βρίσκεται στην πλευρά του διάκενου)

Για να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός του εμβαδού του χείλους της οδόντωσης του στάτη χρησιμοποιείται η εξίσωση (4.80). Από αυτή προκύπτει ότι λαμβάνει τιμή ίση με $S_{\text{stator tooth lip}} = 1,34 \text{ cm}^2$.

$$S_{\text{stator tooth lip}} = S_{\text{stator tooth lip rectangular}} - S_{\text{stator tooth circle area segment}} \quad (4.80)$$

Το συνολικό εμβαδόν της οδόντωσης του στάτη προκύπτει από την εξίσωση (4.81) ίσο με $S_{\text{stator tooth total}} = 12,177 \text{ cm}^2$. Σύμφωνα με τη σχέση (4.82) το συνολικό εμβαδόν των οδοντώσεων του στάτη προκύπτει ίσο με $S_{\text{stator teeth total}} = 1461,24 \text{ cm}^2$.

$$S_{\text{stator tooth total}} = (S_{\text{stator tooth main body}} + S_{\text{stator tooth wedge}} + S_{\text{stator tooth lip}}) \quad (4.81)$$

$$S_{\text{stator teeth total}} = Q \cdot S_{\text{stator tooth total}} \quad (4.82)$$

Ο προσδιορισμός των απωλειών πυρήνα των οδοντώσεων του στάτη απαιτεί τον υπολογισμό του όγκου και του βάρους τους σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.83) και (4.84). Ο όγκος των οδοντώσεων του στάτη προκύπτει ίσος με $V_{\text{stators teeth}} = 71936,8 \text{ cm}^3$. Το βάρος των οδοντώσεων του στάτη υπολογίζεται ίσο με $\text{Stators core teeth Weight} = 553,91 \text{ kg}$.

$$V_{\text{stators teeth}} = S_{\text{stator teeth total}} \cdot L_i \quad (4.83)$$

$$\text{Stators core teeth Weight} = V_{\text{stators teeth}} \cdot \text{Stators Core Teeth Yoke Specific Weight} \quad (4.84)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί για να κατασκευαστεί ο πυρήνας της γεννήτριας επιλέγεται το υλικό *M-43* σύμφωνα με τα αμερικανικά πρότυπα. Για τα ευρωπαϊκά πρότυπα το ίδιο υλικό λαμβάνει την ονομασία *M-400-50A*. Το πάχος των ελασμάτων του πυρήνα να λαμβάνεται ίσο με 0,5 mm. Στη συνέχεια παρατίθεται η χαρακτηριστική $P_{Fe} = f(B)$ του υλικού *M-43* για φύλλα λαμαρίνας πάχους 0,5 mm και για συχνότητα λειτουργίας ίση με 50 Hz.

▪ Υπολογισμός των απωλειών σιδήρου των οδοντώσεων του πυρήνα του στάτη

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα για τις οδοντώσεις του στάτη η τιμή της μαγνητικής επαγωγής λαμβάνεται ίση με $B_{\text{stator tooth}} = 1,5 \text{ Wb/m}^2$. Από τις τιμές της γραφικής παράστασης του σχήματος 4.1 μετά από αναγωγή των μονάδων W/round σε W/kg με γραμμική παρεμβολή προκύπτει ότι η τιμή των απωλειών των οδοντώσεων ισούται με $P_{Fe \text{ stators core teeth per kg}} = 2,85 \text{ W/kg}$. Επομένως, οι συνολικές απώλειες σιδήρου των οδοντώσεων του πυρήνα του στάτη υπολογίζονται σύμφωνα με την εξίσωση (4.85) και προκύπτουν ίσες με $P_{Fe \text{ stators core teeth}} = 1578,64 \text{ W}$.

$$P_{Fe \text{ stators core teeth}} = \text{Stators core teeth Weight} \cdot P_{Fe \text{ stators core teeth per kg}} \quad (4.85)$$

- Υπολογισμός του εμβαδού του πυρήνα του ζυγώματος του στάτη

Το εμβαδόν του ζυγώματος του στάτη υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.86) και προκύπτει ίσο με $A_{stators\ yoke} = 546,45\ cm^2 = 0,054645\ m^2$.

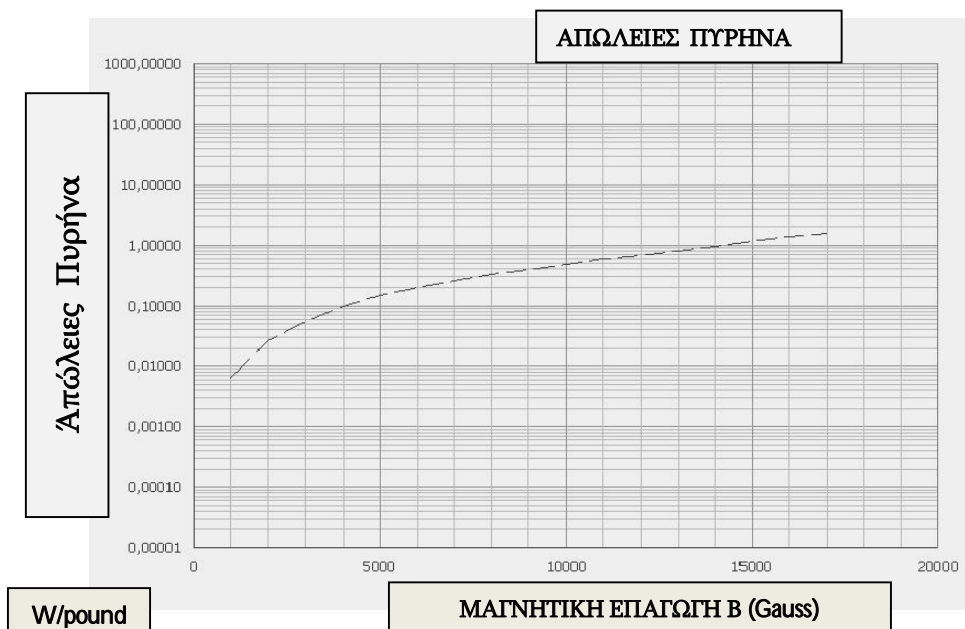
$$A_{stators\ yoke} = d_{stators\ yoke} \cdot L_i \quad (4.86)$$

Έπειτα, θα υπολογισθεί η μέση διάμετρος του πυρήνα στο ζύγωμα του στάτη από τη σχέση (4.87). Αυτή προκύπτει ίση με $D_{stator\ yoke\ mean\ below\ the\ slots} = 1,47\ m = 147\ cm$. Στη συνέχεια μέσω αυτής της παραμέτρου υπολογίζεται ο όγκος του πυρήνα του ζυγώματος του στάτη σύμφωνα με τη σχέση (4.88) ο οποίος προκύπτει ίσος με $V_{stators\ core\ yoke} = 252358\ cm^3$ ενώ, το βάρος του ζυγώματος του στάτη υπολογίζεται από την εξίσωση (4.89) και προκύπτει ίσο με $Stators\ core\ yoke\ Weight = 1943,16\ kg$.

$$D_{stator\ yoke\ mean\ below\ the\ slots} = D_{internal\ stator} + (2 \cdot h_{stator\ tooth}) + d_{stators\ yoke} \quad (4.87)$$

$$V_{stators\ core\ yoke} = (\pi \cdot D_{stator\ yoke\ mean\ below\ the\ slots}) \cdot A_{stators\ yoke} \quad (4.88)$$

$$Stators\ core\ yoke\ Weight = V_{stators\ core\ yoke} \cdot Stators\ Core\ Teeth\ Yoke\ Specific\ Weight \quad (4.89)$$



Σχήμα 4.1: Απώλειες ισχύος πυρήνα υλικού M-43. [E15, σχήμα 1 σελίδα 37]

- Υπολογισμός των απωλειών σιδήρου του ζυγώματος του πυρήνα του στάτη

Προκειμένου να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των απωλειών σιδήρου του ζυγώματος στο στάτη αρχικά, θα υπολογισθεί η αναθεωρημένη τιμή της μαγνητικής επαγωγής σε αυτό από την εξίσωση (4.90) που παρατίθεται στη συνέχεια. Αυτή προκύπτει ίση με $B_{stators\ yoke\ revised} = 1,07\ Wb/m^2$.

$$B_{stators\ yoke\ revised} = \Phi_{stator\ yoke} / A_{stators\ yoke} \quad (4.90)$$

Για την αναθεωρημένη τιμή της μαγνητικής επαγωγής του ζυγώματος του στάτη και από τις τιμές της γραφικής παράστασης του σχήματος 4.1 μετά από αναγωγή των μονάδων $W/pound$ σε W/kg με γραμμική παρεμβολή προκύπτει ότι η τιμή των απω-

λειών του ζυγώματος ισούται με $P_{Fe\ stators\ core\ yoke\ per\ kg} = 1,25\ W/kg$. Επομένως, οι συνολικές απώλειες σιδήρου του ζυγώματος του πυρήνα του στάτη υπολογίζονται από την εξίσωση (4.91) και προκύπτουν ίσες με $P_{Fe\ stators\ core\ yoke} = 2428,95\ W$.

$$P_{Fe\ stators\ core\ yoke} = Stators\ core\ yoke\ Weight \cdot P_{Fe\ stators\ core\ yoke\ per\ kg} \quad (4.91)$$

Οι συνολικές απώλειες σιδήρου του στάτη υπολογίζονται από την εξίσωση (4.92) και προκύπτουν ίσες με $P_{Fe\ stators\ core\ total} = 4007,59\ W$.

$$P_{Fe\ stators\ core\ total} = P_{Fe\ stators\ core\ teeth} + P_{Fe\ stators\ core\ yoke} \quad (4.92)$$

4.3.5 Υπολογισμός της ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας της αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής λ_{slot} , της μαγνητικής αγωγιμότητας της ροής σκέδασης της αύλακας Λ_{slot} , του συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης της αύλακας $L_{slot\ leakage}$ και του συνολικού συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης των αυλάκων έκαστης φάσεως της περιέλιξης $L_{slots\ leakage\ per\ phase}$

Η αυτεπαγωγή ενός τυλίγματος ή ενός τμήματος τυλίγματος προκύπτει από τον υπολογισμό της μαγνητικής ροής σύζευξης (flux linkage) η οποία είναι η πεπλεγμένη ροή Ψ και υπολογίζεται από τη σχέση : $\Psi = K_w \cdot N \cdot \Phi$. Αυτή προκαλείται από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος I ενώ, πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι αυτή υπολογίζεται και από τη σχέση $\Psi = L \cdot I$.

Επιπρόσθετα, ο συντελεστής αυτεπαγωγής προσδιορίζεται από τη σχέση $L = N^2 \cdot \Lambda$ όπου η παράμετρος Λ είναι η μαγνητική αγωγιμότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ενέργεια που αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο για τον προσδιορισμό των επαγωγών (inductances) ή των επαγωγικών αντιδράσεων (reactances) ενός κυκλώματος.

Επίσης, η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου μπορεί να αναπαρασταθεί από το ολοκλήρωμα της πυκνότητας της ενέργειας σε ένα μαγνητικό πεδίο $w_\phi = W_\phi/V = B \cdot H/2$ ως προς τον όγκο του V . Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα προκύπτει η σχέση (4.93) ενώ, αν θεωρηθεί ότι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού είναι σταθερή και μετά από αντικατάσταση της μαγνητικής επαγωγής $B = \mu \cdot H$ σε αυτή προκύπτει η σχέση (4.94).

$$W_\phi = \int_V \frac{1}{2} \cdot (H \cdot B) \, dV \quad (4.93)$$

$$W_\phi = \frac{1}{2\mu} \int_V B^2 \, dV \quad (4.94)$$

Η εξίσωση της ενέργειας είναι έγκυρη ανεξάρτητα του τρόπου με τον οποίο έχει δημιουργηθεί η μαγνητική επαγωγή. Η μαγνητική επαγωγή μπορεί να δημιουργηθεί από ένα ή περισσότερα ρεύματα τυλιγμάτων. Λαμβάνεται ως παράδειγμα μια απλή περίπτωση στην οποία σε ένα γραμμικό μαγνητικό κύκλωμα αναπτύσσεται μαγνητική επα-

γωγή ίση με $B = B_1 + B_2$ από δύο ρεύματα I_1 και I_2 . Τότε η εξίσωση της ενέργειας λαμβάνει τη μορφή της εξίσωσης (4.95).

$$W_\varphi = \frac{1}{2\mu} \int_V (B_1 + B_2)^2 dV = \frac{1}{2\mu} \int_V (B_1^2 + B_2^2 + 2 \cdot B_1 \cdot B_2) dV \quad (4.95)$$

Στις ηλεκτρομηχανικές διατάξεις που διατίθενται με δύο διατεταγμένα τυλίγματα περιέλιξης αμοιβαίας επαγωγής M , η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου αποθηκεύεται στα πηνία. Έτσι, η εξίσωση της ενέργειας μπορεί να επαναγραφεί εφαρμόζοντας τις παραμέτρους των αυτεπαγωγών L_1 , L_2 και της αμοιβαίας επαγωγής M και να λάβει τη μορφή της εξίσωσης (4.96).

$$W_\varphi = \frac{1}{2} \cdot L_1 \cdot I_1^2 + \frac{1}{2} \cdot L_2 \cdot I_2^2 + \frac{1}{2} \cdot M \cdot I_1 \cdot I_2 \quad (4.96)$$

Όταν εξισώνονται οι σχέσεις (4.95) και (4.96) προκύπτει ότι οι αντίστοιχοι όροι και στις δύο πλευρές είναι ίσοι. Η εξίσωση μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τρεις ανεξάρτητους όρους. Οι όροι που βρίσκονται στα άκρα της εξίσωσης είναι μεταξύ τους ίσοι και σε αυτή την περίπτωση η αυτεπαγωγή του τυλίγματος υπολογίζεται από την εξίσωση (4.97).

$$L = \frac{1}{\mu \cdot I^2} \int_V B^2 dV \quad (4.97)$$

Επειδή οι όροι που βρίσκονται στο μέσο των εξισώσεων (4.95) και (4.96) είναι ίσοι λαμβάνεται η αμοιβαία επαγωγή και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.98).

$$M = \frac{2}{\mu \cdot I_1 \cdot I_2} \int_V B_1 \cdot B_2 dV \quad (4.98)$$

Όταν χρησιμοποιούνται αυτές οι εξισώσεις, ο όγκος μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τμήματα και μπορούν να υπολογισθούν οι συνιστώσες των επαγωγών. Για παράδειγμα, όταν υπολογίζεται η αμοιβαία επαγωγή ενδείκνυται να διαιρεθεί ο όγκος V σε τμήματα της κύριας μαγνητικής ροής και της ροής σκέδασης για να υπολογισθούν οι αντίστοιχες επαγωγές [Ε67].

Σύμφωνα με το Νόμο του Ampere ο οποίος ονομάζεται και Νόμος του διαρρέυματος ισχύει ότι : $\oint_c H \cdot dl = I_{εσωτ}$ όπου $I_{εσωτ} = N \cdot I = \theta$. Η παράμετρος θ ονομάζεται διάρρευμα. Αρχικά, εξετάζεται η μορφή της αύλακας του σχήματος 4.2 στην οποία τοποθετείται τυλίγμα μιας στρώσης. Επιπρόσθετα, θεωρείται ότι η αύλακα διαιρείται σε περιοχές με παράλληλα σιδηρομαγνητικά όρια σταθερού πλάτους ίσου με το πλάτος της πλευράς του πηνίου ή της περιοχής (άνοιγμα αύλακας) το οποίο γενικά λαμβάνει τιμή ίση με b . Σε αυτή την περίπτωση το μήκος της διαδρομής ολοκλήρωσης l γίνεται ίσο με το πλάτος της αύλακας οπότε προκύπτει η σχέση (4.99)[Ε67].

Η συνολική μαγνητική αγωγιμότητα πολλών τμημάτων της αύλακας που κάθε ένα από αυτά βρίσκεται τοποθετημένο διαδοχικά ως προς τα άλλα και έχουν διαφορετική γεωμετρία προκύπτει από το άθροισμα των μεμονομένων τιμών της μαγνητικής αγωγιμότητας κάθε τμήματος [Ε67-Ε69-Ε70].

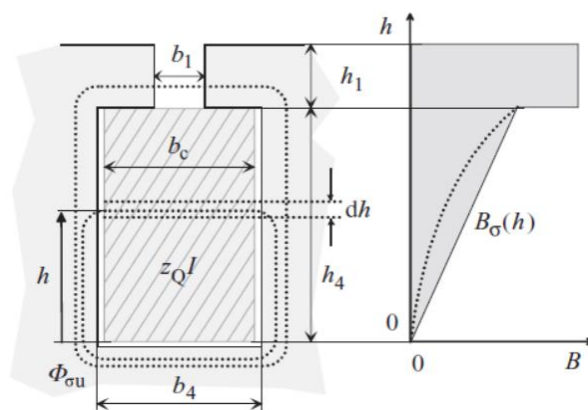
Αν τα επιμέρους τμήματα στα οποία πρόκειται να διαχωριστεί η αύλακα έχουν παράλληλα σιδηρομαγνητικά όρια τότε, στη σχέση υπολογισμού της συνολικής ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής για κάθε τμήμα της λ εμφανίζεται το άθροισμα των σχετικών αναλογιών ύψους προς πλάτος των μεμονωμένων τμημάτων της. Σε κάθε περίπτωση αυτά εξαρτώνται από τη θέση των περιοχών διέλευσης του διαρρέυματος και μόνο εφόσον ισχύει η προαναφερθείσα μπορεί να εφαρμοστεί η παράμετρος λ [Ξ67].

$$\oint_c H \cdot dl = I_{\varepsilon\sigma\omega\tau} \Rightarrow H \oint_c dl = N \cdot I \Rightarrow H \cdot b = \theta \quad (4.99)$$

Η μαγνητική επαγωγή B είναι συνάρτηση του ύψους της αύλακας όπως και η ένταση του μαγνητικού πεδίου H . Γενικά, υπολογίζονται από τις σχέσεις $B(h) = \mu_o \cdot H(h)$ και $H(h) = (N_{conductors \text{ per stator slot}} \cdot I/b) \cdot (h/h_x)$. Ο δείκτης x δείχνει το μέγιστο ύψος του τμήματος της αύλακας ενώ, ο λόγος (h/h_x) δείχνει ότι πραγματοποιείται μεταβολή του μεγέθους κατά το ύψος της αύλακας οπότε, προκύπτει η εξίσωση (4.100).

$$\left. \begin{aligned} B(h) &= \mu_o \cdot H(h) \\ H(h) &= \frac{N_{conductors \text{ per stator slot}} \cdot I \cdot \left(\frac{h}{h_x}\right)}{b} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$B(h) = \mu_o \cdot \frac{N_{conductors \text{ per stator slot}} \cdot I \cdot \left(\frac{h}{h_x}\right)}{b} \quad (4.100)$$



Σχήμα 4.2: Ροή σκέδασης ρευματοφόρου αύλακας μιας ηλεκτρικής μηχανής και μαγνητική επαγωγή σκέδασης. Αριστερά διακρίνονται οι αγωγοί στην αύλακα. Η ρευματοφόρος περιοχή απεικονίζεται με διαγράμμιση και σε αυτήν υφίστανται τα αμπερελίγματα $z_Q \cdot I$ ή $N_{conductors \text{ per stator slot}} \cdot I$. Στα δεξιά εμφανίζεται η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής σκέδασης της αύλακας ως συνάρτηση του ύψους της αύλακας h . Η συμπαγής γραμμή απεικονίζει τη μεταβολή χωρίς την επίδραση του επιδερμικού φαινομένου στην περιέλιξη ενώ, η διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύει την περίπτωση που λαμβάνει χώρα το επιδερμικό φαινόμενο. [Ξ68, Fig 4.13, page 249]

- Υπολογισμός της ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας της αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής λ_{slot} , της μαγνητικής αγωγιμότητας της ροής σκέδασης της αύλακας Λ_{slot} , του συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης αύλακας $L_{slot\ leakage}$, και του συνολικού συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης των αυλάκων $L_{slots\ leakage\ per\ phase}$ για τύλιγμα μιας στρώσης

Από τη σχέση (4.97) για τη διάταξη της αύλακας του σχήματος 4.2 μέσω της σχέσης (4.100) και μετά την αντικατάσταση του στοιχειώδους όγκου προκύπτει η γενική μορφή της εξίσωσης (4.101). Με την εισαγωγή των διαστάσεων της αύλακας προκύπτει η τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης της αύλακας $L_{slot\ leakage}$ που παρατίθεται στη συνέχεια.

$$\left. \begin{aligned} L_{slot\ leakage} &= \frac{1}{\mu_0 \cdot I^2} \int_V B^2 dV \\ B(h) &= \mu_0 \cdot \frac{N_{conductors\ per\ stator\ slot} \cdot I \cdot \left(\frac{h}{h_x}\right)}{b} \\ dV &= L_i \cdot b \cdot dh \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$L_{slot\ leakage} = \frac{1}{\mu_0 \cdot I^2} \int_0^{h_x} \left[\mu \cdot \frac{N_{conductors\ per\ stator\ slot} \cdot I \cdot \left(\frac{h}{h_x}\right)}{b} \right]^2 L_i \cdot b \cdot dh \quad (4.101)$$

$$L_{slot\ leakage\ b_4} = \frac{1}{\mu_0 \cdot I^2} \int_0^{h_4} \left[\mu_0 \cdot \frac{N_{conductors\ per\ stator\ slot} \cdot I \cdot \left(\frac{h}{h_4}\right)}{b_4} \right]^2 \cdot L_i \cdot b_4 \cdot dh \Rightarrow$$

$$L_{slot\ leakage\ b_4} = \frac{1}{\mu_0 \cdot I^2} \cdot \mu_0^2 \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot I^2 \cdot \frac{1}{b_4^2} \cdot L_i \cdot b_4 \int_0^{h_4} \left(\frac{h}{h_4}\right)^2 dh \Rightarrow$$

$$L_{slot\ leakage\ b_4} = \frac{\mu_0 \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot L_i}{b_4} \cdot \frac{1}{h_4^2} \int_0^{h_4} h^2 dh \Rightarrow$$

$$L_{slot\ leakage\ b_4} = \frac{\mu_0 \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot L_i}{b_4} \cdot \frac{1}{h_4^2} \left[\frac{h^3}{3} \right]_0^{h_4} \Rightarrow$$

$$L_{slot\ leakage\ b_4} = \frac{\mu_0 \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot L_i}{b_4} \cdot \frac{1}{h_4^2} \cdot \frac{h_4^3}{3} \Rightarrow$$

$$L_{slot\ leakage\ b_4} = \mu_0 \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot L_i \cdot \frac{h_4}{3 \cdot b_4} \Rightarrow$$

$$L_{slot\ leakage\ b_4} = N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot \Lambda_{slot\ b_4}$$

Η μαγνητική αγωγιμότητα της ροής σκέδασης της αύλακας L_{slot} προκύπτει ως τμήμα του συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης της αύλακας και για το υπό εξέταση τμήμα υπολογίζεται από τη σχέση (4.102).

$$L_{b_4} = \mu_o \cdot L_i \cdot \frac{h_4}{3 \cdot b_4} \quad (4.102)$$

Η ειδική μαγνητική αγωγιμότητα αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής για τη συγκεκριμένη περιοχή η οποία διαθέτει πλάτος b_4 ορίζεται ως ο λόγος της μαγνητικής αγωγιμότητας της ροής σκέδασης της αύλακας με το γινόμενο του ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής L_i με τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα του κενού μ_o και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.103).

$$\lambda_{slot\ b_4} = \frac{h_4}{3 \cdot b_4} \quad (4.103)$$

Στην περιοχή του ανοίγματος της αύλακας το οποίο διαθέτει ύψος h_1 η παράμετρος της μαγνητικής επαγωγής $B(h)$ παραμένει σταθερή. Αυτό συμβαίνει διότι το διάρρευμα που επηρεάζει την περιοχή δεν μεταβάλλεται περαιτέρω επειδή η ρευματοφόρος περιοχή έχει ήδη σαρωθεί και η μαγνητική επαγωγή πλέον είναι σταθερή. Συγκεκριμένα, λαμβάνει τιμή ίση με $B = \mu_o \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot} \cdot I / b_1$ οπότε, προκύπτει ότι η τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής για την περιοχή του ανοίγματος της αύλακας ισούται με :

$$L_{slot\ leakage\ b_1} = \mu_o \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot L_i \cdot \frac{h_1}{b_1}.$$

$$\left. \begin{aligned} L_{slot\ leakage} &= \frac{1}{\mu_o \cdot I^2} \int_V B^2 dV \\ B &= \frac{\mu_o \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot} \cdot I}{b_1} \\ dV &= L_i \cdot b_1 \cdot dh \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$L_{slot\ leakage\ b_1} = \frac{1}{\mu_o \cdot I^2} \int_0^{h_1} \left[\frac{\mu_o \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot} \cdot I}{b_1} \right]^2 \cdot L_i \cdot b_1 \cdot dh \Rightarrow$$

$$L_{slot\ leakage\ b_1} = \frac{1}{\mu_o \cdot I^2} \mu_o^2 \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot I^2 \cdot \frac{1}{b_1^2} \cdot L_i \cdot b_1 \int_0^{h_1} dh \Rightarrow$$

$$L_{slot\ leakage\ b_1} = \mu_o \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot L_i \cdot \frac{h_1}{b_1} \Rightarrow$$

$$L_{slot\ leakage\ b_1} = N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot L_{slot\ b_1}$$

Η μαγνητική αγωγιμότητα της ροής σκέδασης της αύλακας $L_{slot\ b_1}$ για την περιοχή του ανοίγματος της υπολογίζεται από τη σχέση (4.104) ενώ, η ειδική μαγνητική αγωγιμότητα αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής $\lambda_{slot\ b_1}$ για τη συ-

γκεκριμένη περιοχή η οποία διαθέτει πλάτος b_1 υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.105).

$$L_{slot\ b_1} = \mu_o \cdot L_i \cdot \frac{h_1}{b_1} \quad (4.104)$$

$$\lambda_{slot\ b_1} = \frac{h_1}{b_1} \quad (4.105)$$

Γενικά, μεταξύ διαρρεύματος θ και μαγνητικής ροής Φ ισχύει η σχέση (4.106) ενώ, η μαγνητική αντίσταση R_m είναι το αντίστροφο της μαγνητικής αγωγιμότητας της ροής σκέδασης της αύλακας Λ και υπολογίζεται από τη σχέση (4.107).

$$\Phi = \Lambda \cdot \theta \quad (4.106)$$

$$R_m = \frac{1}{\Lambda} \quad (4.107)$$

Η συνολική μαγνητική ενέργεια που αποθηκεύεται στην αύλακα προκύπτει από το άθροισμα της αποθηκευμένης ενέργειας σε κάθε τμήμα (περιοχή) της αύλακας και υπολογίζεται από τη σχέση (4.108).

$$W_{\varphi\ slot} = W_{\varphi\ slot\ b_1} + W_{\varphi\ slot\ b_4} = \frac{1}{2} \cdot L_{slot\ b_1} \cdot I^2 + \frac{1}{2} \cdot L_{slot\ b_4} \cdot I^2 \quad (4.108)$$

$$W_{\varphi\ slot} = W_{\varphi\ slot\ b_1} + W_{\varphi\ slot\ b_4} = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot L_i \cdot \frac{h_1}{b_1} \cdot I^2 +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot L_i \cdot \frac{h_4}{3 \cdot b_4} \cdot I^2 \Rightarrow$$

$$W_{\varphi\ slot} = W_{\varphi\ slot\ b_1} + W_{\varphi\ slot\ b_4} = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot L_i \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot I^2 \cdot \left(\frac{h_1}{b_1} + \frac{h_4}{3 \cdot b_4} \right) \Rightarrow$$

$$W_{\varphi\ slot} = W_{\varphi\ slot\ b_1} + W_{\varphi\ slot\ b_4} = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot L_i \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot I^2 \cdot (\lambda_{slot\ b_1} + \lambda_{slot\ b_4})$$

Η τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης της αύλακας $L_{slot\ leakage}$ ορίζεται από το άθροισμα των επιμέρους ειδικών μαγνητικών αγωγιμοτήτων της αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής. Για την εφαρμογή μας η τιμή της συνολικής ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας της αύλακας λαμβάνει την παρακάτω τιμή:

$$\lambda_{slot} = \lambda_{slot\ b_1} + \lambda_{slot\ b_4} \quad (4.109)$$

ενώ, για την τρέχουσα εφαρμογή η τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης της αύλακας υπολογίζεται από τη σχέση (4.110).

$$L_{slot\ leakage} = \mu_o \cdot L_i \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot (\lambda_{slot\ b_1} + \lambda_{slot\ b_4}) \quad (4.110)$$

Εάν η περιέλιξη διαθέτει αριθμό αυλάκων Q , αριθμό παράλληλων συμμετρικών κλάδων $N_{stator\ parallel\ branches}$ και αριθμό φάσεων m τότε ο αριθμός των αυλάκων που συνδέονται εν σειρά στο τύλιγμα μιας φάσης της περιέλιξης προκύπτει από τη σχέση: $Q/(N_{stator\ parallel\ branches} \cdot m)$ ενώ, ο συνολικός συντελεστής αυτεπαγωγής των αυλάκων μιας φάσης της περιέλιξης υπολογίζεται από τη σχέση (4.111) [Ξ68].

$$L_{slots\ leakage\ per\ phase} = \frac{Q}{N_{stator\ parallel\ branches} \cdot m} \cdot \frac{1}{N_{stator\ parallel\ branches}} \cdot L_{slot\ leakage}$$

$$L_{slots\ leakage\ per\ phase} = \mu_o \cdot L_i \cdot \frac{Q}{m} \cdot \left(\frac{N_{conductors\ per\ stator\ slot}}{N_{stator\ parallel\ branches}} \right)^2 \cdot \lambda_{slot} \quad (4.111)$$

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί ο αριθμός των αγωγών μιας αύλακας ισούται με $N_{conductors\ per\ stator\ slot}$ επομένως, ο αριθμός των αγωγών που συνδέονται μεταξύ τους εν σειρά στο τύλιγμα έκαστης φάσης υπολογίζεται από τη σχέση (4.112).

$$N_{conductors\ per\ phase} = \frac{N_{conductors\ per\ stator\ slot} \cdot Q}{(N_{stator\ parallel\ branches} \cdot m)} \quad (4.112)$$

Ένα έλιγμα αποτελείται από δύο αγωγούς έτσι, ο αριθμός των εν σειρά συνδεδεμένων ελιγμάτων σε μια φάση του τυλίγματος προκύπτει από την εξίσωση (4.113).

$$N_{ph} = \frac{N_{conductors\ per\ phase}}{2} = \frac{N_{conductors\ per\ stator\ slot} \cdot Q}{2 \cdot (N_{stator\ parallel\ branches} \cdot m)} \quad (4.113)$$

Η εξίσωση (4.113) επιλύεται ως προς την παράμετρο του αριθμού των αγωγών ανά αύλακα του στάτη $N_{conductors\ per\ stator\ slot}$ και λαμβάνει τη μορφή της εξίσωσης (4.114).

$$N_{conductors\ per\ stator\ slot} = \frac{2 \cdot N_{ph} \cdot (N_{stator\ parallel\ branches} \cdot m)}{Q} \quad (4.114)$$

Μετά από την αντικατάσταση της εξίσωσης (4.114) στην εξίσωση (4.111) αυτή λαμβάνει τη μορφή της εξίσωσης (4.115) η οποία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να υπολογισθεί ο συνολικός συντελεστής αυτεπαγωγής σκέδασης των αυλάκων μιας φάσης της περιέλιξης.

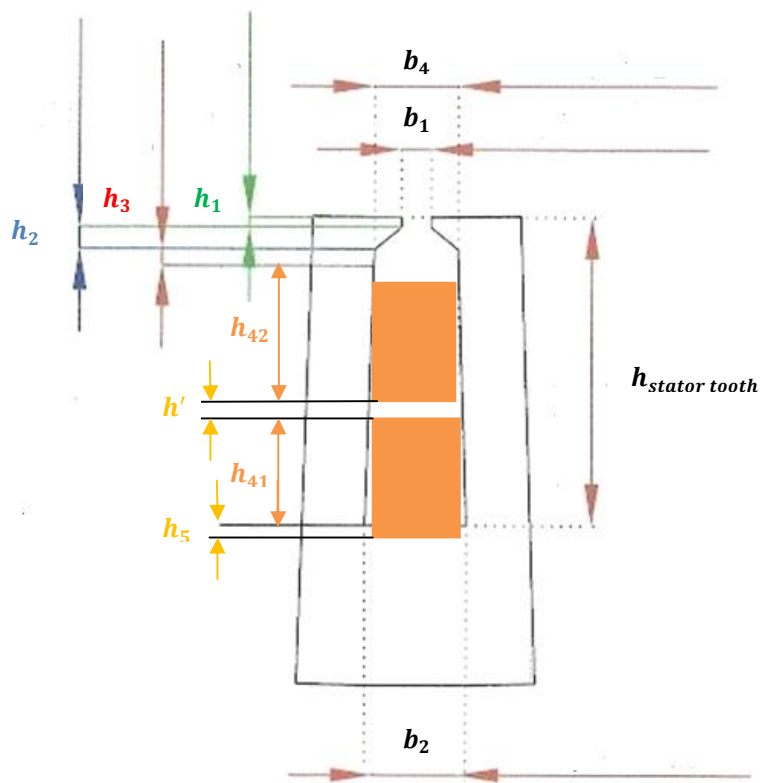
$$L_{slots\ leakage\ per\ phase} = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot \mu_o \cdot L_i \cdot N_{ph}^2 \cdot \lambda_{slot} \quad (4.115)$$

Για την παρούσα σχεδίαση η προτεινόμενη αύλακα διαθέτει το σχήμα και τις διαστάσεις που εμφανίζονται στο σχήμα 4.3. Σύμφωνα με αυτό θα διερευνηθεί η ροή σκέδασης της αύλακας για την περιέλιξη η οποία θα τοποθετηθεί σε δύο στρώσεις.

- Υπολογισμός της ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας της αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής λ_{slot} , της μαγνητικής αγωγιμότητας της ροής σκέδασης της αύλακας Λ_{slot} , του συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης της αύλακας $L_{slot\ leakage}$, και του συνολικού συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης των αυλάκων έκαστης φάσεως της περιέλιξης $L_{slots\ leakage\ per\ phase}$ για τύλιγμα διπλής στρώσης

Ο συντελεστής μαγνητικής διαπερατότητας για μια περιέλιξη διπλής στρώσης καθορίζεται με τον υπολογισμό της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου σκέδασης στην αύλακα σύμφωνα με την εξίσωση (4.95). Κατά τον υπολογισμό πρέπει να έχουμε υπόψιν ότι σε ορισμένες αύλακες υπάρχουν πλευρές πηνίων που ανήκουν σε διαφορετικές φάσεις.

Τα διαρρεύματα (current linkages) της κάτω και της άνω στρώσης του τυλίγματος θ_{Lower} και θ_{Upper} αυξάνουν αναλογικά ως προς το ύψος h . Για κάθε στρώση τα διαρρεύματα υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (4.116) και (4.117) αντίστοιχα οι οποίες



Σχήμα 4.3: Προτεινόμενη κωνική αύλακα γεννήτριας για τύλιγμα διπλής στρώσης με διαστάσεις

παρατίθενται στη συνέχεια. Σε κάθε περίπτωση το ύψος h μετριέται ξεχωριστά από το κάτω τμήμα κάθε πηνίου (έκαστης στρώσης).

$$\theta_{Lower}(h) = \frac{h}{h_{41}} \cdot \theta_{Lower} \quad (4.116)$$

$$\theta_{Upper}(h) = \theta_{Lower} + \frac{h}{h_{42}} \cdot \theta_{Upper} \quad (4.117)$$

Παρατηρείται ότι η αύλακα χωρίζεται σε τρία τμήματα:

1. Τμήμα σταθερού πλάτους ίσου με b_4

Αυτό απαρτίζεται από τα παρακάτω τμήματα:

- α) Τμήμα ύψους h_5 το οποίο εκτείνεται από τη μεγάλη βάση της αύλακας έως την αρχή του τυλίγματος της κάτω στρώσης (lower layer). Σε αυτό βρίσκονται τα μονωτικά υλικά που τοποθετούνται ανάμεσα στα τυλίγματα και τα ελάσματα των αυλάκων του στάτη ενώ, από αυτό δεν διέρχονται ρεύματα σύζευξης.
- β) Τμήμα ύψους h_{41} το οποίο εκτείνεται μετά από το τμήμα ύψους h_5 και περιλαμβάνει την αρχή του τυλίγματος της κάτω στρώσης έως και το διαχωριστήρα που τοποθετείται ανάμεσα στα τυλίγματα των δύο στρώσεων μέσα στην αύλακα. Σε αυτό βρίσκεται το τυλίγμα της κάτω στρώσης ενώ, από αυτό διέρχεται ρεύμα σύζευξης κάτω στρώσης $\theta_{Lower}(h)$ το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με το ύψος του σύμφωνα με την εξίσωση (4.116).
- γ) Τμήμα ύψους h' το οποίο είναι ο διαχωριστήρας, υφίσταται ανάμεσα στις δύο στρώσεις του τυλίγματος, αποτελείται από μονωτικό υλικό και μέσω αυτού διέρχεται ρεύμα σύζευξης ίσο με θ_{Lower} .
- δ) Τμήμα ύψους h_{42} το οποίο περιλαμβάνει το τυλίγμα άνω στρώσης της αύλακας και βρίσκεται μετά το διαχωριστήρα έως και το μονωτικό καπέλο που τοποθετείται για να κλείσει η αύλακα στο άνω μέρος της. Σύμφωνα με την εξίσωση (4.117) από αυτό διέρχεται όλο το ρεύμα σύζευξης $\theta_{Lower}(h)$ και το ρεύμα σύζευξης $\theta_{Upper}(h)$ το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με το ύψος του.
- ε) Τμήμα ύψους h_3 το οποίο είναι το μονωτικό καπέλο που έχει προαναφερθεί στο τμήμα δ) και από αυτό διέρχεται το συνολικό ρεύμα σύζευξης που εμπλέκει και τις δύο στρώσεις του τυλίγματος. Αυτό προκύπτει από το άθροισμα $\theta_{Lower} + \theta_{Upper}$.
2. Τμήμα μεταβλητού πλάτους με όρια μεταβολής από την τιμή πλάτους b_4 που είναι το πλάτος στην άνω βάση της αύλακας ακριβώς κάτω από τη σφήνα έως την τιμή b_1 που είναι το πλάτος του ανοίγματος της αύλακας. Το τμήμα αυτό διαθέτει ύψος h_2 , βρίσκεται στην περιοχή της σφήνας και από αυτό διέρχεται το συνολικό ρεύμα σύζευξης που εμπλέκει και τις δύο στρώσεις του τυλίγματος το οποίο προκύπτει από το άθροισμα $\theta_{Lower} + \theta_{Upper}$.
3. Τμήμα σταθερού πλάτους b_1 το οποίο βρίσκεται στην περιοχή του ανοίγματος της αύλακας, διαθέτει ύψος h_1 και από αυτό διέρχεται το συνολικό ρεύμα σύζευξης που εμπλέκει και τις δύο στρώσεις του τυλίγματος το οποίο προκύπτει από το άθροισμα $\theta_{Lower} + \theta_{Upper}$.

Η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου σκέδασης σε μια αύλακα υπολογίζεται σύμφωνα με τα προαναφερθέντα από τη σχέση (4.118).

$$W_{\varphi \text{ slot}} = W_{\varphi \text{ slot } b_4} + W_{\varphi \text{ slot } b_1} + W_{\varphi \text{ slot } b_4-b_1} \quad (4.118)$$

Επιπρόσθετα, τα διαρρεύματα της άνω και της κάτω στρώσης θ_{Upper} και θ_{Lower} αντίστοιχα είναι ίσα με το ήμισυ του συνολικού διαρρεύματος της αύλακας σύμφωνα με τη σχέση (4.119). Επομένως, τα τετράγωνα των διαρρευμάτων των στρώσεων υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση (4.120).

$$\theta_{Lower} = \theta_{Upper} = \frac{\theta_{slot}}{2} \quad (4.119)$$

$$\theta_{Lower}^2 = \theta_{Upper}^2 = \frac{\theta_{slot}^2}{4} \quad (4.120)$$

Μια περιέλιξη μπορεί να διαθέτει αύλακες στις οποίες οι πλευρές των πηνίων ανήκουν σε διαφορετικές φάσεις. Αν η διαφορά φάσης ανάμεσα στα ρεύματα των πηνίων της άνω και της κάτω στρώσης ισούται με γ τότε, το γινόμενο των διαρρευμάτων κάτω και άνω στρώσης $\theta_{Lower} \cdot \theta_{Upper}$ πρέπει να πολλαπλασιαστεί με την παράμετρο $\cos \gamma$. Ο όρος του γινομένου $\theta_{Lower} \cdot \theta_{Upper}$ αναπαριστά την αμοιβαία επίδραση των ρευμάτων της κάτω και της άνω στρώσης. Επειδή η διαφορά φάσης μπορεί να μεταβάλλεται από αύλακα σε αύλακα πρέπει να υπολογιστεί η μέση τιμή g που υφίσταται σε $2q$ πλευρές πηνίων. Αυτή η παράμετρος θα υπολογιστεί σύμφωνα με τη σχέση (4.121). Τότε το γινόμενο των διαρρευμάτων λαμβάνει τη μορφή της εξίσωσης (4.122) η οποία παρατίθεται παρακάτω.

$$g = \frac{1}{2q} \sum_{n=1}^{2q} \cos \gamma_n \quad (4.121)$$

$$\theta_{Lower} \cdot \theta_{Upper} = g \cdot \frac{\theta_{slot}}{2} \cdot \frac{\theta_{slot}}{2} = g \cdot \left(\frac{\theta_{slot}}{2} \right)^2 = g \cdot \frac{\theta_{slot}^2}{4} \quad (4.122)$$

Στα τυλίγματα διπλής στρώσης το ύψος των πλευρών των πηνίων κάθε στρώσης είναι ίσο και υπολογίζεται από τη σχέση (4.123).

$$h_{41} = h_{42} = \frac{h_4 - h'}{2} \quad (4.123)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η κάθε μια συνιστώσα της εξίσωσης (4.118) ξεχωριστά. Αρχικά θα υπολογιστεί η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου σκέδασης για την περιοχή της αύλακας η οποία διαθέτει πλάτος b_4 .

$$W_{\varphi \text{ slot } b_4} = \frac{1}{2} \mu_o L_i \cdot \frac{1}{b_4} \cdot \left\{ \begin{array}{l} 0^2 \int_0^{h_5} dh + \theta_{Lower}^2 \int_0^{h_{41}} \left(\frac{h}{h_{41}} \right)^2 dh + \theta_{Lower}^2 \int_0^{h'} dh \\ + \int_0^{h_{42}} \left[\theta_{Lower} + \theta_{Upper} \left(\frac{h}{h_{42}} \right) \right]^2 dh + (\theta_{Lower} + \theta_{Upper})^2 \int_0^{h_3} dh \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$W_{\varphi \text{ slot } b_4} = \frac{1}{2} \mu_o L_i \frac{1}{b_4} \cdot \left\{ \begin{array}{l} 0 + \theta_{Lower}^2 \cdot h_{41} \int_0^{h_{41}} \left(\frac{h}{h_{41}} \right)^2 d \left(\frac{h}{h_{41}} \right) + \theta_{Lower}^2 \cdot h' + \\ \left[\int_0^{h_{42}} \theta_{Lower}^2 dh + \int_0^{h_{42}} \theta_{Upper}^2 \left(\frac{h}{h_{42}} \right)^2 dh + \int_0^{h_{42}} 2 \cdot \theta_{Lower} \cdot \theta_{Upper} \left(\frac{h}{h_{42}} \right) dh \right] \\ + \left[\int_0^{h_3} \theta_{Lower}^2 dh + \int_0^{h_3} \theta_{Upper}^2 dh + \int_0^{h_3} 2 \cdot \theta_{Lower} \cdot \theta_{Upper} dh \right] \end{array} \right\}$$

$$W_{\varphi \text{ slot } b_4} = \frac{1}{2} \mu_o L_i \cdot \frac{1}{b_4} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \theta_{Lower}^2 \cdot h_{41} \left[\frac{\left(\frac{h}{h_{41}} \right)^3}{3} \right]_0^{h_{41}} + \theta_{Lower}^2 \cdot h' + \\ \left[\theta_{Lower}^2 \cdot h_{42} + \theta_{Upper}^2 \cdot h_{42} \left[\frac{\left(\frac{h}{h_{42}} \right)^3}{3} \right]_0^{h_{42}} + 2 \cdot \theta_{Lower} \cdot \theta_{Upper} \cdot h_{42} \left[\frac{\left(\frac{h}{h_{42}} \right)^2}{2} \right]_0^{h_{42}} \right] \\ + [\theta_{Lower}^2 \cdot h_3 + \theta_{Upper}^2 \cdot h_3 + 2 \cdot \theta_{Lower} \cdot \theta_{Upper} \cdot h_3] \end{array} \right\}$$

$$W_{\varphi \text{ slot } b_4} = \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \frac{1}{b_4} \cdot$$

$$\left\{ \theta_{Lower}^2 \cdot \frac{h_{41}}{3} + \theta_{Lower}^2 \cdot h' + \left[\theta_{Lower}^2 \cdot h_{42} + \theta_{Upper}^2 \cdot \frac{h_{42}}{3} + 2 \cdot \theta_{Lower} \cdot \theta_{Upper} \cdot \frac{h_{42}}{2} \right] \right\} \\ + [(\theta_{Lower}^2 + \theta_{Upper}^2 + 2 \cdot \theta_{Lower} \cdot \theta_{Upper}) \cdot h_3]$$

$$W_{\varphi \text{ slot } b_4} = \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \frac{1}{b_4} \cdot$$

$$\left\{ \theta_{Lower}^2 \cdot \left(\frac{h_{41}}{3} + h' + h_{42} + h_3 \right) + \theta_{Upper}^2 \cdot \left(\frac{h_{42}}{3} + h_3 \right) + \theta_{Lower} \cdot \theta_{Upper} \cdot (h_{42} + 2h_3) \right\}$$

Στην εξίσωση που προέκυψε παραπάνω αρχικά, πραγματοποιείται αντικατάσταση των τιμών των παραμέτρων σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.120) και (4.122) και στη συνέχεια αντικαθίσταται η τιμή της παραμέτρου που προκύπτει από την εξίσωση (4.123).

$$W_{\varphi \text{ slot } b_4} = \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \frac{1}{b_4} \cdot \left\{ \frac{\theta_{slot}^2}{4} \cdot \left(\frac{h_{41}}{3} + h' + h_{42} + h_3 \right) + \frac{\theta_{slot}^2}{4} \cdot \left(\frac{h_{42}}{3} + h_3 \right) + g \cdot \frac{\theta_{slot}^2}{4} \cdot (h_{42} + 2h_3) \right\} \Rightarrow$$

$$W_{\varphi \text{ slot } b_4} = \frac{1}{2} \mu_o L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left\{ \left(\frac{h_{41}}{12 \cdot b_4} + \frac{h'}{4 \cdot b_4} + \frac{h_{42}}{4 \cdot b_4} + \frac{h_3}{4 \cdot b_4} \right) + \left(\frac{h_{42}}{12 \cdot b_4} + \frac{h_3}{4 \cdot b_4} \right) + g \cdot \left(\frac{h_{42}}{4 \cdot b_4} + \frac{2h_3}{4 \cdot b_4} \right) \right\} \Rightarrow$$

$$W_{\varphi \text{ slot } b_4} = \frac{1}{2} \mu_o L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left\{ \left(\frac{h_{41}}{12 \cdot b_4} + \frac{h'}{4 \cdot b_4} + \frac{h_{42}}{4 \cdot b_4} + \frac{h_3}{4 \cdot b_4} \right) + \left(\frac{h_{42}}{12 \cdot b_4} + \frac{h_3}{4 \cdot b_4} \right) + g \cdot \left(\frac{h_{42}}{4 \cdot b_4} + \frac{2h_3}{4 \cdot b_4} \right) \right\} \Rightarrow$$

$$W_{\varphi \text{ slot } b_4} = \frac{1}{2} \mu_o L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left\{ \left(\frac{h_{41}}{12 \cdot b_4} + \frac{h'}{4 \cdot b_4} + \frac{h_{42}}{4 \cdot b_4} + \frac{h_3}{4 \cdot b_4} \right) + \left(\frac{h_{42}}{12 \cdot b_4} + \frac{h_3}{4 \cdot b_4} \right) + g \cdot \left(\frac{h_{42}}{4 \cdot b_4} + \frac{2h_3}{4 \cdot b_4} \right) \right\} \Rightarrow$$

$$W_{\varphi \text{ slot } b_4} = \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left(\frac{h_{41}}{12 \cdot b_4} + \frac{h'}{4 \cdot b_4} + \frac{3 \cdot h_{42}}{12 \cdot b_4} + \frac{h_{42}}{12 \cdot b_4} + \frac{2 \cdot h_3}{4 \cdot b_4} + \frac{3g \cdot h_{42}}{12 \cdot b_4} + \frac{2g \cdot h_3}{4 \cdot b_4} \right) \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}
W_{\varphi \text{ slot } b_4} &= \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left(\frac{h_{41}}{12 \cdot b_4} + \frac{4 \cdot h_{42}}{12 \cdot b_4} + \frac{3g \cdot h_{42}}{12 \cdot b_4} + 2 \cdot (g + 1) \cdot \frac{h_3}{4 \cdot b_4} + \frac{h'}{4 \cdot b_4} \right) \Rightarrow \\
W_{\varphi \text{ slot } b_4} &= \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left(h_{41} \cdot \frac{1}{12 \cdot b_4} + h_{42} \cdot \frac{4}{12 \cdot b_4} + h_{42} \cdot \frac{3g}{12 \cdot b_4} + \frac{(1 + g)}{2} \cdot \frac{h_3}{b_4} + \frac{h'}{4 \cdot b_4} \right) \Rightarrow \\
W_{\varphi \text{ slot } b_4} &= \frac{1}{2} \mu_o L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left(\frac{h_4 - h'}{2} \cdot \frac{1}{12 \cdot b_4} + \frac{h_4 - h'}{2} \cdot \frac{4}{12 \cdot b_4} + \frac{h_4 - h'}{2} \cdot \frac{3g}{12 \cdot b_4} + \frac{(1 + g)}{2} \cdot \frac{h_3}{b_4} + \frac{h'}{4 \cdot b_4} \right) \Rightarrow \\
W_{\varphi \text{ slot } b_4} &= \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left[\frac{(5 + 3g)}{8} \cdot \frac{(h_4 - h')}{3 \cdot b_4} + \frac{(1 + g)}{2} \cdot \frac{h_3}{b_4} + \frac{h'}{4 \cdot b_4} \right] \quad (4.124)
\end{aligned}$$

Η ίδια διαδικασία θα εφαρμοστεί για τον υπολογισμό της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου σκέδασης της αύλακας για την περιοχή του ανοίγματος της το οποίο διαθέτει πλάτος b_1 .

$$\begin{aligned}
W_{\varphi \text{ slot } b_1} &= \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \frac{1}{b_1} \cdot \left\{ (\theta_{Lower} + \theta_{Upper})^2 \int_0^{h_1} dh \right\} \Rightarrow \\
W_{\varphi \text{ slot } b_1} &= \frac{1}{2} \mu_o L_i \frac{1}{b_1} \cdot \left[\int_0^{h_1} \theta_{Lower}^2 dh + \int_0^{h_1} \theta_{Upper}^2 dh + \int_0^{h_1} 2 \cdot \theta_{Lower} \cdot \theta_{Upper} dh \right] \Rightarrow \\
W_{\varphi \text{ slot } b_1} &= \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \frac{1}{b_1} \cdot [(\theta_{Lower}^2 \cdot h_1 + \theta_{Upper}^2 \cdot h_1 + 2 \cdot \theta_{Lower} \cdot \theta_{Upper} \cdot h_1)] \Rightarrow
\end{aligned}$$

Για να προκύψει η τελική μορφή της εξίσωσης αντικαθίστανται και σε αυτή οι τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων (4.120) και (4.122).

$$\begin{aligned}
W_{\varphi \text{ slot } b_1} &= \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \frac{1}{b_1} \cdot \left[\left(\frac{\theta_{slot}^2}{4} + \frac{\theta_{slot}^2}{4} + 2g \cdot \frac{\theta_{slot}^2}{4} \right) \cdot h_1 \right] \Rightarrow \\
W_{\varphi \text{ slot } b_1} &= \frac{1}{2} \mu_o L_i \frac{1}{b_1} \cdot \frac{\theta_{slot}^2}{4} \cdot [(1 + 1 + 2g) \cdot h_1] = \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left[\frac{2}{4} \cdot (1 + g) \cdot \frac{h_1}{b_1} \right] \Rightarrow \\
W_{\varphi \text{ slot } b_1} &= \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left[\frac{(1 + g)}{2} \cdot \frac{h_1}{b_1} \right] \quad (4.125)
\end{aligned}$$

Για εκείνες τις περιοχές που βρίσκονται μέσα στην αύλακα πάνω από το τμήμα που καταλαμβάνετε από τους αγωγούς στην περίπτωση που οι πλευρές της αύλακας δεν είναι μεταξύ τους παράλληλες πρέπει να υιοθετηθεί διαφορετική διαδικασία. Σε αυτή

την κατηγορία περιοχών ανήκει η περιοχή της σφήνας. Αυτή θα αντικατασταθεί με μια ισοδύναμη περιοχή η οποία θα διαθέτει παράλληλες πλευρές ενώ, το πλάτος της θα εκτιμηθεί ως το μέσο των τιμών της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής του. Σε αυτή την περίπτωση για την λεπτυνόμενη τραπεζοειδή περιοχή της σφήνας λαμβάνεται ως ακριβής σχέση υπολογισμού της ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας της αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής η σχέση (4.126) .

$$\lambda_{slot\ b_4-b_1} = \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln\left(\frac{b_4}{b_1}\right) \quad (4.126)$$

$$W_{\varphi\ slot\ b_4-b_1} = \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \left\{ (\theta_{Lower} + \theta_{Upper})^2 \int_{b_1}^{b_4} h_2 db \right\} \Rightarrow$$

$$W_{\varphi\ slot\ b_4-b_1} = \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \left\{ (\theta_{Lower}^2 + \theta_{Upper}^2 + 2 \cdot \theta_{Lower} \cdot \theta_{Upper}) \cdot \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln\left(\frac{b_4}{b_1}\right) \right\} \Rightarrow$$

Μετά από την αντικατάσταση των παραμέτρων των εξισώσεων (4.120) και (4.122) στην ανωτέρω εξίσωση προκύπτει η τελική της μορφή.

$$W_{\varphi\ slot\ b_4-b_1} = \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \left\{ \left(\frac{\theta_{slot}^2}{4} + \frac{\theta_{slot}^2}{4} + 2g \cdot \frac{\theta_{slot}^2}{4} \right) \cdot \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln\left(\frac{b_4}{b_1}\right) \right\} \Rightarrow$$

$$W_{\varphi\ slot\ b_4-b_1} = \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \left\{ \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + 2g \cdot \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln\left(\frac{b_4}{b_1}\right) \right\} \Rightarrow$$

$$W_{\varphi\ slot\ b_4-b_1} = \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \left\{ \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + 2g \cdot \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln\left(\frac{b_4}{b_1}\right) \right\} \Rightarrow$$

$$W_{\varphi\ slot\ b_4-b_1} = \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \left\{ \frac{(1+g)}{2} \cdot \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln\left(\frac{b_4}{b_1}\right) \right\} \quad (4.127)$$

Αντικαθιστώντας τις συνιστώσες (4.124), (4.125) και (4.127) στην εξίσωση (4.118) προκύπτει η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου σκέδασης σε μια αύλακα.

$$W_{\varphi\ slot} = \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left[\frac{(5+3g)}{8} \cdot \frac{(h_4 - h')}{3 \cdot b_4} + \frac{(1+g)}{2} \cdot \frac{h_3}{b_4} + \frac{h'}{4 \cdot b_4} \right] +$$

$$+ \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left[\frac{(1+g)}{2} \cdot \frac{h_1}{b_1} \right] + \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \left\{ \frac{(1+g)}{2} \cdot \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln\left(\frac{b_4}{b_1}\right) \right\} \Rightarrow$$

$$W_{\varphi slot} = \frac{1}{2} \mu_o L_i \theta_{slot}^2 \left\{ \frac{(5+3g) \cdot (h_4 - h')}{8 \cdot 3 \cdot b_4} + \frac{(1+g) \cdot h_3}{2 \cdot b_4} + \frac{h'}{4 \cdot b_4} + \left[\frac{(1+g) \cdot h_1}{2 \cdot b_1} \right] + \right. \\ \left. + \frac{(1+g) \cdot h_2}{2 \cdot b_4 - b_1} \cdot \ln\left(\frac{b_4}{b_1}\right) \right\} \Rightarrow$$

$$W_{\varphi slot} = \frac{1}{2} \mu_o L_i \cdot \theta_{slot}^2 \left\{ \frac{(5+3g) \cdot (h_4 - h')}{8 \cdot 3 \cdot b_4} + \frac{(1+g) \cdot \left[\frac{h_3}{b_4} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln\left(\frac{b_4}{b_1}\right) \right]}{2} \right. \\ \left. + \frac{h'}{4 \cdot b_4} \right\} \Rightarrow$$

$$W_{\varphi slot} = \frac{1}{2} \mu_o L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left\{ \frac{(5+3g) \cdot (h_4 - h')}{8 \cdot 3 \cdot b_4} + \frac{(1+g) \cdot \left[\frac{h_3}{b_4} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln\left(\frac{b_4}{b_1}\right) \right]}{2} + \frac{h'}{4 \cdot b_4} \right\}$$

Στη σχέση που προκύπτει γίνεται αντικατάσταση των τιμών από τις σχέσεις (4.128) και (4.129) που παρατίθενται παρακάτω έτσι ώστε να προκύψει η τελική της μορφή η οποία είναι η σχέση (4.130).

$$k_1 = \frac{(5+3g)}{8} \quad (4.128)$$

$$k_2 = \frac{(1+g)}{2} \quad (4.129)$$

$$W_{\varphi slot} = \frac{1}{2} \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \left\{ k_1 \cdot \frac{(h_4 - h')}{3 \cdot b_4} + k_2 \cdot \left[\frac{h_3}{b_4} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln\left(\frac{b_4}{b_1}\right) \right] + \frac{h'}{4 \cdot b_4} \right\} \quad (4.130)$$

Η συνολική μαγνητική ενέργεια που αποθηκεύεται στην προτεινόμενη αύλακα προκύπτει από τη σχέση (4.131). Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (4.130) προκύπτει ότι η ειδική μαγνητική αγωγιμότητα της προτεινόμενης αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής υπολογίζεται από τη σχέση (4.132)

$$W_{\varphi slot} = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot L_i \cdot \theta_{slot}^2 \cdot \lambda_{slot} \quad (4.131)$$

$$\lambda_{slot} = k_1 \cdot \frac{(h_4 - h')}{3 \cdot b_4} + k_2 \cdot \left[\frac{h_3}{b_4} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln\left(\frac{b_4}{b_1}\right) \right] + \frac{h'}{4 \cdot b_4} \quad (4.132)$$

Οι εξισώσεις (4.130) και (4.132) ισχύουν και για τυλίγματα μιας στρώσης. Σε αυτή την περίπτωση επειδή δεν υπάρχει διαχωριστήρας ανάμεσα στις δύο στρώσεις ισχύει ότι $h' = 0$ ενώ, για τους συντελεστές ισχύει $k_1 = k_2 = 1$. Οι συντελεστές k_1 και k_2 υπολογίζονται με τη χρήση της παραμέτρου σμίκρυνσης βήματος ε η οποία προκύπτει από την εξίσωση (4.133). Η σχέση (4.133) μπορεί να επιλυθεί ως προς την παράμετρο W και

$$\varepsilon = \varepsilon_{short\ pitching\ parameter} = 1 - \frac{W}{\tau_p} \quad (4.133)$$

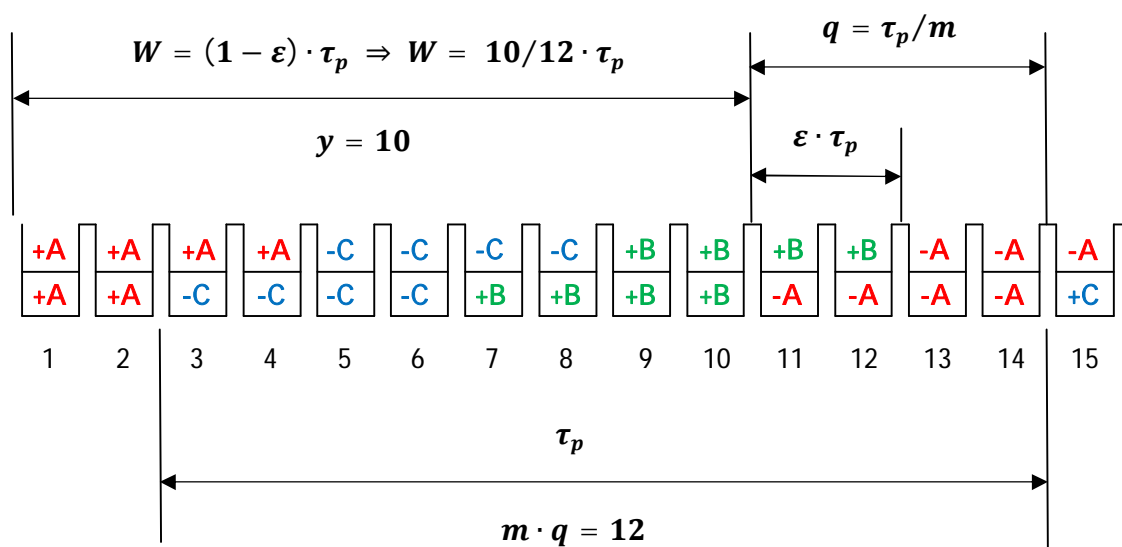
όπου : W είναι το μέσο άνοιγμα του πηνίου μετρούμενο σε m

τ_p είναι το πολικό βήμα μετρούμενο σε m (υπολογίστηκε από τη σχέση (4.16))

λαμβάνει τη μορφή της εξίσωσης (4.134) από την οποία υπολογίζεται το μέσο άνοιγμα του πηνίου ή της ομάδας.

$$W = (1 - \varepsilon) \cdot \tau_p \quad (4.134)$$

Μέσα σε μια ζώνη υφίστανται $q = \tau_p/m$ αύλακες (αύλακες ανά πόλο και φάση) εκ των οποίων $\varepsilon \cdot \tau_p$ είναι οι αύλακες στις στρώσεις των οποίων οι πλευρές των πηνίων που τοποθετούνται ανήκουν σε διαφορετικές φάσεις και $[(\tau_p/m) - \varepsilon \cdot \tau_p]$ είναι οι εναπομείνουσες αύλακες στις στρώσεις των οποίων οι πλευρές των πηνίων που τοποθετούνται ανήκουν στην ίδια φάση. Στο σχήμα 4.4 παρατίθεται το τμήμα του αναπτύγματος της τριφασικής περιέλιξης διπλής στρώσης της προτεινόμενης σχεδίασης της γεννήτριας. Οι τιμές των παραμέτρων Q , q και m που αναφέρονται έχουν προσδιοριστεί στην ενότητα 4.3 του παρόντος κεφαλαίου.



Σχήμα 4.4: Τμήμα του αναπτύγματος τριφασικής περιέλιξης διπλής στρώσης της προτεινόμενης σχεδίασης της γεννήτριας. $Q = 120$ αύλακες, $q = 4$ αύλακες ανά πόλο και φάση, $m = 3$ φάσεις, $W = 10/12 \cdot \tau_p$ μέσο άνοιγμα του πηνίου, $W \tau_p \text{ ratio} = W/\tau_p = 10/12$, $\varepsilon = \varepsilon_{short \text{ pitching parameter}} = 2/12 \cdot \tau_p$ παράμετρος σμίκρυνσης βήματος, $y = 10$ βήμα της περιέλιξης

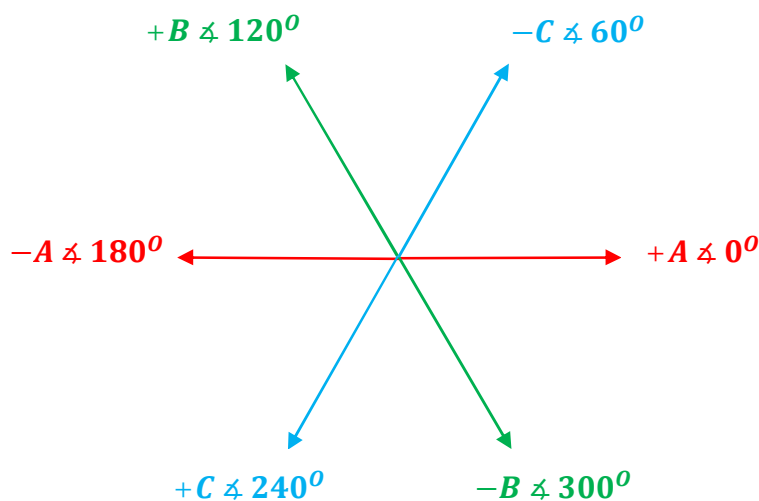
Επιπρόσθετα, η τιμή του πολικού βήματος μετρούμενη σε αύλακες υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.134α), προκύπτει ίση με $\tau_p = 12$ αύλακες και παρατίθεται στο σχήμα 4.4.

$$\tau_p = m \cdot q \quad (4.134\alpha)$$

- Υπολογισμός της παραμέτρου g

Επειδή από το τυλίγμα που προτείνεται προκύπτει ότι η διαφορά φάσης μπορεί να μεταβάλλεται από αύλακα σε αύλακα πρέπει να υπολογιστεί η μέση τιμή g που υφίσταται σε 2 q πλευρές πηνίων σύμφωνα με την εξίσωση (4.121).

Εάν τα τμήματα των πηνίων στις στρώσεις των αυλάκων ανήκουν σε διαφορετικές φάσεις ή στην ίδια φάση τότε η διαφορά φάσης των ρευμάτων από τα οποία διαρρέονται θα προκύψει από το διανυσματικό διάγραμμα με το οποίο αναπαρίστανται οι εισαγωγές και οι εξαγωγές των ρευμάτων ανά αύλακα και ανά στρώση αυτής και αναπαρίσταται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Διανυσματικό διάγραμμα εισαγωγών και εξαγωγών των ρευμάτων στα τυλίγματα τριφασικής περιέλιξης.

Σύμφωνα με το σχήμα 4.4 για τη σχεδίαση μας διακρίνονται οι αύλακες 1 και 2 οι οποίες και στις δύο στρώσεις τους εφοδιάζονται με τυλίγματα που ανήκουν στην ίδια φάση **+A** και οι αύλακες 13 και 14 οι οποίες και στις δύο στρώσεις τους εφοδιάζονται με τυλίγματα που ανήκουν στην ίδια φάση **-A**. Η διαφορά φάσης για τις αύλακες υπ' αριθμόν 1 και 2 υπολογίζεται και προκύπτει ίση με 0° . Δηλαδή για κάθε μια από αυτές ισχύει ότι η διαφορά φάσης των ρευμάτων στις δύο στρώσεις τους είναι $\Delta\varphi = \varphi_{\text{άνω στρώσης}}(+A) - \varphi_{\text{κάτω στρώσης}}(+A) = 0^\circ - 0^\circ = 0^\circ$. Όμοιο αποτέλεσμα προκύπτει για τις αύλακες υπ' αριθμόν 13 και 14 $\Delta\varphi = \varphi_{\text{άνω στρώσης}}(-A) - \varphi_{\text{κάτω στρώσης}}(-A) = 180^\circ - 180^\circ = 0^\circ$. Το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει για οποιοδήποτε συνδυασμό άνω και κάτω στρώσης στην ίδια αύλακα υπό την προϋπόθεση ότι σε αυτές τοποθετούνται τυλίγματα που ανήκουν στην ίδια φάση (+A, -A, +B, -B, +C, -C).

Έπειτα, εξετάζονται οι αύλακες υπ' αριθμόν 3 και 4 στις οποίες στην άνω στρώση έχουν τοποθετηθεί πηνία που ανήκουν στη φάση **+A** ενώ, στην κάτω στρώση τοποθετούνται πηνία που ανήκουν στη φάση **-C**. Η διαφορά φάσης των ρευμάτων που διέρχονται από τα πηνία στις δύο στρώσεις τους είναι $\Delta\varphi = \varphi_{\text{άνω στρώσης}}(+A) -$

$\varphi_{\text{κάτω στρώσης}}(-C) = 0^\circ - 60^\circ = -60^\circ$. Τελευταίες εξετάζονται οι αύλακες υπ' αριθμόν 11 και 12 στις οποίες στην άνω στρώση έχουν τοποθετηθεί πηνία που ανήκουν στη φάση **+B** ενώ, στην κάτω στρώση τοποθετούνται πηνία που ανήκουν στη φάση **-A**. Υπολογίζεται η διαφορά φάσης των ρευμάτων που διέρχονται από τα πηνία στις δύο στρώσεις η οποία προκύπτει ίση με: $\Delta\varphi = \varphi_{\text{άνω στρώσης}}(+B) - \varphi_{\text{κάτω στρώσης}}(-A) = 120^\circ - 180^\circ = -60^\circ$. Το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει για οποιοδήποτε συνδυασμό άνω και κάτω στρώσης στην ίδια αύλακα για τριφασικά τυλίγματα.

Συμπέρασμα 1° : Σε μια τριφασική περιέλιξη ($m = 3$) η διαφορά φάσης των ρευμάτων που διαρρέουν τις πλευρές των πηνίων της άνω και κάτω στρώσης μιας αύλακας που ανήκουν στην ίδια φάση προκύπτει ίση με $\Delta\varphi = 0^\circ$ επομένως, ισχύει ότι $\cos \gamma_n = 1$.

Συμπέρασμα 2° : Σε μια τριφασική περιέλιξη ($m = 3$) η διαφορά φάσης των ρευμάτων που διαρρέουν τις πλευρές των πηνίων της άνω και κάτω στρώσης μιας αύλακας που ανήκουν σε διαφορετικές φάσεις προκύπτει ίση με $\Delta\varphi = 60^\circ$ ή $\Delta\varphi = -60^\circ$. Ακόμα, επειδή ισχύει ότι $\cos \theta = \cos(-\theta)$ πάντα ισχύει ότι $\cos \gamma_n = 0,5$.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή της παραμέτρου g σύμφωνα με όσα παρατίθενται παραπάνω.

$$g = \frac{1}{2q} \sum_{n=1}^{2q} \cos \gamma_n = \frac{1}{2q} [(2 \text{ στρώσεις} \cdot \varepsilon \cdot \tau_p \cdot \cos 60^\circ) + 2 \text{ στρώσεις} \cdot (q - \varepsilon \cdot \tau_p)] \cdot \cos 0^\circ \Rightarrow$$

όπου : $q = \tau_p/m$ είναι οι αύλακες ανά πόλο και φάση δηλαδή είναι οι αύλακες που ανήκουν σε μια ζώνη

τ_p είναι το πολικό βήμα μετρούμενο σε m (υπολογίστηκε από τη σχέση (4.16))

m είναι ο αριθμός των φάσεων.

$\varepsilon \cdot \tau_p$ είναι οι αύλακες στις στρώσεις των οποίων οι πλευρές των πηνίων που τοποθετούνται ανήκουν σε διαφορετικές φάσεις

$(q - \varepsilon \cdot \tau_p)$ είναι οι εναπομείναντες αύλακες στις στρώσεις των οποίων οι πλευρές των πηνίων που τοποθετούνται ανήκουν στην ίδια φάση

$$g = \frac{1}{2 \cdot \frac{\tau_p}{3}} \cdot 2 \text{ στρώσεις} \cdot \left[\left(\varepsilon \cdot \tau_p \cdot \frac{1}{2} \right) + \left(\frac{\tau_p}{3} - \varepsilon \cdot \tau_p \right) \cdot 1 \right] = \frac{1}{\tau_p} \cdot \frac{\tau_p}{3} \cdot \left[\left(3 \cdot \varepsilon \cdot \frac{1}{2} \right) + (1 - 3 \cdot \varepsilon) \right] \Rightarrow$$

$$g = \left(\frac{3}{2} \cdot \varepsilon + 1 - \frac{6}{2} \cdot \varepsilon \right) \Rightarrow$$

$$g = \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \varepsilon \right) \quad (4.134)$$

Γίνετε αντιληπτό ότι απαιτείται ο προσδιορισμός της παραμέτρου ε η οποία είναι η παράμετρος σμίκρυνσης βήματος. Σύμφωνα με το σχήμα 4.3, το μέσο άνοιγμα του πηνίου είναι $W = 10/12 \cdot \tau_p$ δηλαδή προέκυψε ίσο με $W = 5/6 \cdot \tau_p$ ενώ, ο λόγος του μέσου ανοίγματος του πηνίου προς το πολικό βήμα προκύπτει ίσος με $W/\tau_p = 5/6$. Από

την εφαρμογή της εξίσωσης (4.133) υπολογίζεται η παράμετρος σμίκρυνσης του βήματος.

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon = 1 - \frac{W}{\tau_p} \\ \frac{W}{\tau_p} = \frac{5}{6} \end{array} \right\} \Rightarrow \varepsilon = \frac{1}{6}$$

Έπειτα, υπολογίζεται η παράμετρος g για τη σχεδίαση μας σύμφωνα με την εξίσωση (4.134) ενώ, οι σταθερές k_1 και k_2 υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (4.128) και (4.129).

$$\left. \begin{array}{l} g = \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \varepsilon\right) \\ \varepsilon = \frac{1}{6} \end{array} \right\} \Rightarrow g = 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{6} = 1 - \frac{3}{12} \Rightarrow g = \frac{3}{4} = 0,75$$

$$\left. \begin{array}{l} k_1 = \frac{(5 + 3g)}{8} \\ g = \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \varepsilon\right) \end{array} \right\} \Rightarrow k_1 = \frac{\left[5 + 3 \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \varepsilon\right)\right]}{8} = \frac{\left(5 + 3 - \frac{9}{2} \cdot \varepsilon\right)}{8} = \frac{\left(8 - \frac{9}{2} \cdot \varepsilon\right)}{8} \Rightarrow$$

$$k_1 = \frac{8 \cdot \left(1 - \frac{9}{16} \cdot \varepsilon\right)}{8} \Rightarrow k_1 = \left(1 - \frac{9}{16} \cdot \varepsilon\right)$$

$$\left. \begin{array}{l} k_2 = \frac{(1 + g)}{2} \\ g = \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \varepsilon\right) \end{array} \right\} \Rightarrow k_2 = \frac{\left[1 + \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \varepsilon\right)\right]}{2} = \frac{\left(2 - \frac{3}{2} \cdot \varepsilon\right)}{2} = \frac{2 \cdot \left(1 - \frac{3}{4} \cdot \varepsilon\right)}{2} \Rightarrow$$

$$k_2 = \left(1 - \frac{3}{4} \cdot \varepsilon\right)$$

Οπότε, οι σταθερές k_1 και k_2 μετά την αντικατάσταση της παραμέτρου σμίκρυνσης του βήματος λαμβάνουν τις τιμές

$$\left. \begin{array}{l} k_1 = \left(1 - \frac{9}{16} \cdot \varepsilon\right) \\ k_2 = \left(1 - \frac{3}{4} \cdot \varepsilon\right) \\ \varepsilon = \frac{1}{6} \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} k_1 = \left(1 - \frac{9}{16} \cdot \frac{1}{6}\right) \\ k_2 = \left(1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{6}\right) \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} k_1 = \left(1 - \frac{9}{96}\right) \\ k_2 = \left(1 - \frac{3}{24}\right) \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} k_1 = \left(1 - \frac{3}{32}\right) \\ k_2 = \left(1 - \frac{1}{8}\right) \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{29}{32} \\ k_2 &= \frac{7}{8} \end{aligned} \right\}$$

Συνεπώς, για τη σχεδίαση της τριφασικής γεννήτριας που εξετάζεται η σχέση (4.132) μετά την αντικατάσταση των παραμέτρων k_1 και k_2 λαμβάνει τη μορφή της σχέσης (4.135) από την οποία προκύπτει η ειδική μαγνητική αγωγιμότητα της προτεινόμενης αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής.

$$\lambda_{slot} = \frac{29}{32} \cdot \frac{(h_4 - h')}{3 \cdot b_4} + \frac{7}{8} \cdot \left[\frac{h_3}{b_4} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln \left(\frac{b_4}{b_1} \right) \right] + \frac{h'}{4 \cdot b_4} \quad (4.135)$$

Για να υπολογιστεί η τιμή της ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας της προτεινόμενης αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής λ_{slot} αντικαθίστανται οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων σε αυτή. Αυτές έχουν ήδη υπολογιστεί και παρατίθενται συνοπτικά στον πίνακα 4.1.

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{slot} &= \frac{29}{32} \cdot \frac{(h_4 - h')}{3 \cdot b_4} + \frac{7}{8} \cdot \left[\frac{h_3}{b_4} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln \left(\frac{b_4}{b_1} \right) \right] + \frac{h'}{4 \cdot b_4} \\ h_4 &= 45,35 \text{ mm} \\ h' &= 0,35 \text{ mm} \\ b_{stator \text{ slot upper base } b_4} &= 13,21 \text{ mm} \\ h_3 &= 3,15 \text{ mm} \\ h_1 &= 3 \text{ mm} \\ b_{stator \text{ slot opening } b_1} &= 7 \text{ mm} \\ h_2 &= 5 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \lambda_{slot} = 2,067$$

Επειδή η παράμετρος λ_{slot} λαμβάνεται από αναλογίες, αυτή δεν επηρεάζεται από τις μονάδες μέτρησης (εδώ χιλιοστά) στις οποίες έχουν υπολογιστεί οι μεταβλητές του ύψους των διαφόρων τμημάτων της αύλακας h και του πλάτους που υφίσταται στα διάφορα σημεία της αύλακας b .

Για να υπολογισθεί η μαγνητική αγωγιμότητα σκέδασης της προτεινόμενης αύλακας Λ_{slot} πρέπει η τιμή της ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας της αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής λ_{slot} να πολλαπλασιαστεί με τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού μ_o και το ενεργό μήκος του πυρήνα της μηχανής L_i σύμφωνα με τη σχέση (4.136). Η τιμή της συνολικής μαγνητικής αγωγιμότητας σκέδασης της αύλακας έχει μονάδες μέτρησης *Henry* και προκύπτει ίση με $\Lambda_{slot} = 1,279 \mu H$.

$$\Lambda_{slot} = \mu_o \cdot L_i \cdot \lambda_{slot} \quad (4.136)$$

Για να υπολογισθεί η τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης της αύλακας χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (4.137) και (4.138). Αυτή προκύπτει ίση με $L_{slot \text{ leakage}} = 0,020464 \text{ mH}$.

$$L_{slot \text{ leakage}} = \mu_o \cdot L_i \cdot N_{conductors \text{ per stator slot}}^2 \cdot \lambda_{slot} \quad (4.137)$$

$$L_{slot\ leakage} = N_{conductors\ per\ stator\ slot}^2 \cdot \Lambda_{slot} \quad (4.138)$$

Ο υπολογισμός του συνολικού συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης των αυλάκων μιας φάσης της περιέλιξης πραγματοποιείται από τη σχέση (4.115) η οποία περαιτέρω λαμβάνει και τη μορφή της σχέσης (4.139). Ο συντελεστής αυτός προκύπτει ίσος με $L_{slots\ leakage\ per\ phase} = 32,742\ \mu H$.

$$L_{slots\ leakage\ per\ phase} = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot \mu_o \cdot L_i \cdot N_{ph}^2 \cdot \lambda_{slot} = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot N_{ph}^2 \cdot \Lambda_{slot} \quad (4.139)$$

4.3.6 Υπολογισμός της ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας $\lambda_{overhang}$ και του συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης $L_{overhang\ leakage}$ των κεφαλών του τυλίγματος του στάτη

Οι υπολογισμοί των παραμέτρων αυτών πραγματοποιούνται σύμφωνα με όσα παρατίθενται στην παράγραφο 2.5.5 του 2^{ου} κεφαλαίου που αναφέρεται στη ροή σκέδασης. Συγκεκριμένα, μας ενδιαφέρει η 5^η περίπτωση που αναφέρεται στον υπολογισμό της ροής σκέδασης των κεφαλών του τυλίγματος (μετωπικές συνδέσεις). Σύμφωνα με αυτή το πρόβλημα της σκέδασης των μετωπικών συνδέσεων του τυλίγματος δεν αντιμετωπίζεται με την εφαρμογή θεωρητικών μεθόδων, διότι αυτές αποτυγχάνουν πλήρως στην επίλυση του. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται απλοί εμπειρικοί μαθηματικοί τύποι ενώ, η σκέδαση πρέπει να σχετισθεί με κάποιο τρόπο με το μήκος των μετωπικών συνδέσεων των τυλιγμάτων και τα σχήματα τους, τους τύπους των τυλιγμάτων, την απόσταση μεταξύ των άκρων της περιέλιξης του στάτη και του δρομέα, και την εγγύτητα των μαγνητικών περιβλημάτων. Προκειμένου αυτό να επιτευχθεί χρησιμοποιείται η εξίσωση (2.64) η οποία λαμβάνει τη μορφή της εξίσωσης (4.140).

$$L_{overhang\ leakage} \cdot \lambda_{over\ hang} = K_{slot\ leakage} \cdot \tau_p^2 / \pi \cdot \tau_s \quad (4.140)$$

όπου η παράμετρος $K_{slot\ leakage}$ αποτελεί το συντελεστή σκέδασης αύλακας, ο οποίος εξαρτάται από το λόγο (εύρος πηνίου / πολικό βήμα) (coil span / pole pitch) και θα υπολογιστεί από τη γραφική παράσταση του σχήματος 2.25.α, η παράμετρος $Y = \tau_p = 0.3911\ m$ είναι το πολικό βήμα και η παράμετρος $y_s = \tau_s = 0.0326\ m$ είναι το βήμα της αύλακας τα οποία έχουν ήδη υπολογιστεί.

▪ Υπολογισμός του συντελεστή σκέδασης της αύλακας $K_{slot\ leakage}$

Η παράμετρος του εύρους του πηνίου ταυτίζεται με την παράμετρο του βήματος του πηνίου ($W = y$) το οποίο για τη σχεδίαση μας εμφανίζεται στο σχέδιο 4.4 και προκύπτει ίσο με $y = 10$ αύλακες. Το πολικό βήμα έχει ήδη υπολογιστεί από τη σχέση (4.16) και προέκυψε ίσο με $Y = \tau_p = 0,3911\ m$. Επιπρόσθετα το πολικό βήμα μετρούμενο σε αύλακες εμφανίζεται στο σχήμα 4.4 $\tau_p = m \cdot q = 3 \cdot 4 \Rightarrow \tau_p = 12$ αύλακες. Συνεπώς όπως εμφανίζεται και στο σχήμα 4.4 ισχύει ότι :

$$\frac{W}{\tau_p} = \frac{y}{\tau_p} = \frac{10}{12} \Rightarrow \frac{W}{\tau_p} = \frac{5}{6} \Rightarrow \frac{W}{\tau_p} \approx 0,83333$$

Ορισμός 1: Μια ομάδα διαδοχικών αυλάκων που ανήκει σε μια φάση και βρίσκεται κάτω από ένα ζεύγος πόλων ονομάζεται ζώνη φάσης (phase belt).

Ορισμός 2: Η γωνία κάτω από την οποία βρίσκεται μια ζώνη φάσης ονομάζεται εύρος φάσης (phase spread).

Σύμφωνα με τους ορισμούς που παρατίθενται παραπάνω η περιέλιξη του στάτη πρέπει να χωριστεί σε στοιχειώδη τμήματα. Κάθε τμήμα από αυτά αποτελείται από ένα ζεύγος πόλων. Η γεννήτρια που σχεδιάζεται αποτελείται από $P = 10$ πόλους δηλαδή διαθέτει 5 ζεύγη πόλων και επομένως απαρτίζεται από 5 στοιχειώδη τμήματα. Ακόμη οι τριφασικές περιελίξεις σχεδιάζονται πάντα έτσι ώστε το εύρος φάσης να ισούται με 60° .

Ο αριθμός των αυλάκων του στάτη της γεννήτριας έχει υπολογιστεί από τη σχέση (4.22) και πρόκυψε ίσος με $Q = 120$ αύλακες. Επομένως, κάθε στοιχειώδες τμήμα απαρτίζεται από $120/5 = 24$ αύλακες. Τμήμα του αναπτύγματος της περιέλιξης ίσο με 15 αύλακες εμφανίζεται στο σχήμα 4.4. Από αυτό προκύπτει ότι η ζώνη φάσης απαρτίζεται από $q = 4$ διαδοχικές αύλακες της ίδιας φάσεως οι οποίες βρίσκονται κάτω από ένα ζεύγος πόλων ενώ, το εύρος φάσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.141) και προκύπτει ίση με $phase\ belt = 60^\circ$.

$$phase\ belt = \frac{q}{P/2} \cdot 360^\circ \quad (4.141)$$

Για τη τιμή του εύρους φάσης που έχει υπολογιστεί και προέκυψε ίση με 60° και για λόγο εύρους πηνίου /πολικό βήμα ίσο με $W/\tau_p = 5/6$ υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή από τη γραφική παράσταση του σχήματος 2.25.α ο συντελεστής σκέδασης της αύλακας. Αυτός προκύπτει ίσος με $K_{slot\ leakage} = 0,83$. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη γραφική εκείνη η οποία αναπαρίσταται με συμπαγή γραμμή αντιστοιχεί σε εύρος φάσης 60° μοιρών ενώ, με διακεκομμένη γραμμή αναπαρίσταται η γραφική παράσταση που αντιστοιχεί σε εύρος φάσης ίσο με 120° .

Με την αντικατάσταση των τιμών των παραμέτρων στην εξίσωση (4.140) προκύπτει η τιμή του γινομένου των παραμέτρων ίση με $L_{overhang\ leakage} \cdot \lambda_{overhang} = 1,24 H$.

4.3.7 Υπολογισμός της μαγνητικής ροής σκέδασης του στάτη στις αύλακες $\Phi_{stator\ slot\ leakage}$, στις κεφαλές του τυλίγματος $\Phi_{stator\ overhang\ leakage}$, της συνολικής μαγνητικής ροής σκέδασης του στάτη $\Phi_{stator\ total\ leakage}$ και της αντίδρασης σκέδασης του στάτη p.u. $X_{stator\ pu\ flux\ leakage}$

Για να υπολογιστεί η συνολική μαγνητική ροή σκέδασης του στάτη αρχικά υπολογίζεται η μαγνητική ροή σκέδασης των αυλάκων του στάτη και έπειτα η μαγνητική ροή σκέδασης των κεφαλών των τυλιγμάτων του στάτη. Από το άθροισμα τους προκύπτει η συνολική μαγνητική ροή σκέδασης του στάτη.

▪ *Μαγνητική ροή σκέδασης των αυλάκων του στάτη $\Phi_{stator\ slot\ leakage}$*

Η μαγνητική ροή σκέδασης των αυλάκων του στάτη υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.142). Σε αυτή τη σχέση η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ισούται με $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$, η ένταση του ρεύματος φάσης έχει υπολογισθεί και προέκυψε ίση με $I_{phase} = 1240,47 A$, ο αριθμός των αγωγών ανά αύλακα του στάτη έχει υπολογισθεί και προέκυψε ίσος με $N_{conductors\ per\ stator\ slot} = 4$. Το μήκος της αύλακας ισούται με $L_{slot} = L_{net} = 0,547 m$ ενώ, η ειδική μαγνητική αγωγιμότητα της αύλακας ανά μονάδα ενεργού αξονικού μήκους της μηχανής υπολογίσθηκε και προέκυψε ίση με $\lambda_{slot} = 2,067$. Μετά από την αντικατάσταση των προαναφερθέντων τιμών προκύπτει η τιμή της μαγνητικής ροής σκέδασης των αυλάκων ίση με $\Phi_{stator\ slot\ leakage} = 0,01994 Wb$.

$$\Phi_{stator\ slot\ leakage} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot I_{phase} \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot} \cdot L_{slot} \cdot \lambda_{slot} \quad (4.142)$$

όπου : μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού μετρούμενη σε H/m .

L_{slot} είναι το μήκος της αύλακας μετρούμενο σε m

▪ *Υπολογισμός της μαγνητικής ροής σκέδασης των κεφαλών του τυλίγματος του στάτη $\Phi_{stator\ overhang\ leakage}$*

Οι παράμετροι της εξίσωσης είναι ίδιοι με εκείνους της εξίσωσης (4.142) που έχουν αναφερθεί παραπάνω ενώ, το γινόμενο των παραμέτρων της ειδικής μαγνητικής αγωγιμότητας $\lambda_{overhang}$ και του συντελεστή αυτεπαγωγής σκέδασης $L_{overhang\ leakage}$ των κεφαλών του τυλίγματος του στάτη έχει ήδη υπολογισθεί και προέκυψε ίσο με $L_{overhang\ leakage} \cdot \lambda_{overhang} = 1,24 H$. Μετά από αντικατάσταση των τιμών των παραμέτρων προκύπτει ότι η τιμή της μαγνητικής ροής σκέδασης των κεφαλών του τυλίγματος του στάτη προκύπτει ίση με $\Phi_{stator\ overhang\ leakage} = 0,02187 Wb$.

$$\Phi_{stator\ overhang\ leakage} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot I_{phase} \cdot N_{conductors\ per\ stator\ slot} \cdot L_{overhang\ leakage} \cdot \lambda_{overhang} \quad (4.143)$$

Η συνολική μαγνητική ροή σκέδασης του στάτη υπολογίζεται από τη σχέση (4.144) και απαρτίζεται από το άθροισμα των επιμέρους μαγνητικών ροών σκέδασης του στάτη που έχουν υπολογιστεί και αφορούν τις αύλακες και τις κεφαλές των τυλιγμάτων. Αυτή προκύπτει ίση με $\Phi_{stator\ total\ leakage} = 0,04181 Wb$.

$$\Phi_{stator\ total\ leakage} = \Phi_{stator\ slot\ leakage} + \Phi_{stator\ overhang\ leakage} \quad (4.144)$$

Η συνολική μαγνητική ροή σκέδασης πρέπει να εκφραστεί ως προς την κύρια μαγνητική ροή. Για το λόγο αυτό απαιτείται να υπολογιστεί ο λόγος της σχέσης (4.145) όπου η αναθεωρημένη τιμή της μαγνητικής ροής ανά πόλο ισούται με $\Phi_{per\ pole\ revised} = 0,117 Wb$. Η τιμή της αντίδρασης σκέδασης υπολογίζεται ίση με $X_{stator\ pu\ flux\ leakage} = 0,35735 p.u.$

$$X_{stator\ pu\ flux\ leakage} = \frac{\Phi_{stator\ total\ leakage}}{\Phi_{per\ pole\ revised}} \quad (4.145)$$

4.3.8 Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων διέγερσης όταν η μηχανή λειτουργεί εν κενώ ($At_{No\ load\ Excitations\ per\ Rotors\ pole}$)

Ο υπολογισμός των αμπερελιγμάτων διέγερσης ανά πόλο όταν η μηχανή λειτουργεί χωρίς φορτίο (εν κενώ) πραγματοποιείται σύμφωνα με τη σχέση (4.147) εφόσον προηγουμένως έχουν υπολογισθεί τα αμπερελίγματα αντίδρασης ανά πόλο του στάτη (του επαγωγίμου) από την εξίσωση (4.146).

$$At_{Reaction\ per\ Stators\ pole} = \frac{1,35 \cdot I_{phase} \cdot N_{ph} \cdot K_w}{(P/2)} \quad (4.146)$$

όπου : I_{phase} είναι η ενεργός τιμή της έντασης του ρεύματος φάσης η οποία μετρείται σε Ampere (έχει υπολογισθεί από τις σχέσεις (4.23) και (4.24)).

N_{ph} είναι ο αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση (έχει υπολογισθεί από τη σχέση (4.20))

K_w είναι ο συντελεστής τυλίγματος.

P είναι ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

Η τιμή των αμπερελιγμάτων αντίδρασης ανά πόλο του στάτη προκύπτει ίση με $At_{Reaction\ per\ Stators\ pole} = 5117,68\ At$. Επιπρόσθετα, κρίνεται σκόπιμο εδώ να αναφερθεί ότι η τιμή των αμπερελιγμάτων αντίδρασης ανά πόλο του στάτη είναι η θεμελιώδης συνιστώσα της μαγνητεγερτικής δύναμης (Μ.Ε.Δ.).

$$At_{No\ Load\ Excitations\ per\ Rotors\ pole} = At_{Reaction\ per\ Stators\ pole} \cdot S.C.R. \quad (4.147)$$

όπου : $S.C.R.$ είναι ο λόγος βραχυκύκλωσης της μηχανής.

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τα ανωτέρω γίνεται αντιληπτό ότι ισχύει και η εξίσωση (4.148).

$$At_{No\ Load\ Excitations\ per\ Rotors\ pole} = I_{f\ no\ load} \cdot N_{f\ no\ load} \quad (4.148)$$

όπου : $I_{f\ no\ load}$ είναι το ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα διέγερσης εν κενώ.

$N_{f\ no\ load}$ είναι τα ελίγματα του απαιτούνται να διαθέτει το τύλιγμα διέγερσης για να λειτουργήσει η μηχανή χωρίς φορτίο.

Σε κάθε περίπτωση η ρύθμιση των αμπερελιγμάτων διέγερσης πραγματοποιείται μέσω της μεταβολής του ρεύματος διέγερσης. Επομένως, η τιμή της παραμέτρου $N_{f\ no\ load}$ που αντιστοιχεί στα ελίγματα του τυλίγματος διέγερσης που απαιτούνται για την εν κενώ λειτουργία είναι πλασματική διότι η τιμή τους δεν μεταβάλλεται.

Ο λόγος βραχυκύκλωσης της μηχανής (Short Circuit Ratio) για γεννήτριες έκτυπων πόλων λαμβάνει τιμές εντός του εύρους 0,9 έως 1,3. Το κόστος κατασκευής της γεννήτριας εξαρτάται από την τιμή του λόγου βραχυκύκλωσης. Συγκεκριμένα όσο μικρότερη είναι η τιμή του λόγου βραχυκύκλωσης τόσο χαμηλότερο είναι το κόστος κατασκευής της γεννήτριας. Στην υπό εξέταση περίπτωση ο λόγος βραχυκύκλωσης λαμβάνεται ίσος με $S.C.R. = 1,05$. Η τιμή των αμπερελιγμάτων της διέγερσης ανά πόλο του δρομέα κατά

τη λειτουργία της μηχανής εν κενώ προκύπτει ίση με $At_{No Load Excitations per Rotors pole} = 5373,57$.

4.3.9 Υπολογισμός της εξωτερικής διαμέτρου του δρομέα $D_{external rotor}$

Για να υπολογισθεί η εξωτερική διάμετρος του δρομέα αρχικά θα υπολογισθούν τα αμπερελίγματα του διακένου. Στο πλήρες μαγνητικό κύκλωμα της γεννήτριας το μεγαλύτερο μέρος των αμπερελιγμάτων καταναλώνεται από το διάκενο. Θεωρείται ότι το 70-75 % των αμπερελιγμάτων της διέγερσης ανά πόλο που απαιτούνται για τη λειτουργία εν κενώ καταναλώνεται από το διάκενο. Τα αμπερελίγματα του διακένου υπολογίζονται από τη σχέση (4.149).

$$At_{Airgap} = 0,796 \cdot B_{gap} \cdot K_{gap} \cdot L_{gap} \cdot 10^6 \quad (4.149)$$

όπου : B_{gap} είναι η τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο.

K_{gap} είναι ο συντελεστής διακένου ο οποίος λαμβάνει τιμή από 1,12 έως 1,18

L_{gap} είναι το μήκος του διακένου.

Το μήκος του διακένου έχει υπολογισθεί σύμφωνα με τη σχέση (4.17) για τιμή του λόγου $L_{gap \text{ } \tau \text{ } ratio} = 0,0141$ και προέκυψε ίσο με $L_{gap} = 0,0055 \text{ m}$. Η τιμή του λόγου $L_{gap \text{ } \tau \text{ } ratio}$ επαληθεύεται από τη σχέση (4.145) και βρίσκεται εντός των ορίων μεταβολής που εμφανίζονται στη σχέση (4.17) $L_{gap \text{ } \tau \text{ } ratio} = (0,013 \div 0,018)$. Ο συντελεστής του διακένου λαμβάνεται ίσος με $K_{gap} = 1,12$. Η μέση τιμή της μαγνητικής επαγωγής έχει ληφθεί ίση με $B_{ave} = 0,5 \text{ Wb/m}^2$ και ο λόγος (πολικό τόξο / πολικό βήμα) έχει ληφθεί ίσος με $K_f = 0,70$. Η τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο υπολογίζεται μέσω της σχέσης (4.150) και ισούται με $B_{gap} = 0,71 \text{ Wb/m}^2$. Με την αντικατάσταση των τιμών των παραμέτρων που αναφέρονται παραπάνω στην εξίσωση (4.149) προκύπτει ότι η τιμή των αμπερελιγμάτων του διακένου ισούται με $At_{Airgap} = 3481,39$.

$$B_{gap} = \frac{B_{ave}}{K_f} \quad (4.150)$$

$$L_{gap \text{ } \tau \text{ } ratio} = \frac{L_{gap}}{\tau_p} \quad (4.151)$$

Η εξωτερική διάμετρος του δρομέα υπολογίζεται από τη σχέση (4.152) και προκύπτει ίση με $D_{external rotor} = 1,234 \text{ m}$

$$D_{external rotor} = D_{internal stator} - 2 \cdot L_{gap} \quad (4.152)$$

4.3.10 Υπολογισμός των διαστάσεων του πόλου του δρομέα

Για να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των διαστάσεων του πόλου του δρομέα πρέπει να υπολογιστούν οι διαστάσεις των επιμέρους τμημάτων του.

- Υπολογισμός του αξονικού μήκους του πόλου του δρομέα

Το μικτό αξονικό μήκος του πόλου του δρομέα προκύπτει από το μικτό μήκος του πυρήνα του στάτη και υπολογίζεται από τη σχέση (4.153). Συγκεκριμένα το μικτό μήκος

του πυρήνα του στάτη μειώνεται κατά το μήκος $L_{shortening} = 1 \text{ cm}$ έτσι ώστε ο δρομέας να μπορεί να ταλαντώνεται ελεύθερα. Το μικτό αξονικό μήκος του πόλου του δρομέα ισούται με το μήκος του πόλου του δρομέα $L_{gross \ axial \ rotor \ pole} = L_{rotors \ pole} = 57,7 \text{ cm} = 0,577 \text{ m}$.

$$L_{gross \ axial \ rotor \ pole} = L - L_{shortening} \quad (4.153)$$

Το καθαρό αξονικό μήκος του πόλου του δρομέα υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.154) αφού ληφθεί υπόψη ο συντελεστής στοίβαξης $K_{stacking \ factor}$ ο οποίος λαμβάνει τιμές από 0,93 έως και 0,95 [Ξ63]. Για τιμή του συντελεστή στοίβαξης ίση με $K_{stacking \ factor} = 0,95$ προκύπτει ότι το καθαρό αξονικό μήκος του πόλου του δρομέα ισούται με $L_{net \ axial \ rotor \ pole} = 54,81 \text{ cm} = 0,5481 \text{ m}$.

$$L_{net \ axial \ rotor \ pole} = L_{gross \ axial \ rotor \ pole} \cdot K_{stacking \ factor} \quad (4.154)$$

- Υπολογισμός του πλάτους του πόλου του δρομέα $b_{rotors \ pole}$, του πόλου του δρομέα με τις μονώσεις του $b_{rotors \ pole \ with \ insulation}$ και του πάχους (βάθους) του πηνίου του πόλου της περιέλιξης του δρομέα $d_{rotor \ pole \ field}$

Για να υπολογισθεί το πλάτος του πόλου του δρομέα αρχικά πρέπει να υπολογισθεί η μαγνητική ροή του πόλου του δρομέα από τη σχέση (4.155). Για τιμή του συντελεστή σκέδασης του πόλου του δρομέα ίση με $K_{rotor \ pole \ leakage \ factor} = 1,1$ η τιμή της μαγνητικής ροής του πόλου του δρομέα προκύπτει ίση με $\Phi_{rotors \ pole} = 0,129 \text{ Wb}$.

$$\Phi_{rotors \ pole} = K_{rotor \ pole \ leakage \ factor} \cdot \Phi_{per \ pole \ revised} \quad (4.155)$$

όπου : $K_{rotor \ pole \ leakage \ factor}$ είναι ο συντελεστής σκέδασης του πόλου του δρομέα ο οποίος λαμβάνει τιμές από 1,1 έως και 1,15.

$\Phi_{per \ pole \ revised}$ είναι η αναθεωρημένη τιμή της μαγνητικής ροής ανά πόλο

Έπειτα, υπολογίζεται το εμβαδόν του πόλου του δρομέα από τη σχέση (4.156). Για τιμή της μαγνητικής επαγωγής η οποία λαμβάνεται ίση με $B_{rotors \ pole} = 1,2 \text{ Wb/m}^2$ αυτό λαμβάνει τιμή ίση με $A_{rotors \ pole} = 0,1075 \text{ m}^2$.

$$A_{rotors \ pole} = \frac{\Phi_{rotors \ pole}}{B_{rotors \ pole}} \quad (4.156)$$

Για την περίπτωση που η γεννήτρια εφοδιάζεται με πόλους ορθογώνιου σχήματος το εμβαδόν αυτών μπορεί να υπολογιστεί και από τη σχέση (4.157). Αυτή επιλύεται ως προς το πλάτος του πόλου και λαμβάνει τη μορφή της εξίσωσης (4.158) από την οποία προκύπτει ότι η τιμή του πλάτους του πόλου του ρότορα ισούται με $b_{rotors \ pole} = 19,6 \text{ cm} = 0,196 \text{ m}$.

$$A_{rotors \ pole} = L_{net \ axial \ rotor \ pole} \cdot b_{rotors \ pole} \quad (4.157)$$

$$b_{rotors \ pole} = \frac{A_{rotors \ pole}}{L_{net \ axial \ rotor \ pole}} \quad (4.158)$$

Έπειτα υπολογίζεται το πλάτος του πόλου του δρομέα με τις μονώσεις του. Για κατ'ελάχιστον δυνατός ο υπολογισμός του, η παράμετρος του πάχους της μόνωσης που τοποθετείται ανάμεσα στον πυρήνα και το τυλίγμα του πόλου λαμβάνεται ίση με $t_i = 0,75 \text{ cm}$ και χρησιμοποιείται η σχέση (4.159). Το πλάτος του πόλου του δρομέα με τις μονώσεις του προκύπτει ίσο με $b_{rotors \text{ pole with insulation}} = 21,1 \text{ cm} = 0,211 \text{ m}$.

$$b_{rotors \text{ pole with insulation}} = b_{rotors \text{ pole}} + (2 \cdot t_i) \quad (4.159)$$

Το πάχος (βάθος) του πηνίου του πόλου της περιέλιξης του δρομέα υπολογίζεται από τη σχέση (4.160) και προκύπτει ίση με $d_{rotor \text{ pole field}} = 3,14 \text{ cm}$. Η τιμή του βάθους του πηνίου του πόλου του τυλίγματος διέγερσης του δρομέα μπορεί να λαμβάνει τιμές μέσα στο εύρος $3 \text{ cm} \leq d_{rotor \text{ pole field}} \leq 5 \text{ cm}$ [Ξ63]. Η τιμή του βάθους του πηνίου της διέγερσης που έχει υπολογισθεί βρίσκεται εντός των ορίων των περιορισμών επομένως είναι αποδεκτή.

$$d_{rotor \text{ pole field}} = \frac{(Pole \text{ Arc} - b_{rotors \text{ pole with insulation}})}{2} \quad (4.160)$$

4.3.10.1 Υπολογισμός του ύψους του πηνίου της διέγερσης του πόλου του δρομέα $h_{rotor \text{ pole field coil}}$ και του συνολικού ύψους του πόλου του δρομέα $h_{rotor \text{ pole total}}$

Για να πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός του ύψους του πηνίου της διέγερσης του πόλου του δρομέα $h_{rotor \text{ pole field coil}}$ χρησιμοποιείται η σχέση (4.168) η οποία απαρτίζεται από τις εξισώσεις (4.161) και (4.162) που παρατίθενται παρακάτω.

- Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων πλήρους φορτίου της διέγερσης ανά πόλο A_1

Για να υπολογισθεί το πλάτος του πόλου του δρομέα αρχικά πρέπει να υπολογισθεί η μαγνητική ροή του πόλου του δρομέα από τη σχέση (4.149).

Από την εξίσωση (4.161) για τη τιμή της παραμέτρου $K_{At \text{ reaction per stators pole}} = 2$ υπολογίζονται τα αμπερελιγμάτα πλήρους φορτίου ανά πόλο του τυλίγματος διέγερσης. Αυτά προκύπτουν ίσα με $A_1 = At_{Full \text{ Load Excitations per Rotors pole}} = (I_f \cdot N_f)_{full \text{ load}} = 10235,4$ αμπερελίγματα.

$$A_1 = K_{At \text{ reaction per stators pole}} \cdot At_{Reaction \text{ per Stators pole}} \quad (4.161)$$

όπου : $K_{At \text{ reaction per stators pole}}$ είναι ο συντελεστής με τον οποίο πολλαπλασιάζονται τα αμπερελίγματα αντίδρασης ανά πόλο του στάτη ο οποίος λαμβάνει τιμές από 1,7 έως και 2.

$At_{Reaction \text{ per Stators pole}}$ είναι τα αμπερελίγματα αντίδρασης ανά πόλο του στάτη που έχουν ήδη υπολογισθεί από τη σχέση (4.146).

- Υπολογισμός της μεταβλητής A_2

Από την εξίσωση (4.162) υπολογίζεται η μεταβλητή A_2 μετά από τον υπολογισμό και την αντικατάσταση σε αυτή των επιμέρους παραμέτρων της.

$$A_2 = \sqrt{\frac{\rho_{Cu\ 155^\circ C} \cdot L_{rotor\ pole\ mean\ turn\ field\ coil} \cdot 10^{-4}}{L_{rotor\ pole\ external\ turn\ perimeter\ field\ coil} \cdot Power\ losses\ dissipation \cdot d_{rotor\ pole\ field} \cdot S_{rotor\ pole\ field\ coil\ space\ factor}}} \quad (4.162)$$

όπου: $\rho_{Cu\ 155^\circ C}$ είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού στους $155^\circ C$ ($\Omega \cdot mm^2/m$).

$L_{rotor\ pole\ mean\ turn\ field\ coil}$ είναι το μέσο μήκος του ελίγματος του πηνίου της διέγερσης (m).

$L_{rotor\ pole\ external\ turn\ perimeter\ field\ coil}$ είναι το μήκος του ελίγματος της εξωτερικής περιφέρειας του πηνίου της διέγερσης (m).

$Power\ losses\ dissipation$ είναι η αποβολή των απωλειών θερμότητας ανά cm^2 της εξωτερικής επιφάνειας του πηνίου (W/cm^2).

$d_{rotor\ pole\ field}$ είναι το βάθος του πηνίου του πόλου της περιέλιξης του δρομέα (m).

$S_{rotor\ pole\ field\ coil\ space\ factor}$ είναι ο συντελεστής χώρου του πηνίου της διέγερσης.

- Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του χαλκού στη θερμοκρασία λειτουργίας

Η παράμετρος της ειδικής αντίστασης του χαλκού στη θερμοκρασία λειτουργίας της μηχανής προκύπτει ίση με $\rho_{Cu\ 155^\circ C} = 0,0267 \Omega \cdot mm^2/m$ από τη σχέση (4.163). Η μεταβλητή της ειδικής αντίστασης του χαλκού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $20^\circ C$ λαμβάνεται ίση με $\rho_{Cu\ 20^\circ C} = 0,0175 \Omega \cdot mm^2/m$, ο θερμοκρασιακός συντελεστής ισούται με $\alpha_{temperature\ coefficient\ 20^\circ C} = 0,0039$ ($1/^\circ C$) ενώ, η αύξηση της θερμοκρασίας της περιέλιξης προκύπτει ίση με $Windings\ Temperature\ Rise = 135^\circ C$. Αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (4.164) όπου η θερμοκρασιακή κλάση F στην οποία ανήκει η μηχανή αντιστοιχεί σε θερμοκρασία $Windings\ Class\ Temp = 155^\circ C$ [E71].

$$\rho_{Cu\ 155^\circ C} = \rho_{Cu\ 20^\circ C} \cdot \left(1 + \alpha_{temperature\ coefficient\ 20^\circ C} \cdot Windings\ Temperature\ Rise \right) \quad (4.163)$$

όπου: $\rho_{Cu\ 20^\circ C}$ η ειδική αντίσταση του χαλκού στους $20^\circ C$ ($\Omega \cdot mm^2/m$).

$\alpha_{temperature\ coefficient\ 20^\circ C}$ ο θερμοκρασιακός συντελεστής για θερμοκρασία $20^\circ C$ ($1/^\circ C$)

$Windings\ Temperature\ Rise$ η αύξηση της θερμοκρασίας της περιέλιξης συγκρινόμενη με εκείνη του περιβάλλοντος.

$$Windings\ Temperature\ Rise = Windings\ Class\ Temp - Environment\ Temp \quad (4.164)$$

όπου: $Windings\ Class\ Temp$ η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην κλάση μόνωσης F

$Environment\ Temp$ η θερμοκρασία του περιβάλλοντος $20^\circ C$

- Υπολογισμός του μέσου μήκους του ελίγματος του πηνίου διέγερσης

Η τιμή του μέσου μήκους του ελίγματος του πηνίου διέγερσης που τοποθετείται σε κάθε πόλο του δρομέα υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.165) και προκύπτει ίση με $L_{rotor\ pole\ mean\ turn\ field\ coil} = 169,18\ cm$. Στη συνέχεια παρατίθενται οι τιμές των παρα-

μέτρων από τις οποίες εξαρτάται και έχουν ήδη υπολογισθεί: α) $L_{rotors\ pole} = 57,7\ cm$, β) $b_{rotors\ pole} = 19,6\ cm$, γ) $d_{rotor\ pole\ field} = 3,14\ cm$, δ) $t_i = 0,75\ cm$.

$$L_{rotor\ pole\ mean\ turn\ field\ coil} = 2 \cdot (L_{rotors\ pole} + b_{rotors\ pole}) + \pi \cdot (d_{rotor\ pole\ field} + 2 \cdot t_i) \quad (4.165)$$

όπου: $L_{rotors\ pole}$ το μήκος του πόλου του δρομέα (cm).

$b_{rotors\ pole}$ το πλάτος του πόλου του δρομέα (cm).

$d_{rotor\ pole\ field}$ το πάχος του πηνίου του πόλου της περιέλιξης του δρομέα (cm).

t_i το πάχος της μόνωσης ανάμεσα στον πυρήνα και το τύλιγμα του πόλου (cm).

- Υπολογισμός του μέσου μήκους του ελίγματος της εξωτερικής περιφέρειας του πηνίου της διέγερσης

Το μέσο μήκος του ελίγματος της εξωτερικής περιφέρειας του πηνίου της διέγερσης υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.166) και η τιμή του προκύπτει ίση με $L_{rotor\ pole\ external\ turn\ perimeter\ field\ coil} = 179,04\ cm$. Οι τιμές των παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται έχουν υπολογισθεί προηγουμένως και παρατίθενται παρακάτω: α) $L_{rotor\ pole\ mean\ turn\ field\ coil} = 169,18\ cm$, β) $d_{rotor\ pole\ field} = 3,14\ cm$.

$$L_{rotor\ pole\ external\ turn\ perimeter\ field\ coil} = L_{rotor\ pole\ mean\ turn\ field\ coil} + \pi \cdot d_{rotor\ pole\ field} \quad (4.166)$$

όπου: $L_{rotor\ pole\ mean\ turn\ field\ coil}$ το μέσο μήκος του ελίγματος του πηνίου διέγερσης (cm).

$d_{rotor\ pole\ field}$ το πάχος του πηνίου του πόλου της περιέλιξης του δρομέα (cm).

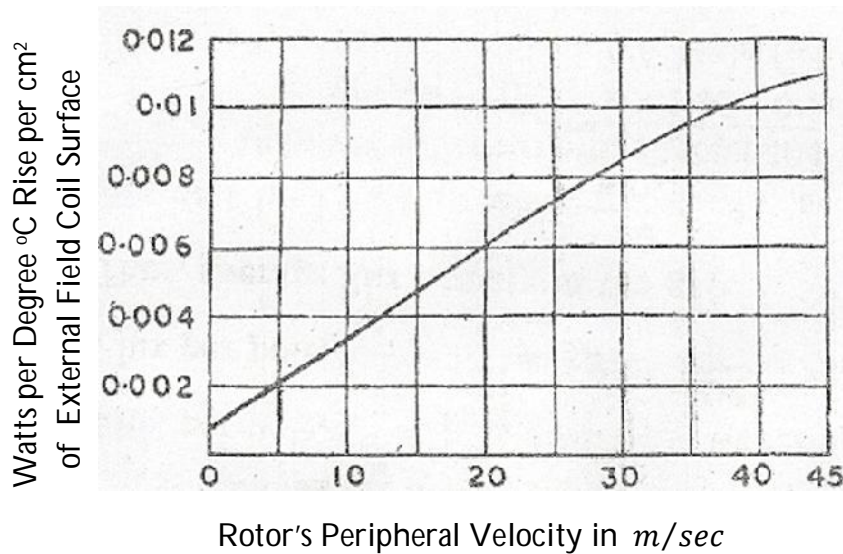
- Προσδιορισμός του συντελεστή χώρου του πηνίου της διέγερσης

Ο συντελεστής χώρου του πηνίου διέγερσης λαμβάνει τιμές από μια περιοχή με εύρος από 0,6 έως και 0,8. Για τη σχεδίαση που βρίσκεται υπό μελέτη λαμβάνεται ίσος με $S_{rotor\ pole\ field\ coil\ space\ factor} = 0,6$.

- Προσδιορισμός των απωλειών θερμότητας σε Watt που αποβάλλονται ανά τετραγωνικό εκατοστό της εξωτερικής επιφάνειας του πηνίου διέγερσης

Η παράμετρος της αποβολής των απωλειών θερμότητας ανά cm^2 της εξωτερικής επιφάνειας του πηνίου $Power\ losses\ dissipation$ έχει μονάδες μέτρησης (W/cm^2). Η τιμή της εξαρτάται από την αύξηση της θερμοκρασίας ανά cm^2 της εξωτερικής επιφάνειας του πηνίου διέγερσης του δρομέα η οποία με τη σειρά της μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την περιφερειακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της μηχανής. Οι μεγάλες ταχύτητες περιστροφής του δρομέα επιτρέπουν την αποβολή μεγαλύτερων ποσοτήτων θερμότητας. Για τη περίπτωση αυτή η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα υπολογίζεται σε m/sec . Αυτή αυτή υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (4.18) και προέκυψε ίση με $u = 39,11\ m/sec$. Έπειτα, από τη γραφική παράσταση του σχήματος 4.6 με γραμμική παρεμβολή υπολογίζονται οι απώλειες ισχύος ανά βαθμό Κελσίου αύξησης της θερμο-

κρασίας ανά cm^2 της εξωτερικής επιφάνειας του πηνίου διέγερσης του δρομέα. Αυτές ισούνται με $Power Losses from Rotors Peripheral Velocity = 0,0102576 W/cm^2 \cdot Celsius Degree$.



Σχήμα 4.6: Απώλειες ισχύος ανά βαθμό Κελσίου αύξησης της θερμοκρασίας ανά cm^2 της εξωτερικής επιφάνειας του πηνίου διέγερσης του δρομέα σε συνάρτηση με την περιφερειακή του ταχύτητα [Ξ63 Fig 13.10 page 797]

Η τιμή αύξησης της θερμοκρασίας ισούται $Windings Temperature Rise = 135^{\circ}C$ Αυτή έχει υπολογισθεί παραπάνω από τη σχέση (4.164). Οι απώλειες ισχύος που αποβάλλονται ανά cm^2 της εξωτερικής επιφάνειας του πηνίου διέγερσης του δρομέα προσδιορίζονται σύμφωνα με τη σχέση (4.167) και ισούνται με $Power losses dissipation = 1,385 W/cm^2$.

$$Power losses dissipation = \left(\frac{Power Losses from Rotors}{Peripheral Velocity} \right) \cdot \left(\frac{Windings}{Temperature Rise} \right) \quad (4.167)$$

Σύμφωνα με όσα έχουν παρατεθεί παραπάνω προκύπτει ότι η μεταβλητή A_2 ισούται με $A_2 = 0,000983308$. Μετά την αντικατάσταση των μεταβλητών A_1 και A_2 στην εξίσωση (4.168) προκύπτει ότι το ύψος του πηνίου του τυλίγματος διέγερσης του πόλου του δρομέα ισούται με $h_{rotor pole field coil} = 14 cm$.

$$h_{rotor pole field coil} = 1,35 \cdot A_1 \cdot A_2 \quad (4.168)$$

▪ Υπολογισμός του συνολικού ύψους του πόλου του δρομέα $h_{rotor pole total}$

Για να υπολογισθεί το συνολικό ύψος του πόλου του δρομέα χρησιμοποιείται η σχέση (4.169). Σε αυτή το ύψος του πόλου που καταλαμβάνεται από τις μονώσεις λαμβάνεται ίσο με $h_{rotor pole insulation} = 1 cm$ ενώ, το ύψος του πέλδου του πόλου λαμβάνει τιμή ίση με $h_{rotor pole shoe} = 3 cm$. Μετά την πραγματοποίηση των αναγκαίων υπολογισμών η τιμή του προκύπτει ίση με $h_{rotor pole total} = 18 cm$.

$$h_{rotor pole total} = h_{rotor pole field coil} + h_{rotor pole insulation} + h_{rotor pole shoe} \quad (4.169)$$

όπου: $h_{rotor\ pole\ field\ coil}$ το ύψος του πηνίου του τυλίγματος διέγερσης του πόλου του δρομέα (cm).

$h_{rotor\ pole\ insulation}$ το ύψος των μονώσεων του πόλου του δρομέα (cm).

$h_{rotor\ pole\ shoe}$ το ύψος του πέδιλου του πόλου του δρομέα (cm).

4.3.11 Υπολογισμός του διακένου ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους του δρομέα στη βάση τους (στην πλευρά του άξονα της μηχανής) μετά την τοποθέτηση του τυλίγματος με τις μονώσεις του

Ο υπολογισμός του διακένου ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους του δρομέα της μηχανής στη βάση τους μετά την τοποθέτηση του τυλίγματος με τις μονώσεις του, απαιτείται προκειμένου να διασφαλιστεί ότι υπάρχει ο αναγκαίος χώρος για την απρόσκοπτη τοποθέτηση των τυλιγμάτων της διέγερσης σε αυτούς. Επιπρόσθετα, πρέπει να υφίσταται κενός χώρος ανάμεσα στα τυλίγματα δύο διαδοχικών πόλων έτσι ώστε να πραγματοποιείται κυκλοφορία του αέρα μέσα από αυτούς και έτσι να διασφαλίζεται η ψύξη των πηνίων.

Αρχικά, υπολογίζεται η διάμετρος του δρομέα στη βάση του πόλου σύμφωνα με τη σχέση (4.170) και προκύπτει ίση με $D_{rotor\ in\ pole\ base} = 87,4\ cm$. Έπειτα, υπολογίζεται η περίμετρος του δρομέα για αυτή τη διάμετρο από τη σχέση (4.171). Αυτή προκύπτει ίση με $L_{rotor\ in\ pole\ base} = 2745,75\ mm$.

$$D_{rotor\ in\ pole\ base} = D_{external\ rotor} - 2 \cdot h_{rotor\ pole\ total} \quad (4.170)$$

$$L_{rotor\ in\ pole\ base} = \pi \cdot D_{rotor\ in\ pole\ base} \quad (4.171)$$

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί το διαθέσιμο πλάτος που υφίσταται στη βάση των πόλων της γεννήτριας προς την πλευρά του άξονα ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους του δρομέα σύμφωνα με τη σχέση (4.172). Από αυτή τη παράμετρο διαπιστώνεται εάν υπάρχει ο αναγκαίος χώρος για την τοποθέτηση του τυλίγματος. Για τη σχεδίαση μας το διαθέσιμο πλάτος ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους του δρομέα ισούται με $b_{between\ 2\ consecutive\ poles\ in\ rotors\ pole\ base} = 63,58\ mm$. Γίνεται αντιληπτό ότι ο διαθέσιμος χώρος επαρκεί για την τοποθέτηση του τυλίγματος στους πόλους επειδή το διαθέσιμο πλάτος είναι μεγαλύτερο από το διπλάσιο του πάχους του πηνίου του δρομέα και ισχύει ότι: $b_{between\ 2\ consecutive\ poles\ in\ rotors\ pole\ base} > 2 \cdot d_{rotor\ pole\ field}$.

$$b_{between\ 2\ consecutive\ poles\ in\ rotors\ pole\ base} = \left(\frac{L_{rotor\ in\ pole\ base} - (P \cdot b_{rotors\ pole\ with\ insulation})}{P} \right) \quad (4.172)$$

Το διάκενο ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους του δρομέα στη βάση τους μετά την τοποθέτηση του τυλίγματος με τις μονώσεις του υπολογίζεται από τη σχέση (4.173) και ισούται με $Gap_{after\ Insertion\ Rotors\ Pole\ Field\ in\ Rotors\ Pole\ Base} = 0,78\ mm$.

$$Gap_{after\ Insertion\ Rotors\ Pole\ Field\ in\ Rotors\ Pole\ Base} = b_{between\ 2\ consecutive\ poles\ in\ rotors\ pole\ base} - 2 \cdot d_{rotor\ pole\ field} \quad (4.173)$$

4.3.12 Υπολογισμός του διακένου ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους κάτω από το πέδιλο του πόλου(στην πλευρά του διακένου) μετά την τοποθέτηση του τυλίγματος με τις μονώσεις του

Οι λόγοι για τους οποίους επιβάλλεται ο υπολογισμός του διακένου ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους του δρομέα της μηχανής γενικά έχουν ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 4.3.11. Οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για το σημείο που βρίσκεται ακριβώς κάτω από το πέδιλο του έκτυπου πόλου.

Η διάμετρος του δρομέα στο σημείο ακριβώς κάτω από το πέδιλο του πόλου υπολογίζεται από τη σχέση (4.174) και προκύπτει ίση με $D_{rotor\ below\ pole\ shoe} = 117,4\ cm$. Για το ίδιο σημείο υπολογίζεται η περιμετρος του δρομέα από τη σχέση (4.175) η οποία προκύπτει ίση με $L_{rotor\ below\ pole\ shoe} = 3688,23\ mm$.

$$D_{rotor\ below\ pole\ shoe} = D_{external\ rotor} - 2 \cdot h_{rotor\ pole\ shoe} \quad (4.174)$$

$$L_{rotor\ below\ pole\ shoe} = \pi \cdot D_{rotor\ below\ pole\ shoe} \quad (4.175)$$

Το διαθέσιμο πλάτος που υφίσταται στο κάτω τμήμα του πέδιλου των πόλων της γεννήτριας προς την πλευρά του διακένου ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους του δρομέα υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.176). Με την αντικατάσταση των παραμέτρων προκύπτει ίσο με $b_{between\ 2\ consecutive\ poles\ below\ pole\ shoe} = 157,82\ mm$.

$$b_{between\ 2\ consecutive\ poles\ below\ pole\ shoe} = \left(\frac{L_{rotor\ below\ pole\ shoe} - (P \cdot b_{rotors\ pole\ with\ insulation})}{P} \right) \quad (4.176)$$

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί το διαθέσιμο πλάτος που υφίσταται ακριβώς κάτω από το πέδιλο στους πόλους της γεννήτριας προς την πλευρά του διακένου ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους του δρομέα σύμφωνα με τη σχέση (4.177). Αυτό προκύπτει ίσο με $Gap_{after\ Insertion\ Rotors\ Pole\ Field\ in\ Rotors\ Below\ Pole\ Shoe} = 63,21\ mm$.

$$Gap_{after\ Insertion\ Rotors\ Pole\ Field\ in\ Rotors\ Below\ Pole\ Shoe} = b_{between\ 2\ consecutive\ poles\ in\ rotors\ pole\ base} - 2 \cdot d_{rotor\ pole\ field} \quad (4.177)$$

Παρατηρείται επάρκεια χώρου για την τοποθέτηση των τυλιγμάτων στο σημείο του πόλου ακριβώς κάτω από το πέδιλο. Ο χώρος αυτός και το διάκενο που εμφανίζεται μετά την τοποθέτηση των τυλιγμάτων με τις μονώσεις τους είναι εμφανώς μεγαλύτερος από εκείνο στη βάση του πόλου διότι στο σημείο αυτό η διάμετρος του δρομέα είναι μεγαλύτερη.

4.3.13 Υπολογισμός του βάθους του ζυγώματος του δρομέα $d_{rotors\ yoke}$.

Για αν υπολογισθεί το βάθος του ζυγώματος του δρομέα αρχικά, υπολογίζεται η μαγνητική ροή του ζυγώματος από τη σχέση (4.178). Σύμφωνα με αυτή ισχύει ότι η μαγνητική ροή του ζυγώματος του δρομέα ισούται με το ήμισυ της μαγνητικής ροής του πόλου του δρομέα. Η τιμή της προκύπτει ίση με $\Phi_{rotors\ yoke} = 0,0645\ Wb$.

$$\Phi_{rotors\ yoke} = \frac{1}{2} \cdot \Phi_{rotors\ pole} \quad (4.178)$$

Έπειτα, υπολογίζεται το εμβαδόν του ζυγώματος του δρομέα μέσω της σχέσης (4.179). Η τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο ζύγωμα του δρομέα λαμβάνεται ίση με $B_{rotors yoke} = 1,1 \text{ Wb/m}^2$. Σύμφωνα με αυτή το εμβαδόν του ζυγώματος του λαμβάνει τιμή ίση με $A_{rotors yoke} = 0,0587 \text{ m}^2$.

$$A_{rotors yoke} = \frac{\Phi_{rotors yoke}}{B_{rotors yoke}} \quad (4.179)$$

Το μήκος του ζυγώματος του ρότορα λαμβάνεται ίσο με το μικτό μήκος του πυρήνα του στάτη. Επομένως, ισχύει ότι $L_{rotors yoke} = L = 0,587 \text{ m}$. Σύμφωνα με αυτό υπολογίζεται το βάθος του ζυγώματος του ρότορα το οποίο από τη σχέση (4.180) προκύπτει ίσο με $d_{rotors yoke} = 0,1 \text{ m}$.

$$d_{rotors yoke} = \frac{A_{rotors yoke}}{L_{rotors yoke}} \quad (4.180)$$

Η διάμετρος του ρότορα ακριβώς κάτω από το ζύγωμα του υπολογίζεται από τη σχέση (4.181) και προκύπτει ίση με $D_{rotor below yoke} = 0,674 \text{ m}$.

$$D_{rotor below yoke} = D_{external rotor} - 2 \cdot h_{rotor pole total} \quad (4.181)$$

4.3.14 Υπολογισμός της ωμικής πτώσης τάσης ανά φάση στην περιέλιξη του στάτη $V_{drop IR per phase}$ και της ωμικής αντίστασης έκαστης φάσης του στάτη ανά μονάδα $R_{phase stator pu}$.

Η ωμική πτώση τάσης υπολογίζεται από τη σχέση (4.182). Επειδή η περιέλιξη του στάτη κατασκευάζεται με αγωγούς κυκλικής διατομής η τιμή του συντελεστή μέσω των απωλειών λαμβάνεται ίση με $Average Loss Coefficient = 1$ σύμφωνα με τη σχέση (4.65). Έτσι η ωμική πτώση τάσης προκύπτει ίση με $V_{drop IR per phase} = 4,9619 \text{ V}$ ενώ, η ωμική αντίσταση έκαστης φάσης του στάτη στο ανά μονάδα σύστημα θα υπολογιστεί σύμφωνα με τη σχέση (4.183). Αυτή προκύπτει ίση με $R_{phase stator pu} = 0,01246 \text{ pu}$.

$$V_{drop IR per phase} = I_{phase} \cdot R_{155^\circ C per stators phase} \cdot Average Loss Coefficient \quad (4.182)$$

$$R_{phase stator pu} = \frac{V_{drop IR per phase}}{E_{ph}} \quad (4.183)$$

4.4 Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων του μαγνητικού κυκλώματος που απαιτούνται για τη λειτουργία της γεννήτριας εν κενώ

Για αν υπολογισθεί ο συνολικός αριθμός των αμπερελιγμάτων που απαιτούνται για να επιτευχθεί η διέγερση της γεννήτριας όταν αυτή λειτουργεί χωρίς φορτίο (εν κενώ) πρέπει να υπολογιστούν ξεχωριστά τα αμπερελίγματα που απαιτούνται για κάθε ένα τμήμα της. Συγκεκριμένα το μαγνητικό κύκλωμα της γεννήτριας απαρτίζεται από τα ακόλουθα τμήματα: α) Διάκενο, β) Οδοντώσεις του στάτη, γ) Ζύγωμα του στάτη, δ) Πόλοι του δρομέα, ε) Ζύγωμα του δρομέα.

4.4.1 Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων του διακένου

Ο υπολογισμός των αμπερελιγμάτων του διακένου πραγματοποιείται σύμφωνα με τη σχέση (4.149) της παραγράφου 4.3.9. Στην περίπτωση αυτή όμως ο συντελεστής του διακένου $K_{gap\ Carter}$ υπολογίζεται.

Ο συντελεστής διακένου αποτελείται από δύο συνιστώσες: α) το συντελεστή διακένου της αύλακας του στάτη $K_{gap\ stator\ slot}$ και β) το συντελεστή διακένου των διακένων αερισμού του στάτη $K_{gap\ stator\ ventilation\ ducts}$, υπολογίζεται από τη σχέση (4.184) και λαμβάνει τιμή ίση με $K_{gap\ Carter} = 1,077$.

$$K_{gap\ Carter} = K_{gap\ stator\ slot} \cdot K_{gap\ stator\ ventilation\ ducts} \quad (4.184)$$

- Υπολογισμός του συντελεστή διακένου της αύλακας του στάτη $K_{gap\ stator\ slot}$.

Ο συντελεστής διακένου της αύλακας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.185). Σε αυτή υπάρχει η παράμετρος του συντελεστή Carter για την αύλακα η οποία ισούται με $(1 - \delta_s)$. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή Carter αρχικά πρέπει να υπολογισθεί ο λόγος του ανοίγματος της αύλακας προς το μήκος του διακένου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η σχέση (4.186). Το μήκος του διακένου έχει υπολογισθεί από τη σχέση (4.17) της σελίδας 271 και προέκυψε ίσο με $L_{gap} = 5,5\ mm = 0,0055\ m$ ενώ, το άνοιγμα της αύλακας έχει ληφθεί ίσο με $b_{stator\ slot\ opening\ b1} = 7\ mm = 0,007\ m$. Το βήμα της αύλακας έχει υπολογισθεί από τη σχέση (4.32) και προέκυψε ίσο με $\tau_s = 3,26\ cm = 32,6\ mm$. Επομένως, ο λόγος του ανοίγματος της αύλακας προς το μήκος του διακένου προκύπτει ίσος με $b_{stator\ slot\ opening\ b1}/L_{gap} = 7/5,5 = 1,273$. Για αυτή την τιμή του λόγου για ημίκλειστες αύλακες από το σχήμα 4.6 με γραμμική παρεμβολή προκύπτει ότι ο συντελεστής Carter για την αύλακα ισούται με $(1 - \delta_s) = 0,24$. Μετά από την αντικατάσταση των τιμών των προαναφερθέντων μεταβλητών στη σχέση (4.185) προκύπτει ότι η τιμή του συντελεστή διακένου της αύλακας του στάτη είναι ίση με $K_{gap\ stator\ slot} = 1,054$.

$$K_{gap\ stator\ slot} = \frac{\tau_s}{\tau_s - b_{stator\ slot\ opening\ b1} \cdot (1 - \delta_s)} \quad (4.185)$$

$$\frac{b_{stator\ slot\ opening\ b1}}{L_{gap}} \quad (4.186)$$

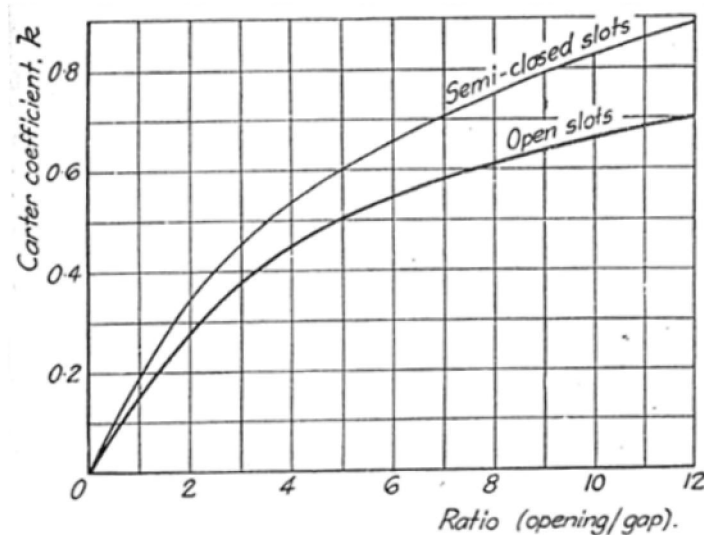
- Υπολογισμός του συντελεστή διακένου για τα διάκενα αερισμού του στάτη $K_{gap\ stator\ ventilation\ ducts}$.

Ο συντελεστής διακένου για τα διάκενα αερισμού του στάτη υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.187). Σε αυτή υπάρχει η παράμετρος του συντελεστή Carter για την αύλακα η οποία ισούται με $(1 - \delta_s)$. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή Carter αρχικά πρέπει να υπολογισθεί ο λόγος του ανοίγματος του διάκενου αερισμού προς το μήκος του διακένου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η σχέση (4.188). Το μήκος του διακένου έχει υπολογισθεί από τη σχέση (4.17) και προέκυψε ίσο με $L_{gap} = 5,5\ mm$ ενώ. Ο αριθμός των διακένων αερισμού έχει ληφθεί ίσος με $n_{ducts} = 4$ τεμάχια και το πλάτος

του διάκενου αερισμού ισούται με $b_{stator\ ventilation\ ducts} = 0,01\ m = 10\ mm$. Επομένως, ο λόγος του ανοίγματος της αύλακας προς το μήκος του διακένου προκύπτει ίσος με $b_{stator\ ventilation\ ducts}/L_{gap} = 10/5,5 = 1,818$. Για αυτή τη τιμή του λόγου για ημίκλειστες αύλακες από το σχήμα 4.7 με γραμμική παρεμβολή προκύπτει ότι ο συντελεστής Carter για τα διάκενα αερισμού του στάτη από τη γραφική για ανοικτές αύλακες ισούται με $(1 - \delta_s) = 0,3218$. Ακόμη, το μικτό μήκος του πυρήνα του στάτη το οποίο περιλαμβάνει το καθαρό μήκος του πυρήνα και το συνολικό μήκος των διακένων αερισμού έχει υπολογισθεί και προέκυψε ίσο με $L = 0,587\ m$. Μετά από την αντικατάσταση των τιμών των προαναφερθέντων μεταβλητών στη σχέση (4.187) προκύπτει ότι η τιμή του συντελεστή διακένου της αύλακας του στάτη είναι ίση με $K_{gap\ stator\ ventilation\ ducts} = 1,022$.

$$K_{gap\ stator\ ventilation\ ducts} = \frac{L}{L - n_{ducts} \cdot b_{stator\ ventilation\ ducts} \cdot (1 - \delta_s)} \quad (4.187)$$

$$\frac{b_{stator\ ventilation\ ducts}}{L_{gap}} \quad (4.188)$$



Σχήμα 4.7: Ο συντελεστής Carter ως συνάρτηση του λόγου του ανοίγματος της αύλακας προς το μήκος του διακένου για ημίκλειστες και ανοικτές αύλακες και διάκενα αερισμού [Ξ63 Fig 3.14 page 73]

Αντικαθιστώντας τις τιμές των ακόλουθων παραμέτρων: α) της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο $B_{gap} = 0,71\ Wb/m^2$, β) του μήκους του διακένου $L_{gap} = 0,0055\ m$ και γ) της τιμής του συντελεστή διακένου Carter $K_{gap\ Carter} = 1,077$ στην εξίσωση (4.149) προκύπτει η τιμή των αμπερελιγμάτων του διακένου $At_{Airgap} = 3347,73\ At$.

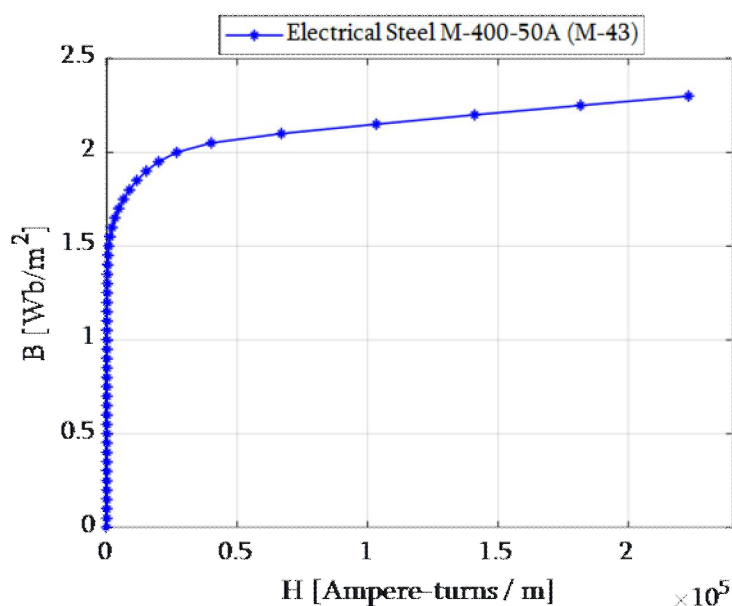
Παρατηρείται ότι αυτή είναι ελαφρώς διαφοροποιημένη από την τιμή που είχε υπολογισθεί προηγουμένως $At_{Airgap} = 3481,39\ At$. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τιμή του συντελεστή διακένου που έχει υπολογισθεί με το συντελεστή Carter $K_{gap\ Carter} = 1,077$ είναι ελαφρώς μικρότερη από εκείνη που έχει ληφθεί $K_{gap} = 1,12$ αλλά έχει μεγα-

λύτερη ακρίβεια διότι λαμβάνει υπόψιν της τόσο τις αύλακες όσο και τα διάκενα αερισμού του στάτη της γεννήτριας.

4.4.2 Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων των οδοντώσεων του στάτη

Έχει επιλεγθεί η κατασκευή του στάτη να πραγματοποιηθεί με οδοντώσεις σταθερού πλάτους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι αύλακες να έχουν κωνική μορφή. Επομένως, η μαγνητική επαγωγή στις οδοντώσεις του στάτη υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.36) μετά από την αντικατάσταση των τιμών των παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται οι οποίες έχουν υπολογισθεί και είναι: α) το πλάτος του κύριου σώματος της οδόντωσης $b_{stator\ tooth\ main\ body} = 0,0198\ m$, β) το μήκος των ελασμάτων του πυρήνα που έχει υπολογισθεί από τη σχέση (4.15) $L_i = 0,492\ m$, γ) του αριθμού των οδοντώσεων ανά πολικό τόξο $Teeth\ per\ Pole\ Arc = 8$ και δ) της αναθεωρημένης τιμής της μαγνητικής ροής ανά πόλο $\Phi_{revised} = 0,117\ Wb$. Η μαγνητική επαγωγή των οδοντώσεων του στάτη προέκυψε ίση με $B_{stator\ tooth} = 1,5\ Wb/m^2$.

Για τη τιμή της μαγνητικής επαγωγής των οδοντώσεων του στάτη υπολογίζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου στις οδοντώσεις του στάτη. Αυτή προκύπτει από γραμμική παρεμβολή μέσω της γραφικής παράστασης του σχήματος 4.8 η οποία αναπαριστά τη μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής ως συνάρτηση της τιμής των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο $B = f(At/m)$ για το υλικό της λαμαρίνας που έχει επιλεγθεί M-400-50A (M-43). Στο σχήμα 4.9 εμφανίζεται η λεπτομέρεια της προαναφερθείσας χαρακτηριστικής για τιμές της μαγνητικής επαγωγής από $B = 1.4\ Wb/m^2$ έως και $B = 1.8\ Wb/m^2$.

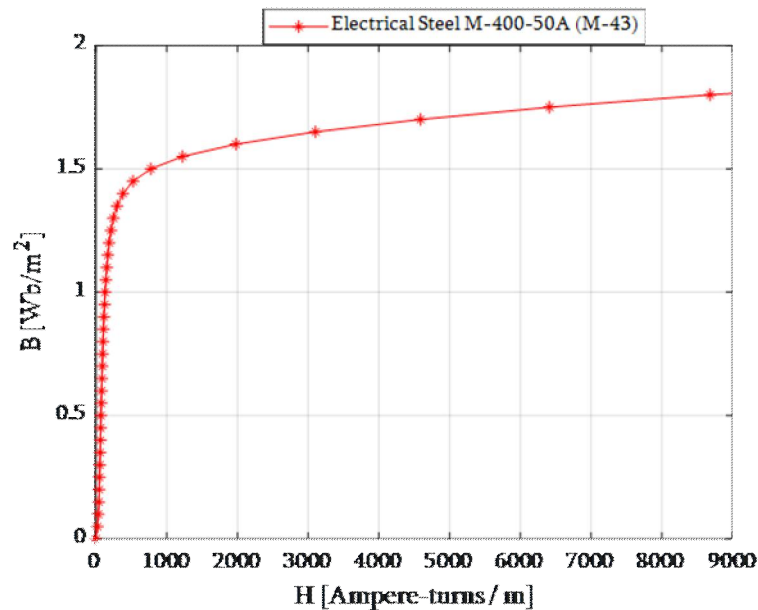


Σχήμα 4.8: Χαρακτηριστική $B = f(At/m)$ μαγνητικής λαμαρίνας υλικού M-400-50A (M-43)

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στις οδοντώσεις του στάτη προκύπτει ίση με $H_{stator\ tooth} = 780,99\ At/m$. Το ύψος της οδόντωσης του στάτη έχει υπολογισθεί από τη σχέση (4.46) και προέκυψε ίση με $h_{stator\ tooth} = 57\ mm = 0,057\ m$.

Η τιμή των αμπερελιγμάτων των οδοντώσεων υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.189) που παρατίθεται παρακάτω και προκύπτει ίση με $At_{stators\ teeth} = 44,52 At$.

$$At_{stators\ teeth} = H_{stator\ tooth} \cdot h_{stator\ tooth} \quad (4.189)$$



Σχήμα 4.9: Λεπτομέρεια χαρακτηριστικής $B = f(At/m)$ μαγνητικής λαμαρίνας υλικού M-400-50A (M-43)

4.4.3 Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων του ζυγώματος του στάτη

Για να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των αμπερελιγμάτων του ζυγώματος του στάτη αρχικά θα ληφθεί υπόψιν το εμβαδόν του που έχει υπολογισθεί από τη σχέση (4.86) και ισούται με $A_{stators\ yoke} = 0,054645 m^2$.

Ο υπολογισμός της μαγνητικής επαγωγής στο ζύγωμα του στάτη θα υπολογισθεί από τη σχέση (4.58) χωρίς να ληφθεί υπόψιν ο συντελεστής 1,024. Σύμφωνα με αυτή ισχύει ότι $B_{stators\ yoke} = \Phi_{stator\ yoke} / A_{stators\ yoke}$ ενώ, η μαγνητική ροή του ζυγώματος του στάτη έχει υπολογισθεί από τη σχέση (4.57) και προέκυψε ίση με $\Phi_{stator\ yoke} = 0,0585 Wb$. Με αντικατάσταση των τιμών των παραμέτρων προκύπτει ότι η μαγνητική επαγωγή στο ζύγωμα του στάτη ισούται με $B_{stators\ yoke} = 1,07 Wb/m^2$.

Η τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο ζύγωμα του στάτη υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή. Συγκεκριμένα από τη γραφική παράσταση του σχήματος 4.8 και προκύπτει ίση με $H_{stators\ yoke} = 145,86 At/m$.

Η τιμή των αμπερελιγμάτων του ζυγώματος του στάτη υπολογίζεται από τη σχέση (4.190) και προκύπτει ίση με $At_{stators\ yoke} = 33,68 At$.

$$At_{stators\ yoke} = H_{stators\ yoke} \cdot L_{average\ magnetic\ flux\ route\ stators\ yoke} \quad (4.190)$$

όπου: $L_{average\ magnetic\ flux\ route\ stators\ yoke}$ το μήκος της διαδρομής της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του στάτη (m).

Για να υπολογισθεί το μήκος της διαδρομής της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του στάτη πρέπει να υπολογισθεί η μέση διάμετρος του ζυγώματος του στάτη. Αυτή προκύπτει από τη σχέση (4.191) και ισούται με $D_{average\ stators\ yoke} = 1,47\ m$. Οι παράμετροι που εμπεριέχονται στην εξίσωση έχουν ήδη υπολογισθεί. Συγκεκριμένα: α) η εσωτερική διάμετρος του στάτη προέκυψε ίση με $D_{internal\ stator} = 1,245\ m$, β) το ύψος της οδόντωσης του στάτη έχει υπολογισθεί από την εξίσωση (4.46) και προέκυψε ίσο με $h_{stator\ tooth} = 0,057\ m$ και γ) το βάθος του ζυγώματος του στάτη έχει υπολογισθεί από την εξίσωση (4.58) και προέκυψε ίσο με $d_{stators\ yoke} = 0,111\ m$.

$$D_{average\ stators\ yoke} = D_{internal\ stator} + 2 \cdot h_{stator\ tooth} + d_{stators\ yoke} \quad (4.191)$$

Η μέση τιμή του μήκους της διαδρομής της μαγνητικής ροής στο ζύγωμα του στάτη υπολογίζεται από τη σχέση (4.192). Σε αυτή η παράμετρος P αντιστοιχεί στον αριθμό των πόλων της μηχανής. Η τιμή του μήκους της διαδρομής της μαγνητικής ροής προκύπτει ίση με $L_{average\ magnetic\ flux\ route\ stators\ yoke} = 0,2309\ m$.

$$L_{average\ magnetic\ flux\ route\ stators\ yoke} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\pi \cdot D_{average\ stators\ yoke}}{P} \right] \quad (4.192)$$

4.4.4 Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων διέγερσης για τους πόλους του δρομέα

Για να επιτευχθεί ο υπολογισμός των αμπερελιγμάτων που απαιτείται να τοποθετηθούν σε κάθε πόλο του δρομέα πρέπει να υπολογιστούν η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της μαγνητικής ροής που υφίστανται σε αυτόν.

Αρχικά υπολογίζεται το άθροισμα των αμπερελιγμάτων για τα επιμέρους τμήματα του στάτη σύμφωνα με τη σχέση (4.193). Τα τμήματα αυτά είναι: α) το διάκενο της γεννήτριας, β) οι οδοντώσεις του στάτη και γ) το ζύγωμα του στάτη. Η τιμή τους προκύπτει ίση με $At_{Airgap-stators\ teeth-stators\ yoke} = 3425,32\ At/m$.

$$At_{Airgap-stators\ teeth-stators\ yoke} = At_{Airgap} + At_{stators\ teeth} + At_{stators\ yoke} \quad (4.193)$$

- Υπολογισμός της μαγνητικής ροής σκέδασης που υφίσταται ανάμεσα στα πέδιλα των πόλων $\Phi_{leakage\ between\ pole\ shoes}$.

Η μαγνητική ροή σκέδασης που υφίσταται ανάμεσα στα πέδιλα των πόλων του δρομέα υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση (4.194). Συγκεκριμένα, αυτή αποτελείται από το γινόμενο του αθροίσματος των αμπερελιγμάτων που έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τη σχέση (4.193) με ένα συντελεστή ο οποίος ονομάζεται συντελεστής μαγνητικής ροής σκέδασης ανάμεσα στα πέδιλα των πόλων και λαμβάνει τιμές μέσα από το εύρος $\Phi_{leakage\ between\ pole\ shoes\ coefficient} = (17 \div 20) \cdot 10^{-8}$. Για την υπό μελέτη σχεδίαση αυτή λαμβάνεται ίση με $\Phi_{leakage\ between\ pole\ shoes\ coefficient} = 17 \cdot 10^{-8}$ οπότε, η τιμή της μαγνητικής ροής σκέδασης που υφίσταται ανάμεσα στα πέδιλα των πόλων προκύπτει ίση με $\Phi_{leakage\ between\ pole\ shoes} = 0,0005824\ Wb$.

$$\Phi_{leakage\ between\ pole\ shoes} = \Phi_{leakage\ between\ pole\ shoes\ coefficient} \cdot At_{Airgap-stators\ teeth-stators\ core\ yoke} \quad (4.194)$$

- Υπολογισμός της μαγνητικής ροής σκέδασης ανάμεσα στους πόλους του δρομέα $\Phi_{leakage\ between\ poles}$.

Η μαγνητική ροή σκέδασης που υφίσταται ανάμεσα στους πόλους του δρομέα υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση (4.195). Συγκεκριμένα, αυτή αποτελείται από το γινόμενο του αθροίσματος των αμπερελιγμάτων που έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τη σχέση (4.193) με ένα συντελεστή ο οποίος ονομάζεται συντελεστής μαγνητικής ροής σκέδασης των πόλων. Οι τιμές του συντελεστή αυτού λαμβάνονται μέσα από το εύρος $\Phi_{leakage\ between\ poles\ coefficient} = (70 \div 80) \cdot 10^{-8}$. Στην υπό εξέταση περίπτωση αυτή λαμβάνεται ίση με $\Phi_{leakage\ between\ poles\ coefficient} = 70 \cdot 10^{-8}$. Επομένως, η τιμή της μαγνητικής ροής σκέδασης που υφίσταται ανάμεσα στους πόλους προκύπτει ίση με $\Phi_{leakage\ between\ poles} = 0,002398\ Wb$.

$$\Phi_{leakage\ between\ poles} = \Phi_{leakage\ between\ poles\ coefficient} \cdot At_{Airgap-stators\ teeth - stators\ core\ yoke} \quad (4.195)$$

- Υπολογισμός της συνολικής μαγνητικής ροής του πόλου του δρομέα στην κορυφή του $\Phi_{top\ of\ pole\ min}$.

Η συνολική μαγνητική ροή του πόλου του δρομέα στην κορυφή του (άνω τμήμα στην πλευρά του διακένου) είναι η ελάχιστη μαγνητική ροή του πόλου, υπολογίζεται από τη σχέση (4.196) και προκύπτει ίση με $\Phi_{top\ of\ pole\ min} = 0,1176\ Wb$.

$$\Phi_{top\ of\ pole\ min} = \Phi_{per\ pole\ revised} + \Phi_{leakage\ between\ pole\ shoes} \quad (4.196)$$

- Υπολογισμός της συνολικής μαγνητικής ροής του πόλου του δρομέα στη βάση του πόλου $\Phi_{base\ of\ pole\ max}$.

Η συνολική μαγνητική ροή του πόλου του δρομέα στη βάση του (κάτω τμήμα στην πλευρά του άξονα) είναι η μέγιστη μαγνητική ροή του πόλου, υπολογίζεται από τη σχέση (4.197) και προκύπτει ίση με $\Phi_{base\ of\ pole\ max} = 0,11998\ Wb$.

$$\Phi_{base\ of\ pole\ max} = \Phi_{per\ pole\ revised} + \Phi_{leakage\ between\ poles} \quad (4.197)$$

- Υπολογισμός της ελάχιστης $B_{rotors\ pole\ min}$ και της μέγιστης $B_{rotors\ pole\ max}$ τιμής της μαγνητικής επαγωγής στον πόλο του δρομέα.

Ο υπολογισμός της ελάχιστης $B_{rotors\ pole\ min}$ και της μέγιστης $B_{rotors\ pole\ max}$ τιμής της μαγνητικής επαγωγής στον πόλο του δρομέα απαιτεί τον προσδιορισμό του εμβαδού του πόλου από τις διαστάσεις του. Αυτός πραγματοποιείται από την εξίσωση (4.157) και η τιμή του εμβαδού του προκύπτει ίση με $A_{rotors\ pole\ dimensions} = 0,1074\ m^2$.

Έπειτα υπολογίζονται οι τιμές των μαγνητικών επαγωγών σύμφωνα με τη σχέση (4.156) η οποία λαμβάνει τη μορφή των εξισώσεων (4.198) και (4.199) αντίστοιχα. Από την πρώτη προκύπτει η ελάχιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής του πόλου του δρομέα η οποία ισούται με $B_{rotor\ poles\ min} = 1,095\ Wb/m^2$. Από τη δεύτερη προκύπτει η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής του πόλου του δρομέα η οποία λαμβάνει τιμή ίση με $B_{rotor\ poles\ max} = 1,117\ Wb/m^2$.

$$B_{rotor\ poles\ min} = \frac{\Phi_{top\ of\ pole\ min}}{A_{rotors\ pole\ dimensions}} \quad (4.198)$$

$$B_{rotor\ poles\ max} = \frac{\Phi_{base\ of\ pole\ max}}{A_{rotors\ pole\ dimensions}} \quad (4.199)$$

- Προσδιορισμός της ελάχιστης $H_{rotors\ pole\ min}$ και της μέγιστης $H_{rotors\ pole\ max}$ τιμής της έντασης του μαγνητικού πεδίου στον πόλο του δρομέα.

Ο προσδιορισμός της ελάχιστης $H_{rotors\ pole\ min}$ και της μέγιστης $H_{rotors\ pole\ max}$ τιμής της έντασης του μαγνητικού πεδίου στον πόλο του δρομέα πραγματοποιείται με γραμμική παρεμβολή από τη γραφική παράσταση του σχήματος 4.8 για τις αντίστοιχες τιμές των μαγνητικών επαγωγών ανά περίπτωση. Οι τιμές που προκύπτουν είναι: α) η ελάχιστη τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου του πόλου η οποία είναι ίση με $H_{rotors\ pole\ min} = 151,85\ At/m$ και β) η μέγιστη τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου του πόλου η οποία ισούται με $H_{rotors\ pole\ max} = 158,25\ At/m$.

Από τις τιμές των εντάσεων του μαγνητικού πεδίου και από το συνολικό ύψος του πόλου που έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τη σχέση (4.200) υπολογίζεται η τιμή των αμπερελιγμάτων του πόλου. Το συνολικό ύψος του πόλου του δρομέα υπολογίστηκε από τη σχέση (4.169) και προέκυψε ίσο με $h_{rotor\ pole\ total} = 0,18\ m$. Τα αμπερελίγματα ανά πόλο του δρομέα προκύπτουν ίσα με $At_{rotors\ pole\ total} = 27,72\ At$

$$At_{rotors\ pole\ total} = \left(\frac{2}{3} \cdot H_{rotors\ pole\ min} + \frac{1}{3} \cdot H_{rotors\ pole\ max} \right) \cdot h_{rotor\ pole\ total} \quad (4.200)$$

4.4.5 Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων του ζυγώματος του δρομέα

Για να επιτευχθεί ο υπολογισμός των αμπερελιγμάτων του ζυγώματος του δρομέα αρχικά υπολογίζεται η μαγνητική ροή του ζυγώματος του δρομέα σύμφωνα με την εξίσωση (4.201). Συγκεκριμένα, η μαγνητική ροή στο ζύγωμα του δρομέα λαμβάνεται ίση με το ήμισυ της μέγιστης τιμής της μαγνητικής ροής του πόλου του δρομέα. Αυτή προκύπτει ίση με $\Phi_{rotors\ yoke} = 0,05999\ Wb$. Η τιμή αυτή είναι διαφορετική από εκείνη που έχει αρχικά υπολογισθεί.

$$\Phi_{rotors\ yoke} = \frac{1}{2} \cdot \Phi_{base\ of\ pole\ max} \quad (4.201)$$

Το εμβαδόν του ζυγώματος του δρομέα υπολογίζεται από την εξίσωση (4.180) σύμφωνα με τις διαστάσεις του. Αυτές είναι: α) το μήκος ζυγώματος δρομέα $L_{rotors\ yoke} = 0,587\ m$ και β) το βάθος ζυγώματος δρομέα $d_{rotors\ yoke} = 0,1\ m$ ενώ, η τιμή του προκύπτει ίση με $A_{rotors\ yoke} = 0,0587\ m^2$.

Για τη νέα τιμή της μαγνητικής ροής του ζυγώματος του δρομέα υπολογίζεται η μαγνητική επαγωγή του σύμφωνα με την εξίσωση (4.179). Η τιμή της μαγνητικής επαγωγής του ζυγώματος που λαμβάνει υπόψιν τη μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής του πόλου στη βάση του ισούται με $B_{rotors\ yoke} = 1,022\ Wb/m^2$.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο ζύγωμα του ρότορα προκύπτει για την υπολογισθείσα τιμή της μαγνητικής επαγωγής του με γραμμική παρεμβολή από τη γραφική παράσταση του σχήματος 4.8. Η τιμή της ισούται με $H_{rotors\ yoke} = 135,02\ At/m$.

Έπειτα, υπολογίζεται το μέσο μήκος της διαδρομής της μαγνητικής ροής στο ζύγωμα του δρομέα. Αρχικά, υπολογίζεται η μέση διάμετρος του ζυγώματος με τη χρήση της εξίσωσης (4.202). Από αυτή προκύπτει ότι η τιμή της ισούται με $D_{average\ rotors\ yoke} = 0,774\ m$. Ο υπολογισμός του μέσου μήκους της διαδρομής της μαγνητικής ροής στο ζύγωμα του δρομέα πραγματοποιείται σύμφωνα με την εξίσωση (4.203) στην οποία η παράμετρος P είναι ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας. Η τιμή του προκύπτει ίση με $L_{average\ magnetic\ flux\ route\ rotors\ yoke} = 0,1216\ m$. Τα αναγκαία αμπερελίγματα του ζυγώματος του δρομέα υπολογίζονται από τη σχέση (4.204) και η τιμή τους ισούται με $At_{rotors\ yoke} = 16,42\ At$.

$$D_{average\ rotors\ yoke} = D_{external\ rotor} - 2 \cdot h_{rotor\ pole\ total} - d_{rotors\ yoke} \quad (4.202)$$

$$L_{average\ magnetic\ flux\ route\ rotors\ yoke} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\pi \cdot D_{average\ rotors\ yoke}}{P} \right] \quad (4.203)$$

$$At_{rotors\ yoke} = H_{rotors\ yoke} \cdot L_{average\ magnetic\ flux\ route\ rotors\ yoke} \quad (4.204)$$

Τα συνολικά αμπερελίγματα του μαγνητικού κυκλώματος που απαιτούνται για τη λειτουργία της γεννήτριας εν κενώ υπολογίζονται από την άθροιση των αμπερελιγμάτων που έχουν υπολογιστεί για τα επιμέρους τμήματα από τα οποία απαρτίζεται από τη σχέση (4.205). Η τιμή τους ισούται με $At_{total\ No\ load} = 3470,06\ At$.

$$At_{total\ No\ load} = At_{Airgap} + At_{stators\ teeth} + At_{stators\ yoke} + At_{rotors\ pole\ total} + At_{rotors\ yoke} \quad (4.205)$$

4.5 Χάραξη της καμπύλης μαγνήτισης

Για να χαραχθεί η καμπύλη μαγνήτισης απαιτείται ο προσδιορισμός των αμπερελιγμάτων κενού φορτίου για τις ακόλουθες ποσοστιαίες τιμές της ονομαστικής τάσης εξόδου της γεννήτριας: α) 100 % , β) 110 % , γ) 120 % , δ) 130 % , ε) 140 % και στ) 150 %. Υλοποιείται η συγκέντρωση των αποτελεσμάτων σε πίνακες και σύμφωνα με αυτά πραγματοποιείται η σχεδίαση της χαρακτηριστικής ανοικτού κυκλώματος της γεννήτριας η οποία είναι η καμπύλη μαγνήτισης.

Στους πίνακες εμφανίζονται οι ακόλουθες παράμετροι για τα διάφορα τμήματα του μαγνητικού κυκλώματος: α) Η μαγνητική ροή Φ της οποίας οι μονάδες μέτρησης είναι $[Wb]$, β) Η μαγνητική επαγωγή B σε μονάδες $[Wb/m^2]$, γ) Η ένταση του μαγνητικού πεδίου H σε μονάδες $[At/m]$ και δ) Τα αμπερελίγματα $[At]$.

Πίνακας 4.2.α

Μαγνητική ροή, μαγνητική επαγωγή, ένταση του μαγνητικού πεδίου και αναγκαία αμπερελίγματα για τα διάφορα τμήματα του μαγνητικού κυκλώματος.

Φασική Τάση [V]		398,37 (100 %)					438,21 (110 %)				
α/α	Τμήμα της γεννήτριας	Μήκος τμήματος [m]	Μαγνητική Ροή Φ [Wb]	Μαγνητική Επαγωγή B [Wb/m ²]	Ένταση Μαγνητικού Πεδίου H [At/m]	Αμπερελίγματα [At]	Μαγνητική Ροή Φ [Wb]	Μαγνητική Επαγωγή B [Wb/m ²]	Ένταση Μαγνητικού Πεδίου H [At/m]	Αμπερελίγματα [At]	
1	Διάκενο	0,0055	0,117	0,71	608677	3347,7	0,1287	0,781	669545	3682,5	
2	Οδοντώσεις Στάτη	0,0057	0,117	1,5	780,99	44,52	0,1287	1,65	3117,88	177,72	
3	Ζύγωμα Στάτη	0,2309	0,0585	1,071	145,88	33,68	0,06435	1,178	178,52	41,22	
4	Αμπερελίγματα Στάτη					3425,9					3901,4
5	Πόλος Δρομέα min	0,18	0,1176	1,095	151,85		0,1294	1,205	189,24		
6	Πόλος Δρομέα max	0,18	0,1199	1,117	158,25		0,132	1,23	201,95		
7	Πόλος Δρομέα Σύνολο					27,72					34,83
8	Ζύγωμα Δρομέα	0,1216	0,0599	1,022	135,02	16,42	0,066	1,125	160,65	19,54	
9	Συνολικά Αμπερελίγματα Κενού Φορτίου					3470,1					3955,8

Παρατηρώντας τις τιμές των παραμέτρων εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:
 α) Η μαγνητική ροή Φ έχει ίδια τιμή τόσο στο διάκενο όσο και στις οδοντώσεις του στατη για όλες τις τιμές των Η.Ε.Δ., β) Για να προσδιοριστούν τα αναγκαία αμπερελίγματα ανά πόλο του δρομέα πρέπει να υπολογιστούν οι ελάχιστες (στην κορυφή του πόλου και οι μέγιστες (στη βάση του πόλου) τιμές των παραμέτρων της μαγνητικής ροής Φ και της μαγνητικής επαγωγής B από τις οποίες υπολογίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου H . Έπειτα υπολογίζονται τα αναγκαία αμπερελίγματα ανά πόλο. γ) Τα αμπερελίγματα του διακένου αποτελούν την πλειοψηφία των

αμπερελιγμάτων σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται. δ) Στις περιπτώσεις εκείνες που η τιμή της μαγνητικής επαγωγής στις οδοντώσεις λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες ή ίσες από $B_{stator\ tooth} \geq 1,8\ Wb/m^2$ παρατηρείται ότι η τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου αυξάνει πολύ σύμφωνα με τη χαρακτηριστική $B = f(At/m)$ της λαμαρίνας του μαγνητικού υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση μεγάλου αριθμού αμπερελιγμάτων για τις οδοντώσεις του στάτη. Ιδιαίτερα όταν η τιμή της μαγνητικής επαγωγής στις οδοντώσεις υπερβαίνει την τιμή των $2\ Wb/m^2$ η τιμή των αμπερελιγμάτων των οδοντώσεων προσεγγίζει ή και υπερβαίνει το 80 % των αμπερελιγμάτων που απαιτούνται για το διάκενο.

Πίνακας 4.2.β

Μαγνητική ροή, μαγνητική επαγωγή, ένταση του μαγνητικού πεδίου και αναγκαία αμπερελίγματα για τα διάφορα τμήματα του μαγνητικού κυκλώματος.

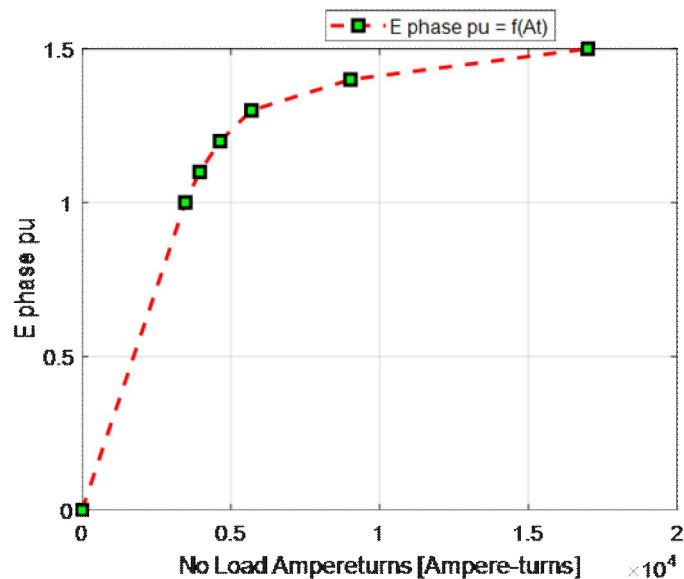
Φασική Τάση [V]		478 (120 %)					518 (130 %)			
α/α	Τμήμα της γεννήτριας	Μήκος τμήματος [m]	Μαγνητική Ροή Φ [Wb]	Μαγνητική Επαγωγή B [Wb/m ²]	Ένταση Μαγνητικού Πεδίου H [At/m]	Αμπερελίγματα [At]	Μαγνητική Ροή Φ [Wb]	Μαγνητική Επαγωγή B [Wb/m ²]	Ένταση Μαγνητικού Πεδίου H [At/m]	Αμπερελίγματα [At]
1	Διάκενο	0,0055	0,1404	0,852	730413	4017,3	0,1521	0,923	791281	4352
2	Οδοντώσεις Στάτη	0,0057	0,1404	1,8	8707,2	496,31	0,1521	1,95	19901,9	1134,4
3	Ζύγωμα Στάτη	0,2309	0,0702	1,285	236,25	54,55	0,07605	1,392	369	85,21
4	Αμπερελίγματα Στάτη					4568,1				5571,7
5	Πόλος Δρομέα min	0,18	0,1412	1,315	262,15		0,153	1,425	454,08	
6	Πόλος Δρομέα max	0,18	0,1444	1,344	293,28		0,1569	1,46	582,38	
7	Πόλος Δρομέα Σύνολο					49,05				89,43
8	Ζύγωμα Δρομέα	0,1216	0,0722	1,23	201,87	24,55	0,07847	1,337	285,53	34,72
9	Συνολικά Αμπερελίγματα Κενού Φορτίου					4641,7				5695,8

Πίνακας 4.2.γ

Μαγνητική ροή, μαγνητική επαγωγή, ένταση του μαγνητικού πεδίου και αναγκαία αμπερελίγματα για τα διάφορα τμήματα του μαγνητικού κυκλώματος.

Φασική Τάση [V]		557,7 (140 %)					597,6 (150 %)				
α/α	Τμήμα της γεννήτριας	Μήκος τμήματος [m]	Μαγνητική Ροή Φ [Wb]	Μαγνητική Επαγωγή B [Wb/m ²]	Ένταση Μαγνητικού Πεδίου H [At/m]	Αμπερελίγματα [At]	Μαγνητική Ροή Φ [Wb]	Μαγνητική Επαγωγή B [Wb/m ²]	Ένταση Μαγνητικού Πεδίου H [At/m]	Αμπερελίγματα [At]	
1	Διάκενο	0,0055	0,1638	0,994	852148	4686,8	0,1755	1,065	913016	5021,6	
2	Οδοντώσεις Στάτη	0,0057	0,1638	2,1	67337	3838,2	0,1755	2,25	182155	10383	
3	Ζύγωμα Στάτη	0,2309	0,0819	1,499	771,36	178,11	0,0878	1,606	2110,9	487,42	
4	Αμπερελίγματα Στάτη					8703					15892
5	Πόλος Δρομέα min	0,18	0,1653	1,539	1127		0,1782	1,659	3379,5		
6	Πόλος Δρομέα max	0,18	0,1714	1,596	1914,2		0,1893	1,763	6992,7		
7	Πόλος Δρομέα Σύνολο					250,09					825,1
8	Ζύγωμα Δρομέα	0,1216	0,0857	1,46	574,25	69,83	0,0947	1,613	2264,9	275,41	
9	Συνολικά Αμπερελίγματα Κενού Φορτίου					9023					16992

Η καμπύλη μαγνήτισης προκύπτει από τις τιμές των συνολικών αμπερελιγμάτων που απαιτούνται κατά περίπτωση για την ανάπτυξη της Η.Ε.Δ. της γεννήτριας σε ένα εύρος από 1 ÷ 1,5 p.u. και παρατίθεται στο σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Χαρακτηριστική μαγνήτισης $E_{phase pu} = f(At/m)$ της υπό σχεδίαση σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων

4.6 Υπολογισμός της αναπτυσσόμενης τάσης του εναλλακτήρα $E_g phase pu$

Ο υπολογισμός της αναπτυσσόμενης τάσης του εναλλακτήρα πραγματοποιείται από την εξίσωση (4.206).

$$E_g phase pu = E_{ph pu} + I_{ph pu} \cdot (R_{phase stator pu} + j \cdot X_{stator pu flux leakage}) \quad (4.206)$$

- όπου: $E_{ph pu}$ η φασική τάση ανά μονάδα.
 $I_{ph pu}$ το ρεύμα φάσης ανά μονάδα.
 $R_{phase stator pu}$ η αντίσταση της φάσης του στάτη ανά μονάδα
 $X_{stator pu flux leakage}$ η τιμή της αντίδρασης σκέδασης ανά μονάδα

Στην ανωτέρω σχέση η τιμή της φασικής τάσης ανά μονάδα λαμβάνεται ίση με $E_{ph pu} = (1 + j 0) = 1 \angle 0^\circ$. Το ρεύμα φάσης ανά μονάδα προσδιορίζεται από την τιμή του συντελεστή ισχύος ο οποίος για την υπό μελέτη σχεδίαση ισούται με 0,85 και έχει επαγωγική συμπεριφορά. Αρχικά, υπολογίζεται η γωνία που αντιστοιχεί και έπειτα η τιμή του ημφ της γωνίας όπως παρατίθεται.

$$\cos \varphi = 0,85 \Rightarrow \varphi = \cos^{-1}(0,85) = 31,7883^\circ \Rightarrow \sin(31,7883^\circ) = 0,526783$$

Η τιμή του ρεύματος φάσης στο ανά μονάδα σύστημα προκύπτει ίση με $I_{ph pu} = (0,85 - j 0,526783) = 1 \angle -31,7883^\circ$. Το πρόσημο πλὴν στο φανταστικό μέρος στην καρτεσιανή μορφή αλλά και στη γωνία στην πολική μορφή οφείλεται στην επαγωγική συμπεριφορά φόρτισης της μηχανής. Σε αυτή η τάση πρέπει να προηγείται του ρεύματος κατά γωνία φ και εφόσον η τιμή της φασικής τάσης ανά μονάδα έχει γωνία 0° η γωνία του ρεύματος φάσης στο ανά μονάδα σύστημα θα είναι αρνητική. Οι παράμετροι των τυλιγμάτων του στάτη ανά φάση της αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης

ανά μονάδα έχουν υπολογισθεί από τις σχέσεις (4.183) και (4.145) αντίστοιχα. Οι τιμές τους ισούνται με $R_{phase\ stator\ pu} = 0,01246\ pu$ και $X_{stator\ pu\ flux\ leakage} = 0,35735\ p.u.$

Η φασική τάση ανά μονάδα που αναπτύσσεται στα άκρα του εναλλακτήρα μετά την αντικατάσταση των τιμών των παραμέτρων στην εξίσωση (4.206) προκύπτει ίση με $E_{g\ phase\ pu} = 1,23512 \pm 13,9226^\circ$. Από την τιμή του μέτρου της αναπτυσσόμενης τάσης ανά μονάδα $|E_{g\ phase\ pu}| = 1,23512$ με γραμμική παρεμβολή από τη χαρακτηριστική μαγνήτισης της γεννήτριας που παρατίθεται στο σχήμα 4.10 προκύπτει ότι η τιμή των αμπερελιγμάτων που αντιστοιχούν ισούνται με $At_{for\ E_{g\ phase\ pu}} = 5011,96\ At.$

4.7 Υπολογισμός των αμπερελιγμάτων πλήρους φορτίου της διέγερσης ανά πόλο

Τα αμπερελίγματα πλήρους φορτίου της γεννήτριας υπολογίζονται από τη σχεδίαση του διάνυσματικού διαγράμματος αφού προηγουμένως έχουν υπολογιστεί η τιμή της αναπτυσσόμενης Η.Ε.Δ. και τα αμπερελίγματα αντίδρασης ανά πόλο του στάτη.

Η τιμή της αναπτυσσόμενης Η.Ε.Δ. από τη γεννήτρια έχει υπολογισθεί από τη σχέση (4.206) και προέκυψε ίση με $E_{g\ phase\ pu} = 1,23512 \pm 13,9226^\circ$ ενώ, τα αμπερελίγματα αντίδρασης ανά πόλο του στατη έχουν υπολογισθεί από τη σχέση (4.146) και η τιμή τους ισούνται με $At_{Reaction\ per\ Stators\ pole} = 5117,68\ At.$

- Βήματα κατασκευής του διάνυσματικού διαγράμματος για τον προσδιορισμό των αμπερελιγμάτων διέγερσης πλήρους φορτίου.

1. Επιλέγεται η κλίμακα της σχεδίασης για τα αμπερελίγματα

Η κλίμακα σχεδίασης ορίζεται ως η αντιστοιχία $1\ cm = 7000\ At.$

2. Από το διάνυσμα ab αναπαρίσταται η φασική τάση της μηχανής

$$ab = E_{ph\ pu} = (1 + j\ 0) = 1 \pm 0^\circ$$

3. Η ωμική πτώση τάσης της γεννήτριας αναπαρίσταται από το διάνυσμα bd

Υπολογίζεται από τη σχέση (4.207) και προκύπτει ίση με $V_{drop\ IR\ per\ phase\ pu} = 0,01246 \pm -31,7883^\circ.$

$$bd = V_{drop\ IR\ per\ phase\ pu} = I_{phase\ pu} \cdot R_{phase\ stator\ pu} \quad (4.207)$$

4. Η επαγωγική πτώση τάσης της μηχανής αναπαρίσταται από το διάνυσμα de

Υπολογίζεται από τη σχέση (4.208) και προκύπτει ίση με $V_{drop\ IX_s\ per\ phase\ pu} = 0,35735 \pm 58,2117^\circ.$ Αυτό σχεδιάζεται κάθετα σε γωνία 90° ως προς το διάνυσμα bd του 3^{ου} βήματος που αναπαριστά την ωμική πτώση τάσης στα τυλίγματα του στάτη ανά μονάδα

$$de = V_{drop\ IX_s\ per\ phase\ pu} = I_{phase\ pu} \cdot X_{stator\ pu\ flux\ leakage} \quad (4.208)$$

5. Η αναπτυσσόμενη τάση του εναλλακτήρα αναπαρίσταται από το διάνυσμα ae

$$ae = E_{g\ phase\ pu} = 1,23512 \pm 13,9226^\circ$$

6. Προσδιορισμός του διάνυσματος af

Για τη τιμή της αναπτυσσόμενης τάσης από τη γεννήτρια έχουν προσδιοριστεί τα αμπερελίγματα διέγερσης που απαιτούνται με γραμμική παρεμβολή από τη χαρακτηριστική μαγνήτισης του σχήματος 4.10. Αυτά αναπαρίστανται από το διάνυσμα af

$$af = At_{for\ Eg\ phase\ pu} = 5011,96\ At$$

7. Τα αμπερελίγματα αντίδρασης του στάτη ανά πόλο αναπαρίστανται από το διάνυσμα fg

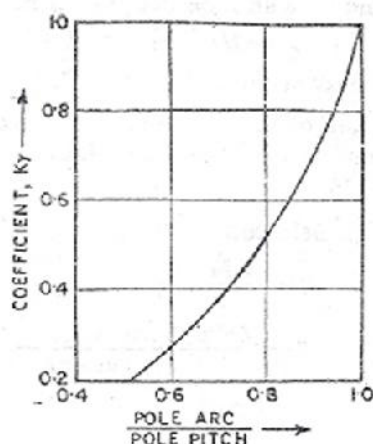
Αυτό σχεδιάζετε κάθετα ως προς το διάνυσμα του ρεύματος στο σημείο f . Εάν στο διανυσματικό διάγραμμα η πλευρά fg προεκταθεί έως ότου το διάνυσμα του ρεύματος τμηθεί από αυτή, τότε παρατηρείται ότι αυτή είναι κάθετη σε αυτό. Η σχεδίαση του διανύσματος πραγματοποιείται υπό κλίμακα όπως και όλα όσα έχουν προαναφερθεί

$$fg = At_{Reaction\ per\ Stators\ pole} = 5117,68\ At$$

8. Το διάνυσμα fg διαιρείται στο σημείο h έτσι ώστε να ισχύει η σχέση (4.209)

$$fh = K_r \cdot fg \quad (4.209)$$

Σε αυτή ο συντελεστής K_r ονομάζεται συντελεστής διασταυρούμενης αντίδρασης και εκφράζει τις σχετικές μαγνητικές διαπερατότητες των διαδρομών των συνιστωσών του εγκάρσιου και του ευθύ άξονα αντίστοιχα. Η μεταβολή του πραγματοποιείται ως προς το λόγο $K_f = Pole\ arc/Pole\ pitch$. Αυτός είναι ο λόγος του πολικού τόξου προς το πολικό βήμα και για την υπό μελέτη σχεδίαση έχει επιλεγθεί να ισούται με $K_f = 0,70$. Η τιμή του υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή από τη γραφική παράσταση του σχήματος 4.11. Αυτή προκύπτει ότι ισούται με $K_r = 0,3783$. Μετά από αντικατάσταση των παραμέτρων προκύπτει ότι το τμήμα fh ισούται με $fh = 0,3783 \cdot 5117,68 \Rightarrow fh = 1936,02\ At$, ενώ το τμήμα hg υπολογίζεται από τη διαφορά των παραπάνω διανυσμάτων και προκύπτει ίσο με $hg = fg - fh = 5117,68 - 1936,02 \Rightarrow hg = 3181,66\ At$.



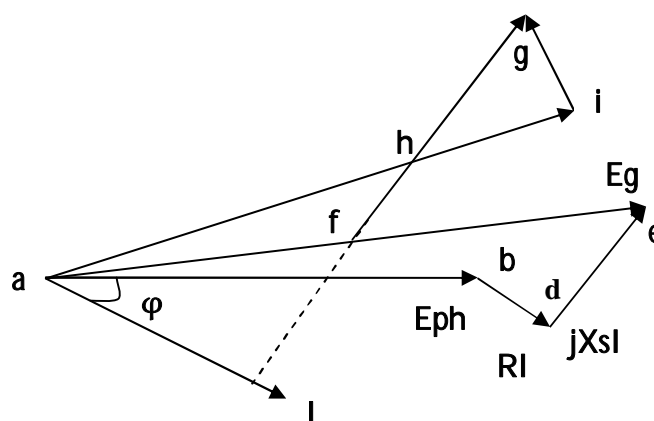
Σχήμα 4.11: Χαρακτηριστική μεταβολής του συντελεστή διασταυρούμενης αντίδρασης $K_r = f(K_f = Pole\ arc/Pole\ pitch)$ [Ξ63].

9. Προσδιορισμός του διανύσματος ai των αμπερελιγμάτων πλήρους φορτίου

Τα άκρα του διανύσματος ah ενώνονται και στη συνέχεια αυτό επεκτείνεται πέρα από το σημείο h . Με αφητηρία το σημείο g σχεδιάζεται μια κάθετη στο διάνυσμα ah που έχει επεκταθεί έτσι ώστε αυτό να τμηθεί στο σημείο i . Η τιμή των αμπερελιγμάτων της διέγερσης όταν η γεννήτρια λειτουργεί με πλήρες φορτίο προκύπτει γραφικά από το μήκος του διανύσματος ai .

$$ai = At_{full\ load\ per\ rotors\ pole\ vector} = 9137,23\ At$$

Στη συνέχεια παρατίθεται το διανυσματικό διάγραμμα μέσω του οποίου προσδιορίζονται τα αμπερελίγματα που απαιτούνται για τη διέγερση της γεννήτριας όταν αυτή λειτουργεί στο πλήρες φορτίου.



Σχήμα 4.12: Διανυσματικό διάγραμμα προσδιορισμού των αμπερελιγμάτων διέγερσης πλήρους φορτίου

4.8 Ρύθμιση της παραγόμενης τάσης της γεννήτριας

Η τιμή της τάσεως εξόδου της γεννήτριας όταν αυτή λειτουργεί εν κενώ προσδιορίζεται από τη χαρακτηριστική μαγνήτισης του σχήματος 4.10. Για την τιμή των αμπερελιγμάτων πλήρους φορτίου τα οποία έχουν προσδιοριστεί και προέκυψαν ίσα με $At_{full\ load\ per\ rotors\ pole\ vector} = 9137,23\ At$ με γραμμική παρεμβολή η τιμή της τάσεως εξόδου της γεννήτριας για αυτή την κατάσταση λειτουργίας προκύπτει ίση με:

$$E_g\ phase\ no\ load\ for\ At\ full\ load\ pu\ magnitude = 1,4014$$

Επομένως, η ρύθμιση της τάσης της μηχανής ισούται με $0,4014\ pu$.

4.9 Σχεδίαση του πηνίου της διέγερσης

Για πραγματοποιηθεί η σχεδίαση του πηνίου της διέγερσης της γεννήτριας αρχικά θα προσδιοριστούν η τάση της διεγέρτριας, η τάση που θα εφαρμοστεί στα πηνία της διέγερσης και η αναγκαία εφεδρεία της τάσης. Η παραγόμενη τάση από τη διεγέρτρια για εναλλακτικές μέσης ισχύος πρέπει να επιλέγεται από ένα εύρος $110 \div 125\ V$.

Επιλέγεται η διεγέρτρια να μην έχει ψήκτρες δηλαδή, να ανήκει στην κατηγορία Brushless. Η τάση της διεγέρτριας λαμβάνεται ίση με $V_{exciter} = 125 V$. Από αυτή η τάση που εφαρμόζεται στα πηνία του δρομέα που απαρτίζουν το τυλίγμα διέγερσης ισούται με $V_{rotor coils excitation} = 100 V$ ενώ, η διαφορά των δύο τάσεων λαμβάνεται ως εφεδρεία $V_{exciter reserve} = 25 V$. Αυτές οι παραδοχές γίνονται λαμβάνοντας υπόψη ότι η τάση για την οποία σχεδιάζονται τα πηνία διέγερσης κατά προσέγγιση πρέπει να ισούται με $V_{rotor coils excitation} = (80 \div 85) \% \cdot V_{exciter}$ [E15].

Επιλέγεται η σύνδεση των πηνίων του τυλίγματος διέγερσης να πραγματοποιηθεί εν σειρά *Rotor Coils Connection Type = Series*. Από αυτή τη συνδεσμολογία προκύπτει ότι ο αριθμός των παράλληλων κλάδων του τυλίγματος του δρομέα ισούται με $N_{rotors parallel branches} = 1$. Σε αυτή την περίπτωση η τάση που επικρατεί στα άκρα κάθε πηνίου του τυλίγματος διέγερσης υπολογίζεται από τη σχέση (4.210) και προκύπτει ίση με $V_{rotor coil} = 10 V$.

$$V_{rotor coil} = \frac{V_{rotor coils excitation}}{(P/N_{rotors parallel branches})} \quad (4.210)$$

όπου: P ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας.

▪ Υπολογισμός της διατομής του αγωγού των πηνίων της διέγερσης.

Η διατομή του αγωγού που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των πηνίων της διέγερσης υπολογίζεται από τη σχέση (4.211). Σε αυτή η ειδική αντίσταση του χαλκού ισούται με $\rho_{Cu 155^\circ C} = 0,0267 \Omega \cdot mm^2/m$ και έχει υπολογιστεί από τη σχέση (4.163), το μέσο μήκος του ελίγματος του πηνίου του δρομέα έχει υπολογιστεί από τη σχέση (4.165) και ισούται με $L_{rotor pole mean turn field coil} = 1,692 m$, τα αμπερελίγματα πλήρους φορτίου έχουν προσδιοριστεί και ισούνται με $At_{full load per rotors pole vector} = 9137,23 At$ ενώ, η τάση στα άκρα κάθε πηνίου ισούται με $V_{rotor coil} = 10 V$. Σύμφωνα με τα ανωτέρω το εμβαδόν διατομής του αγωγού των πηνίων της διέγερσης προκύπτει ίσο με $S_{rotor coil conductor 155^\circ C} = 41,27 mm^2$.

$$S_{rotor coil conductor 155^\circ C} = \frac{\rho_{Cu 155^\circ C} \cdot L_{rotor pole mean turn field coil} \cdot At_{full load per rotors pole vector}}{V_{rotor coil}} \quad (4.211)$$

όπου: $V_{rotor coils excitation}$ η τάση τροφοδοσίας του τυλίγματος διέγερσης.

$\rho_{Cu 155^\circ C}$ η ειδική αντίσταση του χαλκού σε θερμοκρασία $155^\circ C$.
 $L_{rotor pole mean turn field coil}$ το μέσο μήκος του ελίγματος του πηνίου του δρομέα

Για την κατασκευή του τυλίγματος των πόλων του δρομέα επιλέγεται η χρήση αγωγού παραλληλόγραμμης διατομής *Rotors Coil Conductor Shape = Rectangular*. Η διατομή καλύπτεται από τη χρήση ενός αγωγού $N_{Parallel Rectangular Conductors} = 1$. Επιλέγεται αγωγός με καθαρές διαστάσεις χωρίς τις μονώσεις του: α) Πλάτος αγωγού $b_{rotors coil conductor} = 2,24 mm$, β) Ύψος αγωγού $h_{rotors coil conductor} = 19 mm$. Η διατομή της μπάρας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.212) και προκύπτει ότι αυτή

ισούται με $S_{rotors\ coil\ rectangular\ conductor} = 42,56\ mm^2$. Οι διαστάσεις των μονωμένων αγωγών είναι: α) Πλάτος αγωγού $b_{insulated\ conductors\ rectangular} = 2,4\ mm = 0,24\ cm$, β) Ύψος αγωγού $h_{insulated\ conductors\ rectangular} = 19,2\ mm = 1,92\ cm$.

$$S_{rotors\ coil\ rectangular\ conductor} = N_{Parallel\ Rectangular\ Conductors} \cdot b_{rotors\ coil\ conductor} \cdot h_{rotors\ coil\ conductor} \quad (4.212)$$

▪ Υπολογισμός του ρεύματος διέγερσης.

Η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος στα τυλίγματα διέγερσης στην περίπτωση που η ψύξη της γεννήτριας πραγματοποιείται με φυσική ή εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα λαμβάνει τιμές εντός του εύρους $[3,5 \div 5\ A/mm^2]$. Για τη παρούσα σχεδίαση η πυκνότητα λαμβάνεται ίση με $J_{rotors\ excitation\ coils\ rectangular} = 4,7\ A/mm^2$ ενώ, η ένταση του ρεύματος του τυλίγματος διέγερσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.213) και προκύπτει ότι ισούται με $I_{rotors\ field} = 200\ A$.

$$I_{rotors\ field} = J_{rotors\ excitation\ coils\ rectangular} \cdot S_{rotors\ coil\ rectangular\ conductor} \quad (4.213)$$

▪ Υπολογισμός του αριθμού των ελιγμάτων του πηνίου διέγερσης.

Ο αριθμός των ελιγμάτων πλήρους φορτίου ισούται με τον αριθμό των ελιγμάτων του πηνίου διέγερσης. Αυτά υπολογίζονται από τη σχέση (4.214) και προκύπτουν ίσα με $N_{rotors\ field\ full\ load\ per\ pole} = 46$.

$$N_{rotors\ field\ full\ load\ per\ pole} = \frac{At_{full\ load\ per\ rotors\ pole\ vector}}{I_{rotors\ field}} \quad (4.214)$$

Έπειτα, από τη τιμή των ελιγμάτων πλήρους φορτίου ανά πόλο και τη τιμή του ρεύματος διέγερσης που έχουν υπολογιστεί από τη σχέση (4.215) υπολογίζεται η αναθεωρημένη τιμή των αμπερελιγμάτων πλήρους φορτίου ανά πόλο. Αυτή προκύπτει ίση με $At_{full\ load\ per\ rotors\ pole\ revised} = 9201,47\ At > At_{full\ load\ per\ rotors\ pole\ vector}$.

$$At_{full\ load\ per\ rotors\ pole\ revised} = N_{rotors\ field\ full\ load\ per\ pole} \cdot I_{rotors\ field} \quad (4.215)$$

Επειδή υπάρχει ο χώρος για την τοποθέτηση μεγαλύτερου αριθμού ελιγμάτων ανά πηνίο στο τύλιγμα διέγερσης πραγματοποιείται διερεύνηση η οποία στοχεύει στη μείωση του ρεύματος διέγερσης η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών χαλκού του δρομέα. Αρχικά, γίνεται αντιληπτό ότι για την τοποθέτηση των ελιγμάτων πλήρους φορτίου $N_{rotors\ field\ full\ load\ per\ pole} = 46$ που έχουν υπολογισθεί απαιτούνται επτά στρώσεις. Από αυτές οι έξι στρώσεις απαρτίζονται από επτά ελίγματα έκαστη ενώ, η έβδομη στρώση θα αποτελείται από τέσσερα ελίγματα. Επομένως, υπάρχει διαθέσιμος χώρος για την τοποθέτηση επιπρόσθετων τριών ελιγμάτων. Η αναθεωρημένη τιμή των ελιγμάτων πλήρους φορτίου του δρομέα προκύπτει από τη σχέση (4.216). Με αντικατάσταση του αριθμού των στρώσεων $N_{layers\ per\ rotor\ pole\ rectangular} = 7$ και των ελιγμάτων ανά στρώση του τυλίγματος του δρομέα $N_{coil\ turns\ per\ layer\ rotor\ pole\ rectangular} = 7$ προκύπτει ότι αυτή ισούται με $N_{rotors\ field\ full\ load\ per\ pole\ revised} = 49$ ελίγματα.

$$N_{rotors\ field\ full\ load\ per\ pole\ revised} = N_{layers\ per\ rotor\ pole\ rectangular} \cdot N_{coil\ turns\ per\ layer\ rotor\ pole\ rectangular} \quad (4.216)$$

- *Επαναπροσδιορισμός του ρεύματος διέγερσης.*

Από την αναθεωρημένη τιμή των ελιγμάτων και των αμπερελιγμάτων πλήρους φορτίου ανά πόλο του δρομέα επαναπροσδιορίζεται η τιμή του ρεύματος διέγερσης σύμφωνα με τη σχέση (4.217). Αυτή προκύπτει ίση με $I_{rotors\ field\ revised} = 187,79\ A$.

$$I_{rotors\ field\ revised} = \frac{At_{full\ load\ per\ rotors\ pole\ vector}}{N_{rotors\ field\ full\ load\ per\ pole\ revised}} \quad (4.217)$$

- *Επαναπροσδιορισμός της πυκνότητας του ρεύματος στο τύλιγμα διέγερσης.*

Η αναθεωρημένη τιμή της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος στο τύλιγμα διέγερσης υπολογίζεται από την εξίσωση (4.218). Παρατηρείται ότι αυτή λαμβάνει τιμή ίση με $J_{rotors\ excitation\ coils\ rectangular\ revised} = 4,41\ A/mm^2$ η οποία προκύπτει αισθητά μειωμένη σε σχέση με την αρχική.

$$J_{rotors\ excitation\ coils\ rectangular\ revised} = \frac{I_{rotors\ field\ revised}}{S_{rotors\ coil\ rectangular\ conductor}} \quad (4.218)$$

- *Προσδιορισμός των αναθεωρημένων τιμών του βάθους και του ύψους του πηνίου διέγερσης.*

Ο προσδιορισμός των αναθεωρημένων τιμών του βάθους και του ύψους του πηνίου της διέγερσης πραγματοποιείται για να διαπιστωθεί ότι η σχεδίαση διαθέτει τον αναγκαίο χώρο για την τοποθέτηση των πηνίων σε κάθε πόλο του δρομέα. Για το βάθος του πηνίου της διέγερσης χρησιμοποιείται η εξίσωση (4.219). Από αυτή προκύπτει ότι η αναθεωρημένη τιμή του βάθους του πηνίου ισούται με $d_{rotor\ pole\ field\ revised} = 1,68\ cm$. Συνεπώς, ισχύει ότι $d_{rotor\ pole\ field} = 3,14\ cm > d_{rotor\ pole\ field\ revised} = 1,68\ cm$. Επομένως, υπάρχει ο διαθέσιμος χώρος για την τοποθέτηση του πηνίου κατά πλάτος.

$$d_{rotor\ pole\ field\ revised} = \frac{N_{layers\ per\ rotor} \cdot b_{insulated\ conductors\ rectangular\ pole\ rectangular}}{\quad} \quad (4.219)$$

Η αναθεωρημένη τιμή του ύψους του πηνίου της διέγερσης υπολογίζεται με τη χρήση της εξίσωσης (4.220). Αυτή προκύπτει ίση με $h_{rotor\ pole\ field\ coil\ revised} = 14\ cm = 0,14\ m$. Συνεπώς, ισχύει ότι $h_{rotor\ pole\ field\ coil} = 14\ cm \geq h_{rotor\ pole\ field\ coil\ revised} = 14\ cm$. Επομένως, υπάρχει ο διαθέσιμος χώρος για την τοποθέτηση του πηνίου κατά ύψος.

$$h_{rotor\ pole\ field\ coil\ revised} = \frac{N_{coil\ turns\ per\ layer\ rotor} \cdot h_{insulated\ conductors\ rectangular}}{pole\ rectangular} \quad (4.220)$$

- *Προσδιορισμός της αντίστασης του πηνίου διέγερσης και των απωλειών χαλκού του δρομέα.*

Η αντίσταση έκαστου πόλου του τυλίγματος διέγερσης της γεννήτριας υπολογίζεται από την εξίσωση (4.221). Αυτή προκύπτει ίση με $R_{rotor\ pole\ field\ coil} = 0,05201\ \Omega$.

$$R_{rotor\ pole\ field\ coil} = \frac{\rho_{Cu\ 155^\circ C} \cdot L_{rotor\ pole\ mean} \cdot N_{rotors\ field\ full\ load}}{turn\ field\ coil \quad per\ pole\ revised} \cdot S_{rotors\ coil\ rectangular\ conductor} \quad (4.221)$$

Αρχικά, υπολογίζονται οι απώλειες χαλκού σε κάθε πηνίο του τυλίγματος από τη σχέση (4.222). Αυτές ισούνται με $P_{Cu\ rotor\ pole\ field\ coil} = 1834,1\ W$. Έπειτα, υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες χαλκού του δρομέα από την εξίσωση (4.223) και η τιμή τους προκύπτει ίση με $P_{Cu\ rotor\ poles\ field\ coils\ total} = 18341,4\ W$.

$$P_{Cu\ rotor\ pole\ field\ coil} = I_{rotors\ field\ revised}^2 \cdot R_{rotor\ pole\ field\ coil} \quad (4.222)$$

$$P_{Cu\ rotor\ poles\ field\ coils\ total} = P \cdot P_{rotor\ pole\ field\ coil} \quad (4.223)$$

Οι συνολικές απώλειες χαλκού του τυλίγματος διέγερσης απαρτίζονται από δύο συνιστώσες: α) τις απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του δρομέα και β) τις απώλειες χαλκού που οφείλονται στην πτώση τάσεως στους δακτυλίους τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του δρομέα με τάση. Όμως επειδή η σχεδίαση της γεννήτριας έχει επιλεγεί χωρίς την ύπαρξη δακτυλίων και ψηκτρών για την τροφοδοσία των τυλιγμάτων του ρότορα ανήκει στην κατηγορία γεννητριών άνευ ψηκτρών (Brushless) όπως έχει ήδη προαναφερθεί και η δεύτερη συνιστώσα των απωλειών χαλκού του δρομέα είναι μηδενική. Δηλαδή ισχύει ότι: $P_{rotor\ rings\ voltage\ drop\ Cu\ losses} = 0\ W$. Η τιμή συνολικών απωλειών χαλκού της διέγερσης υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.224) και προκύπτει ίση με $P_{Cu\ rotor\ total\ excitations\ losses} = 18,3\ kW$.

$$P_{Cu\ rotor\ total\ excitations\ losses} = P_{Cu\ rotor\ poles\ field\ coils\ total} + P_{rotor\ rings\ voltage\ drop\ Cu\ losses} \quad (4.224)$$

- Υπολογισμός της ισχύος και των απωλειών της διεγέρτριας.

Η διεγέρτρια του εναλλακτήρα πρέπει να διαθέτει ισχύ εξόδου τόση όση να καλύπτει τις συνολικές απώλειες χαλκού της διέγερσης. Επομένως ισχύει η σχέση (4.225). Ο βαθμός απόδοσης της διεγέρτριας λαμβάνεται ίσος με $n_{exciters} = 0,9$.

$$P_{exciters\ output} = P_{Cu\ rotor\ total\ excitations\ losses} \quad (4.225)$$

Η ισχύς εισόδου της διεγέρτριας υπολογίζεται από την εξίσωση (4.226) και η τιμή της προκύπτει ίση με $P_{exciters\ input} = 20,33\ kW$.

$$P_{exciters\ input} = \frac{P_{exciters\ output}}{n_{exciters}} \quad (4.226)$$

Οι απώλειες ισχύος της διεγέρτριας προσδιορίζονται από τη σχέση (4.227). Η τιμή τους προκύπτει ίση με $P_{exciters\ power\ losses} = 2,03\ kW$.

$$P_{exciters\ power\ losses} = P_{exciters\ input} - P_{exciters\ output} \quad (4.227)$$

4.10 Υπολογισμός της ισχύος εξόδου και των απωλειών τριβών και ανεμισμού της γεννήτριας

Η πραγματική ονομαστική ισχύς εξόδου της γεννήτριας προσδιορίζεται από την φαινομένη ισχύ εξόδου και τον ονομαστικό συντελεστή ισχύος της. Ο συντελεστής ισχύος έχει ληφθεί ίσος με $\cos\phi = 0,85$ ενώ, η γεννήτρια διαθέτει ονομαστική φαινομένη ισχύ εξόδου ίση με $S = 1482,5\ kVA$. Η τιμή της υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.228) και προκύπτει ίση με $P_{generators\ output} = 1260,13\ kW$.

$$P_{generators\ output} = S \cdot \cos\varphi \quad (4.228)$$

Οι απώλειες τριβών και ανεμισμού λαμβάνονται ίσες με το 1 % της ισχύος εξόδου της γεννήτριας, υπολογίζονται από την εξίσωση (4.229) και η τιμή τους προκύπτει ίση με $P_{generators\ friction\ windage\ losses} = 12,6\ kW$.

$$P_{generators\ friction\ windage\ losses} = 0,01 \cdot P_{generators\ output} \quad (4.229)$$

4.11 Υπολογισμός της θερμοκρασίας του τυλίγματος της διέγερσης

Για να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του τυλίγματος διέγερσης αρχικά πρέπει να έχουν προσδιοριστεί η εξωτερική διάμετρος του ρότορα και η ταχύτητα περιστροφής του σε στροφές ανά δευτερόλεπτο. Η εξωτερική διάμετρος του δρομέα υπολογίστηκε από την εξίσωση (4.152) και προέκυψε ίση με $D_{external\ rotor} = 1,234\ m$. Επιπρόσθετα, έχει προσδιοριστεί η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα η οποία προέκυψε ίση με $n_{s\ S.A.A.} = 10\ R.P.s$. Η ταχύτητα περιστροφής της περιφέρειας του δρομέα υπολογίζεται από τη σχέση (4.18) και ισούται με $u_{D_{external\ rotor}} = 38,77\ m/sec$.

Έπειτα, από τον πίνακα 2.18 λαμβάνεται η σχέση προσδιορισμού του συντελεστή ψύξεως για περιστρεφόμενα πηνία διέγερσης σύμφωνα με τη συνολική επιφάνεια ψύξεως του πηνίου. Αυτή είναι η εξίσωση (4.230) στην οποία ο αριθμητής λαμβάνεται ίσος με $C_{rotating\ excitation\ coils\ total\ cooling\ area\ numerator} = 0,08$ και προκύπτει ότι ο συντελεστής ψύξης των πηνίων της διέγερσης σύμφωνα με τη συνολική επιφάνεια ψύξης ισούται με $C_{rotating\ excitation\ coils\ total\ cooling\ area} = 0,0164$.

$$C_{rotating\ excitation\ coils\ total\ cooling\ area} = \frac{C_{rotating\ excitation\ coils\ total\ cooling\ area\ numerator}}{(1 + 0,1 \cdot u_{D_{external\ rotor}})} \quad (4.230)$$

- Υπολογισμός του εμβαδού της συνολικής επιφάνειας αποβολής θερμότητας ανά πηνίο.

Ο υπολογισμός του εμβαδού της συνολικής επιφάνειας αποβολής θερμότητας ανά πηνίο του τυλίγματος διέγερσης πραγματοποιείται από την εξίσωση (4.231). Οι μεταβλητές από τις οποίες εξαρτάται έχουν ήδη υπολογισθεί και παρατίθενται στη συνέχεια: α) $L_{rotor\ pole\ mean\ turn\ field\ coil} = 1,692\ m$, β) $h_{rotor\ pole\ field\ coil\ revised} = 0,14\ m$ και γ) $d_{rotor\ pole\ field\ revised} = 0,0168\ m$. Με την εκτέλεση των αναγκαίων πράξεων η τιμή του προκύπτει ίση με $A_{heat\ dissipation\ per\ rotor\ coil} = 0,53055\ m^2$.

$$A_{heat\ dissipation\ per\ rotor\ coil} = 2 \cdot L_{rotor\ pole\ mean\ turn\ field\ coil} \cdot \left(h_{rotor\ pole\ field\ coil\ revised} + d_{rotor\ pole\ field\ revised} \right) \quad (4.231)$$

Η αύξηση της θερμοκρασίας στα τυλίγματα των πόλων υπολογίζεται από τη σχέση (4.232) και η τιμή της προκύπτει ίση με $\theta_{excitation\ coil\ total\ cooling\ area} = 56,7^\circ C$.

$$\theta_{excitation\ coil\ total\ cooling\ area} = \frac{P_{Cu\ rotor\ pole\ field\ coil} \cdot C_{rotating\ excitation\ coils\ total\ cooling\ area}}{A_{heat\ dissipation\ per\ rotor\ coil}} \quad (4.232)$$

4.12 Υπολογισμός της θερμοκρασίας του στάτη

Η θερμοκρασία του στάτη οφείλεται στις απώλειες ισχύος που αποβάλλονται από την επιφάνεια του πυρήνα του στάτη. Αυτές κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες: α) Απώλειες χαλκού στους αγωγούς που βρίσκονται μέσα στις αύλακες του στατη, β) Απώλειες δινορρευμάτων στους αγωγούς (Eddy) και γ) Συνολικές απώλειες σιδήρου του στάτη.

- Υπολογισμός των απωλειών χαλκού των αγωγών που βρίσκονται μέσα στις αύλακες του στάτη.

Για να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των απωλειών χαλκού των αγωγών που βρίσκονται μέσα στις αύλακες του στάτη πρέπει να προσδιοριστούν: α) το μήκος της αύλακας του στάτη και β) το μέσο μήκος των αγωγών που βρίσκονται μέσα στις αύλακες του στάτη. Το μήκος της αύλακας του στάτη ισούται με το μικτό μήκος της μηχανής $Slots Length = L = 0,587 m$. Το μέσο μήκος των αγωγών υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.233), η παράμετρος του αριθμητή ισούται με $L_{average stators coil turn length} = 2,543 m$ ενώ, η τιμή του προκύπτει ίση με $L_{average conductors length inside stator slots} = 1,2715 m$.

$$L_{average conductors length inside stator slots} = \frac{L_{average stators coil turn length}}{2} \quad (4.233)$$

Οι απώλειες ισχύος του τμήματος των αγωγών του στάτη που βρίσκονται μέσα στις αύλακες υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση (4.234) και προκύπτουν ίσες με $P_{stators Cu losses conductor part inside slots} = 8524,63 kW$.

$$P_{stators Cu losses conductor part inside slots} = \left(\frac{L}{L_{average conductors length inside stator slots}} \right) \cdot P_{Cu stator power losses} \quad (4.234)$$

- Υπολογισμός των συνολικών απωλειών που πρέπει να αποβληθούν από τις επιφάνειες του πυρήνα του στάτη.

Επειδή η περιέλιξη του στάτη της γεννήτριας έχει επιλεγεί να κατασκευαστεί με αγωγούς κυκλικής διατομής αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι απώλειες χαλκού του στάτη που οφείλονται στα δινορρεύματα να είναι μηδενικές $P_{stators Eddy current Cu losses} = 0 W$.

Οι συνολικές απώλειες σιδήρου του στάτη έχουν υπολογιστεί από την εξίσωση (4.92) και προέκυψαν ίσες με $P_{Fe stators core total} = 4007,59 W$. Οι συνολικές απώλειες που πρέπει να αποβληθούν από τις επιφάνειες του πυρήνα του στάτη υπολογίζονται από τη σχέση (4.235). Αυτές είναι ίσες με $P_{losses dissipated through stators core surfaces} = 12532,2 W$.

$$P_{losses dissipated through stators core surfaces} = P_{stators Cu losses conductor part inside slots} + P_{stators Eddy current Cu losses} + P_{Fe stators core total} \quad (4.235)$$

Οι ανωτέρω απώλειες αποβάλλονται από τις ακόλουθες επιφάνειες του πυρήνα του στάτη: α) την εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια του πυρήνα του στάτη, β) τις επιφάνειες

των δύο άκρων του πυρήνα του στάτη, γ) την εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια του πυρήνα του στάτη και δ) τις επιφάνειες των διακένων.

- Υπολογισμός της ισχύος των απωλειών που αποβάλλονται από την εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια και τις επιφάνειες των άκρων του πυρήνα του στάτη.

Το εμβαδόν της εξωτερικής κυλινδρικής επιφάνειας του πυρήνα του στάτη υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.236). Από αυτή προκύπτει ότι η τιμή του ισούται με $A_{stators\ core\ external\ cylindrical\ area} = 2,916\ m^2$.

$$A_{stators\ core\ external\ cylindrical\ area} = \pi \cdot D_{external\ stator} \cdot L \quad (4.236)$$

Το εμβαδόν της επιφάνειας των άκρων του στάτη υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.237) και προκύπτει ότι η τιμή του ισούται με $A_{stators\ core\ ends\ surfaces} = 1,492\ m^2$.

$$A_{stators\ core\ ends\ surfaces} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{(D_{external\ stator}^2 - D_{internal\ stator}^2)}{4} \quad (4.237)$$

Η συνολική επιφάνεια από την οποία αποβάλλεται η θερμοκρασία του στάτη υπολογίζεται από το άθροισμα των δύο επιμέρους επιφανειών: της εξωτερικής κυλινδρικής επιφάνειας και της επιφάνειας των άκρων του σύμφωνα με την εξίσωση (4.238). Αυτή προκύπτει ίση με $A_{stators\ core\ external\ cylindrical\ area\ and\ Core\ ends\ surfaces} = 4,41\ m^2$.

$$A_{stators\ core\ external\ cylindrical\ area\ and\ Core\ ends\ surfaces} = A_{stators\ core\ external\ cylindrical\ area} + A_{stators\ core\ ends\ surfaces} \quad (4.238)$$

Ο συντελεστής ψύξεως της εξωτερικής επιφάνειας και των επιφανειών των άκρων του στάτη λαμβάνει τιμές από το εύρος $c = 0,025 \div 0,04$ σύμφωνα με τον πίνακα 2.18. αυτός λαμβάνεται ίσος με $c_{Ext\ Cyl\ stators\ Ends\ Areas\ cooling\ coefficient} = 0,03$. Η ισχύς που αποβάλλεται από την εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια και τις επιφάνειες των άκρων του στάτη ανά βαθμό Κελσίου υπολογίζεται από τη σχέση (4.239) και προκύπτει ίση με $P_{Loss\ dissip\ per\ Celsius\ degree\ Ext\ Cyl\ stators\ Ends\ Areas} = 146,93\ W/Celsius\ degree$.

$$P_{Losses\ dissip\ per\ Celsius\ degree\ Ext\ Cyl\ stators\ Ends\ Areas} = \frac{A_{stators\ core\ external\ cylindrical\ area\ and\ Core\ ends\ surfaces}}{c_{Ext\ Cyl\ stators\ Ends\ Areas\ cooling\ coefficient}} \quad (4.239)$$

- Υπολογισμός της ισχύος των απωλειών που αποβάλλονται από την εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια του πυρήνα του στάτη.

Το εμβαδόν της εσωτερικής κυλινδρικής επιφάνειας του πυρήνα του στάτη υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.240). Από αυτή προκύπτει ότι η τιμή του ισούται με $A_{stators\ internal\ cylindrical\ area} = 2,296\ m^2$.

$$A_{stators\ internal\ cylindrical\ area} = \pi \cdot D_{internal\ stator} \cdot L \quad (4.240)$$

Ο αριθμητής του συντελεστή ψύξεως της εσωτερικής επιφάνειας του στάτη λαμβάνει τιμές από το εύρος $0,03 \div 0,05$ σύμφωνα με τον πίνακα 2.18. Αυτός λαμβάνεται ίσος με $c_{Internal\ Cyl\ stators\ Area\ cooling\ coefficient\ Numerator} = 0,03$. Έπειτα, υπολογίζεται η τιμή

του συντελεστή ψύξεως σύμφωνα με τη σχέση (4.241) του οποίου η τιμή προκύπτει ίση με $C_{Internal\ Cyl\ stators\ Area\ cooling\ coefficient} = 0,006151$.

$$C_{Internal\ Cyl\ stators\ Area\ cooling\ coefficient} = \frac{C_{Internal\ Cyl\ stators\ Area\ cooling\ coefficient\ Numerator}}{(1 + 0,1 \cdot u_{D_{external\ rotor}})} \quad (4.241)$$

Η ισχύς που αποβάλλεται από την εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια του στάτη ανά βαθμό Κελσίου υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.242). Αυτή λαμβάνει τιμή ίση με $P_{Losses\ dissip\ per\ Celsius\ degree\ Int\ Cyl\ stators\ Area} = 373,25\ W/Celsius\ degree$.

$$P_{Losses\ dissip\ per\ Celsius\ degree\ Int\ Cyl\ stators\ Areas} = \frac{A_{stators\ internal\ cylindrical\ area}}{C_{Internal\ Cyl\ stators\ Area\ cooling\ coefficient}} \quad (4.242)$$

- Υπολογισμός της ισχύος των απωλειών που αποβάλλονται από την επιφάνεια των διακένων αερισμού του στάτη.

Το εμβαδόν της επιφάνειας των διακένων αερισμού του πυρήνα του στάτη υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.243). Από αυτή προκύπτει ότι η τιμή του ισούται με $A_{stators\ ventilation\ ducts\ surfaces} = 2,983\ m^2$.

$$A_{stators\ ventilation\ ducts\ surfaces} = \pi \cdot \frac{(D_{external\ stator}^2 - D_{internal\ stator}^2)}{4} \cdot n_{ducts} \quad (4.243)$$

Έπειτα, από τον πίνακα 2.18 λαμβάνεται η σχέση προσδιορισμού του συντελεστή ψύξεως για τα διάκενα αερισμού του πυρήνα του στάτη. Αυτή είναι η εξίσωση (4.244). Σε αυτή ο αριθμητής παίρνει τιμές εντός του εύρους $0,08 \div 0,2$, ενώ η τιμή του λαμβάνεται ίση με $C_{stators\ ventilation\ ducts\ area\ cooling\ coeff\ numerator} = 0,11$. Ο συντελεστής ψύξης των διακένων αερισμού ισούται με $C_{stators\ ventilation\ ducts\ area\ coolin\ coeff} = 0,02837$.

$$C_{stators\ ventilation\ ducts\ area\ cooling\ coeff} = \frac{C_{stators\ ventilation\ ducts\ area\ cooling\ coeff\ numerator}}{(0,1 \cdot u_{D_{external\ rotor}})} \quad (4.244)$$

Η ισχύς που αποβάλλεται από την επιφάνεια των διακένων αερισμού του στάτη ανά βαθμό Κελσίου υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.245). Αυτή λαμβάνει τιμή ίση με $P_{Losses\ dissip\ per\ Celsius\ degree\ stators\ Ventilation\ Ducts\ Area} = 105,14\ W/Celsius\ degrees$.

$$P_{Losses\ dissip\ per\ Celsius\ degree\ stators\ Ventilation\ Ducts\ Area} = \frac{A_{stators\ ventilation\ ducts\ surfaces}}{C_{stators\ ventilation\ ducts\ area\ cooling\ coeff}} \quad (4.245)$$

- Υπολογισμός της ισχύος των απωλειών που αποβάλλονται ανά βαθμό Κελσίου από όλες τις επιφάνειες του στάτη.

Η ισχύς ανά βαθμό Κελσίου που αποβάλλεται από όλες τις επιφάνειες του στάτη προκύπτει από το άθροισμα των ισχύων που αποβάλλονται από τις επιμέρους επιφάνειες από τις οποίες απαρτίζεται, υπολογίζεται από τη σχέση (4.246) και προκύπτει ίση με $P_{Losses\ dissip\ per\ Celsius\ degree} = 625,324\ W/Celsius\ degrees$.

$$P_{Losses\ dissip\ per\ Celsius\ degree} = P_{Loss\ dis\ per\ Celsius\ deg\ Ext\ Cyl\ stators\ Ends\ Areas} + P_{Loss\ dis\ per\ Celsius\ deg\ Int\ Cyl\ stators\ Areas} + P_{Loss\ dis\ per\ Celsius\ deg\ stators\ Vent\ Ducts\ Area} \quad (4.246)$$

Η αύξηση της θερμοκρασίας του στάτη στις απώλειες ισχύος υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.247) και προκύπτει ίση με $\theta_{\text{stator temperature rise}} = 20,04^{\circ}\text{C}$.

$$\theta_{\text{stator temperature rise}} = \frac{P_{\text{Losses dissipated through stator core surfaces}}}{P_{\text{Losses dissipated per Celsius degree}}} \quad (4.247)$$

Παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες του ρότορα και του στάτη βρίσκονται εντός των ορίων της κλάσης Β. Υπενθυμίζεται ότι οι μονώσεις της μηχανής έχουν επιλεχθεί να ανήκουν στην κλάση F. Γίνεται αντιληπτό ότι η γεννήτρια δεν θα αντιμετωπίσει πρόβλημα κατά τη λειτουργία της υπό πλήρες φορτίο.

4.13 Υπολογισμός του βαθμού απόδοσης της γεννήτριας

Ο βαθμός απόδοσης προκύπτει από το λόγο της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου της μηχανής. Η ισχύς εξόδου έχει υπολογισθεί από τη σχέση (4.228) και προέκυψε ίση με $P_{\text{generators output}} = 1260,13 \text{ kW}$. Οι απώλειες διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: α) στις απώλειες χαλκού, β) στις απώλειες σιδήρου ή πυρήνα και γ) σε όλες τις εναπομείνουσες. Οι απώλειες χαλκού υπολογίζονται από τη σχέση (4.248) και η τιμή τους προκύπτει ίση με $P_{\text{Cu generator losses}} = 36,77 \text{ kW}$. Οι απώλειες σιδήρου ή πυρήνα έχουν ήδη υπολογιστεί και η τιμή τους προέκυψε ίση με $P_{\text{Fe stators core total}} = 4007,6 \text{ W}$. Οι εναπομείνουσες απώλειες υπολογίζονται από τη σχέση (4.249) και η τιμή τους προκύπτει ίση με $P_{\text{rest losses}} = 15,37 \text{ kW}$. Επομένως, οι συνολικές απώλειες προκύπτουν από το άθροισμα των απωλειών χαλκού της γεννήτριας, των εναπομεινάντων απωλειών, των συνολικών απωλειών σιδήρου και των απωλειών της διεγέρτριας σύμφωνα με τη σχέση (4.250), ενώ η τιμή τους ισούται με $P_{\text{Losses total}} = 58,18 \text{ kW}$.

$$P_{\text{Cu generator losses}} = P_{\text{Cu stator power losses}} + P_{\text{stators Eddy Current Cu losses}} + P_{\text{Cu rotor total excitations losses}} \quad (4.248)$$

$$P_{\text{rest losses}} = P_{\text{stray losses}} + P_{\text{generators friction windage losses}} \quad (4.249)$$

$$P_{\text{Losses total}} = P_{\text{Cu generator losses}} + P_{\text{Fe stators core total}} + P_{\text{rest losses}} + P_{\text{exciters power losses}} \quad (4.250)$$

Ο βαθμός απόδοσης της μηχανής προκύπτει από τη σχέση (4.251) και λαμβάνει τιμή ίση με $n_{\text{efficiency}} = 95,59 \%$.

$$n_{\text{efficiency}} = \frac{P_{\text{generators output}}}{(P_{\text{generators output}} + P_{\text{Losses total}})} \cdot 100 \quad (4.251)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

Ανασκόπηση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

5.1 Διανυσματική ανάλυση

Σε ένα χώρο τριών διαστάσεων ορίζεται το βαθμωτό μέγεθος $V = V(P)$ το οποίο ορίζει ένα βαθμωτό πεδίο, και η διανυσματική ποσότητα $\mathbf{A} = \mathbf{A}(P)$ η οποία ορίζει ένα διανυσματικό πεδίο. Η εξάρτηση από το σημείο P εκφράζεται με τη χρήση ενός συστήματος αναφοράς με καμπυλόγραμμες ορθογώνιες συντεταγμένες. Οι συντεταγμένες αυτές είναι: α) Καρτεσιανές (x, y, z) , β) Κυλινδρικές (r, θ, z) ή γ) Σφαιρικές (r, θ, ϕ) συντεταγμένες.

Γενικά, κάθε μια από αυτές τις ποσότητες μπορεί να είναι μια συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή μπορεί να έχει τη μορφή $V = V(P, t)$ και $\mathbf{A} = \mathbf{A}(P, t)$. Αυτή η εξάρτηση εξετάζεται σε επόμενη παράγραφο. Ωστόσο, για να απλοποιηθεί το κείμενο, παραλείπεται η ρητή σημειογραφία που επισημαίνει την εξάρτηση των διαφόρων μεγεθών από το σημείο P .

5.1.1 Πράξεις ανάμεσα σε διανύσματα

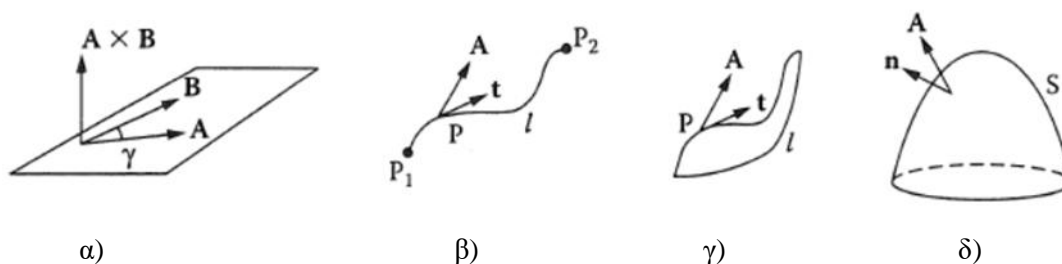
Έστω δύο διανύσματα \mathbf{A} και \mathbf{B} , με τα μέτρα τους να είναι $|\mathbf{A}|$ και $|\mathbf{B}|$ αντίστοιχα και γ η γωνία ανάμεσα στις προσανατολισμένες κατευθύνσεις τους. Το βαθμωτό ή εσωτερικό γινόμενο είναι ο πραγματικός αριθμός που δίνεται από τη σχέση (5.1).

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = |\mathbf{A}| \cdot |\mathbf{B}| \cdot \cos\gamma \quad (5.1)$$

Το διανυσματικό ή εξωτερικό γινόμενο είναι το διάνυσμα που δίνεται από τη σχέση (5.2).

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = (|\mathbf{A}| \cdot |\mathbf{B}| \cdot \sin\gamma) \cdot \mathbf{n}_{AB} \quad (5.2)$$

όπου \mathbf{n}_{AB} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα το οποίο είναι κάθετο στο επίπεδο που ορίζεται από τα διανύσματα \mathbf{A} και \mathbf{B} . Το διάνυσμα που δίνεται από την εξίσωση (5.2) προκύπτει κανονικό τόσο ως προς το διάνυσμα \mathbf{A} όσο και ως προς το διάνυσμα \mathbf{B} και η κατεύθυνση του αντιστοιχεί στην κίνηση ενός δεξιόστροφου κοχλίου ο οποίος περιστρέφεται έτσι ώστε να τοποθετήσει το διάνυσμα \mathbf{A} στο διάνυσμα \mathbf{B} , όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1α.



Σχήμα 5.1: Πράξεις ανάμεσα στα διανύσματα. [E16]

Με τη χρήση των καρτεσιανών συντεταγμένων, τα διανύσματα γράφονται $\mathbf{A} = (A_x, A_y, A_z) = A_x \mathbf{u}_x + A_y \mathbf{u}_y + A_z \mathbf{u}_z$ και $\mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z) = B_x \mathbf{u}_x + B_y \mathbf{u}_y + B_z \mathbf{u}_z$, όπου \mathbf{u}_x , \mathbf{u}_y και \mathbf{u}_z είναι τα μοναδιαία διανύσματα συντεταγμένων. Τα βαθμωτά και τα διανυσματικά γινόμενα γίνονται:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z \quad (5.3)$$

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} \mathbf{u}_x & \mathbf{u}_y & \mathbf{u}_z \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} \quad (5.4)$$

$$= (A_y B_z - A_z B_y) \mathbf{u}_x + (A_z B_x - A_x B_z) \mathbf{u}_y + (A_x B_y - A_y B_x) \mathbf{u}_z$$

Υφίστανται οι ακόλουθες ιδιότητες:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \cdot \mathbf{A} &= |\mathbf{A}|^2 & \mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} + \mathbf{C}) &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{A} \cdot \mathbf{C} \\ \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} &= \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} & \mathbf{A} \times (\mathbf{B} + \mathbf{C}) &= \mathbf{A} \times \mathbf{B} + \mathbf{A} \times \mathbf{C} \\ \mathbf{A} \times \mathbf{B} &= -\mathbf{B} \times \mathbf{A} & \mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) &= (\mathbf{A} \cdot \mathbf{C}) \mathbf{B} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}) \mathbf{C} \end{aligned} \quad (5.5)$$

5.1.2 Επικαμπύλιο ολοκλήρωμα και μαγνητική ροή διανυσματικού πεδίου

Το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα ενός διανυσματικού πεδίου \mathbf{A} κατά μήκος μιας καμπύλης μήκους l από το σημείο P_1 έως το σημείο P_2 το οποίο προσανατολίζεται σε κάθε σημείο από το μοναδιαίο διάνυσμα \mathbf{t} εφαπτομενικά ως προς την καμπύλη, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 5.1.β δίνεται από τη σχέση (5.6).

$$\Gamma_{12} = \int_{P_1}^{P_2} \mathbf{A} \cdot \mathbf{t} \, dl \quad (5.6)$$

Το κλειστό επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του διανυσματικού πεδίου αντιστοιχεί στο επικαμπύλιο ολοκλήρωμα κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής, η οποία εμφανίζεται στο σχήμα 5.1.γ το οποίο είναι η σχέση (5.7).

$$\Gamma = \oint_l \mathbf{A} \cdot \mathbf{t} \, dl \quad (5.7)$$

Η ροή του διανυσματικού πεδίου \mathbf{A} διαμέσου της επιφάνειας S η οποία προσανατολίζεται από το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 5.1.δ δίνεται από τη σχέση (5.8).

$$\Phi = \int_S \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} \, dS \quad (5.8)$$

Στην περίπτωση στην οποία η επιφάνεια είναι κλειστή, και το μοναδιαίο διάνυσμα \mathbf{n} θεωρείται συμβατικά ότι έχει εξωτερική κατεύθυνση, η ροή Φ που εξέρχεται από την επιφάνεια S είναι θετική.

5.1.3 Διαφορικοί τελεστές

Η κλίση ενός βαθμωτού πεδίου V είναι μια διανυσματική συνάρτηση που ορίζεται σε κάθε σημείο P από μια κατεύθυνση που αντιστοιχεί στη μέγιστη παράγωγο και το μέτρο είναι ίσο με αυτή την παράγωγο το οποίο δίνεται από τη σχέση (5.9).

$$\text{grad}V = \max \left[\frac{\partial V}{\partial l} \right] \cdot \mathbf{u}_{max} \quad (5.9)$$

Κατά μήκος οποιασδήποτε κατεύθυνσης που ορίζεται από το μοναδιαίο διάνυσμα \mathbf{u} , το βαθμωτό γινόμενο της κλίσης του βαθμωτού πεδίου V ($\text{grad}V$) με το μοναδιαίο διάνυσμα \mathbf{u} δίνει την παράγωγο του V κατά μήκος της κατεύθυνσης του μοναδιαίου διανύσματος \mathbf{u} , η οποία προσδιορίζεται από τη σχέση (5.10).

$$\text{grad}V \cdot \mathbf{u} = \left. \frac{\partial V}{\partial l} \right|_{\mathbf{u}} \quad (5.10)$$

Τελικά, αν το βαθμωτό πεδίο V δεν είναι συνεχές διαμέσου μιας επιφάνειας Σ , η οποία χαρακτηρίζεται από το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα \mathbf{n}_Σ , και λαμβάνει τις τιμές V_1 και V_2 στις δύο πλευρές της επιφάνειας Σ , τότε μπορεί να οριστεί μια επιφανειακή κλίση σύμφωνα με τη σχέση (5.11).

$$\text{grad}_\Sigma V = (V_2 - V_1) \cdot \mathbf{n}_\Sigma \quad (5.11)$$

Η απόκλιση ενός διανυσματικού πεδίου \mathbf{A} είναι μια βαθμωτή συνάρτηση που ορίζεται σε κάθε σημείο P από τον λόγο ανάμεσα στη ροή του διανυσματικού πεδίου \mathbf{A} που εξέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια S_c και τον όγκο τ που εμπεριέχεται από αυτή όταν ο όγκος τείνει στο ίδιο το σημείο P . Υπολογίζεται από τη σχέση (5.12).

$$\text{div}\mathbf{A} = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\oint_{S_c} \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dS}{\tau} \quad (5.12)$$

Η στοιχειώδης ροή $d\Phi$ του διανυσματικού μεγέθους \mathbf{A} που διέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια, που περιέχει το στοιχειώδη όγκο $d\tau$ υπολογίζεται από τη σχέση $d\Phi = \text{div}\mathbf{A} \cdot d\tau$. Τότε η απόκλιση $\text{div}\mathbf{A} > 0$ σημαίνει ένα σημείο από όπου ξεκινούν οι γραμμές του διανυσματικού πεδίου \mathbf{A} , ενώ $\text{div}\mathbf{A} < 0$ η αρνητική τιμή της απόκλισης έχει την έννοια ενός σημείου στο οποίο καταλήγουν οι γραμμές του διανυσματικού πεδίου \mathbf{A} .

Τελικά, αν το διανυσματικό πεδίο \mathbf{A} δεν είναι συνεχές διαμέσου μιας επιφάνειας Σ και λαμβάνει τις τιμές \mathbf{A}_1 και \mathbf{A}_2 στις δύο πλευρές της επιφάνειας Σ , τότε μπορεί να οριστεί μια επιφανειακή απόκλιση με χρήση του κάθετου μοναδιαίου διανύσματος \mathbf{n}_Σ σύμφωνα με τη σχέση (5.13).

$$\text{div}_\Sigma \mathbf{A} = (\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1) \cdot \mathbf{n}_\Sigma \quad (5.13)$$

Ο στροβιλισμός ενός διανυσματικού πεδίου \mathbf{A} είναι μια διανυσματική συνάρτηση που ορίζεται σε κάθε σημείο P από τον λόγο ανάμεσα στο ολοκλήρωμα του διανυσματικού πεδίου \mathbf{A} κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής l και την επιφάνεια S που οριοθετείται από την κλειστή διαδρομή l , όταν η επιφάνεια S τείνει στο ίδιο το σημείο P , ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση (5.14).

$$\text{curl} \mathbf{A} = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\oint_l \mathbf{A} \cdot \mathbf{t} dl}{S} \quad (5.14)$$

Το στοιχειώδες κλειστό επικαμπύλιο ολοκλήρωμα $d\Gamma$ του διανύσματος \mathbf{A} κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής l που συνορεύει με τη στοιχειώδη επιφάνεια dS η οποία έχει προσανατολιστεί από το μοναδιαίο διάνυσμα \mathbf{n} , δίνεται από τον στροβιλισμό $\text{curl} \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dS$. Τότε ο στροβιλισμός αναπαριστά τις δίνες γύρω από τις οποίες περιστρέφονται οι γραμμές του διανύσματος \mathbf{A} .

Εάν το διανυσματικό πεδίο \mathbf{A} δεν είναι συνεχές διαμέσου μιας επιφάνειας Σ , με κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα \mathbf{n}_Σ , και λαμβάνει τις τιμές \mathbf{A}_1 και \mathbf{A}_2 στις δύο πλευρές της επιφάνειας Σ , τότε ορίζεται ένας στροβιλισμός επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση (5.15).

$$\text{curl}_\Sigma \mathbf{A} = -(\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1) \times \mathbf{n}_\Sigma \quad (5.15)$$

Η λαπλασιάνη ενός βαθμωτού πεδίου V δίνεται από την απόκλιση της διανυσματικής κλίσης της βαθμωτής συνάρτησης V και δίνεται από την εξίσωση (5.16).

$$\nabla^2 V = \text{div grad} V \quad (5.16)$$

Η λαπλασιανή ενός διανυσματικού πεδίου \mathbf{A} δίνεται από την εξίσωση (5.17).

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \text{grad div} \mathbf{A} - \text{curl curl} \mathbf{A} \quad (5.17)$$

Αναφορικά με τους διαφορικούς τελεστές που ορίζονται παραπάνω, ορισμένες ιδιότητες αναφέρονται παρακάτω. Τα μεγέθη U και V είναι βαθμωτά πεδία, τα \mathbf{A} και \mathbf{B} είναι διανυσματικά πεδία, ενώ k και h είναι τυπικές σταθερές.

5.1.4 Ολοκληρωτικές σχέσεις

Το θεώρημα της κλίσης (gradient theorem) δηλώνει ότι το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα από το σημείο P_1 στο σημείο P_2 μιας διανυσματικής κλίσης $\text{grad} V$ εξαρτάται μόνο από την τιμή της βαθμωτής συνάρτησης V στα σημεία P_1 και P_2 σύμφωνα με την εξίσωση (5.18).

$$\Gamma_{12} = \int_{P_1}^{P_2} \text{grad} V \cdot \mathbf{t} dl = V_2 - V_1 \quad (5.18)$$

Αυτό στην περίπτωση του κλειστού επικαμπύλιου ολοκληρώματος, ισούται με μηδέν. Επιπρόσθετα, ισχύει:

$$\int_\tau \text{grad} V dt = \oint_S V \cdot \mathbf{n} dS \quad (5.19)$$

Το θεώρημα της απόκλισης (Gauss theorem) δηλώνει ότι το ολοκλήρωμα του όγκου μιας απόκλισης ενός διανυσματικού πεδίου $\text{div} \mathbf{A}$ ισούται με το ολοκλήρωμα του διανύσματος \mathbf{A} που διέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια η οποία περιέχει τον όγκο, το οποίο είναι η ροή του διανυσματικού πεδίου \mathbf{A} που εξέρχεται από την κλειστή επιφάνεια

$$\Phi = \oint_{S_c} \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dS = \int_\tau (\text{div} \mathbf{A}) dt \quad (5.20)$$

Το θεώρημα του στροβιλισμού (Stoke's theorem) δηλώνει ότι το ολοκλήρωμα της επιφάνειας S ενός διανύσματος στροβιλισμού του διανυσματικού πεδίου $curl \mathbf{A}$ ισούται με το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του διανυσματικού πεδίου \mathbf{A} κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής l που οριοθετεί την επιφάνεια S . Το μοναδιαίο διάνυσμα \mathbf{t} είναι εφαπτομενικό στη διαδρομή l και, πρέπει να επιλεγθεί σύμφωνα με το μοναδιαίο διάνυσμα \mathbf{n} κάθετο στην επιφάνεια S (με τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλίου). Αυτό παρατίθεται στη σχέση (5.21).

$$\oint_l \mathbf{A} \cdot \mathbf{t} dl = \int_S curl \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dS \quad (5.21)$$

Το πρώτο θεώρημα του Green για βαθμωτά μεγέθη δηλώνει ότι:

$$\int_{\tau} U div(h grad V) + h grad U \cdot grad V d\tau = \oint_{S_c} hU \frac{\partial V}{\partial n} dS \quad (5.22)$$

Το δεύτερο θεώρημα του Green για βαθμωτά μεγέθη δηλώνει ότι:

$$\int_{\tau} U div(a grad V) - V div(a grad U) d\tau = \oint_{S_c} A \left(U \frac{\partial V}{\partial n} - V \frac{\partial U}{\partial n} \right) dS \quad (5.23)$$

Το πρώτο θεώρημα του Green για διανυσματικά μεγέθη δηλώνει ότι:

$$\int_{\tau} k curl \mathbf{A} \cdot curl \mathbf{B} - \mathbf{A} \cdot [curl(k curl \mathbf{B})] d\tau = \oint_{S_c} k (\mathbf{A} \times curl \mathbf{B}) \cdot \mathbf{n} dS \quad (5.24)$$

Το δεύτερο θεώρημα του Green για διανυσματικά μεγέθη δηλώνει ότι:

$$\begin{aligned} & \int_{\tau} \mathbf{B} \cdot [curl(k curl \mathbf{A})] - \mathbf{A} \cdot [curl(k curl \mathbf{B})] d\tau \\ & = \oint_{S_c} k (\mathbf{A} \times curl \mathbf{B} - \mathbf{B} \times curl \mathbf{A}) \cdot \mathbf{n} dS \end{aligned} \quad (5.25)$$

5.1.5 Διαφορικές σχέσεις

Κλίση:

$$grad(VU) = V(grad U) + U(grad V) \quad (5.26)$$

$$grad(kU + hV) = k grad U + h grad V \quad (5.27)$$

$$grad V(U) = \frac{\partial V}{\partial U} grad U \quad (5.28)$$

Απόκλιση:

$$div(U\mathbf{A}) = U div(\mathbf{A}) + grad U \cdot \mathbf{A} \quad (5.29)$$

$$\operatorname{div}(k\mathbf{A} + h\mathbf{B}) = k \operatorname{div}(\mathbf{A}) + h \operatorname{div}(\mathbf{B}) \quad (5.30)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\mathbf{A} \times \mathbf{B}) &= -\mathbf{A} \cdot (\operatorname{curl} \mathbf{B}) + (\operatorname{curl} \mathbf{A}) \cdot \mathbf{B} \\ \operatorname{div}(\operatorname{curl} \mathbf{A}) &= 0 \end{aligned} \quad (5.31)$$

Στροβιλισμός:

$$\operatorname{curl}(U\mathbf{A}) = U \cdot (\operatorname{curl} \mathbf{A}) + (\operatorname{grad} U) \times \mathbf{A} \quad (5.32)$$

$$\operatorname{curl}(k\mathbf{A} + h\mathbf{B}) = k \operatorname{curl}(\mathbf{A}) + h \operatorname{curl}(\mathbf{B}) \quad (5.33)$$

$$\operatorname{curl} \operatorname{grad} U = 0 \quad (5.34)$$

Λαπλασιανή:

$$\nabla^2(UV) = U \cdot \nabla^2 V + V \nabla^2 U + 2 \operatorname{grad} U \cdot \operatorname{grad} V \quad (5.35)$$

$$\nabla^2(kU + hV) = k \nabla^2 U + h \nabla^2 V \quad (5.36)$$

5.1.6 Έκφραση των διαφορικών τελεστών σε διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων

5.1.6.1 Καρτεσιανές συντεταγμένες

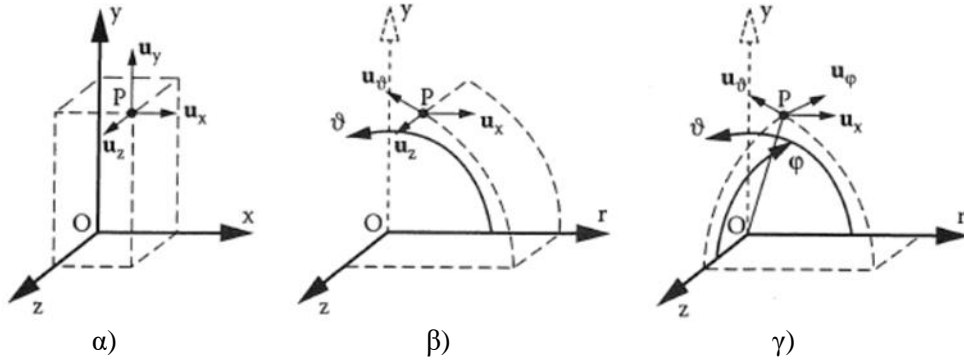
Με τη χρήση καρτεσιανών συντεταγμένων το σημείο P γράφεται $P(x, y, z)$ και τα μοναδιαία διανύσματα συντεταγμένων είναι \mathbf{u}_x , \mathbf{u}_y και \mathbf{u}_z όπως εμφανίζονται στο σχήμα 5.2.α. Οι διαφορικοί τελεστές είναι οι ακόλουθοι:

$$\operatorname{grad} V = \frac{\partial V}{\partial x} \mathbf{u}_x + \frac{\partial V}{\partial y} \mathbf{u}_y + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{u}_z \quad (5.37)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (5.38)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{curl} \mathbf{A} &= \begin{vmatrix} \mathbf{u}_x & \mathbf{u}_y & \mathbf{u}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix} \\ &= \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \mathbf{u}_x + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \mathbf{u}_y + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \mathbf{u}_z \end{aligned} \quad (5.39)$$

$$\nabla^2 U = \operatorname{div} \operatorname{grad} U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad (5.40)$$



Σχήμα 5.2: Συστήματα ορθογωνικών συντεταγμένων [E16].

α) Καρτεσιανές, β) Κυλινδρικές και γ) Σφαιρικές συντεταγμένες

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{A} &= \text{grad}(\text{div} \mathbf{A}) - \text{curl}(\text{curl} \mathbf{A}) = \nabla^2 A_x \mathbf{u}_x + \nabla^2 A_y \mathbf{u}_y + \nabla^2 A_z \mathbf{u}_z \\ &= \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} \right) \mathbf{u}_x + \left(\frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} \right) \mathbf{u}_y + \\ &\quad \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} \right) \mathbf{u}_z \end{aligned} \quad (5.41)$$

5.1.6.2 Κυλινδρικές συντεταγμένες

Με τη χρήση κυλινδρικών συντεταγμένων το σημείο P γράφεται $P(r, \theta, z)$ και τα μοναδιαία διανύσματα συντεταγμένων είναι \mathbf{u}_r , \mathbf{u}_θ και \mathbf{u}_z όπως εμφανίζονται στο σχήμα 5.2.β. Οι διαφορικοί τελεστές είναι οι ακόλουθοι:

$$\text{grad} V = \frac{\partial V}{\partial r} \mathbf{u}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \mathbf{u}_\theta + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{u}_z \quad (5.42)$$

$$\text{div} \mathbf{A} = \frac{1}{r} \frac{\partial (r A_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (5.43)$$

$$\text{curl} \mathbf{A} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) \mathbf{u}_r + \left(\frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) \mathbf{u}_\theta + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial (r A_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right) \mathbf{u}_z \quad (5.44)$$

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad (5.45)$$

5.1.6.3 Σφαιρικές συντεταγμένες

Με τη χρήση σφαιρικών συντεταγμένων το σημείο P γράφεται $P(r, \theta, \phi)$ και τα μοναδιαία διανύσματα συντεταγμένων είναι \mathbf{u}_r , \mathbf{u}_θ και \mathbf{u}_ϕ όπως εμφανίζονται στο σχήμα 5.2.γ [E16]. Οι διαφορικοί τελεστές είναι οι ακόλουθοι:

$$\text{grad} V = \frac{\partial V}{\partial r} \mathbf{u}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \mathbf{u}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} \mathbf{u}_\phi \quad (5.46)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{A} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 A_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial(\sin\theta A_\theta)}{\partial\theta} + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial A_\phi}{\partial\phi} \quad (5.47)$$

$$\operatorname{curl}\mathbf{A} = \frac{1}{r \sin\theta} \left(\frac{\partial(\sin\theta A_\phi)}{\partial\theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial\phi} \right) \mathbf{u}_r + \frac{1}{r \sin\theta} \left(\frac{\partial A_r}{\partial\phi} - \frac{\partial(\sin\theta r A_\phi)}{\partial r} \right) \mathbf{u}_\theta + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r A_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial A_r}{\partial\theta} \right) \mathbf{u}_\phi \quad (5.48)$$

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\sin\theta \frac{\partial V}{\partial\theta} \right) + \frac{1}{(r \sin\theta)^2} \frac{\partial^2 V}{\partial\phi^2} \quad (5.49)$$

5.1.7 Χρονική εξάρτηση

Μέχρι τώρα τα βαθμωτά και τα διανυσματικά πεδία θεωρούνταν αποκλειστικά ως συνάρτηση των σημείων του χώρου. Ωστόσο, μπορεί να είναι και συναρτήσεις του χρόνου. Οι μεταβλητές του χώρου και η μεταβλητή του χρόνου t εξετάζονται ξεχωριστά. Τότε λαμβάνονται οι παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} \operatorname{grad} \frac{\partial V}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{grad} V & \operatorname{div} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{div} \mathbf{A} \\ \operatorname{curl} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{curl} \mathbf{A} & \nabla^2 \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \mathbf{A} \end{aligned} \quad (5.50)$$

Συνηθίζεται να θεωρείται ότι η εξάρτηση από το χρόνο είναι συνημιτονοειδής, ενώ χαρακτηρίζεται από την κυκλική συχνότητα ω . Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μιγαδικός συμβολισμός και κάθε μέγεθος αναπαρίσταται μέσω ενός μιγαδικού φασιθέτη. Για παράδειγμα αναφέρεται η συνιστώσα $A_x(P, t)$ κατά τη διεύθυνση του άξονα των x του διανυσματικού πεδίου $\mathbf{A}(P, t)$. Είναι δυνατό να εισαχθεί η αντιστοιχία:

$$\begin{aligned} A_x &= A_{xM} \cdot \cos(\omega t + \alpha_x) \leftrightarrow \dot{A}_x = A_{xM} \cdot e^{j\alpha_x} = A_{xr} + j A_{xi} \\ &= A_{xM} \cdot \cos\alpha_x + j A_{xM} \cdot \sin\alpha_x \end{aligned} \quad (5.51)$$

Αναλογικά προκύπτουν οι σχέσεις και για τις υπόλοιπες συνιστώσες. Το διανυσματικό πεδίο \mathbf{A} του οποίου οι συνιστώσες περιγράφονται από τη συμβολική συνάρτηση (5.51) περιγράφεται από τη σχέση (5.52).

$$\dot{\mathbf{A}} = \dot{A}_x \mathbf{u}_x + \dot{A}_y \mathbf{u}_y + \dot{A}_z \mathbf{u}_z \quad (5.52)$$

5.2 Ηλεκτρομαγνητικά πεδία

5.2.1 Ηλεκτρικό φορτίο και πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου

Τα ηλεκτρικά φορτία σε μια περιοχή του χώρου διακρίνονται σε ελεύθερα φορτία και φορτία πόλωσης. Τα ελεύθερα φορτία δύνανται να πραγματοποιήσουν μακροσκοπική μετατόπιση, ενώ τα φορτία πόλωσης αναπόφευκτα εξαρτώνται από τη μοριακή

δομή των μέσων. Τα φαινόμενα της έλξης και της άπωσης ανάμεσα στα διάφορα σώματα, στα οποία τίθεται το ηλεκτρικό φορτίο, δημιουργούνται από το συνολικό φορτίο το οποίο προκύπτει από το άθροισμα των ελεύθερων φορτίων και των φορτίων πόλωσης. Στη συνέχεια εξετάζονται μόνο τα ελεύθερα φορτία, ενώ τα φορτία πόλωσης λαμβάνονται υπόψη προσδιορίζοντας κατάλληλα τα χαρακτηριστικά του μέσου [E16].

Σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου, όπου ο στοιχειώδης όγκος $\Delta\tau$ περιέχει το στοιχειώδες ελεύθερο φορτίο Δq , είναι δυνατό να οριστεί μια πυκνότητα όγκου των ελεύθερων φορτίων ρ σύμφωνα με τη σχέση (5.53), η οποία μετριέται σε C/m^3 , και γενικά μεταβάλλεται με τον χρόνο.

$$\rho = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta\tau} \quad (5.53)$$

Εάν το στοιχείο στο οποίο το ηλεκτρικό φορτίο κατανέμεται χαρακτηρίζεται από μια αμελητέα διάσταση σε σχέση με τις άλλες δύο διαστάσεις, είναι δυνατό να προσδιοριστεί μια επιφανειακή πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου ρ_s , η οποία μετριέται σε C/m^2 , και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (5.54).

$$\rho_s = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta s} \quad (5.54)$$

5.2.2 Ηλεκτρικό πεδίο μετατόπισης

Η χωρική περιγραφή των επιπτώσεων λόγω των ελεύθερων ηλεκτρικών φορτίων που βρίσκονται σε περιορισμένες περιοχές αντιπροσωπεύεται από διανυσματικό πεδίο \mathbf{D} , που ονομάζεται πεδίο ηλεκτρικής μετατόπισης. Το μέτρο του μετριέται σε (C/m^2) . Η θεμελιώδης ιδιότητα του πεδίου \mathbf{D} , σε διαφορική μορφή δίνεται από τη σχέση (5.55), ενώ σε ολοκληρωτική μορφή δίνεται από τη σχέση (5.56).

$$\text{div} \mathbf{D} = \rho \quad (5.55)$$

$$\oint_{S_c} \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} \, dS = q \quad (5.56)$$

Η δεύτερη εξίσωση είναι ο γνωστός νόμος του Gauss. Αυτή δείχνει ότι η ροή του διανύσματος \mathbf{D} που εξέρχεται μέσα από την κλειστή επιφάνεια S_c , η οποία είναι προσανατολισμένη σύμφωνα με το μοναδιαίο διάνυσμα \mathbf{n} , το οποίο είναι κάθετο προς την επιφάνεια και με εξωτερική κατεύθυνση ισούται με το ελεύθερο φορτίο q , το οποίο περιέχεται από την επιφάνεια S_c .

5.2.3 Πεδίο πυκνότητας ρεύματος

Η κίνηση του ηλεκτρικού φορτίου περιγράφεται μέσω της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος. Το διάνυσμα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος \mathbf{J} μπορεί να οριστεί ως μια χωρική πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου ρ , η οποία κινείται με μια ταχύτητα \mathbf{v}_ρ σύμφωνα με τη σχέση (5.57).

$$\mathbf{J} = \rho \cdot \mathbf{v}_\rho \quad (5.57)$$

του οποίου η θετική κατεύθυνση αναφοράς είναι αυτή των θετικών φορτίων. Το μέγεθος του μετριέται σε (A/mm^2). Το διάνυσμα \mathbf{J} ορίζει ένα διανυσματικό πεδίο που ονομάζεται πεδίο ρεύματος. Θεωρείται μια ανοιχτή επιφάνεια S , με κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα \mathbf{n} , τότε η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος i μετριέται σε (A) και δίνεται από την εξίσωση (5.58).

$$i = \int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS \quad (5.58)$$

Η εξίσωση της συνέχειας του ηλεκτρικού πεδίου σε διαφορική μορφή δίνεται από τη σχέση (5.59).

$$\text{div} \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (5.59)$$

Στην ολοκληρωτική μορφή, θεωρείται μια κλειστή επιφάνεια S_c , με μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα \mathbf{n} , τότε η ένταση του ρεύματος που εξέρχεται από την επιφάνεια S_c σε χρονικό διάστημα Δt αντιστοιχεί στη μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου Δq στον όγκο που περικλείεται από την επιφάνεια S_c και δίνεται από τη σχέση (5.60).

$$i_{out} = \oint_{S_c} \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS = -\frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (5.60)$$

Είναι δυνατό να οριστεί το διάνυσμα της συνολικής πυκνότητας ρεύματος μέσω της εξίσωσης (5.61), η οποία είναι το άθροισμα του διανύσματος της πυκνότητας ρεύματος \mathbf{J} και της πυκνότητας του ρεύματος μετατόπισης $\partial \mathbf{D} / \partial t$. Από την ιδιότητα της σχέσης (5.55) σχετικά με το πεδίο της διηλεκτρικής μετατόπισης \mathbf{D} και την εξίσωση της συνέχειας (5.59), το συνολικό πεδίο του ρεύματος \mathbf{J}_{total} είναι σωληνοειδές.

$$\mathbf{J}_{total} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (5.61)$$

5.2.4 Πεδίο πυκνότητας μαγνητικής ροής (μαγνητικής επαγωγής)

Η κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων προκαλεί επιδράσεις στα σημεία του περιβάλλοντος χώρου, έτσι, ώστε είναι δυνατό να οριστεί το πεδίο της πυκνότητας της μαγνητικής ροής (το πεδίο της μαγνητικής επαγωγής) \mathbf{B} . Οι μονάδες μέτρησης του μέτρου του είναι (Wb/m^2) ή (*Tesla*). Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι ένα δοκιμαστικό φορτίο δq κινείται εντός του πεδίου πυκνότητας μαγνητικής ροής (μαγνητικής επαγωγής) \mathbf{B} με ταχύτητα \mathbf{v}_q και σε αυτό ασκείται μια στοιχειώδης δύναμη $\delta \mathbf{F} = \delta q \mathbf{v}_q \times \mathbf{B}$. Αυτή η δύναμη ονομάζεται δύναμη Lorentz και θα περιγραφεί στη συνέχεια.

Η θεμελιώδης ιδιότητα του πεδίου \mathbf{B} είναι ότι είναι ένα σωληνοειδές πεδίο π.χ. η ροή του πεδίου \mathbf{B} μέσα από οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια S_c είναι μηδενική. Έτσι ισχύουν οι σχέσεις (5.62) και (5.63) σε διαφορική και ολοκληρωτική μορφή αντίστοιχα.

$$\text{div} \mathbf{B} = 0 \quad (5.62)$$

$$\oint_{S_c} \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (5.63)$$

5.2.5 Πεδίο του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού

Αφού το πεδίο της πυκνότητας της μαγνητικής επαγωγής είναι σωληνοειδές σε ολόκληρο το χώρο, είναι κατάλληλο να οριστεί ένα πεδίο διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού \mathbf{A} , του οποίου το μέτρο μετριέται σε (*Tesla* · *m*) και περιγράφεται από τη σχέση (5.64).

$$\mathbf{B} = \text{curl} \mathbf{A} \quad (5.64)$$

Η σχέση ορίζει το πεδίο \mathbf{A} εκτός από την περίπτωση ενός γενικά αστρόβιλου πεδίου. Η απόκλιση του πεδίου \mathbf{A} μπορεί να οριστεί με ένα αυθαίρετο τρόπο. Οι θέσεις που συνήθως υιοθετούνται παρατίθενται στη συνέχεια.

Συνθήκη του Coulomb κυρίως χρησιμοποιείται σε στατικά ή ημι-στατικά μαγνητικά πεδία η οποία παρατίθεται στη σχέση (5.65).

$$\text{div} \mathbf{A} = 0 \quad (5.65)$$

Συνθήκη του Lorentz η οποία είναι κατάλληλη για τη μελέτη ταχέως χρονικά μεταβαλλόμενων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και δίνεται από τη σχέση (5.66).

$$\text{div} \mathbf{A} = -\mu \varepsilon \frac{\partial V}{\partial t} \quad (5.66)$$

5.2.6 Ένταση μαγνητικού πεδίου

Μαζί με το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} , εισάγεται το διάνυσμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} . Οι μονάδες μέτρησης του μέτρου του είναι (*A/m*). Τα δύο διανυσματικά πεδία συνδέονται με τον καταστατικό νόμο ο οποίος δίνεται από τη σχέση (5.67) όπου μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου η οποία έχει μονάδες μέτρησης (*H/m*). Μέσα σε ένα ομοιόμορφο μέσο τα δύο πεδία \mathbf{B} , και \mathbf{H} είναι ανάλογα (έχουν την ίδια κατεύθυνση και ανάλογο μέτρο), ενώ σε ένα ανισοτροπικό μέσο η ζεύξη τους παρουσιάζει μια φύση τανυστή.

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (5.67)$$

Η θεμελιώδης ιδιότητα του πεδίου \mathbf{H} είναι ο ορισμός του στροβιλισμού του (Νόμος του Ampere), η οποία παρατίθεται στη σχέση (5.68).

$$\text{curl} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (5.68)$$

Σε στατικές ή ημι-στατικές μαγνητικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα όταν η πυκνότητα του ρεύματος μετατόπισης μπορεί να αγνοηθεί, η εξίσωση (5.68) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$\text{curl} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (5.69)$$

Σε ολοκληρωτική μορφή, ο νόμος του Ampere εκφράζεται εξισώνοντας το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} κατά μήκος μιας προσανα-

τολισμένης κλειστής γραμμής l με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος i που διαρρέει την επιφάνεια που περικλείεται από τη γραμμή l και παρατίθεται στη σχέση (5.70) η οποία ονομάζεται μαγνητεγερτική δύναμη (Μ.Ε.Δ.).

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot \mathbf{t} dl = i \quad (5.70)$$

Το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} κατά μήκος μιας προσανατολισμένης ανοικτής γραμμής l ορίζει τη μαγνητική τάση ανάμεσα στα δύο άκρα P και Q της γραμμής. Αυτή δίνεται από τη σχέση (5.71).

$$\Psi_{PQ} = \int_P^Q \mathbf{H} \cdot \mathbf{t} dl \quad (5.71)$$

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} και η μαγνητική επαγωγή \mathbf{B} έχουν προσδιοριστεί πλήρως από τις εξισώσεις (5.61) και (5.68) μαζί με την καταστατική εξίσωση (5.67). Από αυτές τις σχέσεις προκύπτει η απόκλιση της έντασης του μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} , η οποία δίνεται από τη σχέση (5.72). Αυτή είναι μηδενική σε κάθε ομογενές μέσο, ενώ ο στροβιλισμός της μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} υπολογίζεται από την εξίσωση (5.73).

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = - \frac{\mathbf{H}}{\mu} \operatorname{grad} \mu \quad (5.72)$$

$$\operatorname{curl} \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} + \operatorname{grad} \mu \times \mathbf{H} \quad (5.73)$$

Εάν η ένταση του μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} είναι αστρόβιλη σε μια απλά συνδεδεμένη περιοχή, μπορεί να οριστεί σε αυτή την περιοχή ένα βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό Ψ έτσι ώστε:

$$\mathbf{H} = - \operatorname{grad} \Psi \quad (5.74)$$

5.2.7 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Μπορούν να υφίστανται δυνάμεις διαφορετικής φύσης στα ηλεκτρικά φορτία. Θεωρείται η στοιχειώδης δύναμη $\delta \mathbf{F}_k$ ως μια οποιαδήποτε δύναμη που ασκείται σε ένα στοιχειώδες θετικό δοκιμαστικό φορτίο δq , η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E}_k ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση (5.75) της οποίας το μέτρο μετριέται σε (N/C).

$$\mathbf{E}_k = \lim_{\delta q \rightarrow 0} \frac{\delta \mathbf{F}_k}{\delta q} \quad (5.75)$$

Η ένταση ηλεκτρικού πεδίου Coulomb \mathbf{E}_c λαμβάνει υπόψη ότι τα ηλεκτρικά φορτία τείνουν να έλκονται και να απωθούνται μεταξύ τους. Αυτή είναι μια ιδιότητα των σημείων του χώρου έτσι ορίζει ένα διανυσματικό πεδίο. Η θεμελιώδης ιδιότητά του είναι ότι είναι συντηρητικό. Κατά συνέπεια είναι αστρόβιλο, δηλαδή ισχύει ότι: $\operatorname{curl} \mathbf{E}_c = 0$. Έπειτα, είναι δυνατό να εισαχθεί ένα βαθμωτό πεδίο, που ονομάζεται πεδίο ηλεκτρικού δυναμικού V , έχει μονάδες μέτρησης (V) και δίνεται από τη σχέση (5.76).

$$\mathbf{E}_c = - \operatorname{grad} V \quad (5.76)$$

Επίσης η ένταση ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E}_i που επάγεται, παράγεται από τον ρυθμό μεταβολής του πεδίου της μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} ως προς τον χρόνο, είναι μια συνάρτηση των σημείων του χώρου έτσι, ώστε να ορίζει ένα διανυσματικό πεδίο. Η θεμελιώδης ιδιότητα του ηλεκτρικού πεδίου που επάγεται είναι ο ορισμός του στροβιλισμού, του οποίου δίνεται από τη σχέση (5.77).

$$\text{curl } \mathbf{E}_i = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (5.77)$$

Αφού δεν υπάρχει περιορισμός στην απόκλιση της έντασης ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E}_i , γενικά θεωρείται ότι είναι ένα σωληνοειδές πεδίο π.χ. $\text{div } \mathbf{E}_i = 0$. Μέσω αυτής της υπόθεσης μαζί με τη συνθήκη του Coulomb (η οποία δίνεται από τη σχέση (5.65) $\text{div } \mathbf{A} = 0$) το ηλεκτρικό πεδίο που επάγεται προκύπτει από την εξίσωση (5.78). Η σχέση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στον υπολογισμό των επαγόμενων ρευμάτων σε αγωγίμα μέσα.

$$\mathbf{E}_i = - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (5.78)$$

Επίσης, το ηλεκτρικό πεδίο \mathbf{E} ονομάζεται ηλεκτρικό πεδίο του Maxwell και αντιστοιχεί στο άθροισμα των ηλεκτρικών πεδίων Coulomb και των ηλεκτρικών πεδίων που επάγονται, ενώ προκύπτει από τη σχέση (5.79).

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_c + \mathbf{E}_i = - \text{grad } V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (5.79)$$

Το ηλεκτρικό πεδίο \mathbf{E} ορίζεται από την απόκλιση και τον στροβιλισμό του, τα οποία είναι $\text{div } \mathbf{E} = \text{div } \mathbf{E}_c$ και $\text{curl } \mathbf{E} = \text{curl } \mathbf{E}_i$, αντίστοιχα. Σε ένα διηλεκτρικό μέσο με ηλεκτρική επιτρεπτότητα (διηλεκτρική σταθερά) ϵ (γενικά τανυστικού χαρακτήρα), το ηλεκτρικό πεδίο \mathbf{E} , συνδέεται με τη διηλεκτρική μετατόπιση \mathbf{D} , μέσω της θεμελιώδους σχέσης (5.80).

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (5.80)$$

Η ένταση ηλεκτρικού πεδίου Lorentz \mathbf{E}_L επιδρά στα ηλεκτρικά φορτία που κινούνται εντός πεδίου μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} με μια ταχύτητα \mathbf{v}_q σε σχέση με το σύστημα αναφοράς που έχει υιοθετηθεί και υπολογίζεται από τη σχέση (5.81).

$$\mathbf{E}_L = \mathbf{v}_q \times \mathbf{B} \quad (5.81)$$

Η ένταση ηλεκτρικού πεδίου (λόγω κίνησης) \mathbf{E}_m επιδρά στα ηλεκτρικά φορτία που βρίσκονται σε ένα αγωγό που κινείται με ταχύτητα \mathbf{v}_m σε ένα πεδίο μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} και υπολογίζεται από την εξίσωση (5.82).

$$\mathbf{E}_m = \mathbf{v}_m \times \mathbf{B} \quad (5.82)$$

Αμφότερες οι προαναφερθείσες εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου δεν αποτελούν ιδιότητες των σημείων του χώρου, αλλά εξαρτώνται από την ταχύτητα των ηλεκτρικών φορτίων και του αγωγού, σε σχέση με το σύστημα αναφοράς που έχει υιοθετηθεί. Έτσι, δεν προσδιορίζουν ένα διανυσματικό πεδίο. Ωστόσο, με την έννοια μιας αλλαγής του συστήματος αναφοράς είναι δυνατό να εξετάσει τις επιπτώσεις των εντάσεων ηλεκτρικών πεδίων λόγω κίνησης ως εντάσεις ηλεκτρικών πεδίων που επάγονται.

Η ένταση ηλεκτρικού πεδίου μη ηλεκτρομαγνητικής φύσης, \mathbf{E}_{ne} μπορεί να έχει χημική, πιεζοηλεκτρική ή φωτοβολταϊκή φύση. Όλες είναι μη συντηρητικές δυνάμεις. Δεν προσδιορίζονται από αυτές διανυσματικά πεδία, αλλά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ως ειδικές εξωτερικές δυνάμεις (ή ως εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου) ως προς το ηλεκτρομαγνητικό σύστημα.

Η συνολική ένταση ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E}_t είναι το άθροισμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E} , των εντάσεων ηλεκτρικού πεδίου Lorentz λόγω κίνησης φορτίων και των εξωτερικών εντάσεων ηλεκτρικού πεδίου και των εξωτερικών εντάσεων ηλεκτρικού πεδίου μη ηλεκτρομαγνητικής φύσης και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (5.83)

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E} + \mathbf{E}_L + \mathbf{E}_m + \mathbf{E}_{ne} \quad (5.83)$$

Σε ένα αγωγίμο μέσο που χαρακτηρίζεται από την αγωγιμότητα σ (σε γενική μορφή ή μορφή ταυστών), το πεδίο \mathbf{E}_t συνδέεται με το διανυσματικό πεδίο της ρευματικής πυκνότητας \mathbf{J} μέσω της θεμελιώδους σχέσης (5.84).

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E}_t \quad (5.84)$$

Οι μη συντηρητικές εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E}_{emf} είναι περιστροφικές ειδικές ηλεκτρικές δυνάμεις. Ονομάζονται ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις (Η.Ε.Δ). Ανάμεσα σε αυτές οι \mathbf{E}_i , \mathbf{E}_L και \mathbf{E}_m είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσης.

5.2.8 Ηλεκτρική τάση και ηλεκτρεγερτική δύναμη (Η.Ε.Δ.)

Η ηλεκτρική τάση v_{AB} , ανάμεσα σε δυο σημεία $A +$ και $B -$, κατά μήκος μιας καμπύλης l , η οποία έχει προσανατολιστεί από το μοναδιαίο κάθετο εφαπτομενικό διάνυσμα \mathbf{t} και έχει προσαρμοστεί στο σύστημα αναφοράς που έχει υιοθετηθεί, δίνεται από το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα κατά μήκος της καμπύλης l από το σημείο A στο σημείο B του ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E} και δίνεται από τη σχέση (5.85).

$$v_{AB} = \int_A^B \mathbf{E} \cdot \mathbf{t} dl \quad (5.85)$$

Εάν η γραμμή l κινείται σε μια ταχύτητα \mathbf{v}_l στο σύστημα αναφοράς που έχει υιοθετηθεί, επίσης, η ηλεκτρική τάση πρέπει να λάβει υπόψη την ένταση ηλεκτρικού πεδίου λόγω κίνησης, η οποία επιδρά στα φορτία που περιορίζονται να παραμείνουν στη γραμμή. Η ηλεκτρική τάση υπολογίζεται από τη σχέση (5.86).

$$v_{AB} = \int_A^B (\mathbf{E} + \mathbf{v}_l \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{t} dl \quad (5.86)$$

Αναλογικά, η ηλεκτρεγερτική δύναμη (Η.Ε.Δ.) e_{BA} , ανάμεσα σε δύο σημεία $B +$ και $A -$, κατά μήκος μιας καμπύλης l δίνεται από το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα κατά μήκος της καμπύλης l από το σημείο A στο σημείο B της έντασης ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E}_{emf} προκύπτει από τη σχέση (5.87).

$$e_{BA} = \int_A^B \mathbf{E}_{emf} \cdot \mathbf{t} dl \quad (5.87)$$

Στην ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών, η επαγόμενη Η.Ε.Δ. και η κινητική Η.Ε.Δ. παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η Η.Ε.Δ που επάγεται προκαλείται από τη χρονική διακύμανση της μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} . Η κινητική Η.Ε.Δ. προκαλείται από την κίνηση της γραμμής σε ένα πεδίο σταθερής μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} . Το άθροισμα των δύο Η.Ε.Δ. που υπολογίζεται κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής l_c αναπαριστά τη συνολική Η.Ε.Δ. της ηλεκτρομαγνητικής φύσης. Αυτή εκφράζεται μέσω του Νόμου των Faraday – Neumann από τη σχέση (5.88), όπου S είναι η επιφάνεια που περικλείεται από την κλειστή διαδρομή l_c και λ είναι η πεπλεγμένη μαγνητική ροή του διανύσματος \mathbf{B} που συνδέεται από τη γραμμή l_c . Η υποδιαίρεση της e_{l_c} της Η.Ε.Δ. στις δύο συνιστώσες της, την Η.Ε.Δ. που επάγεται και την κινητική Η.Ε.Δ., εξαρτάται μόνο από σύστημα αναφοράς που έχει υιοθετηθεί.

$$e_{l_c} = \oint_{l_c} (\mathbf{E}_i + \mathbf{E}_m) \cdot \mathbf{t} dl = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (5.88)$$

5.3 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε η υπενθύμιση βασικών εννοιών των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων οι οποίες είναι απαραίτητες για την πεδιακή ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί.

Βασικές αρχές της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται ορισμένες βασικές έννοιες της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη, επισημαίνονται οι διαφορές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους ανάλυσης πεδιακών προβλημάτων και παρουσιάζονται οι μαθηματικές έννοιες της μεθόδου.

Η απαίτηση ολοένα και μεγαλύτερης ακρίβειας κατά τη διαδικασία σχεδίασης και ανάλυσης ηλεκτρικών μηχανών ενθάρρυνε τη διάδοση κατάλληλων αριθμητικών μοντέλων για τον υπολογισμό ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Αυτές οι αριθμητικές μέθοδοι ουσιαστικά βασίζονται στον προσδιορισμό της κατανομής των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων στις κατασκευές που μελετώνται και βασίζονται στην επίλυση των εξισώσεων του Maxwell. Εξαιτίας της πολύπλοκης γεωμετρίας των μηχανών και των μη γραμμικών χαρακτηριστικών των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους (π.χ. ελάσματα πυρήνων) μόλις και μετά βίας επιτυγχάνεται, μια αναλυτική λύση. Για αυτό, στις περισσότερες περιπτώσεις μόνο μια αριθμητική λύση είναι δυνατή.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική τεχνική που είναι κατάλληλη για αυτόν τον σκοπό. Επιτρέπει να ληφθεί μια λύση του πεδίου ακόμη και στην περίπτωση των χρονικά μεταβαλλόμενων πεδίων και με υλικά τα οποία δεν είναι ομοιογενή, με υλικά που είναι ανισότροπα ή μη γραμμικά. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ολόκληρη η περιοχή που πρέπει να αναλυθεί χωρίζεται σε στοιχειώδεις υποπεριοχές, οι οποίες ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Έπειτα, εφαρμόζονται οι πεδιακές εξισώσεις σε κάθε μια από αυτές.

Αυτή η μέθοδος προτάθηκε τη δεκαετία του 1940, αλλά εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σχεδόν δέκα χρόνια αργότερα στην αεροναυπηγική και στην ανάλυση των κατασκευών. Με την πάροδο των ετών, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υιοθετήθηκε σε μεγάλο βαθμό σε όλα σχεδόν τα φυσικά και μαθηματικά προβλήματα. Σήμερα είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων διανυσματικών πεδίων.

Η μελέτη των κατανομών πεδίου, και ειδικότερα των προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, εμφανίζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Επιτρέπει τη διεξαγωγή σχολαστικής τοπικής ανάλυσης επισημαίνοντας την επικίνδυνη κλίση του πεδίου, την ένταση του μαγνητικού πεδίου, τον κορεσμό και άλλες.
- Επιτρέπει μια καλή εκτίμηση της απόδοσης των υπό ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων (ειδικά όταν οι κλασικές μέθοδοι ανάλυσης δίνουν μη ικανοποιητικά αποτελέσματα).
- Τελικά, επιτρέπει τη σημαντική μείωση του αριθμού των πρωτοτύπων που απαιτείται να κατασκευαστούν.

Ωστόσο, η μέθοδος έχει επίσης ορισμένα μειονεκτήματα:

- Αναγκαστικά η επίλυση είναι προσεγγιστική εξαιτίας της αριθμητικής της φύσης
- Εάν η μέθοδος δεν εφαρμοστεί σωστά, μπορεί να παράξει ανακριβή αποτελέσματα.
- Έχοντας ως δεδομένο ότι τα μεγέθη που υπολογίζονται κατανέμονται στον χώρο, γενικά απαιτείται μεγάλος χρόνος για τον υπολογισμό τους.

Προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος υπολογισμού, και ταυτόχρονα να βελτιωθεί η ανάλυση, χρησιμοποιείται οποιαδήποτε περιοδικότητα και συμμετρία της κατασκευής (τόσο γεωμετρική όσο και ηλεκτρομαγνητική). Η προκύπτουσα ακρίβεια επηρεάζεται από τη διάσταση των πεπερασμένων στοιχείων και από την ομοιομορφία της υποδιαίρεσης. Για να αυξηθεί η ακρίβεια, πραγματοποιείται μια λεπτή υποδιαίρεση της κατασκευής υιοθετώντας πεπερασμένα στοιχεία μικρότερης διάστασης. Ωστόσο, μια υπερβολική υποδιαίρεση της περιοχής ανάλυσης προκαλεί αύξηση του χρόνου που απαιτείται για την πραγματοποίηση των υπολογισμών.

6.2 Πεδιακά προβλήματα με συνοριακές συνθήκες

Γενικά, ένα πρόβλημα διανυσματικού πεδίου περιγράφεται από μια διαφορική εξίσωση, που ορίζεται στον τομέα D σύμφωνα με τη σχέση (6.1) μαζί με τις συνοριακές συνθήκες. Οι τελευταίες περιορίζουν τα πεδία κατά μήκος ενός συνόρου Γ της περιοχής που πρόκειται να αναλυθεί. Στην εξίσωση (6.1) η παράμετρος L είναι ένας διαφορικός τελεστής, η παράμετρος ϕ είναι η άγνωστη συνάρτηση που πρέπει να προσδιοριστεί, και η παράμετρος f είναι η συνάρτηση διέγερσης. Η εξίσωση (6.1) τονίζει ότι αμφότερες οι ϕ και f είναι ταυτόχρονα συναρτήσεις της θέσης στο χώρο, $P(x, y, z)$ και του χρόνου t .

$$L \phi(P, t) = f(P, t) \quad (6.1)$$

6.2.1 Σημασία του διαφορικού τελεστή L

Γενικά, η παράμετρος L μπορεί να είναι οποιοσδήποτε διαφορικός τελεστής. Συνήθως αντιπροσωπεύει μια γραμμική πράξη που ικανοποιεί τις ιδιότητες της πρόσθεσης και του πολλαπλασιασμού με μια σταθερά.

Στα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα, η εξίσωση (6.1) δίνεται από την εξίσωση Poisson, την εξίσωση Laplace ή την εξίσωση Helmholtz, στις οποίες η παράμετρος ϕ μπορεί να είναι ένα βαθμωτό ή διανυσματικό πεδίο. Σαν παράδειγμα, στην περίπτωση ενός ηλεκτροστατικού προβλήματος, η παράμετρος ϕ δεικνύει το βαθμωτό μέγεθος ηλεκτρικό δυναμικό V και η κατανομή του περιγράφεται από την εξίσωση του Poisson. Η συνάρτηση διέγερσης είναι η κατανομή της ελεύθερης πυκνότητας φορτίου $f = \rho$. Τότε, η εξίσωση (6.1) λαμβάνει τη μορφή της εξίσωσης (6.2).

$$- \operatorname{div} (\epsilon \operatorname{grad} V) = \rho \quad (6.2)$$

στην οποία θεωρείται ένα ανομοιογενές μέσο έτσι ώστε να μπορεί η ηλεκτρική διαπερατότητα ϵ να μην είναι σταθερή. Στη συνέχεια ο διαφορικός τελεστής L εκφράζεται από τη σχέση (6.3).

$$L = - \operatorname{div} (\varepsilon \operatorname{grad}) \quad (6.3)$$

6.2.2 Συνοριακές συνθήκες

Ένα πεδιακό πρόβλημα δέχεται μια λύση αν η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την κατανομή του είναι γνωστή σε όλα τα σημεία της περιοχής D και εφόσον η άγνωστη συνάρτηση ϕ δίνεται πάνω στο σύνορο Γ της περιοχής D . Επιπρόσθετα, μπορεί να επαληθευτεί ότι, αφού βρεθεί η λύση, αυτή η λύση είναι μοναδική (αυτό είναι το θεώρημα της μοναδικότητας).

Οι συνθήκες που εκφράζουν τη συμπεριφορά της συνάρτησης ϕ στο σύνορο Γ ονομάζονται περιορισμοί ή συνοριακές συνθήκες. Μεταξύ αυτών των συνθηκών μπορεί να προσδιοριστεί μια συνοριακή συνθήκη τύπου Dirichlet για μια δεδομένη τιμή της συνάρτησης ϕ πάνω στο σύνορο Γ ή μια συνοριακή συνθήκη τύπου Neumann για την οποία δίνεται η τιμή της παραγώγου ϕ πάνω στο σύνορο Γ . Επιπρόσθετα, μπορούν να προσδιοριστούν συνθήκες περιοδικότητας επιβάλλοντας ίσες τιμές της συνάρτησης ϕ σε διαφορετικά τμήματα του συνόρου Γ .

Αν θεωρηθεί ότι το Γ_1 είναι ένα τμήμα του συνόρου Γ , τότε η συνοριακή συνθήκη τύπου Dirichlet γράφεται:

1. Ομογενής συνθήκη (συνοριακή συνθήκη πρώτου είδους)

$$\phi = 0 \quad \text{στο σύνορο } \Gamma_1 \quad (6.4)$$

2. Μη ομογενής συνθήκη

$$\phi = \phi_f \quad \text{στο σύνορο } \Gamma_1 \quad (6.5)$$

Αν θεωρηθεί ότι το Γ_2 είναι το υπόλοιπο τμήμα του συνολικού συνόρου Γ , οι συνοριακές συνθήκες τύπου Neumann γράφονται:

1. Ομογενής συνθήκη (συνοριακή συνθήκη δεύτερου είδους)

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{στο σύνορο } \Gamma_2 \quad (6.6)$$

2. Ομογενής συνθήκη (συνοριακή συνθήκη τρίτου είδους)

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} + k\phi = 0 \quad \text{στο σύνορο } \Gamma_2 \quad (6.7)$$

3. Μη ομογενής συνθήκη

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} + k\phi = \phi_g \quad \text{στο σύνορο } \Gamma_2 \quad (6.8)$$

6.3 Κλασσικές μέθοδοι για την επίλυση προβλημάτων πεδίων

Θεωρείται ότι το πεδιακό πρόβλημα εκφράζεται από την εξίσωση (6.1) και από κατάλληλες συνοριακές συνθήκες όπως δίνονται στην προηγούμενη παράγραφο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένοι μέθοδοι επίλυσης πεδιακών προβλημάτων. Συγκεκρι-

μένα, η κλασική μέθοδος υπολοίπων (ή μέθοδος Galerkin), η κλασική μέθοδος μεταβολών (ή μέθοδος Rayleigh – Ritz) και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Όλες αυτές οι μέθοδοι στοχεύουν στον προσδιορισμό μιας συνάρτησης ϕ^* που προσεγγίζει την άγνωστη συνάρτηση ϕ όσο πλησιέστερα είναι δυνατόν. Μια τέτοια συνάρτηση συνήθως εκφράζεται ως ο γραμμικός συνδυασμός βασικών συναρτήσεων, όπως η εξίσωση (6.9). Όπου v_j είναι συναρτήσεις παρεμβολής (οι οποίες ονομάζονται και συναρτήσεις επέκτασης ή βασικές συναρτήσεις), ενώ Φ_j είναι άγνωστοι συντελεστές που πρέπει να προσδιοριστούν κατά τη διαδικασία υπολογισμού. Ένας τέτοιος συνδυασμός πρέπει να προσεγγίζει κατάλληλα την ακριβή λύση, ενώ πρέπει να ικανοποιεί ταυτόχρονα τον διαφορικό τελεστή της εξίσωσης (6.1) και τις συνοριακές συνθήκες.

$$\phi^*(P, t) = \sum_{j=1}^N \Phi_j \cdot v_j(P, t) \quad (6.9)$$

Οι δύο πρώτες μέθοδοι, η κλασική μέθοδος υπολοίπων και η κλασική μέθοδος μεταβολών, λαμβάνουν υπόψη όλο το χώρο της ανάλυσης. Οι συναρτήσεις v_j ορίζονται σε ολόκληρο το χώρο. Αντίστροφα, στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ολόκληρος ο χώρος υποδιαιρείται σε υποχώρους, τότε η συνάρτηση ϕ^* αποτελεί ένα συνδυασμό των συναρτήσεων v_j , οι οποίες ορίζονται στους επιμέρους υποχώρους στους οποίους έχει υποδιαιρεθεί η περιοχή. Συνεπώς, έχοντας ως δεδομένο ότι οι υποχώροι έχουν μειωμένες διαστάσεις, οι συναρτήσεις παρεμβολής v_j μπορεί να είναι πολύ απλές.

Πριν την επεξήγηση των διαφορετικών διαδικασιών, θα εισαχθεί το εσωτερικό γινόμενο ανάμεσα σε δύο συναρτήσεις ϕ και φ . Γίνεται αναφορά στον όγκο τ , οπότε το εσωτερικό γινόμενο ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση (6.10) όπου το σύμβολο που ομοιάζει με περισπωμένη δηλώνει το συζυγή μιγαδικό. Το εσωτερικό γινόμενο είναι μια γραμμική πράξη, αφού ικανοποιούνται οι ιδιότητες της πρόσθεσης και του πολλαπλασιασμού με μια σταθερά.

$$\langle \phi, \varphi \rangle = \int_{\tau} \phi \cdot \bar{\varphi} \, d\tau \quad (6.10)$$

$$\langle \phi_1 + \phi_2, \varphi \rangle = \langle \phi_1, \varphi \rangle + \langle \phi_2, \varphi \rangle \quad (6.11)$$

$$\langle \alpha\phi, \varphi \rangle = \alpha \langle \phi, \varphi \rangle \quad (6.12)$$

Ο ορισμός του εσωτερικού γινομένου δίνεται από την εξίσωση (6.10) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτευχθεί η επαλήθευση των ιδιοτήτων του διαφορικού τελεστή L . Συγκεκριμένα, θα πρέπει να επαληθεύεται εάν ο διαφορικός τελεστής L ορίζεται θετικά και αν είναι δυνατόν να αλλάξει το όρισμα του τελεστή L εντός της λειτουργίας του εσωτερικού γινομένου προκύπτει η σχέση (6.14).

$$\langle L\phi, \varphi \rangle = \begin{cases} > 0 & \phi \neq 0 \\ = 0 & \phi = 0 \end{cases} \quad (6.13)$$

$$\langle L\phi, \varphi \rangle = \langle \phi, L\varphi \rangle \quad (6.14)$$

6.4 Η κλασική μέθοδος υπολοίπου (Μέθοδος Galerkin)

Η κλασική μέθοδος υπολοίπου ασχολείται άμεσα με τη διαφορική εξίσωση (6.1). Επιλύει το πεδιακό πρόβλημα μειώνοντας το υπόλοιπο της διαφορικής εξίσωσης (6.1). Βασίζεται στην ακόλουθη υπόθεση: η συνάρτηση ϕ^* που προσεγγίζει καλύτερα την ακριβή λύση ϕ αντιστοιχεί σε ένα υπόλοιπο, το οποίο ισούται με μηδέν (ή τουλάχιστο είναι πολύ μικρό) σε όλο το χώρο ανάλυσης. Αυτό δίνεται από τη σχέση (6.15).

$$r = L \phi^* - f \quad (6.15)$$

Διορθώνοντας κάποιες συναρτήσεις βάρους w_i , η μέθοδος υπολοίπου αναγκάζει το ολοκλήρωμα των υπολοίπων το οποίο έχει σταθμιστεί από τις συναρτήσεις βάρους w_i να ισούται με μηδέν στον όγκο του χώρου τ_D . Αυτό γίνεται για να επιβάλει την ακόλουθη συνθήκη που δίνεται από τη σχέση (6.16).

$$R_i = \int_{\tau_D} w_i \cdot (L \phi^* - f) d\tau = 0 \quad (6.16)$$

Υπάρχουν διαφορετικές σταθμισμένες μέθοδοι υπολοίπων. Η πιο γνωστή και η μέθοδος που χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις είναι η μέθοδος Galerkin όπου οι συναρτήσεις βάρους επιλέγονται ίσες με τη συνάρτηση παρεμβολής v_i . Ένα παράδειγμα παρατίθεται στη σχέση (6.17)

$$w_i = v_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (6.17)$$

Γενικά, αυτή η επιλογή αποδίδει μια λύση με μεγαλύτερη ακρίβεια. Έπειτα, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση της εξίσωσης (6.9) η εξίσωση (6.16) λαμβάνει τη μορφή της σχέσης (6.18).

$$R_i = \int_{\tau_D} v_i \cdot L \left(\sum_{j=1}^N \Phi_j \cdot v_j \right) - v_i \cdot f d\tau \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (6.18)$$

Από αυτήν την εξίσωση προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων που μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση (6.19), όπου $[\phi]$ είναι το διάνυσμα στήλης των άγνωστων συντελεστών Φ_i , και $[SS]$ είναι ένας πίνακας διανυσμάτων που εξαρτάται από τις συναρτήσεις παρεμβολής των οποίων τα στοιχεία δίνονται από τη σχέση (6.20).

$$[SS] \cdot [\phi] = [T] \quad (6.19)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \int_{\tau_D} (v_i \cdot L \cdot v_j + v_j \cdot L \cdot v_i) d\tau \quad (6.20)$$

Εάν ο τελεστής L ικανοποιεί την ιδιότητα που δίνεται από τη σχέση (6.14), τότε ο πίνακας διανυσμάτων $[SS]$ είναι συμμετρικός, και τα στοιχεία του δίνονται από τη σχέση (6.21).

$$S_{ij} = \int_{\tau_D} v_i \cdot L \cdot v_j d\tau \quad (6.21)$$

Σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα των εξισώσεων που προκύπτει από τη μέθοδο Galerkin είναι το ίδιο με εκείνο που προκύπτει από τη μέθοδο μεταβολών. Ο όρος $[T]$ στη σχέση (6.19) είναι το διάνυσμα στήλης του οποίου τα στοιχεία εξαρτώνται από τη συνάρτηση διέγερσης και δίνονται από τη σχέση (6.22).

$$t_i = \int_{\tau_D} v_i \cdot f \, d\tau \quad (6.22)$$

6.5 Κλασική μέθοδος των μεταβολών (Μέθοδος Rayleigh – Ritz)

Η κλασική μέθοδος των μεταβολών, η οποία είναι γνωστή και ως μέθοδος Rayleigh – Ritz, επιλύει το πεδιακό πρόβλημα μέσω μιας ολοκληρωτικής προσέγγισης. Ξεκινώντας από τη διαφορική εξίσωση (6.1) κατασκευάζεται μια κατάλληλη συνάρτηση, έτσι ώστε το ελάχιστο της να αντιστοιχεί στη λύση του πεδιακού προβλήματος. Αυτό επιτυγχάνεται όταν η εξίσωση του πεδίου (6.1) έχουν αντιστοιχηθεί. Αυτή η συνάρτηση ονομάζεται μεταβολή. Τότε η διαδικασία αναζήτησης της λύσης του διαφορικού προβλήματος γίνεται μια διαδικασία αναζήτησης του ελάχιστου του συγκεκριμένου τύπου της συνάρτησης (functional).

Τότε, αφού το ελάχιστο του συγκεκριμένου τύπου της συνάρτησης σε σχέση με τη συνάρτηση ϕ αντιστοιχεί στη λύση της εξίσωσης (6.1), μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με τη σχέση (6.23)

$$F(\phi) = \frac{1}{2} \langle L\phi, \phi \rangle - \frac{1}{2} \langle \phi, f \rangle - \frac{1}{2} \langle f, \phi \rangle \quad (6.23)$$

Η συνάρτηση ϕ αντικαθίσταται από τη συνάρτηση ϕ^* που δίνεται από την εξίσωση (6.9), όπου ξανά το v_j ορίζεται σε ολόκληρη την περιοχή D . Αντικαθιστώντας την εξίσωση (6.9) στην εξίσωση (6.23) και θέτοντας ίσες με μηδέν τις παραγώγους των μεταβολών της συνάρτησης F σε σχέση με τους άγνωστους συντελεστές Φ_j δηλαδή:

$$\frac{\delta F}{\delta \Phi_i} = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (6.24)$$

προκύπτει ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, παρόμοιο με εκείνο της εξίσωσης (6.19). Η μέθοδος των μεταβολών απαιτεί να είναι έγκυρη η ιδιότητα που δίνεται από τη σχέση (6.14). Αυτό έχει ως συνέπεια ο πίνακας των διανυσμάτων $[SS]$ να είναι συμμετρικός και το σύστημα να είναι το ίδιο με εκείνο που προκύπτει από τη μέθοδο υπολοίπου (μέθοδος Galerkin).

6.5.1 Λύση πεδιακού προβλήματος με τη μέθοδο των μεταβολών

Θεωρείται ένα πεδιακό πρόβλημα που περιγράφεται από τη διαφορική εξίσωση (6.1), με ομογενείς συνοριακές συνθήκες π.χ. του τύπου που δίνεται από τις εξισώσεις (6.4), (6.6) ή (6.7). Έπειτα, η πράξη του εσωτερικού γινομένου ορίζεται όπως στην εξίσωση (6.10). Θεωρείται ότι, ο διαφορικός τελεστής ικανοποιεί και τις δύο ιδιότητες που προκύπτουν από τις εξισώσεις (6.13) και (6.14). Ο στόχος είναι να επιδειχθεί ότι η λύση

της εξίσωσης (6.1) αντιστοιχεί στο ελάχιστο του συγκεκριμένου τύπου συνάρτησης που ορίζεται στη σχέση (6.23) π.χ. $\delta F = 0$ με $\delta(\delta F) > 0$.

Ισχύει:

$$\begin{aligned} F + \delta F &= F(\phi + \delta\phi) \\ &= \frac{1}{2} \langle L(\phi + \delta\phi), \phi + \delta\phi \rangle - \frac{1}{2} \langle \phi + \delta\phi, f \rangle - \frac{1}{2} \langle f, \phi + \delta\phi \rangle \end{aligned} \quad (6.25)$$

Χάρη στην ιδιότητα της πρόσθεσης, αγνοώντας τα απειροστά ανώτερης τάξης προκύπτει η παρακάτω σχέση (6.26).

$$\delta F = \frac{1}{2} \langle L\phi, \delta\phi \rangle + \frac{1}{2} \langle L\delta\phi, \phi \rangle - \frac{1}{2} \langle \delta\phi, f \rangle - \frac{1}{2} \langle f, \delta\phi \rangle \quad (6.26)$$

Αφού έχει υποθεθεί ότι ο διαφορικός τελεστής L ικανοποιεί την εξίσωση (6.14), ισχύει η σχέση (6.27).

$$\delta F = \frac{1}{2} \langle \delta\phi, L\phi - f \rangle + \frac{1}{2} \langle L\phi - f, \delta\phi \rangle \quad (6.27)$$

Έτσι από τον ορισμό του εσωτερικού γινομένου της εξίσωσης (6.10) προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

$$\delta F = Re(\langle \delta\phi, L\phi - f \rangle) \quad (6.28)$$

όπου Re σημαίνει το πραγματικό μέρος. Με την επιβολή της σταθερής συνθήκης $\delta\phi = 0$ προκύπτει ότι ισχύει η σχέση (6.29).

$$Re(\langle \delta\phi, L\phi - f \rangle) = 0 \quad (6.29)$$

Δεδομένου ότι η παράμετρος $\delta\phi$ είναι μια αυθαίρετη μεταβολή της συνάρτησης ϕ άμεσα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η συνάρτηση ϕ πρέπει να ικανοποιήσει τη συνθήκη (6.1) για να ικανοποιείται η εξίσωση (6.19) για κάθε $\delta\phi$. Έπειτα, για να επαληθευτεί ότι στο σημείο αυτό εμφανίζεται ελάχιστο διαπιστώνεται ότι:

$$\delta(\delta F) = \delta F(\phi + \delta\phi) - \delta F(\phi) = Re(\langle \delta\phi, L\delta\phi \rangle) > 0 \quad (6.30)$$

επειδή έχει υποθεθεί ότι ο διαφορικός τελεστής L είναι θετικά ορισμένος, όπως στην εξίσωση (6.13).

Αξίζει να παρατηρηθεί ότι η ιδιότητα (6.14) είναι ουσιώδης, προκειμένου το σταθερό σημείο του συγκεκριμένου τύπου συνάρτησης να αντιστοιχεί στη λύση του πεδιακού προβλήματος. Αντίστροφα, για να ικανοποιείται η συνθήκη (6.13) σημαίνει ότι αυτό το στατικό σημείο αντιστοιχεί σε σημείο ελαχίστου. Η συνθήκη αυτής της μορφής μπορεί να απαλειφθεί, αφού ο στόχος είναι να βρεθεί λύση για την εξίσωση (6.1) ανεξάρτητα αν αυτή η λύση αντιστοιχεί σε ένα ελάχιστο, σε ένα μέγιστο ή σε ένα σημείο καμπής του συγκεκριμένου τύπου της συνάρτησης.

6.5.2 Ορισμός της τροποποιημένης μεθόδου των μεταβολών

Όταν το πεδιακό πρόβλημα περιγράφεται από την εξίσωση (6.1) και από μη ομογενείς συνοριακές συνθήκες, όπως για παράδειγμα εκείνες του τύπου που παρατίθενται στις εξισώσεις (6.5) και (6.8), είναι απαραίτητο να τροποποιηθεί ο ορισμός του τύπου

της συνάρτησης F που δίνεται από την εξίσωση (6.23), προκειμένου να εφαρμοστεί ξανά η μέθοδος που έχει περιγραφεί παραπάνω. Στην πράξη, σε αυτήν την περίπτωση, ο διαφορικός τελεστής δεν ταιριάζει με την ιδιότητα (6.14).

Προκειμένου να διορθωθεί αυτό το μειονέκτημα, εισάγεται αντί της συνάρτησης ϕ μια νέα άγνωστη συνάρτηση η $\phi' = \phi - \psi$ όπου η παράμετρος ψ είναι οποιαδήποτε συνάρτηση ικανοποιεί τις μη ομογενείς συνοριακές συνθήκες που έχουν προκαθοριστεί. Επομένως, η συνάρτηση ϕ' ικανοποιεί τις ομογενείς συνοριακές συνθήκες, και έπειτα ο διαφορικός τελεστής L ικανοποιεί την ιδιότητα (6.14). Αντικαθιστώντας τη συνάρτηση ϕ' στη θέση της συνάρτησης ϕ και της συνάρτησης $f' = f - L\psi$ στη θέση της συνάρτησης f στον ορισμό του συγκεκριμένου τύπου συνάρτησης που παρατίθεται στην εξίσωση (6.23) προκύπτει η σχέση (6.31).

$$F(\phi') = \frac{1}{2} \langle L\phi', \phi' \rangle - \frac{1}{2} \langle \phi', f' \rangle - \frac{1}{2} \langle f', \phi' \rangle \quad (6.31)$$

Από την εξίσωση (6.31) ορίζεται ο τροποποιημένος τύπος συνάρτησης ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις μη ομογενείς συνοριακές συνθήκες με αυτό τον τρόπο προκύπτει η σχέση (6.32)

$$F(\phi) = \frac{1}{2} \langle L\phi, \phi \rangle - \frac{1}{2} \langle L\phi, \psi \rangle + \frac{1}{2} \langle \phi, L\psi \rangle - \frac{1}{2} \langle \phi, f \rangle - \frac{1}{2} \langle f, \phi \rangle \quad (6.32)$$

Σε αυτήν την εξίσωση στο δεύτερο και στον τρίτο όρο του δεύτερου μέλους εμπεριέχεται η συνάρτηση ψ η οποία μπορεί να αλλαχθεί σε ολοκληρώματα κατά μήκος της περιοχής του συνόρου, υπό την έννοια του θεωρήματος του Stokes και του θεωρήματος της απόκλισης. Έτσι η συνάρτηση ψ εξαφανίζεται όταν εφαρμόζονται οι μικτές συνοριακές συνθήκες.

Δύνανται να εφαρμοστούν περαιτέρω τροποποιήσεις στον ορισμό του συγκεκριμένου τύπου συνάρτησης και στον ορισμό του εσωτερικού γινομένου, οι οποίες θα επιτρέψουν στη μέθοδο να γενικευθεί. Συγκεκριμένα, είναι δυνατό να προσαρμοστεί η μέθοδος με τη χρήση μιγαδικών διαφορικών τελεστών (οι οποίοι χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό μέσων με απώλειες) ή με διαφορικούς τελεστές, οι οποίοι δεν ικανοποιούν τις ιδιότητες (6.13) και (6.14).

6.5.3 Φυσικές συνοριακές συνθήκες

Στη μέθοδο των μεταβολών, οι συνοριακές συνθήκες μπορούν να διακρίνονται ανάμεσα σε φυσικές και ουσιώδεις συνθήκες. Οι φυσικές συνοριακές συνθήκες είναι εκείνες που ικανοποιούνται αυτόματα στο σταθερό σημείο του συγκεκριμένου τύπου συναρτήσεων. Οι ουσιώδεις συνοριακές συνθήκες πρέπει να προστίθενται στον ορισμό του συγκεκριμένου τύπου συνάρτησης, προκειμένου να προκύψει η ακριβής λύση του πεδιακού προβλήματος.

Με τον κοινό ορισμό του τύπου της συνάρτησης οι συνοριακές συνθήκες τύπου Neumann που εφαρμόζονται στην παράγωγο της συνάρτησης ϕ είναι φυσικές συνοριακές συνθήκες, δηλαδή ικανοποιούνται άμεσα από τη λύση που προκύπτει. Αντίστρο-

φα, οι συνοριακές συνθήκες τύπου Dirichlet, οι οποίες εφαρμόζονται απευθείας στην τιμή της συνάρτησης ϕ , είναι ουσιώδεις συνοριακές συνθήκες.

6.6 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Ουσιαστικά η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην υποδιαίρεση όλης της περιοχής σε ένα καθορισμένο αριθμό υποπεριοχών. Σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους που έχουν περιγραφεί προηγουμένως, όπου οι συναρτήσεις παρεμβολής v_i ορίζονται σε όλη την περιοχή D , στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αυτές ορίζονται μόνο σε κάθε υποπεριοχή. Επειδή αυτές οι υποπεριοχές έχουν μικρές διαστάσεις, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η συνάρτηση ϕ να προσεγγίζεται από απλές συναρτήσεις παρεμβολής των οποίων οι συντελεστές είναι άγνωστες ποσότητες. Η λύση του πεδιακού προβλήματος προκύπτει όταν υπολογιστούν αυτοί οι άγνωστοι συντελεστές.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. **Κατάτμηση της περιοχής:** Η περιοχή υποδιαιρείται σε υποπεριοχές, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μειωμένες διαστάσεις
2. **Επιλογή των συναρτήσεων παρεμβολής:** Επιλέγονται οι συναρτήσεις παρεμβολής v_i . Όπως έχει προαναφερθεί, αυτές οι συναρτήσεις μπορεί να είναι πολύ απλές εξαιτίας των μικρών διαστάσεων των υποπεριοχών.
3. **Διαμόρφωση του συστήματος των εξισώσεων για να επιλυθεί το πεδιακό πρόβλημα:** Το σύστημα των εξισώσεων από το οποίο προκύπτει η λύση του προβλήματος αναπτύσσεται διαφορετικά ανάλογα με τη μέθοδο που θα επιλεγεί (μέθοδος Galerkin ή μέθοδος Rayleigh-Ritz).
4. **Επίλυση του προβλήματος:** Η λύση του προβλήματος προκύπτει από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων που προέκυψε.

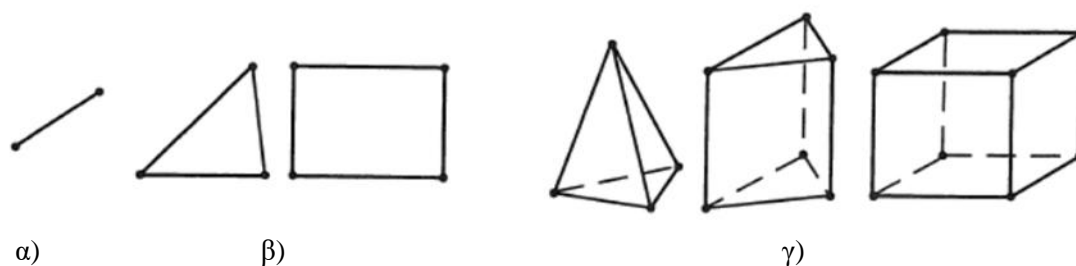
6.6.1 Κατάτμηση της περιοχής

Το πρώτο βήμα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η κατάτμηση της περιοχής. Όλη η περιοχή D υποδιαιρείται σε N_m στοιχεία D_m ($m = 1, 2, 3, \dots, N_m$). Ο τρόπος για να επιτευχθεί μια υποδιαίρεση σαν αυτή επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια της λύσης. Επιπρόσθετα, επηρεάζει τον χώρο μνήμης που απαιτείται στον υπολογιστή.

Σε προβλήματα μιας διάστασης η περιοχή είναι μια καμπύλη και κάθε υποπεριοχή είναι ένα τμήμα, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 6.1.α. Η σύνδεση των διαφορετικών τμημάτων σχηματίζει την αρχική καμπύλη.

Σε προβλήματα δύο διαστάσεων, η περιοχή είναι μια επιφάνεια και κάθε υποπεριοχή είναι ένα πολύγωνο, συνήθως ένα τρίγωνο ή ένα παραλληλόγραμμο όπως εμφανίζεται στο σχήμα 6.1.β.

Σε προβλήματα τριών διαστάσεων, η περιοχή είναι ένας όγκος και κάθε υποπεριοχή είναι ένα τετράεδρο, ένα τριγωνικό πρίσμα, ή ένα συμπαγές παραλληλόγραμμο όπως εμφανίζεται στο σχήμα 6.1.γ.



Σχήμα 6.1: Στοιχεία για την κατάτμηση της περιοχής [Ξ72].

α) μια διάσταση τμήμα καμπύλης, β) δύο διαστάσεις τρίγωνο ή παρ/μο
γ) τρεις διαστάσεις τριγωνικό πρίσμα, τετράεδρο ή συμπαγές παρ/μο

6.6.2 Επιλογή συνάρτησης παρεμβολής

Το δεύτερο βήμα αποτελείται από την επιλογή της συνάρτησης παρεμβολής για την προσέγγιση της άγνωστης συνάρτησης σε κάθε στοιχείο της m . Εάν επιλεγθεί ένα πολυώνυμο πρώτης τάξης, επιτυγχάνεται μια γραμμική παρεμβολή. Με ένα πολυώνυμο δεύτερης τάξης, επιτυγχάνεται μια τετραγωνική παρεμβολή. Μπορεί επίσης να επιλεγθεί ένα πολυώνυμο ανώτερης τάξης, ωστόσο, ενώ αποδίδεται μεγαλύτερη ακρίβεια στην παρεμβολή, απαιτείται η υιοθέτηση μιας πιο σύνθετης διατύπωσης και για αυτόν τον λόγο σπάνια υιοθετείται η επιλογή τους. Μόλις επιλεγθεί η τάξη του πολυωνύμου, η άγνωστη λύση σε κάθε ένα από τα m στοιχεία γράφεται με τη μορφή της σχέσης (6.33). Όπου n είναι ο αριθμός των κόμβων του στοιχείου, Φ_{mj} είναι η τιμή της παραμέτρου ϕ στον κόμβο j τάξης του στοιχείου m τάξης. Τελικά, v_{mj} είναι η συνάρτηση παρεμβολής που αναφέρεται στον κόμβο j τάξης του στοιχείου m τάξης. Επίσης, η ανώτερη τάξη της συνάρτησης προσδιορίζει την τάξη του στοιχείου.

$$\phi_m^*(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^n \Phi_{mj} \cdot v_{mj}(x, y, z, t) \quad (6.33)$$

6.6.3 Διατύπωση των εξισώσεων του συστήματος

Για να επιλυθεί το πεδιακό πρόβλημα, πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές της παραμέτρου Φ_{mj} , οι οποίες είναι οι τιμές της παραμέτρου ϕ στους κόμβους κάθε στοιχείου. Είναι απαραίτητο να προετοιμαστεί ένα σύστημα εξισώσεων, του οποίου η λύση αντιστοιχεί αντιστοιχεί στις τιμές της παραμέτρου Φ_{mj} . Για να αναπτυχθεί αυτό το σύστημα των εξισώσεων, μπορεί να υιοθετηθούν και οι δύο μέθοδοι τόσο η μέθοδος των μεταβολών, όσο και η μέθοδος των υπολοίπων με ένα παρεμφερή τρόπο, όπως έχει εξηγηθεί παραπάνω, αλλά η εφαρμογή τους πρέπει να πραγματοποιηθεί σε κάθε στοιχείο ξεχωριστά.

Στην περίπτωση της μεθόδου Galerkin εφαρμόζεται σε κάθε στοιχείο η εξίσωση (6.16). Το ολοκλήρωμα των υπολοίπων τίθεται ίσο με μηδέν. Για κάθε στοιχείο m τα n ολοκληρώματα που δίνονται από τη σχέση (6.34) τίθενται ίσα με μηδέν. Έτσι, λαμβάνεται ένα σύστημα n εξισώσεων με n αγνώστους Φ_{mj} . Εφαρμόζοντας την εξίσωση (6.34) σε όλα τα N_m στοιχεία από τα οποία απαρτίζεται η περιοχή και λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις με τις οποίες συνδέονται τα γειτονικά στοιχεία προκύπτει ένα σύστημα του είδους που παρατίθεται στη σχέση (6.35), η οποία σχηματίζεται από N_n εξισώσεις με N_n αγνώστους Φ_j .

$$R_{im} = \int_{\tau} v_i \cdot (L\phi_m^* - f_m) d\tau \quad (6.34)$$

$$= \int_{\tau} v_i \cdot L \left(\sum_{j=1}^n \Phi_{mj} \cdot v_{mj} \right) d\tau - \int_{\tau} v_i \cdot f_m d\tau \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$[SS] \cdot [\phi] - [T] = 0 \quad (6.35)$$

Στην περίπτωση της μεθόδου Rayleigh-Ritz (μέθοδος των μεταβολών) ο τύπος της συγκεκριμένης συνάρτησης δίνεται από τη σχέση (6.36).

$$F(\phi^*) = \sum_{m=1}^M F(\phi_m^*) = \sum_{m=1}^M \left[\frac{1}{2} \int_{\tau} \phi_m^* L\phi_m^* d\tau - \frac{1}{2} \int_{\tau} f_m \phi_m^* d\tau \right] \quad (6.36)$$

η οποία σε μητρική μορφή λαμβάνει τη μορφή της σχέσης (6.37)

$$F(\phi^*) = \frac{1}{2} [\phi]^t [SS] [\phi] - [\phi]^t [T] \quad (6.37)$$

Το σύστημα προκύπτει από την επιβολή της σταθερής συνθήκης στον τύπο της συνάρτησης. Αυτό πραγματοποιείται θέτοντας όλες τις μερικές παραγώγους της εξίσωσης (6.37) ίσες με μηδέν σε σχέση με την παράμετρο Φ_j . Η διαδικασία αυτή παρατίθεται στη σχέση (6.38).

$$\frac{\partial F}{\partial \Phi_j} = 0 \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (6.38)$$

Προκύπτει ένα σύστημα N_n εξισώσεων της ίδιας μορφής με την εξίσωση (6.35). Ωστόσο, με τη χρήση της μεθόδου των μεταβολών ο πίνακας $[SS]$ είναι συμμετρικός, αφού πρέπει να ικανοποιηθεί η συνθήκη (6.14). Γενικά, αυτό δεν επαληθεύεται με τη μέθοδο Galerkin.

6.6.4 Λύση του προβλήματος

Μόλις καταστρωθεί το σύστημα των εξισώσεων που παρατίθεται στη σχέση (6.35) καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των τιμών της παραμέτρου Φ_i στην περιοχή που διαθέτει N_n κόμβους. Το σύστημα (6.35) είναι ένα σύστημα εξισώσεων που μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση κοινών αριθμητικών μεθόδων. Επειδή ο πίνακας $[SS]$ περιέχει αρκε-

τά μηδενικά, υπάρχουν κατάλληλοι αλγόριθμοι για να επιλυθεί γρήγορα αυτό το σύστημα.

6.7 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η οποία, θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που εμφανίζονται κατά τη σχεδίαση του εναλλακτήρα. Επιπρόσθετα, έχουν αναφερθεί οι δυο βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να καταστεί δυνατή η επίλυση του εκάστοτε πεδριακού προβλήματος σε κάθε υποπεριοχή που έχει καταταμηθεί η περιοχή ενδιαφέροντος. Αυτές οι μέθοδοι είναι: α) η μέθοδος του υπολοίπου (Μέθοδος Galerkin) και β) η μέθοδος των μεταβολών (Rayleigh – Ritz).

Επιβεβαίωση της Σχεδίασης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

7.1 Εισαγωγή

Για να επιβεβαιωθεί η σχεδίαση της γεννήτριας, επιλέγεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων λόγω των πλεονεκτημάτων που αυτή διαθέτει τα οποία έχουν ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 6. Συγκεκριμένα, η σχεδίαση επιλέγεται να αναλυθεί ως πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε δύο διαστάσεις. Με τη μέθοδο αυτή θα καταστεί δυνατή η μελέτη της μη γραμμικής συμπεριφοράς των σιδηρομαγνητικών υλικών από τα οποία θα κατασκευαστεί η γεννήτρια. Επειδή έχει επιλεχθεί το πεδιακό πρόβλημα να αναλυθεί σε δύο διαστάσεις, αυτή θα υλοποιηθεί κατά την εγκάρσια διατομή της μηχανής. Αυτό γίνεται, διότι το μαγνητικό πεδίο έχει ακτινική κατανομή και το διάκενο της μηχανής είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με τις υπόλοιπες γεωμετρικές διαστάσεις της. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη παραμένουν αμετάβλητα κατά τη διεύθυνση του άξονα της γεννήτριας.

7.1.1 Βήματα σχεδίασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Για να επιλυθεί το πεδιακό πρόβλημα χρησιμοποιείται κατάλληλο λογισμικό. Για τη διερεύνηση της σχεδίασης που μελετάται έχει επιλεχθεί το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Femm που αναπτύχθηκε από τον David Meeker [E72]. Σε αυτό αρχικά, πρέπει να σχεδιαστεί η γεωμετρία της γεννήτριας. Έπειτα, τοποθετούνται τα υλικά στις διάφορες περιοχές τα στοιχεία των κυκλωμάτων και οι οριακές συνθήκες. Σε γενικές γραμμές ακολουθείται ο αλγόριθμος του οποίου τα βήματα παρατίθεται παρακάτω.

1. Σχεδίαση της γεωμετρίας της μηχανής

Προκειμένου να σχεδιαστεί η γεωμετρία της μηχανής λαμβάνονται οι τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων που έχουν προσδιοριστεί στην προκαταρκτική σχεδίαση.

2. Τοποθέτηση υλικών κατασκευής στα διάφορα τμήματα της γεννήτριας

Ανάλογα με την περιοχή επιλέγονται από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος τα υλικά που απαιτούνται.

3. Εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών σε όποια σημεία απαιτούνται

Οι αναγκαίες συνοριακές συνθήκες καθορίζονται από τη γεωμετρία της μηχανής και επιβάλλονται στα σύνορα των περιοχών από τις οποίες απαρτίζεται.

4. Ρύθμιση του μεγέθους του πλέγματος

Αυτή είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία, διότι από αυτή εξαρτάται η ακρίβεια των λύσεων, αλλά και ο χρόνος που απαιτείται για την επίλυση του πεδιακού προβλήματος.

5. Έλεγχος της πυκνότητας του πλέγματος
6. Ρύθμιση της ακρίβειας της επίλυσης
7. Προσομοίωση
8. Λήψη αποτελεσμάτων
9. Επεξεργασία – εκτίμηση των αποτελεσμάτων

7.2 Σχεδίαση της γεωμετρίας της μηχανής

Το πρόγραμμα Femm που έχει επιλεγεί διαθέτει δύο επιλογές για τη σχεδίαση της γεωμετρίας της μηχανής:

Η μια από αυτές δίνει τη δυνατότητα να πραγματοποιηθεί η σχεδίαση στο πρόγραμμα σχεδίασης AutoCAD. Σε αυτήν την περίπτωση αρχικά, το σχέδιο αποθηκεύεται ως αρχείο τύπου drawing. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του προγράμματος Femm για να εισαχθεί σε αυτό μια σχεδίαση του προγράμματος AutoCAD, αυτή πρέπει να έχει αποθηκευθεί ως αρχείο τύπου Dxf. Επομένως από την αρχική μορφή του αρχείου δημιουργείται η μορφή που μας ενδιαφέρει. Έπειτα, εισάγεται η μορφή του αρχείου αυτού στον χώρο σχεδίασης του προγράμματος προσομοίωσης σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

- Όταν δημιουργείται η γεωμετρία της μηχανής στο σχεδιαστικό πρόγραμμα λαμβάνεται μέριμνα έτσι, ώστε το κέντρο του δρομέα της να τοποθετηθεί στην αρχή των αξόνων του ορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων, δηλαδή στο σημείο (0,0).
- Επιλέγεται το αρχείο πρόκειται να εισαχθεί.
- Επιλέγεται η εισαγωγή του αρχείου. Από τις επιλογές του προγράμματος επιλέγεται η Import Dxf
- Επιλέγεται το όνομα του αρχείου που πρέπει να εισαχθεί και αυτό εισάγεται ως σχέδιο στον χώρο σχεδίασης του προγράμματος προσομοίωσης

Παρατηρείται ότι τις περισσότερες φορές μετά την εισαγωγή του αρχείου από το σχεδιαστικό πρόγραμμα στον καμβά σχεδίασης του προγράμματος προσομοίωσης το σχέδιο του τοποθετείται μετατοπισμένο ως προς το σημείο (0,0) στο οποίο πρέπει να βρίσκεται το κέντρο του δρομέα της.

Επειδή, ο υπολογισμός των ηλεκτρικών και μαγνητικών μεγεθών της γεννήτριας (ενδεικτικά αναφέρονται η ροπή, η ισχύς, οι απώλειες και η μαγνητική επαγωγή) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται ως προς το κέντρο του άξονα της η μετατόπιση της σχεδίασης της έχει ως αποτέλεσμα τη λήψη εσφαλμένων αποτελεσμάτων. Επομένως, για αυτήν την περίπτωση καθίσταται υποχρεωτική η μετατόπιση της σχεδίασης με τέτοιο τρόπο, ώστε το κέντρο του δρομέα της να τοποθετείται ακριβώς στην αρχή των αξόνων. Στη συνέχεια παρατίθενται τα βήματα του αλγόριθμου

που ακολουθείται για να επιτευχθεί η μετατόπιση του κέντρου του άξονα στην αρχή των αξόνων εφόσον, χρειάζεται [Ξ73].

1. Επιλέγεται από το πρόγραμμα η εργασία σε κόμβους (Operate on nodes)
2. Τοποθετείται ο κένσορας πάνω στον κόμβο που βρίσκεται στο κέντρο του άξονα της γεννήτριας
3. Επιλέγεται ο κόμβος με το διπλό πάτημα του δεξιού πλήκτρου του ποντικιού πάνω σε αυτόν
4. Εμφανίζονται οι συντεταγμένες του σημείου (x,y)
5. Αν αυτές είναι οι συντεταγμένες της αρχής των αξόνων (0,0), ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις για να πραγματοποιηθεί η προσομείωση. Αν προκύψουν διαφορετικές συντεταγμένες, αυτές καταγράφονται.
6. Εφόσον οι συντεταγμένες είναι διαφορετικές, πρέπει να επιλεγθεί το σύνολο της σχεδίασης που εμφανίζεται (λειτουργία προγράμματος select a group of entities using the mouse).
7. Από τις λειτουργίες του προγράμματος αρχικά επιλέγεται η λειτουργία edit και στη συνέχεια η λειτουργία της μετακίνησης move.
8. Στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγεται η λειτουργία translation και έπειτα τοποθετούνται οι συντεταγμένες x και y ως προς τις οποίες πρέπει να γίνει η μετακίνηση.
9. Για να πραγματοποιηθεί η μετακίνηση κατά τον άξονα των x τοποθετείται η τιμή στη θέση horizontal shift, ενώ για να γίνει η μετακίνηση κατά τον άξονα y η τιμή τοποθετείται στη θέση vertical shift.
10. Για ολοκληρωθεί η μετακίνηση της σχεδίασης επιλέγεται OK.

Για να γίνει κατανοητή η διαδικασία παρατίθεται το ακόλουθο παράδειγμα:

Έστω ότι ο κόμβος που βρίσκεται στο κέντρο του άξονα της γεννήτριας έχει συντεταγμένες $(x, y) = (-1.045, 0.45)$. Προκειμένου όλη η σχεδίαση να μετακινηθεί στην αρχή των αξόνων (σημείο $(x, y) = (0, 0)$), πρέπει να πραγματοποιηθεί μετακίνηση της σχεδίασης κατά τον άξονα των x και κατά τον άξονα των y. Επομένως, στο παράθυρο του διαλόγου του ένατου βήματος γράφονται οι ακόλουθες τιμές:

$$1) \text{ Horizontal shift} = 1.045 \quad \text{και} \quad 2) \text{ Vertical shift} = -0.45$$

Η δεύτερη επιλογή για τη σχεδίαση της μηχανής υλοποιείται με τη χρήση των δυνατοτήτων σχεδίασης που εμπεριέχονται στο πρόγραμμα προσομείωσης Femm. Η σχεδίαση σε αυτήν την περίπτωση πραγματοποιείται σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα [Ξ73]:

1. Η σχεδίαση της γεννήτριας χωρίζεται στα ακόλουθα τμήματα: α) Στο στάτη, ο οποίος απαρτίζεται από τις αύλακες, τις οδοντώσεις, τα διάκενα αερισμού και το ζύγωμα.

- β) Ο δρομέας που αποτελείται από τους έκτυπους πόλους, το ζύγωμα και τα διάκενα αερισμού κατά μήκος του πυρήνα του πόλου, ενώ οι έκτυποι πόλοι αποτελούνται από το κύριο σώμα των πόλων και τα πέδιλα.
2. Κάθε τμήμα που αναφέρεται στο πρώτο βήμα υποδιαιρείται σε κόμβους (nodes), σε ευθύγραμμα τμήματα (segments) και σε τμήματα τόξων (arcsegments).
 3. Επιλέγεται το σύστημα των καρτεσιανών συντεταγμένων για τη σχεδίαση της γεωμετρίας της μηχανής
 4. Θεμελιώδες τμήμα της σχεδίασης είναι οι κόμβοι (nodes). Η τοποθέτηση των κόμβων προϋποθέτει τον υπολογισμό των συντεταγμένων τους ανά τμήμα της σχεδίασης της γεννήτριας.
 5. Πραγματοποιείται η τοποθέτηση των κόμβων στο χώρο της σχεδίασης με χρήση της εντολής « `mi_addnode (x,y)` »
 6. Προκειμένου να επιτευχθεί η σχεδίαση των επιμέρους τμημάτων της γεννήτριας, απαιτείται κάθε κόμβος να ενταχθεί σε ομάδα (group) και να ρυθμιστεί η ιδιότητα του. Επομένως, αρχικά έκαστος κόμβος πρέπει να επιλεγεί μέσω της εντολής « `mi_selectnode (x,y)` ». Έπειτα, ορίζονται οι ιδιότητες του κόμβου και ο αριθμός της ομάδας στην οποία ανήκει μέσω της εντολής « `mi_setnodeprop ("propname", groupno)` »
 7. Συνδέονται μεταξύ τους τα ευθύγραμμα τμήματα της μηχανής (segments). Για την τοποθέτηση τους απαιτείται η σύνδεση δύο κόμβων, η οποία πραγματοποιείται με χρήση της εντολής « `mi_addsegment (x1, y1, x2, y2)` ».
 8. Επιλέγονται τα ευθύγραμμα τμήματα μέσω της εντολής « `mi_selectsegment (x, y)` ». Επειδή η εντολή αυτή επιλέγει τον πλησιέστερο κόμβο προς το ευθύγραμμο τμήμα και αν τοποθετηθούν σε αυτή οι συντεταγμένες του κόμβου αναχωρήσεως ή του κόμβου αφίξεως του εκάστοτε ευθύγραμμου τμήματος ως συνήθως αστοχεί η επιλογή του ευθύγραμμου τμήματος θα βρεθεί τρόπος εξάλειψης της αστοχίας. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται οι συντεταγμένες του μέσου της απόστασης ανάμεσα στους δύο κόμβους και έπειτα αυτές τοποθετούνται στην εντολή επιλογής ευθύγραμμων τμημάτων που έχει προαναφερθεί.
 9. Ορίζονται οι ιδιότητες των ευθύγραμμων τμημάτων μέσω της εντολής « `mi_setsegmentprop ("propname", elementsize, automesh, hide, group)` ». Η εντολή "propname" χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση Συνοριακών Συνθηκών και θα χρησιμοποιηθεί μετά το πέρας της σχεδίασης της γεωμετρίας της γεννήτριας. Η εντολή `elementsized` δίνει τη δυνατότητα της ρύθμισης του πλέγματος για το εκάστοτε ευθύγραμμο τμήμα και επενεργεί, εφόσον η εντολή `automesh` είναι απενεργοποιημένη. Εφόσον έχει ενεργοποιηθεί η εντολή `automesh`, τότε το πρόγραμμα επιλέγει το πλέγμα που θεωρεί ότι θα φέρει τα καλύτερα αποτελέσματα. Καλό είναι αυτή να είναι απενεργοποιημένη. Οι εντολές που έχουν προαναφερθεί ρυθμίζονται σε επόμενο βήμα, ενώ η εντολή `group` χρησιμοποιείται για να πραγματοποιηθεί η ένταξη του ευθύγραμμου τμήματος σε ομάδα.

10. Πραγματοποιείται η σύνδεση των τμημάτων τόξων (arcsegments). Για αυτή απαιτείται η σύνδεση δύο κόμβων, ενώ πρέπει να υπολογιστεί και η γωνία τους. Η σύνδεση υλοποιείται με χρήση της εντολής « `mi_addarc (x1, y1 , x2, y2, angle, maxseg)` ». Η τελευταία παράμετρος χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του πλέγματος κατά μήκος του τόξου και θα χρησιμοποιηθεί μετά το πέρας της σχεδίασης της γεωμετρίας της μηχανής.
11. Επιλέγονται τα τμήματα των τόξων που έχουν τοποθετηθεί μέσω της εντολής « `mi_selectarcsegment (x, y)` ». Εδώ εμφανίζεται το πρόβλημα του 8^{ου} βήματος, το οποίο αντιμετωπίζεται με τον ίδιο τρόπο.
12. Ορίζονται οι ιδιότητες των τμημάτων τόξων μέσω της εντολής « `mi_setarcsegment-prop (maxsegdeg, "propname", hide, group)` ». Οι εντολές `maxsegdeg` και `"propname"`, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση του πλέγματος και για την τοποθέτηση των Συνοριακών Συνθηκών αντίστοιχα, ρυθμίζονται μετά το πέρας της σχεδίασης της γεωμετρίας της γεννήτριας, ενώ η εντολή `group` εντάσσει τα τμήματα τόξων σε ομάδα.
13. Για το τμήμα του στάτη διατάσσονται στον χώρο σχεδίασης οι κόμβοι που αντιστοιχούν σε μια αύλακα και μια οδόντωση. Στη συνέχεια πρώτα τοποθετούνται τα ευθύγραμμα τμήματα και στη συνέχεια τα τμήματα τόξων που ανήκουν σε μια αύλακα και μια οδόντωση.
14. Με την ίδια διαδικασία που περιγράφεται στα βήματα 5 έως 13 τοποθετούνται σταδιακά όλες οι αύλακες και όλες οι οδοντώσεις του στάτη.
15. Το διάκενο της μηχανής χωρίζεται σε τρία τμήματα α) πλευρά του στάτη, β) πλευρά δρομέα και γ) μέσο του διακένου. Για τη σχεδίαση του απαιτούνται δύο κόμβοι και δύο τόξα για κάθε τμήμα.
16. Η εξωτερική διάμετρος του στάτη απαιτεί για τη σχεδίασή της δύο κόμβους και ισάριθμα τμήματα τόξων.
17. Για κάθε έκτυπο πόλο του δρομέα τοποθετούνται οι κόμβοι, τα ευθύγραμμα τμήματα και τα τμήματα τόξων.
18. Το ίδιο πραγματοποιείται για κάθε τμήμα του ζυγώματος και για τον άξονα του δρομέα

Η σχεδίαση της γεωμετρίας της γεννήτριας έχει ολοκληρωθεί και απομένουν: α) η τοποθέτηση των υλικών και των Συνοριακών Συνθηκών και β) οι κατάλληλες ρυθμίσεις του πλέγματος στα διάφορα τμήματα της γεννήτριας.

7.3 Τοποθέτηση υλικών κατασκευής στα διάφορα τμήματα της γεννήτριας

Για την τοποθέτηση των υλικών κατασκευής στα διάφορα τμήματα της μηχανής ακολουθούνται τα βήματα του αλγόριθμου που παρατίθεται παρακάτω.

- Επιλέγονται τα σημεία τοποθέτησης των υλικών

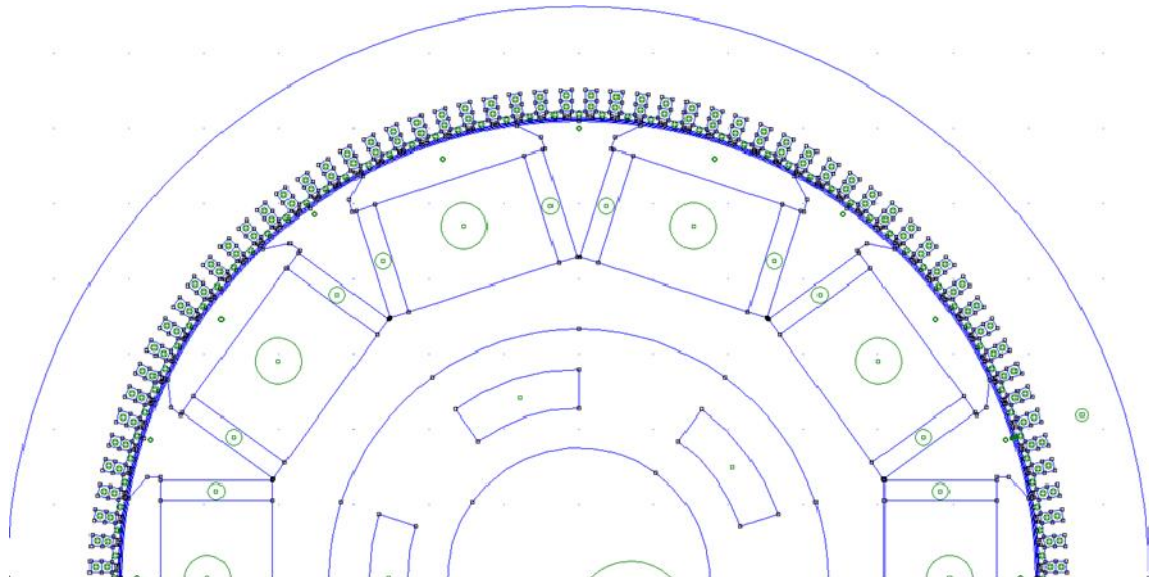
1. Στο διάκενο το υλικό είναι ο αέρας (Air)
2. Στις αύλακες του στάτη τοποθετούνται τα τυλίγματα (Stator Winding)
Αυτά εισάγονται με τη μορφή των φάσεων A,B,C, ενώ έχει ρυθμιστεί κατάλληλα η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που τα διαρρέει κατά την τοποθέτησή τους στη βιβλιοθήκη
3. Στις οδοντώσεις και στο ζύγωμα του στάτη τοποθετείται ο πυρήνας.
Για την περιοχή μαγνητικής φόρτισης της γεννήτριας επιλέγεται το υλικό M-43 (M-43 Steel) για την κατασκευή του πυρήνα
4. Στους έκτυπους πόλους τοποθετούνται τα τυλίγματα διέγερσης (Rotor Winding)
5. Στο κύριο σώμα και στο πέδιλο του έκτυπου πόλου καθώς και στο ζύγωμα του δρομέα τοποθετείται πυρήνας από υλικό M-43 (M-43 Steel), όπως και στο στάτη.
6. Ο άξονας του δρομέα έχει επιλεγεί να κατασκευαστεί από κράμα χάλυβα (Pure Iron).
7. Τα διάκενα αερισμού του δρομέα δεν τοποθετείται υλικό.
 - Υπολογίζονται οι συντεταγμένες των σημείων τοποθέτησης των υλικών στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.
 - Δημιουργείται βιβλιοθήκη με τα υλικά που απαιτούνται για την κατασκευή της μηχανής. Εάν κάποια από αυτά δεν εμπεριέχονται στις υφιστάμενες βιβλιοθήκες υλικών του λογισμικού, τότε τα χαρακτηριστικά τους πρέπει να εισάγονται κατά τη δημιουργία της βιβλιοθήκης.
 - Για την τοποθέτηση των υλικών χρησιμοποιούνται οι εντολές
 1. « `mi_addblocklabel (x,y)` », όπου (x,y) οι συντεταγμένες του σημείου τοποθέτησης
 2. « `mi_selectblocklabel (x,y)` », όπου (x,y) οι συντεταγμένες του σημείου τοποθέτησης
 3. « `mi_setblockprop ("blockname", automesh, meshsize, "incircuit", magdirection, group, turns)` »
 - 4. Μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων του μπλόκ ανάλογα με την περίπτωση χρησιμοποιείται η ακόλουθη εντολή απενεργοποίησης της επιλογής του μπλόκ « `mi_clearselected` »

7.4 Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών σε όποια σημεία απαιτούνται

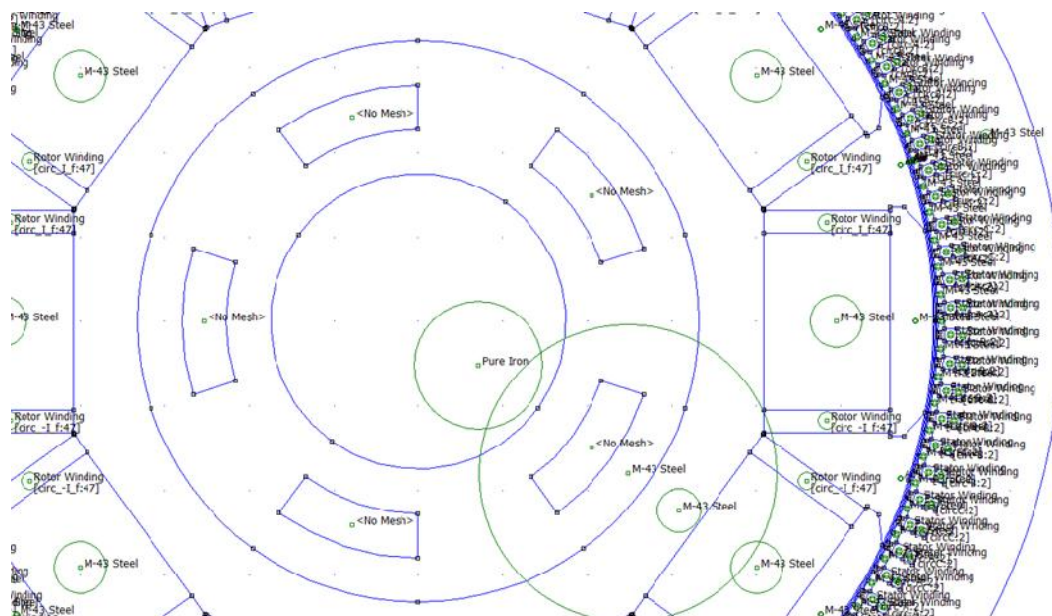
Έχει επιλεγεί η σχεδίαση και προσομοίωση ολόκληρης της γεννήτριας επομένως, απαιτείται η τοποθέτηση μόνο μιας Συνοριακής Συνθήκης. Αυτή τοποθετείται στο σύνορο, το οποίο αποτελεί τη διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στον πυρήνα του στάτη και τον αέρα. Στην υπό μελέτη σχεδίαση το σύνορο είναι η εξωτερική διάμετρος του πυρήνα του στάτη. Στη συγκεκριμένη θέση τοποθετείται η Συνοριακή Συνθήκη τύπου Dirichlet $A = 0$. Αυτή προσδιορίζει την τιμή του μαγνητικού δυναμικού A κατά μήκος του συνό-

ρου και με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η μαγνητική ροή έτσι, ώστε να μη διασχίσει το σύνορο.

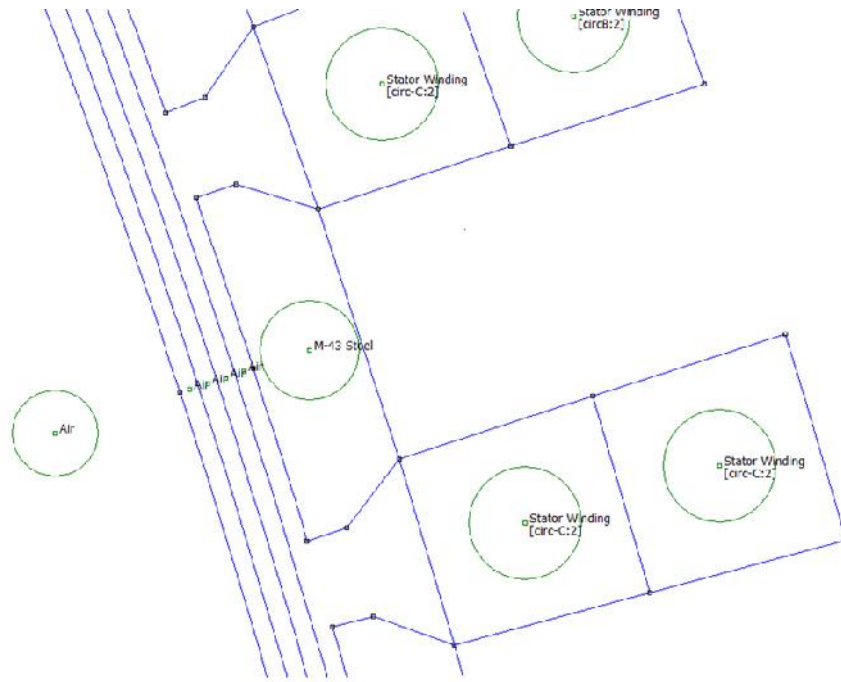
Στη συνέχεια παρατίθενται σχήματα που αφορούν τη γεωμετρική σχεδίαση της μηχανής και την τοποθέτηση των αναγκαίων υλικών στα διάφορα τμήματα της. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 7.1 εμφανίζεται το άνω τμήμα της μηχανής, ενώ στο σχήμα 7.2 παρατίθενται ο στάτης και ο δρομέας της γεννήτριας με έμφαση στους έκτυπους πόλους, στο ζύγωμα, στα διάκενα αερισμού και στον άξονα του δρομέα.



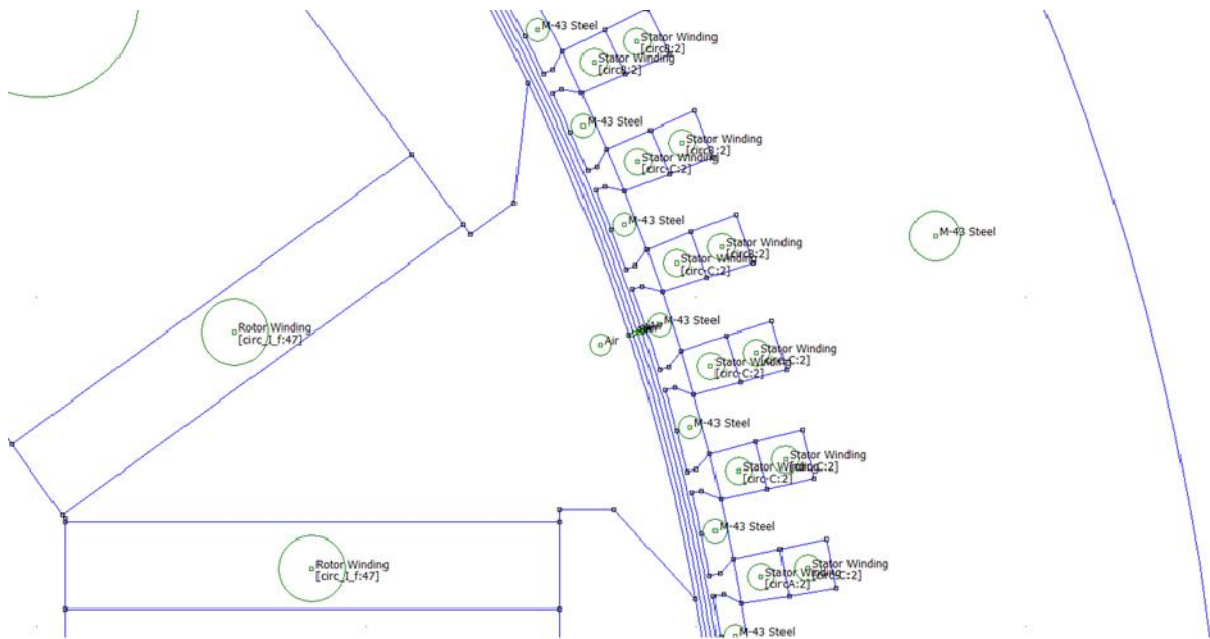
Σχήμα 7.1: Σχεδίαση άνω τμήματος σύγχρονης γεννήτριας δέκα έκτυπων πόλων.



Σχήμα 7.2: Στάτης και δρομέας της γεννήτριας



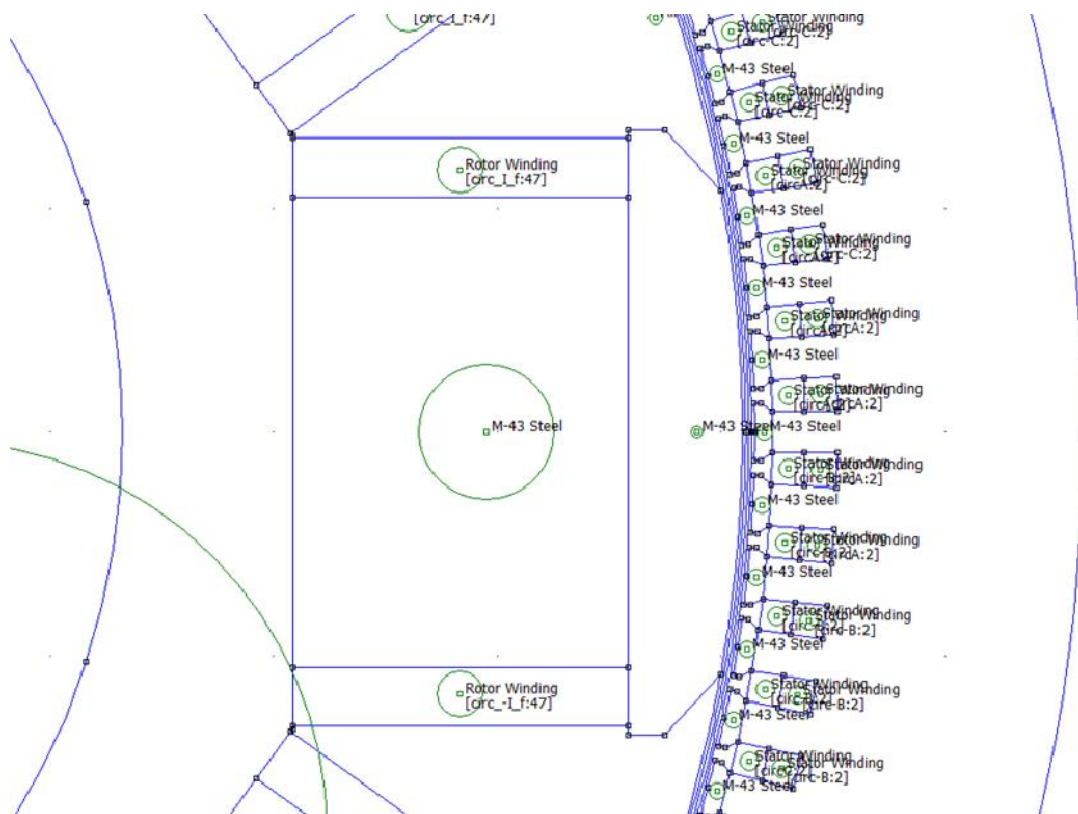
Σχήμα 7.3: Αύλακες και οδοντώσεις του στάτη. Λεπτομέρεια του διακένου



Σχήμα 7.4: Τμήμα του στάτη, του διακένου και των έκτυπων πόλων του δρομέα

Στο σχήμα 7.3 εμφανίζονται οι οδοντώσεις και οι αύλακες του στάτη μετά την τοποθέτηση των τυλιγμάτων και του μαγνητικού υλικού, καθώς και τα τμήματα στα οποία χωρίζεται το διάκενο μετά την τοποθέτηση του αέρα, ο οποίος παρεμβάλλεται

στο χώρο αυτό ανάμεσα στον στάτη και στον δρομέα. Στο σχήμα 7.4 εμφανίζεται τμήμα της σχεδίασης που αφορά το στάτη και το δρομέα ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς έκτυπους πόλους.



Σχήμα 7.5: Τμήμα του στάτη, του διάκενου, των έκτυπων πόλων και του ζυγώματος του δρομέα ίσο με ένα πολικό βήμα

Στο σχήμα 7.5 εμφανίζεται τμήμα της γεννήτριας ίσο με ένα πολικό βήμα το οποίο περιέχει τμήμα του στάτη με τις αύλακες, τις οδοντώσεις και το ζύγωμα, το διάκενο, ένα έκτυπο πόλο και τμήμα του ζυγώματος του δρομέα.

7.5 Ρύθμιση του μεγέθους του πλέγματος – Έλεγχος της πυκνότητας του πλέγματος

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί περί ακρίβειας της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και του χρόνου εκτέλεσης της προσομοίωσης, έπειτα από δοκιμές προκύπτει ότι το πλέγμα σε κάθε τμήμα της γεννήτριας πρέπει να διαθέτει τις ρυθμίσεις που παρατίθενται στον πίνακα 7.1.

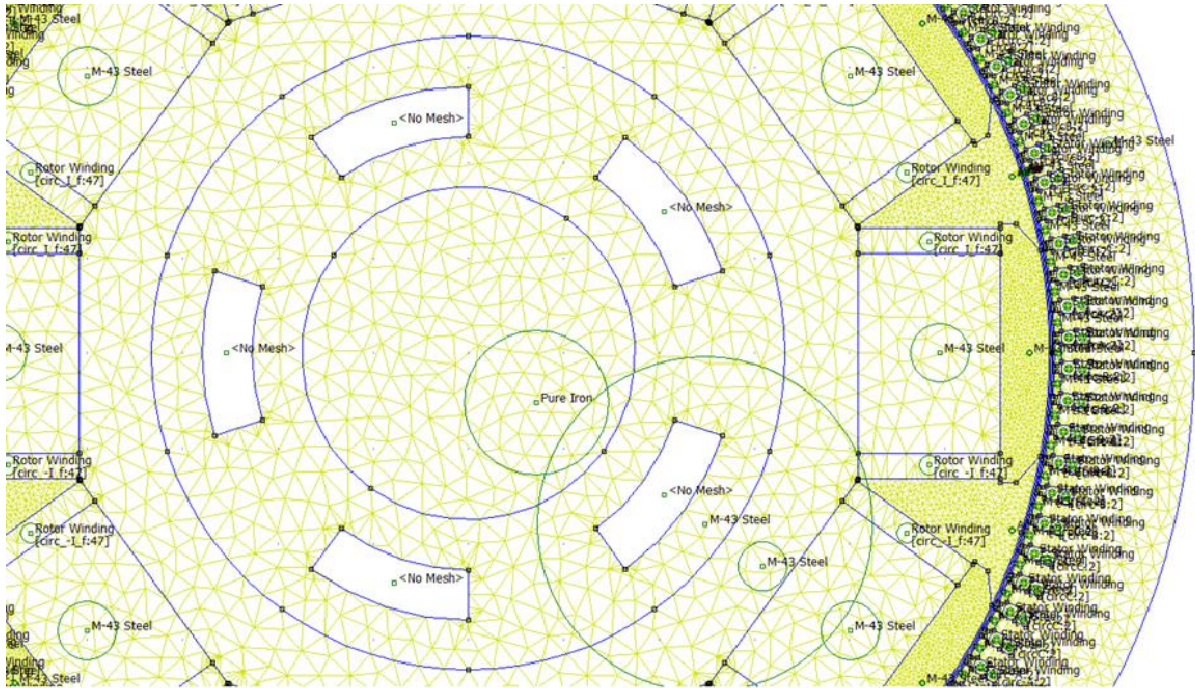
Από τις ρυθμίσεις του πίνακα εξαγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όσο μικρότερη είναι η τιμή που λαμβάνει η ρύθμιση, τόσο πυκνότερο είναι το πλέγμα στο σημείο που αναφέρεται
- Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση, το πλέγμα είναι πυκνό στο διάκενο και πυκνότερο στη λαμαρίνα του χείλους της οδόντωσης, στα τυλίγματα του στάτη και στα πέδιλα του πόλου του δρομέα

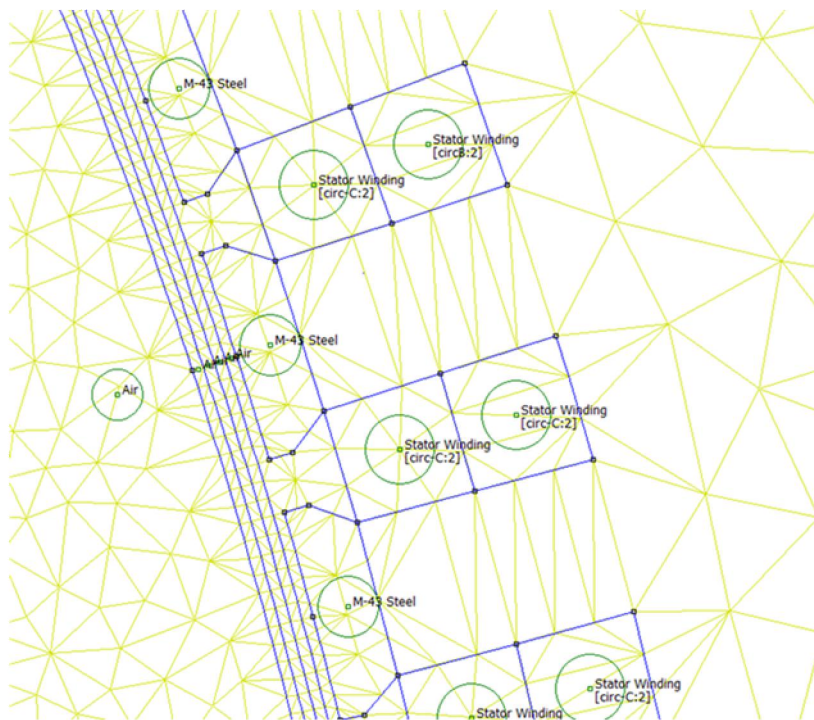
Πίνακας 7.1

Ρυθμίσεις πλέγματος και υλικά στα διάφορα τμήματα της γεννήτριας.

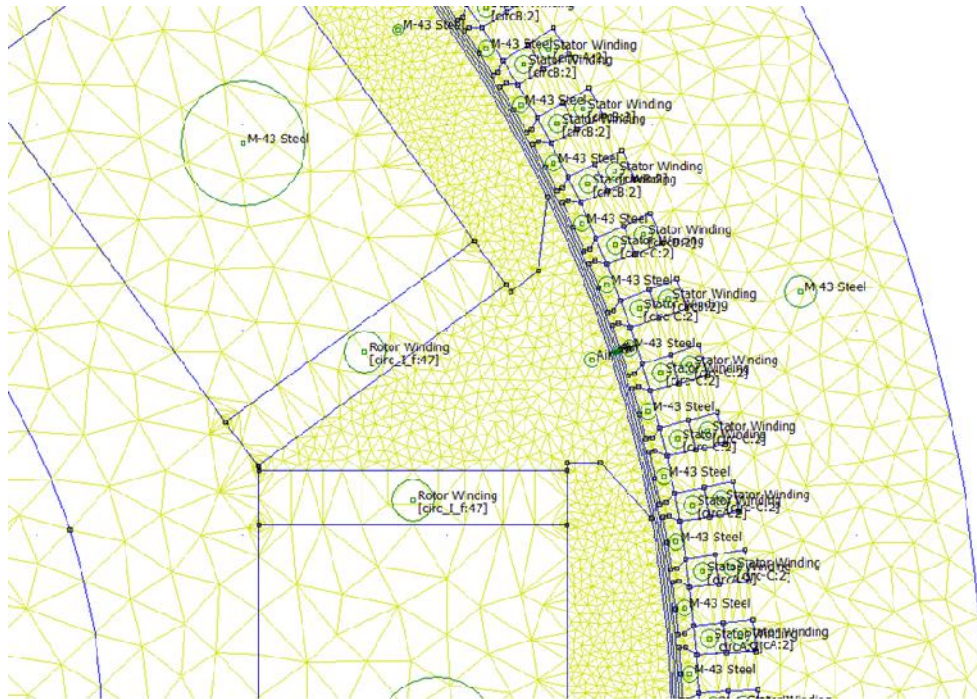
α/α	Τμήμα της γεννήτριας	Υλικό τμήματος	Ρύθμιση Πλέγματος	Τμήμα της γεννήτριας	Υλικό τμήματος	Ρύθμιση Πλέγματος	Τμήμα της γεννήτριας	Υλικό τμήματος	Ρύθμιση Πλέγματος
	Στάτης			Διάκενο			Δρομέας		
1	Λαμαρίνα	M-43	0,015	Πηνία δρομέα	Αέρας	0,006	Άξονας δρομέα	Χάλυβας	0,15
2	Λαμαρίνα χείλους οδόντωσης	M-43	0,007	2	Αέρας	0,009	Κάτω από το ζύγωμα	M-43	0,35
3	Τυλίγματα	Cu	0,008	3	Αέρας	0,009	Ζύγωμα	M-43	0,05
4							Σώμα πόλου	M-43	0,06
5							Πέδιλο πόλου	M-43	0,0045
6							Τυλίγματα		0,02
	Ευθύγραμμα τμήματα						Ευθύγραμμα τμήματα		
7	Χείλος οδόντωσης		0,003	4	Αέρας	0,009	Βάση πόλου		0,05
8	Σφήνα		0,005	5	Αέρας	0,009	Άνω τμήμα πόλου		0,07
9	Αύλακα		0,005				Σώμα πόλου		0,07
10	Κάτω μέρος άνω τμήμα οδόντωσης		0,005				Πέδιλο πόλου		0,20
11							Κορυφή πέδilu		0,20
12							Διάκενα αερισμού		10
	Τμήματα τόξων								
13	Βάση αύλακας		0,5	Πλευρά δρομέα		0,20	Άξονας		10
14	Κορυφή της οδόντωσης		0,15	Μέση		0,20	Ζύγωμα		5
15	Εξωτερική διάμετρος		1,5	Πλευρά στάτη		0,20	Διάκενα αερισμού		10
16							Διάμετρος		0,20



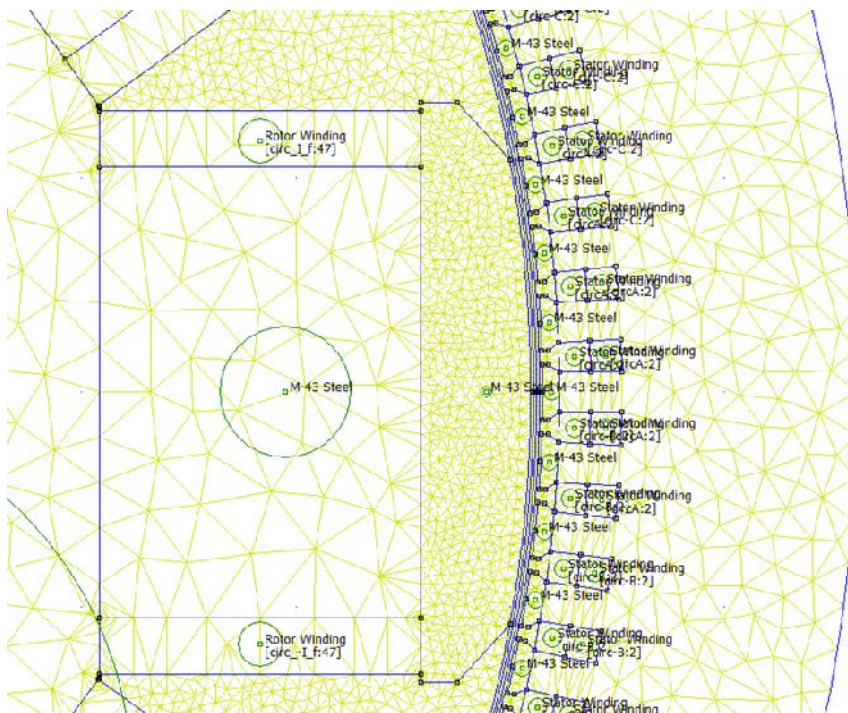
Σχήμα 7.6: Πλέγμα της γεννήτριας που αφορά τον άξονα, το ζύγωμα και τους πόλους του δρομέα, το διάκενο και τον στάτη (29058 κόμβοι, 57644 στοιχεία)



Σχήμα 7.7: Πλέγμα της γεννήτριας για την περιοχή των οδοντώσεων και του διακένου (29058 κόμβοι, 57644 στοιχεία)



Σχήμα 7.8: Πλέγμα της μηχανής για τμήμα του στάτη, του διακένου και των έκτυπων πόλων του δρομέα. (29058 κόμβοι, 57644 στοιχεία)



Σχήμα 7.9: Πλέγμα της μηχανής για τμήμα του στάτη, του διάκενου, των έκτυπων πόλων και του ζυγώματος του δρομέα ίσο με ένα πολικό βήμα. (29058 κόμβοι, 57644 στοιχεία)

Με τις ρυθμίσεις του πίνακα 7.1 έχει επιτευχθεί πλέγμα καλής ποιότητας που οδηγεί σε ακριβή επίλυση του πεδιακού προβλήματος, όπως θα δούμε παρακάτω η οποία πραγματοποιείται σε εύλογο χρονικό διάστημα μέσω ενός υπολογιστή.

7.6 Ρύθμιση της ακρίβειας της επίλυσης – Προσομείωση

Για τη ρύθμιση της ακρίβειας της επίλυσης του πεδιακού προβλήματος χρησιμοποιείται η ακόλουθη εντολή:

```
« mi_probdef(frequency, units, type, precision, (depth), (minangle), (acsolver)) »
```

όπου : frequency η παράμετρος της επιθυμητής συχνότητας προσομοίωσης σε Hz

units η παράμετρος που καθορίζει τις μονάδες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του μήκους στην περιοχή του προβλήματος

type η παράμετρος του τύπου του πεδιακού προβλήματος προς επίλυση

precision η παράμετρος που υπαγορεύει την ακρίβεια που απαιτείται από το λογισμικό για την προσομοίωση

(depth) η παράμετρος που αναπαριστά το βάθος του προβλήματος στην κατεύθυνση από τον παρατηρητή προς τη σελίδα, η οποία πρέπει να προσδιοριστεί για επίπεδα προβλήματα δύο διαστάσεων (2D)

(minangle) η παράμετρος που ορίζει τους περιορισμούς στη γεννήτρια δημιουργίας του πλέγματος

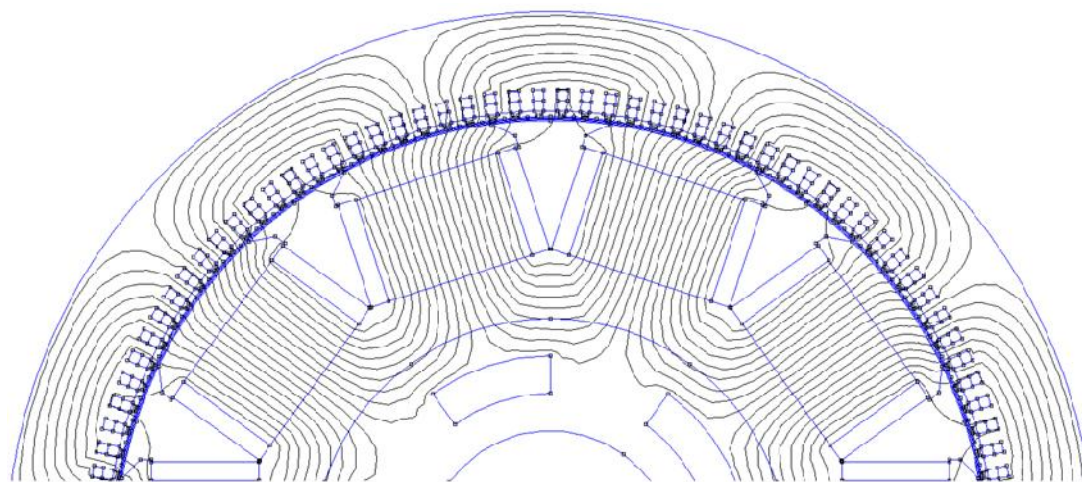
(acsolver) η παράμετρος που προσδιορίζει τον τύπο της επίλυσης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για προβλήματα AC

Το πεδιακό πρόβλημα που επιλύεται έχει συχνότητα προσομοίωσης $frequency = 0 \text{ Hz}$, οι μονάδες μέτρησης στην περιοχή του ρυθμίζονται σε μέτρα. Επειδή έχει επιλεγεί το πεδιακό πρόβλημα να επιλυθεί σε δύο διαστάσεις η παράμετρος του τύπου του πεδιακού προβλήματος ορίζεται σε planar. Η επιθυμητή ακρίβεια του λογισμικού ορίζεται σε 10^{-8} . Το βάθος του προβλήματος ορίζεται ίσο με το βάθος της μηχανής L , ενώ η παράμετρος που ορίζει τους περιορισμούς στη γεννήτρια δημιουργίας πλέγματος λαμβάνεται ίση με 10. Συνοπτικά η εντολή γράφεται:

```
« mi_probdef (0, 'meters', 'planar', 1E-8, L, 10) »
```

7.7 Λήψη – Επεξεργασία – Εκτίμηση των αποτελεσμάτων

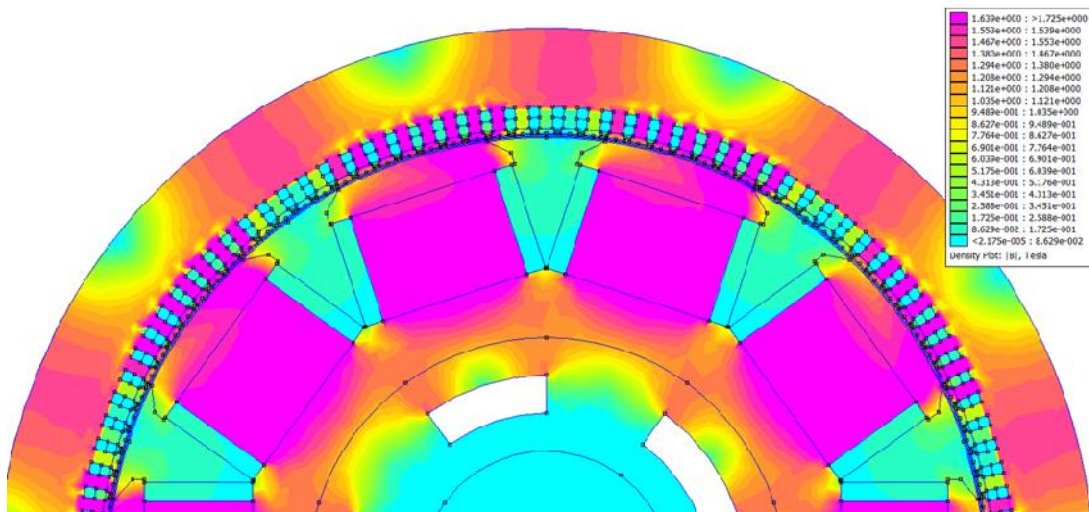
Μετά το πέρας της προσομοίωσης λαμβάνονται γραφικές αναπαραστάσεις υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας α) των πεδιακών μεγεθών, όπως η μαγνητική επαγωγή B , η ένταση του μαγνητικού πεδίου H , β) των ηλεκτρικών μεγεθών, όπως της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος j , γ) των μαγνητικών γραμμών, του ταυστή του μαγνητικού πεδίου και άλλες. Ενδεικτικά κάποιες από αυτές παρατίθενται στη συνέχεια και από αυτές εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν τη λειτουργία της γεννήτριας.



Σχήμα 7.10: Αναπαράσταση του μαγνητικών γραμμών του πεδίου της γεννήτριας.

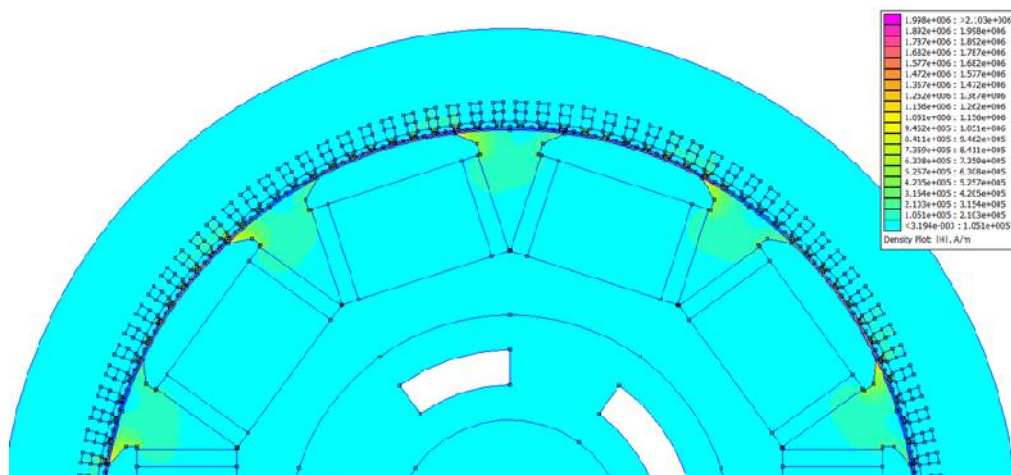
Στο σχήμα 7.10 εμφανίζονται οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου στον στάτη, στον δρομέα και στο διάκενο της μηχανής. Παρατηρείται ότι από τις μαγνητικές γραμμές του πεδίου ακολουθείται διαδρομή, η οποία εκκινεί από το πέδιλο του πόλου, έπειτα αυτές διέρχονται από το διάκενο και τις οδοντώσεις του στάτη. Στη συνέχεια εισέρχονται στο ζύγωμα του στάτη και από αυτό τον τομέα ακολουθώντας αντίστροφη διαδρομή επιστρέφουν στο διάκενο. Έπειτα, διέρχονται αρχικά από το πέδιλο και έπειτα από το κύριο σώμα του γειτονικού ως προς τον αρχικό πόλο. Η πορεία τους συνεχίζεται και αυτές εισέρχονται στο ζύγωμα του δρομέα, ενώ μετά από διαδρομή τους στο κύριο σώμα του πόλου από τον οποίο έχουν ξεκινήσει καταλήγουν στο πέδιλο. Επιπρόσθετα παρατηρείται ότι:

- Η διαδρομή που ακολουθούν οι μαγνητικές γραμμές, η οποία περιγράφεται παραπάνω, είναι η αναμενόμενη, επομένως έχουν πραγματοποιηθεί σωστά τόσο οι συνδεσμολογίες των πηνίων διέγερσης του δρομέα, όσο και εκείνες του τριφασικού τυλίγματος του στάτη.
- Από το ζύγωμα του δρομέα διέρχεται το σύνολο των μαγνητικών γραμμών, ενώ πέρα από την εξωτερική διάμετρο του στάτη δεν διέρχεται καμμία. Αυτό προκύπτει από την εφαρμογή της συνοριακής συνθήκης τύπου Dirichlet $A = 0$ πάνω στο σύνορο, το οποίο όπως έχει προαναφερθεί ορίζεται από την εξωτερική διάμετρο του στάτη.
- Στο δρομέα, τμήμα των μαγνητικών γραμμών διέρχεται στο τμήμα του πυρήνα που βρίσκεται κάτω από το ζύγωμα. Αυτό είναι αναμενόμενο επειδή σε αυτό το σημείο δεν προβλέπεται η τοποθέτηση συνοριακής συνθήκης
- Το πλήθος των μαγνητικών γραμμών είναι σημαντικό και αντιστοιχεί στην πυκνότητα που προκύπτει από τη σχεδίαση της γεννήτριας σύμφωνα με την προκαταρκτική της σχεδίαση.



Σχήμα 7.11: Αναπαράσταση της μαγνητικής επαγωγής B της γεννήτριας.

Στο σχήμα 7.11 παρατίθενται οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής B στα επιμέρους τμήματα του εναλλακτήρα. Συγκεκριμένα, τα τμήματα εκείνα στα οποία υφίστανται μεγάλες τιμές της μαγνητικής φόρτισης εμφανίζονται με σκούρα χρώματα (κόκκινο), ενώ στις περιοχές που η μαγνητική φόρτιση είναι χαμηλή τα χρώματα είναι ανοικτόχρωμα (γαλάζιο). Ιδιαίτερα υψηλή τιμή της μαγνητικής επαγωγής εμφανίζεται στον δρομέα στις περιοχές των πόλων (στο κύριο σώμα και στα πέδιλα) και στον στάτη (κυρίως στις οδοντώσεις και δευτερευόντως σε ορισμένα τμήματα του ζυγώματος). Αυτή αναπαριστάται με βαθύ κόκκινο ή πορτοκαλί – κόκκινο χρώμα. Η εικόνα είναι εντελώς διαφορετική για τον δρομέα στην περιοχή του άξονα και στο ήμισυ της περιοχής που βρίσκεται κάτω από το ζύγωμα όπου επικρατεί το γαλάζιο χρώμα ή ο συνδυασμός κίτρινου – γαλάζιου χρώματος. Παρεμφερείς τιμές μαγνητικής επαγωγής εμφανίζονται τα τυλίγματα του δρομέα, τον αέρα που παρεμβάλλεται ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους του δρομέα καθώς και ένα τμήμα το οποίο βρίσκεται στις εξωτερικές περιοχές του ζυγώματος του στάτη. Το εύρος διακύμανσης της μαγνητικής επαγωγής βρίσκεται εντός των ορίων $2,175 \times 10^{-5}$ έως $> 1,725 \text{ Wb/m}^2$.

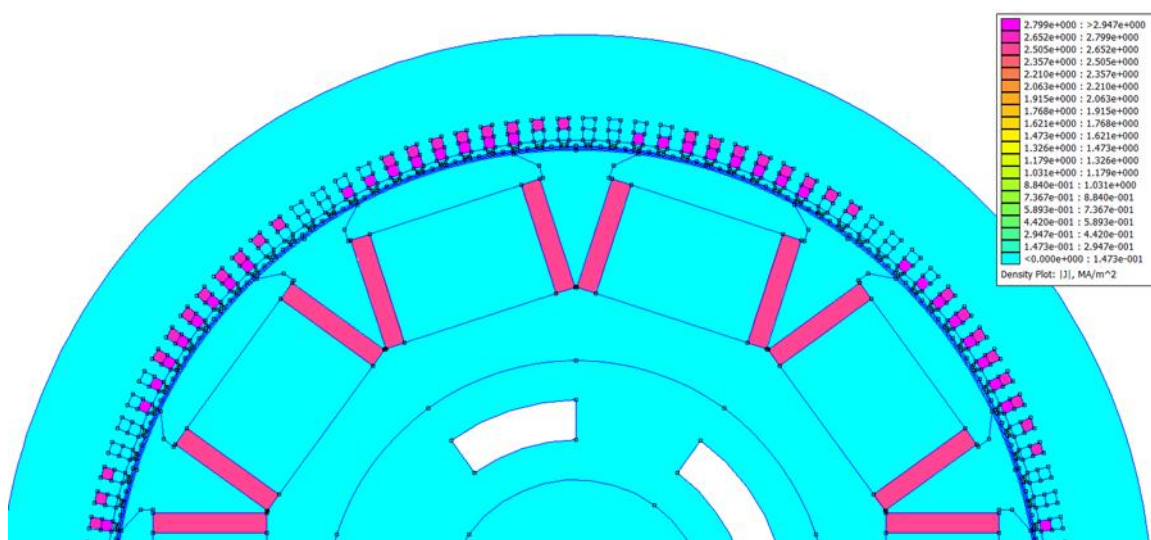


Σχήμα 7.12: Αναπαράσταση της έντασης του μαγνητικού πεδίου H της γεννήτριας.

Στο σχήμα 7.12 εμφανίζεται η αναπαράσταση της έντασης του μαγνητικού πεδίου H . Η γενική άποψη της εικόνας αντικατοπτρίζει τις χαμηλές τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου της γεννήτριας. Αυτό γίνεται αντιληπτό από το γαλάζιο χρώμα που επικρατεί στα επιμέρους τμήματα με εξαίρεση κάποια τμήματα του αέρα που παρεμβάλλεται ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους του δρομέα και το διάκενο. Εκεί επικρατεί χρώμα κίτρινο – γαλάζιο. Σύμφωνα με τη λεζάντα που παρατίθεται στο άνω δεξιό τμήμα του σχήματος Το γαλάζιο χρώμα που επικρατεί στον δρομέα και στον στάτη αντιστοιχεί σε τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου που βρίσκονται μέσα στο εύρος $3,194 \div 105000 \text{ A/m}$. Για το τμήμα του αέρα που υφίσταται ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους και για το χρώμα κίτρινο – γαλάζιο οι τιμές αυτές αυξάνονται και πλέον βρίσκονται εντός του εύρους $525700 \div 630800 \text{ A/m}$, ενώ για το διάκενο εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές που αντιστοιχούν σε κίτρινο χρώμα με τιμές εντός του εύρους $841110 \div 946200 \text{ A/m}$.

Πραγματοποιείται μια σύγκριση των τιμών της έντασης του μαγνητικού πεδίου H και της μαγνητικής επαγωγής B με εκείνες που προέκυψαν κατά τη φάση της προκαταρκτικής σχεδίασης και παρατίθενται στον πίνακα 4.2. Η σύγκριση επιβεβαιώνει τις τιμές των δύο σημαντικότερων μεγεθών του μαγνητικού πεδίου. Δηλαδή, οι τιμές αυτές είναι παραπλήσιες με εκείνες που παρατίθενται στον πίνακα 4.2. Επειδή από αυτά τα δύο μεγέθη υπολογίζεται η μεγάλη πλειοψηφία και των υπόλοιπων μεγεθών γίνεται αντιληπτό ότι η προκαταρκτική σχεδίαση επαληθεύεται.

Στο σχήμα 7.13 παρατίθενται οι τιμές της πυκνότητας του ρεύματος J στα επιμέρους τμήματα της γεννήτριας που προέκυψαν από την πεδιακή ανάλυση. Παρατηρείται ότι κυριαρχεί το γαλάζιο χρώμα που αντιστοιχεί στις περισσότερες περιοχές. Συγκεκριμένα, στα ζυγώματα του στάτη και του δρομέα, στο τμήμα που βρίσκεται κάτω από το ζύγωμα, στον άξονα, στο κύριο σώμα και στο πέδιλο του πόλου στο δρομέα επικρατεί το γαλάζιο χρώμα. Αντίθετα το κόκκινο χρώμα που αντιστοιχεί σε υψηλές τιμές ρευματικής πυκνότητας επικρατεί στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα.



Σχήμα 7.13: Αναπαράσταση της πυκνότητας του ρεύματος J της γεννήτριας.

Οι τιμές στα τυλίγματα εμφανίζονται μεγαλύτερες από $2,95 \text{ MA}/\text{m}^2$ και αυτές είναι αναμενόμενες μιας και στην προκαταρκτική σχεδίαση οι τιμές της ηλεκτρικής φόρτισης έχουν θεωρηθεί ίσες με $4,6 \text{ A}/\text{mm}^2$ για το στάτη και $4,41 \text{ A}/\text{mm}^2$ για το δρομέα. Κρίνεται σκόπιμο να σημειωθεί εδώ ότι η αντίστοιχη ηλεκτρική φόρτιση που προέκυψε από την πεδιακή ανάλυση είναι $> 2,95 \text{ A}/\text{mm}^2$.

7.8 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έχει πραγματοποιηθεί η επιβεβαίωση της προκαταρκτικής σχεδίασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Κατά τη διαδικασία αυτή η επιβεβαίωση πραγματοποιήθηκε αλλά εμφανίστηκαν ορισμένες αποκλίσεις στις τιμές ορισμένων μεγεθών. Ενδεικτικά, στη συνέχεια παρατίθενται μερικές από αυτές:

➤ Η τιμή της μαγνητικής επαγωγής

1. Στις οδοντώσεις του στάτη υπολογίζεται από $1,5$ έως $2,25 \text{ Wb}/\text{m}^2$ ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται $> 1,73 \text{ Wb}/\text{m}^2$.
2. Στο ζύγωμα του στάτη υπολογίζεται από $1,035$ έως $1,55 \text{ Wb}/\text{m}^2$ ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται από $1,07$ έως $1,61 \text{ Wb}/\text{m}^2$.
3. Στο κύριο σώμα του πόλου υπολογίζεται από $1,467$ έως $1,55 \text{ Wb}/\text{m}^2$ ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται από $1,1$ έως $1,76 \text{ Wb}/\text{m}^2$.
4. Στο ζύγωμα του δρομέα υπολογίζεται από $1,294$ έως $1,38 \text{ Wb}/\text{m}^2$ ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται από $1,07$ έως $1,61 \text{ Wb}/\text{m}^2$.

➤ Η τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου

1. Στις οδοντώσεις του στάτη υπολογίζεται από 781 έως $182000 \text{ At}/\text{m}$ ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται 930 έως $230000 \text{ At}/\text{m}$.
2. Στο ζύγωμα του στάτη υπολογίζεται από 145 έως $487 \text{ At}/\text{m}$ ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται από 200 έως $580 \text{ At}/\text{m}$.
3. Στο κύριο σώμα του πόλου υπολογίζεται από 150 έως $1914 \text{ At}/\text{m}$ ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται από 180 έως $2200 \text{ At}/\text{m}$.
4. Στο ζύγωμα του δρομέα υπολογίζεται από 135 έως $275 \text{ At}/\text{m}$ ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται από 180 έως $320 \text{ At}/\text{m}$.

➤ Η τιμή της πυκνότητας ρεύματος

1. Για την περιέλιξη του στάτη υπολογίζεται ίση με $4,6 \text{ A}/\text{mm}^2$, ενώ προσδιορίζεται μεγαλύτερη από $2,95 \text{ MA}/\text{m}^2 = 2,95 \text{ A}/\text{mm}^2$.
2. Για τα τυλίγματα των πόλων του δρομέα υπολογίζεται ίση με $4,4 \text{ A}/\text{mm}^2$, ενώ προσδιορίζεται μεγαλύτερη από $2,95 \text{ MA}/\text{m}^2 = 2,95 \text{ A}/\text{mm}^2$.

➤ Η τιμή της πραγματικής ισχύος εξόδου υπολογίζεται ίση με 1260 kW , ενώ προσδιορίζεται ίση με 1320 kW .

Βελτιστοποίηση της Σχεδίασης της Γεννήτριας με τη Μέθοδο της Ανάλυσης Ευαισθησίας και Χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

8.1 Εισαγωγή

Μετά την επιβεβαίωση των στοιχείων της μηχανής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία έχει πραγματοποιηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση της σχεδίασής της. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας της γεννήτριας. Για τον σκοπό αυτό θα υιοθετηθεί μια μέθοδος βελτιστοποίησης, η οποία βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα, για την υπό μελέτη σχεδίαση επιλέγεται η μέθοδος της ανάλυσης ευαισθησίας. Για να υλοποιηθεί αυτή η μέθοδος, ακολουθούνται τα βήματα του αλγόριθμου που παρατίθεται παρακάτω:

➤ Επιλέγονται οι παράμετροι εξόδου της διαδικασίας βελτιστοποίησης ως προς τους οποίους η σχεδίαση της γεννήτριας πρέπει να βελτιστοποιηθεί. Οι παράμετροι που επιλέγονται ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα:

1. Τη μείωση του κατασκευαστικού κόστους

Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με την ελαχιστοποίηση του όγκου και του βάρους των υλικών κατασκευής.

2. Με την υιοθέτηση κατάλληλων υλικών, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος κατασκευής της. Επιπρόσθετα, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των ημερομισθίων που απαιτούνται, προκειμένου να κατασκευαστεί η μηχανή.

3. Τη μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης, επομένως την ελαχιστοποίηση των απωλειών.

4. Την ελαχιστοποίηση των παραμέτρων που αφορούν την ποιότητα της παραγόμενης ισχύος από τη γεννήτρια. Σε αυτήν την περίπτωση επιδιώκονται η καταστολή των αρμονικών περιττής τάξης και η ελαχιστοποίηση του ολικού συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης (THD %).

5. Τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος

6. Τη μεγιστοποίηση της πυκνότητας ισχύος

➤ Επιλέγονται οι παράμετροι εισόδου της βελτιστοποίησης που έχουν την μεγαλύτερη επίδραση για την επίτευξη των προαναφερθέντων αποτελεσμάτων – στόχων στις εξόδους. Οι παράμετροι της σχεδίασης ανήκουν σε δύο βασικές κατηγορίες: α) παράμετροι της γεωμετρίας της γεννήτριας και β) παράμετροι της ηλεκτρικής φόρτισης της.

- Λαμβάνονται οι τιμές των παραμέτρων που υπολογίζονται στην προκαταρκτική σχεδίαση και έχουν επιβεβαιωθεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επιπρόσθετα, ορίζονται οι τιμές σημαντικών παραμέτρων οι οποίες βασίζονται σε αυτές.
- Επιλέγεται το εύρος τιμών μεταβολής των εισόδων με τέτοιο τρόπο έτσι, ώστε σε αυτό να περιλαμβάνεται η τιμή που έχει υπολογιστεί από την προκαταρκτική σχεδίαση.
- Ανάλογα με την περίπτωση κάθε φορά μια ή εάν κριθεί απαραίτητο δύο παράμετροι εισόδου μεταβάλλονται σε όλο το εύρος τιμών που τους έχουν αποδοθεί.
- Για τις τιμές εκείνες που έχει επιτευχθεί το κατάλληλο αποτέλεσμα η διαδικασία επαναλαμβάνεται διατηρώντας σταθερή την καλύτερη τιμή της μεταβλητής που έχει διερευνηθεί αρχικά.
- Μέσω αυτής της διαδικασίας προκύπτουν συνολικά οι τιμές των παραμέτρων εισόδων για τις οποίες επιτυγχάνεται το βέλτιστο αποτέλεσμα για τις τιμές των παραμέτρων εξόδου.

Η επιλογή των παραμέτρων εισόδου της βελτιστοποίησης οι τιμές που λαμβάνονται από αυτές και το εύρος τιμών τους παρατίθενται στον πίνακα 8.1.

Η παράμετρος *Slot opening Q_p ratio* αποτελεί παράμετρο που δεν υπολογίζεται στην προκαταρκτική σχεδίαση. Αυτή ρυθμίζει το άνοιγμα της αύλακας του στάτη, το οποίο προκύπτει από τη γωνία που αντιστοιχεί σε μια αύλακα και μια οδόντωση μέσω της σχέσης (8.1). Η τιμή της γωνίας που αντιστοιχεί σε μια αύλακα και μια οδόντωση υπολογίζεται από τη σχέση (4.76) και προκύπτει ίση με $Q_p = \theta_{1 \text{ slot } 1 \text{ tooth}} = 3^\circ$, ενώ το άνοιγμα της αύλακας πλέον έχει παραμετροποιηθεί και η τιμή του υπολογίζεται σε μοίρες.

$$\theta_{\text{slot opening}} = \text{Slot opening } Q_p \text{ ratio} \cdot Q_p \quad (8.1)$$

Η δεύτερη παράμετρος που δεν υπολογίζεται στην προκαταρκτική σχεδίαση ρυθμίζει τη μορφή του πέδιλου του πόλου μεταβάλλοντας την απόσταση ανάμεσα στους κόμβους 14 και 15 της σχεδίασης. Αυτοί οι κόμβοι τοποθετούνται στην κορυφή του πέδιλου. Στην πράξη είναι ένας συντελεστής (*aux coeff 14 15 rotor*) και αποτελεί βοηθητική παράμετρο της σχεδίασης. Η σημασία του όμως είναι ιδιαίτερα σημαντική στη διαμόρφωση των παραμέτρων εξόδου, όπως θα διαπιστωθεί στη συνέχεια.

Ο προσδιορισμός του εύρους των παραμέτρων της βελτιστοποίησης εκτός από τα όρια διακύμανσης των τιμών του εμπεριέχει και το βήμα της μεταβολής τους. Η επιλογή του βήματος είναι σημαντική, διότι πρέπει να λάβει τιμή τέτοια, ώστε οι μεταβολές των παραμέτρων εξόδου να είναι παρατηρήσιμες.

Στον πίνακα 8.1 παρατίθενται οι εννέα παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Παρατηρείται ότι έξι από αυτές υπολογίζονται στην προκαταρκτική σχεδίαση, ενώ τρεις προκύπτουν από άλλες παραμέτρους.

Όλες οι παράμετροι εισόδων που παρατίθενται στον πίνακα 8.1 είτε έχουν ήδη αναφερθεί στο 4^ο κεφάλαιο της προκαταρκτικής σχεδίασης ή αναφέρονται στην παρούσα παράγραφο.

Πίνακας 8.1

Παράμετροι εισόδου της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

α/α	Παράμετρος Εισόδου	Τιμή προκαταρκτικής σχεδίασης	Εύρος μεταβολής παραμέτρου
1	L	0,547 m	0,48 : 0,02 : 0,60 m
2	$D_{internal\ stator}$	1,245 m	1,17 : 0,03: 1,35 m
3	$h_{slot\ stator}$	0,054 m	0,048 : 0.02: 0.056 m
4	$d_{stators\ yoke}$	0,111 m	0,09 : 0,01: 0,15 m
5	$K_f = (Pole\ Arc/Pole\ pitch)$	0,70	0,68 : 0,01: 0,72
6	$h_{pole\ shoe}$	0,030 m	0,028 : 0.001: 0,032 m
7	$I_{rotors\ field\ revised}$	187,79 A	168 : 5: 213 A
8	Slot opening Q_p ratio	-	0,16 : 0,02: 0,30
9	aux coeff 14 15 rotor	-	0,60 : 0,05: 0,90

Πίνακας 8.2

Παράμετροι εξόδου της διαδικασίας βελτιστοποίησης

α/α	Παράμετρος Εξόδου	Ονομασία	Παράμετρος Εξόδου	Ονομασία
1	$Emf_{Phase\ a}$	HEΔ φάσης A	First harmonic pu	1 ^η Αρμονική p.u.
2	$Emf_{Phase\ b}$	HEΔ φάσης B	Third harmonic pu	3 ^η Αρμονική p.u.
3	$Emf_{Phase\ c}$	HEΔ φάσης C	Fifth harmonic pu	5 ^η Αρμονική p.u.
4	Emf_{rms}	Ενεργός HEΔ	Seventh harmonic pu	7 ^η Αρμονική p.u.
5	Emf_{THD}	THD της HEΔ	Ninth harmonic pu	9 ^η Αρμονική p.u.

Πίνακας 8.3

Παράμετροι εξόδου της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

α/α	Παράμετρος Εξόδου	Ονομασία	Παράμετρος Εξόδου	Ονομασία
1	$V_{stators\ rotors\ copper\ winding}$	Συνολικός όγκος χαλκού	$T_{max\ middle}$	Μαχ Ροπή μέσο διάκενου
2	$V_{machines\ Fe}$	Συνολικός Όγκος Σιδήρου	$T_{max\ over\ middle}$	Μαχ Ροπή πλευρά στάτη
3	$Stator\ Rotor\ wind\ weight$	Συνολικό Βάρος Χαλκού	$P_{nom\ torque\ below\ middle}$	Ισχύος Ονομ Ροπής πλευρά δρομέα
4	$Machines\ weight\ Fe$	Συνολικό Βάρος Σιδήρου	$P_{nom\ torque\ middle}$	Ισχύος Ονομ Ροπής διάκενο στο μέσο
5	$Machines\ weight\ Fe\ Cu$	Συνολικό Βάρος Fe - Cu	$P_{nom\ torque\ over\ middle}$	Ισχύος Ονομ Ροπής πλευρά στάτη
6	$T_{below\ middle}$	Ροπή διάκενου πλευρά δρομέα	$Power\ density_{T_{nom\ below\ middle}}$	Πυκνότητα Ισχύος Ονομ Ροπής πλευρά δρομέα
7	T_{middle}	Ροπή διάκενου στο μέσο	$Power\ density_{T_{nom\ middle}}$	Πυκνότητα Ισχύος Ονομ Ροπής διάκενο στο μέσο
8	$T_{over\ middle}$	Ροπή διάκενου πλευρά στάτη	$Power\ density_{T_{nom\ over\ middle}}$	Πυκνότητα Ισχύος Ονομ Ροπής πλευρά στάτη
9	$T_{nom\ below\ middle}$	Ονομ Ροπή πλευρά δρομέα	$Power\ density_{T_{max\ below\ middle}}$	Πυκνότητα Ισχύος μαχ Ροπής πλευρά δρομέα
10	$T_{nom\ middle}$	Ονομ Ροπή διάκενου στο μέσο	$Power\ density_{T_{max\ middle}}$	Πυκνότητα Ισχύος μαχ Ροπής διάκενο στο μέσο
11	$T_{nom\ over\ middle}$	Ονομ Ροπή πλευρά στάτη	$Power\ density_{T_{max\ over\ middle}}$	Πυκνότητα Ισχύος μαχ Ροπής πλευρά στάτη
12	$T_{max\ below\ middle}$	Μαχ Ροπή πλευρά δρομέα	$L_{stator\ core\ cutting}$	Μήκος κοπής λαμαρίνας στάτη

Πίνακας 8.4

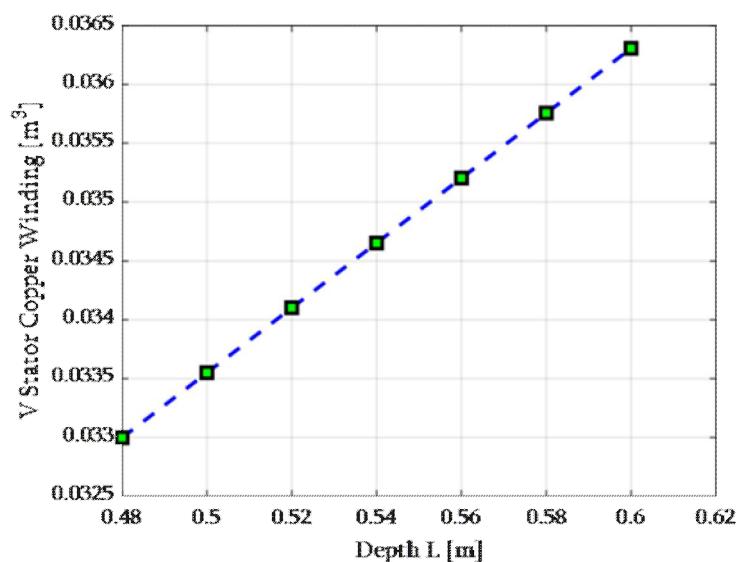
Παράμετροι εξόδου της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

α/α	Παράμετρος Εξόδου	Ονομασία	Παράμετρος Εξόδου	Ονομασία
13	$L_{rotor\ core\ cutting}$	Μήκος κοπής πυρήνα δρομέα	$T_{ripple\ middle}$	Κυμάτωση Ροπή μέσο διάκενου
14	$L_{machines\ core\ cutting}$	Μήκος κοπής πυρήνα μηχανής	$T_{ripple\ over\ middle}$	Κυμάτωση Ροπή πλευρά στάτη
15	$R_{155\ C\ per\ stators\ phase}$	Αντίσταση ανά φάση στάτη	$P_{stator\ Cu\ 155\ C}$	Απώλειες Χαλκού στάτη
16	L_d	Αυτεπαγωγή Ευθέως άξονα	$P_{machines\ Cu\ 155\ C}$	Απώλειες Χαλκού Μηχανής
17	L_q	Αυτεπαγωγή Εγκάρσιου άξονα	$P_{stator\ Fe}$	Απώλειες πυρήνα στάτη
18	X_d	Επαγ Αντίδραση Ευθέως άξονα	$P_{rotor\ Fe}$	Απώλειες πυρήνα δρομέα
19	X_q	Επαγ Αντίδραση Εγκάρσιου άξονα	$P_{machines\ Fe}$	Απώλειες πυρήνα μηχανής
20	$B_{ave\ below\ middle}$	Μαγν Επαγωγή πλευρά στάτη	$P_{friction\ windage\ loss}$	Απώλειες τριβών - ανεμισμού
21	$B_{ave\ middle}$	Μαγν Επαγωγή μέσο διάκενου	$P_{machines\ total\ loss}$	Απώλειες μηχανής
22	$B_{ave\ over\ middle}$	Μαγν Επαγωγή πλευρά δρομέα	$\eta_{efficiency}$	Βαθμός απόδοσης
23	$T_{ripple\ below\ middle}$	Κυμάτωση Ροπή πλευρά δρομέα		

Στην επόμενη ενότητα ενδεικτικά παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις και οι κυματομορφές που προέκυψαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης ως προς την παράμετρο του μήκους της γεννήτριας L . Ακολουθώντας τον αλγόριθμο της ανάλυσης ευαισθησίας που έχει περιγραφεί προκύπτουν τα αποτελέσματα και για τις υπόλοιπες παραμέτρους.

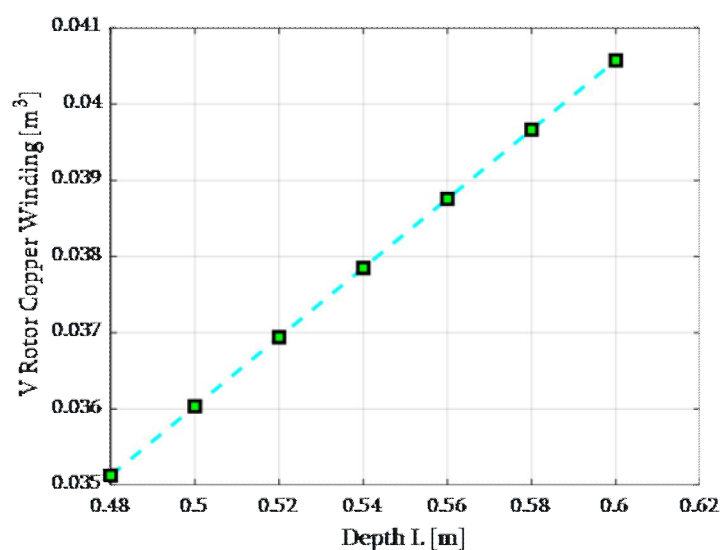
8.2 Βελτιστοποίηση της σχεδίασης ως προς το μήκος της γεννήτριας L

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης της σχεδίασης με τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας εκκινείται από τη διερεύνηση της μεταβολής της μεταβλητής του μήκους της γεννήτριας L και τις επιπτώσεις που αυτή επιφέρει στις παραμέτρους των εξόδων της διαδικασίας βελτιστοποίησης.



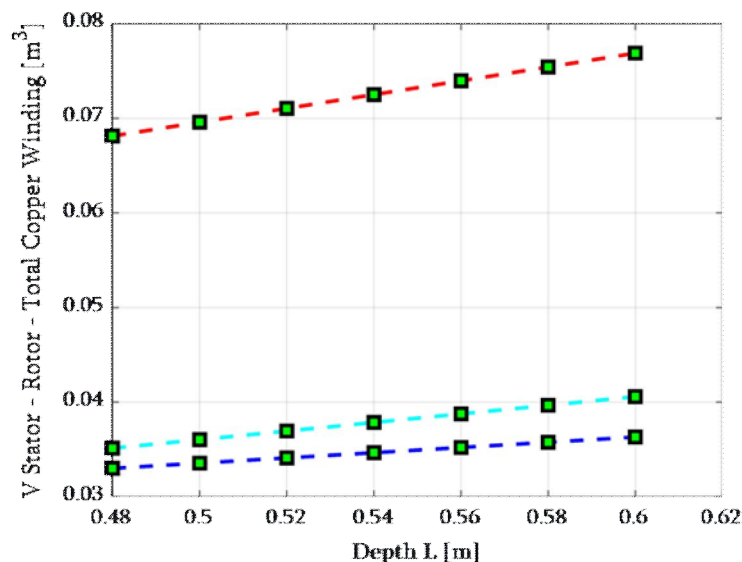
Σχήμα 8.1: Μεταβολή του όγκου του χαλκού του στάτη ως προς την παράμετρο του μήκους της σύγχρονης γεννήτριας

Αρχικά, εξετάζεται η μεταβολή της παράμετρου του όγκου του χαλκού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα.



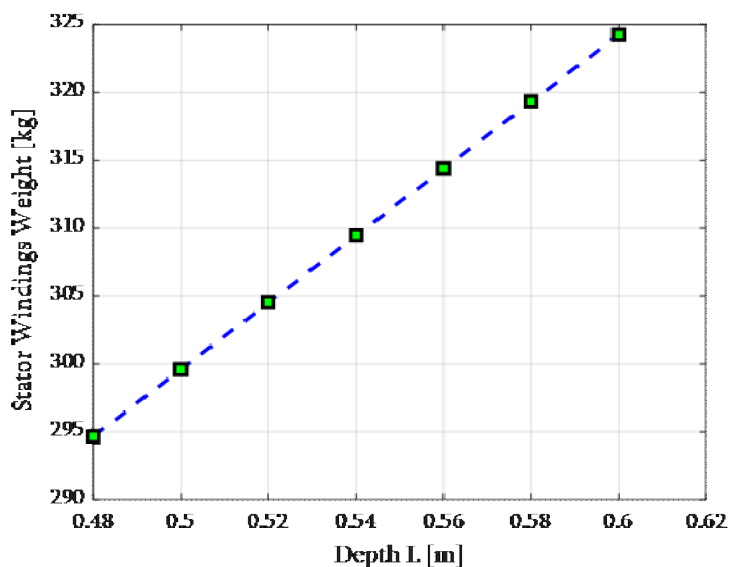
Σχήμα 8.2: Μεταβολή του όγκου του χαλκού του δρομέα ως προς την παράμετρο του μήκους της σύγχρονης γεννήτριας

Αυτή παρατίθεται στα σχήματα 8.1 και 8.2 αντίστοιχα, ενώ τόσο οι μεταβολές τους όσο και η συνολική μεταβολή του όγκου του χαλκού του εναλλακτήρα παρατίθενται στο σχήμα 8.3. Παρατηρείται ότι ο όγκος του χαλκού αυξάνεται σε συνάρτηση με το μήκος της μηχανής και ότι αυτή η μεταβολή κυμαίνεται από 10 % έως 15 %.



Σχήμα 8.3: Μεταβολή του όγκου του χαλκού στο στάτη, στο δρομέα και συνολικά ως προς την παράμετρο του μήκους της σύγχρονης γεννήτριας

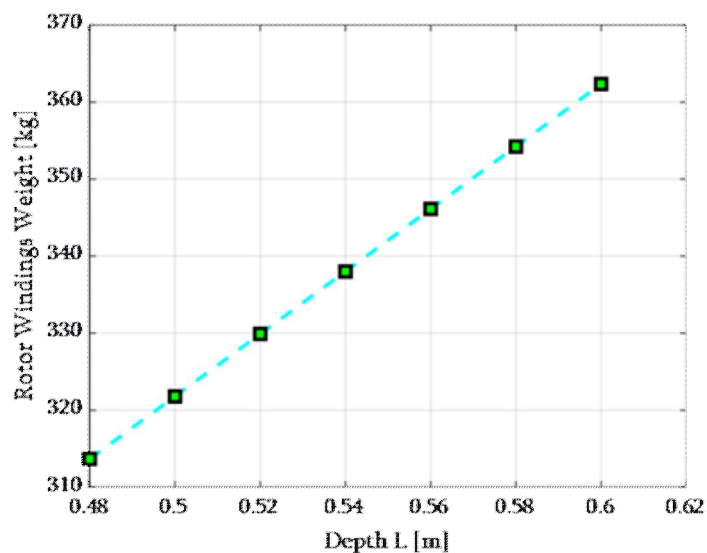
Η διερεύνηση συνεχίζεται με την εξέταση της μεταβολής του βάρους των επιμέρους τυλιγμάτων του εναλλακτήρα καθώς και του συνολικού βάρους του χαλκού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους.



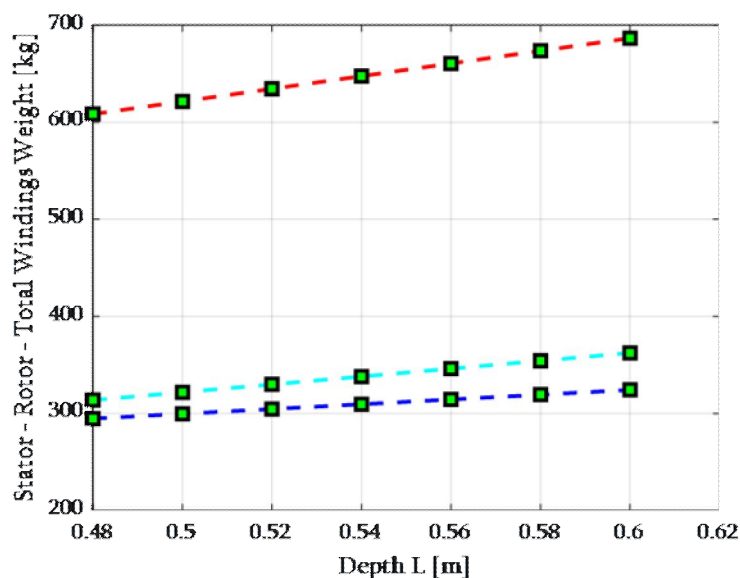
Σχήμα 8.4: Μεταβολή του βάρους των τυλιγμάτων του στάτη του εναλλακτήρα ως προς την παράμετρο του μήκους του

Αυτή παρατίθεται στα σχήματα 8.4 και 8.5 αντίστοιχα για τα τμήματα του στάτη και του ρότορα, ενώ τόσο οι μεταβολές τους όσο και η συνολική μεταβολή του βάρους του χαλκού της μηχανής παρατίθενται στο σχήμα 8.6.

Παρατηρείται ότι η μεταβολή του βάρους του χαλκού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των τυλιγμάτων της μηχανής είναι ανάλογη με εκείνη της μεταβολής του όγκου του η οποία είναι αναμενόμενη.

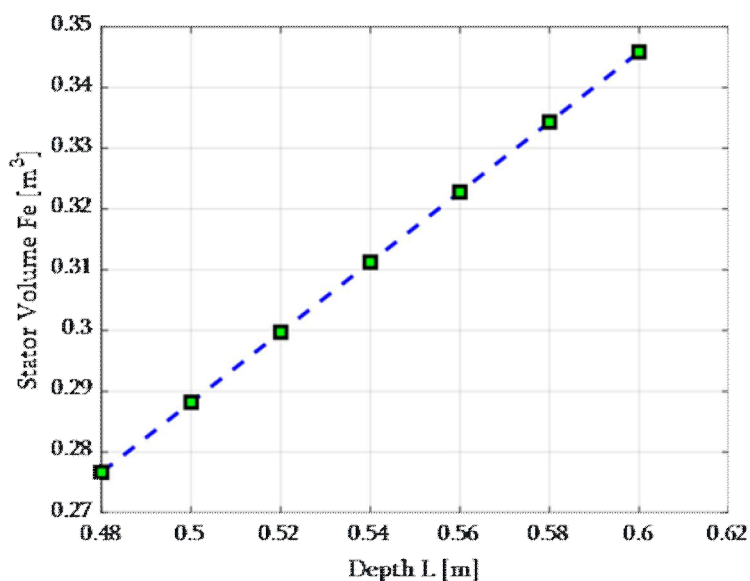


Σχήμα 8.5: Μεταβολή του βάρους των τυλιγμάτων του δρομέα του εναλλακτήρα ως προς την παράμετρο του μήκους του

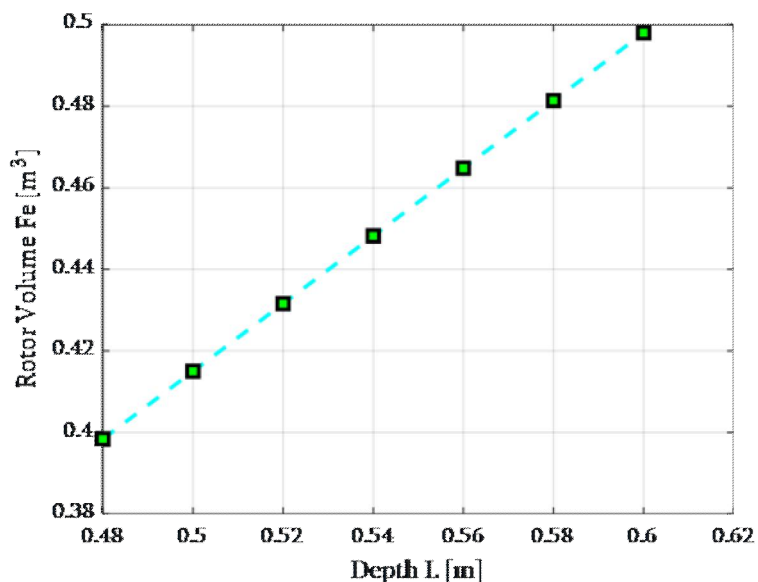


Σχήμα 8.6: Μεταβολή του βάρους του χαλκού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των τυλιγμάτων του εναλλακτήρα ως προς την παράμετρο του μήκους του

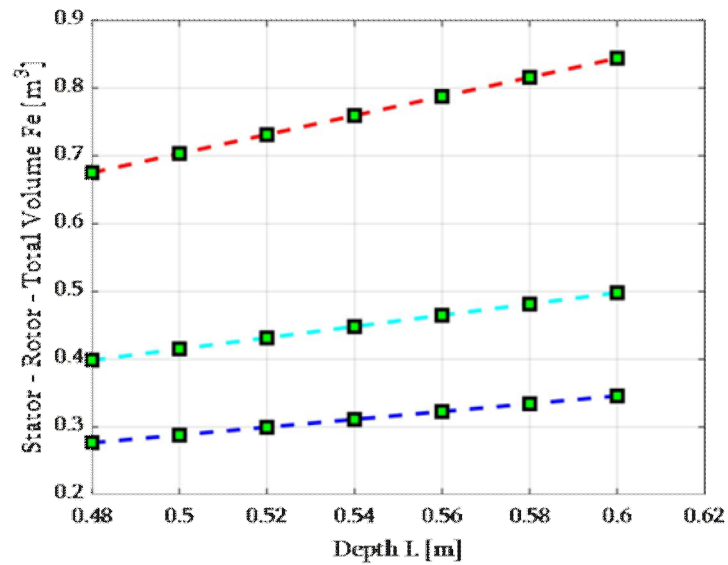
Η επόμενη παράμετρος εξόδου που εξετάζεται είναι εκείνη που αφορά τον όγκο του πυρήνα του στάτη. Αυτή συνδέεται με την παράμετρο του όγκο του χαλκού και επηρεάζει άμεσα τον όγκο και το κόστος των υλικών κατασκευής της μηχανής.



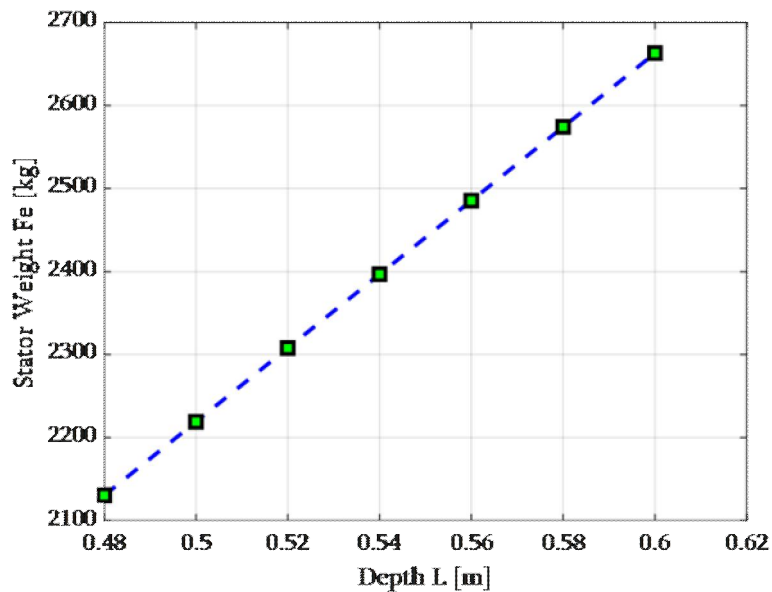
Σχήμα 8.7: Μεταβολή του όγκου του πυρήνα του στάτη του μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



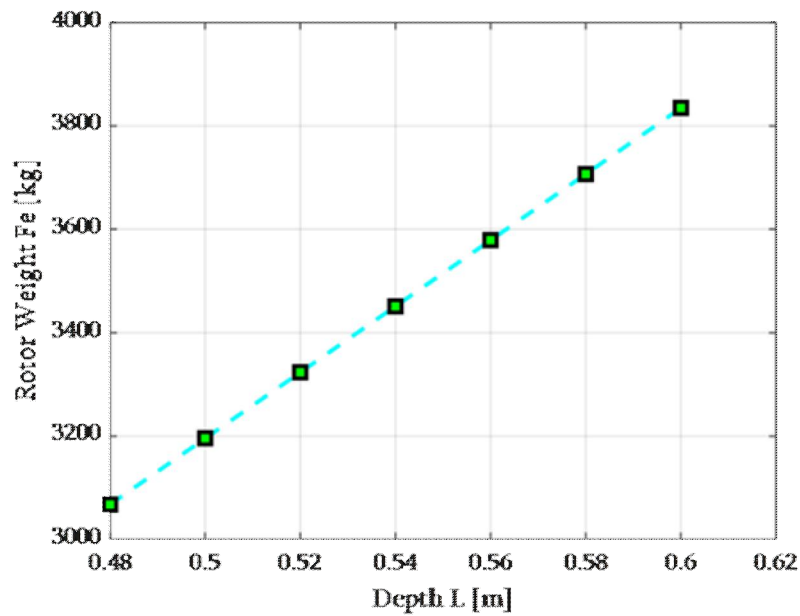
Σχήμα 8.8: Μεταβολή του όγκου του πυρήνα του δρομέα της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



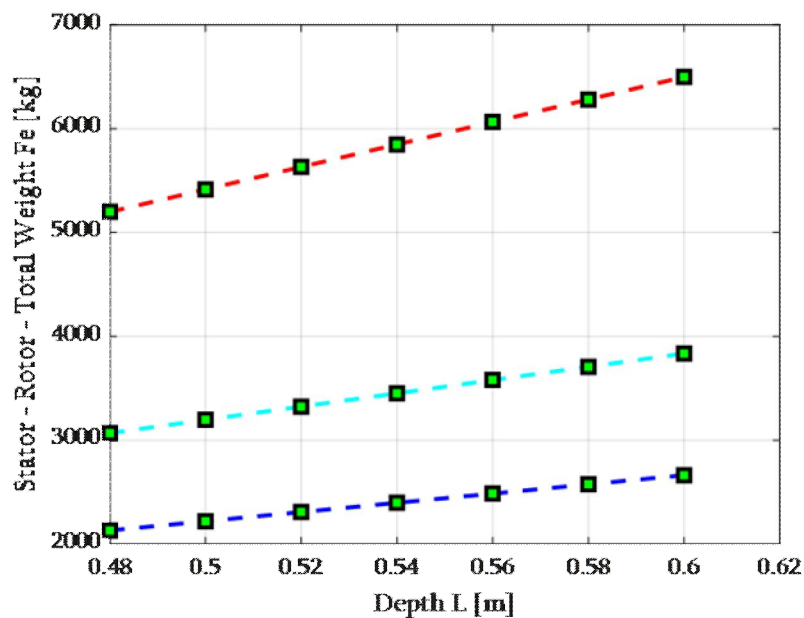
Σχήμα 8.9: Μεταβολή του όγκου του πυρήνα στο στάτη, στο δρομέα και συνολικά ως προς την παράμετρο του μήκους της σύγχρονης γεννήτριας



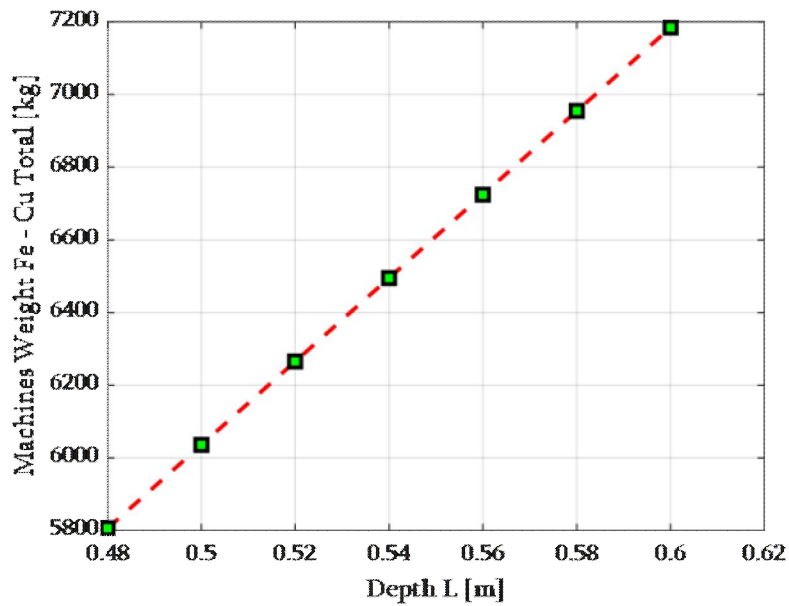
Σχήμα 8.10: Μεταβολή του βάρους του πυρήνα του στάτη της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



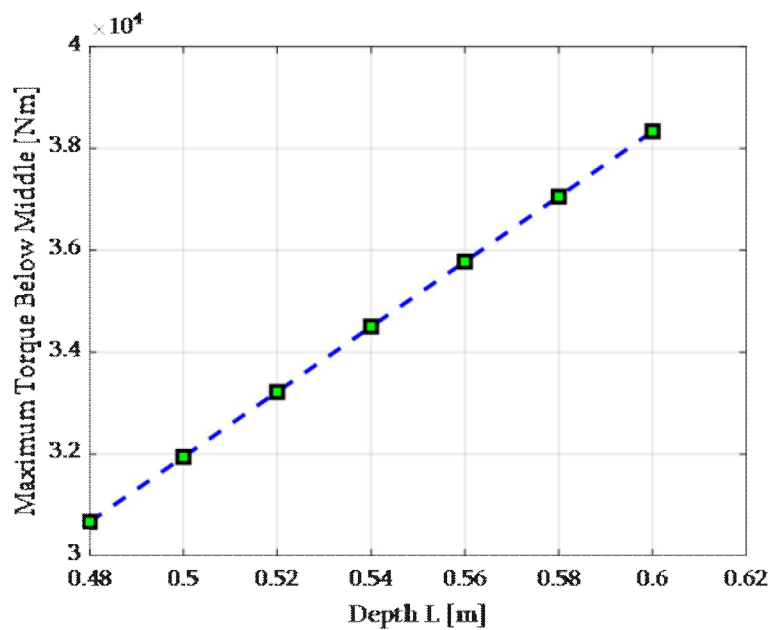
Σχήμα 8.11: Μεταβολή του βάρους του πυρήνα του δρομέα της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους του



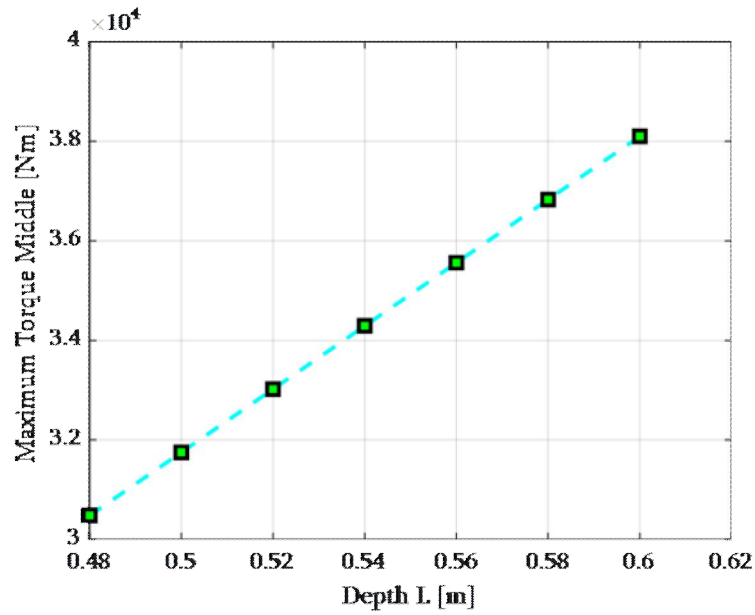
Σχήμα 8.12: Μεταβολή του βάρους του πυρήνα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



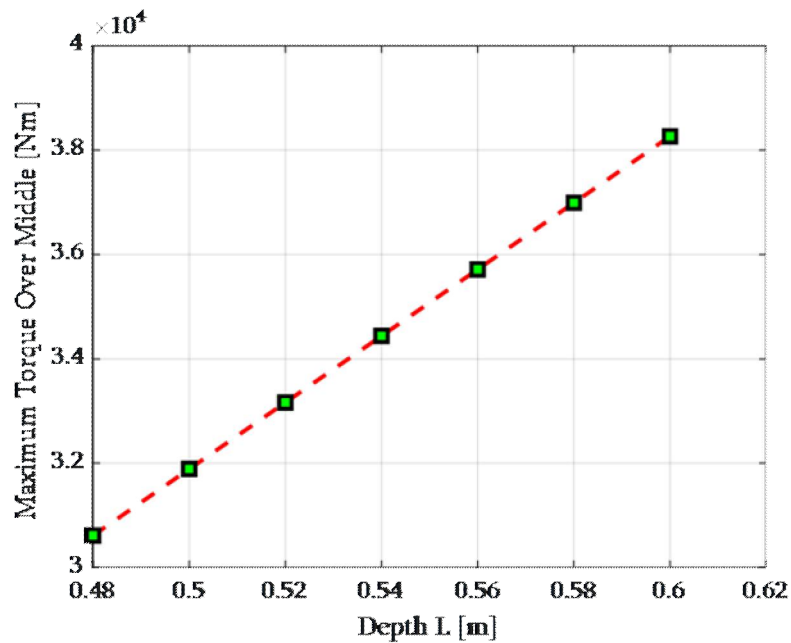
Σχήμα 8.13: Μεταβολή του συνολικού βάρους της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



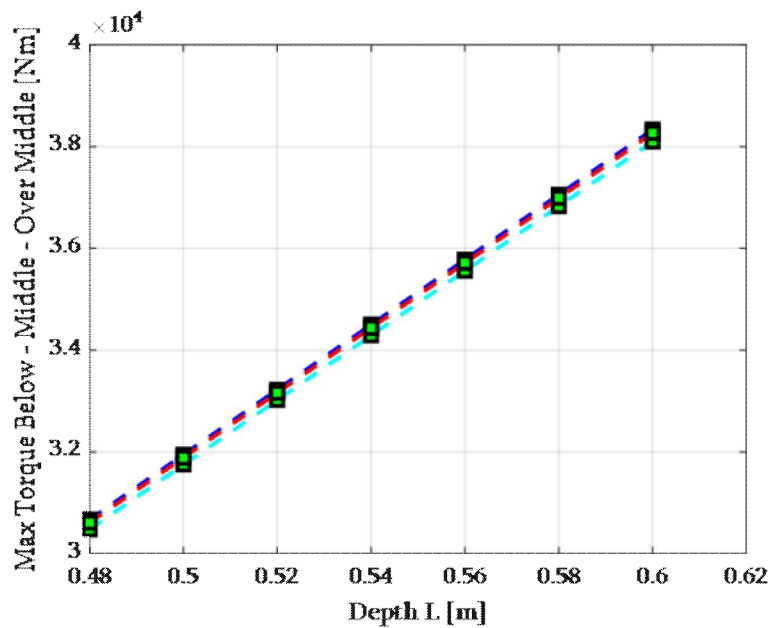
Σχήμα 8.14: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της αναπτυσσόμενης ροπής στο διάκενο της μηχανής πλευρά του δρομέα ως προς την παράμετρο του μήκους της



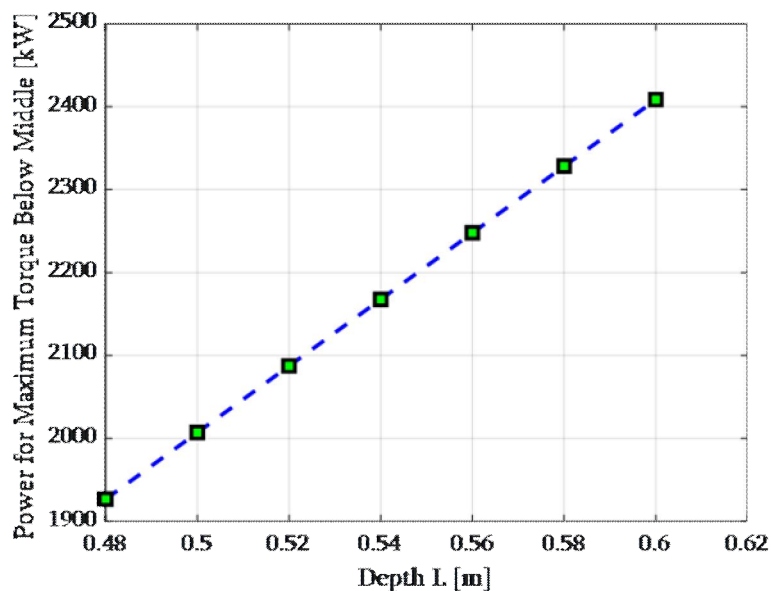
Σχήμα 8.15: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της αναπτυσσόμενης ροπής στη μέση του διακένου της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



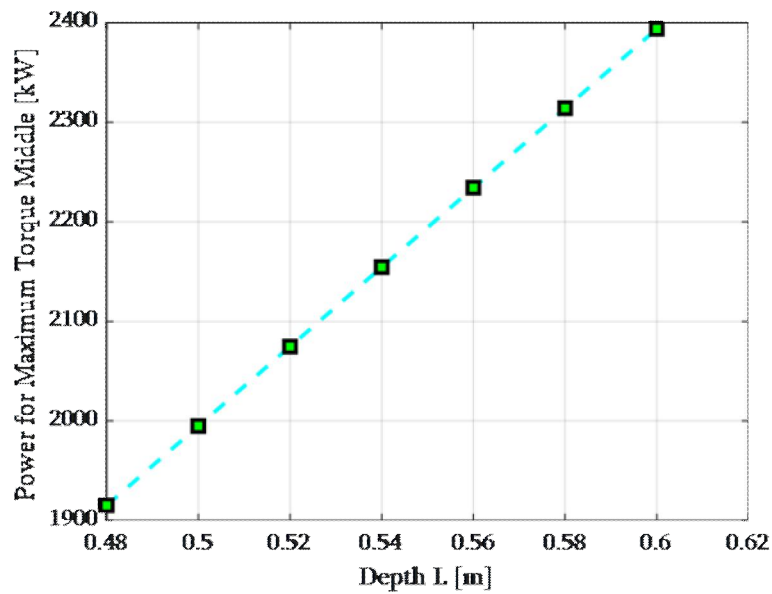
Σχήμα 8.16: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της αναπτυσσόμενης ροπής στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του στάτη ως προς την παράμετρο του μήκους της



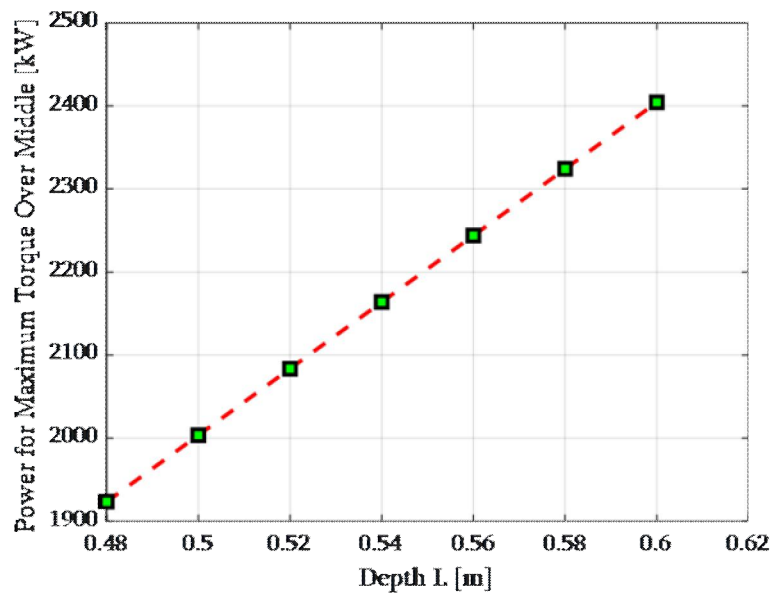
Σχήμα 8.17: Μεταβολή της μέγιστης τιμής της αναπτυσσόμενης ροπής στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του δρομέα, του στάτη και στο μέσο του ως προς τη παράμετρο του μήκους της



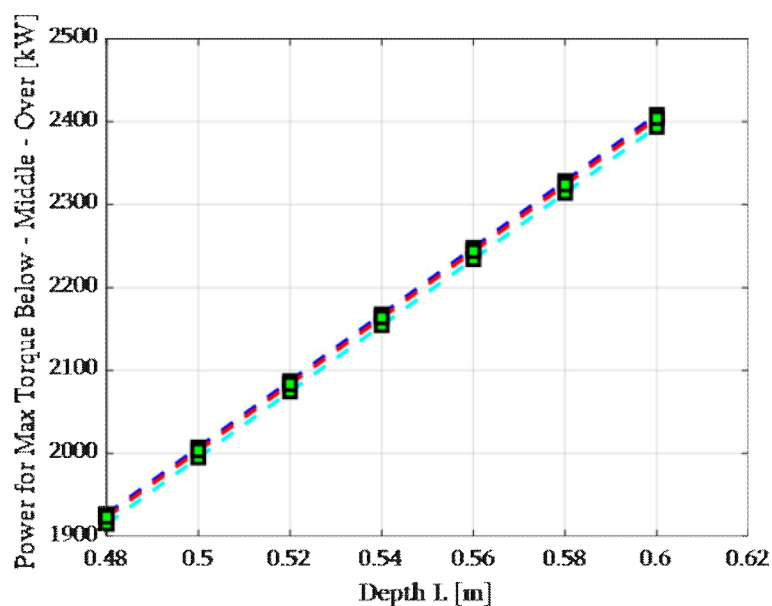
Σχήμα 8.18: Μεταβολή της μέγιστης ισχύος στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του δρομέα ως προς τη παράμετρο του μήκους της



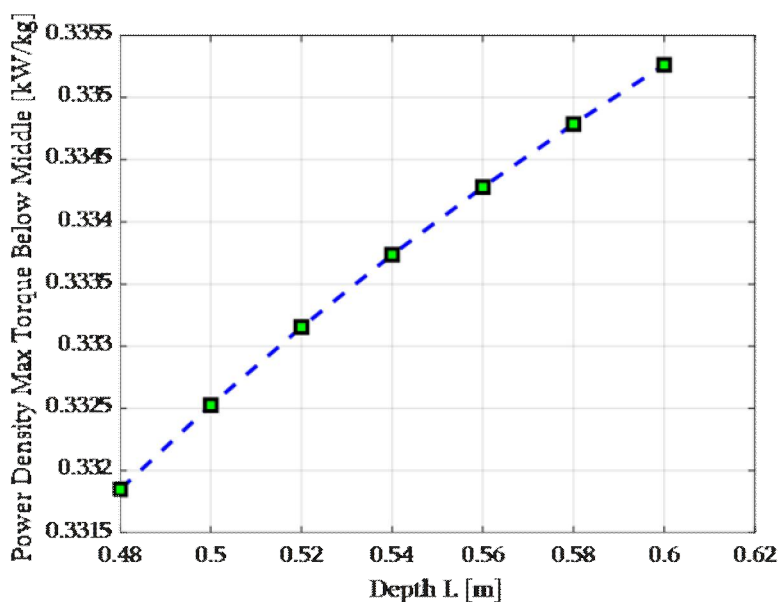
Σχήμα 8.19: Μεταβολή της μέγιστης ισχύος στη μέση του διάκενου της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



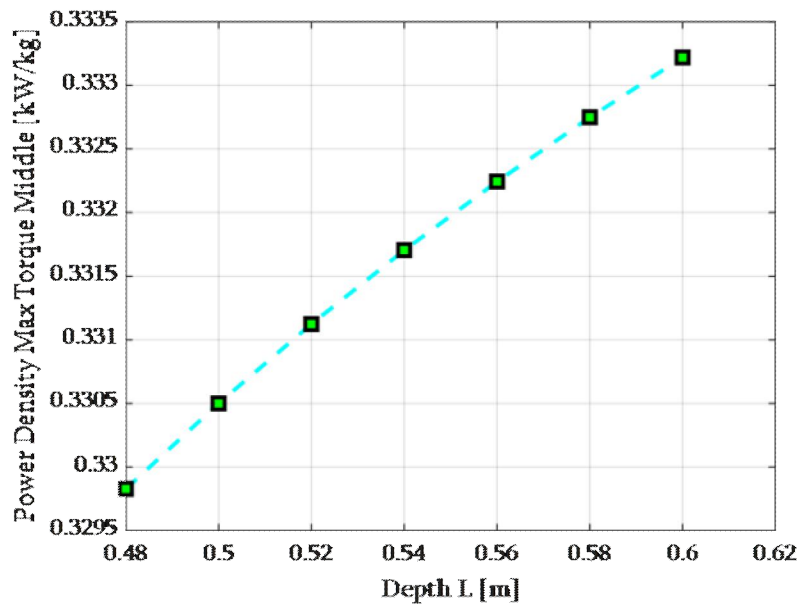
Σχήμα 8.20: Μεταβολή της μέγιστης ισχύος στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του στάτη ως προς την παράμετρο του μήκους της



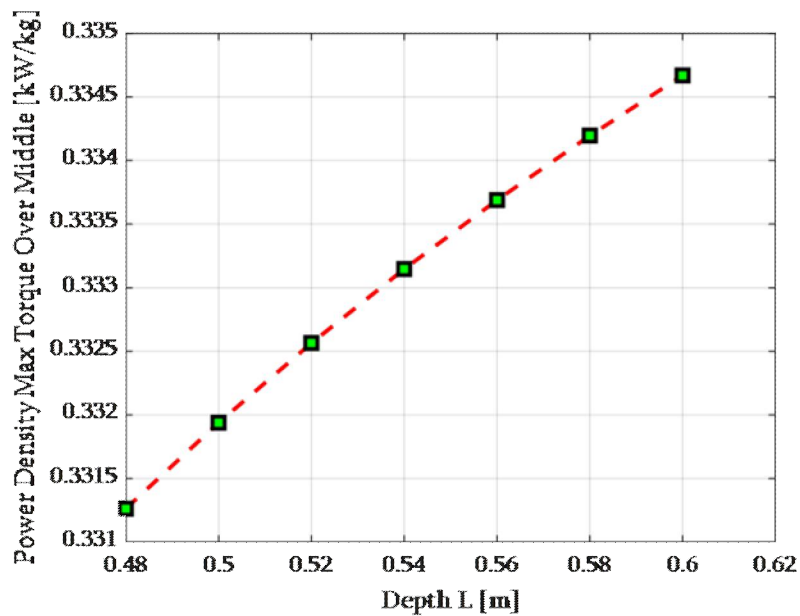
Σχήμα 8.21: Μεταβολή της μέγιστης ισχύος στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του δρομέα, του στάτη και στο μέσο του ως προς τη παράμετρο του μήκους της



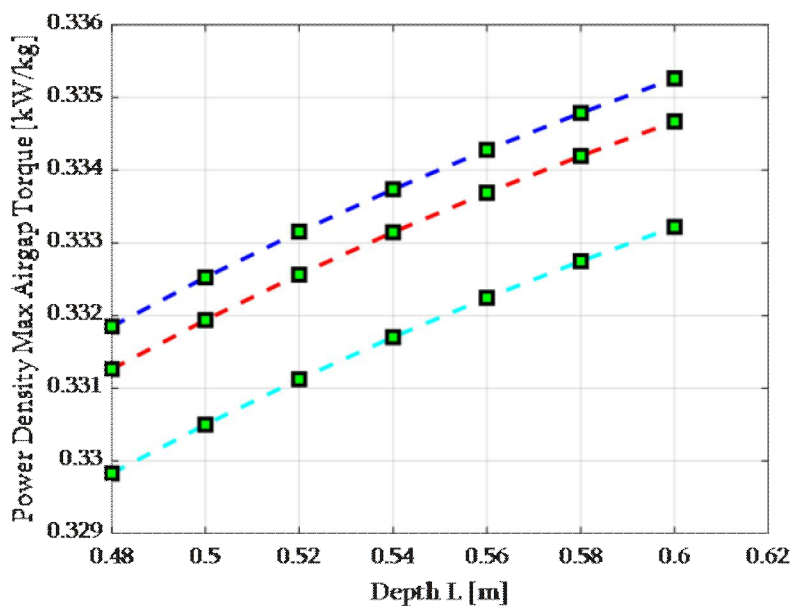
Σχήμα 8.22: Μεταβολή της πυκνότητας της μέγιστης ισχύος στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του δρομέα ως προς τη παράμετρο του μήκους της



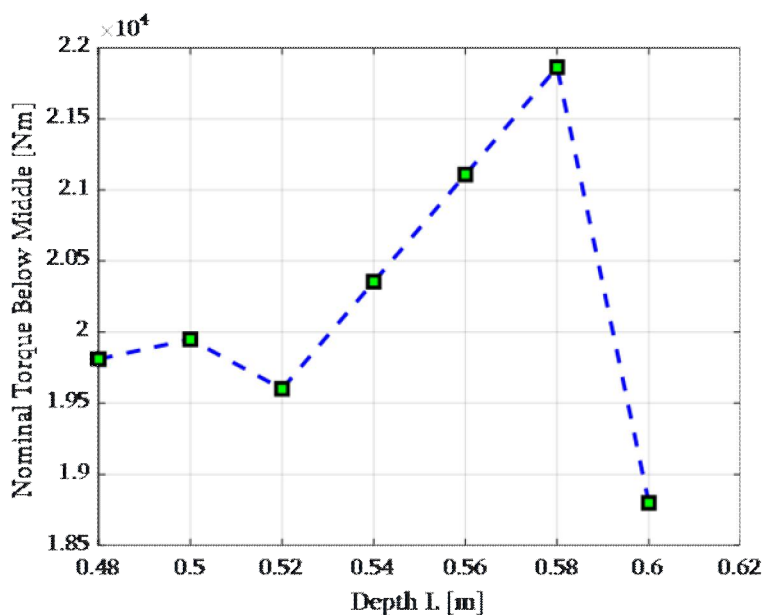
Σχήμα 8.23: Μεταβολή της πυκνότητας της μέγιστης ισχύος στη μέση του διάκενου της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



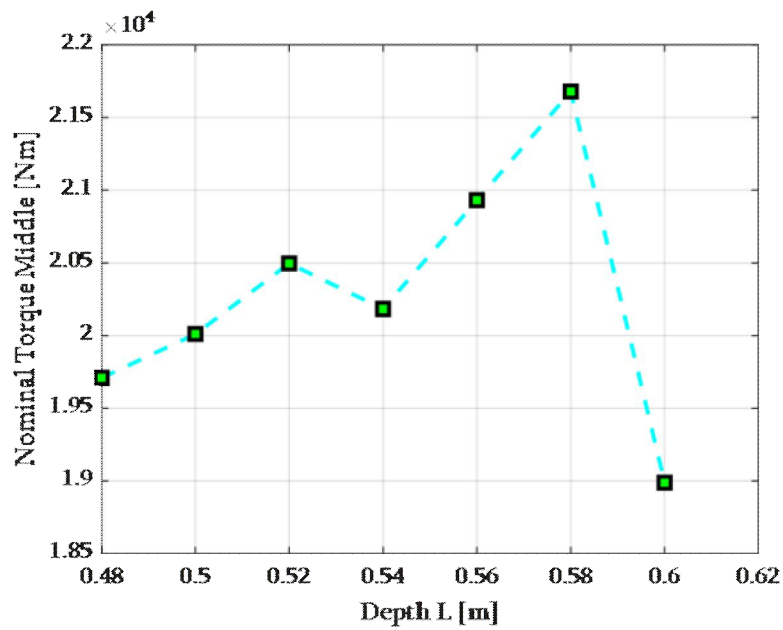
Σχήμα 8.24: Μεταβολή της πυκνότητας της μέγιστης ισχύος στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του στάτη ως προς την παράμετρο του μήκους της



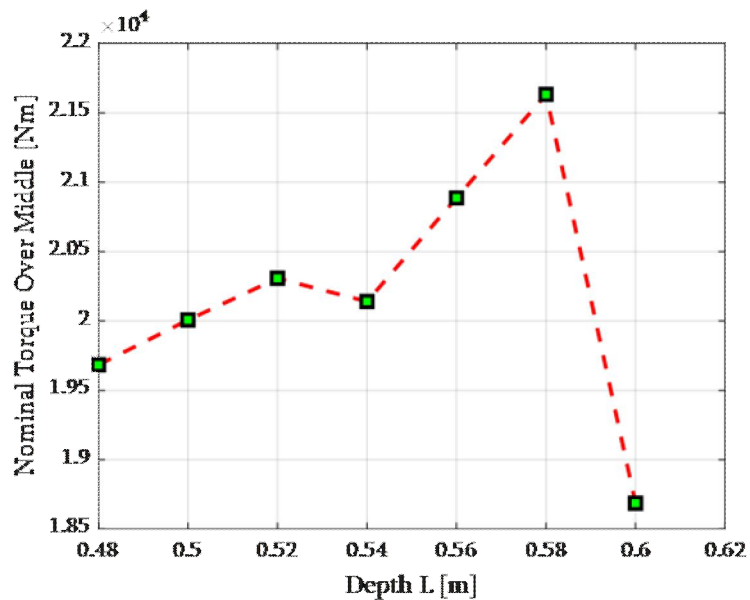
Σχήμα 8.25: Μεταβολή της πυκνότητας της μέγιστης ισχύος στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του δρομέα, του στάτη και στο μέσο του ως προς τη παράμετρο του μήκους της



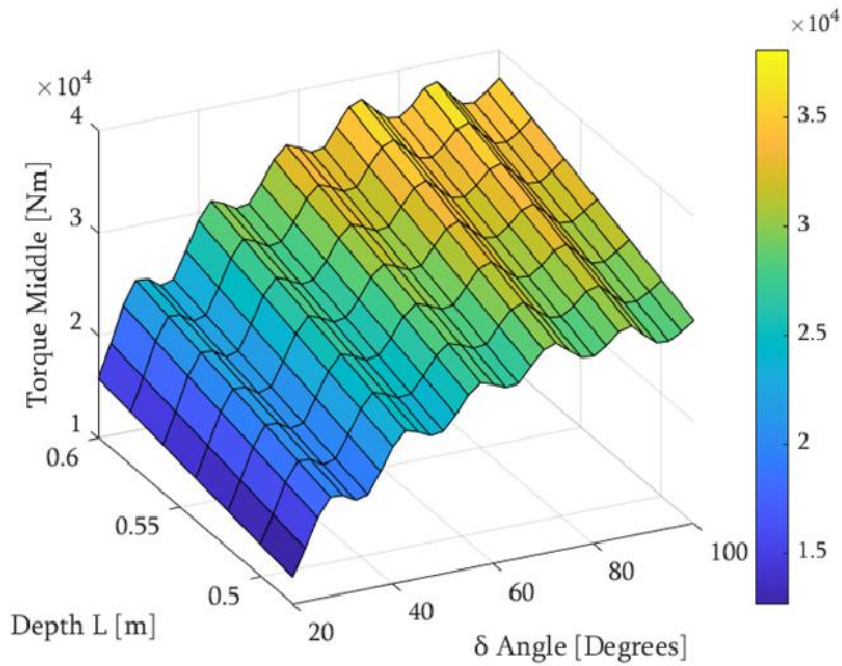
Σχήμα 8.26: Μεταβολή της ονομαστικής ροπής στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του δρομέα ως προς τη παράμετρο του μήκους της



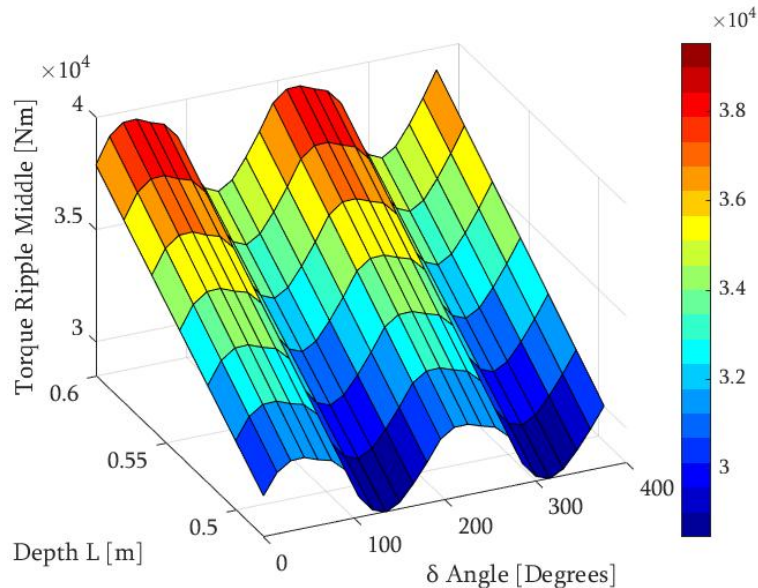
Σχήμα 8.27: Μεταβολή της ονομαστικής ροπής στη μέση του διάκενου της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



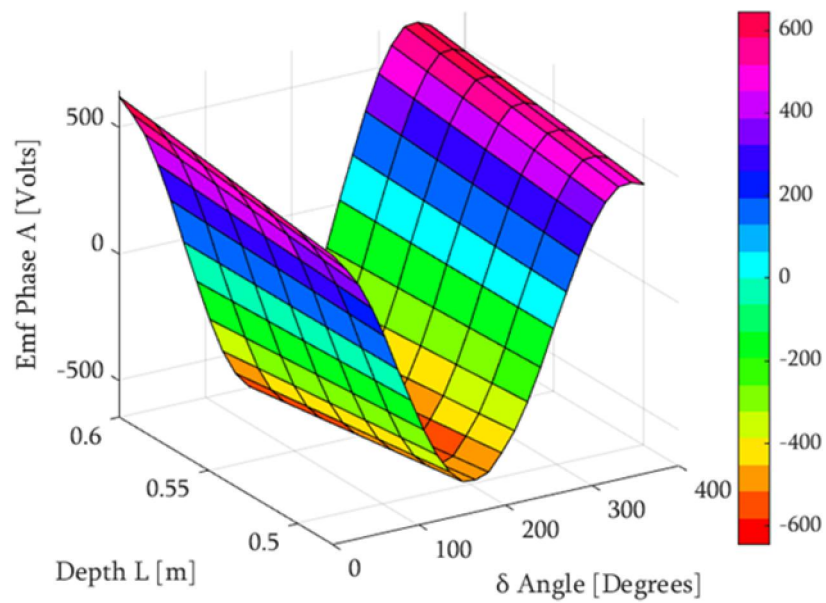
Σχήμα 8.28: Μεταβολή της ονομαστικής ροπής στο διάκενο της μηχανής στην πλευρά του στάτη ως προς την παράμετρο του μήκους της



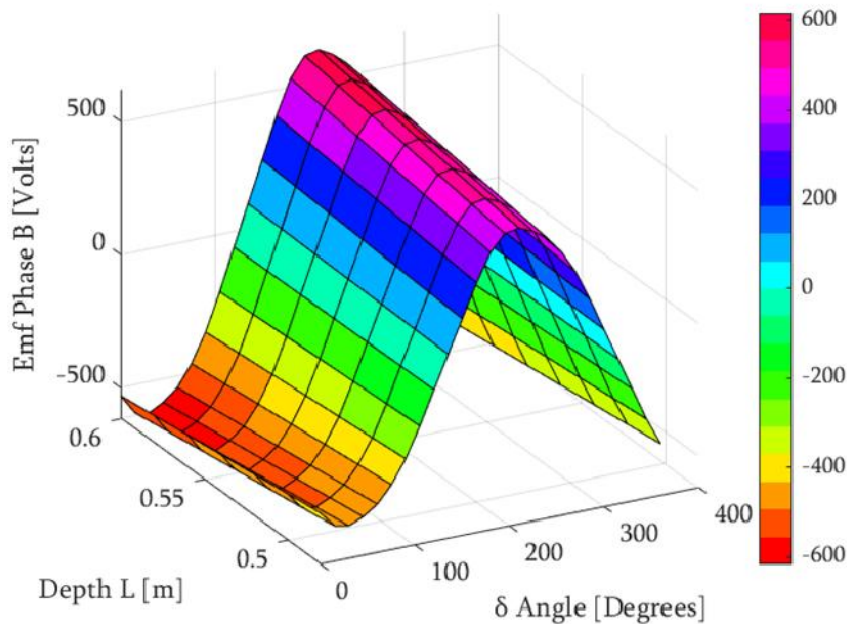
Σχήμα 8.29: Μεταβολή της ροπής στο μέσο του διάκενου για διάφορες τιμές της γωνίας δ ως προς την παράμετρο του μήκους της



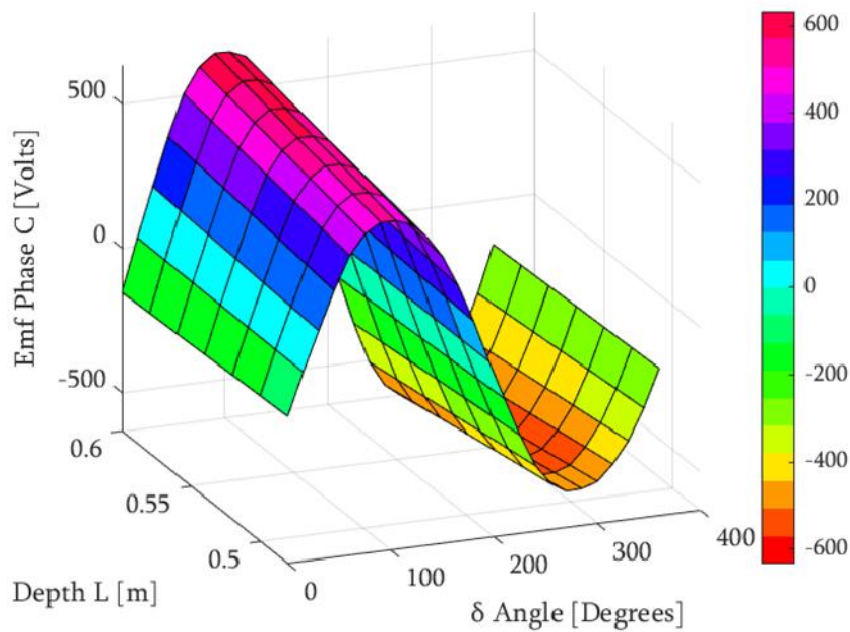
Σχήμα 8.30: Μεταβολή της κυμάτωσης της ροπής στο μέσο του διάκενου για διάφορες τιμές της γωνίας δ ως προς την παράμετρο του μήκους της



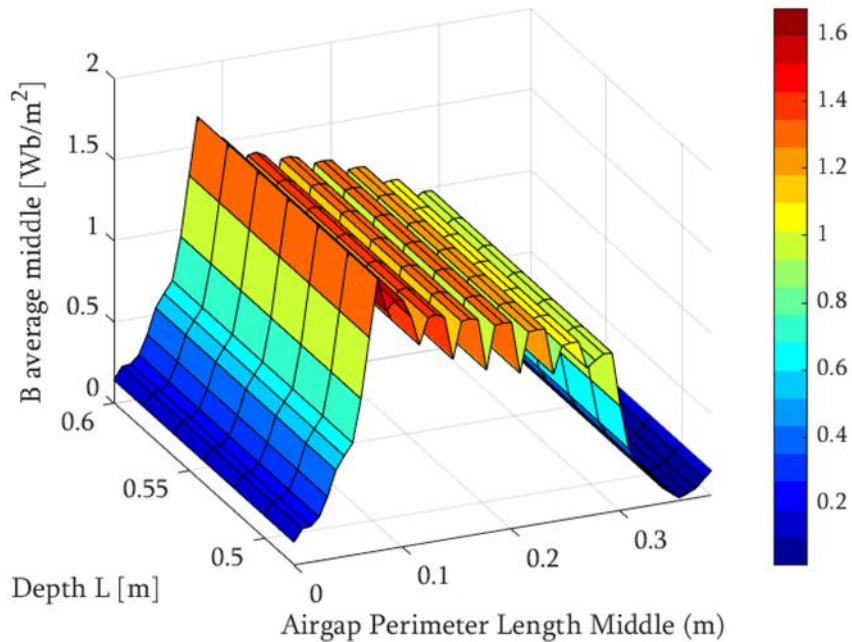
Σχήμα 8.31: Μεταβολή της ΗΕΔ της τάσης A για διάφορες τιμές της γωνίας δ ως προς την παράμετρο του μήκους της



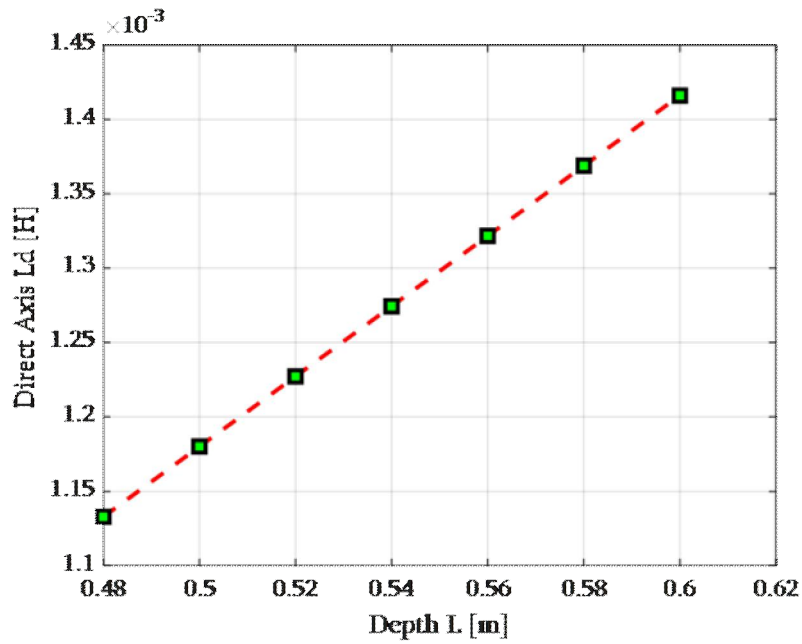
Σχήμα 8.32: Μεταβολή της ΗΕΔ της τάσης B για διάφορες τιμές της γωνίας δ ως προς την παράμετρο του μήκους της



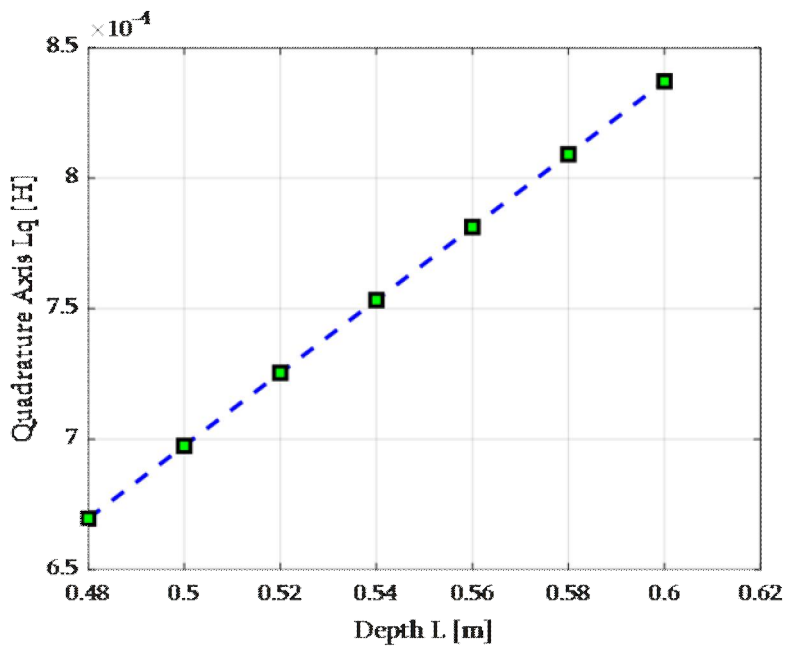
Σχήμα 8.33: Μεταβολή της ΗΕΔ της τάσης C για διάφορες τιμές της γωνίας δ ως προς την παράμετρο του μήκους της



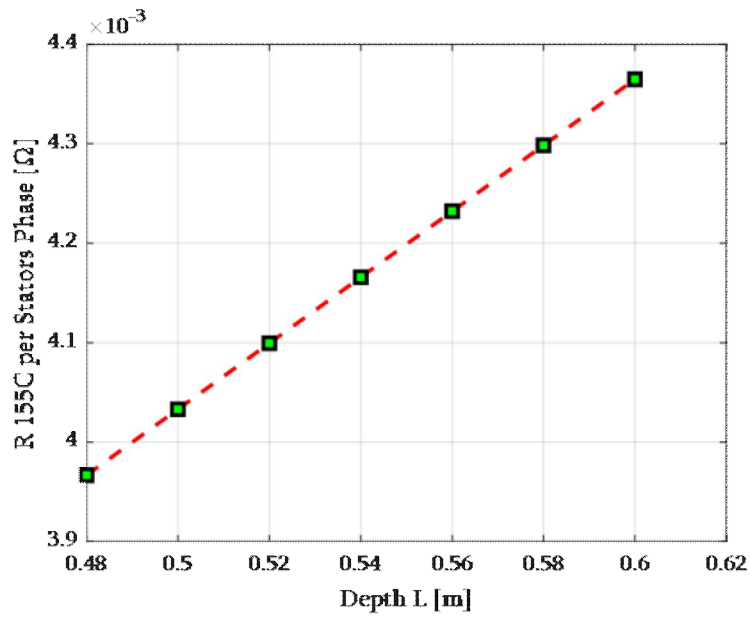
Σχήμα 8.34: Μεταβολή της τιμής της μαγνητικής επαγωγής του διάκενου που αντιστοιχεί σε ένα πόλο στο μέσο του για διάφορες τιμές της γωνίας δ έως προς την παράμετρο του μήκους της



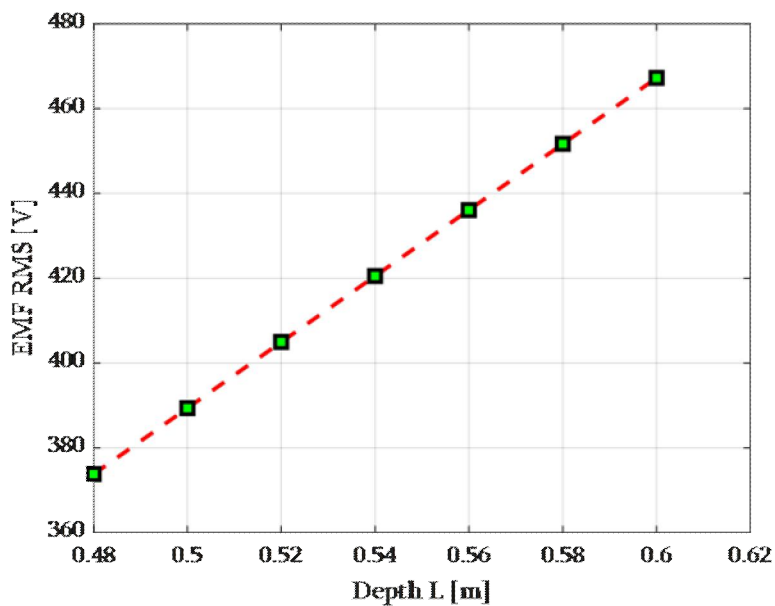
Σχήμα 8.35: Μεταβολή της αυτεπαγωγής ευθέως άξονα L_d της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



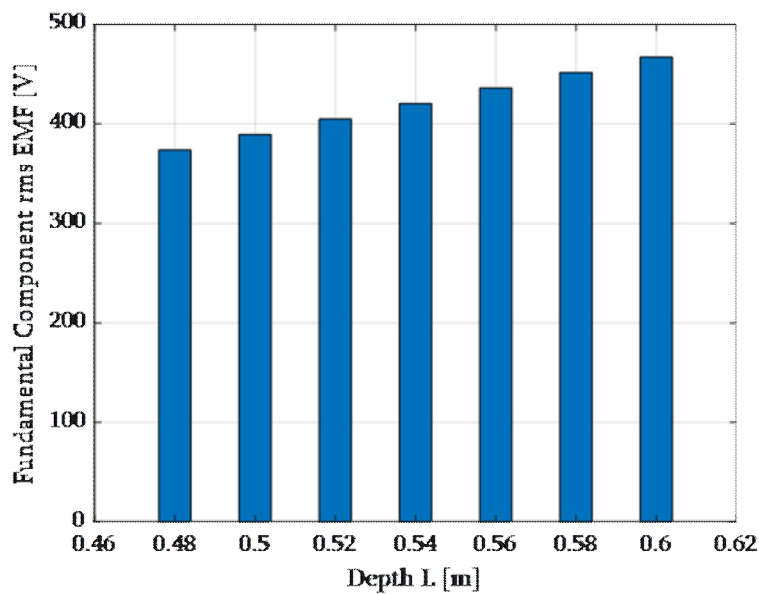
Σχήμα 8.36: Μεταβολή της αυτεπαγωγής εγκάρσιου άξονα L_q της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



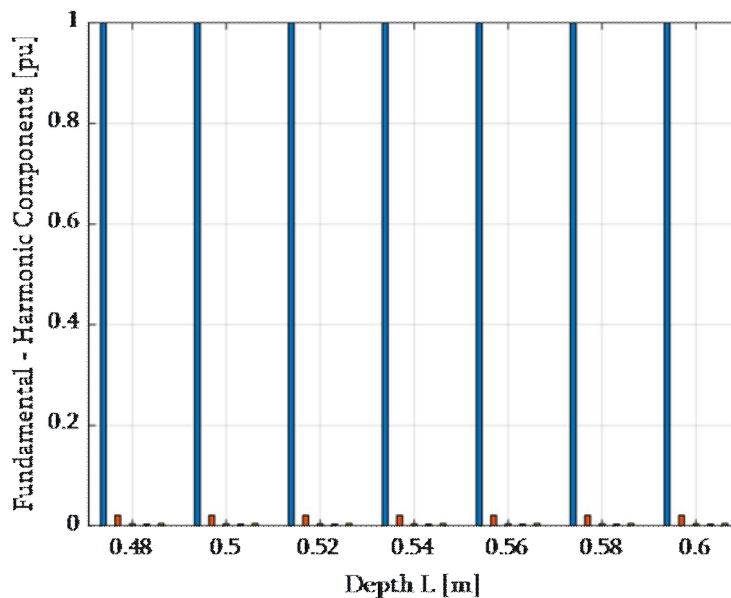
Σχήμα 8.37: Μεταβολή της τιμής της αντίστασης του στάτη ανά φάση της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



Σχήμα 8.38: Μεταβολή της ενεργούς τιμής της Η.Ε.Δ. της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της

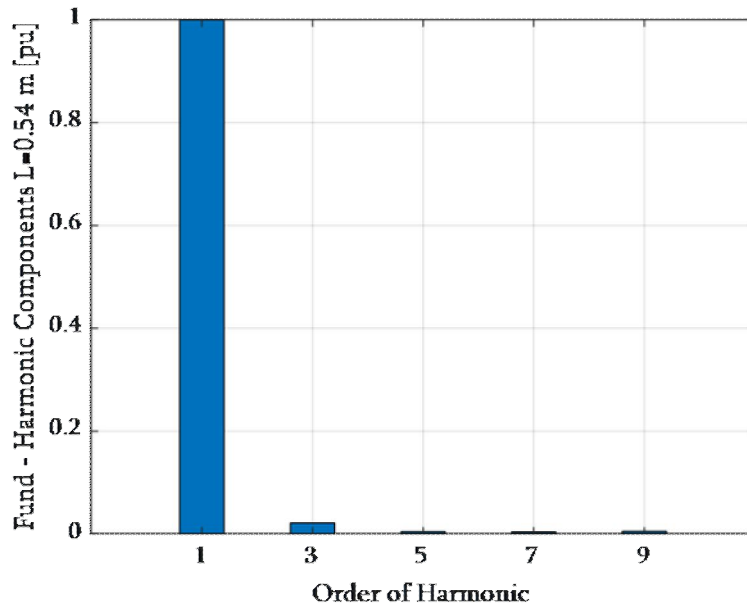


Σχήμα 8.39: Μεταβολή των τιμών της θεμελιώδους συνιστώσας της ενεργούς τιμής της Η.Ε.Δ. της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της

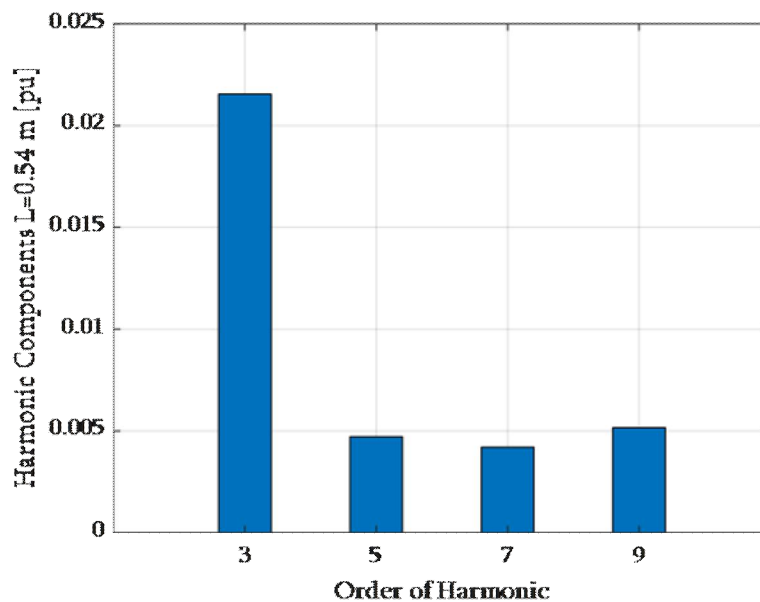


Σχήμα 8.40: Μεταβολή των τιμών της θεμελιώδους συνιστώσας και των τεσσάρων πρώτων αρμονικών της ενεργούς τιμής της Η.Ε.Δ. της μηχανής στο ανά μονάδα σύστημα ως προς την παράμετρο του μήκους της

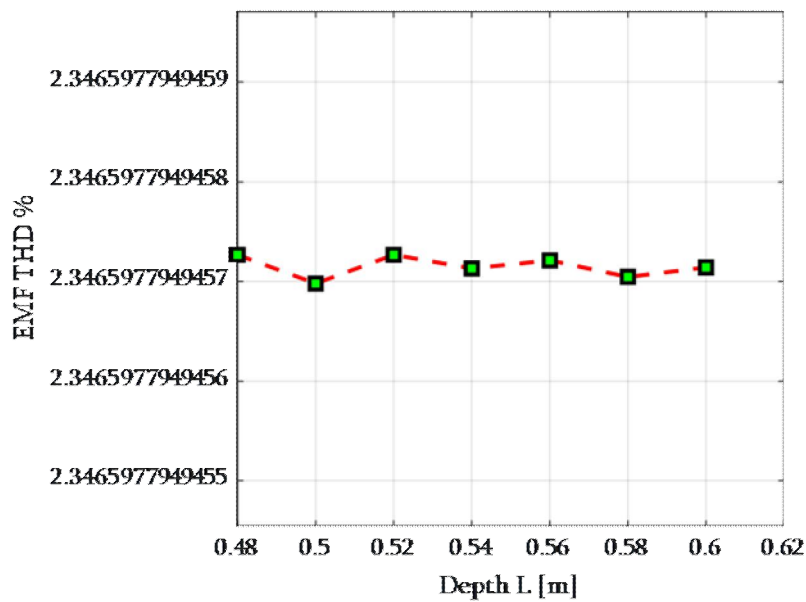
Στη συνέχεια, στο σχήμα 8.39 παρατίθενται οι γραφικές αναπαραστάσεις της θεμελιώδους συνιστώσας και των τεσσάρων πρώτων αρμονικών περιττής τάξης (3^η, 5^η, 7^η, 9^η) για συγκεκριμένη τιμή του μήκους της μηχανής ίσου με $L = 0,54 \text{ m}$.



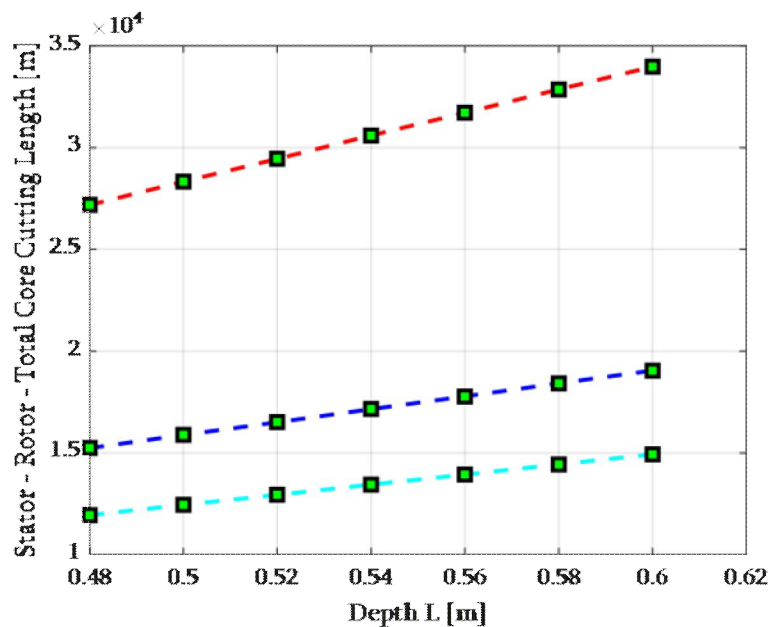
Σχήμα 8.41: Τιμές της θεμελιώδους συνιστώσας και των τριών πρώτων αρμονικών περιττής τάξης για τιμή της μεταβλητής του μήκους της μηχανής ίσης με $L = 0,54 \text{ m}$



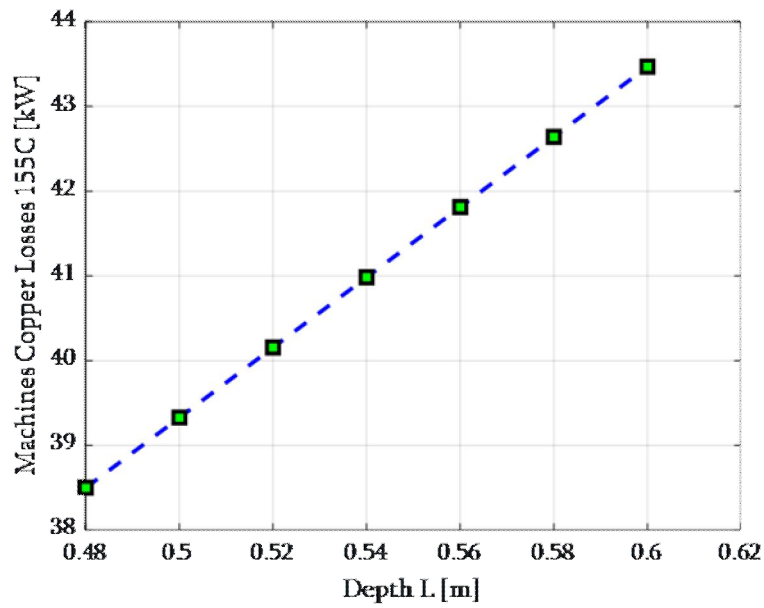
Σχήμα 8.42: Τιμές των τριών πρώτων αρμονικών περιττής τάξης για τιμή της μεταβλητής του μήκους της μηχανής ίσης με $L = 0,54 \text{ m}$



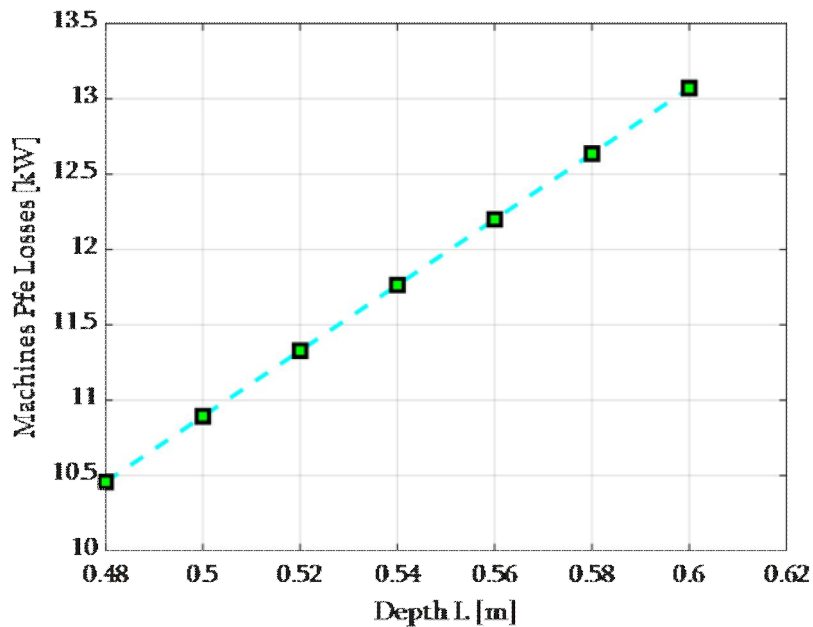
Σχήμα 8.43: Μεταβολή του συντελεστή ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της Η.Ε.Δ. της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



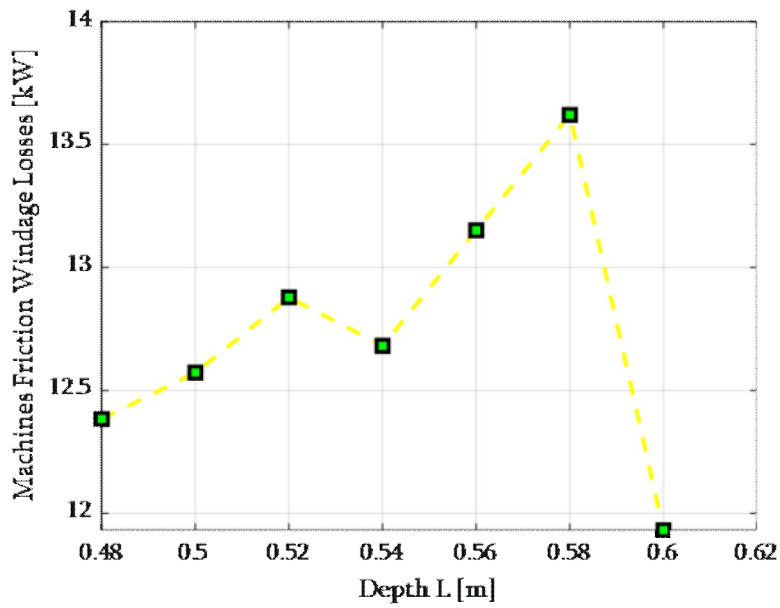
Σχήμα 8.44: Μεταβολή της τιμής του μήκους κοπής του πυρήνα του στάτη, του δρομέα και της μηχανής συνολικά ως προς την παράμετρο του μήκους της



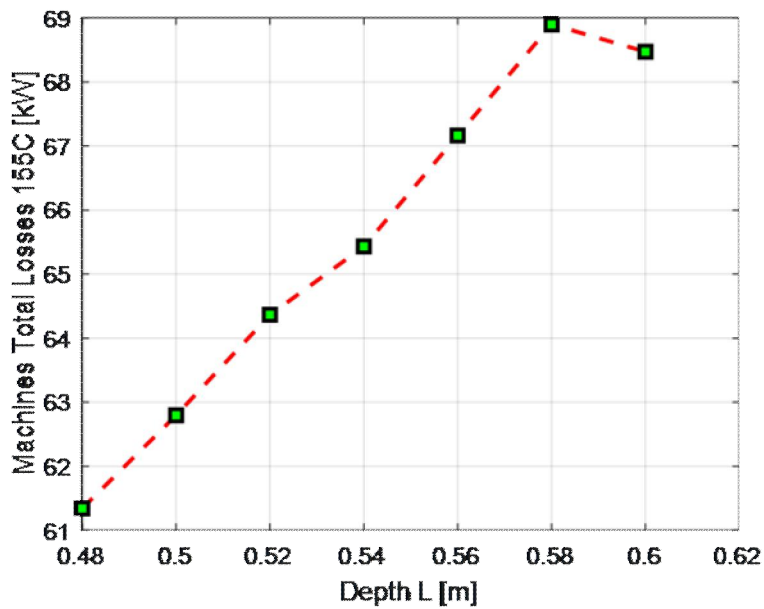
Σχήμα 8.45: Μεταβολή των απωλειών χαλκού της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



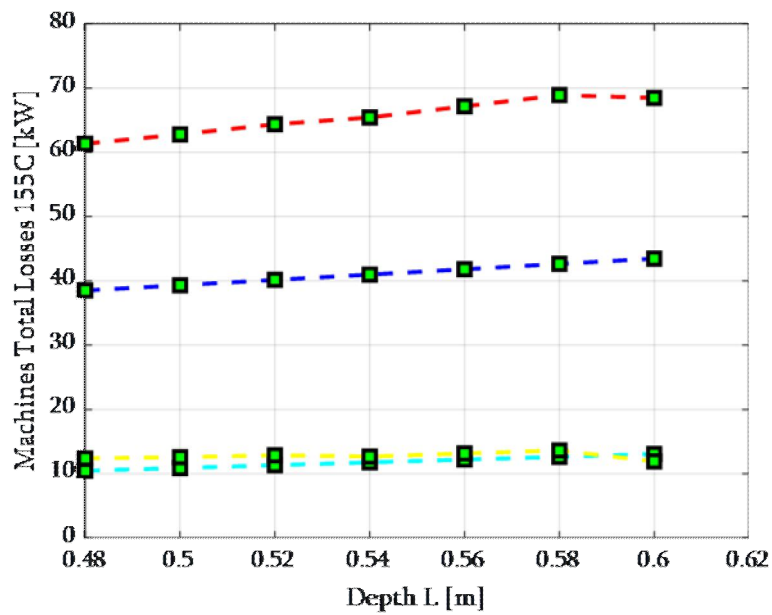
Σχήμα 8.46: Μεταβολή των απωλειών πυρήνα της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



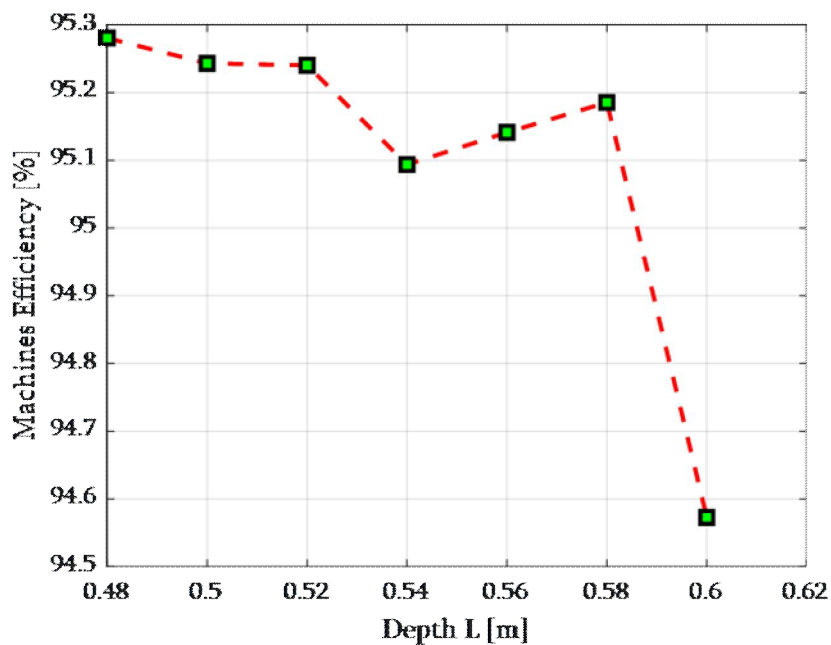
Σχήμα 8.47: Μεταβολή των απωλειών τριβών και ανεμισμού της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



Σχήμα 8.48: Μεταβολή των συνολικών απωλειών της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



Σχήμα 8.49: Μεταβολή των απωλειών χαλκού, πυρήνα, τριβών και ανεμισμού και των συνολικών απωλειών της μηχανής ως προς την παράμετρο του μήκους της



Σχήμα 8.50: Μεταβολή του βαθμού απόδοσης της μηχανής ως προς προς την παράμετρο του μήκους της

8.3 Συμπεράσματα

Η βελτιστοποίηση της σχεδίασης με τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας έχει πραγματοποιηθεί και από αυτή παρατίθενται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ροπή και η ισχύς εξόδου της γεννήτριας επηρεάζονται περισσότερο από το μήκος του διακένου και από την εσωτερική διάμετρο του στάτη. Η δεύτερη αποτελεί μια από τις παραμέτρους εισόδου για τη μέθοδο βελτιστοποίησης της γεννήτριας.
- Επόμενη σημαντική παράμετρος για τη μεγιστοποίηση των παραμέτρων που έχουν προαναφερθεί αποτελεί ο λόγος του πολικού τόξου προς το πολικό βήμα K_f . Από αυτόν ρυθμίζεται το πλάτος του πέδιλου και κατ' επέκταση μεταβάλλονται ανάλογα η ισχύς και η ροπή που αναπτύσσονται στο διάκενο. Αύξηση του προκαλεί την αύξηση της ροπής και της ισχύος στο διάκενο.
- Οι βασικές παράμετροι από τις οποίες επηρεάζονται τα μεγέθη των εξόδων της διαδικασίας βελτιστοποίησης που αφορούν την κυμάτωση της ροπής στο διάκενο και την ποιότητα ισχύος (κυματομορφές τάσεως εξόδου ανά φάση, αρμονικές, THD %) είναι:
 1. Το ύψος του πέδιλου του πόλου $h_{pole\ shoe}$
 2. Ο λόγος του πολικού τόξου προς το πολικό βήμα K_f
 3. Το άνοιγμα των αυλάκων του στάτη που προδιορίζεται από το συντελεστή *Slot opening* $Q_p\ ratio$
 4. Η βοηθητική παράμετρος από την οποία καθορίζεται η μορφή του πέδιλου του τραπεζοειδούς έκτυπου πόλου *aux coeff 14 15 rotor*.
- Ανάλογα με την ισχύ της μηχανής, το μήκος του διακένου και την εσωτερική διάμετρο του στάτη της πρέπει να προσδιοριστεί το ύψος του πέδιλου
- Στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτό προσδιορίστηκε από την προκαταρκτική σχεδίαση.
- Αύξηση του ύψους του πέδιλου $h_{pole\ shoe}$ πέραν ενός ορίου το οποίο διαφέρει ανάλογα με την περίπτωση προκαλεί αύξηση της κυμάτωσης των αρμονικών και του ολικού συντελεστή παραμόρφωσης THD %
- Το ίδιο συμβαίνει και για τις τιμές που λαμβάνουν η βοηθητική παράμετρος *aux coeff 14 15 rotor*. Συγκεκριμένα, η αύξηση της τιμής της απομακρύνει τη μορφή του πέδιλου από εκείνη του τραπεζίου, αυξάνει τον όγκο του πυρήνα του πέδιλου και καταστέλλει μέχρι ενός ορίου τις αρμονικές.
- Γενική παρατήρηση για όλη τη διαδικασία βελτιστοποίησης αποτελεί το γεγονός ότι η μεγάλη πλειοψηφία των παραμέτρων της εξόδου εξαρτώνται ταυτόχρονα από περισσότερες από μια παραμέτρους των εισόδων της μεθόδου βελτιστοποίησης.
- Από την προαναφερθείσα γενική παρατήρηση διαπιστώνεται ότι η διαδικασία της βελτιστοποίησης διαχειρίζεται στην πράξη πεπλεγμένες συναρτήσεις πολλών μεταβλητών.

- Απόρροια της διαπίστωσης αυτής είναι η ανάγκη διερεύνησης και άλλων μεθόδων βελτιστοποίησης για τη διεξοδική μελέτη πεδιακών προβλημάτων σχεδίασης σύγχρονων γεννητριών έκτυπων πόλων.
- Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας επηρεάζεται από το σύνολο των παραμέτρων εισόδου που αναφέρονται στον πίνακα 8.1, ενώ τη μεγαλύτερη επίδραση σε αυτόν κατά σειρά παράθεσης έχουν:
 1. Η εσωτερική διάμετρος του στάτη
 2. Ο λόγος του πολικού τόξου προς το πολικό βήμα K_f
 3. Η μορφή του έκτυπου πόλου που καθορίζεται από τη βοηθητική παράμετρο *aux coeff 14 15 rotor*
 4. Το άνοιγμα των αυλάκων του στάτη μέσω της παραμέτρου *Slot opening Q_p ratio*

Το συνολικό βάρος της γεννήτριας παραμένει εντός των ορίων. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη μεταβολή του συνολικού βάρους πυρήνα και στάτη της μηχανής η οποία παρατίθεται στο σχήμα 8.13 και εφόσον λάβουμε υπόψη ότι το βάρος του άξονα του δρομέα, των σφαιροτριβών ή των κουζινέτων που θα τοποθετηθούν καθώς και των καπακιών της μηχανής δεν ξεπερνά αθροιστικά τα 1700 kg αυτό προκύπτει κατά προσέγγιση μικρότερο ή ίσο με 8400 kg με όριο τα 9320 kg.

Μελέτη Απόδοσεων Γεννητριών και Μετασχηματιστών κατά τη Μελέτη Σχεδίασης Μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού Ροής με έναν Υδροστρόβιλο

9.1 Εισαγωγή

Κατά τον σχεδιασμό του μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού έχουν ληφθεί διάφοροι συντελεστές απόδοσης, προκειμένου να υπολογιστεί η συνολική απόδοσή του σε διαφορετικά επίπεδα παροχής ροής. Στην περίπτωση ενός μικρού υδροηλεκτρικού με έναν υδροστρόβιλο, οι υδραυλικές απώλειες του αγωγού προσαγωγής, οι απώλειες του υδροστροβίλου, της γεννήτριας και του μετασχηματιστή επηρεάζουν κατά κύριο λόγο τη συνολική απόδοση. Από αυτές οι πρώτες δύο έχουν αναλυθεί πολύ αναλυτικά στη σχετική βιβλιογραφία [E7, E9, E4], ενώ οι αποδόσεις της γεννήτριας και του μετασχηματιστή θεωρούνται σταθερές για όλο το εύρος λειτουργίας, χωρίς επαρκή βιβλιογραφική δικαιολόγηση. Στην παρούσα περίπτωση θα μελετηθούν οι συνθήκες υπό τις οποίες οι ανωτέρω υποθέσεις ευσταθούν λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες πυρήνα, χαλκού και πρόσθετες απώλειες μίας χαμηλόστροφης σύγχρονης γεννήτριας εκτύπων πόλων, καθώς επίσης τις απώλειες χαλκού και πυρήνα ενός μετασχηματιστή για διάφορα επίπεδα φόρτισής τους που συνδέονται όμως άμεσα με την παραγόμενη ισχύ από τον υδροστρόβιλο για διάφορα επίπεδα παροχής.

9.2 Προσδιορισμός απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων χαμηλών στροφών

Για τη μελέτη της απόδοσης μίας σύγχρονης τριφασικής γεννήτριας έκτυπων πόλων χαμηλών στροφών γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Τα τυλίγματα του στάτη κατανέμονται ομοιόμορφα κατά μήκος του διάκενου, και σε σχέση με την αμοιβαία επαγωγή του δρομέα.
- Παραλείπονται τα φαινόμενα των αρμονικών.
- Θεωρείται ότι οι αύλακες του στάτη δεν επιδρούν ουσιαστικά στις αυτεπαγωγές του δρομέα ανεξάρτητα από τη θέση του.
- Αγνοείται το φαινόμενο του κορεσμού του μαγνητικού κυκλώματος.

Οι τάσεις ακροδεκτών εξόδου στις φάσεις a, b, c για το τύλιγμα του στάτη της γεννήτριας προσδιορίζονται ως εξής:

$$e_a = -R_s \cdot i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (9.1)$$

$$e_b = -R_s \cdot i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (9.2)$$

$$e_c = -R_s \cdot i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \quad (9.3)$$

Όπου R_s είναι η αντίσταση του τυλίγματος του στάτη, λ_a (λ_b, λ_c) η πεπλεγμένη μαγνητική ροή της φάσης a (b, c αντίστοιχα), i_a (i_b, i_c) η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος της φάσης a b, c αντίστοιχα, όπου η θετική φορά ρεύματος αντιστοιχεί σε λειτουργία γεννήτριας), t ο χρόνος.

Η τάση ακροδεκτών του τυλίγματος διέγερσης του δρομέα δίνεται από τη σχέση:

$$e_{fr} = R_{fr} \cdot i_{fr} + \frac{d\lambda_{fr}}{dt} \quad (9.4)$$

Όπου R_{fr} είναι η αντίσταση του τυλίγματος διέγερσης του δρομέα, λ_{fr} η πεπλεγμένη μαγνητική ροή και i_{fr} η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος του τυλίγματος διέγερσης.

Οι σχέσεις των πεπλεγμένων ροών είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a(t) \\ \lambda_b(t) \\ \lambda_c(t) \\ \lambda_{fr}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa}(t) & L_{ab}(t) & L_{ac}(t) & L_{afr}(t) \\ L_{ba}(t) & L_{bb}(t) & L_{bc}(t) & L_{bfr}(t) \\ L_{ca}(t) & L_{cb}(t) & L_{cc}(t) & L_{cfr}(t) \\ L_{fra}(t) & L_{frb}(t) & L_{frc}(t) & L_{frfr}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_a(t) \\ -i_b(t) \\ -i_c(t) \\ i_{fr}(t) \end{bmatrix} \quad (9.5)$$

Όπου L_{jj} είναι η αυτεπαγωγή του $j^{\text{οστού}}$ τυλίγματος, L_{jk} η αλληλεπαγωγή μεταξύ του $j^{\text{οστού}}$ και του $k^{\text{οστού}}$ τυλίγματος, τα οποία δίνονται από:

$$L_{jj}(t) = \mu_0 \cdot \ell_s \cdot (r_s - 0,5 \cdot g_o) \cdot \int_0^{2\pi} \frac{N_j^2(\theta)}{g(\theta)} \cdot d\theta \quad (9.6)$$

$$L_{jk}(t) = \mu_0 \cdot \ell_s \cdot (r_s - 0,5 \cdot g_o) \cdot \int_0^{2\pi} \frac{N_j(\theta) \cdot N_k(\theta)}{g(\theta)} \cdot d\theta \quad (9.7)$$

Όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, ℓ_s το μήκος του στάτη, r_s η εσωτερική διάμετρος του στάτη, g_o το μέσο ακτινικό πλάτος του διακένου, $g(\theta)$ το ακτινικό πλάτος του διακένου στη γωνία θ του ευθέως άξονα από τον άξονα της φάσης a, $N_j(\theta)$ το πλήθος των ελιγμάτων σε γωνία θ του ευθέως άξονα από τον άξονα της φάσης a, ενώ η γωνία θ δίνεται από τη σχέση:

$$\theta = \omega \cdot t + \theta_0 \quad (9.8)$$

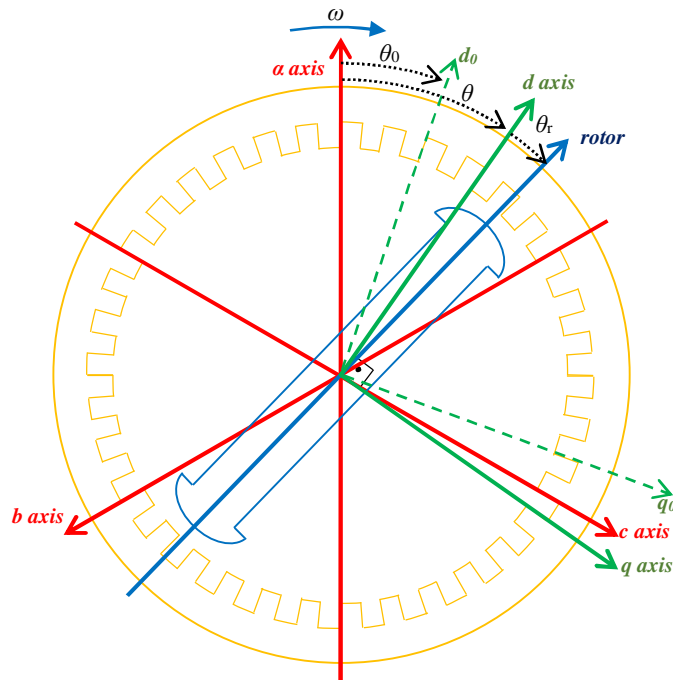
Όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, θ_0 η αρχική γωνία τη χρονική στιγμή $t=0$. Στη συνέχεια ο τροποποιημένος μετασχηματισμός του Park εφαρμόζεται με χρήση του ευθέως άξονα d, του εγκάρσιου άξονα q και του άξονα της μηδενικής ακολουθίας θεωρώντας ισοδύναμα περιστρεφόμενα τυλίγματα οπλισμού:

$$\begin{bmatrix} i_o \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (9.9)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \cos\theta & -\sin\theta \\ 1/\sqrt{2} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_o \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (9.10)$$

Όπου i_d, i_q, i_o είναι οι εντάσεις ηλεκτρικού ρεύματος του ευθέως άξονα d, του εγκάρσιου άξονα q και του άξονα μηδενικής ακολουθίας των ισοδύναμων περιστρεφόμενων τυλιγμάτων οπλισμού. Οι σχέσεις (9.9) και (9.10) μπορούν να εφαρμοστούν όμοια και για τις αντίστοιχες τάσεις.

Στο σχήμα 9.1 παρουσιάζονται οι γωνίες των μαγνητικών πεδίων του δρομέα, του στάτη και των ισοδύναμων τυλιγμάτων d, q.



Σχήμα 9.1: Αναπαράσταση γωνιών μαγνητικού πεδίου στάτη, δρομέα και ισοδύναμων τυλιγμάτων αξόνων d και q μίας σύγχρονης γεννήτριας.

Από τον συνδυασμό των σχέσεων (9.5)-(9.8), (9.10) προσδιορίζονται οι αντίστοιχες πεπλεγμένες ροές:

$$\begin{bmatrix} \lambda_o(t) \\ \lambda_d(t) \\ \lambda_q(t) \\ \lambda_{fr}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{00} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{dd} & 0 & L_{dfr} \\ 0 & 0 & L_{qq} & 0 \\ 0 & L_{frd} & 0 & L_{frfr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_o(t) \\ -i_d(t) \\ -i_q(t) \\ i_{fr}(t) \end{bmatrix} \quad (9.11)$$

Όπου οι αντίστοιχες αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές είναι ανεξάρτητες του χρόνου και υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$L_{dd} = \frac{3}{2} \cdot \mu_0 \cdot \ell_s \cdot \pi \cdot \frac{(r_s - 0,5 \cdot g_o)}{g_o} \cdot N_s^2 \cdot (1 + K) \quad (9.12)$$

$$L_{qq} = \frac{3}{2} \cdot \mu_0 \cdot \ell_s \cdot \pi \cdot \frac{(r_s - 0,5 \cdot g_o)}{g_o} \cdot N_S^2 \cdot (1 - K) \quad (9.13)$$

$$L_{dfr} = L_{frd} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \mu_0 \cdot \ell_s \cdot \pi \cdot \frac{(r_s - 0,5 \cdot g_o)}{g_o} \cdot N_S \cdot N_R \cdot (1 + K) \quad (9.14)$$

$$L_{frfr} = \mu_0 \cdot \ell_s \cdot \pi \cdot \frac{(r_s - 0,5 \cdot g_o)}{g_o} \cdot N_R^2 \cdot (1 + K) \quad (9.15)$$

$$L_{00} = 0 \quad (9.16)$$

Όπου K είναι μία θετική παράμετρος που εκφράζει την εκτυπότητα της σύγχρονης μηχανής, N_S ο αριθμός των ελιγμάτων του τυλίγματος οπλισμού μίας φάσης, N_R ο αριθμός των ελιγμάτων του τυλίγματος διέγερσης.

Στη συνέχεια οι τάσεις ακροδεκτών των ισοδύναμων περιστρεφόμενων τυλιγμάτων του στάτη του ευθέως άξονα d , του εγκάρσιου άξονα q και της μηδενικής ακολουθίας υπολογίζονται:

$$\begin{bmatrix} e_o(t) \\ e_d(t) \\ e_q(t) \\ e_{fr}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{fr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_o(t) \\ -i_d(t) \\ -i_q(t) \\ i_{fr}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\lambda_o}{dt} \\ \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega \cdot \lambda_q \\ \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega \cdot \lambda_d \\ \frac{d\lambda_{fr}}{dt} \end{bmatrix} \quad (9.17)$$

Στην περίπτωση μόνιμης κατάστασης η σχέση (9.17) μεταπίπτει σε:

$$\begin{bmatrix} e_o(t) \\ e_d(t) \\ e_q(t) \\ e_{fr}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{fr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_o(t) \\ -i_d(t) \\ -i_q(t) \\ i_{fr}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega \cdot \lambda_q \\ \omega \cdot \lambda_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9.18)$$

Αν το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι συμμετρικό, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν φασιθέτες. Οπότε οι εντάσεις των ηλεκτρικών ρευμάτων στις φάσεις a , b , c παριστάνονται ως εξής:

$$i_a(t) = \sqrt{2} \cdot \tilde{I}_a \cdot \cos(\omega \cdot t) = \text{Re}\{\sqrt{2} \cdot \tilde{I}_a \cdot e^{j \cdot 0} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}\} \Leftrightarrow \hat{I}_a = \tilde{I}_a \neq 0^\circ \quad (9.19)$$

$$\begin{aligned} i_b(t) &= \sqrt{2} \cdot \tilde{I}_a \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) = \text{Re}\left\{\sqrt{2} \cdot \tilde{I}_a \cdot e^{j \cdot \left(-\frac{2\pi}{3}\right)} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}\right\} \\ &\Leftrightarrow \hat{I}_b = \tilde{I}_a \neq (0^\circ - 2\pi/3) = \tilde{I}_a \neq (-2\pi/3) \end{aligned} \quad (9.20)$$

$$\begin{aligned} i_c(t) &= \sqrt{2} \cdot \tilde{I}_a \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) = \text{Re}\left\{\sqrt{2} \cdot \tilde{I}_a \cdot e^{j \cdot \left(+\frac{2\pi}{3}\right)} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}\right\} \\ &\Leftrightarrow \hat{I}_c = \tilde{I}_a \neq (0^\circ + 2\pi/3) = \tilde{I}_a \neq (+2\pi/3) \end{aligned} \quad (9.21)$$

Όπου \tilde{I}_a είναι η ενεργός τιμή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος της φάσης a .

Ενώ οι εντάσεις των ηλεκτρικών ρευμάτων των αξόνων d-q-0 δεν εξαρτώνται από τον χρόνο και είναι ίσες με:

$$i_d(t) = \sqrt{3} \cdot \tilde{I}_a \cdot \cos(\theta_0) \quad (9.22)$$

$$i_q(t) = -\sqrt{3} \cdot \tilde{I}_a \cdot \sin(\theta_0) \quad (9.23)$$

$$i_0(t) = 0 \quad (9.24)$$

Από τον συνδυασμό των σχέσεων (9.10), (9.19), (9.22) ως (9.24) προκύπτει μία απλή σχέση μεταξύ του φασιθέτη ρεύματος της φάσης a και των εντάσεων των ρευμάτων των αξόνων d και q:

$$\begin{aligned} i_a(t) &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot i_0 + i_d \cdot \cos\theta - i_q \cdot \sin\theta \right) \Rightarrow \\ i_a(t) &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot i_d \cdot \cos(\omega \cdot t + \theta_0) - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot i_q \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta_0) \Rightarrow \\ i_a(t) &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot i_d \cdot \cos(\omega \cdot t + \theta_0) + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot i_q \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \theta_0 + \frac{\pi}{2}\right) \Rightarrow \\ \operatorname{Re}\{\sqrt{2} \cdot \tilde{I}_a \cdot e^{j \cdot 0} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}\} &= \frac{\operatorname{Re}\{\sqrt{2} \cdot i_d \cdot e^{j \cdot \theta_0} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}\} + \operatorname{Re}\{\sqrt{2} \cdot i_q \cdot e^{j \cdot (\theta_0 + \frac{\pi}{2})} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}\}}{\sqrt{3}} \Rightarrow \\ \hat{I}_a &= \frac{i_d + j \cdot i_q}{\sqrt{3}} \quad (9.25) \end{aligned}$$

Η σχέση (9.25) μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα, έτσι, ώστε να συνδέσει τον φασιθέτη ακροδεκτών της φάσης a και των τάσεων ακροδεκτών των τυλιγμάτων των αξόνων d και q:

$$\hat{E}_a = \frac{e_d + j \cdot e_q}{\sqrt{3}} \quad (9.26)$$

Όπου \hat{E}_a είναι ο φασιθέτης της τάσης ακροδεκτών του κυκλώματος της φάσης a.

Από τον συνδυασμό των σχέσεων (9.11), (9.18), (9.25) (9.26) η τάση ακροδεκτών του κυκλώματος της φάσης a δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{E}_a = j \cdot \left(E_i - (X_d - X_q) \cdot \frac{i_d}{\sqrt{3}} \right) - (R_s + j \cdot X_q) \cdot \hat{I}_a \Rightarrow \quad (9.27)$$

$$\hat{E}_a = j \cdot E_q - (R_s + j \cdot X_q) \cdot \hat{I}_a \quad (9.28)$$

Όπου E_i είναι η αναπτυσσόμενη τάση ανοικτοκύκλωσης (γνωστή ως ηλεκτρεγερτική δύναμη πίσω από τη σύγχρονη αντίδραση του ευθέως άξονα d), E_q η ηλεκτρεγερτική δύναμη πίσω από τη σύγχρονη αντίδραση του εγκάρσιου άξονα q, X_d η σύγχρονη αντίδραση του ευθέως άξονα d, X_q η σύγχρονη αντίδραση του εγκάρσιου άξονα q, τα οποία δίνονται από τις σχέσεις:

$$E_i = L_{afrr} \cdot \omega \cdot \frac{i_{fr}}{\sqrt{3}} \quad (9.29)$$

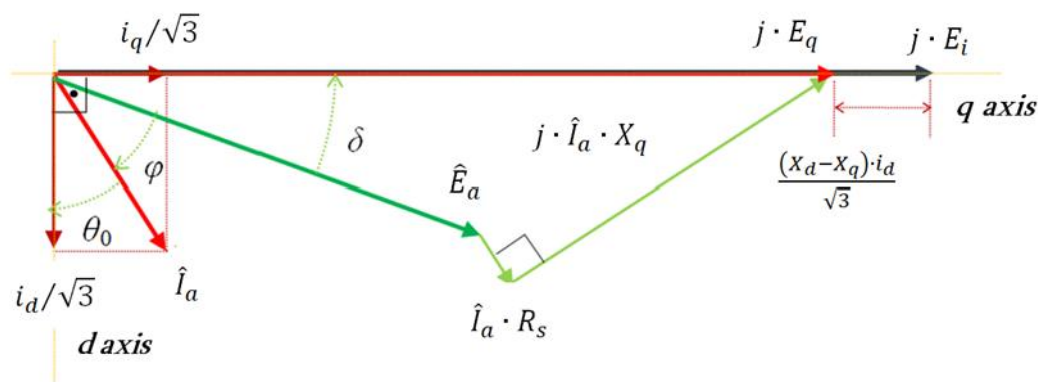
$$E_q = E_i - (X_d - X_q) \cdot \frac{i_d}{\sqrt{3}} \quad (9.30)$$

$$X_d = L_{dd} \cdot \omega \quad (9.31)$$

$$X_q = L_{qq} \cdot \omega \quad (9.32)$$

Στο σχήμα 9.2 παρουσιάζεται το διανυσματικό διάγραμμα, όπου καταγράφεται η σύνδεση των τάσεων και των ρευμάτων των τυλιγμάτων των αξόνων d-q με εκείνων της φάσης a, με τη βοήθεια της γωνίας ροπής δρομέα δ , της γωνίας φ μεταξύ των \hat{E}_a και \hat{I}_a (θετική για επαγωγική συμπεριφορά), της γωνίας θ_0 μεταξύ του άξονα d και \hat{I}_a (στην παρούσα απεικόνιση είναι αρνητική). Η σύνδεση μεταξύ των γωνιών δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi + |\theta_0| + \delta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \varphi - \theta_0 + \delta = \frac{\pi}{2} \quad (9.33)$$



Σχήμα 9.2: Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων σε σύγχρονη γεννήτρια έκτυπων πόλων ($\theta_0 < 0^\circ$).

Από την ανάλυση του διανυσματικού διαγράμματος ως προς τη συνιστώσα της τάσης του άξονα d προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\tilde{E}_a \cdot \sin\delta + R_s \cdot \tilde{I}_a \cdot \cos\theta_0 = X_q \cdot \tilde{I}_a \cdot \sin\theta_0 \Leftrightarrow \tilde{E}_a \cdot \sin\delta + R_s \cdot \frac{i_d}{\sqrt{3}} = X_q \cdot \left(-\frac{i_q}{\sqrt{3}}\right) \quad (9.34)$$

Ομοίως, από την ανάλυση του διανυσματικού διαγράμματος ως προς τη συνιστώσα της τάσης του άξονα q προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$E_i = \tilde{E}_a \cdot \cos\delta + R_s \cdot \tilde{I}_a \cdot \sin\theta_0 + X_q \cdot \tilde{I}_a \cdot \cos\theta_0 + (X_d - X_q) \cdot \frac{i_d}{\sqrt{3}} \quad (9.35)$$

$$\Leftrightarrow E_i = \tilde{E}_a \cdot \cos\delta + R_s \cdot \left(-\frac{i_q}{\sqrt{3}}\right) + X_d \cdot \frac{i_d}{\sqrt{3}}$$

Από τον συνδυασμό των σχέσεων (9.34) και (9.35) οι έντασεις ηλεκτρικού ρεύματος των αξόνων d και q προκύπτουν τα εξής:

$$\frac{i_d}{\sqrt{3}} = \frac{E_i \cdot X_q - \tilde{E}_a \cdot (X_q \cdot \cos\delta + R_S \cdot \sin\delta)}{R_S^2 + X_d \cdot X_q} \quad (9.36)$$

$$-\frac{i_q}{\sqrt{3}} = \frac{E_i \cdot R_S + \tilde{E}_a \cdot (X_d \cdot \sin\delta - R_S \cdot \cos\delta)}{R_S^2 + X_d \cdot X_q} \quad (9.37)$$

Η ενεργός ισχύς εξόδου της τριφασικής γεννήτριας είναι ίση με:

$$P_{gen} = 3 \cdot \tilde{E}_a \cdot \tilde{I}_a \cdot \cos\varphi \quad (9.38)$$

Με χρήση της σχέσης (9.33) η ενεργός ισχύς εξόδου της τριφασικής γεννήτριας επαναυπολογίζεται:

$$\begin{aligned} P_{gen} &= 3 \cdot \tilde{E}_a \cdot \tilde{I}_a \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_0 - \delta\right) = 3 \cdot \tilde{E}_a \cdot \tilde{I}_a \cdot \sin(\delta - \theta_0) \Rightarrow \\ P_{gen} &= 3 \cdot \tilde{E}_a \cdot \tilde{I}_a \cdot (\cos\theta_0 \cdot \sin\delta - \sin\theta_0 \cdot \cos\delta) \Rightarrow \{(9.25)\} \\ P_{gen} &= 3 \cdot \tilde{E}_a \cdot \left(\frac{i_d}{\sqrt{3}} \cdot \sin\delta + \left(-\frac{i_q}{\sqrt{3}}\right) \cdot \cos\delta\right) \Rightarrow \{(9.36), (9.37)\} \Rightarrow \\ P_{gen} &= \frac{3 \cdot \left\{ \tilde{E}_a \cdot E_i \cdot (R_S \cdot \cos\delta + X_q \cdot \sin\delta) - \tilde{E}_a^2 \cdot R_S + \frac{\tilde{E}_a^2}{2} \cdot (X_d - X_q) \cdot \sin(2\delta) \right\}}{R_S^2 + X_d \cdot X_q} \quad (9.39) \end{aligned}$$

Η απόδοση της γεννήτριας είναι ίση με:

$$\eta_{gen} = \frac{P_{gen}}{P_{hydro}} = \frac{P_{gen}}{P_{gen} + P_{Fe-gen} + P_{Cu-st} + P_{Cu-r} + P_{rest-gen}} \quad (9.40)$$

όπου P_{hydro} είναι η ισχύς εισόδου από την πλευρά του υδροστροβίλου, που περιλαμβάνει πέρα από την ισχύ εξόδου της γεννήτριας P_{gen} , όλα τα άλλα είδη απωλειών, που είναι τα εξής:

- Τις απώλειες πυρήνα P_{Fe-gen} , οι οποίες εξαρτώνται από τις απώλειες πυρήνα κατά τη δοκιμή ανοικτοκύκλωσης $P_{Fe-gen-OC}$ με την τάση ανοικτοκύκλωσης E_{i-OC} , διορθωμένες από την πραγματικά εφαρμοζόμενη τάση ανοικτοκύκλωσης E_i για κάθε επίπεδο φόρτισης (χωρίς την ύπαρξη φαινομένων κορεσμού), με τη βοήθεια ενός εκθετικού παράγοντα n_1 (λαμβάνοντας τιμές από 1,5 σε 2,5):

$$P_{Fe-gen} \approx P_{Fe-gen-OC} \cdot \left(\frac{E_i}{E_{i-OC}}\right)^{n_1} \quad (9.41)$$

- Τις απώλειες χαλκού στάτη P_{Cu-st} , θεωρώντας σε πρώτη εκτίμηση την τιμή αντίστασης σταθερή, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία:

$$P_{Cu-st} = 3 \cdot I_a^2 \cdot R_S \quad (9.42)$$

- Τις απώλειες χαλκού δρομέα P_{Cu-r} , θεωρώντας σε πρώτη εκτίμηση την τιμή αντίστασης σταθερή, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία, υπολογιζόμενες είτε μέσω του ρεύματος διέγερσης, είτε μέσω των απωλειών χαλκού δρομέα υπό συνθήκες ανοικτοκυκλώματος και αφόρτιστης γεννήτριας $P_{Cu-r-OC}$, ή μπορούν να αγνοηθούν σ'

αυτό το στάδιο, αν λαμβάνονται υπόψη στις καταναλώσεις βοηθητικών υπηρεσιών του μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού:

$$P_{Cu-r} = i_{fr}^2 \cdot R_{fr} \approx P_{Cu-r-oc} \cdot \left(\frac{E_i}{E_{i-oc}} \right)^2 \quad (9.43)$$

Με όμοιο τρόπο μπορούν να ληφθούν υπόψη οι απώλειες της διεγέρτριας.

- Άλλες απώλειες γεννήτριας $P_{rest-gen}$, οι οποίες περιλαμβάνουν απώλειες ανεμισμού, ρουλεμάν / τριβέων και κατανεμημένες – μη εύκολα υπολογίσιμες απώλειες (π.χ. απώλειες λόγω σκέδασης μαγνητικής ροής), οι οποίες τυπικά ανέρχονται σε 0,5% με 1% της ονομαστικής ενεργού ισχύος της γεννήτριας. Υπό συνθήκες σταθερών στροφών παραμένουν αμετάβλητες.

Συνολικά, για να προσδιοριστεί ο συνολικός βαθμός απόδοσης μίας σύγχρονης γεννήτριας για διάφορα επίπεδα ισχύος εξόδου για ένα συγκεκριμένο συντελεστή ισχύος και τάση ακροδεκτών, χωρίς περιορισμούς στο τύλιγμα διέγερσης, ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- Υπολογίζεται η ένταση ηλεκτρικού ρεύματος του στάτη από τη σχέση (9.38) ως εξής:

$$\tilde{I}_a = \frac{P_{gen}}{3 \cdot \tilde{E}_a \cdot \cos\varphi} \quad (9.44)$$

- Υπολογίζεται από τη σχέση (9.28) η ηλεκτρεγερτική δύναμη σε σχέση με την επαγωγική αντίδραση του εγκάρσιου άξονα q θεωρώντας ως διάνυσμα αναφοράς την τάση ακροδεκτών εξόδου, δηλαδή:

$$\hat{E}_q = \hat{E}_a + (R_s + j \cdot X_q) \cdot \hat{I}_a \text{ με } \hat{E}_a = \tilde{E}_a \angle 0^\circ, \hat{I}_a = \tilde{I}_a \angle -\varphi, \hat{E}_q = \tilde{E}_q \angle \delta \quad (9.45)$$

- Υπολογίζεται η γωνία θ_0 από τη σχέση (9.33) και ακολούθως η ένταση ηλεκτρικού ρεύματος του άξονα d από τη σχέση (9.22) και η τάση ανοικτοκύκλωσης E_i από τη σχέση (9.30).
- Επαληθεύεται η ισχύς εξόδου από τη σχέση (9.39), υπολογίζονται όλα τα είδη απωλειών από τις σχέσεις (9.41) ως (9.43) και τελικά η απόδοση και η ισχύς εισόδου από τη σχέση (9.40).

9.3 Προσδιορισμός απόδοσης μετασχηματιστή

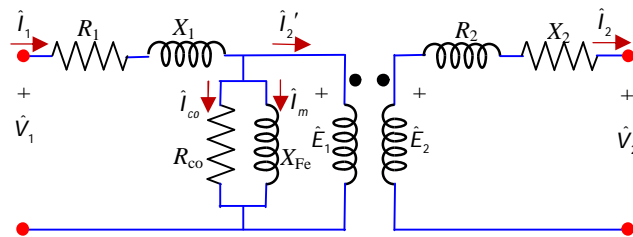
Συνολικά, για να προσδιοριστεί ο συνολικός βαθμός απόδοσης μίας σύγχρονης γεννήτριας για διάφορα επίπεδα ισχύος εξόδου για ένα συγκεκριμένο συντελεστή ισχύος και τάση ακροδεκτών, χωρίς περιορισμούς στο τύλιγμα διέγερσης, ακολουθούνται τα εξής βήματα:

Κατά τη μελέτη της απόδοσης ενός τριφασικού μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Οι κλάδοι των τυλιγμάτων, των απωλειών πυρήνα και της μαγνήτισης θεωρούνται σύμφωνα με το σχήμα 9.3, όπου R_1 είναι η αντίσταση του πρωτεύοντος τυλίγματος, X_1 η επαγωγική αντίδραση του πρωτεύοντος τυλίγματος, R_2 η αντίσταση του δευτε-

ρεύοντος τυλίγματος, X_2 η επαγωγική αντίδραση του δευτερεύοντος τυλίγματος, R_{co} η αντίσταση του κλάδου απωλειών πυρήνα, X_{Fe} η επαγωγική αντίδραση του κλάδου μαγνήτισης και a ο λόγος μετασχηματισμού. Τα υπόλοιπα μεγέθη φαίνονται στο σχήμα 9.3.

- Το πρωτεύον τυλίγμα θεωρείται ότι είναι το τυλίγμα τροφοδοσίας από την πλευρά της γεννήτριας, π.χ. \hat{V}_1 είναι ίσο με \hat{E}_a , ενώ το δευτερεύον τυλίγμα συνδέεται με το δίκτυο διανομής, π.χ. \hat{V}_2 είναι ίσο με \hat{V}_{grid} .
- Τα φαινόμενα κορεσμού παραλείπονται.
- Η συνδεσμολογία τυλιγμάτων είναι τρίγωνο/τρίγωνο ή τρίγωνο/αστέρα, ώστε να περιορίζονται τα φαινόμενα αρμονικών.



Σχήμα 9.3: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού μετασχηματιστή.

Οι αντίστοιχες κυκλωματικές σχέσεις (που προκύπτουν από τους νόμους του Kirchhoff) είναι οι ακόλουθες:

$$\hat{E}_2 = \hat{V}_2 + (R_2 + j \cdot X_2) \cdot \hat{I}_2 \quad (9.46)$$

$$\hat{E}_1 = a \cdot \hat{E}_2 \quad (9.47)$$

$$\hat{I}_2' = \hat{I}_2 / a \quad (9.48)$$

$$\hat{I}_{co} = \frac{\hat{E}_1}{R_{co}} \quad (9.49)$$

$$\hat{I}_m = \frac{\hat{E}_1}{j \cdot X_{Fe}} \quad (9.50)$$

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2' + \hat{I}_{co} + \hat{I}_m \quad (9.51)$$

$$\hat{V}_1 = \hat{E}_1 + (R_1 + j \cdot X_1) \cdot \hat{I}_1 \quad (9.52)$$

Η απόδοση του μετασχηματιστή είναι ίση με:

$$\eta_{tr} = \frac{P_{tr}}{P_{gen}} = \frac{P_{tr}}{P_{tr} + P_{Fe-tr} + P_{Cu-tr}} \quad (9.53)$$

όπου P_{gen} είναι η ισχύς εισόδου από την πλευρά γεννήτριας, καλύπτοντας όλα τα είδη απωλειών (επιπρόσθετα της ισχύος εξόδου του μετασχηματιστή P_{tr}), περιλαμβάνοντας τα εξής:

- Τις απώλειες πυρήνα P_{Fe-tr} , οι οποίες εξαρτώνται από τις απώλειες πυρήνα κατά τη δοκιμή ανοικτοκύκλωσης $P_{Fe-tr-OC}$ με την ηλεκτρεγερτική δύναμη πρωτεύοντος E_{1-OC} , διορθωμένες από την πραγματικά εφαρμοζόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη πρωτεύοντος τυλίγματος E_1 για κάθε επίπεδο φόρτισης (χωρίς την ύπαρξη φαινομένων κορεσμού), με τη βοήθεια ενός εκθετικού παράγοντα n_1 (ο οποίος λαμβάνει τιμές από την περιοχή [1,5 έως 2,5]):

$$P_{Fe-tr} \approx P_{Fe-tr-OC} \cdot \left(\frac{E_1}{E_{1-OC}} \right)^{n_1} = 3 \cdot I_{Co}^2 \cdot R_{Co} \quad (9.54)$$

- Τις απώλειες χαλκού πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος P_{Cu-tr} , θεωρώντας σε πρώτη εκτίμηση τις τιμές των αντιστάσεων σταθερές, ανεξάρτητες από τη θερμοκρασία:

$$P_{Cu-tr} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 + 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (9.55)$$

9.4 Πρακτική εφαρμογή

Έστω ένας υδροηλεκτρικός σταθμός με έναν υδροστρόβιλο, που μπορεί να είναι είτε Francis, είτε Pelton. Επιλέχθηκαν αυτοί οι δύο τύποι, διότι είναι οι πιο συνηθισμένοι σε ελλαδικό χώρο και παρουσιάζουν διαφοροποίηση τόσο σε βαθμό απόδοσης, όσο και σε εύρος παροχών. Η παραγόμενη μηχανική ισχύς του υδροστροβίλου P_{hydro} είναι ίση με:

$$P_{hydro}(q) = \eta(q) \cdot \gamma \cdot q \cdot (H_{gr} - H_{loss}(q)) \quad (9.56)$$

όπου γ είναι το ειδικό βάρος ($\gamma = 9,784 \text{ N/m}^3$), q είναι παροχή στροβίλου (με ονομαστική παροχή q_{nom} ίση με $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$, ελάχιστο $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ για Francis και $0,124 \text{ m}^3/\text{s}$ για Pelton, μέγιστο $0,92 \text{ m}^3/\text{s}$ για Francis ή Pelton), H_{gr} το διαθέσιμο μεικτό ύψος (ίσο με 148 m για Francis και 146 m για Pelton), H_{loss} το υδραυλικό ύψος (ίσο με $7,40 \text{ m}$ για την ονομαστική παροχή q_{nom} και είναι ανάλογες του τετραγώνου της παροχής), και η ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου, εκφρασμένη ως πολυωνύμο δευτέρου βαθμού για το επιτρεπτό εύρος λειτουργίας παροχών με τη βοήθεια της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων:

$$\text{Francis: } \eta(q) = 0,4339 + 0,9302 \cdot \frac{q}{q_{nom}} - 0,4403 \cdot \left(\frac{q}{q_{nom}} \right)^2 \quad (9.57)$$

$$\text{Pelton: } \eta(q) = 0,5751 + 0,7395 \cdot \frac{q}{q_{nom}} - 0,4147 \cdot \left(\frac{q}{q_{nom}} \right)^2 \quad (9.58)$$

Στην περίπτωση του στροβίλου Francis η ονομαστική ισχύς είναι $1.019,0 \text{ kW}$ με εύρος λειτουργίας από $452,3 \text{ kW}$ (για παροχή $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$) ως $1.148,9 \text{ kW}$ (για παροχή $0,92 \text{ m}^3/\text{s}$). Στην περίπτωση του στροβίλου Pelton η ονομαστική ισχύς είναι $978,6 \text{ kW}$ με εύρος λειτουργίας από $120,54 \text{ kW}$ (για παροχή $0,124 \text{ m}^3/\text{s}$) ως $1.077,9 \text{ kW}$ (για παροχή $0,92 \text{ m}^3/\text{s}$). Αν θεωρηθεί και στις δύο περιπτώσεις ότι ο συντελεστής ισχύος στην έξοδο του μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού είναι $0,8$ επαγωγικός, τότε και στις δύο περιπτώ-

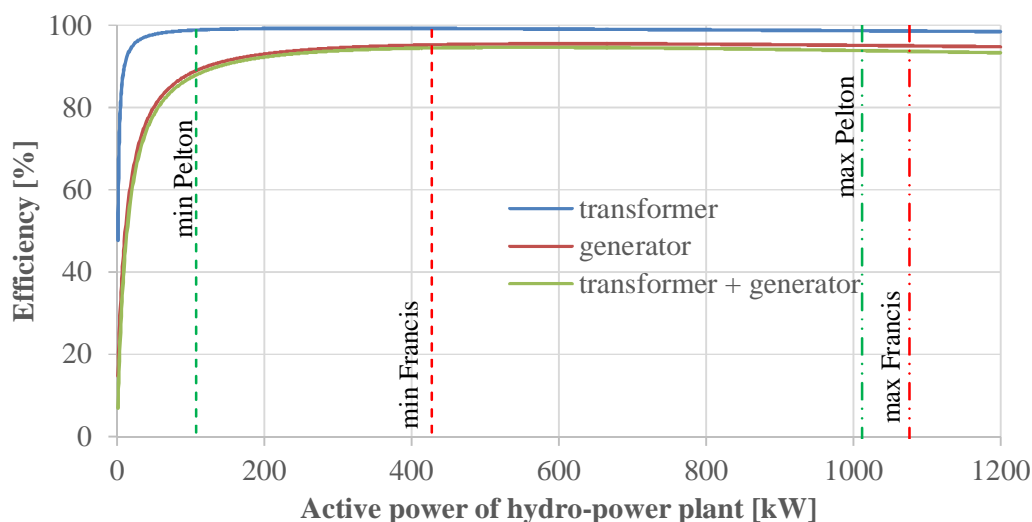
σεις επιλέγεται ενδεικτικά μία τριφασική σύγχρονη γεννήτρια εκτύπων πόλων μοντέλο S630 από τη Marelli, 10 πόλων, ονομαστικής φαινόμενης ισχύος 1.210 kVA, ονομαστικής ενεργού ισχύος 968 kW, ονομαστικής τάσης 400 V, ονομαστικής συχνότητας 50 Hz, σύγχρονης αντίδρασης του ευθέως άξονα $X_d = 1,0 \text{ p.u.}$, σύγχρονης αντίδρασης εγκάρσιου άξονα $X_d = 0,6 \text{ p.u.}$, αντίστασης τυλίγματος στάτη 0,02 p.u., απωλειών πυρήνα κατά τη διάρκεια δοκιμής βραχυκυκλώματος 5.808 W, απωλειών χαλκού δρομέα (μαζί με τη διεγέρτρια κατά τη διάρκεια δοκιμής ανοικτοκυκλώματος) 3.872 W, πρόσθετων απωλειών γεννήτριας 1.936 W. Αντίστοιχα επιλέγεται ένας τριφασικός μετασχηματιστής τύπου ελαίου μοντέλο MINERA από τη Schneider Electric, ονομαστικής τάσης πρωτεύοντος 410 V, ονομαστικής τάσης δευτερεύοντος 20 kV, ονομαστικής φαινόμενης ισχύος 1.250 kVA, επαγωγικής αντίδρασης υπό συνθήκες βραχυκύκλωσης 0,06 p.u., ρεύματος διέγερσης 0,02 p.u., απωλειών πυρήνα στο 1.092,5 W, απωλειών χαλκού υπό συνθήκες φορτίου (στους 75 °C) ίσο με 12.100 W.

Στο σχήμα 9.4 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των αποδόσεων για τον μετασχηματιστή, τη γεννήτρια και το σύστημα μετασχηματιστή και γεννήτριας σε συνάρτηση με την πραγματική ισχύ εξόδου του υδροηλεκτρικού σταθμού για τις δύο περιπτώσεις στροβίλων. Οπτικά φαίνεται μία σταθερή συμπεριφορά για την περίπτωση του στροβίλου Francis, ενώ για το Pelton υπάρχει μία απόκλιση στις χαμηλές ισχύες που αντιστοιχούν σε χαμηλές παροχές.

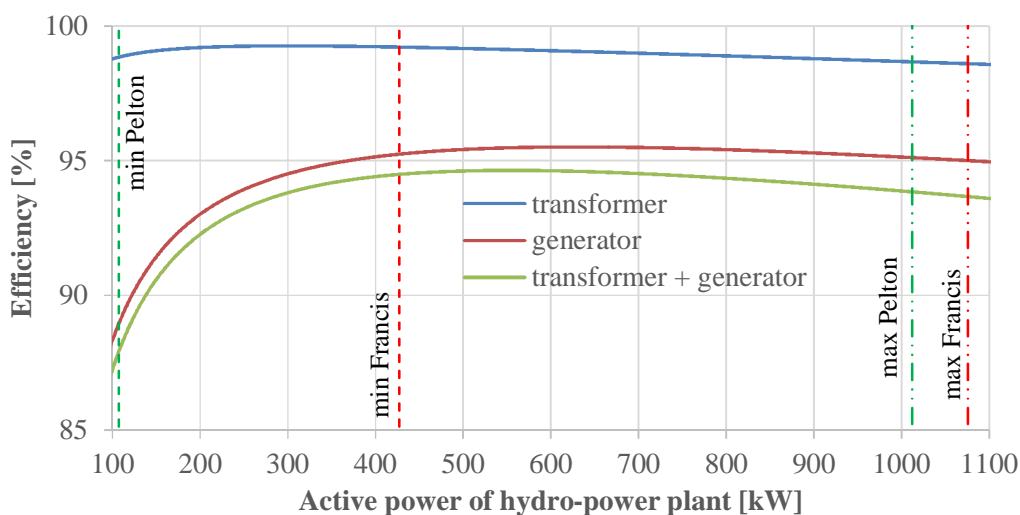
Ειδικότερα διαπιστώνεται ότι για τον μετασχηματιστή η ονομαστική απόδοσή του είναι 98,677 % (για τυπική τιμή ενεργού ισχύος εξόδου 1.000 kW) με μέγιστη τιμή 99,257 % (για ενεργό ισχύ εξόδου 301 kW). Για τιμές ισχύος άνω των 48 kW η απόδοση είναι 97,69 % και άνω (αντιστοιχεί στο 99 % της ονομαστικής απόδοσης). Επίσης η απόδοση είναι ανώτερη της αντίστοιχης ονομαστικής για εύρος ισχύος εξόδου από 90 kW ως 1.000 kW. Δηλαδή από πλευράς κάτω ορίου ισχύος δεν υπάρχει πρόβλημα ούτε για τον στροβίλο Pelton, παρά το γεγονός ότι λειτουργεί με κάτω όριο παροχής 15 % παράγοντας 107 kW. Ενώ πάνω από τα 1.000 kW ως το μέγιστο όριο παραγωγής ισχύος από πλευράς Francis (1.076 kW) επιτυγχάνεται απόδοση 98,595 %, μόλις 0,041 % μικρότερη της ονομαστικής. Δηλαδή πρακτικά για τον μετασχηματιστή χρησιμοποιείται χωρίς σημαντικό σφάλμα ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή.

Για τη γεννήτρια η ονομαστική απόδοσή της είναι 95,132 % (για τυπική τιμή ενεργού ισχύος εξόδου 1.000 kW) με μέγιστη τιμή 95,507 % (για ενεργό ισχύ εξόδου 631 kW). Για τιμές ισχύος άνω των 269 kW η απόδοση είναι 94,18 % και άνω (αντιστοιχεί στο 99 % της ονομαστικής απόδοσης). Επίσης η απόδοση είναι ανώτερη της αντίστοιχης ονομαστικής για εύρος ισχύος εξόδου από 398 kW ως 1.000 kW. Δηλαδή για το κάτω όριο παραγωγής ισχύος στην περίπτωση στροβίλου Pelton υπάρχει μία σημαντική απόκλιση απόδοσης, καθώς για παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ 105,85 kW σε σχέση με την προσφερόμενη ισχύ των 120,54 kW ο βαθμός απόδοσης ανέρχεται σε 88,853 %, έναντι του ονομαστικού, διαπιστώνοντας σημαντική απόκλιση της τάξης 6,279 %. Αντίθετα για το κάτω όριο ισχύος για το στροβίλο Francis η απόδοση της γεννήτριας είναι ανώτερη της αντίστοιχης ονομαστικής. Ενώ πάνω από τα 1.000 kW ως το μέγιστο όριο παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από πλευράς Francis (1.076 kW έναντι της προσφερόμενης ισχύος

1.148,93 kW) επιτυγχάνεται απόδοση 95,001 %, μόλις 0,131 % μικρότερη της ονομαστικής. Συνεπώς για τη γεννήτρια χρειάζεται ιδιαίτερη μέριμνα. Διότι στην περίπτωση χρήσης στροβίλου Francis ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας (95,132 %) κυμαίνεται σε περιορισμένο εύρος γύρω από την ονομαστική απόδοσή της [95,001 %, 95,507 %]. Αντίθετα για την περίπτωση στροβίλου Pelton υπάρχει σημαντική απόκλιση για τις μικρές ισχύες, οπότε δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερή η απόδοση της γεννήτριας, ειδικά για μικρές παροχές, που αντιστοιχούν σε ισχύ εξόδου σταθμού μικρότερη των 269 kW ή σε ισχύ στροβίλου μικρότερη των 287,8 kW που αντιστοιχεί σε 0,262 m³/s ή στο 32,75 % της ονομαστικής παροχής.



(α)



(β)

Σχήμα 9.4: Απόδοση μετασχηματιστή, γεννήτριας, συστήματος μετασχηματιστή –γεννήτριας για τον υπό μελέτη υδροηλεκτρικό σταθμό ενός στροβίλου με χρήση στροβίλου Francis ή Pelton: (α) πλήρες διάγραμμα, (β) μεγέθυνση.

Αν μελετηθεί το σύστημα μετασχηματιστή-γεννήτριας η ονομαστική απόδοσή του είναι 93,874 % (για τυπική τιμή ενεργού ισχύος εξόδου 1.000 kW) με μέγιστη τιμή 94,637

% (για ενεργό ισχύ εξόδου 555 kW). Για τιμές ισχύος άνω των 232 kW η απόδοση είναι 92,935 % και άνω (αντιστοιχεί στο 99 % της ονομαστικής απόδοσης). Επίσης η απόδοση είναι ανώτερη της αντίστοιχης ονομαστικής για εύρος ισχύος εξόδου από 307 kW ως 1.000 kW. Δηλαδή για το κάτω όριο παραγωγής ισχύος στην περίπτωση στροβίλου Pelton υπάρχει μία σημαντική απόκλιση απόδοσης, καθώς για παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ 105,85 kW ο βαθμός απόδοσης ανέρχεται σε 87,815 %, έναντι του ονομαστικού, διαπιστώνοντας σημαντική απόκλιση της τάξης 6,059 %. Αντίθετα για το κάτω όριο ισχύος για τον στροβίλο Francis η απόδοση του συστήματος είναι ανώτερη της αντίστοιχης ονομαστικής. Ενώ πάνω από τα 1.000 kW ως το μέγιστο όριο παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από πλευράς Francis (1.076,14 kW) επιτυγχάνεται απόδοση 93,667 %, μόλις 0,207 % μικρότερη της ονομαστικής. Συνεπώς για το σύστημα γεννήτριας - μετασχηματιστή χρειάζεται ιδιαίτερη μέριμνα. Διότι στην περίπτωση χρήσης στροβίλου Francis ο βαθμός απόδοσης του συστήματος (93,874 %) κυμαίνεται σε περιορισμένο εύρος γύρω από την ονομαστική απόδοσή της [93,667 %, 94,637 %]. Αντίθετα για την περίπτωση στροβίλου Pelton υπάρχει σημαντική απόκλιση για τις μικρές ισχύες, οπότε δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερή η απόδοση της γεννήτριας, ειδικά για μικρές παροχές, που αντιστοιχούν σε ισχύ εξόδου σταθμού μικρότερη των 232 kW ή σε ισχύ στροβίλου μικρότερη των 249,6 kW που αντιστοιχεί σε 0,232 m³/s ή στο 29 % της ονομαστικής παροχής.

Ακολούθως ορίζεται το σφάλμα μεταξύ παραγωγής ισχύος από πλευράς γεννήτριας e_{gen} και από πλευράς μετασχηματιστή e_{tr} μεταξύ των ισχύων P_{gen} και P_{tr} που υπολογίζονται από τις παραγράφους 9.2 και 9.3 και εκείνων που θα προσδιορίζονταν με σταθερούς ονομαστικούς βαθμούς απόδοσης P_{gen}' και P_{tr}' αντίστοιχα:

$$e_{gen} = P_{gen} - P_{gen}' \quad (9.59)$$

$$e_{tr} = P_{tr} - P_{tr}' \quad (9.60)$$

Στο σχήμα 9.5 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αντίστοιχα αποτελέσματα, όπου τα σφάλματα περιορίζονται μεταξύ τιμών -12 kW ως +5 kW. Ειδικά στην περιοχή ενδιαφέροντος τα σφάλματα είναι ακόμη πιο περιορισμένα. Για τον μετασχηματιστή κυμαίνονται από -7,30 kW (για το ελάχιστο όριο λειτουργίας του Pelton) ως τα 4,9 kW (για παραγόμενη ισχύ 654 kW περίπου). Αντίστοιχα για τη γεννήτρια κυμαίνονται από -7,56 kW (για το ελάχιστο όριο λειτουργίας του Pelton) ως τα 4,9 kW (για παραγόμενη ισχύ 699 kW περίπου). Μηδενικές τιμές σφάλματος λαμβάνονται στην ονομαστική ενεργό ισχύ λειτουργίας μετασχηματιστή / γεννήτριας, όπως αναμενόταν άλλωστε.

Έπειτα ορίζεται το εκατοστιαίο σφάλμα μεταξύ παραγωγής ισχύος από πλευράς γεννήτριας PE_{gen} και από πλευράς μετασχηματιστή PE_{tr} μεταξύ των ισχύων P_{gen} και P_{tr} που υπολογίζονται από τις παραγράφους 9.2 και 9.3 και εκείνων που θα προσδιορίζονταν με σταθερούς ονομαστικούς βαθμούς απόδοσης P_{gen}' και P_{tr}' αντίστοιχα:

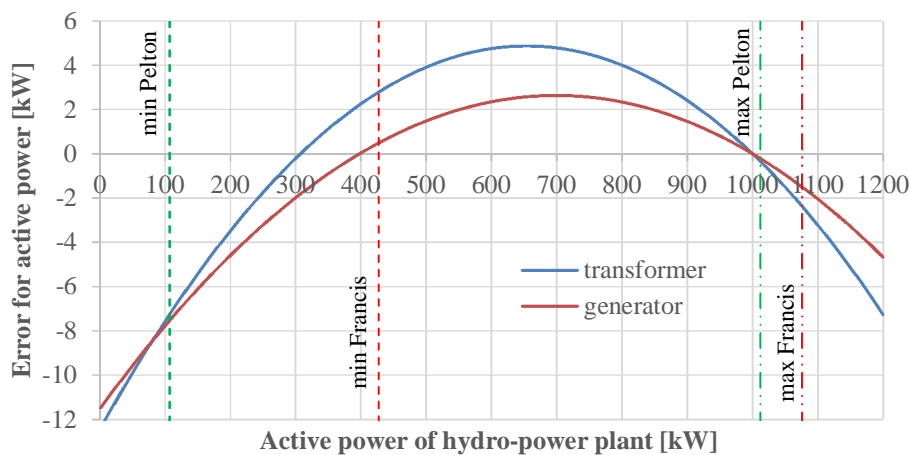
$$PE_{gen} = \frac{P_{gen} - P_{gen}'}{P_{gen}} \cdot 100\% \quad (9.61)$$

$$PE_{tr} = \frac{P_{tr} - P_{tr}'}{P_{tr}} \cdot 100\% \quad (9.62)$$

Στο σχήμα 9.6 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αντίστοιχα αποτελέσματα, όπου τα εκατοστιαία σφάλματα εκτείνονται σε πολύ μεγάλες τιμές για πολύ μικρές ισχύες, οι οποίες αντιστοιχούν σε μη λειτουργικές καταστάσεις. Ειδικά στην περιοχή ενδιαφέροντος τα εκατοστιαία σφάλματα είναι πολύ περιορισμένα, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.6β υπό μεγένθυση. Για τον μετασχηματιστή κυμαίνονται από -6,88% (για το ελάχιστο όριο λειτουργίας του Pelton) ως τα +0,807% (για παραγόμενη ισχύ 555 kW περίπου). Αντίστοιχα για τη γεννήτρια κυμαίνονται από -7,05% (για το ελάχιστο όριο λειτουργίας του Pelton) ως τα +0,393% (για παραγόμενη ισχύ 630 kW περίπου). Δηλαδή τα μέγιστα των εκατοστιαίων σφαλμάτων δεν παρατηρούνται στις ίδιες τιμές με τα σφάλματα των σχέσεων (9.59) και (9.60). Μηδενικές τιμές εκατοστιαίου σφάλματος λαμβάνονται στην ονομαστική ενεργό ισχύ λειτουργίας μετασχηματιστή / γεννήτριας, όπως αναμενόταν άλλωστε.

Στη συνέχεια υπολογίζεται για ομοιόμορφη και τριγωνική κατανομή πιθανότητας για παροχή από 0 ως 1,5 m³/s (οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 9.7) η ισοδύναμη ετήσια παραγόμενη ενέργεια σύμφωνα με:

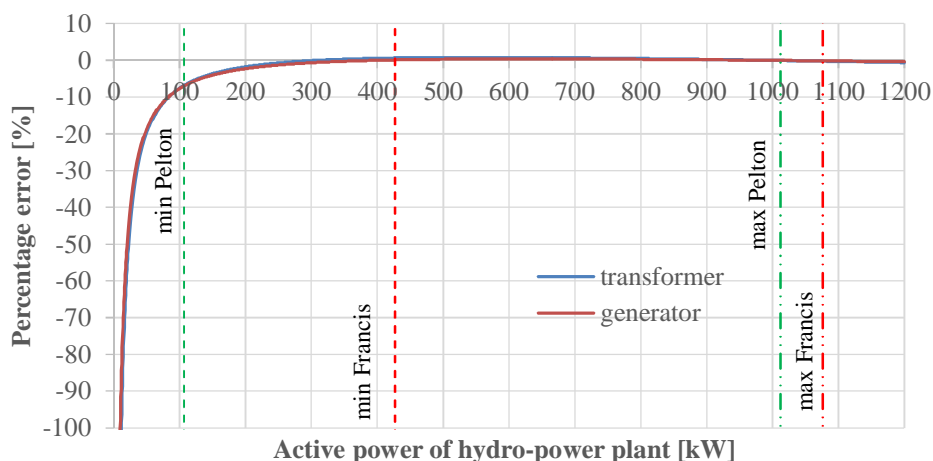
$$E = \int_0^{8760h} \eta_{gen}(P_{hydro}) \cdot \eta_{tr}(P_{hydro}) \cdot P_{hydro}(q(t)) \cdot dt \quad (9.63)$$



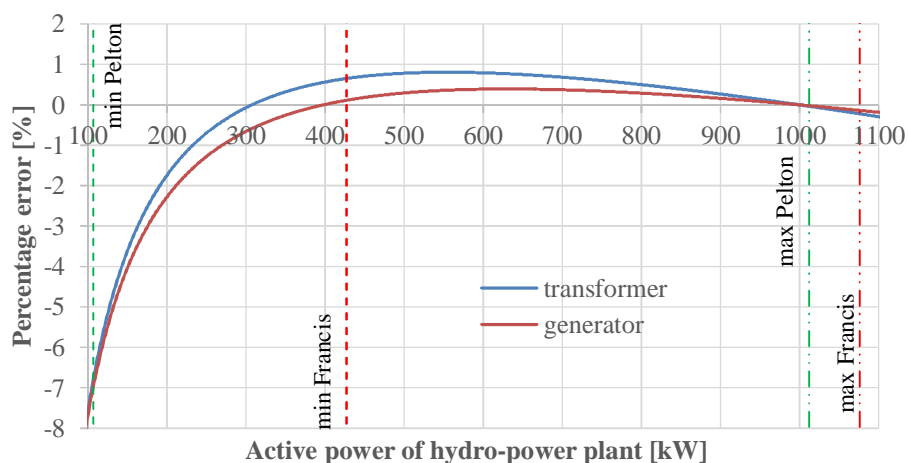
Σχήμα 9.5: Σφάλμα ενεργού ισχύος κατά τον υπολογισμό παραγόμενων ισχύων από μετασχηματιστή και γεννήτρια, για τον υπό μελέτη υδροηλεκτρικό σταθμό ενός στροβίλου με χρήση στροβίλου Francis or Pelton.

Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται τόσο για σταθερές αποδόσεις γεννήτριας-μετασχηματιστή (ίσες με ονομαστικές), όσο και για μεταβλητές αποδόσεις (όπως υπολογίζονται από τις παραγράφους 9.2 και 9.3) και τα αντίστοιχα αποτελέσματα καταγράφονται σε πίνακα 9.1. Από τον τελευταίο φαίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις το σφάλμα από πλευράς υπολογισμών ενέργειας περιορίζεται κάτω 0,2%, με τα μεγαλύτερα σφάλματα να εντοπίζονται στην τριγωνική συνάρτηση κατανομή πιθανότητας. Βέβαια σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν είναι από την ασφαλή πλευρά, καθώς η θεώ-

ρηση σταθερών αποδόσεων οδηγεί σε μικρότερα / πιο απαισιόδοξα αποτελέσματα από πλευράς παραγόμενης ενέργειας.

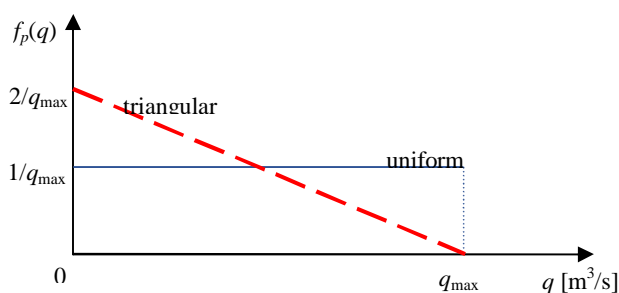


(α)



(β)

Σχήμα 9.6: Εκατοστιαίο σφάλμα ενεργού ισχύος κατά τον υπολογισμό παραγόμενων ισχύων από μετασχηματιστή και γεννήτρια, για τον υπό μελέτη υδροηλεκτρικό σταθμό ενός στροβίλου με χρήση στροβίλου Francis ή Pelton: (α) πλήρες διάγραμμα, (β) μεγέθυνση.



Σχήμα 9.7: Κατανομή πιθανότητας παροχής νερού κατά τη διάρκεια του έτους, όπου $f_p(q)$ είναι η συνάρτηση της πυκνότητας πιθανότητας, q_{max} η μέγιστη παροχή νερού (= 1,5 m³/s).

Πίνακας 9.1

Υπολογισμός Ετήσιας Παραγόμενης Ενέργειας για Διαφορετικά Είδη Στροβίλων (Francis, Pelton), για Διαφορετικές Κατανομές Πιθανότητας (Ομοιόμορφη, Τριγωνική) με Σταθερές ή Μεταβλητές Αποδόσεις Γεννήτριας-Μετασχηματιστή

Κατανομή Πιθανότητας	Ομοιόμορφη		Τριγωνική	
	Francis	Pelton	Francis	Pelton
Είδος στροβίλου				
Παραγόμενη ενέργεια με βάση τις αποδόσεις των παραγράφων 9.2 και 9.3 [kWh]	6.012.648	6.184.380	3.949.168	4.532.963
Παραγόμενη ενέργεια με βάση τις ονομαστικές αποδόσεις [kWh]	6.011.855	6.178.069	3.941.484	4.526.374
Διαφορά ενέργειας [kWh]	792,32	6.310,11	7.683,61	6.588,35
Ποσοστιαία διαφορά [%]	0,013	0,102	0,194	0,144

9.5 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού μελετήθηκε η επίδραση της χρήσης σταθερών αποδόσεων για τις γεννήτριες και τους μετασχηματιστές έναντι των πραγματικών μεταβλητών αποδόσεων που λαμβάνουν υπόψη τους τη μεταβολή των απωλειών χαλκού και πυρήνα ανάλογα με τον βαθμό φόρτισης της γεννήτριας και του μετασχηματιστή. Ειδικότερα η απόδοση του μετασχηματιστή μεταβάλλεται αρκετά περιορισμένα μέσα στα συνήθη όρια λειτουργίας στροβίλων, π.χ. Francis, Pelton. Αντίθετα η απόδοση της γεννήτριας μεταβάλλεται έντονα σε χαμηλές φορτίσεις των υδροστροβίλων (ιδιαίτερα στο Pelton). Ο συνδυασμός και των δύο συντελεστών απόδοσης μαζί αμβλύνει ελαφρώς τις έντονες διακυμάνσεις. Ενεργειακά το σφάλμα μπορεί να θεωρηθεί σχετικά μικρό της τάξης του 0,2%, αλλά επηρεάζεται σημαντικά από τη μορφή της κατανομής πιθανότητας της παροχής ύδατος στον υδροστρόβιλο. Συνεπώς χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η μεταβλητή απόδοση των γεννητριών (και δευτερευόντως των μετασχηματιστών) στην περίπτωση μεγάλων τιμών της συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της παροχής ύδατος για τιμές παροχής ύδατος που αντιστοιχούν σε χαμηλές φορτίσεις του υδροστροβίλου (όπως στον Pelton), καθώς και όταν χρειάζεται αυξημένη μαθηματική ακρίβεια στην παραγόμενη ενέργεια, π.χ. αν ο υδροηλεκτρικός σταθμός συμμετέχει στο χρηματιστήριο ηλεκτρικής ενέργειας.

10.1 Βασικά συμπεράσματα της εργασίας

Από την προκαταρκτική μελέτη που πραγματοποιήθηκε και αφορά το μικρό υδροηλεκτρικό έργο προέκυψαν τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας για την οποία ζητείται η βελτιστοποιημένη σχεδίασης:

- Σύγχρονη γεννήτρια έκτυπων πόλων, τριφασικής εναλλασσόμενης τάσης συχνότητας ίσης με 50 Hz,
- Σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής ίση με 600 R.P.M. για άμεση ζεύξη με υδροστρόβιλο χωρίς την παρεμβολή κιβωτίου μετάδοσης. Αυτή αντιστοιχεί σε διαμόρφωση δεκά πόλων.
- Ονομαστική πολική τάση της τάξης μεγέθους ίσης ή μεγαλύτερης των 400 V.
- Παραγόμενη ονομαστική ενεργός ισχύς εξόδου ίση με 1236 kW με δυνατότητα υπερφόρτισης ως 12% επί της ονομαστικής ενεργού ισχύος (1385 kW),
- Φαινόμενη ονομαστική ισχύς τουλάχιστον 1420 kVA για επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0,871, αλλά με αρχικό στόχο 1545 kVA με επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0,80,
- Ροπή αδρανείας δρομέα 260 kg/m² τουλάχιστον, για να βοηθήσει την ευσταθή λειτουργία του συστήματος αυτομάτου ελέγχου,
- Βάρος μικρότερο των 9.500 kp, για να είναι φθηνότερο από τις υπάρχουσες τυποποιημένες μηχανές,
- Ονομαστικό βαθμό απόδοσης 96,80% τουλάχιστον και σχεδόν επιπεδοποιημένη καμπύλη απόδοσης (άνω του 70% για φορτίση μηχανής 20% και κάτω), για να είναι ισάξια ή καλύτερη από τις υπάρχουσες τυποποιημένες μηχανές,
- μέγιστη ταχύτητα μηχανικής περιστροφής 960 Σ.Α.Λ. λόγω αναπτυσσόμενης ταχύτητας φυγής +60% της ονομαστικής,
- Συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του στάτη κατά αστέρα με γειωμένο ουδέτερο μέσω κατάλληλης σύνθετης αντίστασης.

Κατά την προκαταρκτική σχεδίαση της σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων υιοθετήθηκαν οι ακόλουθες προδιαγραφές:

- Σύγχρονη τριφασική γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης και συχνότητας 50 Hz.
- Ταχύτητα περιστροφής ίση με 600 R.P.M. και άμεση ζεύξη του άξονα της με τον υδροστρόβιλο χωρίς παρεμβολή κιβωτίου μετάδοσης προκειμένου, η διάταξη να διαθέτει αυξημένη αξιοπιστία. Από αυτή καθώς και από τη συχνότητα της τάσης εξόδου προκύπτει ότι ο δρομέας θα εφοδιαστεί με δέκα έκτυπους πόλους.

- Ονομαστική πολική τάση ίση με 690 V και σύνδεση των τυλιγμάτων του στάτη κατά αστέρα.
- Ονομαστική φαινομένη ισχύ ίση με 1482,5 kVA με επαγωγικό συντελεστή ισχύος ίσο με 0,85
- Παραγόμενη ονομαστική πραγματική ισχύ 1260 kW με δυνατότητα υπερφόρτισης έως 11,5 % επί της παραγόμενης πραγματικής ισχύος (1405 kW).

Από την προκαταρκτική σχεδίαση της γεννήτριας προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Υιοθετείται το υλικό με κωδικοποίηση M-43 για την κατασκευή του πυρήνα της γεννήτριας. Αυτό το υλικό διαθέτει δυνατότητα μαγνητικής φόρτισης για τιμές έως και $B = 2,3 \text{ Wb/m}^2$. Επομένως, δίνεται η δυνατότητα προσωρινής υπερφόρτισης της για την εκμετάλλευση μεγαλύτερης παροχής από το υδατόρευμα.
- Η κατασκευή του τυλίγματος διέγερσης προτείνεται να πραγματοποιηθεί με χρήση αγωγών παραλληλόγραμμης διατομής (μπάρες). Αυτή υιοθετείται για να επιτευχθεί η βέλτιστη εκμετάλλευση του χώρου που διατίθεται για την τοποθέτηση των πηνίων πάνω στον πυρήνα του κορμού έκαστου πόλου. Επιπρόσθετα η χρήση αγωγών παραλληλόγραμμης διατομής έχει ως συνέπεια τη μείωση της αντίστασης του τυλίγματος διέγερσης, τη μείωση των απωλειών χαλκού του δρομέα και την επίτευξη υψηλότερου βαθμού απόδοσης από τη γεννήτρια.
- Προτείνεται η κατασκευή των τυλιγμάτων του στάτη να πραγματοποιηθεί με αγωγούς κυκλικής διατομής. Για να επιτευχθεί η αναγκαία διατομή το τύλιγμα πρέπει να διαθέτει μικτή συνδεσμολογία η οποία αποτελείται από πέντε παράλληλους κλάδους ανά φάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου και του κόστους κατασκευής του συγκεκριμένου τυλίγματος.
- Η αναγκαία διατομή του αγωγού που θα χρησιμοποιηθεί απαιτεί τη χρήση 27 αγωγών – κλώνων με καθαρή διάμετρο 1,60 mm έκαστος.
- Λαμβάνεται μέριμνα ώστε να υπάρχουν περιθώρια συνεχούς υπερφόρτισης των τυλιγμάτων χωρίς να υπάρχει κίνδυνος καταστροφής τους. Αυτό διασφαλίζεται με την υιοθέτηση μονώσεων ανώτερης κλάσης (F, H) από την κλάση που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα διάφορα τμήματα της μηχανής (B).
- Ο πυρήνας των πόλων του δρομέα προτείνεται να κατασκευαστεί από ελάσματα τα οποία διαμορφώνονται κατάλληλα ως προς τη γεωμετρία τους.
- Προτείνεται η κατασκευή των πόλων του δρομέα να πραγματοποιηθεί με τη χρήση κατάλληλα διαμορφωμένων ελασμάτων. Κατά τη σχεδίαση έχει ληφθεί μέριμνα ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αφαίρεσης κάθε έκτυπου πόλου προκειμένου να επισκευαστεί το ηλεκτρικό (πηνίο) ή το μαγνητικό (λαμαρίνα) τμήμα του.
- Η διαδικασία προκαταρκτικής σχεδίασης της μηχανής με τη χρήση αναλυτικών σχέσεων ήταν λεπτομερής και ολοκληρωμένη.

Η επιβεβαίωση της προκαταρκτικής σχεδίασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων έχει επιτευχθεί, ενώ εμφανίστηκαν μικρές αποκλίσεις κατά τον προσδιορισμό ορισμένων παραμέτρων. Ενδεικτικά, μερικές από αυτές παρατίθενται στη συνέχεια:

➤ Η τιμή της μαγνητικής επαγωγής

1. Στις οδοντώσεις του στάτη υπολογίζεται από 1,5 έως 2,25 Wb/m^2 ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται $> 1,73 Wb/m^2$.
2. Στο ζύγωμα του στάτη υπολογίζεται από 1,035 έως 1,55 Wb/m^2 ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται από 1,07 έως 1,61 Wb/m^2 .
3. Στο κύριο σώμα του πόλου υπολογίζεται από 1,467 έως 1,55 Wb/m^2 ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται από 1,1 έως 1,76 Wb/m^2 .
4. Στο ζύγωμα του δρομέα υπολογίζεται από 1,294 έως 1,38 Wb/m^2 ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται από 1,07 έως 1,61 Wb/m^2 .

➤ Η τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου

1. Στις οδοντώσεις του στάτη υπολογίζεται από 781 έως 182000 At/m ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται 930 έως 230000 At/m .
2. Στο ζύγωμα του στάτη υπολογίζεται από 145 έως 487 At/m ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται από 200 έως 580 At/m .
3. Στο κύριο σώμα του πόλου υπολογίζεται από 150 έως 1914 At/m ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται από 180 έως 2200 At/m .
4. Στο ζύγωμα του δρομέα υπολογίζεται από 135 έως 275 At/m ανάλογα με τη φόρτιση της μηχανής, ενώ προσδιορίζεται από 180 έως 320 At/m .

➤ Η τιμή της πυκνότητας ρεύματος

1. Για την περιέλιξη του στάτη υπολογίζεται ίση με 4,6 A/mm^2 , ενώ προσδιορίζεται μεγαλύτερη από 2,95 $MA/m^2 = 2,95 A/mm^2$.
2. Για τα τυλίγματα των πόλων του δρομέα υπολογίζεται ίση με 4,4 A/mm^2 , ενώ προσδιορίζεται μεγαλύτερη από 2,95 $MA/m^2 = 2,95 A/mm^2$.

Η τιμή της πραγματικής ισχύος εξόδου υπολογίζεται ίση με 1260 kW , ενώ προσδιορίζεται ίση με 1320 kW .

Η βελτιστοποίηση της σχεδίασης με τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας έχει πραγματοποιηθεί και από αυτή παρατίθενται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ροπή και η ισχύς εξόδου της γεννήτριας επηρεάζονται περισσότερο από το μήκος του διακένου και από την εσωτερική διάμετρο του στάτη. Η δεύτερη αποτελεί μια από τις παραμέτρους εισόδου για τη μέθοδο βελτιστοποίησης της γεννήτριας.
- Επόμενη σημαντική παράμετρος για τη μεγιστοποίηση των παραμέτρων που έχουν προαναφερθεί αποτελεί ο λόγος του πολικού τόξου προς το πολικό βήμα K_f . Από αυτόν ρυθμίζεται το πλάτος του πέδιλου και κατ' επέκταση μεταβάλλονται ανάλογα

η ισχύς και η ροπή που αναπτύσσονται στο διάκενο. Αύξηση του προκαλεί την αύξηση της ροπής και της ισχύος στο διάκενο.

- Οι βασικές παράμετροι από τις οποίες επηρεάζονται τα μεγέθη των εξόδων της διαδικασίας βελτιστοποίησης που αφορούν την κυμάτωση της ροπής στο διάκενο και την ποιότητα ισχύος (κυματομορφές τάσεως εξόδου ανά φάση, αρμονικές, THD %) είναι:
 1. Το ύψος του πέδιλου του πόλου $h_{pole\ shoe}$
 2. Ο λόγος του πολικού τόξου προς το πολικό βήμα K_f
 3. Το άνοιγμα των αυλάκων του στάτη που προδιορίζεται από το συντελεστή *Slot opening* $Q_p\ ratio$
 4. Η βοηθητική παράμετρος από την οποία καθορίζεται η μορφή του πέδιλου του τραπεζοειδούς έκτυπου πόλου *aux coeff* 14 15 rotor.
- Ανάλογα με την ισχύ της μηχανής, το μήκος του διακένου και την εσωτερική διάμετρο του στάτη της πρέπει να προσδιοριστεί το ύψος του πέδιλου
- Στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτό προσδιορίστηκε από την προκαταρκτική σχεδίαση.
- Αύξηση του ύψους του πέδιλου $h_{pole\ shoe}$ πέραν ενός ορίου το οποίο διαφέρει ανάλογα με την περίπτωση προκαλεί αύξηση της κυμάτωσης των αρμονικών και του ολικού συντελεστή παραμόρφωσης THD %
- Το ίδιο συμβαίνει και για τις τιμές που λαμβάνουν η βοηθητική παραμέτρος *aux coeff* 14 15 rotor. Συγκεκριμένα, η αύξηση της τιμής της απομακρύνει τη μορφή του πέδιλου από εκείνη του τραπεζίου, αυξάνει τον όγκο του πυρήνα του πέδιλου και καταστέλλει μέχρι ενός ορίου τις αρμονικές.
- Γενική παρατήρηση για όλη τη διαδικασία βελτιστοποίησης αποτελεί το γεγονός ότι η μεγάλη πλειοψηφία των παραμέτρων της εξόδου εξαρτώνται ταυτόχρονα από περισσότερες από μια παραμέτρους των εισόδων της μεθόδου βελτιστοποίησης.
- Από την προαναφερθείσα γενική παρατήρηση διαπιστώνεται ότι η διαδικασία της βελτιστοποίησης διαχειρίζεται στην πράξη πεπλεγμένες συναρτήσεις πολλών μεταβλητών.
- Απόρροια της διαπίστωσης αυτής είναι η ανάγκη διερεύνησης και άλλων μεθόδων βελτιστοποίησης για τη διεξοδική μελέτη πεδιακών προβλημάτων σχεδίασης σύγχρονων γεννητριών έκτυπων πόλων.
- Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας επηρεάζεται από το σύνολο των παραμέτρων εισόδου που αναφέρονται στον πίνακα 8.1, ενώ τη μεγαλύτερη επίδραση σε αυτόν κατά σειρά παράθεσης έχουν:
- 5. Η εσωτερική διάμετρος του στάτη
- 6. Ο λόγος του πολικού τόξου προς το πολικό βήμα K_f

7. Η μορφή του έκτυπου πόλου που καθορίζεται από τη βοηθητική παράμετρο $aux\ coeff\ 14\ 15\ rotor$
8. Το άνοιγμα των αυλάκων του στάτη μέσω της παραμέτρου $Slot\ opening\ Q_p\ ratio$
 - Το συνολικό βάρος της γεννήτριας παραμένει εντός των ορίων. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη μεταβολή του συνολικού βάρους πυρήνα και στάτη της μηχανής η οποία παρατίθεται στο σχήμα 8.13 και εφόσον λάβουμε υπόψη ότι το βάρος του άξονα του δρομέα, των σφαιροτριβών ή των κουζινέτων που θα τοποθετηθούν καθώς και των καπακιών της μηχανής δεν ξεπερνά αθροιστικά τα $2000\ kg$ αυτό προκύπτει κατά προσέγγιση μικρότερο ή ίσο με $8700\ kg$ με όριο τα $9320\ kg$.

Έχει υλοποιηθεί η μελέτη αποδόσεων γεννητριών και μετασχηματιστών κατά τη μελέτη σχεδίασης ΜΥΗ σταθμού ροής με ένα υδροστρόβιλο. Στα πλαίσια μελετήθηκε:

- Η επίδραση χρήσης σταθερών αποδόσεων για τις γεννήτριες και τους μετασχηματιστές έναντι των πραγματικών μεταβλητών αποδόσεων που λαμβάνουν υπόψη τους ότι οι απώλειες χαλκού και πυρήνα μεταβάλλονται ανάλογα με τη φόρτιση τους όταν η λειτουργία τους δεν πραγματοποιείται υπό ονομαστικό φορτίο. Από τη μελέτη προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:
 1. Η απόδοση του μετασχηματιστή μεταβάλλεται αρκετά περιορισμένα μέσα στα συνήθη όρια λειτουργίας στροβίλων, π.χ. Francis, Pelton.
 2. Αντίθετα η απόδοση της γεννήτριας μεταβάλλεται έντονα σε χαμηλές φορτίσεις των υδροστροβίλων (ιδιαίτερα στο Pelton).
 3. Ο συνδυασμός και των δύο συντελεστών απόδοσης μαζί αμβλύνει ελαφρώς τις έντονες διακυμάνσεις
 4. Ενεργειακά το σφάλμα μπορεί να θεωρηθεί σχετικά μικρό της τάξης του 0,2%, αλλά επηρεάζεται σημαντικά από τη μορφή της κατανομής πιθανότητας της παροχής ύδατος στον υδροστρόβιλο.

Χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η μεταβλητή απόδοση των γεννητριών (και δευτερευόντως των μετασχηματιστών) στην περίπτωση μεγάλων τιμών της συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της παροχής ύδατος για τιμές παροχής ύδατος που αντιστοιχούν σε χαμηλές φορτίσεις του υδροστροβίλου (όπως στον Pelton), καθώς και όταν χρειάζεται αυξημένη μαθηματική ακρίβεια στην παραγόμενη ενέργεια, π.χ. αν ο υδροηλεκτρικός σταθμός συμμετέχει στο χρηματιστήριο ηλεκτρικής ενέργειας.

10.2 Περιοχές για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας αναδεικνύονται σημεία που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση. Αυτά παρατίθενται στη συνέχεια. Πρίν την παράθεση τους όμως θέλω να τονίσω ιδιαίτερα ότι τα θέματα αυτά σε καμμία περίπτωση δεν μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενα μεταπτυχιακών σπουδών εξαιτίας της ιδιαίτερης εξειδίκευσης και του εξεζητημένου μαθηματικού υπόβαθρου που απαιτούν. Κάθε ένα από αυτά θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο διδακτορικής διατριβής εάν και εφόσον κάποιος

είχε τη γνώση, την υπομονή και το χρόνο για να ασχοληθεί. Επιπρόσθετα είναι γνωστό ότι η έρευνα δεν καταλήγει πάντα στα επιθυμητά αποτελέσματα και πάντοτε εμπειρεύεται αβεβαιότητα στη θετική κατάληξη της.

- Εφαρμογή διαφορετικών ευρετικών μεθόδων βελτιστοποίησης στη σχεδίαση των ηλεκτρικών μηχανών όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, η τεχνική σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization), η τεχνική που βασίζεται στη συμπεριφορά αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony) και άλλες.
- Εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων βελτιστοποίησης όπως οι SPEA, SPEA II οι οποίες θα έχουν ως επακόλουθο τη δημιουργία χάρτη λύσεων και τη μετέπειτα επιλογή της βέλτιστης λύσης με κατάλληλο αλγόριθμο.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί ιδιαίτερα το γεγονός ότι οι ευρετικοί αλγόριθμοι σπάνια οδηγούν στην εύρεση ολικού ελάχιστου ή μέγιστου (global optimum) και εκεί υπάρχει η δυσκολία εύρεσης βέλτιστης λύσης.

- Εφαρμογή μοντέλων θερμικής ανάλυσης για τη σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών και σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα που προκύπτουν από την πεδιακή ανάλυση. Αυτή η ανάλυση εφαρμόζεται συμπληρωματικά σε ηλεκτρικές μηχανές μεγάλης ισχύος.
- Διερεύνηση της επίδρασης της καμπύλης διάρκειας παροχής του ΜΥΗΕ ως προς τη σχεδίαση της γεννήτριας για την βέλτιστη εκμετάλλευση του υδατορέματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

Βιβλιογραφία – Πηγές στην ελληνική γλώσσα

- [E1] Β.Κ. Παπαδιάς: «Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας Τόμος Ι Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας», Εκδόσεις Συμμετρίας, Αθήνα 1985.
- [E2] Γ. Ι. Τσεκούρας: «Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας και Ηλεκτρική Οικονομία», Σημειώσεις Μαθήματος ΤΕΙ Αθήνας Τμήμα Ενεργειακής Τεχνολογίας, Αθήνα. 2010
- [E3] Χάρτης Γραμμών Μεταφοράς / Α.Δ.Μ.Η.Ε.
<https://www.admie.gr/systima/perigrafia/hartis-grammon>
- [E4] Έργα – Διασυνδέσεις / Α.Δ.Μ.Η.Ε.
<https://www.admie.gr/erga/erga-diasyndeseis/diasyndesi-tis-kritis-me-tin-attiki>
- [E5] Η. Λιώκη-Λειβαδά, Μ. Ασημακοπούλου: «Αιολική και άλλες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας Βιομάζα, Γεωθερμία, Υδατοπτώσεις», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2008.
- [E6] Μ. Π. Παπαδόπουλος: «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές», Εκδόσεις Συμμετρίας, Αθήνα, 1997
- [E7] Δ. Ε. Παπαντώνης: «Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα», Εκδόσεις Συμμετρίας, Αθήνα, 2008
- [E8] Κ. Βουρνάς, Β. Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκίς: «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2011
- [E9] Δ. Ε. Παπαντώνης: «Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες - Υδροστροβίλοι – Υδροδυναμικές Μεταδόσεις», Εκδόσεις Συμμετρίας, Αθήνα, 2009
- [E10] Γ. Ι. Ζερβός: «Ο Σχεδιασμός των Υδροηλεκτρικών Σταθμών Παραγωγής & ο Λειτουργικός τους Ρόλος στο Ελληνικό Ηπειρωτικό Σύστημα – Η Αντίστοιχη Επίδραση των Διεθνών Συνδέσεων», Διπλωματική εργασία, Ιούλιος 2001.
- [E11] Α. Δημητριάδης: «Τεχνολογία Περιελίξεων», Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου, Αθήνα 1995.
- [E12] Στ. Καραδήμου, Γ. Ασίμης: «Τεχνικοοικονομική μελέτη μικρού υδροηλεκτρικού έργου στο Γοργούρι Τρικάλων (Κεφαλοπόταμος)», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., Απρίλιος 2019.
- [E13] Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας – Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδας - «ΕΑΚ 2000 - Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000», Απρίλιος 2001, σελ.265, όπως τροποποιήθηκε από Φ.Ε.Κ. Β' 1154/12-8-2003, Απόφαση Αριθ. Δ17α/115/9/ΦΝ275.
- [E14] Κ. Κυριακίδης: «Διερεύνηση επιρροής μεταβολής μηνιαίου ύψους βροχόπτωσης με το υψόμετρο στις περιοχές του Ελλαδικού χώρου», Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη & Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων Ε.Μ.Π.
- [E15] Α.Π. Μοσχούδης: «Μελέτη κατασκευής και ανάλυση πεδιακής συμπεριφοράς σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων», Μεταπτυχιακή εργασία στα πλαίσια του μαθήματος Ανάλυση Πεδίων Χαμηλής Συχνότητας με Υπολογιστή Ε.Μ.Π.

[E16] Ι.Λ. Βομβορίδης: «Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Μέρος Α'», Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003 (Επανέκδοση).

Βιβλιογραφία – Πηγές σε ξένες γλώσσες

[E1] A. V. Meier, "Electric power systems A Conceptual Introduction", John Wiley – IEEE Press, New Jersey, USA, 2006.

[E2] T. A. Short, "Electric power distribution equipment and systems", CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, Florida, USA, 2006.

[E3] L. Freris, D. Infield, "Renewable energy in power systems", John Wiley & Sons Ltd, CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, West Sussex, United Kingdom, 2008.

[E4] "Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant", European Small Hydropower Association ESHA, 2004.

[E5] B. Pandey, A. Karki, "Hydroelectric Energy, Renewable Energy and the Environment", CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, Florida, USA, 2017.

[E6] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/Water_Turbine_Chart.png last accessed 2-2-2021.

[E7] E. Dick, "Fundamentals of Turbomachines", Springer, Dordrecht, 2015.

[E8] J. J. Fritz, "Small and Mini Hydropower Systems", McGraw-Hill, USA, 1984.

[E9] R. V. Kuzmin, A. S. Meshkov and V. I. Susdorf, "Ecological micro hydropower plant with axial hydro-turbine," 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), Harbin, 2015, pp. 724-728, doi: 10.1109/FPM.2015.7337210.

[E10] J.A. Laghari, H. Mokhlis, A.H.A. Bakar, Hasmaini Mohammad. A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipments and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 20, 2013, pp. 279-293.

[E11] H. Mehmood, R. Jamshaid, F. A. Fareed and Asad, "Electrical Power Generation from Canal Systems using Whirlpool Vortex Turbines," 2019 IEEE 6th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS), Kuala Lumpur, Malaysia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICETAS48360.2019.9117406.

[E12] R. A. Subekti, A. Susatyo and H. Sudiby, "Design and Analysis of Crossflow Turbine Prototype for Picohydro Scale," 2018 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA), Tangerang, Indonesia, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICSEEA.2018.8627139.

[E13] A. Raza, D. Xu, M. S. Mian and J. Ahmed, "A micro hydro power plant for distributed generation using municipal water waste with archimedes screw," INMIC, Lahore, 2013, pp. 66-71, doi: 10.1109/INMIC.2013.6731326.

[E14] D. B. Guzun, M. D. Cazacu, N. Nistor and R. Guzun, "Multiple purpose micro hydro electric power station," 2007 iREP Symposium - Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability, Charleston, SC, 2007, pp. 1-8, doi: 10.1109/IREP.2007.4410578.

- [E15] V. Valsan and P. Kanakasabapathy, "Design and implementation of smart energy management system for stand-alone micro-hydro systems," 2017 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), Kollam, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAPENERGY.2017.8397315.
- [E16] D. Aminov, B. Kosimov, O. Sultonov, "Development of a Water-Submersible Hydrogenerator as a Renewable Source of Electricity for Small Rivers," 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2020, pp. 1079-1084, doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208214.
- [E17] R. V. Klyuev and I. I. Bosikov, "Research of water-power parameters of small hydropower plants in conditions of mountain territories," 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911420.
- [E18] B. A. Nasir, Design Considerations of Micro-hydro-electric Power Plant, Energy Procedia, vol. 50, 2014, pp. 19-29.
- [E19] J. Zou, M. Pipattanasomporn, S. Rahman and X. Lai, "A Frequency Regulation Framework for Hydro Plants to Mitigate Wind Penetration Challenges," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 4, pp. 1583-1591, Oct. 2016, doi: 10.1109/TSTE.2016.2569560.
- [E20] F. J. G. Santos, M. K. I. Uemori and E. C. Bortoni, "A Cylindrical Rotor Synchronous Generator Design for Small Hydro Power Plants," 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, 2018, pp. 474-478, doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506831.
- [E21] G. Traxler-Samek and M. Lecker, "Three-Phase Winding Design for Large Hydro-Generators," 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, Sweden, 2020, pp. 2657-2663, doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9271049.
- [E22] B. Skala and K. Hruska, "Parallel Winding of a Synchronous Generator," 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/EPE.2019.8778106.
- [E23] M.M. Znidarich (2009) Hydro Generator High Voltage Stator Windings: Part 2 - Design for Reduced Copper Losses and Elimination Of Harmonics, Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 5:2, 119-135.
- [E24] A. Karlsson and T. Karlsson, "Estimating Lifetimes for Stator Windings in Hydro-power Generators," 2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Stockholm, 2006, pp. 1-8, doi: 10.1109/PMAPS.2006.360285.
- [E25] L. Vandebossche, S. Jacobs, T. Lugand and A. Schwery, "Improved calculation of iron losses in large salient-pole synchronous hydro-generators," 2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, 2016, pp. 253-260, doi: 10.1109/EDPC.2016.7851342.
- [E26] Riley, C.P. and Michaelides, A.M. (2006), "Eddy current heating in large salient pole generators", COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 25 No. 2, pp. 465-474.
- [E27] M. Chiandone, V. Arcidiacono and G. Sulligoi, "Electric Shaft Starting Sequence for Synchronous Generator in Hydroelectric Pumped Storage Station using Smart Exciter,"

2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Portland, OR, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2018.8585787.

[E28] E. L. Engevik, M. Valavi and A. Nysveen, "Efficiency and loss calculations in design of converter-fed synchronous hydrogenerators," 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, 2016, pp. 1636-1642, doi: 10.1109/ICELMACH.2016.7732743.

[E29] R. Lin, L. Feihui, G. Guobiao, W. Xingang and S. Tianhu, "The evaluation of the design and operation of the 400MW evaporative cooling hydrogenerator in LiJiaXia hydropower station," 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Pattaya, 2015, pp. 209-213, doi: 10.1109/ICEMS.2015.7385028.

[E30] A. Gozdowiak, "Faulty Synchronization of Salient Pole Synchronous Hydro Generator" *Energies* 13, 2020, no. 20: 5491.

[E31] J. Li, Z. Zhang, J. Lu and C. Chen, "Analysis and Design of Damper Winding of Salient-Pole Synchronous Generator for Negative-Sequence Reactance Reduction," 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Jeju, 2018, pp. 543-548, doi: 10.23919/ICEMS.2018.8549508.

[E32] Traxler-Samek, G., Schwery, A. and Schmidt, E. (2003), "Analytic calculation of the voltage shape of salient pole synchronous generators including damper winding and saturation effects", *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, Vol. 22 No. 4, pp. 1126-1141.

[E33] Hongbo Qiu, Xiaobin Fan, Jianqin Feng, Cunxiang Yang. Influence factors to affect eddy current loss of damper winding in 24 MW bulb tubular turbine generator, *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 37, no.1, pp. 375-385, 2018.

[E34] Y. Zhan, K. Kong, G. Xu, J. Kang and H. Zhao, "Analysis of Damper Transient Currents in Salient-Pole Synchronous Generator With Skewed Armature Slots Considering Interbar Currents," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 1, pp. 336-343, Jan.-Feb. 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2866480.

[E35] H. Karmaker and A. M. Knight, "Investigation and Simulation of fields in large salient-pole synchronous Machines with skewed stator slots," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 3, pp. 604-610, Sept. 2005, doi: 10.1109/TEC.2005.852955.

[E36] S. Nuzzo, M. Degano, M. Galea, C. Gerada, D. Gerada and N. Brown, "Improved Damper Cage Design for Salient-Pole Synchronous Generators," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 1958-1970, March 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2619321.

[E37] E. Schlemmer, "Damping of synchronous machines -analytical estimations versus finite element results," 2009 International Conference on Clean Electrical Power, Capri, 2009, pp. 751-754, doi: 10.1109/ICCEP.2009.5211969.

[E38] M. Petrinić, S. Tvorčić and S. Car, "The effects of pole number and rotor wedge design on unbalanced magnetic pull of the synchronous generator," 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, 2014, pp. 316-322, doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960199.

- [E39] Y. Xu, N. Maki and M. Izumi, "Electrical Design Study of 10-MW Salient-Pole Wind Turbine HTS Synchronous Generators," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 24, no. 6, pp. 1-6, Dec. 2014, Art no. 5202706, doi: 10.1109/TASC.2014.2338300.
- [E40] C. Carunaiselvane, T. R. Chelliah and S. V. Appa Sarma, "Negative Sequence Current in Megawatt Hydro Generators at Up-rated Unbalanced Loads," 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Chennai, India, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES.2018.8707919.
- [E41] C. Carunaiselvane and T. R. Chelliah, "Evaluation and Implementation of Incessant Up-rated Operating Technology in Large Hydroturbine Generators," 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020), Cochin, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070502.
- [E42] G. D. P. Serb and I. P. Serb, "Designing a Graphical User Interface with Matlab to select the ideal covering coefficient of the polar pitch for a salient pole synchronous generator calculation," 2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICATE.2018.8551418.
- [E43] S. Talpur, "Testing and model validation of round rotor synchronous generator (GENROU)," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 80, December 2017, pp. 880-887.
- [E44] I. M. Ducar and C. P. Ion, "Design of a PMSG for micro hydro power plants," 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Brasov, 2012, pp. 712-717, doi: 10.1109/OPTIM.2012.6231949.
- [E45] A. Dietz, A. Groeger and C. Klingler, "Efficiency improvement of small hydroelectric power stations with a permanent-magnet synchronous generator," 2011 1st International Electric Drives Production Conference, Nuremberg, 2011, pp. 93-100, doi: 10.1109/EDPC.2011.6085557.
- [E46] K. Wirtayasa, P. Irasari, M. Kasim, P. Widiyanto and M. Hikmawan, "Design of an axial-flux permanent-magnet generator (AFPMG) 1 kW, 220 volt, 300 rpm, 1 phase for pico hydro power plants," 2017 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA), Jakarta, 2017, pp. 172-179, doi: 10.1109/ICSEEA.2017.8267704.
- [E47] Y. Guo, H. Lin, Y. Huang, S. Fang, H. Yang and K. Wang, "Air-Gap Magnetic Field Analysis of Wind Generator With PM Embedded Salient Poles by Analytical and Finite Element Combination Technique," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 2, pp. 777-780, Feb. 2014, Art no. 7019204, doi: 10.1109/TMAG.2013.2281659.
- [E48] W. Sriwannarat, P. Seangwong, V. Lounthavong, S. Khunkitti, A. Siritaratiwat, P. Khunkitti. "An Improvement of Output Power in Doubly Salient Permanent Magnet Generator Using Pole Configuration Adjustment" Energies 2020, vol. 13, no. 17: 4588.
- [E49] S. S. Katre and V. N. Bapat, "Induction generator for Pico-hydro generation as a renewable energy source," 2015 International Conference on Energy Systems and Applications, Pune, 2015, pp. 130-134, doi: 10.1109/ICESA.2015.7503326.

- [E50] P. Löhdefink, A. Dietz and A. Möckel, "The brushless doubly fed induction machine as generator for small hydro power - machine design and experimental verification," 2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EVER.2017.7935892.
- [E51] N. H. Nam, T. Xuan Trung, "Computer Simulation and Analysis of A Doubly Fed Induction Generator with A One Side Directly Connected to The Grid," 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Brno, Czech Republic, 2020, pp. 52-57, doi: 10.1109/ICUMT51630.2020.9222434.
- [E52] P. D. Singh and S. Gao, "An Isolated Hydro Power Generation using Parallel Asynchronous Generators at Variable Turbine Inputs using AC-DC-AC Converter," 2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE), JAIPUR, India, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/IICPE.2018.8709477.
- [E53] A. Tessarolo, C. Bassi and D. Giulivo, "Time-Stepping Finite-Element Analysis of a 14-MVA Salient-Pole Shipboard Alternator for Different Damper Winding Design Solutions," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 6, pp. 2524-2535, June 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2157294.
- [E54] C. Bassi, D. Giulivo and A. Tessarolo, "Transient finite-element analysis and testing of a salient-pole synchronous generator with different damper winding design solutions," The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome, 2010, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5608128.
- [E55] Y. Wang, Gaurang Vakil; Stefano Nuzzo; Michele Degano; Michael Galea; Chris Gerada; He Zhang; Neil Brown, "Sensitivity analysis for performance and power density improvements in salient-pole synchronous generators," 2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Nottingham, 2017, pp. 163-168, doi: 10.1109/WEMDCD.2017.7947741.
- [E56] Mandić, I., Pužar, M. and Petrinić, M. (2001), "Optimization of large electrical salient pole synchronous generators", COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 20 No. 3, pp. 813-827.
- [E57] A. E. Bell and P. Anpalahan, "Optimisation of Salient-Pole Rotor for Synchronous Generators," 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, 2018, pp. 339-344, doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506805.
- [E58] A. Spargo, S. Ilie and J. Chan, "Salient-pole rotor optimisations for synchronous generators using FEA software," 2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Nottingham, 2017, pp. 158-162, doi: 10.1109/WEMDCD.2017.7947740.
- [E59] M. G. Say, "The Performance and Design of Alternating Current Machines", Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd, London, England, 3rd Edition reprinted 1961.
- [E60] S. I. Shahl, "Introduction to A.C. Machines, Electrical Machines II".
- [E61] <https://www.preformedwindings.com/> last accessed 13-4-2021.

- [E62] A.J. Peterka: "Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators", Monograph no. 25, 1st edition 1958, eighth edition 1984, United States department of the Interior Bureau of Reclamation.
- [E63] V.N.Mittle: «Design of Electrical Machines D.C & A.C», Reprint of 3rd Edition, Standard Publishers Distributors, 1992.
- [E64] Essam S.Hamdi: «Design of Small Electrical Machines D.C & A.C», First Edition, John Wiley & Sons, 1994
- [E65] Giorgio Crisci: «Costruzione Schemi e Calcolo Degli Avvolgimenti Delle Macchine Elettriche Rotanti», Settima Edizione, Societa Tipografica Editrice Modenese Mucci Modena, 1956
- [E66] M. G. Say, "Alternating Current Machines", Pitman Publishing Ltd, Great Britain, 4th Edition reprinted, 1978.
- [E67] G. Muller, K. Vogt, B. Ponick "Berechnung Elektrischer Maschinen", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA Weinheim, Federal Republic of Germany, 6th Auflage, 2008.
- [E68] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovkova "Design of Rotating Electrical Machines", John Wiley and Sons Ltd, West Sussex, United Kingdom, 2nd Edition, 2014.
- [E69] R. Richter "Elektrische Maschinen, Band II, Synchronmaschinen und Einankerumformer", Springer Basel A.G., Schweiz, 2nd Auflage, 1953.
- [E70] R. Richter "Elektrische Maschinen, Band II, Synchronmaschinen und Einankerumformer", Springer Basel A.G., Schweiz, 3rd Auflage, 1963.
- [E71] K. Kupfmuller "Einführung in die theoretische Electrotechnik", Springer Verlag, Berlin und Heidelberg, Deutshland, Neunte verbesserte und erweiterte Auflage, 1968.
- [E72] N. Bianchi "Electrical Machine Analysis Using Finite Elements", CRC Press Taylor and Francis Group, Florida, USA, 1st Edition, 2005.
- [E73] D. Meeker "Finite Element Method Magnetics User's Manual version 4.2", January 30, 2018.