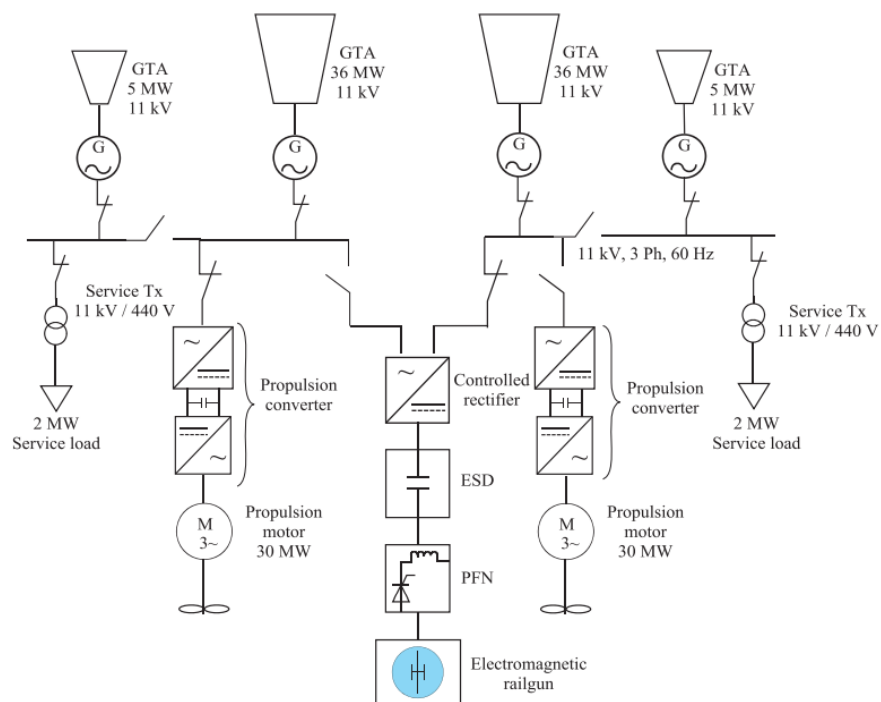


Διπλωματική Εργασία

Μελέτη προβλημάτων ποιότητας ισχύος από παλμικά φορτία για σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων



Φοιτητής: Κολερός Ι. Αθανάσιος
ΑΜ: 47361

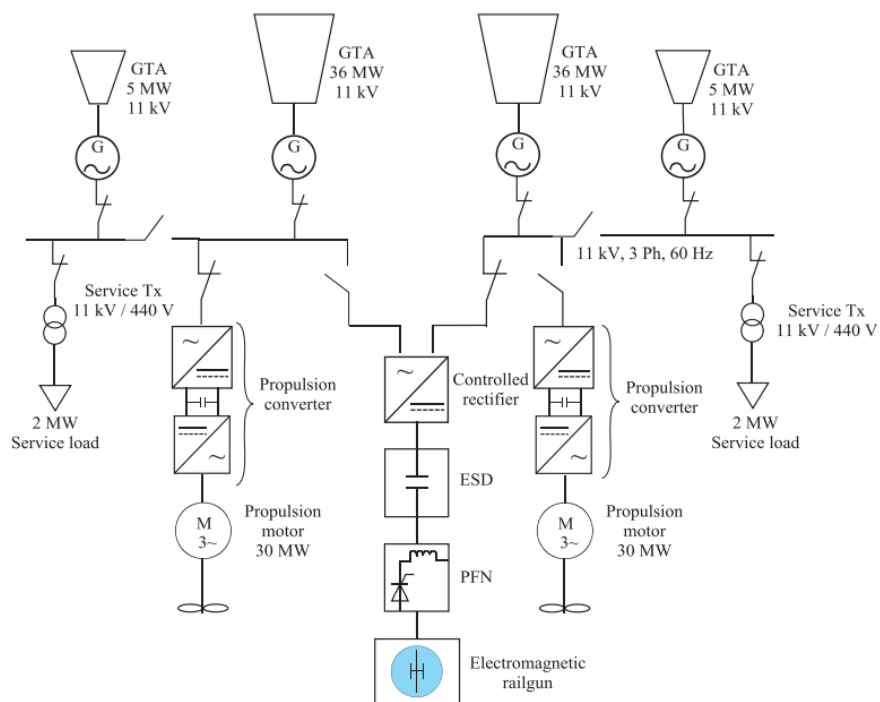
Επιβλέπων Καθηγητής
Τσεκούρας Ι. Γεώργιος
Επίκουρος Καθηγητής



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Study of power quality disturbances from pulse loads in power electric systems on ships



Student: Koleros I. Athanasios

Registration Number: 47361

Supervisor

Tsekouras I. Georgios

Assistant Professor

Η διπλωματική εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Τσεκούρας Ι. Γεώργιος Επίκουρος Καθηγητής	Μανουσάκης Ν. Επίκουρος Καθηγητής	Κονταξής Π. Λέκτορας εφαρμογών

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Αθανάσιος Κολερός, Ιούλιος, 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας 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 τους συγγραφείς.

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

ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπόγραφα ότι η παρούσα εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα αποκλειστικά και ότι είμαι ο αποκλειστικός συγγραφέας του κειμένου της.

Η εργασία μου δεν προσβάλλει οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας ή προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής ή λογοκλοπής.

Κάθε βοήθεια που έλαβα για την ολοκλήρωση της εργασίας είναι αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στο κείμενό της. Ειδικότερα, έχω αναφέρει ευδιάκριτα μέσα στο κείμενο και με την κατάλληλη παραπομπή όλες τις πηγές δεδομένων, κώδικα προγραμματισμού Η/Υ, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών που χρησιμοποιήθηκαν, είτε κατά κυριολεξία, είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης, και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Επιπλέον, όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης κατά τα διεθνή πρότυπα.

Τέλος δηλώνω ενυπόγραφα ότι αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ημερομηνία: 19-07-2022

Αθανάσιος Ι. Κολερός

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Τσεκούρα Γεώργιο για το ενδιαφέρον και τις επιστημονικές και γενικές γνώσεις που μου προσέφερε στο κομμάτι της παραγωγής ενέργειας και των Σ.Η.Ε. πλοίων μέσα από τα προπτυχιακά μαθήματά του και τη μετέπειτα αποδοχή του να μου προτείνει και να αναλάβει την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασία που περιέχει το αντικείμενο που επιθυμούσα. Επιπλέον, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την αμέριστη υπομονή και τη συνεχή και πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη μεγάλη διάρκεια της συγκεκριμένης εργασίας.

Στη συνέχεια, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον καθηγητή κ. Μανουσάκη Νικόλαο για τις βασικές γνώσεις ηλεκτρολογίας που μου παρείχε στην πολύ αρχή της πορείας μου ως φοιτητής του τμήματος και για την αποδοχή του να είναι μέλος της επιτροπής εξέτασης, όπως και τον κύριο Κονταξή Παναγιώτη τον οποίο ευχαριστώ θερμά.

Τέλος, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και την αδερφή μου για την αδιάκοπη βοήθεια και υποστήριξη που μου προσέφεραν με κάθε τρόπο, όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη (στα ελληνικά)

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιείται μία γενική μελέτη των προβλημάτων που προκαλούν τα παλμικά φορτία στα ηλεκτρικά συστήματα των πλοίων. Περιγράφονται τα βασικά μέρη και τα χαρακτηριστικά του Σ.Η.Ε. ενός πλοίου, τα ποικίλα προβλήματα που εμφανίζονται σε αυτό και οι τρόποι εντοπισμού και αντιμετώπισης του κάθε προβλήματος. Ακολουθώς, γίνεται μία εκτενής περιγραφή και ανάλυση του κάθε φαινομένου που προκαλεί διαταραχή στην ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος του πλοίου. Κάποια από τα βασικότερα φαινόμενα είναι οι διακυμάνσεις και οι παραμορφώσεις των κυματομορφών ορισμένων μεγεθών, όπως η τάση και η συχνότητα του συστήματος. Επιπλέον, αναλύεται λεπτομερώς το φαινόμενο των αρμονικών συνιστωσών που αποτελεί, ίσως τον κυριότερο λόγο πρόκλησης προβλημάτων στην ποιότητα της ισχύος στα ΣΗΕ πλοίων (αλλά και ξηράς). Παρουσιάζονται οι απαραίτητοι περιορισμοί στις διαταραχές των ηλεκτρικών μεγεθών (τάση, συχνότητα) ενός συστήματος με βάση πρότυπα (IEEE Standard 45, STANAG 1008) με σκοπό τη μείωση των επιπτώσεων των αρμονικών στα πλοία. Στη συνέχεια, εξηγούνται τα είδη, ο τρόπος λειτουργίας των παλμικών φορτίων και οι επιπτώσεις αυτών (παλμικών φορτίων) στη λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος των πλοίων. Επίσης, αναλύονται θεωρητικά, αλλά και μέσω προσομοιώσεων, τα ζητήματα της διαμόρφωσης (διαταραχής) της συχνότητας και της τάσης που προκύπτει κατά τη λειτουργία των παλμικών φορτίων. Έπειτα, πραγματοποιείται ένα απλοποιημένο, αλλά πλήρες Σ.Η.Ε. πλοίου αποτελούμενο από τα βασικά στοιχεία του (γεννήτριες, αγωγούς, μετασχηματιστές, κινητήρες πρόωσης, απλά φορτία) και με την προσθήκη ενός παλμικού φορτίου στην πλευρά της υψηλής τάσης αυτού. Μέσω αυτού (του Σ.Η.Ε.) είναι δυνατή η εκτέλεση ποικίλων σεναρίων, ανάλογα των αρχικών συνθηκών και δεδομένων που δίνονται. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα των σεναρίων αυτών εξαρτώνται άμεσα από τα χαρακτηριστικά και τις τιμές των στοιχείων του συστήματος, κάνοντας εμφανή της κατάλληλες τιμές υπό τις οποίες λειτουργεί ομαλά ένα σύστημα κατά τη λειτουργία των παλμικών φορτίων, αλλά και τα προβλήματα που προκαλούν αυτά υπό όλες αυτές τις πιθανές συνθήκες. Τέλος, καταγράφονται συμπεράσματα και παρατηρήσεις που προκύπτουν από τις παραπάνω προσομοιώσεις, αλλά και γενικά απ' όλη την εργασία και αναφέρονται ορισμένοι τομείς, οι οποίοι απ' ότι φάνηκε μέσα από τη συγκεκριμένη εργασία αξίζει να μελετηθούν περαιτέρω στο μέλλον.

Περίληψη (στα αγγλικά)

In this diploma thesis a general study is carried out regarding the problems that are caused on a ship's electric power systems (EPS), problems which are brought about by specific kinds of loads, which are called pulse loads. The study describes the basic parts and characteristics of the EPS of ships, various problems that appear in these and some ways of detection and treatment of these problems. Addition, an extensive description and analysis of each phenomenon that causes disturbance on ship's EPS power quality is given. Some of the most important phenomena are fluctuation of distortion of electric structure waveforms such as frequency and voltage of the system. In addition, there is a detailed analysis of the harmonics which are probably the most important reasons that provoke power equality problems on the EPS of ships and land EPSs. The system's basic limitations of frequency and voltage modulation disturbance according to various standards such as IEEE st. 45, STANAG-1008 are also presented so as to reduce the harmonic impact. Furthermore, further insight is given into the different kinds of harmonics, the way that pulse loads work and the effects that these loads cause on EPSs. Also, a theoretical and experimental analysis was made as far as frequency and voltage modulation is concerned, modulation caused by pulse loads. Next, a simplified yet complete check of a ship's elements (generations, cables, transformers, propulsion motors, low voltage loads) and a pulse load on the side of the system's high voltage. Through this EPS, many scenaria are analyzed reached which are based on electric system's experimental elements. More specifically, the results of these conclusions depend entirely on the estimates and characteristics of EPS elements making obvious the impact of pulse loads on a system's different stages. In conclusion, some crucial results and observations from the above scenaria and from the whole study are brought about and also, some sectors of further interest concerning the specific study are introduced for future research.

Πρόλογος

Στη σημερινή εποχή η πλειοψηφία των αναγκών ενός πλοίου και σε πολλές περιπτώσεις ολόκληρη η λειτουργία αυτού στηρίζεται στην ηλεκτρική ενέργεια. Ο αριθμός των πλήρως εξηλεκτρισμένων πλοίων (All Electric Ship-AES), των ηλεκτρικών φορτίων και το είδος αυτών που προστίθενται σε ένα εξηλεκτρισμένο, ή και σε συμβατικό πλοίο, αυξάνονται συνεχώς. Αυτή η άνοδος του εξηλεκτρισμού στα πλοία έχει οδηγήσει στην εμφάνιση ποικίλων νέων ζητημάτων και προβλημάτων με βασικότερο αυτών, την επίπτωση στην ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος. Ένα είδος φορτίων, που κατά τη λειτουργία τους επηρεάζουν έντονα την ποιότητα ισχύος του συστήματος είναι τα παλμικά φορτία, δηλαδή φορτία που απαιτούν αρκετά μεγάλες τιμές ισχύος για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, μία διαδικασία που επαναλαμβάνεται κατά τη λειτουργία του πλοίου μετατρέποντας ολόκληρο αυτό το φαινόμενο σε περιοδικό. Ορισμένα καίρια μεγέθη για την ορθή λειτουργία ενός Σ.Η.Ε. που διαταράσσονται είναι η συχνότητα (διαμόρφωση συχνότητας) και η τάση (διαμόρφωση τάσης). Οι υπάρχοντες κανονισμοί και πρότυπα δεν αντιμετωπίζουν ικανοποιητικά και επαρκώς τα παραπάνω προβλήματα που προκύπτουν κατά τη λειτουργία των παλμικών φορτίων, αλλά και γενικά δε συντελούν στη διατήρηση μιας ικανοποιητικής ποιότητας ισχύος υπό τις προαναφερόμενες συνθήκες φόρτισης (λειτουργία παλμικών φορτίων). Επομένως, είναι αναγκαία η βελτίωση των υπαρχόντων κανονισμών και προτύπων ή ακόμα και η προσθήκη νέων επιμέρους προτύπων, τα οποία να περικλείουν όλα τα προαναφερθέντα φαινόμενα που υπάρχουν σε ένα Σ.Η.Ε. πλοίου. Με αυτόν τον τρόπο είναι ικανή η βελτίωση και η εξέλιξη στον τομέα της ποιότητας ισχύος ενός συστήματος και κατ' επέκταση ολόκληρης της εγκατάστασης του πλοίου.

Λέξεις – κλειδιά

- Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.)
- Πρόωση
- Ποιότητα ισχύος
- Παλμικά φορτία
- Αρμονικές συνιστώσες
- Διαμόρφωση συχνότητας
- Διαμόρφωση τάσης

Keywords

- Electrical Power System (E.P..S.)
- Propulsion
- Power quality
- Pulse loads
- Harmonics
- Frequency modulation
- Voltage modulation

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	16
Κατάλογος Εικόνων & Σχημάτων.....	17
Αλφαβητικό Ευρετήριο	22
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	23
1.1 Εισαγωγή στη σχεδίαση συστημάτων πρόωσης & συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων.....	23
1.1.1 Γενικά περί Συστημάτων πρόωσης και συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων	23
1.1.2 Σχεδίαση και βασική δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου και του συστήματος πρόωσής του.....	23
1.1.3 Βασικά στοιχεία του συστήματος πρόωσης ενός πλοίου	24
1.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.)	26
1.2.1 Γενικά περί συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.....	26
1.2.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας πλοίου	26
1.2.3 Γειωμένο & Αγείωτο σύστημα	28
1.2.4 Σύστημα τροφοδοσίας 3 ή 4 αγωγών	28
1.3 Φορτίο Πρόωσης	29
1.3.1 Ανάλυση φορτίου πρόωσης	29
1.3.2 Συντελεστές για τη μελέτη της πρόωσης.....	30
1.3.3 Αλυσίδα πρόωσης.....	32
1.4 Φορτίο ηλεκτρικών καταναλώσεων	34
1.4.1 Γενική περιγραφή	34
1.4.2 Τρόποι υπολογισμού της συνολικής ισχύος των φορτίων.....	34
1.5 Τυπικά χαρακτηριστικά Σ.Η.Ε.	37
1.5.1 Γενική περιγραφή	37
1.5.2 Χαρακτηριστικά Σ.Η.Ε. πλοίου.....	37
1.6 Τα προβλήματα της ποιότητας ισχύος.....	39
1.6.1 Γενική περιγραφή	39
1.7 Παλμικά φορτία	41
1.8 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	42
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Εισαγωγή στα ζητήματα ποιότητας ισχύος.....	43
2.1 Εισαγωγή	43
2.2 Μεταβατικά φαινόμενα	43
2.2.1 Κρουστικά μεταβατικά φαινόμενα (Impulsive transients).....	44
2.2.2 Ταλαντευόμενα μεταβατικά φαινόμενα (Oscillatory transients).....	44
2.3 Διακυμάνσεις τάσης μακράς διάρκειας	45
2.4 Διακυμάνσεις τάσης μικρής διάρκειας	46
2.5 Ανισορροπία τάσης.....	48
2.6 Παραμόρφωση κυματομορφής.....	49
2.7 Αυξομείωση τάσης.....	50
2.8 Διακύμανση συχνότητας.....	50
2.9 Όροι ποιότητας ισχύος	52
2.10 Πηγές αρμονικών	54

2.10.1	Γενική περιγραφή αρμονικών.....	54
2.10.2	Χαρακτηριστικές αρμονικές ρεύματος.....	55
2.10.3	Υπολογισμός αρμονικών τιμών τάσης και ρεύματος.....	58
2.10.4	Ενδοαρμονικές.....	59
2.10.5	Πηγές παραγωγής αρμονικών συνιστωσών τάσεως και ρεύματος.....	60
2.11	Ανταπόκριση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε αρμονικές συνιστώσες.....	61
2.11.1	Παράγοντες επιδείνωσης επιπτώσεων αρμονικών σε ένα σύστημα.....	61
2.11.2	Συνθήκες συντονισμού συστήματος.....	62
2.11.3	Επίδραση του φορτίου στο σύστημα.....	63
2.11.4	Χαρακτηριστικά απόκρισης συστήματος στις αρμονικές συνιστώσες.....	64
2.12	Επιπτώσεις αρμονικών.....	65
2.12.1	Επιπτώσεις αρμονικών σε μηχανές.....	65
2.12.2	Επιπτώσεις αρμονικών σε μετασχηματιστές.....	66
2.12.3	Επιπτώσεις αρμονικών σε ηλεκτρονικές διατάξεις.....	66
2.12.4	Επιπτώσεις αρμονικών σε ασφαλιστικές διατάξεις.....	66
2.13	Έλεγχος αρμονικών.....	67
2.14	Μέθοδοι ανάλυσης αρμονικών.....	68
2.14.1	Απλοποιημένη ανάλυση.....	68
2.14.2	Ανάλυση με χρήση υπολογιστή.....	69
2.15	Μετρήσεις αρμονικών.....	71
2.15.1	Όργανα μέτρησης αρμονικών μεγεθών.....	72
2.16	Προτεινόμενες πρακτικές για μεμονωμένους καταναλωτές.....	73
2.16.1	Περιορισμοί ρευμάτων διαταραχής.....	73
2.16.2	Αντιμετώπιση ζητημάτων μετασχηματιστών.....	75
2.16.3	Αντιμετώπιση σύντομων πτώσεων τάσης (flickers).....	75
2.17	Προτεινόμενες πρακτικές για Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.)	76
2.17.1	Γενικές πρακτικές αντιμετώπισης.....	76
2.17.2	Αντιμετώπιση εισερχόμενων αρμονικών (Addition of Harmonics).....	76
2.17.3	Αντιμετώπιση αρμονικών μικρής διάρκειας.....	76
2.17.4	Προβλήματα αρμονικών περιορισμένης εμφάνισης.....	77
2.18	Προτεινόμενες μέθοδοι αξιολόγησης πηγών αρμονικών.....	78
2.18.1	Θεωρητική ανάλυση.....	78
2.18.2	Πειραματική διαδικασία μέσω μετρήσεων.....	78
2.19	Προβλήματα αρμονικών σε πλοία κατά IEEE Standard 45.....	79
2.19.1	Περιορισμοί συχνότητας.....	79
2.19.2	Περιορισμοί τάσης.....	80
2.19.3	Περιορισμοί κυματομορφής.....	82
2.19.4	Έκτακτες καταστάσεις.....	83
2.20	Προβλήματα αρμονικών σε πλοία κατά STANAG 1008.....	83
2.20.1	Περιορισμοί πηγών συνεχούς (DC) τάσης.....	83
2.20.2	Περιορισμοί (αρμονικών) στον εξοπλισμό ενός Σ.Η.Ε. πλοίου.....	84
2.20.3	Περιορισμοί σε λοιπά τμήματα των Σ.Η.Ε. πλοίων.....	85
2.21	Προβλήματα αρμονικών σε πλοία με λοιπούς κανονισμούς.....	86
2.21.1	Προβλήματα αρμονικών κατά ABS (American Bureau of Shipping).....	86
2.21.2	Προβλήματα αρμονικών κατά IEEE 1159.....	87
2.22	Αρμονικές και Συντελεστής Ισχύος (Σ.Ι.) στα πλοία.....	87

2.22.1	Γενική ανάλυση ισχύος σε Σ.Η.Ε. γραμμικών φορτίων (χωρίς αρμονικές)..	87
2.22.2	Ανάλυση ισχύος και συντελεστής ισχύος παρουσία αρμονικών.....	92
2.22.3	Τρόποι βελτίωσης πραγματικού συντελεστή ισχύος.....	93
2.23	Αρμονικές ρεύματος σε πλοία.....	94
2.23.1	Ολική αρμονική τάση διαταραχής (Total Voltage Distortion- V_{THD}).....	94
2.23.2	Ολικό ρεύμα διαταραχής (Total Harmonic Current Distortion- I_{THD}).....	94
2.24	Επίδραση της σύνθετης αντίστασης και της φαινόμενης ισχύς στις αρμονικές σε πλοία.....	97
2.24.1	Γενική περιγραφή.....	97
2.24.2	Υπολογισμός ισοδύναμης ικανότητας βραχυκύκλωσης συστήματος.....	100
2.25	Επίδραση ανισορροπίας τάσης και τάση ουδετέρου στις αρμονικές σε πλοία	101
2.25.1	Ισορροπία (συμμετρία) συστήματος.....	101
2.25.2	Επίδραση ασύμμετρου (μη ισορροπημένου) φορτίου στις αρμονικές.....	102
2.25.3	Επίδραση ανισορροπίας τάσης και τάσης υποβάθρου στο σύστημα.....	103
2.26	Συντονισμός σε πλοία.....	103
2.26.1	Γενική περιγραφή.....	103
2.26.2	Αντιμετώπιση συντονισμού.....	104
2.27	Περιορισμός αρμονικών σε πλοία.....	106
2.27.1	Περιορισμός αρμονικών λόγω επίδρασης της διαφοράς μεταξύ γωνιών τάσης ή ρεύματος.....	106
2.27.2	Περιορισμός αρμονικών λόγω γραμμικών φορτίων.....	106
2.27.3	Μετατόπιση φάσεων μέσω μετασχηματιστή (Transformer phase shifting)	106
2.27.4	Μετασχηματιστής απομόνωσης φασικής (γωνιακής) μετατόπισης διπλού τυλίγματος (Double-wound isolating transformer phase shift system).....	107
2.27.5	Πολυγωνικός (μη απομονωμένος) αυτό-μετασχηματιστής μετατόπισης φάσης (Polygonal non-isolating autotransformer phase shift system).....	108
2.27.6	Διάταξη διπλής επαγωγικής αντίδρασης (Duplex reactor).....	109
2.28	Απαιτήσεις για περιορισμό αρμονικών σε πλοία.....	112
2.29	Συμπεράσματα.....	114
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Παλμικά φορτία.....	115
3.1	Εισαγωγή.....	115
3.2	Είδη φορτίων που συμπεριφέρονται ως παλμικά.....	115
3.2.1	Βοηθητικό σύστημα πρόωσης (Thrusters).....	115
3.2.2	Επαγωγικό σύστημα εκτόξευσης βλήματος αποτελούμενο από πηνία (inductive coilgun).....	116
3.2.3	Ηλεκτρο-θερμοχημική προώθηση (Electro-thermochemical propulsion-ETC)	117
3.2.4	Ηλεκτρομαγνητικό κανόνι (railgun).....	118
3.3	Ανάλυση επιπτώσεων παλμικών φορτίων στα Σ.Η.Ε. πλοίων μέσω προσομοιώσεων.....	120
3.3.1	Εισαγωγή.....	120
3.3.2	Προσομοιώσεις λειτουργίας ποικίλων Σ.Η.Ε. πλοίου με παλμικό φορτίο..	123
3.3.3	Προσομοίωση βασικής κατάστασης λειτουργίας εξηλεκτρισμένου πλοίου (AES) με σύνδεση του παλμικού φορτίου στην υψηλή τάση.....	126
3.3.4	Γενική περιγραφή προσομοιώσεων.....	128
3.3.5	Προσομοίωση μεταβολής του βαθμού φόρτισης των γεννητριών.....	128

3.3.6	Προσομοίωση μεταβολής της διανομής φόρτισης στα υποσυστήματα των Σ.Η.Ε.	129
3.3.7	Προσομοίωση μεταβολής συντελεστή ισχύος (Σ.Ι.) του φορτίου	131
3.3.8	Προσομοίωση μεταβολής μήκους αγωγών	132
3.3.9	Προσομοίωση μεταβολής περιόδου παλμικού φορτίου	133
3.3.10	Προσομοίωση μεταβολής κύκλου λειτουργίας (duty cycle) παλμικού φορτίου	134
3.3.11	Προσομοίωση μεταβολής υπομεταβατικής επαγωγικής αντίδρασης γεννήτριας	135
3.3.12	Προσομοίωση μεταβολής σταθεράς αδράνειας γεννήτριας	136
3.3.13	Προσομοίωση μεταβολής κέρδους ρυθμιστή συχνότητας (Governor)	137
3.3.14	Προσομοίωση μεταβολής κέρδους ρυθμιστή τάσης (AVR)	137
3.3.15	Προσομοίωση μεταβολής μέγιστου ορίου τάσης διέγερσης γεννήτριας- V_{Rmax} (generator's field voltage upper bound)	139
3.4	Ανάλυση επιπτώσεων παλμικών φορτίων σε Σ.Η.Ε. πλοίων μέσω μαθηματικής ανάλυσης ως προς τη διαμόρφωση συχνότητας	139
3.4.1	Γενική περιγραφή	139
3.4.2	Μαθηματική ανάλυση	140
3.5	Ανάλυση επιπτώσεων παλμικών φορτίων στα Σ.Η.Ε. πλοίων μέσω μαθηματικής ανάλυσης ως προς τη διαμόρφωση τάσης	148
3.5.1	Γενική περιγραφή	148
3.5.2	Μαθηματική ανάλυση	148
3.6	Απαιτήσεις κανονισμών-δυνατότητες βελτίωσης	155
3.6.1	Γενική περιγραφή	155
3.6.2	Απαιτήσεις κανονισμών και δυνατότητες βελτίωσης ως προς τη διαμόρφωση συχνότητας	155
3.6.3	Απαιτήσεις κανονισμών και δυνατότητες βελτίωσης ως προς τη διαμόρφωση τάσης	156
3.7	Συμπεράσματα	156
4	Κεφάλαιο 4^ο: Ανάπτυξη συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου για την προσομοίωση παλμικών φορτίων	157
4.1	Εισαγωγή	157
4.2	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας πλοίου-κύκλωμα προσομοίωσης	157
4.3	Διαμόρφωση στοιχείων	161
4.3.1	Μοντέλο ηλεκτρογεννήτριας	161
4.3.2	Μοντέλο γραμμών μεταφοράς	165
4.3.3	Μοντέλο μετασχηματιστή	166
4.3.4	Μοντέλα απλού φορτίου κατανάλωσης	167
4.3.5	Μοντέλα κινητήρων πρόωσης	168
4.3.6	Μοντέλο παλμικού φορτίου	171
4.4	Περιγραφή του συστήματος στο χώρο κατάστασης	174
4.5	Ανάπτυξη λογισμικού προσομοίωσης και εκτέλεση σεναρίων	177
4.6	Συμπεράσματα	184
5	Κεφάλαιο 5^ο: Γενικά συμπεράσματα & περιοχές για περαιτέρω έρευνα	185
5.1	Γενικά συμπεράσματα	185
5.2	Περιοχές για περαιτέρω έρευνα	186

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....	187
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1	189

Κατάλογος Πινάκων

- Πίνακας 1.1.** Πίνακας ισολογισμού ισχύος (Μάθημα "Σ.Η.Ε. πλοίων & λιμένων 8^ο εξάμηνο, 3^η εργασία εξαμήνου)
- Πίνακας 1.2.** Πίνακας τυποποιημένων τάσεων [14, Cr.4, pg 40]
- Πίνακας 1.3.** Πίνακας εφαρμογής του IEEE σε πλοία [17, Selection of voltage and system, ch. 4, type pg 26]
- Πίνακας 1.4.** Πίνακας ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων [17, Table 2.1, ch. 1, pg 12]
- Πίνακας 2.1.** Γραφικές παραστάσεις τάσης και ρεύματος [22, Figure 1,2b, pg 11, sect. 2]
- Πίνακας 2.2.** Περιορισμοί του αρμονικού ρεύματος για καταναλωτές ποικίλων απαιτήσεων [14, Table 10.3, sect.10, pg 78]
- Πίνακας 2.3.** Περιορισμοί του αρμονικού ρεύματος για καταναλωτές ποικίλων απαιτήσεων [14 Table 10.4, sect.10, pg 78]
- Πίνακας 2.4.** Χαρακτηριστικά (περιορισμοί) συχνότητας Σ.Η.Ε. πλοίου χαμηλής τάσης κατά IEEE Std 45 [14, Table4-1, content 4, pg 28]
- Πίνακας 2.5.** Χαρακτηριστικά (περιορισμοί) τάσης Σ.Η.Ε. πλοίου χαμηλής τάσης κατά IEEE Std 45 [14, Table4-1, content 4, pg 28]
- Πίνακας 2.6.** Χαρακτηριστικά (περιορισμοί) κυματομορφής Σ.Η.Ε. πλοίου χαμηλής τάσης κατά IEEE Std 45 [14, Table4-1, content 4, pg 28]
- Πίνακας 2.7.** Χαρακτηριστικά (περιορισμοί) Σ.Η.Ε. πλοίου χαμηλής τάσης σε έκτακτη ανάγκη κατά IEEE Std 45 [14, Table4-1, content 4, pg 28]
- Πίνακας 2.8.** Χαρακτηριστικά (περιορισμοί) Σ.Η.Ε. συνεχούς (DC) τάσης πλοίου χαμηλής τάσης κατά STANAG 1008 [19, Table 4, C-3]
- Πίνακας 2.9.** Ρεύματα εκκίνησης μετασχηματιστών [19, ANNEX B, B.9. B-5]
- Πίνακας 2.10.** Ρεύματα εκκίνησης γεννητριών [19, ANNEX B, B.9. B-5]
- Πίνακας 2.11.** Περιορισμοί χωρητικότητας συστήματος [19, par.9.b., B-5]
- Πίνακας 2.12.** Τρίγωνα ισχύος [22, Figure 1, pg 95, sect. 5]
- Πίνακας 2.13.** (Αριστερά) Περιπτώσεις Σ.Η.Ε. με διαφορετικές κάθε φορά τιμές μεγεθών λειτουργίας και (Δεξιά) κυματομορφές τάσεως και ρεύματος εισόδου [22, Figures 1a,1b,2a,2b,3a,3b,4a,4b, pg 108-115, sect. 7]
- Πίνακας 3.1.** Χαρακτηριστικά ηλεκτρομαγνητικού κανονιού (σχήματος 3.4) (On electric warship power system performance when meeting the energy requirements of electromagnetic railguns, I. Whitelegg, R.W.G. Bucknall & B.T. Thorp, pg 87)
- Πίνακας 3.2.** Χαρακτηριστικά συστήματος γεννητριών των τριών περιπτώσεων [23, Tab.1, pg. 122]
- Πίνακας 3.3.** Παράμετροι των 2 παραπάνω ρυθμιστών [23, Tab.2, pg. 123-124]
- Πίνακας 3.4.** Σταθεροί παράμετροι λειτουργίας για κάθε περίπτωση [23, Tab.3, pg 125-126]

Κατάλογος Εικόνων & Σχημάτων

- [1] Προπέλα πλοίου
- [2] Σύστημα πρόωσης πλοίου (waterjet) (www.tmmotion.com/english/newsshow_290.html)
- [3] Σύστημα πρόωσης πλοίου (Voith-Scheider) (<http://voith.com/us-en/drives-transmissions/voith-schneider-propeller-vsp.html>)
- [4] Τυπικό Σ.Η.Ε. πλοίου [11]
- [5] Γειωμένο & αγείωτο σύστημα [7]
- [6] Αλυσίδα πρόωσης [1]
- [7] Μελέτη λόγων πρόκλησης προβλημάτων ισχύος [17 Figure 1.1, pg 4, ch. 1]
- [8] Βήματα επίλυσης προβλήματος ισχύος [17, Figure 1.2, pg 8, ch. 1]
- [9] Γραφική απεικόνιση κρουστικού μεταβατικού φαινομένου λόγω κεραυνού [17, Figure 2.1, pg 16, ch. 2]
- [10] Ταλαντευόμενο μεταβατικό φαινόμενο μέσης συχνότητας από συνεχή ένταξη πυκνωτών στο δίκτυο [17, Figure 2.2, pg 17, ch. 2]
- [11] Προσωρινή βύθιση τάσης λόγω εκκίνησης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα [17, Figure 2.7, pg 22, ch. 2]
- [12] Υπέρταση μικρής διάρκειας (στιγμιαία) λόγω μονοφασικού σφάλματος φάσης με γη ($T > 0,15 \text{ sec}$) [17, Figure 2.8, pg 24, ch. 2]
- [13] Βύθιση τάσης στην φάση 1 ενός τριφασικού συστήματος (0,2 sec-0,9 sec), ακόλουθη διακοπή (0,9 sec -1,3 sec) και άμεση αποκατάσταση και των τριών τάσεων ($> 1,3 \text{ sec}$) [17, Figure 2.5, pg 21, ch. 2]
- [14] Αυξομείωση τάσης από τη λειτουργία φούρνου ηλεκτρικού τόξου [17, Figure 2.12, pg 29, ch. 2]
- [15] Διακύμανση συχνότητας σε ένα 24ωρο [17, Figure 2.14, pg 31, ch. 2]
- [16] Ανορθωτής πλήρους κύματος (AC/DC) [22, Figure 2a, pg 11, sect. 2]
- [17] Ημιτονοειδής τάση εισόδου [22, Figure 1, pg 11, sect. 2]
- [18] (α) Ρεύμα εισόδου τετραγωνικής μορφής ($I_{\text{εισ}}$) και (β) ανορθωμένο ρεύμα εξόδου (I_{dc}) [22, Figure 2b, pg 11, sect. 2]
- [19] Μονοφασική γέφυρα ανόρθωσης πλήρους ανόρθωσης [19, fig. 6] [22, Figure 6, pg 13, sect. 2]
- [20] (α) Θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα, (β) 3^η αρμονική και (γ) άθροισμα των δύο συνιστωσών [22, Figure 8, pg 14, sect. 2]
- [21] Αρμονική συνιστώσα ρεύματος εισόδου ανορθωτή [22, Figure 10, pg 16, sect. 2]
- [22] Αρμονικές συνιστώσες ρεύματος του ανορθωτή [22, Figure 11, pg 17, sect. 2]
- [23] Τριφασικός (6-παλμικός) ανορθωτής πλήρους κύματος [22, Figure 12, pg 17, sect. 2]
- [24] Αρμονική συνιστώσα ρεύματος εισόδου ανορθωτή [22, Figure 13, pg 18, sect. 2]
- [25] Αρμονικές συνιστώσες ρεύματος του ανορθωτή [22, Figure 14, pg 18, sect. 2]
- [26] Ισοδύναμο απλοποιημένο κύκλωμα (απεικόνιση πτώσης τάσης κατά τη ροή αρμονικού ρεύματος μέσω της επαγωγικής αντίδρασης) [22, Figure 15, pg 19, sect. 2]
- [27] Παραμόρφωση της κυματομορφής της μέγιστης εναλλασσόμενης (AC) τάσης εισόδου (V_{p-p}) λόγω ενδοαρμικών [22, Figure 23, pg 27, sect. 2]
- [28] Κύκλωμα παράλληλου συντονισμού [18, Figure 5.2, pg 29, sec.5]
- [29] Κύκλωμα παράλληλου συντονισμού [18, Figure 5.3, pg 29, sec.5]

- [30] Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό παραμέτρων λόγω αρμονικών [18, Figure 8.2, pg 56, sec.8]
- [31] Τρίγωνο ισχύος (α) στοιχείου επαγωγικού χαρακτήρα, (β) στοιχείου χωρητικού χαρακτήρα [22, Figure 1, pg 95, sect. 5]
- [32] Γραφική απεικόνιση ισχύων σε σύστημα με αρμονικές [22, Figure 2, pg 96, sect. 5]
- [33] Κυματομορφές ρεύματος τροφοδοσία 6-παλμικού ρυθμιστή α) στο πλήρες (100%) φορτίο, με αντίδραση γραμμής 3%, $I_{THD}=37,5\%$ και πραγματικό συντελεστή ισχύος 0,94 επαγωγικό (lag), β) με μειωμένο φορτίο (στο 30%), με αντίδραση γραμμής 3%, $I_{THD}=65,7\%$ και πραγματικό συντελεστή ισχύος 0,83 επαγωγικό (lag) [22, Figure 1,3, pg 100, 101, sect. 6]
- [34] Κατανομή των αρμονικών ρευμάτων των 2 παραπάνω περιπτώσεων αντίστοιχα (από Σχήμα 2.21) [22, Figure 2,4, pg 100,101, sect. 6]
- [35] Κυματομορφή ρεύματος τροφοδοσίας 6-παλμικού SCR ρυθμιστή με μειωμένο φορτίο (στο 70%), με $I_{THD}=35,1\%$ [22, Figure 5, pg 102, sect. 6]
- [36] Κατανομή αρμονικών ρευμάτων για την παραπάνω περίπτωση (Σχήμα 2.23) [22, Figure 6, pg 103, sect. 6]
- [37] Ρεύμα εισόδου 6-παλμικού κυκλομετατροπέα α) χαμηλής συχνότητας, μειωμένου φορτίου και β) μεγάλης συχνότητας, αυξημένου φορτίου [22, Figure 7,8, pg 104, sect. 6]
- [38] (Αριστερά) μεγεθών λειτουργίας Σ.Η.Ε. και (Δεξιά) κυματομορφές τάσεως και ρεύματος εισόδου [22, Figure 1a,1b, pg 108-109, sect. 7]
- [39] (Αριστερά) μεγεθών λειτουργίας Σ.Η.Ε. και (Δεξιά) κυματομορφές τάσεως και ρεύματος εισόδου [22, Figure 2a,2b, pg 110-111, sect. 7]
- [40] (Αριστερά) μεγεθών λειτουργίας Σ.Η.Ε. και (Δεξιά) κυματομορφές τάσεως και ρεύματος εισόδου [22, Figure 3a,3b, pg 112-113, sect. 7]
- [41] (Αριστερά) μεγεθών λειτουργίας Σ.Η.Ε. και (Δεξιά) κυματομορφές τάσεως και ρεύματος εισόδου (Figure 4a,4b, pg 114-115, sect. 7, “Control of Harmonics in Electrical Power Systems ABS 2006”)
- [42] Σύστημα n γεννητριών συνδεδεμένες παράλληλα [22, Figure 5, pg 116, sect. 7]
- [43] Κυματομορφή ρεύματος εισόδου 6-παλμικού PWM ρυθμιστή σε α) συμμετρικό και β) ασύμμετρο (5% ασυμμετρία τάσης) σύστημα [22, Figure 6,7, pg 124, sect. 8]
- [44] Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα εν σειρά συντονισμού [22, Figure 1a, pg 135, sect. 9]
- [45] Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα παράλληλου συντονισμού [22, Figure 1b, pg 135, sect. 9]
- [46] Διάταξη αποσυντονισμού- x_L συνδεδεμένη σε σειρά με χωρητικό φορτίο- x_C (π.χ. συστοιχία πυκνωτών) [22, Figure 4, pg 139, sect. 9]
- [47] Κύκλωμα 12-παλμικού μετασχηματιστή μετατόπισης φάσης διπλού τυλίγματος [22, Figure 33, pg 172, sect. 10]
- [48] Κύκλωμα 12-παλμικού πολυγωνικού αυτομετασχηματιστή μετατόπισης φάσης [22, Figure 35, pg 174, sect. 10]

- [49] Συμπεριφορά ρεύματος διαταραχής (I_{THD}) σε σχέση με το φορτίο 18-παλμικού ρυθμιστή (18-pulse drive) για α) μηδενική ανισοροπία και β) ανισοροπία 2% [22, Figure 38, pg 176, sect. 10]
- [50] Συμπεριφορά ρεύματος διαταραχής (I_{THD}) σε σχέση με την τάση υποβάθρου (V_{THD}) του συστήματος για α) 50% και β) 100% φορτίο [22, Figure 39, pg 177, sect. 10]
- [51] Διάταξη διπλής επαγωγικής αντίδρασης (duplex reactor) [22, Figure 21, pg 161, sect. 10]
- [52] Κυματομορφή τάσης α) πρωτεύοντος (τάση συστήματος), β) δευτερεύοντος (τάση αντιστάθμισης) πηνίου και γ) τελική (αντισταθμισμένη) τάση [22, Figure 22a,b,c, pg 161-162, sect. 10]
- [53] Κύκλωμα γεννήτριας α) αρχικό (χωρίς τη διάταξη αντιδράσεων), β) νέο (με τη διάταξη αντιδράσεων) [22, Figure 21, pg 161, sect. 10,]
- [54] Κυματομορφές α) ρεύματος και β) τάσης κατά την εκκίνηση ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα ονομαστικής ισχύος 1MW [32, pg 441]
- [55] Αρχή λειτουργίας διάταξης ηλεκτρο-θερμοχημικής προώθησης [35, fig.1, pg. 37-2]
- [56] Μονογραμμικό διάγραμμα ηλεκτρομαγνητικού κανονιού ενός Σ.Η.Ε. πλοίου [30, pg 87]
- [57] Ηλεκτρομαγνητικό κανόνι 200MJ [31, pg 162]
- [58] Παραμόρφωση κυματομορφής (β) τάσης και (γ) συχνότητας κατά την περιοδική λειτουργία παλμικού φορτίου τετραγωνικής κυματομορφής (α) [23, fig. 16]
- [59] Καμπύλη λειτουργίας παλμικού φορτίου με βάση τις σχέσεις (3.8β) και (3.9β) [23, fig. 17, pg 118]
- [60] Τετραγωνική μορφή παλμικού φορτίου [23, fig. 21, pg 122]
- [61] (α) Σύστημα ελέγχου συχνότητας (governor) και (β) τάσης (AVR) [23, fig.22, pg 122]
- [62] Μοντέλο (α) συμβατικού Σ.Η.Ε. με το παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση και Σ.Η.Ε. εξηλεκτρισμένου πλοίου (AES) με το φορτίο συνδεδεμένο (β) στη χαμηλή και (γ) στην υψηλή τάση [23, figs 18,19,20, pgs 120-121]
- [63] Πραγματική (ενεργός) ισχύς γεννητριών [23, fig. 24a, pg 124]
- [64] Συχνότητα λειτουργίας Σ.Η.Ε. [23, fig. 24b, pg 124]
- [65] Ενεργές (RMS) τιμές τάσης σε όλους τους ζυγούς του Σ.Η.Ε. (γεννήτριας- V_{gen} , υψηλής τάσης- V_{4160V} , χαμηλής τάσης 440- V_{440V} , χαμηλής τάσης 115V- V_{115V}) [23, fig.24c, pg125]
- [66] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές βαθμού φόρτισης των γεννητριών του Σ.Η.Ε. α) για συμβατικό σύστημα και για εξηλεκτρισμένο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 25,26,27, pgs 127-128]
- [67] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές του συντελεστή n_{LV440} για συμβατικό σύστημα [23, fig. 32, pg 132]

- [68] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές του συντελεστή n_{HV} σε εξηλεκτρισμένο σύστημα με το παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση (LV) για σταθερό α) $n_{LV115}=5\%$ και β) $n_{LV440}=10\%$ [23, figs 30,31, pg 131]
- [69] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές του συντελεστή n_{HV} σε εξηλεκτρισμένο σύστημα με το παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση (HV) για σταθερό α) $n_{LV115}=5\%$ και β) $n_{LV440}=10\%$ [23, figs 28, 29, pgs 129-130]
- [70] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές του Σ.Ι. των φορτίων για α) συμβατικό σύστημα και για εξηλεκτρισμένο με παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή (LV) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 33,34,35, pgs 133-134]
- [71] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές μήκους αγωγών στην υψηλή τάση (HV) εξηλεκτρισμένου πλοίου για σύνδεση του παλμικού φορτίου α) στη χαμηλή (LV) και β) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 36,38, pgs 135-136]
- [72] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορα μήκη αγωγών στο τμήμα χαμηλής τάσης (LV) 440V για α) συμβατικό πλοίο και εξηλεκτρισμένο για σύνδεση του παλμικού φορτίου β) στη χαμηλή (LV) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 39,40,41, pgs 137-138]
- [73] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορα μήκη αγωγών στο τμήμα χαμηλής τάσης (LV) 115V για εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο α) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και β) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 42,43, pg 139]
- [74] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές περιόδου λειτουργίας του παλμικού φορτίου για α) συμβατικό σύστημα για εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 44,45,46, pgs 140-141]
- [75] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές κύκλου λειτουργίας (duty cycle) του παλμικού φορτίου για α) συμβατικό σύστημα για εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 47,48,49, pgs 142-143]
- [76] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές της υπομεταβατικής αντίδρασης των γεννητριών (X_d'') για α) συμβατικό σύστημα για εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 50,51,52, pgs 144-145]
- [77] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές αδράνειας της γεννήτριας για α) συμβατικό σύστημα για εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 53,54,55, pgs 145-146]
- [78] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές κέρδους (K) του ρυθμιστή συχνότητας (governor) για α) συμβατικό σύστημα για εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 56,57,58, pgs 147-148]
- [79] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές κέρδους (K_A) του ρυθμιστή τάσης (AVR) για α) συμβατικό σύστημα για εξηλεκτρισμένο πλοίο

με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 59,60,61, pgs 149-150]

[80] Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές του V_{Rmax} της γεννήτριας για εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο α) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και β) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 62,63, pg 151]

[81] Απλοποιημένο Σ.Η.Ε. πλοίου [24, fig.3, pg.13]

[82] Κυματομορφή α) απόκλισης της συχνότητας $\Delta f(t)$ και β) συχνότητας f με παραμέτρους $\Delta S=0,15p.u.$, $\cos\phi=0,8$, $R_f=20$, $J'=4sec$, $K_{\Pi}=25$, $dc=0,5$ και $T=0,6sec$ [24, fig.6, pg.17]

[83] Κυματομορφή α) απόκλισης της συχνότητας $\Delta f(t)$ και β) συχνότητας f για $K_{\Pi}=0$ με παραμέτρους $\Delta S=0,15p.u.$, $\cos\phi=0,8$, $R_f=20$, $J'=4sec$, $dc=0,5$ και $T=0,6sec$ [24, fig.7, pg.19]

[84] Διαμόρφωση (διαταραχή) τάσης [25, fig.1, pg.19]

[85] Ισοδύναμο μονοφασικό ηλεκτρικό κύκλωμα του υπό μελέτη Σ.Η.Ε. πλοίου [25, fig.5, pg.21]

[86] Γραφική παράσταση λειτουργίας (profile) (α) κύριου φορτίου και (β) παλμικού φορτίου [25, figs 4b, 4a]

[87] (α) Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα γραμμής διανομής-μεταφοράς (κύκλωμα RL) και (β) το διανυσματικό διάγραμμα αυτού [25, fig.6, pg.21]

[88] Κυματομορφή της τάσης του ζυγού στο φορτίο (μετά τη γραμμή μεταφοράς-διανομής) V_L με παραμέτρους $\Delta S=0,2p.u.$, $\cos\phi=0,8$, $K=5$, $K_I=5$, $dc=0,5$, $T=1sec$, $X'=0,15p.u.$, $X_C=0,2p.u.$, $S_{L0}=0,3p.u.$ [25, fig.7, pg.23]

Αλφαβητικό Ευρετήριο

APA: American Psychological Association

IEEE: The Institute for Electrical and Electronics Engineers

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή στη σχεδίαση συστημάτων πρόωσης & συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων

1.1.1 Γενικά περί Συστημάτων πρόωσης και συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων
Κάποια από τα βασικότερα συστήματα ενός πλοίου είναι το σύστημα πρόωσης, το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή, μεταφορά και διανομή αυτής όπου απαιτείται. Για τη σωστή λειτουργία του πλοίου είναι απαραίτητος ο σωστός σχεδιασμός του κάθε συστήματος, αλλά και η ομαλή συνεργασία όλων αυτών μαζί. Ο εξοπλισμός ενός πλοίου (κινητήρες, γεννήτριες, σασί, μηχανικά εξαρτήματα) και ο τρόπος λειτουργίας του πρέπει να σχεδιάζονται και να λειτουργούν με βάση ορισμένα διεθνή πρότυπα κανονισμών. Τέτοιου είδους πρότυπα είναι η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC: International Electrotechnical Commission), η Ακτοφυλακή των Ηνωμένων Πολιτειών (USCG: United States Coast Guard), SOLAS (Safety of Life at Sea) και διάφορα ακόμα.

1.1.2 Σχεδίαση και βασική δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου και του συστήματος πρόωσής του

Η βασική προϋπόθεση για το σχεδιασμό ενός πλοίου είναι η χρήση αυτού (εμπορικό, επιβατικό, πολεμικό κ.α.) και στη συνέχεια προσεγγίζεται συγκεκριμένα και αναλυτικότερα ο τρόπος μελέτης και σχεδιασμού του. Κάθε τμήμα και εξάρτημα του πλοίου χωρίζεται σε κατηγορίες, όπου μελετάται και σχεδιάζεται ξεχωριστά. Ορισμένες κατηγορίες που μπορεί να χωριστεί είναι το Σ.Η.Ε. (Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας), το Σ.Π. (Σύστημα Πρόωσης), το σύστημα επικοινωνίας και ενδοεπικοινωνίας, πυροπροστασίας και πυρασφάλειας. Με αυτόν τον τρόπο είναι ευκολότερη, ορθότερη και λιγότερο περίπλοκη η σχεδίαση του κάθε τμήματος. Κάθε υπό μελέτη κατηγορία μπορεί να χωριστεί σε υποκατηγορίες και να μελετηθεί ξεχωριστά (π.χ. το Σ.Π. του πλοίου μπορεί να διαιρεθεί στα βασικά του τμήματα που είναι: η μονάδα παραγωγής κίνησης, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης και ο προωστήρας). Αντίστοιχα, κάθε μία από αυτές τις υποκατηγορίες μπορεί να χωριστεί σε περαιτέρω υποκατηγορίες και να μελετηθεί ξεχωριστά.

1.1.2.1 Βασικές αρχές σχεδιασμού ενός ΣΗΕ και Σ.Π. πλοίου

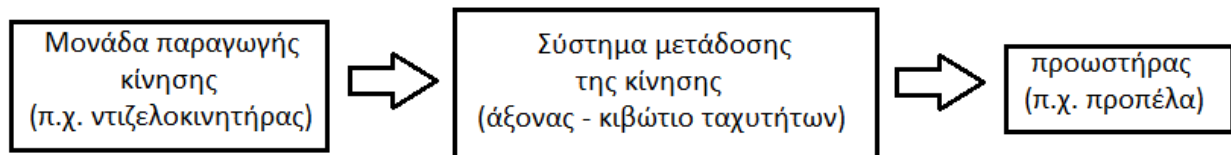
Υπάρχουν ορισμένα σημαντικά κριτήρια στα οποία στηρίζεται η υλοποίηση του ΣΗΕ και Σ.Π. ενός πλοίου και αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Μηχανικές και ηλεκτρολογικές αρχές:** Είναι τα κύρια κριτήρια και κανόνες που ακολουθούνται για τον σχεδιασμό των περισσότερων συστημάτων πάνω σε ένα πλοίο και γενικά κάθε κατασκευαστικής εφαρμογής (παραγωγή ενέργειας, νόμοι της θερμοδυναμικής, μηχανική ρευστών κ.α.). Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί μία τέτοια κατασκευή (ένα πλοίο) πρέπει να υπακούει σε αυτούς του φυσικούς κανόνες και να είναι δυνατή η υλοποίησή της με βάση αυτούς.
- **Οικονομικές αρχές:** Οι περισσότερες εφαρμογές έχουν κάποιο οικονομικό όριο το οποίο δεν θα πρέπει να ξεπεράσουν, όχι μόνο στο κομμάτι της κατασκευής, αλλά και στη συντήρηση και τη λειτουργία αυτής.
- **Ασφάλεια και αξιοπιστία:** Είναι βασική ανάγκη η τήρηση ορισμένων κανόνων κατά την κατασκευή και τη λειτουργία της συγκεκριμένης κατασκευής, του πλοίου, με σκοπό την ασφάλεια του πληρώματος, των επιβατών και οποιουδήποτε εμπλέκεται με αυτήν. Επίσης, σημαντική παράμετρος είναι και η αξιοπιστία κατά την λειτουργία ενός πλοίου, αλλά και η προγραμματισμένη πρόβλεψη των συντηρήσεων και της αντικατάστασης τμημάτων αυτού.

- **Περιορισμοί χώρου και βάρους:** Ο σχεδιασμός ενός πλοίου (π.χ. πολεμικό) μπορεί να περιορίσει το διαθέσιμο χώρο που συνήθως δίνεται για άλλες λειτουργίες, όπως το χώρο του ηλεκτροστασίου, τους χώρους διέλευσης αγωγών (ηλεκτρισμού, θερμότητας, εξαερισμού, πεπιεσμένου λαδιού και αέρα). Επίσης, το βάρος σε ένα πλοίο χρειάζεται συχνά να είναι περιορισμένο και κατανομημένο ομοιόμορφα, ώστε να μην επηρεάζεται η σταθερότητά του.
- **Έλεγχος:** Ο έλεγχος ενός πλοίου είναι μείζονος σημασίας, διότι μέσω αυτού επιτυγχάνεται η αποδοτικότερη και κυρίως ασφαλέστερη λειτουργία του. Σήμερα οι περισσότερες λειτουργίες ενός πλοίου στηρίζονται στον αυτόματο έλεγχο, κυρίως λόγω καλύτερης απόδοσης και γιατί μέσω αυτού προλαμβάνονται έκτακτες καταστάσεις και κίνδυνοι, που μπορεί να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στο ανθρώπινο δυναμικό του πλοίου, αλλά και στο ίδιο το πλοίο και θα ήταν δύσκολο να αντιμετωπιστούν με συμβατικούς τρόπους (ανθρώπινο δυναμικό).

1.1.3 Βασικά στοιχεία του συστήματος πρόωσης ενός πλοίου

Το σύστημα πρόωσης ενός πλοίου αποτελείται από 3 βασικά τμήματα, το σύστημα παραγωγής κίνησης, το σύστημα μετάδοσής της και τον προωστήρα, τα οποία είτε αυτούσια, είτε με διάφορες παραλλαγές υπάρχουν και έχουν ως κύριο στόχο την ελεγχόμενη μετακίνηση και το χειρισμό του κάθε πλοίου. Στο σχήμα 1, απεικονίζεται η κύρια δομή του συστήματος πρόωσης.



Σχήμα 1.1. Δομή συστήματος πρόωσης πλοίου

- **Μονάδα παραγωγής κίνησης:** Μπορεί να είναι οποιαδήποτε μονάδα μετατροπής της χημικής ενέργειας κάποιου καυσίμου σε κινητική, όπως κινητήρες εσωτερικής καύσης (ντιζελοκινητήρας) που χρησιμοποιούνται συνήθως, σε επιβατικά πλοία, κινητήρες εξωτερικής καύσης (αεριοστρόβιλοι, ατμοστρόβιλοι είτε με λέβητα, είτε με πυρηνικό αντιδραστήρα για την παραγωγή του υπέρθερμου ατμού), κυρίως σε πολεμικά.
- **Σύστημα μετάδοσης της κίνησης:** Υπάρχουν δύο τρόποι μετάδοσης της κίνησης από τον κινητήρα στον προωστήρα:
 - 1) Με απευθείας σύνδεση κινητήρα και προωστήρα μέσω άξονα μετάδοσης
 - 2) Με παρεμβολή κιβωτίου ταχυτήτων
 - (i) μηχανικό, μετατροπή της κίνησης μέσω γραναζιών
 - (ii) ηλεκτρικό, που ο κινητήρας περιστρέφει μία γεννήτρια και αυτή συνδέεται στη συνέχεια με έναν ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος δίνει κίνηση σε μια προπέλα (azirpode)
 - (iii) άλλου τύπου (π.χ. υδραυλικό)
- **Προωστήρας:** Είναι το τελικό εξάρτημα στο σύστημα πρόωσης ενός πλοίου και είναι υπεύθυνο για το χειρισμό και τη μετακίνησή του. Λαμβάνει την κίνηση του κινητήρα μέσω του συστήματος μετάδοσης και τη μετατρέπει σε ροπή προώθησης ικανή να μετακινήσει το καράβι. Η ισχύς του κινητήρα (P_e) δίνεται από τη σχέση:

$$P_e = M_e \cdot \omega_e,$$

όπου M_e : η ροπή του κινητήρα και

ω_e : η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του
και η τελική ροπή ώθησης που παράγεται από τον προωστήρα (T_p) προκύπτει από την σχέση:

$$P_p = T_p * v_p ,$$

όπου T_p : η δύναμη ώθησης του προωστήρα και

v_p : η ταχύτητα κίνησης του πλοίου

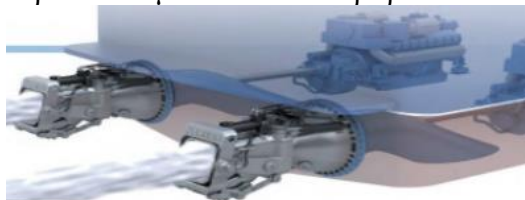
Οι τύποι προωστήρα που συναντώνται είναι οι εξής:

- **Προπέλα:** Είναι ο συνηθέστερος τύπος προωστήρα.



Εικόνα 1.1. Προπέλα πλοίου [1, fig.5.1.6]

- **Waterjet:** Αποτελείται από μία αντλία, η οποία επιταχύνει το νερό που περνάει από μέσα της, δημιουργώντας έναν πίδακα νερού που μετακινεί το καράβι.



Εικόνα 1.2. Σύστημα πρόωσης πλοίου (waterjet) [2, fig.1]

- **Voith-Schneider:** (Κυκλοειδής ρότορας) Πρόκειται για μία κυκλική πλάκα, κάθετα στην οποία είναι ενσωματωμένες ορισμένες λεπίδες με προσανατολισμό από την πλάκα προς τα κάτω. Με κατάλληλη περιστροφή αυτής της πλάκα, παράγεται η κατάλληλη ώθηση για την κίνηση του σκάφους.



Εικόνα 1.3. Σύστημα πρόωσης πλοίου (Voith-Scheider) [3, fig.1]

1.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.)

1.2.1 Γενικά περί συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων, του εξοπλισμού και γενικά όλων των μέσων που απαιτούνται για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Ένα Σ.Η.Ε. αποτελείται από τρία βασικά τμήματα που είναι:

- Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας,
- Η μεταφορά της και
- Η διανομή αυτής

1.2.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας πλοίου

Στα πλοία, λόγω της αδύνατης ηλεκτροδότησής τους από εξωτερικές πηγές ενέργειας (σταθμούς παραγωγής ξηράς), το κάθε ένα έχει αυτόνομους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ένα τέτοιο Σ.Η.Ε. συναντάται είτε τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 50, 60 Hz (πιο συνηθισμένο), είτε σε ορισμένες περιπτώσεις (όπως υποβρύχια) συνεχές ρεύμα. Η εναλλασσόμενη τάση που παράγουν οι γεννήτριες στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας των πλοίων είναι της τάξης των μερικών kV (3,3kV, 6,6kV, 11kV, 15kV) και τροφοδοτούνται απευθείας με αυτήν την τάση μόνο μεγάλα φορτία, όπως το σύστημα πρόωσης. Οι καταναλωτές που απαιτούν μικρότερη ισχύ για τη λειτουργία τους τροφοδοτούνται με μικρότερη τάση που φτάνει σε αυτούς μέσω μετασχηματιστών ή και με άλλους τρόπους (παράγραφος 1.2.4). Οι καταναλώσεις που λειτουργούν με συνεχή τάση, τροφοδοτούνται από κατάλληλους μετατροπείς της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή – ανορθωτές (AC-DC converters). Επίσης, σε αντίθεση με τα Σ.Η.Ε. ξηράς, σε ένα καράβι εξαιτίας του σχετικά μικρού μήκους διαδρομής των αγωγών ανάμεσα στους σταθμούς παραγωγής και των καταναλώσεων, υπάρχει κατευθείαν το σύστημα διανομής χωρίς να μεσολαβεί το σύστημα μεταφοράς. Παρακάτω απεικονίζεται η βασική δομή ενός Σ.Η.Ε. πλοίου:

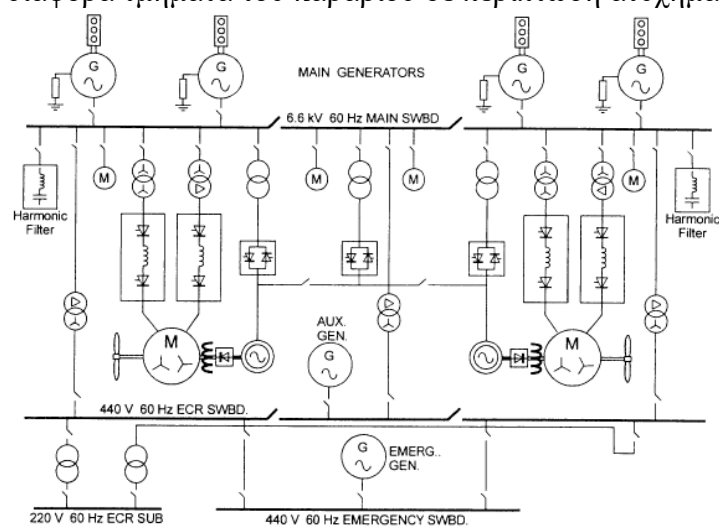


Σχήμα 1.2. Δομή ενός Σ.Η.Ε. πλοίου

- **Μονάδα παραγωγής κίνησης:** Οι πιο συνηθισμένες μονάδες είναι οι ντιζελογεννήτριες λόγω της υψηλής αναλογίας απόδοσης και οικονομίας στη λειτουργία (φθηνότερο καύσιμο). Ένας ακόμα τύπος μονάδας που χρησιμοποιείται είναι οι αεριοστροβίλοι, οι οποίοι είναι ελαφρύτεροι σε σχέση με τις ντιζελογεννήτριες και απαιτούν μικρότερο χώρο στο μηχανοστάσιο (χώρος εγκατάστασης των μονάδων παραγωγής), όμως απαιτούν ακριβότερο καύσιμο για τη λειτουργία τους. Μία ακόμα λύση, που συναντάται όμως πιο σπάνια είναι οι ατμοστροβίλοι. Σε ειδικές εφαρμογές, όπως στα υποβρύχια, που πρέπει να τηρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις (μειωμένος θόρυβος λειτουργίας) υπάρχουν διαφορετικές πηγές ενέργειας, όπως μπαταρίες και κυψέλες καυσίμου (fuel cells).
- **Γεννήτρια:** Ο πιο συνηθισμένος τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία είναι μέσω σύγχρονων τριφασικών γεννητριών. Αποτελούνται από ένα κινητό μέρος (δρομέας) στο οποίο βρίσκεται το τύλιγμα διέγερσης που παράγεται η μαγνητική ροή, από ένα σταθερό μέρος, το επαγωγικό τύμπανο (ή στάτης), που είναι το τμήμα στο οποίο παράγεται η ημιτονοειδής τάση και από τη διεγέρτρια, μία γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που τροφοδοτεί το τύλιγμα διεγέρσεως μέσω ψηκτρών. Χαρακτηρίζονται ως σύγχρονες οι συγκεκριμένες γεννήτριες, διότι η ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου ισούται με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Επιλέγεται τριφασικό σύστημα

γεννητριών λόγω του μειωμένου βάρους σε σχέση με το μονοφασικό σύστημα, για την παραγωγή ίδιας τιμής ισχύος. Για λόγους αξιοπιστίας επιλέγονται περισσότερες από μία γεννήτριες και ηλεκτροστάσια (χώροι εγκατάστασης των γεννητριών) για την κάλυψη του συνολικού φορτίου, τα οποία συνδέονται όλα μεταξύ τους. Για παράδειγμα, για συνολικό φορτίο 600kW μπορούν να τοποθετηθούν 2 ηλεκτροστάσια των 300kW, που το καθένα θα αποτελείται από 2 γεννήτριες των 150kW η κάθε μία (σχήμα 1.2.2). Επίσης, είναι δυνατή η ηλεκτρική σύνδεση του πλοίου με την ξηρά, όταν βρίσκεται αγκυροβολημένο σε λιμάνι, μέσω συγκεκριμένων διατάξεων, όπως επιτηρητή της διαδοχής των φάσεων, της μόνωσης των αγωγών σύνδεσης κ.α. Έτσι, επιτυγχάνεται η μείωση των ρύπων από τις γεννήτριες των πλοίων (περισσότεροι από αυτούς των σταθμών παραγωγής της ξηράς), αποφεύγονται οι κραδασμοί από τη λειτουργία τους και μπορεί να γίνει έλεγχος και επιδιόρθωση πιθανών βλαβών αυτών.

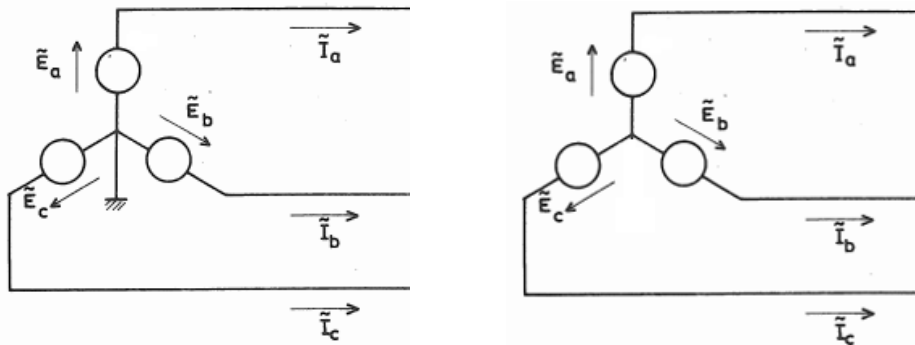
- **Διανομή Η.Ε (Ηλεκτρικής Ενέργειας):** Οι γεννήτριες συνδέονται με κεντρικούς πίνακες διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας απέχοντας μεταξύ τους (γεννήτριες-πίνακες) τη μικρότερη δυνατή απόσταση, ώστε να μειωθεί το μήκος των αγωγών και ταυτόχρονα η πιθανότητα βραχυκυκλώματος του παροχικού καλωδίου μεταξύ των φάσεων ή και με το ίδιο το σκάφος του πλοίου. Οι κεντρικοί πίνακες τροφοδοτούν είτε μεγάλα φορτία απευθείας (προωθητήρα πλώρης, πρύμνης), είτε άλλους πίνακες (υποπίνακες) που και αυτοί τροφοδοτούν αντίστοιχα άλλα φορτία, τα οποία είναι συνήθως συγκεντρωμένα σε διάφορα τμήματα του караβιού (π.χ. κουζίνα, γέφυρα). Οι υποπίνακες λαμβάνουν μειωμένη τάση μέσω μετασχηματιστών (6600V/440V, 440V/220V). Άλλοι μετατροπείς που συναντώνται είναι οι ανορθωτές (AC-DC) που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία ορισμένων φορτίων, όπως φορτία επικοινωνίας, ελέγχου. Επιπλέον, με βάση το πρότυπο SOLAS (Safety of Life at Sea) είναι υποχρεωτικό να υπάρχουν σε όλα τα πλοία μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εκτάκτου ανάγκης σε περίπτωση που τεθεί εκτός λειτουργίας το κύριο σύστημα παραγωγής ενέργειας. Συνήθως, το σύστημα αυτό αποτελείται από μία ή περισσότερες ντιζελογεννήτριες, που βρίσκονται σε ξεχωριστό χώρο από το κύριο ηλεκτροστάσιο, τροφοδοτούνται από ξεχωριστές δεξαμενές καυσίμου με φυσική ροή (ανεξάρτητες από αντλίες) και τροφοδοτούν για επαρκές χρονικό διάστημα ζωτικής σημασίας συστήματα του πλοίου, όπως συστήματα επικοινωνίας, πυρασφάλεια και πυροπροστασία. Επίσης, κάποια ακόμα από τα συστήματα μείζονος σημασίας πάνω σε ένα πλοίο είναι το πηδάλιο, το οποίο δεν πρέπει να τεθεί σε καμία περίπτωση εκτός λειτουργίας τόσο λόγω της διακοπής τροφοδοσίας του από το κύριο σύστημα, όσο λόγω βλάβης του ίδιου, καθώς και οι στεγανές πόρτες (watertight doors) που εμποδίζουν την εισχώρηση του νερού σε διάφορα τμήματα του караβιού σε περίπτωση ατυχήματος.



Σχήμα 1.3 Τυπικό Σ.Η.Ε. πλοίου [4, fig. 1,1]

1.2.3 Γειωμένο & Αγειώτο σύστημα

Όσον αφορά τη γείωση λειτουργίας ενός πλοίου, αυτή μπορεί να υπάρχει, δηλαδή ο κοινός-ουδέτερος κόμβος των τριών φάσεων στη σύνδεση αστέρα (σχήμα 1.2.3.) να είναι συνδεδεμένος με το σκελετό του πλοίου (γειωμένο σύστημα) ή να μην υπάρχει αυτή η σύνδεση (αγειώτο σύστημα).



Σχήμα 1.4. Γειωμένο σύστημα (αριστερά) και αγειώτο σύστημα (δεξιά) [5, Σχ.17]

1.2.3.1 Σύγκριση γειωμένου & αγειώτου συστήματος (πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα)

- **Γειωμένο σύστημα:** Στην περίπτωση που υπάρξει επαφή μεταξύ μιας φάσης και του σκελετού του πλοίου, τότε θα συμβεί στο συγκεκριμένο σημείο μονοφασικό βραχυκύκλωμα. Επίσης, αν έρθει σε επαφή με μία φάση κάποιο μέλος του πληρώματος, τότε θα υπάρξει ένωση της φάσης και του σκελετού (ουδέτερος κόμβος) μέσω του ανθρώπου και θα οδηγήσει σε τραυματισμό ή και δυσκολότερη κατάσταση. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται στο τμήμα του Σ.Η.Ε. που υπάρχουν μεγάλες τάσεις (μεγαλύτερες του 1kV) και ταυτόχρονα τηρούνται αυστηρές προϋποθέσεις για την επιλογή μόνωσης των αγωγών αυτών.
- **Αγειώτο σύστημα:** Στο αγειώτο σύστημα δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ του κοινού κόμβου του αστέρα και του σκάφους-σκελετού του πλοίου (floating system). Εάν κάποια από τις τρεις φάσεις έρθει σε επαφή με το σκάφος ή με μέλος του προσωπικού, δε θα συμβεί βραχυκύκλωμα, δε θα τραυματιστεί ο άνθρωπος και θα συνεχίσει να λειτουργεί η εγκατάσταση παρά το ρεύμα διαρροής που υπάρχει στο σκάφος. Γι' αυτό το λόγο το αγειώτο σύστημα είναι ασφαλέστερο και χρησιμοποιείται σε μέρη του Σ.Η.Ε. που λειτουργούν με χαμηλή τάση (λιγότερο από 440V). Όμως, η ύπαρξη αυτού του ρεύματος σφάλματος θα μείνει απαρατήρητη και γι' αυτό είναι ανάγκη να ελέγχεται η μόνωση των καλωδίων με επιτηρητές μόνωσης, ώστε να είναι έστω και έμμεσα εμφανής η συγκεκριμένη βλάβη.

1.2.4 Σύστημα τροφοδοσίας 3 ή 4 αγωγών

Το καλώδιο τροφοδοσίας που καταλήγει στους κεντρικούς πίνακες από τις γεννήτριες μπορεί να αποτελείται από 3 ή 4 αγωγούς. Για καλώδιο με 3 αγωγούς φτάνουν στους κεντρικούς πίνακες μόνο οι 3 φάσεις της πηγής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας μόνο η πολική τάση (τάση ανάμεσα σε δύο φάσεις) της γεννήτριας, ενώ για μικρότερη τάση είναι απαραίτητος μετασχηματιστής υποβιβασμού. Για καλώδιο με 4 αγωγούς καταλήγουν στους κεντρικούς πίνακες οι 3 φάσεις και ο ουδέτερος κόμβος των τριών τυλιγμάτων της γεννήτριας. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η χρήση της πολικής τάσης της γεννήτριας, αλλά και της φασικής (τάση ανάμεσα σε μία φάση και τον ουδέτερο κόμβο), η οποία προκύπτει στο τριφασικό σύστημα μέσω της εξής σχέσης:

$$V_{\phi} = \frac{V_{\pi}}{\sqrt{3}} \quad (1.1)$$

που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί τάση μικρότερου μέτρου χωρίς την ύπαρξη μετασχηματιστή.

1.3 Φορτίο Πρόωσης

1.3.1 Ανάλυση φορτίου πρόωσης

Ένα από τα βασικότερα συστήματα ενός πλοίου είναι το σύστημα πρόωσης. Για το σχεδιασμό και την κατασκευή αυτού πρέπει να είναι γνωστά εξαρχής ορισμένα μεγέθη και τιμές που αφορούν το πλοίο.

- **Αντίσταση (αδράνεια) σκάφους (hull resistance):** Ένα σημαντικό μέγεθος για τη μελέτη του συστήματος πρόωσης είναι η αντίσταση σκάφους ενός πλοίου, δηλαδή η αντίσταση για την οποία πρέπει να ασκηθεί η ελάχιστη δύναμη ώστε να κινηθεί το καράβι στο νερό μη εξαναγκασμένα (χωρίς πρόωση). Η αντίσταση αυτή εξαρτάται από τα παρακάτω μεγέθη:
 1. **Τριβή & Ιξώδες:** πρόκειται για την αντίσταση που συναντά το πλοίο από την επαφή του με το νερό που βρίσκεται γύρω του.
 2. **Πίεση:** είναι η διαφορά της πίεση που αναπτύσσεται ανάμεσα στο μπροστινό και το πίσω μέρος του πλοίου κατά την κίνησή του.
- **Αντίσταση κυμάτων:** είναι η αντίσταση που οφείλεται στα κύματα που δημιουργούνται κατά την πλεύση του πλοίου.

Η αντίσταση του αέρα που ασκείται στο τμήμα του πλοίου που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του νερού, (συνήθως) δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τη μελέτη.

Γενικά, η αντίσταση του σκάφους (R) είναι ανάλογη της ταχύτητας του πλοίου (v_s):

$$R = c_1 \cdot v_s^2 \quad (1.2)$$

όπου c_1 : συντελεστής αναλογίας

και η ωφέλιμη ισχύς που απαιτείται για να κινηθεί το πλοίο είναι:

$$P_E = R \cdot v_s \quad (1.3)$$

$$= (c_1 \cdot v_s^2) \cdot v_s$$

$$\text{ή } P_E = c_1 \cdot v_s^3 \quad (1.4)$$

δηλαδή για δεδομένη αύξηση της ταχύτητας του πλοίου η ισχύς που απαιτείται αυξάνεται εκθετικά της ταχύτητας. Ο συντελεστής αναλογίας (c_1) αποτελείται από ένα παράγοντα (c_0) που εξαρτάται από την ταχύτητα του πλοίου (v_s) και μία μεταβλητή y που προκύπτει από διάφορες παραμέτρους (βάθος του νερού, ρύπανση του πλοίου, κατάσταση της θάλασσας). Η λεπτομερής μελέτη της αντίστασης σκάφους απαιτεί πολλές γνώσεις από διάφορους τομείς (π.χ. μηχανική ρευστών) και λαμβάνει υπόψη διάφορα μεγέθη (τριβή, ιξώδες νερού, συμπεριφορά των κυμάτων) και γι' αυτό στη συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται απλά μία περιληπτική παρουσίαση αυτού του μεγέθους.

- **Αδιάστατη αντίσταση C_T :** Η αντίσταση σκάφους (R) μπορεί να αντικατασταθεί από μία γενικότερη (αδιάστατη-χωρίς μονάδες μέτρησης) σχέση, η οποία προκύπτει από τη μηχανική των ρευστών:

$$C_T = \frac{R}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_s \cdot v_s^2} \quad (1.5)$$

όπου ρ : η πυκνότητα του νερού (kg/m^3),

A_s : η επιφάνεια του πλοίου που περιβάλλεται από νερό (m^2) και ισχύει:

$$A_s = V^{\frac{2}{3}} \quad (1.6)$$

όπου ∇ : ο όγκος μετατόπισης του πλοίου (m^3) και ισχύει:

$$\nabla = \rho * \Delta \quad (1.7)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (1.3), (1.6), (1.7) στην (1.5) προκύπτει η παρακάτω σχέση μέσω της οποίας υπολογίζεται η ειδική αντίσταση C_E :

$$C_E = \frac{P_E}{\frac{1}{2} \rho \nabla v_s^3} \quad (1.8)$$

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι η ειδική αντίσταση του πλοίου εξαρτάται από το μέγεθος του πλοίου, την ταχύτητα και το μέσο στο οποίο κινείται (θαλασινό νερό, γλυκό νερό).

Πρόωση: Πρόωση είναι η κατάσταση κατά την οποία παράγεται η κατάλληλη ώθηση (T), ώστε το πλοίο να υπερνικήσει την αντίστασή (αδράνεια) του, να κινηθεί και να αναπτύξει την ταχύτητα που απαιτείται κάθε φορά. Το βασικότερο εξάρτημα για την παραγωγή της συγκεκριμένης ώθησης είναι ο προωστήρας του πλοίου, ο οποίος όταν κινείται (περιστρέφεται) με την κατάλληλη ταχύτητα (v_A) παράγει την αντίστοιχη ώθηση-ροπή ώστε να κινηθεί το καράβι. Ο συνηθέστερος τύπος προωστήρα είναι η προπέλα (όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.1.3) και η τελική ισχύς που παράγεται από την προπέλα δίνεται από την εξής σχέση:

$$P_T = T * v_A \quad (1.9)$$

1.3.2 Συντελεστές για τη μελέτη της πρόωσης

Οι βασικοί συντελεστές για την πρόωση είναι :

- **Αφαιρετικός συντελεστής ώθησης (thrust deduction factor):** Για την έναρξη ενός πλοίου από στάση είναι απαραίτητο ένα ποσοστό της συνολικής ροπής ώθησης ($k_p * T$) που παράγεται συνολικά από τον προωστήρα. Αυτό το ποσοστό (t) καλείται αφαιρετικός συντελεστής ώθησης και συνδέεται με την αντίσταση σκάφους (R) με την σχέση:

$$R = (1-t) * k_p * T \quad (1.10)$$

όπου k_p : ο αριθμός των αξόνων των προωστήρων (προπέλες)

- **Συντελεστής απόνερων (wake factor):** Η ταχύτητα στον προωστήρα (προπέλα) του πλοίου δεν ισούται με την ταχύτητα πλεύσης του, αλλά είναι μεγαλύτερη. Όμως, η ταχύτητα που αναπτύσσεται στην έξοδο της προπέλας (v_A) είναι μικρότερη από αυτή του πλοίου. Από τη διαφορά ανάμεσα στην ταχύτητα κίνησης του πλοίου (v_s) και την ταχύτητα v_A προκύπτει ο συντελεστής απόνερων (w):

$$w = \frac{v_s - v_A}{v_s} \quad (1.11)$$

- **Συντελεστής σκάφους (hull efficiency):** Η τελική ισχύς που παράγεται στους προωστήρες (P_T) είναι διάφορη της ωφέλιμης ισχύς (P_E) και η σχέση σύνδεσης αυτών ονομάζεται συντελεστής σκάφους (η_H):

$$\eta_H = \frac{P_E}{k_p * P_T} \quad (1.12)$$

$$\left[\eta_H = \frac{P_E}{k_p * P_T} = \frac{R * v_S}{k_p * T * v_A} = \frac{R * v_S}{\left(\frac{R}{1-t}\right) * v_A} = \frac{R * v_S * (1-t)}{R * v_A} = \frac{v_S * (1-t)}{v_A} \right] \quad (1.12\alpha)$$

$$\left[w = \frac{v_S - v_A}{v_S} \quad \text{ή} \quad v_S * w = v_S - v_A \quad \text{ή} \quad v_S * w - v_S = v_A \quad \text{ή} \quad v_S * (1 - w) = v_A \right]$$

$$\left[\frac{v_S}{v_A} = \frac{1}{1-w} \right] \quad (1.12\beta)$$

Αντικαθιστώντας την συνάρτηση (1.12α) στην (1.12β) προκύπτει ότι:

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (1.13)$$

- **Συντελεστής προωστήρα (propeller efficiency):** Η ισχύς που μεταφέρεται στον προωστήρα (P_o) ώστε να παραχθεί κατάλληλη ώθηση και να αναπτυχθεί η επιθυμητή ταχύτητα, υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$P_o = Q * \omega_p = Q * 2\pi * n \quad (1.14)$$

όπου Q : η ροπή του άξονα του προωστήρα και

ω_p : η γωνιακή του ταχύτητα (του άξονα)

Για να προκύψει η ισχύς P_o , ο προωστήρας δοκιμάζεται σε δεξαμενή νερού (ιδανικές συνθήκες) και ο συντελεστής προωστήρα (η_o) προκύπτει ως εξής:

$$\eta_o = \frac{P_T}{P_o} = \frac{T * v_A}{Q * 2\pi * n_p} \quad (1.15)$$

Η ισχύς που μεταφέρεται στο πίσω μέρος του πλοίου (P_o) στην πραγματικότητα διαφέρει από αυτή που υπολογίζεται κατά την δοκιμή στη δεξαμενή νερού. Από τη σχέση ανάμεσα στην ιδανική ισχύ (P_o) και την πραγματική (P_p) προκύπτει ο συντελεστής σχετικής περιστροφής (relative rotating efficiency):

$$\eta_R = \frac{P_o}{P_p} = \frac{Q}{M_p} \quad (1.16)$$

όπου M_p : η πραγματική ροπή στο πίσω μέρος του πλοίου.

- **Προωθητικός συντελεστής (propulsive efficiency):** Ως προωθητικός συντελεστής ορίζεται το πηλίκο της ωφέλιμης ισχύς (P_E) προς την πραγματική ισχύ που λαμβάνεται από τους προωστήρες (P_D):

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} \quad (1.17)$$

Επίσης, ο παραπάνω συντελεστής μπορεί να εκφραστεί και μέσω προηγούμενων συντελεστών που έχουν αναφερθεί και έχει την παρακάτω μορφή:

$$\eta_D = \eta_H * \eta_o * \eta_R \quad (1.18)$$

- **Αδιάστατος συντελεστής μεταφερόμενης ισχύς (Non-dimensional delivered power coefficient)- C_D :**

Η μεταφερόμενη ισχύς προς όλους τους προωστήρες υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$P_D = \frac{P_E}{\eta_D} \quad (1.19)$$

Από τη σχέση (1.8) ισχύει ότι:

$$C_E = \frac{P_E}{\frac{1}{\rho^{\frac{1}{3}} * \Delta^{\frac{2}{3}} * v_s^3}} \quad \text{ή}$$

$$P_E = \rho^{\frac{1}{3}} * \Delta^{\frac{2}{3}} * v_s^3 * C_E \quad \text{ή}$$

$$P_E = c_1 * C_E \quad (1.20)$$

όπου $c_1 = \rho^{\frac{1}{3}} * \Delta^{\frac{2}{3}} * v_s^3$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (1.20) στην (1.19) προκύπτει:

$$P_D = \frac{\rho^{\frac{1}{3}} * \Delta^{\frac{2}{3}} * v_s^3 * C_E}{n_D} = C_D * \rho^{\frac{1}{3}} * \Delta^{\frac{2}{3}} * v_s^3 \quad \text{ή}$$

$$P_D = c_2 * v_s^3 \quad (1.21)$$

όπου $C_D = \frac{C_E}{n_D} \quad (1.22)$

και $c_2 = C_D * \rho^{\frac{1}{3}} * \Delta^{\frac{2}{3}}$

Ο παραπάνω συντελεστής εξαρτάται από την ταχύτητα και το σχήμα του πλοίου, τη ρύπανση αυτού, τη γεωμετρία της προπέλας, την κατασκευή και το βάθος του νερού. Οπότε εξαρτάται από τις ίδιες παραμέτρους που επηρεάζουν τους συντελεστές από τους οποίους ορίζεται (C_E, n_D).

- **Νόμος προωστήρα (propeller law):** Νόμος προωστήρα καλείται η σχέση ανάμεσα στην ισχύ που μεταφέρεται στον προωστήρα (P_D) και στην ταχύτητα του άξονά του (n_p). Εμπειρικά προκύπτει ότι η ταχύτητα του άξονα είναι ανάλογη της ταχύτητας του πλοίου:

$$n_p = c_3 * v_s \quad (1.23)$$

και ο νόμος προωστήρα ορίζεται ως εξής:

$$P_p = \frac{P_D}{k_p} = \frac{c_2}{k_p} * v_s^3 = \frac{c_2 * n_p^3}{k_p * c_3^3}$$

$$\text{ή } P_p = c_4 * n_p^3 \quad (1.24)$$

και η ροπή του προωστήρα είναι:

$$P_p = M_p * \omega_p = 2\pi * n_p * M_p \quad \text{ή } M_p = \frac{P_p}{2\pi * n_p} = \frac{c_4 * n_p^3}{2\pi * n_p} = \frac{c_4}{2\pi} * n_p^2$$

$$\text{ή } M_p = c_5 * n_p^2 \quad (1.25)$$

Δηλαδή η ροπή του άξονα του προωστήρα είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής του.

1.3.3 Αλυσίδα πρόωσης

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.1.3 ένα σύστημα πρόωσης αποτελείται από 3 βασικά τμήματα (μονάδα παραγωγής κίνησης, σύστημα μετάδοσης αυτής και προωστήρας-προπέλα).

- **Συντελεστής άξονα (shaft efficiency):** Τα κύρια μέρη του συστήματος μετάδοσης είναι το κιβώτιο ταχυτήτων και ο άξονας μετάδοσης της κίνησης από τη μονάδα παραγωγής προς την προπέλα. Σε αυτό το τμήμα υπάρχουν ορισμένες απώλειες που οφείλονται σε τριβές που εμφανίζονται στα έδρανα (ρουλεμάν) και στα γρανάζια του κιβωτίου και σε έδρανα στήριξης του άξονα. Οι συγκεκριμένες απώλειες καλούνται απώλειες άξονα και εκφράζονται με το συντελεστή άξονα:

$$n_s = \frac{P_p}{P_s} \quad (1.26)$$

όπου P_p : η ισχύς που μεταφέρεται τελικά στην προπέλα και

P_s : η ισχύς που μεταφέρεται στον άξονα από το κιβώτιο ταχυτήτων και ισχύει ότι:

$$P_s = M_s \cdot \omega_p = 2\pi \cdot n_p \cdot M_s \quad (1.27)$$

Η αναπτυσσόμενη ισχύς της μονάδας κίνησης (P_B) ισούται με:

$$P_B = M_B \cdot \omega_e = 2\pi \cdot n_e \cdot M_B \quad (1.28)$$

όπου M_B : η ροπή της μονάδας παραγωγής κίνησης και

ω_e : η γωνιακή ταχύτητα του άξονα της μονάδας κίνησης

- **Συντελεστής κιβωτίου (gearbox efficiency):** Στην περίπτωση που παρεμβάλλεται κιβώτιο ταχυτήτων μεταξύ της μονάδας κίνησης και της προπέλας, τότε λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής κιβωτίου:

$$\begin{aligned} n_{GB} &= \frac{P_s}{k_e \cdot P_B} \quad (1.29) \\ &= \frac{M_s \cdot 2\pi \cdot n_p}{k_e \cdot M_B \cdot 2\pi \cdot n_e} = \frac{M_s \cdot n_p}{k_e \cdot M_B \cdot n_e} \\ \text{ή } n_{GB} &= \frac{M_s}{k_e \cdot M_B} * \frac{1}{i} \quad (1.30) \end{aligned}$$

όπου $i = \frac{n_e}{n_p}$ είναι ο συντελεστής αναλογίας του κιβωτίου, δηλαδή η σχέση ανάμεσα στις στροφές στην είσοδο και την έξοδο του κιβωτίου.

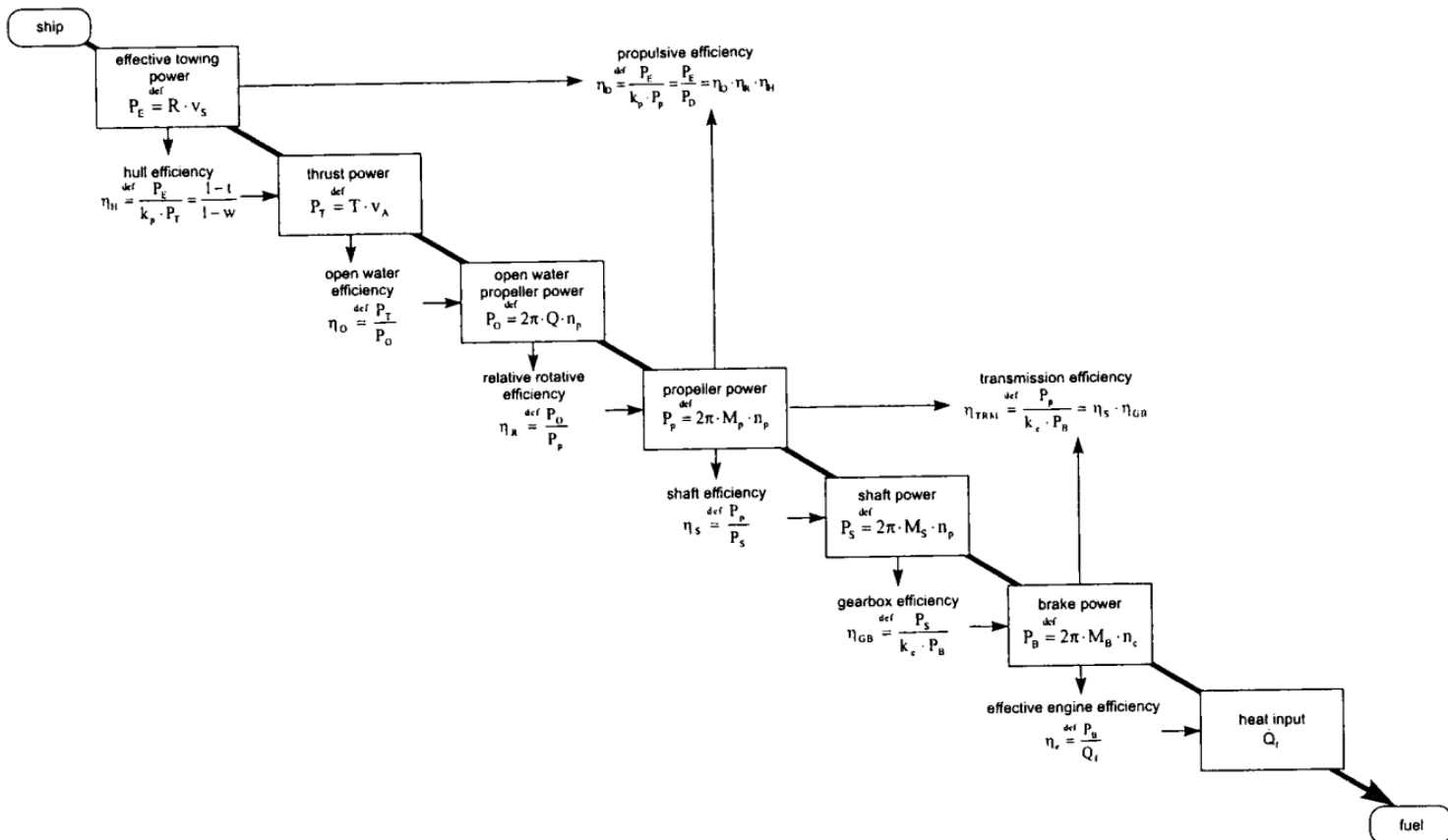
- **Συντελεστής μετάδοσης (total transmission efficiency):** Ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης προσδιορίζεται μέσω των δύο προηγούμενων συντελεστών ως εξής:

$$n_{TRM} = n_s \cdot n_{GB} \quad (1.31)$$

- **Βαθμός απόδοσης κινητήρα (effective engine efficiency):** Πρόκειται για την εφαρμογή του 2^{ου} θερμοδυναμικού αξιώματος κατά Kelvin-Plank, δηλαδή είναι αδύνατο μια θερμική μηχανή να μετατρέψει κατά 100% τη θερμική της ενέργεια (Q_f) σε ωφέλιμο έργο (P_B) στον άξονά της. Ο συγκεκριμένος βαθμός μετατροπής της ενέργειας καλείται βαθμός απόδοσης της μονάδας παραγωγής κίνησης και δίνεται από τη σχέση:

$$n_e = \frac{P_B}{Q_f} \quad (1.32)$$

Η απεικόνιση όλων των παραπάνω συντελεστών και ισχύων που παρουσιάστηκαν στα διάφορα τμήματα του συστήματος πρόωσης, επιτυγχάνεται μέσω του διαγράμματος της αλυσίδας πρόωσης (σχήμα 1.3.1):



Σχήμα 1.5. Αλυσίδα πρόωσης [6, fig. 3.8]

1.4 Φορτίο ηλεκτρικών καταναλώσεων

1.4.1 Γενική περιγραφή

Σε κάθε πλοίο απαιτείται η μελέτη της συνολικής ηλεκτρικής ισχύος των καταναλώσεων για το σχεδιασμό του Σ.Η.Ε. του (διαστασιολόγηση γεννητριών, μετατροπέων, αγωγών, ασφαλιστικών διατάξεων). Η συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιείται για διάφορες λειτουργικές καταστάσεις του πλοίου και οι βασικότερες είναι οι τρεις παρακάτω:

- λειτουργία κανονικής πορείας (στη θάλασσα)
- λειτουργία χειρισμών
- λειτουργία «εν όρμω»

1.4.2 Τρόποι υπολογισμού της συνολικής ισχύος των φορτίων

Ανάλογα με τον τύπο του πλοίου μπορούν να αναλυθούν και περισσότερες λειτουργικές καταστάσεις. Για παράδειγμα, στα πολεμικά πλοία μελετάται ξεχωριστά η λειτουργία όταν το πλοίο βρίσκεται σε επιφυλακή, όταν βρίσκονται σε κατάσταση μάχης όταν είναι εν πλω, εν όρμω κτλ. Επίσης, σε άλλου τύπου, όπως

κρουαζιερόπλοια και πλοία-ψυγεία αναλύεται ξεχωριστά η λειτουργία τους ανάλογα με την εποχή (καλοκαίρι ή χειμώνας), λόγω των μεγάλων μονάδων διατήρησης της θερμοκρασίας που διαθέτουν. Ο υπολογισμός των φορτίων των ηλεκτρικών καταναλώσεων μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τρόπους:

- με εμπειρικό τύπο
- με ισολογισμό ισχύος
- μέσω προσομοίωσης

1.4.2.1 Εμπειρικός τύπος

Με τον εμπειρικό τύπο προκύπτει μια αρχική εκτίμηση της ισχύος που απαιτούν οι καταναλώσεις ενός πλοίου. Ο τύπος που επιλέγεται για τον υπολογισμό του συνολικού φορτίου πρέπει προηγουμένως να έχει χρησιμοποιηθεί σε ένα ικανοποιητικό αριθμό πλοίων με παρόμοια χαρακτηριστικά, όπως τύπο και μέγεθος και με ανάλογη εγκατεστημένη ισχύ πρόωσης, ώστε να προκύψει ένα αποδεκτό αποτέλεσμα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας εμπειρικός τύπος (σχέση 1.33), ο οποίος αφορά ένα μέσο φορτηγό πλοίο, στηρίζεται στην ισχύ πρόωσης παρόμοιων πλοίων με το υπό μελέτη και σκοπός του είναι ο υπολογισμός της αναγκαίας ισχύος κατά τη λειτουργία κανονικής πορείας.

$$P_{EL} = 100 + 0,55*(P_{MCR})^{0,7} \quad (1.33)$$

Για τον υπολογισμό της αναγκαίας ισχύος των άλλων δύο καταστάσεων (χειρισμών και «εν όρμω») ισχύει επίσης ο εξής εμπειρικός κανόνας:

- Ισχύς λειτουργίας χειρισμών = 1,3*ισχύς κανονικής πορείας
- Ισχύς λειτουργίας «εν όρμω» = (0,3-0,4)*ισχύς κανονικής πορείας
(Design of propulsion and electric power generation systems, H.K.Wood, D.Stapersman, pg. 65, par.3.5)

1.4.2.2 Ενεργειακός ισολογισμός ισχύος

Ο ισολογισμός ισχύος αποτελεί το συνηθέστερο τρόπο υπολογισμού του φορτίου των ηλεκτρικών καταναλώσεων. Πρόκειται για έναν πίνακα που περιέχει όλα τα στοιχεία των φορτίων που βρίσκονται σε ένα πλοίο. Πιο αναλυτικά, στο πρώτο τμήμα του πίνακα (αριστερό) καταγράφονται σε ξεχωριστές στήλες τα παρακάτω:

- ονομαστικά, όλα τα φορτία του караβιού (καταναλωτές)
- το πλήθος των ίδιων φορτίων (N)
- ο βαθμός απόδοσής τους (n)
- η ονομαστική τους ισχύς (η ισχύς που αναγράφεται στην πινακίδα των φορτίων- $P_{ov.αποδ.}$)
- η ονομαστική ισχύς που απορροφούν από το δίκτυο ($P_{ov.απορ.} = P_{ov.αποδ.}/n$)
- η εγκατεστημένη ισχύς ($P_{εγκ.} = P_{ov.απορ.} * N$)

Το δεύτερο τμήμα του πίνακα (δεξιό) χωρίζεται ανάλογα με τις λειτουργικές καταστάσεις του πλοίου (λειτουργία κανονικής πορείας, χειρισμών και «εν όρμω») και η κάθε μία από αυτές διακρίνεται στις εξής υποκατηγορίες:

- πλήθος ίδιων φορτίων που λειτουργούν στη συγκεκριμένη κατάσταση (N')
- συντελεστής λειτουργίας των φορτίων αυτών (f_s) όπου:

$$f_s = \frac{\sum P_i t_i}{24 * P_{ov. αποδ.}}$$

με P_i: η ισχύς λειτουργίας κατά το χρονικό διάστημα i του 24-ώρου και

t_i: οι ώρες λειτουργίας με ισχύ P_i κατά τη διάρκεια ενός 24-ώρου.

- η συνολική ισχύς λειτουργίας αυτών των φορτίων κατά τη συγκεκριμένη κατάσταση (P_{λειτ.} = P_{ov. απορ.} * N' * f_s)

Το άθροισμα της ισχύς λειτουργίας ((P_{λειτ.}) των φορτίων σε μία λειτουργική κατάσταση δίνει την απαιτούμενη ισχύ παραγωγής για τη συγκεκριμένη κατάσταση.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ένας ενδεικτικός πίνακας ισολογισμού ισχύος για ένα τμήμα της ηλεκτρικής εγκατάστασης πλοίου:

Πίνακας 1.1. Πίνακας ισολογισμού ισχύος

a/a	Καταναλωτές	Απόδοση	Πλήθος	Εγκατεστημένη Ισχύς				Ισχύς Κανονικής Πορείας			Ισχύς «εν όρμω»		
				P _{ov. αποδ.}		P _{ov. αποροφ.}	P _{εγκατ.}	N	f _s	P _{λειτ.}	N	f _s	P _{λειτ.}
				Hp	kW	kW	kW			kW			kW
		n	N										
				4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Γερανογέφυρα	0,85	1	25	18,65	21,94	21,94	1	0,50	10,97	1	0,00	0,00
2	Τόρνος	0,85	1	4	3	3,51	3,51	1	0,10	0,35	1	0,10	0,35
3	Δράπανο	0,85	1	2	1,49	1,76	1,76	1	0,10	0,18	1	0,10	0,18
4	Συσκευή συγκολλήσεων	0,70	1	20,1	15	21,43	21,43	1	0,10	2,14	1	0,10	2,14
5	Μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων	0,85	2	16,1	12	14,12	28,24	1	0,40	5,65	1	0,40	5,65
6	Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	0,85	2	10	7,46	8,77	17,55	1	0,10	0,88	1	0,10	0,88
7	Εφεδρική παροχή	0,85	2	13,4	10	11,77	23,53	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
8	Σύνολο									20,17			9,19

- **Συντελεστής φορτίου:** Εκφράζει το βαθμό λειτουργίας ενός φορτίου, δηλαδή κατά τι ποσοστό λειτουργεί αυτό σε μία λειτουργική κατάσταση σε σχέση με το 100% της απόδοσής του. Για παράδειγμα, το βαρούλκο χειρισμού της άγκυρας, ονομαστικής ισχύος P_B, λειτουργεί κατά ένα μικρό ποσοστό και μόνο στη διάρκεια των χειρισμών για την πόντιση και την ανέλκυση αυτής και γι' αυτό δεν υπολογίζεται ολόκληρη η τιμή της ισχύς του κατά τον ισολογισμό, αλλά μόνο ένα ποσοστό αυτής. Ο συντελεστής φορτίου λαμβάνει τιμές από 0 ως 1.
- **Συντελεστής ταυτοχρονισμού:** Ο συντελεστής αυτός αφορά το χρόνο που λειτουργούν ορισμένα φορτία ταυτόχρονα. Συχνά, δεν λειτουργούν ταυτόχρονα όλα τα φορτία σε μία λειτουργική κατάσταση και γι' αυτό δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη στη συνολική ισχύ όλο το άθροισμα αυτών των φορτίων, παρά μόνο τα φορτία που είναι ενεργοποιημένα ταυτόχρονα κάποια χρονική στιγμή. Ο συγκεκριμένος συντελεστής λαμβάνει τιμές από 0 ως 1.

Πολλές φορές οι δύο παραπάνω συντελεστές δεν χρησιμοποιούνται ξεχωριστά στους υπολογισμούς, αλλά εμφανίζονται ως ένας ενιαίος που καλείται συντελεστής λειτουργίας (f_s).

Ο υπολογισμός των συντελεστών που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι αρκετά απαιτητικός και συχνά υπερδιαστασιολογούνται, ώστε να προκύψει μία υψηλότερη τιμή εγκατεστημένης ισχύος και να μην υπάρξει κίνδυνος ανεπάρκειας ισχύος για την εξυπηρέτηση των φορτίων. Η παραπάνω σύμβαση πραγματοποιείται παρά τα μειονεκτήματα που προκύπτουν, όπως:

- υψηλότερο κόστος γεννητριών (αγορά, συντήρηση, λειτουργία)
- λειτουργία αυτών με χαμηλότερη απόδοση (διότι δουλεύοντας σε ένα μικρό ποσοστό σε σχέση με την πλήρη λειτουργία τους αυτή γίνεται ασύμφορη λόγω των ίδιων τους των απωλειών που πρέπει να καλύψουν).

Γενικά, για τη μελέτη του συνολικού ηλεκτρικού φορτίου χρησιμοποιείται αρχικά ο εμπειρικός τύπος ώστε να προκύψει μια γρήγορη και αντιπροσωπευτική τιμή της ισχύος που απαιτείται για την κάλυψη των καταναλώσεων και το τελικό και πιο λεπτομερές αποτέλεσμα προκύπτει μέσω του ισολογισμού ισχύος.

1.4.2.3 Προσομοίωση ηλεκτρικών απαιτήσεων του φορτίου

Ένας ακόμα τρόπος υπολογισμού του φορτίου ηλεκτρικών καταναλώσεων είναι μέσω προσομοίωσης της κάθε λειτουργικής κατάστασης του πλοίου λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους και συνθήκες λειτουργίας. Είναι η ακριβέστερη μέθοδος από τις προηγούμενες δύο που αναλύθηκαν και ο βασικός τρόπος λειτουργίας της είναι με τη χρήση στοχαστικών κατανομών πιθανότητας (stochastic probability distributions).

1.5 Τυπικά χαρακτηριστικά Σ.Η.Ε.

1.5.1 Γενική περιγραφή

Η σχεδίαση και η υλοποίηση κάθε πλοίου και γενικά κάθε θαλάσσιας και παραθαλάσσιας εγκατάστασης πρέπει ή εΐθισται να ακολουθεί τις οδηγίες που θέτουν ορισμένα πρότυπα. Τέτοιου είδους πρότυπο είναι το IEEE Recommended Practice for Electric Installations on Shipboards, το οποίο έχει ως αντικείμενο το ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό τμήμα του πλοίου και προτείνει τρόπους σχεδιασμού, δοκιμής, λειτουργίας όσον αφορά το Σ.Η.Ε. μιας τέτοιας εγκατάστασης.

1.5.2 Χαρακτηριστικά Σ.Η.Ε. πλοίου

Με βάση τον παραπάνω κανονισμό, υπάρχουν συγκεκριμένοι τρόποι σχεδίασης και σύνδεσης ενός Σ.Η.Ε. αλλά και τυποποιημένες τιμές και μεγέθη, όπως η τάση και η συχνότητα, που ποικίλουν ανάλογα με το μέγεθος, το απαιτούμενο φορτίο και τον τύπο του πλοίου ή γενικά της εγκατάστασης.

Οι τρόποι σύνδεσης του Σ.Η.Ε. ενός πλοίου σύμφωνα με το σχετικό πρότυπο είναι οι εξής:

- Μονοφασικό σύστημα (AC ή DC) με 2 αγωγούς
- Μονοφασικό σύστημα (AC ή DC) με 3 αγωγούς
- Τριφασικό σύστημα (AC) με 3 αγωγούς
- Τριφασικό σύστημα (AC) με 4 αγωγούς

Οι τυποποιημένες τιμές τάσης που θέτει το συγκεκριμένο πρότυπο παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1.2. Πίνακας τυποποιημένων τάσεων

Είδος τάσης	AC															DC	
	120	208	230	240	380	450	480	600	690	2400	3300	4160	6600	11000	13800	120	240
Τάση παραγωγής γεννητριών (V)	120	208	230	240	380	450	480	600	690	2400	3300	4160	6600	11000	13800	120	240
Τάση δικτύου (χρήσης) (V)	115	200	220	230	350	440	460	575	660	2300	3150	4000	6000	10600	13460	115	240

Στα εναλλασσόμενα δίκτυα οι τιμές συχνότητας που προτείνονται από το IEEE είναι 50Hz ή 60Hz. Τέλος, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται γενικές εφαρμογές των παραπάνω μεγεθών και τιμών σε διάφορα είδη πλοίων.

Πίνακας 1.3. Πίνακας εφαρμογής του IEEE σε πλοία

*Διαίρεση του συστήματος του πλοίου σε υποσυστήματα και τροφοδοσία αυτών μέσω μετασχηματιστών.

**Ισομερή κατανομή φορτίου στις 3 φάσεις.

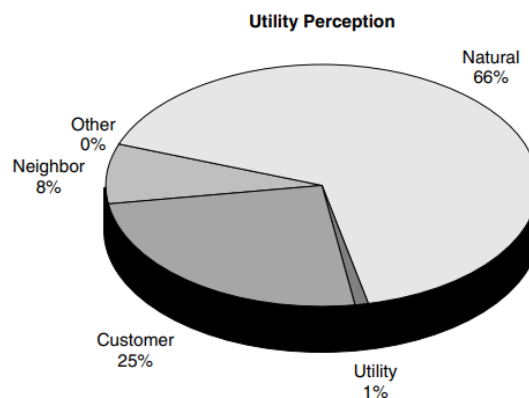
***Η τάση λειτουργίας του φωτισμού και των υπόλοιπων φορτίων (μηχανών, κινητήρων) πρέπει να είναι 200V/115V AC, τριφασική τάση.

Πλοία με γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC)						
Μέγεθος πλοίου	Μέγιστη Ισχύ	Σύνδεσης και παραγωγή γεννήτριας		Τάση δικτύου (τάση χρήσης)		Σύνδεση δικτύου διανομής
		Μικρό	15 kW	Μονοφασική	120V AC	Μονοφασική
Τριφασική	Τριφασική			Τριφασική		
Μεσαίο	100kW	Τριφασική	230V AC	Τριφασική	220V AC	Τριφασική – 3 αγωγοί 120V AC
			240V AC		230V AC	Τριφασική – 4 αγωγοί 208V/120V***
Μεγάλο**		Τριφασική 450V -690V AC		Τριφασική 440V -660V AC		Τριφασική – 3 αγωγοί 120V-230V AC
Πολύ μεγάλο**		2400V-6600V AC		Τριφασική 2300V-6000V AC		Τριφασική – 4 αγωγοί 120V/208V AC*
Πλοία με γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (DC)						
Μικρό		120V DC				115V DC
Μεγάλο		240V DC	3 αγωγοί			115V DC – 3 αγωγοί
						230V DC – 3 αγωγοί

1.6 Τα προβλήματα της ποιότητας ισχύος

1.6.1 Γενική περιγραφή

Γενικά, η ποιότητα ισχύος δεν είναι μία απόλυτη έννοια, αλλά καθορίζεται από ποικίλους παράγοντες. Η ποιότητα της προσφερόμενης ισχύος από το δίκτυο κρίνεται από τις απαιτήσεις των καταναλωτών και των φορτίων που πρόκειται να τροφοδοτηθούν. Τα προβλήματα που προκύπτουν οφείλονται κυρίως σε καιρικά φαινόμενα και σε αρκετά μικρότερο ποσοστό σε σφάλματα του κέντρου παραγωγής της ισχύος ή στους καταναλωτές, όπως έχει προκύψει από σχετική μελέτη (Courtesy of Georgia Power Co), όσον αφορά το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στην ξηρά.



Σχήμα 1.6. Μελέτη λόγων πρόκλησης προβλημάτων ισχύος [7, fig. 1.1]

Στο κομμάτι των σφαλμάτων που οφείλονται στο κέντρο παραγωγής, υπεύθυνα μπορεί να είναι ο εξοπλισμός του συστήματος παραγωγής της ισχύος και το λογισμικό ελέγχου κάνοντας τον εντοπισμό αυτού αρκετά απαιτητικό.

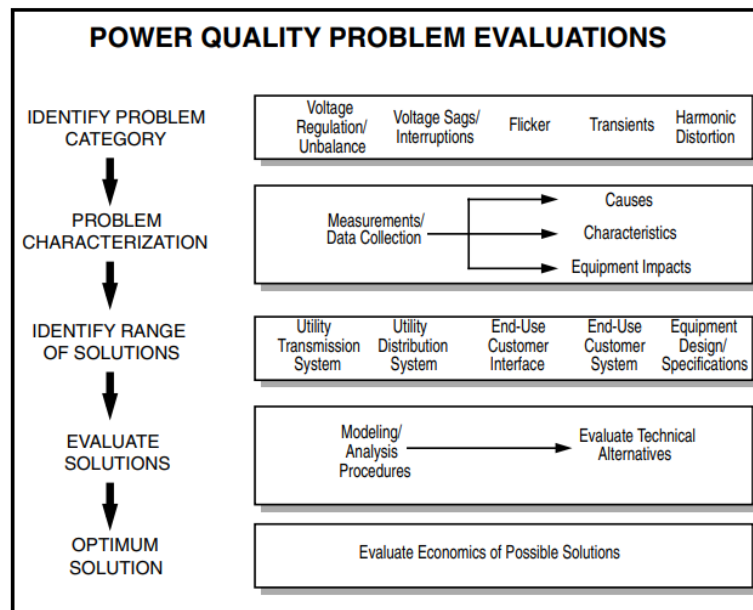
Ο έλεγχος της ποιότητας ισχύος αναφέρεται ουσιαστικά στον έλεγχο της τάσης και σε ορισμένες περιπτώσεις του ρεύματος, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, που παρέχει το Σ.Η.Ε. της εγκατάστασης. Το μέγεθος της τάσης μπορεί να ρυθμιστεί με αρκετούς και διαφορετικούς τρόπους, ενώ τα ρεύματα που διαρρέουν τα φορτία ελέγχονται δυσκολότερα. Η τάση που παράγεται από τις γεννήτριες Ε.Ρ. (Εναλλασσόμενου Ρεύματος) ενός Σ.Η.Ε. παριστάνεται από ένα ημιτονοειδές κύμα με συγκεκριμένη περίοδο (T) – συχνότητα (f) και πλάτος ($V_{\max} - V_{\min}$) και οποιαδήποτε παραμόρφωση αυτών των μεγεθών εκτός των επιτρεπτών ορίων που θέτουν τα πρότυπα, αποτελεί πρόβλημα της ποιότητας ισχύος. Επιπλέον, παραμόρφωση της τάσης μπορεί να προκληθεί και μέσω προβλημάτων του ρεύματος που διαρρέει το Σ.Η.Ε.. Για παράδειγμα, σε περίπτωση βραχυκυκλώματος ή κατά το κεραυνικό πλήγμα σε κάποιο τμήμα του Σ.Η.Ε. (στη γραμμή μεταφοράς, στο φορτίο, κ.α.) το ρεύμα βραχυκύκλωσης αποκτά μεγάλες τιμές και έτσι η τάση μειώνεται σημαντικά (σχεδόν μηδενίζεται). Επίσης, τα ρεύματα των αρμονικών συχνοτήτων προκαλούν ανάλογες διαταραχές στην τάση του δικτύου.

Οι λόγοι για τους οποίους γίνεται τόση προσπάθεια για την κατανόηση και αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος (της ποιότητας ισχύος) είναι κυρίως οικονομικοί. Το πρόβλημα αυτό γίνεται ακόμα σοβαρότερο όταν αφορά μεγάλες επιχειρήσεις και εργοστάσια στα οποία κάποιο έντονο πρόβλημα ισχύος μπορεί να οδηγήσει σε διακοπή της παροχής αυτής και άρα στην παύση της γραμμής παραγωγής, προκαλώντας μεγάλο οικονομικό κόστος (αντίστοιχα στην περίπτωση ενός πλοίου που η εξυπηρέτηση σχεδόν όλων των φορτίων

του βασίζεται στο ηλεκτρικό σύστημα παραγωγής ενέργειας, η διακοπή της ισχύος μπορεί να προκαλέσει εξίσου σοβαρά προβλήματα). Το πρότυπο που σχετίζεται με τον έλεγχο αυτού του θέματος είναι το “SEMI Standard f-47, Specification for Semiconductor Process Equipment Voltage Sag Immunity” (Προδιαγραφή για τον εξοπλισμό ημιαγωγών με σκοπό την αντιμετώπιση της βύθισης τάσεως). Είναι ένα θέμα μείζονος σημασίας για κάθε επιχείρηση και κατασκευαστή εξοπλισμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (γεννητριών), διότι η παροχή ισχύος με συνεχή προβλήματα ποιότητας κλονίζει την εμπιστοσύνη των καταναλωτών προς την επιχείρηση, προκαλώντας σε αυτήν οικονομική ζημιά και αμφίβολη φήμη.

Το πρόβλημα της ποιότητας ισχύος χωρίζεται στις παρακάτω πέντε κατηγορίες, ώστε να αναλυθεί και τελικά να αντιμετωπιστεί:

- Αναγνώριση του είδους του προβλήματος ποιότητας ισχύος (βύθιση τάσης, διαταραχές λόγω αρμονικών συχνοτήτων, κλπ.).
- Χαρακτηρισμός προβλήματος μέσω μετρήσεων (επιπτώσεις σε δίκτυο και φορτία, χαρακτηριστικά αυτού).
- Εύρεση του τμήματος που επιδέχεται βελτίωση (σύστημα παραγωγής, εξοπλισμός διανομής, φορτία-καταναλώσεις).
- Αξιολόγηση λύσης (καταλληλότητα της λύσης και εναλλακτικοί τρόποι επιδιόρθωσης του προβλήματος).
- Τελική λύση (Οικονομική αξιολόγηση αυτής ώστε να κριθεί συμφέρουσα ή όχι).



Σχήμα 1.7. Βήματα επίλυσης προβλήματος ισχύος [8, fig. 1.2]

Υπάρχουν πολλά και ποικίλα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που προκαλούν διαταραχές και κατ' επέκταση προβλήματα ποιότητας ισχύος στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας των διάφορων Σ.Η.Ε. (χερσαία, πλοίου, κλπ.). Τα κυριότερα από αυτά με βάση την κατάταξη της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (International Electrotechnical Commission – IEC) παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1.4. Πίνακας ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων

Φαινόμενα αγωγής χαμηλών συχνοτήτων	Conducted low-frequency phenomena
Αρμονικές - ενδο-αρμονικές	Harmonics – interharmonics
Ταλαντώσεις – Διακυμάνσεις τάσης	Voltage fluctuations (flicker)
Βυθίσεις & Διακοπές τάσης	Voltage dips and interruptions
Ανισορροπία τάσης	Voltage imbalance (unbalance)
Παραμόρφωση συχνότητας	Power frequency variations
Επαγόμενες τάσεις χαμηλής συχνότητας	Inducted low-frequency voltages
DC τάσεις σε AC δίκτυα	DC in AC networks
Σήματα συστημάτων	Signal systems (power line carrier)
Φαινόμενα ακτινοβολίας χαμηλών συχνοτήτων	Radiated low-frequency phenomena
Μαγνητικά πεδία	Magnetic fields
Ηλεκτρικά πεδία	Electric fields
Φαινόμενα αγωγής υψηλών συχνοτήτων	Conducted high-frequency phenomena
Διαρκώς περιοδικά επαγόμενα κύματα τάσεων ή ρευμάτων	Inducted continuous-wave (CW) voltages or currents
Μίας κατεύθυνσης ή μεταβατικά φαινόμενα	Unidirectional transients
Μεταβατικά φαινόμενα υπό μορφή ταλάντωσης	Oscillatory transients
Φαινόμενα ακτινοβολίας υψηλών συχνοτήτων	Radiated high-frequency phenomena
Μαγνητικά πεδία	Magnetic fields
Ηλεκτρικά πεδία	Electric fields
Ηλεκτρομαγνητικά πεδία	Electromagnetic fields
Διαρκώς περιοδικά κύματα	Continuous waves
Μεταβατικά φαινόμενα	Transients
Φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	Electrostatic discharge phenomena (ESD)
Πυρηνικός ηλεκτρομαγνητικός παλμός	Nuclear electromagnetic pulse (NEMP)

Για τα πλοία, η συνεχής εγκατάσταση νέων ηλεκτρικών φορτίων και η αντικατάσταση των μη ηλεκτρικών, που υπήρχαν μέχρι τα τελευταία χρόνια, με ηλεκτρικά (π.χ. αντλίες, βαρούλκα, ηλεκτροπρόωση) παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που έχει προσφέρει, έχει δημιουργήσει και ορισμένα προβλήματα στην ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος, όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω.

1.7 Παλμικά φορτία

Ένα είδος φορτίου που προκαλεί προβλήματα στην ποιότητα ισχύος των πλοίων και όχι μόνο, όπως αυτά αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, είναι τα παλμικά φορτία (pulse loads). Παλμικά φορτία ενός Σ.Η.Ε. πλοίου είναι αυτά που απαιτούν μεγάλα ποσά ισχύος σε πολύ μικρό χρονικά διάστημα (sec, msec) προκαλώντας σοβαρά προβλήματα στην ισχύ του δικτύου, όπως αλλοίωση συχνότητας και τάσης (frequency/

voltage modulation), με αποτέλεσμα διάφορες επιπτώσεις σε συστήματα του πλοίου. Υπάρχουν πρότυπα (NATO standard-STANAG 1008, IEEE-45) που θέτουν περιορισμούς στις αλλοιώσεις που αναφέρθηκαν με σκοπό την ομαλή λειτουργία του Σ.Η.Ε. κάθε πλοίου και θαλάσσιας εγκατάστασης (offshore). Τέτοιου είδους φορτία είναι οι συσκευές πλοήγησης και εντοπισμού μέσω παραγωγής ηλεκτρομαγνητικών και ακουστικών κυμάτων (ραντάρ, σόναρ), τα ηλεκτρομαγνητικά όπλα (κανόνια, λέιζερ) κ.α. Είναι φορτία που συνδέονται σε διάφορα τμήματα του ηλεκτρικού δικτύου (του πλοίου), όπως στο τμήμα της χαμηλής τάσης ή της υψηλής τάσης και σε συνδυασμό με διάφορους άλλους παράγοντες, όπως θα αναφερθούν λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3, που συμβαίνουν στο δίκτυο τη συγκεκριμένη στιγμή μπορεί να μεταβληθεί ο βαθμός της επιρροής τους στην παρεχόμενη ισχύ και κατ' επέκταση να είναι εντός ή εκτός των επιτρεπόμενων ορίων των κανονισμών.

1.8 Δομή διπλωματικής εργασίας

Το κύριο αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η συγκεκριμένη εργασία είναι η μελέτη της ποιότητας ισχύος ενός Σ.Η.Ε. πλοίου και ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Ορισμένοι από αυτούς είναι τα διάφορα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που συμβαίνουν στο ηλεκτρικό δίκτυο, όπως βύθιση τάσης, παραμόρφωση τάσης και συχνότητας, μεταβατικά φαινόμενα, αρμονικές συνιστώσες τάσεων και ρευμάτων. Θα γίνει ανάλυση όλων αυτών των φαινομένων που προκαλούν αλλοίωση της ισχύος και κυρίως των αρμονικών ρευμάτων και τάσεων, θα σχολιαστούν οι περιορισμοί στις διακυμάνσεις βασικών μεγεθών ενός ηλεκτρικού δικτύου, όπως η τάση και η συχνότητα, που θέτουν διάφορα πρότυπα που αφορούν τα Σ.Η.Ε. πλοίων και θαλάσσιων εγκαταστάσεων. Θα μελετηθούν αναλυτικά τα παλμικά φορτία ενός πλοίου, ένα είδος φορτίων που η λειτουργία τους προκαλεί σημαντικές παραμορφώσεις στην τάση και τη συχνότητα του δικτύου, με αποτέλεσμα να δημιουργείται θέμα παραβίασης των ορίων παραμόρφωσης των μεγεθών που αναφέρθηκαν προηγουμένως (τάση, συχνότητα) και συνεπώς των αντίστοιχων κανονισμών. Επίσης, θα γίνει θεωρητική ανάλυση (μέσω μαθηματικής προσέγγισης) των επιπτώσεων που προκαλούν στο Σ.Η.Ε. ενός πλοίου, αλλά και ανάλυση μέσω προσομοιώσεων. Επίσης, θα γίνει σύγκριση των κανονισμών που ισχύουν για τους περιορισμούς των παραμορφώσεων των διάφορων μεγεθών (τάσης, συχνότητας) που επηρεάζονται από παλμικά φορτία και μέσω των θεωρητικών και πρακτικών μελετών αυτών θα φανεί αν μπορούν να προκύψουν σημεία βελτίωσης των κανονισμών. Τέλος, μέσω της σχεδίασης ενός Σ.Η.Ε πλοίου που θα περιέχει τα βασικά εξαρτήματα και εγκαταστάσεις (αγωγοί, μηχανές, κινητήρες, μετασχηματιστές, κ.α.) θα εκτελεστούν προσομοιώσεις με διάφορα σενάρια λειτουργίας των παλμικών φορτίων ενός πλοίου. Έτσι, θα προκύψει μία εικόνα του τρόπου λειτουργίας των παλμικών φορτίων ενός πλοίου ανάλογα με τις παραμέτρους που ισχύουν κάθε φορά για τα φορτία αυτά (διάρκεια, απαίτηση ισχύος, τμήμα σύνδεσης) και θα είναι δυνατή η βελτίωση και τελικά η επίλυση των προβλημάτων που προκύπτει από τα παλμικά φορτία.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Εισαγωγή στα ζητήματα ποιότητας ισχύος

2.1 Εισαγωγή

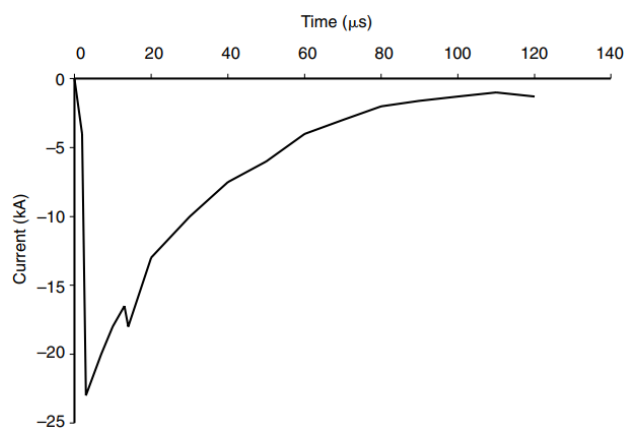
Η συνεχής βελτίωση και εξέλιξη του ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στο τμήμα της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, για το έλεγχο και την παρακολούθηση αυτής, πέρα από τα πολλά και ποικίλα οφέλη που προσφέρει, έχει δημιουργήσει και ορισμένα ζητήματα που επηρεάζουν την ορθή λειτουργία των Σ.Η.Ε. και χρήζουν αντιμετώπιση. Η διατήρηση και η βελτίωση της ποιότητας ισχύος ώστε να ανταποκρίνονται στα όρια που θέτουν τα αντίστοιχα πρότυπα είναι κρίσιμης σημασίας. Για διάφορες κατηγορίες καταναλωτών (εταιρίες τηλεπικοινωνιών, ιατρικές εγκαταστάσεις, φαρμακευτικά εργαστήρια, κ.α.) είναι απαραίτητη η σταθερή και εντός των επιτρεπτών ορίων ισχύ για την τροφοδοσία του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεών τους. Κυρίως τα τελευταία χρόνια λόγω της συνεχής εξέλιξης των μεθόδων αναλύσεων, οι οποίες στηρίζονται στην αυτόματη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, με ελάχιστη εμπλοκή του ανθρώπινου δυναμικού, έχει δοθεί μεγάλη έμφαση στην παρακολούθηση και καταγραφή δεδομένων που αφορούν διάφορες τιμές και μεγέθη που επηρεάζουν την ποιότητα ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνονται πληροφορίες που βοηθούν τις εταιρίες παραγωγής ενέργειας στον εντοπισμό σημείων του Σ.Η.Ε. που προκαλούν διαταραχές στη συμπεριφορά της ισχύος, όπως σφάλματα στη λειτουργία διακοπών ή ηλεκτρικές εκκενώσεις με τη μορφή τόξου μεταξύ αγωγών. Έτσι, μέσω της επιδιόρθωσης αυτών των θεμάτων και με συστηματική συντήρηση παρόμοιων τμημάτων της εγκατάστασης επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση στην ποιότητα της ισχύος και κατ' επέκταση ορθότερη εξυπηρέτηση των καταναλωτών. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.6 του προηγούμενου κεφαλαίου, τα ζητήματα της ποιότητας ισχύος ενός Σ.Η.Ε. εξαρτώνται από διάφορα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που προκαλούν ποικίλα προβλήματα στο δίκτυο, όπως παραμόρφωση συγκεκριμένων μεγεθών (τάση, συχνότητα) με αποτέλεσμα τη διαταραχή και την παραμόρφωση της τελικής ηλεκτρικής ισχύος που λαμβάνεται από τους χρήστες. Στο πρώτο τμήμα του συγκεκριμένου κεφαλαίου θα γίνει μία αναλυτική περιγραφή των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, όπως σύντομα παρουσιάστηκαν στον πίνακα 1.4, που προκύπτουν στο δίκτυο και προκαλούν τελικά ορισμένα σοβαρά ζητήματα στην ποιότητα ισχύος. Στο δεύτερο μισό του κεφαλαίου θα γίνει αρχικά μία γενική μελέτη των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος και της τάσεως στα Σ.Η.Ε. ξηράς και στη συνέχεια θα δοθεί μεγαλύτερη βάση στα Σ.Η.Ε. πλοίων. Συγκεκριμένα θα αναλυθούν οι πηγές των αρμονικών, τα προβλήματα που προκαλούν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, οι τρόποι μέτρησης, ελέγχου και ανάλυσης αυτών και τελικά οι μέθοδοι αντιμετώπισης και περιορισμού τους.

2.2 Μεταβατικά φαινόμενα

Γενικά, ως μεταβατικό φαινόμενο (transient-surge) ορίζεται εκείνο που συμβαίνει στιγμιαία και μη αναμενόμενα στη φύση ή ως το σημείο μεταβολής κατά τη μετάβαση μιας σταθερής κατάστασης σε μία άλλη, το οποίο εξαφανίζεται αμέσως μετά τη μετάβαση αυτή. Ένα μεταβατικό φαινόμενο, στο κομμάτι που αφορά τη συγκεκριμένη ηλεκτρική ανάλυση, χωρίζεται σε δύο κατηγορίες με βάση την κυματομορφή που λαμβάνει η μεταβατική τάση ή το μεταβατικό ρεύμα κατά τη διάρκεια αυτού. Υπάρχουν τα κρουστικά (impulsive) και τα ταλαντευόμενα (oscillatory) μεταβατικά φαινόμενα.

2.2.1 Κρουστικά μεταβατικά φαινόμενα (Impulsive transients)

Πρόκειται για μία ξαφνική (στιγμιαία) μεταβολή μιας σταθερής κατάστασης της τάσης, του ρεύματος ή και των δύο και είναι ένα φαινόμενο διπλής κατεύθυνσης, που μπορεί να εμφανιστεί είτε στη θετική, είτε στην αρνητική ημιπερίοδο του κύματος της τάσης ή του ρεύματος. Ο κύριος λόγος εμφάνισης των κρουστικών μεταβατικών φαινομένων είναι το κεραυνικό πλήγμα σε κάποιο τμήμα του Σ.Η.Ε. και συνήθως δε διαδίδονται σε μεγάλη απόσταση μέσα στο σύστημα (Η.Ε.) από το σημείο που προσέκρουσαν, παρά μόνο σε σπάνιες περιπτώσεις. Το συγκεκριμένο φαινόμενο χαρακτηρίζεται από το χρόνο μετώπου του, το χρόνο που χρειάζεται για να λάβει τη μέγιστη (peak) τιμή του και το χρόνο ημίσεως εύρους, το χρόνο που απαιτείται για να φτάσει στο μισό της μέγιστης τιμής του (αφότου έχει ήδη φτάσει τη μέγιστη τιμή του). Στο σχήμα 2.1 απεικονίζεται ένα κρουστικό μεταβατικό φαινόμενο που προκλήθηκε από πλήγμα κεραυνού με τιμές 1,2/50μsec, 2000V, δηλαδή χρειάζονται 1,2μsec ($1,2 \cdot 10^{-6}$ sec) για να φτάσει τη μέγιστη τιμή της τάσης του (2000V) και άλλα 50μsec ($50 \cdot 10^{-6}$ sec) για να μειωθεί στο μισό της μέγιστης τιμής της τάσης του.



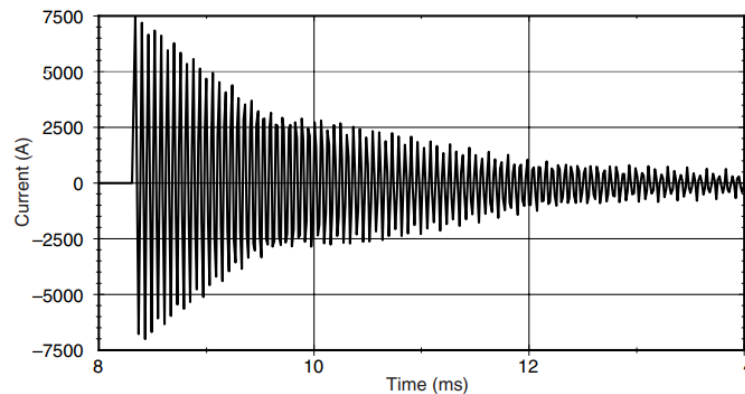
Σχήμα 2.1. Γραφική απεικόνιση κρουστικού μεταβατικού φαινομένου λόγω κεραυνού [9, fig. 2.1]

2.2.2 Ταλαντευόμενα μεταβατικά φαινόμενα (Oscillatory transients)

Ομοίως με τα κρουστικά, τα ταλαντευόμενα μεταβατικά φαινόμενα προκαλούνται από μία αιφνίδια αλλαγή της μόνιμης κατάστασης της τάσεως ή του ρεύματος, αλλά με τη διαφορά ότι σε αυτά η διαταραχή που προκαλείται, συμβαίνει και στη θετική και στην αρνητική ημιπερίοδο του κύματος της τάσεως ή του ρεύματος. Με άλλα λόγια, πρόκειται για την ταχεία εναλλαγή της πολικότητας του αντίστοιχου κάθε φορά κύματος. Τα μεγέθη που καθορίζουν το συγκεκριμένο μεταβατικό φαινόμενο είναι η διάρκεια, το πλάτος και η συχνότητά του. Με βάση το τελευταίο, τα ταλαντευόμενα μεταβατικά φαινόμενα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- **Μεταβατικά φαινόμενα υψηλής συχνότητας (High frequency transients):** Η συχνότητά τους είναι μεγαλύτερη των 500kHz, έχουν διάρκεια μερικά μsec ($1-10 \cdot 10^{-6}$ sec) και προκαλούνται κυρίως, αφού έχει προηγηθεί στο δίκτυο κάποιο κρουστικό μεταβατικό φαινόμενο.
- **Μεταβατικά φαινόμενα μέσης συχνότητας (Medium frequency transients):** Το εύρος της συχνότητάς τους είναι από 5-500kHz και η διάρκειά τους είναι κάποιες δεκάδες μsec ($10-100 \cdot 10^{-6}$ sec). Η συνεχόμενη σύνδεση πυκνωτών στο δίκτυο (σχήμα 2.2), ο χειρισμός διακοπών αγωγών και η εμφάνιση κρουστικού μεταβατικού φαινομένου μπορούν να προκαλέσουν τέτοιου είδους διαταραχή στο δίκτυο.

- **Μεταβατικά φαινόμενα χαμηλής συχνότητας (Low frequency transients):** Λαμβάνουν τιμές συχνότητας μικρότερες των 5kHz και η διάρκειά τους κυμαίνεται από 0,3-0,5msec ($0,3-0,5 \cdot 10^{-3}$ sec). Προκαλείται κυρίως κατά τη σύνδεση συστοιχίας (τράπεζας) πυκνωτών στο δίκτυο και εμφανίζεται συνήθως σε δίκτυα διανομής ενέργειας και μετάδοσης σημάτων. Υπάρχουν και τα φαινόμενα μικρότερης συχνότητας (κάτω από 300Hz) που συναντώνται επίσης σε δίκτυα διανομής και προκαλούνται κατά την έναρξη λειτουργίας μετασχηματιστών.



Σχήμα 2.2. Ταλαντευόμενο μεταβατικό φαινόμενο μέσης συχνότητας από συνεχή σύνδεση πυκνωτών στο δίκτυο [10, fig. 2.2]

2.3 Διακυμάνσεις τάσης μακράς διάρκειας

Γενικά, οι διακυμάνσεις μακράς διάρκειας αφορούν ενεργές (RMS – Root-Mean-Square) τιμές της τάσης και με βάση το πρότυπο ANSI C84.1 (American National Standard for Electric Power Systems and Equipment) ως τέτοιου είδους διακυμάνσεις ορίζονται εκείνες που υπερβαίνουν σε διάρκεια τα 60 sec. Οι συγκεκριμένες διαταραχές προκαλούνται κυρίως από μεταβολές στη λειτουργία των φορτίων που είναι συνδεδεμένα στο σύστημα, από χειρισμούς σε διακοπών και διακρίνονται τρεις κατηγορίες, οι διακυμάνσεις υπερτάσεων, υποτάσεων και οι παρατεταμένες διακοπές τάσης.

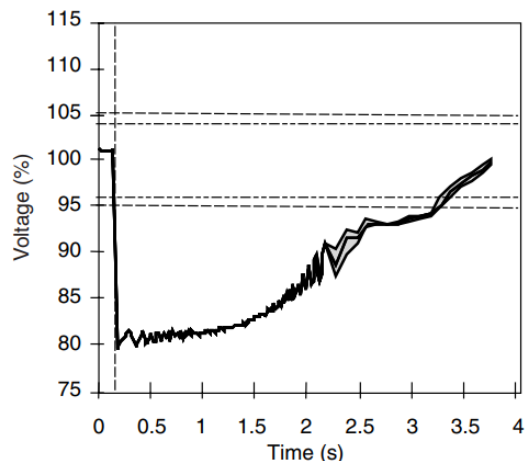
- **Διακυμάνσεις υπερτάσεων μακράς διάρκειας (Overvoltages):** Πρόκειται για αύξηση της ενεργού τιμής της εναλλασσόμενης τάσης (AC) στο 110% της ονομαστικής της τιμής, για διάρκεια που ξεπερνάει τα 60 sec. Οι λόγοι εμφάνισής τους είναι εξαιτίας της σύνδεσης μια συστοιχίας πυκνωτών στο δίκτυο ή από την αποσύνδεση κάποιου φορτίου μεγάλης ισχύος από αυτό. Συνήθως, συμβαίνουν σε Σ.Η.Ε. με ελλιπή ή ανύπαρκτο εξοπλισμό ρύθμισης της τάσεως.
- **Διακυμάνσεις υποτάσεων μακράς διάρκειας (Undervoltages):** Αντίθετα με τις παραπάνω διαταραχές, οι διακυμάνσεις υποτάσεων αφορούν τη μείωση της ενεργού τιμής της τάσης στο 90% της ονομαστικής τιμής λειτουργίας της, για διάρκεια που ξεπερνάει τα 60 sec. Τα αίτια πρόκλησής τους είναι οι αντίστροφες διαδικασίες από αυτές που προκαλούν διακυμάνσεις υπερτάσεων, δηλαδή η αποσύνδεση κάποιας συστοιχίας (τράπεζας) πυκνωτών από το σύστημα, η σύνδεση φορτίων μεγάλης ισχύος λειτουργίας και η υπερβολική ζήτηση ισχύος από το συγκεκριμένο δίκτυο.
- **Παρατεταμένες διακοπές τάσεως (Sustained interruptions):** Η συγκεκριμένη κατηγορία διακύμανσης τάσης μακράς διάρκειας αναφέρεται στο συμβάν κατά το οποίο η τάση μηδενίζεται για περίοδο μεγαλύτερη του ενός λεπτού. Πολλές φορές ο όρος αυτός σχετίζεται με τη γενική διακοπή της

τροφοδοσίας (outage), αλλά δεν προσδιορίζουν το ίδιο φαινόμενο. Η γενική διακοπή τροφοδοσίας οφείλεται στην παύση λειτουργίας του Σ.Η.Ε. λόγω βλάβης κάποιου τμήματος ή εξαρτήματος αυτού, ενώ ο όρος της παρατεταμένης διακοπής της τάσεως οφείλεται ειδικά στην ανυπαρξία τάσης για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

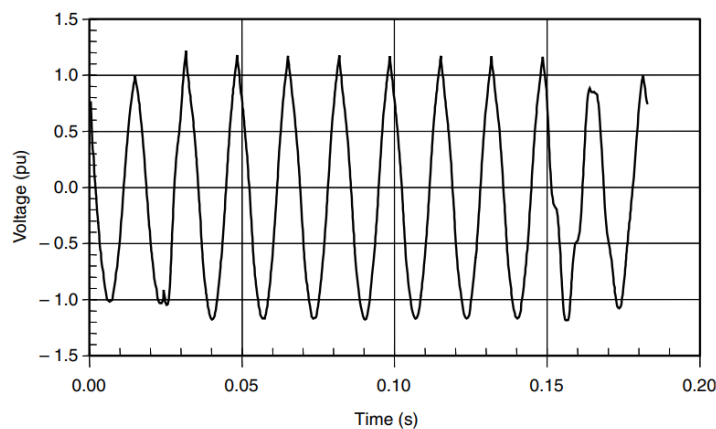
2.4 Διακυμάνσεις τάσης μικρής διάρκειας

Η συγκεκριμένη κατηγορία αφορά διακυμάνσεις που χαρακτηρίζονται ως αστραπιαίες, στιγμιαίες ή προσωρινές λόγω της μικρής διάρκειας δράσης τους, η οποία ξεκινάει με την εμφάνιση του σφάλματος (διακύμανσης) και τερματίζει με την ενεργοποίηση των ασφαλιστικών διατάξεων. Οι βασικές αιτίες πρόκλησης αυτού του φαινομένου είναι η σύνδεση φορτίων μεγάλης ισχύος, που απαιτούν αντίστοιχα ρεύματα εκκίνησης και οι απώλειες σε σημεία συνδέσεων των αγωγών με διάφορα τμήματα του δικτύου. Το φαινόμενο αυτό χωρίζεται και αναλύεται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες:

- **Προσωρινή βύθιση τάσης (Voltage Sag-Dip):** Πρόκειται για μείωση της ενεργού (RMS) τιμής της τάσης από 10% ως 90% για χρόνο από μισό κύκλο κύματος (μισή περίοδος, $T/2 = 10\text{msec} = 0.01\text{sec}$, για συχνότητα δικτύου $f=50\text{Hz}$, όπου $T=1/f$) μέχρι ένα λεπτό (60 sec). Για χρόνο βύθισης της τάσης μικρότερη του μισού κύκλου κύματος, η διαταραχή κατατάσσεται στην κατηγορία των μεταβατικών φαινομένων (παράγραφος 2.2), ενώ για διάρκεια που ξεπερνάει το 1 λεπτό, τότε αποτελεί διαταραχή τάσεως μακράς διάρκειας (παράγραφο 2.3). Βύθιση τάσης (Sag) εμφανίζεται στο δίκτυο με την ενεργοποίηση κάποιου φορτίου μεγάλης ισχύος ή κάποιου κινητήρα. Ένας τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας κατά την εκκίνησή του απαιτεί τιμές ρεύματος 6-10 φορές μεγαλύτερες του ρεύματος ονομαστικής λειτουργίας του. Αυτό μπορεί να προκαλέσει στο δίκτυο σημαντική βύθιση στην τάση του, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 2.3, τη στιγμή εκκίνησης του κινητήρα η τάση μειώνεται στο 80% της ονομαστικής και μετά από μικρό χρονικό διάστημα (περίπου 3 sec) επανέρχεται στην κανονική τιμή της.
- **Προσωρινή υπέρταση (Swell – Momentary overvoltage):** Καλείται η αύξηση της ενεργού τάσης κατά 10% μέχρι 80% της τιμής της κατά την ονομαστική λειτουργία και για χρόνο από μισό κύκλο κύματος ως 1 λεπτό. Η συγκεκριμένη διαταραχή χαρακτηρίζεται από τη διάρκεια και την ενεργό τιμή που λαμβάνει κατά τη διαταραχή και η σοβαρότητα του σφάλματος που προκύπτει από τη διαταραχή αυτή εξαρτάται από το σημείο, την αντίσταση και τη γείωση του Σ.Η.Ε.. Κατά τη διάρκεια μονοφασικού σφάλματος με τη γη, για παράδειγμα, ενός τριφασικού συστήματος (Η.Ε.) η υπέρταση αυτή εμφανίζεται στις άλλες δύο φάσεις που δεν εμπλέκονται στο σφάλμα. Σε αγείωτο τριφασικό σύστημα, που δεν υπάρχει αντίσταση μηδενικής ακολουθίας, η τάση μεταξύ φάση και γης των μη εμπλεκόμενων στο σφάλμα φάσεων λαμβάνει αρκετά μεγάλη τιμή (σχεδόν διπλάσια της ονομαστικής τιμής της), ενώ σε γειωμένο σύστημα που υπάρχει μικρή αντίσταση μηδενικής ακολουθίας και άρα αγωγίμος δρόμος για το ρεύμα σφάλματος προς τη γη, οι τάσεις των αντίστοιχων φάσεων είναι πολύ μικρές, ιδανικά μηδενικές. Επίσης υπέρταση μπορεί να προκληθεί και από την αποσύνδεση μεγάλου φορτίου από το δίκτυο ή με την ενεργοποίηση συστοιχίας πυκνωτών.

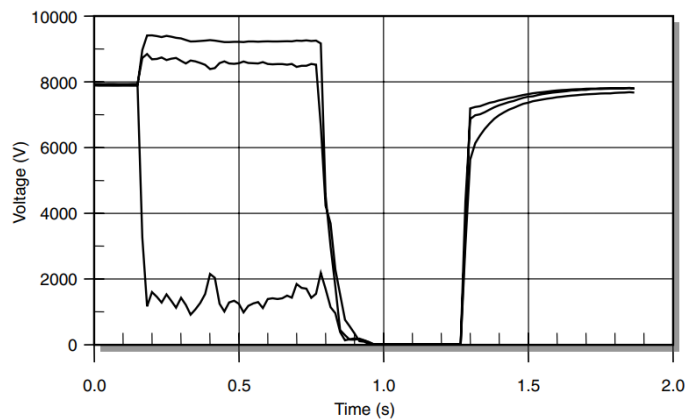


Σχήμα 2.3. Προσωρινή βύθιση τάσης λόγω εκκίνησης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα [11, fig.2.7]



Σχήμα 2.4. Υπέρταση μικρής διάρκειας (στιγμιαία) λόγω μονοφασικού σφάλματος φάσης με γη ($T > 0,15$ sec) [12, fig.2.8]

- **Διακοπή τάσεως μικρής διάρκειας (Interruption):** Διακοπή της τάσεως σε ένα σύστημα συμβαίνει όταν η ενεργός τιμή της τάσης «πέσει» κάτω από το 10% της ονομαστικής τιμής λειτουργίας του συστήματος και διαρκέσει για λιγότερο του 1 λεπτού. Μία βύθιση τάσεως (sag) μπορεί να προκαλέσει μία τέτοια διακοπή τάσεως, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 2.5. Άλλοι λόγοι διακοπής της τάσης είναι η βλάβη τμήματος του εξοπλισμού ή λανθασμένος χειρισμός λειτουργιών του Σ.Η.Ε.. Η διάρκεια της διακοπής εξαρτάται από το χρόνο απόκρισης των ασφαλιστικών διατάξεων (κλείσιμο διακοπών). Για στιγμιαία αποκατάσταση της τάσης στο δίκτυο, η διακοπή διαρκεί περίπου 30 κύκλους κύματος (οι 50 κύκλοι κύματος αντιστοιχούν σε χρόνο 1 sec για δίκτυο με συχνότητα λειτουργίας $f=50\text{Hz}$), ενώ για πιο καθυστερημένη απόκριση των διατάξεων αποκατάστασης, η διακοπή μπορεί να διαρκέσει για μικρό, αλλά αισθητό χρονικό διάστημα.



Σχήμα 2.5 Βύθιση τάσης στη φάση 1 ενός τριφασικού συστήματος (0,2 sec-0,9 sec), ακόλουθη διακοπή (0,9 sec -1,3 sec) και άμεση αποκατάσταση και των τριών τάσεων (>1,3 sec) [12, fig. 2.5]

2.5 Ανισορροπία τάσης

Η ανισορροπία τάσης (voltage imbalance-unbalance) σε ένα τριφασικό σύστημα ορίζεται κατά προσέγγιση ως η μέγιστη απόκλιση της κάθε πολικής τάσης (V_{12} , V_{23} , V_{31}) από τη μέση τάση των γραμμών (average line voltage). Μία δεύτερη και αναλυτικότερη μέθοδος υπολογισμού της ανισορροπίας της τάσης σε ένα τριφασικό σύστημα επιτυγχάνεται μέσω των συμμετρικών συνιστωσών (symmetrical components). Δηλαδή το συγκεκριμένο μέγεθος (της ανισορροπίας τάσης) προκύπτει από το λόγο της ενεργού (RMS) τιμής της αρνητικής συνιστώσας της τάσης (V_{a1}) προς την ενεργό τιμή της θετικής συνιστώσας της τάσης (V_{e1}) (βαθμός ασυμμετρίας αντίστροφης διαδοχής, μ_a – σχέση 2.1) και από το λόγο της ενεργού μηδενικής συνιστώσας της τάσης ($V_{\mu 1}$) προς τη θετική συνιστώσα της ενεργού τάσης (βαθμός ασυμμετρίας μηδενικής διαδοχής μ_0 – σχέση 2.2).

$$\mu_a = \frac{V_{a1}}{V_{e1}} \quad (2.1)$$

$$\mu_0 = \frac{V_{\mu 1}}{V_{e1}} \quad (2.2)$$

Σε εφαρμογές τριφασικών Σ.Η.Ε. ξηράς οι βαθμοί ανισορροπίας με βάση τα αντίστοιχα πρότυπα, λαμβάνουν τιμές μικρότερες του 5%. Σε εφαρμογές των πολεμικών πλοίων του NATO, με βάση τον κανονισμό STANAG 1008-edition 9, ο συντελεστής ανισορροπίας της τάσης γραμμής (line voltage unbalanced ratio – k_1) προκύπτει από το πηλίκο της συνιστώσας της αρνητικής διαδοχής της πολικής τάσης ($V_{\pi-a1}$) προς τη συνιστώσα θετικής διαδοχής της πολικής τάσης ($V_{\pi-e1}$), (σχέση 2.3) και η τιμή του k_1 δεν πρέπει να ξεπερνάει το 2%.

$$K_1 = \frac{V_{\pi-a1}}{V_{\pi-e1}} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

Επιπλέον, ο παραπάνω συντελεστής ανισορροπίας (k_1) μπορεί να υπολογιστεί και μέσω της εξής σχέσης:

$$k_1^2 = \frac{V_{12} + V_{23} + V_{31} - \sqrt{3*(V_{12}^2 + V_{23}^2 + V_{31}^2) - 6*(V_{12}^4 + V_{23}^4 + V_{31}^4)}}{V_{12} + V_{23} + V_{31} + \sqrt{3*(V_{12}^2 + V_{23}^2 + V_{31}^2) - 6*(V_{12}^4 + V_{23}^4 + V_{31}^4)}} \quad (2.4)$$

όπου V_{12} , V_{23} , V_{31} οι πολικές τάσεις (line voltages) του τριφασικού συστήματος.

2.6 Παραμόρφωση κυματομορφής

Ως παραμόρφωση κυματομορφής (waveform distortion) ορίζεται η σταθερή απόκλιση από μία ιδανική ημιτονοειδή κυματομορφή και καθορίζεται από τον τύπο της διαταραχής. Παρακάτω περιγράφονται οι πέντε βασικότεροι τύποι πρόκλησης παραμόρφωσης μιας κυματομορφής:

- **Συνιστώσα συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.) (DC offset):** Πρόκειται για την ύπαρξη συνεχούς ρεύματος ή τάσης σε ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος και εμφανίζεται λόγω του γεωμαγνητικού πεδίου της γης ή λόγω των ασυμμετριών που προκύπτουν από τα ηλεκτρονικά ισχύος των διάφορων μετατροπέων τάσης. Κάποιες από τις επιπτώσεις τους σε ένα δίκτυο είναι ο κορεσμός των σιδηρομαγνητικών πυρήνων των μετασχηματιστών, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας τους και κατ'επέκταση των απωλειών τους λόγω θερμότητας και η ηλεκτρολυτική διάβρωση των ηλεκτροδίων γείωσης και των αντίστοιχων εξαρτημάτων τους.
- **Αρμονικές συνιστώσες (Harmonics):** Οι αρμονικές συνιστώσες είναι ημιτονοειδή κύματα τάσης ή ρεύματος με συχνότητες που προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας τη θεμελιώδη συχνότητα (ονομαστική συχνότητα λειτουργίας του δικτύου) με ακέραια, μονά πολλαπλάσια (3,5,7,κλπ). Συνήθως, περιγράφεται είτε η κάθε μία συνιστώσα ξεχωριστά με βάση το πλάτος και τη συχνότητά της, είτε μέσω ορισμένων ενιαίων συντελεστών, όπως του THD (Total Harmonic Distortion) και του TDD (Total Demand Distortion). Κύριοι παράγοντες δημιουργίας αρμονικών είναι τα μη-γραμμικά στοιχεία διάφορων συσκευών και φορτίων. Σε επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου θα γίνει αναλυτική και ολοκληρωμένη παρουσίαση των αρμονικών συνιστωσών.
- **Ενδο-αρμονικές συνιστώσες (Inter-harmonics):** Πρόκειται για συνιστώσες της τάσης ή του ρεύματος που δεν αποτελούν ακέραια, μονά πολλαπλάσια της θεμελιώδους συνιστώσας και εμφανίζονται στο κύκλωμα ως ξεχωριστά κύματα συχνοτήτων ή ως κύματα στο ευρύ φάσμα (διαφορετικό φάσμα εκπομπής). Η συγκεκριμένη διαταραχή προέρχεται κυρίως από συσκευές, όπως μετατροπείς, επαγωγικοί φούρνοι (π.χ. φούρνοι επεξεργασίας μετάλλων) και συσκευές παραγωγής τόξου (μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης). Όταν η τιμή κάποιας ενδο-αρμονικής συνιστώσας ταυτιστεί με την τιμή της θεμελιώδους, τότε εμφανίζονται στο δίκτυο φαινόμενα συντονισμού. Άλλες συνέπειες είναι το οπτικό «τρεμόσβημα» (visual flicker) σε λαμπτήρες φθορισμού και η εμφάνιση ηλεκτρικού τόξου σε οθόνες συσκευών.
- **Στιγμιαίος μηδενισμός τάσης (Notching):** Κύρια αιτία πρόκλησης αυτού του φαινομένου είναι τα ηλεκτρονικά ισχύος (δίοδοι, θυρίστορ, τρανζίστορ, κ.α.) των διάφορων συσκευών (π.χ. μετατροπείς τάσης). Τη χρονική στιγμή της εναλλαγής πολικότητας της τάσης, που παύουν να άγουν τα ορθά πολωμένα στοιχεία της διάταξης και ξεκινούν την αγωγή τους τα μέχρι εκείνη τη στιγμή ανάστροφα πολωμένα στοιχεία, δημιουργούνται στιγμιαία βραχυκυκλώματα εντός της διάταξης που τείνουν να μηδενίσουν την τάση της αντίστοιχης φάσης (π.χ. σε τριφασικό κύκλωμα).

- **Θόρυβος (Noise):** Γενικά, ως θόρυβος ορίζεται οποιαδήποτε διαταραχή δεν ανήκει στην κατηγορία των αρμονικών συνιστωσών ή των μεταβατικών φαινομένων. Πρόκειται για ανεπιθύμητα ηλεκτρικά σήματα, με συχνότητες μικρότερες των 200 kHz, που επηρεάζουν την κυματομορφή της τάσεως ή του ρεύματος και εμφανίζονται στους αγωγούς των τριών φάσεων ή στον ουδέτερο αγωγό. Προκαλούνται από συσκευές που αποτελούνται από ηλεκτρονικά ισχύος, συσκευές παραγωγής ηλεκτρικού τόξου και διακόπτες ισχύος διαταράσσοντας συσκευές, όπως μικροϋπολογιστές, λογικούς ελεγκτές (PLC). Για τον περιορισμό τους χρησιμοποιούνται φίλτρα και μετασχηματιστές απομόνωσης μεταξύ των διάφορων κυκλωμάτων.

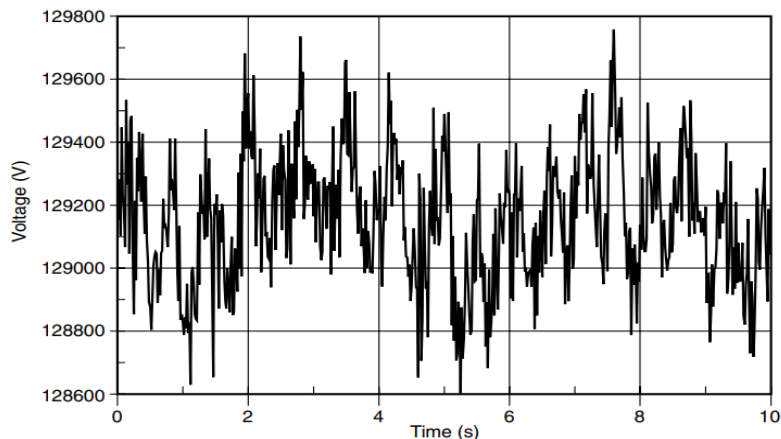
2.7 Αυξομείωση τάσης

Αυξομείωση τάσης (voltage fluctuation) είναι η τυχαία μεταβολή (αυξομείωση) της τάσης, η οποία με βάση τον κανονισμό ANSI C84.1 πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ του 90% και 110% της ονομαστικής της τιμής. Επιπλέον, η τιμή της αυξομείωσης της τάσης ορίζεται και ως το ποσοστό της ενεργού (RMS) τάσης κατά τη στιγμή της διαταραχής (αύξησης ή μείωσης) προς την ονομαστική ενεργό τάση επί τοις εκατό. Σε διάφορα φορτία που εμφανίζεται η συγκεκριμένη διαταραχή (π.χ. λαμπτήρες φωτισμού) υφίστανται στιγμιαίες μεταβολές ρεύματος, οι οποίες προκαλούν αισθητά στο ανθρώπινο μάτι αποτελέσματα. Πολλές φορές αυτό το οπτικό ερέθισμα (flicker) που γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο ταυτίζεται με το ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο της αυξομείωσης της τάσης που το προκαλεί. Παρά τη λανθασμένη αυτή αντίληψη που επικρατεί, έχει καθιερωθεί η συγκεκριμένη παραδοχή για λόγους ευκολίας. Τα όρια της αυξομείωσης της τάσης προκύπτουν με βάση την ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού σε αυτήν τη διαταραχή, που όπως έχει προκύψει για ποσοστό αυτής μεγαλύτερο από 0,5% υπάρχει αντίληψη με γυμνό μάτι. Η μέθοδος και τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση αυτής της αυξομείωσης καθορίζονται από το πρότυπο IEC 61000-4-15 και τα δεδομένα που λαμβάνονται από αυτά είναι τιμές τάσης από διάφορα χρονικά σημεία. Τα μετρητικά όργανα μέσω ορισμένων λειτουργιών και προσομοιώσεων που βασίζονται στη λειτουργία του ανθρώπινου ματιού και εγκεφάλου καταλήγουν σε αποτελέσματα που καλούνται βραχυπρόθεσμες μετρήσεις αυξομείωσης τάσεως (Short-term flicker sensation – Pst), τα οποία συγκρίνονται με βασικές τιμές που θέτουν οι διάφοροι κανονισμοί και πρότυπα. Ένας άλλος τύπος μετρήσεων που χρησιμοποιούνται είναι οι μακροπρόθεσμες μετρήσεις αυξομείωσης τάσεως (Long-term flicker sensation – Plt) που προκύπτουν από το μέσο όρο των βραχυπρόθεσμων μετρήσεων. Η συνηθέστερη αιτία πρόκλησης αυξομειώσεων τάσης στο δίκτυο είναι οι φούρνοι ηλεκτρικού τόξου (arc furnace) που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία με σκοπό την τήξη μετάλλων, τυπικό παράδειγμα κυματομορφής τάσεως λειτουργίας ενός τέτοιου φούρνου τόξου απεικονίζεται στο σχήμα 2.6.

2.8 Διακύμανση συχνότητας

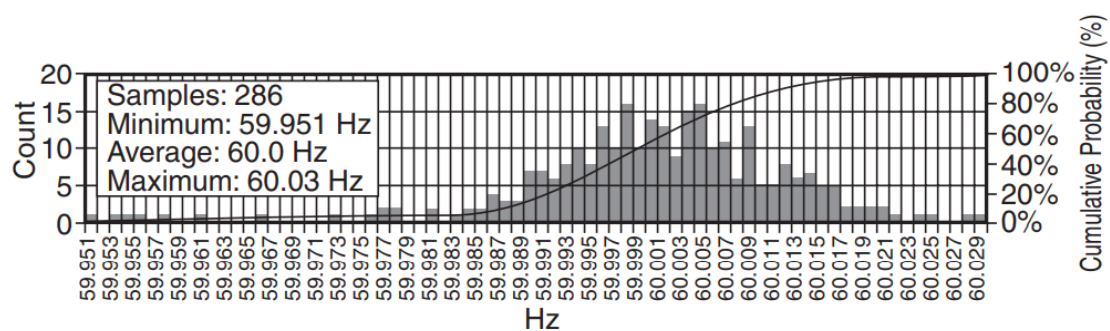
Με τον όρο διακύμανση συχνότητας (Power frequency variation) περιγράφεται η απόκλιση της τιμής της συχνότητας μία συγκεκριμένη στιγμή από την ονομαστική συχνότητα λειτουργίας του δικτύου (π.χ. 50Hz). Η συχνότητα του συστήματος εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα περιστροφής των γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά επίσης οι μεταβολές της και η διάρκεια αυτών εξαρτώνται από τις μεταβολές του φορτίου και το χρόνο απόκρισης των συστημάτων ελέγχου και αποκατάστασης των μεταβολών της

συχνότητας. Τέτοιου είδους διακυμάνσεις που υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια, μπορεί να οφείλονται σε σφάλμα κάποιου τμήματος του Σ.Η.Ε., στην αποσύνδεση ενός φορτίου μεγάλης ισχύος από αυτό ή στη διακοπή



Σχήμα 2.6. Αυξομείωση τάσης από τη λειτουργία φούρνου ηλεκτρικού τόξου [14, fig.2.12]

λειτουργίας μεγάλου μέρους του συστήματος παραγωγής ενέργειας. Λόγω της σπάνιας εμφάνισης τέτοιων σφαλμάτων στα σύγχρονα Σ.Η.Ε., τα φορτία που επηρεάζονται περισσότερο από διακυμάνσεις είναι αυτά που τροφοδοτούνται από γεννήτριες που δεν συνδέονται με το δίκτυο. Αιτία πρόκλησης της διαταραχής συχνότητας αποτελεί το φαινόμενο στιγμιαίου μηδενισμού της τάσης (Notching – παράγραφος 2.2), διότι κατά τη διάρκεια που η τάση λαμβάνει σε τυχαία χρονικά σημεία τιμές που προσεγγίζουν το μηδέν, τα διάφορα όργανα ελέγχου και ρύθμισης της συχνότητας, τα οποία λειτουργούν βασιζόμενα στα καθορισμένα σημεία μηδενισμού της τάσης, λαμβάνουν λανθασμένες πληροφορίες και εξάγουν αντίστοιχα δεδομένα. Στην παρακάτω γραφική παράσταση (σχήμα 2.7) απεικονίζεται η διακύμανση της συχνότητας για χρονικό διάστημα 24 ωρών σε ένα ζυγό υποσταθμού που εφαρμόζεται τάση 13kV. Κάτω από τη γραφική παράσταση αναγράφεται η τιμή της συχνότητας τη στιγμή της μέτρησης, αριστερά αναγράφεται το πλήθος των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε για κάθε τιμή της ίδιας συχνότητας και δεξιά υπολογίζεται η αθροιστική πιθανότητα εμφάνισης της συγκεκριμένης τιμής της συχνότητας εντός αυτού του 24ώρου.



Σχήμα 2.7. Διακύμανση συχνότητας σε ένα 24ωρο [15, fig.2.14]

2.9 Όροι ποιότητας ισχύος

Στις προηγούμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου αναπτύχθηκαν ορισμένοι όροι για την περιγραφή βασικών ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων που επηρεάζουν θεμελιώδη μεγέθη που συντελούν στη λειτουργία ενός Σ.Η.Ε., όπως η τάση, το ρεύμα και η συχνότητα. Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιαστούν κάποιοι επιπλέον ορισμοί που αφορούν τα συγκεκριμένα μεγέθη και είναι απαραίτητοι για την ευκολότερη κατανόηση των εννοιών και φαινομένων που θα αναπτυχθούν στις επόμενες παραγράφους.

- **Αλλαγή διαδοχής φάσεων (Phase Shift):** Είναι η μεταβολή της σειράς διαδοχής των φάσεων ενός συστήματος. Για παράδειγμα, σε ένα τριφασικό σύστημα υπάρχει η σειρά των φάσεων 1-2-3 (ευθεία διαδοχή) και η σειρά 2-1-3 (αντίστροφη διαδοχή) με οποιονδήποτε άλλον συνδυασμό να καταλήγει σε μία από αυτές τις δύο διαδοχές, λόγω της περιοδικότητας των κυματομορφών της τάσεως και του ρεύματος (στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο).
- **Αντιστροφέας (Inverter – DC/AC):** Πρόκειται για διάταξη αποτελούμενη από ηλεκτρονικά στοιχεία και μετατρέπει το συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο (AC) οποιασδήποτε συχνότητας απαιτείται. Αυτή η μετατροπή επιτυγχάνεται μέσω της διαμόρφωσης πλάτους (PWM).
- **Γραμμικά φορτία (Linear loads):** Είναι τα φορτία που κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τους διατηρούν σταθερή την τιμή της αντίστασής τους σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή βρίσκεται η κυματομορφή της τάσης.
- **Διαμόρφωση πλάτους (Pulse-Width Modulation, PWM):** Είναι ένας τρόπος που χρησιμοποιείται στους αντιστροφείς (DC/AC) με σκοπό τη διαμόρφωση της κυματομορφής της παραγόμενης εναλλασσόμενης τάσης (AC), ο οποίος πραγματοποιείται με κατάλληλο έλεγχο των ηλεκτρονικών στοιχείων της διάταξης. Σε ορισμένες περιπτώσεις η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται και για τον περιορισμό των αρμονικών συνιστωσών σε ένα κύκλωμα.
- **Δίκτυο γείωσης (Ground grid):** Πρόκειται για ένα σύστημα που αποτελείται από αγωγούς συνδεδεμένους σε διάφορες διατάξεις, ανάλογα με την απαίτηση της εγκατάστασης, οι οποίοι βρίσκονται είτε σε ειδικό χώρο, είτε θαμμένοι κάτω από το έδαφος. Κύριος σκοπός αυτών των διατάξεων είναι η προστασία του ανθρώπου, περιορίζοντας σε ασφαλές επίπεδο τα διάφορα ρεύματα διαρροής που υπάρχουν μέσα σε ένα κύκλωμα. Σε περίπτωση ανυπαρξίας δικτύου γείωσης, η οποιαδήποτε ανθρώπινη επαφή με εκτεθειμένη επιφάνεια του κυκλώματος αυτού μπορεί να δημιουργήσει αγωγίμο «δρόμο» του ρεύματος προς τη γη διαμέσου του ανθρώπινου σώματος προκαλώντας επικίνδυνα ή και θανατηφόρα αποτελέσματα.
- **Μετατροπέας (Converter):** Αφορά συσκευή που αποτελείται από συγκεκριμένη διάταξη ημιαγωγών (δίοδοι, θυρίστορ) και έχει ως σκοπό τη μετατροπή της κυματομορφής της τάσης, ώστε να προκύψει ένας από τους ακόλουθους συνδυασμούς (AC/DC, DC/AC, AC/AC, DC/DC).
- **Μη γραμμικά φορτία (Nonlinear loads):** Είναι φορτία, που για τη λειτουργία τους απορροφούν από το δίκτυο ακανόνιστα (ασυνεχή) ποσά ρεύματος και η αντίστασή τους ποικίλει ανάλογα με το χρονικό σημείο εντός της περιόδου που βρίσκεται η τιμή εναλλασσόμενης τάσης.
- **Μονωμένη γείωση προστασίας (Isolated ground):** Πρόκειται για ένα μονωμένο σε όλο του το μήκος αγωγό που βρίσκεται στον ίδιο φορέα (π.χ. σωλήνα) με τους ενεργούς αγωγούς της τάσης τροφοδοσίας. Η αφητηρία αυτού του καλωδίου βρίσκεται σε ειδικά σχεδιασμένο μέρος (π.χ. σε μονωμένο φρεάτιο) και ο τερματισμός του γίνεται, συνήθως στο τμήμα παραγωγής ενέργειας όπου συνδέεται με τον ουδέτερο αγωγό της παροχής.

- **Ονομαστική τάση (Nominal voltage)** : Η τυποποιημένη τάση λειτουργίας που έχει προκύψει ότι χρειάζεται για τη λειτουργία ενός συστήματος (π.χ. 230V/400V).
- **Παλμός (Pulse)**: Πρόκειται για μία απότομη αλλαγή μικρής διάρκειας μιας φυσικής ποσότητας (τάσης, ρεύματος, συχνότητας) που ακολουθείται από άμεση επαναφορά της στην αρχική τιμή της.
- **Στιγμιαία επαναλειτουργία (κλείσιμο) διακόπτη (Instantaneous reclosing)**: Αναφέρεται στο χρόνο που απαιτείται για να κλείσει ένας διακόπτης ισχύος μετά από το άνοιγμά του λόγω κάποιου ρεύματος σφάλματος που προέκυψε μετά από βλάβη στο σύστημα. Ο χρόνος αυτός κυμαίνεται από 18 ως 30 κύκλους κύματος (1 κύκλος κύματος = 1 περίοδος (T) ή T=0.02sec, για συχνότητα f=50Hz).
- **Στιγμιαίο φαινόμενο (Instantaneous)**: Με τον όρο αυτόν χαρακτηρίζεται ο χρόνος διατήρησης ενός φαινομένου μικρής διάρκειας (π.χ. διακύμανση τάσης μικρής διάρκειας – παράγραφος 2.4), ο οποίος κυμαίνεται από μισό ως 30 κύκλους κύματος της συχνότητας λειτουργίας.
- **Συντελεστής διαταραχών-αρμονικών (Distortion-Harmonic factor)**: Ο συγκεκριμένος συντελεστής υπολογίζεται από τη ρίζα του λόγου όλων των τετραγώνων των αρμονικών συνιστωσών προς το τετράγωνο της θεμελιώδους συνιστώσας επί τοις εκατό (όλες οι τιμές των αρμονικών συνιστωσών αφορούν τις ενεργές τιμές τάσεων ή ρευμάτων):

$$DF = \sqrt{\frac{\text{άθροισμα των τετραγώνων των ενεργών τιμών των αρμονικών συνιστωσών}}{\text{τετράγωνο της ενεργού θεμελιώδους συνιστώσας}}} \cdot 100\%$$

και ειδικότερα:

Συντελεστής αρμονικών συνιστωσών τάσεως:

$$DF_V = \frac{\sqrt{E_3^2 + E_5^2 + E_7^2 + \dots}}{\sqrt{E_1^2}}$$

$$\text{ή } DF_V = \frac{\sqrt{E_3^2 + E_5^2 + E_7^2 + \dots}}{E_1} \quad (2.5)$$

Συντελεστής αρμονικών συνιστωσών ρεύματος:

$$DF_I = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots}}{\sqrt{I_1^2}}$$

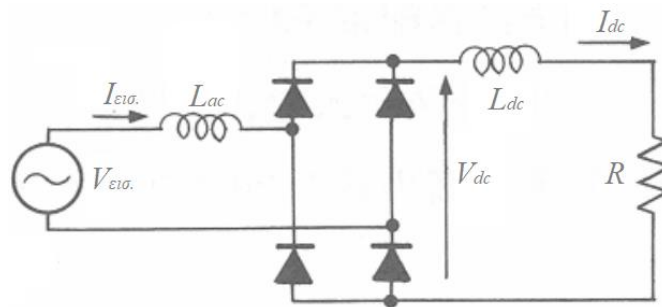
$$\text{ή } DF_I = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots}}{I_1} \quad (2.6)$$

- **Συντελεστής ισχύος-συνφ (Power factor-cosφ)**: Είναι ο λόγος της ενεργού ισχύς, P(kW) προς την φαινόμενη ισχύ, S(kVA).
- **Υπερένταση δευτερεύοντος (Low-side surge)**: Με το συγκεκριμένο όρο περιγράφεται η μεγάλη τιμή ρεύματος που εμφανίζεται στο δευτερεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή κατά το κεραυνικό πλήγμα των αγωγών γείωσης που βρίσκονται κοντά στο μετασχηματιστή.
- **Φίλτρο αρμονικών (Passive filter)**: Πρόκειται για μία διάταξη που αποτελείται από ωμικές αντιστάσεις, επαγωγικές και χωρητικές αντιδράσεις (συνήθως μία επαγωγική και μία χωρητική αντίδραση συνδεδεμένες σε σειρά), που περιορίζει τις αρμονικές συνιστώσες ενός κυκλώματος.

2.10 Πηγές αρμονικών

2.10.1 Γενική περιγραφή αρμονικών

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, μη γραμμικά φορτία είναι εκείνα που απορροφούν από το δίκτυο μη συνεχή (ακανόνιστα) ποσά ρεύματος σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Με άλλα λόγια, η κυματομορφή του ρεύματος στην είσοδο αυτών των φορτίων είναι ανόμοια με αυτήν της τάσης εισόδου τους. Για παράδειγμα στην είσοδο ενός ανορθωτή πλήρους κύματος (μετατροπέας AC/DC), όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 2.8, εφαρμόζεται μία ημιτονοειδής τάση στην είσοδό του ($V_{εισ.}$), σχήμα 2.9, ενώ το ρεύμα εισόδου ($I_{εισ.}$) έχει τετραγωνική-τραπεζοειδή κυματομορφή (σχήμα 2.10^α) και το συνεχές ρεύμα εξόδου (I_{dc}) έχει την αναμενόμενη γραφική απεικόνιση μίας ευθείας γραμμής (σχήμα 2.10^β).



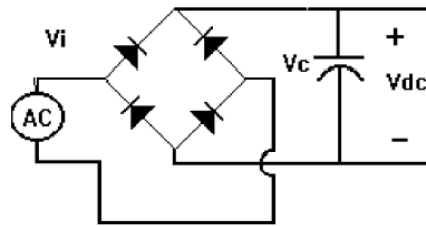
Σχήμα 2.8. Ανορθωτής πλήρους κύματος (AC/DC) [16, fig. 2^α]

Πίνακας 2.1. Γραφικές παραστάσεις τάσης και ρεύματος

<p>Σχήμα 2.9. Ημιτονοειδής τάση εισόδου [17, fig. 1]</p>	<p>Σχήμα 2.10. (α) Ρεύμα εισόδου τετραγωνικής - τραπεζοειδούς μορφής ($I_{εισ.}$) και (β) ανορθωμένο ρεύμα εξόδου (I_{dc}) [18, fig. 2b]</p>

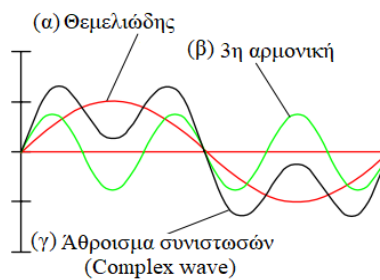
Τα περισσότερα μη γραμμικά φορτία είναι συσκευές που αποτελούνται από ημιαγωγούς, δηλαδή στοιχεία που άγουν μόνο σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές μιας περιόδου (π.χ. μόνο κατά τη θετική ημιπερίοδο) αναλόγως της σύνδεσής τους και χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της κυματομορφής της τάσης (π.χ. AC/DC). Για να γίνει αντιληπτός ο τρόπος παραγωγής των αρμονικών συνιστωσών της τάσεως και του ρεύματος, θα αναλυθεί η λειτουργία μιας βασικής συσκευής ημιαγωγών, μίας μονοφασικής γέφυρας ανόρθωσης πλήρους κύματος (single-phase switched mode power supply), σχήμα 2.11. Η συγκεκριμένη συσκευή τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη ημιτονοειδή τάση (V_i) και τη μετατρέπει σε συνεχή τάση (V_{dc}) στην έξοδό της. Ο πυκνωτής στην έξοδο της γέφυρας χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση της τάσης εξόδου και για την αποθήκευση

ηλεκτρικής ενέργειας, που τροφοδοτεί το φορτίο όποτε απαιτείται. Όταν η τάση εισόδου (V_i) είναι μεγαλύτερη του πυκνωτή (V_c), τότε άγουν οι κατάλληλες διόδους λαμβάνοντας από το δίκτυο ρεύμα μη ημιτονοειδούς



Σχήμα 2.11 Μονοφασική γέφυρα ανόρθωσης πλήρους ανόρθωσης [19, fig. 6]

μορφής, το οποίο περιέχει επιπλέον συνιστώσες ρεύματος, άλλων συχνοτήτων πέρα της θεμελιώδους (π.χ. για θεμελιώδη συχνότητα $f=50\text{Hz}$), που καλούνται αρμονικές συνιστώσες ρεύματος και έχουν συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους και που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι μονοί αριθμοί (1,3,5,...) και άρα οι τιμές των συχνοτήτων τους είναι ($f_3=3*50\text{Hz}=150\text{Hz}$, $f_5=5*50\text{Hz}=250\text{Hz}$, ...). Από το άθροισμα όλων των αρμονικών συνιστωσών τάσεως ή ρεύματος, συμπεριλαμβανομένου και της θεμελιώδους συνιστώσας προκύπτει μία νέα κυματομορφή (complex wave), όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12 (α) Θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα, (β) 3^η αρμονική και (γ) άθροισμα των δύο συνιστωσών [20, fig. 8]

2.10.2 Χαρακτηριστικές αρμονικές ρεύματος

Για τη θεωρητική (ιδανική) ανάλυση των αρμονικών συνιστωσών λαμβάνονται ως δεδομένες ορισμένες ιδανικές συνθήκες λειτουργίας, όπως:

- Μηδενική αντίσταση δικτύου παροχής ενέργειας
- Συμμετρικό σύστημα τροφοδοσίας
- Ημιτονοειδής τάση και ρεύμα τροφοδοσίας
- Απευθείας σύνδεση του ανορθωτή στην πηγή τροφοδοσίας χωρίς τη μεσολάβηση μετασχηματιστή
- Ομοιόμορφη συνιστώσα συνεχούς ρεύματος ανορθωτή
- Ανυπαρξία γωνιών καθυστέρησης ή προπόρευσης μεταξύ τάσεως και ρεύματος στο δίκτυο τροφοδοσίας των συσκευών

Ένας απλοποιημένος τύπος υπολογισμού της τάξης (h) των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος, που ισχύει για την ιδανική κατάσταση λειτουργίας της διάταξης, είναι ο εξής:

$$h = np \pm 1 \quad (2.6)$$

όπου $n =$ ακέραιος θετικός αριθμός (1,2,3,4,...)

$p =$ ο αριθμός των παλμών του ρεύματος σε κάθε περίοδο (κύκλο κύματος)

Το πλάτος της κάθε αρμονικής συνιστώσας του ρεύματος (I_h) προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$I_h = \frac{I_{ov}}{h} \quad (2.7)$$

όπου I_{ov} : το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας (το ρεύμα της θεμελιώδους συνιστώσας)

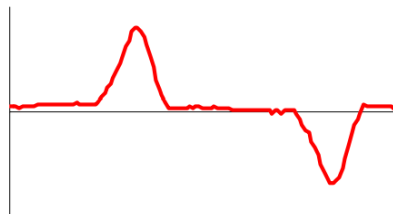
Ένας μονοφασικός ανορθωτής πλήρους κύματος, όπως εκείνος που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.8, περιέχει δύο παλμούς ρεύματος σε μία περίοδο ($p=2$), οπότε με βάση τη σχέση 2.6 προκύπτουν οι ακόλουθες σειρές αρμονικών:

$$h=3,5,7\dots$$

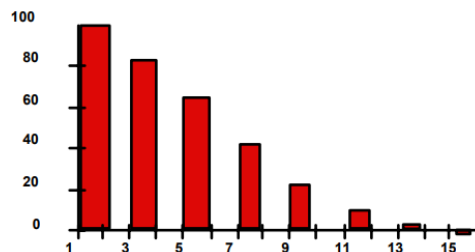
και τα αντίστοιχα πλάτη ρεύματος:

$$I_h = 0,333 I_{ov}, 0,2 I_{ov}, 0,143 I_{ov}, 0,111 I_{ov}, \dots$$

Στα σχήματα 2.13 και 2.14 απεικονίζονται, στο πρώτο, η κυματομορφή του ρεύματος εισόδου του ανορθωτή, όπου εμφανίζονται και οι δύο παλμοί του στην περίοδο και στο δεύτερο, οι τάξεις (οριζόντιος άξονας) και τα πλάτη (κάθετος άξονας) των αρμονικών συνιστωσών αντίστοιχα.

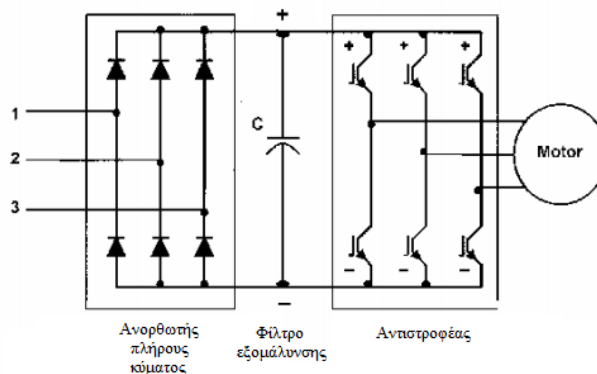


Σχήμα 2.13 Αρμονική συνιστώσα ρεύματος εισόδου ανορθωτή [21, fig.10]

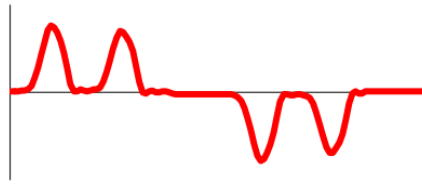


Σχήμα 2.14 Αρμονικές συνιστώσες ρεύματος του ανορθωτή [22, fig.11]

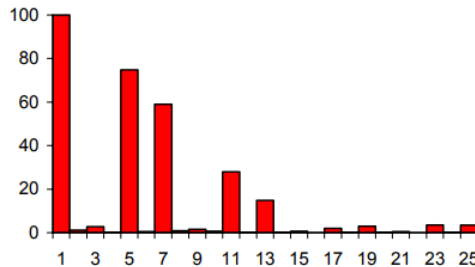
Ομοίως, για τριφασικό ανορθωτή πλήρους κύματος (γέφυρα 6 παλμών) προκύπτουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα ρεύματος εισόδου ανορθωτή, σειρών και πλάτους, που είναι $h=11,13,23,24,35,37,\dots$, όπως απεικονίζεται στα 3 παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 2.15 Τριφασικός (6-παλμικός) ανορθωτής πλήρους κύματος [23, fig.12]

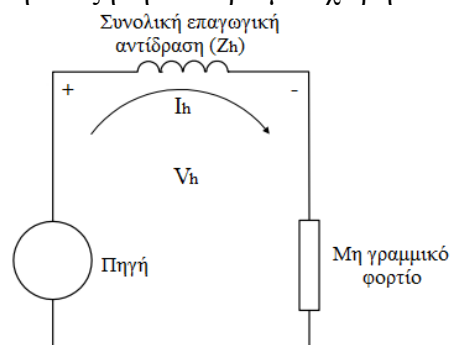


Σχήμα 2.13 Αρμονική συνιστώσα ρεύματος εισόδου ανορθωτή [24, fig.13]



Σχήμα 2.14 Αρμονικές συνιστώσες ρεύματος του ανορθωτή [25, fig.14]

Τα διάφορα αρμονικά ρεύματα που υπάρχουν μέσα στο κύκλωμα, ρέουν μέσα από τις ισοδύναμες επαγωγικές αντιδράσεις των στοιχείων που περιέχονται σε αυτό (γεννήτριες, μετασχηματιστές, αγωγοί, φορτία). Η ροή αυτή του κάθε αρμονικού ρεύματος, προκαλεί αντίστοιχες (αρμονικές) πτώσεις τάσεις, οι οποίες προστίθενται στη συνολική αρμονική διαταραχή της τάσης (Total Harmonic Voltage Distortion- V_{THD}). Η διαταραχή αυτή (της τάσης) εξαρτάται από την τιμή του αντίστοιχου αρμονικού ρεύματος και από την τιμή της επαγωγικής αντίδρασης στη συγκεκριμένη αρμονική συχνότητα (ίδια με αυτή του ρεύματος). Η συνολική τάση διαταραχής (V_{THD}) κάθε αρμονικής συχνότητας προκύπτει από τη διανυσματική άθροιση όλων των επιμέρους πτώσεων τάσης και παρουσιάζει μείωση κατά την αύξηση του αριθμού χωρητικών αντιδράσεων στο κύκλωμα.



Σχήμα 2.15 Ισοδύναμο απλοποιημένο κύκλωμα (απεικόνιση πτώσης τάσης κατά τη ροή αρμονικού ρεύματος μέσω της επαγωγικής αντίδρασης [26, fig.15]

Υπολογισμός συνολικής πτώσης τάσης (V_h) συστήματος (με βάση το γενικευμένο νόμο του $\Omega\mu$):

$$V_h = I_h Z_h \quad (2.8)$$

όπου I_h : αρμονικό ρεύμα της h-αρμονικής και

Z_h : συνολική επαγωγική αντίδραση του κυκλώματος για την αρμονική συχνότητα h-τάξης με $Z_h = jX_L = j\omega L = j2\pi f_h L$

2.10.3 Υπολογισμός αρμονικών τιμών τάσης και ρεύματος

Η στιγμιαία τιμή της τάσης $[v(t)]$ μιας μη-ημιτονοειδούς κυματομορφής μπορεί να υπολογιστεί με βάση το ανάπτυγμα Fourier μέσω της εξής σχέσης:

$$v(t) = V_o + V_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + V_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + V_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (2.9)$$

όπου V_o : DC συνιστώσα της τάσης

V_1 : θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα τάσης

$V_{2, \dots, n}$: 2^η, ... n-οστή αρμονική συνιστώσα τάσης

φ : αρχική φάση (γωνία) κύματος

$\omega = 2\pi f$, (γωνιακή συχνότητα)

f : συχνότητα θεμελιώδους τάσης

Ο συνηθέστερος τρόπος υπολογισμού της στιγμιαίας τιμής της τάσης $v(t)$ και του ρεύματος $i(t)$ είναι μέσω της ανάλυσης Fourier, σύμφωνα με την οποία κάθε περιοδική συνάρτηση στο πεδίο του χρόνου μπορεί να εκφραστεί από το άθροισμα της θεμελιώδους συνιστώσας και των υπόλοιπων συνιστωσών που αποτελούν ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους. Επομένως, ο υπολογισμός της στιγμιαίας τιμής της τάσης (αγνοώντας την DC συνιστώσα) μέσω της ανάλυσης Fourier προκύπτει από τη σχέση:

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sin(h\omega_o + \varphi_h) \quad (2.10)$$

όπου h : η σειρά της αρμονικής (π.χ. 1,3,5,...)

V_h : η ενεργός (rms) τιμή της h-αρμονικής τάσης (instantaneous rms voltage)

και οι γενικοί τύποι υπολογισμού της ενεργού (rms) τάσης και ρεύματος είναι οι εξής:

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{V_1^2 + V_1^2 + \dots + V_n^2} \quad (2.11)$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + I_1^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.12)$$

όπου V_1 : η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης και

I_1 : η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος

η ενεργός (rms) τιμή της τάσης και του ρεύματος THD (Total Harmonic Distortion) υπολογίζονται μέσω των παρακάτω σχέσεων αντίστοιχα:

$$V_{\text{THD}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.13)$$

$$I_{\text{THD}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (2.14)$$

και τέλος, η ενεργός τιμή της τάσης και του ρεύματος TDD (Total Demand Distortion) είναι αντίστοιχα:

$$V_{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_{load}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_{load}} \cdot 100\% \quad (2.15)$$

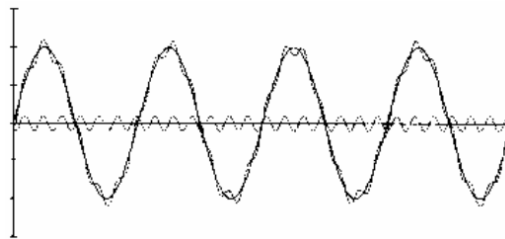
$$I_{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{load}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_{load}} \cdot 100\% \quad (2.16)$$

όπου V_{load} , I_{load} είναι η μέγιστη τάση και το μέγιστο ρεύμα απαίτησης από το φορτίο αντίστοιχα.

Οι συντελεστές THD και TDD της τάσης και του ρεύματος έχουν οριστεί ως τρόποι μέτρησης της διαταραχής του κυκλώματος λόγω της ύπαρξης αρμονικών συνιστωσών.

2.10.4 Ενδοαρμονικές

Με βάση το πρότυπο IEC Standard 1000-2-1, ως ενδοαρμονικές συνιστώσες (interharmonics) τάσεως ή ρεύματος ορίζονται εκείνες των οποίων η τιμή της συχνότητάς τους δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους. Όπως και στις αρμονικές συνιστώσες, έτσι και στις ενδοαρμονικές τα κύρια αίτια εμφάνισής τους είναι τα μη γραμμικά φορτία, όπως οι μετατροπείς τάσης, οι κυκλομετατροπείς, οι μηχανισμοί ανάκτησης ενέργειας, κ.α.. Όπως εξηγήθηκε και στην παράγραφο 2.10.1, ο πυκνωτής που βρίσκεται στη μεριά της συνεχούς (DC) τάσης στο κύκλωμα του ανορθωτή (αλλά και παρόμοιων κυκλωμάτων) χρησιμοποιείται για τον περιορισμό των αρμονικών και για την τροφοδοσία του φορτίου στην έξοδο της διάταξης. Όταν η τιμή της εναλλασσόμενης (AC) τάσης είναι μεγαλύτερη της τάσης του πυκνωτή, τότε το φορτίο στην πλευρά του ανορθωτή τροφοδοτείται με ρεύμα από την εναλλασσόμενη πηγή και όχι από τον πυκνωτή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αρμονικών συνιστωσών, που δεν επηρεάζουν τη μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης τάσης (V_{p-p}), διότι συγχρονίζονται με τη συνιστώσα της θεμελιώδους συχνότητας. Αντίθετα η συχνότητα των ενδοαρμονικών συνιστωσών δεν είναι σύγχρονη με τη θεμελιώδη, προκαλώντας διαταραχές στη μέγιστη (peak) τάση τροφοδοσίας (σχήμα 2.15) που επηρεάζουν τη λειτουργία των πυκνωτών και γενικά όλου του εξοπλισμού.



Σχήμα 2.15. Παραμόρφωση της κυματομορφής της μέγιστης εναλλασσόμενης (AC) τάσης εισόδου (V_{p-p}) λόγω ενδοαρμονικών [27, fig.23]

Η στιγμιαία τιμή της τάσης διαταραχής λόγω ενδοαρμονικών υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$V(t) = V_1 \sin(2\pi f_1 t) + V_n \sin(2\pi f_n t) \quad (2.17)$$

όπου V_1 : το πλάτος της τάσης της θεμελιώδους συχνότητας

f_1 : θεμελιώδης συχνότητα

V_n : το πλάτος της τάσης της n-οστής ενδοαρμονικής συνιστώσας

n: η τάξη της ενδοαρμονικής συνιστώσας

και η ενεργός (rms) τιμή της τάσης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (2.18)$$

όπου $T = \frac{1}{f}$, η περίοδος της κυματομορφής της τάσης

Μία υποκατηγορία των ενδοαρμονικών αποτελούν οι υποαρμονικές συνιστώσες (subharmonics), των οποίων η συχνότητα είναι μεγαλύτερη του μηδενός, αλλά μικρότερη της θεμελιώδους συχνότητας και για τον υπολογισμό τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ίδιες μέθοδοι που εφαρμόζονται και στις ενδοαρμονικές.

2.10.5 Πηγές παραγωγής αρμονικών συνιστωσών τάσεως και ρεύματος

Ρυθμιστές στροφών (AC PWM-Pulse Width Modulation)(Μετατροπέας AC σε AC με διαμόρφωση εύρους παλμών): Πρόκειται για ηλεκτρονικές διατάξεις που αποτελούνται από έναν ανορθωτή πλήρους κύματος και έναν αντιστροφέα που συνδέονται μεταξύ του μέσω ενός πυκνωτή τοποθετημένου παράλληλα προς τα δύο κυκλώματα και μέσω της συνδυαστικής λειτουργίας τους επιτυγχάνεται η ρύθμιση των στροφών (ταχύτητας) κινητήρων μικρής και μεσαίας ισχύος. Η κυματομορφή τάσης που προκύπτει στην έξοδο μιας τριφασικής γέφυρας ανόρθωσης είναι μία συνεχή τάση που απαρτίζεται από 6 ανορθωμένες κορυφές τάσης, μία για κάθε ημιπερίοδο (μία θετική και μία αρνητική) των ημιτονοειδών τάσεων των τριών φάσεων και γι' αυτό καλείται εξαπαλμικός ανορθωτής (6-pulse drive). Αντίστοιχα, στην έξοδο ενός μονοφασικού ανορθωτή παράγεται μία κυματομορφή συνεχούς τάσης που περιέχει δύο ανορθωμένους παλμούς λόγω των δύο ημιπεριόδων της εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοσίας. Οι αρμονικές συνιστώσες ρεύματος που παράγονται από μια τέτοια διάταξη εξαρτώνται από τον αριθμό των κορυφών (παλμών) της κυματομορφής συνεχούς τάσης εξόδου.

Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters): Είναι μία κατηγορία ρυθμιστών που χρησιμοποιείται σε κινητήρες μεγάλης απαίτησης ισχύος, όπως οι κινητήρες πρόωσης πλοίων. Ένας μονοφασικός κυκλομετατροπέας αποτελείται από δύο γέφυρες ανόρθωσης, μία για κάθε ημιπερίοδο της ημιτονοειδούς τάσης εισόδου και σε αντίθεση με το ρυθμιστή PWM δεν απαιτεί την ύπαρξη πυκνωτή για τη σύνδεση των δύο γεφυρών (AC/DC-DC/AC), αλλά λειτουργεί μεταβάλλοντας την τιμή της συχνότητας εξόδου και ρυθμίζοντας έτσι την ταχύτητα του κινητήρα. Τα χαρακτηριστικά του ρεύματος εισόδου και των αντίστοιχων αρμονικών ρευμάτων εισόδου εξαρτώνται από τους παρακάτω παράγοντες:

- τον αριθμό των παλμών του κυκλομετατροπέα
- την τιμή της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας της τάσης εισόδου
- την αναλογία της συχνότητας εισόδου και εξόδου
- το συντελεστή ισχύος (συνφ) του φορτίου
- της γωνία έναυσης (γωνία εκκίνησης αγωγής) των θυρίστορ των γεφυρών

Από τη λειτουργία των κυκλομετατροπέων παράγονται αρμονικές και ενδοαρμονικές συνιστώσες ρεύματος που μπορούν να υπολογιστούν μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$f_n = (pm \pm 1) \pm 6nf_o \quad (2.19)$$

όπου f_n : συχνότητα αρμονικής συνιστώσας ρεύματος

f_0 : συχνότητα εξόδου

$m=1,2,3,\dots$

$p,n=0,1,2,\dots$

Μετατροπείς καθοδηγούμενοι από το φορτίο (AC Load Commutated Inverters-LCI): Πρόκειται συνήθως, για μία κατηγορία ρυθμιστών στροφών ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα. Αποτελείται από μία πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα ανόρθωσης με θυρίστορ στην είσοδό της που ανορθώνει την εναλλασσόμενη τάση τροφοδοσίας και ελέγχει τη συνεχή τάση που προκύπτει στην έξοδό της. Στην έξοδο του ανορθωτή υπάρχει ένας αντιστροφέας που ρυθμίζει τη συχνότητα εξόδου και τα δύο αυτά κυκλώματα (γέφυρα ανόρθωσης και αντιστροφέας) συνδέονται μεταξύ τους με μία επαγωγική αντίδραση συνδεδεμένη σε σειρά με τα κυκλώματα, η οποία λειτουργεί ως πηγή ρεύματος. Το ρεύμα εξόδου του τριφασικού ρυθμιστή (LCI) έχει τετραγωνική κυματομορφή και περιέχει μεγάλο ποσοστό αρμονικών ρεύματος που προκαλούν υπερθέρμανση του κινητήρα και ταλαντώσεις της ροπής σε χαμηλές ταχύτητες.

Άλλες πηγές αρμονικών: Υπάρχουν ακόμα πολλές και ποικίλες ηλεκτρικές διατάξεις κατά τη λειτουργία των οποίων παράγονται αρμονικές συνιστώσες ρεύματος και τάσεως και ορισμένες από αυτές είναι οι εξής:

- Φούρνοι ηλεκτρικού τόξου (Arc furnaces)
- Στρεφόμενες μηχανές (γεννήτριες, κινητήρες)
- Μετασχηματιστές
- Τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS)

2.11 Ανταπόκριση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε αρμονικές συνιστώσες

2.11.1 Παράγοντες επιδείνωσης επιπτώσεων αρμονικών σε ένα σύστημα

Οι συσκευές παραγωγής αρμονικών συνιστωσών ρεύματος σε ένα Σ.Η.Ε., όπως αυτές που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, λειτουργούν ως πηγές ρευμάτων (αρμονικών). Η ανταπόκριση του συστήματος (Η.Ε.) στις αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος και κατ' επέκταση και της τάσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες του ίδιου του συστήματος, όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Ικανότητα βραχυκυκλώματος του συστήματος:** Ο συγκεκριμένος όρος αφορά είτε την τιμή της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης/ηλεκτρικής εμπέδησης βραχυκύκλωσης του συστήματος κατά την εφαρμογή της θεμελιώδους συχνότητας σε αυτό, είτε την τιμή αυτής στην εμφάνιση αρμονικών ρευμάτων (αρμονικών συχνοτήτων) πολλαπλασιαζόμενη με την τάξη της αρμονικής ($h=2,3,4,5,\dots$). Ισχυρότερα Σ.Η.Ε. (με υψηλότερη ικανότητα ισχύος) έχουν χαμηλότερη παραμόρφωση τάσης για το ίδιο μέγεθος ρεύματος αρμονικών σε σχέση με τα πιο αδύναμα Σ.Η.Ε..
- **Συστοιχίες πυκνωτών και μονωμένα καλώδια:** Οι συστοιχίες πυκνωτών και τα μονωμένα καλώδια σε ένα σύστημα μπορούν να λειτουργήσουν ως πηγές τάσης παράλληλα συνδεδεμένες στο σύστημα σε εφαρμογές που περιέχουν πηγές αρμονικών, όπως μετατροπείς τάσεως στερεάς κατάστασης (static power converters) ή ως διατάξεις βελτίωσης του συντελεστή ισχύος (συνφ) αυτού. Η ύπαρξή τους σε ένα δίκτυο μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα συντονισμού, τα οποία παράγουν αρμονικές σε αυτό (εκτενέστερη ανάλυση των φαινομένων συντονισμού γίνεται στη συνέχεια της παραγράφου).

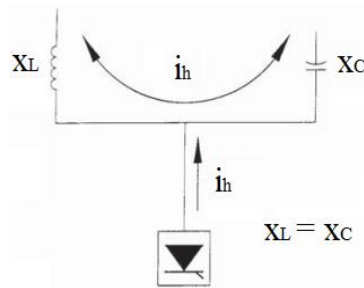
Παρόμοιες συνέπειες προκαλούνται και κατά τη λειτουργία μονωμένων αγωγών και αγωγών των γραμμών μεταφοράς, οι οποίοι παρουσιάζουν σημαντική χωρητικότητα σε σχέση με το έδαφος.

- **Χαρακτηριστικά φορτίου:** Το κάθε τμήμα του φορτίου (ωμικό, επαγωγικό, χωρητικό) επιδρά διαφορετικά στην ανταπόκριση του συστήματος στις αρμονικές συνιστώσες. Το ωμικό τμήμα προκαλεί απόσβεση των ταλαντώσεων (damping), η οποία επηρεάζει την ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση του συστήματος κοντά στη συχνότητα συντονισμού και επιπλέον περιορίζει την τιμή των αρμονικών μεγεθών (τάση και ρεύμα) κοντά στη συχνότητα παράλληλου συντονισμού. Επίσης, υπάρχουν και τα φορτία με ασταθή (δυναμική) απαίτηση ισχύος (π.χ. κινητήρες), τα οποία επηρεάζουν την ικανότητα βραχυκύκλωσης (short-circuit capacity) του συστήματος και μεταβάλλουν την τιμή της συχνότητας συντονισμού αυτού.
- **Ισορροπία συστήματος:** Ως ισορροπημένο (συμμετρικό) σύστημα καλείται εκείνο που αποτελείται από συμμετρική τροφοδοσία, δηλαδή ίσα μέτρα τιμών των πηγών τάσης και διαφορά γωνίας ίση με 120° για τριφασικό σύστημα (π.χ. $\tilde{V}_{12} = 400\angle 0^\circ V$, $\tilde{V}_{23} = 400\angle -120^\circ V$, $\tilde{V}_{31} = 400\angle 120^\circ V$), συμμετρικές γραμμές σε όλες τις φάσεις (ίσο μέτρο και ίση γωνία της σύνθετης αντίστασής τους) και συμμετρικό φορτίο, δηλαδή ίση τιμή σύνθετης αντίστασης σε κάθε φάση (ίσο μέτρο και ίση γωνία). Ένα τέτοιου είδους σύστημα μπορεί να μελετηθεί μέσω ενός ισοδύναμου μονοφασικού κυκλώματος ανεξάρτητα από τον αριθμό των φάσεων που αποτελείται και με απλές αναγωγές των αποτελεσμάτων στη γωνία της κάθε φάσης είναι δυνατός ο υπολογισμός των αντίστοιχων στις υπόλοιπες φάσεις. Η ανάλυση του ισοδύναμου μονοφασικού κυκλώματος είναι μία απλοποιημένη και άμεση μέθοδος επίλυσης περίπλοκων πολυφασικών συμμετρικών κυκλωμάτων, κάνοντας αντίστοιχα απλό και γρήγορο τον υπολογισμό των μεγεθών στις αρμονικές συχνότητες. Όμως, στην πραγματικότητα συναντώνται μη ισορροπημένα (ασύμμετρα) συστήματα, δηλαδή συστήματα των οποίων οι τιμές των πηγών, των γραμμών και των φορτίων διαφέρουν σε κάθε φάση τόσο σε μέτρο, όσο και σε γωνία, κάνοντας αδύνατη την απλοποίησή τους σε μονοφασικά, κάτι που απαιτεί ξεχωριστή ανάλυση της κάθε φάσης αυτού.

2.11.2 Συνθήκες συντονισμού συστήματος

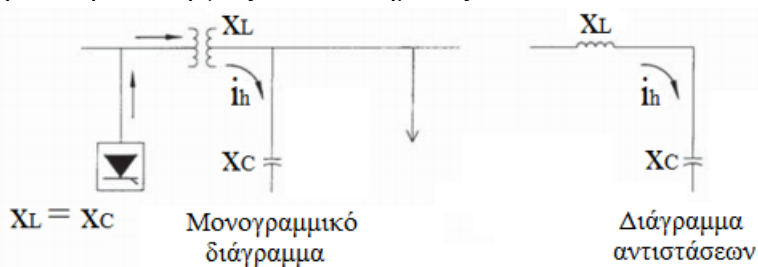
Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στην αύξηση των αρμονικών συνιστωσών ενός συστήματος είναι το φαινόμενο του συντονισμού. Υπάρχει ο παράλληλος συντονισμός (parallel resonance) και εν σειρά συντονισμός (series resonance). Το ρεύμα της κάθε αρμονικής συχνότητας έχει φορά από την εκάστοτε πηγή αρμονικών προς την πηγή τροφοδοσίας του συστήματος. Ο τρόπος συντονισμού (παράλληλος ή εν σειρά) αφορά την αντίσταση που συναντούν τα αρμονικά ρεύματα και τα οποία προκαλούν αύξηση του ρεύματος τροφοδοσίας και διαταραχή της τάσης λειτουργίας του συστήματος.

- **Παράλληλος συντονισμός:** Πρόκειται για την παράλληλη σύνδεση μιας επαγωγικής και μιας χωρητικής αντίδρασης με ίσες τιμές ($x_L = x_C$) στην ίδια συχνότητα. Η παραγωγή αρμονικών συνιστωσών ρεύματος από αντίστοιχη πηγή αρμονικών που συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα του παράλληλου συντονισμού οδηγεί σε ροή των ρευμάτων αυτών μέσα από το κύκλωμα (συντονισμού) προκαλώντας ταλάντωση ρεύματος μεγάλης τιμής μεταξύ των δύο στοιχείων (επαγωγικό και χωρητικό). Αποτέλεσμα αυτής της ταλάντωσης είναι η διαταραχή της κυματομορφής της τάσης του συστήματος και ακολούθως διάφορων σημάτων (π.χ. τηλεφωνικών) που διαδίδονται σε γραμμές κοντά σε αυτές τις οποίες εφαρμόζεται η διαταρασόμενη τάση.



Σχήμα 2.16. Κύκλωμα παράλληλου συντονισμού [28, fig.5.2]

- **Εν σειρά συντονισμός:** Είναι η σύνδεση σε σειρά μιας χωρητικής αντίδρασης (x_c), όπως μία συστοιχία πυκνωτών και μιας επαγωγικής αντίδρασης (x_L), όπως η ισοδύναμη αντίδραση των μετασχηματιστών ή των γραμμών μεταφοράς ενός συστήματος και οι οποίες έχουν ίσες τιμές ($x_L = x_c$) στην ίδια συχνότητα. Η ροή των αρμονικών ρευμάτων μέσω της συγκεκριμένης διάταξης συναντά μικρή αντίσταση και έτσι είναι δυνατή η «απομάκρυνση» αυτών προς τη γη και άρα εκτός του συστήματος, προκαλώντας την ανάπτυξη αμιγών τιμών τάσεων στα άκρα αυτών των διατάξεων, οι οποίες διαταράσσουν την τάση λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα 2.17. Κύκλωμα εν σειρά συντονισμού [29, fig.5.3]

2.11.3 Επίδραση του φορτίου στο σύστημα

- **Μετασχηματιστής υποβιβασμού:** Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός μετασχηματιστή αποτελείται από μία ωμική αντίσταση που αντιπροσωπεύει τις ηλεκτρικές απώλειες σε κάθε τύλιγμα σε σειρά με μία επαγωγική αντίδραση που αντιπροσωπεύει τη μαγνητική ροή σκέδασης κάθε τυλίγματος (πρωτεύον, δευτερεύον). Σε χαμηλές συχνότητες η τιμή της επαγωγικής αντίδρασης είναι αρκετά μικρή σε σχέση με την τιμή της αντίστασης φορτίου στην έξοδο του Μ/Σ (μετασχηματιστή), ενώ για υψηλότερες συχνότητες η επαγωγική αντίδραση λαμβάνει συγκρίσιμες τιμές με την αντίσταση του φορτίου ($x_L = \omega L = 2\pi fL - \Omega$). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο Μ/Σ να λειτουργεί ως φίλτρο των υψηλών συχνοτήτων και άρα των υψηλών αρμονικών συνιστωσών.
- **Ωμικά φορτία (Resistive components):** Τα ωμικά φορτία αποτελούν σημαντικό παράγοντα στον καθορισμό του συντονισμού ενός συστήματος, καθώς όσο αυξάνονται τα φορτία, τόσο μειώνεται η αντίσταση. Λόγω της έλλειψης επαγωγικής αντίδρασης (impedance), οι αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος διαρρέουν το κύκλωμα μέσω των ωμικών στοιχείων και όχι μέσω των διατάξεων του παράλληλου συντονισμού, με αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγάλων ρευμάτων μέσα στο κύκλωμα.
- **Φορτία κινητήρων:** Κατά την εφαρμογή αρμονικών συχνοτήτων σε έναν κινητήρα επικρατεί ο επαγωγικός του χαρακτήρας, με χρήση της υπομεταβατικής επαγωγικής αντίδρασης ο οποίος δεν παρέχει σημαντική απόσβεση στις αρμονικές, αλλά μπορεί να μεταβάλλει τη συχνότητα συντονισμού

κατά ορισμένη τιμή. Σε περίπτωση που κάποια αρμονική συχνότητα είναι κοντά στη συχνότητα συντονισμού, τότε η κάθε αλλαγή στο φορτίο μπορεί να οδηγήσει σε ταύτιση των τιμών των δύο συχνοτήτων (αρμονικής και συντονισμού), προκαλώντας προβλήματα στο δίκτυο και στο φορτίο.

2.11.4 Χαρακτηριστικά απόκρισης συστήματος στις αρμονικές συνιστώσες

Στα διάφορα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν ορισμένοι τύποι απόκρισης αυτών στις αρμονικές συνιστώσες ρεύματος που τα διαρρέουν. Λόγω των πολλών παραμέτρων του κάθε κυκλώματος, των φορτίων και του είδους των αρμονικών γίνεται σχεδόν αδύνατη η καταγραφή όλων των τρόπων απόκρισης του συστήματος σε αυτές. Όπως θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια, υπάρχουν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών που επικρατούν κατά την εμφάνιση των αρμονικών.

- **Χαρακτηριστικά συστήματος διανομής Η.Ε.:** Η απόκριση του συστήματος διανομής στην ύπαρξη αρμονικών, εντοπίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των χωρητικών αντιδράσεων που υπάρχουν σε αυτό (συστοιχίες πυκνωτών, χωρητικότητα των αγωγών με τη γη) και των επαγωγικών του αντιδράσεων (ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση των γραμμών). Η ύπαρξη συγκεντρωμένων πυκνωτών σε κάποιο σημείο του συστήματος, όπως σε έναν υποσταθμό ορίζει μια συχνότητα συντονισμού και σε περίπτωση που ταυτιστεί κάποια αρμονική συχνότητα με αυτή του συντονισμού μπορεί να προκληθεί σημαντική διαταραχή της τάσης και αυξημένα αρμονικά ρεύματα. Στην περίπτωση διασπαρμένων συστοιχιών πυκνωτών μέσα στο σύστημα, οι οποίες ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους, δεν υπάρχει συγκεκριμένη τιμή συχνότητας συντονισμού και έτσι περιορίζεται το πρόβλημα των αυξημένων αρμονικών ρευμάτων και τάσεων. Η απόσβεση γίνεται κυρίως από την ωμική συνιστώσα των φορτίων, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.
- **Χαρακτηριστικά βιομηχανικού συστήματος:** Γενικά τα χαρακτηριστικά ενός βιομηχανικού συστήματος είναι παρόμοια με αυτά ενός συστήματος διανομής σε μικρότερη κλίμακα, αλλά υπάρχουν 4 βασικές διαφορές που παρουσιάζονται παρακάτω:
 1. Λόγω του μικρού μήκους αγωγών μίας βιομηχανίας, οι χωρητικές και επαγωγικές αντιδράσεις αυτών θεωρούνται αμελητέες. Οπότε η συχνότητα συντονισμού εξαρτάται μόνο από τις συστοιχίες πυκνωτών που χρησιμοποιούνται για διάφορες χρήσεις, όπως για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος (συνφ).
 2. Η έντονη χρήση μη γραμμικών φορτίων στις βιομηχανίες (μετατροπείς τάσης, διατάξεις παραγωγής τόξου) οδηγεί σε μεγαλύτερο ποσοστό αρμονικών εντός αυτών, σε σχέση με το ποσοστό που υπάρχει στο σύστημα διανομής.
 3. Ο περιορισμένος αριθμός ωμικών (resistive) φορτίων παρέχει μικρή απόσβεση των ταλαντώσεων (damping) κοντά στη συχνότητα συντονισμού. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση που κάποια αρμονική συχνότητα πλησιάσει τη συχνότητα συντονισμού, προκύπτουν έντονα φαινόμενα αρμονικών διαταραχών στο σύστημα.
 4. Ένα βιομηχανικό σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως ισορροπημένο (συμμετρικό), λόγω της ορθότερης κατανομής των φορτίων του στις φάσεις του, απλοποιώντας έτσι την ανάλυσή του.
- **Χαρακτηριστικά συστήματος μεταφοράς Η.Ε.:** Η μελέτη των γραμμών μεταφοράς είναι μία δύσκολη και περίπλοκη διαδικασία κάνοντας την καταγραφή των χαρακτηριστικών απόκρισης τους στις αρμονικές συνιστώσες εξίσου δυσχερή. Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει και τα δύο προηγούμενα συστήματα (διανομής και βιομηχανικά) και λαμβάνονται υπόψη πολλοί παράγοντες που αμελήθηκαν σε αυτά, όπως η επαγωγική και χωρητική αντίδραση των γραμμών, ακόμα και η μετάθεση

των γραμμών σε διάφορα σημεία της διαδρομής τους. Ο μεγάλος αριθμός των κλάδων που μπορούν να «ακολουθήσουν» τα αρμονικά ρεύματα, τα πολυάριθμα φορτία και οι μεγάλες τιμές χωρητικότητας που χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς καθιστούν απαραίτητη τη χρήση υπολογιστών για τη βασική μελέτη τους, παραμένοντας όμως μία απαιτητική διαδικασία.

2.12 Επιπτώσεις αρμονικών

Η σοβαρότητα των επιπτώσεων των αρμονικών συνιστωσών σε ένα σύστημα εξαρτάται από την ευαισθησία του εξοπλισμού περιέχεται σε αυτό. Συσκευές που απαιτούν υψηλή ποιότητα τάσης και ρεύματος (κυματομορφές που προσεγγίζουν το τέλειο ημίτονο) για τη λειτουργία τους, έχουν ελάχιστη ανοχή σε αρμονικές. Για εξοπλισμό με μεσαία επίπεδα ευαισθησίας, όπως οι κινητήρες ή με πολύ χαμηλότερα επίπεδα, όπως οι φούρνοι ηλεκτρικού τόξου υπάρχει μεγαλύτερη ανοχή ύπαρξης αρμονικών συνιστωσών στην κυματομορφή τροφοδοσίας τους. Ακόμα, όμως και για αυτά τα φορτία μικρής ευαισθησίας η εμφάνιση αρμονικών μπορεί να δημιουργήσει ποικίλα προβλήματα, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια και γι' αυτό είναι αναγκαίος ο περιορισμός αυτών.

2.12.1 Επιπτώσεις αρμονικών σε μηχανές

Κάποιες από τις σημαντικότερες συνέπειες των αρμονικών στο κύκλωμα μιας μηχανής (σύγχρονης ή ασύγχρονης) είναι η αύξηση της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων της, λόγω απωλειών που εξαρτώνται από την τιμή της συχνότητας λειτουργίας και οι ταλαντώσεις της ροπής εξόδου, όπου και οι δύο οδηγούν σε μείωση του βαθμού απόδοσης της. Πιο συγκεκριμένα, οι απώλειες που διακρίνονται σε μια μηχανή χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη αφορά τις απώλειες χαλκού που οφείλονται στην απώλεια ενέργειας υπό μορφή θερμότητας από τα τυλίγματα της, κατά τη διάρκεια της ροής ρεύματος μέσω αυτών. Επίσης, το φαινόμενο αυτό των απωλειών χαλκού, ενισχύεται από την εμφάνιση του επιδερμικού φαινομένου, κατά το οποίο το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μόνο στην επιφάνεια του αγωγού και όχι σε ολόκληρη τη διατομή του. Αυτό επιδεινώνεται με την αύξηση της συχνότητας, διότι με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η αντίσταση που «συναντά» το ρεύμα στη ροή του μέσα στα τυλίγματα. Το δεύτερο είδος απωλειών αφορά τις απώλειες σιδήρου μιας μηχανής, οι οποίες χωρίζονται στις δύο παρακάτω υποκατηγορίες:

- **Απώλειες μαγνητικής υστέρησης:** Πρόκειται για την απώλεια ενέργειας κατά την εναλλαγή της πολικότητας του ρεύματος (100 φορές το δευτερόλεπτο για συχνότητα λειτουργίας $f=50\text{Hz}$ ή 50 κύκλοι κύματος το δευτερόλεπτο), η οποία αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας (περισσότερες εναλλαγές το δευτερόλεπτο).
- **Απώλειες δινορρευμάτων:** Προκύπτουν όταν επάγονται ρεύματα σε διάφορα τμήματα της μηχανής (σιδηροπυρήνας, πείροι σύνδεσης, κ.α.) και η αύξηση των απωλειών αυτών (P_{EC}) είναι ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$P_{EC} = P_{EF} \sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 h^2 \quad (2.20)$$

όπου P_{EF} : απώλειες δινορρευμάτων υπό τη θεμελιώδη συχνότητα

I_h : ενεργός (rms) τιμή της h-οστής αρμονικής συνιστώσας ρεύματος

h: τάξη αρμονικής

Μία ακόμα σημαντική παράμετρος επίπτωσης των αρμονικών είναι η επίδρασή τους στα ακολουθιακά κυκλώματα μιας μηχανής. Το ρεύμα κάθε αρμονικής συνιστώσας είναι είτε ευθείας, είτε αντίστροφης διαδοχής (ακολουθίας). Όταν αυτές εμφανίζονται ως ζεύγη αρμονικών σε ένα σύστημα, όπως η 5^η και η 7^η, τότε η 5^η αρμονική του ρεύματος είναι αντίστροφης διαδοχής και επάγει στο δρομέα του κινητήρα την 6^η αρμονική αντίστροφη συνιστώσα, ενώ η 7^η αρμονική είναι ευθείας διαδοχής και επάγει στο δρομέα την 6^η αρμονική ευθείας διαδοχής. Τα αποτελέσματα αυτής της κατάστασης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας στα τυλίγματα της μηχανής και οι μηχανικές ταλαντώσεις στον άξονα της μηχανής, τα οποία παρουσιάζουν πρόωρη καταπόνηση και φθορά.

2.12.2 Επιπτώσεις αρμονικών σε μετασχηματιστές

Οι απώλειες λόγω αρμονικών στους μετασχηματιστές οφείλονται τόσο στις αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος, όσο και της τάσεως. Πιο αναλυτικά, οι αρμονικές του ρεύματος συμβάλλουν στην αύξηση των απωλειών χαλκού και των διαφευγουσών απωλειών, όπου οι τελευταίες ανήκουν στην κατηγορία των απωλειών σιδήρου ενός μετασχηματιστή, ενώ οι αρμονικές της τάσης εντείνουν τα άλλα δύο είδη απωλειών σιδήρου, δηλαδή τις απώλειες δινορρευμαίων και αυτές λόγω μαγνητικής υστέρησης. Οι τιμές των αρμονικών της τάσης και του ρεύματος εξαρτώνται από την τιμή της αρμονικής συχνότητας και η αύξηση αυτής προκαλεί αντίστοιχα υψηλές απώλειες. Ως απώλειες σε ένα μετασχηματιστή ορίζονται η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών σε διάφορα τμήματα αυτού (τυλίγματα, σιδηρο-πυρήνας, πείροι σύσφιξης, κ.α.) και ο θόρυβος στο φάσμα των ηχητικών κυμάτων.

2.12.3 Επιπτώσεις αρμονικών σε ηλεκτρονικές διατάξεις

Οι περισσότερες διατάξεις που αποτελούνται από διάφορα ηλεκτρονικά εξαρτήματα παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στις αρμονικές συνιστώσες που υπάρχουν μέσα στο ίδιο σύστημα με αυτά. Η λειτουργία των διατάξεων αυτών πολλές φορές βασίζεται σε χαρακτηριστικά της κυματομορφής της τάσης ή του ρεύματος, όπως η χρονική στιγμή που λαμβάνουν μηδενική τιμή ή εκείνη κατά την οποία υπάρχει κάποια συγκεκριμένη διαφορά (στη γωνία) μεταξύ των πολικών τάσεων. Η εμφάνιση αρμονικών μπορεί να μεταβάλλει τα χρονικά σημεία που κανονικά συμβαίνουν οι παραπάνω καταστάσεις και να προκαλέσουν δυσλειτουργία των διατάξεων ή εξαγωγή εσφαλμένων τιμών από αυτά. Σε ορισμένες ηλεκτρονικές συσκευές, όπως τηλεοράσεις και ραδιόφωνα, οι επιπτώσεις αυτές είναι αβλαβείς και ανεπαίσθητες. Αντίθετα, σε διαφορετικές περιπτώσεις, όπως σε στρατιωτικές και ιατρικές εφαρμογές τέτοιου είδους διαταραχές λόγω αρμονικών μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρά ή και θανάσιμα αποτελέσματα.

2.12.4 Επιπτώσεις αρμονικών σε ασφαλιστικές διατάξεις

- **Αυτόματοι διακόπτες κυκλώματος:** Η ενεργοποίηση (άνοιγμα) του κάθε διακόπτη, ανεξαρτήτως του τύπου του (μηχανικός, ηλεκτρονικός) πραγματοποιείται είτε σε περίπτωση υπερέντασης στη γραμμή και άρα σοβαρή αύξηση της θερμοκρασίας της (θερμικό κριτήριο), είτε λόγω βραχυκυκλώματος σε κάποιο σημείο αυτής. Τα χρονικά σημεία δράσης των διακοπών, ανάλογα με τον τύπο του καθενός, είναι κυρίως κατά τη στιγμή μηδενισμού της κυματομορφής του ρεύματος ή τη στιγμή που λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, όμως η ύπαρξη αρμονικών ρευμάτων μέσα σε ένα κύκλωμα μπορεί να μεταβάλλει τη μορφή της και κατ' επέκταση τις χρονικές αυτές στιγμές. Χωρίς την κατάλληλη ρύθμιση των διακοπών με βάση τις νέες τιμές που προκύπτουν στην κυματομορφή του ρεύματος, μπορεί να προκληθεί άνοιγμα αυτών σε μη επιθυμητή στιγμή.

- **Ασφάλειες κυκλώματος:** Παρόμοια λειτουργία με τους διακόπτες παρουσιάζουν και οι ασφάλειες ενός κυκλώματος, αφού αντιδρούν σε συνθήκες υπερέντασης και βραχυκυκλώματος προστατεύοντας το κύκλωμα (αγωγούς, φορτίο) από έντονη καταπόνηση και σοβαρές επιπτώσεις. Η λειτουργία των ασφαλειών στηρίζεται στην ενεργό (rms) τιμή του ρεύματος, δηλαδή όσο περισσότερο αυξάνεται η τιμή του πέρα του ονομαστικού ρεύματος λειτουργίας της ασφάλειας, τόσο ταχύτερη είναι η αντίδραση (άνοιγμα) αυτής. Η ανύψωση του ρεύματος στο σύστημα συνεπάγεται και αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας στους αγωγούς και στα διάφορα εξαρτήματα αυτού. Η κατάσταση αυτή επιδεινώνεται με την εμφάνιση αρμονικών συνιστωσών ρεύματος, διότι εκδηλώνεται το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) και το φαινόμενο εγγύτητας (proximity effect) στους αγωγούς που συμβάλλουν αμφότερα στην αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών και στην παραμόρφωση της κυματομορφής του ρεύματος διαρροής των ασφαλειών.

2.13 Έλεγχος αρμονικών

Ένα σύστημα Η.Ε. αποτελείται από πολλούς κλάδους, που ο καθένας μπορεί να τροφοδοτεί γραμμικά και μη φορτία απευθείας, γραμμές διανομής της Η.Ε., κ.α.. Οι κλάδοι των μη γραμμικών φορτίων, αποτελούν πηγές αρμονικών συνιστωσών (όπως αναλύθηκαν στην παράγραφο 2.10), που σημαίνει πως η τάση στα άκρα του κάθε κλάδου προκαλεί ροή αρμονικών ρευμάτων προς όλα τα τμήματα του Σ.Η.Ε. με τα οποία συνδέονται τα φορτία αυτά. Το μέγεθος της κάθε αρμονικής συνιστώσας ρεύματος που ρέει στα τμήματα του κυκλώματος εξαρτάται από την επαγωγική αντίδραση που παρουσιάζει το κάθε τμήμα στη συχνότητα της αντίστοιχης αρμονικής ρεύματος. Ο έλεγχος των αρμονικών ενός συστήματος επιτυγχάνεται με ποικίλες μεθόδους, ορισμένες από τις οποίες παρουσιάζεται παρακάτω:

- **Φίλτρα κλάδων (Shunt filters):** Τα συγκεκριμένα φίλτρα χρησιμοποιούνται στα διάφορα κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) που περιέχουν πηγές αρμονικών, με σκοπό τον περιορισμό των αρμονικών ρευμάτων που παράγονται από αυτές. Πρόκειται για ηλεκτρικές διατάξεις που αποτελούνται από ξεχωριστά κυκλώματα χωρητικών και επαγωγικών αντιδράσεων (πυκνωτές και πηνία αντίστοιχα) σε σειρά, το καθένα υπεύθυνο για τον περιορισμό αρμονικής συνιστώσας ρεύματος συγκεκριμένης συχνότητας ($3^{\text{η}}$, $5^{\text{η}}$, $7^{\text{η}}$,...). Το ρεύμα από το οποίο διαρρέεται το φίλτρο ορίζεται ως ο λόγος της τάσης στα άκρα του προς τη συνολική σύνθετη αντίσταση των δύο αντιδράσεων (χωρητικής και επαγωγικής) και λόγω της μικρότερης σύνθετης αντίστασης ολόκληρου του φίλτρου σε σχέση με αυτή του πυκνωτή, προκύπτει ότι το ρεύμα σε αυτόν θα είναι μικρότερο από το ρεύμα που διαπερνά ολόκληρο το φίλτρο. Επιπλέον, η αρμονική συνιστώσα της τάσης του πυκνωτή στη συχνότητα που είναι συντονισμένο το φίλτρο, υπολογίζεται από το γινόμενο του αρμονικού ρεύματος του πυκνωτή και της σύνθετης αντίστασης αυτού.
- **Πολλαπλασιασμός φάσεων (Phase multiplication):** Κυκλώματα μονοφασικών μετατροπέων, όπως ανορθωτές μισού κύματος που χρησιμοποιούνται σε φορτία μικρής ισχύος παράγουν αρμονικές που περιέχουν συνιστώσες συνεχούς ρεύματος (DC) και οι οποίες προκαλούν διάφορες επιπτώσεις στους μετασχηματιστές, όπως κορεσμό στους πυρήνες τους. Για την αποφυγή τέτοιου είδους προβλημάτων, ένας τρόπος αντιμετώπισης είναι η χρήση πολυφασικών ανορθωτών πλήρους κύματος. Ο απλούστερος τύπος πολυφασικού ανορθωτή είναι ο εξαπαλμικός (τριφασική τροφοδοσία), όμως όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των παλμών και αντίστοιχα των φάσεων σε έναν ανορθωτή, τόσο αποτελεσματικότερος

είναι ο περιορισμός των αρμονικών συνιστωσών ρεύματος. Ένας ανορθωτής 24 παλμών αποτελείται από 4 γέφυρες 6 παλμών, κάθε μία μετατοπισμένη κατά 15° από την άλλη και ο οποίος υλοποιείται είτε με μετασχηματιστές μετατόπισης φάσης, είτε μέσω πρόσθετων πηνίων κατάλληλα συνδεδεμένων στα πρωτεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών σε συνδεσμολογία zing-zang. Μόνο στην περίπτωση διακοπής λειτουργίας κάποιας εκ των 4 γεφυρών εμφανίζεται η αρμονική συνιστώσα του ρεύματος που θα περιοριζόταν η συγκεκριμένη γέφυρα. Ο πολλαπλασιασμός των φάσεων χρησιμοποιείται κυρίως σε συστήματα που περιέχουν ανορθωτές και φορτία ίσης τιμής ισχύος αντίστοιχα και ίση διαφορά φάσεως (συμμετρικά συστήματα). Περαιτέρω περιορισμός των αρμονικών κατορθώνεται από το συνδυασμό της συγκεκριμένης και της προηγούμενης μεθόδου (φίλτρα αρμονικών).

- **Έγχυση αρμονικών (Harmonic injection):** Ένας ακόμα τρόπος μείωσης των αρμονικών σε ένα Σ.Η.Ε. είναι μέσω αυτόματων αντισταθμιστών (adaptive compensators). Πρόκειται για διατάξεις που ελέγχουν συνεχώς το ποσοστό των αρμονικών συνιστωσών ρεύματος ενός συστήματος και, όποτε απαιτείται, εγχέουν σε αυτό ρεύμα ίσου μέτρου και αντίθετης γωνίας ($\varphi=180^\circ$) με αυτό του αρμονικού ρεύματος διαταραχής. Αυτό πραγματοποιείται στο τμήμα των μετασχηματιστών, όπου κατά την αντίστροφη αρμονικών ροών, επάγονται από το ρεύμα του δευτερεύοντος ροές ίδιου μέτρου και αντίθετης γωνίας. Η έγχυση αρμονικών είναι μία πειραματική μέθοδος που δεν εφαρμόζεται ακόμα σε ευρύ φάσμα εφαρμογών.

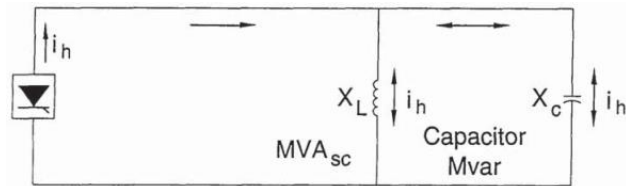
2.14 Μέθοδοι ανάλυσης αρμονικών

Όπως αναλύθηκε και στην παράγραφο 2.10, πηγές αρμονικών συνιστωσών ρεύματος και τάσεων αποτελούν οι μη γραμμικές ηλεκτρικές συσκευές ενός συστήματος, όπως οι μετατροπείς τάσεως (ανορθωτές, αντιστροφείς, μετασχηματιστές), οι διατάξεις παραγωγής τόξου, όπου τα χαρακτηριστικά και το επίπεδο των αρμονικών αυτών επηρεάζουν τη λειτουργία του συστήματος. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών τους και γενικά για τη θεωρητική ανάλυσή τους, οι πηγές αρμονικών μπορούν να αναπαρασταθούν σε ένα κύκλωμα ως ιδανικές πηγές ρεύματος παρέχοντας αρκετά ακριβή και άμεσα αποτελέσματα, όσον αφορά περιορισμένου μεγέθους συστήματα (βιομηχανικά, μικρά συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας). Ορισμένα ακόμα στοιχεία που συμβάλλουν στην αναπαράσταση ενός συστήματος που περιέχει αρμονικές είναι:

- η ισοδύναμη αντίδραση βραχυκυκλώματος του συστήματος
- συστοιχίες πυκνωτών
- χαρακτηριστικά αγωγών και γενικά γραμμών του συστήματος
- χαρακτηριστικά των φορτίων του συστήματος

2.14.1 Απλοποιημένη ανάλυση

Ένα απλό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα που αντιπροσωπεύει μία εγκατάσταση που περιέχει πηγή αρμονικών ρευμάτων παρουσιάζεται στο σχήμα 2.18. Πρόκειται για μία διάταξη που χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές και σε συστήματα διανομής που περιέχουν συστοιχίες πυκνωτών στο σημείο εκκίνησής τους (υποσταθμοί) και με βάση αυτή υπολογίζονται διάφορα μεγέθη που περιγράφουν την απόκριση ενός συστήματος κατά την παρουσία αρμονικών μέσα σε αυτό.



Σχήμα 2.18. Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό παραμέτρων λόγω αρμονικών [30, fig.8.2]

Από το παραπάνω κύκλωμα προκύπτουν δύο σημαντικά μεγέθη για τη συγκεκριμένη ανάλυση, που είναι τα εξής:

➤ **Συχνότητα συντονισμού (Resonant frequency)**

$$f_r = \sqrt{\frac{x_c}{x_{sc}}} \quad (2.21)$$

όπου f_r : συχνότητα συντονισμού ως πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας

x_c : χωρητική αντίδραση της συστοιχίας πυκνωτών στη θεμελιώδη συχνότητα

x_{sc} (ή x_L): ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση βραχυκύκλωσης του υποσταθμού

Αν η τιμή της συχνότητας συντονισμού είναι κοντά με την τιμή κάποιας αρμονικής συχνότητας, τότε είναι αναγκαία η διόρθωση κατάλληλων παραμέτρων του συστήματος, ώστε η νέα συχνότητα συντονισμού να απέχει αρκετά από οποιαδήποτε αρμονική.

➤ **Ισοδύναμες αντιστάσεις της πηγής αρμονικών**

Η ισοδύναμη αντίσταση της πηγής για κάθε αρμονική συχνότητα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Z_h = \frac{R+j\omega L}{1-\omega^2(LC)+j\omega RC} \quad (2.22)$$

$$\text{ή } z_h = (R+j\omega L) // \left(\frac{1}{j\omega C}\right) \quad (2.23)$$

όπου $R+j\omega L$: η σύνθετη αντίσταση της πηγής συναρτήσει της αντίστοιχης αρμονικής συχνότητας (Ω)

$\frac{1}{j\omega C}$: η χωρητική αντίδραση της πηγής συναρτήσει της αντίστοιχης αρμονικής συχνότητας (Ω)

$\omega=2\pi f$: γωνιακή συχνότητα για κάθε αρμονική συχνότητα

Μέσω της παραπάνω αντίστασης (z_h) μπορεί να υπολογιστεί και η αντίστοιχη αρμονική τάση της πηγής εφαρμόζοντας σε αυτήν το γενικευμένο νόμο του Ωμ:

$$V_h = I_h \cdot Z_h \quad (2.24)$$

όπου I_h : η αρμονική συνιστώσα του ρεύματος για κάθε αρμονική συχνότητα της πηγής

2.14.2 Ανάλυση με χρήση υπολογιστή

Για την ανάλυση μεγαλύτερων και πιο σύνθετων συστημάτων, όπως συστήματα μεταφοράς Η.Ε. είναι αναγκαία η χρήση υπολογιστή, διότι με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται άμεσα και με μεγάλη ακρίβεια η μελέτη πολυφασικών και μη συμμετρικών συστημάτων και η προβολή της απόκρισης αυτών κατά την εφαρμογή πολλών πηγών αρμονικών συχνοτήτων σε αυτά. Ο συνηθέστερος μαθηματικός τρόπος ανάλυσης της απόκρισης ενός συστήματος στις αρμονικές συνιστώσες είναι μέσω της μήτρας αγωγιμοτήτων (ή της μήτρας

αντιστάσεων). Κάθε τμήμα του συστήματος (μηχανές, γραμμές μεταφοράς, γραμμικά φορτία) απεικονίζεται με βάση το ισοδύναμο ηλεκτρικό μοντέλο του, ώστε να προκύψει μία ισοδύναμη ηλεκτρική αναπαράσταση του συστήματος βάσει της οποίας σχηματίζεται η μήτρα αγωγιμοτήτων (οι πηγές αρμονικών, δηλαδή τα μη γραμμικά φορτία, απεικονίζονται ως πηγές τάσεως ή ρεύματος). Πληροφορίες για την απόκριση του συστήματος στις αρμονικές μπορούν να ληφθούν και μέσα από τη μελέτη της ροής ισχύος του συστήματος για κάθε αρμονική συχνότητα και από την οποία προκύπτουν δεδομένα, όπως η τιμή της τάσης (μέτρο και γωνία) σε κάθε ζυγό του συστήματος και η τιμή της ισχύος (ενεργό και άεργο) που ρέει σε κάθε γραμμή αυτού. Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται κυρίως μέσω επαναληπτικών μεθόδων (Gauss-Seidel, Newton-Raphson) κατά τις οποίες θέτονται αρχικά εκτιμώμενες τιμές τάσεων στις εξισώσεις αγωγιμοτήτων των ζυγών, επιλύονται και τα αποτελέσματα αυτών χρησιμοποιούνται ως δεδομένα για την επίλυση των ίδιων εξισώσεων στην επόμενη επανάληψη. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να προκύψουν οι ελάχιστες επιτρεπόμενες τιμές είτε των τάσεων των ζυγών, είτε των αποκλίσεων ανάμεσα στις τιμές ισχύος (ανάλογα με την ακολουθούμενη μέθοδο). Είναι προτιμότερο το ισοδύναμο κύκλωμα να αναλύεται ως ενιαίο, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη όλες τις φάσεις αυτού και όχι απλοποιώντας το σε μονοφασικό και αυτό, διότι σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αδύνατη ή μη ικανοποιητική η μελέτη του ισοδύναμου μονοφασικού, όπως στην περίπτωση ασύμμετρου τριφασικού συστήματος. Σε μικρά και μεσαία συστήματα (βιομηχανικά, διανομής) είναι αποδεκτή η σχεδίαση του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος μόνο στο τμήμα της χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή υποβιβασμού που βρίσκεται ανάμεσα στην παροχή ισχύος και στη γραμμή διανομής. Σε αυτό το τμήμα υπάρχουν γραμμές τροφοδοσίας, φορτία και συστοιχίες πυκνωτών, τα οποία μοντελοποιούνται όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

- **Μοντέλο μηχανών:** Η αναπαράσταση των μηχανών (κινητήρων και γεννητριών) γίνεται μέσω μιας υπομεταβατικής επαγωγικής αντίδρασης, η οποία πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τη σειρά της υπό μελέτη αρμονικής συχνότητα ($jx_L = j\omega L = j2\pi f_h L$).
- **Μοντέλο αγωγών και καλωδίων:** Για γραμμές μικρού μήκους και για χαμηλές αρμονικές συχνότητες η γραμμή μπορεί να αναπαρασταθεί ως μία επαγωγική αντίδραση, ενώ στην περίπτωση μεγάλων γραμμών (γραμμές μεταφοράς) και μεγάλης σειράς αρμονικής συχνότητας (πάνω από την 25^η) απαιτείται και η εισαγωγή εγκάρσιων πυκνωτών για την πλήρη απεικόνισή τους.
- **Μοντέλο μετασχηματιστή:** Τα διαμήκη στοιχεία ενός μετασχηματιστή στο ισοδύναμο μοντέλο του είναι μία επαγωγική αντίδραση, που αντιπροσωπεύει την αντίδραση σκέδασης του τυλίγματος, σε σειρά με την ωμική αντίσταση αυτού. Στον εγκάρσιο κλάδο του περιέχει δύο εγκάρσια στοιχεία, συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους, την ωμική αντίσταση απωλειών πυρήνα R_c που αντιπροσωπεύει τις ηλεκτρικές απώλειες του πυρήνα και την επαγωγική αντίδραση X_m που αντιπροσωπεύει τη συνολικά καταναλισκόμενη άεργο ισχύ κατά τη λειτουργία χωρίς φορτίο. Ένας μετασχηματιστής αποτελεί πηγή αρμονικών, αλλά στην περίπτωση που δεν παράγει υψηλές τιμές αρμονικών συχνοτήτων, μπορεί να παραληφθεί η επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης (X_m), διαφορετικά θα πρέπει να αναπαρασταθεί ως πηγή αρμονικών ρευμάτων. Επίσης, όταν πρόκειται για τριφασικό μετασχηματιστή είναι σημαντική η γνώση του τρόπου σύνδεσης αυτού (τρίγωνο-αστέρας), ώστε να καθοριστεί η σχεδίαση του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας (zero sequence harmonic components). Σημειώνεται ότι κατά τη συνδεσμολογία τριγώνου τα αρμονικά ρεύματα απομονώνονται εντός αυτού (του τριγώνου).
- **Μοντέλο φορτίων:** Αναλόγως το είδος του φορτίου (μετασχηματιστής υποβιβασμού, κινητήρας, ωμική αντίσταση) ορίζεται και η αντίστοιχη αναπαράσταση αυτού, όπως παρουσιάστηκαν και προηγουμένως. Γενικά, τα φορτία ενός συστήματος επηρεάζουν ελάχιστα την απόκριση του

συστήματος, εκτός αν βρίσκονται κοντά στη συχνότητα συντονισμού (resonant frequency), όπου σκοπός του φορτίου είναι η μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος, ώστε να μη σχετίζεται με αυτή του συντονισμού του.

Σε μεγαλύτερα συστήματα, όπως σε αυτά μεταφοράς Η.Ε. είναι απαραίτητο ένα αναλυτικότερο μοντέλο αναπαράστασης των στοιχείων του και έτσι το πρόβλημα καθορισμού της απόκρισης αυτών στις αρμονικές γίνεται περιπλοκότερο και πιο χρονοβόρο.

2.15 Μετρήσεις αρμονικών

Η λήψη διάφορων μετρήσεων που σχετίζονται με τις αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος και της τάσεως είναι μία απαραίτητη διαδικασία που πρέπει να ακολουθείται σε κάθε σύστημα, ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα, οι επιμέρους λόγοι της χρησιμότητας των συγκεκριμένων μετρήσεων είναι οι παρακάτω:

- Παρακολούθηση των τιμών των αρμονικών και σύγκριση αυτών με τις τιμές που ορίζουν οι κανονισμοί.
- Πρόληψη και αντιμετώπιση προβλημάτων στον εξοπλισμό που οφείλονται στις αρμονικές διαταραχές.
- Μέτρηση αρμονικών μεγεθών, με σκοπό την επαλήθευση μεγεθών που έχουν προκύψει από θεωρητικές μελέτες.
- Δημιουργία και ανανέωση αρχείου αρμονικών μετρήσεων, με στόχο την ανάπτυξη μοντέλων συμπεριφοράς του εκάστοτε συστήματος σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (Βραχυπρόθεσμα, μεσοπρόθεσμα, μακροπρόθεσμα).

Οι διατάξεις και τα όργανα μέτρησης των αρμονικών μεγεθών πρέπει να μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα μεγάλο και υψηλό εύρος συχνοτήτων (πάνω από 3kHz), ώστε να είναι ικανά να λάβουν τιμές για υψηλές σειρές (h) αρμονικών. Αυτή είναι η βασική διαφορά τους με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μεγεθών όπως τάση, ένταση ρεύματος και ισχύ σε συγκεκριμένη συχνότητα (καθορισμένη συχνότητα λειτουργίας) ή σε περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων. Όπως και στις περισσότερες συσκευές μέτρησης, έτσι και σε αυτές των αρμονικών απαιτείται βαθμονόμηση αυτών πριν από κάθε διαδικασία μετρήσεων, ώστε να επανέλθουν στις ονομαστικές τιμές αναφοράς, οι οποίες μπορεί να έχουν επηρεαστεί από προηγούμενες μετρήσεις. Επιπλέον, οι διάφορες τιμές των πηγών αρμονικών ενός συστήματος, θα πρέπει να λαμβάνονται και στις 3 φάσεις (σύστημα 3 αγωγών) και στον ουδέτερο αγωγό, αν υπάρχει (σύστημα 4 αγωγών), αλλά και σε διάφορα τμήματα αυτού, όπως στις γεννήτριες και στους κύριους πίνακες διανομής Η.Ε.. Ορισμένα από τα βασικά μεγέθη και πληροφορίες των αρμονικών που λαμβάνονται από κάθε μη γραμμικό φορτίο ενός Σ.Η.Ε. είναι τα εξής:

- Ενεργός (rms) τιμή ρεύματος και τάσης της κάθε αρμονικής συχνότητας.
- Συντελεστής THD (Total Harmonic Distortion) της τάσης και του ρεύματος (V_{THD} , I_{THD} αντίστοιχα).
- Μετρήσεις μέχρι την 50στή αρμονική συνιστώσα (h=50) ή μέχρι την 100στή (h=100), αν πρόκειται για ρυθμιστή στροφών (PWM drive).
- Επιγραμμιακή καταγραφή των μέτρων και γωνιών των αρμονικών τάσεων και ρευμάτων.
- Τμήμα της κυματομορφής της τάσεως και του ρεύματος (για κάθε προς μέτρηση αρμονική συχνότητα).
- Ανισορροπία τάσεως μεταξύ των φάσεων.

Ένα επιπλέον είδος μέτρησης που μπορεί να ληφθεί από το σύστημα είναι ο συντελεστής συνολικής αρμονικής διαταραχής (THD) υποβάθρου (background) της τάσης (V_{THD}) σε δοκιμαστική λειτουργία του συστήματος,

προσωρινά χωρίς το μη γραμμικό φορτίο. Όμως, αυτή η μέτρηση μπορεί να μην ανταποκρίνεται σε συνθήκες μόνιμης λειτουργίας του συστήματος. Τα περισσότερα όργανα μέτρησης αρμονικών καταγράφουν και απεικονίζουν εσωτερικά (τα ίδια) ή μέσω υπολογιστή τις πρώτες 5-6 μετρήσεις από αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ορισμένα από αυτά τα μεγέθη (τα 2 πρώτα) είναι απαραίτητο παρά την ψηφιακή αποθήκευσή τους, να καταγράφονται και χειρόγραφα για ποικίλους λόγους, όπως για μία πρόχειρη, αλλά άμεση εικόνα του επιπέδου των αρμονικών συνιστωσών που προκύπτουν από το προς μέτρηση μη γραμμικό φορτίο.

2.15.1 Όργανα μέτρησης αρμονικών μεγεθών

- **Παλμογράφος (Oscilloscope):** Η συγκεκριμένη συσκευή εμφανίζει στην οθόνη της κυματομορφές τάσεως και ρεύματος του συστήματος, προσφέροντας μία ακριβής απεικόνιση του τύπου και του βαθμού της διαταραχής αυτού λόγω των αρμονικών. Συχνά, μέσω αυτής της απεικόνισης είναι εμφανής ο συντονισμός που μπορεί να υπάρχει σε συγκεκριμένη συχνότητα από αυτές που παρουσιάζονται στον παλμογράφο.
- **Αναλυτές φάσματος (Spectrum analyzers):** Πρόκειται για συσκευές όμοιες με τους παλμογράφους, όπου στις οθόνες τους εμφανίζουν την κατανομή της ισχύος ενός σήματος συναρτήσει της συχνότητας. Το σήμα αυτό σαρώνει ένα φάσμα συχνοτήτων και τελικά εμφανίζονται στην οθόνη όλες οι αρμονικές και ενδοαρμονικές συνιστώσες που περιέχονται μέσα σε αυτό στο φάσμα.
- **Αναλυτές αρμονικών ή κύματος (Harmonic or wave analyzers):** Τέτοιου είδους αναλυτές μετρούν το πλάτος της κυματομορφής κάθε συχνότητας (θεμελιώδους και αρμονικών) εντός συγκεκριμένου φάσματος. Ορισμένες από αυτές τις συσκευές υπολογίζουν και τη γωνία μεταξύ των φάσεων ενός συστήματος.
- **Αναλυτές διαταραχών (Distortion analyzers):** Πρόκειται για συσκευές που υπολογίζουν το συντελεστή THD ενός συστήματος.

Οι παραπάνω μέθοδοι που αναλύθηκαν χρησιμοποιούν κυρίως αναλογικούς τρόπους μέτρησης των αρμονικών μεγεθών. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες μετρήσεις αρμονικών μπορούν να πραγματοποιηθούν και με ψηφιακές μεθόδους με βάση τους 2 παρακάτω τρόπους:

- **Μέσω ψηφιακών φίλτρων (Digital filters):** Τα ψηφιακά φίλτρα λειτουργούν ομοίως με τα αναλογικά ηλεκτρικά φίλτρα (πυκνωτές), δηλαδή περιορίζοντας ένα φάσμα συχνοτήτων μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής συχνότητας. Το μετρούμενο φάσμα ρυθμίζεται ανάλογα με την εκάστοτε μέτρηση και συνήθως το φάσμα που επιλέγεται είναι αυτό που περιέχει αρμονικές συνιστώσες μικρότερες από τη θεμελιώδη συχνότητα και αυτό επιτυγχάνεται λόγω των περισσότερων δυνατοτήτων που προσφέρουν τα ψηφιακά φίλτρα.
- **Άμεση ανάλυση Fourier (Fast Fourier Transform technique- FFT):** Πρόκειται για στιγμιαία ανάλυση Fourier σε ένα προκαθορισμένο εύρος συχνοτήτων, η οποία επιτυγχάνεται μέσω μικροϋπολογιστικών μονάδων και ψηφιακών και αναλογικών μετατροπών που πραγματοποιούνται σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα από τη συσκευή μέτρησης. Επίσης, είναι δυνατή η καταγραφή των κυματομορφών διάφορων συχνοτήτων μέσω ψηφιακών και αναλογικών διατάξεων με σκοπό τη μεταφορά τους σε διαφορετικό χώρο επεξεργασίας, όπως σε ένα εργαστήριο. Έτσι, είναι δυνατή μία μεταγενέστερη και πιο λεπτομερής μελέτη των συνθηκών που επικρατούν σε κάθε δίκτυο και οφείλονται στις αρμονικές.

2.16 Προτεινόμενες πρακτικές για μεμονωμένους καταναλωτές

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται οι περιορισμοί που θέτει το πρότυπο IEEE Std 519-1992, οι οποίοι συμβάλλουν στην αντιμετώπιση των αρμονικών διαταραχών και κατ' επέκταση των επιπτώσεων αυτών στους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας (Η.Ε.). Στους καταναλωτές αυτούς δεν περιλαμβάνονται εγκαταστάσεις μεγάλης απαίτησης ισχύος (MVA), διότι σε αυτήν την περίπτωση θα απαιτούνταν μεγαλύτερη εμβάθυνση στη μελέτη των αρμονικών διαταραχών και των μεθόδων μείωσης αυτών. Οι σχετικοί κανονισμοί θέτουν όρια σε βασικούς δείκτες (μεγέθη) που συνθέτουν τις αρμονικές συνιστώσες, όπως το ρεύμα και η τάση. Πέρα από τον επιτυχή σχεδιασμό των κανονισμών, μεγάλη βάση δίνεται και στο σημείο κοινής σύνδεσης (Point of Common Coupling-PCC) ανάμεσα στους καταναλωτές και τους παραγωγούς Η.Ε., δηλαδή στο σημείο όπου πραγματοποιείται η άμεση και προσιτή μέτρηση των αρμονικών δεικτών και από τις δύο πλευρές. Οι δείκτες αρμονικών αφορούν κυρίως μεγέθη όπως η τάση και το ρεύμα ολικής αρμονικής διαταραχής (V_{THD} , I_{THD} αντίστοιχα) και τιμές φαινομένων, όπως ο στιγμιαίος μηδενισμός τάσης (Notching-παράγραφος 2.6). Τα κριτήρια επιλογής των αρμονικών δεικτών είναι τα παρακάτω:

- η σχέση τους με θεμελιώδη μεγέθη (τάση, ρεύμα), τα οποία σχετίζονται άμεσα με τις αρμονικές διαταραχές.
- ο καθορισμός τους μέσω συμβατικών τρόπων μέτρησης.
- η απλότητα αυτών, που τους καθιστά προσιτούς στην αναγνώριση και τη μελέτη τους.

Οι διάφορες μεταβολές που υπάρχουν μεταξύ των ποικίλων εξοπλισμών και εγκαταστάσεων των καταναλωτών, τα προσεγγιστικά αποτελέσματα των αρμονικών δεικτών που λαμβάνονται από τις περισσότερες μετρήσεις και οι συνεχείς αλλαγές που πραγματοποιούνται σε όλο το σύστημα Η.Ε. καθιστούν εξαιρετικά δύσκολη τη θέσπιση απόλυτων ορίων στους αρμονικούς δείκτες, ώστε να ικανοποιούν όλες αυτές τις διαφορετικές περιπτώσεις. Έτσι, είναι σημαντική η συνεχής αναθεώρηση και εξέλιξη αυτών λαμβάνοντας υπόψη όλες τις αλλαγές που συμβαίνουν στο σύστημα, αλλά και τα πορίσματα που προκύπτουν από τη μελέτη του συστήματος από ειδικούς στο αντικείμενο αυτό (μηχανικούς, αναλυτές).

2.16.1 Περιορισμοί ρευμάτων διαταραχής

Υπάρχουν 2 βασικές πρακτικές για την αντιμετώπιση των αρμονικών ρευμάτων, οι οποίες στηρίζονται στη μείωση των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος διαταραχής (current distortion) ενός συστήματος. Αναλυτικά, οι πρακτικές αυτές βασίζονται στις 2 παρακάτω διαδικασίες:

- στον περιορισμό των επιμέρους εισερχόμενων αρμονικών διαταραχών (αρμονικών ρευμάτων) από κάθε επιμέρους σύστημα (καταναλωτή) που υπερβαίνει τα αποδεκτά επίπεδα διαταραχής, υπό τα ονομαστικά χαρακτηριστικά αυτού (normal system characteristics).
- στον περιορισμό της αρμονικής τάσης διαταραχής του συστήματος, από την οποία τροφοδοτούνται οι καταναλωτές.

Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος αφορούν τα επιμέρους τμήματα από τα οποία αποτελείται το κάθε σύστημα (γραμμή διανομής, πυκνωτές διόρθωσης συντελεστή ισχύος, φορτίο). Στην περίπτωση αυτή, που εξετάζονται οι αρμονικές διαταραχές, ολόκληρο το σύστημα περιγράφεται μόνο από την ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση βραχυκύκλωσης (short-circuit impedance), ενώ η επίδραση των πυκνωτών και του φορτίου αμελούνται. Η αρμονική τάση διαταραχής του συστήματος προκύπτει από το γινόμενο του συνολικού

ρεύματος διαταραχής, δηλαδή το άθροισμα των αρμονικών ρευμάτων που εισέρχονται στο σύστημα από τον κάθε καταναλωτή και της επαγωγικής αντίδρασης (x_L) του συστήματος για κάθε αρμονική συχνότητα ($x_L=j\omega L=j2\pi f_h L$). Το συνολικό αρμονικό ρεύμα που ρέει μέσα στο δίκτυο εξαρτάται από τον αριθμό των καταναλωτών αυτού και από το μέγεθος του καθενός (απαιτήση ηλεκτρικής ενέργειας). Επομένως, μία αποτελεσματική μέθοδος για τη μείωση του συνολικού αρμονικού ρεύματος είναι η θέσπιση περιορισμών ανάλογα με το μέγεθος του κάθε καταναλωτή. Μα άλλα λόγια, οι εγκαταστάσεις μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος, όπου το μεγαλύτερο ποσοστό εισερχόμενων στο σύστημα αρμονικών ρευμάτων οφείλεται σε αυτές, θα πρέπει να τηρούν αυστηρότερους περιορισμούς, σε σχέση με καταναλωτές μικρότερης ισχύος. Επιπλέον, στη δημιουργία των περιορισμών λαμβάνονται υπόψη και οι διαφορές που υπάρχουν στα χαρακτηριστικά του αρμονικού ρεύματος που προέρχεται από τον κάθε καταναλωτή, όπως οι συνιστώσες που παρέχει (αριθμός και τάξη), η γωνία αυτών και η χρονική περίοδος μέσα στο 24ωρο που εντοπίζεται η έγχυση των αρμονικών ρευμάτων στο σύστημα.

Πίνακας 2.2. Περιορισμοί του αρμονικού ρεύματος για καταναλωτές ποικίλων απαιτήσεων [18, Πίν.10.3]

Τάξεις αρμονικών (μονά πολλαπλάσια αρμονικών συνιστωσών)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Πίνακας 2.3. Περιορισμοί του αρμονικού ρεύματος για καταναλωτές ποικίλων απαιτήσεων [18, Πίν.10.4]

Τάξεις αρμονικών (μονά πολλαπλάσια αρμονικών συνιστωσών)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Στους 2 παραπάνω πίνακες απεικονίζονται οι περιορισμοί του αρμονικού ρεύματος διαταραχής, για ορισμένες αρμονικές συχνότητες σε σύστημα διανομής (120V-69kV)-Πίνακας 2.2 και σε σύστημα διανομής (69kV-161kV)-Πίνακας 2.3. Στην πρώτη στήλη του κάθε πίνακα απεικονίζεται ο λόγος του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{sc}) προς το μέγιστο ονομαστικό ρεύμα (I_L) στη θεμελιώδη συχνότητα, στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC). Το ρεύμα I_L ορίζεται ως η μέση τιμή του μέγιστου ρεύματος ζήτησης στη διάρκεια 12 μηνών (1 χρόνου). Στην τελευταία στήλη του πίνακα καταγράφονται οι τιμές του συντελεστή TDD (Total Demand Distortion), όπου περιγράφει το ποσοστό (%) του ρεύματος διαταραχής προς τη μέγιστη ζήτηση ρεύματος για χρονικό διάστημα περίπου 25 min.

2.16.2 Αντιμετώπιση ζητημάτων μετασηματιστών

Με βάση το πρότυπο IEEE C57.12.00.1987, οι περιορισμοί των αρμονικών ρευμάτων, όπως αυτοί που παρουσιάζονται στους 2 παραπάνω πίνακες (Πίνακας 2.2, Πίνακας 2.3) ισχύουν για ένα σύστημα, με την προϋπόθεση ότι ο μετασηματιστής υποβιβασμού μεταξύ δικτύου (διανομής ή μεταφοράς) και φορτίου δεν διαρρέεται από αρμονικό ρεύμα υψηλότερο του 5% της τιμής του ονομαστικού του ρεύματος λειτουργίας. Στην περίπτωση που εμφανιστεί αρμονικό ρεύμα που υπερβαίνει αυτό το ποσοστό, τότε απαιτείται η εγκατάσταση μετασηματιστή μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος και κατ' επέκταση μεγαλύτερου ονομαστικού ρεύματος λειτουργίας. Μέσω αυτού αποφεύγεται ταυτόχρονα και η έντονη θερμική καταπόνηση των τυλιγμάτων του από τη συνεχή διαρροή αυτών από αρκετά υψηλό αρμονικό ρεύμα.

2.16.3 Αντιμετώπιση σύντομων πτώσεων τάσης (flickers)

Το φαινόμενο αυτό (flickers) δεν προκαλείται από τους ίδιους τους μετατροπείς (ανορθωτές, αντιστροφείς), αλλά από την επαναληπτική εκκίνηση και παύση λειτουργίας συγκεκριμένων φορτίων που τροφοδοτούνται από αυτούς. Τέτοιου είδους φορτία είναι τα κυρίως τα παλμικά φορτία, όπως οι φούρνοι ηλεκτρικού τόξου, οι συσκευές ηλεκτροσυγκόλλησης, αλλά και μη παλμικά φορτία όπως οι ανελκυστήρες. Όταν η πτώση τάσης είναι αρκετά μεγάλη και υφίσταται σε τμήμα του Σ.Η.Ε. όπου υπάρχουν φορτία φωτισμού, τότε το φαινόμενο γίνεται αντιληπτό από το «τρεμόσβημα» που συμβαίνει σε αυτά. Όμως, το ίδιο φαινόμενο συμβαίνει και σε άλλα φορτία, όπως επικοινωνίας, ελέγχου, μετρήσεων, όπου δεν είναι δυνατή η αναγνώρισή του μέσω οπτικού ερεθίσματος. Το συγκεκριμένο φαινόμενο περιγράφεται από την πτώση τάσης που προκαλεί στο σύστημα και από τη συχνότητα εμφάνισής του σε αυτό. Η ένταση αυτού, δηλαδή η τιμή της πτώσης τάσης που προκαλεί εξαρτάται από την ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση του συστήματος και της απαίτησης ισχύος του φορτίου (load peak power requirements). Στην περίπτωση εγκατάστασης παλμικών φορτίων σε ένα σύστημα, απαιτείται η γνώση των ονομαστικών μεγεθών αυτών (ισχύς -kVA και συχνότητα λειτουργίας), η ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση των πηγών (γεννητριών), για να διαπιστωθεί ο βαθμός ακαμψίας αυτών (η διατήρηση σταθερής τάσης τροφοδοσίας) και η ευαισθησία των εξαρτημάτων του Σ.Η.Ε. στο φαινόμενο αυτό (η ευαισθησία των διάφορων στοιχείων του συστήματος στη διακύμανση-πτώση αυτή της τάσης έχει καθοριστεί μέσα από εμπειρικές μελέτες και πειράματα). Ένας τρόπος αντιμετώπισης αυτών των περιοδικών πτώσεων τάσης επιτυγχάνεται μέσω της βελτίωσης της ακαμψίας των πηγών του συστήματος, ώστε να παραμένει ανεπηρέαστη η τιμή της παρεχόμενης τάσης τροφοδοσίας κατά τη διακοπή λειτουργίας των φορτίων που προκαλούν αυτή τη διαταραχή. Για την επίτευξη της ευστάθειας της τάσης τροφοδοσίας χρησιμοποιούνται ορισμένοι μηχανισμοί, οι οποίοι μπορεί να είναι συστοιχίες πυκνωτών συνδεδεμένες με την πηγή, επαγωγικές αντιδράσεις κορεσμού (saturating shunt inductors), και διατάξεις θυρίστορ συνδεδεμένες με επαγωγικές και χωρητικές αντιδράσεις (static var control).

2.17 Προτεινόμενες πρακτικές για Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.)

Η επιτρεπόμενη (εντός ορίων) διαταραχή λόγω αρμονικών που υπάρχει σε κάθε Σ.Η.Ε. είναι μία από τις προϋποθέσεις που πρέπει να καλύπτει, ώστε να μπορεί να τροφοδοτήσει τους χρήστες του. Οι συγκεκριμένες διαταραχές προκαλούνται στο σύστημα από πολλούς και ποικίλους λόγους, που ο καθένας αναλύεται και αντιμετωπίζεται ξεχωριστά, όπως παρουσιάζεται και στη συνέχεια. Μέσα από όλους τους τρόπους αντιμετώπισης που επιστρατεύονται για τον περιορισμό των αρμονικών διαταραχών, κύριος στόχος είναι η ύπαρξη επιθυμητών τιμών στο κοινό σημείο σύνδεσης (PCC) του συστήματος με τον κάθε καταναλωτή.

2.17.1 Γενικές πρακτικές αντιμετώπισης

Σε περίπτωση που παρουσιαστεί παραβίαση των ορίων στο σημείο λήψης των μετρήσεων (PCC) και γενικά στο σύστημα, ακολουθούνται ορισμένες βασικές διαδικασίες για τον εντοπισμό και την επίλυση αυτών των διαταραχών. Κάποιες από αυτές είναι οι παρακάτω:

- εντοπισμός καταναλωτών που περιέχουν πηγές αρμονικών (π.χ. μετατροπείς τάσης) στις εγκαταστάσεις τους, οι οποίες προκαλούν έντονα φαινόμενα αρμονικών διαταραχών στο δίκτυο και πρόταση τρόπων αντιμετώπισης (π.χ. φίλτρα αρμονικών) προς αυτούς.
- εγκατάσταση φίλτρων αρμονικών από την πλευρά του συστήματος διανομής ή πρόσθεση νέων αναχωρήσεων (feeders) με σκοπό την απομόνωση του δικτύου, σε μεγάλο βαθμό, από τις αρμονικές διαταραχές.

2.17.2 Αντιμετώπιση εισερχόμενων αρμονικών (Addition of Harmonics)

Οι αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος και κατ' επέκταση και της τάσεως που παράγονται από μία πηγή αρμονικών, σε κάθε συχνότητα διαφέρουν από τις αρμονικές ίδιας συχνότητας άλλης πηγής αρμονικών που είναι συνδεδεμένη στο ίδιο κύκλωμα, κυρίως ως προς το όρισμά τους (γωνία-delay angle). Ο θεωρητικός προσδιορισμός του συνολικού αρμονικού ρεύματος, για κάθε χρονική στιγμή, επιτυγχάνεται με χρήση του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff, δηλαδή αθροίζοντας όλες τις συνιστώσες ρεύματος των αντίστοιχων συχνοτήτων που προέρχονται από όλους τους κλάδους (πηγές αρμονικών) του δικτύου. Παρόμοια, μέσω του νόμου τάσεων του Kirchhoff υπολογίζεται η συνολική αρμονική τάση των αντίστοιχων πηγών αρμονικών συχνοτήτων ενός συστήματος. Όμως, η άθροιση όλων των αντίστοιχων συνιστωσών ρεύματος ή τάσεως της κάθε πηγής αρμονικών για όλες τις χρονικές στιγμές αποτελεί σχεδόν αδύνατη διαδικασία. Γι' αυτό το λόγο, στην πράξη λαμβάνονται συγκεκριμένες μετρήσεις κατά τη διάρκεια του 24ώρου, όπου υπολογίζεται ξεχωριστά η αρμονική τάση και το ρεύμα ίδιας συχνότητας της κάθε πηγής και προστίθενται, ώστε να προκύψει η τελική τιμή (μέτρηση) τους για τη δεδομένη χρονική στιγμή. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με εκείνες που θέτουν οι κανονισμοί, ο IEEE Std 519-1992 στη συγκεκριμένη περίπτωση και διαπιστώνεται αν είναι εντός ή εκτός των επιτρεπτών ορίων. Ιδιαίτερη βάση δίνεται στα σημεία του δικτύου όπου εμφανίζεται έντονη παραβίαση των ορίων λόγω αρμονικών, με σκοπό την παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού (π.χ. μετασχηματιστές, πυκνωτές) και των φαινομένων (π.χ. συντονισμός) που μπορεί να συμβαίνουν στο σύστημα.

2.17.3 Αντιμετώπιση αρμονικών μικρής διάρκειας

Οι ρυθμιστές στροφών (PWM drives) που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο πολλών φορτίων, συχνά παράγουν αρμονικές συνιστώσες για μικρό χρονικό διάστημα (intermittent harmonics), το οποίο εξαρτάται από τη φόρτιση του φορτίου (κινητήρα) που διαχειρίζονται. Οι συνέπειες αυτού του είδους αρμονικών δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα διάφορα μέρη της εγκατάστασης (μετασχηματιστές, πυκνωτές) και η επίδραση τόσο των

διακοπτόμενων, όσο και των μόνιμων αρμονικών στα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου είναι όμοια. Μία από τις συνέπειές τους στα συστήματα είναι το φαινόμενο του «τρεμοσβήσιματος» (flicker), όπως αναφέρθηκε και στις παραγράφους 2.6-2.7. Επομένως, η αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού οδηγεί έμμεσα και στην αντιμετώπιση του προβλήματος των αρμονικών.

2.17.4 Προβλήματα αρμονικών περιορισμένης εμφάνισης

Πέραν των προαναφερθέντων συχνών προβλημάτων λόγω αρμονικών που συμβαίνουν σε ένα Σ.Η.Ε., υπάρχουν ορισμένα ακόμα που εμφανίζονται σπανιότερα, αλλά δεν παύουν να αποτελούν ζητήματα προς επίλυση. Παρακάτω παρουσιάζονται 3 από τα βασικότερα προβλήματα τέτοιου είδους:

- **Φυσικός συντονισμός των γραμμών μεταφοράς (Natural resonant of a transmission line):** Κάθε γραμμή μεταφοράς χαρακτηρίζεται από μία ή και περισσότερες φυσικές συχνότητες συντονισμού, η τιμή των οποίων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των γραμμών, όπως και το σημείου τερματισμού τους (termination). Στην περίπτωση που κάποια αρμονική συχνότητα προσεγγίσει τη φυσική συχνότητα συντονισμού, μπορεί είτε να επηρεαστεί η επαγωγική αντίδραση (input impedance) της γραμμής και να λάβει σχεδόν μηδενική τιμή (σε σειρά συντονισμός) ή σημαντικά μεγάλη (παράλληλος συντονισμός), είτε να υπάρξει έντονη διαταραχή σε γειτονικές τηλεφωνικές γραμμές. Ορισμένες προτεινόμενες μέθοδοι επίλυσης είναι η αλλαγή ορισμένων χαρακτηριστικών της γραμμής, ώστε να μεταβληθεί η συχνότητα συντονισμού της και η ενσωμάτωση κατάλληλων φίλτρων αρμονικών σε κατάλληλα τμήματα του Σ.Η.Ε..
- **Υπερδιέγερση μετασχηματιστών (Overexcitation of transformers):** Η υπερδιέγερση στους μετασχηματιστές του δικτύου οδηγεί στην παραγωγή ασυνήθιστων αρμονικών συχνοτήτων, η τάξη (h) των οποίων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πυρήνα του μετασχηματιστή. Στη διάρκεια αυτής της κατάστασης εμφανίζεται αύξηση της τάσης λειτουργίας του δικτύου (στο τμήμα της υψηλής τάσης του μετασχηματιστή) με τιμές που υπερβαίνουν αρκετά τις ονομαστικές και κατ' επέκταση επιβαρύνουν τις συστοιχίες πυκνωτών που είναι συνδεδεμένες στο κύκλωμα δημιουργώντας έτσι, αρμονικές συνιστώσες στο δίκτυο.
- **Αρμονικός συντονισμός στο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας (Harmonic resonance in the zero-sequence circuit):** Το συγκεκριμένο φαινόμενο εμφανίζεται σε ένα Σ.Η.Ε., όταν επικρατούν σε αυτό κάποιες ή και όλες από τις παρακάτω 3 συνθήκες:
 1. Σύνδεση των γεννητριών σε αστέρα με γειωμένο ουδέτερο κόμβο, μέσω επαγωγικής αντίδρασης.
 2. Σύνδεση του τυλίγματος του μετασχηματιστή, στην πλευρά σύνδεσης του με τη γεννήτρια, σε αστέρα με γειωμένο ουδέτερο κόμβο απευθείας ή μέσω επαγωγικής αντίδρασης.
 3. Παρουσία πυκνωτών διόρθωσης συντελεστή ισχύος (συνφ) στο δίκτυο, σε σύνδεση αστέρα με γειωμένο ουδέτερο κόμβο.

Η τάση που παράγεται από κάθε γεννήτρια περιέχει μηδενικής ακολουθίας αρμονικές συνιστώσες τάσης (zero-sequence harmonic voltages), δηλαδή πηγές αρμονικών τάσεων στο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας, κάθε μία από τις οποίες συνδέεται σε σειρά με τη συνολική επαγωγική αντίδραση του κυκλώματος (επαγωγική αντίδραση γεννήτριας, μετασχηματιστή, γραμμής, ουδέτερου αγωγού γείωσης) και τη χωρητική αντίδραση αυτού (ισοδύναμη αντίδραση συστοιχίας πυκνωτών). Ο συντονισμός των αντιδράσεων αυτών με κάποια αρμονική συχνότητα οδηγεί σε ροή αρμονικών

ρευμάτων μέσα στο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας, προκαλώντας σοβαρές συνέπειες, όπως δυσλειτουργία ηλεκτρονόμων (ρελέ) διαρροής και μετρητών ηλεκτρικής ενέργειας (kWh) μονοφασικών καταναλωτών. Ο βασικότερος τρόπος αντιμετώπισης είναι η αλλαγή στη σύνδεση των τυλιγμάτων του εξοπλισμού από γειωμένο αστέρα, σε αγείωτο ή η σύνδεση του πρωτεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή ανύψωσης (step-up) σε τρίγωνο.

2.18 Προτεινόμενες μέθοδοι αξιολόγησης πηγών αρμονικών

Η διαδικασία αξιολόγησης πηγών αρμονικών συνιστώσων εφαρμόζεται για τη μελέτη είτε μεγάλων πηγών αρμονικών που εντοπίζονται σε συγκεκριμένο σημείο μέσα στο σύστημα, είτε μεμονωμένων πηγών αρμονικών που είναι κατανεμημένες σε ολόκληρο το σύστημα. Με την πάροδο του χρόνου αυτή η μελέτη αξιολόγησης ενσωματώνεται όλο και περισσότερο σε γενικότερες μελέτες που αφορούν το σχεδιασμό ποικίλων συστημάτων, αφού ένα μεγάλο μέρος του εξοπλισμού τους αποτελείται από φορτία που παράγουν αρμονικές. Παρακάτω παρουσιάζονται οι 4 βασικότεροι στόχοι που επιτυγχάνονται μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας:

- Αναγνώριση του επιπέδου αρμονικών του συστήματος.
- Αναγνώριση των προβλημάτων του συστήματος που οφείλονται στις αρμονικές συνιστώσες.
- Αξιολόγηση της επίδρασης των διάφορων πηγών αρμονικών (συγκεντρωμένων ή διεσπαρμένων) του συστήματος σε αυτό.
- Σχεδιασμός εξοπλισμού για τον έλεγχο και περιορισμό των αρμονικών μέσα στο σύστημα.

2.18.1 Θεωρητική ανάλυση

Η επαρκής γνώση των 4 παραγόντων, που παρουσιάστηκαν παραπάνω, προέρχεται, τουλάχιστον σε θεωρητικό επίπεδο, από το σχεδιασμό ενός μοντέλου του συστήματος μέσα από το οποίο προκύπτουν οι αναγκαίες τιμές και μεγέθη που σχετίζονται με τις αρμονικές, αλλά και η γενική συμπεριφορά αυτού. Οι υπολογισμοί των αρμονικών πραγματοποιούνται για διαφορετικές πιθανές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Στην περίπτωση που οι αρμονικές διαταραχές αυτού είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων, που θέτουν οι ακολουθούμενοι σε κάθε περίπτωση κανονισμοί (π.χ. IEEE Std 519-1992), τότε δεν συνεχίζεται η ανάλυση. Διαφορετικά, για αρμονικές διαταραχές που παραβιάζουν τους αντίστοιχους περιορισμούς, πραγματοποιούνται διαδικασίες εύρεσης ανάλογων τρόπων αντιμετώπισης.

2.18.2 Πειραματική διαδικασία μέσω μετρήσεων

Η μέτρηση των κατάλληλων αρμονικών μεγεθών είναι μία μεταγενέστερη διαδικασία της ανάλυσης του συστήματος, διότι πραγματοποιείται πλέον στον ήδη εγκατεστημένο εξοπλισμό. Όμως, εξακολουθεί να αποτελεί μία αναγκαία διαδικασία της ανάλυσης για τους εξής λόγους:

- Αποτελεί έναν ακόμα τρόπο υπολογισμού (επιβεβαίωσης) των 4 στόχων που αναφέρθηκαν στην αρχή της παραγράφου (προηγούμενη σελίδα).
- Επαληθεύονται ή όχι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη θεωρητική μελέτη.
- Καθορίζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των πηγών αρμονικών και η απόκριση του συστήματος σε αυτές.

Ορισμένες βασικές μετρήσεις που λαμβάνονται μέσω παλμογράφου είναι η ελάχιστη συνιστώσα συνεχούς ρεύματος (minimum dc current) και οι περιοχές στιγμιαίου μηδενισμού τάσης (notching areas) στην

κυματομορφή της τάσης. Μέσω των τιμών αυτών υπολογίζεται η ανά φάση επαγωγική αντίδραση (per phase inductance) του συστήματος. Περαιτέρω ανάλυση μπορεί να διεξαχθεί σε συνδυασμό με τις μετρήσεις που έχουν ληφθεί για το σύστημα. Η εκτέλεση προσομοιώσεων λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας αυτού, οι πιθανές μελλοντικές προσθήκες πηγών αρμονικών στο σύστημα και οι επιπτώσεις τους σε αυτό, όπως και η δοκιμή και εξέλιξη των μεθόδων ελέγχου και περιορισμού των αρμονικών, αποτελούν τομείς της συνολικής ανάλυσης. Μέσω αυτών των λεπτομερών προσομοιώσεων, που καλύπτουν σημαντικό εύρος συνθηκών λειτουργίας είναι δυνατός ο έλεγχος της κάθε πηγής αρμονικών ξεχωριστά, με τη μέθοδο που λειτουργεί αποτελεσματικότερα στην κάθε μία.[18, Sect.12], [22, Sect.12]

2.19 Προβλήματα αρμονικών σε πλοία κατά IEEE Standard 45

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας κάθε Σ.Η.Ε. πλοίου, που ορίζονται με βάση κατάλληλα πρότυπα που εφαρμόζονται σε αυτά (π.χ. IEEE Standard 45) πρέπει να τηρούνται υπό όλες τις συνθήκες λειτουργίας που επικρατούν στο σύστημα, όπως σε διακοπές ισχύος, μεταβατικά φαινόμενα, δοκιμές μόνωσης καλωδίων, κ.α.. Για την επίτευξη αυτού, οι διατάξεις που περιέχει το κάθε σύστημα απαιτείται να λειτουργούν επιβαρύνοντας το όσο λιγότερο γίνεται. Όπως συμβαίνει στα Σ.Η.Ε. ξηράς, έτσι και στα συστήματα πλοίων εμφανίζονται αρμονικές συνιστώσες ρεύματος κατά τη λειτουργία φορτίων που δρουν ως πηγές αρμονικών (ρυθμιστές στροφών, μετατροπείς τάσεις, H/Y, κ.α.). Επίσης, κατά την εμφάνιση αυτών των αρμονικών επηρεάζονται τμήματα του συστήματος, όπως ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές λόγω των παρεμβολών στις συχνότητες που λαμβάνουν και επεξεργάζονται (Radio Frequency Interference-RFI). Για τον περιορισμό των επιπτώσεων των αρμονικών στα χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών συστημάτων των πλοίων χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, όπως φίλτρα αρμονικών, μετασχηματιστές ηλεκτρικής απομόνωσης (1:1) σε τμήματα του συστήματος όπου απαιτούνται, όπως και μέθοδοι φυσικής απομόνωσης μεταξύ των ηλεκτρικών διατάξεων μικρής ισχύος λειτουργίας και του εξοπλισμού μεγάλης απαίτησης ισχύος (κινητήρες, μεγάλα ωμικά φορτία). Τα φορτία μεγάλης ισχύος συνδέονται μέσω μετασχηματιστή απομόνωσης απευθείας στην πηγή παροχής ενέργειας (γεννήτριες), δηλαδή αποτελούν ένα αυτόνομο κύκλωμα χωρίς άλλο φορτίο, ακόμα και μικρότερης ισχύος, σε αυτό και τα φίλτρα αρμονικών και οι καταστολείς υπερτάσεων-ασφάλειες (surge suppressers) συνδέονται στο δευτερεύον τύλιγμα των μετασχηματιστών αυτών. Οι κύριοι ζυγοί φορτίων (main power switchboards) που συνδέονται με τους ακροδέκτες των γεννητριών και οι ρυθμιστές στροφών των κινητήρων πρόωσης (propulsion motor drives) αποτελούν φορτία με τη μεγαλύτερη ζήτηση ισχύος σε ένα πλοίο. Γι' αυτό το λόγο εγκαθίστανται σε διαφορετικό τμήμα (ηλεκτροστάσιο) από τους πίνακες τροφοδοσίας των υπόλοιπων (μικρότερων) φορτίων, ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (Electromagnetic Interference-EMI) λόγω της σημαντικής διαφοράς στην ισχύ λειτουργίας μεταξύ αυτών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα μεγέθη και οι περιορισμοί που θέτονται σε αυτά από το πρότυπο IEEE Standard 45.

2.19.1 Περιορισμοί συχνότητας

- **Ονομαστική συχνότητα (Nominal frequency):** Είναι η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος σε Hertz (Hz).
- **Απόκλιση συχνότητας (Frequency tolerance):** Πρόκειται για τη μέγιστη απόκλιση που μπορεί να λάβει η τιμή της συχνότητας λειτουργίας σε σχέση με την ονομαστική και εκφράζεται ως ποσοστό της ονομαστικής. Δεν περιλαμβάνονται αποκλίσεις στη συχνότητα λόγω μεταβατικών φαινομένων

(transients) και κυκλικών (περιοδικών) μεταβολών αυτής (cyclic frequency variations), αλλά μόνο αποκλίσεις που προκαλούνται από υπερφόρτιση του συστήματος, καιρικές συνθήκες (αύξηση θερμοκρασίας), κ.α..

- **Διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Modulation-F.M.):** Αφορά την επιτρεπόμενη περιοδική μεταβολή της συχνότητας του συστήματος λόγω της λειτουργίας φορτίων σε επαναλαμβανόμενη ή τυχαία χρονική στιγμή. Η μεταβολή αυτή δεν πρέπει να ξεπερνά τα 10sec (χρονικό όριο μέσα στο οποίο η συχνότητα λειτουργίας πρέπει να λάβει την ονομαστική της τιμή).

$$F.M.(%) = \frac{f_{max} - f_{min}}{2f_{nom}} \cdot 100\% \quad (2.25)$$

όπου f_{max} : η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η συχνότητα κατά την περίοδο της μεταβολής της

f_{min} : η ελάχιστη τιμή που λαμβάνει η συχνότητα κατά την περίοδο της μεταβολής της

f_{nom} : η ονομαστική συχνότητα λειτουργίας του συστήματος

- **Απόκλιση μεταβατικής συχνότητας (Frequency transient tolerance):** Αναφέρεται στη στιγμιαία διαταραχή της συχνότητας εκτός ορίων και στην επαναφορά εντός αυτών σε συγκεκριμένο χρόνο επαναφοράς.
- **Χρόνος επαναφοράς απόκλισης μεταβατικής συχνότητας (frequency transient recovery time):** Είναι το χρονικό διάστημα από την έναρξη της διαταραχής της συχνότητας ως την επαναφορά και παραμονή αυτής στην ονομαστική τιμή λειτουργίας της.

Πίνακας 2.4. Χαρακτηριστικά (περιορισμοί) συχνότητας Σ.Η.Ε. πλοίου χαμηλής τάσης κατά IEEE Std 45 [14, Πίν.4.1]

a/a	Καταστάσεις-Μεγέθη	Περιορισμοί
1	Ονομαστική συχνότητα	50/60Hz
2	Απόκλιση συχνότητας	±3%
3	Διαμόρφωση συχνότητας	0.5%
4	Μεταβατική συχνότητα	
	α) Απόκλιση	±4%
	β) Χρόνος επαναφοράς	2sec
5	Μέγιστη απόκλιση συχνότητας στη δυσμενέστερη περίπτωση που μπορεί να προκληθεί από τις 3 προηγούμενες καταστάσεις (2,3,4 ^α)	±5.5%

2.19.2 Περιορισμοί τάσης

- **Απόκλιση τάσης καταναλωτών (User voltage tolerance):** Πρόκειται για τη μέγιστη απόκλιση της τάσης λειτουργίας σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, από την ονομαστική τάση λειτουργίας του συστήματος. Περιλαμβάνονται οι αποκλίσεις που οφείλονται σε αλλαγές στο φορτίο (υπερφόρτιση), σε

καιρικές συνθήκες (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία), σε προβλήματα οργάνων των πινάκων (switchboard meter errors), κ.α..

- **Απόκλιση στην ανισορροπία τάσης σε τριφασικό σύστημα (Line Voltage Unbalance Tolerance-L.V.U.T.):** Είναι η μέγιστη διαφορά ανάμεσα στην υψηλότερη (E_{max}) και τη χαμηλότερη (E_{min}) πολική (line-to-line) τάση του συστήματος:

$$L.V.U.T. = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{nom}} \cdot 100\% \quad (2.26)$$

όπου E_{nom} : η ονομαστική πολική τάση λειτουργίας του συστήματος (οριζόμενη ως η διαφορά τάσης μεταξύ 2 αγωγών φάσεων)

- **Διαμόρφωση (πλάτους) τάσης (Voltage Modulation-V.M.):** Πρόκειται για την περιοδική διαταραχή στην τάση (των καταναλωτών) που προκαλείται από την επαναλαμβανόμενη ή τυχαία λειτουργία παλμικών φορτίων. Η συγκεκριμένη διαταραχή (διαμόρφωση) εξετάζεται όταν συμβαίνει για χρονικό διάστημα 1-10sec ή 1-0,1Hz, αντίστοιχα:

$$V.M. = \frac{E_{max} - E_{min}}{2E_{nom}} \cdot 100\% \quad (2.27)$$

όπου E_{max} : η μέγιστη τιμή της κυματομορφής της τάσης

E_{min} : η ελάχιστη τιμή της κυματομορφής της τάσης

E_{nom} : η ονομαστική τιμή της τάσης

Όλες οι τιμές των τάσεων που χρησιμοποιούνται στη σχέση 2.27 είναι είτε τιμές ενεργού (RMS) τάσης, είτε τιμές τάσης κορυφής (peak).

- **Μεταβατική τάση (Voltage transient):** Αφορά στιγμιαίες μεταβολές της τάσης (όχι αιχμές τάσης-voltage spikes) εκτός των επιτρεπόμενων ορίων και κατόπιν επαναφορά και διατήρηση αυτής εντός του ορίου του κανονισμού, μέσα σε συγκεκριμένο χρόνο επαναφοράς, μεγαλύτερο του 1msec από την έναρξη της διαταραχής.
- **Χρόνος επαναφοράς (Recovery time):** Είναι το χρονικό διάστημα από την έναρξη της διαταραχής ως την επαναφορά και παραμονή αυτής εντός των επιτρεπτών ορίων.
- **Αιχμή τάσης (Voltage spike):** Είναι η στιγμιαία και απότομη μεταβολή τάσεως μικρότερης διάρκειας από τη μεταβατική τάση (<1msec).

Πίνακας 2.5. Χαρακτηριστικά (περιορισμοί) τάσης Σ.Η.Ε. πλοίου χαμηλής τάσης κατά IEEE Std 45 [14, Πίν.4.1]

α/α	Καταστάσεις-Μεγέθη	Περιορισμοί
1	Ανισορροπία τάσης γραμμής	3%
2	Απόκλιση τάσης καταναλωτών	
	α) Μέσος όρος απόκλισης των 3 πολικών τάσεων	±5%
	β) Οποιαδήποτε πολική τάση συμπεριλαμβανομένου του μέσου όρου (α) και της ανισορροπίας (1)	±7%
3	Διαμόρφωση τάσης	3%
4	Μεταβατική τάση	

	α) Απόκλιση μεταβατικής τάσης	±16%
	β) Χρόνος επαναφοράς	2 sec
5	Αιχμή τάσης (τάση κορυφής) (peak value includes fundamental)	±1kV*
		±2,5kV**
6	Μέγιστη απόκλιση του συνδυασμού του μέσου όρου (απόκλισης) των 3 πολικών τάσεων (2 ^α) και της απόκλισης μεταβατικής τάσης (4 ^α), εκτός περιπτώσεων εμφάνισης μεταβατικών ή έκτακτων καταστάσεων	±6%
7	Δυσμενέστερη απόκλιση τάσης του συνδυασμού των καταστάσεων 2 ^α , 2β, 4 ^α εκτός έκτακτων περιπτώσεων	±20%

*1kV για τάση λειτουργίας συστήματος 120-240V

**2,5kV για τάση λειτουργίας συστήματος 380-600V

2.19.3 Περιορισμοί κυματομορφής

- **Συνολική αρμονική διαταραχή ημιτονοειδούς κυματομορφής (Total Harmonic Distortion-THD- of a sine wave):** Είναι ο λόγος της ρίζας του αθροίσματος του τετραγώνου των αρμονικών συνιστωσών της τάσης ή του ρεύματος προς το αντίστοιχα μέγεθος (τάση ή ρεύμα) στη θεμελιώδη συχνότητα, επί τοις εκατό.
- **Απομονωμένη αρμονική ημιτονοειδούς κυματομορφή (Single harmonic of sine wave):** Πρόκειται για το λόγο της κάθε αρμονικής συνιστώσας τάσεως ή ρεύματος ξεχωριστά προς τη θεμελιώδη συνιστώσα (τάσης ή ρεύματος) επί τοις εκατό.
- **Συντελεστής απόκλισης ημιτονοειδούς κυματομορφής (Deviation Factor-D.F. of a sine wave):** Είναι ο λόγος της μέγιστης διαφοράς των τεταγμένων μίας κυματομορφής από τις αντίστοιχες τεταγμένες της ισοδύναμης ημιτονοειδούς (ημίτονο αναφοράς), προς τη μέγιστη τιμή της ισοδύναμης ημιτονοειδούς, υπό την προϋπόθεση ότι η ισοδύναμη ημιτονοειδής έχει τοποθετηθεί σε σχέση με την κυματομορφή έτσι, ώστε η μέγιστη διαφορά των τεταγμένων των δύο καμπυλών να είναι η μικρότερη δυνατή.

$$D.F. = \frac{\text{Μέγιστη απόκλιση}}{\text{μέγιστη τεταγμένη του ισοδύναμου ημιτονοειδούς κύματος}} \cdot 100\% \quad (2.28)$$

Πίνακας 2.6. Χαρακτηριστικά (περιορισμοί) κυματομορφής Σ.Η.Ε. πλοίου χαμηλής τάσης κατά IEEE Std 45 [14, Πίν.4.1]

α/α	Καταστάσεις-Μεγέθη	Περιορισμοί
1	Μέγιστη ολική αρμονική διαταραχή (THD)	5%
2	Μέγιστη μονή αρμονική	3%
3	Μέγιστος συντελεστής απόκλισης	5%

2.19.4 Έκτακτες καταστάσεις

Πρόκειται για κρίσιμες καταστάσεις, οι οποίες εμφανίζονται συνήθως κατά τη διακοπή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιου είδους διακοπή μπορεί να προκύψει κατά τη χρονική περίοδο παύσης λειτουργίας μίας ή περισσότερων κύριων γεννητριών ή κατά την αναμονή εκκίνησης των ντιζελογεννητριών έκτακτης ανάγκης (NEA). [14, Sect. 4,5-4,6]

Πίνακας 2.7. Χαρακτηριστικά (περιορισμοί) Σ.Η.Ε. πλοίου χαμηλής τάσης σε έκτακτη ανάγκη κατά IEEE Std 45 [14, Πίν.4.1]

α/α	Καταστάσεις-Μεγέθη	Περιορισμοί
1	Απόκλιση συχνότητας	-100% έως +12%
2	Διάρκεια απόκλισης συχνότητας	Πάνω από 2min
3	Απόκλιση τάσης	-100% έως +35%
4	Διάρκεια απόκλισης τάσης	
	α) Μέγιστο όριο	2min
	β) Ελάχιστο όριο	Πάνω από 2 min

2.20 Προβλήματα αρμονικών σε πλοία κατά STANAG 1008

Το πρότυπο STANAG (STANDARDISATION AGREEMENT) 1008 παρέχει κανονισμούς και συστάσεις, ώστε να εξασφαλίσει τη συμβατότητα του ηλεκτρικού εξοπλισμού μεταξύ των πολεμικών πλοίων της βορειοανατολικής συμμαχίας (North Atlantic Treaty Navies), αλλά και στη διεθνή θέσπιση κοινών χαρακτηριστικών στα διάφορα Σ.Η.Ε. πλοίων

2.20.1 Περιορισμοί πηγών συνεχούς (DC) τάσης

Οι περιορισμοί στην τάση, τη συχνότητα, την κυματομορφή και τις έκτακτες καταστάσεις που θέτονται από το συγκεκριμένο πρότυπο είναι οι ίδιοι που χρησιμοποιούνται και από το πρότυπο IEEE Std 45, όπως παρουσιάστηκαν και στην προηγούμενη παράγραφο (2.19). Ωστόσο, ο κανονισμός αυτός (STANAG 1008) παρέχει χαρακτηριστικά-περιορισμούς για την τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος (DC) ενός πλοίου, όπως παρουσιάζεται και στον πίνακα 2.8. Τα φορτία που τροφοδοτούνται από πηγές συνεχούς ρεύματος και ακολουθούν το συγκεκριμένο πρότυπο, είναι συγκεντρωμένα φορτία και δεν πρόκειται για μεμονωμένα φορτία που λειτουργούν αυτόνομα από ξεχωριστή πηγή το καθένα. Στα φορτία που μελετώνται σε αυτή την περίπτωση (συγκεντρωμένα) είναι απαραίτητη η επιλογή κατάλληλων αγωγών, ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της πτώσης τάσης και τελικά η ελλιπής τροφοδοσία του κάθε φορτίου. Εάν ένα ή περισσότερα φορτία λάβουν τάση μικρότερη από την ελάχιστη και για περισσότερο χρόνο απ' όσο θέτει ο κανονισμός, τότε θα πρέπει να απομονώνεται το αντίστοιχο φορτίο από το κύκλωμα.

Πίνακας 2.8. Χαρακτηριστικά (περιορισμοί) Σ.Η.Ε. συνεχούς (DC) τάσης πλοίου χαμηλής τάσης κατά STANAG 1008 [19, Πίν.4]

a/a	Καταστάσεις-μεγέθη	Περιορισμοί
1	Ονομαστική τάση εξοπλισμού (Nominal user voltage)	24/28V
2	Όρια τάσης εξοπλισμού (User voltage limits)	
	α) Κανονική λειτουργία (Normal)	22-30V
	β) Έκτακτη κατάσταση (μη ικανοποίηση ελάχιστου ορίου τάσης)-Emergency*	18-30V
	γ) Μη κανονική λειτουργία (υπέρβαση μέγιστου ορίου τάσης)-Abnormal**	32V
3	Διαμόρφωση τάσης (Voltage modulation)	2%
4	Κυματισμός κορυφή με κορυφή (Ripple peak-to-peak)	2,5V
5	Μεταβατική τάση (Voltage transient)	
	α) Μέγιστο όριο (Upper limit)	35V
	β) Ελάχιστο όριο (Lower limit)	18V
6	Αιχμή τάσης (Voltage spike-peak value)	600V
7	Χρόνος επαναφοράς μεταβατικής τάσης (Voltage transient recovery time)	2 sec

****Έκτακτη κατάσταση:** Αφορά τις περιπτώσεις, όπου υπάρχει διακοπή φόρτισης των πηγών συνεχούς τάσης (συνήθως μπαταρίες) ή όταν συμβεί έντονη εκφόρτιση αυτών.

****Μη κανονική λειτουργία:** Πρόκειται για την κατάσταση υπερβολικής φόρτισης των μπαταριών, συνήθως λόγω σφάλματος του συστήματος ελέγχου φόρτισής τους.

2.20.2 Περιορισμοί (αρμονικών) στον εξοπλισμό ενός Σ.Η.Ε. πλοίου

Η επίδραση των αρμονικών σε ένα Σ.Η.Ε. πλοίου, σύμφωνα με το πρότυπο STANAG 1008, ταξινομείται και μελετάται με βάση το ποσοστό εμφάνισής τους στο σύστημα. Στην περίπτωση που το μεγαλύτερο φορτίο παραγωγής αρμονικών έχει ισχύ ίση με 0,5% και η συνολική ισχύς όλων των φορτίων του συστήματος που προκαλούν αρμονική διαταραχή στην κυματομορφή του ρεύματος τροφοδοσίας, δεν ξεπερνάει το 1% της ισχύς βραχυκύκλωσης της γεννήτριας (short circuit power of generation capacity)-σχέση 2.29, τότε το σύστημα μπορεί να λειτουργεί κανονικά, διότι αυτά τα ποσοστά θεωρούνται ανεκτά. Επιπλέον, τα φορτία που κατά τη λειτουργία τους παράγουν αρμονικές συνιστώσες, έχουν ισχύ ίση με το 0,1% (το καθένα) της ισχύος βραχυκύκλωσης της γεννήτριας, τότε η συνολική ισχύς αυτών μπορεί να φτάσει ως το 2% χωρίς να πραγματοποιηθεί περαιτέρω διερεύνηση για τη μείωση των αρμονικών. Εάν υπάρξει υπέρβαση των παραπάνω ορίων, τότε απαιτείται ο επανέλεγχος της διατήρησης των ορίων τάσης (πίνακας 2.5, παράγραφο 2.19) στο σύστημα και η εύρεση τρόπων περιορισμού των αρμονικών.

$$S_{sc} = \frac{S_n}{X_d''} \cdot 100\% \quad (2.29)$$

όπου S_{sc} : η ισοδύναμη ισχύς βραχυκύκλωσης (short circuit power) του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (γεννητριών) σε kVA.

S_n : η ισοδύναμη ονομαστική φαινόμενη ισχύς των γεννητριών σε kVA

X_d'' : η ισοδύναμη υπομεταβατική επαγωγική αντίδραση των γεννητριών επί τοις εκατό

2.20.3 Περιορισμοί σε λοιπά τμήματα των Σ.Η.Ε. πλοίων

- Ένας ακόμα σημαντικός περιορισμός που υφίσταται στα ηλεκτρικά συστήματα των πλοίων αφορά την τιμή του ρεύματος εκκίνησης των μηχανών (κινητήρες, μετασχηματιστές). Γενικά, η τιμή κορυφής του ρεύματος εκκίνησης των μηχανών δεν πρέπει να ξεπερνάει το ρεύμα υπό πλήρες φορτίο επί 10. Πιο συγκεκριμένα, τα επιτρεπόμενα όρια για τους μετασχηματιστές και τους κινητήρες σε σχέση με την ονομαστική τους ισχύ παρουσιάζονται στους 2 παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 2.9. Ρεύματα εκκίνησης μετασχηματιστών

	Ονομαστική ισχύς	Ρεύμα εκκίνησης (πολλαπλάσιο του ρεύματος της μηχανής-μετασχηματιστή υπό πλήρες φορτίο)
Μετασχηματιστές (60Hz)	>10kVA	x25
	<10kVA	>x25

Πίνακας 2.10. Ρεύματα εκκίνησης γεννητριών

	Ονομαστικό ρεύμα γεννήτριας (A)	Ρεύμα εκκίνησης (ως ποσοστό του ονομαστικού ρεύματος) της γεννήτριας
Κινητήρες με τάση λειτουργίας 440V	<800	50%
	800 έως 1600	45%
	>1600	40%

- Η συνολική τιμή της κάθε χωρητικότητας που συνδέεται σε δίκτυο με τάση 440V ανάμεσα σε γραμμή και γη (440V line and earth) περιορίζεται σε κατάλληλες τιμές. Για τιμή χωρητικότητας πάνω από 0,1μF στα 60Hz και 0,02μF στα 400Hz με ισοδύναμη διαρροή ρεύματος 0,03A (για ημιτονοειδή κυματομορφή ρεύματος) κρίνεται απαραίτητη η ενημέρωση των υπεύθυνων σχεδιασμού του Σ.Η.Ε., ώστε να αξιολογηθεί η δυνατότητα λειτουργίας του συστήματος υπό αυτές τις συνθήκες. Όλοι οι περιορισμοί που λαμβάνονται στη συγκεκριμένη περίπτωση αποσκοπούν στη μείωση του ποσού ρεύματος διαρροής προς τη γη, το οποίο δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα 20A, με βάση το συγκεκριμένο κανονισμό (STANAG 1008). [19,20,21]

Πίνακας 2.11. Περιορισμοί χωρητικοτήτων συστήματος [19, B-5]

Χωρητικότητα (μF)	Συχνότητα (HZ)	Ρεύμα διαρροής προς γη (A)	Συστάσεις
0,1	60	0,03	Κρίνεται απαραίτητη η ενημέρωση των υπεύθυνων σχεδιασμού του Σ.Η.Ε., για τα μεγέθη που επικρατούν στο σύστημα.
0,02	400	0,03	
0,1	60	0,3	Κρίνεται απαραίτητη η ενημέρωση των υπεύθυνων σχεδιασμού του Σ.Η.Ε., ώστε να εξεταστεί η πιθανότητα απομόνωσης των αντιδράσεων από το υπόλοιπο κύκλωμα μέσω μετασχηματιστών.
0,2	400	0,3	

2.21 Προβλήματα αρμονικών σε πλοία με λοιπούς κανονισμούς

2.21.1 Προβλήματα αρμονικών κατά ABS (American Bureau of Shipping)

Το πρότυπο ABS Guidance Notes for Control of Harmonics in Electric Power Systems παρέχει προτάσεις για τον έλεγχο και τον περιορισμό των αρμονικών στα πλοία, από τα πρώιμα στάδια του σχεδιασμού. Για την ακριβέστερη ανάλυση της αρμονικής διαταραχής που συμβαίνει σε ένα σύστημα, λαμβάνονται μετρήσεις μέχρι την 50^η αρμονική συνιστώσα τάσεως και ρεύματος. Μία σημαντική και αντιπροσωπευτική μέτρηση που πραγματοποιείται είναι αυτή της ολικής αρμονικής διαταραχής (Total Harmonic Distortion-TDH) της τάσης (V_{THD}), όπως έχει αναλυθεί στην παράγραφο 2.10.3. Γενικά, μία επιθυμητή τιμή της τάσης διαταραχής είναι στο 5% για μέτρηση που πραγματοποιείται στο κοινό σημείο σύνδεσης (PCC) των καταναλώσεων και του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στο 3% για κάθε συσκευή ξεχωριστά. Ωστόσο, στην περίπτωση που η κάθε συσκευή ενός συστήματος μπορεί να λειτουργήσει μέχρι 10% αρμονική διαταραχή και επιπλέον όλες οι συσκευές τροφοδοτούνται από τον ίδιο (μοναδικό) ζυγό, τότε το όριο του συστήματος επιτρέπεται να οριστεί στο 10%. Η επιπλέον ανοχή που παρουσιάζουν τα φορτία στην τάση V_{THD} που οδηγεί και στην αλλαγή των ορίων αρμονικών ολόκληρου του συστήματος είναι απαραίτητο να επιβεβαιώνεται επίσημα από τους κατασκευαστές των φορτίων αυτών. Λόγω του μεγάλου αριθμού φορτίων και της έντονης διαφοράς μεταξύ των ονομαστικών τους ισχύων λειτουργίας, σε ένα πλοίο και κατ' επέκταση διαφορετικού ποσοστού αρμονικής διαταραχής (σύστημα πρόωσης, κινητήρες βαρούλκων, φωτισμός) η σύνδεση όλων αυτών σε έναν κοινό ζυγό τροφοδοσίας δεν συνηθίζεται. Κάποιες πιο συγκεκριμένες περιπτώσεις τέτοιων φορτίων διαφορετικού ποσοστού αρμονικής επιβάρυνσης του δικτύου μπορεί να εμφανιστούν μεταξύ μεγάλων ρυθμιστών στροφών κινητήρων (large drives) με ονομαστική τάση λειτουργίας 4160V που προκαλούν διαταραχή ίση με 12% και άλλου τμήματος του εξοπλισμού που συνδέονται στον ίδιο ζυγό και προκαλεί 5% διαταραχή. Επιπλέον, το ίδιο μπορεί να παρατηρηθεί και ανάμεσα σε μετασχηματιστές με τάση λειτουργίας 480V και ποσοστό 8% και σε φορτία που τροφοδοτούνται από διακλάδωση αυτής της γραμμής (480V) παράγοντας 5% αρμονική διαταραχή ([22], sect.11). Το επίπεδο των αρμονικών στο Σ.Η.Ε. κάθε είδους πλοίου (επιβατικό, μεταφορικό, πολεμικό, κ.α.) μελετάται για οποιαδήποτε λειτουργική κατάσταση αυτού (παράγραφος 1.4.1). Με αυτόν τον τρόπο γίνεται γνωστή η απόκλιση της αρμονικής διαταραχής από τις επιτρεπόμενες τιμές και λαμβάνονται κατάλληλες μέθοδοι περιορισμού αυτής (της διαταραχής). Σε περίπτωση, όμως, που εμφανίζεται διαταραχή σε συνθήκες λειτουργίας που δεν εφαρμόζεται συχνά ή για λειτουργία

μικρής χρονικής διάρκειας, τότε δεν απαιτούνται περαιτέρω μέτρα περιορισμού των αρμονικών, διότι η επιρροή τους στη λειτουργία και τα όργανα του συστήματος είναι αμελητέα.

2.21.2 Προβλήματα αρμονικών κατά IEEE 1159

- **Στιγμαίος μηδενισμός τάσης (Notching):** Το φαινόμενο αυτό, όπως αναλύθηκε και στην παράγραφο 2.6, εμφανίζεται στο σύστημα λόγω της λειτουργίας ηλεκτρονικών συσκευών (κυρίως τριφασικοί μετατροπείς τάσης) και προκαλεί παραμόρφωση στην κυματομορφή της τάσης. Χαρακτηρίζεται ως φαινόμενο σταθερής κατάστασης (steady state phenomenon), παρατηρείται σε υψηλές συχνότητες (υψηλές τάξεις αρμονικών) και επηρεάζει συσκευές που λειτουργούν βασιζόμενες στην κυματομορφή της τάσης (π.χ. στα σημεία μέγιστης, ελάχιστης ή μηδενικής τιμής αυτής).
- **Θόρυβος:** Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.6, πρόκειται για σήματα που εμφανίζονται σε συχνότητες μικρότερες των 200kHz και προκαλούνται από ηλεκτρονικές συσκευές ελέγχου, παραγωγής ηλεκτρικού τόξου, κ.α.. Τα σήματα αυτά εμφανίζονται στους ενεργούς αγωγούς (οι 3 φάσεις για τριφασικό σύστημα), στον αγωγό σύνδεσης των ουδέτερων κόμβων γεννήτριας και φορτίου (όταν πρόκειται για σύνδεση και των 2 σε αστέρα) και σε γραμμές σημάτων (signal lines).

Τα δύο παραπάνω φαινόμενα, όπως γενικά τα ζητήματα αρμονικών δεν έχουν αναλυθεί στο βαθμό που απαιτείται για την πλήρη κάλυψη των αναγκών των σύγχρονων Σ.Η.Ε. πλοίων, τα οποία εξελίσσονται ραγδαία και ανανεώνονται συνεχώς από νέες και όλο και περισσότερες ηλεκτρονικές διατάξεις και συσκευές, με βασικότερες τους ρυθμιστές τάσεως των κινητήρων (electric motor variable speed drives). Σκοπός όλων αυτών είναι η αμεσότερη, πιο αξιόπιστη και τελικά η εξηλεκτρισμένη λειτουργία των πλοίων υπό όλες τις λειτουργικές συνθήκες. Έτσι, αποτελεί επιτακτική ανάγκη η έρευνα και η βελτίωση των κανονισμών, ώστε να γίνει δυνατή η κάλυψη τουλάχιστον των απαιτήσεων και των έντονων φαινομένων που προέρχονται από τον ήδη υπάρχοντα εξοπλισμό. Πολλοί κανονισμοί, μέχρι και σήμερα, βασίζονται σε μετρήσεις και δεδομένα πολλών χρόνων πριν ([21], 1/13-Introduction and background). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, παρά τις ενδελεχείς μελέτες και προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται πριν από κάθε κατασκευή ενός Σ.Η.Ε. πλοίου, να εξακολουθούν να υφίστανται «κενά» στους τρόπους αντιμετώπισης πολλών φαινομένων από αυτά που αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. [21,22]

2.22 Αρμονικές και Συντελεστής Ισχύος (Σ.Ι.) στα πλοία

2.22.1 Γενική ανάλυση ισχύος σε Σ.Η.Ε. γραμμικών φορτίων (χωρίς αρμονικές)

Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος κάθε φάσης ενός τριφασικού συστήματος περιγράφονται από τις εξής σχέσεις αντίστοιχα, μέσω των οποίων υπολογίζεται η τιμή της τάσης και του ρεύματος για κάθε χρονική στιγμή:

$$v(t)=V_o\cos(\omega t+\varphi_v) \quad (2.30)$$

$$i(t)=I_o\cos(\omega t+\varphi_i) \quad (2.31)$$

όπου V_o (ή V_{peak}), I_o (ή I_{peak}): το πλάτος (ή μέγιστη τιμή) της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα

φ_v, φ_i : αρχική φάση-γωνία της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα

Η σχέση ανάμεσα στην αρχική φάση-γωνία της τάσης και του ρεύματος ποικίλει ανάλογα με το χαρακτήρα του φορτίου (ωμικό, επαγωγικό, χωρητικό), σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

Φορτίο ωμικού χαρακτήρα: $\varphi_v=\varphi_i$

Φορτίο ιδανικού επαγωγικού χαρακτήρα: $\varphi_v=\varphi_i+90^\circ$ (η κυματομορφή της τάσης προηγείται αυτής του ρεύματος)

Φορτίο ιδανικού χωρητικού χαρακτήρα: $\varphi_V = \varphi_I - 90^\circ$ (η κυματομορφή της τάσης καθυστερεί σε σχέση με του ρεύματος)

Κατάσταση φάσης σε κύκλωμα που περιέχει συνδυασμό των 3 παραπάνω φορτίων:

$$-90^\circ < \varphi_V - \varphi_I < 90^\circ,$$

Εάν το φορτίο παράγει ισχύς και δεν καταναλώνει, λειτουργεί δηλαδή ως πηγή, τότε η διαφορά φάσης είναι εκτός του παραπάνω διαστήματος και ισχύει:

$$|\varphi_V - \varphi_I| < 90^\circ$$

Με βάση τις σχέσεις (2.30) και (2.31) και τον τύπο της ισχύος (σχέση 2.32) παρακάτω, ο οποίος είναι ο ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισχύος σε κυκλώματα συνεχούς (DC) τάσης, προκύπτει η τιμή της στιγμιαίας ισχύος ενός κυκλώματος:

$$P = V \cdot I \quad (2.32)$$

$$\text{ή } p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.33)$$

$$= V_o \cos(\omega t + \varphi_V) \cdot I_o \cos(\omega t + \varphi_I)$$

$$\{ \cos A \cdot \cos B = \frac{1}{2} [\cos(A+B) + \cos(A-B)] \}$$

$$= V_o \cdot I_o \cdot \frac{1}{2} [\cos(\omega t + \varphi_V + \omega t + \varphi_I) + \cos(\omega t + \varphi_V - \omega t + \varphi_I)]$$

$$= \frac{V_o I_o}{2} \cdot [\cos(2\omega t + \varphi_V + \varphi_I) + \cos(\varphi_V - \varphi_I)]$$

$$\text{ή } p(t) = \frac{V_o I_o}{2} \cos(\varphi_V - \varphi_I) + \frac{V_o I_o}{2} \cos(2\omega t + \varphi_V + \varphi_I) \quad (2.34)$$

Ο πρώτος όρος της παραπάνω εξίσωσης αποτελεί τον σταθερό όρο, διότι είναι ανεξάρτητος του χρόνου (t), ενώ ο δεύτερος όρος περιγράφει μία ημιτονοειδή κυματομορφή συναρτήσεως του χρόνου με συχνότητα διπλάσια αυτής της τάσης ή του ρεύματος. Μέσα από τη σχέση (2.34) είναι δυνατός ο υπολογισμός της ισχύος για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Η στιγμιαία ισχύς έχει μικρή πρακτική αξία σε εφαρμογές, όπου απαιτείται μία μέση τιμή αυτής σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας ενός συστήματος. Όμως, μέσω αυτής (της στιγμιαίας ισχύος) υπολογίζεται η τιμή της μέσης ισχύος, δηλαδή του μέσου όρου όλων των τιμών (θετικών και αρνητικών) που λαμβάνει όσο υφίσταται σε ένα κύκλωμα. Με βάση το γενικό τύπο (από τη θεωρία σημάτων) της μέσης τιμής ενός περιοδικού (σχέση 2.35) σήματος, η μέση τιμή ενός σήματος υπολογίζεται ως εξής:

$$X_{AVE} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) dt \quad (2.35)$$

Σύνολο τιμών και πεδίο ορισμού της $x(t)$:

$$x(t) = \begin{cases} a, & Kt < t < kT + \frac{T}{2} \\ -a, & kT + \frac{T}{2} < t < (K+1)T \end{cases}$$

όπου T: η περίοδος του σήματος

k: σταθερά

Αντίστοιχα, η σχέση της μέσης ισχύος προκύπτει μέσω της στιγμιαίας ισχύος (2.33) ως εξής:

$$P_{AVE} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2.36)$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{V_o I_o}{2} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I) + \frac{V_o I_o}{2} \cdot \cos(2\omega t + \varphi_V + \varphi_I) \right] dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_o I_o}{2} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_o I_o}{2} \cdot \cos(2\omega t + \varphi_V + \varphi_I) dt$$

$$= \frac{1}{T} \frac{V_o I_o}{2} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I) \int_0^T 1 dt + \frac{1}{T} \frac{V_o I_o}{2} \int_0^T \cos(2\omega t + \varphi_V + \varphi_I) dt \quad (A)$$

Επιμέρους υπολογισμός των 2 όρων της παραπάνω εξίσωσης (A):

$$\begin{aligned} (\alpha) &= \frac{1}{T} \frac{V_o I_o}{2} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I) \int_0^T 1 dt \\ &= \frac{1}{T} \frac{V_o I_o}{2} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I) \cdot [t]_0^T \\ &= \frac{1}{T} \frac{V_o I_o}{2} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I) \cdot [T-0] \\ &= \frac{1}{T} \frac{V_o I_o}{2} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I) \cdot T \\ \text{ή } (\alpha) &= \frac{V_o I_o}{2} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\beta) &= \frac{1}{T} \frac{V_o I_o}{2} \int_0^T \cos(2\omega t + \varphi_V + \varphi_I) dt \\ &= \frac{1}{T} \frac{V_o I_o}{2} \left[\frac{\sin(2\omega t + \varphi_V + \varphi_I)}{2\omega} \right]_0^T \\ &= \frac{1}{T} \frac{V_o I_o}{2} \left[\frac{\sin(2\omega T + \varphi_V + \varphi_I)}{2\omega} - \frac{\sin(2\omega 0 + \varphi_V + \varphi_I)}{2\omega} \right] \\ &= \frac{1}{T} \frac{V_o I_o}{4\omega} [\sin(\varphi_V + \varphi_I) - \sin(\varphi_V - \varphi_I)] \\ \text{ή } (\beta) &= 0 \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (α) και (β) στην αρχική σχέση (A), προκύπτει ότι:

$$P_{AVE} = \frac{V_o I_o}{2} \cdot \cos(\varphi_V + \varphi_I) \quad (2.37)$$

Στην παραπάνω σχέση για τον υπολογισμό της μέσης ισχύος χρησιμοποιούνται τα πλάτη (peak τιμές) της τάσης και του ρεύματος. Ωστόσο, η ίδια τιμή προκύπτει και με τη χρήση των ενεργών τιμών των μεγεθών αυτών. Οι ενεργές (RMS-Root Mean Square) τιμές της τάσης και του ρεύματος υπολογίζονται μέσω της γενικής μαθηματικής σχέσης για την ενεργό τιμή περιοδικού σήματος (σχέση 2.38), ως εξής:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2.38)$$

Υπολογισμός ενεργού τιμής τάσης ημιτονοειδούς σήματος (έστω πλάτους V_o και περιόδου T):

$$\begin{aligned} V_{RMS} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_o^2 \cos^2(\omega t) dt} \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} V_o^2 \int_0^T \cos^2(\omega t) dt} \\ &\quad \left\{ \cos^2 A = \frac{1 + \cos 2A}{2} \right\} \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} V_o^2 \int_0^T \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} dt} \\ &= V_o \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T 1 dt + \int_0^T \cos 2\omega t dt} \\ &= V_o \sqrt{\frac{1}{2T} \left\{ [t]_0^T + \left[\frac{\sin(2\omega t)}{2\omega} \right]_0^T \right\}} \\ &= V_o \sqrt{\frac{1}{2T} \left\{ [T - 0] + \left[\frac{\sin(2\omega T)}{2\omega} - \frac{\sin(2\omega 0)}{2\omega} \right] \right\}} \end{aligned}$$

$$=V_o \sqrt{\frac{1}{2T} T}$$

$$\text{ή } V_{\text{RMS}} = \frac{V_o}{\sqrt{2}} \quad (2.39)$$

Ομοίως, υπολογίζεται και η ενεργός τιμή του ρεύματος ημιτονοειδούς σήματος και προκύπτει ίση με:

$$I_{\text{RMS}} = \frac{I_o}{\sqrt{2}} \quad (2.40)$$

Αντίστοιχα, για τετραγωνική τάση πλάτους α και περιόδου T , η ενεργός τιμή της υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} [\int_0^{\frac{T}{2}} x^2(t) + \int_{\frac{T}{2}}^T x^2(t)] dt}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} [\int_0^{\frac{T}{2}} \alpha^2 + \int_{\frac{T}{2}}^T (-\alpha)^2] dt}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} [\int_0^{\frac{T}{2}} \alpha^2 + \int_{\frac{T}{2}}^T \alpha^2] dt}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \alpha^2 dt}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \alpha^2 \int_0^T 1 dt}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \alpha^2 [t]_0^T}$$

$$= \alpha \sqrt{\frac{1}{T} [T - 0]}$$

$$= \alpha \sqrt{\frac{1}{T} T}$$

$$\text{ή } V_{\text{RMS}} = \alpha \quad (2.41)$$

Ομοίως, προκύπτει και η τιμή της ενεργού τιμής του ρεύματος τετραγωνικού σήματος:

$$I_{\text{RMS}} = \alpha \quad (2.42)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.39) και (2.40) στη σχέση (2.37) της μέσης ισχύος προκύπτει ότι:

$$P_{\text{AVE}} = \frac{V_o I_o}{2} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I)$$

$$= \frac{1}{2} (\sqrt{2} V_{\text{RMS}} \cdot \sqrt{2} I_{\text{RMS}}) \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I)$$

$$\text{ή } P_{\text{AVE}} = V_{\text{RMS}} \cdot I_{\text{RMS}} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_I) \quad (2.43)$$

Από την παραπάνω σχέση (2.43) υπολογίζεται η πραγματική (ενεργός) ισχύς ενός συστήματος.

Το συνημίτονο της διαφοράς φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος ενός στοιχείου $[\cos(\varphi_V - \varphi_I)]$ αποτελεί το συντελεστή ισχύος (Σ.Ι.) αυτού. Η γωνία του συντελεστή ισχύος ταυτίζεται με τη γωνία της σύνθετης αντίστασης ενός στοιχείου, αφού με βάση το γενικευμένο νόμο του Ωμ ισχύει:

$$z = |z| \angle \varphi_z$$

$$\text{ή } z = \frac{V \angle \varphi_V}{I \angle \varphi_I} = \frac{V}{I} \angle \varphi_V - \varphi_I$$

$$\eta \varphi_z = \varphi_V - \varphi_I \quad (2.44)$$

Καταγράφονται και πάλι οι συναρτήσεις στιγμιαίας τάσης (2.30) και ρεύματος (2.31), αλλά με μηδενική αρχική γωνία της τάσης ($\varphi_V=0$, για λόγους απλοποίησης των πράξεων) και με το ρεύμα να «καθυστερεί» σε σχέση με την τάση κατά γωνία φ (επαγωγικός χαρακτήρας κυκλώματος):

$$v(t)=V_o \cos(\omega t)$$

$$i(t)=I_o \cos(\omega t - \varphi)$$

Οπότε από τον τύπο της στιγμιαίας ισχύος (2.33) προκύπτει ότι:

$$p(t)=v(t) \cdot i(t)$$

$$= V_o \cos(\omega t) \cdot I_o \cos(\omega t - \varphi)$$

$$= V_o I_o \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

$$\{ \cos(A-B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B \}$$

$$= V_o I_o \cos(\omega t) [\cos(\omega t) \cos \varphi + \sin(\omega t) \sin \varphi]$$

$$\eta \text{ ή } p(t) = V_o I_o \cos \varphi \cos(\omega t) \cos(\omega t) + V_o I_o \sin \varphi \cos(\omega t) \sin(\omega t) \quad (2.45)$$

Αναλύοντας τον 2^ο όρο της παραπάνω σχέσης προκύπτει:

$$V_o I_o \sin \varphi \cos(\omega t) \sin(\omega t)$$

$$= V_o I_o \sin \varphi \frac{\sin 2(\omega t)}{2} \quad (2.46^a)$$

και αντικαθιστώντας τις ενεργές τιμές της τάσης και του ρεύματος στην παραπάνω σχέση προκύπτει τελικά:

$$\frac{\sqrt{2} V_{rms} \sqrt{2} I_{rms} \sin \varphi}{2} \sin(2\omega t)$$

$$= (V_{rms} I_{rms} \sin \varphi) \cdot \sin(2\omega t) \quad (2.46\beta)$$

Το πλάτος της παραπάνω σχέσης αποτελεί την άεργο ισχύ ενός κυκλώματος, δηλαδή:

$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin \varphi \quad (2.47)$$

Αντίστοιχα, αναλύοντας τον πρώτο όρο της σχέσης (2.45) προκύπτει ο τύπος της πραγματικής ισχύος (P). Όταν σε ένα στοιχείο του κυκλώματος (πηγή, φορτίο) υπολογιστεί θετική άεργος ισχύς σημαίνει ότι αυτή καταναλώνεται από το σύστημα (δηλαδή λειτουργεί ως πηνίο), αντίθετα η εμφάνιση αρνητικής άεργου ισχύος σε αυτό σημαίνει πως αυτή τελικά παράγεται (δηλαδή λειτουργεί ως πυκνωτής). Ανεξάρτητα από τον τρόπο εμφάνισής της μέσα στο κύκλωμα, η άεργος ισχύς δεν παράγει ωφέλιμο έργο στο κύκλωμα, αλλά κυκλοφορεί μέσα σε αυτό προκαλώντας, συνήθως αρκετά προβλήματα, όπως μείωση του συντελεστή ισχύος ($\cos \varphi$).

Τα 2 προηγούμενα είδη ισχύος που αναπτύχθηκαν (πραγματική και άεργος) συνδέονται μέσω μίας πιο ολοκληρωμένης έννοιας για την περιγραφή της ισχύος, τη μιαδική ισχύ. Η μιαδική ισχύ ενός στοιχείου υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$S = V \cdot I^* \quad (2.48)$$

$$= V [\varphi_V \cdot (I [\varphi_I])^*]$$

$$= V [\varphi_V \cdot I] - \varphi_I$$

$$S = VI [(\varphi_V - \varphi_I)]$$

$$S = V \cos(\varphi_V - \varphi_I) - j V I \sin(\varphi_V - \varphi_I) \quad (VA) \quad (2.49)$$

όπου V, I: ενεργές (RMS) τιμές της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα

I^* : ο συζυγής μιαδικός του ρεύματος

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.43) και (2.47) στη σχέση (2.49) προκύπτει ότι:

$$S = P + jQ \quad (2.50)$$

Το μέτρο της μιαδικής ισχύος αποτελεί τη φαινόμενη ισχύ:

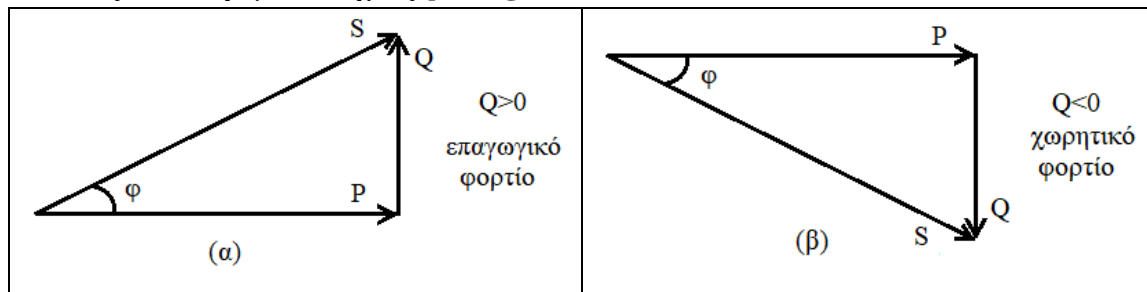
$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.51)$$

και η γωνία της μιγαδικής ισχύος αποτελεί τη γωνία του συντελεστή ισχύος, αφού:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right) \quad (2.52)$$

Όλα τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να παρασταθούν γραφικά, μέσω του τριγώνου ισχύος, ως εξής:

Πίνακας 2.12. Τρίγωνα ισχύος [22, fig.1]



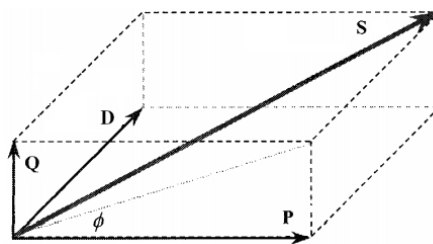
Σχήμα 2.19. Τρίγωνο ισχύος (α) στοιχείου επαγωγικού χαρακτήρα, (β) στοιχείου χωρητικού χαρακτήρα [31, fig.1]

Με χρήση του ορισμού του συνημίτονου στο σχήμα 2.19(α) ή 2.19(β) μπορεί να προσδιοριστεί ο συντελεστής ισχύος, ως εξής:

$$\cos\varphi = \frac{\text{προσκειμένη κάθετη}}{\text{υποτείνουσα}} = \frac{P}{S} \quad (2.53)$$

2.22.2 Ανάλυση ισχύος και συντελεστής ισχύος παρουσία αρμονικών

Στην περίπτωση συστήματος που περιλαμβάνει και μη γραμμικά φορτία, δηλαδή υπάρχουν πηγές αρμονικών μέσα σε αυτό, τότε διαφοροποιείται ο ορισμός του συντελεστή ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται 2 επιμέρους είδη αυτού, ο συντελεστής ισχύος μετατόπισης (displacement power factor), ο οποίος προσδιορίζεται από μεγέθη της θεμελιώδους συχνότητας και ο πραγματικός συντελεστής ισχύος-φ (true power factor) που προσδιορίζεται από μεγέθη της θεμελιώδους συχνότητας και των αρμονικών συνιστωσών του συστήματος. Το αντίστοιχο σχήμα («τρίγωνο») ισχύων συστήματος με αρμονικές παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 2.20. Γραφική απεικόνιση ισχύων σε σύστημα με αρμονικές [22, fig.2]

Όπως απεικονίζεται και στο παραπάνω σχήμα, εκτός από τα 3 είδη ισχύος που αποτελούσαν το τρίγωνο ισχύος σε σύστημα μόνο με γραμμικά φορτία, υπάρχει ένα ακόμα είδος, η ισχύς διαταραχής, η οποία υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2) \quad (VA_{TH}) \quad (2.54)$$

Ο υπολογισμός της κάθε ισχύος στη συγκεκριμένη περίπτωση αλλάζει, οπότε ισχύουν οι εξής νέες σχέσεις:

➤ Φαινόμενη ισχύς: $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$ (2.55)

➤ Πραγματική (ενεργός) ισχύς: $P = \sum_{h=0}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_n = P_0 + P_1 + \sum_{h=2}^{\infty} P_n$ (2.56)

όπου h: η τάξη της αρμονικής (2,3,4,...)

φ_n : η γωνία (φάση) της h-οστης αρμονικής

P_0 : η DC συνιστώσα της ενεργού ισχύος

P_1 : η ενεργός ισχύς στη θεμελιώδη συχνότητα

P_n : η ενεργός ισχύς της h αρμονικής συνιστώσας

➤ Άεργος ισχύς: $Q = \sum_{h=0}^{\infty} V_{h,rms} I_{h,rms} = Q_1 + \sum_{h=2}^{\infty} Q_n$ (2.57)

όπου h: η τάξη της αρμονικής (2,3,4,...)

Q_1 : η άεργος ισχύς στη θεμελιώδη συχνότητα

Q_n : η άεργος ισχύς της h αρμονικής συνιστώσας

$V_{h,rms}, I_{h,rms}$: η ενεργός τιμή της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα, της κάθε αρμονικής συχνότητας

Η φαινόμενη ισχύς υπολογίζεται και ως εξής:

$$\begin{aligned} S &= V_{rms} \cdot I_{rms} \\ &= \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h,rms}^2 I_{h,rms}^2} \\ &= V_{h,rms} \cdot I_{h,rms} \sqrt{1 + THD_V^2} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2} \\ \text{ή } S &= S_1 \cdot \sqrt{1 + THD_V^2} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (2.58) \end{aligned}$$

όπου S_1 : η φαινόμενη ισχύς στη θεμελιώδη συχνότητα

THD_V : ο συντελεστής ολικής αρμονικής διαταραχής της τάσης

THD_I : ο συντελεστής ολικής αρμονικής διαταραχής του ρεύματος

Με βάση την παραπάνω σχέση, ο πραγματικός συντελεστής ισχύος στη συγκεκριμένη περίπτωση (σύστημα με μη γραμμικά φορτία) υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1 \sqrt{1 + THD_V^2} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2}} \\ \text{ή } \cos \varphi &= \cos \varphi_{disp} \cdot \cos \varphi_{dist} \quad (2.59) \end{aligned}$$

όπου $\cos \varphi_{disp} = \frac{P}{S_1}$: ο συντελεστής ισχύος μετατόπισης (displacement power factor)

$\cos \varphi_{dist} = \frac{P}{\sqrt{1 + THD_V^2} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2}}$: ο συντελεστής ισχύος διαταραχής (distortion power factor)

2.22.3 Τρόποι βελτίωσης πραγματικού συντελεστή ισχύος

Με βάση το σχήμα 2.20 παρατηρείται ότι η μείωση της τιμής της ισχύς διαταραχής D συμβάλλει στη βελτίωση του πραγματικού συντελεστή ισχύος (Σ.Ι.) $\cos \varphi$. Σε συστήματα που περιέχουν στον εξοπλισμό τους φορτία που ελέγχονται από γέφυρες ανόρθωσης πλήρους κύματος (π.χ. ρυθμιστές στροφών, μετατροπείς καθοδηγούμενοι από το φορτίο, κ.α.) η τιμή του Σ.Ι. εξαρτάται από τη γωνία έναυσης λειτουργίας (conduction angle) των ημιαγωγών των γεφυρών και από τις απαιτήσεις του φορτίου. Ένας τρόπος μείωσης των αρμονικών και κατ' επέκταση διόρθωσης του Σ.Ι. είναι μέσω της χρήσης παθητικών επαγωγικών-χωρητικών φίλτρων (passive inductor-capacitor filters-παράγραφος 2.9) συντονισμένα σε συγκεκριμένη τάξη αρμονικής

συχνότητας (συνήθως 5^η ή 7^η). Παρόμοια αποτελέσματα επιτυγχάνονται και με τη χρήση ενεργών φίλτρων (active filters), τα οποία χρησιμοποιούν τη μέθοδο έγχυσης αρμονικών (harmonic injection-παράγραφος 2.13), δηλαδή την παροχή ρευμάτων στο σύστημα ίσου μέτρου, αλλά αντίθετης γωνίας ($\varphi=180^\circ$) αυτής των αρμονικών ρευμάτων, παραμένοντας στο δίκτυο μόνο το ρεύμα της θεμελιώδους συχνότητας (ονομαστικό ρεύμα). Επιπλέον, τα ενεργά φίλτρα μπορούν να παρέχουν στο σύστημα κατάλληλη τιμή άεργου ρεύματος (reactive current compensation), με σκοπό τη διόρθωση του Σ.Ι. του φορτίου. Ωστόσο, σε περιπτώσεις μικρών αρμονικών πηγών στο σύστημα ή σε απενεργοποίηση των μη γραμμικών φορτίων αυτού, τα φίλτρα αυτά εξακολουθούν να εισάγουν κάποιο ποσό άεργου ρεύματος στο σύστημα. [22,28]

2.23 Αρμονικές ρεύματος σε πλοία

2.23.1 Ολική αρμονική τάση διαταραχής (Total Voltage Distortion- V_{THD})

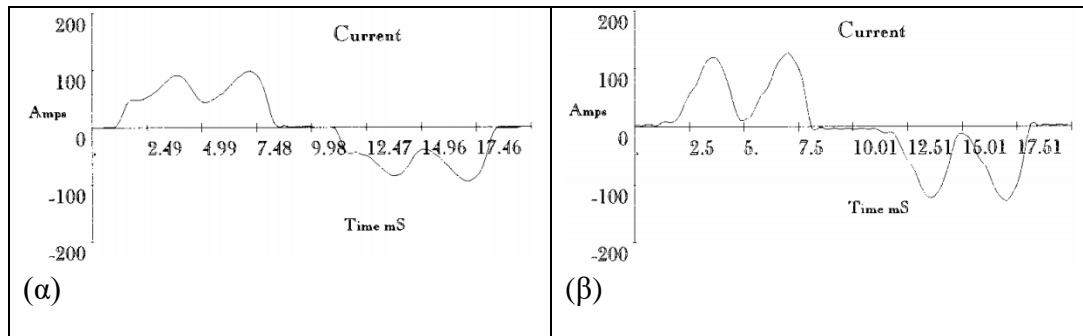
Τα διάφορα αρμονικά ρεύματα σε ένα κύκλωμα, κατά τη ροή τους μέσα από τις σύνθετες αντιστάσεις που περιέχονται σε αυτό, προκαλούν πτώσεις τάσης ίδιας αρμονικής συχνότητας με αυτή του ρεύματος και τιμής ανάλογης του ρεύματος ($V_Z=I_Z \cdot Z$). Ο λόγος του αθροίσματος των αρμονικών τάσεων προς την τάση στη θεμελιώδη συχνότητα δίνουν την ολική αρμονική τάση διαταραχής- V_{THD} (παράγραφος 2.10.3, σχέση 2.12). Αυτή η τάση διαταραχής (V_{THD}) έχει υψηλότερη τιμή όσο πλησιέστερα μετριέται στο φορτίο και αυτό οφείλεται στις πτώσεις τάσης που προκαλούνται τόσο στα επιμέρους τμήματα του Σ.Η.Ε. που μεσολαβούν ανάμεσα στην πηγή αρμονικών ρευμάτων και στο φορτίο (μετασχηματιστές, αγωγοί), όσο και στα γραμμικά φορτία (ασύγχρονοι κινητήρες, ωμικές αντιστάσεις), τα οποία διαρρέονται έντονα από αρμονικά ρεύματα («harmonic sink»). Πέρα του ποσοστού του ρεύματος διαταραχής (όπως αναλύεται παρακάτω) σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη αρμονικών τάσεων έχει και το μέγεθος του κάθε αρμονικού ρεύματος. Η ροή αυτών μέσα από τις διάφορες αντιδράσεις του συστήματος είναι που προκαλεί ανάλογου μεγέθους πτώσεις τάσης και άρα συντελεί στην αύξηση του ποσοστού της διαταραχής της τάσης V_{THD} . Επομένως, ο συγκεκριμένος συντελεστής (V_{THD}) αποτελεί βασικό αντικείμενο στη μελέτη μείωσης των αρμονικών διαταραχών ενός συστήματος.

2.23.2 Ολικό ρεύμα διαταραχής (Total Harmonic Current Distortion- I_{THD})

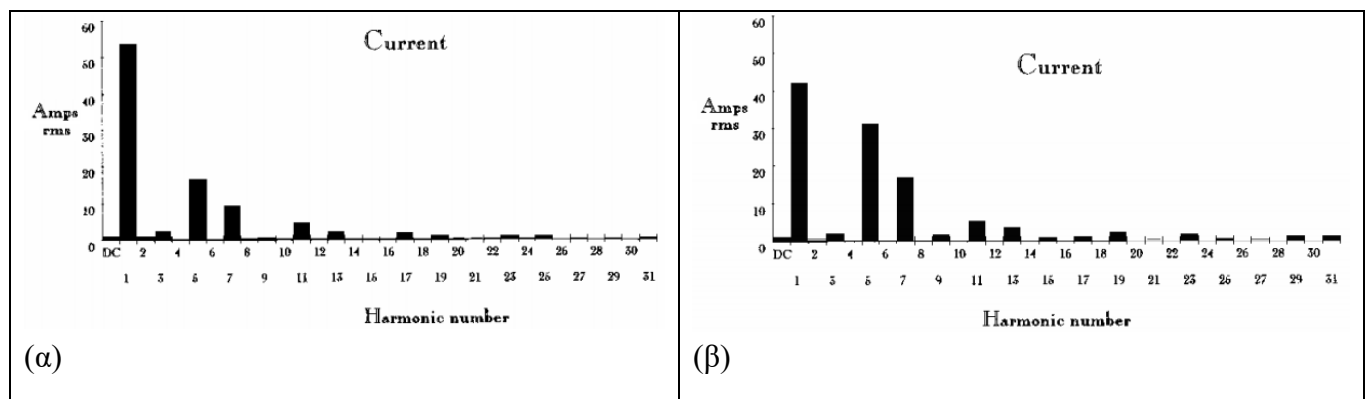
Η τιμή των αρμονικών ρευμάτων εξαρτάται από τις απαιτήσεις των μη γραμμικών φορτίων του συστήματος, τα οποία διαρρέονται από μέγιστα αρμονικά ρεύματα και παρουσιάζουν αυξημένο ποσοστό ρεύματος διαταραχής ($THDI$) κατά τη λειτουργία τους στο ονομαστικό φορτίο (εκτός από την περίπτωση συντονισμού, όπου κάποιο αρμονικό ρεύμα με συχνότητα που ταυτίζεται με τη συχνότητα συντονισμού μπορεί να λάβει σημαντικά μεγάλη τιμή). Παρακάτω περιγράφεται η επίδραση ορισμένων, συχνά εμφανιζόμενων σε πλοία, μη γραμμικών διατάξεων (ρυθμιστές στροφών) στα φορτία στα οποία είναι συνδεδεμένα:

- **Ρυθμιστές διαμόρφωσης εύρους παλμού (AC PWM drives):** Ο συγκεκριμένος τύπος ρυθμιστή στροφών (όπως περιγράφεται και στην παράγραφο 2.10.5) αποτελείται από μία γέφυρα ανόρθωσης πλήρους κύματος συνδεδεμένη με έναν αντιστροφέα και έναν πυκνωτή να παρεμβάλλεται παράλληλα συνδεδεμένο προς τα 2 κυκλώματα, ανορθωτή-αντιστροφέα (DC bus). Όταν ο ρυθμιστής λειτουργεί στο πλήρες (ονομαστικό) φορτίο, τότε λαμβάνεται το ελάχιστο ποσοστό του I_{THD} , μικρότερη τιμή στην κάθε αρμονική ρεύματος και βελτιωμένος πραγματικός συντελεστής ισχύος, υπό την προϋπόθεση ότι ο ρυθμιστής περιέχει DC bus ή τροφοδοτείται από γραμμή με κατάλληλη τιμή επαγωγικής αντίδρασης (AC line reactor). Για λειτουργία του ρυθμιστή με μειωμένο φορτίο παρατηρείται αύξηση του ρεύματος

διαταραχής I_{THD} και των αρμονικών ρευμάτων και μείωση του πραγματικού συντελεστή ισχύος. Στο ρυθμιστή παρέχεται ρεύμα από το δίκτυο μόνο στην περίπτωση που η τάση του DC bus είναι μικρότερη από τη στιγμιαία τάση της γραμμής (instantaneous AC line voltage). Γι' αυτό το λόγο εμφανίζεται έντονη διακύμανση (pulse nature) στην κυματομορφή του ρεύματος τροφοδοσίας του ρυθμιστή στροφών και κατ' επέκταση του ρεύματος του συστήματος.



Σχήμα 2.21. Κυματομορφές ρεύματος τροφοδοσία 6-παλμικού ρυθμιστή α) στο πλήρες (100%) φορτίο, με αντίδραση γραμμής 3%, $I_{THD}=37,5\%$ και πραγματικό συντελεστή ισχύος 0,94 επαγωγικό (lag), β) με μειωμένο φορτίο (στο 30%), με αντίδραση γραμμής 3%, $I_{THD}=65,7\%$ και πραγματικό συντελεστή ισχύος 0,83 επαγωγικό (lag) [22, fig.1,3]

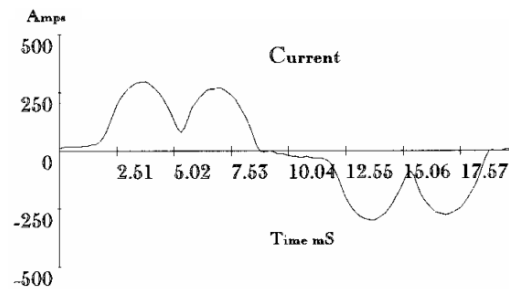


Σχήμα 2.22. Κατανομή των αρμονικών ρευμάτων των 2 παραπάνω περιπτώσεων αντίστοιχα (από Σχήμα 2.21) [22, fig.2,4]

Επιπλέον, η αύξηση της τιμής των αρμονικών ρευμάτων προκαλεί αύξηση των αντίστοιχων αρμονικών τάσεων πάνω στις ισοδύναμες επαγωγικές αντιδράσεις του κυκλώματος και έτσι εμφανίζεται διαταραχή στην τάση του δικτύου. Μια τακτική για τον περιορισμό των προαναφερθέντων διαταραχών είναι η αποφυγή της υπερδιαστασιολόγησης των ρυθμιστών PWM, οι οποίοι στην περίπτωση αυτή δεν θα φτάσουν ποτέ στο πλήρες φορτίο, παρέχοντας κατά τη λειτουργία τους υψηλή διαταραχή λόγω αρμονικών στο σύστημα, όπως περιεγράφηκε παραπάνω για τη λειτουργία χαμηλότερα του ονομαστικού φορτίου.

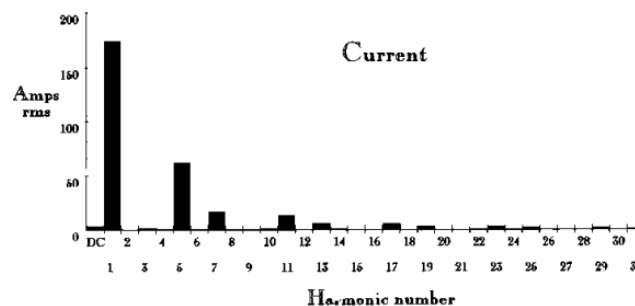
- **Ρυθμιστές στροφών συνεχούς ρεύματος (DC SCR-Silicon Controlled Rectifier Drives):** Πρόκειται για διατάξεις που περιέχουν μόνο έναν ανορθωτή αποτελούμενο από ημιαγωγούς (θυρίστορ), του οποίου η είσοδος συνδέεται στο δίκτυο και η έξοδος στο φορτίο (DC κινητήρας). Η τιμή της τάσης εξόδου του ανορθωτή καθορίζεται από τη γωνία έναυσης των θυρίστορ της γέφυρας ανόρθωσης αυτού, από την

οποία εξαρτάται και η τιμή του ρεύματος διαταραχής I_{THD} . Όπως και με τους ρυθμιστές PWM, έτσι και στους SCR ρυθμιστές, παρατηρείται αύξηση του ποσοστού I_{THD} , όταν λειτουργούν με μικρότερο φορτίο του ονομαστικού με τη δυσμενέστερη περίπτωση να εμφανίζεται για μειωμένο φορτίο και γωνία έναυσης ίση με 90° . Ωστόσο, για να παρατηρηθεί σημαντική αύξηση του ρεύματος διαταραχής (I_{THD}), θα πρέπει να μειωθεί η ζήτηση ισχύος από το φορτίο κάτω από το 15%, ενώ για μεσαία ποσοστά φορτίου δεν εντοπίζεται τόσο έντονη διαταραχή αρμονικών, όσο για αντίστοιχα ποσοστά στους PWM ρυθμιστές.



Σχήμα 2.23. Κυματομορφή ρεύματος τροφοδοσίας 6-παλμικού SCR ρυθμιστή με μειωμένο φορτίο (στο 70%), με $I_{THD}=35,1\%$ [22, fig.5]

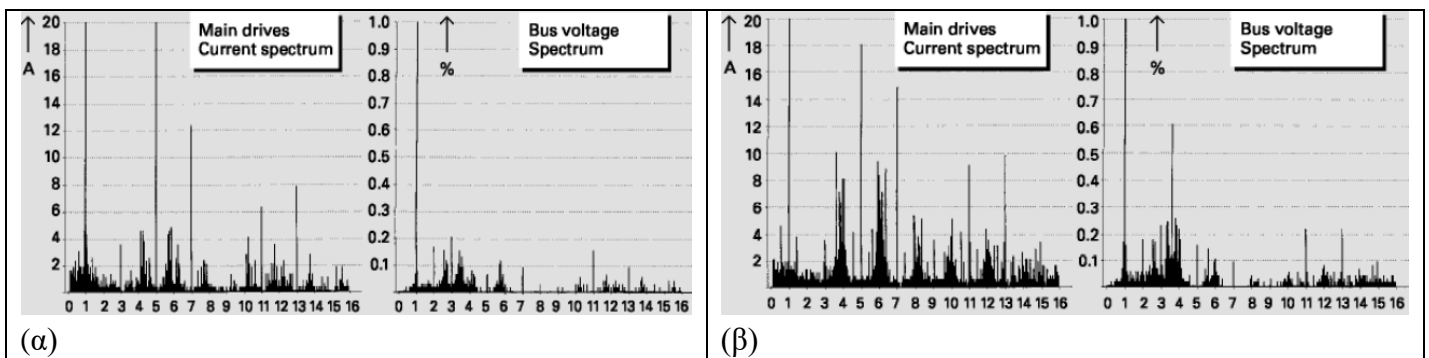
Στην περίπτωση ενός PWM ρυθμιστή με όμοια φόρτιση (70%) και αντίδραση γραμμής 3%, σημειώνεται διαταραχή ρεύματος $I_{THD}=42-44\%$ ([22], “Control of Harmonics in Electrical Power Systems ABS 2006”, Sect.6, σελ.102).



Σχήμα 2.24. Κατανομή αρμονικών ρευμάτων για την παραπάνω περίπτωση (Σχήμα 2.23) [22, fig.6]

- **Μετατροπείς καθοδηγούμενοι από το φορτίο (Load Commutated Inverters-LCI):** Ο συγκεκριμένος τύπος μετατροπέων (όπως περιγράφεται και στην παράγραφο 2.10.5) έχει παρόμοια διάταξη με τους μετατροπείς PWM, αφού αποτελούνται από μία γέφυρα ανόρθωσης και έναν αντιστροφέα που συνδέονται μεταξύ τους μέσω μίας επαγωγικής αντίδρασης (στο DC bus) που έχει ρόλο πηγής ρεύματος. Οι τιμές των αρμονικών ρεύματος και η μορφή της κυματομορφής του ρεύματος εισόδου είναι όμοιες με αυτές που προκύπτουν από τους ρυθμιστές SCR. Επιπλέον, η τιμή του ρεύματος διαταραχής I_{THD} εξαρτάται από τη γωνία έναυσης των ημιαγωγών του ανορθωτή, παρουσιάζοντας χειρότερο (μεγαλύτερο) ποσοστό του I_{THD} υπό συνθήκες χαμηλής ταχύτητας και μέγιστου φορτίου του ελεγχόμενου κινητήρα.
- **Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters):** Όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.10.5, οι κυκλομετατροπείς αποτελούν μία σύνθετη διάταξη ελέγχου κινητήρων, η οποία βασίζεται σε γέφυρες ανόρθωσης της τάσης. Η τιμή και η σειρά των αρμονικών συνιστωσών ρεύματος που παράγονται από

τους μετατροπείς αυτούς, εξαρτώνται από τους παλμούς του μετατροπέα και τα χαρακτηριστικά του συστήματος (γενικά παράγονται λιγότερες αρμονικές σε σχέση με τους υπόλοιπους μετατροπείς). Υπάρχει όμως, έντονη παρουσία ενδοαρμονικών συνιστωσών, των οποίων η τιμή σχετίζεται με τη συχνότητα εξόδου του κυκλομετατροπέα, το φορτίο του κινητήρα, το ρεύμα κυματισμού αυτού (motor ripple current) και τη μορφή (σύνδεσης) του κυκλομετατροπέα (blocking or circulating mode). Για χαμηλές συχνότητες εξόδου παρατηρείται παρόμοια (μειωμένη) εμφάνιση αρμονικών με τους μετατροπείς SCR και αντίστοιχη εμφάνιση ενδοαρμονικών. Για υψηλότερες συχνότητες εξόδου έως την ονομαστική ταχύτητα των κινητήρων παρουσιάζεται μείωση αρμονικών, αλλά αύξηση των ενδοαρμονικών συνιστωσών. Ο συνηθέστερος τύπος κυκλομετατροπέα είναι ο 6-παλμικός (6-pulse), όπου οι ενδοαρμονικές γύρω από τη θεμελιώδη, την 5^η και την 7^η τάξη αρμονικών πρέπει να είναι περιορισμένης τιμής, ενώ για μεγαλύτερης τάξης αρμονικές δεν υπάρχει μεγάλη ανάγκη περιορισμού της τιμής των ενδοαρμονικών. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές πλοίων, όπου χρησιμοποιούνται 12-παλμικοί ή και περισσότερων παλμών μετατροπείς, λόγω των κινητήρων μεγάλου μεγέθους (τάξης των MVA) που καλούνται να χειριστούν, απαιτούνται ποικίλοι τρόποι περιορισμού των αρμονικών και ενδοαρμονικών επιπτώσεων, οι οποίες προκαλούνται στο σύστημα (λόγω των ρυθμιστών αυτών). [22]



Σχήμα 2.25. Ρεύμα εισόδου 6-παλμικού κυκλομετατροπέα α) χαμηλής συχνότητας, μειωμένου φορτίου και β) μεγάλης συχνότητας, αυξημένου φορτίου του κινητήρα [22, fig.7,8]

2.24 Επίδραση της σύνθετης αντίστασης και της φαινόμενης ισχύος στις αρμονικές σε πλοία

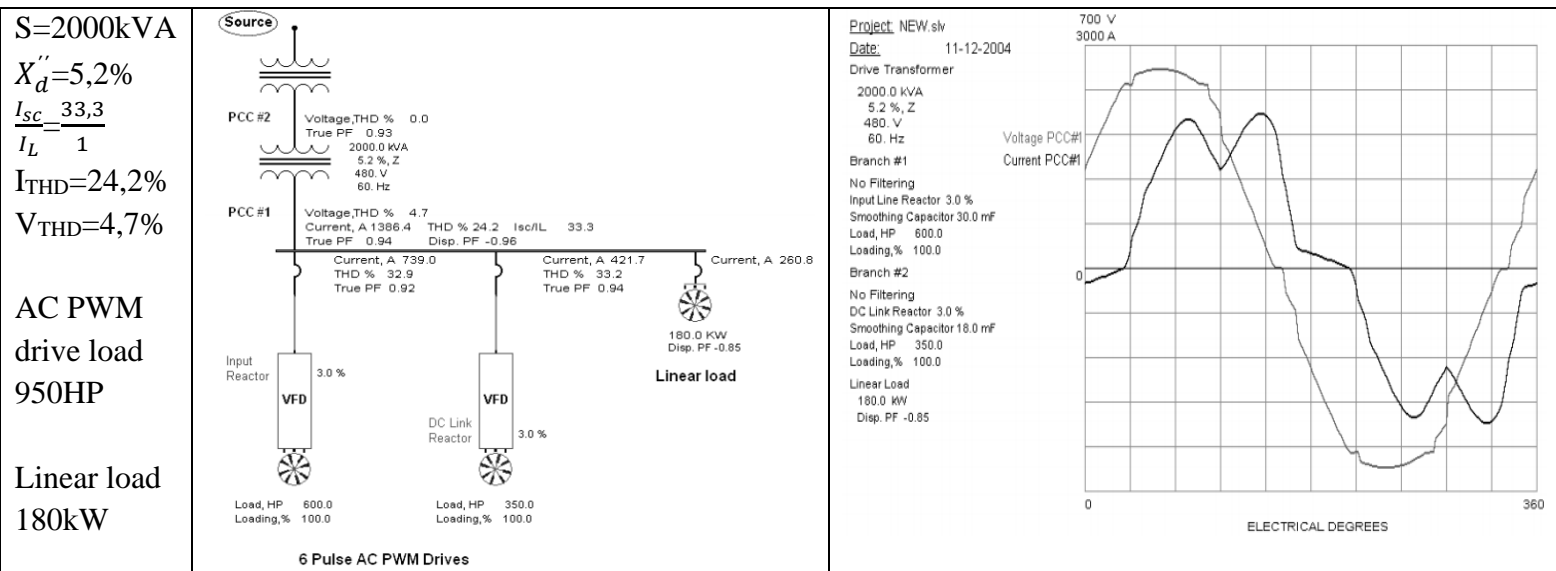
2.24.1 Γενική περιγραφή

Οι πηγές ενός συστήματος, στο οποίο περιέχονται φορτία αρμονικών, κατηγοριοποιούνται με βάση τη σύνθετη αντίσταση και την ικανότητα βραχυκυκλώματος αυτών, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

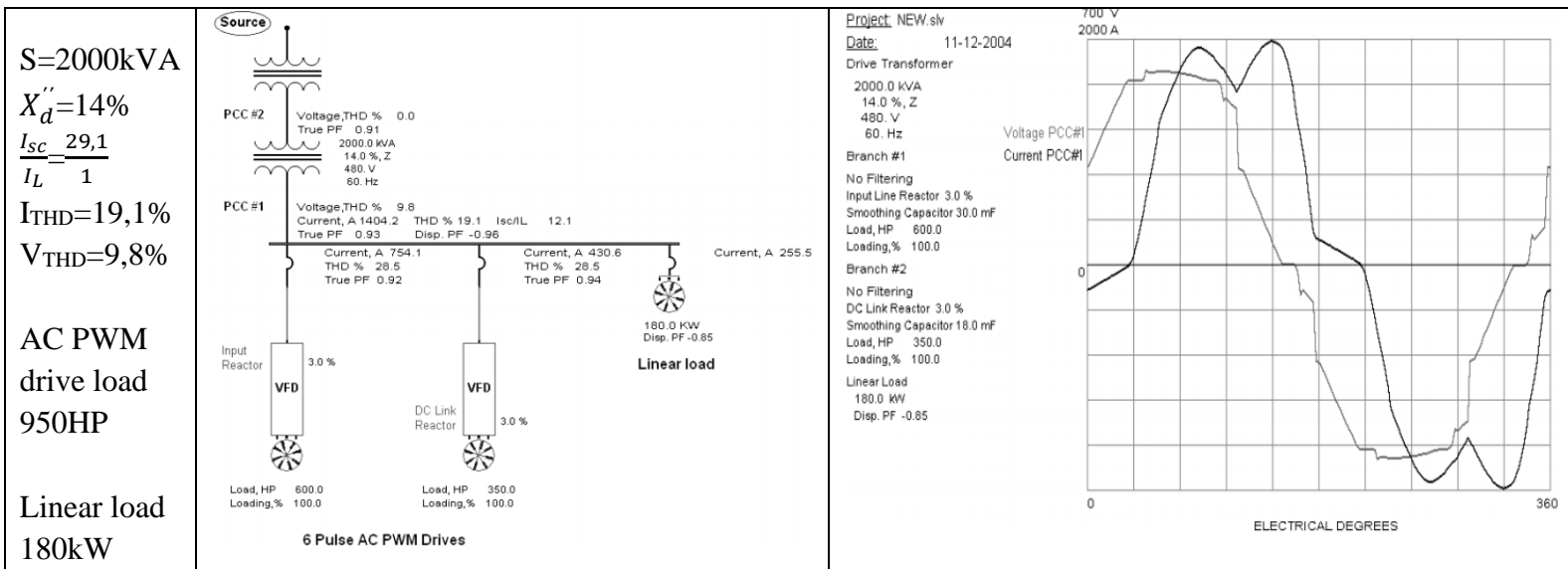
- «Δύσκαμπτες» πηγές (Stiff sources): Στις συγκεκριμένες πηγές τροφοδοσίας κατατάσσονται οι μετασχηματιστές ενός δικτύου, των οποίων η σύνθετη αντίσταση κυμαίνεται συνήθως στο 5-6% (0,05-0,06 ανά μονάδα) και η ικανότητα βραχυκύκλωσής τους (short circuit capability) είναι αρκετά μεγάλη. Το συνολικό αρμονικό ρεύμα που παρέχεται από τις πηγές αυτές προς τα μη γραμμικά φορτία του συστήματος είναι υψηλό, αλλά αντίθετα το ποσοστό της τάσης διαταραχής είναι χαμηλό.

- «Εύκαμπτες» πηγές (Soft sources): Οι πηγές που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι οι γεννήτριες, που η σύνθετη αντίσταση (υπομεταβατική αντίδραση- X_d'') αυτών λαμβάνει τιμές μεταξύ 10-18% (0,1-0,18 α.μ.). Η ικανότητα βραχυκύκλωσης είναι χαμηλότερη σε σχέση με την προηγούμενη κατηγορία πηγών και κατ' επέκταση στο κύκλωμα ρέουν μικρά ποσά αρμονικών ρευμάτων (προς τα μη γραμμικά φορτία), όμως υπάρχει αυξημένη τάση διαταραχής σε αυτό. Για την επιλογή της τελικής τιμής φαινόμενης ισχύος (kVA) λειτουργίας, που θα παραχθεί μέσω των αντίστοιχων γεννητριών, λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες, ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατό χαμηλότερη αρμονική διαταραχή στο σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζεται συχνά αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, με σκοπό την επέκταση της ικανότητας βραχυκύκλωσης του συστήματος και άρα τη μικρότερη τιμή υπομεταβατικής αντίδρασης (X_d''). Κατά την εμφάνιση μη γραμμικών φορτίων στο κύκλωμα, προκύπτει μεγαλύτερη ροή αρμονικών ρευμάτων σε αυτό, οπότε είναι αναγκαία η χαμηλή τιμή της αντίδρασης X_d'' για τον περιορισμό της αρμονικής τάσης διαταραχής. Μία ακόμη προϋπόθεση που επηρεάζει την τιμή της φαινόμενης ισχύος είναι ο λόγος του ονομαστικού ρεύματος του φορτίου (I_L) προς το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) του συστήματος (I_L/I_{sc}). Γενικά, η αύξηση της φαινόμενης ισχύος συνεπάγεται με μεγέθυνση των αρμονικών ρευμάτων, αλλά ελάττωση της τάσης διαταραχής στο σύστημα.

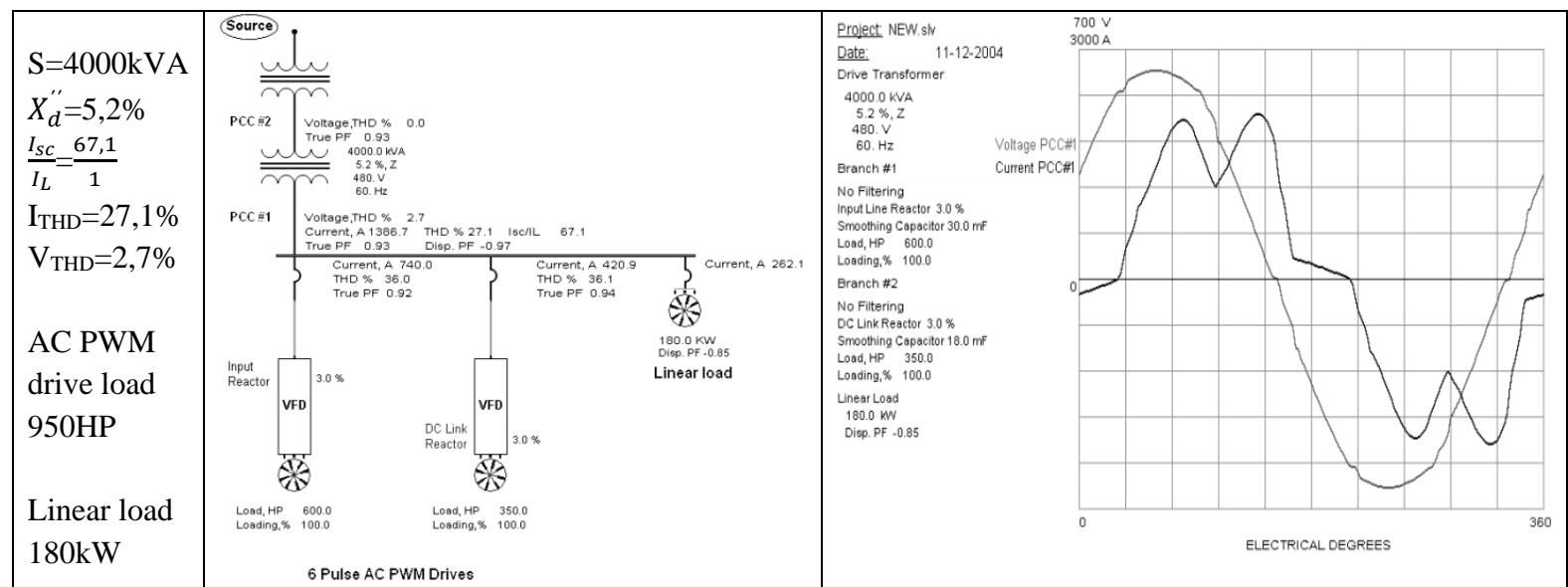
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται 4 περιπτώσεις ενός Σ.Η.Ε. που αποτελείται από έναν μετασχηματιστή με κατάλληλη τιμή ισοδύναμης αντίστασης κάθε φορά, 2 6-παλμικούς μετατροπείς (AC PWM) και ένα γραμμικό φορτίο, όπου και τα 2 τελευταία είδη φορτίων διατηρούν τα ίδια χαρακτηριστικά σε όλες τις περιπτώσεις. Σε κάθε μία από τις 4 περιπτώσεις υπάρχει διαφορετικός συνδυασμός εγκατεστημένης φαινόμενης ισχύος του συστήματος (kVA) και υπομεταβατικής αντίδρασης (X_d'') της πηγής (γεννήτριας). Μέσα από αυτούς τους συνδυασμούς λειτουργίας παρουσιάζεται η επίδραση στα διάφορα αρμονικά μεγέθη του συστήματος (V_{THD} , I_{THD}) και η συμπεριφορά των κυματομορφών τάσεως και ρεύματος τροφοδοσίας.



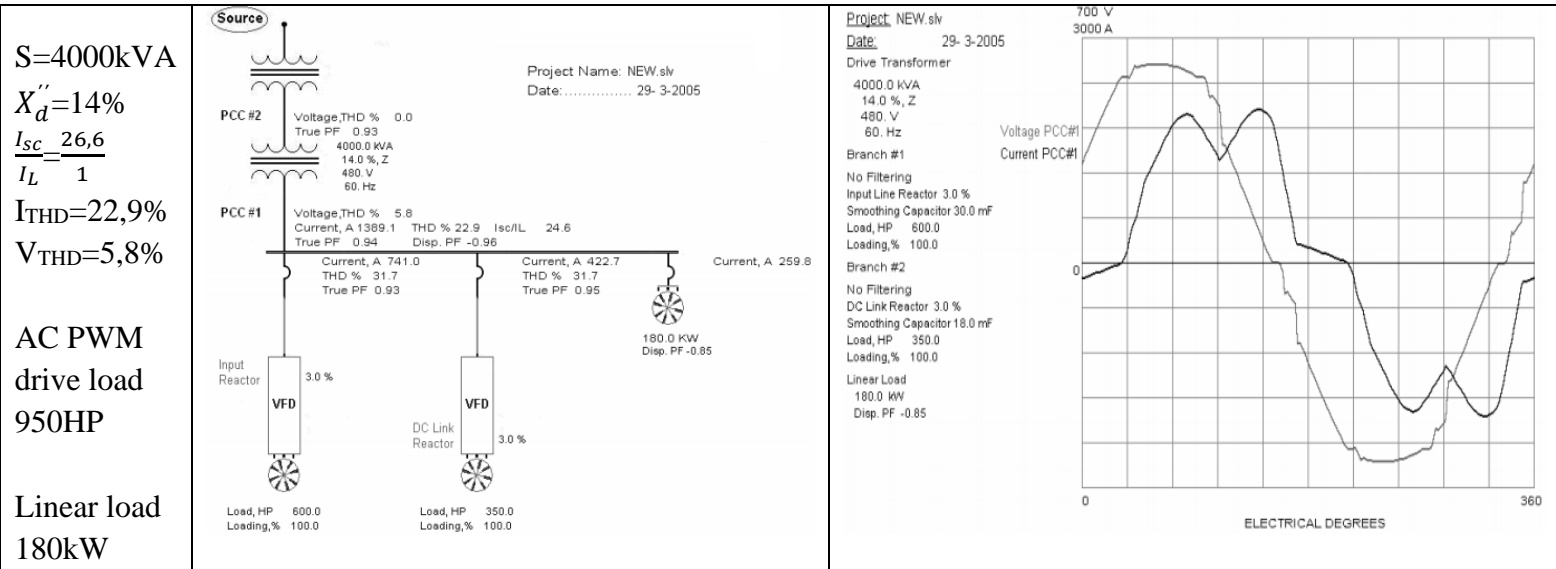
Σχήμα 2.26. (Αριστερά) μεγεθών λειτουργίας Σ.Η.Ε. και (Δεξιά) κυματομορφές τάσεως και ρεύματος εισόδου [22, fig.1a,1b]



Σχήμα 2.27. (Αριστερά) μεγεθών λειτουργίας Σ.Η.Ε. και (Δεξιά) κυματομορφές τάσεως και ρεύματος εισόδου [22, fig.2a,2b]



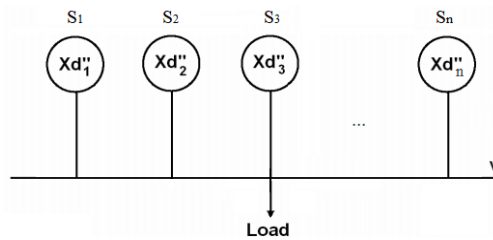
Σχήμα 2.28. (Αριστερά) μεγεθών λειτουργίας Σ.Η.Ε. και (Δεξιά) κυματομορφές τάσεως και ρεύματος εισόδου [22, fig.3a,3b]



Σχήμα 2.29. (Αριστερά) μεγεθών λειτουργίας Σ.Η.Ε. και (Δεξιά) κυματομορφές τάσεως και ρεύματος εισόδου [22, fig.4a,4b]

2.2.4.2 Υπολογισμός ισοδύναμης ικανότητας βραχυκύκλωσης συστήματος

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.26) απεικονίζεται ένα σύστημα n γεννητριών, διαφορετικής ισχύος (kVA) και υπομεταβατικής αντίδρασης (X''_d) η καθεμία, όπου είναι συνδεδεμένες παράλληλα.



Σχήμα 2.30. Σύστημα n γεννητριών συνδεδεμένες παράλληλα [22, fig.5]

Για τον υπολογισμό της ικανότητας βραχυκύκλωσης του συστήματος, λαμβάνοντας τα στοιχεία μίας οποιασδήποτε γεννήτριας ως βάση (S_{base} , X_{base}) και στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγονται αυτά της πρώτης γεννήτριας (S_1 , X''_{d1}). Στη συνέχεια υπολογίζονται οι βασικές υπομεταβατικές αντιδράσεις των υπόλοιπων γεννητριών ως εξής:

$$X''_{d2,base} = X''_{d2} \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad (2.60)$$

$$X''_{d3,base} = X''_{d3} \cdot \frac{S_1}{S_3} \quad (2.61)$$

...

$$X''_{dn,base} = X''_{dn} \cdot \frac{S_1}{S_n} \quad (2.62)$$

Έπειτα, λόγω της κοινής βάσης όλων των γεννητριών είναι δυνατή η εύρεση της συνολικής βασικής υπομεταβατικής αντίδρασης του συστήματος:

$$X''_{d_{1,2,3,\dots,n},base} = X''_{d_1,base} // X''_{d_2,base} // X''_{d_3,base} // \dots // X''_{d_n,base}$$

$$\text{ή } Y''_{d_{1,2,3,\dots,n},base} = \frac{1}{X''_{d_{1,2,3,\dots,n},base}}$$

$$\text{ή } Y''_{d_{1,2,3,\dots,n},base} = \frac{1}{X''_{d_1,base}} + \frac{1}{X''_{d_2,base}} + \frac{1}{X''_{d_3,base}} + \dots + \frac{1}{X''_{d_n,base}}$$

$$\text{ή } X''_{d_{1,2,3,\dots,n},base} = \frac{1}{Y''_{d_{1,2,3,\dots,n},base}} \quad (2.63)$$

όπου $Y''_{d_{1,2,3,\dots,n},base}$: η συνολική υπομεταβατική αγωγιμότητα

Τελικά, προκύπτει η συνολική ικανότητα βραχυκύκλωσης του συστήματος (total system short capacity), ως εξής:

$$S_{sc} = \frac{S_{base} (=S_1)}{X''_{d_{1,2,3,\dots,n},base}} \quad (2.64)$$

[22, Sect.7]

2.25 Επίδραση ανισοροπίας τάσης και τάση ουδέτερου στις αρμονικές σε πλοία

2.25.1 Ισοροπία (συμμετρία) συστήματος

Γενικά, ως ισοροπημένο (συμμετρικό) χαρακτηρίζεται ένα σύστημα του οποίου οι πηγές (όσες και αν είναι) παράγουν συμμετρικό σήμα και τροφοδοτούν συμμετρικό φορτίο (ίσες σύνθετες αντιστάσεις των φορτίων μεταξύ τους) μέσω αγωγών που παρουσιάζουν συμμετρική συμπεριφορά (ίση σύνθετη αντίσταση μεταξύ τους όσον αφορά τους αγωγούς φάσης). Όσον αφορά τα τριφασικά συστήματα, ως συμμετρικά καλούνται εκείνα που αποτελούνται από τα 3 παρακάτω χαρακτηριστικά:

- **Τριφασικές συμμετρικές πηγές**, οι οποίες έχουν ίσα μέτρα τάσης και φασική (γωνιακή) απόκλιση 120° μεταξύ τους.
- **Τριφασικές συμμετρικές γραμμές μεταφοράς**, δηλαδή γραμμές και εγκάρσια στοιχεία μεταξύ πηγής και φορτίου, που έχουν ίσες (κατά μέτρο και γωνία) σύνθετες αντιστάσεις μεταξύ τους (όσον αφορά αγωγούς φάσης).
- **Τριφασικά συμμετρικά φορτία**, (π.χ. τριφασικοί κινητήρες), που αποτελούνται από ίση (κατά μέτρο και γωνία) σύνθετες αντιστάσεις είτε ανά 2 φάσεις, είτε ανάμεσα σε κάθε φάση και τον ουδέτερο αγωγό ή κόμβο για τύλιγμα τριγώνου και αστέρα αντίστοιχα.

Στην περίπτωση που δεν ισχύει η συμμετρία σε μία ή περισσότερες από τις παραπάνω κατηγορίες, τότε το σύστημα ονομάζεται ασύμμετρο κα απαιτείται διαφορετική προσέγγιση από το συμμετρικό για τη μελέτη του. Ορισμένοι λόγοι που προκαλούν ανισοροπία (ασυμμετρία) σε κάποιο τμήμα του τριφασικού συστήματος Η.Ε. (πηγές, γραμμές, φορτίο) και κατ' επέκταση σε ολόκληρο το σύστημα είναι οι εξής:

- Άνιση κατανομή των μονοφασικών φορτίων στις 3 φάσεις του δικτύου ή μη συμμετρικό τριφασικό φορτίο.

- Διαφορετική τιμή των ισοδύναμων επαγωγικών αντιδράσεων (impedances) των εξαρτημάτων του συστήματος.
- Παρουσία ασυμμετριών στις αντιδράσεις των ρυθμιστών στροφών (AC and DC drive commutation reactances).
- Αρμονική διαταραχή των συνιστωσών, της θετικής και αρνητικής διαδοχής των φάσεων.
- Συνιστώσες επαγόμενης τάσης (commutating voltage) αρνητικής διαδοχής στη θεμελιώδη συχνότητα.

Για τη μελέτη της ανισορροπίας της τάσης σε ένα τριφασικό σύστημα χρησιμοποιούνται οι συντελεστές μ_a (βαθμός ασυμμετρίας αντίστροφης διαδοχής) και μ_o (βαθμός ασυμμετρίας μηδενικής διαδοχής), όπως παρουσιάστηκαν και στην παράγραφο 2.5. Οι τύποι που αναλύθηκαν στην παράγραφο αυτή σχέσεις (2.1-2.4) προέρχονται από τον κανονισμό STANAG 1008-edition 9. Ωστόσο, για το συγκεκριμένο σκοπό του υπολογισμού της ανισορροπίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μία απλούστερη σχέση, βάσει του κανονισμού NEMA (National Electric Manufacturers Association, in the USA), η οποία είναι η παρακάτω:

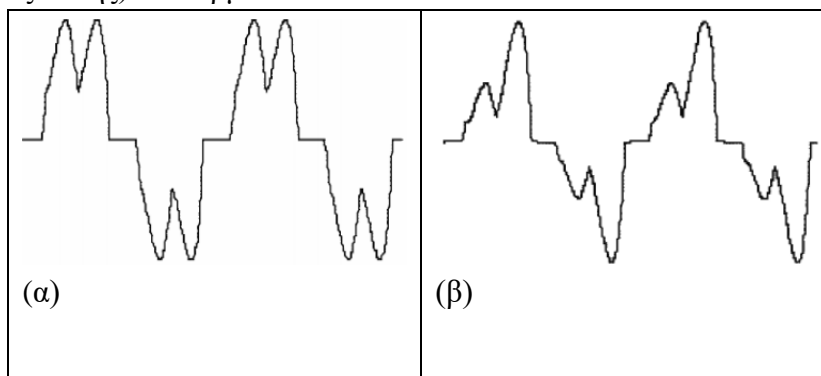
$$\text{Ανισορροπία τάσης} = \frac{\text{Μέγιστη απόκλιση των μέσων τιμών των πολικών τάσεων } (V_{12}, V_{23}, V_{31})}{\text{Μέση τιμή των πολικών τάσεων } (V_{12}, V_{23}, V_{31})} \quad (2.65)$$

$$[\text{Voltage Unbalance (V.U.)} = \frac{\text{Maximum deviation from mean of } (V_{12}, V_{23}, V_{31})}{\text{Mean of } (V_{12}, V_{23}, V_{31})}]$$

2.25.2 Επίδραση ασύμμετρου (μη ισορροπημένου) φορτίου στις αρμονικές

Υπάρχουν πολλές και ποικίλες συνέπειες της ασύμμετρης τάσης στη συμπεριφορά των αρμονικών σε ένα Σ.Η.Ε., όπως:

- Η παρουσία συνιστωσών συνεχούς ρεύματος (DC) και απροσδιόριστων τάξεων αρμονικών (π.χ. 2^η, 3^η, 9^η), των οποίων η επιρροή τους στο σύστημα είναι αρκετά δύσκολο να προβλεφθεί. Το φαινόμενο εμφανίζεται κατά την αστοχία έναυσης αγωγής των ημιαγωγών (τρανζίστορ-SCRs) των διατάξεων ελέγχου των κινητήρων (AC PWM drives), η οποία προκαλείται επίσης λόγω ανισορροπία τάσης.
- Η εμφάνιση ασύμμετρων ρευμάτων, τα οποία οδηγούν σε θερμική καταπόνηση (thermal stress) των εξαρτημάτων των συσκευών ελέγχου των κινητήρων.
- Η μείωση της τιμής της τάσης στις αντιδράσεις (DC bus) των διατάξεων ελέγχου κινητήρων με ενδεχόμενη διακοπή λειτουργίας (subsequent tripping) αυτών.
- Η αλλοίωση της κυματομορφής της τάσης εισόδου των γεφυρών ανόρθωσης, εξαιτίας της επιδείνωσης (λόγω ασυμμετρίας τάσης) των αρμονικών.



Σχήμα 2.31. Κυματομορφή ρεύματος εισόδου 6-παλμικού PWM ρυθμιστή σε α) συμμετρικό και β) ασύμμετρο (5% ασυμμετρία τάσης) σύστημα [22, fig. 6,7]

2.25.3 Επίδραση ανισορροπίας τάσης και τάσης υποβάθρου στο σύστημα

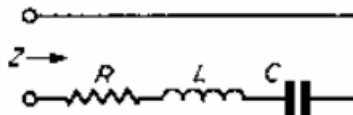
Η ανισορροπία τάσης (voltage unbalance) και η διαταραχή της τάσης υποβάθρου (background voltage distortion) αποτελούν δύο έντονα προβλήματα για τις διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μείωση των αρμονικών ενός συστήματος. Η ανισορροπία τάσης επηρεάζει τη συμπεριφορά διατάξεων, όπως οι πολύ-παλμικές συσκευές περιορισμού αρμονικών (multi-pulse harmonic mitigation drive systems) και τα συστήματα περιορισμού που βασίζονται στη μετατόπιση φάσης (phase shift systems). Επίσης, η διαταραχή της τάσης υποβάθρου επηρεάζει κυρίως την απόδοση των πολύ-παλμικών συστημάτων και συστημάτων που αποτελούνται από πυκνωτές εισόδου («front end» capacitors) για τη μείωση των αρμονικών. Ειδικότερα, στα Σ.Η.Ε. πλοίων δεν είναι άμεσα γνωστή η τιμή της διαταραχής τάσης υποβάθρου πέρα από την οποία θα προκληθεί έντονη διατάραξη στη λειτουργία των συστημάτων περιορισμού αρμονικών (περισσότερη ανάλυση των τρόπων περιορισμού των αρμονικών στα πλοία παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.27). [22, Sect.8]

2.26 Συντονισμός σε πλοία

2.26.1 Γενική περιγραφή

Η συνολική χωρητικότητα (capacitance) ενός κυκλώματος προκύπτει από το ποσοστό χωρητικής συμπεριφοράς των φορτίων και από τα αμιγώς (θεωρητικά) χωρητικά φορτία (πυκνωτές). Στα πλοία και στις παράκτιες εγκαταστάσεις (offshore) η συνολική χωρητικότητα του συστήματος εξαρτάται από τις χωρητικότητες που εμφανίζονται σε διάφορα τμήματα αυτού, όπως σε αυτά που περιέχουν πυκνωτές διόρθωσης του συντελεστή ισχύος (Σ.Ι.), οι οποίοι εγκαθίστανται συνήθως, απευθείας στα φορτία που απαιτείται βελτίωση αυτού (τοπική αντιστάθμιση). Η χρήση συστοιχιών πυκνωτών στους κεντρικούς πίνακες ενός Σ.Η.Ε. πλοίου για τη βελτίωση του Σ.Ι. (κεντρική αντιστάθμιση) δεν είναι τόσο συχνή στα πλοία. Επιπλέον, σημαντική συνεισφορά στη χωρητικότητα του συστήματος έχει και η χωρητικότητα των αγωγών και καλωδίων αυτού. Η χωρητική αντίδραση (χωρητικότητα) του συστήματος είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας ($x_c = \frac{1}{2\pi fC}$), ενώ η επαγωγική αντίδραση αυτού είναι ανάλογη της συχνότητας ($x_L = 2\pi fL$). Το φαινόμενο του συντονισμού εμφανίζεται όταν οι τιμές των δύο αντιδράσεων (χωρητική και επαγωγική) γίνονται ίσες μεταξύ τους. Όπως παρουσιάστηκε και στην παράγραφο 2.11.2, υπάρχουν 2 περιπτώσεις συντονισμού, ο εν σειρά (series resonance) και ο παράλληλος συντονισμός (parallel resonance).

➤ Εν σειρά συντονισμός



Σχήμα 2.32. Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα εν σειρά συντονισμού [22, fig.1a]

Στον εν σειρά συντονισμό η συχνότητα συντονισμού (f_s) προκύπτει μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$f_s = f \sqrt{\frac{S_t}{S_c Z_t} - \frac{S_t^2}{S_c^2}} \quad (2.66)$$

όπου f : θεμελιώδης συχνότητα λειτουργίας του συστήματος

S_i : φαινόμενη ισχύς μετασχηματιστή ή γεννήτριας

S_c : φαινόμενη ισχύς πυκνωτή (capacitor rating)

S_r : ισχύς φορτίου (load resistive rating)

Z_i : ανά μονάδα σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστή (X_d'' : ανά μονάδα υπομεταβατική αντίδραση γεννήτριας)

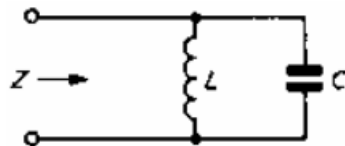
Κατά την εμφάνιση συντονισμού ($x_c=x_L$) στο αντίστοιχο (εν σειρά) κύκλωμα (Σχήμα 2.28) η συνολική σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος ισούται με την τιμή της ωμικής αντίστασης ΤΗΣ μόνο ($z = R+z_L+z_c = R + jx_L - jx_c = R$). Έτσι, στη συχνότητα συντονισμού η τιμή του ρεύματος που διαρρέει το σύστημα περιορίζεται μόνο από την ωμική αντίσταση και για μικρές τιμές αυτής, εμφανίζονται μεγάλα ρεύματα για μικρές τιμές τάσης διέγερσης (exciting voltage) και για μικρές τάξεις αρμονικών τάσεως ($V_z=I_z \cdot Z$). Το μέγεθος αυτού του ρεύματος χαρακτηρίζεται από την τιμή του συντελεστή ποιότητας (quality factor-Q):

$$Q = \frac{x_r}{R} \quad (2.67)$$

όπου x_r : επαγωγική αντίδραση κυκλώματος κατά το συντονισμό

R : ωμική αντίσταση κυκλώματος

➤ Παράλληλος συντονισμός



Σχήμα 2.33. Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα παράλληλου συντονισμού [22, fig.1b]

Ο παράλληλος συντονισμός αποτελεί το συνηθέστερο τύπο συντονισμού σε ένα σύστημα, αφού τα περισσότερα φορτία συνδέονται παράλληλα με τους κεντρικούς ζυγούς τροφοδοσίας. Η συχνότητα συντονισμού (f_p) κατά τον παράλληλο συντονισμό, για συνολική ισοδύναμη αντίδραση κυκλώματος αμιγώς επαγωγικού χαρακτήρα, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_p = f \sqrt{\frac{S_s}{S_c}} \quad (2.68)$$

όπου f : θεμελιώδης συχνότητα λειτουργίας του συστήματος

S_s : ικανότητα βραχυκύκλωσης συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (short circuit rating)

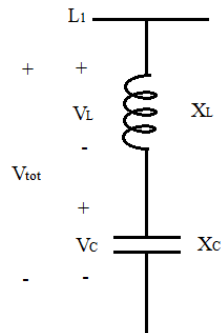
S_c : ισχύς ωμικού φορτίου (load resistive rating)

Η ισοδύναμη παράλληλη σύνθετη αντίσταση στον παράλληλο συντονισμό έχει αρκετά μεγάλη τιμή, που σημαίνει πως η παρουσία μικρών τιμών ρεύματος στο κύκλωμα μπορεί να προκαλέσει σημαντικές τιμές τάσης σε αυτό ($V_z=I_z \cdot Z$).

2.26.2 Αντιμετώπιση συντονισμού

Η επικρατέστερη μέθοδος αντιμετώπισης του φαινομένου του συντονισμού σε ένα σύστημα επιτυγχάνεται με τη χρήση επαγωγικής αντίδρασης αποσυντονισμού (detuning reactors). Σε ένα τυπικό Σ.Η.Ε. με ονομαστική συχνότητα λειτουργίας 50Hz, εγκατεστημένη ισχύ της τάξης μερικών MVA (10-50 MVA) και ισοδύναμης χωρητικότητας της τάξης αρκετών kVAr (400-800kVAr), με βάση τη σχέση 2.68 προκύπτει συχνότητα συντονισμού κοντά στην $3^{\text{η}}$ - $5^{\text{η}}$ αρμονική συχνότητα (150-250Hz). Οι συγκεκριμένες διατάξεις

αποσυντονισμού συνδέονται στο σύστημα με σκοπό να μετατοπίσουν την τιμή της συχνότητας συντονισμού, ώστε να μην ταυτιστεί με κάποια αρμονική συχνότητα από αυτές που επικρατούν στο σύστημα. Η τιμή αυτή ορίζεται κάτω από την 5^η αρμονική συχνότητα ($5 \times 50\text{Hz} = 250\text{Hz}$), περίπου στην 4,5^η-4,7^η τάξη και σε ειδικές περιπτώσεις κάτω της 3^{ης} τάξης (σύστημα 4 αγωγών). Με άλλα λόγια, μέσω της προσθήκης των διατάξεων αποσυντονισμού αποτρέπεται το φαινόμενο συντονισμού στις αρχικές αρμονικές συχνότητες (3^η, 5^η). Η επαγωγική αντίδραση της διάταξης αποσυντονισμού προστιθέμενη με τη χωρητική αντίδραση των πυκνωτών σε κάποιο σημείο του κυκλώματος (π.χ. συστοιχίες πυκνωτών αντιστάθμισης), έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής σύνθετης αντίστασης του συστήματος. Έτσι, υπάρχει αύξηση στην τιμή του ρεύματος που διαρρέει το χωρητικό φορτίο (πυκνωτές) και κατ' επέκταση και στην τιμή της τάσης στο κύκλωμα.



Σχήμα 2.34. Διάταξη αποσυντονισμού- x_L συνδεδεμένη σε σειρά με χωρητικό φορτίο- x_C (π.χ. συστοιχία πυκνωτών) [22, fig 4.2]

Με βάση το κύκλωμα του παραπάνω σχήματος, ισχύει ότι:

$$x = x_L + x_C \quad (2.69)$$

$$\left[\text{ή } jx = jx_L + \frac{x_C}{j} = j\omega L - \frac{j}{\omega C} = \frac{j\omega L(\omega C) - j}{\omega C} = \frac{j\omega^2 LC - j}{\omega C} \text{ ή } jx = \frac{j(\omega^2 LC - 1)}{\omega C} \right]$$

Μέσω του διαιρέτη τάσης στο κύκλωμα του σχήματος 2.30, προκύπτει ότι:

$$V_C = \frac{x_C}{x_L + x_C} \cdot V_{\text{tot}} \quad (2.70)$$

και αντικαθιστώντας τη σχέση 2.69 στην παραπάνω (2.70) προκύπτει ο εξής τύπος:

$$V_C = \frac{x_C}{x} \cdot V_{\text{tot}} \quad (2.71)$$

$$\left[\text{ή } V_C = \frac{x_C}{\frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C}} \cdot V_{\text{tot}} = \frac{\frac{1}{\omega C}}{\frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C}} \cdot V_{\text{tot}} = \frac{\frac{1}{\omega C} \omega C}{\omega^2 LC - 1} \cdot V_{\text{tot}} = \frac{1}{\omega^2 LC - 1} \cdot V_{\text{tot}} \right]$$

Ένα από τα κύρια τμήματα στα πλοία, όπου εντοπίζεται το φαινόμενο του συντονισμού είναι στους πυκνωτές αντιστάθμισης στα φωτιστικά φθορισμού (fluorescent lighting). Η αύξηση της τάσης και του ρεύματος (όπως αναφέρθηκε προηγουμένως) στα σημεία αυτά που παρουσιάζεται συντονισμός μπορεί να οδηγήσει σε βλάβες ή και καταστροφή του φορτίου αυτού, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο φωτισμός. Άλλο κομμάτι του εξοπλισμού που κατά τη φόρτισή του προκαλεί συχνά συντονισμό είναι οι αγωγοί και τα καλώδια του

συστήματος, λόγω του έντονου χωρητικού χαρακτήρα που παρουσιάζουν. Το φαινόμενο αυτό στους αγωγούς ενισχύεται σε μεγάλο βαθμό, όταν χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία φορτίων σε μεγάλη απόσταση, όπως για παράδειγμα την τροφοδοσία ενός πλοίου από την ξηρά κατά την «εν όρμω» λειτουργία αυτού. Η αναγνώριση του συντονισμού μέσω μετρήσεων μπορεί να επιτευχθεί μέσω διατάξεων μέτρησης των αρμονικών μεγεθών. Οι αρμονικές τάσεις και ρεύματα μειώνονται για μεγαλύτερες τάξεις της αρμονικής συχνότητας, οπότε η παρουσία σημαντικά αυξημένων τιμών τάσεως και ρεύματος σε κάποια προχωρημένη τάξη αρμονικής συχνότητας αποτελεί ένδειξη φαινομένων συντονισμού στη συχνότητα αυτή. [22, Sect.9]

2.27 Περιορισμός αρμονικών σε πλοία

Υπάρχουν ποικίλοι τρόποι που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό των αρμονικών ρευμάτων και τάσεων σε ένα σύστημα, όπως θα παρουσιαστούν στη συνέχεια αυτής της παραγράφου. Για την επιλογή του κατάλληλου τρόπου σε κάθε εφαρμογή λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες, με βασικότερο τον τύπο του συστήματος (μονοφασικό, τριφασικό 3 αγωγών, τριφασικό 4 αγωγών, κ.α.) Επιπλέον, η μέθοδος μείωσης των αρμονικών μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε κάποιο μεμονωμένο φορτίο που προκαλεί στο σύστημα μη επιτρεπτή διαταραχή, είτε σε ολόκληρο το κύκλωμα κατά τη σύνδεση της κατάλληλης διάταξης περιορισμού στο γενικό πίνακα τροφοδοσίας του συστήματος.

2.27.1 Περιορισμός αρμονικών λόγω επίδρασης της διαφοράς μεταξύ γωνιών τάσης ή ρεύματος

Η μείωση αρμονικών στη συγκεκριμένη περίπτωση στηρίζεται στη διαφορετική γωνία των μεγεθών (τάσης και ρεύματος) της κάθε πηγής για την ίδια συχνότητα. Η ύπαρξη αυτής της διαφοράς γωνίας (φάσης) οδηγεί, σε πολλές περιπτώσεις, στον περιορισμό ή και μηδενισμό των αρμονικών ρευμάτων και κατ' επέκταση και τάσεων. Οι τιμές των μεγεθών αυτών μπορούν να υπολογιστούν για το κάθε μη γραμμικό φορτίο ανάλογα με τα χαρακτηριστικά αυτού (ονομαστική ισχύς, τάση λειτουργίας). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προβλεφθεί η συμπεριφορά των τιμών των αρμονικών μεγεθών μέσα στο σύστημα.

2.27.2 Περιορισμός αρμονικών λόγω γραμμικών φορτίων

Η ύπαρξη γραμμικών φορτίων σε ένα σύστημα, όπως ωμικά φορτία και επαγωγικοί κινητήρες, συμβάλλουν στον περιορισμό της αρμονικής διαταραχής σε αυτό. Τα φορτία αυτά δεν απαιτούν αρμονικά ρεύματα για τη λειτουργία τους, παρόλα αυτά τα απορροφούν καθώς αυτά διαρρέουν όλο το σύστημα και καταναλώνονται στα διάφορα τμήματα των φορτίων αυτών (γραμμικών) ως θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Οι επαγωγικοί κινητήρες, παρά τη συμβολή τους στη μείωση των αρμονικών, λόγω του επαγωγικού τους χαρακτήρα μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να οδηγήσουν στην επιδείνωση της διαταραχής στο σύστημα μετατοπίζοντας τη συχνότητα συντονισμού αυτού προς κάποια αρμονική συχνότητα μικρότερης τάξης. Γι' αυτό το λόγο τα ωμικά φορτία θεωρούνται αποτελεσματικότερα σε αυτή τη μέθοδο περιορισμού αρμονικών.

2.27.3 Μετατόπιση φάσεων μέσω μετασχηματιστή (Transformer phase shifting)

Η συγκεκριμένη μέθοδος περιορισμού αρμονικών βασίζεται στη λειτουργία των γεφυρών ανόρθωσης που υπάρχουν στις διατάξεις ελέγχου των στροφών των κινητήρων. Η κατάλληλη σύνδεση των γεφυρών μιας διάταξης επιτρέπει τη μείωση ορισμένων αρμονικών ρευμάτων της μίας γέφυρας, από τα αρμονικά ρεύματα των αντίστοιχων τάξεων που παράγονται από μία άλλη γέφυρα με αποτέλεσμα τον περιορισμό αρμονικών του συστήματος. Ο αριθμός των παλμών (Pulse Number-P.N.) ενός ρυθμιστή στροφών (drive) ενός κινητήρα, υπολογίζεται από το γινόμενο του αριθμού των γεφυρών που περιέχει η διάταξη και των ανορθωμένων παλμών

που παράγονται στην έξοδο της γέφυρας. Για παράδειγμα, μία διάταξη που αποτελείται από 2 6-παλμικές γέφυρες καλείται 12-παλμικός (2x6) ρυθμιστής (12-pulse drive). Με βάση τον αριθμό παλμών προκύπτουν οι τάξεις των αρμονικών ρευμάτων που παραμένουν στο σύστημα και άρα τα αρμονικά ρεύματα που μηδενίζονται. Η σχέση που δίνει την πληροφορία αυτή είναι η εξής:

$$P.N.-1, P.N.+1, 2P.N.-1, 2P.N.+1, 3P.N.-1, 3P.N.+1, \dots \quad (2.72)$$

Για παράδειγμα, οι τάξεις των αρμονικών ρευμάτων που παράγονται από έναν 12-παλμικό (P.N.=12) ρυθμιστή είναι οι: 11,13,23,25,35,37,... Στο παράδειγμα αυτό, για διάταξη με αριθμό παλμών P.N.=12, προκύπτει ότι στο σύστημα οι αρμονικές συνιστώσες ξεκινούν από την 11^η τάξη και πάνω με αποτέλεσμα να μηδενίζονται οι συνιστώσες 3,5,7 και 9. Γενικά, ισχύει ότι για διατάξεις περισσότερων παλμών οι αρμονικές ξεκινούν από μεγαλύτερες τάξεις και παράλληλα μηδενίζονται περισσότερες αρμονικές μικρότερων τάξεων. Η μετατόπιση στη γωνιακή φάσης (phase shift) μεταξύ των γεφυρών της διάταξης (drive) υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης:

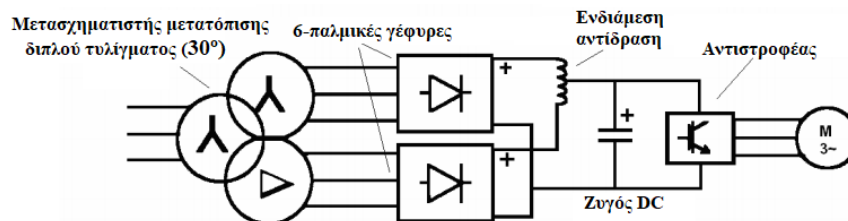
$$\text{Μετατόπιση φάσης} = \frac{60^\circ}{\text{Αριθμός γεφυρών}} \quad (\text{σε μοίρες}) \quad (2.73)$$

Οι 2 6-παλμικές γέφυρες από τις οποίες αποτελείται ο 12-παλμικός ρυθμιστής, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, απαιτούν μετατόπιση φάσης μεταξύ τους ίση με $\frac{60^\circ}{2}=30^\circ$. Η συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό μέχρι και σήμερα στα πλοία, όμως η συνεχής αναθεώρηση των κανονισμών για τη μείωση των αρμονικών τείνει να αντικαταστήσει πολλά υπάρχοντα μοντέλα περιορισμού αρμονικών, με αποδοτικότερα, όπως τις 18-παλμικές γέφυρες (18-pulse systems). Για την επίτευξη της κατάλληλης, κάθε φορά, φασικής μετατόπισης χρησιμοποιούνται 2 είδη μετασχηματιστών μετατόπισης, όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.27.4 Μετασχηματιστής απομόνωσης φασικής (γωνιακής) μετατόπισης διπλού τυλίγματος (Double-wound isolating transformer phase shift system)

Στο σχήμα 2.31 παρουσιάζεται μία πλήρη διάταξη τροφοδοσίας και ελέγχου ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα (M). Στην είσοδο του συστήματος αυτού υπάρχει ο μετασχηματιστής διπλού τυλίγματος αστέρα και ενός τυλίγματος τριγώνου με διαφορά φάσης των 2 διαφορετικών τυλιγμάτων (αστέρα-τριγώνου) ίση με 30° , λόγω των 2 6-παλμικών ανορθωτών που περιέχονται στο σύστημα. Επίσης, στο σύστημα υπάρχει μία ενδιάμεση επαγωγική αντίδραση (AC interbridge reactor), ένας ζυγός συνεχούς ρεύματος (DC bus) και μία γέφυρα ελεγχόμενων ημιαγωγών (τρανζίστορ-IGBTs) για τον έλεγχο της ταχύτητας (στροφών) του κινητήρα. Η χρήση του συγκεκριμένου μετασχηματιστή επιλέγεται για την ελάττωση (θεωρητικά μηδενισμό) της 5^{ης} και 7^{ης} αρμονικής συνιστώσας ρεύματος. Για την επίτευξη αυτού, το σύστημα απαιτείται να έχει σε μεγάλο βαθμό συμμετρικά χαρακτηριστικά (συμμετρική τροφοδοσία, συμμετρική επαγωγική αντίδραση τυλιγμάτων, συμμετρική πολική τάση μεταξύ των τυλιγμάτων στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή), διότι σε διαφορετική περίπτωση παρουσιάζεται απότομη αύξηση του ρεύματος της 5^{ης} και 7^{ης} αρμονικής. Για τον περιορισμό των ασυμμετριών στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή και κατ' επέκταση στην είσοδο των γεφυρών ανόρθωσης, επιλέγεται αρκετά υψηλή τιμή της αντίδρασης διαρροής του μετασχηματιστή ($Z_n > 0,05\mu$), δηλαδή της αντίστασης μεταξύ του ουδετέρου κόμβου του τυλίγματος αστέρα και της γης. Επιπλέον,

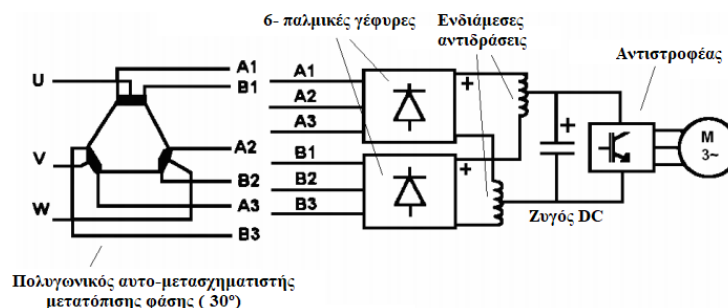
έχει μεγάλη σημασία ο ακριβής και προσεγγμένος σχεδιασμός των τμημάτων ολόκληρου του συστήματος, αφού σε ένα τέτοιο σύστημα και με συμμετρική τροφοδοσία παρουσιάζεται αρμονικό ρεύμα διαταραχής περίπου ίσο με $I_{THD}=10-12\%$. Αυτό το είδος μετασχηματιστή χρησιμοποιείται αρκετά στα πλοία, διότι λειτουργεί ως φίλτρο εμπλοκής του θορύβου (Electromagnetic Interference-EMI) που υπάρχει μέσα στο σύστημα. Ορισμένες φορές δεν είναι εφικτή η χρήση αποκλειστικών φίλτρων θορύβου (EMI filters), όπως στα Σ.Η.Ε. πλοίων χωρίς ουδέτερο αγωγό (IT δίκτυο), όπου απαιτείται η σύνδεση αυτών των φίλτρων, στο ένα άκρο τους, με κάποια επιφάνεια αναφοράς (γείωση).



Σχήμα 2.35. Κύκλωμα 12-παλμικού μετασχηματιστή μετατόπισης φάσης διπλού τυλίγματος [22, Sect.10, fig.33]

2.27.5 Πολυγωνικός (μη απομονωμένος) αυτό-μετασχηματιστής μετατόπισης φάσης (Polygonal non-isolating autotransformer phase shift system)

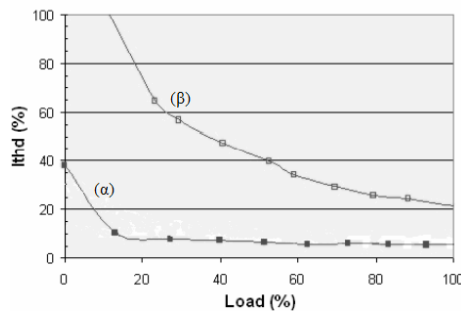
Ο συγκεκριμένος μετασχηματιστή (σχήμα 2.32) χρησιμοποιείται στα πλοία συχνότερα από το μετασχηματιστή που παρουσιάστηκε προηγουμένως, κυρίως λόγω της ικανότητας χρήσης του σε πολλές εφαρμογές, παρόλο την υψηλότερη αρμονική διαταραχή ρεύματος που παρουσιάζει ($I_{THD}=15-17\%$).



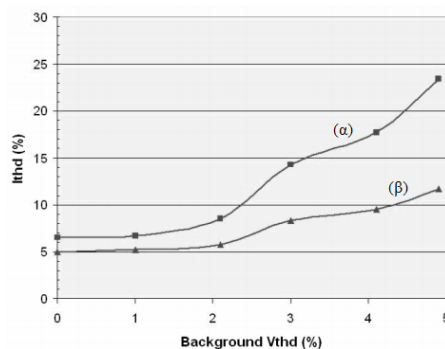
Σχήμα 2.36. Κύκλωμα 12-παλμικού πολυγωνικού αυτό-μετασχηματιστή μετατόπισης φάσης [22, Sect.10, fig.35]

Το κύκλωμα του παραπάνω σχήματος αποτελείται αρχικά, από τον πολυγωνικό αυτό-μετασχηματιστή, από τον οποίο προκύπτει φασική (γωνιακή) μετατόπιση ίση με $+15^\circ$ (σε σχέση με τη φάση της τάσης εισόδου) στους ακροδέκτες B1,B2,B3. Οπότε μεταξύ των 2 6-παλμικών γεφυρών επιτυγχάνεται διαφορά φάσης 30° (σχέση 2.73). Γενικά, η βασική λειτουργία του αυτό-μετασχηματιστή αυτού είναι ο εξαναγκασμός ροής των ασυμμετρικών των ρευμάτων της 3^{ης} αρμονικής που προκαλούνται από τις ανορθωτικές διατάξεις, στο βρόχο που σχηματίζεται στο τύλιγμα τριγώνου αυτού. Στον περιορισμό των ρευμάτων αυτής της τάξης αρμονικών συμβάλλει και η παρουσία των ενδιάμεσων επαγωγικών αντιδράσεων (inter-bridge reactors), που σε διαφορετική περίπτωση θα επιβάρυναν (τα αρμονικά ρεύματα) τις γέφυρες ανόρθωσης. Επιπλέον, η χρήση των επαγωγικών αντιδράσεων καθιστά τις 2 γέφυρες ως συμμετρικά φορτία και έτσι αποφεύγεται η ανάγκη για

ασύμμετρη τροφοδοσία αυτών από τον αυτό-μετασχηματιστή. Η ανισορροπία τάσης (voltage unbalance) και η προ υπάρχουσα τάση διαταραχής-υποβάθρου (background) στο σύστημα επηρεάζει αρνητικά, σε μεγάλο βαθμό, τη διαδικασία φασικής μετατόπισης. Σε οποιαδήποτε από τις 2 παραπάνω περιπτώσεις σημαντική επίδραση έχει και το φορτίο που καλείται να εξυπηρετηθεί από τις διατάξεις φασικής μετατόπισης, αφού για μειωμένο φορτίο υπάρχει αύξηση της διαταραχής του αρμονικού ρεύματος (I_{THD}) ανάλογης της τάσης ανισορροπίας (V_{THD}). Παρακάτω παρουσιάζονται 2 γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν τη σχέση του ρεύματος διαταραχής (I_{THD}) συναρτήσει του φορτίο και της διαταραχής της τάσης υποβάθρου (V_{THD}) αντίστοιχα.



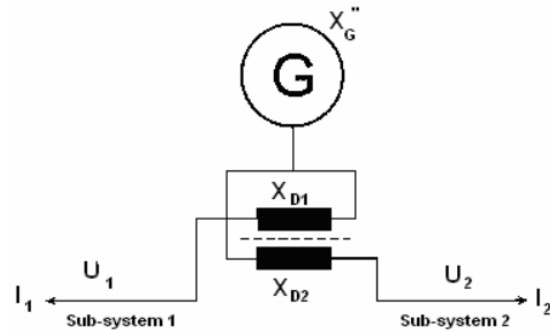
Σχήμα 2.37. Συμπεριφορά ρεύματος διαταραχής (I_{THD}) σε σχέση με το φορτίο 18-παλμικού ρυθμιστή (18-pulse drive) για α) μηδενική ανισορροπία και β) ανισορροπία 2% [22, Sect.10, fig.38]



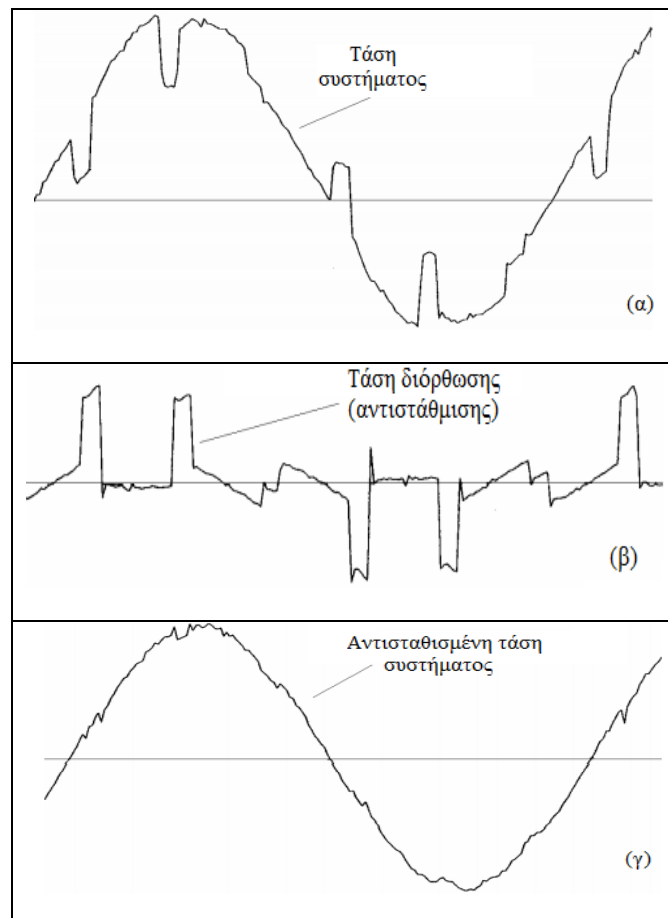
Σχήμα 2.38. Συμπεριφορά ρεύματος διαταραχής (I_{THD}) σε σχέση με την τάση υποβάθρου (V_{THD}) του συστήματος για α) 50% και β) 100% φορτίο [[22, Sect.10, fig.39]

2.27.6 Διάταξη διπλής επαγωγικής αντίδρασης (Duplex reactor)

Όπως απεικονίζεται και στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.35), η βασική διάταξη της διπλής επαγωγικής αντίδρασης αποτελείται από 2 επαγωγικές αντιδράσεις-πηνία (πρωτεύον και δευτερεύον) συνδεδεμένα το καθένα σε σειρά με τον ζυγό τροφοδοσίας (ή κατευθείαν με τη γεννήτρια) και σε αντί-παράλληλη σύνδεση μεταξύ τους, αλλά διατηρώντας στενή μαγνητική σύζευξη ανάμεσά τους. Η σύζευξη αυτή επιτρέπει στο δευτερεύον πηνίο να επέμβει στη λειτουργία του πρωτεύοντος παρέχοντας μια τάση διόρθωσης (αντιστάθμισης) κατά την αποτυχία παραγωγής κυματομορφής τάσης του πρώτου πηνίου (τάση συστήματος) εκτός των επιτρεπτών ορίων διακύμανσης αυτής κατά τη διάρκεια κάθε χρονικής περιόδου.



Σχήμα 2.39. Διάταξη διπλής επαγωγικής αντίδρασης (duplex reactor) [[22, Sect.10, fig.21]

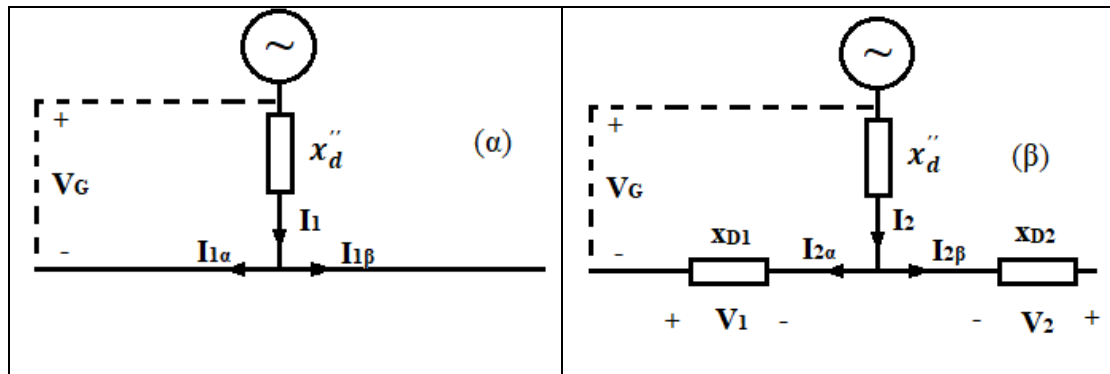


Σχήμα 2.40. Κυματομορφή τάσης α) πρωτεύοντος πηνίου (τάση συστήματος), β) δευτερεύοντος πηνίου (τάση αντιστάθμισης) και γ) τελική (αντισταθμισμένη) τάση [[22, Sect.10, fig.22 a,b,c]

Η τιμή της συνολικής αντίδρασης (x_{D1}/x_{D2} -σχήμα 2.35) της διάταξης (duplex reactor) επιλέγεται, ώστε να ισούται με τη συνολική υπομεταβατική αντίδραση των γεννητριών ($x_d'' = x_{D1}/x_{D2}$ -σχέση 2.74) σε λειτουργία, οι οποίες συνδέονται με τον ζυγό τροφοδοσίας. Επιπλέον, ο κατάλληλος λόγος μεταξύ των τυλιγμάτων των 2 πηνίων της διάταξης διπλής αντίδρασης ισούται με το αποτέλεσμα που δίνει ο λόγος της συνολικής υπομεταβατικής αντίδρασης των γεννητριών (x_d'') του συστήματος προς την επαγωγική αντίδραση του πρωτεύοντος πηνίου της διάταξης (x_{D1}). Βάσει των παραπάνω, προκύπτει ότι η συνολική αντίδραση του κυκλώματος, που δεν περιέχει τη διάταξη των αντιδράσεων ($x_{G1}'' = x_d''$), θα είναι η μισή σε σχέση με τη διάταξη

όπου παρεμβάλλεται αυτή ($x''_{G_2} = x''_d + x_{D1} // x_{D2}$). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ικανότητα βραχυκύκλωσης (I_2) του κυκλώματος που περιέχει τη διάταξη να είναι μειωμένη στο μισό της ικανότητα (I_1) του κυκλώματος χωρίς τη διάταξη.

Απόδειξη:



Σχήμα 2.41. Κύκλωμα γεννήτριας α) αρχικό (χωρίς τη διάταξη αντιδράσεων), β) νέο (με τη διάταξη αντιδράσεων) [49, fig 21]

- Υπολογισμός συνολικής αντίδρασης των 2 κυκλωμάτων:

$$\alpha) x''_{G_1} = x''_d \quad (2.75)$$

$$\beta) x''_{G_2} = x''_d + x_{D1} // x_{D2}$$

και αντικαθιστώντας τη σχέση 2.74 προκύπτει ότι:

$$x''_{G_2} = x''_d + x''_d$$

$$\text{ή } x''_{G_2} = 2x''_d \quad (2.76)$$

- Υπολογισμός ικανότητας (ρεύματος) βραχυκύκλωσης των 2 κυκλωμάτων:

$$\alpha) I_1 = \frac{V_G}{x''_{G_1}} \text{ ή}$$

$$I_1 = \frac{V_G}{x''_d} \quad (2.77\alpha)$$

$$\beta) I_2 = \frac{V_G}{x''_{G_2}}$$

και αντικαθιστώντας τη σχέση 2.76 προκύπτει ότι:

$$\text{ή } I_2 = \frac{V_G}{2x''_d} \quad (2.77\beta)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις 2 παραπάνω σχέσεις (2.75^α, 2.75^β) προκύπτει τελικά:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{V_G}{x_d}}{\frac{V_G}{2x_d}}$$

$$\text{ή } \frac{I_1}{I_2} = \frac{V_G 2x_d}{V_G x_d}$$

$$\text{ή } \frac{I_1}{I_2} = 2$$

$$\text{ή } I_2 = \frac{I_1}{2} \quad (2.78)$$

Η λειτουργία των διατάξεων διπλών αντιδράσεων εξαρτάται κυρίως από τη συνολική υπομεταβατική αντίδραση του κυκλώματος, η οποία μεταβάλλεται κατά τη σύνδεση και αποσύνδεση γεννητριών στο σύστημα και από το φορτίο που τροφοδοτεί ο κάθε κλάδος (πηνίο) της διάταξης αυτής. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που το πρωτεύον τύλιγμα είναι συνδεδεμένο σε γραμμή τροφοδοσίας ενός σημαντικά μεγάλου φορτίου (π.χ. ζυγός πρόωσης) και το δευτερεύον συνδέεται σε γραμμή όχι και τόσο έντονης φόρτισης με την προηγούμενη (π.χ. ζυγός φωτισμού) προκύπτουν αξιοπρόσεκτα θέματα στη διάταξη, αλλά και σε ολόκληρο το σύστημα. Ένα από αυτά οφείλεται στην αλλαγή που απαιτείται στον αριθμό των τυλιγμάτων των 2 πηνίων, όπου το πρωτεύον (μεγάλη φόρτιση) απαιτεί λιγότερα από ότι το δευτερεύον (μικρότερη φόρτιση). Η διαφορά αυτή οδηγεί σε μία άνιση κατανομή της τάσης μεταξύ των 2 αυτών γραμμών, η οποία όμως αντιμετωπίζεται μέσω των αντισταθμιστών (compensators) του συστήματος, διατηρώντας τη μέσα στα επιτρεπτά όρια. Η συγκεκριμένη μέθοδος περιορισμού των αρμονικών χρησιμοποιείται στα πλοία από τη δεκαετία του 80' μέχρι και σήμερα, παρόλα αυτά η απόδοσή της παραμένει σε μέτρια επίπεδα, το οποίο οφείλεται αρκετά στο γεγονός ότι δεν έχει κατανοηθεί πλήρως όσο άλλες μέθοδοι περιορισμού. [22, Sect.10]

2.28 Απαιτήσεις για περιορισμό αρμονικών σε πλοία

Κατά τη διαδικασία επιλογής ηλεκτρικού εξοπλισμού ενός πλοίου ή γενικά οποιασδήποτε θαλάσσιας και παραθαλάσσιας εγκατάστασης είναι απαραίτητη η γνώση ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών αυτού (του εξοπλισμού) από τους σχεδιαστές μηχανικούς του συστήματος αυτού. Αυτό συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη μελέτη των αρμονικών φαινομένων που ενδέχεται να προκύψουν στην εγκατάσταση και στην εύρεση μεθόδων περιορισμού και ελέγχου αυτών. Κάποια από τα κυριότερα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Αριθμός φορτίων που πρόκειται να εγκατασταθούν, ο τύπος αυτών (γραμμικά, μη-γραμμικά), η ονομαστική ισχύς (kVA) και τάση λειτουργίας και ο αριθμός παλμών (pulse number) του ανορθωτή αν πρόκειται για μη-γραμμικό φορτίο.
- Η συνολική αρμονική διαταραχή ρεύματος (I_{THD}) μέχρι την 50^η αρμονική τάξη για όλα τα μη-γραμμικά φορτία, εκτός των ανορθωτών με ενεργή είσοδο και έξοδο (active front-ends), όπου λαμβάνονται τιμές της διαταραχής ως την 100^η τάξη. Επιπλέον, απαιτείται η γνώση της συνολικής τιμής του ολικού ρεύματος διαταραχής- I_{THD} (σε ανά μονάδα τιμή) του κάθε φορτίου ή τμήματος της εγκατάστασης ανάλογα με την περίπτωση.

- Η ισοδύναμη αντίδραση ή η υπομεταβατική αντίδραση, αν η τροφοδοσία προέρχεται από μετασχηματιστή ή γεννήτρια αντίστοιχα.
- Το ρεύμα του ουδέτερου αγωγού σε ανά μονάδα τιμές (μονωμένου ή γειωμένου), στην περίπτωση συστήματος 4 αγωγών, που συνήθως εμφανίζεται σε μικρά υποσυστήματα, όπως φωτισμού. Είναι σημαντικό να αναφέρονται επίσης τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν (π.χ. ισχύς, τάση) στο συγκεκριμένο υποσύστημα για τον υπολογισμό κάθε τιμής αυτού.
- Πιθανοί τρόποι περιορισμού αρμονικών ή μείωσης της ολικής αρμονικής διαταραχής του ρεύματος και του συνολικού αρμονικού ρεύματος ως την 50^η ή 100^η τάξη, αναλόγως την περίπτωση. Οι νέες μειωμένες τιμές των μεγεθών αυτών πρέπει να είναι σε ανά μονάδα και να αφορούν είτε ολόκληρη την εγκατάσταση, είτε κάποιο τμήμα αυτής.

Κάθε μελέτη αρμονικών είναι αναγκαίο να περιλαμβάνει κάποιες βασικές πληροφορίες για την αποτελεσματικότερη και πιο ξεκάθαρη έκβασή της (εκτέλεση και εφαρμογή αυτής) στο σύστημα. Μέσα σε αυτές τις πληροφορίες περιλαμβάνονται και τα 5 χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, αφού παίζουν σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίηση μιας μελέτης αρμονικών. Ορισμένοι ακόμα, παράγοντες που είθισται να αναφέρονται είναι οι εξής:

- Η ολική αρμονική διαταραχή της τάσης (V_{THD}) του συστήματος κατά τη λειτουργία των μη-γραμμικών φορτίων υπό κανονικές συνθήκες και υπό τη χειρότερη δυνατή κατάσταση λειτουργίας τους, δηλαδή κατά τη διάρκεια ανεπαρκούς τροφοδοσίας (διακοπή λειτουργίας σημαντικού αριθμού γεννητριών). Ο υπολογισμός του μεγέθους αυτού (V_{THD}) πρέπει να πραγματοποιείται στους ακροδέκτες κάθε γεννήτριας και σε κάθε πίνακα τροφοδοσίας του συστήματος ακόμα και σε αυτούς που προορίζονται για λειτουργία σε έκτακτη ανάγκη. Όπως στο αρμονικό ρεύμα διαταραχής, έτσι και στην τάση απαιτείται η μέτρηση αυτής ως την 50^η αρμονική για τα «συμβατικά» μη-γραμμικά φορτία και ως την 100^η για αυτά που περιέχουν ενεργή είσοδο και έξοδο (active front-ends). Επίσης, είναι αναγκαία η καταγραφή της επαγωγικής αντίδρασης (για μετασχηματιστή) ή της υπομεταβατικής αντίδρασης- x_d'' (για γεννήτρια), η οποία χρησιμοποιήθηκε για τους παραπάνω υπολογισμούς.
- Όπως και κατά την παρουσίαση των χαρακτηριστικών των Σ.Η.Ε. των πλοίων, έτσι και για τη μελέτη των αρμονικών αποτελεί σημαντικό παράγοντα η εκτενής παρουσίαση διάφορων τρόπων μείωσης των αρμονικών και ειδικότερα της ολικής αρμονικής διαταραχής της τάσης. Οι τρόποι αυτοί θα πρέπει να δύναται να εφαρμοστούν στους ακροδέκτες των γεννητριών και στους πίνακες τροφοδοσίας (μόνιμης και έκτακτης λειτουργίας) του συστήματος και να φέρουν αποτελέσματα και κατά τη δυσμενέστερη λειτουργία των μη-γραμμικών φορτίων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.
- Γενική περιγραφή της χρήσης των μη-γραμμικών φορτίων και απεικόνιση της τοποθεσίας και σύνδεσής τους στο Σ.Η.Ε. της κάθε εφαρμογής, μέσω ειδικών (μονογραμμικών) σχεδίων. [22, Sect.13]

2.29 Συμπεράσματα

Οι συνεχείς ηλεκτρικές απαιτήσεις που εμφανίζονται στα πλοία έχουν οδηγήσει στη χρήση ποικίλων και σύνθετων, στην κατανόηση και λειτουργία, διατάξεων για την εξυπηρέτησή τους. Πολλές από αυτές τις διατάξεις βασίζονται ή περιέχουν μη γραμμικά στοιχεία για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων. Όμως, η πρόσφατη εμφάνιση των περισσότερων από αυτών των διατάξεων και στοιχείων, η ατελής γνώση ολόκληρου του φάσματος λειτουργιών τους και κατ' επέκταση η συχνά απρόβλεπτη αλληλεπίδρασή τους με τον υπάρχοντα ή με το νέο εξοπλισμό έχουν συμβάλλει στην εμφάνιση ποικίλων και δυσχερών ζητημάτων, τα οποία χρήζουν άμεση και αποτελεσματική επίλυση. Τέτοιου είδους ζητήματα είναι όλα αυτά που παρουσιάστηκαν στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, όπως οι διαταραχές της συμπεριφοράς-κυματομορφής των βασικών ηλεκτρικών μεγεθών (τάση, ρεύμα, συχνότητα), τα μεταβατικά φαινόμενα και οι αρμονικές συνιστώσες, με το τελευταίο να αποτελεί το μεγαλύτερο και πολυπλοκότερο. Οι αρμονικές είναι ο άμεσος απότοκος των μη-γραμμικών φορτίων, τα οποία υπάρχουν σε μεγάλο βαθμό στα Σ.Η.Ε. των πλοίων και καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια για την κατανόηση της επίδρασής τους στο κάθε ηλεκτρικό σύστημα και για την εύρεση όσο πιο αποδοτικών μεθόδων ελέγχου και περιορισμού αυτών.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Παλμικά φορτία

3.1 Εισαγωγή

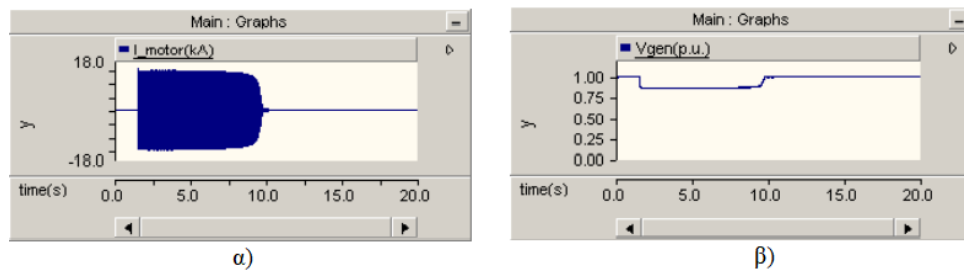
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία αναλυτική θεωρητική μελέτη των επιπτώσεων των παλμικών φορτίων στην ποιότητα ισχύος των διάφορων τμημάτων ενός Σ.Η.Ε. πλοίου. Γενικά, ως παλμικά φορτία καλούνται όσα απαιτούν για τη λειτουργία τους σημαντικά υψηλές τιμές ισχύος (της τάξης των μερικών εκατοντάδων MW) σε πολύ περιορισμένο χρονικό διάστημα (της τάξης των msec ως μερικά sec). Η λειτουργία των φορτίων αυτών είναι συνήθως περιοδική και έτσι το πρόβλημα που προκαλούν στο Σ.Η.Ε. του κάθε πλοίου χαρακτηρίζεται και αυτό ως περιοδικό. Τέτοιου είδους φορτία, κάποια από τα οποία έχουν αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο (1.7) ή θα αναλυθούν σε επόμενη παράγραφο αυτού του κεφαλαίου, είναι τα ραντάρ, τα σόναρ, τα συστήματα πρόωσης σε εξηλεκτρισμένα πλοία (All Electric Ships- AES) και τα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα εκτόξευσης, όπως οπλικά συστήματα (railguns). Η αυξανόμενη χρήση αυτών των εφαρμογών σε όλο και περισσότερα πλοία και η ανακοίνωση του αμερικανικού ναυτικού (US Navy) ότι τα ηλεκτρομαγνητικά οπλικά συστήματα πιθανόν να αποτελέσουν κύριο τμήμα του εξοπλισμού των πλοίων [29] έχει αποτελέσει επιτακτική ανάγκη την ολοκληρωτική και άμεση κατανόηση των επιπτώσεων από τα παλμικά φορτία. Μέσω της κατανόησης των επιπτώσεων αυτών είναι δυνατή η αντιμετώπιση και ο περιορισμός των προβλημάτων, λόγω των παλμικών φορτίων, σε κάθε σύστημα καθιστώντας έτσι ευκολότερη και αποτελεσματικότερη την εγκατάσταση και τη λειτουργία των παλμικών αυτών συστημάτων στα πλοία. Τέλος, ουσιαστική συνεισφορά στην επίτευξη της αντιμετώπισης του προαναφερθέντος προβλήματος έχουν και οι εκάστοτε κανονισμοί που θέτονται για την κατασκευή και τη λειτουργία των παλμικών συσκευών. (π.χ. NATO-STANAG 1008, IEEE-45, USA-ML-1399). Η συνεχής βελτίωση αυτών με βάση πραγματικά δεδομένα και μετρήσεις που λαμβάνονται κατά τη λειτουργία ποικίλων παλμικών φορτίων στα Σ.Η.Ε. πλοίων συμβάλλουν καθοριστικά στην ταχύτερη εύρεση πιο αντιπροσωπευτικών και ρεαλιστικών τρόπων αντιμετώπισης των επιπτώσεων των παλμικών φορτίων.

3.2 Είδη φορτίων που συμπεριφέρονται ως παλμικά

3.2.1 Βοηθητικό σύστημα πρόωσης (Thrusters)

Το σύστημα αυτό απαρτίζεται από συγκεκριμένο αριθμό προωθητήρων τοποθετημένων σε σημεία του πλοίου, όπως η πλώρη και η πρύμνη με σκοπό τη βελτίωση του χειρισμού και ελέγχου του πλοίου κατά τη λειτουργία χειρισμών. Οι συγκεκριμένοι προωθητήρες αποτελούνται από έναν ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα ο καθένας, αρκετά μεγάλης ισχύς λειτουργίας (0,5-2,5MW), ο οποίος περιστρέφει μία προπέλα ελεγχόμενης κλίσης (controlled pitch). Κατά την εκκίνηση των κινητήρων εμφανίζεται έντονη ενεργειακή απαίτηση από το Σ.Η.Ε. του πλοίου, διότι σε αυτή τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας τους (15-20sec), οι κινητήρες απορροφούν σημαντικά ποσά ρεύματος (ρεύματα εκκίνησης-inrush currents) που κυμαίνονται μεταξύ 4-7 φορές του ονομαστικού ρεύματος λειτουργίας τους. Επιπλέον, κατά την κατάσταση αυτή (εκκίνηση) απαιτείται από τις γεννήτριες, η παραγωγή μεγάλων τιμών ενεργού και άεργου ισχύος και επομένως η λειτουργία αυτών με μειωμένο συντελεστή ισχύος, μία κατάσταση την οποία υπάρχει πιθανότητα να μην μπορούν να καλύψουν με αποτέλεσμα να οδηγούνται σε κατάσταση υπερφόρτισης ή διακοπής. Τα μεγάλα ρεύματα εκκίνησης των προωθητήρων προκαλούν στο δίκτυο έντονες πτώσεις τάσης και στις 3 φάσεις αυτού (συμμετρική τριφασική πτώση τάσης-symmetrical voltage dips to all 3phases). Το φαινόμενο αυτό (της πτώσης τάσης) επιδεινώνεται

και λόγω του μεγάλου μήκους των αγωγών τροφοδοσίας και άρα της αυξημένη επαγωγικής αντίδρασης αυτών, αφού οι κινητήρες είναι εγκατεστημένοι σε μεγάλες αποστάσεις από το ηλεκτροστάσιο (χώρος τοποθέτησης γεννητριών) του πλοίου, κάτι το οποίο αποτελεί σοβαρό ζήτημα και απαιτείται η μελέτη και η εύρεση τρόπων αντιμετώπισης αυτού από το στάδιο του σχεδιασμού. Στην εμφάνιση των παραπάνω φαινομένων (μεγάλα ρεύματα εκκίνησης, πτώση τάσης) συμβάλλει η λειτουργία και η θέση της προπέλας του κάθε προωθητήρα. Δύο από τους βασικότερους παράγοντες αυτών (των προπελών) που επιβαρύνουν το σύστημα είναι η αδράνεια και η κλίση τους (η γωνία μεταξύ της νοητής ευθείας κατά μήκος του πλοίου και της θέσης που έχουν στραφεί οποιαδήποτε στιγμή) κατά την εκκίνησή τους. Η κλίση (θέση) της προπέλας πριν την αρχική λειτουργία της είναι στις 0°, δηλαδή έτοιμη να ωθήσει το πλοίο σε ευθεία πορεία και αυτό συμβαίνει, ώστε κατά την εκκίνηση αυτής να εμφανίζεται η μικρότερη δυνατή αντίσταση και άρα μειωμένη ισχύς εκκίνησης. Οι απότομες εναλλαγές της κλίσης των προωθητήρων κατά τη λειτουργία χειρισμών, μπορεί να προκαλέσουν διαταραχή στην ισχύ τροφοδοσίας και σε συνδυασμό με τα προαναφερθέντα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη λειτουργία των προπελών, παρομοιάζουν τη συμπεριφορά των παλμικών φορτίων. Ο συγκεκριμένος τύπος ελέγχου και χειρισμών των πλοίων εφαρμόζεται σε αυτά, τα τελευταία 20 χρόνια και η εκτενέστερη χρήση τους στο μέλλον θα συμβάλλει ακόμα περισσότερο στην ενίσχυση του εξηλεκτρισμού των πλοίων. [32]



Σχήμα 3.1. Κυματομορφές α) ρεύματος και β) τάσης κατά την εκκίνηση ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα ονομαστικής ισχύος 1MW [32, fig. 2]

3.2.2 Επαγωγικό σύστημα εκτόξευσης βλήματος αποτελούμενο από πηνία (inductive coilgun)

Η λειτουργία της συγκεκριμένης συσκευής εκτόξευσης είναι παρόμοια με αυτή του ηλεκτρομαγνητικού κανονιού (railgun-παράγραφος 3.3.3.), αλλά διαφέρουν ως προς τη δομή τους. Πιο αναλυτικά, οι συσκευές αυτές (coilguns) απαρτίζονται από μία σειρά τμημάτων, τα οποία περιέχουν πηνία (coil energized in polyphase) δημιουργώντας μία ομοαξονική διάταξη (σταθερό μέρος συστήματος) που αποτελεί τον αγωγίμο κυλινδρικό χώρο επιτάχυνσης του εκτοξευόμενου αντικειμένου (projectile). Η τροφοδοσία του κάθε τμήματος πηνίων της διάταξης αυτής πραγματοποιείται από ξεχωριστή γεννήτρια αμετάβλητης ταχύτητας (freewheel generator) και οι τιμές της συχνότητας και της τάσης λειτουργίας των πηνίων των τμημάτων αυτών είναι μικρότερες στο σημείο εκκίνησης επιτάχυνσης του βλήματος και αυξάνονται μέχρι να φτάσουν στη μέγιστη τιμή τους στο στόμιο του συστήματος εκτόξευσης. Η επιτάχυνση του βλήματος επιτυγχάνεται μέσω της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης (δύναμη Lorentz). Η δύναμη Lorentz που ασκείται σε ένα ηλεκτρικό φορτίο υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (3.1)$$

όπου q : ηλεκτρικό φορτίο (b-Coulomb)

\vec{E} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (V/m)

\vec{u} : ταχύτητα φορτίου (m/sec)

\vec{B} : μαγνητική επαγωγή του μαγνητικού πεδίου (T)

Η επιτάχυνση αυτού (του βλήματος) δεν γίνεται άμεσα, αλλά μέσω ενός δεύτερου πηνίου (οπλισμός-armature), ομοαξονικού με τα πηνία που περιέχονται στα τμήματα του σταθερού μέρους του συστήματος. Η δημιουργία μαγνητικού πεδίου από τα πηνία του σταθερού μέρους ωθεί το δεύτερο (κινούμενο) πηνίο αξονικά κατά μήκος του κυλινδρικού χώρου επιτάχυνσης του συστήματος και έτσι πραγματοποιείται η έμμεση επιτάχυνση του βλήματος. Με άλλα λόγια, στο δεύτερο πηνίο (οπλισμό) ενός επαγωγικού οπλικού συστήματος εκτόξευσης επάγεται ηλεκτρικό ρεύμα κατά τη συνεχή αλλαγή της μαγνητικής ροής των πηνίων του σταθερού μέρους. Από την αλληλεπίδραση του συγκεκριμένου επαγόμενου ρεύματος, με το μαγνητικό πεδίο που έχει δημιουργηθεί από τα πηνία του σταθερού μέρους προκύπτει ηλεκτρομαγνητική δύναμη (\vec{F}) επιτάχυνσης του δεύτερου πηνίου ανά μονάδα όγκου ίση με:

$$\vec{F} = \vec{B} \times \vec{I} \times \vec{l} \quad (3.2)$$

όπου \vec{I} : πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος (A/cm²)

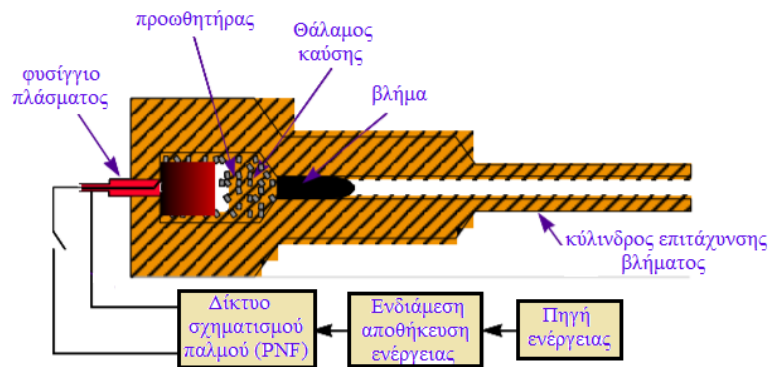
\vec{B} : μαγνητική επαγωγή του μαγνητικού πεδίου (T)

\vec{l} : μήκος αγωγού (cm)

Ο βαθμός απόδοσης της μετατρεπόμενης ενέργειας (average energy conversion efficiency) κατά τη μετατροπή αυτής από αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια στις συστοιχίες πυκνωτών ως την κινητική ενέργεια του βλήματος συμπεριλαμβανομένης της ανάκτησης ενέργειας της συστοιχίας (recovery back into the bank) υπολογίζεται στο 54% (31-INTRODUCTION V., pg 162). Η μέθοδος εκτόξευσης αυτή εφαρμόζεται συνήθως για την εκτόξευση σωμάτων μεγάλης μάζας με αρκετά μεγάλη ταχύτητα, αλλά μπορεί να επιτευχθεί και εκτόξευση με πολύ υψηλή ταχύτητα (hypervelocity). [31-INTRODUCTION V.,33-INTRODUCTION C., 34-Κεφ.11]

3.2.3 Ηλεκτρο-θερμοχημική προώθηση (Electro-thermochemical propulsion-ETC)

Η διαδικασία της ηλεκτρο-θερμοχημικής προώθησης αποτελεί μία ακόμα μέθοδο επιτάχυνσης (εκτόξευσης) στερεών προωθητικών σωμάτων (solid propellants) χρησιμοποιώντας ως εναρκτήριο μέσο της εκτόξευσης μία ιδιαίτερη κατάσταση της ύλης, που εμφανίζεται όταν το αέριο του υδρογόνου βρίσκεται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία και πίεση, το πλάσμα. Η χρήση πλάσματος συντελεί στη βελτίωση της απόδοσης των συσκευών εκτόξευσης και γίνεται συνεχής έρευνα για την αλληλεπίδραση αυτού με τα διάφορα υλικά των εκτοξευόμενων σωμάτων (στερεά προωθητικά). Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η χημική και θερμική επίδραση και η επίδραση λόγω ακτινοβολίας (UV-IR) του πλάσματος στα στερεά προωθητικά. Το αποτέλεσμα των ερευνών αυτών έχουν δείξει ότι εκτός των τριών παραπάνω φαινομένων καταπόνησης των εκτοξευόμενων σωμάτων (UC-IR) μεγάλη επίδραση σε αυτά έχει η ακτινοβολία του πλάσματος, από την οποία προκαλούνται προβλήματα, όπως ραγίσματα στα σώματα προς εκτόξευση και αύξηση της επιφάνειας που επηρεάζεται (increased surface area for reaction). [31-INTRODUCTION V.]



Σχήμα 3.2. Αρχή λειτουργίας διάταξης ηλεκτρο-θερμοχημικής προώθησης[35, fig.1]

3.2.4 Ηλεκτρομαγνητικό κανόνι (railgun)

Πρόκειται για ένα είδος ηλεκτρομαγνητικού οπλικού συστήματος, το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό παλμικό φορτίο, λόγω της απαίτησης αυξημένης ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρό χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, η ενεργειακή απαίτηση για την εκτόξευση του βλήματος του συστήματος αυτού είναι 160MJ σε χρονικό διάστημα 10msec, κάτι το οποίο είναι πρακτικά αδύνατο να επιτευχθεί με απευθείας τροφοδοσία από το σύστημα γεννητριών του πλοίου. Η περιστροφή των γεννητριών πραγματοποιείται μέσω αεροστροβιλικών μηχανών (Gas Turbine Alternators-GTA), οι οποίες καλούνται να καλύψουν την ορθή λειτουργία του ηλεκτρομαγνητικού κανονιού, αλλά και τους υπόλοιπους καταναλωτές σε ένα πλοίο. Με βάση τη δημοσίευση [30] έχει διαπιστωθεί ότι ένας αρκετά μεγάλος αεροστρόβιλος είναι ικανός να τροφοδοτήσει ένα ηλεκτρομαγνητικό κανόνι κατά τη λειτουργία του με την ποιότητα της ισχύος να βρίσκεται εντός των επιτρεπόμενων τιμών. Η ποιότητα ισχύος διατηρείται επίσης, για ορισμένα κατ' εξαίρεση (exceptional) φορτία σύμφωνα με το πρότυπο STANAG 1008 Edition 9 του NATO, όμως παρατηρείται παραβίαση των περιορισμών της μεταβατικής ποιότητας ισχύος (transient quality of power supply) κατά την τροφοδοσία σε συνθήκες έντονης οπλικής λειτουργίας (firing rates). Παρόλα αυτά, για την κάλυψη της συγκεκριμένης εφαρμογής (ηλεκτρομαγνητικό κανόνι) είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας διάταξης αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (Energy Storage Device-ESD), που θα εξασφαλίζει στο κανόνι την απαιτούμενη τιμή ενέργειας στο μικρό χρονικό διάστημα που την απαιτεί. Η διάταξη αυτή μπορεί να αποτελείται από μία συστοιχία πυκνωτών, μπαταρίες, υπεραγωγία πηνία ή από συνδυασμό όλων αυτών, που φορτίζονται από τη γεννήτρια της αεροστροβιλικής μονάδας και εκφορτίζονται κατά την ενεργοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής συσκευής. Το σύστημα αυτό αποτελεί σημαντικό τμήμα της οπλικής συσκευής, αλλά και ολόκληρου του Σ.Η.Ε. του πλοίου, αφού η (αυξημένη) χωρητικότητα αυτού (του συστήματος) συμβάλλει στη διατήρηση της ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος εντός των επιτρεπτών ορίων λειτουργίας. Κατά το πρώτο στάδιο μεταφοράς της ενέργειας προς το ηλεκτρομαγνητικό κανόνι, η χημική ενέργεια που περιέχεται στο καύσιμο αναμειγνύεται με το συμπιεσμένο αέρα εισέρχονται στο θάλαμο καύσης της αεροστροβιλικής μονάδας, ώστε το παραγόμενο καυσαέριο να χρησιμοποιηθεί για την περιστροφή του αεροστροβίλου. Με τη σειρά του, ο αεροστρόβιλος περιστρέφει τη γεννήτρια με την οποία είναι συνδεδεμένος για την τελική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία θα αποθηκευτεί στη διάταξη αποθήκευσης (ESD). Στο δεύτερο στάδιο μεταφοράς, η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια της διάταξης αποθήκευσης μέσω του δικτύου μεταφοράς της ενέργειας από τις γεννήτριες ως την αποθηκευτική διάταξη και από αυτήν ως το ηλεκτρομαγνητικό κανόνι (Pulse Forming Network-PNF) μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητική στο ηλεκτρομαγνητικό κανόνι και τελικά σε κινητική ενέργεια που θα

επιταχύνει το βλήμα, σύμφωνα με τη δύναμη Lorentz (σχέση 3.2). Η ροή της ενέργειας που απαιτείται, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών στα διάφορα τμήματα του συστήματος που μεσολαβούν κατά τη μεταφορά αυτής προς το ηλεκτρομαγνητικό κανόνι δίνεται παρακάτω σε μορφή τύπου:

$$\triangleright \dot{m}_{fuel} - \frac{1}{2}j\omega^2 - loss(GTA + Transmission) \quad (3.3)$$

$$\triangleright \frac{1}{2}CV^2 - loss(ESD) \quad (3.4)$$

$$\triangleright \frac{1}{2}LI^2 - \frac{1}{2}mu^2 - loss(PNF + EM railgun) \quad (3.5)$$

όπου \dot{m}_{fuel} : η αναλογία της μάζας καυσίμου της αεροστροβιλικής μηχανής (mass flow rate of fuel)

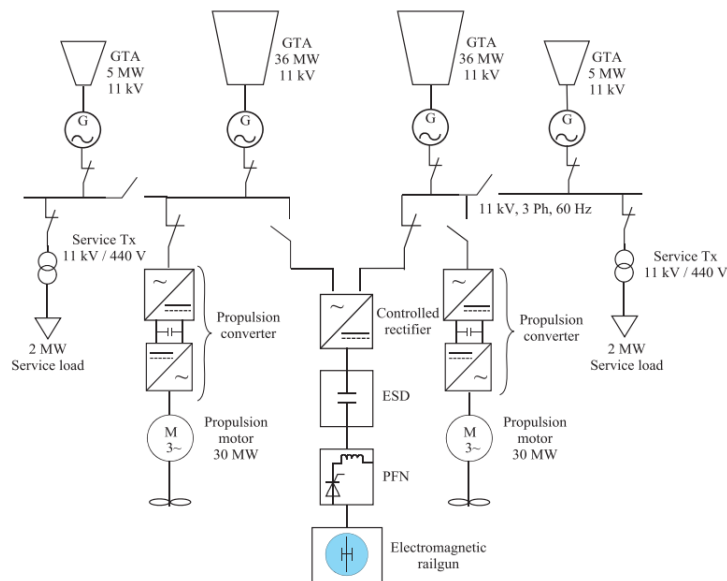
$\frac{1}{2}j\omega^2$: η αδράνεια της αεροστροβιλικής μηχανής (GTA)

$\frac{1}{2}CV^2$: η αποθηκευμένη ενέργεια του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (ESD)

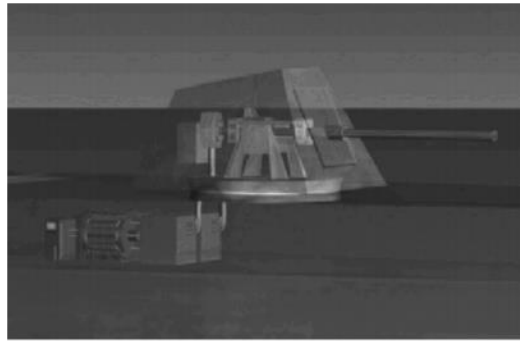
$\frac{1}{2}LI^2$: η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στο χώρο επιτάχυνσης (rail) του βλήματος

$\frac{1}{2}mu^2$: η κινητική ενέργεια του βλήματος

Με άλλα λόγια, η μεταφορά ενέργειας προς το ηλεκτρομαγνητικό κανόνι πραγματοποιείται σε 2 επιμέρους στάδια, στη φόρτιση της εκάστοτε διάταξης αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (συνήθως συστοιχίες πυκνωτών) από την αεροστροβιλική μονάδα (1^ο στάδιο) και στη διαδικασία εκτόξευσης κατά την οποία η ενέργεια μεταφέρεται από τη διάταξη αποθήκευσης προς το κανόνι και τελικά στο προς εκτόξευση σώμα-βλήμα (2^ο στάδιο). Αυτά τα 2 στάδια διακρίνονται και στην πράξη, αφού οι 2 αυτές διαδικασίες (φόρτιση και εκφόρτιση-εκτόξευση) δεν πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Κατά τη φόρτιση της αποθηκευτικής διάταξης, αυτή είναι αποσυνδεδεμένη από το ηλεκτρομαγνητικό κανόνι και κατά την εκφόρτιση αυτής στο κανόνι (διαδικασία εκτόξευσης) η αεροστροβιλική μονάδα (GTA) δεν είναι συνδεδεμένη με τη μονάδα αποθήκευσης. Το βασικό πλεονέκτημα σε αυτή τη μέθοδο των 2 σταδίων είναι η αποφυγή της έντονης καταπόνησης των γεννητριών λόγω της σημαντικής παλμικής απαίτησης κατά τη διάρκεια της εκτόξευσης. Παρόλα αυτά, μετά το πέρας της κάθε εκτόξευσης απαιτείται άμεση φόρτιση των συστοιχιών αποθήκευσης ενέργειας από τις γεννήτριες της αεροστροβιλικής μονάδας, κάτι αρκετά δυσχερές για αυτές. [30]



Σχήμα 3.3. Μονογραμμικό διάγραμμα ηλεκτρομαγνητικού κανονιού ενός Σ.Η.Ε. πλοίου [30, fig.1]



Σχήμα 3.4. Ηλεκτρομαγνητικό κανόνι 200MJ [31, fig. 5]

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά ηλεκτρομαγνητικού κανονιού (σχήματος 3.4) [31, Table]

α/α	Παράμετροι	Τιμές
1	Μάζα βλήματος	20kg
2	Ταχύτητα βλήματος	2,5km/sec
3	Ενέργεια (εκτόξευσης) Βλήματος	64MJ
4	Απαιτούμενη αποθηκευμένη ενέργεια ανά εκτόξευση	160MJ

3.3 Ανάλυση επιπτώσεων παλμικών φορτίων στα Σ.Η.Ε. πλοίων μέσω προσομοιώσεων

3.3.1 Εισαγωγή

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μία ανάλυση των επιπτώσεων των παλμικών φορτίων στην ομαλή λειτουργία ενός Σ.Η.Ε. πλοίου και πιο συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν τα προβλήματα που προκαλούνται στα ηλεκτρικά μεγέθη που καθορίζουν την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος (Power Supply Quality-PSQ) προς τα διάφορα φορτία του πλοίου. Το βασικότερο πρόβλημα εμφανίζεται κατά τη διαμόρφωση της τάσης και της συχνότητας (voltage/frequency modulation), λόγω των παλμικών φορτίων, δηλαδή η περιοδική ή ημιπεριοδική (periodic/quasi-periodic) παραμόρφωση της κυματομορφής των 2 αυτών μεγεθών, η οποία μπορεί να είναι εκτός των επιτρεπτών ορίων που θέτουν τα πρότυπα λειτουργίας (η συγκεκριμένη ανάλυση θα βασιστεί στο πρότυπο NATO Standard, STANAG 1008). Μία τέτοια κατάσταση (παραβίασης των ορίων) είναι ικανή να οδηγήσει σε δυσλειτουργία διάφορων υποσυστημάτων ενός πλοίου, όπως επικοινωνίας, ανίχνευσης (radarscopes), καθοδήγησης εκτοξευόμενων σωμάτων-βλημάτων, κ.α.. Οι τιμές παραμόρφωσης της τάσης και της συχνότητας δίνονται από τους 2 παρακάτω τύπους αντίστοιχα:

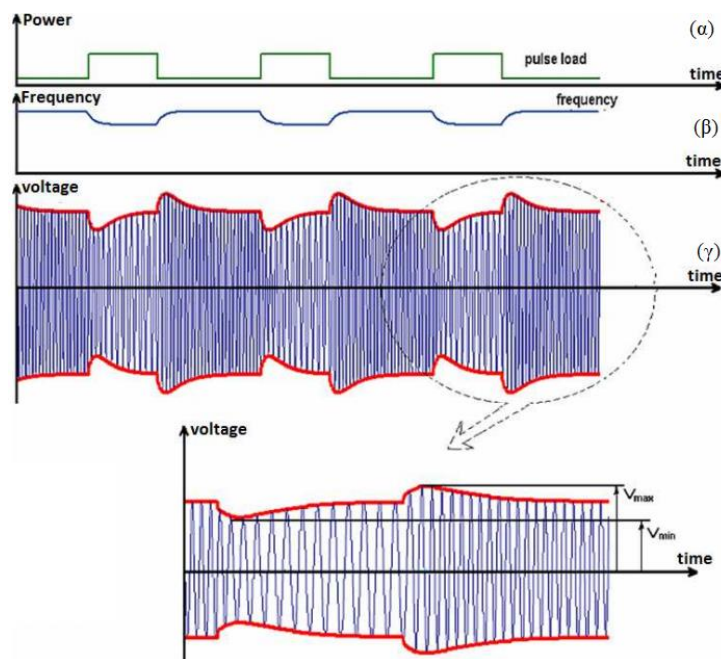
$$M_V = \frac{V_{max} - V_{min}}{2V_n} \quad (3.6)$$

$$M_f = \frac{f_{max} - f_{min}}{2f_n} \quad (3.7)$$

όπου V_{max}^* , f_{max} : οι μέγιστες τιμές της κυματομορφής της τάσης και της συχνότητας λειτουργίας αντίστοιχα
 V_{min}^* , f_{min} : οι ελάχιστες τιμές της κυματομορφής της τάσης και της συχνότητας λειτουργίας αντίστοιχα

*Οι τιμές της τάσης (V_{max} , V_{min} , V_n) μπορούν να αναφέρονται σε ενεργές (rms), μέσες (mean) ή τιμές κορυφής (peak) υπό την προϋπόθεση ότι, όταν εφαρμόζονται στον τύπο (3.6), θα λαμβάνονται και οι τρεις στην ίδια μορφή της τάσης (rms, mean, peak).

Μέχρι σήμερα οι περιορισμοί που θέτει το κάθε πρότυπο δεν αφορούν το ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης ή το τμήμα υψηλής τάσης (ενεργός πολική τάση-rms line to line voltage > 1kV) ενός εξηλεκτρισμένου πλοίου. Οι περιορισμοί που θέτει και το πρότυπο STANAG 1008 για την τιμή της τάσης και της συχνότητας παραμόρφωσης είναι 2% και 0,5% αντίστοιχα. Το πρότυπο αυτό αφορά αποκλειστικά το τμήμα χαμηλής τάσης (Low Voltage-LV) του Σ.Η.Ε. (440V, 115V, 60Hz, 400Hz), χωρίς να περιλαμβάνει το ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης (electric propulsion system) στα πλοία στα οποία υπάρχει, όπως προαναφέρθηκε. Παρόλα αυτά, στο τμήμα χαμηλής τάσης του συστήματος ενός εξηλεκτρισμένου πλοίου ισχύουν οι περιορισμοί στην παραμόρφωση τάσης και συχνότητας του STANAG 1008, αφού τα φορτία αυτού είναι παρόμοια με αυτά ενός συμβατικού Σ.Η.Ε. πλοίου, δηλαδή πλοίου που δεν περιλαμβάνει ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης.



Σχήμα 3.5. Παραμόρφωση α) κυματομορφής, β) συχνότητας και γ) τάσης κατά την περιοδική λειτουργία παλμικού φορτίου τετραγωνικής κυματομορφής (α) [23, fig. 16]

Επιπλέον, η παραμόρφωση τάσης και συχνότητας μπορεί να θεωρηθεί εντός των επιτρεπτών ορίων στην περίπτωση που ισχύουν οι 2 παρακάτω ανισότητες αντίστοιχα:

Παραμόρφωση τάσης:

$$\Delta Q < \alpha S_s \quad (3.8\alpha)$$

$$\cos\phi > \sqrt{1 - \left(\alpha \frac{1}{\Delta S}\right)^2} \quad (3.8\beta)$$

Παραμόρφωση συχνότητας:

$$\Delta P < \beta S_s \quad (3.9\alpha)$$

$$\Delta S \cdot \cos\phi < \beta \quad (3.9\beta)$$

όπου ΔQ : η άεργος ισχύς λειτουργίας του παλμικού φορτίου

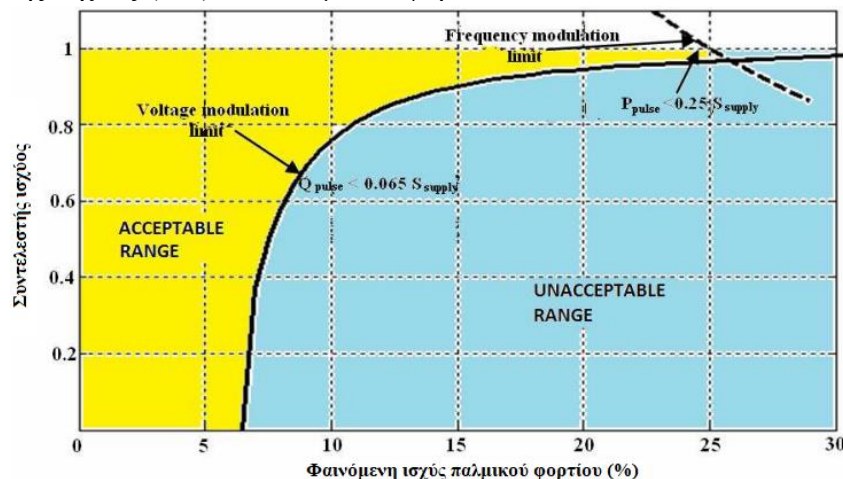
ΔP : η ενεργός ισχύς λειτουργίας του παλμικού φορτίου

S_s : η συνολική φαινόμενη ισχύς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (MVA) κατά τη λειτουργία του παλμικού φορτίου

ΔS : η σχετική φαινόμενη ισχύς του παλμικού φορτίου (pulse load relative apparent power) που περιγράφει τη φαινόμενη ισχύ του παλμικού φορτίου προς την πλήρη παρεχόμενη φαινόμενη ισχύ κατά τη λειτουργία του παλμικού φορτίου

α, β : σταθερές που καθορίζουν την επιτρεπτή περιοχή λειτουργίας (acceptable range), όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα, κατά τη λειτουργία του παλμικού φορτίου (στο πρότυπο STANAG 1008 οι τιμές αυτές είναι 0,065 και 0,25 αντίστοιχα)

$\cos\phi$: ο συντελεστής ισχύος (Σ.Ι.) του παλμικού φορτίου



Σχήμα 3.6. Καμπύλη λειτουργίας παλμικού φορτίου με βάση τις σχέσεις (3.8β) και (3.9β) [23, fig. 17]

Με βάση ανάλυση που έχει πραγματοποιηθεί σε παλιότερη μελέτη που αφορούσε το τμήμα χαμηλής τάσης ενός συμβατικού Σ.Η.Ε. πλοίου, χωρίς ηλεκτρική πρόωση [36], έχει διαπιστωθεί ότι οι περιορισμοί του κανονισμού STANAG 1008 για τα παλμικά φορτία είναι αρκετά αυστηροί. Αυτό συμβαίνει, διότι καθορίζονται βασισμένοι μόνο στη σχετική φαινόμενη ισχύ (ΔS) και το Σ.Ι. ($\cos\phi$) του παλμικού φορτίου αμελώντας πολλούς βασικούς ακόμα παράγοντες, όπως:

- την περιοδικότητα λειτουργίας του παλμικού φορτίου,
- τη διάρκεια λειτουργίας του παλμικού φορτίου σε κάθε κύκλο-περίοδο (duty cycle),
- τη μορφή (profile) του παλμικού φορτίου,
- το σημείο σύνδεσης του παλμικού φορτίου στο σύστημα,

- τη συνολική επαγωγική αντίδραση του συστήματος (υπομεταβατική αντίδραση γεννήτριας, αντίδραση μετασχηματιστών-αγωγών),
- τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των γεννητριών (τάση, συχνότητα) και των ρυθμιστών τάσης και συχνότητας αυτής,
- το φορτίο των γεννητριών κατά τη διάρκεια λειτουργίας του παλμικού φορτίου.

3.3.2 Προσομοιώσεις λειτουργίας ποικίλων Σ.Η.Ε. πλοίου με παλμικό φορτίο

Παρακάτω αναπτύσσονται 3 διαφορετικές περιπτώσεις ενός Σ.Η.Ε. πλοίου από τις οποίες, μέσω προσομοιώσεων, θα ληφθούν δεδομένα για τη διαμόρφωση της τάσης και της συχνότητας. Βασικό κριτήριο των προσομοιώσεων αυτών είναι η μελέτη της διαμόρφωσης τάσης και συχνότητας των συστημάτων λαμβάνοντας υπόψη όσες περισσότερες μεταβλητές και παραμέτρους γίνεται, όπως τα χαρακτηριστικά των διάφορων τμημάτων του Σ.Η.Ε. (γεννήτριες, μετασχηματιστές, αγωγοί, ρυθμιστές τάσης και συχνότητας, Σ.Ι. φορτίου) και του παλμικού φορτίου (διάρκεια λειτουργίας-duty cycle, περιοδικότητα, σημείο σύνδεσης στο Σ.Η.Ε.).

Η 1^η περίπτωση αφορά ένα συμβατικό Σ.Η.Ε. (χωρίς ηλεκτρική πρόωση) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Σύστημα σύγχρονων γεννητριών συνολικής παραγόμενης ισχύος 2MW, τάσης ακροδεκτών 440V και με κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που καταγράφονται στον πίνακα 3.2.
- Τριφασικό υποσύστημα εξυπηρέτησης (service load), 440V, που αποτελείται από αγωγούς μήκους L_{440} , ισοδύναμης αντίδρασης $0,03+j0,07\Omega/\text{km}$, $\Sigma.I.=0,8$, συντελεστή καταναλισκόμενης ισχύος n_{LV440} (όπου $n_{LV440} = \frac{\text{φαινόμενη ισχύς του εκάστοτε (440V) υποσυστήματος}}{\text{συνολική φαινόμενη ισχύς τροφοδοσίας προς όλα (2) υποσυστήματα}}$).
- Τριφασικό υποσύστημα εξυπηρέτησης (service load), 115V, που τροφοδοτείται από μετασχηματιστή (Μ/Σ) υποβιβασμού (440V/115V Δ/Υ, 800KVA, $0,08+j0,04$ p.u.) και αποτελείται από αγωγό μήκους L_{115V} , ισοδύναμης αντίδρασης $0,05+j0,175\Omega/\text{km}$, $\Sigma.I.=0,8$.
- Παλμικό φορτίο, που συνδέεται στο πρώτο υποσύστημα χαμηλής τάσης (440V) με χαρακτηριστική τετραγωνική γραφική παράσταση που απεικονίζεται στο σχήμα 3.9.

Το σύστημα ελέγχου συχνότητας (governor) και ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης (Automatic Voltage Regulator-AVR), τα οποία είναι ίδια και για τις 3 περιπτώσεις, απεικονίζονται στα σχήματα 3.8α και 3.8β αντίστοιχα.

Η 2^η και 3^η περίπτωση αφορούν ένα εξηλεκτρισμένο (AES) σύστημα πλοίου (με ηλεκτρική πρόωση) και αποτελούνται από πανομοιότυπα Σ.Η.Ε. με ίδια χαρακτηριστικά σε κάθε τμήμα, όπως παρουσιάζονται παρακάτω για κάθε περίπτωση. Η διαφορά μεταξύ τους βρίσκεται στο σημείο σύνδεσης του παλμικού φορτίου, όπου στη 2^η περίπτωση συνδέεται στο τμήμα χαμηλής τάσης (440V) του Σ.Η.Ε., ενώ στην 3^η περίπτωση συνδέεται στο τμήμα υψηλής τάσης (4160V) αυτού.

- Σύστημα σύγχρονων γεννητριών συνολικής παραγόμενης ισχύος 35MW, τάσης ακροδεκτών 4160V και με κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.
- Υποσύστημα υψηλής τάσης (4160V) για την τροφοδοσία του συστήματος πρόωσης (και του παλμικού φορτίου στην 3^η περίπτωση), που αποτελείται από αγωγό μήκους L_{HV} , ισοδύναμης αντίδρασης $0,0375+j0,0875\Omega/\text{km}$ και συντελεστή καταναλισκόμενης ισχύος n_{HV} .
- Υποσύστημα χαμηλής τάσης (440V), που τροφοδοτείται από Μ/Σ υποβιβασμού (4160V/440V Δ/Υ, 14MVA, $0,01+j0,05$ p.u.) και αποτελείται από αγωγό μήκους L_{LV440} , ισοδύναμης αντίστασης $0,075+j0,175\Omega/\text{km}$, $\Sigma.I.=0,75$ και συντελεστή καταναλισκόμενης ισχύος n_{LV440} . Στο υποσύστημα αυτό συνδέεται το παλμικό φορτίο στη 2^η περίπτωση. Στη 3^η περίπτωση ο Μ/Σ είναι των 4MVA.

- Υποσύστημα χαμηλής τάσης (115V), που τροφοδοτείται από Μ/Σ υποβιβασμού (4160V/115V Δ/Υ, 800kVA, 0,01+j0,05 p.u.) και αποτελείται από αγωγό μήκους L_{LV115} , ισοδύναμης αντίστασης $0,15+j0,35\Omega/km$, $\Sigma.I.=0,75$ και συντελεστή καταναλισκόμενης ισχύος n_{LV115} .
- Παλμικό φορτίο, τετραγωνικής μορφής (σχήμα 3.7), που συνδέεται στο υποσύστημα χαμηλής τάσης 440V (2^η περίπτωση) ή στο υποσύστημα υψηλής τάσης 4160V (3^η περίπτωση).

Στα ισοδύναμα μοντέλα Σ.Η.Ε. (σχήμα 3.9) τα σημεία όπου λαμβάνονται οι μετρήσεις της διαμόρφωσης τάσης έχουν επισημανθεί με τα γράμματα MP (measurement Points).

Πίνακας 3.2. Χαρακτηριστικά συστήματος γεννητριών των τριών περιπτώσεων [23, Tab.1]

Χαρακτηριστικά γεννητριών	Συμβατικό Σ.Η.Ε. πλοίου (χωρίς ηλεκτροπρόωση)	Εξηλεκτρισμένο σύστημα πλοίου (με το παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση)	Εξηλεκτρισμένο σύστημα πλοίου (με το παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση)
$S_n(MVA)$	2	35	35
$V_n(V)$	440	4160	4160
$r_a(p.u.)$	0,0036	0,00285	0,00285
$X_d(p.u.)$	1,56	1,305	1,305
$X'_d(p.u.)$	0,296	0,296	0,296
$X''_d(p.u.)$	0,177	0,150	0,150
$X_q(p.u.)$	1,06	0,475	0,475
$X''_q(p.u.)$	0,177	0,150	0,150
$X_l(p.u.)$	0,052	0,180	0,180
$T'_{do}(sec)$	3,7	1,7	1,7
$T''_{do}(sec)$	0,05	0,05	0,05
$T''_{qo}(sec)$	0,05	0,1	0,1
$H(sec)$	1,07	1,5	1,5
$F(p.u.)$	0,1	0,1	0,1
Pole pairs (-)	4	4	4

όπου S_n : ονομαστική φαινόμενη ισχύς λειτουργίας της γεννήτριας (MVA)

V_n : ονομαστική τάση λειτουργίας της γεννήτριας (V)

r_a : ισοδύναμη ωμική αντίσταση γεννήτριας (p.u.)

X_d : ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση γεννήτριας (p.u.)

X'_d : ισοδύναμη επαγωγική μεταβατική αντίδραση γεννήτριας (p.u.)

X''_d : ισοδύναμη επαγωγική υπομεταβατική αντίδραση γεννήτριας (p.u.)

X_q : ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση γεννήτριας (p.u.)

X''_q : ισοδύναμη επαγωγική υπομεταβατική αντίδραση γεννήτριας (p.u.)

X_l : ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση γεννήτριας (p.u.)

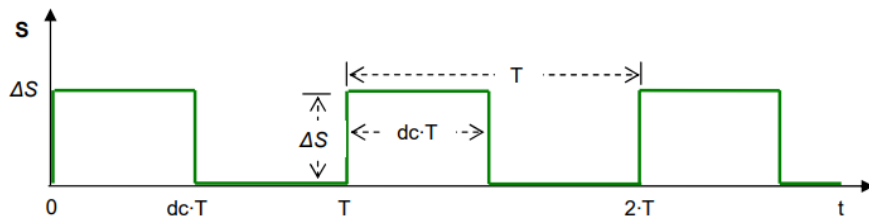
T'_{do} : σταθερά χρόνου της μεταβατικής συνιστώσας του ρεύματος της γεννήτριας (sec)

T''_{do} : σταθερά χρόνου της υπομεταβατικής συνιστώσας του ρεύματος της γεννήτριας (sec)

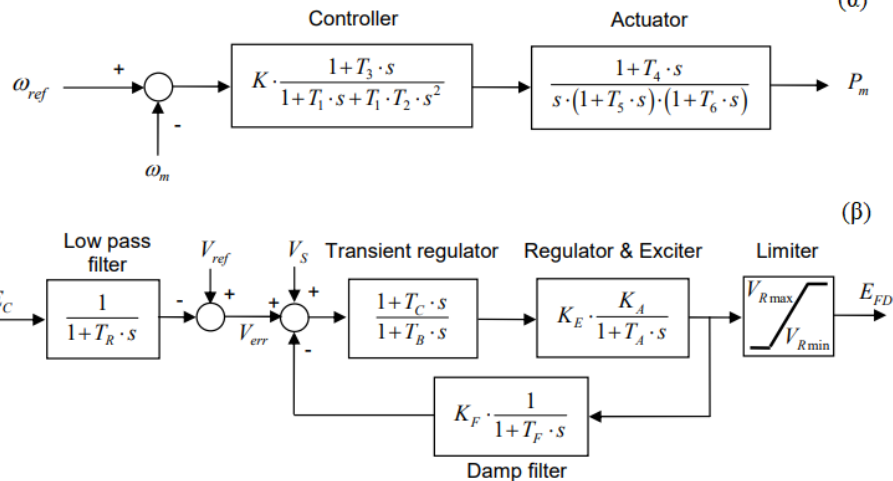
T''_{qo} : σταθερά χρόνου της υπομεταβατικής συνιστώσας του ρεύματος της γεννήτριας (sec)

H: (sec)

F: ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση γεννήτριας (p.u.)



Σχήμα 3.7. Τετραγωνική μορφή παλμικού φορτίου [23, fig.21]

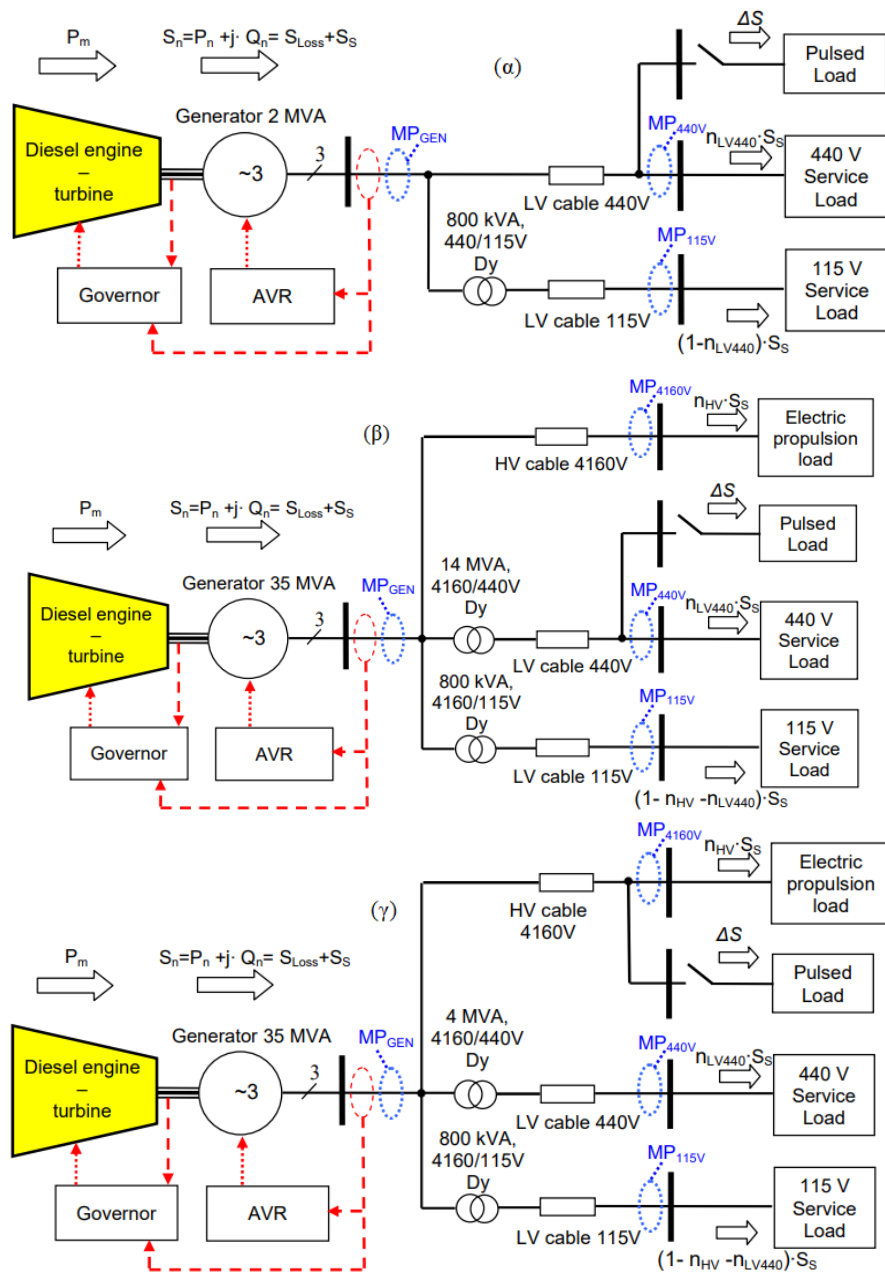


Σχήμα 3.8. (α) Σύστημα ελέγχου συχνότητας (governor) και (β) τάσης (AVR) [23, fig.22]

- όπου (α) ω_{ref} : η γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (rad/sec)
 ω_m : η μετρούμενη γωνιακή ταχύτητα (rad/sec)
 P_m : η μηχανική ισχύς εξόδου της ντιζελογεννήτριας
 (β) E_{FD} : η τάση διέγερσης (field voltage) αναφοράς
 V_{ref} : η τάση αναφοράς
 V_s : η τάση διόρθωσης (stabilization voltage signal)
 V_{err} : η τάση προς διόρθωση
 E_c : η μετρούμενη τάση

Πίνακας 3.3. Παράμετροι των 2 παραπάνω ρυθμιστών

Ρυθμιστής συχνότητας (Governor)		Ρυθμιστής τάσης (AVR)	
Παράμετροι	Τιμές	Παράμετροι	Τιμές
K	40	K_A	200
T_1 (sec)	0,01	K_E	1
T_2 (sec)	0,02	K_F	0,001
T_3 (sec)	0,2	T_A (sec)	0,001
T_4 (sec)	0,25	T_B (sec)	0
T_5 (sec)	0,009	T_C (sec)	0
T_6 (sec)	0,0384	T_F (sec)	0,1
		T_R (sec)	0,020
		V_{Rmax} (p.u.)	6,0
		V_{Rmin} (p.u.)	-6,0



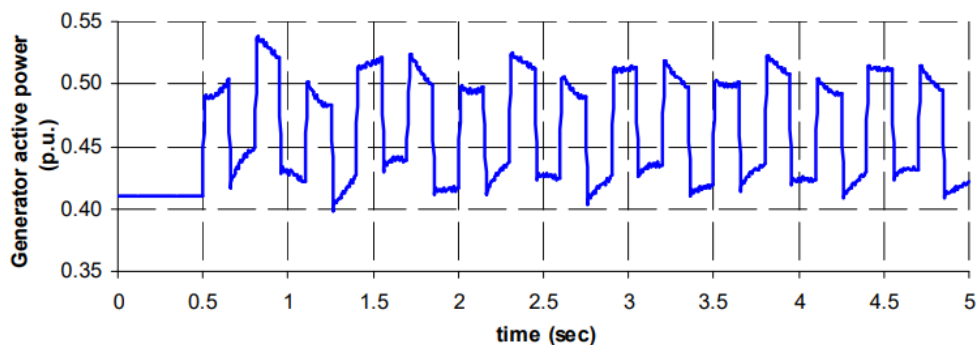
Σχήμα 3.9. Μοντέλο (α) συμβατικού Σ.Η.Ε. με το παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση και Σ.Η.Ε. εξηλεκτρισμένου πλοίου (AES) με το φορτίο συνδεδεμένο (β) στη χαμηλή και (γ) στην υψηλή τάση [23, figs 18,19,20]

3.3.3 Προσομοίωση βασικής κατάστασης λειτουργίας εξηλεκτρισμένου πλοίου (AES) με σύνδεση του παλμικού φορτίου στην υψηλή τάση

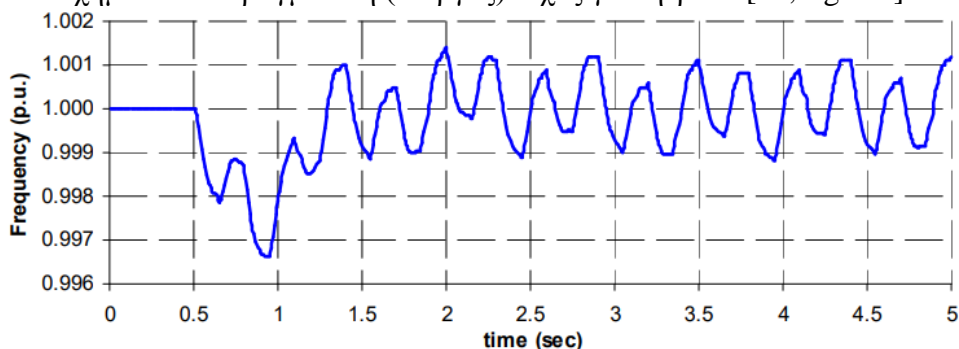
Η συγκεκριμένη προσομοίωση αφορά μία βασική κατάσταση λειτουργίας (basic scenario) ενός Σ.Η.Ε. εξηλεκτρισμένου πλοίου με το παλμικό του φορτίο συνδεδεμένο στο υποσύστημα της υψηλής τάσης. Τα χαρακτηριστικά του Σ.Η.Ε. αυτού είναι τα παρακάτω:

- Συνολικό φορτίο Σ.Η.Ε. ίσο με 0,4 p.u., όπου:
 - α) ποσοστό 85% απαιτείται στο υποσύστημα υψηλής τάσης για την τροφοδοσία της διάταξης ηλεκτροπρόωσης,
 - β) ποσοστό 10% απαιτείται στο υποσύστημα υψηλής τάσης για την τροφοδοσία των λοιπών φορτίων και
 - γ) ποσοστό 5% απαιτείται στο υποσύστημα χαμηλής τάσης για την τροφοδοσία των φορτίων αυτού.
- Συχνότητα λειτουργίας του Σ.Η.Ε. $f=60\text{Hz}$
- Μήκος αγωγού κάθε υποσυστήματος ίσο με 100m
- Παλμικό φορτίο φαινόμενης ισχύος 0,1p.u., κύκλος λειτουργίας (duty cycle) 50%, περίοδος λειτουργίας 0,3sec με χρονική στιγμή εκκίνησης τα 0,5sec από την έναρξη λειτουργίας του Σ.Η.Ε.

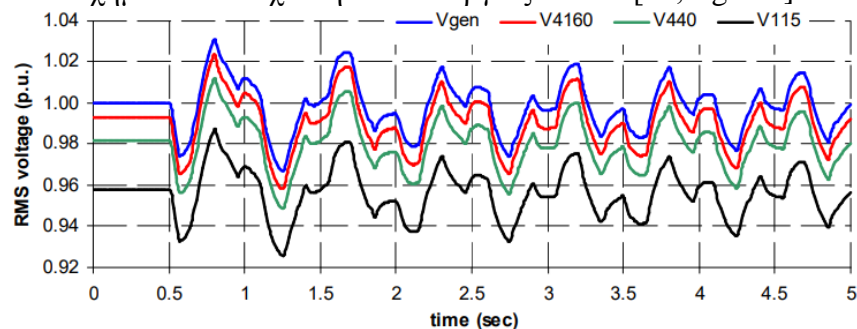
Μέσω της προσομοίωσης αυτής παρουσιάζεται η επίδραση της λειτουργίας του παλμικού φορτίου σε βασικά μεγέθη λειτουργίας του Σ.Η.Ε., όπως η συχνότητα, η τάση στα διάφορα υποσυστήματά του και η παραγόμενη πραγματική ισχύς των γεννητριών. Παρά τη συνεισφορά των συστημάτων ελέγχου τάσης και συχνότητας στην επαναφορά και παραμονή των ελεγχόμενων μεγεθών εντός των επιτρεπτών ορίων, εξακολουθεί να παρατηρείται διαταραχή στα μεγέθη αυτά, όπως απεικονίζεται και στα διαγράμματα των παρακάτω σχημάτων:



Σχήμα 3.10. Πραγματική (ενεργός) ισχύς γεννητριών [23, fig.24a]



Σχήμα 3.11. Συχνότητα λειτουργίας Σ.Η.Ε. [23, fig.24b]



Σχήμα 3.12. Ενεργές (RMS) τιμές τάσης σε όλους τους ζυγούς του Σ.Η.Ε. (γεννήτριας- V_{gen} , υψηλής τάσης- V_{4160V} , χαμηλής τάσης 440- V_{440V} , χαμηλής τάσης 115V- V_{115V}) [23, fig.24c]

3.3.4 Γενική περιγραφή προσομοιώσεων

Για κάθε μία από τις 3 περιπτώσεις Σ.Η.Ε. που περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.3.2, θα πραγματοποιηθούν ορισμένες προσομοιώσεις λειτουργίας μεταβάλλοντας κάθε φορά μία παράμετρο του Σ.Η.Ε.. Όλες οι μετρήσεις του συστήματος πραγματοποιούνται κατά τη λειτουργία του παλμικού φορτίου για διάρκεια 2,5sec και το σημείο λήψης των μετρήσεων (MP) βρίσκεται στο ζυγό χαμηλής τάσης 440V. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών απεικονίζονται μέσω της καμπύλης που σχηματίζουν στη γραφική παράσταση με οριζόντιο άξονα τη φαινόμενη ισχύ του παλμικού φορτίου (ποσοστό επί τοις εκατό) και κάθετο άξονα το συντελεστή ισχύος του συστήματος και συγκρίνεται με την καμπύλη του κανονισμού STANAG 1008 (σχήμα 3.6, σελίδα 119). Οι τιμές της παραμόρφωσης τάσης και συχνότητας παραμένουν σταθερές σε όλες τις προσομοιώσεις και ίσες με 2% και 0,5% αντίστοιχα κατά STANAG 1008 και δίνονται ως σταθερές για κάθε σύστημα οι παράμετροι του πίνακα 3.4.

3.3.5 Προσομοίωση μεταβολής του βαθμού φόρτισης των γεννητριών

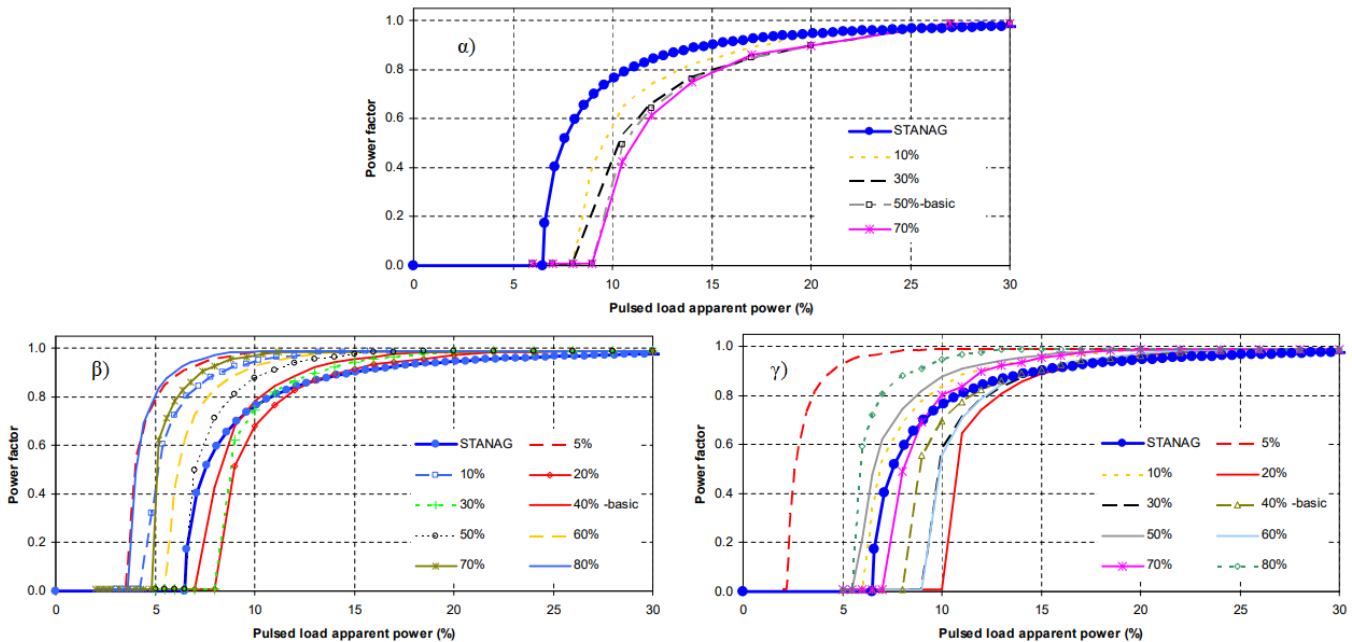
Ο βαθμός φόρτισης (service load) των γεννητριών περιγράφει τη συνολική απαίτηση ισχύος από τα φορτία ολόκληρου του Σ.Η.Ε. χωρίς όμως να περιλαμβάνει τις διάφορες απώλειες στα τμήματα αυτού (τυλίγματα γεννητριών, μετασχηματιστών και απώλειες αγωγών).

- **1^η περίπτωση (συμβατικό Σ.Η.Ε.- χωρίς ηλεκτρική πρόωση):** Στο Σ.Η.Ε. αυτό με την αύξηση του βαθμού φόρτισης η καμπύλη (Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύς) παρατηρείται μείωση της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας (σχήμα 3.6.), όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.11α.

Πίνακας 3.4. Σταθεροί παράμετροι λειτουργίας για κάθε περίπτωση [23, Tab.3]

Παράμετροι	Συμβατικό Σ.Η.Ε.	Σ.Η.Ε. εξηλεκτρισμένου πλοίου (με παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση)	Σ.Η.Ε. εξηλεκτρισμένου πλοίου (με παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση)
Συντελεστής φόρτισης των γεννητριών (χωρίς απώλειες) κατά τη λειτουργία του παλμικού φορτίου (n_{serv})	0,5	0,40	0,40
Αναλογία φαινόμενης ισχύς στην υψηλή τάση προς τη συνολική φαινόμενη ισχύ του συστήματος (n_{HV})	-	0,85	0,85
Αναλογία φαινόμενης ισχύς στη χαμηλή τάση 440 προς τη συνολική φαινόμενη ισχύ του συστήματος (n_{LV440})	0,75	0,10	0,10
Αναλογία φαινόμενης ισχύς στη χαμηλή τάση 115 προς τη συνολική φαινόμενη ισχύ του συστήματος (n_{LV115})	0,25	0,05	0,05
Συντελεστής φόρτισης	0,80	0,8	0,8
Μήκος αγωγών υποσυστήματος υψηλής τάσης L_{HV} (m)	-	100	100
Μήκος αγωγών υποσυστήματος χαμηλής τάσης L_{440} (m)	100	100	100
Μήκος αγωγών υποσυστήματος χαμηλής τάσης L_{115} (m)	50	100	100
Περίοδος παλμικού φορτίου (sec)	0,3	0,3	0,3
Κύκλος λειτουργίας παλμικού φορτίου (%)	50	50	50
Υπομεταβατική αντίδραση γεννήτριας $X_d' = X_q'$ (p.u.)	0,177	0,150	0,150
Αδράνεια γεννήτριας H (sec)	1,07	1,50	1,50
Κέρδος ρυθμιστή συχνότητας K (-)	40	40	40
Κέρδος ρυθμιστή τάσης K_A (-)	200	100	200
Πάνω όριο τάσης πεδίου γεννήτριας $V_{Rmax} = -V_{Rmin}$ (p.u.)	5,0	6,0	6,0

- **2^η περίπτωση (εξηλεκτρισμένο πλοίο-AES με παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση):** Στην περίπτωση αυτή με την αύξηση του βαθμού φόρτισης των γεννητριών παρουσιάζεται κυρίως αύξηση της μη επιτρεπόμενης περιοχής λειτουργίας και άρα η καμπύλη του κανονισμού STANAG 1008 δεν ανταποκρίνεται σε συνθήκες αυξημένης φόρτισης των γεννητριών (σχήμα 3.11β).
- **3^η περίπτωση (εξηλεκτρισμένο πλοίο-AES με παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση):** Σε αυτήν την περίπτωση για τιμές του βαθμού φόρτισης του συστήματος γεννητριών μεταξύ 20-70% διακρίνεται μείωση της επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας, ενώ για τιμές εκτός αυτού του διαστήματος (μικρότερες-μεγαλύτερες) ισχύει το αντίθετο (σχήμα 3.11γ).



Σχήμα 3.11. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές βαθμού φόρτισης των γεννητριών του Σ.Η.Ε. α) για συμβατικό σύστημα και για εξηλεκτρισμένο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 25,26,27]

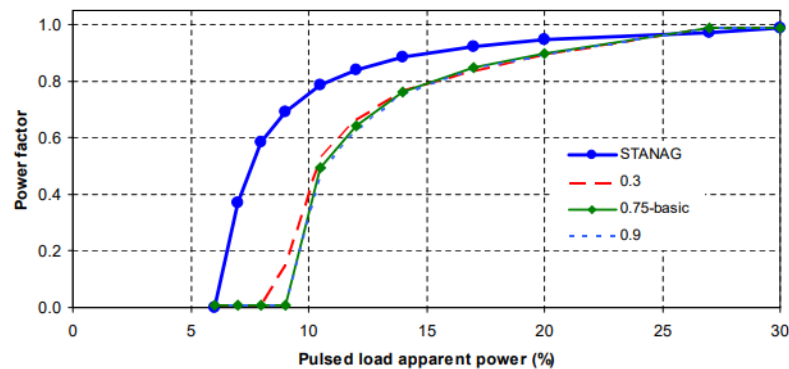
3.3.6 Προσομοίωση μεταβολής της διανομής φόρτισης στα υποσυστήματα των Σ.Η.Ε.

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.3.2. ως συντελεστής καταναλισκόμενης ισχύς κάθε υποσυστήματος ορίζεται ο λόγος της καταναλισκόμενης φαινόμενης ισχύος του αναφερόμενου υποσυστήματος προς τη συνολική καταναλισκόμενη φαινόμενη ισχύ ολόκληρου του Σ.Η.Ε.. Για τα εξεταζόμενα υποσυστήματα ισχύουν τα εξής:

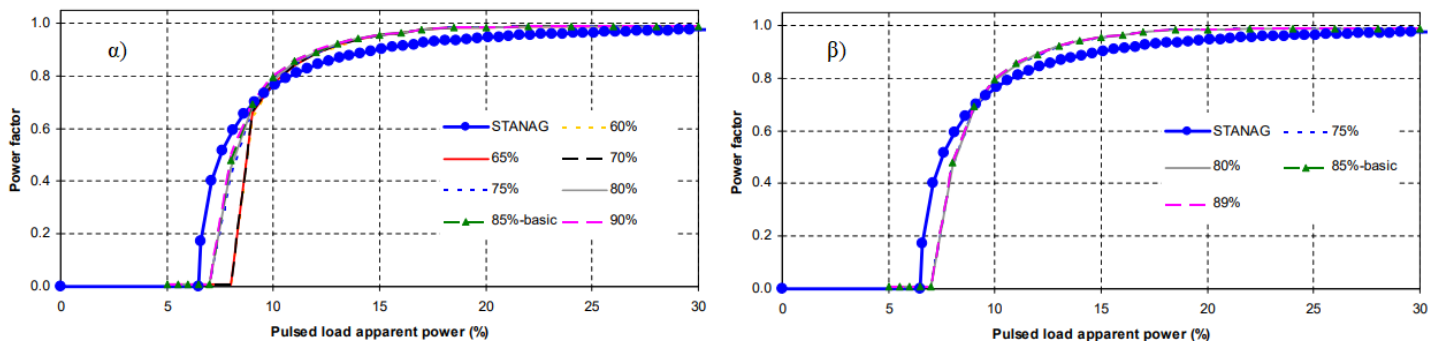
- n_{LV115} : Συντελεστής καταναλισκόμενης φαινόμενης ισχύος υποσυστήματος χαμηλής τάσης 115V
- n_{LV440} : Συντελεστής καταναλισκόμενης φαινόμενης ισχύος υποσυστήματος χαμηλής τάσης 440V
- n_{HV} : Συντελεστής καταναλισκόμενης φαινόμενης ισχύος υποσυστήματος υψηλής τάσης (4160V)
- Συμβατικό Σ.Η.Ε. (1^η περίπτωση): $n_{LV115} + n_{LV440} = 1$ (3.10)
- Εξηλεκτρισμένο Σ.Η.Ε. (2^η και 3^η περίπτωση): $n_{LV115} + n_{LV440} + n_{HV} = 1$ (3.11)

- **1^η περίπτωση:** Στη συγκεκριμένη περίπτωση προκύπτει η καμπύλη Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για τιμές n_{LV440} 30%, 75%, 90% και τιμές του n_{LV115} που προκύπτουν από τη σχέση 3.10. Οι καμπύλες που εξάγονται με βάση αυτά τα ποσοστά του n_{LV440} φαίνεται ότι για μεγαλύτερες τιμές του ποσοστού n_{LV440} αυξάνεται και η επιτρεπόμενη περιοχή λειτουργίας (σχήμα 3.12).

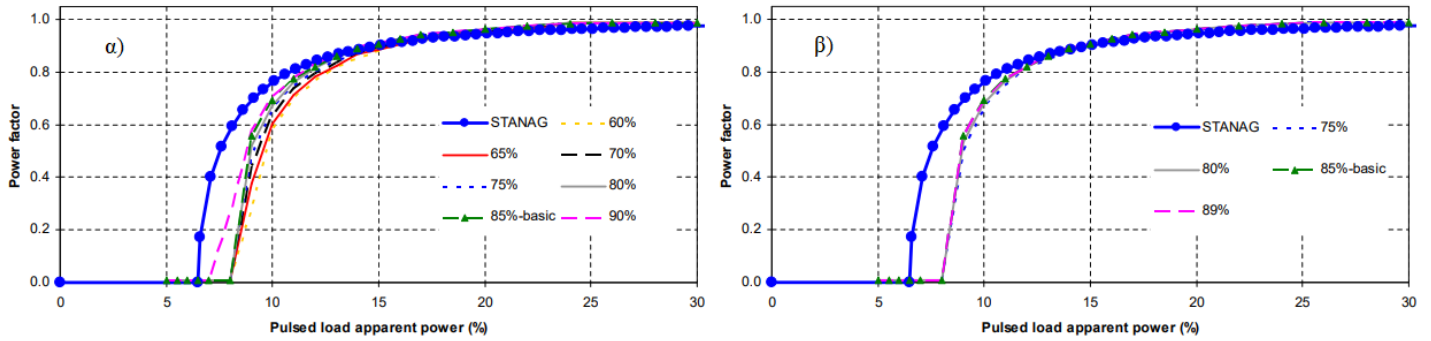
- **2^η περίπτωση:** Στο Σ.Η.Ε. αυτό το παλμικό φορτίο συνδέεται στη χαμηλή τάση 440V του εξηλεκτρισμένου πλοίου και διακρίνονται 2 υποπεριπτώσεις:
 - α) Στην 1^η υποπερίπτωση ο συντελεστής n_{LV115} θεωρείται σταθερός και ίσος με 5% και μεταβάλλεται το ποσοστό του συντελεστή n_{HV} , ενώ οι τιμές του n_{LV440} υπολογίζονται μέσω της σχέση 3.11. Οι αντίστοιχες καμπύλες που προκύπτουν δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, αλλά και σε σχέση με την καμπύλη του κανονισμού (STANAG 1008)-σχήμα 3.13α.
 - β) Στην 2^η υποπερίπτωση λαμβάνεται ως σταθερός ο συντελεστής $n_{LV440}=10\%$ και μεταβάλλεται ξανά ο συντελεστής n_{HV} με το n_{LV115} να υπολογίζεται από τη σχέση 3.11. Πάλι οι καμπύλες που διεξάγονται από την προσομοίωση αυτή ποικίλουν ελάχιστα μεταξύ τους, αλλά και σε σχέση με τη θεωρητική καμπύλη (STANAG 1008)- σχήμα 3.13β.
- **3^η περίπτωση:** Η περίπτωση αυτή, όπου εξετάζεται το σύστημα εξηλεκτρισμένου πλοίου με το παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση (HV) χωρίζεται, ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, σε 2 υποπεριπτώσεις:
 - α) Κατά την 1^η υποπερίπτωση, θεωρείται σταθερός ο συντελεστής $n_{LV115}=5\%$ και αλλάζει η τιμή του n_{HV} , ενώ και πάλι ο συντελεστής n_{LV440} προκύπτει από τη σχέση 3.11. Από αυτή τη διαδικασία γίνεται εμφανής μία μικρή αύξηση της μη επιτρεπόμενης περιοχής με την αύξηση του ποσοστού n_{HV} (σχήμα 3.14^α).
 - β) Κατά τη 2^η υποπερίπτωση, ορίζεται ως σταθερός ο συντελεστής $n_{LV440}=10\%$, ενώ μεταβάλλεται το ποσοστό του n_{HV} με τις αντίστοιχες τιμές του n_{LV115} να προκύπτουν από τη σχέση 3.11. Οι καμπύλες που προκύπτουν σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους για κάθε ποσοστό του n_{HV} και ταυτόχρονα παρατηρείται μία μικρή μείωση της μη επιτρεπόμενης περιοχής σε σχέση με τη θεωρητική καμπύλη (STANAG 1008)-σχήμα 3.14β.



Σχήμα 3.12. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές του συντελεστή n_{LV440} για συμβατικό σύστημα [23, fig. 32]



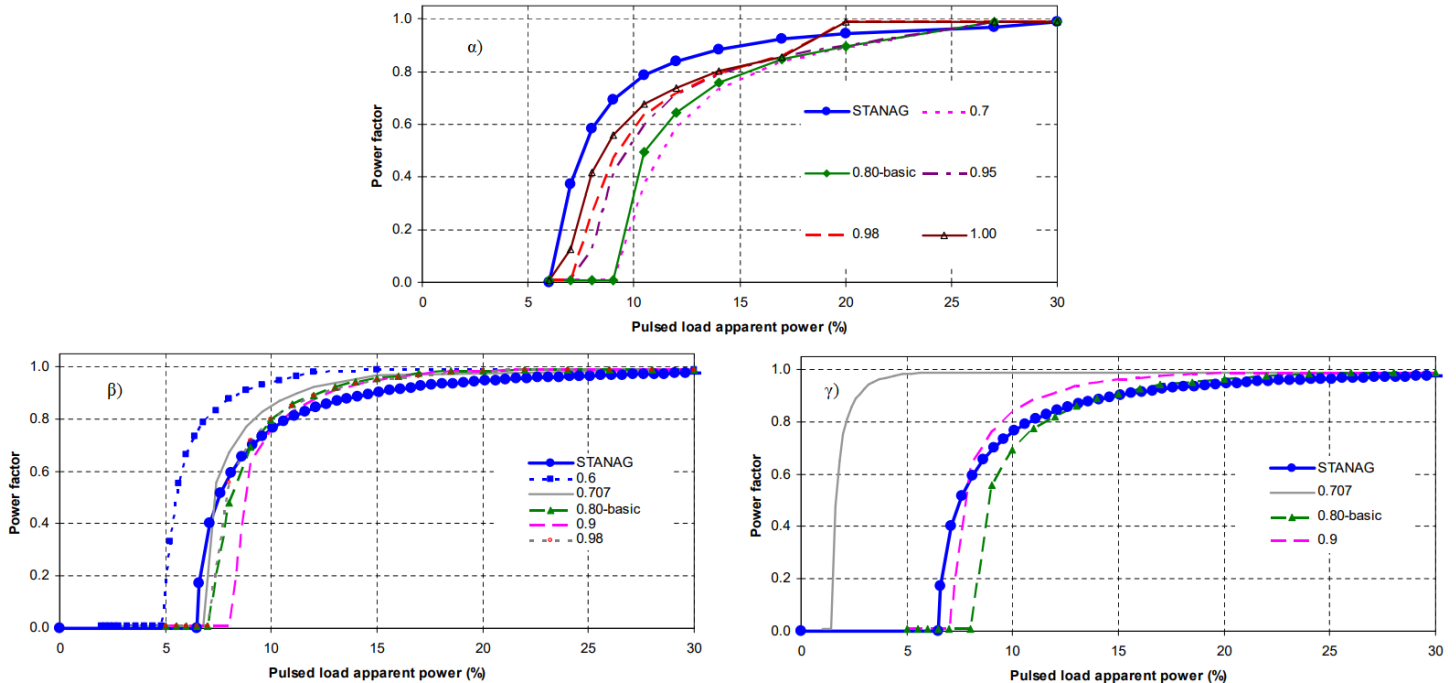
Σχήμα 3.13. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές του συντελεστή n_{HV} σε εξηλεκτρισμένο σύστημα με το παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση (LV) για σταθερό α) $n_{LV115}=5\%$ και β) $n_{LV440}=10\%$ [23, figs 30,31]



Σχήμα 3.14. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές του συντελεστή p_{HV} σε εξηλεκτρισμένο σύστημα με το παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση (HV) για σταθερό α) $p_{LV115}=5\%$ και β) $p_{LV440}=10\%$ [23, figs 28, 29]

3.3.7 Προσομοίωση μεταβολής συντελεστή ισχύος (Σ.Ι.) του φορτίου

- **1^η περίπτωση:** Στην περίπτωση αυτή του συμβατικού πλοίου, με την αύξηση του επαγωγικού Σ.Ι. των φορτίων αυτού (εκτός του παλμικού φορτίου) αυξάνεται αντίστοιχα και το εμβαδόν της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας του συστήματος (σχήμα 3.15α).
- **2^η περίπτωση:** Στο εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση (LV), η αύξηση του επαγωγικού Σ.Ι. συνεπάγεται με μείωση της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας, ενώ για τη μέγιστη τιμή του Σ.Ι. της συγκεκριμένης προσομοίωσης (0,98) παρατηρείται μικρή αύξηση αυτής (της μη επιτρεπόμενης περιοχής)-σχήμα 3.15β.
- **3^η περίπτωση:** Ομοίως και στην περίπτωση εξηλεκτρισμένου πλοίου με το παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση (HV), η αύξηση του επαγωγικού Σ.Ι. συνεπάγεται με μείωση της μη επιτρεπόμενης περιοχής, αλλά και πάλι για τη μέγιστη τιμή Σ.Ι. (0,9) υπάρχει αύξηση της περιοχής αυτής (σχήμα 3.15γ).

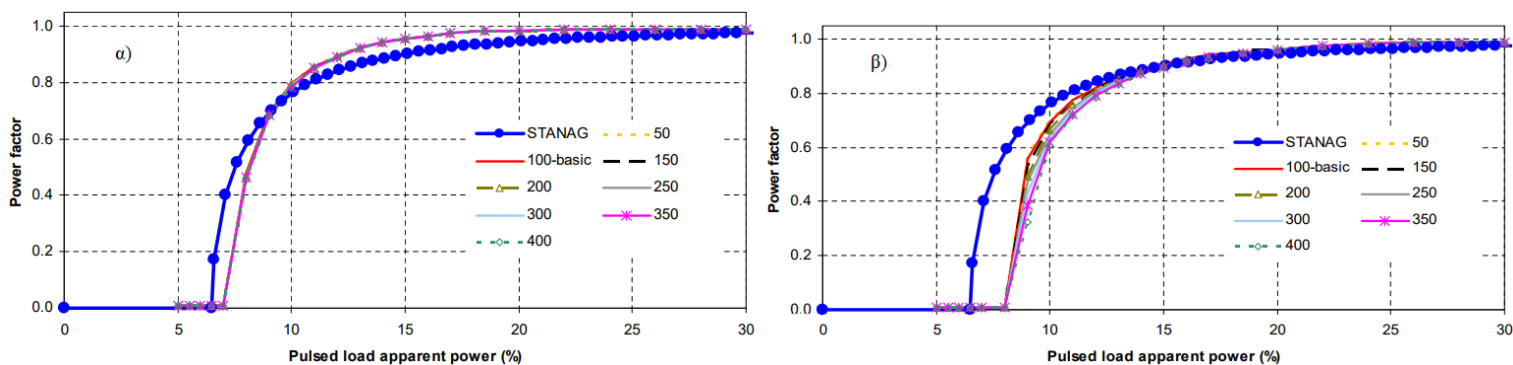


Σχήμα 3.15. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές του Σ.Ι. των φορτίων για α) συμβατικό σύστημα και για εξηλεκτρισμένο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή (LV) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 33,34,35]

3.3.8 Προσομοίωση μεταβολής μήκους αγωγών

3.3.8.1 Αγωγοί στο τμήμα υψηλής τάσης (HV) των Σ.Η.Ε. εξηλεκτρισμένου πλοίου

- **2^η περίπτωση:** Με την αύξηση του μήκους αγωγού στην υψηλή τάση και για σύνδεση του παλμικού φορτίου στη χαμηλή τάση (LV) παρατηρείται μείωση της μη επιτρεπτής περιοχής σχεδόν μέχρι την τιμή 0,7 του Σ.Ι. στη γραφική παράσταση Σ.Ι.-φαινομένου ισχύος Π.Φ., ενώ για μεγαλύτερες τιμές παρατηρείται μία ελάχιστη αύξηση αυτής (σχήμα 3.16^α).
- **3^η περίπτωση:** Με την αύξηση του μήκους αγωγού στην υψηλή τάση και για σύνδεση του παλμικού φορτίου στην υψηλή τάση (HV), όλες οι καμπύλες που προκύπτουν σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους και ως την τιμή 0,8 του Σ.Ι. παρατηρείται ελαφρά μείωση της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας, ενώ για τιμές μεγαλύτερες από αυτήν (0,8) οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται με τη θεωρητική καμπύλη (STANAG 1008)-σχήμα 3.16β.



Σχήμα 3.16. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινομένου ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές μήκους αγωγών στην υψηλή τάση (HV) εξηλεκτρισμένου πλοίου για σύνδεση του παλμικού φορτίου α) στη χαμηλή (LV) και β) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 33,34,35]

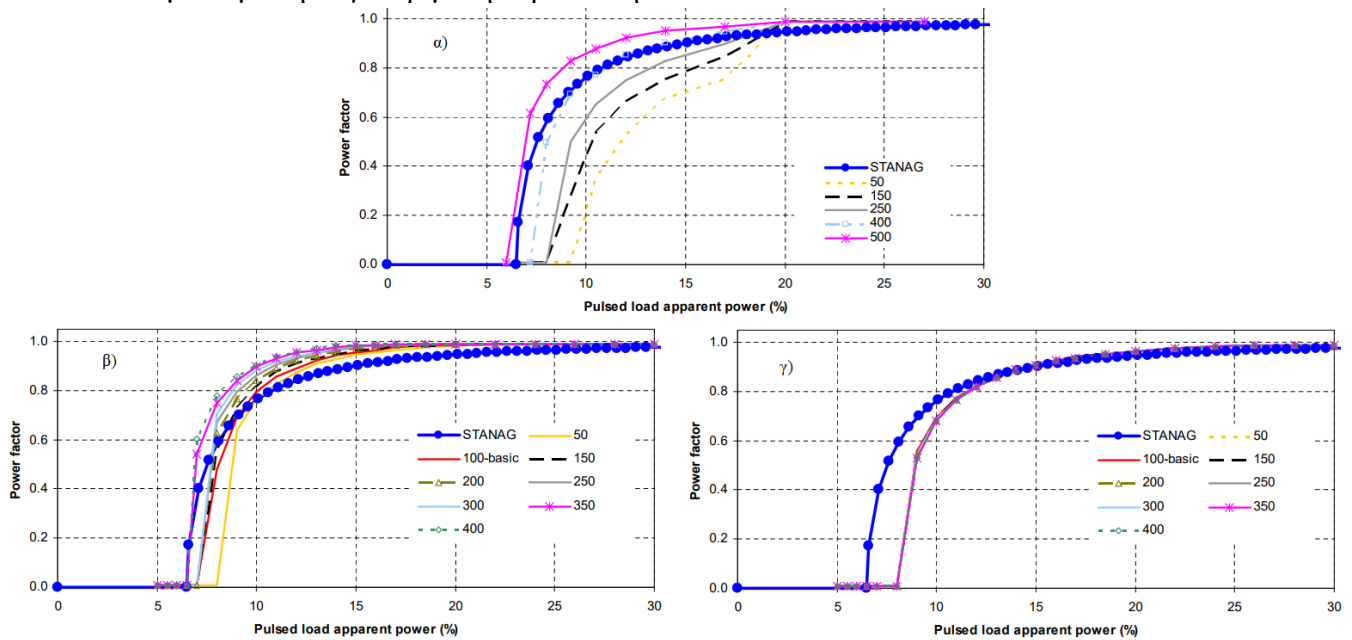
3.3.8.2 Αγωγοί στο τμήμα χαμηλής τάσης (LV) 440V

- **1^η περίπτωση:** Στο συμβατικό σύστημα, αυξάνοντας το μήκος των αγωγών παρατηρείται έντονη αύξηση της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας και αυτό συμβαίνει, διότι στο συγκεκριμένο σύστημα (συμβατικό) μεγάλο μέρος των φορτίων συνδέεται σε αυτό το υποσύστημα χαμηλής τάσης (σχήμα 3.17^α).
- **2^η περίπτωση:** Στην περίπτωση εξηλεκτρισμένου πλοίου (AES) με το παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση (LV) των 440V, παρουσιάζεται μεγέθυνση της μη επιτρεπόμενης περιοχής λειτουργίας για αντίστοιχη αύξηση του μήκους των αγωγών στο τμήμα αυτό (LV 440V), αλλά όχι τόσο έντονη όσο στην προηγούμενη (1^η) περίπτωση (σχήμα 3.17β).
- **3^η περίπτωση:** Στην περίπτωση εξηλεκτρισμένου πλοίου με το παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση (HV) οι καμπύλες που προκύπτουν σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους, ενώ παράλληλα παρατηρείται και μία μικρή μείωση της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας του συστήματος (σχήμα 3.17γ).

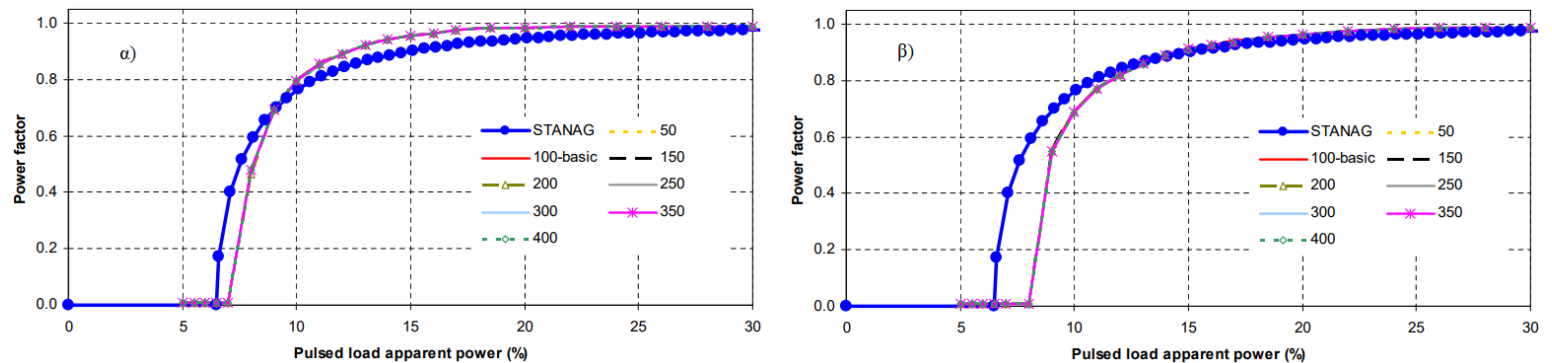
3.3.8.3 Αγωγοί στο τμήμα χαμηλής τάσης (LV) 115V

- **2^η περίπτωση:** Για το εξηλεκτρισμένο πλοίο της περίπτωσης αυτής (με το παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση 440V) για όλα τα εξεταζόμενα μήκη αγωγών οι καμπύλες που προκύπτουν ταυτίζονται μεταξύ τους, ενώ ταυτόχρονα βρίσκονται πάνω από τη μη επιτρεπτή περιοχή που ορίζει ο κανονισμός STANAG 1008 για Σ.Ι. του παλμικού φορτίου μεγαλύτερο του 0,75 (σχήμα 3.18^α).

- **3^η περίπτωση:** Για το εξηλεκτρισμένο σύστημα με το παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση (HV) παρατηρείται επίσης, πρακτικά ταύτιση των καμπυλών και μικρός περιορισμός της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας (σχήμα 3.18β). Για το συμβατικό σύστημα (1^η περίπτωση) προκύπτουν όμοια αποτελέσματα με τη συγκεκριμένη περίπτωση.



Σχήμα 3.17. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορα μήκη αγωγών στο τμήμα χαμηλής τάσης (LV) 440V για α) συμβατικό πλοίο και εξηλεκτρισμένο για σύνδεση του παλμικού φορτίου β) στη χαμηλή (LV) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 39,40,41]



Σχήμα 3.18. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορα μήκη αγωγών στο τμήμα χαμηλής τάσης (LV) 115V για εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο α) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και β) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 42,43]

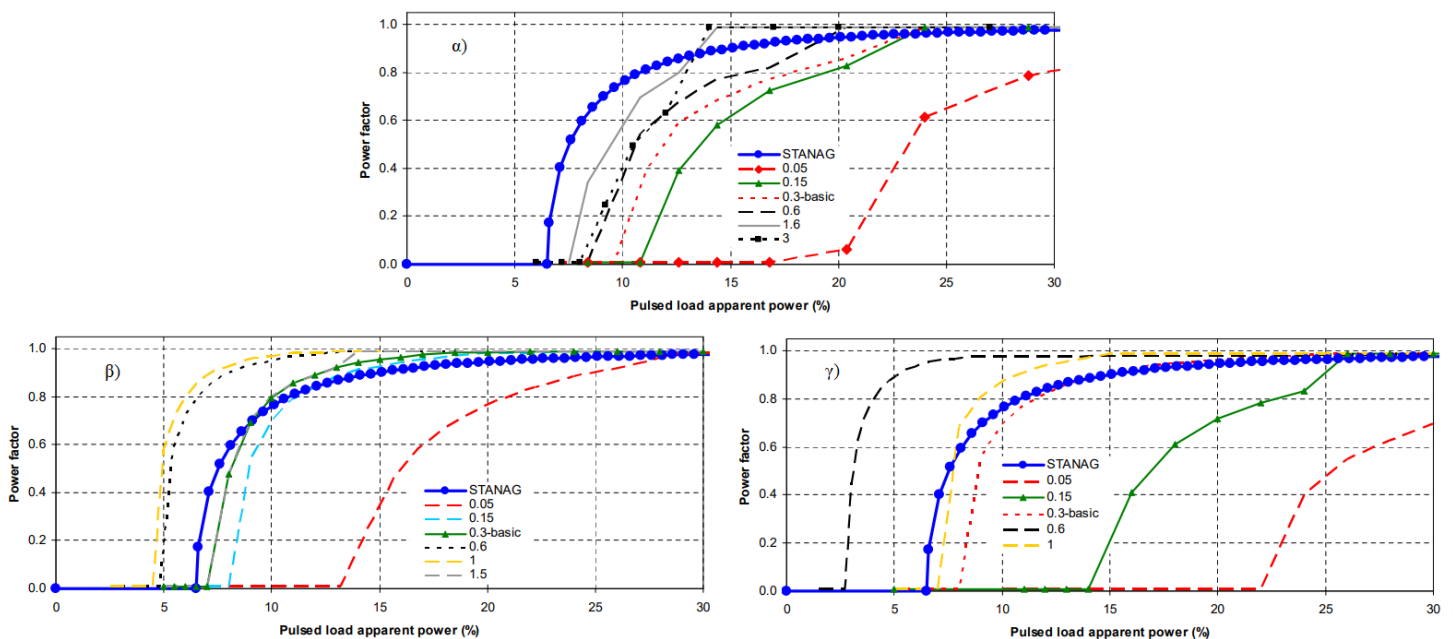
3.3.9 Προσομοίωση μεταβολής περιόδου παλμικού φορτίου

Με βάση το πρότυπο STANAG 1008 η περίοδος λειτουργίας του παλμικού φορτίου προτείνεται (request) να είναι μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος.

- **1^η περίπτωση:** Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η οποία αφορά συμβατικό σύστημα πλοίου, η αύξηση της περιόδου (περισσότερα sec) οδηγεί σε σημαντική αύξηση της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας του

συστήματος μέχρι και την τιμή $T=1,6\text{sec}$, αφού για την αμέσως μεγαλύτερη τιμή της προσομοίωσης ($T=3\text{sec}$) παρατηρείται μείωση αυτής (της μη επιτρεπτής περιοχής)-σχήμα 3.19α.

- **2^η περίπτωση:** Στην περίπτωση του εξηλεκτρισμένου πλοίου με το παλμικό φορτίο να βρίσκεται στη χαμηλή τάση (LV), η αύξηση της περιόδου του παλμικού φορτίου συνεπάγεται με μεγέθυνση της μη επιτρεπόμενης περιοχής λειτουργίας μέχρι την τιμή $T=1\text{sec}$, διότι για αμέσως μεγαλύτερη τιμή περιόδου ($T=1,5\text{sec}$) παρατηρείται ελάττωση αυτής (σχήμα 3.19β).
- **3^η περίπτωση:** Στην περίπτωση του εξηλεκτρισμένου πλοίου με το παλμικό φορτίο να βρίσκεται στην υψηλή τάση (HV), διαπιστώνεται έντονη αύξηση της μη επιτρεπόμενης περιοχής λειτουργίας μέχρι και την τιμή $T=0,6\text{sec}$, ενώ για τη τελευταία εξεταζόμενη τιμή περιόδου ($T=1\text{sec}$) η περιοχή αυτή (μη επιτρεπτή) ελαττώνεται (σχήμα 3.19γ).



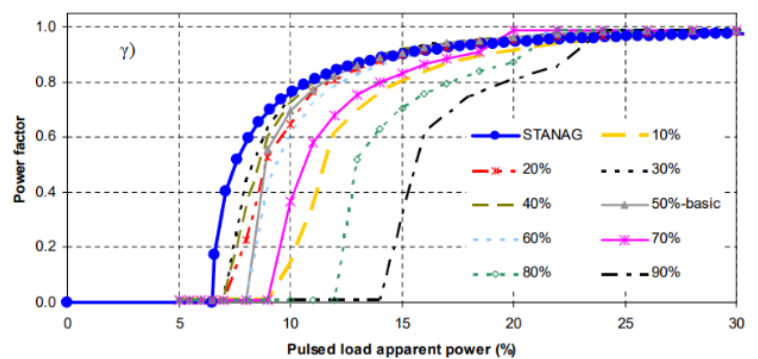
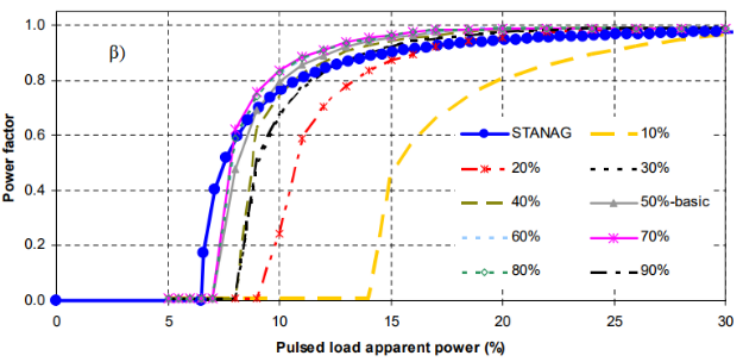
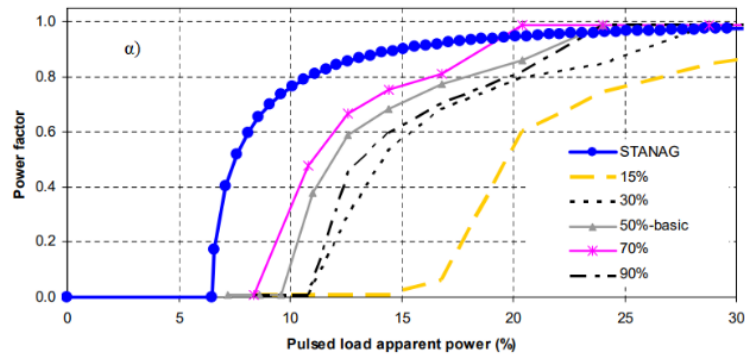
Σχήμα 3.19. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινομένης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές περιόδου λειτουργίας του παλμικού φορτίου για α) συμβατικό σύστημα και για εξηλεκτρισμένο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 44,45,46]

3.3.10 Προσομοίωση μεταβολής κύκλου λειτουργίας (duty cycle) παλμικού φορτίου

- **1^η περίπτωση:** Στην περίπτωση αυτή (συμβατικό πλοίο) για αύξηση του κύκλου λειτουργίας του παλμικού φορτίου ως 70% παρουσιάζεται μείωση της επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας, ενώ για τιμή μεγαλύτερη (90%) η επιτρεπτή περιοχή αυξάνεται αρκετά (σχήμα 3.20α).
- **2^η περίπτωση:** Σε αυτήν την περίπτωση που αφορά εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση παρουσιάζεται και πάλι μείωση της επιτρεπτής περιοχής με την αύξηση του κύκλου λειτουργίας του παλμικού φορτίου, αλλά μέχρι την τιμή 30%, ενώ για μεγαλύτερα ποσοστά η επιτρεπτή περιοχή λειτουργίας αυξάνεται σημαντικά (σχήμα 3.20β).
- **3^η περίπτωση:** Σε αυτήν την περίπτωση (εξηλεκτρισμένο πλοίο με παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση) παρατηρείται κυρίως αύξηση της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας για αντίστοιχη αύξηση του

κύκλου λειτουργίας (μέχρι 70%), ενώ για την τελευταία δοκιμαστική τιμή (90%) υπάρχει μία μικρή μείωση της μη επιτρεπτής περιοχής (σχήμα 3.20γ).

Όπως παρατηρείται από τις 3 παραπάνω περιπτώσεις, η επίδραση του κύκλου λειτουργίας του παλμικού φορτίου στη συμπεριφορά τη περιοχής λειτουργίας του συστήματος είναι σημαντική και απαιτείται η μελέτη και αντιμετώπιση των επιπτώσεων που προκύπτουν λόγω αυτού, από το αρχικό στάδιο του σχεδιασμού του Σ.Η.Ε..



Σχήμα 3.20. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές κύκλου λειτουργίας (duty cycle) του παλμικού φορτίου για α) συμβατικό σύστημα και για εξηλεκτρισμένο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 47,48,49]

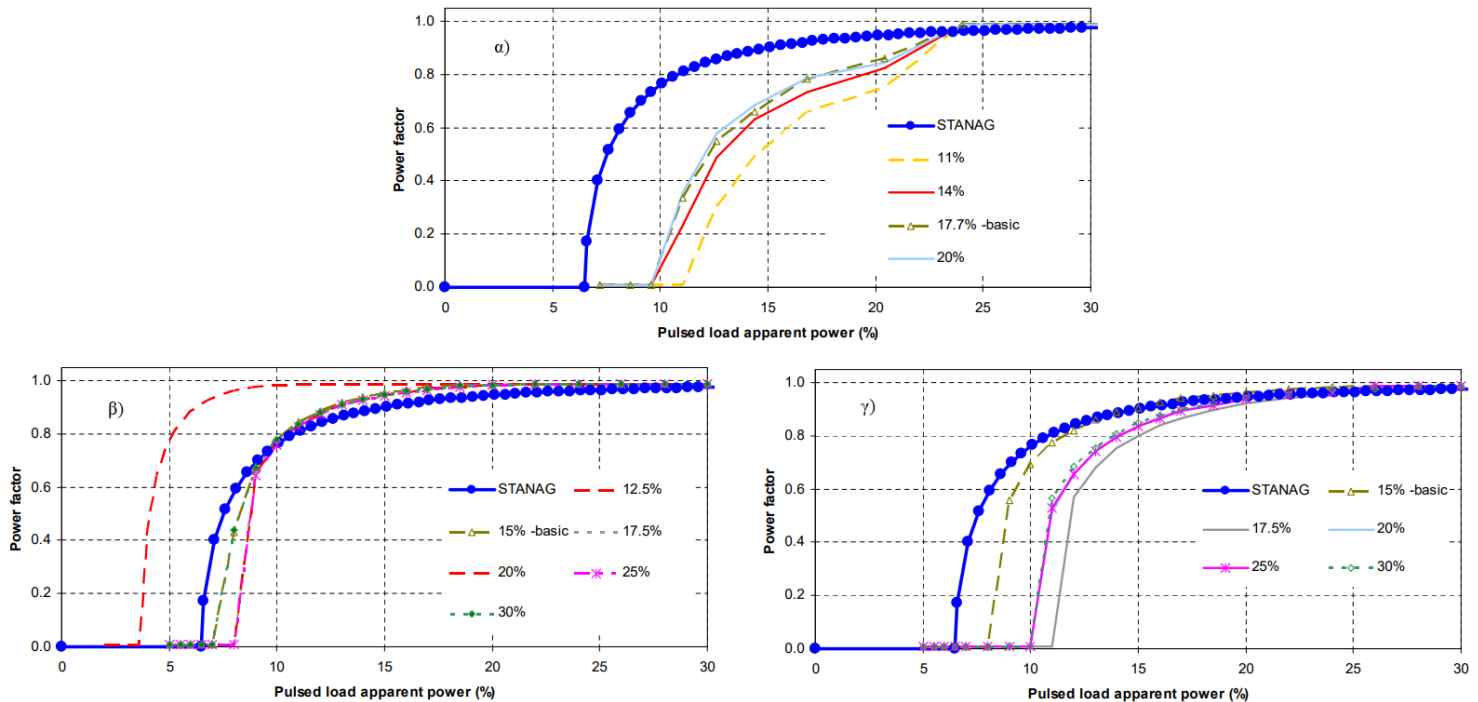
3.3.11 Προσομοίωση μεταβολής υπομεταβατικής επαγωγικής αντίδρασης γεννήτριας

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση εξετάζεται η επίδραση της υπομεταβατικής αντίδρασης X_d'' (ευθέως άξονα X_d'') της γεννήτριας στη συμπεριφορά του συστήματος, ενώ λαμβάνονται ως ίσες οι αντιδράσεις X_d'' και X_q'' (κάθετου άξονα X_q'').

- **1^η περίπτωση:** Στην περίπτωση συμβατικού πλοίου με την αύξηση της τιμής της υπομεταβατικής αντίδρασης παρουσιάζεται αύξηση της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας. Επίσης, η καμπύλη που ορίζει ο κανονισμός STANAG 1008 είναι αρκετά αυστηρή για τη συγκεκριμένη περίπτωση, αφού δεν προσεγγίζεται ικανοποιητικά από καμία από τις πειραματικές καμπύλες (σχήμα 3.21α).
- **2^η περίπτωση:** Εδώ (εξηλεκτρισμένο πλοίο με παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση-LV) η αύξηση της υπομεταβατικής αντίδρασης συμβάλλει στη μείωση της μη επιτρεπτής περιοχής, αφού για μικρές τιμές αυτής ($X_d''=12,5\%$) η περιοχή αυτή είναι αρκετά μεγάλη, ενώ για μεγαλύτερες τιμές παρατηρείται μείωση και σταθεροποίηση στο ενδιάμεσο εύρος τιμών (17,5%-25%) και για τη μεγαλύτερη πειραματική τιμή ($X_d''=30\%$) περιορίζεται σε μικρό βαθμό η μη επιτρεπτή περιοχή λειτουργίας (σχήμα 3.21β)

- **3^η περίπτωση:** Για εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση η αύξηση της υπομεταβατικής αντίδρασης ως την τιμή $X_d'' = 17\%$ συνεπάγεται με ελάττωση της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας, όμως για μεγαλύτερες τιμές αυτής ισχύει το αντίθετο, αφού παρουσιάζεται μικρή αύξηση αυτής (της μη επιτρεπτής περιοχής)-σχήμα 3.21γ.

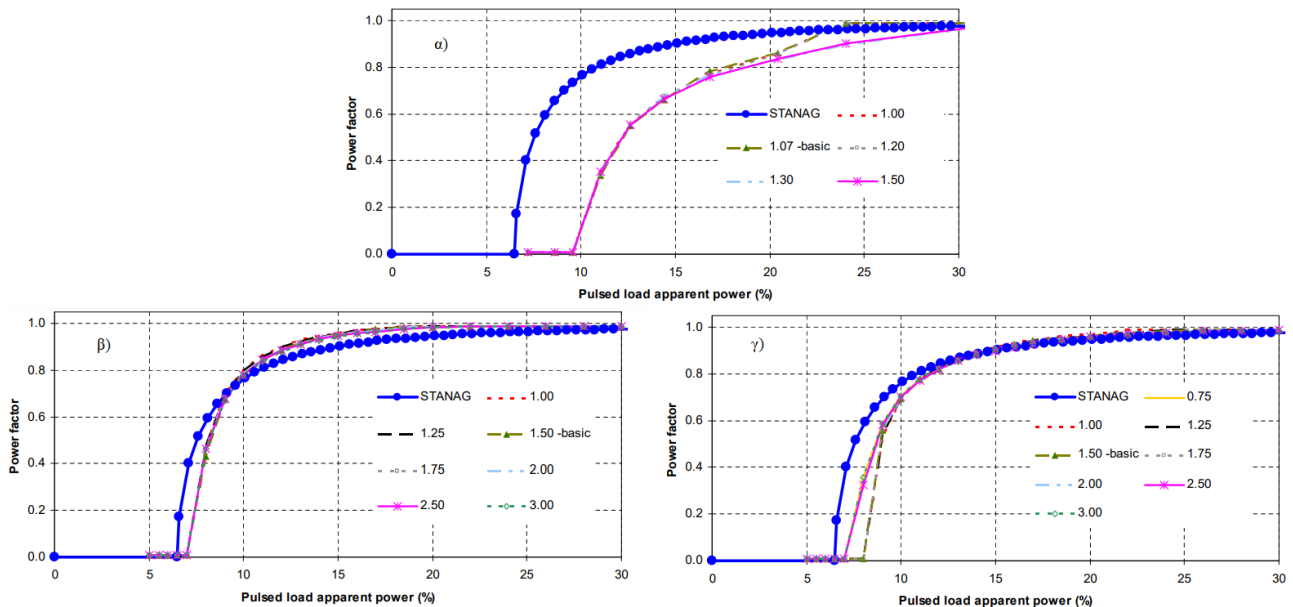
Μέσω των αποτελεσμάτων (καμπυλών) των προσομοιώσεων των τριών παραπάνω περιπτώσεων είναι εμφανές ότι η επίδραση της υπομεταβατικής αντίδρασης ευθέως άξονα στον καθορισμό της επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας του συστήματος είναι ιδιαίτερα σημαντική.



Σχήμα 3.21. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινομένης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές της υπομεταβατικής αντίδρασης των γεννητριών (X_d'') για α) συμβατικό σύστημα και για εξηλεκτρισμένο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 50,51,52]

3.3.12 Προσομοίωση μεταβολής σταθεράς αδράνειας γεννήτριας

- **1^η περίπτωση:** Στο συμβατικό σύστημα, οι καμπύλες που προκύπτουν από τη μεταβολή της σταθεράς αδράνειας σε μονάδα χρόνου της γεννήτριας πρακτικά ταυτίζονται για τιμή του Σ.Ι. του παλμικού φορτίου μέχρι 0,7 περίπου, ενώ για μεγαλύτερες τιμές αυτού παρατηρείται μία μικρή απόκλιση μεταξύ τους. Όμως, οι πειραματικές αυτές καμπύλες βρίσκονται εντός της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας του συστήματος, βάσει της θεωρητικής καμπύλης του προτύπου STANAG 1008 (σχήμα 3.22^α).
- **2^η περίπτωση:** Στο εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση (LV) 440V, παρουσιάζεται ταύτιση των πειραματικών καμπυλών, για κάθε τιμή αδράνειας, μεταξύ τους, αλλά και σε μεγάλο βαθμό με την θεωρητική καμπύλη (STANAG 1008)-σχήμα 3.22β.
- **3^η περίπτωση:** Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση και σε αυτή του εξηλεκτρισμένου πλοίου με το παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση παρατηρείται σχεδόν ταύτιση όλων των καμπυλών μεταξύ τους (θεωρητική-πειραματικές)-σχήμα 3.22γ.



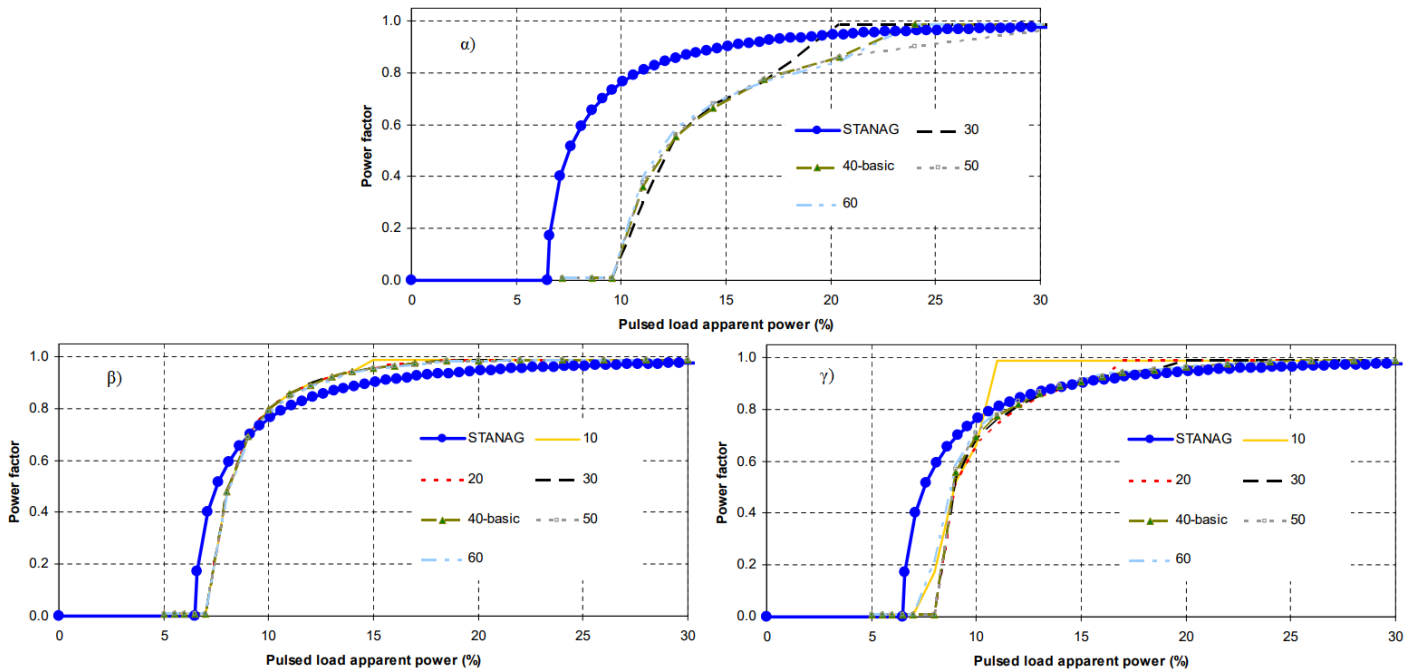
Σχήμα 3.22. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές σταθεράς αδράνειας σε μονάδα χρόνου της γεννήτριας για α) συμβατικό σύστημα και για εξηλεκτρισμένο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 53,54,55]

3.3.13 Προσομοίωση μεταβολής κέρδους ρυθμιστή συχνότητας (Governor)

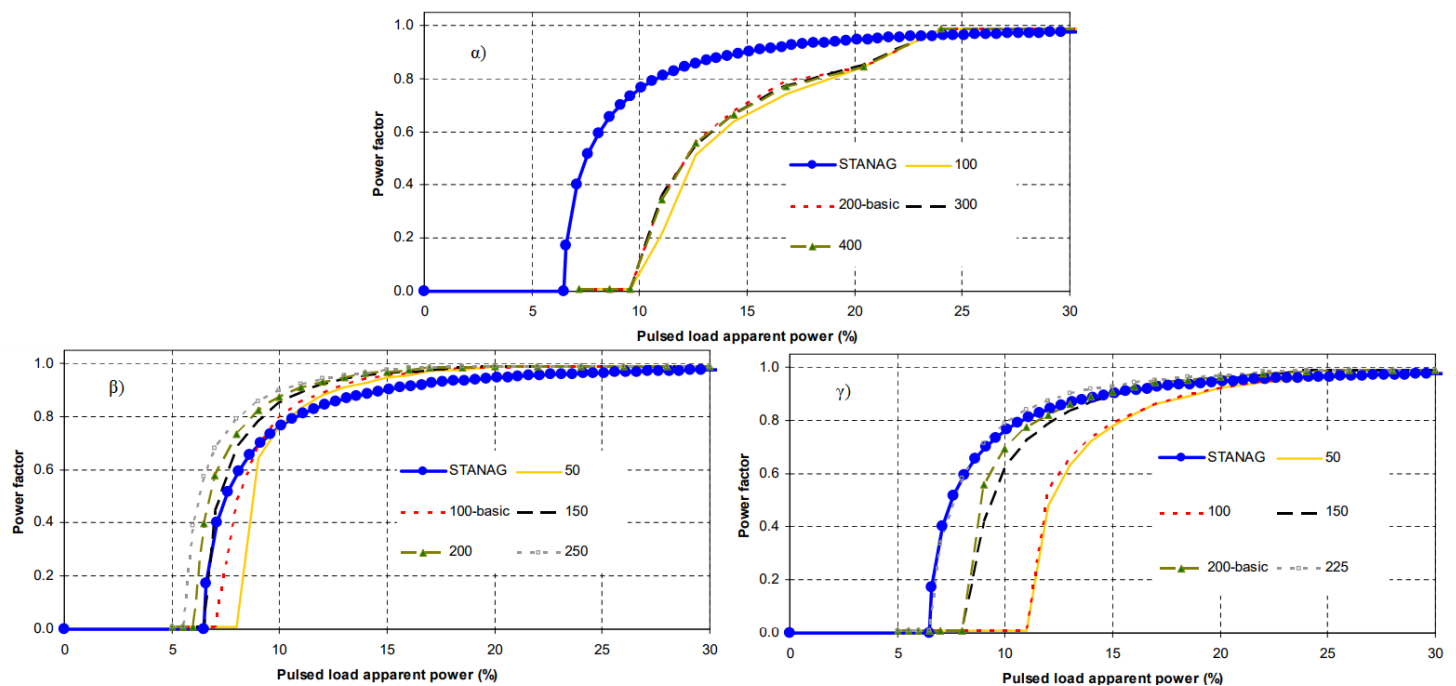
- **1^η περίπτωση:** Στην περίπτωση συμβατικού πλοίου, οι καμπύλες που προκύπτουν για τις διάφορες τιμές κέρδους του αυτόματου ρυθμιστή συχνότητας σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους για τιμές Σ.Ι. του παλμικού φορτίου έως 0,8, ενώ για μεγαλύτερες τιμές διαφέρουν σε μικρό βαθμό. Όμως, με βάση την καμπύλη του STANAG 1008 βρίσκονται εντός της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας που θέτει σχεδόν για κάθε τιμή του Σ.Ι.(σχήμα 3.23^α).
- **2^η και 3^η περίπτωση:** Στην περίπτωση εξηλεκτρισμένου πλοίου με το παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση (LV) και στην υψηλή τάση (HV) αντίστοιχα, οι καμπύλες που προκύπτουν είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, αλλά και σε σχέση με την προτεινόμενη καμπύλη του κανονισμού με μικρές αποκλίσεις, όπως στην περίπτωση της υψηλής τάσης (HV) για τιμή κέρδους $K=10$ (σχήμα 3.23β-3.23γ).

3.3.14 Προσομοίωση μεταβολής κέρδους ρυθμιστή τάσης (AVR)

- **1^η περίπτωση:** Στην περίπτωση του συμβατικού συστήματος για τις διαφορετικές τιμές κέρδους (K_A) του ρυθμιστή τάσης παρατηρείται μεγάλη ομοιότητα μεταξύ των καμπυλών που προκύπτουν. Αντίθετα, οι καμπύλες αυτές (πειραματικές) προσεγγίζουν ελάχιστα την καμπύλη του κανονισμού STANAG 1008, αφού την πλησιάζουν για τιμές Σ.Ι. μεγαλύτερες από 0,9 (σχήμα 3.24^α).
- **2^η περίπτωση:** Στην περίπτωση του εξηλεκτρισμένου πλοίου με το παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση (LV) η αύξηση του κέρδους (K_A) οδηγεί σε αύξηση της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας, υπερβαίνοντας ταυτόχρονα και τη θεωρητική καμπύλη του κανονισμού σχεδόν για κάθε τιμή αυτού (του κέρδους)-σχήμα3.24β.
- **3^η περίπτωση:** Στην περίπτωση του εξηλεκτρισμένου πλοίου με το παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση (HV) παρατηρείται, ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, αύξηση της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας, χωρίς όμως να υπερβαίνεται σε για καμία τιμή, η θεωρητική καμπύλη (σχήμα 3.24γ).



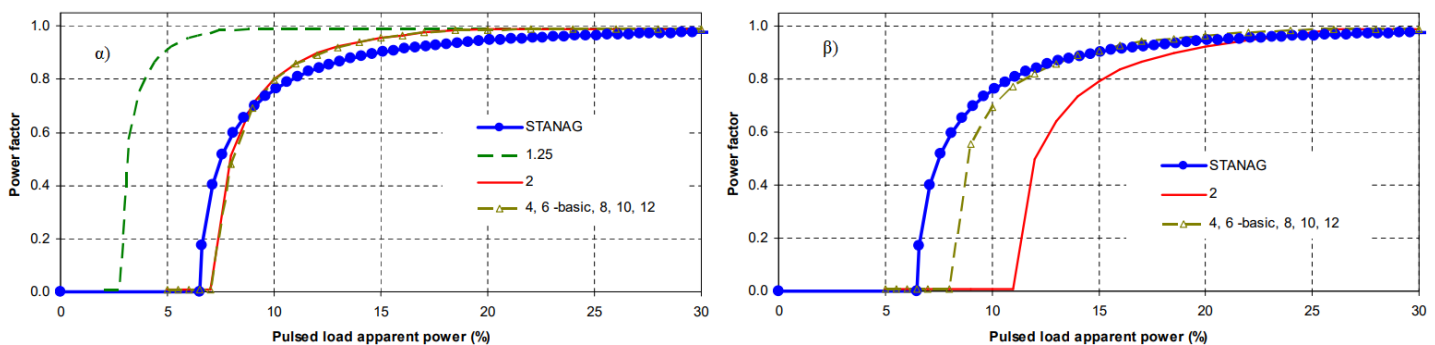
Σχήμα 3.23. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές κέρδους (K) του ρυθμιστή συχνότητας (governor) για α) συμβατικό σύστημα και για εξηλεκτρισμένο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 56,57,58]



Σχήμα 3.24. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές κέρδους (K_A) του αυτόματου ρυθμιστή τάσης (AVR) για α) συμβατικό σύστημα για εξηλεκτρισμένο με το παλμικό φορτίο β) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και γ) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 59,60,61]

3.3.15 Προσομοίωση μεταβολής μέγιστου ορίου τάσης διέγερσης γεννήτριας- V_{Rmax} (generator's field voltage upper bound)

- **2^η περίπτωση:** Για εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο στη χαμηλή τάση (LV) για αύξηση του V_{Rmax} παρατηρείται περιορισμός της μη επιτρεπτής περιοχής λειτουργίας και για τιμές $V_{Rmax}=4-12$, υπάρχει πλήρης ταύτιση των καμπυλών, οι οποίες προσεγγίζουν αρκετά την καμπύλη του STANAG 1008 (σχήμα 3.25α).
- **3^η περίπτωση:** Για εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση (HV) παρουσιάζεται αύξηση της μη επιτρεπόμενης περιοχής λειτουργίας με την αύξηση του V_{Rmax} , αλλά για τιμές $V_{Rmax}=4-12$, όπου είναι και οι πιο συχνά εμφανιζόμενες τιμές σε εφαρμογές ($V_{Rmax}>3$) εμφανίζεται ταύτιση των καμπυλών και αρκετά μεγάλη προσέγγιση της θεωρητικής καμπύλης (STANAG 1008)-σχήμα 3.25β. Όσον αφορά το συμβατικό σύστημα, η επίδραση της μεταβολής του V_{Rmax} είναι αμελητέα. [23]



Σχήμα 3.25. Καμπύλες Σ.Ι.-φαινόμενης ισχύος παλμικού φορτίου για διάφορες τιμές του V_{Rmax} της γεννήτριας για εξηλεκτρισμένο πλοίο με το παλμικό φορτίο α) στη χαμηλή τάση (LV-440V) και β) στην υψηλή τάση (HV) [23, figs 62,63]

3.4 Ανάλυση επιπτώσεων παλμικών φορτίων σε Σ.Η.Ε. πλοίων μέσω μαθηματικής ανάλυσης ως προς τη διαμόρφωση συχνότητας

3.4.1 Γενική περιγραφή

Όπως αναπτύχθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο (3.3), οι βασικές παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η διαμόρφωση (διαταραχή) της συχνότητας (και της τάσης) είναι ο συντελεστής ισχύος και η φαινόμενη ισχύς του παλμικού φορτίου. Υπάρχουν όμως και αρκετοί ακόμα παράγοντες που επηρεάζουν τη διαμόρφωση της συχνότητας, όπως μελετήθηκαν μέσω προσομοιώσεων (3.3). Η συνάρτηση που περιλαμβάνει ορισμένες παραμέτρους που προκαλούν τη διαμόρφωση της συχνότητας, βάσει του κανονισμού STANAG 1008, είναι η παρακάτω:

$$F_f(x, \Delta S, \cos\phi) \leq 0,05 \quad (3.10)$$

όπου $\cos\phi$: ο συντελεστής ισχύος (Σ.Ι.) του παλμικού φορτίου,

ΔS : η φαινόμενη ισχύς του παλμικού φορτίου,

x : το διάνυσμα που περιλαμβάνει τις βασικότερες παραμέτρους ενός Σ.Η.Ε. πλοίου, οι οποίες έχουν επιπτώσεις στη διαμόρφωση συχνότητας

Η περιγραφή του διανύσματος x είναι η παρακάτω:

$$x = [T, dc, J', K_f, R_f] \quad (3.11)$$

όπου T : η περίοδος του παλμικού φορτίου

dc : ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) του παλμικού φορτίου

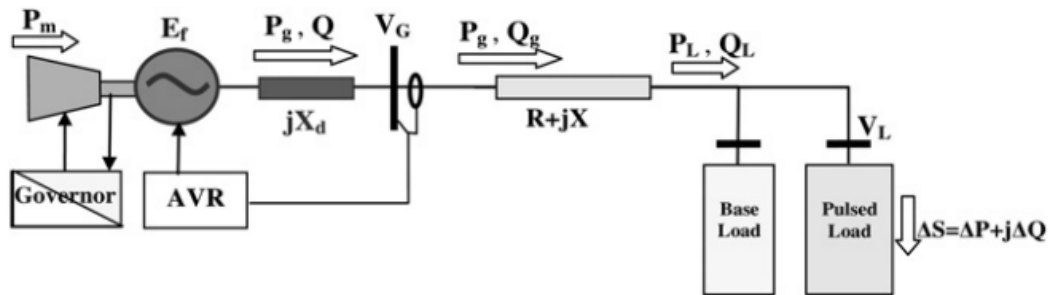
J' : η σταθερά αδράνειας του δρομέα της γεννήτριας

K_f : το κέρδος ολοκληρωτικού παράγοντα του ρυθμιστή συχνότητας (governor-frequency regulator)

R_f : η πτώση (droop) της συχνότητας

Το ισοδύναμο Σ.Η.Ε. που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη περίπτωση για τη μελέτη της διαμόρφωσης (διαταραχής) συχνότητας είναι αυτό του σχήματος 3.26, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως Σ.Η.Ε. συμβατικού πλοίου (χωρίς ηλεκτροπρόωση) ή εξηλεκτρισμένου (AES-με ηλεκτροπρόωση). Το Σ.Η.Ε. αυτό αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Σύγχρονη γεννήτρια
- Γραμμή μεταφοράς (διανομής) σύνθετης αντίστασης $R+jX$
- Ρυθμιστής τάσης (AVR) και συχνότητας (Governor) για τον έλεγχο των αντίστοιχων μεγεθών στους ακροδέκτες της γεννήτριας
- Κύριο φορτίο, όπου στην περίπτωση εξηλεκτρισμένου πλοίου περιλαμβάνει και το σύστημα ηλεκτροπρόωσης
- Παλμικό φορτίο με γραφική παράσταση λειτουργίας (profile), όπως αυτό του σχήματος 3.7 (παράγραφος 3.3, σελ. 122)



Σχήμα 3.26. Απλοποιημένο Σ.Η.Ε. πλοίου [24, fig.3]

3.4.2 Μαθηματική ανάλυση

Βάσει του σχήματος 3.7 η περιοδική συνάρτηση της φαινόμενης ισχύος του παλμικού φορτίου κατά τη διάρκεια μια περιόδου ($0 \leq t < T$) είναι η εξής:

$$\Delta S(t) = \Delta S[u(t) - u(t - dcT)], \quad 0 \leq t < T \quad (3.12)$$

όπου $u(t)$: η βηματική συνάρτηση

Μετατρέποντας την παραπάνω σχέση με το μετασχηματισμό Laplace, λαμβάνεται η εξής:

$$\Delta S(s) = \frac{\Delta S}{1 - e^{-sT}} \left(\frac{1}{s} - \frac{e^{-dcTs}}{s} \right) \quad (3.13)$$

Όσον αφορά το δρομέα, η εξίσωση κίνησης (motion equation) αυτού, αμελώντας τις απώλειες τριβών, είναι η εξής:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_{el} \quad (3.14a)$$

και αντίστοιχα η εξίσωση που περιγράφει τη μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, λόγω της μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος (mechanic and electric power result) είναι:

$$J' \omega \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_g - \Delta P_m \quad (3.14\beta)$$

όπου P_g : η ενεργός ισχύς της γεννήτριας

P_m : η μηχανική ισχύς επιτάχυνσης

ω : η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα

$\Delta\omega$: η ροπή της αδράνειας του δρομέα ($\Delta\omega=1-\omega J$, σε kg/m²)

S_s : η φαινόμενη ισχύς στο πλήρες φορτίο (full rated), η οποία χρησιμοποιείται ως ισχύς βάσης

$$J': J' = J \frac{\omega_b^2}{S_s} \quad (\text{sec})$$

και επειδή στο ανά μονάδα (p.u.) σύστημα ισχύει $\omega=f$, η σχέση 3.14β παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$J' f \frac{d\Delta f}{dt} = \Delta P_g - \Delta P_m \quad (\text{p.u.}) \quad (3.15)$$

όπου $\Delta f=1-f$ (p.u.)

Η πτώση στη συχνότητα της γεννήτριας (frequency droop) για τη μελέτη της βασικής διαμόρφωσης συχνότητας (primary frequency adjustment) δίνεται από τη σχέση 3.16α, ενώ στην περίπτωση που μελετάται και η δευτερεύουσα διαμόρφωση συχνότητας (secondary frequency adjustment), όπως στη συγκεκριμένη μελέτη λαμβάνεται η σχέση 3.16β:

$$\Delta P_m = R_f \cdot \Delta f \quad (3.16\alpha)$$

$$\Delta P_m = R_f \cdot \Delta f + K_{fl} \int_0^t \Delta f d\tau \quad (3.16\beta)$$

όπου K_{fl} : το ακέραιο κέρδος του ρυθμιστή στροφών (speed controller)

Αντικαθιστώντας τη σχέση 3.16β στη 3.15 και θεωρώντας ότι η τιμή της συχνότητας είναι πολύ κοντά στην ονομαστική ανά μονάδα τιμή της ($f \approx 1$ p.u.) προκύπτει η σχέση:

$$J' \frac{d\Delta f}{dt} = P_{\text{pulse}}(t) - R_f \cdot \Delta f - K_{fl} \int_0^t \Delta f d\tau \quad (3.17)$$

όπου P_{pulse} : η ενεργός ισχύς του παλμικού φορτίου

Με βάση το μετασχηματισμό Laplace, η παραπάνω σχέση παίρνει την εξής μορφή:

$$\mathcal{L}\left[J' \frac{d\Delta f}{dt}\right] = \mathcal{L}\left[P_{\text{pulse}}(t) - R_f \cdot \Delta f - K_{fl} \int_0^t \Delta f d\tau\right]$$

$$J' [s\Delta F(s) - \Delta F(0)] + R_f \cdot \Delta F(s) + \frac{K_{fl}}{s} \Delta F(s) - P_{\text{pulse}}(s) = 0 \quad (3.18)$$

Για αρχική συνθήκη $\Delta f(0)=0$, δηλαδή για μηδενικό σφάλμα συχνότητας πριν τη λειτουργία του παλμικού φορτίου προκύπτει:

$$\Delta F(s) = \frac{s}{J' s^2 + R_f s + K_{fl}} \cdot P_{\text{pulse}}(s) \quad (3.19)$$

και αντικαθιστώντας στη σχέση (3.19) τη (3.13) και για $\Delta P = \Delta S \cdot \cos\phi$ λαμβάνεται τελικά η σχέση (3.20):

$$\Delta F(s) = \frac{s}{J' s^2 + R_f s + K_{fl}} \cdot \frac{\Delta S}{1 - e^{-sT}} \left(\frac{e^{-dcTs}}{s} \right)$$

$$\Delta F(s) = \frac{(1 - e^{-dcTs}) \Delta S \cos\phi}{J' s^2 + R_f s + K_{fl}} \cdot \frac{1}{1 - e^{-sT}} \quad (3.20)$$

Οι λύσεις του πολυωνύμου $J' s^2 + R_f s + K_{fl}$ είναι οι εξής:

$$p_{1,2} = \frac{-R_f \pm \sqrt{R_f^2 - 4J' K_{fl}}}{2J'} \quad (3.21)$$

με $p_1 < p_2$

Θεωρώντας ότι η διακρίνουσα του πολυωνύμου αυτού είναι μεγαλύτερη του μηδενός, δηλαδή:

$$\begin{aligned} \Delta > 0 \\ \text{ή } R_f^2 - 4J'K_{fl} > 0 \\ \text{ή } R_f^2 > 4J'K_{fl} \quad (3.22) \end{aligned}$$

η σχέση 3.20 παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\Delta F(s) = \frac{(1-e^{-dcTs})\Delta S\cos\varphi}{J'(s+p_1)(s+p_2)} \cdot \frac{1}{1-e^{-sT}} \quad (3.23)$$

$$\text{ή } \Delta F(s) = \left[\left(\frac{1}{s+p_1} - \frac{1}{s+p_2} \right) - \left(\frac{e^{-dcTs}}{s+p_1} - \frac{e^{-dcTs}}{s+p_2} \right) \right] \frac{\Delta S\cos\varphi}{J'(p_2-p_1)} \cdot \frac{1}{1-e^{-sT}} \quad (3.24)$$

Εφαρμόζοντας αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace στην παραπάνω σχέση, προκύπτει η σχέση που δίνει την απόκλιση συχνότητας Δf στο πεδίο του χρόνου:

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta S\cos\varphi}{J'(p_2-p_1)} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} [(e^{-p_1(t-nT)} - e^{-p_2(t-nT)})u(t-nT) - (e^{-p_1(t-(n+dc)T)} - e^{-p_2(t-(n+dc)T)})u(t-(n+dc)T)] \quad (3.25)$$

Οι τιμές που λαμβάνει η μεταβλητή του χρόνου t βρίσκονται στο διάστημα μιας περιόδου, δηλαδή:

$$nT < t < (n+1)T \quad (3.26)$$

Επομένως, η σχέση 3.25 μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\Delta f(t) = \Delta f_1(t) + \Delta f_2(t) \quad (3.27)$$

όπου:

$$\Delta f_1(t) = \frac{\Delta S\cos\varphi}{J'(p_2-p_1)} \cdot \left(\frac{e^{p_1dcT}-1}{e^{p_1T}-1} e^{-p_1t} - \frac{e^{p_2dcT}-1}{e^{p_2T}-1} e^{-p_2t} \right) \quad (3.28)$$

$$\Delta f_2(t) = \frac{\Delta S\cos\varphi}{J'(p_2-p_1)} \cdot [u'(t) \left(\frac{e^{p_1T}-e^{p_1dcT}}{e^{p_1T}-1} e^{-p_1t'} - \frac{e^{p_2T}-e^{p_2dcT}}{e^{p_2T}-1} e^{-p_2t'} \right) - u(t'-dcT) (e^{-p_1(t'-dcT)} - e^{-p_2(t'-dcT)})] \quad (3.29)$$

$$t' = t - nT \quad (3.30)$$

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος η μέση τιμή της απόκλισης συχνότητας Δf είναι μηδενική, όπως αποδεικνύεται και από την παρακάτω σχέση:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{nT}^{(n+1)T} \Delta f(t) dt = 0 \quad (3.31)$$

Ο όρος Δf_1 λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του για τιμή χρόνου ίση με:

$$t_{\max 1} = \max \left(\frac{1}{p_2-p_1} \ln \left[\frac{p_2(e^{p_2dcT}-1)(e^{p_1T}-1)}{p_1(e^{p_1dcT}-1)(e^{p_2T}-1)} \right], 0 \right) \quad (3.32)$$

και τελικά ισούται με:

$$\max \Delta f_1 = \frac{\Delta S\cos\varphi}{J'(p_2-p_1)} \cdot \left[\frac{e^{p_1dcT}-1}{e^{p_1T}-1} - \frac{e^{p_2dcT}-1}{e^{p_2T}-1} \right], \text{ για } t_{\max 1} = 0 \quad (3.33\alpha)$$

$$\max \Delta f_1 = \frac{\Delta S\cos\varphi}{J'(p_2-p_1)} \cdot \frac{e^{p_1dcT}-1}{e^{p_1T}-1} \frac{p_2-p_1}{p_1} e^{-p_1 t_{\max 1}}, \text{ για } t_{\max 1} > 0 \quad (3.33\beta)$$

Αντίστοιχα, ο όρος Δf_2 μεγιστοποιείται για τιμή του χρόνου ίση με:

$$t'_{\max 2} = \max \left(\frac{1}{p_2-p_1} \ln \left[\frac{p_2(e^{p_2T}-e^{p_2dcT})(e^{p_1T}-1)}{p_1(e^{p_1T}-e^{p_1dcT})(e^{p_2T}-1)} \right], dcT \right) \quad (3.34)$$

και ισούται με:

$$\max \Delta f_2 = \frac{\Delta S\cos\varphi}{J'(p_2-p_1)} \left(e^{-p_1 t'_{\max 2}} \frac{e^{p_1T}-e^{p_1dcT}}{e^{p_1T}-1} - e^{-p_2 t'_{\max 2}} \frac{e^{p_2T}-e^{p_2dcT}}{e^{p_2T}-1} \right), \text{ για } t'_{\max 2} < dcT \quad (3.35\alpha)$$

$$\min \Delta f_2 = \frac{\Delta S\cos\varphi}{J'(p_2-p_1)} \left(\frac{e^{p_1T}-e^{p_1dcT}}{e^{p_1T}-1} - \frac{e^{p_2T}-e^{p_2dcT}}{e^{p_2T}-1} \right), \text{ για } t'_{\max 2} = 0 \quad (3.35\beta)$$

Η ελάχιστη τιμή συχνότητας (f_{\min}) εμφανίζεται όταν οι όροι Δf_1 και Δf_2 λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους και αυτή αποτελεί τη δυσμενέστερη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος:

$$f_{\min} = 1 - \max \Delta f_1 - \max \Delta f_2 \quad (3.36)$$

Ενώ η μέγιστη τιμή της συχνότητας (f_{\max}) εμφανίζεται όταν μηδενίζονται οι όροι Δf_1 και Δf_2 , το οποίο συμβαίνει για $t_{\max 1} \rightarrow \infty$ και για $t_{\max 2} = 0$ ή $t_{\max 2} = T$ για τους 2 παραπάνω όρους αντίστοιχα (αυτό αποδεικνύεται μέσω των σχέσεων 3.28, 3.29 αντίστοιχα).

$$f_{\max} = 1 - \min \Delta f_2 \quad (3.37)$$

Αντικαθιστώντας τις 2 παραπάνω σχέσεις 3.36, 3.37 στη 3.5, προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} M_f &= \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2f_n} \\ &= \frac{1 - \min \Delta f_2 - (1 - \max \Delta f_1 - \max \Delta f_2)}{2f_n} \\ \text{ή } M_f &= \frac{\max \Delta f_1 + \max \Delta f_2 - \min \Delta f_2}{2f_n} \quad (3.38) \end{aligned}$$

Απλοποιώντας την παραπάνω σχέση προκύπτει η ισοδύναμη παρακάτω:

$$\begin{aligned} M_f &= \frac{\Delta S \cos \varphi}{2J' f_n (p_2 - p_1)} \\ (3.21) \rightarrow M_f &= \frac{\Delta S \cos \varphi}{2J' f_n \left(\frac{-R_f + \sqrt{R_f^2 - 4J' K_{fl}}}{2J'} - \frac{-R_f - \sqrt{R_f^2 - 4J' K_{fl}}}{2J'} \right)} \\ \text{ή } M_f &= \frac{\Delta S \cos \varphi c}{2f_n \sqrt{R_f^2 - 4J' K_{fl}}} \quad (3.39) \end{aligned}$$

όπου $c = c'[(p_1, dc, T, t_{\max 1}, t_{\max 2}) - (p_2, dc, T, t_{\max 1}, t_{\max 2})]$

$$\text{και } c = (p, dc, T, t_{\max 1}, t_{\max 2}) = \frac{(e^{pdcT} - 1)e^{-pt_{\max 1}} + (e^{pT} - e^{pdcT})e^{-pt_{\max 2}} - e^{pT} + e^{pdcT}}{e^{pT} - 1} \quad (3.40)$$

Σύμφωνα με τον κανονισμό STANAG 1008 η σχέση 3.39 μετατρέπεται στη σχέση 3.41, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} M_f^{lim} &< 0.5 \\ \text{ή } \frac{\Delta S \cos \varphi c}{2f_n \sqrt{R_f^2 - 4J' K_{fl}}} &< \frac{1}{2} \\ \text{ή } \frac{\Delta S \cos \varphi c}{f_n \sqrt{R_f^2 - 4J' K_{fl}}} &< 1 \\ \text{ή } \Delta S \cos \varphi &< \frac{f_n \sqrt{R_f^2 - 4J' K_{fl}}}{c} \\ \text{ή } \Delta S \cos \varphi &< \frac{f_n \sqrt{R_f^2 - 4J' K_{fl}}}{c} \\ \text{ή } \Delta S \cos \varphi &< \frac{2M_f^{lim} f_n J' (p_2 - p_1)}{c} \quad (3.41) \end{aligned}$$

Από την παραπάνω ανισότητα (3.41) προκύπτει η γραφική παράσταση S-cosφ που έχει μορφή καμπύλης και είναι όμοια με αυτή που προτείνει το πρότυπο STANAG 1008 (σχήμα 3.6). Οι καμπύλες που θέτει ο κάθε κανονισμός εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους του Σ.Η.Ε. ενός πλοίου, όπως αυτές που παρουσιάστηκαν παραπάνω (T, dc, J', K_{fl}, R_f).

Στην περίπτωση που δεν ισχύει η ανισότητα της σχέσης 3.22, τότε μπορούν να διακριθούν οι 3 παρακάτω περιπτώσεις:

- Περίπτωση Α ($R_f^2 = 4J'K_{fI}$): Στη συγκεκριμένη περίπτωση το πολυώνυμο $J's^2 + R_f s + K_{fI}$ της σχέσης 3.20 έχει 1 λύση, την εξής:

$$p = \frac{R_f}{2J'} \quad (3.42)$$

και η 3.20 λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\Delta F(s) = \frac{(1-e^{-dcTs})\Delta S \cos \varphi}{J'(s+p)^2} \cdot \frac{1}{1-e^{-sT}} \quad (3.43)$$

Εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace στην παραπάνω σχέση, προκύπτει:

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta S \cos \varphi}{J'(p_2-p_1)} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} [\sin(p(t-nT))u(t-nT) - \sin(p(t-(n+dc)T))u(t-(n+dc)T)] \quad (3.44)$$

Στο διάστημα μιας περιόδου, δηλαδή για $nT < t < (n+1)T$, η 3.44 παίρνει την εξής μορφή:

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta S \cos \varphi}{J'p} \left\{ \frac{\sin(\frac{npT}{2})}{\sin(\frac{pT}{2})} [\sin(p(t-\frac{n-1}{2}T)) - \sin(p(t-(\frac{n-1}{2}+dc)T))] + \sin(p(t-nT)) - \sin(p(t-(n+dc)T)) \right\} u(t-(n+dc)T) \quad (3.45\alpha)$$

$$\eta \Delta f(t) = \frac{\Delta S \cos \varphi}{J'p} \left\{ \frac{2\sin(\frac{npT}{2})2\sin(\frac{dcpT}{2})}{\sin(\frac{pT}{2})} [\cos(p(t-\frac{n-1+dc}{2}T)) + \sin(p(t-nT)) - \sin(p(t-(n+dc)T))] \right\} u(t-(n+dc)T) \quad (3.45\beta)$$

Πιο συγκεκριμένα, $0 \leq t' = t - nT < T$, η $\Delta f(t)$ είναι η εξής:

$$\Delta f(t') = \begin{cases} 2 \frac{\Delta S \cos \varphi}{R_f} c_{1n} \cos(pt' - \varphi_{1n}), & 0 \leq t' < dcT \\ 2 \frac{\Delta S \cos \varphi}{R_f} c_{2n} \cos(pt' - \varphi_{2n}), & dcT \leq t' < T \end{cases} \quad (3.46)$$

$$\text{όπου } c_{1n} = \sqrt{4 \left[\frac{\sin(\frac{npT}{2}) \sin(\frac{dcpT}{2})}{\sin(\frac{pT}{2})} \right]^2 + 1 - 4 \left[\frac{\sin(\frac{npT}{2}) \sin(\frac{dcpT}{2})}{\sin(\frac{pT}{2})} \right] \sin \left[p \frac{n+1-dc}{2} T \right]}$$

$$c_{2n} = \sqrt{4 \left[\frac{\sin(\frac{npT}{2}) \sin(\frac{dcpT}{2})}{\sin(\frac{pT}{2})} \right]^2 + 2 + 2 \left[\frac{\sin(\frac{npT}{2}) \sin(\frac{dcpT}{2})}{\sin(\frac{pT}{2})} \right] \sin \left[p \frac{n+1+dc}{2} T \right] - 2 \left[\frac{\sin(\frac{npT}{2}) \sin(\frac{dcpT}{2})}{\sin(\frac{pT}{2})} \right] \sin \left[p \frac{n+1-dc}{2} T \right] - 2 \cos(pdcT)}$$

$$\varphi_{1n} = \tan^{-1} \left[\frac{1 - 2 \left[\frac{\sin(\frac{npT}{2}) \sin(\frac{dcpT}{2})}{\sin(\frac{pT}{2})} \right] \sin \left[p \frac{n+1-dc}{2} T \right]}{2 \left[\frac{\sin(\frac{npT}{2}) \sin(\frac{dcpT}{2})}{\sin(\frac{pT}{2})} \right] \cos \left[p \frac{n+1-dc}{2} T \right]} \right]$$

$$\varphi_{2n} = \tan^{-1} \left[\frac{1 - 2 \left[\frac{\sin(\frac{npT}{2}) \sin(\frac{dcpT}{2})}{\sin(\frac{pT}{2})} \right] \sin \left[p \frac{n+1-dc}{2} T \right] - \cos(pdcT)}{2 \left[\frac{\sin(\frac{npT}{2}) \sin(\frac{dcpT}{2})}{\sin(\frac{pT}{2})} \right] \cos \left[p \frac{n+1-dc}{2} T \right] + \sin(pdcT)} \right]$$

Οι χρονικές στιγμές στις οποίες η συνάρτηση απόκλισης της συχνότητας $\Delta f(t)$ μεγιστοποιείται είναι οι παρακάτω:

$$t'_{1n} = \frac{\varphi_{1n} + 2k\pi}{p}, k \in \mathbb{Z}, t'_{1n} \in [0, dcT)$$

$$t'_{2n} = \frac{\varphi_{2n} + 2k\pi}{p}, k \in \mathbb{Z}, t'_{2n} \in [dcT, T)$$

όπου z : ακέραιοι αριθμοί

Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίοδο ($k=0$) ισχύει:

$$t' = 0^+, t' = (dcT)^-, t' = (dcT)^+, t' = T^-$$

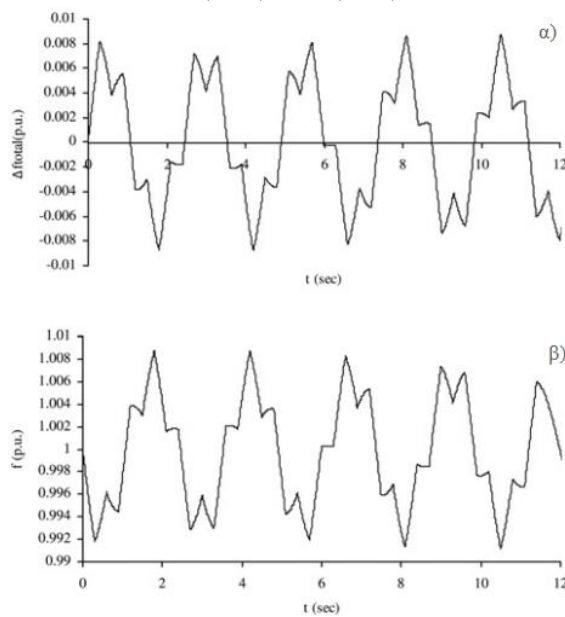
Ενώ τα (χρονικά) σημεία στα οποία ελαχιστοποιείται η $\Delta f(t)$ είναι:

$$t'_{1n} = \frac{\varphi_{1n} + 2k\pi - \pi}{p}, k \in \mathbb{Z}, t'_{1n} \in [0, dcT)$$

$$t'_{2n} = \frac{\varphi_{2n} + 2k\pi - \pi}{p}, k \in \mathbb{Z}, t'_{2n} \in [dcT, T)$$

και κατά την πρώτη περίοδο ($k=0$) ισχύει:

$$t' = 0^+, t' = (dcT)^-, t' = (dcT)^+, t' = T^-$$



Σχήμα 3.27. Κυματομορφή α) απόκλισης της συχνότητας $\Delta f(t)$ και β) συχνότητας f με παραμέτρους $\Delta S=0,15$ p.u., $\cos\varphi=0,8$, $R_f=20$, $J'=4$ sec, $K_{fl}=25$, $dc=0,5$ και $T=0,6$ sec [24, fig.6]

Οι τιμές που περιορίζουν (εννοεί το πλάτος της $\Delta f(t)$;) τη $\Delta f(t)$ είναι οι εξής:

$$\max|\Delta f_1| \leq 2 \frac{\Delta S \cos\varphi}{J' p} \left[\frac{\sin\left(\frac{dcpT}{2}\right)}{\sin\left(\frac{pT}{2}\right)} + 1 \right] \quad (3.47\alpha)$$

$$\max|\Delta f_1| \leq 4 \frac{\Delta S \cos\varphi}{R_f} \left[\frac{\sin\left(\frac{dcpT}{2}\right)}{\sin\left(\frac{pT}{2}\right)} + 1 \right] \quad (3.47\beta)$$

Αντικαθιστώντας τις 2 παραπάνω τιμές στη σχέση 3.5 προκύπτει ότι:

$$M_f = \frac{f_{max} - f_{min}}{2f_n}$$

$$= \frac{\max|\Delta f(t)| - (-\max|\Delta f(t)|)}{2f_n}$$

$$\text{ή } M_f = 4 \frac{\Delta S \cos\varphi}{R_f f_n} \left[\left| \frac{\sin\left(\frac{dcpT}{2}\right)}{\sin\left(\frac{pT}{2}\right)} \right| + 1 \right]$$

- Περίπτωση Β ($R_f^2 < 4J'K_{fl}$): Στην περίπτωση αυτή το πολυώνυμο $J's^2 + R_f s + K_{fl}$ έχει ως λύσεις μιγαδικές ρίζες και η σχέση 3.20 παίρνει τη μορφή:

$$\begin{aligned} \Delta F(s) &= \frac{1}{s^2 + \left(\frac{R_f}{J'}\right)s + \frac{K_{fl}}{J'}} \cdot \frac{\Delta S \cos \varphi}{J'} \cdot \frac{1 - e^{-dcTs}}{1 - e^{-sT}} \\ &= \frac{1}{(s+a_b)^2 + \omega_b^2} \cdot \frac{\Delta S \cos \varphi}{J'} \cdot \frac{1 - e^{-dcTs}}{1 - e^{-sT}} \\ \text{ή } \Delta F(s) &= \frac{\omega_b}{(s+a_b)^2 + \omega_b^2} \cdot 2 \cdot \frac{\Delta S \cos \varphi}{\sqrt{4J'K_{fl} - R_f^2}} \cdot \frac{1 - e^{-dcTs}}{1 - e^{-sT}} \quad (3.49) \end{aligned}$$

όπου $a_b = \frac{R_f}{2J'}$ και $\omega_b = \sqrt{\frac{4J'K_{fl} - R_f^2}{2J'}}$

Εφαρμόζοντας στη σχέση 3.49 αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace, λαμβάνεται η απόκριση της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου:

$$\Delta f(t) = 2 \cdot \frac{\Delta S \cos \varphi}{\sqrt{4J'K_{fl} - R_f^2}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[e^{-a_b(t-nT)} \sin(\omega_b(t-nT)) u(t-nT) - e^{-a_b(t-(n+dc)T)} \sin(\omega_b(t-(n+dc)T)) u(t-(n+dc)T) \right] \quad (3.50)$$

Για το εύρος τιμών που μπορεί να λάβει η $\Delta f(t)$ ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\max |\Delta f_1| \leq 4 \cdot \frac{\Delta S \cos \varphi}{\sqrt{4J'K_{fl} - R_f^2}} \cdot \frac{1}{e^{a_b T} - 1} \quad (3.51)$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση στη 3.5 προκύπτει:

$$\begin{aligned} M_f &= \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2f_n} \leq \frac{\max |\Delta f(t)| - (-\max |\Delta f(t)|)}{2f_n} \\ \text{ή } M_f &= 4 \cdot \frac{\Delta S \cos \varphi}{f_n \sqrt{4J'K_{fl} - R_f^2}} \cdot \frac{1}{e^{a_b T} - 1} \quad (3.52) \end{aligned}$$

- Περίπτωση Γ (ειδική περίπτωση): Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν υπάρχει δευτερεύουσα ρύθμιση στο σύστημα, δηλαδή ισχύει $K_{fl} = 0$ και άρα η σχέση 3.19 λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\Delta F(s) = \frac{1}{J's + R_f} \cdot P_{pulse}(t) \quad (3.53)$$

και αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση τη 3.13 προκύπτει:

$$\begin{aligned} \Delta F(s) &= \frac{(1 - e^{-dcTs}) \Delta S \cos \varphi}{s(J's + R_f)} \cdot \frac{1}{1 - e^{-sT}} \\ &= \frac{(1 - e^{-dcTs}) \Delta S \cos \varphi}{J's(s+p)} \cdot \frac{1}{1 - e^{-sT}} \quad (3.54\alpha) \\ &= \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s+p} \right] \frac{\Delta S \cos \varphi}{J'p} \cdot \frac{1 - e^{-dcTs}}{1 - e^{-sT}} \end{aligned}$$

$$\text{ή } \Delta F(s) = \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s+p} \right] \frac{\Delta S \cos \varphi}{R_f} \cdot \frac{1 - e^{-dcTs}}{1 - e^{-sT}} \quad (3.54\beta)$$

όπου $p = \frac{R_f}{J'}$

και μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού Laplace προκύπτει η απόκριση της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου:

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta S \cos \varphi}{R_f} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[(1 - e^{-p(t-nT)}) u(t-nT) - (1 - e^{-p(t-(n+dc)T)}) u(t-(n+dc)T) \right] \quad (3.55)$$

Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου $nT \leq t < (n+1)T$ και $t' = t - nT$, η παραπάνω σχέση μετατρέπεται σε:

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta S \cos \varphi}{R_f} \left[\frac{e^{dcT} - 1}{e^{pT} - 1} (1 - e^{-npT}) e^{-pt'} + 1 - e^{-pt'} - (1 - e^{-p(t' - dcT)}) e^{-pt'} u(t' - dcT) \right] \quad (3.56)$$

Η τιμή κατά την οποία η Δf μεγιστοποιείται μέσα σε μια περίοδο είναι η $t' = dcT$ και η $\Delta f(t)$ γίνεται:

$$\max \Delta f = \frac{\Delta S \cos \varphi}{R_f} \frac{e^{pT} - e^{-npT}}{e^{pT} - 1} (1 - e^{-pdcT}) \quad (3.57)$$

Η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η Δf (για $t \rightarrow \infty$) είναι η παρακάτω:

$$\max \Delta f = \frac{\Delta S \cos \varphi}{R_f} \frac{e^{pT}}{e^{pT} - 1} (1 - e^{-pdcT}) \quad (3.58)$$

Αντίστοιχα, η Δf ελαχιστοποιείται μέσα σε μία περίοδο όταν $t' = 0$:

$$\min \Delta f = \frac{\Delta S \cos \varphi}{R_f} \left[\frac{e^{dcpT} - 1}{e^{pT} - 1} (1 - e^{-npT}) \right] \quad (3.59)$$

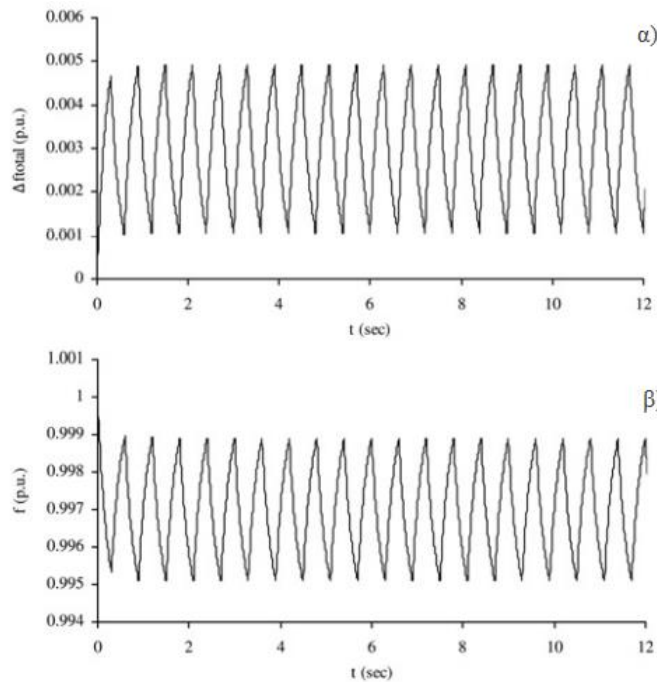
και η ελάχιστη τιμή που μπορεί να λάβει (για $t \rightarrow 0$) είναι:

$$\min \Delta f = 0 \quad (3.60)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις 3.58 και 3.59 στη 3.5 προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$M_f = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2f_n}$$

$$\text{ή } M_f = \frac{\Delta S \cos \varphi}{2f_n R_f} \cdot \frac{e^{pT}}{e^{pT} - 1} (1 - e^{-pdcT}) \quad (3.61)$$



Σχήμα 3.28. Κυματομορφή α) απόκλισης της συχνότητας $\Delta f(t)$ και β) συχνότητας f για $K_{\Pi}=0$ με παραμέτρους $\Delta S=0,15$ p.u., $\cos \varphi=0,8$, $R_f=20$, $J'=4$ sec, $dc=0,5$ και $T=0,6$ sec [24, fig.7]

Από τις 2 παραπάνω κυματομορφές είναι φανερό ότι η απόκλιση της συχνότητας Δf και η συχνότητα f δεν μηδενίζονται σε καμία χρονική στιγμή (non-zero frequency “steady-state” error) στη συγκεκριμένη περίπτωση (περίπτωση Γ). Επομένως, η έλλειψη της δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας επιδρά αρνητικά στο σύστημα.

Η σχέση που καθορίζει το όριο της διαμόρφωσης συχνότητας με βάση το πρότυπο STANAG-1008 είναι η εξής:

$$M_f < M_f^{lim}$$

$$\text{ή } \Delta S \cos \varphi < \frac{2M_f^{lim} f_n R_f (e^{pT} - 1)}{e^{pT} (1 - e^{-pdcT})} \quad (3.62)$$

Από τις σχέσεις 3.41 και 3.62 προκύπτει ότι ο όρος β που εμφανίζεται στις σχέσεις 3.7α και 3.7β δεν είναι σταθερός ($\beta=0,25$ σύμφωνα με το πρότυπο STANAG-1008), αλλά μεταβάλλεται και εξαρτάται από αρκετές παραμέτρους του Σ.Η.Ε. πλοίου, όπως αυτές που παρουσιάστηκαν στη συγκεκριμένη παράγραφο (T , dc , J' , K_{fl} , R_f). Στη συνήθη περίπτωση λειτουργίας του συστήματος ενός πλοίου ($R_f^2 > 4J'K_{fl}$) το β υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση 3.41 και ισούται με:

$$\beta = \frac{2M_f^{lim} f_n J' (p_2 - p_1)}{c} \quad (3.63)$$

όπου οι όροι c , p_1 και p_2 υπολογίζονται από τις σχέσεις 3.40, 3.21 και 3.21 αντίστοιχα.

Στις υπόλοιπες περιπτώσεις (B και Γ) το β υπολογίζεται από τις αντίστοιχες σχέσεις της διαμόρφωσης συχνότητες (M_f^{lim}). [24]

3.5 Ανάλυση επιπτώσεων παλμικών φορτίων στα Σ.Η.Ε. πλοίων μέσω μαθηματικής ανάλυσης ως προς τη διαμόρφωση τάσης

3.5.1 Γενική περιγραφή

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει ανάλυση ενός ακόμα σημαντικού προβλήματος της ποιότητας ισχύος ενός Σ.Η.Ε. πλοίου, της διαμόρφωσης (διαταραχής) της τάσης αυτού. Όπως και η διαμόρφωση συχνότητας, έτσι και η διαμόρφωση τάσης μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα σε ποικίλα υποσυστήματα ενός πλοίου, όπως στα συστήματα επικοινωνίας, πλοήγησης, στα ραντάρ κ.α.. Το συγκεκριμένο πρόβλημα δεν έχει αναλυθεί επαρκώς από τα διάφορα πρότυπα που αφορούν τα Σ.Η.Ε. πλοίων και επομένως υπάρχει άμεση ανάγκη για ένα ολοκληρωμένο θεωρητικό μοντέλο που να περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους που προκαλούν και επιδεινώνουν το φαινόμενο αυτό. Με τον τρόπο αυτόν είναι δυνατός ο ορισμός κατάλληλων περιορισμών για το κάθε πλοίο σε αντίθεση με τους υπάρχοντες γενικούς περιορισμούς των εκάστοτε προτύπων που σε πολλές περιπτώσεις δεν συμφωνούν με τις απαιτήσεις των διάφορων συστημάτων, όπως παρουσιάστηκε και στην προηγούμενη παράγραφο. Όσον αφορά τη συχνότητα ενός Σ.Η.Ε. πλοίου, η επιτρεπόμενη απόκλιση της από την ονομαστική της τιμή είναι περίπου 1% και οι διάφορες διαταραχές του δικτύου έχουν μικρή επίδραση στη διαμόρφωση (διαταραχή) αυτής, λόγω της μεγάλης αδράνειας του δρομέα της γεννήτριας. Επίσης, η διόρθωση της απόκλισης από το ρυθμιστή συχνότητας (Governor) λαμβάνει αρκετό χρόνο, διότι πραγματοποιείται σε 2 στάδια (πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ρύθμιση). Αντίθετα, η επιτρεπόμενη απόκλιση της τάσης του συστήματος είναι μεγαλύτερη από αυτή της συχνότητας (περίπου 2%) και παρά το γεγονός ότι η διαταραχή της τάσης είναι επιρρεπής να προκαλέσει διαταραχή στο Σ.Η.Ε., η αποκατάστασή της από τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης (APT-AVR) είναι αμεσότερη.

3.5.2 Μαθηματική ανάλυση

Η μαθηματική σχέση που δίνει τη διαμόρφωση τάσης είναι η εξής:

$$M_V = \frac{V_{max} - V_{min}}{2V_n} \quad (3.64)$$

όπου V_{max} : η μέγιστη τιμή της τάσης,

V_{min} : η ελάχιστη τιμή της τάσης και

V_n : η ονομαστική τιμή της τάσης

Οι τιμές των τάσεων της σχέσης 3.64 μπορεί να αναφέρονται σε ενεργές, μέσες ή τιμές κορυφής.

Με βάση το πρότυπο STANAG-1008 η τιμή της διαμόρφωσης τάσης δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 2% και το ποσοστό αυτό επιτυγχάνεται όταν ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\Delta Q < 0,065 S_s \quad (3.65\alpha)$$

$$\text{ή } \cos\phi > \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\Delta S(p.u.)}\right)^2} \quad (3.65\beta)$$

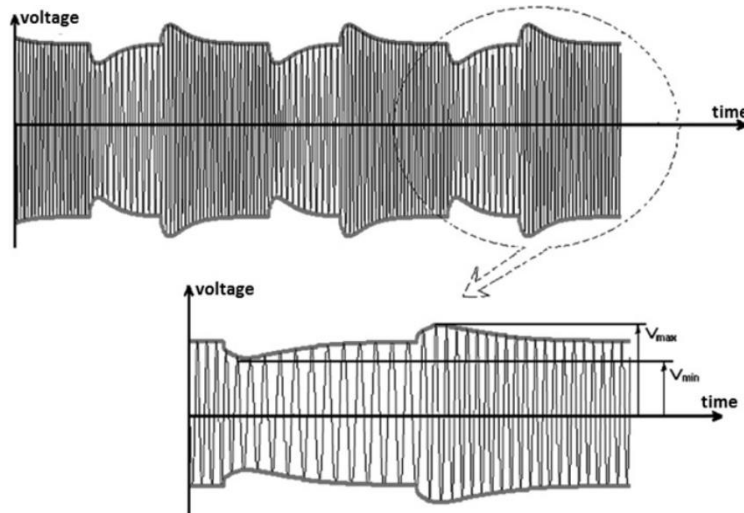
όπου ΔQ : η άεργος ισχύς του παλμικού φορτίου

S_s : η συνολική ονομαστική (rated) φαινόμενη ισχύς της πηγής (supply) κατά τη λειτουργία του παλμικού φορτίου

$\cos\phi$: ο συντελεστής ισχύος του παλμικού φορτίου

α : $\alpha = 0,065$

Η καμπύλη που προκύπτει από τη σχέση 3.65α απεικονίζεται στο σχήμα 3.6, όπου παρουσιάζεται και η επιτρεπτή και μη επιτρεπτή περιοχή λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα 3.29. Διαμόρφωση (διαταραχή) τάσης [25, fig.1]

Η συνάρτηση, η οποία καθορίζει τον περιορισμό της διαμόρφωσης της τάσης (M_V) περιλαμβάνοντας της βασικότερες παραμέτρους του παλμικού φορτίου και του Σ.Η.Ε. πλοίου κατά τη λειτουργία αυτού (του παλμικού φορτίου) είναι οι εξής:

$$F_V = (x, \Delta S, \cos\phi) \leq M_f^{lim} \quad (3.66)$$

όπου ΔS : η φαινόμενη ισχύς του παλμικού φορτίου

$\cos\phi$: Σ.Ι. του παλμικού φορτίου

x : το διάνυσμα που περιλαμβάνει τις κυριότερες παραμέτρους ενός Σ.Η.Ε. πλοίου και οι οποίες επηρεάζουν τη διαμόρφωση τάσης. Η αναλυτική περιγραφή του διανύσματος x είναι η εξής:

$$x = [T, dc, X_C, X', K, K_I, S_{L0}] \quad (3.67)$$

όπου T : η περίοδος λειτουργίας του παλμικού φορτίου

dc : ο κύκλος λειτουργίας του παλμικού φορτίου

X_C : επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταξύ της γεννήτριας και του φορτίου

X' : επαγωγική αντίδραση της γεννήτριας

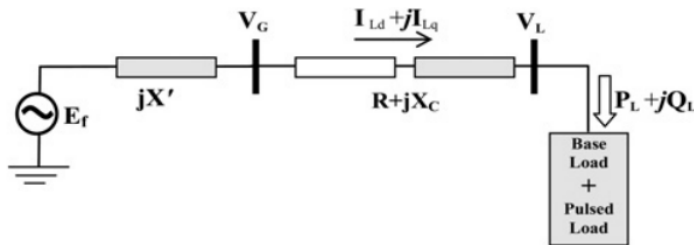
K : αναλογικό (proportional) κέρδος του αυτόματου ρυθμιστή τάσης

K_i: κέρδος ολοκληρωτικού παράγοντα του αυτόματου ρυθμιστή τάσης

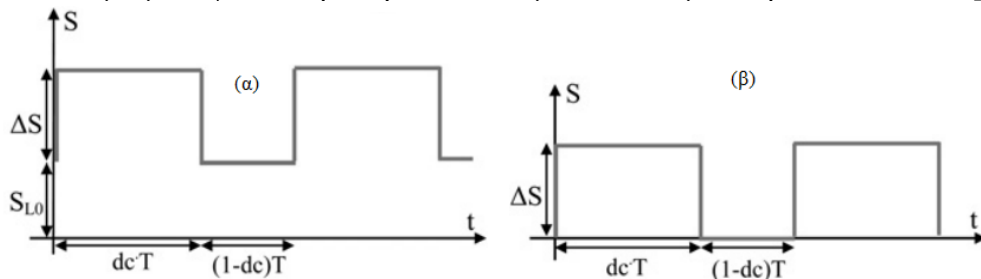
S_{L0}: φαινόμενη ισχύς βάσης του συστήματος πριν τη λειτουργία του παλμικού φορτίου

Το Σ.Η.Ε. που μελετάται στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι αυτό του σχήματος 3.26 που χρησιμοποιήθηκε και στην ανάλυση ως προς τη διαμόρφωση συχνότητας της προηγούμενης παραγράφου (3.4) και με ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, όμοιο με του σχήματος 3.30. Ομοίως, με τη διαμόρφωση συχνότητας το σύστημα μπορεί να εκπροσωπήσει είτε συμβατικό, είτε εξηλεκτρισμένο (AES) πλοίο. Το σύστημα αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Σύγχρονη γεννήτρια
- Γραμμή μεταφοράς (διανομής) σύνθετης αντίστασης $R+jX_C$
- Αυτόματο ρυθμιστή τάσης (AVR)
- Ρυθμιστή συχνότητας (Governor)
- Κύριο φορτίο, στο οποίο περιλαμβάνεται και το σύστημα ηλεκτροπρόωσης στην περίπτωση εξηλεκτρισμένου πλοίου (με γραφική παράσταση λειτουργίας-profile, όπως του σχήματος 3.31α)
- Παλμικό φορτίο (με γραφική παράσταση λειτουργίας, όπως αυτή του σχήματος 3.31β)



Σχήμα 3.30. Ισοδύναμο μονοφασικό ηλεκτρικό κύκλωμα του υπό μελέτη Σ.Η.Ε. πλοίου [25, fig.5]



Σχήμα 3.31. (α) Γραφική παράσταση λειτουργίας (profile) κύριου φορτίου μαζί με παλμικό φορτίο και (β) παλμικού φορτίου [25, figs 4b,4a]

Σύμφωνα με το σχήμα 3.31β η περιοδική συνάρτηση του παλμικού φορτίου είναι η εξής:

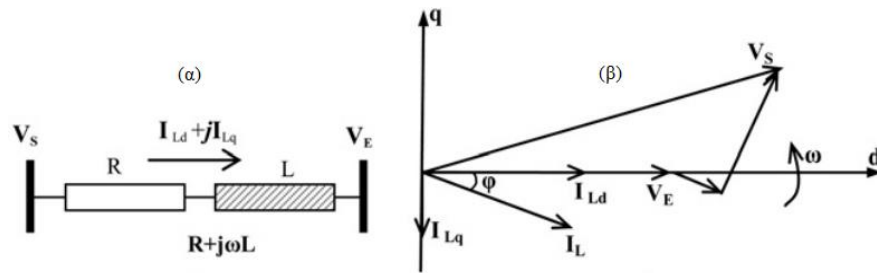
$$\Delta S(t) = \Delta S[u(t) - u(t - dcT)], \quad 0 \leq t < T \quad (3.68)$$

όπου $u(t)$: η βηματική συνάρτηση

Με βάση το μετασχηματισμό Laplace, η παραπάνω συνάρτηση παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\Delta S(s) = \frac{\Delta S}{1 - e^{-sT}} \left(\frac{1}{s} - \frac{e^{-dcTs}}{s} \right) \quad (3.69)$$

Παρακάτω μελετάται η συμπεριφορά της γραμμής διανομής-μεταφοράς του Σ.Η.Ε. της συγκεκριμένης ανάλυσης που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) και από το οποίο προκύπτει το διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 3.32β.



Σχήμα 3.32. (α) Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα γραμμής διανομής-μεταφοράς (κύκλωμα RL) και (β) το διανυσματικό διάγραμμα αυτού [25, fig.6]

Ο κόμβος S του σχήματος 3.32α αντιπροσωπεύει το φανταστικό (imaginary) κόμβο του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος της γεννήτριας, δηλαδή το σημείο που εμφανίζεται η ηλεκτρεγερτική δύναμη (EMF) E_f αυτής, ενώ ο κόμβος E εκπροσωπεί το σημείο σύνδεσης του συστήματος με το φορτίο. Οι σχέσεις που συνδέουν τις τάσεις και τα ρεύματα του κυκλώματος RL είναι οι εξής:

$$V_{sd} = V_{Ed} + RI_{Ld} - \omega LI_{Lq} + \frac{\omega L}{\omega_o} \cdot \frac{dI_{Ld}}{dt} \quad (3.70)$$

$$V_{sq} = V_{Eq} + RI_{Ld} - \omega LI_{Ld} + \frac{\omega L}{\omega_o} \cdot \frac{dI_{Lq}}{dt} \quad (3.71\alpha)$$

και επειδή ισχύει ότι $V_{Eq}=0$, προκύπτει:

$$V_{sq} = RI_{Ld} - \omega LI_{Ld} + \frac{\omega L}{\omega_o} \cdot \frac{dI_{Lq}}{dt} \quad (3.71\beta)$$

όπου $I_{Ld} = I_L \cos \varphi$,

$I_{Lq} = I_L \sin \varphi$ και

φ : η διαφορά φάσης μεταξύ του ρεύματος I_L και της τάσης $V_L (=V_E)$ λόγω του επαγωγικού χαρακτήρα του κυκλώματος (η τάση V_E προηγείται του ρεύματος I_L) η γωνία φ έχει αρνητική τιμή. Για την ανάλυση του RL κυκλώματος έχει ληφθεί ως μέγεθος αναφοράς η τάση εξόδου αυτού ($V_E = V_L$). Οι επαγωγικοί όροι ($\frac{\omega L}{\omega_o}$, $\frac{dI_{Ld}}{dt}$, $\frac{dI_{Lq}}{dt}$) των εξισώσεων 3.70 και 3.71β μπορούν να αμεληθούν αφήνοντας σχεδόν ανεπηρέαστη την ακρίβεια των αποτελεσμάτων των σχέσεων αυτών. Οπότε προκύπτουν οι παρακάτω ισοδύναμες σχέσεις:

$$\begin{aligned} E_{fd} &= V_{Ld} - XI_{Lq} + RI_{Ld}, \\ (V_{Ld} &= V_L, X = X' + X_C) \\ \text{ή } E_{fd} &= V_{Ld} - (X' + X_C)I_{Lq} + RI_{Ld} \quad (3.72) \end{aligned}$$

και

$$\begin{aligned} E_{fq} &= V_{Lq} - XI_{Ld} + RI_{Lq}, \\ (V_{Lq} &= 0, X = X' + X_C) \\ \text{ή } E_{fq} &= (X' + X_C)I_{Ld} + RI_{Lq} \quad (3.73) \end{aligned}$$

Όσον αφορά τη γεννήτρια του συστήματος, η παραγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη (HEΔ-EMF) αυτής ελέγχεται από τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης (APT-AVR), ο οποίος (χωρίς βλάβη της γενικότητας) μπορεί να θεωρηθεί ως αναλογικός ολοκληρωτικός ρυθμιστής (proportional integral-PI). Ως σημείο ελέγχου (μπορεί να θεωρηθεί ως σημείο μέτρησης-measurement point) λαμβάνεται ο ζυγός της γεννήτριας. Επιπλέον, παρά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον ισολογισμό ισχύος του συστήματος για την τιμή της απαιτούμενης εγκατεστημένης ισχύος αυτού, υπάρχει υπερδιαστασιολόγηση αυτής της τιμής με σκοπό την αποφυγή υπερφόρτισης της γεννήτριας. Με αυτήν την επιλογή, η γεννήτρια λειτουργεί στη γραμμική περιοχή της και όχι στην περιοχή κορεσμού ή ακόμα και στο σημείο γονάτου (knee-point) αυτής και γι' αυτό το λόγο ο

κορεσμός της γεννήτριας αμελείται στη συγκεκριμένη μελέτη. Η σχέση που δίνει την τάση εξόδου του APT είναι η εξής:

$$E_f = E_{f0} + K\Delta V_G + K_I \int_0^t \Delta V_G dt \quad (3.74\alpha)$$

$$\left(\begin{array}{l} \Delta V_G = V_{G0} - V_G \\ \text{και για } V_{G0} = 1 \end{array} \right)$$

$$\Delta V_G = 1 - V_G \quad (3.74\beta)$$

όπου E_{f0} : η ΗΕΔ της σύγχρονης γεννήτριας πριν τη λειτουργία του παλμικού φορτίου

V_{G0} : η τάση στο ζυγό της γεννήτριας πριν τη λειτουργία του παλμικού φορτίου

Εφαρμόζοντας αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace στη σχέση 3.74α προκύπτει:

$$\Delta V_G(s) = \frac{sE_f(s) - E_{f0}}{sK + K_I} \quad (3.75)$$

Γενικά, η διαμόρφωση τάσης μπορεί να υπολογιστεί ανεξάρτητα από τον τύπο του APT(AVR), σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\Delta V_G(s) = \frac{E_f(s) - \left(\frac{E_{f0}}{s}\right)}{H_{AVR}(s)} \quad (3.76)$$

όπου $H_{AVR}(s)$: η συνάρτηση μεταφοράς του APT

3.5.2.1 Υπολογισμός της ηλεκτρεγερτικής δύναμης της γεννήτριας – E_f

Με βάση τις σχέσεις 3.72, 3.73 και τον τύπο της φαινόμενης ισχύος $I = \frac{S_L}{V_L}$ ανακύπτει η εξής σχέση:

$$E_f^2 = E_{fd}^2 + E_{fq}^2$$

$$\text{ή } E_f^2 = V_L^2 + \frac{R^2 + X^2}{V_L^2} \cdot S_L^2 + 2(R\cos\varphi + X\sin\varphi)S_L \quad (3.77)$$

και με βάση τον 1^ο όρο (n=1) της σειράς Taylor της παραπάνω εξίσωσης $E_f(V_L, S_L)$ ισχύει:

$$E_f = E_{f0} + \frac{\partial E_f}{\partial V_L} (V_L - V_{L0}) + \frac{\partial E_f}{\partial S_L} (S_L - S_{L0}) \quad (3.78)$$

όπου

$$\left. \frac{\partial E_f}{\partial V_L} \right|_{V_L=V_{L0}, S_L=S_{L0}} = \frac{V_{L0} - \left(\frac{R^2 + X^2}{V_L^2}\right) S_{L0}^2}{E_{f0}} \quad (3.79\alpha),$$

$$\left. \frac{\partial E_f}{\partial S_L} \right|_{V_L=V_{L0}, S_L=S_{L0}} = \frac{(R\cos\varphi + X\sin\varphi) \left(\frac{R^2 + X^2}{V_L^2}\right) S_{L0}^2}{E_{f0}} \quad (3.79\beta)$$

και S_{L0} : η φαινόμενη ισχύς βάσης της γεννήτριας πριν τη λειτουργία του παλμικού φορτίου

Η τάση V_{L0} είναι η τάση στο ζυγό του φορτίου (ταυτίζεται με τον κόμβο E του RL κυκλώματος) και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το κύκλωμα RL (πρόκειται για το κύκλωμα ανάμεσα στο ζυγό της γεννήτριας και στο ζυγό του φορτίου αντί του κυκλώματος μεταξύ του φανταστικού κόμβου της γεννήτριας και του φορτίου). Επιπλέον, η τάση στο ζυγό G του κυκλώματος του σχήματος 3.26 δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{G0}^2 = 1 = V_{L0}^2 + \frac{R^2 + X_C^2}{V_L^2} \cdot S_{L0}^2 + 2(R\cos\varphi + X_C\sin\varphi)S_{L0} \quad (3.80)$$

όπου

$$V_{L0} = \sqrt{\frac{1 - (R\cos\varphi + X_C\sin\varphi)S_{L0} + \sqrt{[2(R\cos\varphi + X_C\sin\varphi)S_{L0} - 1]^2 - 4(R^2 + X_C^2)S_{L0}^2}}{2}} \quad (3.81)$$

Θεωρώντας ότι:

$$\Delta V_L = V_{L0} - V_L \quad (3.82\alpha)$$

$$\Delta S_L = S_L - S_{L0} \quad (3.82\beta)$$

η σχέση 3.78 γίνεται:

$$E_f = E_{f0} + A_1 \Delta S - A_2 V_L \quad (3.83)$$

όπου

$$A_1 = \frac{(R \cos \varphi + X \sin \varphi) + \left(\frac{R^2 + X^2}{V_{L0}^2} \right) S_{L0}}{E_{f0}},$$

$$A_2 = \frac{V_{L0} - \left(\frac{R^2 + X^2}{V_{L0}^3} \right) S_{L0}^2}{E_{f0}} \quad \text{και}$$

$$E_{f0} = \sqrt{V_{L0}^2 + \left(\frac{R^2 + X^2}{V_{L0}^2} \right) S_{L0}^2 + 2(R \cos \varphi + X \sin \varphi) S_{L0}}$$

Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace στη σχέση 3.83 προκύπτει:

$$E_f(s) = \frac{E_{f0}}{s} + A_1 \Delta S(s) - A_2 V_L(s) \quad (3.84)$$

3.5.2.2 Υπολογισμός τάσης ζυγού γεννήτριας V_G

Ομοίως με τον υπολογισμό της τάσης E_f , υπολογίζεται και η τάση V_G ως εξής:

$$V_G^2 = V_{Gd}^2 + V_{Gq}^2$$

$$\text{ή } V_G^2 = V_L^2 + \frac{R^2 + X^2}{V_L^2} \cdot S_L^2 + 2(R \cos \varphi + X_C \sin \varphi) S_L \quad (3.85)$$

Αξιοποιώντας τον 1^ο όρο (n=1) της σειράς Taylor για την παραπάνω σχέση $V_G(V_L, S_L)$ προκύπτει ότι:

$$V_G = V_{G0} + \frac{\partial V_G}{\partial V_L} (V_L - V_{L0}) + \frac{\partial V_G}{\partial S_L} (S_L - S_{L0}) \quad (3.86)$$

$$\text{ή } \Delta V_G = -B_1 \Delta S + B_2 \Delta V_L \quad (3.87)$$

όπου

$$B_1 = \frac{(R \cos \varphi + X_C \sin \varphi) + \left(\frac{R^2 + X_C^2}{V_{L0}^2} \right) S_{L0}}{V_{G0}}$$

και

$$B_2 = \frac{V_{L0} - \left(\frac{R^2 + X_C^2}{V_{L0}^3} \right) S_{L0}^2}{V_{G0}}$$

Με βάση το μετασχηματισμό Laplace, η 3.86 παίρνει την εξής μορφή:

$$\Delta V_G(s) = -B_1 \Delta S(s) - B_2 V_L(s) \quad (3.88)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 3.75, 3.84 και 3.88 προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\Delta V_L(s) = \frac{A_1 + B_1 K}{A_2 + B_2 K} \frac{s + \left(\frac{B_1 K_I}{A_1 + B_1 K} \right)}{s + \left(\frac{B_2 K_I}{A_2 + B_2 K} \right)} \Delta S(s) \quad (3.89)$$

και για

$$\Delta S(s) = \frac{\Delta S}{1 - e^{-sT}} \left(\frac{1}{s} - \frac{e^{-dcTs}}{s} \right)$$

προκύπτει τελικά ότι:

$$\Delta V_L(s) = \Gamma_1 \frac{\Delta S}{s} \left(\frac{1 - e^{-dcTs}}{1 - e^{-sT}} \right) + \Gamma_2 \frac{\Delta S}{s + \gamma} \left(\frac{1 - e^{-dcTs}}{1 - e^{-sT}} \right) \quad (3.90)$$

και η παραπάνω σχέση σύμφωνα με το μετασχηματισμό Laplace γράφεται ως εξής:

$$\Delta V_L(t, n) = \Gamma_1 \Delta S \sum_{n=0}^{\infty} [u(t - nT) - u(t - nT - dcT)] + \Gamma_2 \Delta S \sum_{n=0}^{\infty} [e^{-\gamma(t - nT)} u(t - nT) - e^{-\gamma(t - nT - dcT)} u(t - nT - dcT)] \quad (3.91)$$

όπου

$$\Gamma_1 = \frac{B_1}{B_2} > 0$$

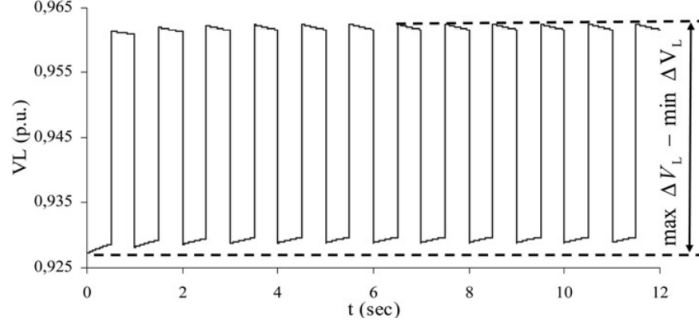
$$\Gamma_2 = \frac{B_2 A_1 - B_1 A_2}{B_2 (A_2 + B_2 K)} > 0$$

$$\gamma = \frac{B_2 K_I}{A_2 + B_2 K}$$

Στο διάστημα $nT < t < (n+1)T$ και $t' = t - nT$ η σχέση 3.91 παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\Delta V_L(t, n) = \Gamma_1 \Delta S + \Gamma_2 \Delta S \left[e^{-\gamma t'} (1 - e^{\gamma dcT}) \left(\frac{1 - e^{-n\gamma T}}{e^{\gamma T} - 1} \right) + e^{\gamma t'} \right], 0 \leq t' < dcT \quad (3.92\alpha)$$

και
$$\Delta V_L(t, n) = \Gamma_2 \Delta S e^{-\gamma t'} (1 - e^{\gamma dcT}) \left(\frac{e^{\gamma T} - e^{-n\gamma T}}{e^{\gamma T} - 1} \right), dcT \leq t' < T \quad (3.92\beta)$$



Σχήμα 3.33. Κυματομορφή της τάσης του ζυγού στο φορτίο (μετά τη γραμμή μεταφοράς-διανομής) V_L με παραμέτρους $\Delta S=0,2\text{p.u.}$, $\cos\varphi=0,8$, $K=5$, $K_I=5$, $dc=0,5$, $T=1\text{sec}$, $X'=0,15\text{p.u.}$, $X_c=0,2\text{p.u.}$, $S_{L0}=0,3\text{p.u.}$ [25, fig.7]

Από τις σχέσεις 3.92α, 3.92β και με βάση το παραπάνω σχήμα συμπεραίνεται ότι η μέγιστη τιμή της τάσης του ζυγού του φορτίου $\max \Delta V_L$ εμφανίζεται τη χρονική στιγμή $t'=0$. Γενικά:

- Για $t'=0$ και $n=0$ ($t=0$) ισχύει:

$$\Delta V_L = (\Gamma_1 + \Gamma_2) \Delta S \quad (3.93)$$

- Για $t'=0$ και $n \rightarrow \infty$ ισχύει:

$$\Delta V_L = \left[\Gamma_1 + \Gamma_2 \left(\frac{e^{\gamma T} - e^{\gamma dcT}}{e^{\gamma T} - 1} \right) \right] \Delta S < (\Gamma_1 + \Gamma_2) \Delta S \quad (3.94)$$

και πιο συγκεκριμένα για τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της τάσης ΔV_L ισχύει:

$$\max \Delta V_L = (\Gamma_1 + \Gamma_2) \Delta S, \text{ για } t=0 \quad (3.95\alpha)$$

και
$$\min \Delta V_L = \Gamma_2 \Delta S (1 - e^{-\gamma dcT}) \frac{e^{\gamma T}}{e^{\gamma T} - 1}, \text{ για } t'=dcT \text{ και } n \rightarrow \infty \quad (3.95\beta)$$

Αντικαθιστώντας τις 2 παραπάνω σχέσεις στη 3.64 προκύπτει:

$$M_V = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2V_n}$$

$$\text{ή } M_V = \frac{\Gamma_1 + \Gamma_2 \left(\frac{2e^{\gamma T} - e^{\gamma T(1-dc)} - 1}{e^{\gamma T} - 1} \right) \Delta S}{2V_n} \quad (3.96\alpha)$$

$$\text{ή } M_V = \frac{\Delta S}{2} (z_1 + z_2 \sin\varphi) \quad (3.96\beta)$$

για $R \approx 0$, $V_n = 1\text{p.u.}$, $E_{f0} = 1\text{p.u.}$, $X \approx X'$, $X + X' \approx 2X$ και $1 - X^2 S_{L0}^2 \approx 1 - (X')^2 S_{L0}^2$

όπου
$$z_1 = \frac{X^2 S_{L0}}{1 - X_c^2 S_{L0}^2} + \frac{2X' X S_{L0}}{(K+1)(1 - X_c^2 S_{L0}^2)^2} \frac{2e^{\gamma T} - e^{\gamma T(1-dc)}}{e^{\gamma T} - 1}$$

και
$$z_2 = \frac{X}{1 - X_c^2 S_{L0}^2} + \frac{X'(1 + X^2 S_{L0}^2)}{(K+1)(1 - X_c^2 S_{L0}^2)^2} \frac{2e^{\gamma T} - e^{\gamma T(1-dc)}}{e^{\gamma T} - 1}$$

Επομένως, η σχέση που καθορίζει το όριο της διαμόρφωσης τάσης είναι η παρακάτω:

$$M_V < M_V^{lim}$$

$$\frac{\Delta S}{2}(z_1 + z_2 \sin \varphi) < M_V^{lim} \quad (3.97)$$

και άρα η σχέση 3.65β μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\cos \varphi > \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\Delta S(p.u.)}\right)^2}$$

$$\text{ή } \cos \varphi > \sqrt{1 - \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2 + \frac{4M_V^{lim} z_1}{z_2^2} \left(\frac{1}{\Delta S}\right) - \frac{4(M_V^{lim})^2}{z_2^2} \left(\frac{1}{\Delta S^2}\right)} \quad (3.98)$$

Επειδή οι όροι $X^2 S_{L0}^2$, $XX_C S_{L0}$, $XX' S_{L0}$ θεωρούνται αμελητέοι η προηγούμενη σχέση απλοποιείται και λαμβάνει την αρχική της μορφή (είναι η ίδια με τη σχέση 3.65β- $\cos \varphi > \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\Delta S(p.u.)}\right)^2}$):

$$\cos \varphi > \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\Delta S}\right)^2} \quad (3.99)$$

και ο συντελεστής α περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\alpha = \frac{2M_V^{lim}}{X + \left(\frac{X'}{K+1}\right) \frac{2e^{\gamma T} - e^{\gamma T(1-dc)}}{e^{\gamma T} - 1}} \quad (3.100)$$

Με βάση τις 2 τελευταίες σχέσεις (3.99-3.100) προκύπτουν οι καμπύλες λειτουργίας S-cosφ του παλμικού φορτίου, των οποίων η γενική μορφή είναι όμοια με αυτή των καμπυλών που προτείνει το πρότυπο STANAG-1008 (σχήμα 3.6). Όμως, στη συγκεκριμένη περίπτωση ο σχεδιασμός των καμπυλών λειτουργίας εξαρτάται από τις παραμέτρους του εκάστοτε Σ.Η.Ε., όπως αναφέρθηκαν και στην αρχή της παραγράφου (T, dc, X_C, X', K, K_I, S_{L0}) και μελετάται στο χρονικό διάστημα $t \in [0, \infty)$, σε αντίθεση με τις καμπύλες που προτείνει το πρότυπο STANAG-1008, οι οποίες είναι σταθερές και δεν προσδιορίζουν το χρονικό διάστημα μελέτης της διαμόρφωσης τάσης. [25]

3.6 Απαιτήσεις κανονισμών-δυνατότητας βελτίωσης

3.6.1 Γενική περιγραφή

Υπάρχουν ορισμένα πρότυπα που προτείνουν περιορισμούς που αφορούν γενικά τα Σ.Η.Ε. πλοίων και ειδικότερα το πρόβλημα της ποιότητας ισχύος (Power Supply Quality-PSQ), η οποία επηρεάζεται από το φαινόμενο της διαμόρφωσης (διαταραχής) τάσης και συχνότητας, όπως αναπτύχθηκαν και στο συγκεκριμένο κεφάλαιο. Τα κυριότερα πρότυπα είναι το IEEE-45, το USA-MIL-1399 και το STANAG-1008 του NATO (που χρησιμοποιήθηκε και στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο αυτό). Παρά τους κανονισμούς-περιορισμούς που θέτουν για τα Σ.Η.Ε. των πλοίων, δεν εμβαθύνουν σε μεγάλο βαθμό στα ζητήματα ποιότητας ισχύος ενός πλοίου και κατ' επέκταση υπάρχουν περιορισμοί που είναι αυστηροί και δεν αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Αυτό έχει επαληθευτεί από διάφορες προσομοιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί (παράγραφος 3.3) και οφείλεται στο γεγονός ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη ορισμένες σημαντικές παράμετροι των Σ.Η.Ε. των πλοίων, όπως αυτές που παρουσιάστηκαν και σε προηγούμενες παραγράφους.

3.6.2 Απαιτήσεις κανονισμών και δυνατότητες βελτίωσης ως προς τη διαμόρφωση συχνότητας

Όπως παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους, σύμφωνα με το πρότυπο STANAG-1008 η ανισότητα που πρέπει να ικανοποιείται, ώστε να μην υπερβαίνεται το όριο της διαμόρφωσης-διαταραχής της συχνότητας

(M_f) είναι αυτή της σχέσης (3.9β). Η σχέση αυτή εξαρτάται από το σταθερό συντελεστή β που λαμβάνεται ίσος με $\beta=0,25$ από το πρότυπο STANAG-1008 και κατ' επέκταση προκύπτει μία μοναδική καμπύλη λειτουργίας $\Delta s-\cos\varphi$ (σχήμα 3.6) από την οποία καθορίζεται η επιτρεπτή και μη περιοχή λειτουργίας του συστήματος. Αυτή η κατάσταση σταθερής περιοχής λειτουργίας, πολλές φορές, είναι μη πρακτική, όπως προέκυψε από τις ποικίλες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παράγραφο 3.3. Πιο αποτελεσματική μελέτη μπορεί να επιτευχθεί λαμβάνοντας υπόψη ορισμένες βασικές παραμέτρους του Σ.Η.Ε. ενός πλοίου από τις οποίες καθορίζεται η καμπύλη λειτουργίας του εκάστοτε συστήματος, διότι πλέον ο συντελεστής β δεν θεωρείται σταθερός, αλλά υπολογίζεται με βάση τις παραμέτρους αυτές, όπως πραγματοποιήθηκε στην παράγραφο 3.4 (σχέση 3.63).

3.6.3 Απαιτήσεις κανονισμών και δυνατότητες βελτίωσης ως προς τη διαμόρφωση τάσης

Ομοίως με τις απαιτήσεις των κανονισμών για τη διαμόρφωση συχνότητας, έτσι και στη διαμόρφωση (διαταραχή) της τάσης (M_V), βάσει του προτύπου STANAG-1008, η τιμή της δίνεται από τη σχέση 3.8β. Σε αυτήν την περίπτωση ο σταθερός όρος της σχέσης είναι ο $\alpha=0,065$ και κατ' επέκταση προκύπτει μία μοναδική καμπύλη λειτουργίας του συστήματος $\Delta S-\cos\varphi$, η οποία εξαρτάται μόνο από τη φαινόμενη ισχύ του παλμικού φορτίου (ΔS) και το συντελεστή ισχύος αυτού ($\cos\varphi$). Όμως, οι περιοχές της επιτρεπτής και μη επιτρεπτής λειτουργίας ενός συστήματος μεταβάλλονται και ανεξάρτητα από τους 2 παραπάνω παράγοντες (Δs , $\cos\varphi$), διότι το εμβαδόν τους επηρεάζεται και από διάφορες παραμέτρους του παλμικού φορτίου, αλλά και ολόκληρου του Σ.Η.Ε., όπως παρουσιάστηκαν και στην παράγραφο 3.5. Έτσι, μία πιο αντιπροσωπευτική προσέγγιση του περιορισμού της διαμόρφωσης τάσης μπορεί να επιτευχθεί με τον αναλυτικό υπολογισμό του συντελεστή α , όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.5 (σχέση 3.100), μέσω του οποίου προκύπτει μία περιοχή λειτουργίας που ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν σε ένα πλοίο κατά τη λειτουργία ενός ή περισσότερων παλμικών φορτίων. [24], [25], [26]

3.7 Συμπεράσματα

Η λήψη όσο το δυνατόν περισσότερων παραμέτρων εντός της μελέτης σχεδιασμού κάθε Σ.Η.Ε. πλοίου είναι απαραίτητη, ειδικά στη συγκεκριμένη εποχή, όπου τα παλμικά φορτία και γενικά ο ηλεκτρικός εξοπλισμός αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα των πλοίων. Μέχρι τώρα, όλοι οι υπάρχοντες περιορισμοί που θέτουν τα εκάστοτε πρότυπα παραλείπουν σημαντικές παραμέτρους του συστήματος, επηρεάζοντας με αυτόν τον τρόπο άσκοπα και έντονα την περιοχή λειτουργίας του παλμικού φορτίου και χωρίς να παρουσιάζουν κάποια λεπτομερή μαθηματική περιγραφή από την οποία να προκύπτουν οι συγκεκριμένοι περιορισμοί. Στο κεφάλαιο αυτό επεξηγήθηκαν ο ορισμός και τα είδη των παλμικών φορτίων ενός πλοίου, καθώς και τα προβλήματα που προκαλούνται στο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου κατά τη λειτουργία τους (των παλμικών φορτίων). Τα 2 βασικότερα προβλήματα που προκύπτουν είναι η διαμόρφωση-διαταραχή της συχνότητας και της τάσης του συστήματος για τις οποίες πραγματοποιήθηκε ξεχωριστή θεωρητική ανάλυση, με σκοπό τη δημιουργία μιας μαθηματικής έκφρασης, η οποία περιλαμβάνει τις κυριότερες παραμέτρους ενός Σ.Η.Ε. πλοίου που συμβάλλουν στη διαταραχή των 2 αυτών μεγεθών. Αυτή η λεπτομερής ανάλυση συμβάλλει στην ευελιξία κάθε μελέτης, διότι στην περίπτωση μη ικανοποίησης των περιορισμών από την υπάρχουσα μελέτη, με κατάλληλη παραλλαγή και επεξεργασία των παραμέτρων μπορεί εύκολα να διορθωθεί η μελέτη, τηρώντας τους εκάστοτε κανονισμούς. Τέλος, μέσω της γνώσης όλων των καθοριστικών για τη μελέτη παραμέτρων είναι δυνατή η λήψη αναλυτικών προσομοιώσεων ποικίλων συνθηκών λειτουργίας του πλοίου και ταυτόχρονα μπορεί να πραγματοποιηθεί και ο έλεγχος της ευστάθειας του ηλεκτρικού συστήματος αυτού.

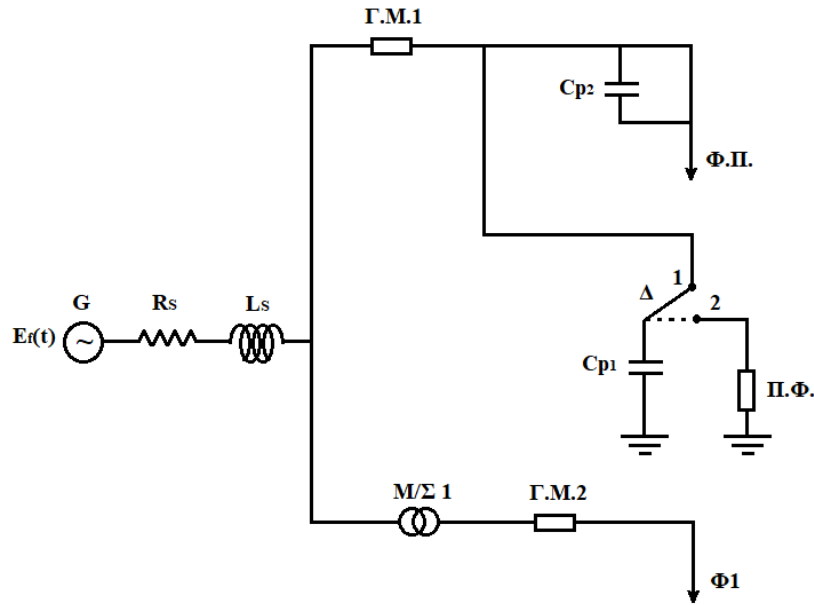
4 Κεφάλαιο 4^ο: Ανάπτυξη συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου για την προσομοίωση παλμικών φορτίων

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα διαμορφωθεί ένα μοντέλο ενός Σ.Η.Ε. πλοίου (με διάταξη παρόμοια των Σ.Η.Ε. που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο-3), το οποίο θα περιλαμβάνει τα βασικά φορτία (απλά φορτία κατανάλωσης, κινητήρες), μετασχηματιστή, τους ισοδύναμους αγωγούς και το παλμικό φορτίο αυτού. Μέσω αυτού του Σ.Η.Ε. θα είναι δυνατή η εκτέλεση σεναρίου λειτουργίας υπό συνθήκες, ώστε να γίνει εμφανής η επίδραση της διάταξης του παλμικού φορτίου στο συνολικό ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου. Θα γίνει αναλυτική παρουσίαση της κατασκευής και των χαρακτηριστικών όλων των διατάξεων που συντελούν το τελικό Σ.Η.Ε. (πηγές, φορτία, αγωγοί, μετασχηματιστής). Κύριος σκοπός της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος κατά τη λειτουργία του παλμικού φορτίου και ειδικότερα η ανάλυση των επιπτώσεων σε αυτό (το σύστημα) λόγω της διαταραχής ορισμένων βασικών μεγεθών λειτουργίας αυτού, όπως η διαμόρφωση συχνότητας και τάσης, που παρουσιάστηκαν και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Με αυτόν τον τρόπο θα γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας των παλμικών φορτίων και η επίδραση αυτών στο υπόλοιπο σύστημα και κατ' επέκταση θα προκύψουν τρόποι αντιμετώπισης των δυσχερών επιπτώσεων που προκαλούνται στο Σ.Η.Ε. ενός πλοίου, λόγω των φορτίων αυτών.

4.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας πλοίου-κύκλωμα προσομοίωσης

Το ισοδύναμο μονογραμμικό διάγραμμα του Σ.Η.Ε. πλοίου που θα μελετηθεί στη συγκεκριμένη εργασία είναι αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1. Πρόκειται για ένα εξηλεκτρισμένο (AES) πλοίο, αποτελείται δηλαδή από σύστημα ηλεκτροπρώωσης (Φ.Π.) και το οποίο τροφοδοτείται μέσω συστήματος τριφασικών σύγχρονων γεννητριών (G). Επίσης, περιλαμβάνει ένα παλμικό φορτίο (Π.Φ.), το οποίο είναι συνδεδεμένο στην πλευρά της υψηλής τάσης του συστήματος και αντιπροσωπεύει έναν ηλεκτρομαγνητικό εκτοξευτή πυραύλων (EMML). Το παλμικό φορτίο δεν τροφοδοτείται απευθείας από το σύστημα γεννητριών, αλλά μέσω μίας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας (ESD-Energy Storage Device), όπως παρουσιάζεται και στη συνέχεια, η οποία αποτελείται από μία συστοιχία πυκνωτών κατάλληλης χωρητικότητας (C_{p1}). Η λειτουργία του συστήματος του παλμικού φορτίου και της μονάδας αποθήκευσης ρυθμίζεται μέσω του συστήματος αυτοματισμού του σχήματος 4.3 ως εξής: κατά τη χρονική περίοδο που το παλμικό φορτίο είναι απενεργοποιημένο, η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας φορτίζεται από το σύστημα γεννητριών χωρίς όμως να τροφοδοτεί το παλμικό φορτίο ταυτόχρονα (λειτουργία 1-ενεργοποίηση ηλεκτρονόμου K1M), καταλήγοντας στο κύκλωμα του σχήματος 4.4. Κατά την ενεργοποίηση του παλμικού φορτίου, (λειτουργία 2-ενεργοποίηση ηλεκτρονόμου K2M), η συστοιχία πυκνωτών αποσυνδέεται από το κύριο σύστημα και συνδέεται μόνο με το παλμικό φορτίο (σχήμα 4.6). Τέλος, στο σύστημα υπάρχει ένα συμβατικό φορτίο (Φ1) στην πλευρά της χαμηλής τάσης του συστήματος, το οποίο τροφοδοτείται μέσω μετασχηματιστή υποβιβασμού (M/Σ1). Τέλος, η πλευρά της υψηλής τάσης τροφοδοτείται μέσω ξεχωριστής γραμμής μεταφοράς-Γ.Μ 1, ενώ το συμβατικό φορτίο τροφοδοτείται μέσω των δικών του αγωγών-Γ.Μ.2. Τα στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα, οι τιμές και τα χαρακτηριστικά αυτών παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 4.1. Ισοδύναμο μονογραμμικό διάγραμμα Σ.Η.Ε. πλοίου

Με βάση το παρακάτω κύκλωμα του σχήματος 4.2β ισχύουν τα εξής:

Για το σχήμα 4.4 ισχύει ότι:

➤ **Είσοδος (1):** $E_f(t)$

➤ **Μεταβλητές (4):** $V_{cp}(t), i_A(t), i_C(t), i_D(t)$,

όπου $C_p = C_{p1} + C_{p2}$ (παράλληλη σύνδεση των 2 πυκνωτών-ίδια τάση λειτουργίας-για K1M κλειστό, λειτουργία 1 του κυκλώματος 4.3)

➤ **Έξοδος (1):** $i_S(t)$

όπου $L_A = L_1, L_C = L_3, L_D = L_4 + L_5 + L_6$

$R_A = R_1, R_C = R_3, R_D = R_4 + R_{4M} + R_5$

Για το σχήμα 4.5 ισχύει ότι:

➤ **Είσοδος (1):** $E_f(t)$

➤ **Μεταβλητές (4):** $V_{cp}(t), i_A(t), i_C(t), i_D(t)$,

όπου $C_p = C_{p2}$ (Για K2M κλειστό, λειτουργία 2 του κυκλώματος 4.3)

➤ **Έξοδος (1):** $i_S(t)$

όπου $L_A = L_1, L_C = L_3, L_D = L_4 + L_5 + L_6$

$R_A = R_1, R_C = R_3, R_D = R_4 + R_{4M} + R_5$

Για το σχήμα 4.6 ισχύει ότι:

➤ **Είσοδος (1):** $V_{cp1}(t)$

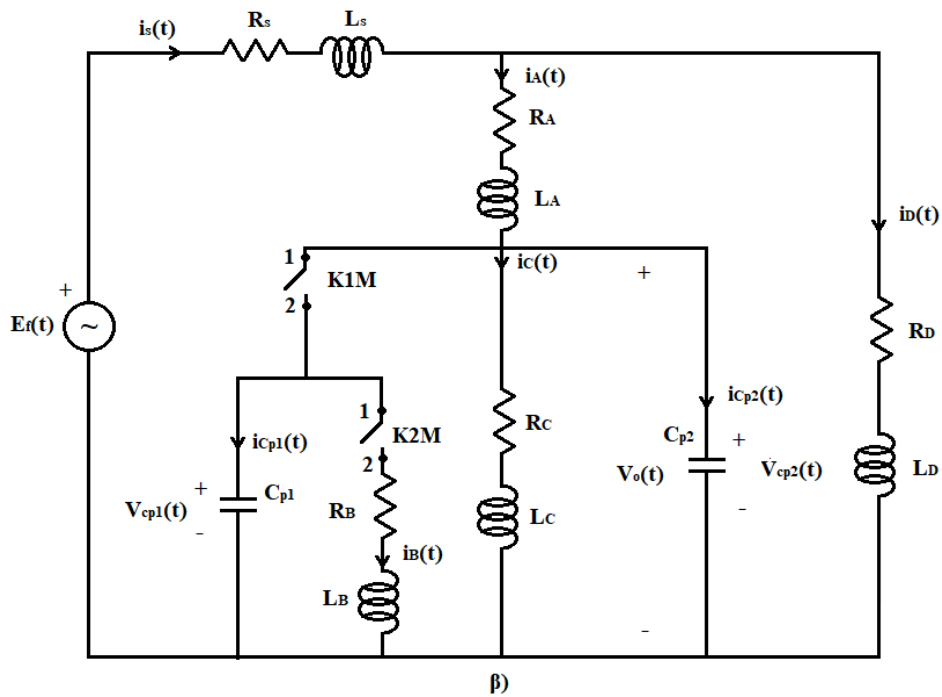
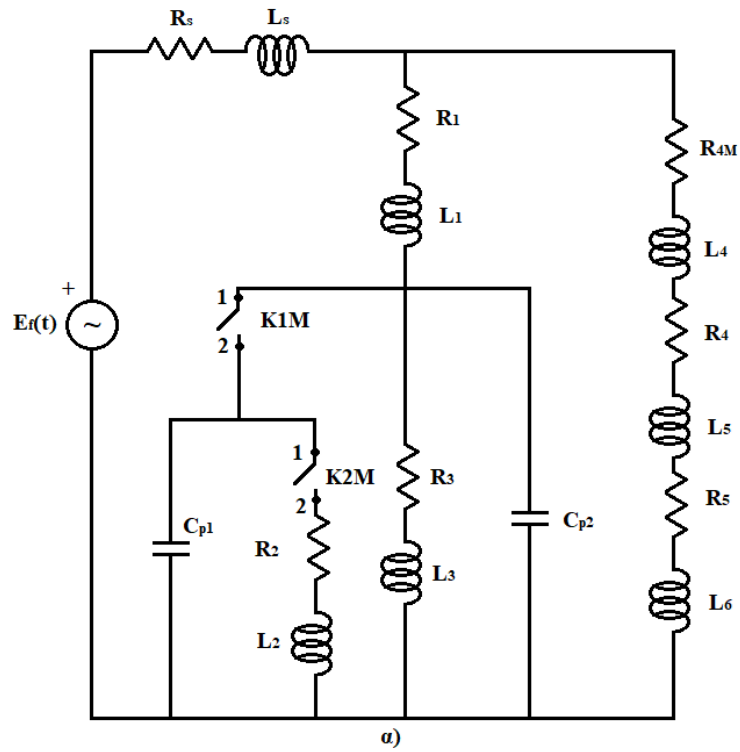
➤ **Μεταβλητές (1):** $i_B(t)$

➤ **Έξοδοι (1):** $i_B(t)$

όπου $L_B = L_2$

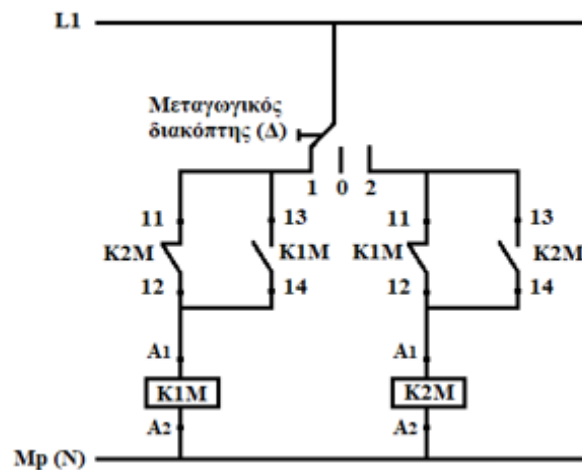
$R_B = R_2$

Το ισοδύναμο μονοφασικό ηλεκτρικό κύκλωμα της παραπάνω διάταξης είναι το εξής:



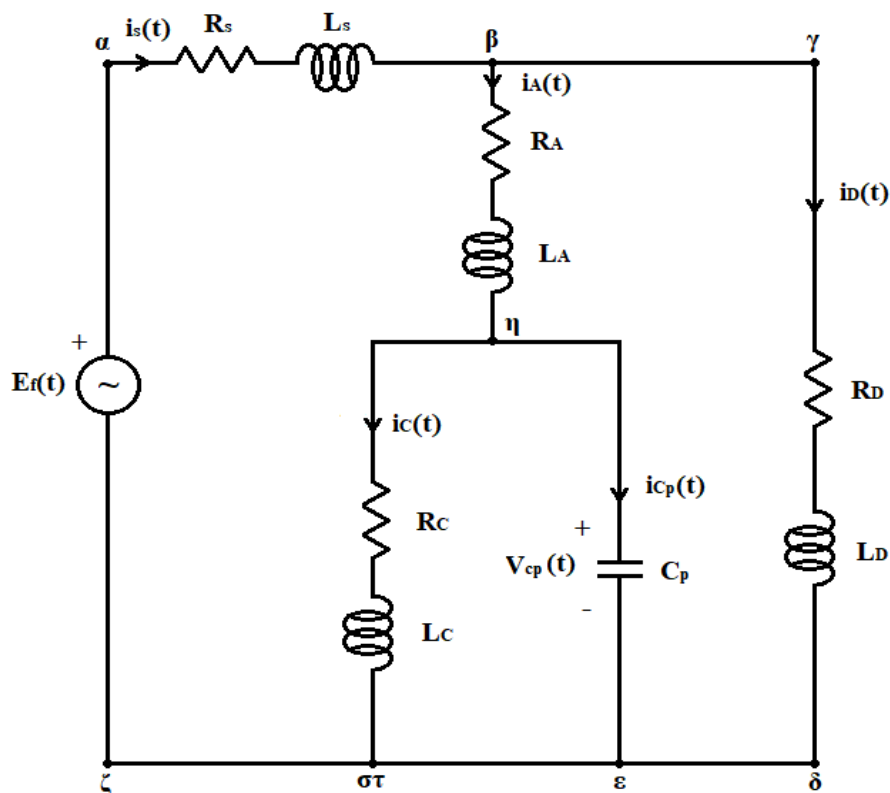
Σχήμα 4.2. Ισοδύναμο μονοφασικό ηλεκτρικό κύκλωμα του υπό μελέτη Σ.Η.Ε. πλοίου σε α) πλήρη και β) ισοδύναμη μορφή

Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτοματισμού βάσει του οποίου λειτουργεί το συνολικό σύστημα είναι το παρακάτω:

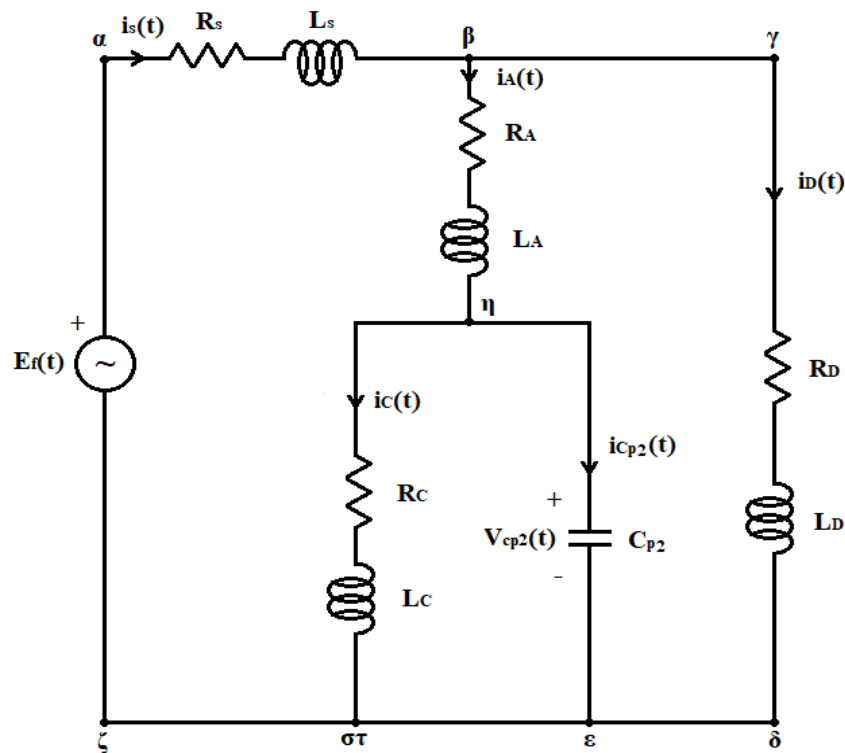


Σχήμα 4.3. Ισοδύναμο μονογραμμικό κύκλωμα αυτοματισμού του συστήματος

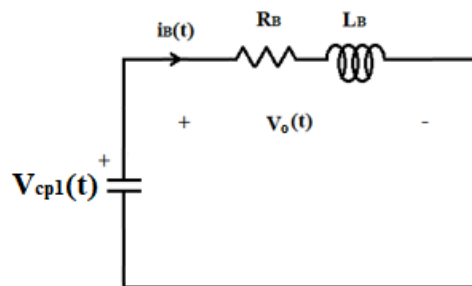
Τα δύο επιμέρους κυκλώματα στα οποία χωρίζεται το συνολικό σύστημα (σύμφωνα με το σύστημα αυτοματισμού) είναι τα εξής:



Σχήμα 4.4. Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα του συστήματος κατά τη μη λειτουργία του παλμικού φορτίου (λειτουργία-1 του συστήματος αυτοματισμού)



Σχήμα 4.5. Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα του συστήματος κατά τη λειτουργία του παλμικού φορτίου (λειτουργία-2 του συστήματος αυτοματισμού)

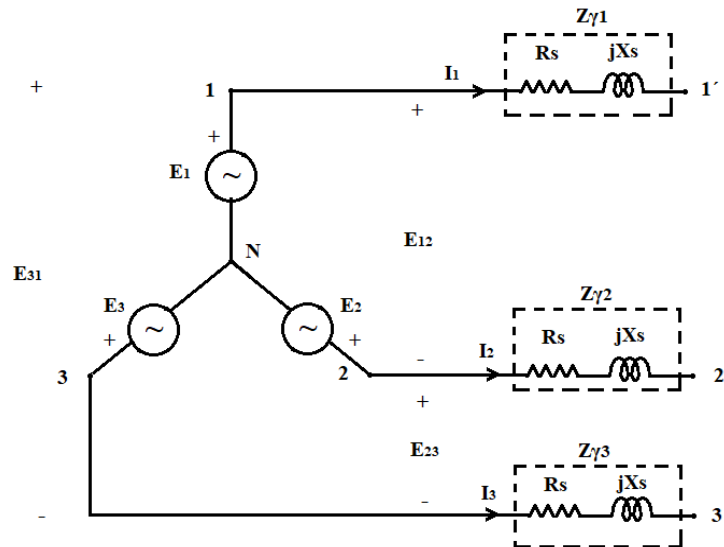


Σχήμα 4.6. Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα του συστήματος τροφοδοσίας του παλμικού φορτίου κατά τη λειτουργία αυτού (λειτουργία-2 του συστήματος αυτοματισμού)

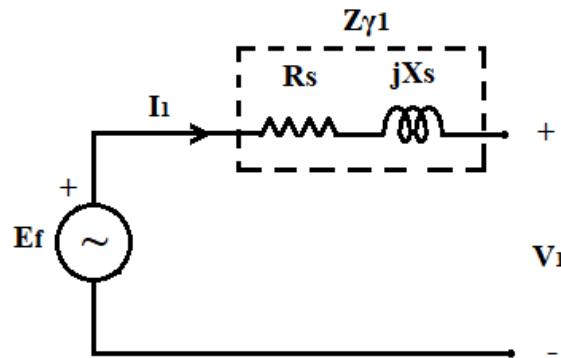
4.3 Διαμόρφωση στοιχείων

4.3.1 Μοντέλο ηλεκτρογεννήτριας

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστεί το μοντέλο της ηλεκτρογεννήτριας που θα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη του Σ.Η.Ε. της προσομοίωσης και την ανάλυση των παραμέτρων αυτού. Πρόκειται για μία σύγχρονη τριφασική γεννήτρια σε συνδεσμολογία αστέρα με τα χαρακτηριστικά που υπολογίζονται παρακάτω και περιέχονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.1. Στα 2 παρακάτω σχήματα απεικονίζονται το τριφασικό μονογραμμικό διάγραμμα της γεννήτριας και το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα αυτής αντίστοιχα:



Σχήμα 4.7. Μονογραμμικό διάγραμμα του μοντέλου της γεννήτριας προσομοίωσης



Σχήμα 4.8. Ισοδύναμο μονοφασικό διάγραμμα της σύγχρονης γεννήτριας

όπου E_f : η τάση διέγερσης της γεννήτριας (ή E_1 για την 1^η φάση): η (φασική-τερματική) τάση του τυλίγματος τυμπάνου

I_1 : το ρεύμα του τυλίγματος τυμπάνου

R_s : η ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου

X_s : η σύγχρονη αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου ($X_s = X_a + X_{al}$)

Πίνακας 4.1. Χαρακτηριστικά γεννήτριας

Παράμετροι γεννήτριας	Αριθμητικές τιμές
S(MVA)	35
V_{π} (V)	4160
R_s (p.u.)	0,00285
X_s (p.u.)	1,305
f(Hz)	60
Σ.Ι. (επαγ.)	0,75
Pole pairs (-)	4

Θεωρώντας ως βασικά μεγέθη στο ζυγό της γεννήτριας την ονομαστική της ισχύ και τάση, υπολογίζεται η αντίστοιχη βασική αντίσταση αυτής:

$$S_{3\varphi} = 3V_{\varphi} * I = \sqrt{3}V_{\pi}I \quad (4.1)$$

όπου V_{φ} : η φασική τάση της γεννήτριας (όπου στην περίπτωση συνδεσμολογίας τριγώνου ταυτίζεται με την πολική)

I : το ρεύμα γραμμής της γεννήτριας

$$S_{3\varphi} = 3V_{\varphi} * \frac{V_{\varphi}}{Z_B}$$

$$\text{ή } S_{3\varphi} = \frac{(\sqrt{3}V_{\varphi})^2}{Z_B}$$

$$\text{ή } S_{3\varphi} = \frac{V_{\pi}^2}{Z_B}$$

$$\text{ή } Z_B = \frac{V_{\pi}^2}{S_{3\varphi}}$$

$$\text{ή } Z_B = \frac{4160^2}{35000000}$$

$$\text{ή } Z_B = 0,49445 \Omega$$

Επομένως, η ισοδύναμη ανά φάση αντίσταση και αντίδραση της γεννήτριας σε απόλυτες τιμές υπολογίζονται με βάση την εξής σχέση:

$$Z_s = Z_{pu} * Z_B \quad (4.2)$$

$$\text{ή } Z_{\gamma 1} = (R_s + jX_s) * Z_B$$

$$\text{ή } Z_s = (0,00285 + j1,305) * 0.49445 = 0,00141 + j0,6453 \Omega = 0,6454 \angle 89,875 \Omega$$

όπου

$$X_s = \omega \cdot L_s$$

$$\text{ή } X_s = 2\pi f L_s$$

$$\text{ή } L_s = \frac{X_s}{2\pi f}$$

$$\text{ή } L_s = \frac{0,6453 \Omega}{2 * 3,14 * 60 \text{ Hz}}$$

$$\text{ή } L_s = 0,00171 \text{ H} = 1,71 \text{ mH}$$

Από το κύκλωμα του σχήματος 4.3 και των χαρακτηριστικών της γεννήτριας (πίνακας 4.1) υπολογίζονται όλα τα μεγέθη της και στις 3 φάσεις, δηλαδή οι φασικές (ή πολικές) τάσεις και τα ρεύματα γραμμής:

➤ Υπολογισμός φασικών τάσεων ακροδεκτών της γεννήτριας:

$$V_1 = \frac{V_{\pi}}{\sqrt{3}}$$

$$\text{ή } V_1 = \frac{4160}{\sqrt{3}}$$

$$\text{ή } V_1 = 2401,777 \text{ V}$$

Λαμβάνοντας τη γωνία της τάσης E_1 ($1^{\text{η}}$ φάση) ως γωνία αναφοράς ($\varphi_1=0$) και για ευθεία διαδοχή των φάσεων η τιμή της είναι η παρακάτω, βάσει της οποίας υπολογίζονται και τα ορίσματα όλων των υπόλοιπων μεγεθών:

$$\tilde{V}_1 = 2401,777 \angle 0^{\circ} \text{ V}$$

και για τις φασικές τάσεις των φάσεων 2 και 3 ισχύει αντίστοιχα ότι:

$$\tilde{V}_2 = 2401,777 \angle -120^\circ V$$

$$\tilde{V}_3 = 2401,777 \angle 120^\circ V$$

➤ Υπολογισμός πολικών τάσεων:

Η πολική και φασική τάση ενός συστήματος ευθείας διαδοχής φάσεων, συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$\tilde{V}_{k(k+1)} = \tilde{V}_k * \sqrt{3} \angle 0^\circ$$

όπου $\tilde{V}_{k(k+1)}$: πολική τάση

\tilde{V}_k : φασική τάση

Άρα οι πολικές τάσεις της γεννήτριας είναι οι εξής:

$$\tilde{V}_{12} = 4160 \angle 30^\circ V$$

$$\tilde{V}_{23} = 4160 \angle -90^\circ V$$

$$\tilde{V}_{31} = 4160 \angle 150^\circ V$$

➤ Υπολογισμός ονομαστικών ρευμάτων γραμμής:

Με βάση τον τύπο της τριφασικής ισχύς (σχέση 4.1) υπολογίζεται το μέτρο του ρεύματος γραμμής:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} V_\pi I$$

$$\text{ή } I = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3} V_\pi}$$

$$\text{ή } I = \frac{35000000}{\sqrt{3} * 4160}$$

$$\text{ή } I = 4857,514 A$$

Η γωνία του ρεύματος υπολογίζεται με βάση το συντελεστή ισχύος (Σ.Ι.) της γεννήτριας ως εξής:

$$\varphi = \cos^{-1}(\text{Σ.Ι.})$$

$$\text{ή } \varphi = \cos^{-1}(0,75)$$

$$\text{ή } \varphi = 41,41^\circ$$

Λόγω του επαγωγικού Σ.Ι. το ονομαστικό ρεύμα γραμμής καθυστερεί σε σχέση με τη φασική τάση της γεννήτριας κατά γωνία φ , οπότε το ρεύμα γραμμής της 1^{ης} φάσης είναι:

$$I_{\gamma\rho 1} = 4857,514 \angle -41,41^\circ A$$

Αντίστοιχα τα ονομαστικά ρεύματα των γραμμών 2 και 3 είναι τα παρακάτω:

$$I_{\gamma\rho 2} = 4857,514 \angle -161,41^\circ A$$

$$I_{\gamma\rho 3} = 4857,514 \angle 78,57^\circ A$$

➤ Υπολογισμός τάσης διέγερσης γεννήτριας:

$$\tilde{E}_f = E_1 + (R_s + jX_s) * I_{\gamma\rho 1}$$

$$\text{ή } \tilde{E}_f = 2401,777 \angle 0^\circ + (0,00141 + j0,6453) * 4857,514 \angle -41,41^\circ$$

$$\text{ή } \tilde{E}_f = 5056,111 \angle 27,636^\circ V$$

Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα μεγέθη που υπολογίστηκαν προηγουμένως:

Πίνακας 4.2. Αριθμητικές τιμές γεννήτριας

Μεγέθη γεννήτριας	Αριθμητικές τιμές
$E_1(V)$	$2401,777\angle 0^\circ$
$E_2(V)$	$2401,777\angle -120^\circ$
$E_3(V)$	$2401,777\angle 120^\circ$
$V_{12}(V)$	$4160\angle 30^\circ$
$V_{23}(V)$	$4160\angle -90^\circ$
$V_{31}(V)$	$4160\angle 150^\circ$
$I_{\gamma p1}(A)$	$4857,514\angle -41,41$
$I_{\gamma p2}(A)$	$4857,514\angle -161,41$
$I_{\gamma p3}(A)$	$4857,514\angle 78,57$
$E_f(V)$	$5056,111\angle 27,636$

4.3.2 Μοντέλο γραμμών μεταφοράς

Στο συγκεκριμένο Σ.Η.Ε. (εξηλεκτρισμένο με το παλμικό φορτίο στην υψηλή τάση) λαμβάνονται υπόψη 2 γραμμές μεταφοράς των οποίων τα χαρακτηριστικά και το τμήμα στο οποίο βρίσκονται παρουσιάζεται παρακάτω:

- Γραμμή μεταφοράς 1 (Γ.Μ.1): Πρόκειται για τον αγωγό που τροφοδοτεί το υποσύστημα υψηλής τάσης (HV cable 4160V), όπου βρίσκεται το παλμικό φορτίο και το σύστημα ηλεκτροπρώωσης, έχει συντελεστή ισοδύναμου κατανεμημένου φορτίου p_{HV} , μήκος l_{HV} και ισοδύναμη αντίσταση $z_{HV}=0,0375+j0,0875$ (Ω/km).
- Γραμμή μεταφοράς 2 (Γ.Μ.2): Ο αγωγός αυτός τροφοδοτεί το 1^ο τμήμα του υποσυστήματος χαμηλής τάσης (LV cable 440V), το οποίο αποτελείται από απλά φορτία κατανάλωσης και έχει συντελεστή ισοδύναμου κατανεμημένου φορτίου p_{LV440} , μήκος l_{LV440} , ισοδύναμη αντίσταση $z_{LV440}=0,075+j0,175$ (Ω/km).

Παρακάτω παρουσιάζονται τα ισοδύναμα μοντέλα των αγωγών και ο υπολογισμός των ισοδύναμων αντιστάσεων αυτών για μήκος γραμμών και στις τρεις περιπτώσεις ίσο με $l=(=l_{HV}= l_{LV440})=100m=0,1km$.

- Γραμμή μεταφοράς 1 (Γ.Μ.1- R_1, L_1 , για $l=0,1km$):

$$Z_{\Gamma.M.1}=(0,0375+8749,9639) \Omega/km \cdot 0,1km$$

$$\text{ή } Z_{\Gamma.M.1}=0,00375+j874,99639 \Omega$$

$$\text{ή } Z_{\Gamma.M.1}= R_1+jX_{L1}$$

όπου

$$X_{L1}=\omega \cdot L_1$$

$$\text{ή } X_{L1}=2\pi f L_1$$

$$\text{ή } L_1=\frac{X_{L1}}{2\pi f}$$

$$\text{ή } L_1=\frac{874,99639\Omega}{2 \cdot 3,14 \cdot 60Hz}$$

$$\text{ή } L_1=2,321H$$

➤ Γραμμή μεταφοράς 2 (Γ.Μ.2-R₄,L₅, για l=0.1km):

$$Z_{Γ.Μ.2}=(0,075+j0,175) \Omega/\text{km}\cdot 0,1\text{km}$$

$$\text{ή } Z_{Γ.Μ.2}=0,0075+j0,0175 \Omega$$

$$\text{ή } Z_{Γ.Μ.2}=7,5+j17,5 \text{ m}\Omega$$

$$\text{ή } Z_{Γ.Μ.2}= R_4+jX_{L5}$$

Αναγωγή στο πρωτεύον στο ισοδύναμο μονοφασικό (4160V):

$$\text{ή } Z'_{M/\Sigma 1} = (0,0075 + j0,0175) * \left(\frac{4160}{440}\right)^2$$

$$\text{ή } Z'_{M/\Sigma 1} = 0,67041 + j1,5643 \Omega$$

όπου

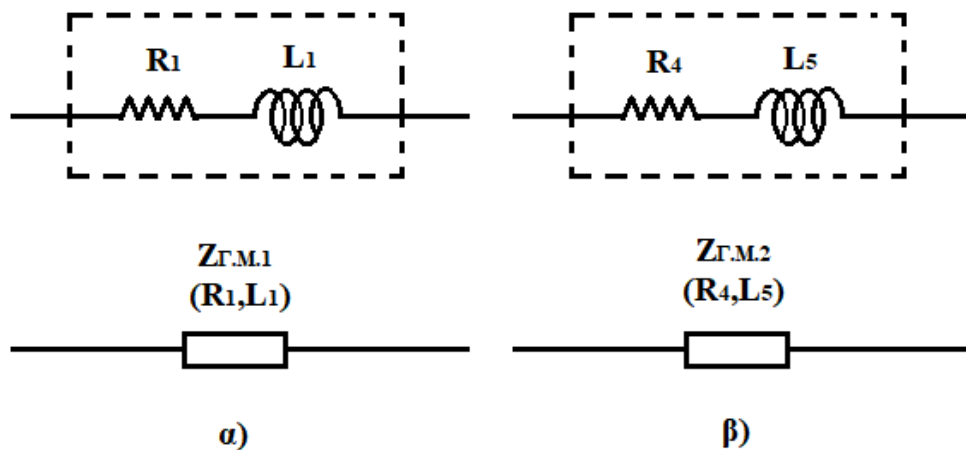
$$X_{L5}=\omega \cdot L_5$$

$$\text{ή } X_{L5}=2\pi f \cdot L_5$$

$$\text{ή } L_5=\frac{X_{L5}}{2\pi f}$$

$$\text{ή } L_5=\frac{1,5643\Omega}{2*3,14*60\text{Hz}}$$

$$\text{ή } L_5=0,00415\text{H} = 4,15\text{mH}$$



Σχήμα 4.9. Ισοδύναμο διάγραμμα α) της γραμμής μεταφοράς 1 (Γ.Μ.1) και β) της γραμμής μεταφοράς 2 (Γ.Μ.2)

4.3.3 Μοντέλο μετασχηματιστή

Το Σ.Η.Ε. της συγκεκριμένης προσομοίωσης περιλαμβάνει 1 τριφασικό μετασχηματιστή υποβιβασμού, ο οποίος τροφοδοτείται απευθείας από την κύρια γεννήτρια και στην έξοδό του συνδέεται με το απλό φορτίο κατανάλωσης (Φ1). Τα χαρακτηριστικά αυτού είναι τα παρακάτω:

➤ Μετασχηματιστής 1 (Μ/Σ 1, 4160V/440V, Δ-Υ, 4MVA):

$Z_{M/\Sigma 1} = 0.01 + j0.05$ p.u. (ανά ισοδύναμο μονοφασικό τύλιγμα)

$$S_B = \frac{V_\pi^2}{Z_B}$$

$$\text{ή } Z_B = \frac{V_\pi^2}{S_B}$$

όπου V_π : πολική τάση

Οπότε ισχύει ότι η βασική αντίσταση του Μ/Σ 1 ισούται με:

$$Z_B = \frac{V_\pi^2}{S_B} = \frac{(4,16 \cdot 10^3 V)^2}{4 \cdot 10^6 VA} = \frac{17,3056 \cdot 10^6 V^2}{4 \cdot 10^6 VA} \text{ ή } Z_B = 4,3264 \Omega$$

και η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση σε απόλυτη τιμή του Μ/Σ 1 είναι ίση με:

$$Z_{\alpha\mu} = \frac{Z_{M/\Sigma 1}}{Z_B} \text{ ή } Z_{M/\Sigma 1} = Z_{\alpha\mu} * Z_B = (0,01 + j0,05) * 4,3264 \Omega$$

$$\text{ή } Z_{M/\Sigma 1} = \mathbf{0,043264 + j0,2163 \Omega}$$

$$\text{ή } Z_{M/\Sigma 1} = R_{4M} + jX_{L4}$$

➤ Αναγωγή στο πρωτεύον στο ισοδύναμο μονοφασικό (4160V):

$$\text{ή } Z'_{M/\Sigma 1} = (0,043264 + j0,2163) * \left(\frac{4160}{440}\right)^2$$

$$\text{ή } Z'_{M/\Sigma 1} = 3,8673 + j19,33472 \Omega$$

όπου

$$X_{L4} = \omega \cdot L_4$$

$$\text{ή } X_{L4} = 2\pi f \cdot L_4$$

$$\text{ή } L_4 = \frac{X_{L4}}{2\pi f}$$

$$\text{ή } L_4 = \frac{19,33472 \Omega}{2 * 3,14 * 60 Hz}$$

$$\text{ή } L_4 = \mathbf{0,05129H = 51,29mH}$$

4.3.4 Μοντέλα απλού φορτίου κατανάλωσης

Φορτίο Φ_1 (Συνδεσμολογία Υ, Σ.Ι.=0,75, $n_{LV440}=0,1$):

Η φαινόμενη ισχύς του φορτίου Φ_1 υπολογίζεται μέσω του συντελεστή ισοδύναμου καταναεμημένου φορτίου του (n_{LV440}) και της φαινόμενης ισχύος της γεννήτριας (S_G):

$$S_{\Phi 1} = S_G \cdot n_{LV440} = 35 \cdot 0,1$$

$$\text{ή } S_{\Phi 1} = \mathbf{3,5MVA}$$

και η γωνία του φορτίου υπολογίζεται ως εξής:

$$\varphi_{\Phi 1} = \cos^{-1}(0,75)$$

$$\text{ή } \varphi_{\Phi 1} = 41,41^\circ$$

(το θετικό πρόσημο της γωνίας οφείλεται στον επαγωγικό χαρακτήρα του φορτίου) και άρα ισχύει ότι:

$$\tilde{S}_{\Phi 1} = 3,5 \angle 41,41^\circ \text{ MVA}$$

➤ Υπολογισμός της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης του φορτίου Φ_1 ανά φάση:

$$\tilde{S}_{\Phi 1} = 3\tilde{V}_{\Phi 1} * \tilde{I}_{\Phi 1}^* = 3\tilde{V}_{\Phi 1} \left(\frac{\tilde{V}_{\Phi 1}}{Z_{\Phi 1}} \right)^* = 3 \frac{\tilde{V}_{\Phi 1}^2}{\tilde{Z}_{\Phi 1}^*} = \frac{(\sqrt{3}V_{\Phi 1})^2}{\tilde{Z}_{\Phi 1}^*}$$

$$\tilde{Z}_{\Phi 1} = \frac{V_{\pi}^2}{\tilde{S}_{\Phi 1}^*}$$

όπου V_{π} : πολική τάση

$$\tilde{Z}_{\Phi 1} = \frac{(0,44 * 10^3 V)^2}{(3,5 * 10^6 \angle 41,41^\circ)^*} = \frac{0,1923 * 10^6 V^2}{3,5 * 10^6 \angle -41,41^\circ}$$

$$\text{ή } \tilde{Z}_{\Phi 1} = 0,055314 \angle +41,41^\circ \Omega$$

$$\text{ή } \tilde{Z}_{\Phi 1} = 0,0415 + j0,0366 \Omega$$

$$\text{ή } \tilde{Z}_{\Phi 1} = R_5 + jX_{L6}$$

➤ Αναγωγή του φορτίου Φ_1 στα 4160V (35MVA):

$$\text{ή } Z'_{\Phi 1} = (0,0415 + j0,0366) * \left(\frac{4160}{440} \right)^2$$

$$\text{ή } Z'_{\Phi 1} = 3,70962 + j36,0592 \Omega$$

όπου

$$X_{L6} = \omega \cdot L_6$$

$$\text{ή } X_{L6} = 2\pi f \cdot L_6$$

$$\text{ή } L_6 = \frac{X_{L6}}{2\pi f}$$

$$\text{ή } L_6 = \frac{36,0592 \Omega}{2 * 3,14 * 60 \text{ Hz}}$$

$$\text{ή } L_6 = 0,09565 \text{ H}$$

4.3.5 Μοντέλα κινητήρων πρόωσης

Η συνολική φαινόμενη ισχύς των κινητήρων πρόωσης (συνδεσμολογίας Δ) είναι ίση με:

$$S_{\Phi II} = S_{\text{tot}} \cdot n_{HV} = 0,722 \cdot 0,85$$

$$\text{ή } S_{\Phi II} = 0,614 \text{ MVA}$$

με συντελεστή ισχύος $\Sigma.I. = 0,37$ επαγωγικό

Οπότε, η γωνία του φορτίου υπολογίζεται ως εξής:

$$\varphi_{\Phi II} = \cos^{-1}(0,37)$$

$$\text{ή } \varphi_{\Phi\Pi} = 68,56^\circ$$

(το θετικό πρόσημο της γωνίας οφείλεται στον επαγωγικό χαρακτήρα του φορτίου)

Επομένως, η συνολική μιγαδική ισχύς των κινητήρων πρόωσης ισούται με:

$$\tilde{S}_{\Phi\Pi} = 0,614 \angle 68,56^\circ \text{ MVA}$$

$$\text{ή } \tilde{S}_{\Phi\Pi} = 0,224 \text{ MW} + j0,571 \text{ MVA}_r$$

➤ Υπολογισμός της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης του φορτίου πρόωσης ανά φάση:

$$\tilde{S}_{\Phi\Pi} = 3\tilde{V}_{\Phi\Pi} * \tilde{I}_{\Phi\Pi}^* = 3\tilde{V}_{\Phi\Pi} \left(\frac{\tilde{V}_{\Phi\Pi}}{\tilde{Z}_{\Phi\Pi}} \right)^* = 3 \frac{\tilde{V}_{\Phi\Pi}^2}{\tilde{Z}_{\Phi\Pi}^*} = \frac{(\sqrt{3}V_{\Phi\Pi})^2}{\tilde{Z}_{\Phi\Pi}^*}$$

$$\tilde{Z}_{\Phi\Pi} = \frac{V_{\pi}^2}{\tilde{S}_{\Phi\Pi}^*}$$

όπου $3\tilde{V}_{\Phi\Pi}$: η φασική τάση του κάθε τυλίγματος των κινητήρων (συνδεσμολογίας τριγώνου)
και V_{π} : πολική τάση

$$\tilde{Z}_{\Phi\Pi} = \frac{(4,16 * 10^3 \text{ V})^2}{(0,613 * 10^6 \angle 68,56^\circ)^*} = \frac{17,3056 * 10^6 \text{ V}^2}{0,614 * 10^6 \angle -68,56^\circ}$$

$$\text{ή } \tilde{Z}_{\Phi\Pi} = 28,20157 \angle +68,56^\circ \Omega$$

$$\text{ή } \tilde{Z}_{\Phi\Pi} = 10,30881 + j26,2499 \Omega$$

και η ισοδύναμη αντίσταση κατά αστέρα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tilde{Z}_{\Phi\Pi-\gamma} = \frac{\tilde{Z}_{\Phi\Pi-\Delta}}{3} = \frac{28,20157 \angle +68,56^\circ}{3} = 9,40052 \angle +68,56^\circ \Omega$$

$$\text{ή } \tilde{Z}_{\Phi\Pi-\gamma} = 3,43627 + j8,74996 \Omega$$

$$\text{ή } \tilde{Z}_{\Phi\Pi-\gamma} = R_3 + jX_{L3}$$

όπου

$$X_{L3} = \omega L_3$$

$$\text{ή } X_{L3} = 2\pi f L_3$$

$$\text{ή } L_3 = \frac{X_{L3}}{2\pi f}$$

$$\text{ή } L_3 = \frac{8,74996 \Omega}{2 * 3,14 * 60 \text{ Hz}}$$

$$\text{ή } L_3 = 0,02321 \text{ H}$$

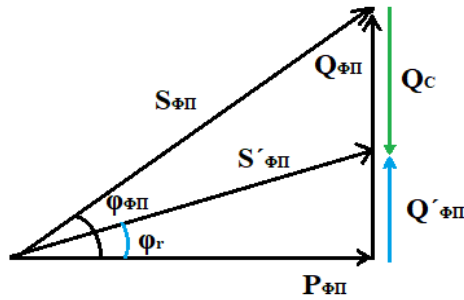
➤ Υπολογισμός χωρητικότητας συστοιχίας πυκνωτών αντιστάθμισης (Cp2):

Επιλέγεται ως νέος Σ.Ι.=0,67, οπότε ισχύει ότι:

$$\varphi_r = \cos^{-1}(0,67)$$

$$\text{ή } \varphi_r = 48^\circ$$

Με βάση το παρακάτω τρίγωνο ισχύος προκύπτει ότι:



Σχήμα 4.10. Τρίγωνο ισχύος

$$Q_{\Phi\Pi} = Q_c + Q'_{\Phi\Pi}$$

$$\text{ή } Q_c = Q_{\Phi\Pi} - Q'_{\Phi\Pi} \text{ (α)}$$

και επιπλέον ισχύει ότι:

$$\text{εφφ}_{\Phi\Pi} = \frac{Q_{\Phi\Pi}}{P_{\Phi\Pi}} \text{ ή } Q_{\Phi\Pi} = P_{\Phi\Pi} * \text{εφφ}_{\Phi\Pi} \text{ (β)}$$

$$\text{εφφ}'_r = \frac{Q'_{\Phi\Pi}}{P_{\Phi\Pi}} \text{ ή } Q'_{\Phi\Pi} = P_{\Phi\Pi} * \text{εφφ}'_r \text{ (γ)}$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση α) τις σχέσεις β) και γ) προκύπτει ότι:

$$Q_c = P_{\Phi\Pi} \text{εφφ}_{\Phi\Pi} - P_{\Phi\Pi} \text{εφφ}'_r$$

$$\text{ή } Q_c = P_{\Phi\Pi} (\text{εφφ}_{\Phi\Pi} - \text{εφφ}'_r)$$

$$= 224310,04 \cdot [\text{εφ}(68,56^\circ) - \text{εφ}(48^\circ)]$$

$$= 224310,04 \cdot (2,54647 - 1,09207)$$

$$= 224310,04 \cdot 0,553$$

$$\text{ή } Q_c = \mathbf{0,326 \text{MVA}r}$$

Λόγω της σύνδεσης του φορτίου πρόωσης (ΦΠ) στην υψηλή τάση, επιλέγεται η σύνδεση των πυκνωτών αντιστάθμιση σε τρίγωνο (Ηλεκτρικές Μηχανές Τόμος Β, Α.Γ.Βλάχος, σελ.10-23/225). Οπότε ισχύει ότι:

$$Q_c = 3 \cdot V_{\pi} \cdot I$$

$$\text{ή } Q_c = 3 \cdot V_{\pi} \cdot \frac{V_{\pi}}{X_c}$$

$$\text{ή } Q_c = 3 \cdot \frac{V_{\pi}^2}{\frac{1}{\omega C_{\Delta}}}$$

$$\text{ή } Q_c = 3 \cdot V_{\pi}^2 \cdot \omega \cdot C_{\Delta}$$

$$\text{ή } C_{\Delta} = \frac{Q_c}{3 \omega V_{\pi}^2}$$

όπου V_{π} : πολική τάση

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση προκύπτει ότι:

$$C_{\Delta} = \frac{Q_c}{3 \omega V_{\pi}^2}$$

$$= \frac{0,326 \cdot 10^6 \text{VA}r}{3 \cdot 2\pi \cdot (4,16 \cdot 10^3 \text{V})^2}$$

$$= \frac{0,326 \cdot 10^6 \text{VA}r}{360\pi \cdot 17,306 \cdot 10^6 \text{V}^2}$$

$$\text{ή } C_{\Delta} = \mathbf{16,667 \cdot 10^{-6} \text{F}}$$

$$\text{ή } C_{\Delta} = 16,667 \mu\text{F}$$

και η ισοδύναμη αντίσταση κατά αστέρα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$C_{\gamma} = 3C_{\Delta} = 3 * 16,667 = 50 \mu\text{F}$$

με

$$\begin{aligned} X_{\Delta} &= \frac{1}{\omega C_{\Delta}} \\ &= \frac{1}{2\pi f C_{\Delta}} \\ &= \frac{1}{2\pi * 60 * 50 * 10^{-6}} \\ &= \frac{10^6}{120\pi * 50} \end{aligned}$$

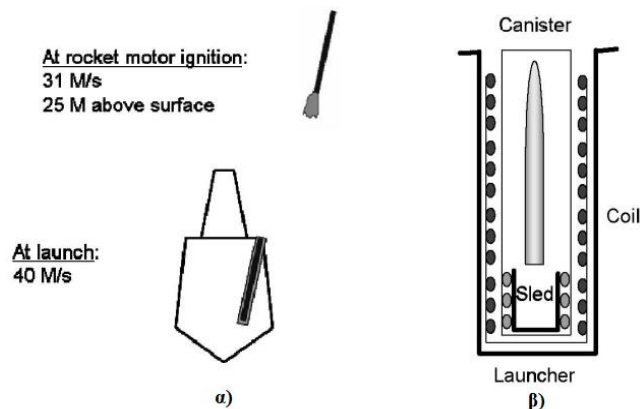
$$\text{ή } X_{\Delta} = 53,05165 \Omega$$

και η ισοδύναμη αντίσταση κατά αστέρα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$X_{\gamma} = \frac{X_{\Delta}}{3} = \frac{53,05165}{3} = 17,68388 \Omega$$

4.3.6 Μοντέλο παλμικού φορτίου

Το παλμικό φορτίο που θα χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ένας ηλεκτρομαγνητικός εκτοξευτής πυραύλων (electromagnetic missile launcher-EMML-[33]). Το παλμικό αυτό φορτίο δεν θα τροφοδοτείται απευθείας από τη γεννήτρια του συστήματος, αλλά θα λαμβάνει την απαιτούμενη για τη λειτουργία του ενέργεια από μία συστοιχία πυκνωτών κατάλληλα σχεδιασμένη για τις απαιτήσεις αυτού. Η διάταξη του εκτοξευτή αποτελείται από μία στοιβασία 5 εξωτερικών πηνίων (5 επιπέδων-stages), τα οποία σχηματίζουν έναν στάτη (barrel-stator) απ' όπου παράγεται μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό χρησιμοποιείται για την εκτόξευση (δύναμη Lorentz) ενός δευτέρου ομοαξονικού πηνίου ενός επιπέδου (stage), μέσα στο οποίο βρίσκεται το εκτοξευόμενο βλήμα (σχήμα 4.11β). Κάθε πηνίο (επίπεδο) του εκτοξευτή τροφοδοτείται από τη δική του ανεξάρτητη συστοιχία πυκνωτών (capacitor bank), τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια. Παρακάτω παρουσιάζονται τα δύο τμήματα της διάταξης του παλμικού φορτίου ξεχωριστά (παλμικό φορτίο και μονάδα αποθήκευσης ενέργειας). Οι απαιτήσεις εκτόξευσης από το παλμικό φορτίο είναι αυτές που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3:



Σχήμα 4.11. Διάγραμμα α) παλμικού φορτίου και β) διάταξης παλμικού φορτίου (παλμικό φορτίο και μονάδα αποθήκευσης ενέργειας 5 επιπέδων) [33, figs 2, 6]

➤ **Χαρακτηριστικά παλμικού φορτίου:**

Πίνακας 4.3. Χαρακτηριστικά παλμικού φορτίου

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Βάρος εκτοξευόμενου βλήματος	3600lb=1633kg
Ταχύτητα βλήματος (τη στιγμή της εκτόξευσης)	40m/s
Ταχύτητα βλήματος (μετά την έναυση του κινητήρα καύσης)	3m/s
Επιθυμητό ύψος εκτόξευσης	25miles

Κύκλος λειτουργίας (duty cycle):

$$\mathbf{d.c.=50\%}$$

Περίοδος λειτουργίας:

$$\mathbf{T_0=0,6sec}$$

Έστω η φαινόμενη ισχύς του παλμικού φορτίου ίση με:

$$\begin{aligned} S &= 0.1 \text{ αμ} \\ &= 0.1 \cdot 35 \text{ MVA} \\ \text{ή } S &= \mathbf{3,5 \text{ MVA}} \end{aligned}$$

με συντελεστή ισχύος ίσο με:

$$\begin{aligned} \Sigma.I. &= 0,75 \text{ επαγωγικό} \\ \text{συνφ}_{\Pi\Phi} &= \frac{P}{S} \\ \text{ή } P &= S \cdot \text{συνφ}_{\Pi\Phi} = 3,5 \cdot 0,75 \\ \text{ή } P &= \mathbf{2,625 \text{ MW}} \end{aligned}$$

Οπότε, η γωνία του παλμικού φορτίου υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \varphi_{\Pi\Phi} &= \cos^{-1}(0,75) \\ \text{ή } \varphi_{\Pi\Phi} &= \mathbf{41,41^\circ} \end{aligned}$$

(το θετικό πρόσημο της γωνίας οφείλεται στον επαγωγικό χαρακτήρα του φορτίου)

Επομένως, η συνολική μιγαδική ισχύς του παλμικού φορτίου ισούται με:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{\Pi\Phi} &= \mathbf{3,5 \angle 41,41^\circ \text{ MVA}} \\ \text{ή } \tilde{S}_{\Pi\Phi} &= \mathbf{2,625 \text{ MW} + j2,315 \text{ MVAr}} \end{aligned}$$

➤ Υπολογισμός της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης του φορτίου πρόωσης ανά φάση:

$$\tilde{S}_{\Pi\Phi} = 3\tilde{V}_{\Pi\Phi} * \tilde{I}_{\Pi\Phi}^* = 3\tilde{V}_{\Pi\Phi} \left(\frac{\tilde{V}_{\Pi\Phi}}{Z_{\Pi\Phi}} \right)^* = \frac{3 * \tilde{V}_{\Pi\Phi}^2}{\tilde{Z}_{\Pi\Phi}^*} = \frac{(\sqrt{3}V_{\Pi\Phi})^2}{\tilde{Z}_{\Pi\Phi}^*}$$

$$\tilde{Z}_{\Pi\Phi} = \frac{V_{\pi}^2}{\tilde{S}_{\Pi\Phi}^*}$$

όπου $3 * \tilde{V}_{\Pi\Phi}$: η φασική τάση του κάθε τυλίγματος του παλμικού φορτίου (συνδεσμολογίας αστέρα)
και V_{π} : πολική τάση

$$\tilde{Z}_{\Pi\Phi} = \frac{(4,16 * 10^3 V)^2}{(3,5 * 10^6 \angle 41,41^\circ)^*} = \frac{17,3056 * 10^6 V^2}{3,5 * 10^6 \angle -41,41^\circ}$$

$$\text{ή } \tilde{Z}_{\Pi\Phi} = 4,945 \angle +41,41^\circ \Omega$$

$$\text{ή } \tilde{Z}_{\Pi\Phi} = 3,7083 + j3,2705 \Omega$$

$$\text{ή } \tilde{Z}_{\Pi\Phi} = R_2 + jX_{L2}$$

όπου

$$X_{L2} = \omega \cdot L_2$$

$$\text{ή } X_{L2} = 2\pi f \cdot L_2$$

$$\text{ή } L_2 = \frac{X_{L2}}{2\pi f}$$

$$\text{ή } L_2 = \frac{3,2705 \Omega}{2 * 3,14 * 60 \text{ Hz}}$$

$$\text{ή } L_2 = 8,675 \cdot 10^{-3} \text{ H} = 8,675 \text{ mH}$$

➤ Χαρακτηριστικά μονάδας αποθήκευσης ενέργειας (energy storage device-ESD):

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω κάθε ένα από τα πέντε εξωτερικά πηνία (επίπεδα) τροφοδοτείται από ξεχωριστή ανεξάρτητη μονάδα αποθήκευσης ενέργειας (ESD), με χωρητικότητα 8μF η κάθε μία. Οι συγκεκριμένες συστοιχίες πυκνωτών είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε χωρητικότητα από αυτή που χρειάζεται ο εκτοξευτής, ο οποίος χρησιμοποιεί λιγότερο από το 10% της αποθηκευμένης ενέργειας των συστοιχιών. Ωστόσο, η μεγάλη αυτή χωρητικότητα των πυκνωτών είναι απαραίτητη εξαιτίας των χαμηλών ταχυτήτων (low velocities-του βλήματος) και των σχετικά μεγάλων μηκών (relatively long pulse lengths) της διάταξης κάννης του παλμικού φορτίου.

Συνολική χωρητικότητα όλων των συστοιχιών (C_{p1}):

$$\frac{\text{Συνολική αποθηκευμένη ενέργεια}}{\text{Αποθηκευμένη ενέργεια ανά επίπεδο}} = \frac{275 \text{ kJ}}{55 \text{ kJ}} = 5 \text{ επίπεδα (συστοιχίες)}$$

και άρα

$$5 \text{ συστοιχίες} * 8 \frac{\mu\text{f}}{\text{συστοιχία}}$$

$$\text{ή } C_{p1} = 40 \mu\text{F}$$

Πίνακας 4.4. Χαρακτηριστικά μονάδας αποθήκευσης ενέργειας (ESD)

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Τελική μηχανική ενέργεια	7506MJ
Συνολική αποθηκευμένη Ενέργεια εκτόξευσης	275kJ
Αποθηκευμένη ενέργεια ανά επίπεδο	55kJ
Απόδοση εκτόξευσης	17,4%
Τάση φόρτισης (για όλες τις συστοιχίες)	4,160kV

4.4 Περιγραφή του συστήματος στο χώρο κατάστασης

Αρχικά περιγράφεται στο χώρο κατάστασης το κύκλωμα του σχήματος 4.4 (λειτουργία 1-K1M ενεργό, εκφόρτωση πυκνωτή C_{p1} , μη λειτουργία παλμικού φορτίου), με βάση τα δεδομένα που δόθηκαν στην παράγραφο 4.2 (είσοδος, μεταβλητές κατάστασης και έξοδοι):

$$\text{➤ NPK(κόμβος } \beta): i_A(t) = i_{Cp}(t) + i_C(t) \text{ ή } C_p \frac{dv_{Cp}}{dt} = i_A(t) - i_C(t) \text{ ή } \frac{dv_{Cp}}{dt} = \frac{1}{C_p} i_A(t) - \frac{1}{C_p} i_C(t) \quad (1)$$

$$\text{➤ NPK(κόμβος } \beta): i_S(t) = i_A(t) + i_D(t) \quad (\alpha)$$

$$\text{και} \quad \frac{di_S}{dt} = \frac{di_A}{dt} + \frac{di_D}{dt} \quad (\beta)$$

$$\text{NTK (αβηστζα):} \quad E_f(t) = R_S i_S + L_S \frac{di_S}{dt} + R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + V_{Cp}(t) \quad (\gamma)$$

$$\text{NTK (βγδστηβ):} \quad R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + V_{Cp}(t) = R_D i_D + L_D \frac{di_D}{dt} \quad (\delta)$$

$$\underline{(\delta)}: \quad \frac{di_A}{dt} = \frac{L_D}{L_A} \frac{di_D}{dt} + \frac{R_D}{L_A} i_D - \frac{R_A}{L_A} i_A - \frac{1}{L_A} V_{Cp}(t) \quad (\delta-\alpha)$$

$$\underline{(\delta)}: \quad \frac{di_D}{dt} = \frac{L_A}{L_D} \frac{di_A}{dt} - \frac{R_D}{L_D} i_D + \frac{R_A}{L_D} i_A + \frac{1}{L_D} V_{Cp}(t) \quad (\delta-\beta)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (β) στη σχέση (γ) προκύπτει ότι:

$$E_f(t) = R_S i_S + L_S \left[\frac{di_A}{dt} + \frac{di_D}{dt} \right] + R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + V_{Cp}(t) \quad (\epsilon)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (α) στη σχέση (ε) προκύπτει ότι:

$$E_f(t) = R_S [i_A(t) + i_D(t)] + L_S \frac{di_A}{dt} + L_S \frac{di_D}{dt} + R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + V_{Cp}(t)$$

$$\text{ή } E_f(t) = (R_S + R_A) i_A(t) + R_S i_D(t) + (L_S + L_A) \frac{di_A}{dt} + L_S \frac{di_D}{dt} + V_{Cp}(t) \quad (\sigma\tau)$$

- Αντικαθιστώντας τη σχέση (δ-β) στη σχέση (στ) προκύπτει ότι:

$$E_f(t) = (R_S + R_A)i_A(t) + R_S i_D(t) + (L_S + L_A) \frac{di_A}{dt} + L_S \left[\frac{L_A}{L_D} \frac{di_A}{dt} - \frac{R_D}{L_D} i_D + \frac{R_A}{L_D} i_A + \frac{1}{L_D} V_{Cp}(t) \right] + V_{Cp}(t)$$

$$\text{ή } E_f(t) = \left[R_S + R_A + \frac{L_S}{L_D} R_A \right] i_A(t) + \left[R_S - \frac{L_S}{L_D} R_D \right] i_D(t) + \left[L_S + L_A + \frac{L_S L_A}{L_D} \right] \frac{di_A}{dt} + \left[1 + \frac{L_S}{L_D} \right] V_{Cp}(t)$$

$$\text{ή } \frac{di_A}{dt} = - \frac{\frac{L_S+1}{L_D}}{L_S+L_A+\frac{L_S L_A}{L_D}} V_{Cp}(t) - \frac{R_S+R_A+\frac{L_S R_A}{L_D}}{L_S+L_A+\frac{L_S L_A}{L_D}} i_A(t) + \frac{\frac{R_D L_S - R_S}{L_D}}{L_S+L_A+\frac{L_S L_A}{L_D}} i_D(t) + \frac{1}{L_S+L_A+\frac{L_S L_A}{L_D}} E_f(t) \quad (2)$$

- NTK(ηεστη): $-V_{Cp}(t) + i_C R_C + V_{Lc} = 0$ ή $L_C \frac{di_C}{dt} = -i_C R_C + V_{Cp}(t)$ ή $\frac{di_C}{dt} = \frac{1}{L_C} V_{Cp}(t) - \frac{R_C}{L_C} i_C \quad (3)$

- Αντικαθιστώντας τη σχέση (δ-α) στη σχέση (στ) προκύπτει ότι:

$$E_f(t) = (R_S + R_A)i_A(t) + R_S i_D(t) + (L_S + L_A) \left[\frac{L_D}{L_A} \frac{di_D}{dt} + \frac{R_D}{L_A} i_D - \frac{R_A}{L_A} i_A - \frac{1}{L_A} V_{Cp}(t) \right] + L_S \frac{di_D}{dt} + V_{Cp}(t)$$

$$\text{ή } E_f(t) = \left[R_S + R_A - \frac{(L_S+L_A)}{L_A} R_A \right] i_A(t) + \left[R_S + \frac{(L_S+L_A)}{L_A} R_D \right] i_D(t) + \left[L_S + \frac{(L_S+L_A)}{L_A} L_D \right] \frac{di_D}{dt} + \left[1 - \frac{(L_S+L_A)}{L_A} \right] V_{Cp}(t)$$

$$\text{ή } \frac{di_D}{dt} = \frac{\frac{L_S}{L_A}}{L_D+L_S+\frac{L_D L_S}{L_A}} V_{Cp}(t) + \frac{\frac{L_S R_A - R_S}{L_A}}{L_D+L_S+\frac{L_D L_S}{L_A}} i_A(t) - \frac{R_S+R_D+\frac{R_D L_S}{L_A}}{L_D+L_S+\frac{L_D L_S}{L_A}} i_D(t) + \frac{1}{L_D+L_S+\frac{L_D L_S}{L_A}} E_f(t) \quad (4)$$

Όσον αφορά το κύκλωμα του σχήματος 4.5 (λειτουργία 2-K2M ενεργό, λειτουργία παλμικού φορτίου-σχήμα 4.6) οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι οι ίδιες με όλες τις παραπάνω που ισχύουν για το κυκλώματος του σχήματος 4.4, με τη διαφορά ότι στη θέση της μεταβλητής $V_{cp}(t) = V_{cp1}(t) + V_{cp2}(t)$, υπάρχει μόνο η μεταβλητή $V_{cp2}(t)$.

Στη συνέχεια, περιγράφεται το κύκλωμα του παλμικού φορτίου (σχήμα 4.6), με βάση τα δεδομένα που δόθηκαν στην παράγραφο 4.2 (είσοδος, μεταβλητές κατάστασης και έξοδος):

- NTK: $-V_{Cp1}(t) + i_B R_B + V_{LB} = 0$ ή $L_B \frac{di_B}{dt} = -i_B R_B + V_{Cp1}(t)$ ή $\frac{di_B}{dt} = \frac{1}{L_B} V_{Cp1}(t) - \frac{R_B}{L_B} i_B \quad (5)$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι παραπάνω εξισώσεις του συστήματος με αποσυνδεδεμένο το παλμικό φορτίο (σχήμα 4.4) και του κυκλώματος λειτουργίας του παλμικού φορτίου (σχήμα 4.5) αντίστοιχα:

➤ Περιγραφή του συστήματος του σχήματος 4.4:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{cp1}(t) \\ i_A(t) \\ i_C(t) \\ i_D(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{cp1}(t) \\ i_A(t) \\ i_C(t) \\ i_D(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \\ B_{31} \\ B_{41} \end{bmatrix} E_f(t)$$

$$y_1(t) = [C_{11} \quad C_{12} \quad C_{13} \quad C_{14}] \begin{bmatrix} V_{cp1}(t) \\ i_A(t) \\ i_C(t) \\ i_D(t) \end{bmatrix} + [D_{11}] E_f(t)$$

και τα στοιχεία των παραπάνω πινάκων είναι τα εξής:

$$A_{11} = A_{14} = 0, \quad A_{12} = \frac{1}{C_p}, \quad A_{13} = -\frac{1}{C_p}$$

$$A_{21} = -\frac{\frac{L_S}{L_D} + 1}{L_S + L_A + \frac{L_S L_A}{L_D}}$$

$$A_{22} = -\frac{R_S + R_A + \frac{L_S}{L_D} R_A}{L_S + L_A + \frac{L_S L_A}{L_D}}$$

$$A_{23} = 0$$

$$A_{24} = \frac{\frac{R_D L_S}{L_D} - R_S}{L_S + L_A + \frac{L_S L_A}{L_D}}$$

$$A_{32} = A_{34} = 0, \quad A_{31} = \frac{1}{L_C}, \quad A_{33} = -\frac{R_C}{L_C}$$

$$A_{41} = \frac{\frac{L_S}{L_A}}{L_D + L_S + \frac{L_D L_S}{L_A}}$$

$$A_{42} = \frac{\frac{L_S}{L_A} R_A - R_S}{L_D + L_S + \frac{L_D L_S}{L_A}}$$

$$A_{43} = 0$$

$$A_{44} = -\frac{R_S + R_D + \frac{R_D L_S}{L_A}}{L_D + L_S + \frac{L_D L_S}{L_A}}$$

$$C_{11} = 0, C_{12} = C_{13} = C_{14} = 1$$

$$D_{11} = 0$$

➤ Περιγραφή του συστήματος του σχήματος 4.6:

$$\frac{d}{dt}[i_B(t)] = [A_{71}][i_B(t)] + [B_{71}][V_{Cp}(t)]$$

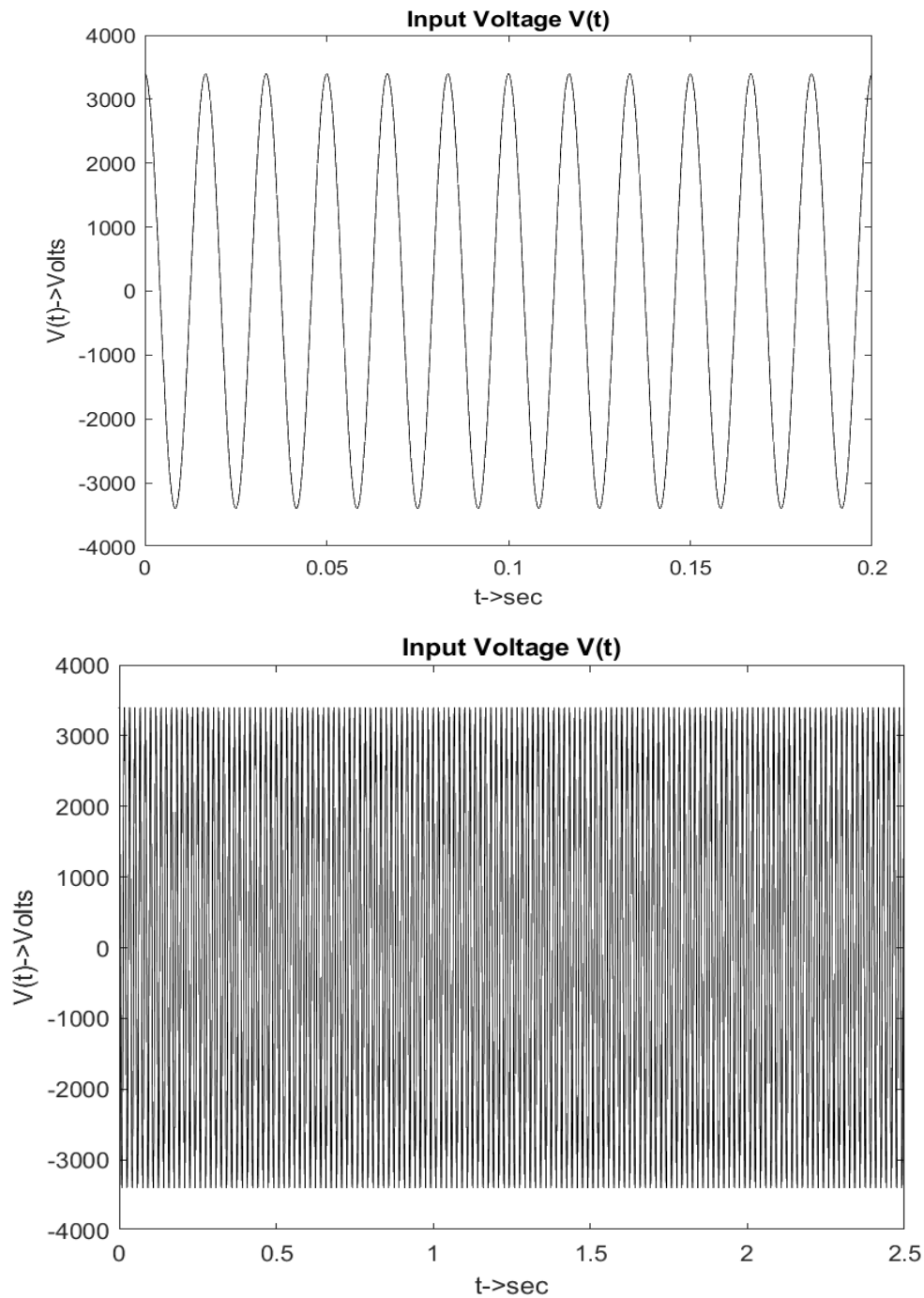
$$y_1(t) = i_B(t) = [C_{71}][i_B(t)] + [D_{71}][V_{Cp}(t)]$$

και τα στοιχεία των παραπάνω πινάκων είναι τα εξής:

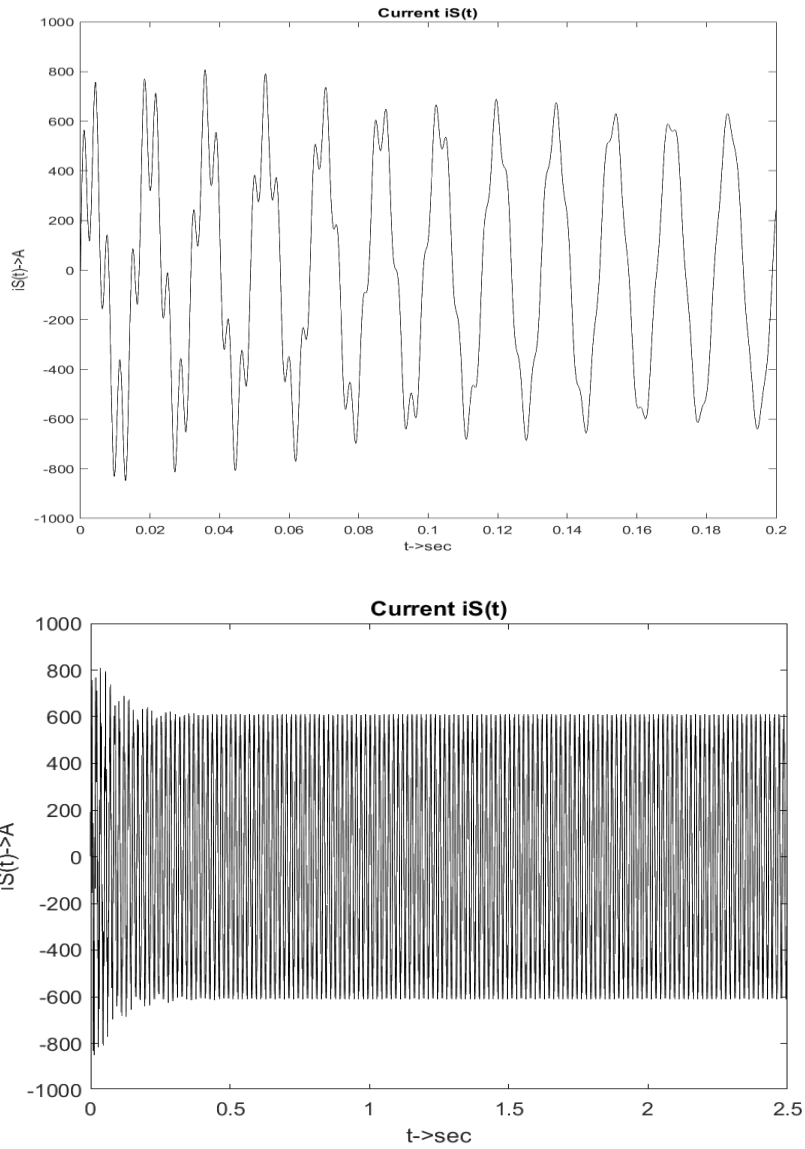
$$A_{71} = -\frac{R_B}{L_B}, B_{71} = \frac{1}{L_B}, C_{71} = 1, D_{71} = 0$$

4.5 Ανάπτυξη λογισμικού προσομοίωσης και εκτέλεση σεναρίων

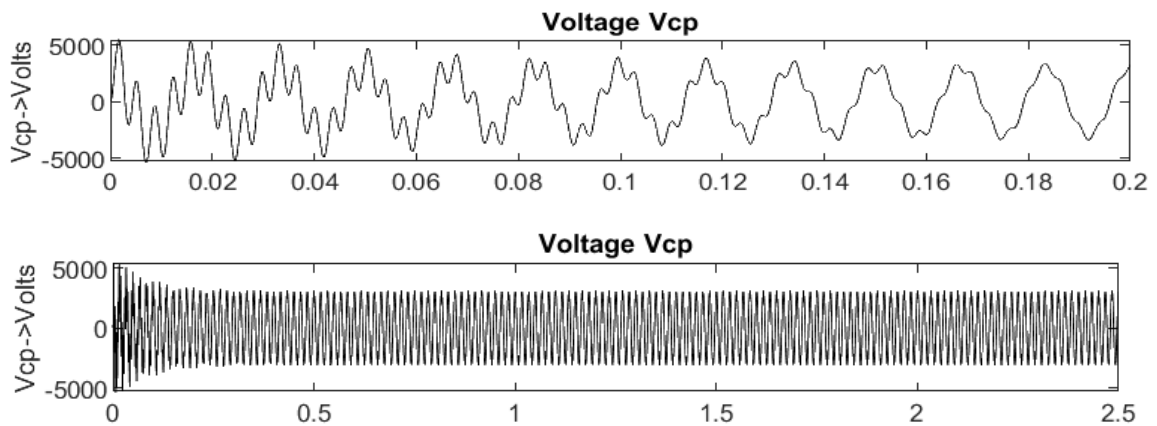
Η ανάλυση και η εκτέλεση σεναρίων λειτουργίας του παλμικού φορτίου και γενικά του συστήματος θα πραγματοποιηθούν μέσω του λογισμικού Matlab, σύμφωνα με τους κώδικες που παρουσιάζονται στο παράρτημα 1 στο τέλος της εργασίας. Παρακάτω, παρουσιάζονται αρχικά, οι γραφικές παραστάσεις των μεγεθών του κυκλώματος του σχήματος 4.4 (σχήματα 4.12-4.15), όταν δηλαδή το παλμικό φορτίο είναι απενεργοποιημένο και πραγματοποιείται η φόρτιση της συστοιχίας πυκνωτών C_{p1} και ισχύει $C_p = C_{p1} + C_{p2}$ (λειτουργία-1 του συστήματος αυτοματισμού-σχήμα 4.3). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του συστήματος του σχήματος 4.5 (σχήματα 4.16-4.19), δηλαδή για τη λειτουργία του παλμικού φορτίου (λειτουργία-1 του συστήματος αυτοματισμού-σχήμα 4.3) και άρα τη λειτουργία του βασικού συστήματος (σχήμα 4.4), χωρίς την ύπαρξη του πυκνωτή C_{p1} . Για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις λειτουργίας του συστήματος, όσον αφορά την απεικόνιση των γραφικών παραστάσεων, πραγματοποιείται σε 2 χρονικά διαστήματα. Στο πρώτο, το οποίο βρίσκεται μεταξύ 0-0,1sec, παρουσιάζεται με μεγαλύτερη ευκρίνεια η μεταβατική περίοδος λειτουργίας του συστήματος, ενώ στο δεύτερο χρονικό διάστημα (0-2,5sec), παρουσιάζεται ολόκληρη η διαδικασία έναρξης και συνέχισης της λειτουργίας του βασικού συστήματος και κατά το οποίο γίνονται εμφανή τόσο η μεταβατική κατάσταση αυτού, όσο και η σταθεροποίησή του στη συνέχεια.



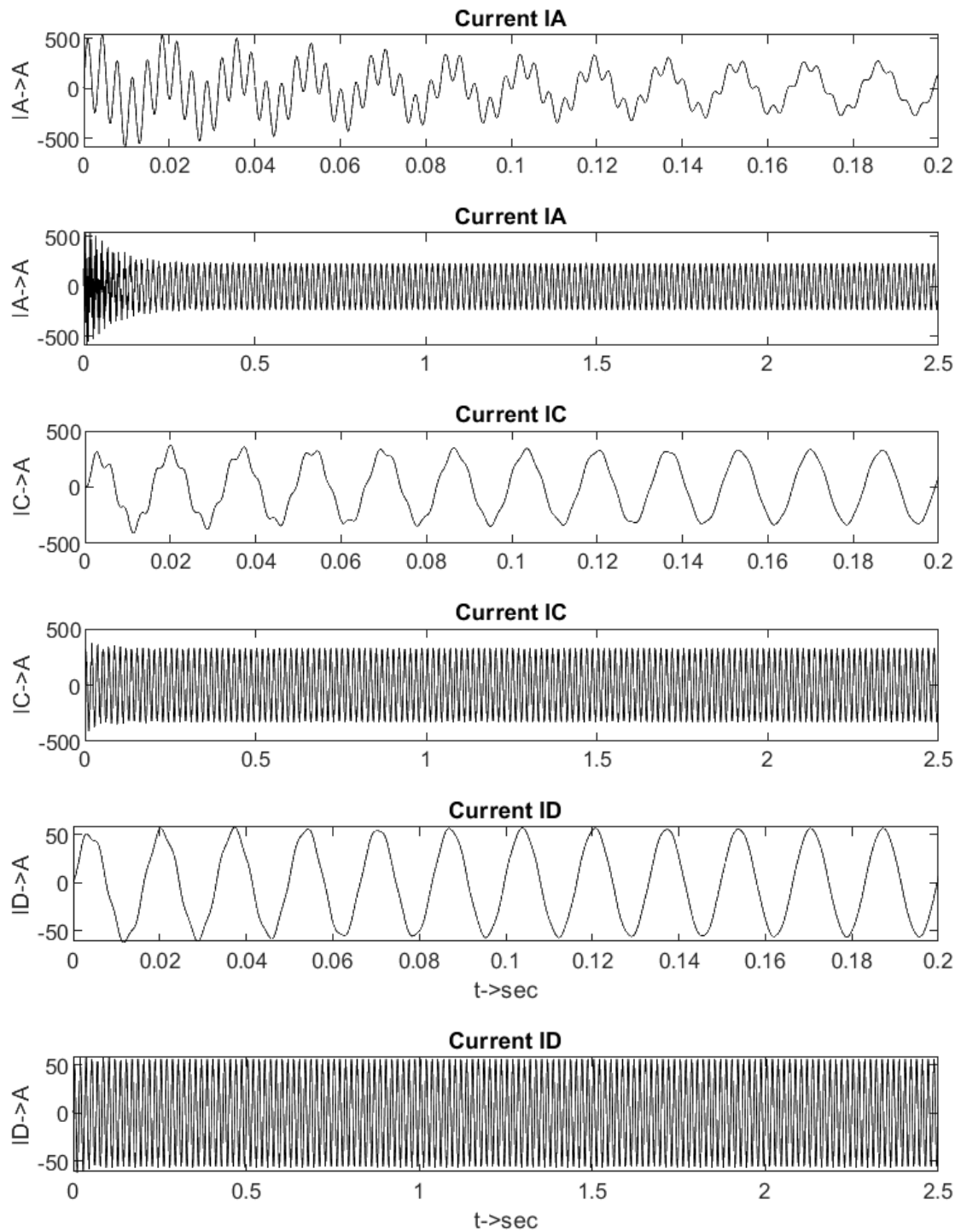
Σχήμα 4.12. Γραφική παράσταση φασικής τάσης εισόδου (V_1) του κυκλώματος του σχήματος 4.4 (λειτουργία-1, Κ1Μ ενεργό), διαδικασία φόρτισης πυκνωτή C_{p1}



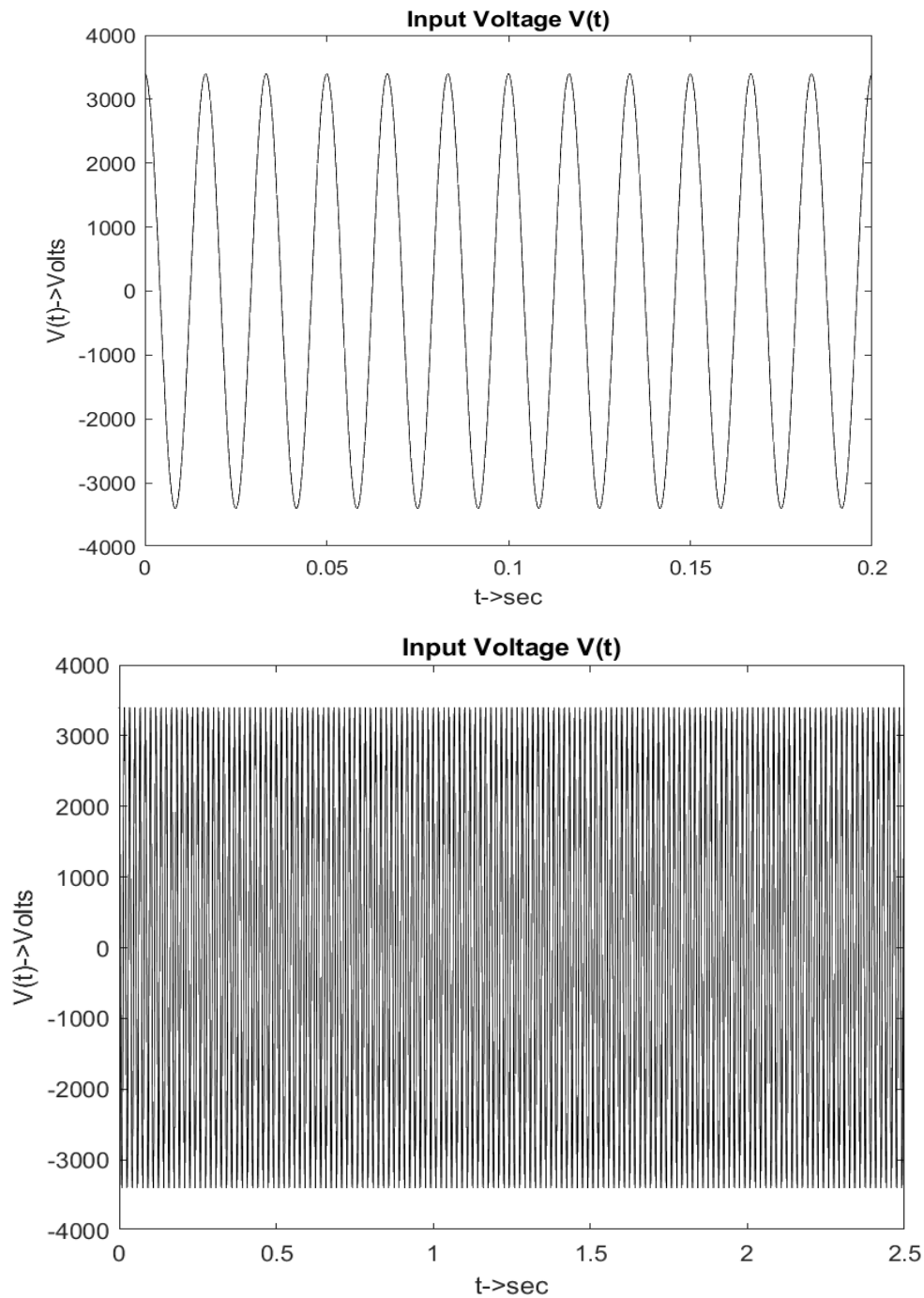
Σχήμα 4.13. Γραφική παράσταση ολικού ρεύματος γεννήτριας (I_s) του κυκλώματος του σχήματος 4.4 (λειτουργία-1, Κ1Μ ενεργό), διαδικασία φόρτισης πυκνωτή C_{p1}



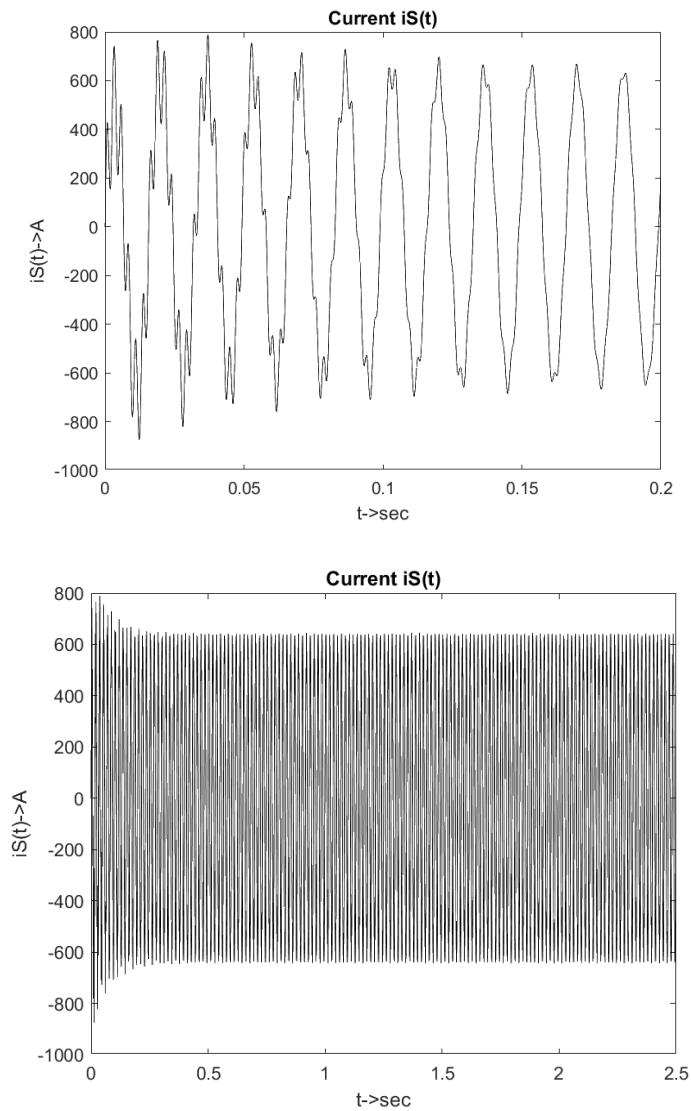
Σχήμα 4.14. Γραφικές παραστάσεις της μεταβλητής κατάστασης της τάσεως του κυκλώματος του σχήματος 4.4 (λειτουργία-1, Κ1Μ ενεργό)



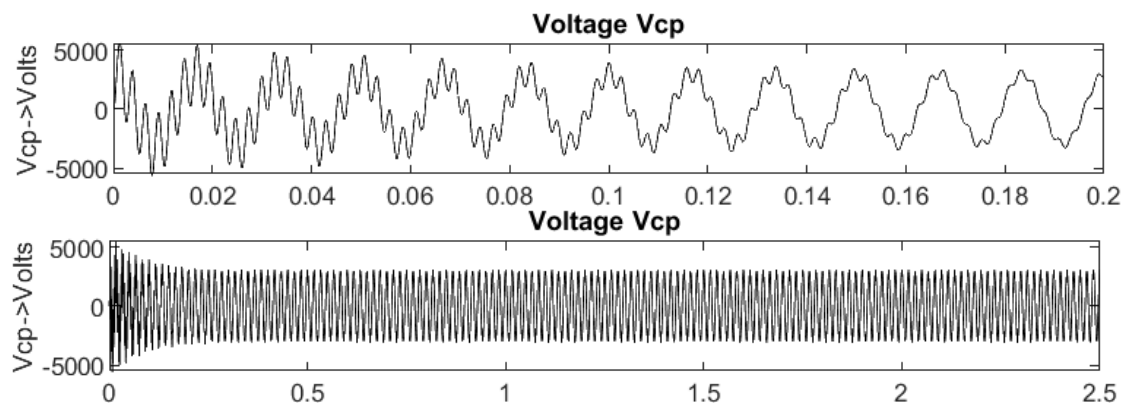
Σχήμα 4.15. Γραφικές παραστάσεις μεταβλητών κατάστασης (ρευμάτων) του κυκλώματος του σχήματος 4.4 (λειτουργία-1, K1M ενεργό)



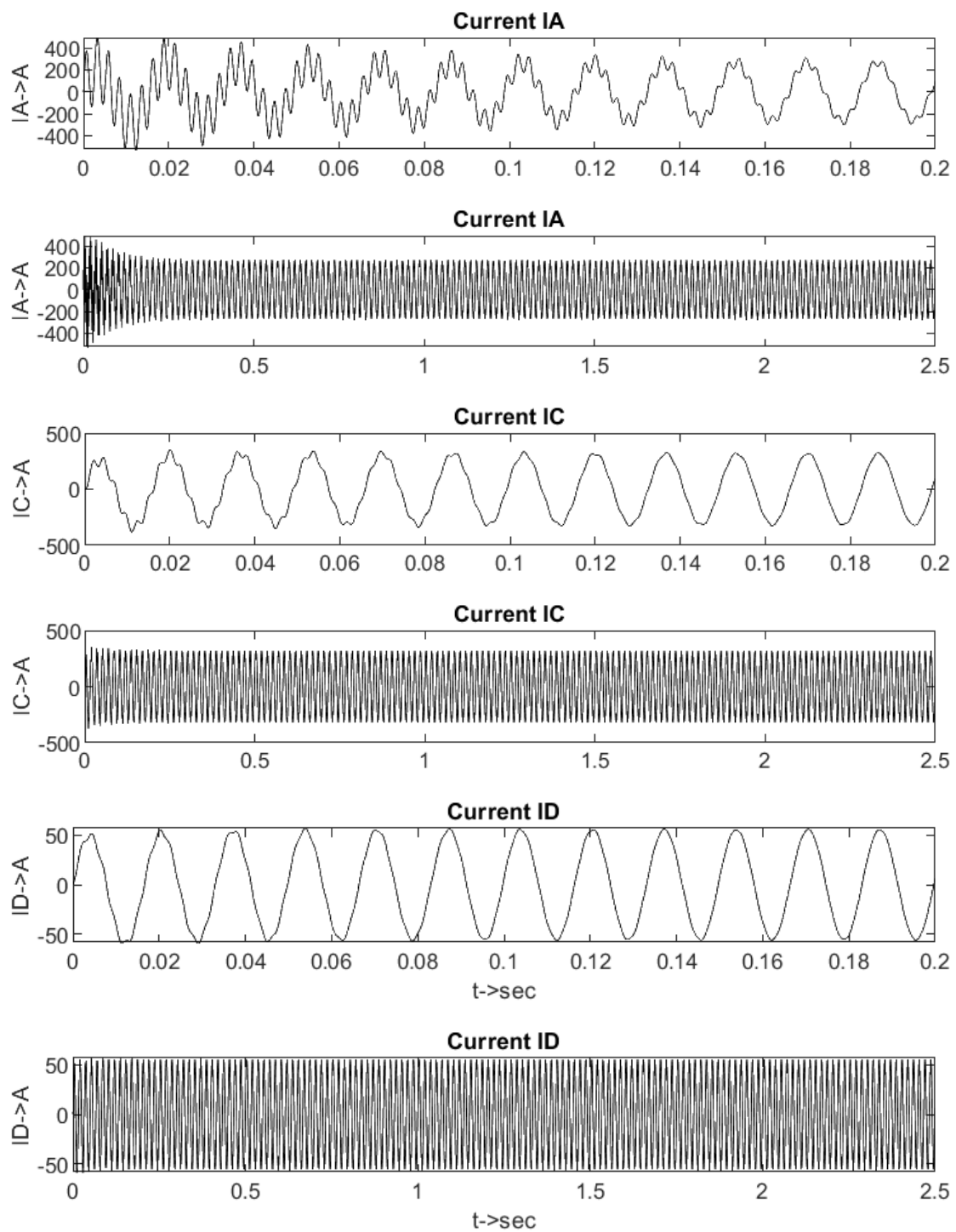
Σχήμα 4.16. Γραφική παράσταση φασικής τάσης εισόδου (V_1) του κυκλώματος του σχήματος 4.5 (λειτουργία-2, K2M ενεργό)



Σχήμα 4.17. Γραφική παράσταση ολικού ρεύματος γεννήτριας (I_S) του κυκλώματος του σχήματος 4.5 (λειτουργία-2, K2M ενεργό)



Σχήμα 4.18. Γραφικές παραστάσεις της μεταβλητής κατάστασης της τάσεως του κυκλώματος του σχήματος 4.5 (λειτουργία-2, K2M ενεργό)



Σχήμα 4.19. Γραφικές παραστάσεις μεταβλητών κατάστασης (ρευμάτων) του κυκλώματος του σχήματος 4.5 (λειτουργία-2, K2M ενεργό)

4.6 Συμπεράσματα

- Στις γραφικές παραστάσεις 4.12 και 4.16 παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάσης εισόδου του συστήματος κατά τη διάρκεια της τροφοδοσίας ολόκληρου του κυκλώματος, η οποία παρουσιάζει την αναμενόμενη ημιτονοειδή μορφή και σταθερή συχνότητα λειτουργίας και στις δύο περιπτώσεις λειτουργίας του συστήματος.
- Όσον αφορά τη γραφική παράσταση του ολικού ρεύματος της γεννήτριας I_S , κατά τη λειτουργία-1, K1M ενεργό, παρατηρείται κατά τη έναρξη λειτουργίας του συστήματος (0-0,2sec), αυξημένη τιμή του πλάτους αυτού και ταλάντωση της κυματομορφής, ενώ στη συνέχεια και όσο πλησιάζει τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και κατά τη διάρκεια αυτής, παρουσιάζει σταθεροποίηση πλάτους και μορφής (σχήμα 4.13). Κατά τη λειτουργία-2, K2M ενεργό, δηλαδή κατά την αποσύνδεση της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας του παλμικού φορτίου (C_{p1}), παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά στην ταλάντωση της κυματομορφής κατά τη μεταβατική περίοδο (με μικρή μείωση της διάρκειας της ταλάντωσης) και μικρή μείωση στο πλάτος του ρεύματος, η οποία γίνεται εμφανέστερη στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος (σχήμα 4.17).
- Η κυματομορφή της τάσης φόρτισης της συστοιχίας πυκνωτών (C_p) και κατ' επέκταση της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας του παλμικού φορτίου, παρουσιάζει και αυτή έντονη ταλάντωση και αυξημένο πλάτος κατά την έναρξη του συστήματος, άλλα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σχεδόν εξαφανίζεται η ταλάντωση και σταθεροποιείται το πλάτος της κυματομορφής (σχήμα 4.14). Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζεται και κατά την αποσύνδεση της χωρητικότητας C_{p1} (σχήμα 4.18), δηλαδή κατά τη λειτουργίας του παλμικού φορτίου και άρα τη λειτουργία του βασικού συστήματος μόνο με τη συστοιχία των πυκνωτών αντιστάθμισης (C_{p2}).
- Κατά τη λειτουργία του συστήματος του σχήματος 4.4, το ρεύμα $i_A(t)$, το οποίο τροφοδοτεί τόσο τη συστοιχία πυκνωτών ($C_p=C_{p1}+C_{p2}$), όσο και το φορτίο πρόωσης, παρουσιάζει αρχικά ταλάντωση και αυξημένο πλάτος σε σχέση με τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, όπου σταθεροποιείται η τιμή του πλάτους αυτού και αποσβένει η ταλάντωση (σχήμα 4.15). Με την αποσύνδεση της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας (C_{p1}), παρουσιάζεται και πάλι ταλάντωση κατά την έναρξη λειτουργίας του κυκλώματος, όμως παρατηρείται μειωμένη η τιμή του πλάτους αυτού, όπως γίνεται εμφανές στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (σχήμα 4.19).
- Τέλος, οι γραφικές παραστάσεις των ρευμάτων $i_C(t)$ και $i_D(t)$, που αφορούν το φορτίο πρόωσης και τον κλάδο του απλού φορτίου-Φ1 αντίστοιχα και στις 2 περιπτώσεις λειτουργίας του συστήματος (με και χωρίς τον πυκνωτή C_{p1}) παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, η οποία χαρακτηρίζεται από μικρή ταλάντωση κατά την έναρξη (στο φορτίο Φ1 είναι σχεδόν αμελητέα) και άμεση σταθεροποίηση στη συνέχεια (σχήματα 4.15 και 4.19).

5 Κεφάλαιο 5^ο: Γενικά συμπεράσματα & περιοχές για περαιτέρω έρευνα

5.1 Γενικά συμπεράσματα

Όπως προέκυψε από την παραπάνω εργασία και τη γενική μελέτη που αφορούσε αυτήν, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα ισχύος ενός Σ.Η.Ε. πλοίου και κατ' επέκταση τη γενική λειτουργία του είναι πολλοί και ποικίλουν κυρίως ανάλογα με το είδος των φορτίων αυτού. Ο έντονος ρυθμός με τον οποίο εξοπλίζονται τα πλοία με ηλεκτρικά φορτία προηγμένης τεχνολογίας (ηλεκτρονικές διατάξεις, μετατροπείς, ρυθμιστές, κ.α.), ο μεγάλος αριθμός φορτίων που καλείται να εξυπηρετήσει το αντίστοιχο Σ.Η.Ε., αλλά και τα ειδικά φορτία αυτών, όπως τα παλμικά φορτία που αναλύθηκαν εκτενώς στη συγκεκριμένη εργασία, έχουν οδηγήσει στην εμφάνιση νέων προβλημάτων στην ποιότητα ισχύος και στην επιδείνωση των ήδη υπάρχοντων (αρμονικές συνιστώσες, παραμορφώσεις κυματομορφών ηλεκτρικών μεγεθών, κ.α.). Όλα αυτά τα εμφανιζόμενα προβλήματα απαιτούν άμεσες και αποτελεσματικές μεθόδους μείωσης και σταδιακής εξάλειψης με στόχο την επίτευξη αποδοτικότερης και οικονομικότερης λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων των πλοίων. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε σε πολλά σημεία στη συγκεκριμένη εργασία, μεγάλο ρόλο στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με την ποιότητα ισχύος, έχουν οι αντίστοιχοι κανονισμοί, οι οποίοι σε πολλές περιπτώσεις θέτουν περιορισμούς μη αποτελεσματικούς και δύσκολα επιτεύξιμους. Πιο συγκεκριμένα, όσο αφορά τη λειτουργία των παλμικών φορτίων, σχετικά πρότυπα (π.χ. STANAG-1008) προτείνουν συγκεκριμένες καμπύλες λειτουργίας αυτών, οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις είναι μη αποδοτικές και δέχονται έντονη βελτίωση μέσω τροποποίησης χαρακτηριστικών των παλμικών φορτίων (π.χ. duty cycle) ή και του υπόλοιπου συστήματος (π.χ. υπομεταβατική επαγωγική αντίδραση της γεννήτριας-Χ_d''). Γι' αυτό το λόγο επιβάλλεται αναθεώρηση αυτών (των κανονισμών) λαμβάνοντας υπόψη όσο το δυνατόν περισσότερες παραμέτρους του συστήματος, με σκοπό τη διόρθωση της ποιότητας ισχύος στο επίπεδο των σύγχρονων αναγκών. Με όλους του παραπάνω τρόπους μπορεί να επιτευχθεί ουσιαστική βελτίωση και εξέλιξη στον τομέα των ηλεκτρικών συστημάτων των πλοίων, αλλά και του ευρύτερου τομέα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεως, συμβάλλοντας έτσι στην αποτελεσματικότερη κάλυψη των αναγκών των χρηστών και των υπηρεσιών που προσφέρουν τα συγκεκριμένα συστήματα.

5.2 Περιοχές για περαιτέρω έρευνα

Όπως έγινε εμφανές μέσω της παραπάνω εργασίας, η μελέτη της ποιότητας ισχύος ενός Σ.Η.Ε. πλοίου δέχεται εκτενή ανάλυση. Ειδικότερα, στη σύγχρονη εποχή των εξηλεκτρισμένων πλοίων και των αντίστοιχων ηλεκτρικών φορτίων με τα οποία εξοπλίζεται, η ανάγκη για την αντιμετώπιση των προβλημάτων ποιότητας ισχύος αυτών είναι απαραίτητη. Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε μία γενική ανάλυση των προβλημάτων στην ποιότητα της ισχύος που προκαλούνται από τα παλμικά φορτία. Παρουσιάστηκαν ορισμένες βασικές συνέπειες που προκύπτουν στο Σ.Η.Ε. ενός πλοίου κατά τη λειτουργία των παλμικών φορτίων (διαμόρφωση συχνότητας και τάσης, αρμονικές συνιστώσες). Επίσης, παρουσιάστηκαν ποικίλοι παράγοντες που επηρεάζουν την καμπύλη λειτουργίας ενός παλμικού φορτίου και κατ' επέκταση τη συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος. Όμως, υπάρχουν πολλοί ακόμη παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία των παλμικών φορτίων και μπορούν να μελετηθούν στο μέλλον. Επιπλέον, μπορούν να πραγματοποιηθούν πιο σύνθετες μελέτες και προσομοιώσεις που αφορούν πιο περίπλοκα Σ.Η.Ε. πλοίων, τα οποία θα περιλαμβάνουν διαφορετικούς ρυθμιστές συχνότητας (Governor) και τάσης (AVR) και θα περιλαμβάνουν ποικίλους τύπους φορτίων (π.χ. μη γραμμικά). Επίσης, είναι δυνατή η εκτέλεση περισσότερων σεναρίων λειτουργίας του συστήματος, για παράδειγμα σεναρία που περιλαμβάνουν διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας και τιμές περιόδου λειτουργίας του παλμικού φορτίου, σύνθετης αντίστασης και Σ.Ι. της γεννήτριας, μήκη αγωγών μεταξύ των στοιχείων του συστήματος, ώστε να γίνει εμφανής η συμπεριφορά του κάθε συστήματος σε μεγαλύτερο εύρος τιμών λειτουργίας. Επίσης, η μεγαλύτερη βάση δεδομένων και αποτελεσμάτων που προκύπτει μέσω των προηγούμενων προσομοιώσεων και μελετών συμβάλει και στην βελτίωση και τον εμπλουτισμό των ήδη υπάρχοντων κανονισμών και προτύπων, οι οποίοι υστερούν ακόμη και σήμερα, όσον αφορά τους λειτουργικούς περιορισμούς που θέτουν, που όπως φάνηκε και μέσα από τη συγκεκριμένη εργασία, σε πολλές περιπτώσεις δεν ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενός ηλεκτρικού συστήματος πλοίου. Βάσει όλων των προαναφερθέντων είναι δυνατή η εύρεση νέων μεθόδων αντιμετώπισης των προβλημάτων στην ποιότητα ισχύος, η βελτίωση των ήδη υπάρχοντων και τελικά η σημαντική μείωση των προβλημάτων αυτών. Μία τέτοια διαδικασία είναι ικανή να συντελέσει στη ραγδαία εξέλιξη των Σ.Η.Ε. πλοίων, αλλά και ολόκληρου του τομέα των θαλάσσιων κατασκευών.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] H.K. Woud, D. Stapersma: “Design of propulsion and electric power generation systems”, Publications IMAREST, 1^η έκδοση 2002, επανατύπωση 2008, σελ. 494.
- [2] ABB: “System project guide for passenger vessels”, 2011, pp. 268.
- [3] Ιωάννης Προυσαλίδης: «ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΠΛΟΙΑ ΚΑΙ ΠΛΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ», Εκδόσεις Συμμετρία, 2012.
- [4] Μ.Π. Παπαδόπουλος: «Προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας», Εκδόσεις ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα, 1997, σελ. 292.
- [5] Κ. Κριτσωτάκης: «Εισαγωγή στην Προστασία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2012, 287.
- [6] ABB, “Switchgear Manual”, 10th edition
- [7] Β.Κ. Παπαδιάς: «Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος Ι, Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας», Αθήνα 1985, σελ. 287.
- [8] Β.Κ. Παπαδιάς: «Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος ΙΙ, Ασύμμετρες και μεταβατικές καταστάσεις», Αθήνα 1985, σελ. 334.
- [9] Γ. Ι. Τσεκούρας: «6^ο κεφάλαιο- Πολυφασικά εναλλασσόμενα συστήματα», ΣΝΔ, 2011, σελ. 122.
- [10] NAVY TRAINING COURSE – BUREAU OF NAVAL PERSONNEL: “ELECTRICIAN’S MATE 1 & C”
- [11] Dennis Hall – WITHERBY 2nd edition: “PRACTICAL MARINE ELECTRICAL KNOWLEDGE”
- [12] Krause, Wasynczuk, Sudoff: “ANALYSIS OF ELECTRIC MACHINERY AND DRIVE SYSTEMS”, IEEE Press
- [13] Dennis Hall – WITHERBY 1st edition: “PRACTICAL MARINE ELECTRICAL KNOWLEDGE”
- [14] IEEE Standard 45 “IEEE Recommended practice for electric installation on shipboard”, 1998, σελ. 314.
- [15] Ηρακλής Χάρχαρος: «ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑ ΠΛΟΙΟΥ», Εκδόσεις Σταυριδάκη
- [16] Ι. Π. Ιωαννίδης, Χ.Α. Φραγκόπουλος, Ι. Προυσαλίδης: «Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου – Συμπληρωματικά βοηθήματα και Ασκήσεις», Ε.Μ.Π. Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα 2006.
- [17] Dugan, Mcgranaghan, Santoso, Beauty. “Electrical power systems quality”, McGraham-Hill, 2004, σελ. 545
- [18] IEEE Std_519 - 1992 - Harmonic Control in Electrical Power Systems
- [19] STANAG 1008, “Characteristics of Shipboard Electrical Power Systems in Warships of the North Atlantic Treaty Navies”, NATO , Edition 8, 21 Febr. 1994. / Edition 9, 24 Aug. 2004
- [20] Final Draft for Ratification STANAG 1008 Edition 10 and ANEP-100(A) CHARACTERISTICS OF SHIPBOARD 440V/230V/115V 60Hz; 440V/115V 400Hz

- and 24/28VDC ELECTRICAL POWER SYSTEMS IN WARSHIPS OF THE NATO NAVIES, 2019, {αυτό δεν το γράφουμε επισήμως ακόμη , τα χρεώνουμε σε [19]}
- [21] I.K. Hatzilau, J. Prousalidis, E. Styvaktakis, F. Kanellos, S. Perros, E. Sofras. Electric power supply quality concepts for the All Electric Ship (AES). INEC 2004
- [22] Control_of_Harmonics_in_Electrical_Power_Systems_ABS_2006
- [23] G. J. Tsekouras, F.D.Kanellos, J.M. Prousalidis, I.K. Hatzilau: “STANAG 1008 design constraints for pulsed loads in the frame of the All Electrical Ships”, Nausivios Chora, A journal in Naval Sciences and Technology, vol. 3, 2010, pp. 115-154.
- [24] F.D.Kanellos, G. J. Tsekouras, J. Prousalidis, I.K. Hatzilau: “An effort to formulate frequency modulation constraints in Ship-Electrical Systems with Pulsed Loads”, IET Electrical Systems in Transportation, vol. 1, issue 1, 2011, pp. 11-23.
- [25] F.D.Kanellos, G. J. Tsekouras, J. Prousalidis, I.K. Hatzilau: “Effort to formulate voltage modulation constraints in ship-electrical systems with pulsed loads”, IET Electrical Systems in Transportation, vol. 2, issue 1, 2012, pp. 18-28.
- [26] George J. Tsekouras, Fotis D. Kanellos, John M. Prousalidis, Ioannis K. Hatzilaou: “Implemetation limitations of STANAG 1008 design constraints for pulsed loads”, Nausivios Chora, A journal in Naval Sciences and Technology, vol. 4, 2012, pp. 110-135.
- [27] Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab and Simulink_ONG
- [28] Ανάλυση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων, Κωνσταντίνος Παπαδόπουλος, 2015
- [29] All-Electric Ships-A Review of the Present State of the Art, J. s. Thongam, M. Tarbouchi, A. F. Okou, D. Bouchard, and R. Beguenane
- [30] On electric warship power system performance when meeting the energy requirements of electromagnetic railguns, I. Whitelegg, R.W.G. Bucknall & B.T. Thorp
- [31] Electromagnetic Launch Science and Technology in the United States Enters a New Era Harry D. Fair
- [32] On Studying the Power Supply Quality problems due to Thruster Start-ups, J.M. Prousalidis, P. Mouzakis, E. Sofras, D. Muthumuni, O. Nayak
- [33] RESULTS FROM SANDIA NATIONAL LABORATORIES/ LOCKHEED MARTIN ELECTROMAGNETIC MISSILE LAUNCHER (EMML), M. S. Aubuchont, T. R. Lockner, B. N. Turman, G. Root, L. Basak, R. Gaigler, B. Skurdal, M. Floyd
- [34] Εισαγωγή στις βασικές έννοιες της ηλεκτροτεχνίας, Γεώργιος Ι. Τσεκούρας
- [35] Electrothermal-Chemical (ETC) Technology Weaponization Issues, Brad Goodell, United Defense, L.P. Armament Systems Division 4800 East River Rd. Minneapolis, MN 55421
- [36] (“Simulation of a Shipboard Electrical Network-AES comprising Pulsed Loads”, Engine as a Weapon II, IMarEST, Dec. 2006, F.D. Kanellos, I.K. Hatzilau, J. Prousalidis, E. Styvaktakis)
- [37] www.tmmotion.com/english/newsshow_290.html
- [38] <http://voith.com/us-en/drives-transmissions/voith-schneider-propeller-vsp.html>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Κώδικες προσομοιώσεως των κυκλωμάτων του κεφαλαίου 4 βάσει του προγράμματος Matlab.

- Κώδικας 1. Περιγραφή βασικού Σ.Η.Ε.-φόρτιση πυκνωτή C_{p1} (χωρίς σύνδεση παλμικού φορτίου-σχήμα 4.4)

```
global A B C D we ue Vin ddt1_0 ddt2_0 ddt3_0 ddt4_0 ddt5_0
% arxikopoihseis
freq=60; %Hz
RS=0.00141; %Ohm
RA=0.00375; %Ohm
RB=3.43627; %Ohm
RC=8.24733; %Ohm
LS=0.00171; %Henry
LA=0.002321; %Henry
LB=0.02321; %Henry
LC=0.15103; %Henry
Cp=0.00009; %Farad
we=2*pi*60; %rad
ue=pi/2; %rad
Vin=3396.62578; %Volts
x_in1=0; %VC->Volts x1->Vc(t)
x_in2=0; %iA->Ampere x2->iA(t)
x_in3=0; %iB->Ampere x2->iB(t)
x_in4=0; %iC->Ampere x2->iC(t)
x_in5=0; %sec-prosoxh einai xronos gia grafikous logous
ddt1_0=0; %rythmos metabolhs x1
ddt2_0=0; %rythmos metabolhs x2
ddt3_0=0; %rythmos metabolhs x3
ddt4_0=0; %rythmos metabolhs x4
ddt5_0=0; %rythmos metabolhs x5-> t xronou
t0=0; %sec
tf=2.5; %sec
met_ddt=0.000001; %sec

% YPOLOGISMOS PINAKWN A,B,C,D
A(1,1)=0;
A(1,2)=1/Cp;
A(1,3)=-1/Cp;
A(1,4)=0;

A(2,1)=((-LS/LC)-1)/(LS+LA+((LS*LA)/LC));
A(2,2)=-((RS+RA+((LS*RA)/LC))/(LS+LA+((LS*LA)/LC)));
A(2,3)=0;
A(2,4)=(((RC*LS)/LC)-RS)/(LS+LA+((LS*LA)/LC));

A(3,1)=1/LB;
A(3,2)=0;
A(3,3)=-RB/LB;
A(3,4)=0;

A(4,1)=(LS/LA)/(LC+LS+(LC*LS/LA));
A(4,2)=(((LS*RA)/LA)-RS)/(LC+LS+(LC*LS/LA));
A(4,3)=0;
```

```

A(4,4)=- (RS+RC+((RC*LS)/LA))/(LC+LS+((LC*LS)/LA));

B(1,1)=0;
B(2,1)=1/(LS+LA+((LS*LA)/LC));
B(3,1)=0;
B(4,1)=1/(LC+LS+((LC*LS)/LA));

C(1,1)=0;
C(1,2)=1;
C(1,3)=1;
C(1,4)=1;

D(1,1)=0;

%loipes arxikopoihseis
we=2*pi*freq; %rad/sec-kikliki sixnothta

%orismos sigkekrimenwn xronikwn stigmwn epilisis
tspan=(t0:met_ddt:tf);

%epilish
x0=[x_in1 x_in2 x_in3 x_in4 x_in5]';
[t,x]=ode45(@sinart_katastasewn,tspan,x0);

%Ejhswh ejodou
t_axis=x(:,5); %apo8hkeush xronou
U1f=u1(t_axis);
Y1=C(1,1)*x(:,1)+C(1,2)*x(:,2)+C(1,3)*x(:,3)+C(1,4)*x(:,4)+D(1,1)*U1f(:);

%plhuos 3x+1esodwn +2ejodwn
figure ('Name', 'Time series -x');
subplot(4,1,1) %x(1)
plot (t_axis,x(:,1), 'k');
title('Voltage Vcp');
ylabel ('Vcp->Volts');
subplot(4,1,2) %x(2)
plot (t_axis,x(:,2), 'k');
title('Current IA');
ylabel ('IA->A');
subplot(4,1,3) %x(3)
plot (t_axis,x(:,3), 'k');
title('Current IB');
ylabel ('IB->A');
subplot(4,1,4) %x(3)
plot (t_axis,x(:,4), 'k');
title('Current IC');
ylabel ('IC->A');
xlabel('t->sec');

figure ('Name', 'Time series -input');
subplot(1,1,1) %u1
plot (t_axis,U1f, 'k');
title('Input Voltage V(t)');
ylabel ('V(t)->Volts');
xlabel ('t->sec');

figure ('Name', 'Time series -output');

```

```
subplot(1,1,1) %y1
plot (t_axis,Y1,'k');
title('Current iS(t)');
ylabel ('iS(t)->A');
xlabel ('t->sec');

function ddt=sinart_katastasewn(t,x)
% H PERIPTWSH 3X3 pinaka A kai 3x1 pinaka B
global A B ddt1_0 ddt2_0 ddt3_0 ddt4_0 ddt5_0
%Arxikes synthhkes
ddt=[ddt1_0 ddt2_0 ddt3_0 ddt4_0 ddt5_0]';
%ddt(1)
ddt(1)=A(1,1)*x(1)+A(1,2)*x(2)+A(1,3)*x(3)+A(1,4)*x(4)+B(1,1)*u1(t);
%ddt(2)
ddt(2)=A(2,1)*x(1)+A(2,2)*x(2)+A(2,3)*x(3)+A(2,4)*x(4)+B(2,1)*u1(t);
%ddt(3)
ddt(3)=A(3,1)*x(1)+A(3,2)*x(2)+A(3,3)*x(3)+A(3,4)*x(4)+B(3,1)*u1(t);
%ddt(4)
ddt(4)=A(4,1)*x(1)+A(4,2)*x(2)+A(4,3)*x(3)+A(4,4)*x(4)+B(4,1)*u1(t);
%ddt(5)- o xronos gia grafikous logous
ddt(5)=1;
end

function ejodos=u1(t)
global Vin we ue
ejodos=Vin*sin(we*t+ue);
end
```

➤ **Κώδικας 2. Περιγραφή βασικού Σ.Η.Ε.- λειτουργία του βασικού συστήματος χωρίς τη σύνδεση της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας του παλμικού φορτίου (λειτουργία παλμικού φορτίου-σχήμα 4.5)**

(Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο κώδικας είναι ίδιος με τον κώδικα 1, με τη μόνη διαφορά ότι στη θέση της χωρητικότητας $C_p=C_{p1}+C_{p2}$, υπάρχει μόνο ο πυκνωτής αντιστάθμισης C_{p2} του φορτίου πρώωσης)