



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ
ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

Διπλωματική Εργασία

**Ανάλυση της Ηλεκτρολογικής Εγκατάστασης
των επιμέρους Μικροδικτύων ενός πλοίου**

Συγγραφέας : Λοκουρέζος Νικόλαος

ΑΜ : 44300

Επιβλέπων : Δρόσος Χρήστος

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

SCHOOL OF ENGINEERING

**DEPARTMENT OF INDUSTRIAL DESIGN AND
PRODUCTION ENGINEERING**

Diploma Thesis

**Analysis of the Electrical Installation of
the individual Microgrids of a ship**

Student name and surname : Lykourezos Nikolaos

Registration Number : 44300

Supervisor name and surname : Drosos Christos

Athens, February 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

**Ανάλυση της Ηλεκτρολογικής Εγκατάστασης
των επιμέρους Μικροδικτύων ενός πλοίου**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή :

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΔΡΟΣΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ	ΕΔΙΠ Α	
2	ΛΑΣΚΑΡΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
3	ΧΑΤΖΟΠΟΥΛΟΣ ΑΒΡΑΑΜ	ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Λυκουρέζος Νικόλαος του Βασιλείου, με αριθμό μητρώου 44300 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι :

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

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

Ο Δηλών



Λυκουρέζος Νικόλαος

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την ανάλυση του ηλεκτρικού συστήματος παροχής ενέργειας στα φορτία ενός εμπορικού πλοίου. Επιπλέον, σκοπός είναι η περιγραφή και διερεύνηση της διασύνδεσης των επιμέρους μικροδικτύων (Χαμηλής και Υψηλής τάσης) σε ένα bulk carrier. Τέλος, ιδιαίτερη σημασία αποτελεί και η ανάλυση των αυτοματισμών που εγκαθίστανται με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας.

Ο σύγχρονος σχεδιασμός της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης σε ένα εμπορικό πλοίο βασίζεται στο διαμοιρασμό και στη παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθότι τα πλοία δεν είναι δυνατό να διασυνδεθούν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, είναι αναγκαίο να καλύπτονται εναλλακτικά οι απαιτήσεις. Από τη μεριά των συστημάτων πρόωσης στα συμβατικά πλοία η ενέργεια καλύπτεται από το καύσιμο έχοντας εγκατεστημένους κινητήρες εσωτερικής καύσης, ενώ στα πλήρως εξηλεκτρισμένα πλοία το σύστημα πρόωσης καλύπτεται από δύο πλήρως ελεγχόμενους αντιστροφείς ισχύος και δύο κινητήρες πρόωσης. Το υποψήφιο είδος κινητήρα για το σύστημα πρόωσης είναι ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών, για τον οποίο θα γίνει εκτεταμένη ανάλυση στη παρούσα διπλωματική.

Από τη μεριά του ηλεκτρικού συστήματος διανομής, το οποίο περιλαμβάνει το διαμοιρασμό της ενέργειας στα φορτία. Στα συμβατικά πλοία η ενέργεια παράγεται μέσω γεννητριών συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος και διαμοιράζεται μέσω μετασχηματιστών στο κατάλληλο επίπεδο τάσης. Ενώ στα πλήρως εξηλεκτρισμένα πλοία η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ατμογεννήτριες για τη παραγωγή θερμικής ενέργειας από πεπιεσμένο αέρα σε συνδυασμό με τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες καθώς και τριφασικές ανορθωτικές γέφυρες διόδων.

Ο υπόλοιπος ηλεκτρολογικός σχεδιασμός μπορεί να θεωρηθεί ίδιος με αυτό μιας κατοικίας, καθώς το ρεύμα διανέμεται μέσω καλωδίων για τον φωτισμό, τη ρευματοδότηση συσκευών γενικής χρήσης, τον κλιματισμό κ.α. Επιπλέον, ένα ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των συσσωρευτών έκτακτης ανάγκης (εφεδρεία).

Τέλος θα σχολιαστεί και θα περιγραφεί ένα σύστημα ανάκτησης ενέργειας από τα θερμά καυσαέρια των μηχανών εσωτερικής καύσης (Waste Heat Recovery). Χρησιμοποιώντας μηχανές εσωτερικής καύσης αυξάνεται το αποτύπωμα διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα μέσω των καυσαερίων από τη καύση του καυσίμου. Η χρήση θερμοηλεκτρικών γεννητριών μπορεί να παρέχει μια άμεση λύση για την εκμετάλλευση αυτών και τη μετατροπή τους σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική με τίτλο « **Ανάλυση της Ηλεκτρολογικής Εγκατάστασης των επιμέρους Μικροδικτύων ενός πλοίου** », πραγματοποιήθηκε, στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας του **Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής** του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Στο σημείο αυτό, αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ειλικρινείς και θερμές ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας. Πρωτίστως στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δρόσο Χρήστο, ο οποίος έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην εν λόγω διπλωματική, καθώς μου έδωσε το κίνητρο και την ώθηση, για την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Από τις ευχαριστίες αυτές, δεν θα μπορούσαν να λείπουν οι γονείς μου Βασίλης και Λεώνη και η αδελφή μου Κωνσταντίνα, οι οποίοι με μεγάλο κόπο και προσωπικές στερήσεις, μου παρείχαν όλα εκείνα τα απαραίτητα εφόδια για την ολοκλήρωση των σπουδών μου αλλά και την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξη τους τόσο σε επαγγελματικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο. Θέλω επίσης, να ευχαριστήσω τους φίλους μου και την σύντροφο μου, που με την υποστήριξη, την συμπαράσταση και προτροπή τους, σχεδόν σε καθημερινή βάση, συνέβαλαν στην τόνωση του ηθικού μου έτσι ώστε να μπορέσω να πετύχω το στόχο μου.

Νικόλαος Β. Λυκουρέζος

Πίνακας Περιεχομένων

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	III
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	- 4 -
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	- 5 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	- 8 -
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΑ ΤΟΥ ΠΛΟΪΟΥ.....	- 8 -
1.1 Εισαγωγή.....	- 8 -
1.2 Γενικές αρχές	- 10 -
1.3 Γεννήτριες Συνεχούς Ρεύματος	- 11 -
1.3.1 Ρύθμιση γεννητριών Σ.Ρ.	- 12 -
1.3.2 Παράλληλη λειτουργία γεννητριών Σ.Ρ.....	- 12 -
1.4 Γεννήτριες Εναλλασσόμενου Ρεύματος	- 13 -
1.4.1 Συνδεσμολογία τριφασικών μηχανών.....	- 14 -
1.4.2 Παράλληλη λειτουργία γεννητριών Ε.Ρ.....	- 15 -
1.5 Πίνακες γεννητριών συνεχούς η εναλλασσόμενου ρεύματος.....	- 15 -
1.6 Μετασηματιστές, στρεφόμενοι μετατροπείς, ανορθωτές.....	- 16 -
1.7 Ζεύγος κινητήρα-γεννήτριας.....	- 17 -
1.8 Μετατροπέας συχνότητας	- 17 -
1.9 Ανορθωτές.....	- 17 -
1.10 Ηλεκτρολογικό υλικό εγκαταστάσεων πλοίου.....	- 18 -
1.11 Προστατευτικές διατάξεις.....	- 18 -
1.11.1 Διακόπτες	- 20 -
1.11.2 Μέθοδοι προστασίας έναντι ηλεκτροπληξίας.....	- 20 -
1.11.3 Προστασία κινητήρων	- 21 -
1.12 Καλώδια	- 22 -

1.13	Κουτιά διακλάδωσης	23 -
1.14	Πίνακες ελέγχου και διανομής	23 -
1.15	Συστήματα ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων πλοίων	23 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2		25 -
2.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	25 -
2.1	Μηχανική Πρόωση	25 -
2.2	Ηλεκτρική πρόωση	26 -
2.2.1	Οφέλη και προκλήσεις της ηλεκτρικής πρόωσης.....	27 -
2.3	Μόνιμων Μαγνητών.....	29 -
2.4	Επαγωγικές Μηχανές.....	31 -
2.5	Brushless Direct Current Motor (BLDCM)	33 -
2.5.1	Μαγνητική Ανάλυση της BLDC.....	34 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3		39 -
3.	ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΥΣΑΕΡΪΩΝ	39 -
3.1	Εισαγωγή.....	39 -
3.2	Θερμοηλεκτρικά φαινόμενα και υλικά.....	40 -
3.3	Μοντελοποίηση θερμοστοιχείου.....	45 -
3.4	Μελέτη συνδεδεμένων θερμοστοιχείων	46 -
3.5	Έλεγχος MPPT.....	47 -
3.5.1	Εισαγωγή στους MPPT.....	47 -
3.5.2	Αλγόριθμοι MPPT.....	48 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		57
4.	ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΪ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΪΑΣ.....	57
4.1	Έξυπνοι διακόπτες ισχύος.....	57
4.2	Ενσωμάτωση των SiC SSPC.....	58
4.3	Έξυπνη διαχείριση ισχύος (SPM)	59
4.4	Σχεδιασμός του συστήματος προστασίας.....	61
4.4.1	Λειτουργίες προστασίας των SSPC.....	61
4.4.2	Χαρακτηριστικά προστασίας των RCCBs	64

4.5	Χαρακτηριστικά προστασίας των SSCB, AFCB – Η κατάληξη στα SSPC	- 65 -
4.6	Διαχωρισμός των SSPCs βάσει των χαρακτηριστικών τους.....	- 67 -
4.7	Ανασκόπηση υποψήφιας τοπολογιών για την υλοποίηση SSPC	- 68 -
4.7.1	Τοπολογία MOSFET με γέφυρα διόδων	- 68 -
4.7.2	Τοπολογία αντιπαράλληλων MOSFET / IGBT.....	- 68 -
4.7.3	Τοπολογία common source	- 69 -
4.7.4	Τοπολογία Αντιπαράλληλων IGBT / SiC BJT	- 70 -
4.8	Προγραμματισμός λειτουργίας του SSPC σύμφωνα με την καμπύλη αντιστρόφου χρόνου.....	- 70 -
5.	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	- 73 -

Κεφάλαιο 1

1. Εισαγωγή στα ηλεκτρολογικά του πλοίου

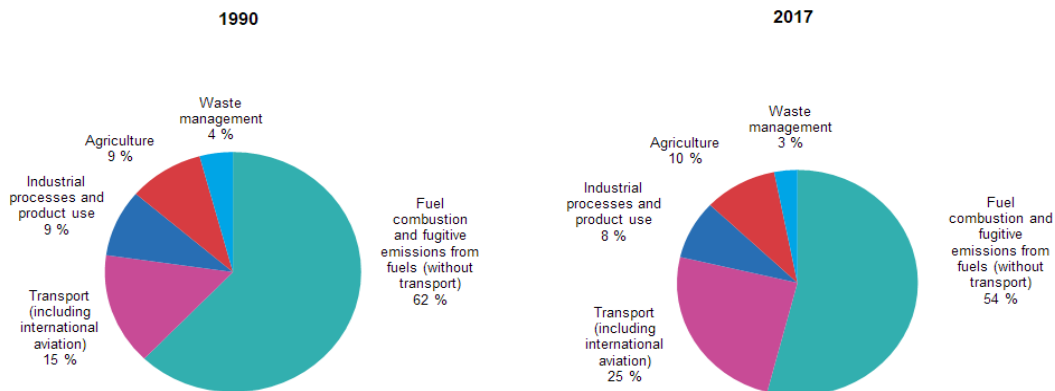
1.1 Εισαγωγή

Ο τομέας της ναυτιλίας αποτελεί έναν από τους πιο μεγάλους κλάδους απασχόλησης από πλευράς οικονομικών μεγεθών. Εκατοντάδες δις σε αξία αγαθών διακινούνται σε ετήσια βάση μέσω της ναυτιλίας, φροντίζοντας πως ο κόσμος σε κάθε γωνιά του πλανήτη θα μπορεί να έχει πρόσβαση σε πράγματα όπως το πετρέλαιο, τα αυτοκίνητα, τα σιτηρά, ρούχα κ.λπ. Για την επίτευξη αυτού του στόχου ωστόσο απαιτείται ένας τεράστιος παγκόσμιος στόλος, χιλιάδων μεγάλων πλοίων, την υποστήριξη των οποίων καλούνται να αναλάβουν ακόμα περισσότερα μικρότερα πλοία. Επιπλέον, σχεδόν όλο και περισσότερες χώρες του κόσμου διαθέτουν πολεμικά ναυτικά πλοία, κάτι που επίσης συνεισφέρει στο τελικό νούμερο των πλοίων που αυτή τη στιγμή κινούνται στη Γη.

Ο μεγάλος αριθμός των συγκεκριμένων πλοίων, τόσο επιβατηγών, όσο και εμπορικών και πολεμικών, οδηγεί στην επίρρωση ενός γνώριμου φαινομένου παγκοσμίως τα τελευταία χρόνια: της κλιματικής αλλαγής. Με τις εκπομπές των πλοίων να συνεισφέρουν στην παγκόσμια υπερθέρμανση, δεν είναι καθόλου παράλογη η έκκληση για περιορισμό των ρύπων και κατασκευή περισσότερων πράσινων, φιλικών προς το περιβάλλον, σκαφών.

Έτσι, τα τελευταία χρόνια γίνονται σημαντικές προσπάθειες στο μέτωπο της αντιμετώπισης των εκπομπών ρύπων των πλοίων, είτε με την εφαρμογή μεθόδων για πρόωση με λιγότερες εκπομπές ή για φιλτράρισμα των εκπομπών σε ήδη υπάρχοντα συστήματα. Στην πρώτη λογική, η απάντηση κρύβεται στην ηλεκτρική και υβριδική τεχνολογία, η οποία έχει ενταχθεί για τα καλά στην αυτοκίνηση. Φυσικά, ο εξηλεκτρισμός των μέσων μεταφοράς δε θα μπορούσε να μείνει εκτός αυτής της αλλαγής, καθώς σύμφωνα με στοιχεία του 2019, πριν την εμφάνιση της πανδημίας του COVID-19, που άλλαξε τα δεδομένα στο εμπόριο και την κίνηση, οι μεταφορές αποτέλεσαν το 25% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση, κάτι που τις καθιστά τον δεύτερο σημαντικότερο παράγοντα εκπομπών ρύπων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1 [1]. Τα στοιχεία αυτά επιτάσσουν εντονότερα σημαντικές αλλαγές στα μέσα μεταφοράς. Η κατανομή των καυσίμων ανά τομέα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2. [2].

Greenhouse gas emissions, analysis by source sector, EU-28, 1990 and 2017
(Percentage of total)

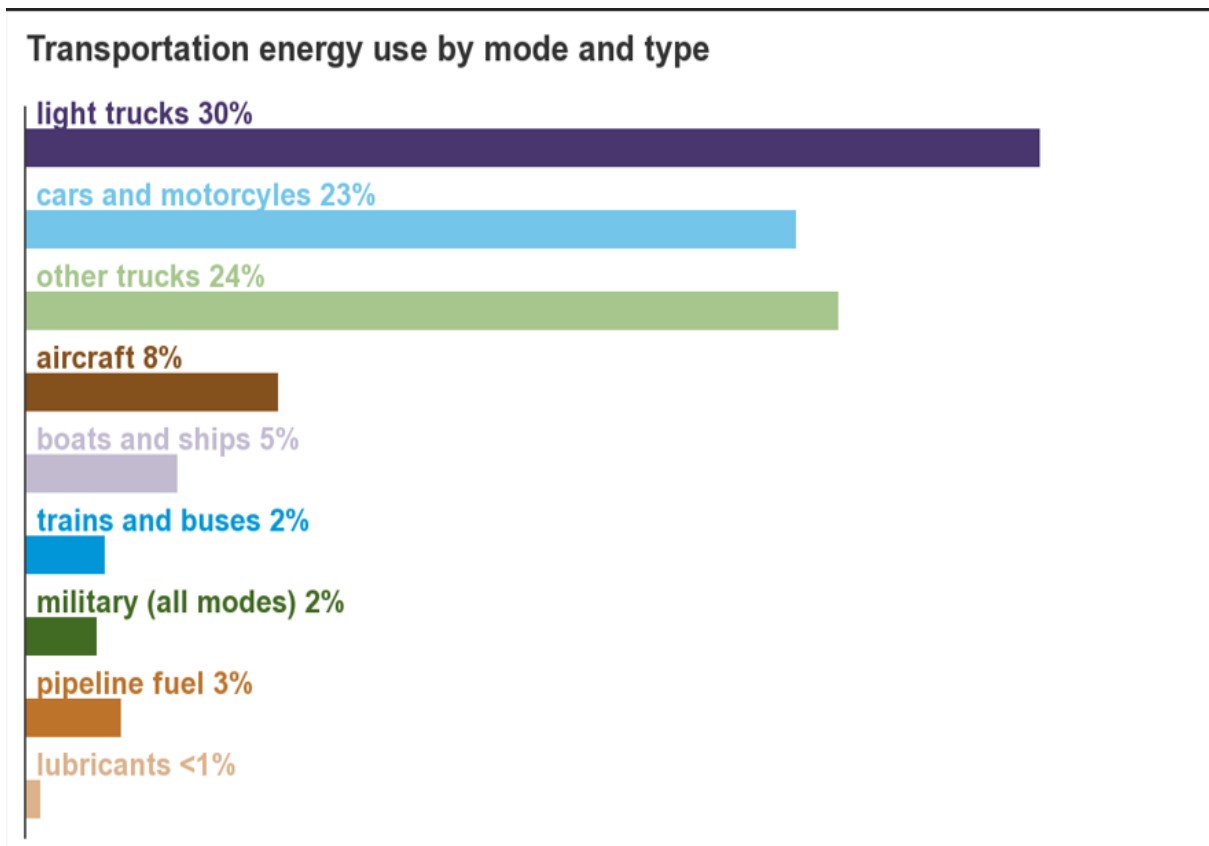


Source: European Environment Agency (online data code: [env_air_gge])

eurostat 

Σχήμα 1.1: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα για τα έτη 1990 και 2017 [1]

Πλοία που τροφοδοτούνται και με ηλεκτρικό ρεύμα από ΑΠΕ ή μπαταρίες, μπορούν να οδηγήσουν σε μικρότερη κατανάλωση καυσίμου για την κίνησή τους και όλες τις επιπλέον ανάγκες που υπάρχουν πάνω σε αυτά. Η λιγότερη κατανάλωση diesel από τα πλοία μεταφράζεται τόσο σε λιγότερες εκπομπές ρύπου, όσο και σε ακόμα πιο μικρή διαρκή ζήτηση για πετρέλαιο, το οποίο πλέον χρησιμοποιείται για μια πληθώρα εφαρμογών, οδηγώντας σε ασταμάτητη εκμετάλλευση των κοιτασμάτων και καταστροφή φυσικού περιβάλλοντος.



Σχήμα 1.2: Ενεργειακή κατανάλωση στα διάφορα μέσα μεταφοράς [2].

1.2 Γενικές αρχές

Η τεχνολογία στις μέρες μας έχει φτάσει σε τέτοιο επίπεδο που πλέον οι επιλογές όσο αναφορά τις ηλεκτρικές μηχανές είναι πολλές. Κάνοντας μία σύντομη επανεξέταση, παρατηρείται ότι αρχικά υπήρχαν οι τρεις εξής “κλασσικές” κατηγορίες μηχανών: οι συνεχούς ρεύματος (dc machines), οι εναλλασσόμενης τάσης σύγχρονες (ac synchronous machines) και οι επαγωγικές ή ασύγχρονες (induction or asynchronous machines). Αυτά τα τρία βασικά είδη μηχανών πληρούν τα εξής τρία κριτήρια:

1. Παράγουν (υπό κατάλληλες προϋποθέσεις) σταθερή ροπή (με μικρή κυμάτωση)
2. Λειτουργούν είτε με συνεχούς ρεύματος τροφοδοσία είτε με ημιτονοειδούς μορφής τροφοδοσία.
3. Μπορούν να εκκινήσουν και να συνεχίσουν να λειτουργούν χωρίς ηλεκτρονικούς ελεγκτές.

Για να παράξουν ηλεκτρική ενέργεια, οι γεννήτριες πρέπει να έχουν περιστροφική κίνηση (μηχανική ενέργεια) από άλλες μηχανές που ονομάζονται κινητήριες μηχανές. Αυτές οι μηχανές πιθανόν να είναι μηχανές εσωτερικής καύσης, αεροστρόβιλοι ή πετρελαιομηχανές. Ανάλογα με την παραγωγή ρεύματος οι γεννήτριες ονομάζονται γεννήτριες συνεχούς ρεύματος ή γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος.

1.3 Γεννήτριες Συνεχούς Ρεύματος

Όσο αφορά την κατασκευή τους, οι γεννήτριες Σ.Ρ. δεν διαφέρουν καθόλου από τους κινητήρες Σ.Ρ., μοναδική διαφορά αποτελεί, ότι από τις ψήκτρες της γεννήτριας παραλαμβάνετε συνεχές ρεύμα, ενώ στους κινητήρες Σ.Ρ., προσδίδετε στις ψήκτρες συνεχές ρεύμα και παραλαμβάνετε από τον άξονα τους μηχανική ενέργεια.

Σε πολύ μικρές μηχανές συνεχούς ρεύματος το μαγνητικό πεδίο, μέσα στο οποίο περιστρέφεται το επαγωγικό τύμπανο, κατασκευάζεται από μόνιμο μαγνήτη. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τους μαγνητικούς πόλους, τα τυλίγματα των οποίων τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα. Η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου από το ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται *διέγερση* της μηχανής. Ανάλογα με τον τρόπο που είναι συνδεδεμένο το τύλιγμα διεγέρσεως, διαχωρίζονται σε γεννήτριες πέντε ειδών:

- Γεννήτριες με ξένη διέγερση

Στις συγκεκριμένες γεννήτριες η περιέλιξη διεγέρσεως τροφοδοτείται από μία ξένη πηγή. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε χαμηλές τάσεις, για ηλεκτρολύσεις και ως γεννήτριες Σ.Ρ. για την προώθηση των πλοίων.

- Γεννήτριες με αυτοδιέγερση: Διακρίνονται ως εξής:

- a. Γεννήτριες με διέγερση σειράς: Στις γεννήτριες αυτές η περιέλιξη διεγέρσεως συνδέεται σε σειρά με το φορτίο. Η τάση τους μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται το φορτίο του εξωτερικού κυκλώματος, για αυτό το λόγο δεν χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται σταθερή τάση. Η χρήση τους είναι περιορισμένη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένα μηχανήματα ηλεκτροσυγκολλήσεως όπου η τάση δεν είναι πρωτεύουσας σημασίας.
- b. Γεννήτριες με παράλληλη διέγερση: Στις γεννήτριες αυτές η περιέλιξη διεγέρσεως συνδέεται παράλληλα με το επαγωγικό τύλιγμα και κατά συνέπεια παράλληλα και προς το εξωτερικό φορτίο. Χρησιμοποιούνται ως γεννήτριες πλοίων, για εγκαταστάσεις μικρής ισχύος και για την φόρτιση συσσωρευτών.
- c. Γεννήτριες με σύνθετη διέγερση: Η περιέλιξη του κάθε κύριου πόλου αποτελείται από δύο μέρη, την παράλληλη περιέλιξη και την περιέλιξη σειράς. Η τάση ρυθμίζεται με μία ρυθμιστική αντίσταση που συνδέεται με την παράλληλη διέγερση. Η αλλαγή φοράς περιστροφής γίνεται εύκολα με την εναλλαγή των ακροδεκτών και χωρίς καμία άλλη επέμβαση. Με σταθερό αριθμό στροφών η παραγόμενη τάση είναι σταθερή και δεν μεταβάλλεται πολύ εάν υπάρξει απότομη μεταβολή του

φορτίου. Οι τελευταίες χρησιμοποιούνται πιο πολύ στα πλοία, γιατί η τάση της γεννήτριας είναι σταθερή και ανεξάρτητη από την αλλαγή του ρεύματος του φορτίου.

1.3.1 Ρύθμιση γεννητριών Σ.Ρ.

Παρακάτω ακολουθεί μία ανασκόπηση των τεχνικών ρύθμισης των γεννητριών Σ.Ρ. Μια μέθοδος που προτείνεται από τους κατασκευαστές είναι η ρύθμιση του διάκενου αέρος με την εισαγωγή ή εξαγωγή ελασμάτων μεταξύ των πόλων και του κελύφους. Κάποιες επιπλέον μέθοδοι είναι η χρησιμοποίηση αντιστάσεως συνδεδεμένης παράλληλα με το πηνίο εν σειρά και η ρύθμιση της θέσεως των ψηκτρών. Επειδή το παραγόμενο ρεύμα στο επαγωγίμο δημιουργεί ένα δικό του μαγνητικό πεδίο, προκαλείται από αυτό παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σπινθήρες μεταξύ των ψηκτρών και του συλλέκτη. Τοποθετούνται βοηθητικοί πόλοι για την εξάλειψη των σπινθηρισμών.

Οι βοηθητικοί πόλοι παραλείπονται στις γεννήτριες πολύ μικρής ισχύς αλλά είναι απαραίτητοι στις γεννήτριες μεγάλης ισχύος για την επίτευξη καλής επαγωγής σε όλα τα φορτία. Κάθε βοηθητικός πόλος κρίνεται απαραίτητο να έχει την ίδια πολικότητα με αυτή του κύριου πόλου που βρίσκεται μετά από αυτόν κατά την διεύθυνση περιστροφής της μηχανής.

Ένας επιπλέον τρόπος ρύθμισης των γεννητριών Σ.Ρ. είναι οι ροοστάτες. Οι ρυθμιστές (ροοστάτες) είναι αναγκαίοι σε όλους τους τύπους των γεννητριών, έτσι ώστε να ρυθμίζεται η τάση για διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Χρησιμοποιούνται κυρίως για να αντισταθμίζουν τις μεταβολές της παράλληλης αντίστασης λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας του αέρα ψύξης. Αυξάνοντας την θερμοκρασία ακολούθως αυξάνεται η αντίσταση του πηνίου τόσο πολύ που το ρεύμα διέγερσης δεν μπορεί να διατηρηθεί στην φυσιολογική του τιμή και η τάση στους ζυγούς πέφτει. Η πτώση αυτή υπολογίζεται από τον κατασκευαστή. Συνήθως, η τάση κατά μήκος των ρυθμιστών διέγερσης δεν είναι μικρότερη του 14% της τάσης της γεννήτριας.

1.3.2 Παράλληλη λειτουργία γεννητριών Σ.Ρ.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία γίνεται με περισσότερες από μία ηλεκτρογεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Οι γεννήτριες αυτές μπορούν να λειτουργήσουν όλες μαζί παράλληλα.

Τα πλεονεκτήματα της παράλληλης λειτουργίας είναι:

- Αυξάνεται η ισχύς του δικτύου.
- Υπάρχει η δυνατότητα μία γεννήτρια να δουλέψει ως εφεδρική.
- Υπάρχει η δυνατότητα διακοπής λειτουργίας μίας γεννήτριας, χωρίς να διακοπεί η ισχύς του πλοίου.

Για να είναι εφικτή η παράλληλη λειτουργία όλων των γεννητριών του πλοίου, πρέπει οι γεννήτριες να είναι της ίδιας τάσης και οι θετικοί και αρνητικοί πόλοι των γεννητριών να είναι συνδεδεμένοι στον αντίστοιχο ζυγό του πίνακα παραλληλισμού, δηλαδή, να έχουν την ίδια πολικότητα.



Σχήμα 1.3: Αντικατάσταση παλιάς γεννήτριας DC

1.4 Γεννήτριες Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Οι παραδοσιακές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τις σύγχρονες και τις μηχανές επαγωγής. Στις σύγχρονες μηχανές, το ρεύμα παρέχεται στο τύλιγμα του δρομέα απευθείας από την στατική διάταξη μέσω μιας στρεφόμενης επαφής. Στις μηχανές επαγωγής, το ρεύμα επάγεται στο δρομέα από το συνδυασμό της χρονικής μεταβολής του ρεύματος στο στάτη και της σχετικής κίνησης του δρομέα ως προς το στάτη.

Για τις σύγχρονες μηχανές μπορεί να διαμορφωθεί μια πρώτη εντύπωση για τη λειτουργία των σύγχρονων μηχανών μελετώντας την παραγόμενη τάση στο τύμπανο της απλουστευμένης, σύγχρονης, ac γεννήτριας έκτυπων πόλων (salient/projecting poles). Το τύλιγμα διέγερσης της συγκεκριμένης μηχανής παράγει ένα ζευγάρι μαγνητικών πόλων (όμοιο με αυτό μιας μαγνητικής ράβδου), ως εκ τούτου ονομάζεται διπολική μηχανή. Πλην σπανίων εξαιρέσεων, το τύλιγμα τυμπάνου σε μια σύγχρονη μηχανή βρίσκεται στο στάτη και το τύλιγμα διέγερσης στο δρομέα. Το τύλιγμα πεδίου διεγείρεται από συνεχές ρεύμα. Ο δρομέας είναι απαραίτητο να είναι εφοδιασμένος με ακίνητες ψήκτρες (brushes) και δαχτυλίδια συλλέκτη (slip/collector rings). Η τοποθέτηση των τυλιγμάτων που περιγράψαμε υπαγορεύεται από

πρακτικούς λόγους. Είναι περισσότερο αποδοτικό να τοποθετείται στο δρομέα το μονοφασικό, χαμηλής ισχύος, τύλιγμα πεδίου και το (συνήθως) πολυφασικό, υψηλής ισχύος τύλιγμα τυμπάνου στο στάτη.

Το τύλιγμα διέγερσης, που στη συγκεκριμένη περίπτωση αποτελείται από ένα και μόνο πυρήνα N ελιγμάτων, απεικονίζεται στην διατομή των δύο όψεων του πυρήνα α και -α που είναι τοποθετημένες στις αντιδιαμετρικές θέσεις της εσωτερικής περιφέρειας του στάτη. Οι αγωγοί που αποτελούν αυτές τις όψεις του πυρήνα είναι παράλληλοι στον άξονα της μηχανής και συνδέονται μεταξύ τους αλυσιδωτά (δεν φαίνεται στο σχήμα). Ο δρομέας περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα από μια πηγή μηχανικής ισχύος συνδεδεμένη στον άξονά του. Το τύλιγμα τυμπάνου θεωρείται ανοιχτοκυκλωμένο, οπότε η μαγνητική ροή στη μηχανή παράγεται αποκλειστικά και μόνο από το τύλιγμα διέγερσης.

Επιπρόσθετα, ένα άλλο είδος μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος είναι οι ασύγχρονες. Όμοια με τις σύγχρονες μηχανές, το τύλιγμα του στάτη μιας μηχανής επαγωγής διεγείρεται με εναλλασσόμενο ρεύμα. Αντιθέτως όμως με τις σύγχρονες μηχανές όπου το τύλιγμα διέγερσης στο δρομέα διεγείρεται με dc ρεύμα, στο δρομέα μιας μηχανής επαγωγής ρέει εναλλασσόμενο ρεύμα. Στις μηχανές επαγωγής, το εναλλασσόμενο ρεύμα παρέχεται απευθείας στο στάτη. Το ρεύμα στο δρομέα παράγεται μέσω επαγωγής, δηλαδή από τη δράση μετασχηματιστή. Μπορούμε να θεωρήσουμε μια μηχανή επαγωγής σαν ένα γενικευμένο μετασχηματιστή, όπου η ηλεκτρική ισχύς μετασχηματίζεται μεταξύ του δρομέα και του στάτη με μια αλλαγή στη συχνότητα και μια ροή μηχανικής ισχύος παρόλο που οι κινητήρες επαγωγής είναι το πιο κοινό είδος κινητήρων, οι μηχανές επαγωγής ελάχιστες φορές χρησιμοποιούνται ως γεννήτριες, λόγω του ότι η απόδοσή τους δεν είναι ικανοποιητική στις περισσότερες εφαρμογές. Παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια οι γεννήτριες επαγωγής βρέθηκαν κατάλληλες σαν ανεμογεννήτριες. Μηχανές επαγωγής χρησιμοποιούνται επίσης και σαν μετασχηματιστές συχνότητας. Σε έναν κινητήρα επαγωγής το τύλιγμα του στάτη είναι το ίδιο με αυτό μιας σύγχρονης μηχανής. Όμως το τύλιγμα του δρομέα είναι ηλεκτρικά βραχυκυκλωμένο και συχνά δεν έχει εξωτερικές διασυνδέσεις. Το ρεύμα στο δρομέα επάγεται από δράση μετασχηματιστή του τυλίγματος του στάτη. Τα τυλίγματα του δρομέα είναι συμπαγείς ράβδοι από αλουμίνιο οι οποίες χυτεύονται σε αυλάκια στο δρομέα και βραχυκυκλώνονται με δαχτυλίδια από αλουμίνιο στα άκρα του δρομέα. Το συγκεκριμένο είδος κατασκευής του δρομέα οδηγεί σε σχετικά οικονομικές και εξαιρετικά αξιόπιστες μηχανές επαγωγής. Αυτοί οι παράγοντες συνεισφέρουν στην τεράστια δημοτικότητα τους και την ευρεία χρήση τους [3].

1.4.1 Συνδεσμολογία τριφασικών μηχανών

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος παράγουν ή καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια υπό μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος, μονοφασικό ή πολυφασικό.

Όταν το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου αποτελείται από δύο ή τρία ή περισσότερα άκρα τότε, το τύλιγμα είναι διφασικό, τριφασικό κ.λπ. και ανάλογα η μηχανή διφασική, τριφασική κ.λπ. Οι τριφασικοί εναλλακτήρες έχουν στο επαγωγικό τους τύμπανο τρία όμοια και ανεξάρτητα μεταξύ τους μονοφασικά τυλίγματα.

Στα τριφασικά τυλίγματα υπάρχουν έξι ελεύθερα άκρα. Τρεις αρχές (U, V, W) και τρία πέρατα (χ , ψ , ζ). Το τύλιγμα U- χ αποτελεί την πρώτη φάση, V- ψ την δεύτερη φάση και W- ζ την τρίτη φάση.

Στους τριφασικούς εναλλακτήρες οι εναλλασσόμενες Η.Ε.Δ. που αναπτύσσονται στις τρεις φάσεις έχουν το ίδιο μέγεθος και την ίδια συχνότητα. Οι Η.Ε.Δ. αυτές ονομάζονται φασικές ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις του εναλλακτήρα. Το τύλιγμα κάθε φάσης απέχει από τις άλλες κατά γωνία 60° (μοιρών) άρα οι Η.Ε.Δ. έχουν μεταξύ τους φασική διαφορά απόκλιση $=120^\circ$.

Υπάρχουν δύο τρόποι να συνδεθούν μεταξύ τους οι φάσεις του τριφασικού εναλλακτήρα και αυτές είναι οι εξής:

- Σύνδεση σε αστέρα (Y)
- Σύνδεση σε τρίγωνο (Δ)

1.4.2 Παράλληλη λειτουργία γεννητριών Ε.Ρ.

Για τον παραλληλισμό (ή αλλιώς τον συγχρονισμό) δύο εναλλακτών Ε.Ρ. κρίνεται απαραίτητο να πληρούνται οι ακόλουθες συνθήκες:

- Οι τάσεις των δύο εναλλακτών να είναι ίσες. Αυτό επιτυγχάνεται με τον ρεοστάτη διέγερσης.
- Οι συχνότητες των δύο εναλλακτών να είναι ίσες. Αυτό επιτυγχάνεται με την μεταβολή της ταχύτητας της κινητήριας μηχανής προς παραλληλισμό εναλλακτήρα.
- Οι τάσεις και των δύο εναλλακτών να είναι εν φάση, μία προς μία. Αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια του συγχροσκοπίου ή των λυχνιών συγχρονισμού τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ εναλλακτήρα και ζυγών.
- Οι τάσεις και των δύο εναλλακτών να έχουν την ίδια διαδοχή φάσεων. Αυτό επιτυγχάνεται κατά την αρχική εγκατάσταση του εναλλακτήρα, οπότε και αντιστρέφεται η διαδοχή των φάσεων του, εάν αυτό απαιτείται.

1.5 Πίνακες γεννητριών συνεχούς η εναλλασσόμενου ρεύματος

Οι πίνακες γεννητριών περιλαμβάνουν όλα τα απαραίτητα όργανα και συσκευές για τον έλεγχο των γεννητριών.

Κάθε γεννήτρια παρέχει το δικό της πίνακα ελέγχου. Ένας από τους πίνακες των γεννητριών του πλοίου (συνήθως ο πρωραίος) περιλαμβάνει και όργανα ένδειξης λειτουργίας για τις υπόλοιπες γεννήτριες και έτσι χρησιμοποιείται σαν κέντρο ελέγχου, της ηλεκτρικής διανομής του πλοίου.

Οι πίνακες αυτοί είναι κλειστής πρόσοψης και περιλαμβάνουν ο καθένας όργανα όπως : βολτόμετρα, αμπερόμετρα και κιλοβαττόμετρα. Επίσης συσκευές όπως: μαχαιρωτούς και αυτόματους διακόπτες, μαχαιρωτές ασφάλειες, ροοστάτη διέγερσης, ρυθμιστή τάσης, ροηφόρους αγωγούς (ή ζυγούς ή μπάρες) και ενδεικτικές λυχνίες απωλειών.

Εκτός των προαναφερθέντων, οι πίνακες γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος περιλαμβάνουν επιπλέον τα ακόλουθα όργανα: αναλυτής ισχύος (power analyzer) και λυχνίες συγχρονισμού.

1.6 Μετασηματιστές, στρεφόμενοι μετατροπείς, ανορθωτές

Οι μετασηματιστές χρησιμοποιούνται για να ανυψώνεται ή να υποβιβάζεται η τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι στρεφόμενοι μετατροπείς μπορούν να μετατρέψουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές και αντίστροφα το συνεχές σε εναλλασσόμενο. Οι ανορθωτές χρησιμοποιούνται για να μετατρέπεται το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Η αρχή λειτουργίας του μετασηματιστή είναι η εξής:

Εάν δυο ανεξάρτητα πηνία περιβάλλουν ένα κοινό σιδηροπυρήνα και διαμέσου του ενός από τα πηνία διέλθει εναλλασσόμενο ρεύμα, θα δημιουργηθεί εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Οι μαγνητικές αυτές γραμμές θα περιβάλλουν και τα δυο πηνία.

Έτσι στο τύλιγμα του πηνίου, που συνδέεται με την πηγή, αναπτύσσεται Η.Ε.Δ. από αυτεπαγωγή. Το τύλιγμα αυτού του πηνίου ονομάζεται πρωτεύον.

Η Η.Ε.Δ. του πρώτου πηνίου αντισταθμίζει σχεδόν την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του πρωτεύοντος πηνίου (τυλίγματος) και επέρχεται ηλεκτρική ισορροπία. Στο τύλιγμα του άλλου πηνίου, που καλείται δευτερεύον, αναπτύσσεται εναλλασσόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή. Εάν τώρα στα άκρα του δευτερεύοντος τυλίγματος συνδεθεί μια κατανάλωση τότε θα κυκλοφορήσει ρεύμα.

Ο λόγος των τάσεων των δυο πηνίων (πρωτεύοντος και δευτερεύοντος) είναι ανάλογος του αριθμού των σπειρών των περιελίξεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασηματιστή. Υπάρχουν μετασηματιστές μονοφασικοί και τριφασικοί.

Στο εναλλασσόμενο ρεύμα, για την μετατροπή μιας τάσης σε μια άλλη μικρότερη της πρώτης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αντίσταση. Και στις δυο όμως περιπτώσεις (χρήσης μετασηματιστή ή αντίστασης), η τελικά λαμβανόμενη τάση είναι της ίδιας συχνότητας με την αρχική συχνότητα του δικτύου. Στο συνεχές ρεύμα μπορούμε να μετατρέψουμε μια τάση σε μια άλλη, μικρότερη της αρχικής, μόνο, με την χρησιμοποίηση αντιστάσεων. Υπάρχει επίσης η προοπτική, με την βοήθεια ανορθωτικών διατάξεων, να

μετατραπεί το εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα, της ίδιας ή μικρότερης τάσης, ενώ για το αντίστροφο, δεν υπάρχει τέτοια δυνατότητα.

1.7 Ζεύγος κινητήρα-γεννήτριας

Με τη χρήση ζευγών κινητήρων-γεννητριών μπορεί να μετατραπεί κάθε εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή και αντίστροφα (ο κινητήρας τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα, η δε γεννήτρια που κινείται υπό του κινητήρα να παράγει την συνεχή τάση που απαιτείται ή και αντίστροφα να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα και η γεννήτρια να παράγει εναλλασσόμενο), και με το ίδιο σύστημα κινητήρα-γεννήτριας, αλλάζει η συχνότητα της γεννήτριας, καθώς επίσης και η τάση.

1.8 Μετατροπέας συχνότητας

Οι μετατροπείς συχνότητας αποτελούνται από ένα τριφασικό κινητήρα και μηχανή επαγωγής με δακτυλίους, που συνδέονται μεταξύ τους, δια μηχανικού συνδέσμου.

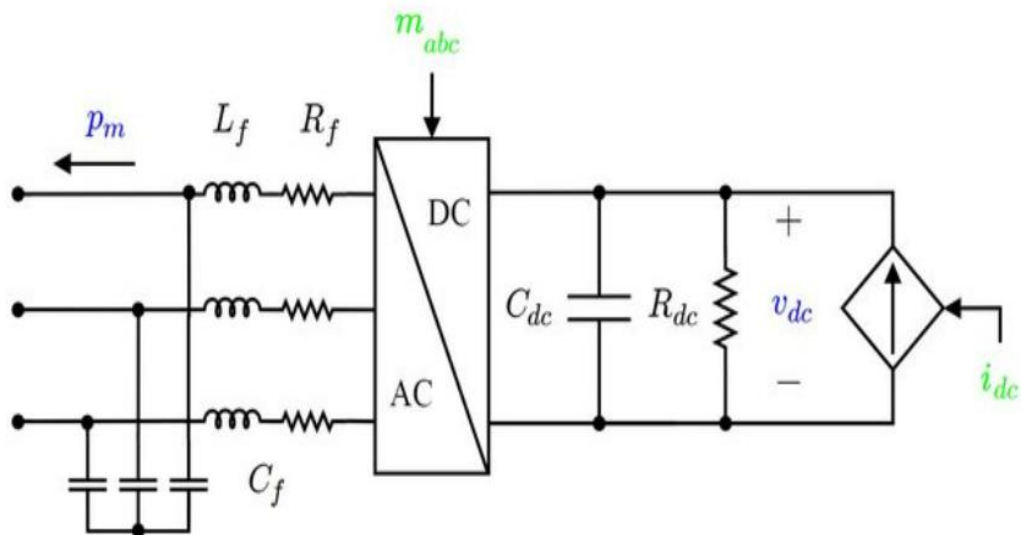
Εάν ο κινητήρας στρέψει τον δρομέα της μηχανής με δακτυλίους κατά φορά αντίθετη προς τη φορά στροφής του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, το οποίο δημιουργείται από το τύλιγμα του στάτη της μηχανής με δακτυλίους, τότε το τύλιγμα του δρομέα αυτής, θα τέμνει τις μαγνητικές γραμμές με ταχύτητα μεγαλύτερη της ταχύτητας του στρεφόμενου πεδίου. Έτσι η τάση που επικρατεί στους δακτυλίους έχει μεγαλύτερη συχνότητα από την συχνότητα του δικτύου, με των οποίων συνδέονται οι στάτες των δυο μηχανών του μετατροπέα. Με τον μετατροπέα, μπορεί να αυξηθεί ή να ελαττωθεί η συχνότητα του δικτύου.

1.9 Ανορθωτές

Οι ανορθωτές είναι συσκευές, που μετατρέπουν, όπως και οι στρεφόμενοι μετατροπείς, το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές (Σχήμα 1.4). Οι ανορθωτές, επειδή δεν έχουν κινούμενα μέρη, καλούνται στατοί μετατροπείς, τείνουν δε να αντικαταστήσουν τους στρεφόμενους μετατροπείς κυρίως στην παραγωγή συνεχούς ρεύματος υψηλών τάσεων.

Διακρίνουμε τρία είδη ανόρθωσης:

- Τους ανορθωτές υδραργύρου
- Τους ξηρούς ανορθωτές (ημιαγωγών)
- Τους ανορθωτές πυρακτωμένης καθόδου



Σχήμα 1.4: Κυκλωματικό διάγραμμα ανορθωτή [4]

1.10 Ηλεκτρολογικό υλικό εγκαταστάσεων πλοίου

Ομοίως με τις εγκαταστάσεις ξηράς, έτσι και στα πλοία υπάρχει αντίστοιχο ηλεκτρολογικό υλικό, το οποίο βέβαια προϋποθέτει να είναι γερής κατασκευής και μονώσεως διότι στο πλοίο, οι συνθήκες κλίματος και ταλαντώσεων, καθώς επίσης και χώρου, είναι διαφορετικές από τις αντίστοιχες της ξηράς. Οι σημαντικότερες κατηγορίες των διατάξεων για τον έλεγχο και προστασία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων είναι οι διακόπτες, οι ασφάλειες και οι αυτόματοι διακόπτες. Όσον αφορά αυτά τα υλικά, όπως επίσης και τα καλώδια, υπάρχουν κανονισμοί και συστάσεις, οι οποίες πρέπει να τηρούνται απόλυτα.

1.11 Προστατευτικές διατάξεις

Για την προστασία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων από υπερβολικές τιμές του ρεύματος που τα διαρρέει, υπάρχουν διάφορες προστατευτικές διατάξεις οι οποίες διακόπτουν την κυκλοφορία του ρεύματος, όταν αυτό υπερβεί μια καθορισμένη τιμή, υπό την οποία το κύκλωμα εργάζεται ασφαλώς.

Τέτοιες διατάξεις είναι i) οι ασφάλειες, ii) οι αυτόματοι διακόπτες και iii) οι μηχανισμοί διακοπής του κυκλώματος με την βοήθεια ορισμένων ηλεκτρονόμων (ρελέ).

Οι ασφάλειες κατασκευάζονται σήμερα σε μεγάλη ποικιλία ειδών, μεγεθών και για διάφορες τάσεις η αρχή όμως λειτουργίας τους είναι η ίδια. Κάθε ασφάλεια, περιλαμβάνει ένα μαλακό μεταλλικό αγωγό, για την συνέχιση του ηλεκτρικού κυκλώματος, ο οποίος τήκεται και διακόπτει το κύκλωμα, όταν

υπερθερμανθεί εξαιτίας υπερβολικής ροής ρεύματος. Υπάρχουν οι κοχλιωτές και οι κυλινδρικές ασφάλειες.

Οι αυτόματοι διακόπτες είναι ηλεκτρικοί διακόπτες που μπορούν να διακόψουν το κύκλωμα, υπό φυσιολογικές ή μη συνθήκες.

α) Φυσιολογική συνθήκη διακοπής ενός κυκλώματος είναι εκείνη, κατά την οποία το διακοπτόμενο ρεύμα δεν υπερβαίνει την ονομαστική τιμή ρεύματος του αυτόματου διακόπτη. Η τιμή αυτή μπορεί να ρυθμίζεται και δεν είναι σταθερή, επομένως, ο αυτόματος θα πέσει, όταν το ρεύμα υπερβεί την τιμή για την οποία έχει ρυθμιστεί.

β) Μη φυσιολογική συνθήκη διακοπής ενός κυκλώματος είναι εκείνη, κατά την οποία το διακοπτόμενο ρεύμα υπερβαίνει την ονομαστική τιμή του ρεύματος του αυτόματου διακόπτη (π.χ. περίπτωση βραχυκυκλώματος, οπότε ο διακόπτης ανοίγει αυτόματα).

Οι ηλεκτρονόμοι αποτελούν εξέλιξη των αυτομάτων διακοπών. Ρυθμίζεται η λειτουργία των διακοπών με την βοήθεια ηλεκτρονόμων (ρελέ) (Σχήμα 1.5). Οι ηλεκτρονόμοι, από τους οποίους εξαρτάται το άνοιγμα των αυτομάτων διακοπών, μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κύριες κατηγορίες:

α) Στιγμιαίου ανοίγματος, δηλαδή, το άνοιγμα του διακόπτη γίνεται χωρίς καμιά καθυστέρηση.

β) Ορισμένου χρόνου, δηλαδή, ο αυτόματος διακόπτης ανοίγει μετά από κάποιο ορισμένο χρόνο (που μπορεί να καθοριστεί) από την στιγμή που εφαρμόζεται μια επικίνδυνη υπερένταση.

γ) Αντίστροφου χρόνου. Εάν η τιμή της υπερέντασης είναι μεγάλη, τότε ο αυτόματος διακόπτης θα ανοίξει με πολύ μικρή καθυστέρηση. Αντίθετα εάν είναι μικρή, τότε η καθυστέρηση θα είναι μεγάλη.



Σχήμα 1.5: Ηλεκτρονόμος (ρελέ)

1.11.1 Διακόπτες

Ο διακόπτης είναι μια διάταξη, που σκοπός της είναι, η αποκατάσταση, διακοπή ή αλλαγή των συνδέσεων ενός ηλεκτρικού κυκλώματος για συνθήκες πλήρους φορτίου. Ο απλούστερος διακόπτης που συναντάται στα πλοία είναι ο μονοπολικός μαχαιρωτός διακόπτης. Οι μαχαιρωτοί διακόπτες ταξινομούνται ανάλογα με το ρεύμα (Ampere), που δύναται να περάσει από αυτούς, υπό μια ορισμένη τάση (volt). Επίσης έχουμε τους διπολικούς μαχαιρωτούς διακόπτες απλής ενέργειας, με ειδικές βοηθητικές λάμες ταχύτατου ανοίγματος.

Επιπλέον, έναν άλλο τύπο διακόπτη αποτελεί ο διπολικός μαχαιρωτός διακόπτης διπλής ενέργειας, που μπορεί να ενεργοποιήσει και δυο κυκλώματα, ανάλογα με την θέση που έχει η λάμα. Ευρύτατα επίσης, χρησιμοποιούνται στα πλοία και οι περιστροφικοί διακόπτες ταχύτατου ανοίγματος. Σε αντίθεση με τους μαχαιρωτούς διακόπτες που μπορούν να τροφοδοτήσουν δυο κυκλώματα, οι περιστροφικοί διακόπτες, μπορούν να τροφοδοτήσουν ένα, δύο ή και περισσότερα κυκλώματα.

1.11.2 Μέθοδοι προστασίας έναντι ηλεκτροπληξίας

Οι μέθοδοι προστασίας διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Μέθοδοι που εφαρμόζονται σε ειδικές περιπτώσεις και αποκλείουν την εμφάνιση επικίνδυνων τάσεων επαφής, όπως:

- Χρησιμοποίηση συσκευών με διπλή μόνωση. Διπλή μόνωση θεωρείται εκείνη που μπορεί να αντέξει τάση δοκιμής ίσης τουλάχιστον προς το διπλάσιο της τάσεως δοκιμής της μόνωσης λειτουργίας και για χρονικό διάστημα ίσο με το χρονικό διάστημα της αντίστοιχης δοκιμής της μόνωσης λειτουργίας. Η διπλή μόνωση επιτυγχάνεται είτε με συμπλήρωση της μόνωσης λειτουργίας με άλλη ανεξάρτητη μόνωση, είτε με ενίσχυση της μόνωσης λειτουργίας.
- Ηλεκτρικός διαχωρισμός ενός κυκλώματος, συνήθως με ένα μετασχηματιστή.
- Χρήση τάσης $U < 50 \text{ V}$.
- Μόνιμη εγκατάσταση συσκευών σε μονωμένο δάπεδο.
- Μέθοδοι που εφαρμόζονται συνήθως και εξασφαλίζουν την διακοπή της τάσης τροφοδότησης μετά την εμφάνιση σφάλματος ώστε να μην εμφανίζονται επικίνδυνες τάσεις επαφής. Τέτοιες μέθοδοι αποτελούν οι παρακάτω:
 - Η άμεση γείωση
 - Η ουδετέρωση
 - Η προστασία με διακόπτες διαφυγής (τάσης ή έντασης), σε συνδυασμό με την άμεση γείωση ή την ουδετέρωση.

Από τις παραπάνω μεθόδους μόνο η άμεση γείωση και η ουδετέρωση αποτελούν γενικές μεθόδους προστασίας. Η προστασία με διακόπτες διαφυγής εφαρμόζεται ως μοναδική μέθοδος μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις. Συνήθως εφαρμόζεται πρόσθετα στην άμεση γείωση ή στην ουδετέρωση. Ωστόσο, απαγορεύεται η εφαρμογή άμεσης γείωσης και ουδετέρωσης στο ίδιο δίκτυο.

1.11.3 Προστασία κινητήρων

Μία διάταξη προστασίας κινητήρων πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις.

α) Η προστασία πρέπει να επενεργεί και να διακόπτει την παροχή ισχύος όταν η θερμοκρασία των τυλιγμάτων του κινητήρα υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Έτσι αποφεύγεται η υπερθέρμανση, η οποία προκαλεί περιορισμό της διάρκειας ζωής ή και άμεσες βλάβες στη μόνωση.

β) Η προστασία δεν πρέπει να επενεργεί όταν:

- ο κινητήρας σε συνεχή φόρτιση λειτουργεί με την ονομαστική του ισχύ,
- ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο το ρεύμα εκκινήσεως, χωρίς να γίνεται υπέρβαση της διάρκειας εκκινήσεως,
- ο κινητήρας λειτουργεί σύμφωνα με τα είδη λειτουργίας S2 έως S8 χωρίς να γίνεται υπέρβαση της μέγιστης επιτρεπόμενης θερμοκρασίας,

- ο κινητήρας υπερφορτίζεται μέσα στα επιτρεπόμενα από τους κανονισμούς πλαίσια. Οι κανονισμοί VDE 0530 επιτρέπουν υπερφόρτιση με $1,5 I_n$ (I_n είναι το ονομαστικό ρεύμα) επί 2 λεπτά ακόμη και αν ο κινητήρας είχε αποκτήσει την κανονική του θερμοκρασία από την ονομαστική του φόρτιση πριν από την υπερφόρτιση αυτή.

Ένα σημαντικό μέσο προστασίας κινητήρων αποτελεί η προστασία με θερμικό μέσο και ασφάλεια. Ο θερμικός ηλεκτρονόμος προστατεύει τον κινητήρα, τη γραμμή τροφοδοτήσεως και τον τηλεχειριζόμενο διακόπτη έναντι υπερφορτίσεως. Οι ασφάλειες προστατεύουν τον τηλεχειριζόμενο διακόπτη, τον ηλεκτρονόμο, τη γραμμή και τον κινητήρα έναντι βραχυκυκλώματος. Οι περιοχές επενέργειας του ηλεκτρονόμου και της ασφάλειας καθορίζονται με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- Η χαρακτηριστική καμπύλη του ηλεκτρονόμου πρέπει να επιτρέπει την εκκίνηση του κινητήρα. Το σημείο τομής του χρόνου εκκινήσεως $t_{εκκ}$ με το ρεύμα $I'_{εκκ}/I_n M$ πρέπει να είναι κάτω από την χαρακτηριστική του ηλεκτρονόμου.
- Οι ασφάλειες πρέπει να προστατεύουν τον ηλεκτρονόμο έναντι μεγάλων ρευμάτων. Το σημείο τομής της καμπύλης καταστροφής του θερμικού στοιχείου με την χαρακτηριστική του ηλεκτρονόμου πρέπει να είναι πάνω από την χαρακτηριστική της ασφάλειας.
- Οι ασφάλειες πρέπει να διακόπτουν τις μεγάλες εντάσεις, οι οποίες δεν μπορούν να διακοπούν από τον διακόπτη. Στο σημείο τομής της χαρακτηριστικής των ασφαλειών με τη χαρακτηριστική του ηλεκτρονόμου πρέπει να αντιστοιχεί ένταση μικρότερη από την ικανότητα διακοπής διακόπτη.

1.12 Καλώδια

Το είδος των χρησιμοποιούμενων καλωδίων παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του συστήματος της ηλεκτρικής διανομής στα πλοία. Οι τύποι των καλωδίων χρειάζεται να είναι εγκεκριμένοι από τους Νηογνώμονες. Ιδιαίτερως τονίζεται ότι πρέπει να είναι άφλεκτα και στεγανά.

Τα καλώδια, εκτός του ρεύματος και της ηλεκτρικής τάσης που μεταφέρουν, πρέπει να έχουν αντοχή στις κάμψεις, στρέψεις, κραδασμούς, θερμότητα, ψύχος, έλαια, πετρέλαιο και υγρασία.

Δυο κατηγορίες καλωδίων, χρησιμοποιούνται ανάλογα με τον τύπο του πλοίου :

α) Δύσκαμπτα καλώδια, που χρησιμοποιούνται εκεί όπου η ευκαμψία του καλωδίου δεν είναι απαραίτητη.

β) Εύκαμπτα καλώδια, τα οποία χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα που απαιτούν την αντοχή του καλωδίου, σε επανειλημμένες κάμψεις αυτού.

Τα καλώδια αυτά, δύσκαμπτα ή εύκαμπτα, είναι μονοπολικά , διπολικά, τριπολικά, ή και πολυπολικά, ανάλογα με τον αριθμό αγωγών που περιλαμβάνουν. Για να αναγνωρίζονται τα καλώδια, τοποθετούνται γύρω τους και σε ορισμένες αποστάσεις μεταλλικές πινακίδες, επάνω στις οποίες σημειώνεται το κύκλωμα που εξυπηρετεί κάθε καλώδιο.

1.13 Κουτιά διακλάδωσης

Τα καλώδια που αναχωρούν από τους πίνακες ισχύος του πλοίου τροφοδοτούν συνήθως περισσότερες από μια καταναλώσεις. Δηλαδή διακλαδώνεται ένα κεντρικό καλώδιο σε πολλά μικρότερης διατομής, καθένα από τα οποία τροφοδοτεί ένα μηχάνημα ή μια κατανάλωση.

Η διακλάδωση αυτή γίνεται μέσα σε ειδικά στεγανά κουτιά τα οποία καλούνται κουτιά διακλάδωσης.

1.14 Πίνακες ελέγχου και διανομής

Οι πίνακες ελέγχου και διανομής, περιλαμβάνουν ειδικές κυψέλες για την προσαρμογή των διαφόρων οργάνων μετρήσεως, ενδεικτικών λαμπτήρων και μηχανισμών, και βέβαια προστατευτικές και ρυθμιστικές διατάξεις, που είναι απαραίτητες για τον έλεγχο της λειτουργίας των γεννητριών και την διανομή της ηλεκτρικής ισχύος. Σε κάθε γεννήτρια ή ομάδα γεννητριών, αντιστοιχεί πάντα και ένας πίνακας ελέγχου και διανομής. Οι κυψέλες αυτές, περιέχουν την μονάδα γεννήτριας, μονάδα ροηφόρων αγωγών (μπαρών), μονάδα διανομής της ηλεκτρικής ισχύος και μονάδα διανομής κυκλωμάτων φωτισμού. Ολόκληρος ο πίνακας, διαχωρίζεται σε τμήματα τα οποία μεταξύ τους συνδέονται και από το χωρισμό αυτό περιορίζονται οι κίνδυνοι ηλεκτροπληξίας ή ζημιές από πυρκαγιές. Είναι δυνατό κάποια τμήματα που έχουν πάθει μια βλάβη, να επισκευασθούν, χωρίς να γίνεται και διακοπή των άλλων τμημάτων. Οι πίνακες ελέγχου και διανομής είναι ανοικτής ή κλειστής πρόσοψης, ανάλογα με τον κίνδυνο επαφής με τα όργανα του πίνακα (κίνδυνος ηλεκτροπληξίας).

Τμήματα μηχανημάτων και συσκευών, που προκαλούν σπινθήρες κατασκευάζονται τελείως κλειστά και στεγανά, ώστε να αποκλείεται η περίπτωση μετάδοσης των σπινθήρων στον έξω χώρο. Τα μηχανήματα και οι συσκευές ονομάζονται τότε αντιαεκρηκτικά. Έχουμε λοιπόν, αντιαεκρηκτικές γεννήτριες, κινητήρες, διακόπτες κ.λπ.

1.15 Συστήματα ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων πλοίων

Οι ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις των πλοίων περιλαμβάνουν τα ακόλουθα κύρια συστήματα:

α) Συστήματα ισχύος: Περιλαμβάνει τις γεννήτριες, τους κινητήρες, τους πίνακες ελέγχου και διανομής, τους πίνακες ισχύος, τα καλώδια, τις συσκευές ελέγχου για τους κινητήρες, τον φωτισμό, την εσωτερική επικοινωνία, τον ασύρματο, τις συσκευές ραντάρ και τις λοιπές ηλεκτρικές κατασκευές.

β) Σύστημα φωτισμού: Περιλαμβάνει τα καλώδια, τα κιβώτια διανομής, τους λαμπτήρες για τον γενικό φωτισμό, το σύστημα φωτισμού ανάγκης, τα φώτα ναυσιπλοΐας και αγκυροβολίας, όπως επίσης και τα φώτα και προβολείς σημάτων.

γ) Συστήματα εσωτερικής επικοινωνίας: Περιλαμβάνει όλες τις απαιτούμενες συσκευές και καλωδιώσεις σύνδεσης αυτών για την διαβίβαση και λήψη διαταγών και πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων διαμερισμάτων του πλοίου.

Μετά το 1950, όταν εισήχθη η χρησιμοποίηση του τριφασικού δικτύου στα πλοία, ελαττώθηκε η χρησιμοποίηση των δικτύων συνεχούς ρεύματος. Πλέον οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις στα πλοία έχουν μόνο τριφασικά δίκτυα. Βέβαια και το συνεχές ρεύμα χρησιμοποιείται στα πλοία για πολλές ειδικές χρήσεις, όπως π.χ. ανελκυστήρες, φορτοεκφορτώσεις, πηδάλια, εργάτες άγκυρας, διάφορα βαρούλκα, ηλεκτρική πρόωση κ.λπ. Η συχνότητα του δικτύου δεν είναι η ίδια. Στην Ευρώπη χρησιμοποιείται η συχνότητα των 50HZ, στην Αμερική των 60HZ. Η συχνότητα των 400HZ, που θα έκανε πολύ πιο ελαφριά την εγκατάσταση, δεν έχει εφαρμοσθεί ακόμη στα πλοία.

Οι τάσεις λειτουργίας και τα συστήματα διανομής των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων των πλοίων, καθορίζονται στους ισχύοντες κανονισμούς των Νηογνωμόνων. Γενικά, στα 50HZ δίκτυα, η τάση των γεννητριών είναι 390V (η τάση των καταναλωτών 380V) και στα 60HZ δίκτυα 450V (τάση των καταναλωτών 440V).

Τα συστήματα διανομής υποδιαιρούνται σε δύο κατηγορίες:

- i) Συστήματα σε σειρά (μόνο για συνεχές ρεύμα) υπό σταθερή ένταση.
- ii) Παράλληλα συστήματα υπό σταθερή τάση

Για τα παράλληλα συστήματα σταθερής τάσης συνεχούς ρεύματος και εναλλασσόμενου, οι χρησιμοποιούμενες τάσεις είναι οι εξής:

Εναλλασσόμενου ρεύματος

α) τριφασικό → 24V,42V,220V με 50Hz

- 250V με 60Hz

β) τριφασικό → 380V με 50Hz

- 440V με 60Hz
- Μέχρι 7500V με 50Hz (ηλεκτρική πρόωση)

Συνεχές ρεύμα:

- 24V,220V ή 240V ή 110Vκαι μέχρι 1200V για ηλεκτρική πρόωση.

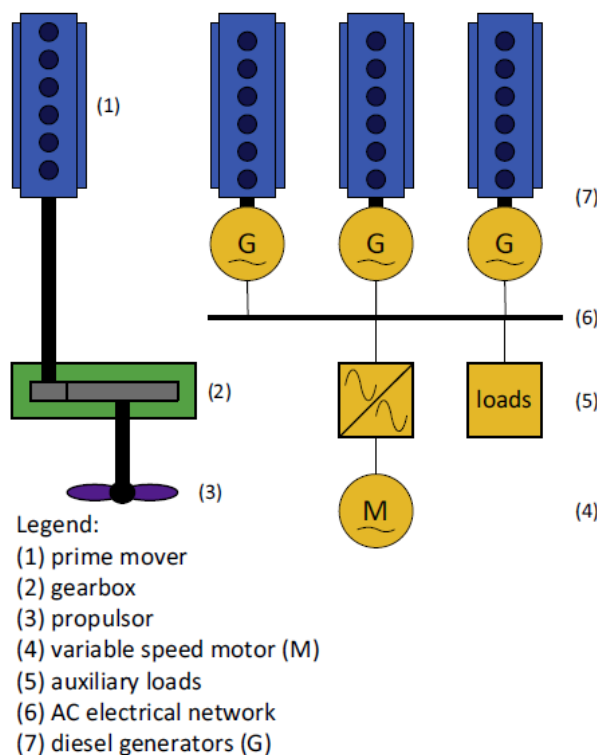
Κεφάλαιο 2

2. Ανάλυση Κινητήρων

2.1 Μηχανική Πρόωση

Πριν τον 19ο αιώνα, τα πλοία κινούνταν με κουπιά και πανιά. Ύστερα, η εξέλιξη της ατμομηχανής οδήγησε στην εισαγωγή της μηχανικής πρόωσης. Μέσα στον 19ο και 20ο αιώνα, οι κινητήρες κίνησης εξελίχτηκαν από τις ατμομηχανές και τους ατμοστρόβιλους σε μηχανές diesel και, για κάποιες εφαρμογές, σε αεριοστρόβιλους. Μια αναλυτική ιστορική αναδρομή αυτών των εξελίξεων μπορεί να βρεθεί και στον Curley.

Μια τυπική αρχιτεκτονική για ένα σύγχρονο πλοίο με μηχανική πρόωση παρουσιάζεται στην Σχήμα 1.4. Ένας βασικός κινητήρας, συνήθως μια μηχανή diesel ή αεριοστρόβιλος, δίνει κίνηση στο προωθητικό μέσο, συνήθως μια προπέλα, είτε απευθείας είτε μέσω ενός κιβωτίου. Εναλλακτικοί κινητήρες είναι ατμοστρόβιλοι σε συνδυασμό με πυρηνικές μονάδες ατμού και αεριοστρόβιλους. Ωστόσο, η ανασκόπηση αυτή εστιάζει στις μηχανές diesel, μιας και τα περισσότερα πλοία τις χρησιμοποιούν λόγω της μεγάλης αποδοτικότητας καυσίμου.



Σχήμα 2.1: Τυπικό μηχανικό σύστημα πρόωσης

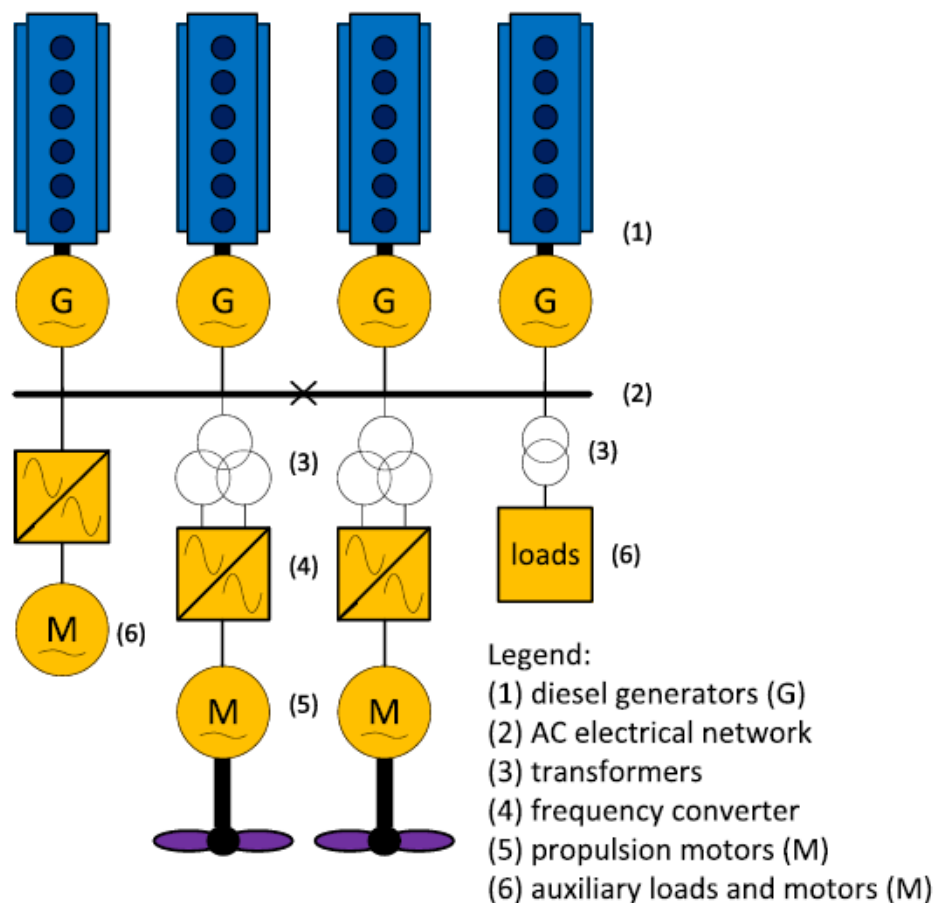
Ένα ξεχωριστό ηλεκτρικό δίκτυο AC απαιτείται για την παραγωγή και διανομή των βοηθητικών ηλεκτρικών φορτίων, όπως οι οδηγοί μεταβλητών ταχυτήτων, τη θέρμανση, τον κλιματισμό και τον εξαερισμό (HVAC) και άλλα βοηθητικά συστήματα που είναι αναγκαία για τη λειτουργία. Το ηλεκτρικό αυτό δίκτυο τροφοδοτείται από γεννήτριες diesel, ατμοστρόβιλους ή αεριοστρόβιλους.

Για μεγάλα εμπορικά πλοία, που χρησιμοποιούν αργόστροφους κινητήρες, δεν απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων και η όπισθεν μπορεί να επιτευχθεί με την αναστροφή της περιστροφής του κινητήρα. Από την άλλη, τα μικρότερα πλοία απαιτούν κιβώτιο για τη μείωση της ταχύτητας του κινητήρα, καθώς κινούνται με μεσόστροφες ή ταχύστροφες μηχανές diesel. Το κιβώτιο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για ανεστραμμένη περιστροφή άξονα.

Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος προωθητής είναι η προπέλα σταθερής γωνίας pitch (FPP). Απαιτεί έναν αναστρέψιμο κινητήρα ή κιβώτιο ώστε να σταματήσει ή να κάνει όπισθεν. Εναλλακτικά, μια προπέλα ελεγχόμενης γωνίας pitch (CPP) μπορεί να δώσει αρνητική ώση για την επιβράδυνση και την οπίσθια κίνηση. Άλλοι προωθητές είναι οι πίδακες νερού (water jets), οι κυκλοειδείς προπέλες, η μαγνητοϋδροδυναμική πρόωση, οι προπέλες διάτρητης επιφάνειας, οι τροχοί πλοίου, και οι προπέλες τύπου ουράς φάλαινας (whale-tail). Στη συγκεκριμένη έρευνα όμως, θα περιοριστούμε στις προπέλες, αν και οι ίδιες αρχές και στρατηγικές ελέγχου ισχύουν και στους άλλους προωθητές επίσης.

2.2 Ηλεκτρική πρόωση

Η ηλεκτρική πρόωση υπάρχει ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1990. Μια μικρή ιστορική αναδρομή της ηλεκτρικής πρόωσης καλύπτεται από τους Moreno & Pigazo. Τη δεκαετία του '90, η ηλεκτρική πρόωση ενισχύθηκε αρκετά στη βιομηχανία της κρουαζιέρας και στα μεγάλα πολεμικά πλοία. Μια τυπική αρχιτεκτονική της ηλεκτρικής πρόωσης αναπαρίσταται στην Σχήμα 1.5. Πολλαπλά σετ γεννητριών diesel τροφοδοτούν ένα ηλεκτρικό δίκτυο σταθερής συχνότητας και υψηλής τάσης. Το δίκτυο τροφοδοτεί τον κινητήρα της ηλεκτρικής πρόωσης και τα περιφερειακά φορτία, τις περισσότερες φορές μέσω ενός μετασχηματιστή. Ο κινητήρας της ηλεκτρικής πρόωσης αποτελείται από έναν ηλεκτρονικό μεταλλάκτη ισχύος που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας του άξονα, άρα και της ταχύτητας του πλοίου.



Σχήμα 2.2: Σχηματισμός ενός τυπικού συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης

2.2.1 Οφέλη και προκλήσεις της ηλεκτρικής πρόωσης

Αρχικά, η ηλεκτρική πρόωση είναι μια λύση για την πρόωση, αποδοτική ως προς το καύσιμο, όπου το περιφερειακό φορτίο είναι σημαντικό μέρος των απαιτήσεων για ισχύ πρόωσης και το προφίλ λειτουργίας παρουσιάζει ποικιλία, μιας και η γεννήτρια ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την πρόωση, μέσα από τα ηλεκτρικά μοτέρ και τόσο στα βοηθητικά συστήματα. Για να επιτευχθεί αυτό, ένα σύστημα διαχείρισης ισχύος (PMS) ταιριάζει τον αριθμό των λειτουργούντων κινητήρων με την απαιτούμενη συνδυαστική πρόωση και το περιφερειακό φορτίο. Η στρατηγική ελέγχου διασφαλίζει πως οι κινητήρες δεν λειτουργούν μη αποδοτικά υπό μερική φόρτιση και αναφέρεται συχνά ως *φιλοσοφία του σταθμούς παραγωγής ρεύματος*.

Δεύτερον, οι εκπομπές NOx της ηλεκτρικής πρόωσης είναι πιθανό να είναι λιγότεροι απ' αυτούς της μηχανικής πρόωσης, επειδή η ισχύς πρόωσης σε πλήρη ταχύτητα είναι, στις περισσότερες περιπτώσεις, χωρισμένη σε πολλαπλούς κινητήρες, κάτι που λόγω της μικρότερης αποδιδόμενης ισχύος του καθενός λειτουργούν με μεγαλύτερη ταχύτητα. Για παράδειγμα, ένα κρουαζιερόπλοιο με ισχύ ηλεκτρικής πρόωσης των 20 MW ανά άξονα τυπικά έχει πέντε γεννήτριες diesel εγκατεστημένες, που λειτουργούν στα 720 rpm και ένα κρουαζιερόπλοιο με μονάδα μηχανικής πρόωσης των 20 MW ανά άξονα, τυπικά έχει δύο κύριες

μηχανές των 20 MW, όπου η καθεμία λειτουργεί σε μέγιστη ταχύτητα 500 rpm με τετράχρονους κινητήρες diesel ή με 80 rpm σε δίχρονους κινητήρες. Για την Τάξη 2, αυτό θα σήμαινε μια μέση παραγωγή NOx του κύκλου ίση με 9.7 g/kWh για τις γεννήτριες diesel στην ηλεκτρική πρόωση και 10.5 ή 14.4 g/kWh για την τετράχρονη και δίχρονη μηχανή diesel αντίστοιχα στη μηχανική πρόωση. Επιπλέον, λόγω του σχεδιασμού της ηλεκτρικής μονάδας στην ηλεκτρική πρόωση, οι γεννήτριες diesel λειτουργούν πιο κοντά στο σημείο σχεδιασμού τους, στο οποίο τυπικά παράγουν λιγότερο NOx, ή χρειάζονται λιγότερα μέτρα περιορισμού για κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές NOx. Ακόμα, λειτουργούν υπό καθορισμένη ταχύτητα, αντιθέτως με τη μηχανική πρόωση, όπου οι κινητήρες λειτουργούν υπό μειωμένη ταχύτητα σε μερικό φορτίο, παράγοντας περισσότερο NOx, λόγω του μεγαλύτερου χρόνου σχηματισμού NOx.

Το τρίτο πλεονέκτημα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι ο μειωμένος φόρτος συντήρησης, καθώς οι κινητήρες μοιράζονται ανάμεσα στην πρόωση και το βοηθητικό φορτίο και κλείνουν εντελώς όταν δεν είναι αναγκαίοι.

Τέταρτον, η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να πετύχει μειωμένα επίπεδα εκπεμπόμενου θορύβου λόγω της απουσίας της μηχανικής μετάδοσης κίνησης από τον κινητήρα στην προπέλα. Για τον σκοπό αυτό, ο σχεδιασμός του μοτέρ και του μετατροπέα ισχύος πρέπει να βελτιστοποιηθεί για ελάχιστες διακυμάνσεις ροπής. Ο αντίκτυπος των δυναμικών (λειτουργικών) συνθηκών στην απόδοση θορύβου της ηλεκτρικής πρόωσης φαίνεται πως δεν έχει μελετηθεί ακόμα.

Το πέμπτο όφελος της ηλεκτρικής πρόωσης είναι η εν δυνάμει υψηλή διαθεσιμότητά της, τουλάχιστον εάν η μονάδα ισχύος και πρόωσης έχει σχεδιαστεί για τον σκοπό αυτό.

Αντιθέτως, η ηλεκτρική πρόωση αντιμετωπίζει τις ακόλουθες προκλήσεις:

- Λόγω των επιπλέον σταδίων μετατροπής στους μετασχηματιστές ισχύος και τα ηλεκτρικά μοτέρ, η ηλεκτρική πρόωση οδηγεί σε αυξημένες απώλειες. Αυτές οι απώλειες οδηγούν σε αύξηση της ειδικής κατανάλωσης, ειδικά κοντά στη μέγιστη ταχύτητα του πλοίου.
- Όταν τρέχουν επιπλέον κινητήρες για να επιτευχθεί η μέγιστη διαθεσιμότητα πρόωσης, το οποίο απαιτείται για ευαίσθητες επιχειρήσεις μετακίνησης θέσεις, οι κινητήρες λειτουργούν υπό χαμηλό φορτίο. Αυτό οδηγεί σε κακή κατανάλωση καυσίμου και πολλές εκπομπές.
- Τα περισσότερα πλοία με ηλεκτρική πρόωση χρησιμοποιούν προπέλα σταθερής γωνίας pitch (FPP), επειδή τα ηλεκτρικά μοτέρ με μεταβλητές ταχύτητες μπορούν να δώσουν μέγιστη ροπή σε κάθε ταχύτητα και λειτουργούν στην όπισθεν. Ο Vrijdag έχει δείξει πως ο εκπεμπόμενος θόρυβος λόγω σπηλαίωσης αυξάνει υπό λειτουργικές συνθήκες όταν σταθεροποιείται η γωνία pitch και χρησιμοποιείται έλεγχος ταχύτητας, το οποίο είναι και η πάγια στρατηγική ελέγχου για τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Έτσι, η σπηλαίωση εν δυνάμει αυξάνει υπό συνθήκες λειτουργίας, ειδικά

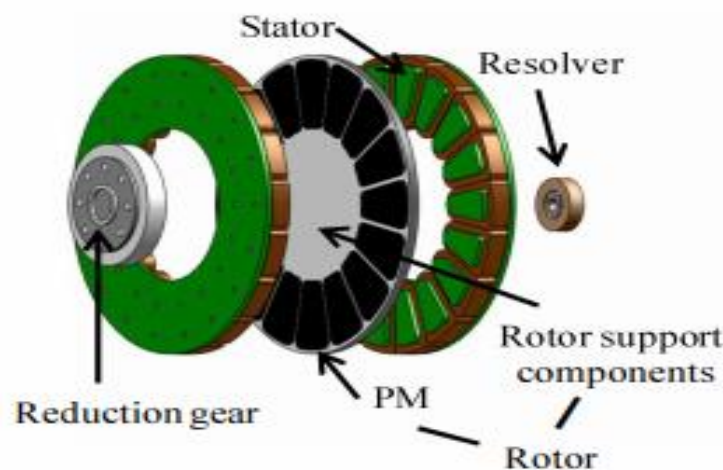
για την ηλεκτρική πρόωση με σταθερή γωνία pitch και έλεγχο ταχύτητας, όπως επίσης και στη μηχανική πρόωση με FPP.

- Επειδή όλα τα φορτία βιώνουν την τάση του ηλεκτρικού δικτύου και τη συχνότητά του, οι διακυμάνσεις στην τάση και τη συχνότητα υπό συνθήκες αστοχίας μπορούν να προκαλέσουν το σβήσιμο των ηλεκτρικών συστημάτων, μειώνοντας άρα την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα. Ειδικά στα συστήματα ενέργειας με πολλές μεταβλητές ταχύτητες, μπορεί να προκληθεί αστάθεια συνεχούς φορτίου ισχύος. Ο Sulligoi περιγράφει το φαινόμενο αυτό, προτείνει μεθόδους για την ανάλυση του ρίσκου με δύο στρατηγικές μοντελοποίησης και συζητά στρατηγικές περιορισμού.

Όπως πριν, η στρατηγική ελέγχου θα πρέπει να στοχεύει στην αντιμετώπιση τέτοιων δυσκολιών. Εναλλακτικά, όταν η στρατηγική ελέγχου δεν μπορεί να βελτιώσει επαρκώς κάποιο από τα κριτήρια επίδοσης, κάποια άλλη αρχιτεκτονική συστήματος θα πρέπει να επιλεγεί.

2.3 Μόνιμων Μαγνητών

Σε αυτό το είδος μηχανών χρησιμοποιούνται υλικά που διατηρούν τη μαγνήτιση τους όπως ο μαγνήτης κράματος Alnico-5, οι φερίττες, το κράμα σαμαριού κοβάλτιου και το κράμα νεοδυμίου-βορίου-κοβαλτίου. Αυτά τα κράματα ονομάζονται υλικά σπάνιας γαίας “rare earth magnets” έχουν καλύτερα στοιχεία από τους απλούς μαγνήτες αλλά και πολύ μεγαλύτερο κόστος. Οι σύγχρονες Μηχανές Μόνιμου μαγνήτη δεν έχουν διέγερση, κάτι που αυξάνει και τη συνολική απόδοση της μηχανής. Εδώ η ροή περνάει από το βόρειο πόλο του μαγνήτη του δρομέα στο στάτη μέσω του διάκενου και στη συνέχεια ολοκληρώνει τη διαδρομή της και περνάει από το στάτη στο νότιο πόλο του δρομέα μέσω του διάκενου.



Σχήμα 2.3

Στους ηλεκτροκινητήρες εντός τροχού μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξωτερικός δρομέας. Δηλαδή οι μαγνήτες τοποθετούνται σε ειδικά ανοίγματα μέσα στο πυρήνα του δρομέα η κολλιούνται στην εσωτερική επιφάνεια του δρομέα και συγκρατούνται από ορειχάλκινους δακτυλίους συγκράτησης. Έπειτα ο δρομέας συνδέεται απευθείας στο χείλος του τροχού.

Υπάρχει και η τεχνολογία του εξωτερικού στάτη και εσωτερικού δρομέα στην οποία ο δρομέας βρίσκεται ανάμεσα από τους δυο στάτες και είναι κατασκευασμένος από μονίμους μαγνήτες νεοδημίου. Αυτή η δομή έχει δρομέα χωρίς πυρήνα και χρησιμοποιείται για μεγιστοποίηση της μαγνητικής ροπής.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης αυτού του τύπου μηχανής είναι τα εξής:

- Είναι πιθανή η αποφυγή της μη αναστρέψιμης απομαγνητίσεως των μονίμων μαγνητών.
- Όταν ο δρομέας είναι στο κέντρο της αξονικής ροής, οι ανισόρροπες ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που ασκούνται πάνω του περιορίζονται.
- Οι απώλειες χαλκού μειώνονται καθώς με αυτή τη δομή υπάρχει μικρότερη πυκνότητα ροής μαγνητικού πεδίου στο στάτη.

Η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου παίζει πολύ μεγάλο ρόλο. Υπάρχουν δυο τύποι μηχανών μονίμου μαγνήτη ανάλογα με τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Οι μηχανές ακτινικής ροής και οι μηχανές αξονικής ροής. Λόγω του μικρού αξονικού της μήκους και της ευκολίας στη κατασκευή προτείνονται οι μηχανές αξονικής ροής. Εδώ οι μαγνήτες έχουν επίπεδο σχήμα και δεν απαιτητέ ειδική κατεργασία για να πάρουν τη κυρτή μορφή για να τοποθετηθούν στην επιφάνεια του δρομέα. Επίσης το αξονικό μήκος του διάκενου μπορεί να ρυθμίζεται κατά τη συναρμολόγηση της μηχανής η ακόμη να αυξομειώνεται κατά τη λειτουργία της ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Κάποια από τα μειονεκτήματα τους είναι η “ροπή cogging” και το σχετικά μεγάλο μήκος διάκενου. Θα αναλυθούν σε άλλη παράγραφο τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων αυτών.

Ως αναφορά τα τυλίγματα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δυο τεχνικές. Συγκεντρωμένα και διανεμημένα τυλίγματα. Μετά από έρευνες το συμπέρασμα είναι πως στους ηλεκτροκινητήρες εντός τροχού τα διανεμημένα τυλίγματα παρουσιάζουν πολλά προτερήματα όπως :

- Μειωμένες παρασιτικές αρμονικές που συνεπάγεται σε αυξημένη απόδοση
- Αυξημένη τιμή του παράγοντα πληρώσεως. Δηλαδή του λόγου της επιφάνειας των τυλιγμάτων προς την συνολική επιφάνεια.
- Σημαντική μείωση των δινορευμάτων
- Μειωμένος θόρυβος και δονήσεις.

Από την άλλη πλευρά τα συγκεντρωμένα τυλίγματα μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλο αριθμό πόλων για τη μείωση του συνολικού πλάτους με το μειονέκτημα όμως ότι αυξάνεται το κόστος. Επιπλέον αυξάνουν τον διαθέσιμο χώρο του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής. Μία περιέλιξη τύπου

δοντιού (tooth coil winding) καλύπτει τις προϋποθέσεις πλάτους της αξονικής ροής της μηχανής. Αυτός ο τρόπος περιέλιξης τυλιγμάτων του στάτη επιτρέπει στις μηχανές με μεγάλο διάκενο να αναπτύσσουν μεγάλη αγωγιμότητα και κατά συνέπεια το καλύτερο έλεγχο της μηχανής και τη μείωση των απαιτήσεων στον αντιστροφέα.

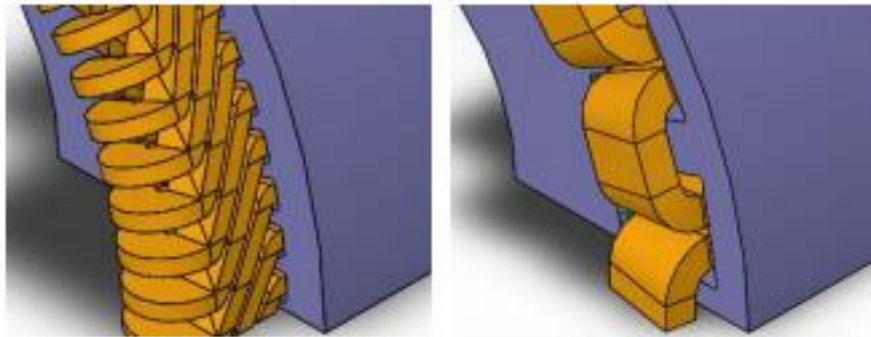


Fig. 1. (a) Distributed winding (b) Concentrated winding

Σχήμα 2.4

Ο αριθμός των πόλων και των αυλακιών επίσης καθορίζει τη ταχύτητα της μηχανής. Ένας μεγάλος αριθμός πόλων οδηγεί σε μειωμένο όγκο λόγω της μικρής μαγνητικής ροής ανά πόλο. Παράλληλα αυξάνεται το διάκενο και η ροπή του δρομέα. Επιπλέον έχοντας μεγάλο αριθμό πόλων μειώνονται οι πιθανότητες απομαγνητίσεις. Ένας κατάλληλος όμως αριθμός πόλων και θυρίδων θα δώσει μειωμένο θόρυβο και δονήσεις και θα μεγαλώσει τη διάρκεια ζωής. Κάθε θυρίδα θα πρέπει να έχει τέτοιο βάθος ώστε να έχει μεγάλη αυτεπαγωγή για το περιορισμό των ρευμάτων.

$$M_e = \frac{m}{\sqrt{2}} \cdot p \cdot \Psi_{PM} \cdot I_q$$

M_e = ηλεκτρομαγνητική ροπή

m = αριθμός φάσεων στάτη

Ψ_{pm} = ροή του μονίμου μαγνήτη

I_q = ρεύμα ανά φάση.

2.4 Επαγωγικές Μηχανές

Οι επαγωγικοί κινητήρες παρουσιάζονται σε δύο κατασκευαστικούς τύπους: Βραχυκυκλωμένου κλωβού και δακτυλιοφόρου δρομέα. Οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού είναι brushless, ενώ οι

κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα έχουν ολισθαίνουσες επιφάνειες στο δρομέα (δακτύλιος ολίσθησης και ψήκτρεις).

Ο έλεγχος της ταχύτητας και των δύο τύπων επαγωγικών κινητήρων γίνεται μεταβάλλοντας τη συχνότητα αναλογικά με την τάση τροφοδοσίας του στάτη (βαθμωτός έλεγχος V/f) μέσω ενός αντιστροφέα (inverter). Στις περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται ακριβής έλεγχος της ταχύτητας και θέσης χρησιμοποιείται σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου. Ο έλεγχος ανοικτού βρόχου είναι απλός και δεν απαιτεί μέτρηση της ταχύτητας. Έτσι, στο σύστημα που περιλαμβάνει το μετατροπέα ισχύος (power converter) και το κύκλωμα ελέγχου είναι σχετικά χαμηλού κόστους και εύκολο στην εγκατάστασή του. Ωστόσο δεν επιτυγχάνεται ακριβής έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα, γιατί η ταχύτητα μεταβάλλεται με το φορτίο (ολίσθηση) και το κινητήριο σύστημα δεν έχει γρήγορη απόκριση σε μεταβολές της ταχύτητας εντολής (δεν μπορεί να αναπτύξει μεγάλη και κυρίως ελεγχόμενη επιτάχυνση και επιβράδυνση). Η ακρίβεια στον έλεγχο της ταχύτητας μπορεί να βελτιωθεί αν χρησιμοποιηθεί σύστημα κλειστού βρόχου όπου έχουμε ανάδραση του σήματος της ταχύτητας, ωστόσο παραμένει το μειονέκτημα των σχετικά χαμηλών επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων του δρομέα.

Στις περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια στον έλεγχο και την απόκριση στα σήματα εντολής χρειάζεται μετατροπέας ισχύος με σύστημα κλειστού βρόχου διανυσματικού ελέγχου (vector control ή έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου, field-oriented control). Για τη λειτουργία του διανυσματικού ελέγχου πρέπει σε κάθε στιγμή να είναι γνωστή η θέση του δρομέα και συνεπώς απαιτείται η εγκατάσταση στο δρομέα ειδικού αισθητήριου θέσης. Η υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου στους επαγωγικούς κινητήρες είναι αρκετά πολύπλοκη και εξαρτάται από τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου των. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ακρίβεια του ελέγχου να επηρεάζεται σημαντικά από τις μεταβολές των παραμέτρων που προκαλούνται κυρίως λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας και του μαγνητικού κορεσμού. Η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου θα παρουσιασθεί αναλυτικά σε χωριστό κεφάλαιο γιατί είναι η κατ' εξοχήν τεχνική ελέγχου στην οποία βασίζεται η λειτουργία των σερβοκινητήρων.

Οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού έχουν χαμηλό κατασκευαστικό κόστος. Ωστόσο, παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες σε σχέση με τους brushless κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, γιατί έχουν ωμικές απώλειες στο δρομέα λόγω του ρεύματος φορτίου και επίσης λειτουργούν πάντοτε με επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Το σύστημα ελέγχου για τη λειτουργία τους ως σερβοκινητήρες είναι πολύπλοκο και επιπλέον δεν μπορούν να επιτύχουν τη δυναμική απόκριση των brushless σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη, γιατί έχουν μεγαλύτερη αδράνεια. Έτσι, οι επαγωγικοί κινητήρες κυρίως χρησιμοποιούνται σε απευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο καθώς και σε κινητήρια συστήματα βαθμωτού ελέγχου ταχύτητας V/f ανοικτού ή κλειστού βρόχου. Ως σερβοκινητήρες σε κινητήρια συστήματα διανυσματικού ελέγχου

χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν σημαντικές απαιτήσεις από την εφαρμογή ως προς τη δυναμική συμπεριφορά και απαιτείται χαμηλό κόστος εγκατάστασης.

2.5 Brushless Direct Current Motor (BLDCM)

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες είναι μια άλλη κατηγορία μονίμων μαγνητών με την ίδια δηλαδή λογική διέγερσης. Η λειτουργία τους προσεγγίζει τις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Από την ονομασία των μηχανών αυτών ενδεχόμενος να δημιουργηθεί σύγχυση και να θεωρηθεί ότι είναι μηχανές συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο η ονομασία τους προήλθε επειδή μέσω του συστήματος οδήγησης επιτυγχάνεται η ίδια εξίσωση ροπής και χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας με αυτή των μηχανών συνεχούς ρεύματος και έτσι οι μηχανές αυτές συμπεριφέρονται ως μηχανές συνεχούς ρεύματος.

Το πλεονέκτημα μιας τέτοιας διέγερσης είναι το μικρό μέγεθος της διάταξης πεδίου και η εξάλειψη των ωμικών απωλειών στο τύλιγμα διέγερσης. Έτσι η δημιουργία μιας μικρού όγκου ψυχρής με υψηλή απόδοση καθίσταται δυνατή. Ο λόγος όμως για τον οποίο αυτές οι μηχανές είναι περισσότερο δημοφιλείς από άλλες ισοδύναμες είναι η απλότητα του μηχανισμού ελέγχου τους.

Με τη σωστή επιλογή του αριθμού των πόλων και των φάσεων μπορεί να πλησιάσει την απόδοση μια σύγχρονης μηχανής καθώς χρησιμοποιείτε καλύτερα ο σιδερένιος πυρήνας με χρήση τραπεζοειδούς ρεύματος τροφοδοσίας. Επιπλέον η κυκλική περιέλιξη τυλιγμάτων καλύπτει τις απαιτήσεις υψηλής ισχύος. Τέλος, προτιμάται η χρήση μηχανών αξονικής ροής έναντι ακτινικής λόγω της εξισορρόπησης των αντίθετων δυνάμεων στο στάτη, της καλύτερης απαγωγής της θερμότητας και του ρυθμιζόμενου διάκενου.

Η κατασκευή τους είναι σχετικά απλή. Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στον δρομέα με διάφορους τρόπους όπως κατά μήκος της επιφάνειας του για παράδειγμα. Ο στάτης περιέχει όλα τα τυλίγματα τα οποία διαρρέει η τάση τροφοδοσίας.

Η BLDC μηχανή έχει 3 τυλίγματα στάτη και μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα. Επειδή η κατανομή της ροής αυτής της μηχανής είναι τραπεζοειδής, η ανάλυση των ρευμάτων του στάτη σε d-q πλαίσιο αναφοράς – όπως γίνεται στις περισσότερες φορές στα υπόλοιπα είδη μηχανών – δεν προσφέρει κάποιο πλεονέκτημα ως προς την απλοποίηση του δυναμικού μοντέλου της, οπότε είναι αναγκαίο να εξαχθεί ένα μοντέλο από τις φασικές μεταβλητές. Για την εξαγωγή του μοντέλου δεν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες σιδήρου και οι λοιπές κατανεμημένες απώλειες διασποράς. Θεωρούμε ότι οι ταλαντώσεις στα ρεύματα και τις τάσεις της μηχανής που προκαλούνται από τις μεταβατικές καταστάσεις υπολογίζονται στη βαθμίδα του αντιστροφέα, οπότε στην ανάλυση δεν λαμβάνονται υπόψη τα τυλίγματα απόσβεσης της μηχανής. Ως εκ τούτου, οι εξισώσεις των τριών τυλιγμάτων του στάτη είναι:

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix}$$

Επιπλέον, για τα φασικά ρεύματα του στάτη ισχύει $i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0$ προκύπτει:

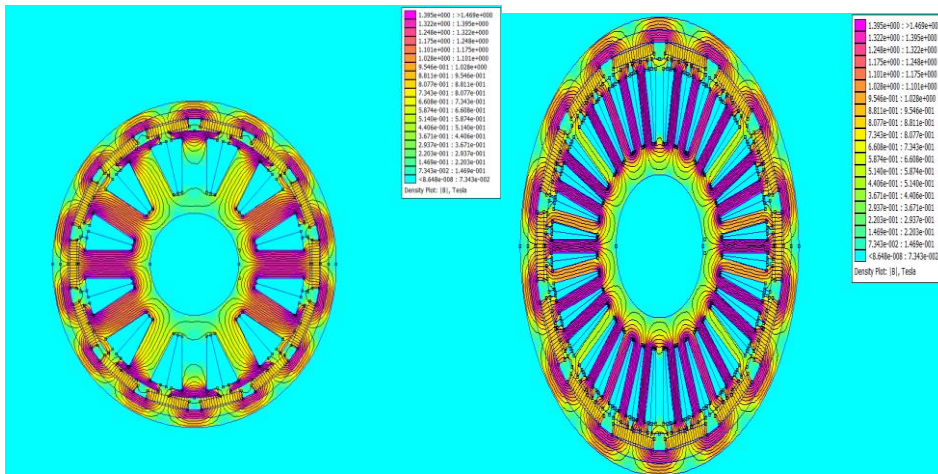
$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L-M) & 0 & 0 \\ 0 & (L-M) & 0 \\ 0 & 0 & (L-M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix}$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή δίνεται από την έκφραση:

$$T_e = [e_{as}i_{as} + e_{bs}i_{bs} + e_{cs}i_{cs}] \frac{1}{\omega_m} (N \square m)$$

2.5.1 Μαγνητική Ανάλυση της BLDC

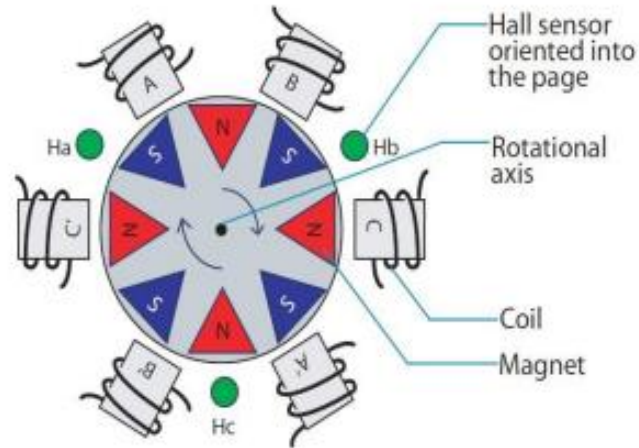
Στο παρακάτω Σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή πυκνότητας ροής της μηχανής μόνιμων μαγνητών τραπεζοειδούς ΗΕΔ ως προς τη θέση του δρομέα. Επίσης, αλλαγή στην κατανομή του μαγνητικού πεδίου παρατηρείται με την αύξηση των “δοντιών” στον στάτη.



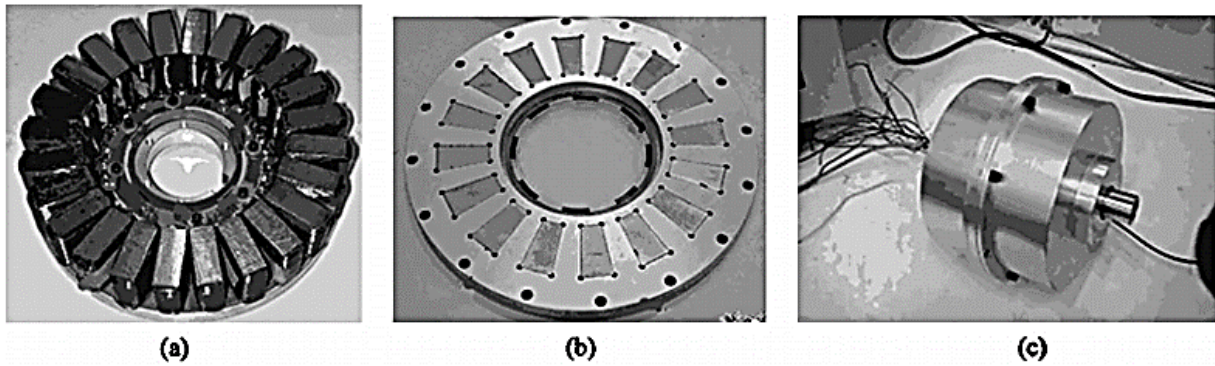
Σχήμα 2.5

Όπου N_s είναι ο αριθμός των δοντιών στα οποία τυλίγονται οι φάσεις στον στάτη. Στο Σχήμα 2-5 μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι έντονα μοβ περιοχές είναι οι περιοχές υψηλού μαγνητικού πεδίου, οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση των δοντιών, επειδή οι δυναμικές γραμμές πυκνώνουν στα δόντια, όπου υπάρχουν τα τυλίγματα. Οι ανοιχτόχρωμες περιοχές συμβολίζουν τις περιοχές με χαμηλότερη ένταση μαγνητικού πεδίου και αυτό φαίνεται από την αραιώση των δυναμικών γραμμών. Τέλος, οι περιοχές με γαλάζιο χρώμα συμβολίζουν τον αέρα, όπου λόγω της μικρής μαγνητικής διαπερατότητας, του δεν αφήνει

τις δυναμικές γραμμές να διαφύγουν και τις αναγκάζει να εκτελέσουν κυκλική πορεία μέσα στον πυρήνα της μηχανής.

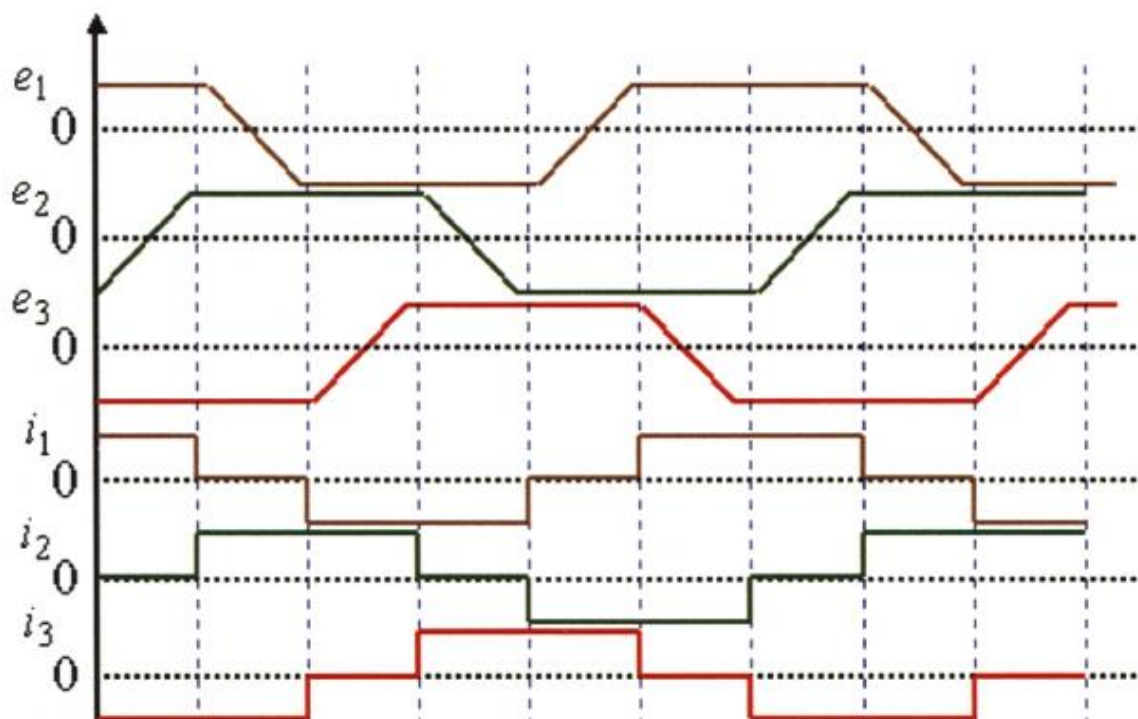


Σχήμα 2.5



Σχήμα 2.6- (α) Στάτης (β) Δρομέας (γ) Πρωτότυπο Μηχανής

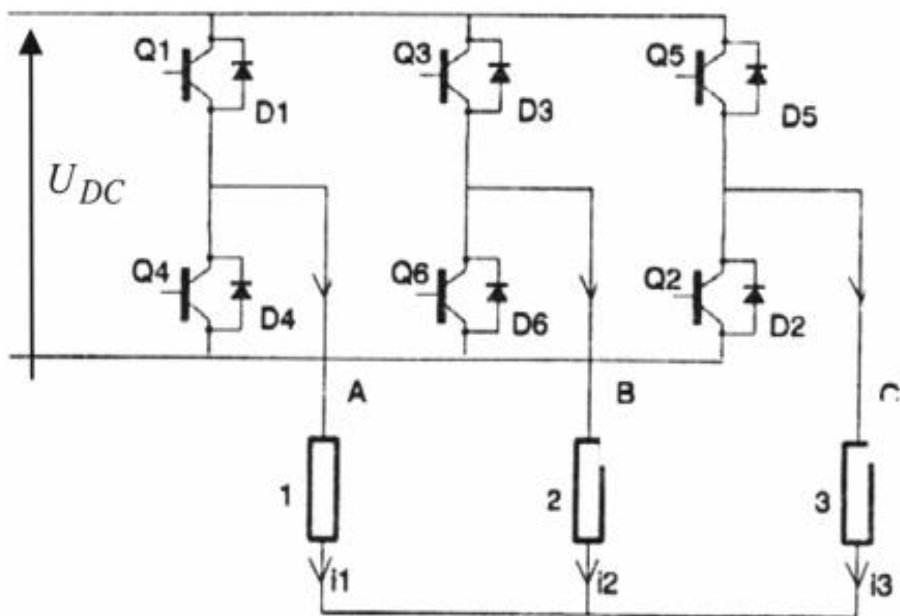
Οι κυματομορφές των φάσεων παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 2.7

Η κατανομή ροής σε έναν κινητήρα DC μονίμου μαγνήτη χωρίς ψήκτρες είναι τραπεζοειδής. Οι επαγόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις έχουν σταθερό μέγεθος για 120 ηλεκτρικές μοίρες τόσο στο θετικό όσο και στο αρνητικό μισό του κύκλου, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Έτσι η ισχύς εξόδου μπορεί και διατηρείται ομοιόμορφη σε σχέση με τη διέγερση των φάσεων. Τα ρεύματα στα τυλίγματα του κινητήρα δεν μπορούν να βυθίζονται σε μηδενικό χρόνο και έπειτα να ανυψώνονται. Επομένως στη κανονική λειτουργία υπάρχουν κυματώσεις της ισχύος.

Και προκύπτουν από μια τριφασική γέφυρα της παρακάτω διάταξης:



Σχήμα 2.8

Χαρακτηριστικό επιπλέον είναι ότι οι χωρίς ψήκτρες DC μηχανές έχουν 15% μεγαλύτερη απόδοση ισχύος από τις σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι ο λόγος της τιμής rms πυκνότητας ροής προς τη μέγιστη τιμή της στην χωρίς ψήκτρες dc μηχανή μονίμου μαγνήτη είναι μεγαλύτερος από αυτόν της ημιτονικής μηχανής μονίμου μαγνήτη.

Υποθέτοντας ότι οι απώλειες χαλκού είναι ίδιες και ότι ο συντελεστής ισχύος του σύγχρονοι κινητήρα PM ισούται με τη μονάδα, οι τιμές των rms των πλάτων στις 2 μηχανές είναι οι εξής:

$$I_{sy} = \frac{I_{ps}}{\sqrt{2}}$$

$$I_d = I_p \sqrt{\frac{2}{3}}$$

Εξισώνοντας τις απώλειες χαλκού και αντικαθιστώντας τα ρεύματα συναρτήσει των μέγιστων τιμών τους έχουμε :

$$3I_{sy}^2 R_a = 3I_d^2 R_a$$

$$3 \left(\frac{I_{ps}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot R_a = 3 \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_p \right)^2 \cdot R_a$$

$$I_p = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{ps}$$

Έτσι προκύπτει ο λόγος της ισχύος έξοδο = $\frac{\text{ισχύς PMdc χωρίς ψήκτρες}}{\text{ισχύς σύγχρονου PM}}$

$$= \frac{2 \times E_p \times I_p}{3 \times \frac{E_p}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{ps}}{\sqrt{2}}} = \frac{2 \times E_p \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{ps}}{3 \times \frac{E_p \times I_{ps}}{2}} = 1,1547$$

Κεφάλαιο 3

3. Ανάκτηση θερμικής ενέργειας καυσαερίων

3.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί σε παραπάνω κεφάλαιο, στην σημερινή εποχή κρίνεται απαραίτητο και αναγκαίο να υπάρξουν βήματα με σκοπό τον εξηλεκτρισμό των μέσων μεταφοράς. Καθώς ο πλήρης εξηλεκτρισμός των πλοίων και των αεροπλάνων βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, ωστόσο είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μεθόδων μέσω των οποίων εξοικονομείται ενέργεια και επιτυγχάνεται μερική μείωση της ποσότητας εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και αερίων του θερμοκηπίου. Στην κατεύθυνση αυτή, η επιστημονική έρευνα έχει εστιάσει το ενδιαφέρον στον εξηλεκτρισμό των μέσων μεταφοράς και στην, κατά το δυνατόν μεγαλύτερη, εξοικονόμηση ενέργειας.

Όσον αφορά τα εναέρια μέσα, παρά τις τεχνικές και οικονομικές δυσκολίες για την κατασκευή ενός πλήρως ηλεκτρικού αεροπλάνου, το Boeing 787 είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός αρκετά εξηλεκτρισμένου αεροσκάφους (More Electric Aircraft), αντικαθιστώντας υδραυλικά, μηχανικά και πνευματικά συστήματα με ηλεκτρικά και χρησιμοποιώντας ηλεκτρογεννήτριες [5]. Παρά τις υφιστάμενες δυσκολίες, το 2016 ολοκληρώθηκε η πρώτη πιλοτική πτήση ενός αμιγώς ηλεκτρικού αεροσκάφους, του Solar Impulse 2, το οποίο χρησιμοποίησε Φ/Β συστήματα, ηλεκτροκινητήρες και συσσωρευτές ιόντων λιθίου[6]. Ωστόσο, το μέγεθος και το βάρος των συσσωρευτών αποτελεί σημαντικό ανασταλτικό παράγοντα για την εξέλιξη προς τα πλήρως εξηλεκτρισμένα αεροσκάφη (All Electric Aircrafts), ενώ θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ανάγκη για καταστολή των αρμονικών, οι οποίες δημιουργούνται στα μικροδίκτυα των αεροσκαφών από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος και δύναται να επηρεάσουν τη λειτουργία ευαίσθητων οργάνων [7].

Στα πλωτά μέσα μεταφοράς η εξέλιξη προς ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship- AES) είναι επίσης αργή και υπολογίζεται ότι το 1/3 αυτών θα χρησιμοποιεί συσσωρευτές μέχρι το 2050[8]. Το 2015 το MF Ampere έγινε το πρώτο παγκοσμίως, πλήρως ηλεκτρικό φέρρυ που κυκλοφορεί στις θάλασσες τις Νορβηγίας, χρησιμοποιώντας συσσωρευτές χωρητικότητας περίπου 1MWh[9]. Παρ' όλα αυτά, είναι πολλοί οι τεχνικοί και οικονομικοί παράγοντες που συμβάλλουν στην αργή εξέλιξη των AES. Μερικοί εκ των τεχνικών παραγόντων είναι οι αρμονικές και η ποιότητα ισχύος, η διαχείριση των σφαλμάτων (ιδιαίτερα σε συστήματα DC), η αξιοπιστία των ηλεκτρικών/ηλεκτρονικών διατάξεων, η σωστή δειγματοληψία και η διαχείριση πολλαπλών δεδομένων. Αντίστοιχα, οι οικονομικοί παράγοντες

σχετίζονται με το υψηλό κόστος επένδυσης και το ρίσκο που αυτή φέρει, με την εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών, καθώς και με την ανάγκη εκπαίδευσης του προσωπικού στη νέα τεχνολογία.

Έτσι, στο πλαίσιο του μερικού εξηλεκτρισμού μία πρόταση ηλεκτρολογικής φύσης αποτελεί η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ (αιολική ενέργεια, Φ/Β πλαίσια), τη χρήση των εξελιγμένων, πλέον, ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος καθώς και την ανάκτηση μέρους της θερμικής ενέργειας που εκλύεται από τις θερμικές μηχανές των πλοίων. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον για την ανάκτηση θερμικής ενέργειας μέσω των συστημάτων ανάκτησης θερμικής ενέργειας (ΣΑΘΕ) ή όπως ονομάζονται διεθνώς Waste Heat Recovery System (WHRS). Η ανάκτηση της θερμικής ενέργειας χρησιμοποιείται για ένα πλήθος παραγωγικών διεργασιών, όπως η αναθέρμανση νερού, η δημιουργία ατμού, η αναθέρμανση αέρα, τα συστήματα ανακύκλωσης (ανακυκλοφορίας) καυσαερίων και άλλα.

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι η χρήση των ΣΑΘΕ μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης της μηχανής έως και 5% υπό την ονομαστική λειτουργία, ενώ παράλληλα μπορεί να εξοικονομήσει ηλεκτρική ενέργεια σε ποσοστό 11% επί της ισχύος εξόδου των ΣΑΘΕ, καθώς και για επέκταση αυτών σε περισσότερο διευρυμένη χρήση.

Για κάθε 100 kW παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος απαιτούνται περίπου 235 kW θερμικής ισχύος, προερχόμενης από καύσιμα[10]. Από αυτήν χάνεται περίπου το 25% με τη μορφή καυσαερίων. Επομένως, αν ένα ποσοστό αυτής της ενέργειας ανακτηθεί και τροφοδοτηθεί και πάλι στο δίκτυο του πλοίου τότε αυξάνεται η συνολική απόδοσή του και μειώνεται το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα. Αυτό είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τη χρήση στατικών θερμοηλεκτρικών μονάδων, οι οποίες, στο εμπόριο, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα έχουν βαθμούς απόδοσης που κυμαίνονται μεταξύ 5% και 8%. Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι για κάθε 100 kW παραγόμενης ισχύος, μπορεί να ανακτηθεί 2% επιπλέον ισχύς από ένα WHRS με TEGs.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών γεννητριών (TEGs) καθώς και των αλγορίθμων MPPT οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την λειτουργία των γεννητριών στο σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου.

3.2 Θερμοηλεκτρικά φαινόμενα και υλικά

Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον T. J. Seebeck. Προηγήθηκε ωστόσο ένα λανθασμένο συμπέρασμα μετά από μια σειρά πειραμάτων του, το 1823. Στα πειράματα αυτά που δημοσίευσε, η βελόνα μιας πυξίδας εκτρέπεται αν βρίσκεται στην περιοχή ενός κλειστού βρόχου, που σχηματίζεται από δύο ανόμοιους αγωγούς, και θερμαίνεται μία από τις δύο ενώσεις του. Το λανθασμένο συμπέρασμα του Seebeck ήταν ότι θεώρησε ότι πρόκειται για ένα μαγνητικό φαινόμενο. Με βάση αυτό το συμπέρασμα προσπάθησε να συσχετίσει το μαγνητισμό της Γης με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του

ισημερινού και των πόλων της. Ωστόσο, στη συνέχεια διερεύνησε το φαινόμενο για πληθώρα υλικών και στη συνέχεια τα ταξινόμησε με βάση το γινόμενο $\alpha \cdot \sigma$, όπου α είναι ο συντελεστής Seebeck ο οποίος εκφράζεται σε V/K και σ η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η ανακάλυψη του θερμοηλεκτρικού φαινομένου έγινε όταν ο Seebeck διαπίστωσε ότι το φαινόμενο που είχε παρατηρήσει προκαλείται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα [11].

Ο J.C. Peltier δώδεκα χρόνια αργότερα ανακάλυψε ένα συμπληρωματικό φαινόμενο. Παρατήρησε θερμοκρασιακές αλλαγές στην ένωση δύο αγωγών όταν κυκλοφορεί ηλεκτρικό ρεύμα. Ο Peltier χρησιμοποίησε ουσιαστικά στα πειράματά του το φαινόμενο Seebeck ως πηγή ασθενών ρευμάτων, ωστόσο δεν κατάφερε να εκτιμήσει τον σημαντικό χαρακτήρα των παρατηρήσεων του ή ακόμα και να συνδέσει τα αποτελέσματά του με αυτά του Seebeck. Τα αποτελέσματα του Peltier εξηγήθηκαν από τον Lenz το 1838, ο οποίος κατάλαβε ότι ανάλογα με την κατεύθυνση ροής του ρεύματος, απορροφάται ή παράγεται θερμότητα στην ένωση δύο αγωγών. Ωστόσο προς τιμήν αυτών που παρατήρησαν πρώτοι τα φαινόμενα αυτά είναι γνωστά και στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως φαινόμενα Seebeck και Peltier, αντίστοιχα.

Λόγω των ιδιαίτερα σημαντικών ανακαλύψεων που συνέβαιναν εκείνη την περίοδο στον χώρο του ηλεκτρομαγνητισμού από τους Ampere, Laplace και Faraday οι οποίοι θεμελίωσαν τους νόμους της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας, παρατηρήθηκε έλλειψη ενδιαφέροντος και αργή πρόοδος σε ζητήματα θερμοηλεκτρικών εφαρμογών.

Ωστόσο, με την ανακάλυψη της θερμοδυναμικής, το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο παρουσίασε μία ανάκαμψη από το 1850, όταν το ενδιαφέρον είχε επικεντρωθεί σε όλες τις μορφές μετατροπής ενέργειας. Ο W. Thomson (γνωστός και ως Kelvin) συνέδεσε τα δύο φαινόμενα και παρατήρησε την ύπαρξη ενός τρίτου, το οποίο απέδειξε πειραματικά και πήρε και την ονομασία του, δηλαδή φαινόμενο Thomson. Το φαινόμενο αυτό αφορά την θέρμανση και την ψύξη ενός ομοιογενή αγωγού, όταν ένα ρεύμα διέρχεται κατά μήκος αυτού, παρουσία θερμοκρασιακής βάρμωσης. Τα ποσά της θερμότητας είναι ανάλογα της τιμής του ρεύματος αλλά και της μεταβολής της θερμοκρασίας. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και κατά την διάρκεια των φαινομένων Seebeck και Peltier, ωστόσο είναι αμελητέο σε σχέση με αυτά τα δύο, και συχνά παραλείπεται.

Η δυνατότητα χρήσης των θερμοηλεκτρικών φαινομένων για την παραγωγή ηλεκτρισμού εξετάστηκε από τον Rayleigh το 1885 ο οποίος υπολόγισε, λανθασμένα, την απόδοση μίας TEG. Στη συνέχεια ο E. Altenkirch το 1909 και το 1911 έδειξε ότι τα καλά θερμοηλεκτρικά υλικά θα πρέπει να διαθέτουν τα εξής χαρακτηριστικά:

Υψηλό συντελεστή Seebeck με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (κ), για την συγκράτηση της θερμότητας στην ένωση.

Χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση, προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες Joule.

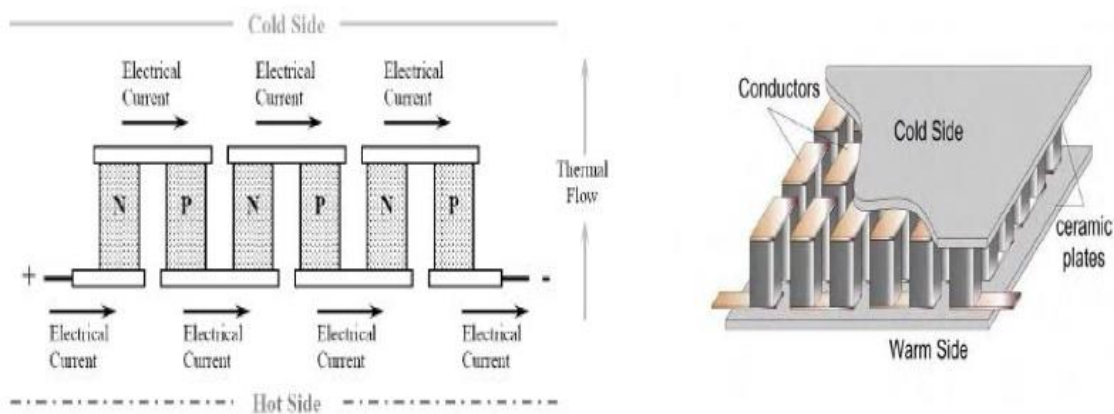
Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά αποτυπώθηκαν από την χαρακτηριστική ποσότητα Z , όπου $Z = \alpha^2 \sigma / \kappa$. Η μονάδα του Z είναι $1/K$. Επειδή οι τιμές του Z μπορεί να ποικίλουν ανάλογα με την θερμοκρασία, χρησιμοποιούμε κυρίως το αδιάστατο μέγεθος ZT , το οποίο είναι ένας δείκτης της ποιότητας ενός θερμοηλεκτρικού υλικού. Επίσης στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ο συντελεστής απόδοσης (coefficient of performance- CoP) για εφαρμογές ψύξης, ο οποίος είναι ο λόγος της ισχύος ψύξης προς την ηλεκτρική ισχύ εισόδου καθώς και ο συντελεστής $\alpha^2 \sigma$ ως παράγοντας ισχύος [12]. Ο υπολογισμός του CoP αποτελεί έναν τρόπο προσδιορισμού της αποδοτικότητας των συστημάτων θερμοηλεκτρικής ψύξης και γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση [13]:

$$CoP = \frac{\sqrt{1+ZT} * T_C - T_H}{(1+\sqrt{1+ZT})(T_H - T_C)} \quad (2.1)$$

Αρχικά, οι έρευνες πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση μετάλλων και μεταλλοειδών τα οποία χαρακτηρίζονται από συντελεστές Seebeck $10 \mu V/K$ ή και λιγότερο, με αποτέλεσμα σε τιμές απόδοσης της τάξης του 1%, η οποία είναι αντικονομική για τη χρήση των θερμοστοιχείων στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Έτσι, η θερμοηλεκτρική ψύξη κατέστη αντικονομική μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1930 και την ανακάλυψη των ημιαγωγών οι οποίοι έχουν συντελεστές Seebeck άνω των $100 \mu V/K$. Μάλιστα το 1947 ο M. Telks δημιούργησε μία γεννήτρια που λειτουργούσε με απόδοση περίπου 5% [14].

Ωστόσο, ένα μειονέκτημα των ημιαγωγών είναι ότι ο λόγος της θερμικής προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερος, συγκριτικά με τα μέταλλα, καθώς στους ημιαγωγούς είναι χαμηλότερη η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα ημιαγωγικά υλικά εδραιώθηκαν για τη δημιουργία θερμοηλεκτρικών μονάδων όταν τη δεκαετία του 1950 η έρευνα για τη δημιουργία τρανζίστορ είχε ως αποτέλεσμα την ανακάλυψη νέων υλικών με καλύτερες θερμοηλεκτρικές ιδιότητες.

Μια θερμοηλεκτρική μονάδα αποτελείται από ημιαγωγούς n- και p- τοποθετημένους διαδοχικά, οι οποίοι συνδέονται σε σειρά με μεταλλικές λωρίδες. Αυτά τα ζεύγη ημιαγωγών είναι τοποθετημένα ενδιάμεσα δύο θερμικά αγωγίμες πλάκες, οι οποίες ονομάζονται ψυχρή και θερμή πλευρά και έτσι σχηματίζεται ένα στοιχείο (module), όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.1 [15].



Σχήμα 3.1. Δομή θερμοηλεκτρικής μονάδας α)εσωτερικά και β) τομή της δομής [33].

Η θερμοηλεκτρική μονάδα μπορεί να λειτουργεί είτε ως γεννήτρια ηλεκτρικής ενέργειας (Thermo electric Generator- TEG), είτε ως ψυκτικό (Thermo electric Cooler - TEC), ή ως θερμαντικό (Thermo electric Heater - TEH). Όταν εκατέρωθεν των δύο πλακών υπάρχει μία διαφορά θερμοκρασίας, τότε παράγεται ενέργεια η οποία καταναλώνεται σε κάποιο ηλεκτρικό φορτίο και κατ' επέκταση η μονάδα λειτουργεί ως TEG. Αντίστοιχα, όταν ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται εσωτερικά της μονάδας, αναλόγως με την κατεύθυνση του, τότε απορροφάται θερμότητα από τη μία πλευρά και απορρίπτεται στην άλλη και έτσι η συσκευή λειτουργεί ως TEC ή TEH αντίστοιχα.

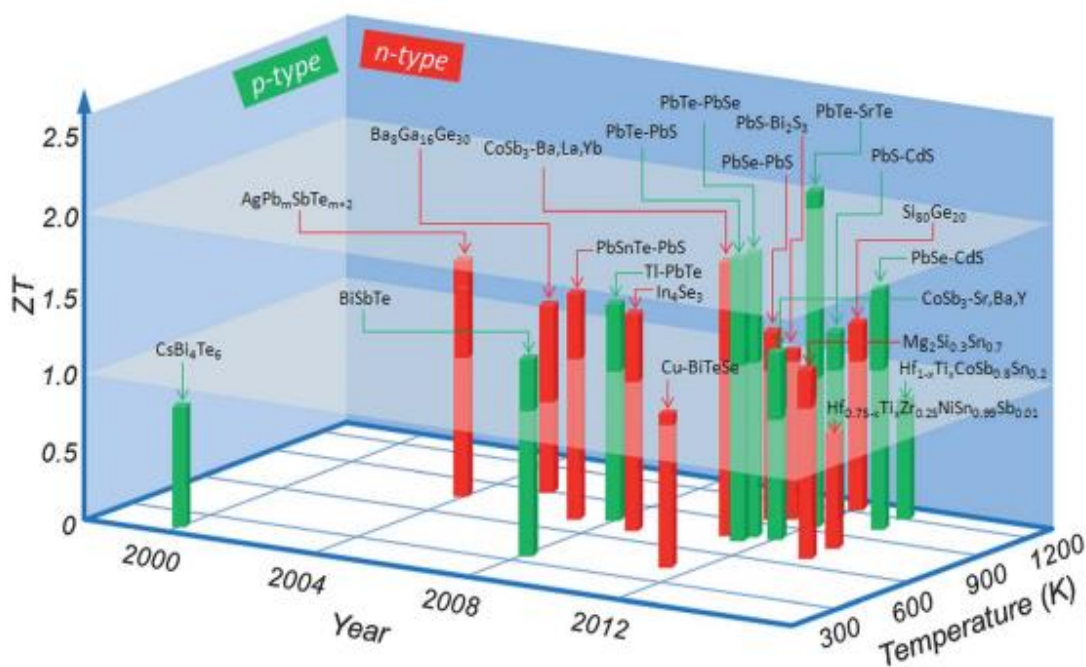
Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960, άρχισε να δημιουργείται η ανάγκη για αυτόνομες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, για εφαρμογές όπως η ιατρική φυσική, η εκμετάλλευση των πόρων της Γης σε εχθρικά και δυσπρόσιτα περιβάλλοντα και η εξερεύνηση του διαστήματος [16]. Παρά τα μειονεκτήματα της TEG, τα οποία σχετίζονται με το υψηλό κόστος και την χαμηλή απόδοση (περίπου 5%), για τέτοιες εφαρμογές αποτελεί ιδανική λύση σε σχέση με λύσεις θερμομηχανικής μετατροπής ενέργειας, χάρη στην αξιοπιστία, την έλλειψη κινητών μερών, την απλότητα, την αντοχή καθώς και την αθόρυβη λειτουργία τους[17].

Ένα γεγονός που ενέτεινε την έρευνα για εντονότερη μελέτη σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ήταν η αύξηση της τιμής του αργού πετρελαίου το 1974. Ωστόσο, η διευρυμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του θερμοηλεκτρικού φαινομένου απαιτούσε την οικονομικότερη παραγωγή ημιαγωγών, σε συνδυασμό με βελτιωμένο το μέγεθος ZT. Παρ' όλα αυτά, προς το τέλος της δεκαετίας του 1980 άρχισε να δίνεται προσοχή στην καταστροφή του στρώματος του όζοντος και στην επικείμενη κλιματική κρίση των επόμενων δεκαετιών. Αυτό έφερε στο επίκεντρο της προσοχής τις ΑΠΕ καθώς και την παραγωγή θερμοηλεκτρικής ενέργειας σε ευρεία κλίμακα με την εκμετάλλευση των καυσαερίων θερμικών μηχανών [18][19]. Διατάξεις θερμοηλεκτρικής παραγωγής ενσωματώνονται στα αυτοκίνητα βιομηχανιών όπως η General Motors, η BMW κ.α., καθώς επίσης και σε

συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, σε κλιβάνους στους οποίους αποβάλλονται μεγάλα ποσά θερμότητας[20][21].

Καθοριστικό παράγοντα για την εκμετάλλευση των θερμοηλεκτρικών μονάδων αποτελεί ο παράγοντας ZT και γι' αυτό κατά τη δεκαετία του 1990 δόθηκε προσοχή στις επιπτώσεις του στις θερμοηλεκτρικές ιδιότητες και υπήρξαν προβλέψεις για την αύξησή του. Οι θεωρητικές ιδέες που υπήρξαν για τον παράγοντα ισχύος οδήγησαν μέσα από πειράματα, κατά την επόμενη δεκαετία, στη σημαντική μείωση της θερμικής αγωγιμότητας του πλέγματος. Η επέμβαση σε νανοκλίμακα οδήγησε στον διπλασιασμό του ZT σε υψηλές θερμοκρασίες και έχει αποδώσει τη δεύτερη γενιά θερμοηλεκτρικών υλικών με το μέγεθος ZT να κυμαίνεται στην περιοχή 1,3-1,7. Έτσι, αυτά τα υλικά αναμένεται να παράγουν συσκευές παραγωγής ενέργειας με απόδοση 11-15%.

Ωστόσο, πλέον έχει αναπτυχθεί η τρίτη γενιά θερμοηλεκτρικών, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερος αριθμός ZT και κατ' επέκταση μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης. Αυτή παρουσιάζει ZT μεταξύ των τιμών 1.8-2.2 και η αναμενόμενη απόδοση είναι 15-20%. Συνοπτικά, στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η γενική εξέλιξη των θερμοηλεκτρικών υλικών κατά τα προηγούμενα έτη, κατά την κατασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκαν διάφορα κράματα.



Σχήμα 3.2. Πρόοδος των θερμοηλεκτρικών υλικών με βάση το μέγεθος ZT και την μέγιστη θερμοκρασία.

Ωστόσο, δεν είναι όλα τα υλικά κατάλληλα για όλες τις εφαρμογές. Η απόδοση του εκάστοτε υλικού εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο πλακών, από την εφαρμοζόμενη πίεση καθώς και από την μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία και την κατάλληλη θερμική μόνωση[20]. Έτσι, προκειμένου να επιλεγεί η θερμοηλεκτρική μονάδα, λαμβάνονται υπόψη όλα τα παραπάνω ή κάποια από

αυτά, καθώς και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά η διαθεσιμότητα στην αγορά κτλ. Κατά γενική ομολογία, μέχρι τώρα προτιμώνται τα κράματα βισμούθιου-τελλουρίου γιατί διαθέτουν υψηλό ΖΤ και είναι πιο ώριμα, από κατασκευαστικής άποψης[20][21][23].

Τέλος, πλέον υπάρχουν τομείς που τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία βρίσκουν ήδη εφαρμογή ή θα βρουν μελλοντικά. Παρόλο που η θερμοηλεκτρική ψύξη θεωρείται ακόμη μειωμένης απόδοσης σε σχέση με τα συστήματα freon, υπάρχουν εφαρμογές που η αξιοπιστία και η προσαρμοστικότητα αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα. Ένας ακόμα τομέας που τα θερμοστοιχεία γνωρίζουν μεγάλη πρόοδο είναι σε εφαρμογές μικρότερης κλίμακας όπως η ανάπτυξη αισθητήρων με σκοπό τη χρήση τους στην ιατρική και σε ηλεκτρονικές συσκευές. Επιπλέον, σημαντικό ενδιαφέρον επικεντρώνεται γύρω από εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μέσα μεταφοράς και κυρίως σε ελικόπτερα, πλοία και υποβρύχια. Ωστόσο, όσον αφορά τα πλοία, όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχουν ακόμη ανασταλτικοί παράγοντες για την ανάπτυξης ενός συστήματος ανάκτησης ενέργειας που έχουν να κάνουν με την επένδυση χρόνου και χρήματος για την εκπαίδευση του προσωπικού σε αυτή τη νέα τεχνολογία.

3.3 Μοντελοποίηση θερμοστοιχείου

Η τάση εξόδου ενός θερμοστοιχείου μεγαλώνει όσο μεγαλώνει η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο πλακών του, εξαρτώμενη πάντα από το συντελεστή Seebeck. Η σχέση είναι:

$$V_{OC,TEG} = a(T_H - T_C) \quad (2.2)$$

όπου $V_{OC,TEG}$ τάση ανοιχτού κυκλώματος του θερμοστοιχείου.

Αν υπάρχει εξωτερικό φορτίο R_o , το ρεύμα που ρέει είναι το I_{TEG} :

$$I_{TEG} = \frac{V_{OC,TEG}}{R_{in,TEG} + R_o} = \frac{a(T_H - T_C)}{R_{in,TEG} + R_o} \quad (2.3)$$

όπου $R_{in,TEG}$ είναι η παρασιτική εσωτερική αντίσταση του θερμοστοιχείου.

Οπότε η τάση στα άκρα του στοιχείου είναι V_{TEG} :

$$V_{TEG} = V_{OC,TEG} - I_{TEG}R_{in,TEG} = \frac{a(T_H - T_C)}{\frac{R_o}{R_{in,TEG}} + 1} \cdot \frac{R_o}{R_{in,TEG}} \quad (2.4)$$

Η ισχύς είναι P_{TEG} :

$$P_{TEG} = I_{TEG}^2 R_o = \frac{a^2(T_H - T_C)^2}{R_{in,TEG}} \cdot \frac{\frac{R_o}{R_{in,TEG}}}{\left(\frac{R_o}{R_{in,TEG}} + 1\right)^2} \quad (2.5)$$

Για δεδομένη θερμοκρασιακή διαφορά η ισχύς εξόδου του θερμοστοιχείου, P_{TEG} , μεγιστοποιείται για $\frac{R_o}{R_{in,TEG}} = 1$, όταν δηλαδή η εσωτερική αντίσταση του στοιχείου ισούται με την εξωτερική αντίσταση. Αυτό είναι το Σημείο Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point). Η τάση, το ρεύμα, η ισχύς στην έξοδο και το φορτίο εξόδου συμβολίζονται ως $V_{MPP,TEG}$, $I_{MPP,TEG}$, $P_{MPP,TEG}$, $R_{MPP,TEG}$, αντίστοιχα. Επίσης, οι μέγιστες τιμές της τάσης και του ρεύματος του θερμοστοιχείου, όπως φαίνεται στις σχέσεις (2.4) και (2.3), είναι η τάση

ανοιχτού κυκλώματος $V_{OC,TEG}$ και $I_{SC,TEG}$ και απαντώνται όταν στα άκρα του θερμοστοιχείου υπάρχει βραχυκύκλωμα ή μηδενική αντίσταση εξόδου R_o , αντίστοιχα.

Σχετικά με το θερμικό μέρος του στοιχείου, ο ρυθμός της θερμότητας που απορροφάται από την θερμή πλευρά Q_H και εκλύεται στην ψυχρή πλευρά Q_C αντίστοιχα περιγράφεται ως εξής:

$$Q_H = \alpha T_H I_{TEG} - \frac{1}{2} I_{TEG}^2 R_{in,TEG} + \kappa (T_H - T_C) \quad (2.6)$$

$$Q_C = \alpha T_H I_{TEG} + \frac{1}{2} I_{TEG}^2 R_{in,TEG} + \kappa (T_H - T_C) \quad (2.7)$$

Εφαρμόζοντας τον 1^ο νόμο της θερμοδυναμικής, η παραγόμενη ισχύς είναι:

$$P_{TEG} = Q_H - Q_C = \alpha I_{TEG} (T_H - T_C) - I_{TEG}^2 R_{in,TEG} \quad (2.8) \quad \eta \quad \text{οποία}$$

ισούται με την ισχύ από την σχέση (2.5).

Βάσει των παραπάνω εξισώσεων αναπτύσσεται το μοντέλο για το θερμοστοιχείο. Η μοντελοποίηση του θερμοστοιχείου περιλαμβάνει ηλεκτρικό και θερμικό μέρος. Αρχικά, όσον αφορά το ηλεκτρικό μέρος, για την ανάλυση απαιτείται ένα ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin με μία πηγή $V_{OC,TEG}$ και μία αντίσταση $R_{in,TEG}$ [25] [26][27][28][29]. Σχετικά με την μοντελοποίηση του θερμικού μέρους, αυτό γίνεται με ηλεκτρικό ανάλογο όταν λειτουργεί ως ψυκτικό μέσο, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω στο μοντέλο της παρούσας εργασίας. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν αναλύσεις μέσω θεωρητικών μαθηματικών μοντέλων [30] ή μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων (finite element method - FEM) [14].

3.4 Μελέτη συνδεδεμένων θερμοστοιχείων

Οι TEG παράγουν χαμηλή τάση και ισχύ, της τάξεως λίγων Volts και δεκάδων Watts. Έτσι, προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο τάσης δημιουργούνται συστοιχίες θερμοστοιχείων συνδεδεμένων εν σειρά καθώς και συστοιχίες συνδεδεμένες παράλληλα προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο ισχύος. Οι υπολογισμοί για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης εξαρτώνται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και με την προϋπόθεση ότι σε κάθε θερμοστοιχείο υπάρχει η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά εκατέρωθεν των πλευρών του.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η διάταξη που έχει επιλεγεί και θα παρουσιαστεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο αποτελείται από 8 θερμοστοιχεία (modules) σε σειρά και κατόπιν αυτή η αλυσίδα (string) θερμοστοιχείων συνδέεται εν παραλλήλω με άλλη μία όμοια αλυσίδα, αποτελώντας μία συστοιχία (array). Στη συνολική διάταξη συνδέονται σε σειρά 4 arrays έχοντας θεωρητική τάση ανοιχτού κυκλώματος 36 V. Το εμπορικό μοντέλο που έχει επιλεγεί για την εργασία είναι το PBTAGS-200:009A4, Solostate Power Generators της εταιρείας TECTEG. Προκειμένου να εξεταστεί λεπτομερέστερα η συγκεκριμένη διάταξη με τη διασύνδεση της στο μικροδίκτυο ενός πλοίου, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί ένα μοντέλο προσομοίωσης που να περιλαμβάνει τα θερμοστοιχεία που έχουν επιλεγεί, καθώς και τη διάταξη ανύψωσης τάσης και διασύνδεσης. Το μοντέλο προσομοίωσης θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Θεωρείται ότι τα συνδεδεμένα θερμοστοιχεία είναι πανομοιότυπα, καθώς και ότι η θερμοκρασιακή διαφορά είναι ίδια κατά μήκος της διάταξης. Κάτω από αυτές τις ιδανικές συνθήκες λοιπόν είναι εφικτό να δημιουργηθεί ένα απλοποιημένο μοντέλο Thevenin με το οποίο θα προσομοιώνεται η σύνδεση πολλών θερμοστοιχείων σε σειρά ή παράλληλα. Στην εργασία αποδεικνύεται ότι υπό αυτές τις ιδανικές συνθήκες τα θερμοστοιχεία λειτουργούν ως συνδεδεμένες πηγές σε σειρά ή παράλληλα, αντίστοιχα.

Συγκεκριμένα, όταν N θερμοστοιχεία είναι συνδεδεμένα εν σειρά, αυξάνεται η τάση $V_{OC,TEG}$, καθώς και η εσωτερική αντίσταση $R_{in,TEG}$ κατά N φορές. Αντίστοιχα, όταν K θερμοστοιχεία συνδέονται παράλληλα, η συνολική εσωτερική αντίσταση μειώνεται κατά K φορές. Επομένως για διάταξη που περιέχει N θερμοστοιχεία σε σειρά και K παράλληλα μπορεί να δημιουργηθεί ένα μοντέλο με $V_{OC,SYSTEM} = N \cdot V_{OC,TEG}$ και $R_{in,SYSTEM} = R_{in,TEG} \cdot (N/K)$, όπου $V_{OC,SYSTEM}$ και $R_{in,SYSTEM}$ η τάση ανοιχτού κυκλώματος και η εσωτερική αντίσταση της συνολικής διάταξης, αντίστοιχα.

3.5 Έλεγχος MPPT

3.5.1 Εισαγωγή στους MPPT

Ο έλεγχος MPPT είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι σε θερμοηλεκτρικές και Φ/Β συστοιχίες, καθώς παίζει καθοριστικό ρόλο για την λειτουργία τους στο σημείο μέγιστης ισχύος, άρα και για τη μέγιστη απόδοσή τους, όπως έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως. Αυτό έχει προκαλέσει την ανάπτυξη και εφαρμογή πολλών τεχνικών, οι οποίες διαφέρουν σε ότι αφορά την πολυπλοκότητα, την ταχύτητα σύγκλισης στο σημείο λειτουργίας, τον απαιτούμενο εξοπλισμό, τον αριθμό των απαιτούμενων μετρητικών οργάνων και το εύρος αποτελεσματικότητας.

Ο σκοπός για κάθε τεχνική που εφαρμόζεται είναι η εύρεση του σημείου στο οποίο πρέπει να λειτουργεί η εκάστοτε ώστε να παράγεται η μέγιστη ισχύς P_{mpp} για δεδομένες συνθήκες λειτουργίας. Για τις TEGs, όπως και για τις Φ/Β, η ισχύς εξόδου δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από το φορτίο που τροφοδοτείται στην έξοδο, δηλαδή την τιμή της αντίστασης που βρίσκεται στα άκρα τους. Όταν η αντίσταση της εξόδου είναι άπειρη (ανοιχτό κύκλωμα), τότε στα άκρα της συστοιχίας λαμβάνεται η μέγιστη τάση V_{oc} , ενώ για μηδενική τιμή αντίστασης (βραχυκύκλωμα) η τάση είναι μηδενική και το ρεύμα είναι το μέγιστο I_{sc} . Για τις ενδιάμεσες τιμές αντίστασης η παραγόμενη ισχύς προκύπτει από το γινόμενο του ζεύγους τάσης ρεύματος και για συγκεκριμένη τιμή τάσης-έντασης μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου. Για θερμοηλεκτρική συστοιχία το σημείο αυτό διαφέρει, ανάλογα με τις συνθήκες διαφοράς θερμοκρασίας. Ως εκ τούτου είναι επιθυμητό κάθε συστοιχία TEGs να λειτουργεί υπό τις εκάστοτε τιμές για τις οποίες αποδίδεται η μέγιστη ισχύς.

3.5.2 Αλγόριθμοι MPPT

Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι MPPT είναι οι παρακάτω:

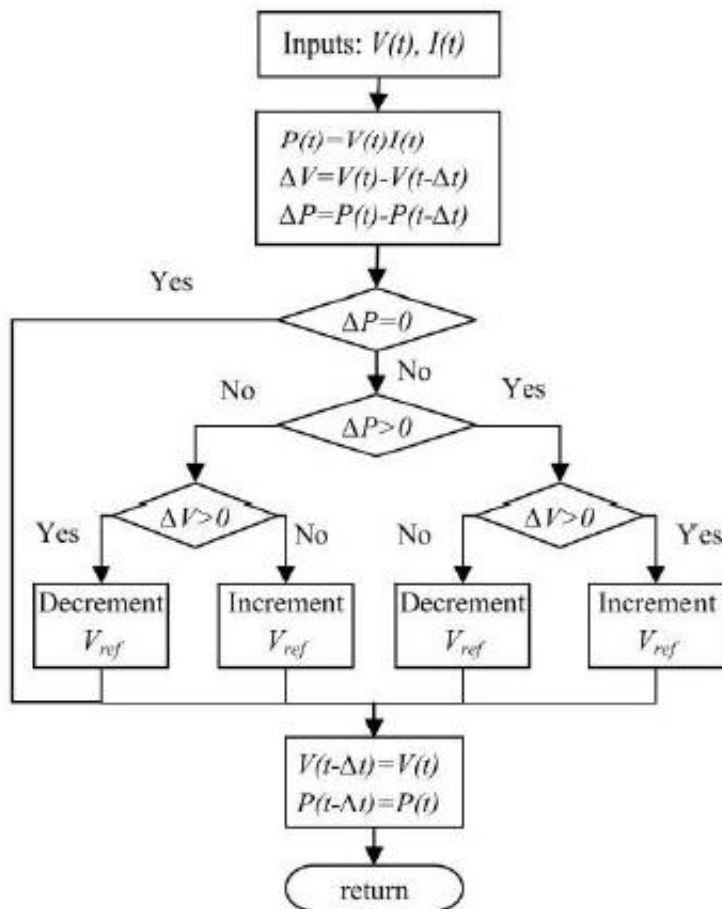
- Διαταραχής και παρατήρησης (Perturb and Observe – P&O)
- Αυξητικής αγωγιμότητας (Incremental Conductance – InC)
- Μέθοδοι τάσης ανοιχτού κυκλώματος και ρεύματος βραχυκύκλωσης

Ωστόσο για τον έλεγχο της ισχύος εξόδου ενός TEG ή ενός Φ/Β, επιπλέον, χρησιμοποιούνται μέθοδοι οι οποίες προκύπτουν από τα επιστημονικά πεδία των νευρωνικών δικτύων και του ελέγχου ασαφούς λογικής. Επιπρόσθετα, υπάρχουν περιπτώσεις, που η εκάστοτε γεννήτρια είναι επιθυμητό να λειτουργεί σε ένα σημείο της καμπύλης P-V διαφορετικό από αυτό του σημείου μέγιστης ισχύος.

3.5.2.1 Διαταραχής και παρατήρησης (Perturb and Observe – P&O)

Ο αλγόριθμος P&O είναι ο πιο διαδεδομένος με ευρεία χρήση σε πλήθος εφαρμογών. Το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4. Όπως φαίνεται σε αυτό, αρχικά μετράται το ρεύμα και η τάση εξόδου και υπολογίζεται η ισχύς. Εν συνεχεία, μέσω του λόγου κατάτμησης μεταβάλλεται η τάση σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση και υπολογίζεται ξανά η ισχύς. Αν η νέα ισχύς είναι μεγαλύτερη της προηγούμενης, τότε το σημείο μέγιστης ισχύος θα βρεθεί μεταβάλλοντας την τάση προς την ίδια κατεύθυνση. Σε περίπτωση που η νέα ισχύς είναι μικρότερη, τότε η τάση μεταβάλλεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Μετά από πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου επιτυγχάνεται η εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος.

Η μέθοδος διαταραχής και παρατήρησης δεν σταματά ποτέ στο σημείο μέγιστης ισχύος, αλλά συνεχίζει να ταλαντώνεται γύρω από αυτό, καθώς μεταβάλλεται συνεχώς η τάση εξόδου. Όταν φτάσει στο σημείο μέγιστης ισχύος, η μεταβολή της τάσης θα οδηγήσει σε μείωση της ισχύος οπότε και αλλαγή της κατεύθυνσης μεταβολής της, το οποίο θα επαναληφθεί και από την αντίθετη κατεύθυνση κ.ο.κ. Η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου στο σημείο MPP εξαρτάται από το βήμα μεταβολής του λόγου κατάτμησης, και κατ'επέκταση της τάσης. Μεγαλύτερο βήμα θα σήμαινε μεν ταχύτερη απόκριση αλλά θα προκαλούσαν μεγαλύτερες ταλαντώσεις γύρω από το σημείο MPP, με άμεση συνέπεια μειωμένη ισχύ. Αντίστοιχα, με μικρότερο βήμα επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια γύρω από το σημείο MPP αλλά θα υπήρχε μείωση στον χρόνο απόκρισης. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό, έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι P&O μεταβλητού βήματος. Όταν το σημείο λειτουργίας απέχει αρκετά από το σημείο MPP χρησιμοποιείται μεγαλύτερο βήμα, ενώ όταν βρίσκεται κοντά, το βήμα μειώνεται προκειμένου να μειωθεί και το εύρος της ταλάντωσης γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος.



Σχήμα 3.3. Διάγραμμα ροής της μεθόδου MPPT&O.

3.5.2.2 Αυξητικής αγωγιμότητας (Incremental Conductance – InC)

Η μέθοδος της αυξητικής αγωγιμότητας βασίζεται στο γεγονός ότι η κλίση dP/dV της καμπύλης P-V ενός TEG ή ενός Φ/Β (Σχήμα 2.5) είναι θετική ή αρνητική όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ για } V < V_{MPP} \tag{2.9}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ για } V > V_{MPP} \tag{2.10}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ για } V = V_{MPP} \tag{2.11}$$

Ωστόσο γνωρίζοντας ότι $P=VI$, η κλίση dP/dV μπορεί να εκφραστεί ως:

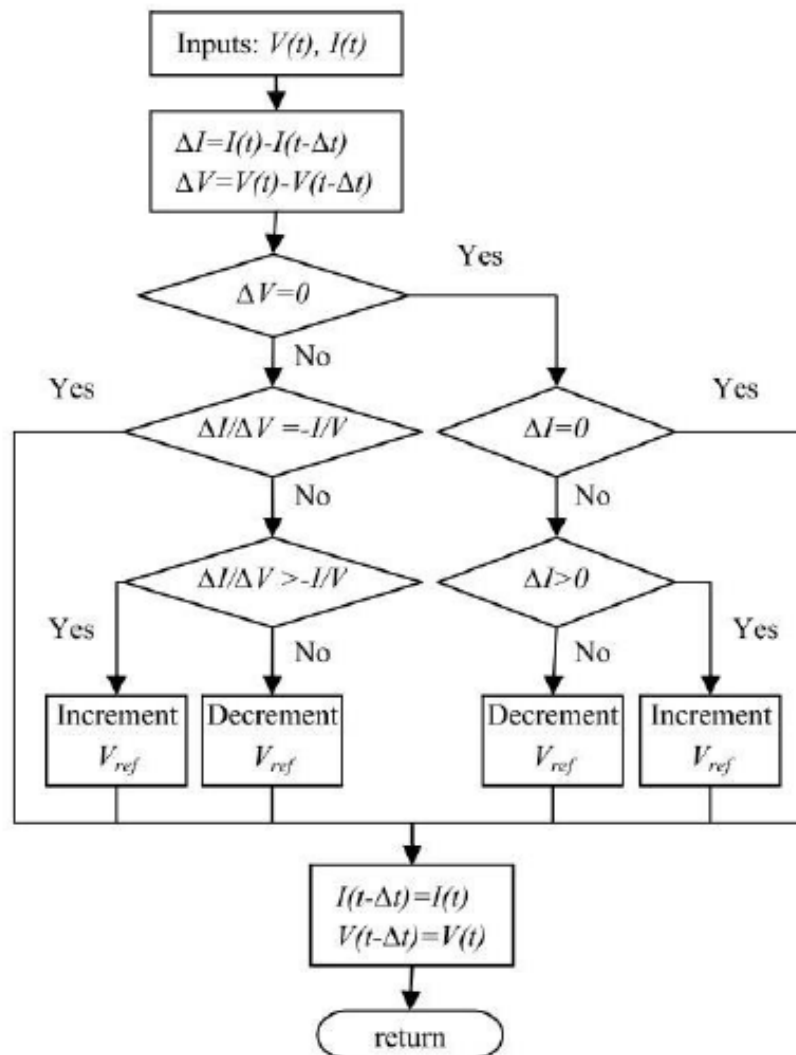
$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \tag{2.12}$$

Συνεπώς οι εξισώσεις (2.9)-(2.11) μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \text{ για } V < V_{MPP} \tag{2.13}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \text{ για } V > V_{MPP} \tag{2.14}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \gamma \alpha V = V_{MPP} \quad (2.15)$$



Σχήμα 3.4. Διάγραμμα ροής της μεθόδου MPPTInC.

Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοιας λογικής με τη μέθοδο P&O, καθώς αμφότερες βασίζονται στην σάρωση τμήματος της καμπύλης (hill climbing algorithms). Λόγω του ότι είναι ιδιαίτερος απίθανο ο αλγόριθμος InC να σταματήσει ακριβώς στο σημείο MPP, θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί η εύρεση του, όταν το σημείο λειτουργίας κινείται μέσα σε ένα συγκεκριμένο περιθώριο σφάλματος e_{InC} :

$$\left| I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \right| < e_{InC} \quad (2.16)$$

Έτσι, είναι εύλογο ότι το μέγεθος του βήματος δε μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το περιθώριο σφάλματος, ώστε να μην προσπεραστεί το MPP. Αυτό επηρεάζει την ταχύτητα απόκρισης του αλγορίθμου, οπότε στους αλγόριθμους InC χρησιμοποιείται επίσης μεταβλητό βήμα σε πλήθος εφαρμογών, ώστε να βελτιωθεί η συμπεριφορά του σε μόνιμη κατάσταση ή σε δυναμικές μεταβολές [34].

3.5.2.3 Μέθοδοι τάσης ανοιχτοκυκλώματος και ρεύματος βραχυκύκλωσης

Η μέθοδος τάσης ανοιχτού κυκλώματος (FOCV) βασίζεται στην παρατήρηση ότι η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος είναι ένα ποσοστό k_{FOCV} της τάσης ανοιχτοκυκλώματος, δηλαδή:

$$V_{MPP} = k_{FOCV} V_{OC} \quad (2.19)$$

Ομοίως, για τη μέθοδο ρεύματος βραχυκύκλωσης (FSCC), και αυτή στηρίζεται στην παρατήρηση ότι το ρεύμα στο MPP είναι ένα ποσοστό k_{FSCC} του ρεύματος βραχυκύκλωσης, δηλαδή:

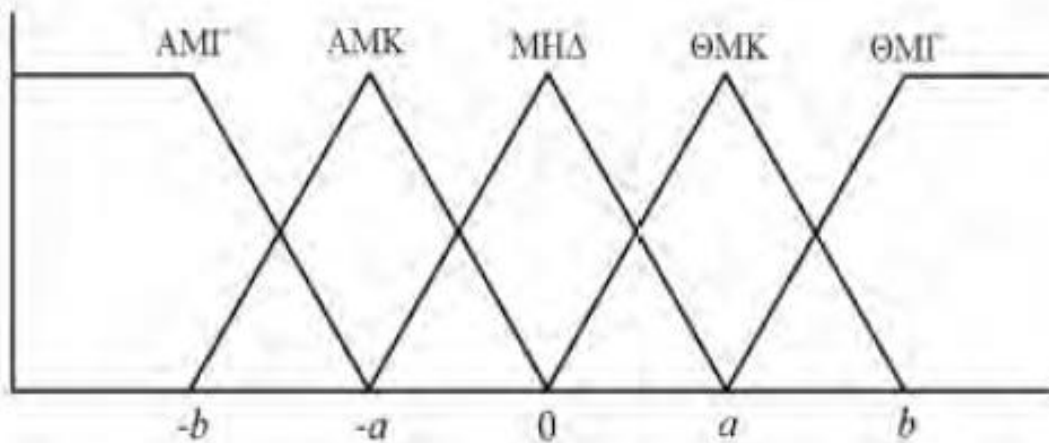
$$I_{MPP} = k_{FSCC} I_{SC} \quad (2.20)$$

Για τα Φ/Β, το k_{FOCV} βρίσκεται σε ένα εύρος μεταξύ του 71%-78%, ενώ το k_{FSCC} βρίσκεται μεταξύ του 78%-92% και μπορεί να αλλάζει ανά Φ/Β στοιχείο. Εξαιτίας αυτού, απαιτείται ο εξαρχής πειραματικός προσδιορισμός των ποσοστών αυτών για τα Φ/Β. Επιπλέον, ένα ακόμη μειονέκτημα για τη χρήση αυτών των μεθόδων είναι ότι θα πρέπει να διακόπτεται περιοδικά η αναζήτηση του μεγίστου, προκειμένου να γίνεται η μέτρηση των V_{OC} και I_{SC} , το οποίο οδηγεί προφανώς στον μηδενισμό της ισχύος εξόδου κατά τα διαστήματα αυτά. Το πλήθος των διακοπών αυτών μπορεί να μειωθεί, αυξάνοντας το χρονικό διάστημα μεταξύ αυτών των μετρήσεων. Έτσι, οι μέθοδοι αυτές δεν συναντώνται συχνά σε Φ/Β συστήματα.

Αντίθετα, για τις TEGs παρατηρείται ιδιαίτερως διευρυμένη χρήση τους και κυρίως της μεθόδου FOCV. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι το MPP απαντάται για τάση και ρεύμα λειτουργίας που είναι ακριβώς το 50% της V_{OC} και του I_{SC} αντίστοιχα, το οποίο είναι ανεξάρτητο από τις υπόλοιπες συνθήκες λειτουργίας. Παρ' όλα αυτά, συνεχίζει να υφίσταται το πρόβλημα της περιοδικής διακοπής παραγωγής ισχύος και είναι απαραίτητη η προσεκτική επιλογή της συχνότητας διακοπής.

3.5.2.4 Έλεγχος ασαφούς λογικής

Η χρήση της ασαφούς λογικής έχει γνωρίσει ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια καθώς δύναται να λειτουργήσει με ανακριβείς εισόδους και δεν χρειάζεται ένα ακριβές μαθηματικό μοντέλο. Επιπρόσθετα, η ανάπτυξη των μικροελεγκτών δημιούργησε ευνοϊκές συνθήκες για τη χρήση του ελέγχου αυτού στην εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος.



Σχήμα 3.5: Συνάρτηση συμμετοχής εισόδων και εξόδων ελεγκτή ασαφούς λογικής.

Ο ασαφής έλεγχος διακρίνεται σε τρία στάδια. Αυτά αποτελούν η ασαφοποίηση, το σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων και η αποσαφοποίηση. Στην ασαφοποίηση, οι αριθμητικές μεταβλητές εισόδου του ελεγκτή μετατρέπονται σε λεκτικές, σύμφωνα με μία συνάρτηση όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Στο Σχήμα 2.7 έχουμε πέντε ασαφή επίπεδα, τα οποία είναι: AMΓ (αρνητικά μεγάλο), AMK (αρνητικά μικρό), ΜΗΔ (μηδέν), ΘΜΚ (θετικά μικρό), ΘΜΓ (θετικά μεγάλο). Ανάλογα με το εύρος τιμών της αριθμητικής μεταβλητής καθορίζονται οι τιμές a , b του Σχήματος 2.7.

Οι εισοδοί του ασαφούς ελέγχου είναι ένα σφάλμα E και η αντίστοιχη μεταβολή ΔE . Το σφάλμα μπορεί να επιλεγεί από το σχεδιαστή, αλλά συνήθως αυτό που επιλέγεται είναι το $\Delta P/\Delta V$, επειδή στο MPP είναι μηδέν. Τότε τα E και ΔE ορίζονται ως εξής:

$$E = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (2.17)$$

$$\Delta E = E(k) - E(k-1) \quad (2.18)$$

Η τιμή της λεκτικής μεταβλητής εξόδου, η οποία συνήθως είναι η αλλαγή του λόγου κατάτμησης του μετατροπέα ισχύος, καθορίζεται σύμφωνα με τον πίνακα του Σχήματος 2.8.

ΔE E	ΑΜΓ	ΑΜΚ	ΜΗΔ	ΘΜΚ	ΘΜΓ
ΑΜΓ	ΜΗΔ	ΜΗΔ	ΑΜΓ	ΑΜΓ	ΑΜΓ
ΑΜΚ	ΜΗΔ	ΜΗΔ	ΑΜΚ	ΑΜΚ	ΑΜΚ
ΜΗΔ	ΑΜΚ	ΜΗΔ	ΜΗΔ	ΜΗΔ	ΘΜΚ
ΘΜΚ	ΘΜΚ	ΘΜΚ	ΘΜΚ	ΜΗΔ	ΜΗΔ
ΘΜΓ	ΘΜΓ	ΘΜΓ	ΘΜΓ	ΜΗΔ	ΜΗΔ

Σχήμα 3.6. Πίνακας κανόνων.

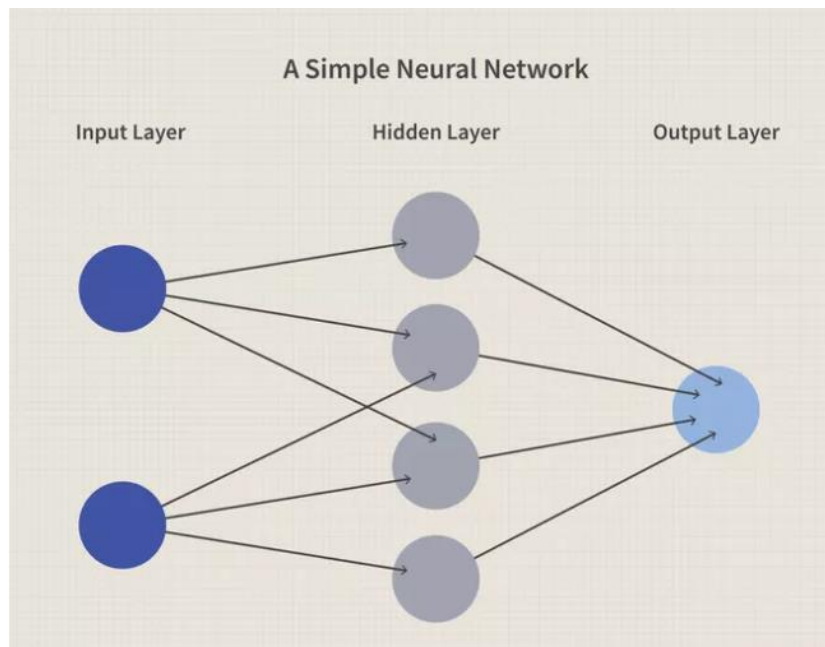
Ο πίνακας κανόνων καθορίζεται από τον μετατροπέα και την κρίση του σχεδιαστή. Η καλύτερη κατανόηση του παραπάνω πίνακα θα γίνει με τη χρήση ενός παραδείγματος. Αν το σημείο λειτουργίας είναι αρκετά μακριά, προς τα δεξιά από το MPP, τότε το E είναι ΑΜΓ και το ΔE είναι ΜΗΔ. Επομένως για να φτάσει στο MPP η τάση πρέπει να μειωθεί και έτσι το ΔV να είναι ΑΜΓ για να μετακινήσει το σημείο λειτουργίας προς το MPP.

Στο τελικό στάδιο της ασαφопоίησης, χρησιμοποιείται ξανά η συνάρτηση συμμετοχής, αλλά αντίστροφα, καθώς εδώ η έξοδος του ασαφούς ελεγκτή μετατρέπεται από λεκτική σε αριθμητική, αποδίδοντας το αναλογικό σήμα που θα ελέγξει την αγωγή του μετατροπέα, και θα οδηγήσει το σύστημα στο MPP.

Σημαντικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η μεγάλη ταχύτητα σύγκλισης καθώς και οι μικρές ταλαντώσεις γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος. Αντίθετα, το μειονέκτημα τους έγκειται στο γεγονός ότι η επίδοση τους εξαρτάται από τις γνώσεις και την εμπειρία του σχεδιαστή στην επιλογή κατάλληλης σχέσης σφάλματος και στον καθορισμό του πίνακα κανόνων.

3.5.2.5 Έλεγχος ισχύος με νευρωνικά δίκτυα

Η εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος με τη χρήση νευρωνικών δικτύων αποτελεί μία όμορη μέθοδο με αυτή του έλεγχου ασαφούς λογικής. Όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 2.9 αποτελούνται από τρία επίπεδα, τα οποία είναι το επίπεδο εισόδου, το κρυφό επίπεδο και το επίπεδο εξόδου. Το πλήθος των κόμβων διαφέρει με την εφαρμογή και με την κρίση του σχεδιαστή.



Σχήμα 3.7. Νευρωνικό δίκτυο [37].

Οι μεταβλητές εισόδου μπορεί να είναι οι παράμετροι της θερμοηλεκτρικής ή Φ/Β γεννήτριας, δηλαδή η τάση ανοιχτοκύκλωσης και το ρεύμα βραχυκύκλωσης, V_{oc} και I_{sc} αντίστοιχα, καθώς επίσης και τις θερμοκρασιακές συνθήκες εσωτερικά και εξωτερικά του αγωγού καυσαερίων ή της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας για την περίπτωση Φ/Β. Η έξοδος του νευρωνικού δικτύου μπορεί να είναι ένα ή και περισσότερα σήματα αναφοράς, όπως το σήμα του λόγου κατάτμησης ή το σήμα της τάσης αναφοράς του μετατροπέα.

Η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται στο κρυφό επίπεδο, αλλά και το επίπεδο της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, οι σύνδεσμοι των κόμβων σημαίνονται με βάρη τα οποία συμβολίζονται ως w_{ij} . Τα βάρη αυτά προσδιορίζονται μέσω μακροχρόνιας διαδικασίας εκπαίδευσης. Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης η συστοιχία ελέγχεται για μεγάλο διάστημα και ελέγχονται οι σχέσεις μεταξύ των εισόδων και εξόδων του νευρωνικού δικτύου.

Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι τα δεδομένα κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης πρέπει να είναι συγκεκριμένα για κάθε συστοιχία που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Ωστόσο, το γεγονός ότι τα δεδομένα για κάθε συστοιχία μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το μοντέλο ή ακόμα και με την πάροδο του χρόνου, καθιστά αναγκαία την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων ανά τακτά χρονικά διαστήματα [38].

3.5.2.6 Λειτουργία σε σημείο διαφορετικό του MPP

Ανεξαρτήτως του γεγονότος ότι η εύρεση του MPP είναι το κύριο ζητούμενο για πολλές εφαρμογές, υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις στις οποίες το σύστημα πρέπει να λειτουργεί σε ένα σημείο διαφορετικό από αυτό της μέγιστης ισχύος. Αυτές οι περιπτώσεις για τις οποίες συμβαίνει αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά και δεν δίνεται μεγαλύτερο βάρος, καθώς δεν θα μελετηθεί κάποια εξ αυτών στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Μερικές από αυτές περιλαμβάνουν συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που περιέχουν εγκαταστάσεις ΑΠΕ, είτε αυτές είναι σε αυτόνομη λειτουργία είτε διασυνδεδεμένες με το δίκτυο.

Ένα αυτόνομο σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερες από μία εναλλακτικές πηγές ενέργειας και επιπλέον περιέχει φορτία και συσσωρευτές. Συνήθως, σε αυτά τα συστήματα επιζητείται η λειτουργία των μονάδων ώστε να παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς για την κάλυψη των φορτίων και την φόρτιση των συσσωρευτών. Ωστόσο, όταν η ζήτηση είναι χαμηλή και επιπλέον το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών είναι υψηλό, τότε απαιτείται ένα σημείο λειτουργίας στο οποίο διατηρείται σταθερή η τάση των συσσωρευτών. Επιπλέον, σε ορισμένα συστήματα δεν είναι επιθυμητή η χρήση συσσωρευτών ή απαιτείται η ελαχιστοποίησή τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις η παραγόμενη ισχύς θα πρέπει να ανταποκρίνεται ακριβώς στη ζήτηση, η οποία μπορεί να αντιστοιχεί σε κάποια ισχύ P_{ref} , μικρότερη από τη μέγιστη.

Σχετικά με τα διασυνδεδεμένα συστήματα, λαμβάνεται υπόψη ότι ένα μεγάλο ποσοστό διείσδυσης των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας, συνεπάγεται την παραμονή αυτών στο δίκτυο σε περιπτώσεις σφάλματος για ορισμένο χρονικό διάστημα (fault ride through capability), κατά το οποίο οφείλουν να υποστηρίζουν το δίκτυο. Αυτό παραπέμπει στη συμπεριφορά των σύγχρονων γεννητριών οι οποίες σε περίπτωση πτώσης τάσης, κατά τη διάρκεια της διαταραχής, παραμένουν στο δίκτυο και συμβάλλουν με μεγαλύτερο ρεύμα από το ονομαστικό τους. Έτσι, σε συνθήκες σφάλματος ο έλεγχος στους μετατροπείς θα πρέπει να αλλάζει ώστε να παρέχεται επιπλέον άεργος ισχύς για την υποστήριξη της τάσης. Παράλληλα όμως θα πρέπει να ρυθμίζεται η ενεργός ισχύς, ώστε η φαινόμενη ισχύς, άρα και το ρεύμα, να μην ξεπερνά τα όρια για τα οποία είναι σχεδιασμένος ο μετατροπέας. Λόγου χάρη, αν στο δίκτυο απαιτείται μία αύξηση της αέργου ισχύος, θα πρέπει να μειωθεί αντίστοιχα η ενεργός ισχύς. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα δεν θα λειτουργεί στο σημείο MPP, αλλά σε ένα σημείο με βάση μία ισχύ αναφοράς P_{ref} , μικρότερη από αυτή της P_{MPP} .

Επίσης, η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτεί αναδιοργάνωση της συνολικής υποδομής των δικτύων προκειμένου να παρέχεται υψηλής ποιότητας ηλεκτρική ενέργεια, καθώς επιπλέον υποστήριξη της τάσης και της συχνότητας. Οι πιο συνήθεις λύσεις σε αυτά τα προβλήματα που προκύπτουν έχουν να κάνουν με την αναβάθμιση των δικτύων και την

εγκατάσταση επιπλέον γεννητριών για αντιστάθμιση της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, καθώς δημιουργούνται προβλήματα εξαιτίας του μη σταθερού χαρακτήρα τους. Αυτές οι λύσεις είναι ιδιαίτερα υψηλού κόστους ή είναι περιβαλλοντικά μη επιθυμητές.

Το πλοίο αποτελεί φυσικά ένα αυτόνομο σύστημα μεγάλης κλίμακας σε σχέση με άλλα μέσα μεταφοράς και με τη συμμετοχή επιπλέον μορφών ενέργειας είναι ένα εν δυνάμει μικροδίκτυο. Αυτό συνεπάγεται ότι οι παραπάνω περιπτώσεις είναι πιθανόν να προκύψουν και σε αυτό το μεταφορικό μέσο. Ωστόσο, δεν θα γίνει περαιτέρω μελέτη επί αυτών των σχημάτων ελέγχου, καθώς δεν εμπίπτουν στα πλαίσια του σκοπού της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Κεφάλαιο 4

4. Αυτοματισμοί και συστήματα προστασίας

4.1 Έξυπνοι διακόπτες ισχύος

Με την ολοένα ανάπτυξη του συστήματος διανομής τόσο των πλοίων, μεταβαίνοντας στη περίοδο του εξηλεκτρισμού όσο και γενικότερα στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, αυξάνεται η ανάγκη εγκατάστασης έξυπνων διακοπών ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιοι διακόπτες είναι ικανοί να αντικαταστήσουν τους συμβατικούς διακόπτες που χρησιμοποιούνται στα εναλλασσόμενα και συνεχή μικροδίκτυα και αποτελούνται από μηχανικά μέρη, με έξυπνους διακόπτες που αποτελούνται από ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται διακόπτες στερεάς καταστάσεις. Οι εγκατάστασή τους εξυπηρετεί τους παρακάτω σκοπούς:

Στόχος / λειτουργίες επιπέδου διανομής υψηλής τάσης (HVDC)

- Παροχή των απαραίτητων λειτουργιών ελέγχου, συμπεριλαμβανομένης της «έξυπνης» διαχείρισης φορτίου για να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική χρήση της διαθέσιμης ισχύος.
- Αυτόματη αναδιάταξη του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ισχύος κατά τη διάρκεια συνθηκών διακοπής ρεύματος εξασφαλίζοντας ότι οι παροχές στα φορτία υψηλής τάσης (HVDC) των αεροσκαφών διατηρούνται στο κατάλληλο κρίσιμο επίπεδο ασφάλειας και εντός των απαιτούμενων προδιαγραφών.
- Υλοποίηση αξιόπιστου σχήματος προστασίας έναντι υπερφόρτωσης, τόξου σφάλματος κλπ.
- Δυνατότητα χειρισμού των κατανεμημένων φορτίων στις HVDC παροχές, σύμφωνα με τις αποφάσεις της «έξυπνης» διαχείρισης φορτίου.
- Αξιοποίηση των διακοπών SiC στερεάς κατάστασης ως κύριο μηχανισμό ελέγχου και προστασίας του επιπέδου διανομής HVDC.

Στόχοι / λειτουργίες επιπέδου διανομής χαμηλής τάσης (LVDC)

- Μετατροπή τάσης HVDC/LVDC και διαμόρφωση του LVDC επιπέδου βάσει των προτύπων MIL-STD-704F και RTCA DO-160G.
- Παροχή προστασίας του δικτύου LVDC έναντι υπέρτασης, υπερφόρτωσης, βραχυκυκλώματος, τόξου σφάλματος κλπ.
- Διανομή ισχύος και αυτόματη αναμόρφωση του συστήματος διανομής σε συνθήκες σφάλματος.
- Δυνατότητα χειρισμού των κατανεμημένων φορτίων στις LVDC παροχές, σύμφωνα με τις αποφάσεις της «έξυπνης» διαχείρισης φορτίου.

Οι παραπάνω στόχοι και οι λειτουργίες θα ενσωματωθούν στο καινοτόμο σύστημα διανομής ηλεκτρικού ρεύματος που θα αναπτυχθεί στο πλαίσιο του έργου αυτού με βάση τη χρήση των SiC SSPCs. Ο σχεδιασμός και η συσκευασία των SiC SSPCs - από πλευράς επιλογής ημιαγωγών ισχύος, θερμικής διαχείρισης, ανάκτησης δεδομένων, επικοινωνίας και ελέγχου - είναι ένα σημαντικό μέρος αυτού του έργου. Επιπλέον, περιλαμβάνονται ο σχεδιασμός και η κατασκευή του Έξυπνου Κέντρου Διαχείρισης Ισχύος και η ανάπτυξη του απαραίτητου λογισμικού. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί κατά τη διάρκεια της σχεδίασης υλικού / λογισμικού, προκειμένου να επιτευχθεί σπονδυλωτή δομή και επεκτασιμότητα. Με αυτόν τον τρόπο, οι νέες λειτουργίες θα μπορούν να ενσωματώνονται εύκολα στην αρχιτεκτονική διαχείρισης ισχύος, ενώ το όλο σύστημα θα μπορούσε να υιοθετηθεί από άλλους τύπους αεροσκαφών.

4.2 Ενσωμάτωση των SiC SSPC

Αρχίζοντας από τη φάση του σχεδιασμού, αρχικά καθορίζονται οι τεχνικές παράμετροι ενός SSPC, ενώ ο σχεδιασμός επικεντρώνεται στη δημιουργία ενός SSPC με δυνατότητα λειτουργίας είτε σε HVDC είτε σε LVDC δίκτυο διανομής. Τα κύρια χαρακτηριστικά που θα πρέπει να διαθέτει ο SSPC είναι τα ακόλουθα:

- Χρήση της τεχνολογίας SiC,
- σχεδιασμός με έμφαση στην ευελιξία της ενσωμάτωσής του (Modular, plug n play),
- δυνατότητα προσαρμογής για διάφορους τύπους φορτίων (modularity),
- χαμηλό βάρος, συμπαγής σχεδιασμός (ολοκληρωμένη μονάδα),
- δυνατότητα λήψης των απαραίτητων πληροφοριών / δεδομένων (data acquisition) και επικοινωνία με το υψηλό / κεντρικό επίπεδο προστασίας ή / και με το σύστημα έξυπνης διαχείρισης ισχύος (smart power management),
- υλοποίηση ενός ευέλικτου συστήματος προστασίας, μέσω σχημάτων έξυπνης διαχείρισης των φορτίων (smart load management),
- δυνατότητα συνεργασίας με RCCBs (οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα συμβατικά συστήματα προστασίας ή και επικουρικά με τους SSPCs), όπως και με οποιαδήποτε άλλη συσκευή προστασίας που μπορεί να συμπεριληφθεί στον τελικό σχεδιασμό,
- προστασία έναντι βραχυκυκλωμάτων, υπερφορτίσεων, ρευμάτων διαρροής,
- αποδοτική διαχείριση του ρεύματος μεγάλων επαγωγικών φορτίων, κατά το άνοιγμα του διακόπτη,
- δυνατότητα χρήσης αλγόριθμου ομαλής εκκίνησης (soft starting), κατά τη ζεύξη / σύνδεση φορτίων.

4.3 Έξυπνη διαχείριση ισχύος (SPM)

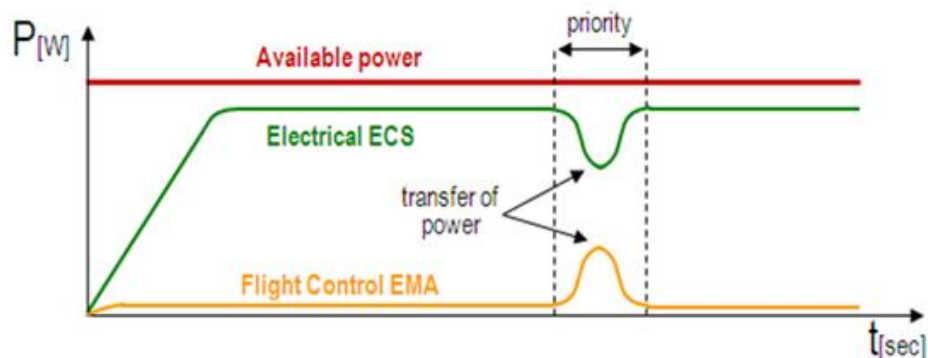
Μια σημαντική τάση στην ανάπτυξη αεροσκαφών είναι η δυναμική διαχείριση των πηγών και των φορτίων. Ο σκοπός του έξυπνου συστήματος διαχείρισης ισχύος (SPMS) του ηλεκτρικού δικτύου ενός αεροσκάφους είναι η διανομή ισχύος από τα συστήματα παραγωγής / μετατροπής ενέργειας (κύρια, έκτακτα, εφεδρικά υποσυστήματα) στα φορτία και τα υποσυστήματα του αεροσκάφους, με ταυτόχρονη εξομάλυνση πιθανών πρόσθετων απαιτήσεων κατανάλωσης ισχύος που προκαλούνται από μεταβατικά φαινόμενα, ηλεκτρικά σφάλματα και γενικότερα από μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα, όπου εφαρμόζεται η απλή απόρριψη των «μη κρίσιμων φορτίων» για την εξισορρόπηση της παραγωγής και της κατανάλωσης, το SPMS μπορεί να ενσωματώσει διαφορετικές λειτουργίες έξυπνης διαχείρισης της ενέργειας, οι οποίες έχουν ήδη εφαρμοστεί με επιτυχία σε άλλες εφαρμογές συστημάτων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα σε μικροδίκτυα.

Τα SPMS διαθέτουν τις ακόλουθες έξυπνες λειτουργίες :

- Μεταβλητές/ρυθμιζόμενες προτεραιότητες. Δεδομένου ότι η προτεραιότητα της διατήρησης ορισμένων φορτίων μπορεί να αλλάξει κατά τη λειτουργία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στρατηγικές ελέγχου με μεταβλητές/ρυθμιζόμενες προτεραιότητες αντί για σταθερές προτεραιότητες, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβαλλόμενη σημασία των φορτίων κατά τη διάρκεια μιας πτήσης. Αυτό μπορεί να αυξήσει τη διαθεσιμότητα των φορτίων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, ενώ τα φορτία μπορούν επιπλέον να καθορίσουν το επίπεδο σπουδαιότητας από μόνα τους. Οι επικοινωνίες μεταξύ μονάδων και τοπικών χαρακτηριστικών ελέγχου φορτίου του SPMS επιτρέπουν τη χρήση των μεταβλητών προτεραιοτήτων,
- επίβλεψη επανασύνδεσης. Σε περίπτωση υπερφόρτισης, αντί να αποβάλλει φορτία, το σύστημα αποτρέπει την επανασύνδεση φορτίων εάν επιτευχθεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να αποκτήσει προηγμένα χαρακτηριστικά, προσθέτοντας προκαθορισμένα βήματα ενεργειών,
- διαχείριση πηγών. Η βέλτιστη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με άλλες μορφές ενέργειας, όπως η θερμότητα, ενσωματώνεται με αποτελεσματικό τρόπο. Η ενέργεια κατανέμεται σε φορτία με μεταβλητή προτεραιότητα ανάλογα με τη φάση πτήσης. Η διαχείριση των πηγών μπορεί επίσης να υποστηριχθεί με την τεχνική ρύθμισης τάσης που αναλύεται στη συνέχεια,
- αξιοποίησης φορτίων αργής απόκρισης. Φορτία αργής απόκρισης καλούνται τα συστήματα / επιμέρους στοιχεία των σύγχρονων αεροσκαφών που χαρακτηρίζονται από μεγάλες σταθερές χρόνου, π.χ. θερμαντήρες. Αυτά τα συστήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν ως συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, καθώς αποθηκεύουν ενέργεια (στη φυσική της μορφή) κατά την κανονική τους λειτουργία, όπως λόγω χάρη η θερμότητα των φούρνων μαγειρείου. Η αξιοποίηση αυτή επιτρέπει τη μείωση του

μεγέθους και του βάρους του συστήματος, διατηρώντας τη διαθεσιμότητα των αντίστοιχων φορτίων. Διάφορες μέθοδοι για την πραγματοποίηση αυτής της προσέγγισης έχουν προταθεί στις αναφορές και οι προαναφερθείσες έξυπνες μέθοδοι και λειτουργίες μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας SSPCs και υιοθετώντας τις ακόλουθες στρατηγικές ελέγχου:

- Η τάση που εφαρμόζεται σε ένα επιλεγμένο φορτίο μεταβλητής ισχύος ρυθμίζεται (αύξηση / μείωση), με αποτέλεσμα την αντίστοιχη ρύθμιση της ισχύος. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα διαχείρισης φορτίου, όπου εφαρμόζεται ολική απόρριψη φορτίου, στο SPMS το επιλεγμένο φορτίο δεν απορρίπτεται πλήρως, καθώς η τάση εφαρμόζεται σε προκαθορισμένο βαθμό (chopping). Η ιδέα αυτής της τεχνικής συνοψίζεται στο Σχ. 3.1 και είναι παρόμοια με τον έλεγχο ρύθμισης της καμπύλης στατισμού (droop control) που εφαρμόζεται κυρίως σε χαμηλής τάσης μικροδίκτυα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολουθώντας αυτήν τη στρατηγική ελέγχου, η εξοικονόμηση ενέργειας μέσω αυτής της λειτουργίας μπορεί επίσης να επαναχρησιμοποιηθεί για ηλεκτρική τροφοδοσία άλλων φορτίων, που επιλέγεται από την εποπτεία της στρατηγικής ελέγχου.
- Σε περίπτωση φορτίων σταθερής ισχύος, π.χ. κινητήρες, η ρύθμιση της τάσης μέσω του SSPC δεν μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία για τη ρύθμιση της ισχύος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το SPMS μπορεί να υποβάλλει εντολές αύξησης/μείωσης της ισχύος στα φορτία ενδιαφέροντος, χρησιμοποιώντας την υποδομή (πρωτόκολλα) επικοινωνίας και τους SSPCs. Νέα σημεία λειτουργίας ρυθμίζονται για να καθορίσουν το επίπεδο της ισχύος.



Σχήμα 4.1 Έλεγχος μεταβαλλόμενων φορτίων ισχύος.

Τέλος, προκειμένου να εφαρμοστεί επιτυχώς η SPMS, απαιτείται λεπτομερής ανάλυση φορτίου, έτσι ώστε να αναγνωρίζεται τόσο η σημασία κάθε φορτίου, που εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης ή τη φάση πτήσης, όσο και το εάν γίνεται αντιληπτή η απόρριψη φορτίου. Αυτές θα είναι βασικές πληροφορίες για τις λειτουργίες του SPMS.

4.4 Σχεδιασμός του συστήματος προστασίας

Ένα κατάλληλο σύστημα προστασίας χρειάζεται να σχεδιαστεί και να εφαρμοστεί για την προστασία από βραχυκύκλωμα, υπερφόρτιση και άλλα σφάλματα που συμβαίνουν στα φορτία και στο υπόλοιπο σύστημα διανομής ισχύος και στις καλωδιώσεις. Όπως φαίνεται από το Σχ. 3.1, οι SSPCs θα είναι τα βασικά μέσα προστασίας, τόσο σε επίπεδο HVDC όσο και σε επίπεδο LVDC, ενώ ένας ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός RCCBs θα συμπεριληφθεί επίσης για την αντιμετώπιση/διακοπή μεγαλύτερων επιπέδων ρευμάτων. Τα SSPCs διευκολύνουν την προηγμένη δυνατότητα προστασίας, επεξεργασίας και επικοινωνίας, ενώ τα RCCB είναι διακόπτες κυκλώματος που μπορούν να λαμβάνουν απλές εντολές ελέγχου για την εκτέλεση κρίσιμων εντολών διακοπής ρεύματος στα καλώδια μεγάλης ισχύος.

4.4.1 Λειτουργίες προστασίας των SSPC

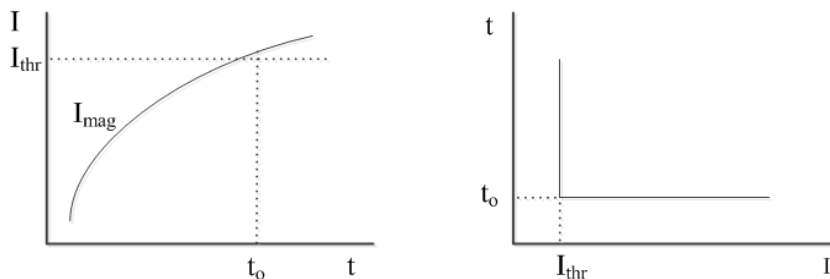
Κατά τη λειτουργία, ενδέχεται να προκύψουν διάφορες καταστάσεις σφάλματος που πρέπει να αντιμετωπιστούν από το σύστημα προστασίας. Για την αντιμετώπιση των κρίσιμων σφαλμάτων, όπως βραχυκυκλώματα, υπερφορτίσεις, υπερτάσεις και τόξα ρεύματος, οι SSPC θα πρέπει να περιλαμβάνουν τις ακόλουθες λειτουργίες προστασίας:

Λειτουργίες προστασίας με βάση το ρεύμα

Αυτές οι λειτουργίες που ενσωματώνονται στη λογική ελέγχου των SSPCs προορίζονται να προστατεύσουν από βραχυκύκλωμα, παρακολουθώντας την ένταση του ρεύματος, τις πιθανές βηματικές αλλαγές του ρεύματος και τον ρυθμό μεταβολής του ρεύματος και μπορούν να εφαρμοστούν χωριστά ή να συνδυαστούν για να συνθέσουν τη λογική προστασίας της τοπικής μονάδας ελέγχου κάθε SSPC. Η χρονικά διαβαθμισμένη λειτουργία μεταξύ των διαδοχικών SSPCs θα διασφαλίσει ότι μόνο το ελάχιστο τμήμα του ηλεκτρικού δικτύου θα αποσυνδεθεί από το υπόλοιπο σύστημα, που βρίσκεται ακόμη σε λειτουργία.

1) Αρχή υπερεντάσεως

Η στιγμιαία τιμή της έντασης του ρεύματος (I_{mag}) παρακολουθείται συνεχώς μέσω των αισθητήρων ρεύματος. Εάν το παρακολουθούμενο ρεύμα υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο κατώφλι (I_{thr}), το SSPC θα διακόψει το κύκλωμα με ή χωρίς καθυστέρηση (t_o). Οι SSPC μπορούν επιτυχάνουν πολύ μικρούς χρόνους απόκρισης, στο εύρος των 5-15 μ s, ή και ακόμα μικρότερους - χάρη στην τεχνολογία SiC.



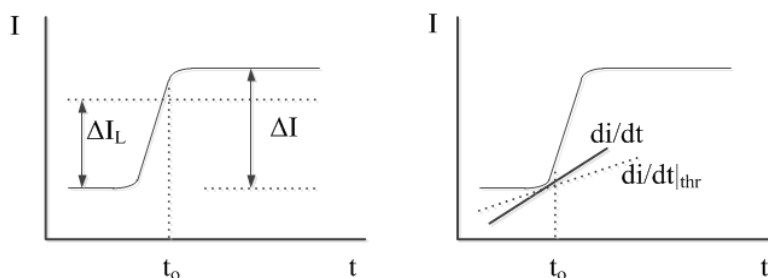
Σχήμα 4.2 Χαρακτηριστικές χρόνου-υπερέντασης ρεύματος

2) Αρχή λειτουργίας βηματικής αλλαγής ρεύματος

Εάν γίνει αντιληπτή μία βηματική αλλαγή (ΔI) η οποία είναι υψηλότερη από το μέγιστο αναμενόμενο βήμα φόρτισης (ΔI_L) κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των στιγμιαίων υψηλών ρευμάτων ζεύξης (inrush currents) κατά τη σύνδεση του εξοπλισμού (π.χ. εκκίνηση κινητήρων), το SSPC θα διακόψει το κύκλωμα με ή χωρίς καθυστέρηση (t_o ή t_{trip}), όπως φαίνεται στο Σχ. 3.3.

3) Αρχή λειτουργίας ρυθμού μεταβολής του ρεύματος

Ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος di/dt παρακολουθείται και εάν είναι υψηλότερος από μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου (di/dt_{thr}), το SSPC θα διακόψει το κύκλωμα με ή χωρίς καθυστέρηση (t_o), όπως φαίνεται στο Σχ.3.3.



Σχήμα 4.3 Χαρακτηριστικές ρεύματος-χρόνου.

4) Αρχή λειτουργίας για ρεύμα διαρροής (σφάλματα γείωσης)

Χρησιμοποιώντας έναν μόνο αισθητήρα (τύπου δακτυλίου), η ανίχνευση σφαλμάτων γείωσης μπορεί να εφαρμοστεί μέσω της παρακολούθησης του ρεύματος που ρέει προς και από το φορτίο, διαμέσου του αισθητήρα. Αν η ένταση του ρεύματος είναι η ίδια (μηδενική διαρροή), ο αισθητήρας δεν θα δείξει κατάσταση σφάλματος.

Λειτουργίες με βάση την τάση

Αυτές οι λειτουργίες που ενσωματώνονται στη λογική ελέγχου του SSPC αποσκοπούν στην προστασία έναντι βραχυκυκλωμάτων ή/ και υπερτάσεων, παρακολουθώντας το επίπεδο της τάσης μέσω αισθητήρων τάσης.

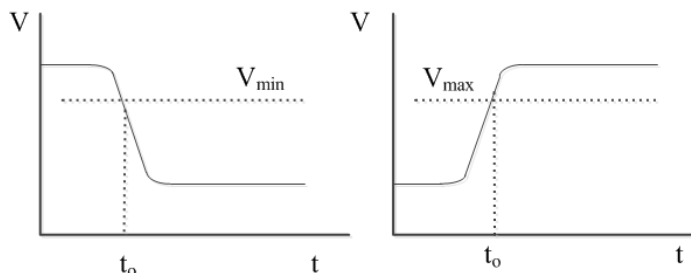
1) Λειτουργία υπότασης

Όταν η παρακολουθούμενη τάση (V_{mag}) πέσει κάτω από μία καθορισμένη τιμή (V_{min}) και παραμείνει κάτω από αυτό το επίπεδο, το SSPC θα διακόψει το κύκλωμα με ή χωρίς καθυστέρηση (t_o), όπως φαίνεται στο Σχ.3.4. Σημαντική πτώση τάσης μπορεί να υποδηλώνει την απώλεια γεννήτριας ή βραχυκυκλωμάτων στο δίκτυο.

2) Λειτουργία υπέρτασης

Όταν η παρακολουθούμενη τάση (V_{mag}) αυξάνεται πάνω από μια καθορισμένη τιμή (V_{max}) και παραμένει πάνω από αυτό το επίπεδο, το SSPC θα διακόψει το κύκλωμα με ή χωρίς καθυστέρηση (t_o).

Η σημαντική αύξηση της τάσης μπορεί να υποδηλώνει υπέρταση λόγω ξαφνικής απώλειας φορτίου ή λόγω αλλαγών, υπό συνθήκες σφάλματος, όπως φαίνεται στο Σχ.3.4.



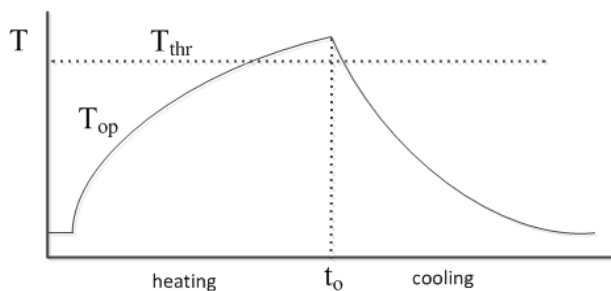
Σχήμα 4.4 Χαρακτηριστικές προστασίες με βάση την παρακολούθηση της τάσης.

Λειτουργίες με βάση τη θερμοκρασία

Αυτές οι λειτουργίες που ενσωματώνονται στη λογική ελέγχου του SSPC αποσκοπούν κυρίως στην προστασία από υπερφόρτιση των καλωδίων που τροφοδοτούν τα φορτία.

1) Αρχή υπέρ-θέρμανσης

Η θερμοκρασία λειτουργίας (T_{op}) του καλωδίου μπορεί να παρακολουθείται, και εάν υπερβαίνει μια τιμή κατωφλίου (T_{thr}), το SSPC θα διακόψει το κύκλωμα με ή χωρίς καθυστέρηση (t_o). Η T_{thr} μπορεί να ρυθμιστεί ίση με τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας για συνεχή λειτουργία ή πάνω από την ονομαστική επιτρεπόμενη θερμοκρασία, με περιορισμένο επιτρεπόμενο χρόνο λειτουργίας. Η θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να εκτιμηθεί από ένα θερμικό μοντέλο του καλωδίου με βάση τις μετρήσεις ρεύματος, τις φυσικές παραμέτρους του καλωδίου και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το Σχ. 3.5 δείχνει ποιοτικά την καμπύλη λειτουργίας με εφαρμογή της αρχής προστασίας έναντι υπερθέρμανσης.



Σχήμα 4.5 Προστασία υπερφόρτισης καλωδίων.

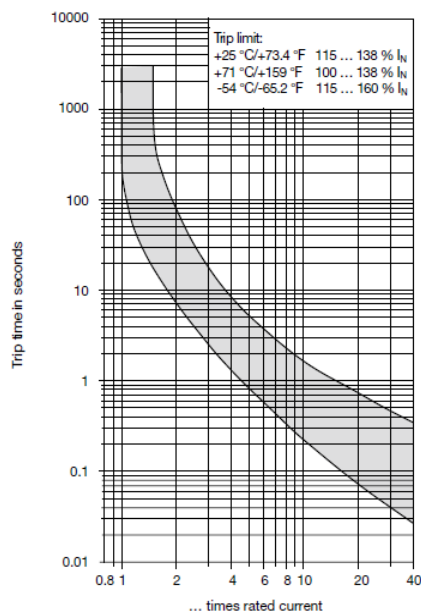
2) Λειτουργία προστασίας από τόξα ρεύματος

Διάφοροι αλγόριθμοι ανίχνευσης τόξου έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Μερικοί από αυτούς έχουν εφαρμοστεί / δοκιμαστεί σε πρωτότυπα και εμπορικά προϊόντα. Ενώ ένας συμβατικός διακόπτης μπορεί να χρειαστεί 40 ms ή και περισσότερο για να ανιχνεύσει ένα μόνιμο σφάλμα, ένας SSPC με αλγόριθμο ανίχνευσης ηλεκτρικού τόξου και με ταχεία διακοπτική λειτουργία (της τάξης των μsec) μπορεί να περιορίσει το επίπεδο ενέργειας / ισχύος του τόξου, σε ασφαλή για τον εξοπλισμό επίπεδα.

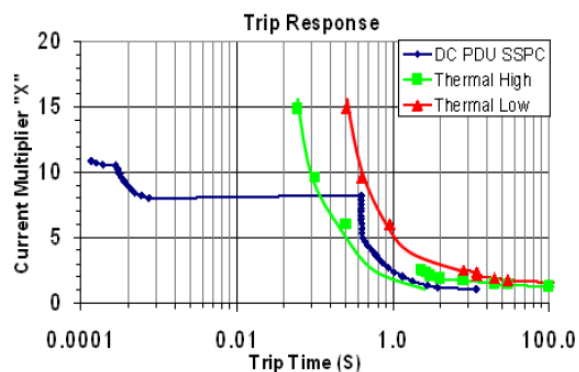
4.4.2 Χαρακτηριστικά προστασίας των RCCBs

Το RCCB είναι ένας συνδυασμός ενός ρελέ και ενός διακόπτη κυκλώματος, η λειτουργία του οποίου (ενεργοποίηση / απενεργοποίηση) μπορεί να ρυθμίζεται διεγείροντας το πηνίο του RCCB ηλεκτρονικά, μέσω μίας μονάδας ελέγχου [35]. Με το RCCB κλειστό, ένα ρεύμα υπερφόρτισης ή σφάλματος στη γραμμή θα προκαλέσει το άνοιγμα του RCCB σε χρόνο που καθορίζεται από τη χαρακτηριστική χρόνου-υπερέντασης του ρελέ, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.6. Προφανώς, τα RCCB επιτρέπουν τον απομακρυσμένο έλεγχο μέσω ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που περιλαμβάνονται μέσα στην ίδια συσκευή.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των RCCBs είναι η ικανότητά τους να αντέχουν υψηλά ρεύματα και τάσεις, η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου τους, η βελτίωση της απόδοσης του PDS και το χαμηλότερο κόστος. Επιπλέον, το RCCB δεν παρουσιάζει πρόβλημα ταχείας γήρανσης, το οποίο είναι πολύ κοινό στους συμβατικούς διακόπτες, ως συνέπεια της αθροιστικής επίδρασης των θερμικών κύκλων στο διμεταλλικό στοιχείο. Αυτό οφείλεται στην αντικατάσταση του διμεταλλικού ελάσματος από ηλεκτρονικά κυκλώματα παρακολούθησης μέσα στον RCCB.



Σχήμα 4.6 Χαρακτηριστική χρόνου - υπερέντασης ενός τυπικού RCCB.



Σχήμα 4.7 Χρόνος ενεργοποίησης (trip) με αναφορά το ρεύμα και τη θερμοκρασία λειτουργίας.

Από την άλλη πλευρά, τα RCCB έχουν τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά που περιορίζουν τη χρήση τους σε πιο περίπλοκα συστήματα, όπως στα συστήματα διανομής ισχύος υψηλής τάσης. Τα υψηλά διακοπτικά ρεύματα και τάσεις (switching currents / voltages) δημιουργούν προκλήσεις όσον αφορά τον σχεδιασμό και τη διάρκεια ζωής των RCCBs. Οι αιχμές (spikes) ρευμάτων και τα τόξα ρεύματος μπορούν να προκαλέσουν βλάβες τόσο στις επαφές του διακόπτη όσο και στις συνδεδεμένες συσκευές. Σε σύγκριση με τα SSPCs, το κύριο μειονέκτημα των RCCBs είναι η πιο αργή απόκριση (από 15 ms έως αρκετά s). Ένα

επιπλέον μειονέκτημα αποτελεί η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, η οποία επηρεάζει σημαντικά τις καμπύλες ενεργοποίησης των RCCBs (βλ. πράσινες και κόκκινες καμπύλες στο Σχ. 3.7).

4.5 Χαρακτηριστικά προστασίας των SSCB, AFCB – Η κατάληξη στα SSPC

Οι παραδοσιακοί διακόπτες CB βασίζονται σε μαγνητικά – θερμικά στοιχεία, τα οποία ανοίγουν το κύκλωμα πριν το ρεύμα που διαρρέει φτάσει τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή ή πριν η διάρκεια του μέγιστου ρεύματος φτάσει τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή. Παρόλα αυτά, τα CB δεν είναι δυνατό να ανιχνεύσουν το τόξο σφάλματος εξαιτίας της πολύ μικρής διάρκειάς του. Ανεξάρτητα από τη μικρή διάρκεια του φαινομένου, το τόξο σφάλματος αυξάνει την θερμοκρασία στον εσωτερικό χώρο γύρω του με αποτέλεσμα να προκαλέσει καταστροφικές συνέπειες στις καλωδιώσεις, έκρηξη του μονωτικού υλικού ή του καυσίμου κοντά στο τόξο σφάλματος. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι παραδοσιακοί CB δεν είναι κατάλληλοι για την προστασία του PDS, επειδή έχουν χαμηλή απόδοση σε υψηλές τιμές Σ.Τ. Ένα ακόμη μειονέκτημα αυτών αποτελεί το περίπλοκο σύστημα παρακολούθησης τους, καθώς δεν διαθέτουν ενσωματωμένο.

Η επόμενη συσκευή προστασίας που βασίστηκε στα CB και είναι πιο πρόσφατη είναι η AFCB. Αυτή η συσκευή προσφέρει τον ίδιο τύπο προστασίας με τα CB, αλλά διαθέτει και την λειτουργία προστασίας του κυκλώματος έναντι ηλεκτρικών τόξων σφάλματος. Η λειτουργία τους συνοψίζεται στη μέτρηση του ρεύματος του κυκλώματος σε διαστήματα των μερικών ms και αποθηκεύει τα δεδομένα όλων των μεμονωμένων διακοπών. Όταν ένας προκαθορισμένος αριθμός τιμών ρεύματος υπερβαίνει μία προκαθορισμένη τιμή, τότε το AFCB προκαλεί διακοπή του κυκλώματος. Ο εντοπισμός των τόξων σφάλματος γίνεται με την εφαρμογή αλγορίθμων που εντοπίζουν απότομες αυξήσεις του ρεύματος λειτουργίας για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (τόξο σφάλματος, ρεύμα εκκίνησης κινητήρων κ.τ.λ.). Εντούτοις, τέτοιοι αλγόριθμοι γίνονται ιδιαίτερα πολύπλοκοι ανάλογα με τις απαιτήσεις του κυκλώματος.

Προκειμένου να επιλυθούν τα μειονεκτήματα των προαναφερθέντων σχημάτων προστασίας, νέες τεχνολογίες εισήχθησαν για την προστασία του PDS – μία απ' αυτές είναι το SSPC. Το SSPC συνδυάζει τη λειτουργία σύνδεσης των φορτίων στον κύριο ζυγό, αλλά και την λειτουργία της προστασίας των εγκατεστημένων στοιχείων από υπερφορτίσεις και βραχυκυκλώματα. Επιπρόσθετα, η προστασία των SSPC υλοποιείται σύμφωνα με την καμπύλη I^2t (η λειτουργία της θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο). Αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν το SSPC είναι η υψηλή αξιοπιστία (κύκλοι ζωής), η χαμηλή κατανάλωση ισχύος και η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου με την χρήση λογισμικού. Εκτός από τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα, το SSPC συνδυάζει και τα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τα ημιαγωγικά στοιχεία, όπως η γρήγορη απόκριση, το χαμηλό βάρος και η χαμηλότερη επίδραση των δονήσεων συγκριτικά με τα CB, RCCB και AFCB.

Τα SSPC κέρδισαν τα τελευταία χρόνια μεγάλη δημοτικότητα με την εγκατάστασή τους στο EPS των αεροσκαφών A380 και B787 [8]. Τα SSPC μπορούν να παρέχουν έναν ενοποιημένο έλεγχο και διαχείριση της ισχύος, με σκοπό την εξάλειψη της χρήσης μεμονωμένων μηχανικών διακοπτικών μέσων. Ένα SSPC μπορεί να διασφαλίσει όχι μόνο την προστασία του κυκλώματος αλλά και τον έλεγχο του φορτίου. Το μικρό μέγεθός του συμβάλλει στη μαζική εγκατάσταση SSPC στον εξοπλισμό των ΜΕΑ, με σκοπό την καλύτερη διαχείριση τόσο του ρεύματος φορτίου όσο και του ρεύματος σφάλματος, αλλά και την ελαχιστοποίηση της καταπόνησης των ημιαγωγικών στοιχείων του μετατροπέα. Με την χρήση των SSPC το φορτίο είναι δυνατό να συνδεθεί πιο κοντά στο ζυγό τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα τη χρήση μικρότερων μηκών καλωδίωσης, το οποίο επιτρέπει την ελαχιστοποίηση του μεγέθους του συστήματος συγκριτικά με άλλα συστήματα προστασίας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, τα SSPC υλοποιούνται με ημιαγωγικούς διακόπτες FET και πιο συγκεκριμένα με το υλικό καρβίδιο του πυριτίου, με σκοπό την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων του (λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία, χαμηλή τιμή αντίστασης αγωγής κ.τ.λ.).

Εκτός από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει τα SSPCs εντοπίστηκαν και συγκεκριμένα ζητήματα. Σύμφωνα με δημοσιευμένες έρευνες της NASA σχετικά με την ασφάλεια των καλωδίων και το πως επηρεάζεται από τις διάφορες διαβαθμίσεις προστασίας της καμπύλης I^2t , ο ορισμός υψηλών επιπέδων ρευμάτων στην καμπύλη αντιστρόφου χρόνου έχει ως αποτέλεσμα τα όρια χρόνου ενεργοποίησης του διακόπτη να ελαχιστοποιούνται δραστικά, αναγκάζοντάς τον να αποκόπτει το κύκλωμα σχεδόν ακαριαία – γεγονός που μειώνει την ικανότητα του SSPC ως προς την ανίχνευση των τόξων σφάλματος. Ακόμα ένα πρόβλημα που ανιχνεύτηκε σχετικά με την λειτουργία του SSPC σχετίζεται με τα ηλεκτρονικά στοιχεία του και την επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής σ' αυτά. Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή μπορεί να προκαλέσει στιγμιαίες διακοπές της λειτουργίας του SSPC, γεγονός που επηρεάζει το ρεύμα λειτουργίας (απότομη αύξηση κατά τη στιγμή της διακοπής). Παρόλα αυτά, οι προαναφερθέντες αστοχίες των SSPCs είναι σχετικά σπάνιες (σχετίζονται με τα ηλεκτρονικά στοιχεία που αποτελούν το SSPC) και είναι μικρότερης σημασίας συγκριτικά με τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν, άρα τα SSPC επικράτησαν ως μέσα προστασίας στο EPStων εξηλεκτρισμένων αεροσκαφών.

Τα SSCB είναι κανονικά κλειστοί διακόπτες (normally closed) SSPC, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν τη λειτουργία των παραδοσιακών διακοπών CB. Και το SSPC και το SSCB λειτουργούν σύμφωνα με την καμπύλη αντιστρόφου χρόνου, σύμφωνα με προκαθορισμένα ρεύματα αποκοπής και μικρούς χρόνους δράσης σε περίπτωση απότομων αιχμών ρεύματος (ρεύματα εκκίνησης κινητήρων κ.τ.λ.). Στη περίπτωση σφαλμάτων ή μεταβατικών φαινομένων, το ρεύμα σφάλματος διακόπτεται εξαιρετικά γρήγορα από το SSPC, ωστόσο η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πηνίο πρέπει να έχει δρόμο εκφόρτισης. Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα είναι η πρόσθεση αντίστασης.

4.6 Διαχωρισμός των SSPCs βάσει των χαρακτηριστικών τους

Όπως έχει προαναφερθεί, η μετάβαση από τους συμβατικούς διακόπτες στους προηγμένους SSPCs είναι εξαιρετικής σημασίας, λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων τους. Ωστόσο, βασικό ζήτημα αποτελεί η επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας SSPC που εξυπηρετεί βέλτιστα τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Επιγραμματικά, μερικά από τα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας είναι το επίπεδο τάσης του ζυγού σύνδεσης (π.χ. στο AC / DC μικροδίκτυο του MEA), το επίπεδο έντασης του ρεύματος μόνιμης λειτουργίας, το επίπεδο έντασης του ρεύματος κατά τη διάρκεια του σφάλματος, η ρύθμιση του επιθυμητού χρόνου διακοπής του ρεύματος σφάλματος, δηλαδή της αποκοπής του φορτίου (t_{trip} , όπως έχει εξηγηθεί παραπάνω), λειτουργία που αποβλέπει στην πιθανή αυτό-εκκαθάριση του σφάλματος, καθώς και το μέγιστο χωρητικό φορτίο που είναι δυνατό να συνδεθεί στο σύστημα. Σύμφωνα με τα παραπάνω, όσον αφορά τους εμπορικούς SSPCs, διατίθεται ένα ευρύ φάσμα επιλογών για τη διασύνδεση είτε σε ζυγό χαμηλής τάσης (28 VDC) είτε σε ζυγό υψηλότερης τάσης. Επιπρόσθετα, όσον αφορά το μέγεθος του ονομαστικού ρεύματος λειτουργίας, υπάρχει πληθώρα επιλογών για την εκάστοτε εφαρμογή, με εύρος 80 – 400 A (ενδεικτικά αναφέρεται το μέγιστο ονομαστικό ρεύμα στο μικροδίκτυο των MEA, που είναι τα 200 ή 170 A, σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο MIL-STD-704F). Στον Πίνακα 3.1 δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά ενδεικτικών εμπορικών SSPCs.

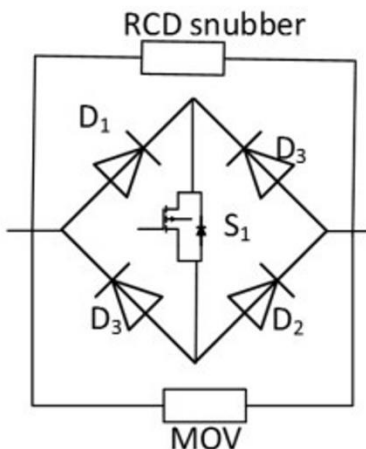
Πίνακας 4.1 Διαθεσιμότητα εμπορικών SSPCs.

Κατασκευαστής SSPC	Χαρακτηριστικά των SSPCs		
	Ονομαστικό Ρεύμα (A)	Ονομαστική Τάση (V)	Χαρακτηριστικά
DDC	80	270	300-700 μs_{trip} , αερόψυκτο (Natural air cooled)
DDC	400	28	-
Micropac Industries	60	270	0.2-3 ms χρόνος έναυσης / σβέσης (rise / fall time)
Micropac Industries	220	28	1-3 ms χρόνος έναυσης / σβέσης (rise / fall time)
Astronics – COREPOWER	300	28	-
Ametek - AMPHION	30	28	6m Ω αντίσταση αγωγής
Sensitron	50	375	-
Sensitron	400	28	-
Leach International	7.5	270	-
Leach International	150	28	-

4.7 Ανασκόπηση υποψήφιων τοπολογιών για την υλοποίηση SSPC

4.7.1 Τοπολογία MOSFET με γέφυρα διόδων

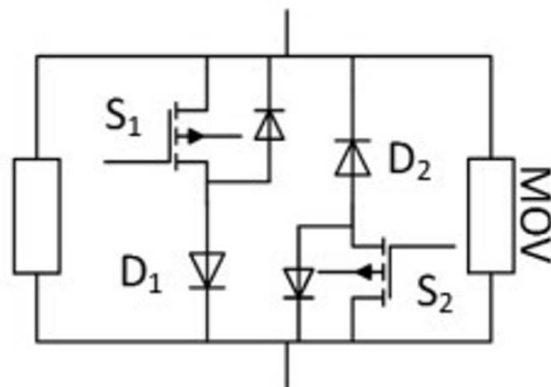
Η τοπολογία του τρανζίστορ τύπου MOSFET με γέφυρα διόδων, όπως αυτή φαίνεται στο Σχ. 3.8, αποτελεί μία λύση υλοποίησης ενός SSPC. Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, τα ημιαγωγικά στοιχεία που διαρρέονται από το ρεύμα λειτουργίας είναι το τρανζίστορ τύπου MOSFET (S_1) και οι δίοδοι D_1 και D_2 , συμβάλλοντας και τα τρία στις απώλειες αγωγής, οι οποίες σε αυτήν την περίπτωση είναι αυξημένες σε σχέση με άλλες τοπολογίες που χρησιμοποιούν λιγότερα ημιαγωγικά στοιχεία. Επιπλέον, οι δύο δίοδοι εισάγουν σημαντική πτώση τάσης, περί το 1,5 Volt. Επιπρόσθετα, το επίπεδο του ρεύματος που μπορεί να διαρρέει αυτήν την τοπολογία περιορίζεται σημαντικά, εξαιτίας της χρήσης διακοπών τρανζίστορ τύπου MOSFET. Για τους παραπάνω λόγους, η εν λόγω τοπολογία θεωρείται ακατάλληλη για εφαρμογές υψηλής ισχύος.



Σχήμα 4.8 Τοπολογία MOSFET με γέφυρα διόδων.

4.7.2 Τοπολογία αντιπαράλληλων MOSFET / IGBT

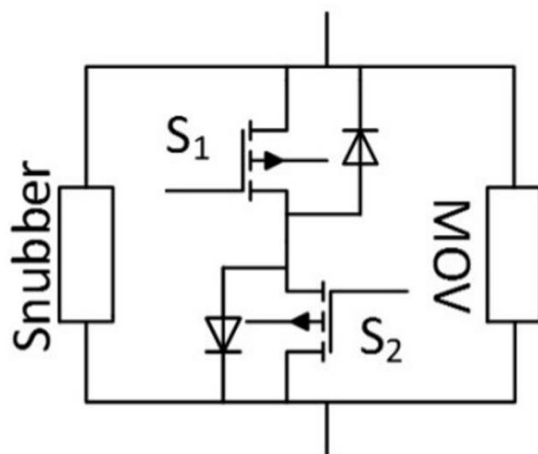
Η τοπολογία αντιπαράλληλων MOSFET / IGBT φαίνεται στο Σχ. 3.9. Ένας από τους λόγους για τους οποίους η τοπολογία αυτή θεωρείται ακατάλληλη για εφαρμογές υψηλής ισχύος είναι ότι γίνεται χρήση δύο επιπρόσθετων διόδων για την αποκοπή της αρνητικής τάσης στα άκρα τρανζίστορ τύπου MOSFET, το οποίο αντιμετωπίζεται αν χρησιμοποιηθούν IGBT, προκειμένου να υφίσταται έλεγχος της δικατευθυντήριας ροής του ρεύματος (οι επιπρόσθετες δίοδοι δεν επιτρέπουν τη διέλευση του ρεύματος μέσω των αντιπαράλληλων διόδων των MOSFET). Έτσι, αυτή η τοπολογία χρησιμοποιεί τέσσερα ημιαγωγικά στοιχεία (εναλλακτικά για την μείωση των στοιχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν IGBT), γεγονός που αυξάνει σημαντικά τις απώλειες αγωγής. Επιπλέον, λόγω της χρήσης διακοπών MOSFET, το επιτρεπόμενο επίπεδο ρεύματος περιορίζεται συγκριτικά με άλλους ημιαγωγικούς διακόπτες (π.χ. IGBTs).



Σχήμα 4.9 Τοπολογία αντιπαράλληλων MOSFET / IGBT.

4.7.3 Τοπολογία common source

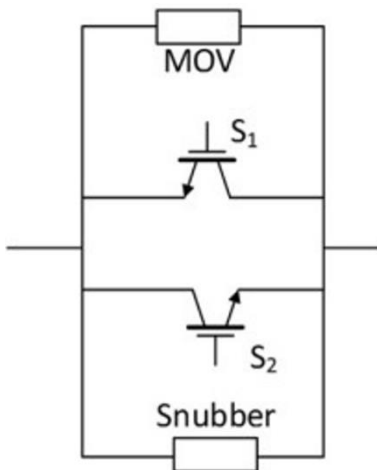
Η τοπολογία common source απεικονίζεται στο Σχ. 3.10. Οι ημιαγωγικοί διακόπτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συγκεκριμένη τοπολογία είναι είτε τρανζίστορ τύπου MOSFETs, είτε IGBTs, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. Ωστόσο, σε εφαρμογές SSCBs, μπορούν χρησιμοποιηθούν και IGCTs. Ειδικότερα, τα IGCTs χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές επιπέδου τάσης υψηλότερου των 2000 V, ενώ αποτελούν αποδεκτή λύση και σε εφαρμογές υψηλών ρευμάτων (>1000 A). Όσον αφορά την εν λόγω τοπολογία, αυτή συγκεντρώνει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως είναι ο μικρός αριθμός ημιαγωγικών διακοπών, που οδηγεί στις ελάχιστες απώλειες αγωγής και η δυνατότητα παραλληλισμού όμοιων μονάδων (οι μονάδες αναφέρονται στο Σχ. 3.10) όταν χρησιμοποιούνται τρανζίστορ τύπου MOSFET ισχύος, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.



Σχήμα 4.10 Τοπολογία common source.

4.7.4 Τοπολογία Αντιπαράλληλων IGBT/SiC BJT

Η τοπολογία των αντιπαράλληλων IGBT / SiC BJT φαίνεται στο Σχ. 3.11. Αρχικά, το πλεονέκτημα της τοπολογίας είναι ο μικρός αριθμός των ημιαγωγικών στοιχείων, που μειώνει τις απώλειες αγωγής. επίσης, η υψηλή αντίσταση του IGBT (περίπου $20 \text{ m}\Omega\text{-cm}^2$) επιτρέπει τη ροή μεγάλου επιπέδου ρεύματος, με υψηλό επίπεδο τάσης, λόγω χάρη 1200 VDC. Το μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας έγκειται στις αυξημένες απώλειες ισχύος των IGBT σε σχέση με τα τρανζίστορ τύπου MOSFET.



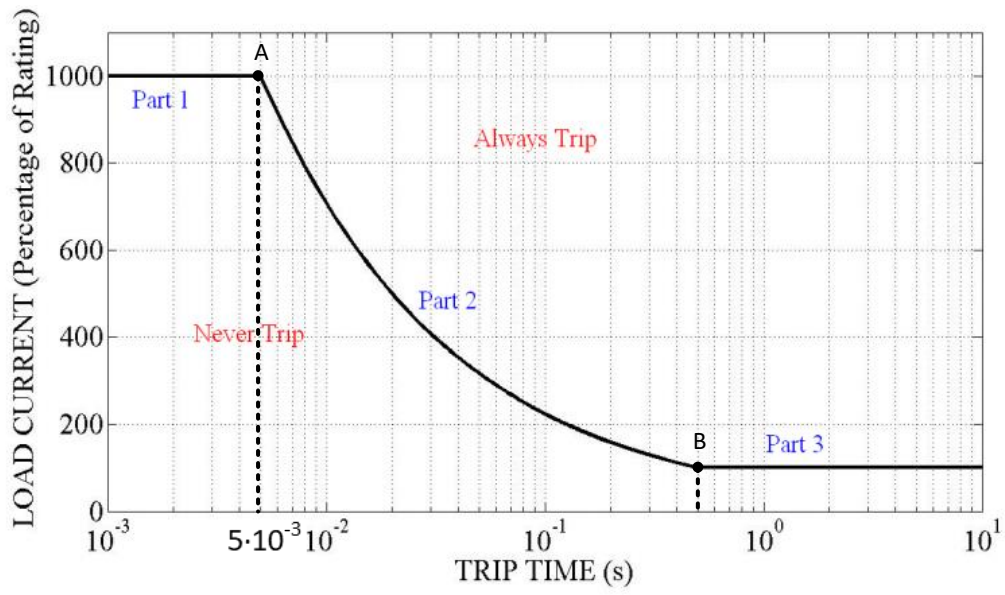
Σχήμα 4.11 Τοπολογία αντιπαράλληλων IGBT / SiC BJT.

4.8 Προγραμματισμός λειτουργίας του SSPC σύμφωνα με την καμπύλη αντιστροφής χρόνου

Η λειτουργία του SSPC, η οποία ακολουθεί τη συμπεριφορά της καμπύλης αντιστροφής χρόνου I^2t έχει παρόμοια λειτουργία με αυτή της ασφάλειας, όπου ανάλογα με το ρεύμα σφάλματος θέτεται και ένας διαφορετικός χρόνος αναμονής για την αποκοπή του κυκλώματος (t_{trip}). Αυτό σημαίνει ότι καθολικός σχεδιασμός του συστήματος προστασίας των EPStων ΜΕΑβασίζεται σε μια προγραμματισμένη λογική που διαφοροποιείται ανάλογα με το πόσο γρήγορα σχεδιάζεται να λειτουργεί το SSPC το επίπεδο των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών που αντέχουν τα ημιαγωγικά του στοιχεία (τάση κατάρρευσης, μέγιστο ρεύμα σφάλματος κ.τ.λ.). Όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.12, όταν παρθούν τα δεδομένα από δειγματοληψία από το κύκλωμα ισχύος εξετάζονται σύμφωνα με την καμπύλη I^2t , αν αυτά παραμένουν κάτω από την καμπύλη τότε το SSPC παραμένει κλειστό (άγει), ενώ ανοίγει στιγμιαία όταν τα δείγματα βρεθούν πάνω από την καμπύλη, προκειμένου να προστατέψει τις καλωδιώσεις το φορτίο ακόμα και τον εαυτό του από το υψηλό ρεύμα σφάλματος. Σε πραγματικές εφαρμογές η καμπύλη I^2t χωρίζεται σε διαστήματα ρευμάτων με τον ίδιο χρόνο ενεργοποίησης όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Η κατανόηση της λειτουργίας της καμπύλης αντιστρόφου χρόνου είναι ιδιαίτερα σημαντική, προκειμένου να καθοριστούν οι απαιτήσεις του σχεδιασμού για ένα SSPC. Όπως γίνεται εμφανές στο Σχ. 3.12, η καμπύλη χωρίζεται σε τρεις διακριτές περιοχές[30]:

- Η πρώτη περιοχή διαχωρίζει το επίπεδο ρεύματος (στερεό βραχυκύκλωμα) καθώς και τους χρόνους στιγμιαίας ενεργοποίησης (instant trip). Σε πραγματικές εφαρμογές ο μέγιστος χρόνος ενεργοποίησης (trip) δεν ξεπερνάει τα 5 ms, με μέγιστο ρεύμα σφάλματος δέκα φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας. Το σημείο (A) πάνω στο Σχ. 3.12 δείχνει την μέγιστη κατανάλωση θερμικής ενέργειας από τις καλωδιώσεις. Ενώ ο μικρότερος χρόνος αποκοπής του μέγιστου σφάλματος δείχνει ότι με την βελτιστοποίηση του αλγορίθμου λειτουργίας αλλά και με την χρήση βελτιωμένων SiC ημιαγωγικών στοιχείων είναι δυνατό να επιτευχθεί βέλτιστη λειτουργία με εξαιρετικά γρήγορη απόκριση του συστήματος προστασίας.
- Η δεύτερη περιοχή αποτελείται από την ιδανική καμπύλη I^2t , στην οποία το κάθε σημείο αντιστοιχεί σε μια σταθερή τιμή κατανάλωσης ενέργειας (στο φορτίο, στον ημιαγωγικό διακόπτη και στις καλωδιώσεις). Το εύρος της καμπύλης εκτείνεται από χαμηλές τιμές ρευμάτων με υψηλούς χρόνους ενεργοποίησης (t_{trip}) έως τιμές ρευμάτων που είναι οχτώ φορές μεγαλύτερες από το ονομαστικό ρεύμα συνεχούς λειτουργίας, με χαμηλές τιμές χρόνων ενεργοποίησης.
- Η τρίτη περιοχή καθορίζεται ανάλογα με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις του SSPC. Όταν υπάρχει το ενδεχόμενο να βρεθεί το SSPC σε κατάσταση όπου η καλωδίωση διαρρέεται από ρεύμα φόρτισης ίσο με τιμή που βρίσκεται πάνω από την τιμή της ονομαστικής κατάστασης λειτουργίας και μικρότερη από το 110% της ονομαστικής τιμής του ρεύματος, τότε στη καμπύλη απεικονίζεται αυτό το ρεύμα με χρόνο ενεργοποίησης που εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες των καλωδίων του EPS. Ειδικά, στη καμπύλη απεικονίζεται το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας το οποίο ανάλογα με το είδος των ημιαγωγικών στοιχείων από SiC ποικίλει από 120 A έως 200 A. Με βάση αυτά τα όρια ρεύματος, η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της συσκευής επιτυγχάνεται όταν η θερμότητα που παράγεται από τα μέσα προστασίας, την καλωδίωση και το φορτίο (για μεγάλο χρονικό διάστημα) είναι ίση με την θερμότητα που διαχέεται κάθε χρονική στιγμή από το κύκλωμα.



Σχήμα 4.12 Καμπύλη I^2t με μέγιστο ρεύμα 10 φορές το ονομαστικό και μέγιστο χρόνο διατήρησης στο στερεό βραχυκύκλωμα 5ms [30].

5. Αναφορές

- [1] Eurostat. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Greenhouse_gas_emissions,_analysis_by_source_sector,_EU-28,_1990_and_2017_\(Percentage_of_total\).png&oldid=438710](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Greenhouse_gas_emissions,_analysis_by_source_sector,_EU-28,_1990_and_2017_(Percentage_of_total).png&oldid=438710).
- [2] EIA. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/transportation.php#tab2>.
- [3] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Stephen D. Umans, *Electric Machinery*, McGraw-Hill, 2005.
- [4] A. Tayyebi, «Grid-Forming Converters -- Inevitability, Control Strategies and Challenges in Future Grid Applications,» *Cired*, 2018.
- [5] A. Pros. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.aviationpros.com/gse/gse-technology/green-alternative-energy-gse/article/12414609/electrification-and-eflight-part-4-boeing-is-on-the-way-to-a-more-electric-future>.
- [6] Crunch, Tech, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://techcrunch.com/2018/07/08/the-electric-aircraft-is-taking-off/>.
- [7] T. Crunch. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://techcrunch.com/2018/07/08/the-electric-aircraft-is-taking-off/>.
- [8] Sea, Safety for, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://safety4sea.com/are-electric-vessels-the-future-of-shipping/>.
- [9] Skjong, E., Rune Volden, Egil Rødskar, Marta Molinas, Tor Arne Johansen, «Past, Present and Future Challenges of the Marine Vessel's Electrical Power System,» *IEEE Transaction on Transportation Electrification*, τόμ. 2, αρ. 4, 2016.
- [10] Ι. Ιωαννίδης, *Ναυτικές Μηχανές, Γενικά, Κινητήρες Diesel*, Αθήνα: Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2009.
- [11] D. Rowe, *Handbook of Thermoelectrics*, New York: CRC Press, 1995.
- [12] L. H., *Thermoelectrics: Design and Materials*, UK: John Wiley and Sons, 2017.
- [13] E. Karampasis, «Active Thermoelectric Cooling Solutions for Airspace Applications: the THERMICOOL Project,» *IEEE Access*, τόμ. 5, 2017.
- [14] Χ. Γ. Ζ.-. Βεκίτς, *ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΤΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΜΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (R2P2) ΓΙΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*, Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, 2019.
- [15] Lihua Chen, Dong Cao, Yi Huang, «Modeling and Power Conditioning for Thermoelectric Generation,» σε *IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC 2008)*.
- [16] Bhandari, D.M. Rowe and C.M., *Modern Thermoelectrics*, Holt Technology, 1983.
- [17] Yeats, E. H. Cooke- Yarborough and F.W., «Efficient thermo-mechanical generation of electricity from the heat of radioisotopes,» σε *Proc. Xth IECEC*, 1975.
- [18] D. Rowe, «Thermoelectric generation,» σε *28th Consultative Conf*, 1992.
- [19] K. Matsuura, D. M. Rowe, K. Koumoto, G. Min, and A. Tsuyoshi, «Design Optimisation for a Large Scale Low Temperature Thermoelectric Generator,» σε *Proc. XIth Int. Conf. on Thermoelectrics*, 1992.
- [20] X.Liu, C.Li, Y.D.Deng, C.Q.Su, «An energy-harvesting system using thermoelectric power generation for automotive application,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, τόμ. 67, 2015.
- [21] Z.B Tang, Y.D. Deng, C.Q. Su, W.W. Shuai, C.J. Xie, «A research on thermoelectric generator's electrical performance under temperature mismatch conditions for automotive waste heat recovery system,» *Case Studies in Thermal Engineering*, 2015.
- [22] Li Dong Zhao, Vinayak P. Dravid, Mercouri G. Kanatzidis, «The panosCoPic approach to high performance thermoelectrics,» *Energy Environmental Science*, τόμ. 7, 2014.

- [23] Elsheikh, M. H., «A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance,» *Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, τόμ. 30, 2014.
- [24] G.C. Christidis, Karatzaferis IC, Perpinias II, Sautreuil M, Bezes G, Papanikolaou NP, Loupis M, Spanoudakis I, Tatakis EC, «Innovative waste heat recovery systems in rotorcrafts,» *IEEE on Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, 2012.
- [25] S. Lineykin, S. Ben- Yaakov, «Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules,» *IEEE Transaction on Industrial Applications*, τόμ. 43, 2007.
- [26] D. Mitrani, «Methodology for extracting thermoelectric module parameters,» *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, τόμ. 54, 2005.
- [27] Shiho, K., «Analysis and modeling of effective temperature differences and electrical parameters of thermoelectric generators,» *Applied Energy*, τόμ. 102, 2013.
- [28] M. Chen, «Design methodology of large-scale thermoelectric generation: A hierarchical modeling approach in SPICE,» *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2011.
- [29] Yaakov, S. Lineykin and S. Ben, «PSPICE-Compatible Equivalent Circuit of Thermoelectric Coolers,» σε *IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference (PESC 2005)*, 2005.
- [30] Hodes, M., «On one-dimensional analysis of thermoelectric modules (TEMs),» *IEEE Transaction on Componets and Packaging Technologies*, τόμ. 28, 2005.
- [31] TECTEG. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://thermoelectric-generator.com/wp-content/uploads/2022/02/MPG-A4-200-2018-009A-Rev-2109-TECTEG.pdf>.
- [32] Zhang, H., «Research on the generating performance of series- parallel connection and reappearance of a semiconductor thermoelectric module,» *Acta Energiæ Solaris Sinica*, τόμ. 22, 2001.
- [33] X. Weidong, W.G. Dunford, «A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems,» σε *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2004.
- [34] L. Bangyin, S. Duan, F. Liu, P. Xu, «Analysis and improvement of maximum power point tracking algorithm based on incremental conductance method for photovoltaic array,» σε *Proc. International Power Electronics and Drive Systems Conference*, 2007.
- [35] I. Laird, D. Dah-Chuan Lu, «High step-up DC/DC topology and MPPT algorithm for use with a thermoelectric generator,» *IEEE Transaction on Power Electronics*, τόμ. 28, 2013.
- [36] A. Montecucco, A.R. Knox, «Maximum Power Point Tracking Converter Based on the Open-Circuit Voltage Method for Thermoelectric Generators,» *IEEE Transaction on Power Electronics*, τόμ. 30, 2015.
- [37] Investopedia. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.investopedia.com/terms/n/neuralnetwork.asp>.
- [38] D. S. Morales, Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications, 2010.
- [39] Ν. Αναστάσιος, Μελέτη και σχεδιασμός στατικής θερμοηλεκτρικής ανάκτησης ενέργειας καυσαερίων, Ξάνθη: Δημοκρήτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 2021.