



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ**

**ΤΙΤΛΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία**

**Έλεγχος και Οδήγηση Θαλάσσιων Συστημάτων**

**Συγγραφέας**

**Ανδρομιδάς Κωνσταντίνος**

**ΑΜ: 80697801**

**Επιβλέπων: Δρόσος Χρήστος**

**Αθήνα, Απρίλιος 2024**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**

**SCHOOL**

**DEPARTMENT**

**TITLE OF POSTGRADUATE PROGRAM (MSc/MBA)**

**Diploma Thesis**

**Controlling and Driving Propulsion Marine Systems**

**Student name and surname:**

**Andromidas Konstantinos**

**Registration Number:**

**80697801**

**Supervisor name and surname:**

**Drosos Christos**

**Athens, April 2024**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ**

**ΤΙΤΛΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**Έλεγχος και Οδήγηση Θαλάσσιων Συστημάτων**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>Α/α</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1	ΔΡΟΣΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ	ΕΔΙΠ Α	
2	ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
3	ΓΚΑΝΕΤΣΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η ...Ανδρομιδάς Κωνσταντίνος.....  
του Σωτηρίου, με αριθμό μητρώου ..80697801 φοιτητής/τρια του Προγράμματος  
Μεταπτυχιακών Σπουδών Αυτοματισμός Παραγωγής και Υπηρεσιών του Τμήματος  
Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής της

Σχολής.....Μηχανικών..... του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής 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».

*\*Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.*

Ο/Η Δηλών/ούσα

**\* Ονοματεπώνυμο /Ιδιότητα**

**Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα**  
(Υπογραφή)



***\* Εάν κάποιος επιθυμεί απαγόρευση πρόσβασης στην εργασία για χρονικό διάστημα 6-12 μηνών (embargo), θα πρέπει να υπογράψει ψηφιακά ο/η επιβλέπων/ουσα καθηγητής/τρια, για να γνωστοποιεί ότι είναι ενημερωμένος/η και συναινεί. Οι λόγοι χρονικού αποκλεισμού πρόσβασης περιγράφονται αναλυτικά στις πολιτικές του Ι.Α. (σελ. 6): [https://www.uniwa.gr/wp-content/uploads/2021/01/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CC%81%CF%82\\_%CE%99%CE%B4%CF%81%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%85%CC%81\\_%CE%91%CF%80%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CC%81%CE%BF%CF%85\\_final.pdf](https://www.uniwa.gr/wp-content/uploads/2021/01/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CC%81%CF%82_%CE%99%CE%B4%CF%81%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%85%CC%81_%CE%91%CF%80%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CC%81%CE%BF%CF%85_final.pdf)***

## Περίληψη

Γνωρίζοντας τις ραγδαίες κλιματολογικές εξελίξεις που πραγματοποιούνται σε αυτή την δεκαετία ζητείτε επιτακτικά από την κοινωνία προς τον κόσμο της τεχνολογίας και των ερευνών νέοι τρόποι μείωσης των ρύπων. Ο κόσμος της ναυτιλίας εδώ και χρόνια έχει κινηθεί προς αυτή την κατεύθυνση της μείωσης των ρύπων δηλαδή της μείωσης τους περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η τεχνολογία στον ναυτιλιακό τομέα ορίζει τις εξελίξεις και εφαρμόζει καινοτομίες μετατρέποντας παλαιότερα συστήματα επί του πλοίου εκσυγχρονίζοντας τα είτε εφαρμόζοντας νέες τεχνολογίες με στόχο την περιβαλλοντική προσέγγιση. Η ηλεκτροπρόωση των πλεύσιμων μέσων, όπου αυτή εφαρμόζεται, αποτελεί ένα τέτοιο κομμάτι του εκσυγχρονισμού του πλοίου καθώς καταναλώνονται οι μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας της τάξεως των MW, παρόλα αυτά συγκρίνοντας τα με την ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται για να παραχθεί για την αξονική πρόωση είναι αρκετά χαμηλότερη και με χαμηλότερες εκπομπές ρύπων. Με την παρούσα διατριβή παρουσιάζεται η έννοια της ηλεκτροπρόωσης μέσα από βιβλιογραφική έρευνα. Θα παρουσιαστούν οι κινητήριες μηχανές όπως αυτές εισάγονται στην ναυτιλία στην πάροδο των χρόνων με σκοπό τον μέγιστο βαθμό απόδοσης σε συνδυασμό με την μικρότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μηχανές διακρίνονται σε κινητήρες και γεννήτριες συνεχούς και εναλλασσομένου ρεύματος. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά στοιχεία και προτερήματα που χρησιμοποιούνται προς όφελος της ηλεκτροπρόωσης. Τα ηλεκτρονικά ισχύος αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ηλεκτροπρόωσης καθώς είναι ο κύριος παράγοντας για την εξέλιξη της. Ξεκινώντας από τους ελεγχόμενους ανορθωτές πυριτίου (Silicon Controlled Rectifier-SCR) στην δεκαετία του '60 για την κίνηση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος και αργότερα με την χρήση των διπολικών τρανζίστορ απομονωμένης πύλης (Insulated Gate Bi Polar Thyristor-IGBT) και τα ολοκληρωμένα θυρίστορ με μεταγωγή πύλης (Integrated Gate Commutating Thyristor-IGCT) είναι κάποια από τα πιο σημαντικά ημιαγωγά στοιχεία που βοήθησαν στην στελέχωση των ηλεκτρονικών μετατροπέων (Converters) στα πλοία κατηγορίας ολοκληρωμένων πλήρως ολοκληρωμένων ηλεκτρικής πρόωσης (Integrated Full Electric Propulsion-IFEP) ή πλήρης ηλεκτρικής πρόωσης ( Full Electric Propulsion-FEP). Το καρβίδιο του πυριτίου SiC είναι το χημικό στοιχείο που έδωσε την ώθηση για την εξέλιξη των μεταγωγικών διακοπών υψηλής ισχύος. Οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται σύμφωνα με τις ανάγκες της πρόωσης λαμβάνοντας υπόψιν το επίπεδο των ελιγμών, της άμεσης απόκρισης, της ζητούμενης και αποδιδόμενης ροπής του προωθητικού κινητήρα, της παραγόμενης ισχύος αλλά και των ηλεκτρικών παραμορφώσεων που αποδίδονται στον ζυγό του πλοίου, είναι κάποια από τα πολλά στοιχεία επιλογής. Συστοιχίες ηλεκτρονικών διατάξεων χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις σε τάση και συχνότητα που απαιτείται για την οδήγηση των προωθητικών κινητήρων μέσω των συστημάτων οδήγησης (Driving Systems). Τα συστήματα αυτά είτε μπορεί να είναι εναλλασσομένου ρεύματος είτε συνεχούς αλλά τα τελευταία χρόνια προωθούνται τα πρώτα. Ο λόγος είναι αρκετοί αλλά οι πιο σημαντικοί είναι το χαμηλό κόστος, η αξιοπιστία και η υψηλή απόδοση. Οι πλέον επονομαζόμενοι ρυθμιστές στροφών μεταβλητής ταχύτητας (Variable Speed Drives) μπορεί να ανορθωτές-αντιστροφείς, κυκλομετατροπείς ή μητροειδείς μετατροπείς. Ο έλεγχος των κινητήρων επιτυγχάνεται με τον έλεγχο του πηλίκου της τάσης ως προς την συχνότητα σε κάποιες των περιπτώσεων είτε με διανυσματικό

έλεγχο με σκοπό τον έλεγχο της ροπής και της ταχύτητας του κινητήρα . Επίσης παρουσιάζεται και η εξέλιξη του διανυσματικού ελέγχου με απευθείας έλεγχο της ροπής . Συμπερασματικά αποδίδονται οι τεχνικές εκείνες που έχουν μεγάλο βαθμό απόδοσης στις συστοιχίες των ημιαγωγών στοιχείων αλλά και οι νέες εξελίξεις των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μεταβλητούς ρυθμιστές στροφών .

## Abstract

Knowing that climate changes rapidly this decade, communities are urgently requests from world of research and technology to invent new ways for reducing pollution. Maritime industry has been moving on that direction aiming to reduce environmental footprint. In the maritime sector technological advancements drive progress by either updating antiquated ship systems or introducing new technologies that prioritize environmental considerations. About electrification of propulsion systems , whenever is applied, is part of vessel's modernization, as it consumes large amounts of power albeit significantly less compared to the energy required for axial propulsion, resulting to lower emissions. This thesis introduces the concept of electric propulsion through literature research. Are presented electrical machines as they have been introduced over the years aiming for maximum efficiency combined while minimizing electrical consumption. The electrical machines are divided into DC and AC motors and generators . Characteristics and advantages beneficial to electric propulsion are being introduced and explored. Power electronics play a crucial role in propulsion systems primary driver of their evolution. Starting with the Silicon Controlled Rectifier (SCR) in the 1960s to drive DC motors and later with the use of the Insulated Gate Bi Polar Thyristor (IGBT) and integrated switched thyristors gate (Integrated Gate Commuting Thyristor-IGCT) is one of the most important semiconductor elements that helped to staff the electronic converters (Converters) in the ships of the integrated full electric propulsion class (Integrated Full Electric Propulsion-IFEP) or full electric propulsion (Full Electric Propulsion-FEP).Silicon carbide SiC is the chemical element that gave the impetus for the development of high power switching switches. The converters are used according to the needs of the propulsion taking into account the level of manoeuvring, the immediate response, the requested and delivered torque of the propulsion motor, the power produced but also the electrical distortions attributed to the yoke of the ship, are some of the many elements of choice. Arrays of electronic devices are used depending on the voltage and frequency requirements needed to drive the propulsion motors through the Driving Systems. These systems can either be AC or DC, but in recent years the former have been promoted. There are several reasons, but the most important ones are low cost, reliability and high performance. The so-called Variable Speed Drives can be a rectifier-inverters, cycloconverters or matrix converters. The control of the motors is achieved by controlling the quotient of the voltage in relation to the frequency in some cases or by vector control in order to control the torque and speed of the motor. The evolution of vector control with direct

torque control is also presented. In conclusion, those techniques that have a high degree of efficiency in the arrays of semiconductor elements are attributed as well as the new developments of permanent magnet motors used in combination with variable speed regulators.





# Πίνακας Περιεχομένων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ .....	1
Συγγραφέας .....	1
Ανδρομιδάς Κωνσταντίνος ΑΜ: 80697801 .....	1
Student name and surname: Andromidas Konstantinos .....	2
Registration Number: 80697801 .....	2
Supervisor name and surname: Drosos Christos .....	2
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ .....	3
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IV</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....</b>	<b>7</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Κλιματική Αλλαγή Στροφή προς ΑΠΕ.....	10
1.2 Περιορισμός Εκπομπών - Ενεργειακό αποτύπωμα.....	12
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.....</b>	<b>17</b>
2.1 Ηλεκτρικές Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος .....	17
2.1.1 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος.....	17
2.1.2 Γεννήτριες Συνεχούς Ρεύματος.....	18
2.1.3 Έλεγχος και Λειτουργία Γεννητριών Συνεχούς Ρεύματος .....	19
2.1.4 Παραλληλισμός Γεννητριών Συνεχούς Ρεύματος.....	21
2.2 Ηλεκτρικές Μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος .....	22
2.2.1 Σύγχρονες Γεννήτριες .....	23
2.2.2 Παραλληλισμός Σύγχρονων Γεννητριών .....	25
2.2.3 Σύγχρονοι Κινητήρες .....	27
2.2.4 Επαγωγικοί Κινητήρες .....	29
2.3 Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη.....	30
2.3.1 Κατηγορίες κινητήρων μόνιμου μαγνήτη .....	31
2.3.2 Κατηγορίες Στάτη .....	32
2.3.3 Κατηγορίες Δρομέα.....	33
2.4 Φαινόμενο Hall.....	37
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ.....</b>	<b>39</b>
3.1 Τεχνολογική Εξέλιξη .....	39

3.2 Πρόωση Πλοίων .....	39
3.3 Ταξινόμηση Πλοίων .....	45
3.4 Αξονική Πρόωση .....	46
3.5 Αζιμουθιακή Πρόωση .....	48
3.6 Σύγκριση αξονικής και αζιμουθιακής πρόωσης .....	51
3.7 Τα οφέλη της ηλεκτρικής πρόωσης .....	52
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΗΜΙΑΓΩΓΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....</b>	<b>55</b>
4.1 Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος .....	55
4.2 Ημιαγωγικές Διατάξεις-Ημιαγωγικά Στοιχεία .....	56
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ .....</b>	<b>74</b>
5.1 Ανορθωτές .....	74
5.1.1 Ελεγχόμενος Τριφασικός Ανορθωτής Γέφυρας .....	74
5.1.1.1 Τριφασικός Ανορθωτής Πλήρους Κύματος .....	75
5.1.1.2 Τριφασικός Ελεγχόμενος Ανορθωτής Εξαναγκασμένης Μετάβασης- (Force-commutated Three Phase Controlled Rectifiers) .....	78
5.1.1.2.1 Λειτουργία Ανορθωτή Πηγής Τάσης .....	79
5.1.2 Τριφασική Γέφυρα Ανορθωτών 12 παλμών .....	82
5.2 Αντιστροφείς Εξωτερικής Μετάβασης .....	85
5.3 Αντιστροφείς Αυτομετάβασης .....	86
5.3.1 Αντιστροφέας Πηγής Ρεύματος-CSI .....	87
5.3.1.1 Αντιστροφέας Μονοφασικής Πηγής Ρεύματος .....	87
5.3.1.2 Αντιστροφέας Τριφασικής Πηγής Ρεύματος .....	90
5.3.2 Αντιστροφέας Πηγής Τάσης – VSI .....	91
5.3.2.1 Αντιστροφέας Τριφασικής Πηγής Τάσης .....	92
5.3.3 Αντιστροφείς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμού-PWM .....	93
5.4 Κυκλομετατροπείς .....	99
5.4.1 Αρχές Λειτουργίας Κυκλομετατροπέα .....	102
5.5 Μητροειδείς Μετατροπείς (Matrix Converters) .....	108
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ – ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΈΛΕΓΧΟΥ .....</b>	<b>110</b>
6.1 Διανυσματικός Έλεγχος (Vector Control) .....	111
6.2 Απευθείας Έλεγχος Ροπής (Direct Torque Control) .....	114
6.3 Έλεγχος με SPWM – CSI .....	117
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΛΟΙΟΥ .....</b>	<b>119</b>

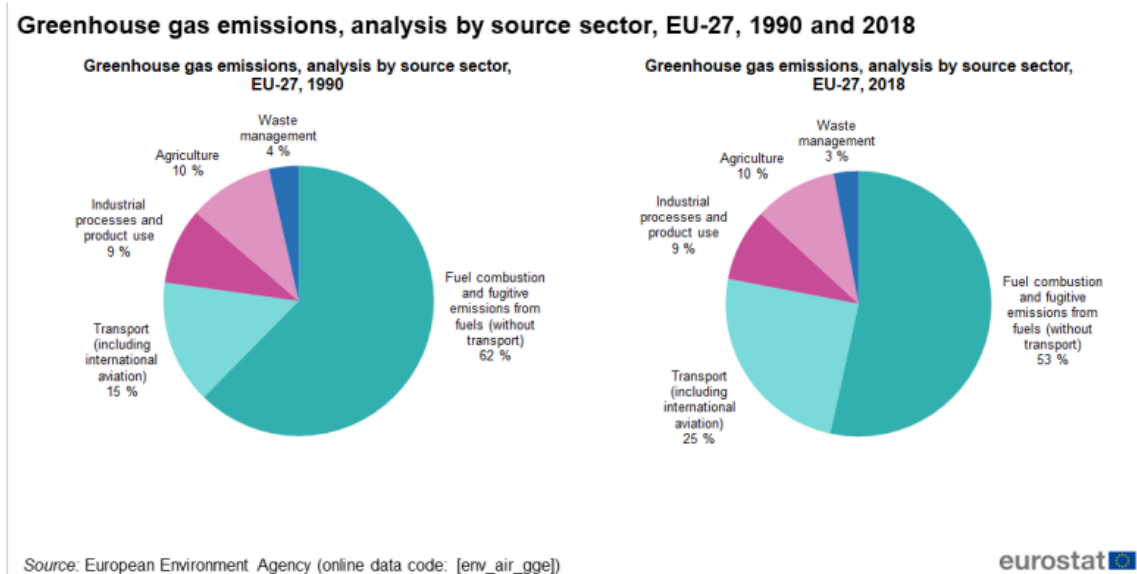
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ.....</b>	<b>120</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>121</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>122</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα

### 1.1 Κλιματική Αλλαγή Στροφή προς ΑΠΕ

Η κλιματική αλλαγή και οι παρενέργειες της που έχουν επέλθει τα τελευταία χρόνια και είναι ορατές σε όλο τον πλανήτη τόσο που έχει αναγκάσει την κοινωνία να επαναπροσδιορίσει τις ανάγκες για ενεργειακή κάλυψη. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ή εναλλακτικών πηγών ενέργειας έρχονται να καλύψουν αυτές τις ανάγκες καθώς χρειάζεται τα επόμενα χρόνια να απομακρυνθεί ο πλανήτης από την χρήση των ορυκτών καυσίμων ως κύρια πηγή ενέργειας καθώς η εκτεταμένη χρήση τους έχει επιδεινώσει τις κλιματικές συνθήκες.

Ο εξηλεκτρισμός των μέσων μεταφοράς κρίνεται απαραίτητος, σύμφωνα με στοιχεία του 2019, το κομμάτι των μεταφορών συμμετέχει κατά 25% στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου της τάξεως του 25% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ευρύτερη περιοχή της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Όπως γίνεται αντιληπτό αποτελεί ένα μεγάλο ποσοστό που συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, Σχήμα 1.1 [1]



Σχήμα 0.1. Ποσοστιαία απεικόνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου

Η ηλεκτροκίνηση έχει συσσωρεύσει των ενδιαφέρον των κατασκευαστών αλλά και των χρηστών βλέποντας την ταχεία επέκταση σημαντικών παραγόντων για την λειτουργίας της όπως οι τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος και των συσσωρευτών . Έχει τεθεί χρονικό περιθώριο από την Ευρωπαϊκή Ένωση ως το 2030 να κυκλοφορούν 30 εκατομμύρια υβριδικά και ηλεκτρικά αυτοκίνητα [2]. Επιπλέον μείωση κατά 55% των εκπομπών CO<sub>2</sub> μέχρι το 2030 [3]. Τροχοπέδη σε αυτή την πολιτική αποτελεί ο τομέας της ναυσιπλοΐας και των εναέριων μέσων καθώς κάποιοι τεχνικοοικονομικοί λόγοι δεν βοηθούν προς αυτή την κατεύθυνση. Ο τομέας των θαλάσσιων μεταφορών συμμετέχει και αυτός με την σειρά του στην επιβάρυνση της κλιματικής αλλαγής και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου . Ο κατασκευαστικός κολοσσός Boeing σε μία αλλαγή τεχνολογικής κατεύθυνσης αποφάσισε την αντικατάσταση των αυστηρώς μηχανολογικών εξαρτημάτων με ηλεκτρικά μέσω της παραγωγής ενέργειας επί του σκάφους για την ενεργειακή κάλυψη αυτών των αναγκών [4].

Ο κόσμος της ναυσιπλοΐας και της τεχνολογικής εξέλιξης σε αυτό τον τομέα επιθυμεί την χρήση πλήρως εξ ηλεκτρισμένων πλοίων (All Electric Ship - AES) παρόλο αυτά αυτό γίνεται με ιδιαίτερα αργούς ρυθμούς και προβλέπεται ότι το 1/3 αυτών θα χρησιμοποιεί συσσωρευτές μέχρι το 2050 [5]. Η Νορβηγία ως χώρα πρωτοπόρος στην ναυσιπλοΐα κατευθύνει τις τεχνολογικές εξελίξεις του τομέα έτσι με την χρήση του MV Ampere το 2015 ως το πρώτο φέρι μποτ χωρητικότητας περίπου 1MWh δείχνει τον δρόμο προς ένα πλήρως εξ' ηλεκτρισμένο θαλάσσιο περιβάλλον [6].

Αν και οικονομοτεχνικοί παράγοντες δεν βοηθούν προς αυτή την εξέλιξη των AES . Τέτοιοι παράγοντες είναι η αξιοπιστία των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών διατάξεων ,οι αρμονικές ταλαντώσεις και η ποιότητα ισχύος που την συνοδεύει, η λήψη πολλών δεδομένων και η διαχείριση των σφαλμάτων. Η αλλαγή κατεύθυνσης έχει μεγάλο οικονομικό κόστος καθώς θα χρειαστεί να αντιμετωπιστούν τεχνικές αστοχίες , εξέλιξη νέων τεχνολογιών και η απαραίτητη εκπαίδευση του προσωπικού.

Αν και η διεθνής ναυσιπλοΐα δεν συμμετέχει κατά μεγάλο ποσοστό στις συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> παγκοσμίως καθώς το 2019 συμμετείχε κατά 2% στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα , παρόλα αυτά λαμβάνει άμεσα μετρά για τον περιορισμό του ενεργειακού αποτυπώματος που της αναλογεί σε παγκόσμια κλίμακα καθιστώντας ενεργειακά πρωτόκολλα και κανονισμούς ακόμα και κατά τον ελλιμενισμό , προωθώντας την πολιτική της ενεργειακής ηλεκτρικής σύνδεσης (shore connection) για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των πλοίων [7].

Επιπλέον, η μεγάλη ανάπτυξη του διαδικτυακού εμπορίου τα τελευταία χρόνια και ιδιαίτερα μετά την εμφάνιση της πανδημίας του COVID-19, έγινε ξεκάθαρη η μελλοντική αύξηση των υπαρχόντων πλωτών μέσων. Αυτό έχει ως επακόλουθο να καθίσταται επιτακτική η ανάγκη εύρεσης λύσεων για

τη μεγαλύτερη δυνατή μείωση των ρύπων και την μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας των θερμικών μηχανών, πιο συγκεκριμένα την επίτευξη της μεγαλύτερης αξιοποίησης της παραγόμενης ισχύος για δεδομένη κατανάλωση καυσίμου.

Συμπερασματικά από τα προηγούμενα δεδομένα, διακρίνεται ότι ο πλήρης εξηλεκτρισμός των μέσω μεταφοράς δεν βρίσκεται ακόμη σε αρκετά ώριμο στάδιο, ώστε να υπάρξει η διαδεδομένη χρήση τους και ιδιαίτερα όσον αφορά τα εναέρια και πλωτά μέσα μεταφοράς. Παρόλα αυτά, μέχρι τον πλήρη εξηλεκτρισμό τους, κρίνεται απαραίτητο στα υφιστάμενα μέσα και σε αυτά που τώρα κατασκευάζονται να εγκαθίστανται συστήματα εξοικονόμησης και ανάκτησης ενέργειας.

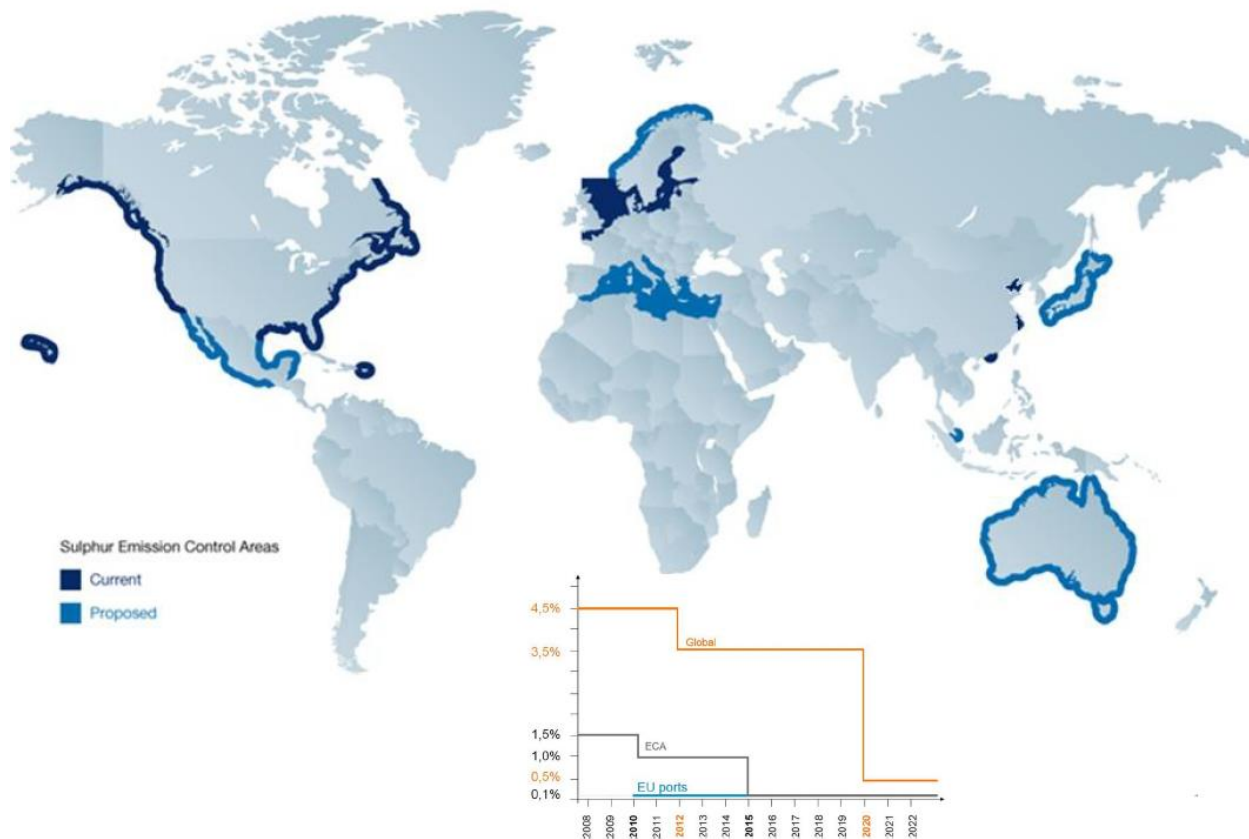
## **1.2 Περιορισμός Εκπομπών - Ενεργειακό αποτύπωμα**

Ως ανώτατη αρχή ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization – IMO), αποφάσισε για τον περιορισμό της θαλάσσιας ρύπανσης και των εκπομπών καυσαερίων που θα προκληθεί από την αυξανόμενη ένταξη πλοίων στα διεθνή νηολόγια να εκδώσει κανονισμούς. Οι κανονισμοί περιλαμβάνονται στη «Διεθνή σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία» και η οποία δέχθηκε τροποποιήσεις το 1997 και το 2008 . Στην πρώτη τροποποίηση προστέθηκε το παράρτημα «Κανονισμοί για την πρόληψη ρύπανσης του αέρα στα πλοία» κατά το οποίο οι εκπομπές οξειδίου του αζώτου ( Nitrogen Oxide -NO<sub>x</sub> )και οξειδίου του θείου (Sulphur oxide-SO<sub>x</sub> ) οριοθετούνται κατά την χρήση των καυσίμων αλλά και απαγορεύονται εκπομπές καυσαερίων που συνδράμουν στην καταστροφή του στρώματος του όζοντος [8].

Οι εκπομπές των παραπάνω ουσιών με την μορφή καυσαερίων τίθενται υπό περιορισμό και μπαίνουν σε όρια όταν αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα σε περιοχές με ελεγχόμενους ρύπους (Emission Control Areas-ECA's) .Οι συγκεκριμένες περιοχές ελέγχου εκπομπών περιλαμβάνουν την Βόρεια και Βαλτική θάλασσα, την Καραϊβική την Βόρεια Αμερική , την Καναδική Ακτή καθώς και άλλες περιοχές που θα ενσωματωθούν στο άμεσο μέλλον (Σχήμα 1.2) [9].

Ακολουθώντας τις νέες ενεργειακές πολιτικές στο Παράρτημα VI της MARPOL ορίζονται ο δείκτης λειτουργίας ενεργειακής απόδοσης ( Energy Efficiency Operation Index – EEOI) και ο δείκτης σχεδιασμού ενεργειακής απόδοσης (Energy Efficiency Design Index – EEDI) οι οποίοι είναι υποχρεωτικοί για κάθε πλοίο από το 2016.

## IMO: Emission Control Areas



Σχήμα 0.2. Χάρτης περιοχών περιορισμένων εκπομπών ρύπων (ECA's) [9].

Ο IMO ανέλαβε να εκδώσει οδηγία για την παρακολούθηση και καταγραφή των δεδομένων και επιδόσεων όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου και των ρύπων που προκύπτουν, τα πλέοντα μεταφορικά μέσα εξοπλίζονται με συστήματα επονομαζόμενά ως SSEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan). Ο συγκεκριμένος έλεγχος όσον αφορά τον σχεδιαστικό τρόπο και λειτουργία του δεν έχει προτυποποιηθεί αλλά όλα τα νέα ναυπηγικά προγράμματα μέσω του PMS (Power Management System) ελέγχουν τους δείκτες αυτούς και στο μέλλον θα μπορεί να συνεργαστεί με το SSEMP. Ο δείκτης EEDI είναι ο δείκτης συνολικής αποδοτικότητας όσον αφορά τον σχεδιασμό του πλοίου συναρτήσει των εκπομπών του. Ο κατασκευαστικός φορέας παρόλο αυτά έχει την δυνατότητα να διαλέξει σχεδιαστικά πως θα το πετύχει πάντα εναρμονιζόμενος με τα όρια του δείκτη. Το ενεργειακό αποτύπωμα του έργου στο περιβάλλον εκφράζεται με αυτόν τον δείκτη αυτό. Η μονάδα μέτρησης του δείκτη είναι η ποσότητα σε γραμμάρια εκπομπών στο περιβάλλον ανά μονάδα μεταφερόμενου φορτίου σε τόνους και μονάδα απόστασης σε ναυτικά μίλια (nautical miles) [10].

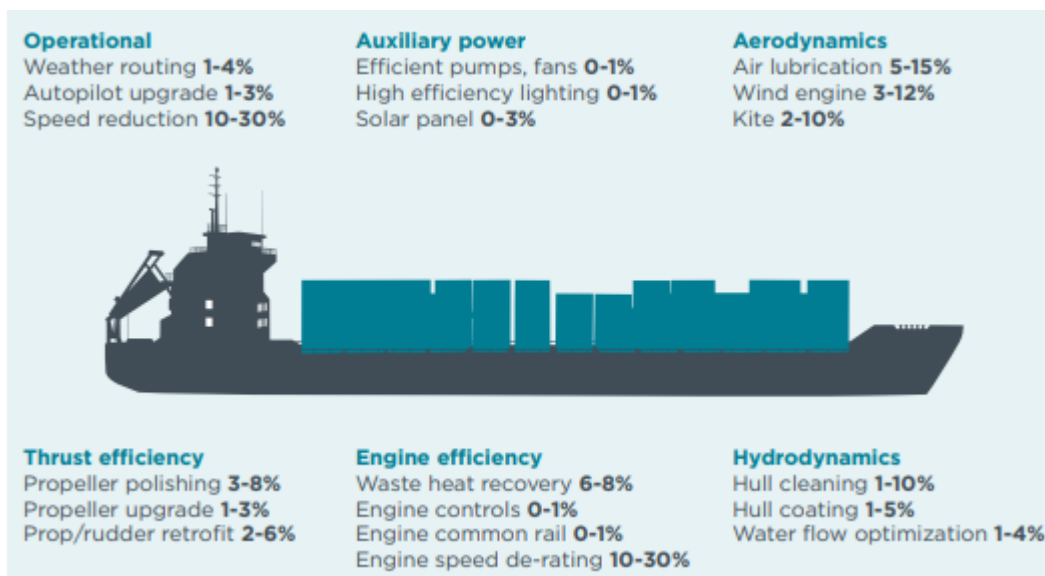


Ο EEDI αποτελεί έναν δείκτη συνολικής αποδοτικότητας της σχεδίασης του πλοίου, σε σχέση με τις εκπομπές. Ωστόσο, ο κατασκευαστής του εκάστοτε πλοίου διαθέτει την ευκαιρία να επιλέξει τον τρόπο με τον οποίο θα επιτύχει τα όρια που έχουν τεθεί για τον EEDI. Είναι δηλαδή ένας δείκτης του αποτυπώματός του στο περιβάλλον, έχοντας ταυτόχρονα άμεση σχέση με το όφελος της κοινωνίας και οι μονάδες μέτρησής του είναι η ποσότητα (γραμμάρια) που εκπέμπεται στο περιβάλλον ανά μονάδα μεταφερόμενου φορτίου (tone) και μονάδα απόστασης (nautical mile) [11]

Ο δείκτης EEOI που είναι το πηλίκο της μάζας CO<sub>2</sub> ανά μονάδα ωφέλιμου μεταφορικού έργου.

Σκοπός των παραπάνω δεικτών είναι να μείνουν σε χαμηλά επίπεδα ώστε τα πλεύσιμα μέσα να έχουν χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα.

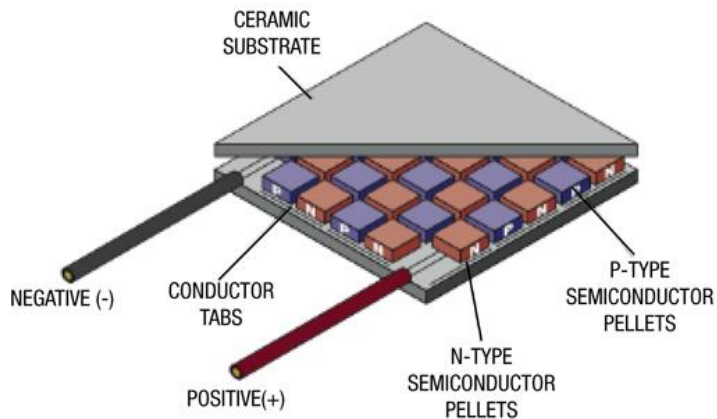
Επιστήμονες από διάφορα επιστημονικά πεδία αναγνωρίζουν το γεγονός πως υπάρχουν ενεργειακά φορτία και απώλειες στα πλοία που καταναλώνονται, χάνονται ή διαχέονται μειώνοντας την αποδοτικότητα του πλοίου. Μηχανικές απώλειες και απώλειες τριβής κατά την μετατροπή της ροπής του κινητήρα και απώλειες περιστροφικές κατά την περιστροφή της προπέλας αποτελούν και αυτές σημαντικό κομμάτι των απωλειών. Επίσης υπάρχουν και τα αεροδυναμικά και υδροδυναμικά εμπόδια που καλείτε η προωθητική προπέλα να ξεπεράσει. Οι θερμοδυναμικές απώλειες από τις κύριες μηχανές, λέβητες και τους βοηθητικούς κινητήρες μαζί με μικρότερες ενεργειακές απώλειες όπως φωτισμός, αντλίες και ανεμιστήρες επιδεινώνουν τους παραπάνω δείκτες. Για αυτό έχει μελετηθεί πως μπορούν να μειωθούν οι ενεργειακές απώλειες μελετώντας άλλες τεχνολογίες για την μείωση των φορτίων και των απωλειών μειώνοντας τις εκπομπές CO<sub>2</sub> και των καυσίμων. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται οι τεχνολογίες που θα βοηθήσουν προς αυτή την κατεύθυνση [12]



Σχήμα 0.3. Μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας σε πλωτά μέσα, για μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών CO<sub>2</sub> [12].

Όπως αναφέρεται στο παραπάνω Σχήμα 1.3 στο μηχανολογικό τομέα , η απόδοση των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας (Waste Heat Recovery System) είναι σε ένα σημαντικό ποσοστό της τάξεως 6-8 % . Η οποιαδήποτε επαναχρησιμοποίηση της θερμότητας που μπορεί να αποδίδουν για παράδειγμα τα καυσαέρια του πλοίου ή λέβητες είναι χρήσιμη ενέργεια που δεν υπάρχει περιθώριο να χάνεται στο εξωτερικό περιβάλλον. Το επίπεδο των θερμοκρασιών είναι αρκετά μεγάλο για αυτό και ωφέλιμο για την χρήση της δημιουργίας ατμού σε άλλα μικρότερα συστήματα που μπορεί απλά να χρειάζεται θερμοκρασίες 30-40 βαθμούς στο νερό. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία ατμού ή για τα συστήματα θέρμανσης-εξαερισμού-κλιματισμός (Hot Ventilation Air Conditioning-HVAC). Τα αποτελέσματα αυτής της εφαρμογής δείχνουν πως ρεαλιστικά μπορεί να αναμένεται εξοικονόμηση καυσίμων 5-15% , ανάλογα πάντα και με την δυνατότητα απόδοσης της μονάδας [13].

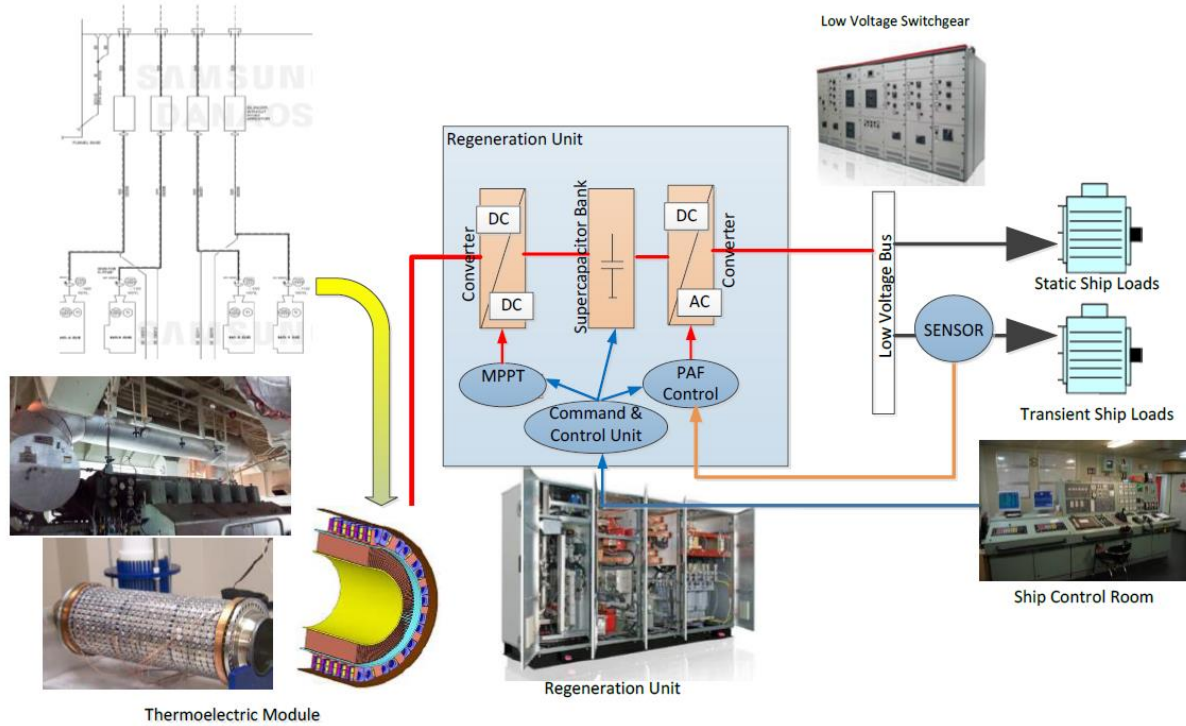
Η τεχνολογική εξέλιξη η οποία φαίνεται να κερδίζει έδαφος στην ναυτιλία καθώς σε άλλους κλάδους όπως η αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιείται ήδη, είναι οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (Thermoelectric Generators-TEG) . Οι γεννήτριες είναι θερμοηλεκτρικά στοιχεία αποτελούμενα από ημιαγωγά υλικά n-p . Τα υλικά κατασκευής παρουσιάζουν υψηλή αγωγιμότητα ανάλογα με την θερμική επίδραση που δέχονται . Τα στοιχεία αυτά παράγουν ενέργεια λόγω διαφοράς θερμοκρασίας στις επιφάνειες του όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4 Κατασκευαστική δομή μονάδας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας

Τα στοιχεία αυτά έχουν υψηλή αξιοπιστία και πρακτικότητα , αποτελούν την πιο υποσχόμενη πηγή ενέργειας του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Μπορεί να εγκατασταθεί σε αρκετές επιφάνειες όπου υπάρχουν υψηλές θερμοκρασίες σε ένα πλοίο όπως μηχανές, ατμολέβητες και γενικότερα σε σημεία του πλοίου όπου υπάρχει απώλεια θερμικής ενέργειας για να υπάρχει η διαφορά θερμοκρασίας στις επιφάνειες. [14]

Στο πρόγραμμα ECOMARINE παρουσιάστηκε η δυνατότητα της μέγιστης απόδοσης αυτών των στοιχείων . Μπορεί να εφαρμοστεί σε επιφάνειες με μεγάλη θερμική απόδοση η οποία και συναντάται στα καυσαέρια των μηχανών . Εκεί οι θερμοκρασίες είναι πάνω από 300° C και σε συνδυασμό με την θερμοκρασία του χώρου δημιουργείται αυτή η διαφορά θερμοκρασίας στις επιφάνειες. Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζεται η διάταξη των υποστηρικτικών συστημάτων του προγράμματος και πως αυτό το σύστημα τροφοδοτεί τον ζυγό του πλοίου [15].



Σχήμα 1.5 Επισκόπηση έργου ECOMARINE [15].

## Κεφάλαιο 2 Ηλεκτρικές Μηχανές

Για την κάλυψη διαφορετικών απαιτήσεων και αναγκών και ακολουθώντας τις τεχνολογικές απαιτήσεις των εποχών κατά κύριο λόγο υπάρχουν οι μηχανές συνεχούς ρεύματος (DC Motors) , οι εναλλασσόμενες μηχανές (AC synchronous machines) αλλά και οι ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές (Asynchronous motors or Induction Motors). Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να υπάρχει συνδυασμός κινητήριας μηχανής (prime mover) άλλοτε μπορεί να είναι μία μηχανή εσωτερικής καύσης ή ένας στροβίλος σε ένα υδροηλεκτρικό εργοστάσιο ή στην περίπτωση ενός πυρηνικού εργοστασίου ένας ατμοστρόβιλος ή ακόμα και ηλεκτροκινητήρας. Χρειάζεται να αναφερθεί ότι η κινητήρια μηχανή θα επηρεάζει τη τάση εξόδου της γεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη ένα πλήθος χαρακτηριστικών κίνησης της κινητήριας μηχανής οπότε και θεωρείται πως λειτουργεί υπό σταθερές στροφές όταν γίνονται συγκρίσεις με άλλες γεννήτριες ή μελέτες. Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος απουσιάζουν από τις σημερινές εφαρμογές σε βιομηχανικά και ηλεκτροπαραγωγικά πεδία συμπεριλαμβάνοντας και την ναυτιλία .Παρόλα αυτά χρίζεται σκόπιμο και για την καλύτερη κατανόηση να αναφερθούν [16].

### 2.1 Ηλεκτρικές Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

Οι ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος κάλυπταν ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών στην ναυτιλία , είτε προκύπταν να εφαρμόσουν την κάλυψη ενεργειακών αναγκών για την κάλυψη των φορτίων είτε για την παραγωγή μηχανικού έργου μέσω κινητικής ενέργειας που προσφέραν οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

#### 2.1.1 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος

Παρόλο που ακόμα και τώρα οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος παραμένουν δημοφιλείς σε κάποιες εφαρμογές όπως στα οχήματα και τα αεροπλάνα , εκεί που καλούνται να καλύψουν μικρές ανάγκες σε έργο, στα βιομηχανικά πεδία έχουν εκλείψει.

Σε εφαρμογές ελέγχου ταχύτητας οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι ιδανικοί . Στην περίπτωση που δεν υπάρχει πηγή συνεχούς τάσης τότε χρησιμοποιούνται ιδανικοί ανορθωτές ή κυκλώματά chopper για την παραγωγή συνεχούς τάσης όπου συνδυαστικά με κινητήρες συνεχούς ρεύματος

ολοκληρώνεται ο επιθυμητός έλεγχος ταχύτητας. Οι βασικές κατηγορίες κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι : κινητήρας συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση (Shunt DC Motor) , κινητήρας συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet DC Motor) ,κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ανεξάρτητη διέγερση (Separately Excited DC Motor), κινητήρας συνεχούς ρεύματος με σύνθετη διέγερση (Compounded DC Motor) και κινητήρας συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς ( Series DC Motor).

### 2.1.2 Γεννήτριες Συνεχούς Ρεύματος

Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος είναι μηχανές συνεχούς ρεύματος που πραγματοποιούν το έργο των γεννητριών .Δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ των κινητήρων συνεχούς ρεύματος και των γεννητριών έως ότου αποσαφηνιστεί η ροή ισχύος τους. Στο τομέα των γεννητριών όλα διαφοροποιούνται όταν εμπλέκεται η έννοια της διέγερσης (excitation) και πως αυτή εφαρμόζεται για την δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στο κύκλωμα της διέγερσης. :

- a. Γεννήτριες Ανεξάρτητης Διέγερσης (separately excited). Το κύκλωμα που παράγει το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται από ανεξάρτητη πηγή από την γεννήτρια , η εξωτερική πηγή τροφοδοτεί το κύκλωμα διέγερσης με συνεχή τάση. Χρησιμοποιούνταν ευρέως σε πλοία κατασκευής την δεκαετία '70.
- b. Γεννήτριες παράλληλης διέγερσης (shunt). Εδώ το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται από την γεννήτρια την ίδια σε παράλληλη σύνδεση με τα άκρα της. Τέτοιου τύπου γεννήτριες χρησιμοποιούνται για την φόρτιση συσσωρευτών στην αυτοκίνηση αλλά και στην ναυτιλία . Επιπλέον συναντάται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς χαμηλής ισχύος όπου μία σταθερή πηγή ενέργειας είναι απαραίτητη.
- c. Γεννήτριες με διέγερση σειράς (series). Το κύκλωμα διέγερσης είναι σε σύνδεση με την ίδια την γεννήτρια σε σειρά με το τύλιγμα του οπλισμού. Το ρεύμα οπλισμού εδώ είναι σε μεγαλύτερο μέγεθος από το ρεύμα των γεννητριών παράλληλης διέγερσης .Ο αριθμός των σπειρών είναι αρκετά μικρός στο τύλιγμα τους στάτη αλλά και η διατομή του αγωγού αρκετά μεγάλη σε σχέση με την εφαρμογή του αντίστοιχου υλικού της παράλληλης διέγερσης. Εδώ το τύλιγμα διέγερσης κατασκευάζεται έτσι ώστε να αποκτήσει ανθεκτικότητα σε υψηλά ρεύματα υπό πλήρες φορτίο. Τέτοιες εφαρμογές

γεννητριών πραγματοποιούνται σε βιομηχανικό περιβάλλον λατομείων όπου απαιτείται μεγάλη ροπή λόγω μεγάλων όγκων αλλά και σε αναβατόρια φορτίων για τους ίδιους παραπάνω λόγους . Στην ναυσιπλοΐα χρησιμοποιούνται για πρόωση εκεί που χρειάζεται υψηλές ροπές εκκίνησης σε χαμηλές ταχύτητες.

- d. Γεννήτριες με σύνθετη διέγερση (cumulatively compounded). Εδώ υπάρχει ο συνδυασμός και της διέγερσης σειράς αλλά και παράλληλης όπου σαν αποτέλεσμα έχει να λαμβάνονται αθροιστικά οι δύο διεγέρσεις έτσι ώστε οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις των δύο τυλιγμάτων να αθροίζονται.

Γεννήτρια σύνθετης διέγερσης χρησιμοποιείται ως εφεδρική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε νοσοκομειακές εγκαταστάσεις αλλά και σε ηλεκτροπαραγωγικές εγκαταστάσεις εκεί όπου η απότομη αυξομείωση των φορτίων δεν πρέπει επηρεάζει την λειτουργία της.

- e. Γεννήτριες διαφορική σύνθετης διέγερσης (differentially compounded). Σε αυτή την περίπτωση οι γεννήτριες συνδυάζονται με διέγερση σειράς αλλά και παράλληλη διέγερση μόνο που το αποτέλεσμα του προκύπτει έπειτα από την διαφορά τους . Εφαρμόζονται σε σταθμούς όπου χρειάζεται ο συνδυασμός ανανεώσιμων πηγών και συμβατικών πηγών ηλεκτρικής ενέργειας ως αθροιστική μονάδα.

### 2.1.3 Έλεγχος και Λειτουργία Γεννητριών Συνεχούς Ρεύματος

Η ρύθμιση των γεννητριών συνεχούς ρεύματος περιλαμβάνει τον έλεγχο διαφόρων παραμέτρων για την επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών εξόδου.

Η τάση σε γεννήτριες συνεχούς ρεύματος πρέπει να παραμένει σταθερή ακόμα και αν υπάρχουν απότομες μεταβολές στο φορτίο ή στην ταχύτητα , η τάση που παράγει η γεννήτρια αυξάνεται με τον αριθμό στροφών και με το ρεύμα διέγερσης. Έτσι η ρύθμιση της τάσης κατά την διάρκεια αυτών των μεταβολών , επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας το ρεύμα του πεδίου μέσω του ρεύματος διέγερσης μέσω κατάλληλου ροοστάτη διεγέρσεως  $R_d$  (εκτός από την περίπτωση της διεγέρσεως σειράς) . Η αύξηση του ρεύματος πεδίου ενισχύει το μαγνητικό πεδίο , με αποτέλεσμα υψηλότερη τάση εξόδου. Ο

έλεγχος της τάσης διέγερσης ελέγχεται ηλεκτρονικά ή με διαιρέτη τάσης για την συνδεσμολογία της γεννήτριας με ανεξάρτητη διέγερση , για τις συνδεσμολογίες όπου χρειάζεται παράλληλη ή σύνθετη διέγερση τότε πραγματοποιείται έλεγχος του ρεύματος διέγερσης  $I_e$  μέσω διαιρέτη. Η ταχύτητα περιστροφής του επαγωγίμου ρυθμίζεται από την ταχύτητα περιστροφής από την κινητήρια δύναμη που το κινεί.

Η σωστή εγκατάσταση και θέση των ψηκτρών κρίνεται απαραίτητη αλλά και ο περιοδικός έλεγχος αυτών. Λανθασμένη θέση και πίεση που ασκείται στον συλλέκτη προκαλεί σπινθηρισμό δημιουργία τόξου και μειωμένη απόδοση. Σε ορισμένες γεννήτριες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται βοηθητικοί πόλοι ή πόλοι αντιστροφής, για την μείωση των σπινθηρισμών . Οι βοηθητικοί πόλοι τοποθετούνται μεταξύ των κύριων πόλων και η περιέλιξη που γίνονται σε αυτούς βοηθούν έτσι ώστε να παράγεται μαγνητικό πεδίο που αντιτίθεται στην αντίδραση οπλισμού. Αυτό βοηθά στην εξουδετέρωση της παραμόρφωσης του κύριου μαγνητικού πεδίου που προκαλείται από το ρεύμα του οπλισμού, μειώνοντας τους σπινθηρισμούς και βελτιώνοντας την εναλλαγή.

Η αναγκαιότητα των βοηθητικών πόλων εξαρτάται από τον συγκεκριμένο σχεδιασμό και την εφαρμογή της γεννήτριας . Σε μικρές γεννήτριες ισχύος, οι βοηθητικοί πόλοι μπορεί να παραληφθούν επειδή τα αποτελέσματα της αντίδρασης οπλισμού είναι σχετικά ελάχιστα. Ωστόσο, στις γεννήτριες υψηλής ισχύος, οι παρεμβολές είναι συχνά απαραίτητες για τη διατήρηση καλής εναλλαγής και τη μείωση των σπινθήρων, ιδιαίτερα σε υψηλά φορτία. Οι βοηθητικοί πόλοι είναι απαραίτητο να παρουσιάζουν την ίδια πολικότητα με τον κύριο πόλο.

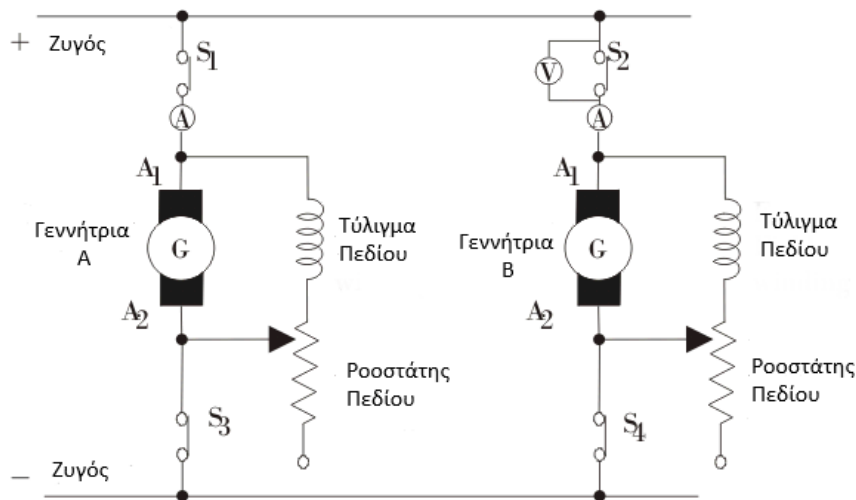
## 2.1.4 Παραλληλισμός Γεννητριών Συνεχούς Ρεύματος

Ο παραλληλισμός γεννητριών προσφέρει την δυνατότητα αυξημένης αξιοπιστίας σε ένα δίκτυο παρέχοντας εναλλακτικές λύσεις σε περίπτωση όπου υπάρχει η ανάγκη για υποστήριξη του φορτίου ή δυσλειτουργία σε κάποια ήδη συνδεδεμένη γεννήτρια ή συντήρηση σε κάποια μονάδα. Ακόμα όταν υπάρχουν συνδεδεμένες παραπάνω από μία γεννήτριες γίνεται ίση κατανομή του φορτίου (Load Sharing) μεταξύ των μονάδων. Ρυθμίζοντας την διέγερση ή το ρεύμα του πεδίου κάθε γεννήτριας, είναι δυνατό να κατανεμηθεί το φορτίο ομοιόμορφα. Για να επιτευχθεί παραλληλισμός δύο ή περισσότερων γεννητριών κρίνεται απαραίτητο να έχουν την ίδια τάση και πολικότητα. Κάνοντας το πιο κατανοητό θα παρατεθεί μελέτη περίπτωσης κατά την ζεύξη και αποσύνδεση μία γεννήτριας στον ζυγό. Χρησιμοποιείται στον ζυγό δύο γεννήτριες A και B. Λαμβάνοντας υπόψη πως η γεννήτρια A είναι ήδη συνδεδεμένη και η B είναι προς παραλληλισμό χρειάζεται να ακολουθηθούν κάποια βήματα:

- Ενεργοποιείται η γεννήτρια B
- Χρειάζεται να ρυθμιστεί η τάση εξόδου της γεννήτριας προς παραλληλισμό (B) σε τάση ίση ή μεγαλύτερη από την τάση των ζυγών μέσω του ροοστάτη για τον έλεγχο της τάσης εξόδου.
- Σύνδεση με της γεννήτριας με το δίκτυο
- Κατά την σύνδεση η κατανομή του φορτίου διαμοιράζεται μειώνοντας το φορτίο στην ήδη συνδεδεμένη γεννήτρια και η γεννήτρια φορτίζεται μέσω αύξησης του ρεύματος διέγερσης.

Συνολικά, οι παράλληλες γεννήτριες συνεχούς ρεύματος μπορούν να παρέχουν βελτιωμένη αξιοπιστία, ευελιξία, απόδοση και ανοχή σφαλμάτων στα συστήματα παραγωγής ενέργειας. [16]





Σχήμα 2.6 Συνδεσμολογία γεννητριών παράλληλης διέγερσης προς παραλληλισμό

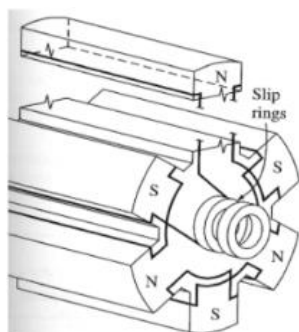
## 2.2 Ηλεκτρικές Μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος καλούνται γεννήτριες που μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική αλλά και οι κινητήρες, που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε σύγχρονες και επαγωγικές. Οι σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές (synchronous machines) είναι οι κινητήρες και οι γεννήτριες όπου το ρεύμα διεγέρσεως τροφοδοτείται με επαγωγή (λειτουργία μετασχηματιστή) στα τυλίγματα της διέγερσης τους. Τα κυκλώματα διεγέρσεως των περισσοτέρων σύγχρονων και επαγωγικών μηχανών τοποθετούνται στους δρομείς.

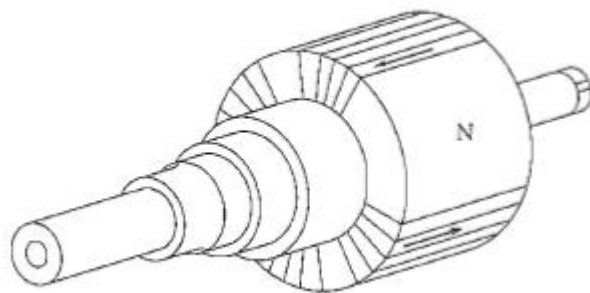
Όσον αφορά τις γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος αυτές διακρίνονται σε σύγχρονες γνωστές ως εναλλακτήρες (Alternators) αλλά και τις επαγωγικές (Inductive). Οι συγκεκριμένες δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη ζήτηση λόγω των πολλαπλών μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Όταν λοιπόν γίνεται αναφορά σε επαγωγικές μηχανές τότε με αυτό προσδιορίζονται οι επαγωγικοί κινητήρες.

## 2.2.1 Σύγχρονες Γεννήτριες

Στις σύγχρονες γεννήτριες είναι απαραίτητη η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα με συνεχές ρεύμα. Η τροφοδοσία με συνεχές ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο και με την στρέψη του δρομέα μέσω κάποιας κινητήριας μηχανής υπεύθυνη για την περιστροφή, τότε το πεδίο περιστρέφεται με την ίδια φορά. Αυτό το καινούριο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει στα άκρα του τυλίγματος του στάτη τριφασική τάση. Ο δρομέας είναι ένας μεγάλος ηλεκτρομαγνήτης. Η δομή του δρομέα μπορεί να είναι είτε εκτύπων πόλων (salient poles) (Σχήμα. 2.7) είτε κυλινδρικού δρομέα (Σχ. 2.8).



Σχήμα 2.7 Εκτύπων πόλων [16]



Σχήμα 2.8 Κυλινδρικός Δρομέας [16]

Συνήθως οι δρομείς με κυλινδρικό σχήμα προορίζονται για γεννήτριες δύο τεσσάρων πόλων ενώ οι γεννήτριες εκτύπων πόλων για μεγαλύτερες των τεσσάρων.

Ο δρομέας κατασκευάζεται με δυναμοελάσματα για την μείωση των απωλειών εξαιτίας των δινορευμάτων. Το φαινόμενο των δινορευμάτων παρουσιάζεται αρκετά στο εσωτερικό των γεννητριών λόγω συχνών μεταβολών του μαγνητικού πεδίου.

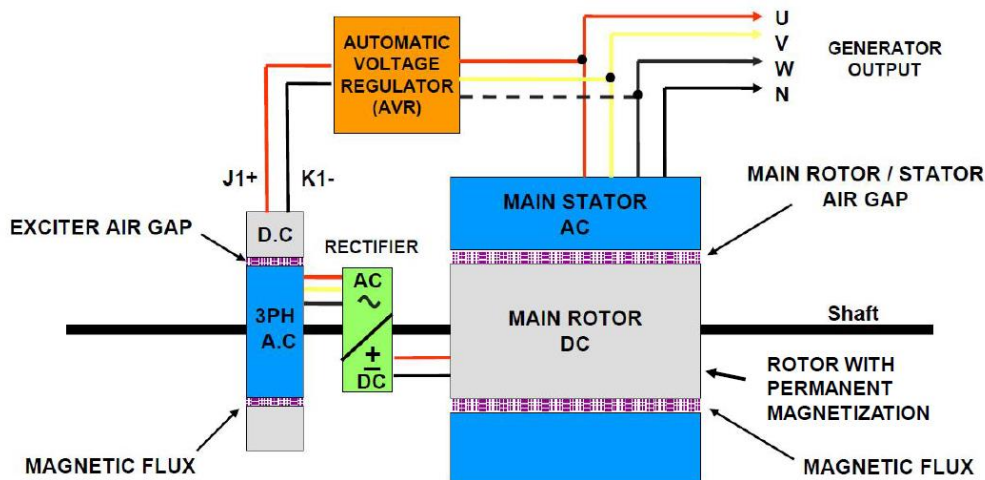
Η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα επιτυγχάνεται με :

- Τροφοδοσία από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος όπου ο δρομέας είναι εφοδιασμένος με ψήκτρες (brushes) και δαχτυλίδια (slip rings)
- Πηγή συνεχούς ρεύματος τοποθετημένη στον άξονα της γεννήτριας.

Τα άκρα των τυλιγμάτων συνδέονται με τα μεταλλικά δαχτυλίδια .Στο πρώτο δαχτυλίδι εφάπτονται οι ψήκτρες όπου και συνδέονται με το θετικό άκρο της πηγής ενώ στο άλλο δαχτυλίδι οι ψήκτρες που αντιστοιχούν συνδέονται με το αρνητικό άκρο της πηγής. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε εγκαταστάσεις με μικρή ζήτηση ισχύος .

Παρόλα αυτά η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μειονεκτήματα .Όπως η συχνή αντικατάσταση των ψηκτρών λόγω φθοράς αλλά και η πτώση της αποδοτικότητας που εκφράζεται μέσω της τάσης όταν η ένταση των ρευμάτων είναι μεγάλη.

Σε γεννήτριες όπου οι ενεργειακές απαιτήσεις μεγαλώνουν τοποθετούνται γεννήτριες χωρίς ψήκτρες (brushless exciters) , πάλι με την ίδια φιλοσοφία , τροφοδοσία με συνεχές ρεύμα στο τύλιγμα του δρομέα της γεννήτριας. Μόνο που η τροφοδοσία αυτή πραγματοποιείται με διεγέρτριες μηχανές , μικρές δηλαδή γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος όπου το κύκλωμα διέγερσης τους τροφοδοτείται από το στάτη της κύριας γεννήτριας, ενώ το κύκλωμα οπλισμού βρίσκεται στον άξονα της κυρίας γεννήτριας. (Σχήμα. 2.9) .



Σχήμα 2.9 Κύκλωμα διέγερσης χωρίς ψήκτρες [51]

Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα για μία διαφορετική προσέγγιση η οποία δίνει την δυνατότητα της ανεξαρτητοποίησης από εξωτερικές πηγές για την τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα. Μία προ-διεγέρτρια (pilot exciter) λειτουργώντας ως μικρή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με δρομέα μόνιμων μαγνητών τοποθετημένη στον άξονα της γεννήτριας. Παράγεται τριφασική τάση από την προ-διεγέρτρια η οποία ανορθώνεται και τροφοδοτεί με την σειρά της , τη διέγερση της διεγέρτριας και ακολούθως το αποτέλεσμα αυτής τροφοδοτεί το δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας. Με αυτό τον τρόπο δεν υπάρχει η ανάγκη εξωτερικής πηγής τροφοδοσίας.

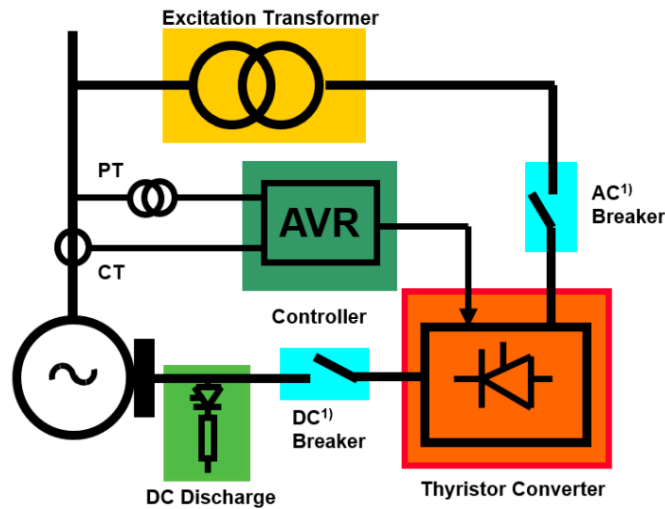
Οι εναλλασσόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις Η.Ε.Δ που δημιουργούνται στα τρία διαφορετικά τυλίγματα έχουν το ίδιο μέγεθος και ίδια συχνότητα. Αυτές οι φασικές ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις μεταξύ τους έχουν φασική διαφορά  $120^\circ$  ηλεκτρικών μοιρών [16].

## 2.2.2 Παραλληλισμός Σύγχρονων Γεννητριών

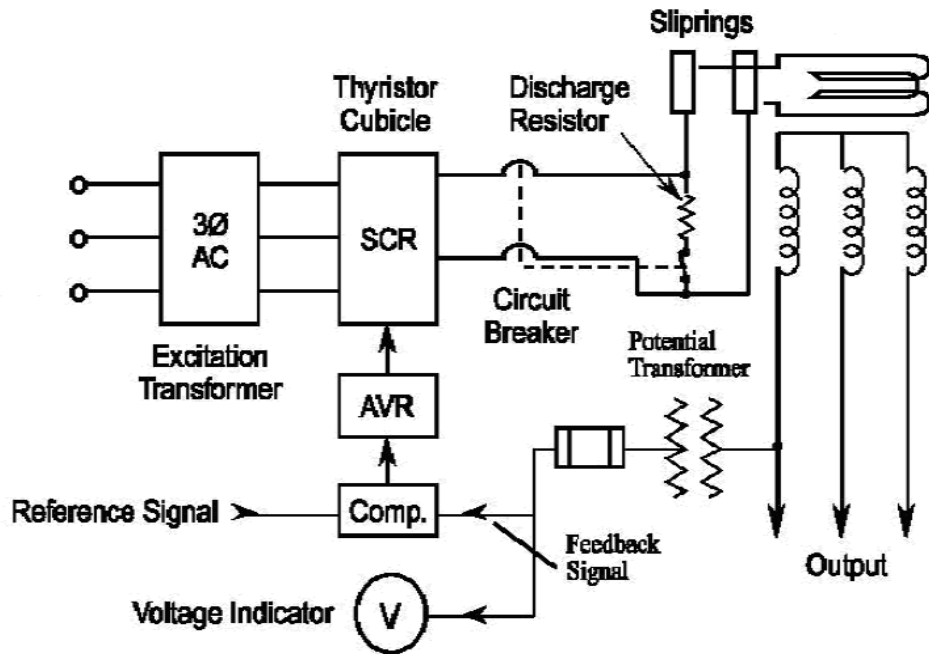
Λόγω των ενεργειακών αναγκών, παρουσιάζεται η ανάγκη για συνεισφορά στην κατανομή των φορτίων μέσω πολλαπλών γεννητριών , αυτό δεν συμβαίνει μόνο στον χέρσο τμήμα αλλά και στην ναυτιλία. Η ανάγκη για κάλυψη μίας θαλάσσια απόστασης σε συγκεκριμένο χρόνο οδηγεί στην χρήση των διαθέσιμων ηλεκτρογεννητριών είτε η χρήση της μέγιστης πρόωσης σε συνθήκες κινδύνου για το πλοίο. Σε μία τέτοια συνθήκη κρίνεται σκόπιμο να γίνει παραλληλισμός ή συγχρονισμός των γεννητριών λαμβάνοντας υπόψη την ικανοποίηση των προϋποθέσεων παραλληλισμού σύγχρονων γεννητριών.

- Η διαδοχή των φάσεων να είναι ίδιες και στις δύο προς παραλληλισμό γεννήτριες.
- Οι φάσεις των τάσεων να είναι ίσες
- Οι πολικές τάσεις στις γεννήτριες να είναι ίσες
- Η συχνότητα της γεννήτριας προς παραλληλισμό (oncoming generator) να είναι να είναι λίγο μεγαλύτερη από την συχνότητα στο ζυγό .

Η ρύθμιση της τάσης της προς παραλληλισμό γεννήτριας γίνεται μέσω του αυτόματου ρυθμιστή τάσης (Automatic Voltage Regulator) (Σχήμα 2.10). Ο ρυθμιστής τάσης είναι ηλεκτρονική συσκευή για την ρύθμιση και διατήρηση της τάσης εξόδου του εναλλάκτη σύμφωνα με τις τιμές αναφοράς (reference value) συγκρινόμενες με τις μετρήσιμες τιμές (actual value) λαμβάνοντας αυτές ως σήμα ανατροφοδότησης (feedback signal) (Σχήμα 2.11) .Η διατήρηση των τάσεων εξόδου της γεννήτριας επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας το ρεύμα διέγερσης της διεγέρτριας . Ακόμα ελέγχει τις τιμές της άεργου ισχύος και της γωνίας φάσης με μεγάλη ακρίβεια , επιπροσθέτως λειτουργεί ως σύστημα ασφαλείας ελέγχοντας τις τιμές τάσης (Over Voltage) και ρεύματος(Over Current) όταν αυτές ξεπερνούν τις τιμές αναφοράς στο εσωτερικό της γεννήτριας [16].



Σχήμα 2.10 Τυπική διάταξη AVR [52]



Σχήμα 2.11 Κύκλωμα ελέγχου τάσης σύγχρονης γεννήτριας [17]

### 2.2.3 Σύγχρονοι Κινητήρες

Στην ηλεκτροπρόωση των πλοίων οι σύγχρονοι κινητήρες ρεύματος μπορούν να επιτύχουν υψηλή απόδοση, ειδικά σε συνθήκες σταθερής ταχύτητας και φορτίου. Αυτή η απόδοση μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση καυσίμων και μειωμένο κόστος λειτουργίας κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου. Παρέχεται η δυνατότητα επίσης να λειτουργούν με σταθερή ταχύτητα για εφαρμογές πρόωσης, μπορούν επίσης να σχεδιαστούν για λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει τη βελτιστοποιημένη απόδοση σε μια σειρά συνθηκών λειτουργίας και ταχυτήτων.

Η ονομασία σύγχρονος κινητήρας προκύπτει από την έννοια της σύγχρονης ταχύτητας όπου σύγχρονη ταχύτητα χαρακτηρίζεται ή φυσική ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη. Η ταχύτητα περιστροφής από τον αριθμό των πόλων της μηχανής και την εφαρμοζόμενη τάση

$$n_s = \frac{120 f s}{P}$$

$n_s$  = η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σε r/min

$f$  = η συχνότητα της τάσης που εφαρμόζεται στο στάτη σε Hz

$P$  = το πλήθος των πόλων του δρομέα

Στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος ο βρόγχος που περιστρέφεται σε ένα ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο λειτουργώντας ως δρομέας τότε παρουσιάζει τάση από επαγωγή και η μέγιστη μαγνητική ροή μέσω του βρόγχου προκύπτει όταν ο βρόγχος βρίσκεται κάθετα στις δυναμικές γραμμές. Η τάση που δημιουργείται μέσα από τον βρόγχο αποτελεί και την καμπύλη συνημίτονου.

$$e_{ind} = \phi_{max} \omega \sin \omega t$$

$e_{ind}$  : ολική τάση στον βρόγχο

$\phi_{max}$  : μαγνητική ροή

$\sin \omega t$ : όταν ο βρόγχος περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  , όταν η γωνία  $\theta$  του βρόγχου αυξάνεται γραμμικά με την πάροδο του χρόνου.

Η τάση που προκύπτει μέσα στον βρόγχο είναι μία καμπύλη συνημίτονου όπου το μέγεθος της ισούται με το γινόμενο της μαγνητική ροής στο εσωτερικό της μηχανής και της ταχύτητα περιστροφής της μηχανής. Η τάση εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής , την μαγνητική ροή και τις σταθερές που προκύπτουν από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής .

Η ροπή που προκύπτει στο βρόγχο είναι ανάλογη με τη δύναμη του μαγνητικού πεδίου του βρόγχου , τη δύναμη του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου αλλά και το ημίτονο της μεταξύ τους γωνίας . Η παραπάνω συνθήκη ισχύει στις πραγματικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος και η αναφορά αυτή γίνεται γιατί μαζί με την τάση είναι σημαντικά στοιχεία για τον έλεγχο των κινητήρων.

Ακόμα μία συνθήκη ,είναι ότι τα στρεφόμενα μαγνητικά πεδία που μπορούν να σχηματίσουν ο στάτης και ο ρότορας δημιουργούν ροπή η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τα δύο αυτά πεδία. Αυτή ροπή που δημιουργείται είναι η αιτία της κίνησης του δρομέα με σκοπό να ευθυγραμμιστεί με το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Η περιστροφή του μαγνητικού πεδίου του στάτη το οποίο τροφοδοτείται με τριφασικό σύστημα ρευμάτων ίδιου πλάτους και διαφοράς φάσης  $120^\circ$  μεταξύ τους, χαρακτηρίζεται

το μαγνητικό πεδίο του στάτη στρεφόμενο και προκαλεί επαγόμενη ροπή στο δρομέα δίνοντας του την δυνατότητα να κυνηγά συνεχώς το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Αυτή είναι η βασική αρχή λειτουργίας των κινητήρων του εναλλασσόμενου ρεύματος . [18]

## 2.2.4 Επαγωγικοί Κινητήρες

Οι κινητήρες επαγωγικού τύπου παρουσιάζονται με την μορφή δακτυλιοφόρου δρομέα και βραχυκυκλωμένου κλωβού . Οι κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα συνοδεύονται με δακτυλιοφόρους δρομείς και ψήκτρες ενώ οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού είναι χωρίς ψήκτρες (brushless). Όπως έχει αναφερθεί ήδη ο έλεγχος της ταχύτητας είναι σημαντικό στοιχείο στον έλεγχο των επαγωγικών κινητήρων και εδώ μεταβάλλεται η συχνότητα αναλογικά με την τάση τροφοδοσίας στο στάτη μέσω αντιστροφέα (inverter). Σε καταστάσεις όπου δεν χρειάζεται έλεγχος ταχύτητας και θέσης εφαρμόζεται έλεγχος ανοιχτού βρόγχου με την βοήθεια ενός μετατροπέα συχνότητας ( frequency converter) μειώνοντας το κόστος και η μέθοδος εγκατάστασης είναι αρκετά ευκολότερη. Παρόλο αυτά σε ένα τέτοιο σύστημα δεν επιτυγχάνεται επαρκώς ο έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα, γιατί το φορτίο (ολίσθηση) επηρεάζει την ταχύτητα του κινητήρα και δεν υπάρχει γρήγορη απόκριση στις μεταβολές της ταχύτητας εντολής . Σε ένα σύστημα όμως κλειστού βρόγχου ο έλεγχος της ταχύτητας βελτιώνεται σε μεγάλο ποσοστό χρησιμοποιώντας την ανάδραση, λαμβάνοντας υπόψιν πως παρουσιάζονται μειονεκτήματα όσον αφορά τις χαμηλές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις του δρομέα.

Σε καταστάσεις που κρίνεται αναγκαίο υψηλή ακρίβεια στην απόκριση και τον έλεγχο στα σήματα εντολής χρησιμοποιείται μετατροπέας ισχύος σε σύστημα κλειστού βρόγχου διανυσματικού ελέγχου ( Field Oriented Control). Με αυτή την μέθοδο χρειάζεται να γίνεται έλεγχος της θέσης του δρομέα άρα είναι απαραίτητη και η εγκατάσταση αισθητηρίου θέσης για τον δρομέα. Ο διανυσματικός έλεγχος σε επαγωγικούς κινητήρες είναι πολύπλοκος λόγω πολλών μεταβολών στις παραμέτρους που συνθέτουν το μοντέλο αυτό. Η θερμοκρασία και ο μαγνητικός κορεσμός επηρεάζουν αρκετές παραμέτρους κατά την εκτέλεση του μοντέλου [16] .

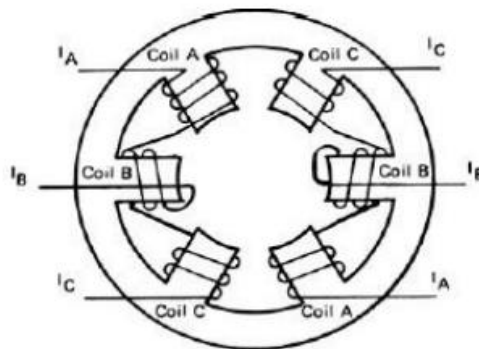


## 2.3 Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη

Σε αυτή την ειδική κατηγορία κινητήρων PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) χρησιμοποιούνται ειδικά μέταλλα για την εξασφάλιση της μαγνητικής τους ιδιότητας, όπως: φερίττες, κράμα σαμαρίου κοβαλτίου, κράμα νεοδυμίου-βορίου-κοβαλτίου, και μαγνήτης κράματος Alnico-5. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι θεωρούνται σπάνια κράματα και παρουσιάζουν καλύτερα στοιχεία από τους κλασικούς μαγνήτες. Στους κινητήρες δεν υπάρχουν πλέον τυλίγματα διέγερσης αλλά μόνιμοι μαγνήτες από ειδικά μέταλλα. Οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν στο εσωτερικό τους μαγνητική ενέργεια που είναι απαραίτητη για την δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στον δρομέα. Οι σύγχρονες αυτές μηχανές Μόνιμου Μαγνήτη δεν έχουν διέγερση, δίνοντας τους την δυνατότητα να αυξήσουν την συνολική τους απόδοση. Η εξάλειψη των απωλειών χαλκού είναι ένα ακόμα πλεονέκτημα.

Παρουσιάζουν μεγάλη ισχύ εξόδου και ροπή αλλά και μεγαλύτερη μαγνητική ροή στην περιοχή του διακένου. Μειονέκτημα αποτελεί η τιμή μαγνήτισης η οποία είναι σταθερή πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορεί να γίνει έλεγχος της διέγερσης. Ακόμα οι υψηλές θερμοκρασίες και μηχανικές καταπονήσεις στο εσωτερικό του κινητήρα μπορεί να οδηγήσουν σε απομαγνήτιση των μετάλλων. Η μαγνητική ροή κατευθύνεται από το βόρειο πόλο του μαγνήτη του δρομέα στο στάτη μέσω διακένου και από τον στάτη στο νότιο πόλο του δρομέα πάλι μέσω του διακένου [19].

Η κατασκευαστική φιλοσοφία του στάτη είναι παρόμοια με αυτόν μία επαγωγικής μηχανής. Η διαφοροποίηση εμφανίζεται στο ρότορα όπου είναι εγκαταστημένοι οι μαγνήτες. Για την δημιουργία στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου χρειάζεται η ύπαρξη τριών συμμετρικών τυλιγμάτων διαφοράς 120 μοιρών ώστε να τροφοδοτηθούν από τριφασική συμμετρική τάση διαφοράς 120 ηλεκτρικών μοιρών μεταξύ των φάσεων [20].



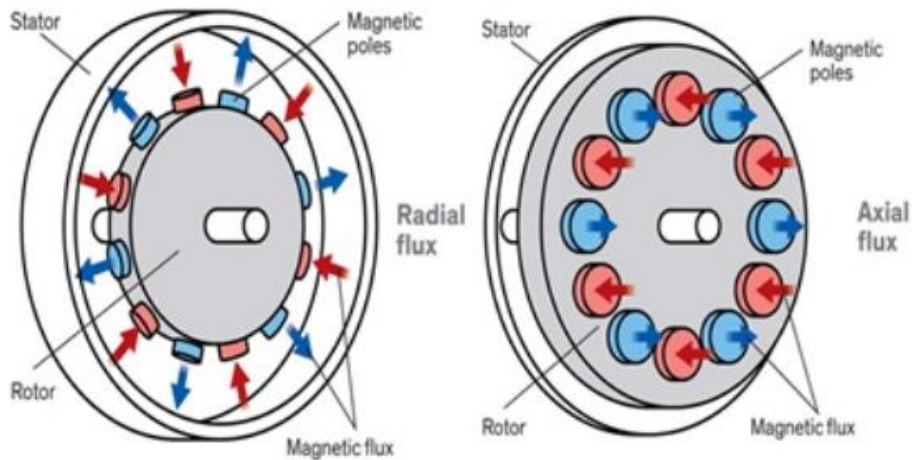
Σχήμα 2.12 Στάτης σύγχρονου κινητήρα με διαφορά 120 μοιρών μεταξύ των φάσεων

### 2.3.1 Κατηγορίες κινητήρων μόνιμου μαγνήτη

Οι σύγχρονοι κινητήρες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής τους και με βάση την μορφή της επαγόμενης τάσης στα τυλίγματα του στάτη.

Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη που λειτουργούν βάσει την μαγνητικής ροής διακρίνονται σε ακτινικής ροής (radial) και αξονικής ροής (axial). (Σχήμα 2.13)

Στους κινητήρες αξονικής ροής η μαγνητική ροή απλώνεται παράλληλα στον άξονα του δρομέα ενώ σε κινητήρες ακτινικής ροής με μόνιμους μαγνήτες οι μαγνητικές ροές διέρχονται από το διάκενο στα τυλίγματα του στάτη [21].



Σχήμα 2.13 Μαγνητικές ροές σε μηχανές μόνιμου μαγνήτη ακτινικής (Radial flux) και αξονικής ροής (Axial flux) [22] .

Ανάλογα με την μέθοδο ελέγχου και την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του τυλίγματος του στάτη οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη διακρίνονται σε :

α) Ημιτονοειδούς σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (sinusoidal permanent magnet) και β) μηχανές μόνιμου μαγνήτη τραπεζοειδούς μορφής ή τετραγωνικού παλμού ( trapezoidal or square wave permanent magnet machines ) .

Οι μηχανές ημιτονοειδούς μόνιμου μαγνήτη κατασκευάστηκαν λόγω της προσπάθειας ανεξαρτητοποίησης από το τύλιγμα διεγέρσεως οπότε και προέκυψε η χρήση μόνιμων μαγνητών ημιτονοειδούς κατανομής μαγνητικού πεδίου. Τροφοδοτώντας το τύλιγμα του στάτη με τριφασική ημιτονοειδή τάση δημιουργείται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο . Κατά την λειτουργία του κινητήρα με σταθερές στροφές δεν χρειάζεται η ακριβής θέση του καθώς είναι γνωστό ο σύγχρονος αριθμός στροφών , κατά την μεταβολή όμως της συχνότητας , κρίνεται απαραίτητο η γνώση της θέσης του

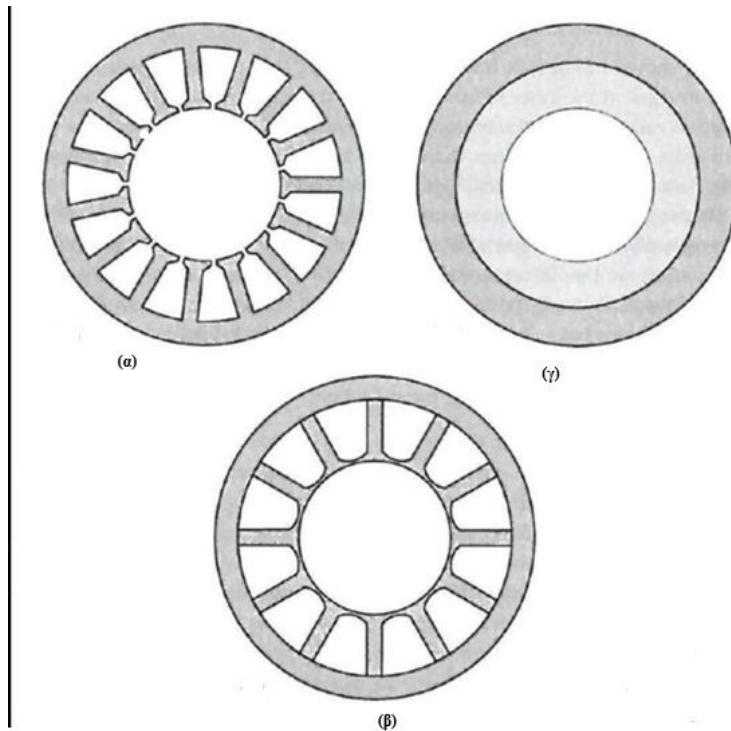
δρομέα , για να ρυθμιστεί κατάλληλα η τάση τροφοδοσίας και ακολούθως η τάση εξ επαγωγής. Η οδήγηση και έλεγχος πραγματοποιείται με την βοήθεια τριφασικού αντιστροφέα [23].

Στις μηχανές τετραγωνικού παλμού η τροφοδοσία στα τυλίγματα του στάτη γίνεται με ρεύμα τετραγωνικών παλμών 120 ηλεκτρικών μοιρών , σε συγχρονισμό με τάση εξ επαγωγής , κατά αυτόν τον τρόπο το σταθερό τμήμα της τάσης συμβαδίζει με το φασικό ρεύμα σταθερής τιμής. Σε αυτές τις εφαρμογές είναι απαραίτητο να γίνεται έλεγχος θέσης του δρομέα μέσω αισθητήρων Hall , τα οποία θα αναφερθούν παρακάτω, στα μεταβατικά σημεία των 60 ηλεκτρικών μοιρών .Για ακόμη μία φορά είναι απαραίτητη η οδήγηση του κινητήρα από τριφασικό αντιστροφέα [24].

### 2.3.2 Κατηγορίες Στάτη

Η δομή του στάτη είναι παρόμοια με την δομή ενός επαγωγικού κινητήρα αλλά με διαφορετικό τρόπο καταναμημένα. Κατασκευαστικά τα ελάσματα τους στάτη είναι από σιλικονούχου χάλυβα πάχους 0,3-0,5 mm και μονωμένα με ρητίνη στην κάθε στρώση τους. Ο στάτης μπορεί να είναι με αυλακώσεις (Σχήμα 2.15α)πετυχαίνοντας μικρό μαγνητικό διάκενο έτσι ώστε ο συντελεστής διαπερατότητας και η πυκνότητα της μαγνητικής ροής να είναι αυξημένοι. Το αυξημένο κόστος κατασκευής και η ανάπτυξη ταλαντώσεων λόγω ροπής αποτελούν τα μειονεκτήματα. Μία άλλη κατασκευαστική προσέγγιση για τον στάτη είναι ο στάτης με αυλακώσεις (Σχήμα 2.15β) και ενωμένα πέλματα. Εδώ , τα πέλματα είναι συ κολλημένα σχηματίζοντας μία συνεχιζόμενη και λεία επιφάνεια. Αυτή η τεχνική έρχεται να καλύψει το μειονέκτημα της προηγούμενης μεθόδου όσον αφορά την ροπή. Παρόλο αυτά , λόγω της λείας επιφάνειας μειώνεται η μαγνητική ροή των μαγνητών από τα τυλίγματα και κατ' επέκταση μειωμένη απόδοση λόγω χαμηλής τάσης εξ επαγωγής.

Μία ακόμα κατηγορία είναι ο στάτης χωρίς αυλακώσεις (Σχήμα 2.15γ). Εδώ τα τυλίγματα είναι σε μορφή δακτυλιδιού και τοποθετούνται εσωτερικά του στάτη. Λόγω αυτής της κατασκευαστικής φιλοσοφίας υπάρχει μηδενική ροπή αντιδράσεως που αποτελεί πλεονέκτημα, επειδή η επιφάνεια τους στάτη είναι λεία η μαγνητική αντίσταση δεν μεταβάλλεται κατά την περιστροφή του δρομέα. Επίσης υπάρχει αυξημένος χώρος στο εσωτερικό του κινητήρα που αποτελεί πλεονέκτημα αλλά δεν μπορεί να γίνει απαγωγή θερμότητας των τυλιγμάτων στοιχείο που αποτελεί εμπόδιο στο ρεύμα λειτουργίας. Μειώνει το εύρος των ρευμάτων λειτουργίας. Εδώ το διάκενο είναι μεγαλύτερο οπότε μειώνεται ο συντελεστής διαπερατότητας και η πυκνότητα των μαγνητικών ροών. Άρα υπάρχει μειωμένη απόδοση λόγω μειωμένης παραγόμενης ροπής [25] .



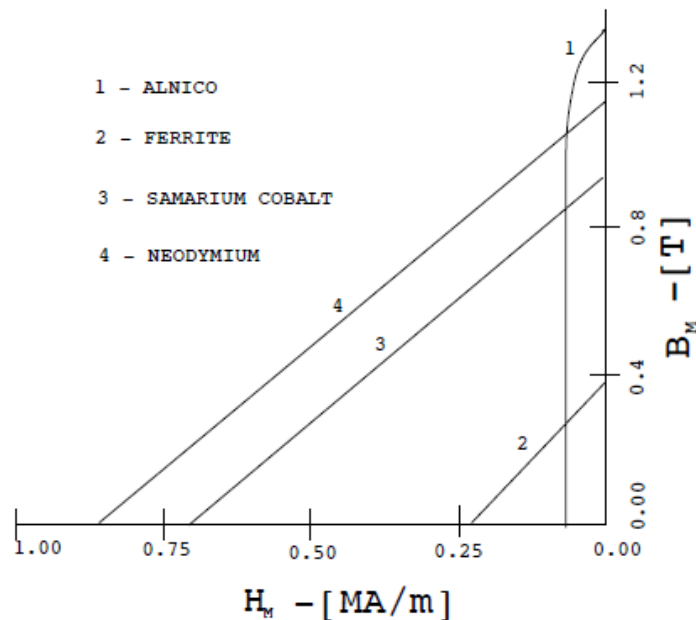
Σχήμα 2.15 (α) στάτης με αυλακώσεις (β) χωρίς αυλακώσεις (γ) αυλακώσεις με ενωμένα πέλματα [26].

### 2.3.3 Κατηγορίες Δρομέα

Κατασκευαστικά ο δρομέας αποτελείται από ελασματοποιημένο σιλικονούχο χάλυβα κυλινδρικής μορφής . Τοποθετούνται μόνιμοι μαγνήτες σχηματίζοντας ζεύγη πόλων με αντίθετη πολικότητα. Λαμβάνοντας υπόψιν την απόδοση άρα και την πυκνότητα των μαγνητικών πεδίων γίνεται και η ανάλογη επιλογή του μαγνητικού υλικού για την κατασκευή του. Αρχικά χρησιμοποιούνταν φερρίτες και αργότερα λόγω των τεχνολογικών εξελίξεων αντικαταστάθηκαν από μαγνήτες υψηλής ενέργειας σπάνιων γαιών όπως κράμα Νεοδυμίου-Σαμάριο – Κοβάλτιο . Οι μαγνήτες NdSmCo είναι επίσης γνωστοί ως μαγνήτες νεοδυμίου.

Επίσης άλλο ένα κράμα σπάνιων γαιών είναι και το NdFeB το οποίο αποτελείται από Νεοδύμιο-Σίδηρο-Βόριο. Οι συγκεκριμένοι είναι ποιο ευρέως διαδεδομένοι στο εμπόριο. Γενικότερα τα μέταλλα έχουν διαφορετικά επίπεδα απογνηματισμού. Η καμπύλη απομαγνητισμού ορισμένων υλικών μόνιμου μαγνήτη φαίνεται στο ( Σχήμα 2.16) . Το Alnico έχει πολύ υψηλή πυκνότητα υπολειμματικής ροής, αλλά η σχετικά χαμηλή καταναγκαστική του ικανότητα σημαίνει ότι είναι ακατάλληλο για εφαρμογή κινητήρα, καθώς μπορεί εύκολα να απομαγνητιστεί από τον στάτη mmf.

Ο φερρίτης, από την άλλη πλευρά, έχει υψηλές τιμές καταναγκαστικής δύναμης, αλλά σχετικά χαμηλές τιμές υπολειπόμενης πυκνότητας ροής. Η υψηλή αντοχή τους στον απομαγνητισμό σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος τα έχουν κάνει σχετικά ελκυστικούς για εφαρμογές κινητήρα. Για την ενίσχυση της παραγωγής ροπής, ωστόσο, ειδικές ρυθμίσεις εστίασης ροής οδηγούν σε απαιτούνται συνήθως περίπλοκες τοπολογίες ρότορα. Τα υλικά Samarium Cobalt έχουν υψηλότερη υπολειμματική ροή πυκνότητα και καταναγκασμό από τους φερρίτες, αλλά είναι σημαντικά πιο ακριβά. Το NdFe σε θερμοκρασία δωματίου έχει την υψηλότερη απόδοση από όλους τους εμπορικούς διαθέσιμους μαγνήτες [27].



Σχήμα 2.16 Καμπύλες απογνηματισμού μόνιμων μαγνητών [27]

Η τεχνολογική φιλοσοφία στην εγκατάσταση των μαγνητών αναγκάζει την κατηγοριοποίηση των μηχανών ανάλογα με την θέση των μαγνητών στον δρομέα. Όπου προκύπτουν :

- Μηχανές Επιφανειακών Μαγνητών

Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι εγκαταστημένοι στην επιφάνεια του δρομέα . Πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η κατασκευαστική απλότητα και συνάμα το μειωμένο κατασκευαστικό κόστος . Μειονέκτημα του είναι η πιθανή απογνημάτιση των μαγνητών (Σχήμα 2.17) όταν αυτοί αποκολληθούν κατά την διάρκεια των περιστροφών του δρομέα ειδικά όταν αυξάνεται η περιστροφή του δρομέα [27].



Σχήμα 2.17 Ρότορας με επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες [19]

- Μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα σε σχηματισμό V

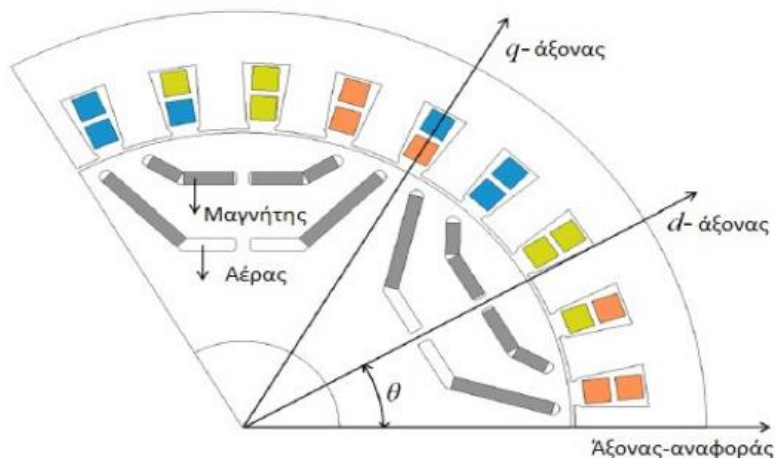
Εδώ τοποθετούνται δύο μαγνήτες υπό συγκεκριμένη γωνία  $V$  (Σχήμα 2.18). Στο ενδιάμεσο μεταξύ μαγνητών και του διακένου υπάρχουν δύο γέφυρες σιδήρου. Το πάχος της γέφυρας ορίζεται από περιορισμούς στην συγκράτηση των μαγνητών . Εάν αυτό το πάχος είναι αρκετά μεγάλο ένα κομμάτι της ροής των μαγνητών να περνάει μέσω αυτών των γεφυρών και όχι μέσω των διακένων για την παραγωγή της ροπής. Επιπρόσθετα η τοποθέτηση των μαγνητών σε σχηματισμό  $V$  δεν μπορούν να υπάρχουν σε κινητήρες με πολλούς πόλους. Όταν χρειάζεται να τοποθετηθούν αρκετοί πόλοι δεν υπάρχει τότε αρκετός χώρος για την τοποθέτηση των μαγνητών , οπότε προκύπτει η ανάγκη του περιορισμού της γωνίας  $V$  που σχηματίζουν. Σαν συνεπακόλουθο είναι ο κορεσμός του σιδήρου εάν η γωνία είναι μικρή [27].



Σχήμα 2.18 Μόνιμοι μαγνήτες σε διάταξη V [54]

- Πολυστρωματικοί Μαγνήτες

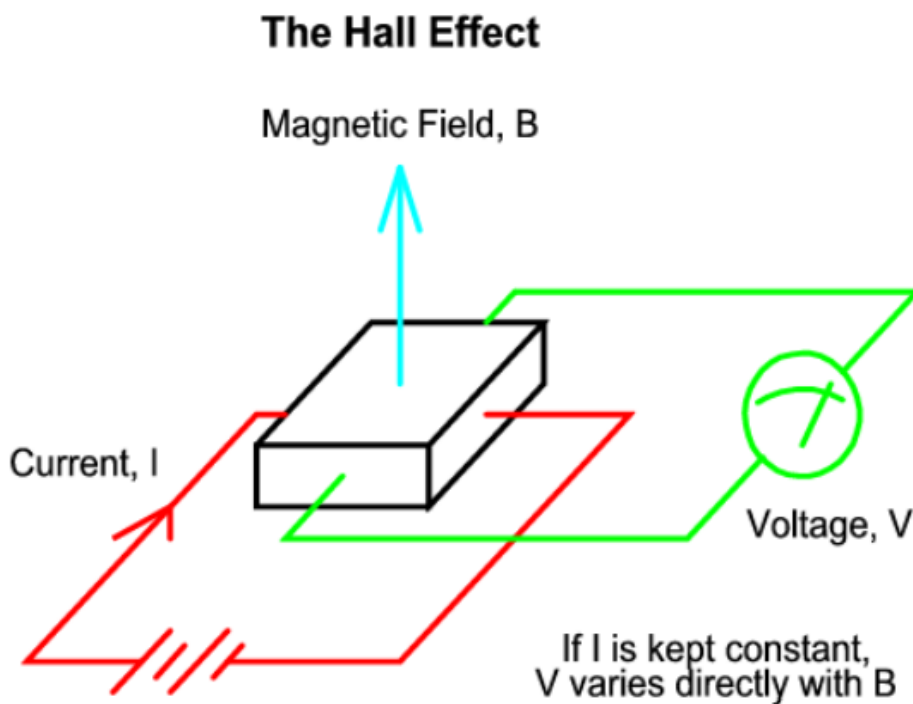
Αυτή η κατασκευαστική φιλοσοφία τοποθετεί πολλούς μαγνήτες πάλι στο εσωτερικό του δρομέα αλλά σε διαφορετικά επίπεδα (Σχήμα 2.19). Η τοποθέτηση αυτή περιλαμβάνει εναλλακτικές μεθόδους τοποθέτησης. Μειονέκτημα αυτής της φιλοσοφίας είναι η πολυπλοκότητα στην κατασκευή και ο περιορισμός σε εφαρμογές με λίγους πόλους. Καθώς στην περίπτωση αυτή εάν ο αριθμός των πόλων είναι μεγάλος τότε υπάρχει περιορισμός στον χώρο για την τοποθέτηση των μαγνητών. Μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της κατασκευής αποτελεί η ροπή εκτυπότητας που εμφανίζεται σε μεγάλο ποσοστό και η εξασθένιση του πεδίου, στοιχεία που είναι ελκυστικά σε περιπτώσεις που χρειάζονται πολλαπλές ταχύτητες λειτουργίας και μικρό αριθμό πόλων [27].



Σχήμα 2.19 Διάταξη πολυστρωματικών μαγνητών [53]

## 2.4 Φαινόμενο Hall

Το φαινόμενο Hall εμφανίζεται όταν σε ένα μαγνητικό πεδίο τοποθετηθεί ένας ρευματοφόρος αγωγός τοποθετημένος μέσα στις μαγνητικές γραμμές ενός πεδίου τότε δημιουργείται διαφορά δυναμικού που είναι κάθετα σε διεύθυνση με το ρεύμα και το μαγνητικό πεδίο (Σχήμα 2.20). Αυτό το φαινόμενο χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο θέσης μέσω διαφόρων αισθητήρων. Οι αισθητήρες Hall είναι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου όπου όταν τροφοδοτηθεί με συνεχές ρεύμα και τοποθετηθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο τότε εμφανίζει στις άκρες του διαφορά δυναμικού.



Σχήμα 2.20 Φαινόμενο Hall ανακάλυψη του Αμερικάνου Edwin Hall το 1879

Το σημείο τοποθέτησης αυτών των αισθητήρων είναι σημαντικό για τον έλεγχο της θέσης του δρομέα γιατί για την περιστροφή του δρομέα τα τυλίγματα του στάτη χρειάζεται να τροφοδοτηθούν με συγκεκριμένη σειρά για την δημιουργία του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου ,έτσι πρέπει να γνωρίζουμε την θέση του δρομέα .Οι αισθητήρες τοποθετούνται στον στάτη σε τρία διαφορετικά σημεία των 60 ή 120 μοιρών.

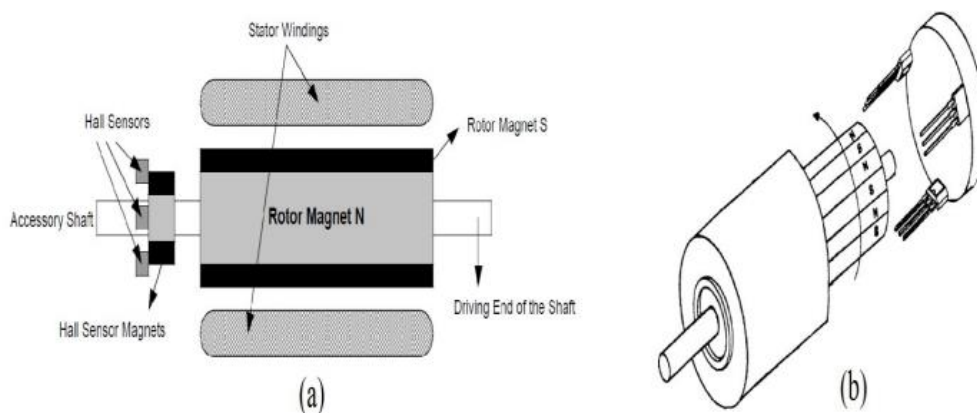
Συχνά σε εφαρμογές υψηλής ισχύος, απαιτείται ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ του προς μέτρηση ρεύματος και των ηλεκτρονικών ελέγχου. Για εναλλασσόμενα ρεύματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετασχηματιστές ρεύματος. Εάν υπάρχει πόλωση dc στο ρεύμα, ο



μετασχηματιστής ρεύματος δεν θα λειτουργήσει. Συχνά το στιγμιαίο ρεύμα πρέπει να μετράτε που περιλαμβάνει την πόλωση συνεχούς ρεύματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το ρεύμα μπορεί να μετρηθεί από έναν αισθητήρα ρεύματος επίδρασης Hall . Σε αυτόν τον αισθητήρα ρεύματος, στη δευτερεύουσα περιέλιξη εφαρμόζεται ένα ρεύμα αντιστάθμισης έτσι ώστε το πεδίο στον δακτύλιο να διατηρείται στο μηδέν. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να μετρηθεί ρεύμα από dc έως εύρος ζώνης 100 kHz [28].

Όταν ο δρομέας περάσει από το σημείο του αισθητήρα ή πιο συγκεκριμένα περάσει ο μαγνητικός πόλος τότε δημιουργείται ανάλογα με την πολικότητα του ένα σήμα υψηλής ή χαμηλής έντασης. Γνωρίζοντας και αποκωδικοποιώντας τα σήματα και των τριών σημείων μέσω των αισθητήρων Hall τότε γίνεται η απαραίτητη τροφοδοσία των τυλιγμάτων για την περιστροφή του μαγνητικού πεδίου. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις οι αισθητήρες βρίσκονται και στο σταθερό κομμάτι της μηχανής με την βοήθεια επιπρόσθετων μαγνητών μικρότερης κλίμακας επί του δρομέα. Οι μαγνήτες έχουν ίδια πολικότητα με τους μαγνήτες του δρομέα .(Σχήμα 2.21).

Οι αισθητήρες αποτελούν μία φθηνή λύση και τοποθετούνται εύκολα για την ακριβή έλεγχο της



Σχήμα 2.21 Τοποθέτηση αισθητήρων Hall στο α) ακίνητο κομμάτι του δρομέα β) στον στάτη

θέσης του δρομέα μέσω των εξόδων των αισθητήρων. Έτσι επιτυγχάνεται ο έλεγχος της μεταπήδησης του δρομέα στις ηλεκτρονικές μοίρες .Η τροφοδοσία των αισθητήρων είναι 4-24 VDC συνεχή τάση και ρεύμα κάποιων mA και τα σήματα εξόδου σε τετραγωνικού παλμούς.

## Κεφάλαιο 3 Ηλεκτροπρόωση

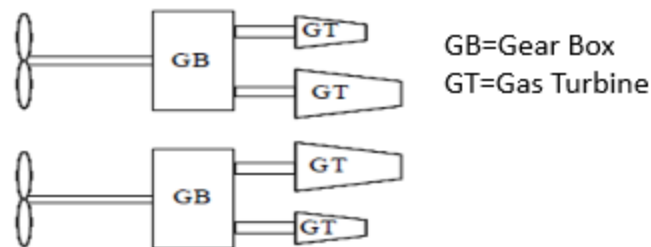
### 3.1 Τεχνολογική Εξέλιξη

Τα συστήματα θαλάσσιας πρόωσης βρίσκονται σε ταχεία εξέλιξη και ανάπτυξη με σημαντική ώθηση ως προς τη χρήση της ηλεκτρικής πρόωσης και της ενσωμάτωσης βοηθητικών και κύριων συστημάτων ισχύος πρόωσης. Είτε το σκάφος είναι ένα μεγάλο κρουαζιερόπλοιο που οδηγείται από αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης (Azimuthing Podded Drive) , ένα μικρό πολεμικό πλοίο υψηλής ισχύος με εσωλέμβιους κινητήρες και άξονες ή ένα πλοίο υποστήριξης ανοιχτής θαλάσσης (off-shore) όπου υπάρχει η ανάγκη για ευέλικτα, στιβαρά και συμπαγή συστήματα ισχύος αυξάνεται συνεχώς.

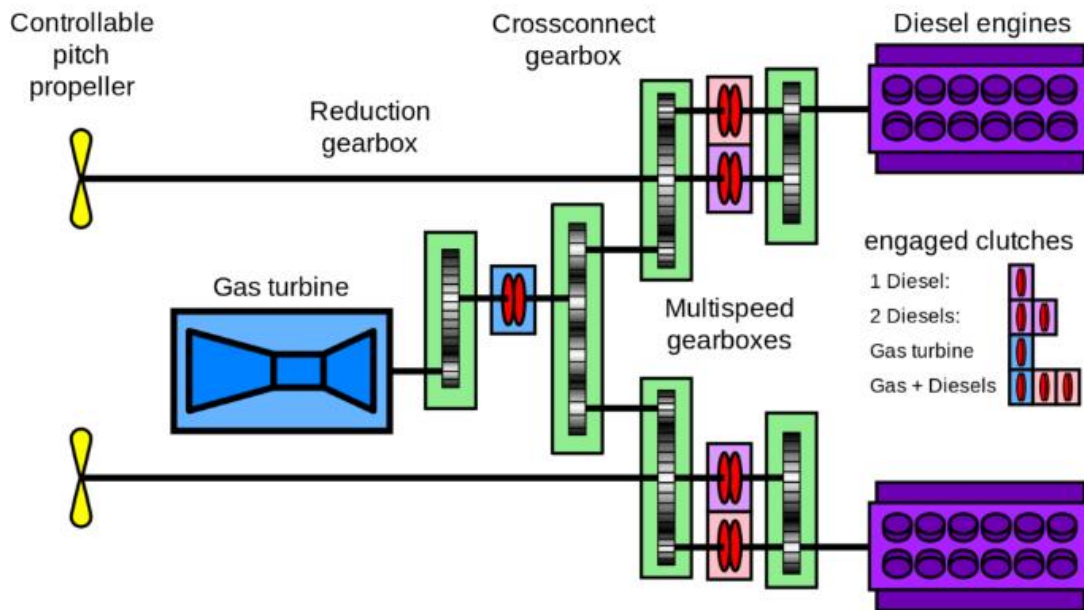
Αυτή η ανάγκη ικανοποιείται από τις προόδους στην κατασκευή ηλεκτρονικών συσκευών ισχύος και την εφαρμογή τους για μετατροπή και έλεγχο της ισχύος. Οι εξελίξεις στις συσκευές μεταγωγής ήταν θεμελιώδεις για την εξέλιξη των θαλάσσιων συστημάτων ισχύος. Οι εξελίξεις στην εφαρμογή των συσκευών μεταγωγής (switching devices) ήταν θεμελιώδεις για την εξέλιξη των θαλάσσιων συστημάτων ισχύος. Ηλεκτρονικά ισχύος όπως τρανζίστορ IGBT (Insulated Gate Bi-Polar Transistor) , θυρίστορ IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) άρχιζαν να εξετάζονται στα θαλάσσια συστήματα ισχύος. Η δυνατότητα που δίνει η επιστήμη των ηλεκτρονικών για τον έλεγχο λειτουργίας αυτών των στοιχείων οδηγεί και στην εξέλιξη των συστημάτων πρόωσης καθώς αυτά οδηγούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες ,συνήθως σύγχρονους για την κύρια πρόωση ή για βοηθητική πλοήγηση ως προωθητήρες ελιγμών (thrusters). Θα χρειαστεί να αναλυθούν τα ηλεκτρονικά στοιχεία ή ο συνδυασμός αυτών σε drives που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των ηλεκτρικών κινητήρων. Πριν από αυτό θα γίνει μία ανασκόπηση και ανάλυση της πρόωσης πλοίων διαφορετικών συνθηκών και αναγκών.

### 3.2 Πρόωση Πλοίων

Ένα παραδοσιακό μηχανικό σύστημα θαλάσσιας πρόωσης χρησιμοποιεί πρωτεύοντες μηχανισμούς κίνησης για την κίνηση των ελίκων μέσω αξόνων και μέσα τις πιο κοινές διατάξεις με τις οποίες κινείται κάθε άξονας το δικό της αφοσιωμένο πρωταρχικό κινητήριο μοχλό. Εκτός αν είναι περίπλοκο χρησιμοποιούνται συνδυαστικά κιβώτια ταχυτήτων για την πρόωση των αξόνων (Σχήμα 3.1) ή σε κάποιες των περιπτώσεων εάν πρόκειται για παράδειγμα πολεμικά πλοία ,οπότε εκεί μπορεί να γίνει χρήση σταυρωτής διάταξης αξόνων για αύξηση της ταχύτητας πλεύσης όπως σε φρεγάτες (Σχήμα 3.2) [29].



Σχήμα 3.1 Τυπικό σύστημα πρόωσης δύο αξόνων ανεξάρτητων μεταξύ τους [29]



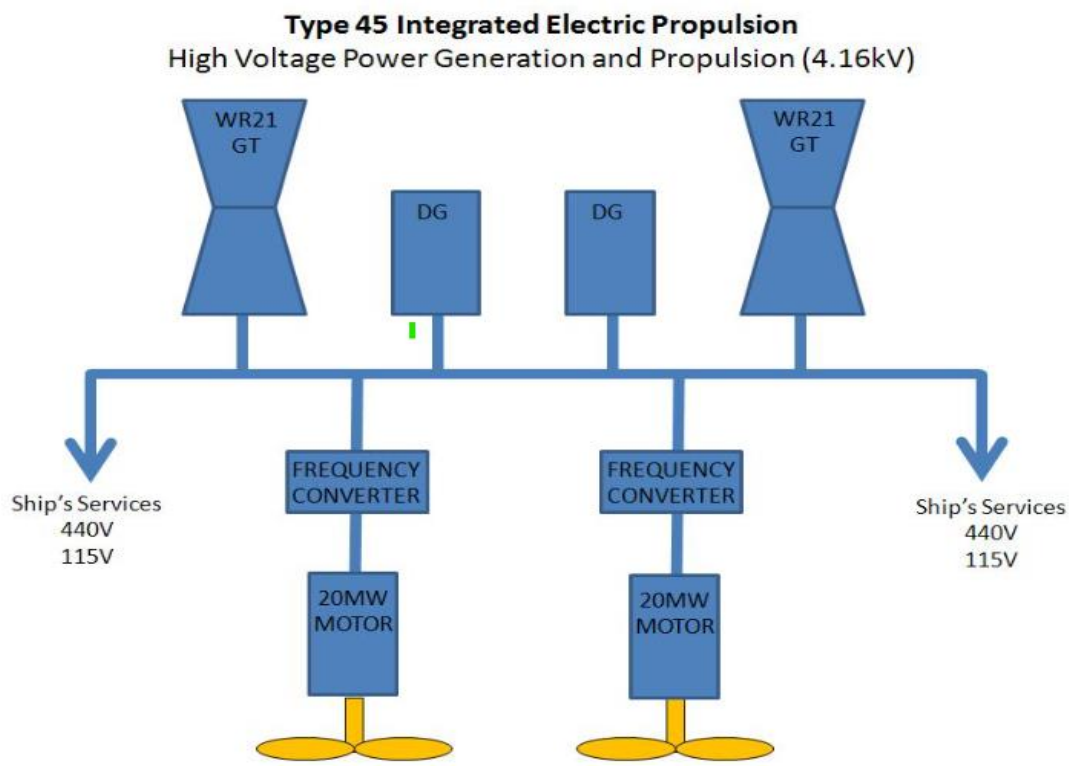
Σχήμα 3.2 Σύστημα πρόωσης σε πολεμικά πλοία με σταυρωτό δίκτυο αξόνων [31].

Δεδομένου ότι πολλά σκάφη σπάνια χρησιμοποιούν πλήρη ταχύτητα αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι κύριες μηχανές να λειτουργούν για μεγάλες περιόδους σε κλασματικά φορτία που μειώνουν την απόδοση και αυξάνουν λειτουργικές δαπάνες. Η ηλεκτροπρόωση ή ηλεκτρική μετάδοση είναι αυτή που προσφέρει την σύνδεση μεταξύ των κύριων μηχανών και τους άξονας μετάδοσης με την προπέλα με σκοπό την ελάφρυνση του φορτίου σε συνθήκες με μικρό φορτίο και την λειτουργία των κύριων μηχανών σε χαμηλές ταχύτητες πλεύσης. Η υιοθέτηση της φιλοσοφίας της ηλεκτροπρόωσης έχει κύριο πλεονέκτημα ότι με μία μόνο κύρια μηχανή ανάλογα βέβαια και με την ισχύ της αλλά και το μέγεθος του σκάφους, μπορεί να παρέχει ισχύ σε κάθε άξονα με την βοήθεια των σύγχρονων ηλεκτρονικών ισχύος σε συνθήκες πλεύσης και ελιγμών χωρίς να χρειάζεται ο έλεγχος του βήματος της προπέλας ή των κιβωτίων μετάδοσης. Ακόμα σε τέτοιες συνθήκες η ίδιες η γεννήτριες μπορούν να υποστηρίξουν και άλλα μικρότερα φορτία οικιακής χρήσης.

Αυτό το βοηθητικό ηλεκτρικό σύστημα παροχής ενέργειας μαζί με το σύστημα ηλεκτροπρόωσης συχνά ονομάζεται ολοκληρωμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν το σύστημα ηλεκτροπρόωσης είναι βαθμονομημένο στην πλήρη ισχύ του χωρίς καμία μηχανική βοήθεια ώθησης τότε ονομάζεται Ολοκληρωμένη Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Integrated Full Electric Propulsion, IFEP).

Υπάρχουν και συστήματα όπου χρησιμοποιούνται ηλεκτροκινητήρες με την βοήθεια των κινητήριων μηχανών- ηλεκτρογεννητριών αποκλειστικά για την πρόωση ενώ τα υπόλοιπα φορτία καλύπτονται από άλλες γεννήτριες αυτή η φιλοσοφία ονομάζεται πλήρης ηλεκτροπρόωση (Full Electric Propulsion , FEP) . Επίσης μπορεί να συμπεριληφθούν και τα τεχνολογικά επιτεύγματα ενός πλήρες εξηλεκτρισμένου σκάφους όπου εκτός από την ηλεκτροπρόωση και τα υπόλοιπα φορτία καλύπτονται από ηλεκτρικές πηγές χωρίς να υπάρχει παρουσία μηχανικών κινητήρων για την κάλυψη αυτών των αναγκών γνωστά ως All Electric Ships (AES).

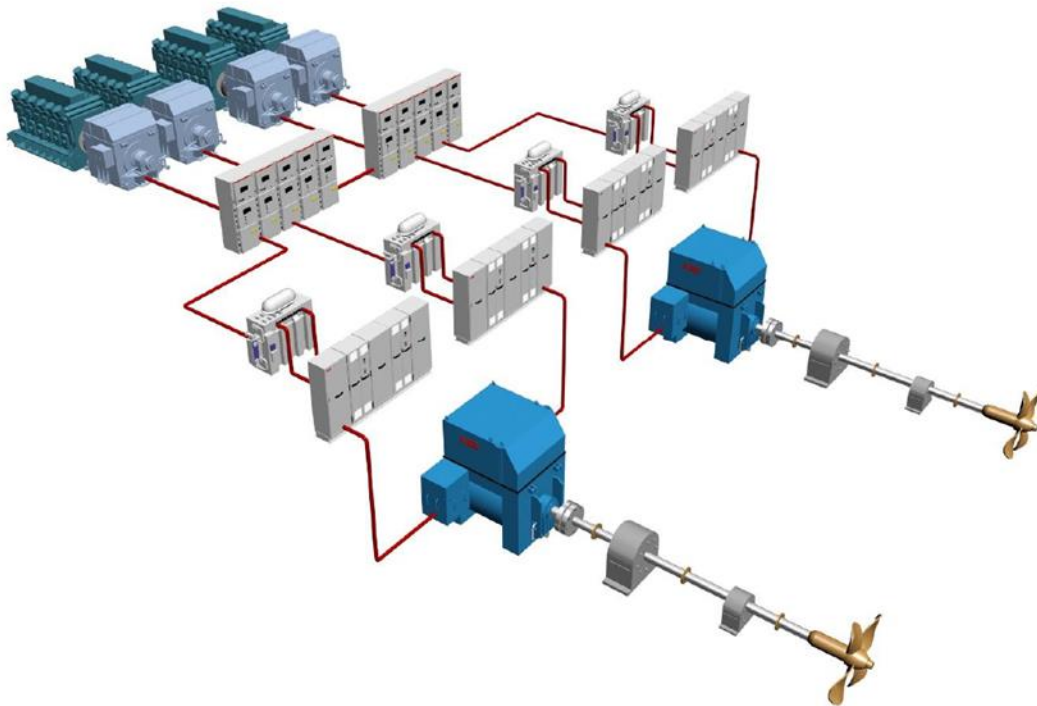
Μία τυπική διάταξη πλήρης ηλεκτροπρόωσης (FEP ή IEP ή IFEP) παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και πρόωσης σε πλοίο του πολεμικού ναυτικού, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3 . Στην συγκεκριμένη αποτύπωση φαίνεται το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 4.16 kV όπου συμμετέχουν δύο αεριοστρόβιλοι ( WR21 GasTurbines) και δύο μηχανές εσωτερικής καύσης (DG). Για το σύστημα πρόωσης συνδράμουν οι μετατροπείς συχνότητας (Frequency Converter) όπου τροφοδοτούν με τάση υπό συγκεκριμένη συχνότητα ανάλογα με την ζητούμενη ταχύτητα πλεύσης , τους δύο ηλεκτροκινητήρες ισχύς 20 MW έκαστος. Επιπλέον υπάρχουν άλλες υποβαθμισμένες (step-down) τάσεις για την κάλυψη των χαμηλών καταναλώσεων πλοίου 440 και 115 Volt . Στα εμπορικά πλοία μία τέτοια διάταξη μπορεί να είναι διαφοροποιημένη όσον αφορά τις γεννήτριες όπου μπορεί να παρουσιάζονται στο σύστημα ισχύος (power plant) μόνο μηχανές εσωτερικής καύσης (diesel) αλλά και αμμοστρόβιλους (Steam Turbine). Οι υποβαθμισμένες σε τάση καταναλώσεις αφορούν όχι μόνο σημεία του μηχανοστασίου αλλά καλούνται να καλύψουν τα συστήματα θέρμανσης και ψύξεως (HVAC) , συστήματα φωτισμού , πυρανίχνευσης και ναυσιπλοΐας [30].



*Propulsion Systems Used in Modern Naval Vessels 18*

Σχήμα 3.3 Σύστημα παραγωγής και πρόωσης πολεμικού πλοίου [31]

Μελετώντας άλλες αρχιτεκτονικές τέτοιων συστημάτων παραγωγής και ελέγχου πρόωσης όπως αυτές εφαρμόζονται στα κρουαζιερόπλοια ή πλοία μεταφοράς κοινού, υπάρχουν διατάξεις τέτοιες όπως προαναφέρθηκαν παραπάνω όπου υπάρχει μία συστοιχία γεννητριών και μηχανών Diesel. Μία τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4 Τυπική διάταξη του μηχανοστασίου πλοίου και του συστήματος πρόωσης του άξονα [30]

Σε μια ντιζελοηλεκτρική πρόωση, ένας αριθμός γεννητριών, οι οποίες κινούνται με ντιζελοκινητήρες, παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε έναν πίνακα διανομής όπου όλοι οι καταναλωτές, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών σύστημα πρόωσης, τροφοδοτούνται απευθείας με ρεύμα. Τα κύρια στοιχεία του ηλεκτρικού συστήματος πρόωσης είναι τα εξής:

- Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Ηλεκτρική κίνηση που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική κίνηση του πλοίου.
- Σύστημα ελέγχου της ηλεκτρικής κίνησης

Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από γεννήτριες ντιζελ, πίνακα διανομής και σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Ο αριθμός των ηλεκτρογεννητριών σε λειτουργία ελέγχεται από το σύστημα διαχείρισης ισχύος. Η ισχύς κάθε γεννήτριας ελέγχεται από το σύστημα ρυθμιστή του Diesel. Το σύστημα πρόωσης αποτελείται από τέσσερις μετατροπείς συχνότητας μέσης τάσης που τροφοδοτούνται από τον πίνακα διανομής μέσω μετασχηματιστών πρόωσης για την υποβάθμιση της τάσης και δύο ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης που τροφοδοτούνται απευθείας από τους μετατροπείς συχνότητας. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης είναι συνδεδεμένοι με το άξονες που περιστρέφουν τις προπέλες. Στη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική φιλοσοφία υπάρχουν τέσσερις μετατροπείς

συχνότητας γιατί κάθε ένας τροφοδοτεί τα διπλά και ανεξάρτητα μεταξύ τους τριφασικά τυλίγματα των κινητήρων πρόωσης. Το σύστημα ελέγχου πρόωσης αποτελείται από τον εξοπλισμό για τον έλεγχο της πρόωσης. Οι λειτουργίες ελέγχου, για παράδειγμα η εκκίνηση, η διακοπή, οι ενδείξεις και ο έλεγχος της πρόωσης, διεκπεραιώνονται στο ελεγκτές μέσα στα ερμάρια Power Control Unit (Control Inverter Unit) των μετατροπέων .

### 3.3 Ταξινόμηση Πλοίων

Η ικανότητα να διατηρεί το σκάφος τη θέση του με αυξημένη ακρίβεια κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες και τα ρεύματα που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή, αποτελεί καίριο παράγοντα για την τελική επιτυχία της επιχείρησης. Τα σκάφη αυτά γνωρίζονται ως "δυναμικά σκάφη θέσης" (dynamic positioning vessels) και χαρακτηρίζονται ανάλογα με τις δυνατότητές τους σε κατηγορίες Class 1, Class 2 και Class 3, σύμφωνα με τον Οργανισμό Ναυτιλίας (IMO)

Ο εξοπλισμός και η τεχνολογία που χρησιμοποιούνται στα Class 1 σκάφη δεν είναι ικανά να προσφέρουν υψηλή ακρίβεια στη δυναμική διόρθωση της θέσης του σκάφους πάνω από το σημείο που πρέπει να διατηρεί σταθερά. Αυτό οδηγεί σε καταστάσεις όπου η απόκλιση από την επιθυμητή θέση μπορεί να είναι σημαντική, με αρνητικές επιπτώσεις στην επιτυχία των εργασιών.

Τα σκάφη που ανήκουν στην κατηγορία Class 2 επιδεικνύουν βελτιωμένη ικανότητα να ελέγχουν τη θέση τους πάνω από το σημείο που επιδιώκουν να διατηρήσουν. Ακόμη και αν παρατηρηθεί δυσλειτουργία σε ένα από τα συστήματα ελέγχου θέσης του πλοίου (όπως η βλάβη σε γεννήτρια ή η δυσλειτουργία των thrusters), το σκάφος διατηρεί την αρχική του θέση με υψηλή ακρίβεια. Ωστόσο, εάν παρατηρηθούν προβλήματα συγχρονίας σε περισσότερα από ένα συστήματα ταυτόχρονα, η ακρίβεια στη διατήρηση της θέσης μειώνεται σημαντικά.

Τα σκάφη που ανήκουν στην κατηγορία Class 3 επιδεικνύουν βελτιωμένη ικανότητα να ελέγχουν τη θέση τους πάνω από το σημείο που επιδιώκουν να διατηρήσουν. Ακόμη και αν παρατηρηθεί δυσλειτουργία σε ένα από τα συστήματα ελέγχου θέσης του πλοίου (όπως η βλάβη σε γεννήτρια ή η δυσλειτουργία των thrusters), το σκάφος διατηρεί την αρχική του θέση με υψηλή ακρίβεια. Ωστόσο, εάν παρατηρηθούν προβλήματα συγχρονίας σε περισσότερα από ένα συστήματα ταυτόχρονα, η ακρίβεια στη διατήρηση της θέσης μειώνεται σημαντικά.



### 3.4 Αξονική Πρόωση

Η αξονική πρόωση (shaft propulsion) αποτελεί ένα από τα πιο κλασικά και διαδεδομένα συστήματα πρόωσης στη ναυπηγική βιομηχανία. Στον κόσμο των πλοίων, η πρόωση αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο ένα πλοίο κινείται μπροστά, και η αξονική πρόωση αποτελεί ένα από τα κύρια μέσα για την επίτευξη αυτού του σκοπού. Στο σύστημα αξονικής πρόωσης, η κίνηση παράγεται από έναν κινητήρα που είναι συνδεδεμένος σε μια προπέλα μέσω ενός μεγάλου άξονα. Ο άξονας εκτείνεται από τον κινητήρα στην προπέλα, και η προπέλα περιστρέφεται γύρω από τον άξονα για να δημιουργήσει ώθηση και να κινήσει το πλοίο μπροστά. Οι αξονικές προπέλες είναι συνήθως μεγάλες και βρίσκονται στο πίσω μέρος του πλοίου, κάτω από το νερό. Αυτό το σύστημα πρόωσης είναι αποτελεσματικό και προσφέρει στα πλοία την απαραίτητη ώθηση για την κίνησή τους. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται για την αξονική πρόωση μπορεί να είναι διάφορου τύπου, όπως κινητήρες εσωτερικής καύσης, κινητήρες πετρελαίου, ηλεκτρικοί κινητήρες, κλπ. Το σύστημα αξονικής πρόωσης είναι σταθερό και αξιόπιστο, αλλά είναι ενέργειας αποδοτικό και μπορεί να προκαλέσει ορισμένη απώλεια ισχύος λόγω της αντίστασης του νερού καθώς το πλοίο κινείται. Παρόλα αυτά, εξακολουθεί να είναι ένα από τα πιο δημοφιλή και αποτελεσματικά συστήματα πρόωσης που χρησιμοποιούνται στη ναυπήγηση πλοίων. Η αξονική πρόωση έχει αρκετά πλεονεκτήματα που την καθιστούν επικρατέστερη σε ορισμένες εφαρμογές πλοίων. Εδώ είναι μερικά από τα βασικά πλεονεκτήματα της αξονικής πρόωσης:

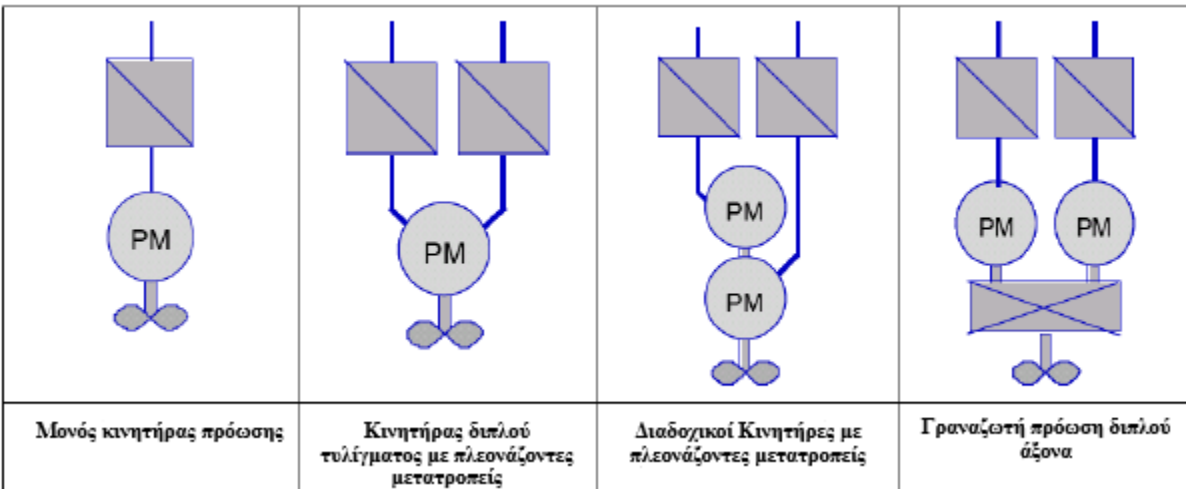
- **Αξιοπιστία:** Η αξονική πρόωση είναι εξαιρετικά αξιόπιστη και ανθεκτική. Οι αξονικοί κινητήρες και προπέλες έχουν αποδειχθεί ως αξιόπιστα στην καθημερινή λειτουργία.
- **Αποτελεσματικότητα:** Η αξονική πρόωση παρέχει υψηλή απόδοση στη μεταφορά της ισχύος από τον κινητήρα στην προπέλα και τη δημιουργία ώθησης.
- **Αξιοσημείωτη Ώθηση:** Οι αξονικές προπέλες μπορούν να παράγουν αρκετά ισχυρή ώθηση, καθιστώντας τις κατάλληλες για μεγάλα εμπορικά πλοία, πλοία επιβατών και πλοία πολεμικής ναυπηγικής.
- **Απλότητα:** Οι αξονικοί κινητήρες είναι συνήθως πιο απλοί στη δομή τους σε σύγκριση με άλλα συστήματα πρόωσης όπως η αζιμουθιακή πρόωση, και αυτό μειώνει τον κίνδυνο βλαβών και τη συντήρηση.

- Ευκολία Συντήρησης: Η συντήρηση των αξονικών κινητήρων και προπελών είναι συνήθως ευκολότερη και φθηνότερη σε σύγκριση με άλλα συστήματα πρόωσης.
- Οικονομία: Η αξονική πρόωση προσφέρει συνήθως αποδοτικότητα καυσίμων, μειώνοντας το κόστος λειτουργίας των πλοίων.

Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματά της, η αξονική πρόωση έχει και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- Περιορισμένη Ευελιξία Κίνησης: Η αξονική πρόωση παρέχει μόνο κίνηση προς τα εμπρός και προς τα πίσω, ενώ δεν είναι ιδανική για μεγάλες αλλαγές κατευθύνσεων, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με περιορισμένο χώρο.
- Αντίσταση Νερού: Καθώς η προπέλα περιστρέφεται και βυθίζεται στο νερό, υπάρχει αντίσταση του νερού που μπορεί να μειώσει την απόδοση και να αυξήσει την κατανάλωση καυσίμων.
- Επιρροή στη Διαρροή Θορύβου: Οι αξονικοί κινητήρες και προπέλες μπορεί να προκαλέσουν θόρυβο και δονήσεις, ιδιαίτερα σε υποβρύχια εφαρμογή.
- Κίνδυνος Για Εμπλοκές: Οι προπέλες της αξονικής πρόωσης βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του νερού, και αυτό μπορεί να τις καθιστά ευάλωτες σε εμπλοκές με αντικείμενα όπως ριγμένα δίχτυα ψαράδων ή απόβλητα.
- Κίνδυνος Βλάβης από Πετρώματα: Σε ύπουλες θαλάσσιες περιοχές, οι προπέλες μπορεί να υποστούν ζημιές λόγω πετρώματος ή άλλων εμποδίων.

Παρόλα αυτά, πρέπει να τονίσουμε ότι αυτά τα μειονεκτήματα εξαρτώνται από τον τύπο και την εφαρμογή του πλοίου, και σε πολλές περιπτώσεις, η αξονική πρόωση παραμένει η καλύτερη επιλογή. Παρόλα αυτά, είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η επιλογή του συστήματος πρόωσης εξαρτάται από τις ανάγκες του συγκεκριμένου πλοίου και την εφαρμογή του. Στο Σχήμα 3.5 φαίνονται τυπικοί και πιο διαδεδομένοι συνδυασμοί αξονικής πρόωσης λαμβάνοντας υπόψιν τις ανάγκες και τους τεχνικούς περιορισμούς της εγκατάστασης.



Σχήμα 3.5 Συνθέσεις αξονικής πρόωσης [32]

### 3.5 Αζιμουθιακή Πρόωση

Η αζιμουθιακή πρόωση (azimuth thruster) είναι ένα εξελιγμένο σύστημα πρόωσης που χρησιμοποιείται σε πολλά σύγχρονα πλοία, κυρίως σε περιπτώσεις όπου απαιτείται αυξημένη ευελιξία και εκτελεστική ικανότητα για την κίνηση και τον έλεγχο του πλοίου. Η κύρια χαρακτηριστική διαφορά της αζιμουθιακής πρόωσης από την αξονική πρόωση είναι ότι οι προπέλες (ή προπέλες) είναι περιστρεφόμενες 360 μοίρες γύρω από τον άξονα τους, παρέχοντας άμεσο έλεγχο της κατεύθυνσης της ώθησης. Αυτό επιτρέπει στο πλοίο να μετακινείται προς την επιθυμητή κατεύθυνση χωρίς την ανάγκη για τροχό τιμονιού και μεγαλύτερη ευελιξία στην πλοήγηση.

Οι αζιμουθιακές προπέλες μπορούν να είναι τεθλασμένες ή περιστρεφόμενες (azimuthing thrusters), ανάλογα με τον τύπο και τις ανάγκες του πλοίου. Οι τεθλασμένες προπέλες μπορούν να περιστρέφονται κατά 360 μοίρες οριζόντια γύρω από τον κατακόρυφο άξονά τους και, συνήθως, χρησιμοποιούνται στα πλοία υψηλής ταχύτητας και σε διάφορα ειδικά πλοία, όπως πλοία πολεμικής ναυπηγικής, ψαροκαΐκα, πλοία επιβατών, και πολλά άλλα. Οι περιστρεφόμενες προπέλες (rotating azimuth thrusters) μπορούν να περιστρέφονται ολόκληρες, συμπεριλαμβανομένου και του κατακόρυφου άξονα τους, και συνήθως χρησιμοποιούνται σε πολυτελή πλοία και γιοτ, όπου απαιτείται ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια και εκτελεστική ικανότητα στην πλοήγηση.

Η αζιμουθιακή πρόωση προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως αυξημένη ευελιξία στην πλοήγηση, εξοικονόμηση χώρου στο πλοίο (καθώς δεν απαιτείται μεγάλος κατακόρυφος άξονας),

και τη δυνατότητα προσφοράς ώθησης προς οποιαδήποτε κατεύθυνση χωρίς την ανάγκη για τροχό τιμονιού. Επιπλέον, οι αζιμουθιακές προπέλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν την ακρίβεια στον σταθμό ή κατά την εκτέλεση εργασιών σε περιορισμένους χώρους, όπως σε λιμάνια και περιοχές περιορισμένης κυκλοφορίας.

Η αζιμουθιακή πρόωση έχει πολλά πλεονεκτήματα που την καθιστούν ελκυστική επιλογή για πολλές εφαρμογές στη ναυπηγική. Εδώ είναι μερικά από τα βασικά πλεονεκτήματα της αζιμουθιακής πρόωσης:

- **Εξαιρετική Ευελιξία:** Η αζιμουθιακή πρόωση επιτρέπει στο πλοίο να κινείται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση χωρίς την ανάγκη για τροχό τιμονιού. Αυτή η ευελιξία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε λιμάνια, περιοχές περιορισμένης κυκλοφορίας, και κατά την διαδικασία πάρκινγκ.
- **Ακρίβεια Στη Πλοήγηση:** Οι αζιμουθιακές προπέλες προσφέρουν ακρίβεια στην κατεύθυνση και τη δύναμη της ώθησης, καθιστώντας την ιδανική για πολύπλοκες κινήσεις και διακριτικές εργασίες.
- **Εξοικονόμηση Χώρου:** Η αζιμουθιακή πρόωση δεν απαιτεί τον μεγάλο χώρο που απαιτεί η αξονική πρόωση με μεγάλο άξονα. Αυτό ελευθερώνει χώρο για άλλες χρήσεις στο εσωτερικό του πλοίου.
- **Δυνατότητα Στάθμης:** Οι αζιμουθιακές προπέλες μπορούν να κρατούν το πλοίο σε σταθερή θέση, πράγμα που είναι χρήσιμο για εργασίες όπως η γεώτρηση θαλάσσιου πυθμένα, η επισκευή υποβρυχίων καλωδίων, και άλλες εφαρμογές στον θαλάσσιο χώρο.
- **Υψηλή Απόδοση:** Οι αζιμουθιακές προπέλες είναι αποδοτικές στη μεταφορά ισχύος και στη δημιουργία ώθησης, με αυξημένη απόδοση σε σχέση με την αξονική πρόωση.
- **Ελάχιστος Κίνδυνος Για Εμπλοκές:** Καθώς οι προπέλες της αζιμουθιακής πρόωσης είναι εντελώς κάτω από το πλοίο και προστατευμένες, ο κίνδυνος εμπλοκών είναι ελάχιστος.

Συνολικά, η αζιμουθιακή πρόωση είναι ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ευελιξία, ακρίβεια και απόδοση στην πλοήγηση και την εκτέλεση εργασιών στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ωστόσο παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

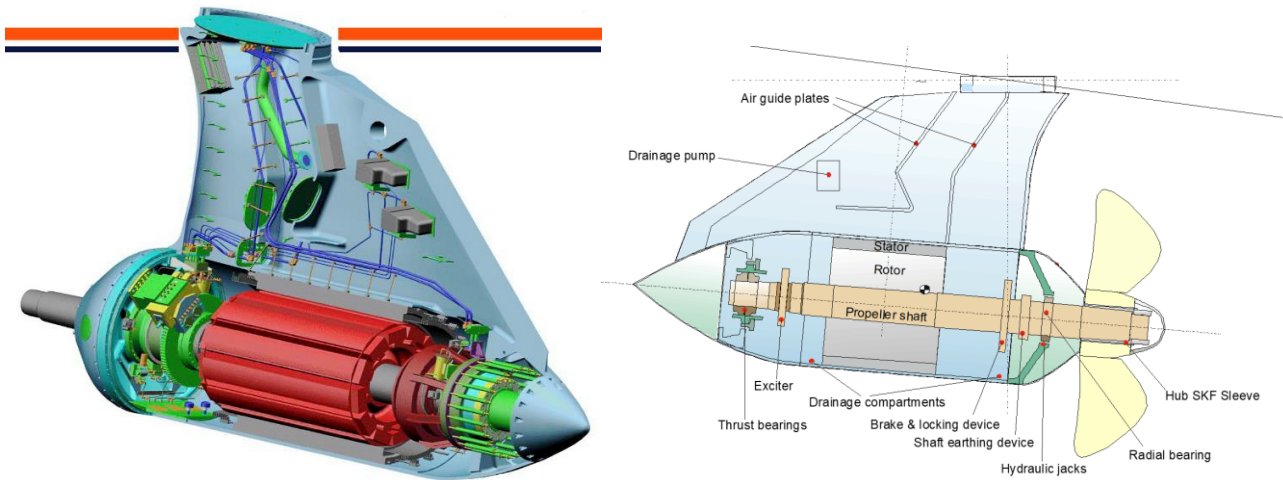
- **Υψηλό Κόστος:** Η αζιμουθιακή πρόωση είναι συνήθως πιο δαπανηρή από την αξονική πρόωση, και η εγκατάσταση και συντήρησή της μπορεί να απαιτεί αυξημένα κεφάλαια.
- **Συντήρηση Και Επισκευές:** Οι αζιμουθιακές μονάδες απαιτούν τακτική συντήρηση και επισκευές, και η αντικατάσταση ενός αντίστοιχου αξονικού κινητήρα είναι συνήθως πιο

ακριβή. Επίσης, ο υποβρύχιος εξοπλισμός της αζιμουθιακής πρόωσης μπορεί να υποστεί ζημιές από την θαλάσσια περιβάλλοντα και να απαιτεί ακριβές επισκευή.

- **Συνολική Απόδοση:** Παρά την ευελιξία της αζιμουθιακής πρόωσης, η συνολική απόδοση σε όρους ταχύτητας και απόδοσης της αζιμουθιακής πρόωσης ενδέχεται να μην είναι τόσο υψηλή όσο αυτή της αξονικής πρόωσης, ειδικά για μεγάλα εμπορικά πλοία.
- **Κατανάλωση Ενέργειας:** Η αζιμουθιακή πρόωση μπορεί να καταναλώνει περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με την αξονική πρόωση, καθιστώντας την λιγότερο αποδοτική σε ορισμένες περιπτώσεις.
- **Επιρροή στην Σταθμή:** Η αζιμουθιακή πρόωση μπορεί να προκαλέσει δονήσεις και θόρυβο που επηρεάζουν την εργασία και την άνεση του πληρώματος.



Σχήμα 3.6 Εξωτερική όψη αζιμουθιακού κινητήρα



Σχήμα 3.7 Αζιμουθιακός κινητήρας από κλάση Millennium κρουαζιερόπλοιο

### 3.6 Σύγκριση αξονικής και αζιμουθιακής πρόωσης

Η επιλογή μεταξύ αξονικής και αζιμουθιακής πρόωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ανάγκες και τις εφαρμογές του συγκεκριμένου πλοίου. Και οι δύο τεχνολογίες έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, και είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή:

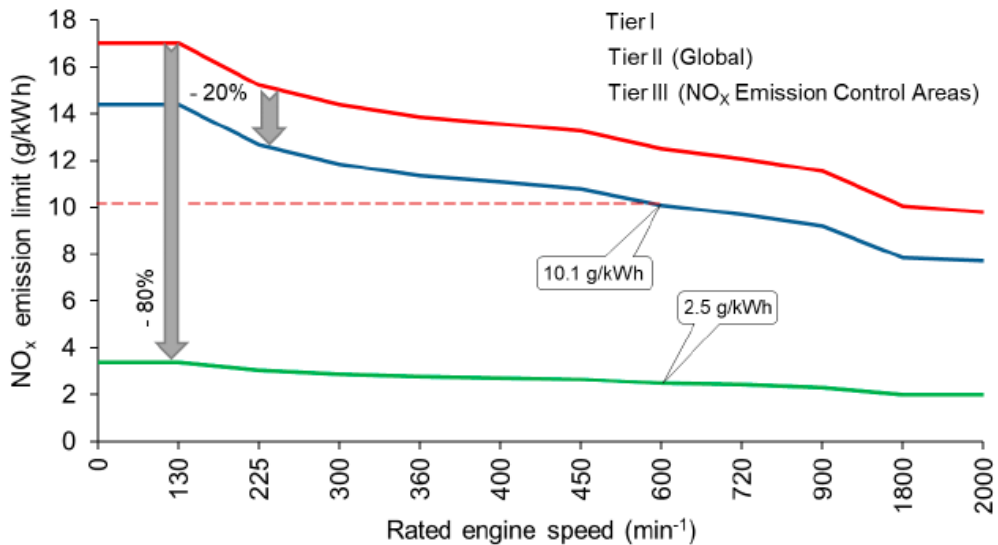
- **Τύπος Πλοίου:** Ο τύπος του πλοίου είναι σημαντικός. Παραδείγματα πλοίων που συχνά χρησιμοποιούν αξονική πρόωση περιλαμβάνουν εμπορικά πλοία, πλοία επιβατών, και πλοία πολεμικής ναυπηγικής, ενώ η αζιμουθιακή πρόωση είναι συνηθέστερη σε πολυτελή γιότ και πλοία επιβατών.
- **Ευελιξία Πλοήγησης:** Αν ένα πλοίο χρειάζεται να εκτελεί πολύπλοκες κινήσεις, όπως στοιβαγμένα πάρκινγκ ή εργασίες σε περιορισμένους χώρους, η αζιμουθιακή πρόωση μπορεί να είναι πιο κατάλληλη λόγω της ευελιξίας της.
- **Σχετική Απόδοση:** Ανάλογα με τον τρόπο χρήσης, η αξονική πρόωση μπορεί να είναι αποδοτικότερη στη μεταφορά της ισχύος από τον κινητήρα στην προπέλα και στη δημιουργία ώθησης.
- **Απαιτήσεις Χώρου:** Η αξονική πρόωση απαιτεί μεγάλο χώρο για τον άξονα και την προπέλα, ενώ η αζιμουθιακή πρόωση είναι πιο συμπαγής, ελευθερώνοντας περισσότερο χώρο στο εσωτερικό του πλοίου.
- **Συντήρηση:** Η συντήρηση της αζιμουθιακής πρόωσης μπορεί να είναι πιο δύσκολη και ακριβή από τη συντήρηση της αξονικής πρόωσης, ειδικά στον υποβρύχιο εξοπλισμό.

Γενικά, δεν υπάρχει μια απόλυτη απάντηση στο ερώτημα αν η αξονική πρόωση υπερτερεί της αξιμουθιακής ή αντίστροφα. Κάθε περίπτωση πρέπει να αξιολογείται ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και περιορισμούς της εφαρμογής.

### 3.7 Τα οφέλη της ηλεκτρικής πρόωσης

Η χρήση της ηλεκτρικής πρόωσης και τα πλεονεκτήματά της συνοψίζονται με την έννοια της απόδοσης και της εξοικονόμησης καυσίμου. Απώτερος σκοπός των τεχνολογιών είναι μεγαλύτερη απόδοση με όσο το δυνατόν μικρότερη κατανάλωση. Η τεχνολογική εξέλιξη βοηθάει προς αυτή την κατεύθυνση, οι γεννήτριες καλούνται να καλύψουν τις ανάγκες σε περιφερειακό φορτίο αλλά και την πρόωση τροφοδοτώντας τους κινητήρες πρόωσης και τα βοηθητικά μηχανήματα αυτών. Ο έλεγχος για την διανομή και διαχείριση ισχύος πραγματοποιείται από το σύστημα διαχείρισης (Power Management System) . Το σύστημα διαχείρισης PMS εξετάζει τις ανάγκες σε περιφερειακό φορτίο σε πραγματικό χρόνο αλλά και περιοδικά σε συνδυασμό με την ζητούμενη πρόωση σε πραγματικό χρόνο. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω γίνεται εξοικονόμηση καυσίμου και οι κινητήρες υπό μερική φόρτιση λειτουργούν αποδοτικά .

Επιπλέον, ένα σημαντικό πλεονέκτημα εμφανίζεται και στις εκπομπές καυσίμων και πιο συγκεκριμένα στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx). Με την χρήση ηλεκτροπρόωσης οι τιμές NOx είναι λιγότεροι σε σχέση με την μηχανική πρόωση ( εμπλέκονται στην κίνηση της προπέλας και την κύρια μηχανή κιβώτιο για τον έλεγχο των στροφών). Οι εκπομπές NOx όταν εφαρμόζεται ηλεκτρική πρόωση είναι μικρότερες σε σχέση με την μηχανική πρόωση γιατί η προωθητική ισχύς υπό πλήρη ταχύτητα σε περιβάλλον ηλεκτρικής πρόωσης ισομοιράζεται μεταξύ των μηχανών , οι οποίες δουλεύουν σε μεγαλύτερες ταχύτητες με αποτέλεσμα μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης άρα και μικρότερες τιμές εκπομπών NOx (Σχήμα 2.8 ) σε γραμμάρια ανά κιλοβατώρα g/kWh [33] .

Σχήμα 3.8 Όρια εκπομπών ρύπων NO<sub>x</sub> [33]

Τα περισσότερα εμπορικά πλοία τροφοδοτούνται από έναν δίχρονο κινητήρα ντίζελ χαμηλής ταχύτητας του οποίου η συνολική απόδοση υπερβαίνει το 50% υπό ορισμένες συνθήκες λειτουργίας. Οι ναυτικοί τετράχρονοι κινητήρες ντίζελ μεσαίας ταχύτητας έχουν περίπου 3–5% χαμηλότερη απόδοση από τους κινητήρες χαμηλής ταχύτητας θαλάσσης. Οι κινητήρες diesel μεσαίας ταχύτητας έχουν το μισό μέγεθος με την ίδια ονομαστική ισχύ και οι εκπομπές NO<sub>x</sub> είναι σημαντικά χαμηλότερες. Τα πλεονεκτήματα των θαλάσσιων κινητήρων ντίζελ μέσης ταχύτητας είναι ιδιαίτερα έντονα εάν χρησιμοποιούνται σε πετρέλαιο-ηλεκτρικά και υβριδικά συστήματα πρόωσης. Η ελαφρώς χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση των τετράχρονων κινητήρων μπορεί να αντισταθμιστεί με τη χρήση της σπατάλης θερμότητας του κινητήρα.

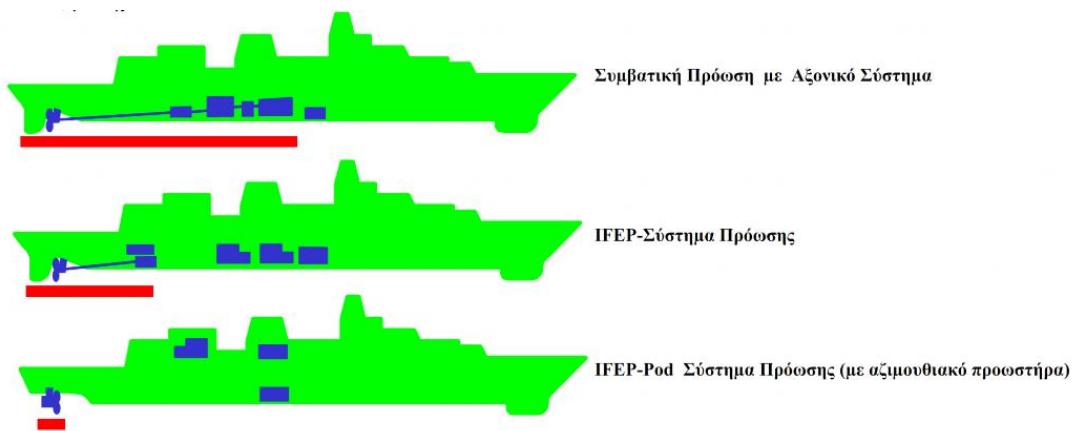
Επιπλέον, οι μηχανές diesel που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές της ηλεκτρικής πρόωσης λειτουργούν πιο κοντά στα σημεία σχεδιασμού τους που σημαίνει ότι εκεί αποδίδουν και τους λιγότερους ρύπους. Επίσης σε συνθήκες όπου η ζητούμενη ταχύτητα πλεύσης είναι μειωμένη σε μερικό φορτίο τότε παράγονται περισσότεροι ρύποι λόγω χαμηλής ταχύτητας μηχανής, εκεί όπου στην ηλεκτρική πρόωση η ταχύτητα είναι σε σταθερά υψηλή ταχύτητα.

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η μείωση του κόστους συντήρησης των κύριων μηχανών λόγω του ότι η χρήση τους είναι μοιρασμένη ανάμεσα στις ανάγκες πρόωσης αλλά και στα βοηθητικά φορτία, και σε πολλές των περιπτώσεων οι κύριες μηχανές απενεργοποιούνται όταν δεν κρίνεται αναγκαία η χρήση τους.



Η συνεχής μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της έλικας και της ταχύτητας του πλοίου σε όλο το πεδίο 0-100% αποτελεί ένα ακόμα όφελος όπως επίσης και η γρήγορη απόκριση κατά την διάρκεια χειρισμών και δυναμικής τοποθέτησης του πλοίου. Παρουσιάζεται χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών. Με την εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης ο κίνδυνος της ρύπανσης του περιβάλλοντος μειώνεται σημαντικά βασιζόμενοι στην άμεση απόκριση του συστήματος κατά τον χειρισμό του σκάφους [34].

Ακόμα ένα σημαντικό όφελος είναι εξοικονόμηση χώρου που υπάρχει κατά την εφαρμογή ηλεκτροπρόωσης. Όπως έχει προαναφερθεί μία τυπική διάταξη συμβατικής πρόωσης με άξονες και μειωτήρες στροφών χρειάζεται χώρο, στην περίπτωση της ηλεκτροπρόωσης αυτός παράγοντας μειώνεται κατά πολύ συμπεριλαμβάνοντας και την αξιμουθιακή πρόωση που αποτελεί και αυτό εφαρμογή ηλεκτροπρόωσης με διαφορετική προσανατολισμένη κατασκευαστική φιλοσοφία με μεγαλύτερη εξοικονόμηση χώρου όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 Αξονικές διατάξεις πλοίων [35]

## Κεφάλαιο 4 Ηλεκτρονικά Ημιαγωγά Στοιχεία

### 4.1 Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος

Για τον έλεγχο των κινητήρων πρόωσης κρίνεται απαραίτητη η συστοιχία ηλεκτρονικών ισχύος για την μετατροπή συχνότητας σε κυκλώματα τροφοδοτούμενα με εναλλασσόμενο ρεύμα (EP). Η συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος είναι σταθερή και η συνεχώς ζητούμενη ταχύτητα περιστροφής του άξονα πρόωσης του ηλεκτροκινητήρα προκύπτει από την μετατροπή της συχνότητας μέσω διατάξεων των ηλεκτρονικών στοιχείων.

Κατά το παρελθόν ,διατάξεις όπου κυριαρχούσαν οι ηλεκτρικές μηχανές μέσω γεννητριών και κινητήρων υπήρχαν σημαντικές απώλειες ισχύος με μεγάλο κόστος σε αντίθεση με τα ηλεκτρονικά ισχύος όπου προσφέρουν χαμηλό κόστος ,υψηλό βαθμό απόδοσης και άμεση ρύθμιση των χαρακτηριστικών ρεύματος.

Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών μονάδων οδήγησης (solid state packages) αποτέλεσε τεράστιο βήμα στην επίλυση της ρύθμισης ισχύος είτε για τον έλεγχο κινητήρων συνεχούς ρεύματος με τροφοδοσία από πηγές εναλλασσόμενης τάσης αλλά και κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος από πηγές συνεχούς τάσης.

Το κύριο χαρακτηριστικό της διαφοροποίησης μεταξύ των ηλεκτρονικών ισχύος αποτελεί η διακοπτική τους ικανότητα. Δηλαδή μπορούν να άγουν και να διακόπτουν κατά πλήρως ελεγχόμενο τρόπο λαμβάνοντας υπόψιν τις εντολές ελέγχου που προκύπτουν από το κύκλωμα ελέγχου ( GTO,IGBT, MOSFET κ.τ.λ ) αλλά και ελεγχόμενα κατά την έναυση όπως τα thyristors αλλά και τα μη ελεγχόμενα όπως οι δίοδοι (diodes).

Τα υλικά κατασκευής τους προέρχονται από ημιαγώγιμα υλικά όπως πυρίτιο Silicon (Si) το πιο διαδομένο υλικό ημιαγωγών λόγω της αφθονίας του και το πλήθος των καθιερωμένων διαδικασιών παραγωγής . Χρησιμοποιείται σε διόδους ,θυρίστορ SCR , MOSFET και IGBT. Άλλο ένα υλικό είναι το πολλά υποσχόμενο Νιτρίδιο του γαλλίου (GaN – Gallium Nitride) το οποίο χρησιμοποιείται για εφαρμογές υψηλής συχνότητας και υψηλής ισχύος λόγω της υψηλής κινητικότητας των ηλεκτρονίων και της ικανότητας του να λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με το πυρίτιο. Ακόμα Υπάρχει το Καρβίδιο του πυριτίου (SiC). Σύμφωνα με μία αναφορά των καθηγητών McCoy και Amy (2009) σε συμπόσιο για την ηλεκτρική τεχνολογία σε πλοία ανέφεραν πως το συγκεκριμένο υλικό θα αλλάξει το τοπίο των μετατροπέων υψηλής ισχύος και εργαστηριακά έχουν πετύχει την εφαρμογή σε IGBT, MOSFET ,JFET . Οι δίοδοι SiC διατίθενται στο εμπόριο με ονομαστικές τιμές τάσης αποδεκτές για χρήση σε κινητήρες πρόωσης υψηλής ισχύος , με χαμηλές τιμές ρεύματος .

Το SiC προσφέρει υψηλότερη τάση διάσπασης, χαμηλότερη αντίσταση στην κατάσταση και καλύτερη θερμική αγωγιμότητα σε σύγκριση με το πυρίτιο, καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής ισχύος και υψηλής θερμοκρασίας, όπως δίοδοι ισχύος, MOSFET και δίοδοι Schottky. Το Νιτρίδιο του γαλλίου χρησιμοποιείται ευρέως στους φορτιστές ταχείας φόρτισης [36].

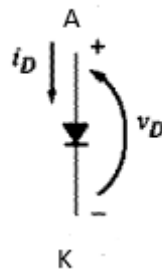
## 4.2 Ημιαγωγικές Διατάξεις-Ημιαγωγικά Στοιχεία

Στην ηλεκτροπρόωση χρησιμοποιούνται διάφορες ημιαγωγικές διατάξεις όπου οι πιο σημαντικές και εφαρμόσιμες σε πολλά πεδία είναι οι παρακάτω:

- Η δίοδος
- Το Thyristor δύο επαφών PNPN
- thyristor τριών επαφών, ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου ή (SCR)
- Το thyristor με αποκοπή από την πύλη (GTO)
- Το ολοκληρωμένο θυρίστορ με μεταγωγή πύλης (IGCT)
- Το DIAC
- Το TRIAC
- Το transistor ισχύος (PTR)

### Η Δίοδος

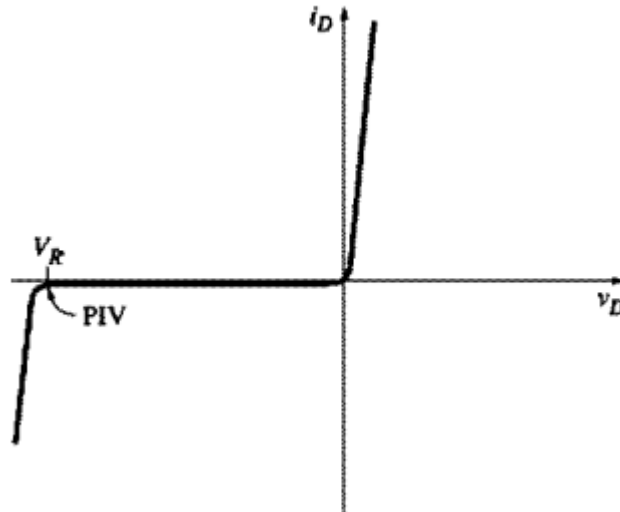
Η δίοδος είναι μια συσκευή ημιαγωγών που έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει την ροή ρεύματος δηλαδή να άγει . μόνο προς μία κατεύθυνση ,στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το σύμβολο της διόδου. Κατασκευαστικά το στοιχείο της διόδου άγει από την άνοδο προς την κάθοδο και όχι αντιστρόφως .



Σχήμα 4.1 Κυκλωματικό σύμβολο της διόδου

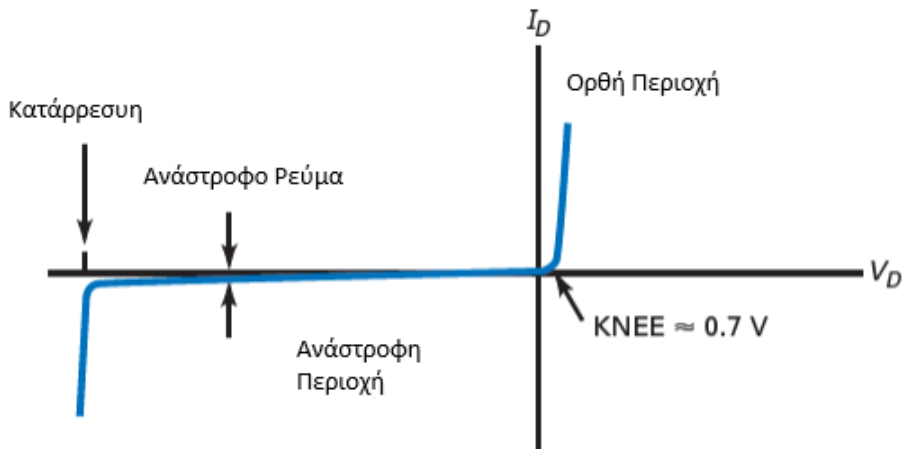
Στο Σχήμα 4.2 δίνεται η καμπύλη διόδου όπου η δίοδος είναι ορθά πολωμένη και δεν υπάρχει σημαντική ποσότητα ρεύματος παρά μόνο όταν η τάση της διόδου ξεπεράσει το φράγμα δυναμικού

έτσι κατά την εφαρμογή τάσης κατά την ορθή φορά αυτή η διόδος διαρρέεται από ρεύμα. Κατά την ανάστροφη φορά εφαρμογής της τάσης το ρεύμα περιορίζεται κατά πολύ της τάξεως των  $\mu\text{A}$ . Εάν εφαρμοστεί αρκετά μεγάλη ανάστροφη τάση στη διόδο, τελικά η διόδος θα καταρρεύσει και θα επιτρέψει στο ρεύμα να ρέει προς την αντίστροφη κατεύθυνση.. Στη χαρακτηριστική της διόδου (Σχήμα 3.2) παρουσιάζονται οι τρεις καταστάσεις ή αλλιώς οι τρεις περιοχές λειτουργίας.



Σχήμα 4.2 Χαρακτηριστική  $v$ - $i$  της διόδου

Οι διόδοι και τα χαρακτηριστικά τους ορίζονται ανάλογα με το ποσό ενέργειας που μπορούν να χειριστούν, την μέγιστη ανάστροφη τάση χωρίς να περνούν στην περιοχή κατάρρευσης. Η ισχύς κατά την ορθή πόλωση του ορίζεται από την πτώση τάσης στα άκρα της επί το ρεύμα που τη διαρρέει [16]. Η ισχύς περιορίζεται, ώστε η διόδος να προστατεύεται από υπερθέρμανση. Η ανάστροφη τάση κορυφής (PIV-peak inverse voltage) είναι η μέγιστη τάση στα άκρα μίας διόδου που δεν άγει [37]. Η τιμή της ανάστροφης τάσης PIV θα πρέπει να είναι μικρότερη από την τάσης κατάρρευσης της διόδου αλλιώς η διόδος θα καταστραφεί.(Σχήμα 4.3).

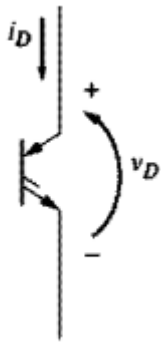


Σχήμα 4.3 Καμπύλη διόδου [37]

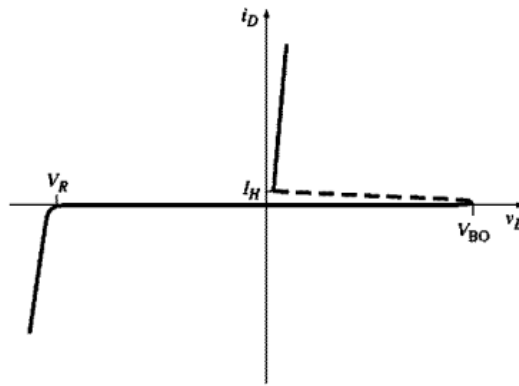
Η PIV τιμή χρειάζεται να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να αποφευχθεί η κατάρρευση και να μην άγει κατά την ανάστροφη περιοχή. Οι διόδοι έχουν ως χαρακτηριστικό λειτουργίας τον χρόνο μετάβασης από την αγωγιμότητα στην κατάσταση αποκοπής και αντίστροφα. Η παραπάνω λειτουργία είναι γνωστή και ως switching time. Όταν οι διόδοι ισχύος καλούνται να διαχειριστούν μεγάλα ποσά ρεύματος τότε και οι τιμές μετάβασης από μία κατάσταση λειτουργίας στην άλλη απαιτεί και αυτή περισσότερο χρόνο. Γενικότερα οι διόδοι ισχύος έχουν γρήγορους χρόνους μεταβάσεως της τάξεως των 50 – 60 Hz παρόλο αυτά σε εφαρμογές όπως η διαμόρφωση εύρους παλμού (Pulse Width Modulation) απαιτούνται τιμές των με ρυθμό των 1000 Hz. Σε τέτοιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται διόδοι γρήγορης ανάκτησης (fast-recovery diodes).

#### Δίοδος PNPN ή Thyristor Δύο επαφών

Όταν κατασκευαστικά μία οικογένεια ημιαγωγών τα μέλη κατασκευάζονται από τέσσερα ημιαγωγά επίπεδα, τότε αυτά ονομάζονται Thyristor. Σε αυτή την κατηγορία είναι και τα thyristor δύο επαφών αλλιώς και ως δίοδος PNPN και έχει τυποποιηθεί γραφικά ως thyristor αποκοπής τύπου διόδου (reverse-blocking diode type thyristor). (Σχήμα 4.4, 4.5).



Σχήμα 4.4 Δίοδος PNPN



Σχήμα 4.5 Χαρακτηριστική v-i διόδου PNPN

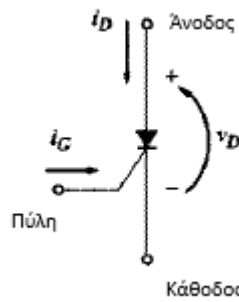
Στην χαρακτηριστική τάσης ρεύματος της διόδου PNPN υπάρχουν 3 περιοχές λειτουργίας . Οι περιοχή ανάστροφης αποκοπής , η περιοχή ορθής αποκοπής και η αγώγιμη περιοχή. Στην ονομαζόμενη περιοχή ανάστροφης αποκοπής η διάδος συμπεριφέρεται ως μια κοινή διάδος όπου το ρεύμα δεν την διαπερνά έως ότου λάβει σήμα συγκεκριμένης τιμής τάσης με την τιμή τάσης της διάσπασης. Κατά την αγώγιμη περιοχή η διάδος επιτρέπει την διέλευση μεγάλων σε τιμή ρεύμα . Η διαφορά της διόδου PNPN με μία κοινή διάοδο έγκειται στην περιοχή ορθής αποκοπής. Όταν η διάδος PNPN μπαίνει στην κατάσταση ορθής πόλωσης και μέχρι το σημείο η τιμή ορθής πόλωσης υπερβεί μία τιμή η οποία και ονομάζεται ορθή τάση κατάρρευσης ( $V_{BO}$ , breakover voltage). Τότε σταματάει η λειτουργία της διόδου PNPN και δεν υπάρχει διέλευση ρεύματος. Όταν η τάση στην διάοδο PNPN ξεπεράσει την τιμή  $V_{BO}$  τότε η διάδος PNPN επιτρέπει την διέλευση του ρεύματος οπότε άγει [16]. Παραμένει σε αυτή την κατάσταση μέχρις ότου εμφανιστεί μία τιμή ρεύματος κάτω από μία τιμή ρεύματος που ονομάζεται ρεύμα συγκράτησης (holding current  $I_H$ ).

Τότε η διάδος δεν επιτρέπει την διέλευση του ρεύματος δηλαδή αλλάζει κατάσταση λειτουργίας και παύει να άγει. Συνοψίζοντας η λειτουργία μίας τέτοιας διόδου PNPN:

- Όταν η τάση  $V_D$  ξεπεράσει την  $V_{BO}$ , η διάδος άγει.
- Όταν το ρεύμα  $i_D$  μειωθεί κάτω από  $I_H$  , η διάδος δεν άγει
- Αποκλείει όλη τη ροή ρεύματος προς την αντίστροφη κατεύθυνση μέχρι να ξεπεραστεί η μέγιστη αντίστροφη τάση.

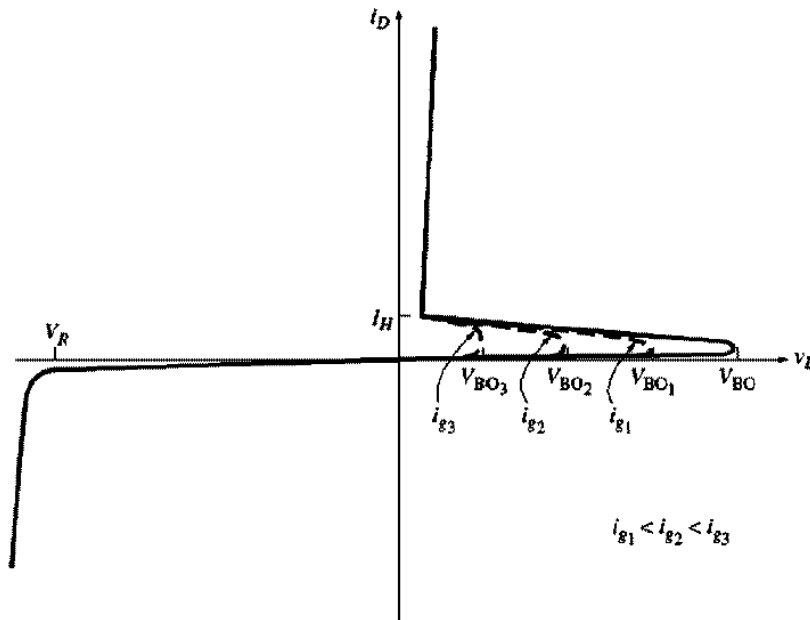
### Ελεγχόμενος Ανορθωτής Πυριτίου SCR

Η ανάπτυξη των ηλεκτρικών κινητήρων βοήθησε την συγκεκριμένη κατηγορία thyristor και βοήθησε στην εξέλιξη των ημιαγωγών ισχύος τα τελευταία 50 χρόνια . Στη δεκαετία του 1960, χρησιμοποιήθηκαν ανορθωτές με βάση το SCR για την κίνηση μηχανικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Το σύμβολο του thyristor τριών επαφών ή αλλιώς ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου SCR παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6



Σχήμα 4.6 Κυκλωματικό σύμβολο SCR

Ο ανορθωτής πυριτίου SCR είναι ένας ελεγχόμενος ανορθωτής ή δίοδος. Έχει παρόμοια λειτουργία με την δίοδο PNP. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο κινητήρων λόγω του ότι η ορθή τάση κατάρρευσης  $V_{BO}$  (breakover voltage) είναι ελεγχόμενη μέσω της ρύθμισης του ρεύματος στην πύλη. Η αντιστοιχία είναι ότι όσο μεγαλύτερο ρεύμα εφαρμοστεί στην πύλη αντιστρόφως ανάλογη είναι η τάση  $V_{BO}$  (Σχήμα 4.7). Η τάση κατάρρευσης χωρίς σήμα πύλης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την υψηλότερη τάση στο κύκλωμα, τότε μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο με την εφαρμογή ρεύματος στην πύλη. Ο ανορθωτής άγει έως ότου το ρεύμα βρεθεί να είναι μικρότερο από  $I_H$ . Αφού ο ανορθωτής ενεργοποιηθεί με την έναυση στην πύλη δεν χρειάζεται πλέον αυτός ο παλμός και ο ανορθωτής παραμένει σε αγώγιμη κατάσταση.



Σχήμα 4.7 Χαρακτηριστική v-i Thyristor τριών επαφών

Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω στοιχεία ο ανορθωτής πυριτίου SCR:

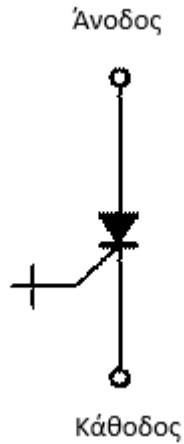
- Όπως και στην δίοδο PNPN η εφαρμοζόμενη τάση  $V_D$  όταν ξεπεράσει την τιμή  $V_{BO}$  τότε ο ανορθωτής πυριτίου άγει.
- Η ορθή τάση κατάρρευσης  $V_{BO}$  ελέγχεται από το ρεύμα  $i_D$  στην πύλη.
- Ο ανορθωτής αποκόπτεται όταν το ρεύμα  $i_D$  γίνει μικρότερο από το  $I_H$ .
- Περνά στην ανάστροφη περιοχή και άγει μόνο όταν ξεπεράσει την μέγιστη τάση αναστροφής.

### Thyristor GTO

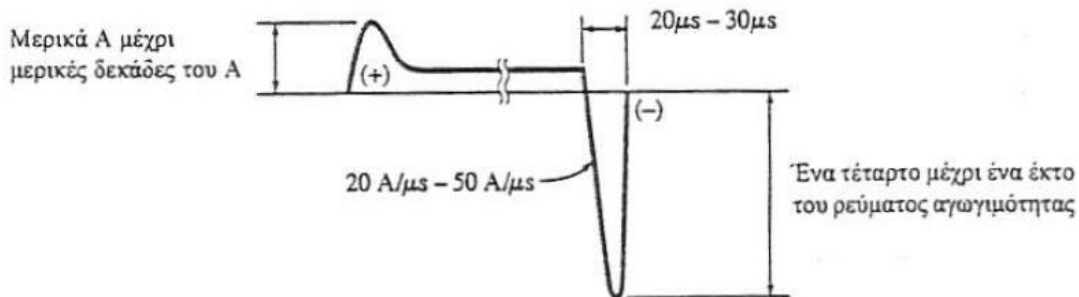
Το συγκεκριμένο ημιαγωγό στοιχείο αποτελεί thyristor με διακοπή πύλης (Gate Turn-Off) (Σχήμα 4.8). Διατηρεί τη βασική δομή των thyristor, τεσσάρων ημιαγωγών επιπέδων με γεωμετρικές διαφορές όσον αφορά την δομή τους σε σχέση με τα καθιερωμένα thyristor. Η περιοχή καθόδου είναι συγκριτικά πιο αυξημένη και οι δύο άλλες περιοχές της ανόδου και πύλης μικρότερες. Σκοπός αυτής της αλλαγής είναι η διακοπή του φαινομένου της θετικής ανατροφοδότησης αλλά και η επίτευξη υψηλών ταχυτήτων μετάβασης (switching time). Αποτελεί μία εξέλιξη της οικογένειας των thyristor. Στην συγκεκριμένη κατηγορία το GTO είναι ένα SCR που με την εφαρμογή μεγάλου αρνητικού παλμού στο ηλεκτρόδιο πύλης τότε περνάει σε κατάσταση αποκοπής, ακόμα και στην περίπτωση



που η τιμή ρεύματος  $i_D$  είναι μεγαλύτερη από το ρεύμα συγκράτησης  $I_H$ . Κρίνεται απαραίτητο να τονισθεί πως το αρνητικό ρεύμα στην πύλη για να περάσει στην σβέση το GTO πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο περίπου στο  $\frac{1}{4}$  του κυρίου ρεύματος αλλά και αρκετά μεγάλος χρόνος και πλάτος 20-30  $\mu s$ . Η τιμή του ρεύματος στην πύλη για έναυση ενός GTO είναι μεγαλύτερη ενός SCR. Οι τιμές ρεύματος είναι άνω των 10 Ampere . (Σχήμα 4.9). Τα συγκεκριμένα στοιχεία δεν δείχνουν αντοχή σε ανάστροφες τάσεις.



Σχήμα 4.8 Κυκλωματικό σύμβολο GTO



Σχήμα 4.9 Ρεύμα έναυσης και σβέσης GTO

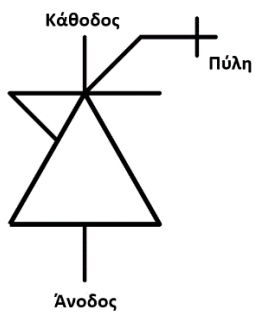
## IGCT

Το ημιαγωγίμο στοιχείο IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) (Σχήμα 4.10) (Σχήμα 4.11) αποτελεί μετεξέλιξη (1997) του GTO με ενσωματωμένο το κύκλωμα οδήγησης και κατηγοριοποιείται στα θυρίστορ. Είναι συνδυασμός ενός GTO θυρίστορ με ενσωματωμένη πύλη λειτουργεί σαν ένας πλήρως ελεγχόμενος διακόπτης ισχύος ρεύματος από την πύλη κατά τις καταστάσεις των ON-OFF παρουσιάζοντας χαμηλές διακοπτικές απώλειες ισχύος σε σχέση με ένα GTO. Το κύκλωμα της πύλης είναι χαμηλό επαγωγικά που ο εκπομπός καθόδου μπορεί να απενεργοποιηθεί στιγμιαία, μετατρέποντας έτσι τη συσκευή σε διπολική τρανζίστορ κατά την σβέση (Turn Off) και εξαλείφοντας την ανάγκη για κυκλώματα καταστολής (snubber circuits) [38].

Το κομμάτι του ακρωνυμίου GCT αναφέρεται στο ημιαγωγικό διακόπτη και το Integrated στην ολοκληρωμένη πύλη. Το συγκεκριμένο θυρίστορ χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ισχύος όπως οδήγηση κινητήρα μεγάλης ισχύος αλλά και συστήματα μεταφοράς και διαχείρισης ενέργειας. Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι όπως :

- Reverse Conducting- RCIGCT: ο ημιαγωγός άγει από την κάθοδο προς την άνοδο και χρησιμοποιείται με εναλλασσόμενο ρεύμα και τοποθετημένη άντι-παράλληλα μία δίοδος.
- Reverse Blocking- RBIGCT: εδώ το στοιχείο έχει την δυνατότητα να απομονώνει και ανάστροφη τάση, κάθοδο προς άνοδο και χρησιμοποιείται σε εναλλασσόμενα κυκλώματα.
- Asymmetric-AIGCT: Δεν υπάρχει η δυνατότητα ανάστροφης πόλωσης ή αγωγής. Ο ημιαγωγός έχει μικρότερες απώλειες και χρησιμοποιείται σε συστήματα συνεχούς ρεύματος και σε ημιαγωγικούς διακόπτες

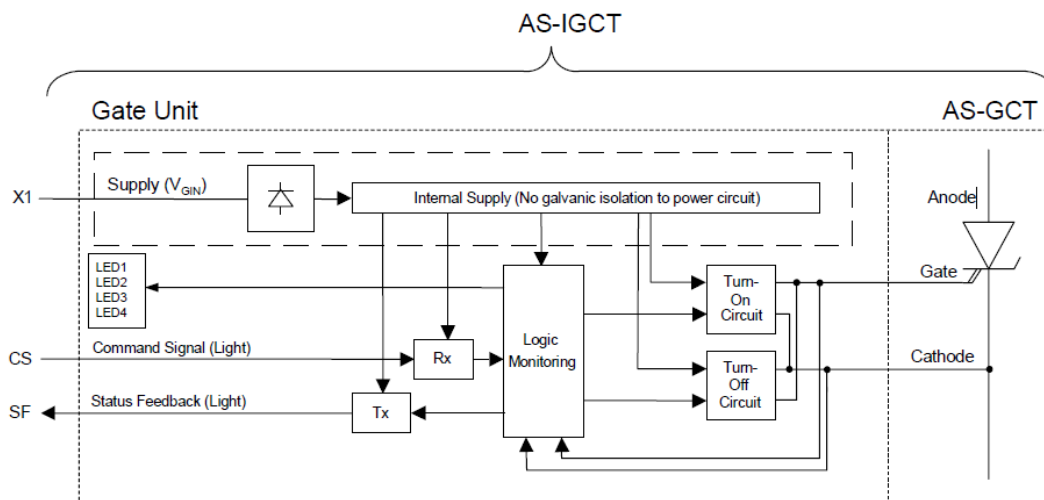
Η κατασκευαστική δομή ενός IGCT δίνει την δυνατότητα για ταχύτερους χρόνους σβέσης σε σχέση με GTO. Τα IGCT έχει ταχύτητες μεταγωγής της τάξεως των kHz αλλά λόγω των υψηλών απωλειών μεταγωγής η συχνότητα λειτουργίας είναι 500Hz. Οι τιμές ρεύματος σβέσης είναι από 520- 5,000 A. και ονομαστικές τάσης αποκλεισμού 4.500 – 6.500 V.



Σχήμα 4.10 Κυκλωματικό σύμβολο IGCT προκύπτει από το γενικευμένο σύμβολο των θυρίστωρ



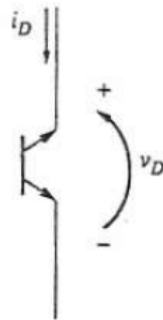
4.11 Εμπορικό στοιχείο A-IGCT [39]



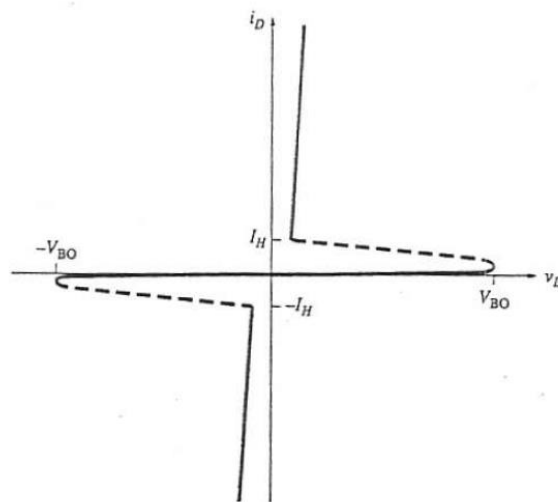
Σχήμα 4.12 Μπλοκ διάγραμμα A-IGCT [39]

## DIAC

Το diac κατασκευαστικά μοιάζει σαν δύο διόδους PNPN και μερικές φορές ονομάζεται και αμφίδρομος διακόπτης πυριτίου (silicon bidirectional switch ,SBS) καθώς μαζί με το triac θεωρούνται αμφίδρομα thyristors. Μπορεί να έχει ρεύμα μανδάλωσης και προς τις δύο κατευθύνσεις λόγω κατασκευής αρκεί η τάση που θα εφαρμοστεί στα άκρα του στοιχείου να περάσει την τάση  $V_{BO}$  δηλαδή την ορθή τάση κατάρρευσης. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός diac είναι ένα ζευγάρι διόδων τεσσάρων επιπέδων. Το DIAC φαίνεται στο Σχήμα 4.13 . Μελετώντας την χαρακτηριστική τάσης ρεύματος (Σχήμα 4.14) του στοιχείου διαπιστώνεται πως ανεξάρτητα από την πολικότητα το στοιχείο άγει μόνο όταν η τάση  $V_D$  στα άκρα του στοιχείου ξεπεράσει την ορθή τάση κατάρρευσης  $V_{BO}$  και σταματάει να άγει όταν το ρεύμα πέσει κάτω από το ρεύμα συγκράτησης  $I_H$ .



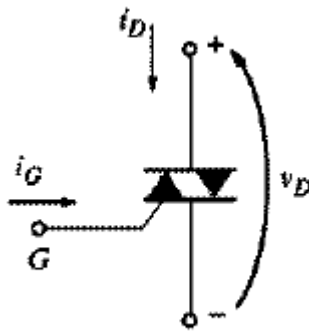
Σχήμα 4.13 Κυκλωματικό σύμβολο DIAC



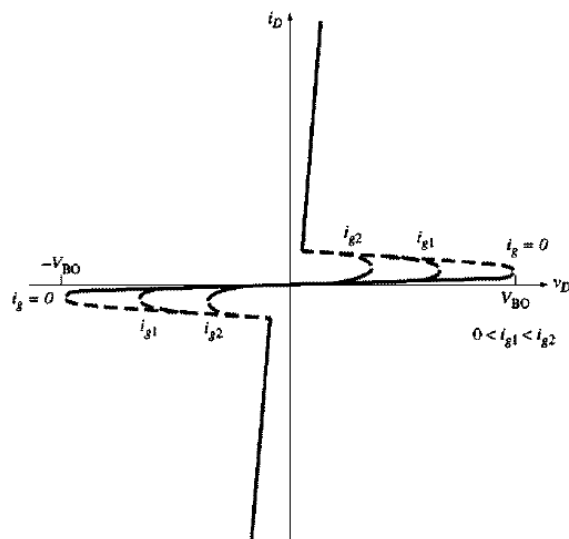
Σχήμα 4.14 Χαρακτηριστική v-i DIAC

## TRIAC

Η φιλοσοφία ενός triac βασίζεται στο SCR όπου ένα ζεύγος συνδεδεμένα αντι-παράλληλα λειτουργούν σε μανδάλωση με κοινή πύλη με σκοπό να ελέγχουν το ρεύμα και προς τις δύο κατευθύνσεις όταν η τάση στα άκρα του στοιχείου ξεπεράσει την ορθή τάση κατάρρευσης  $V_{BO}$ . Στο Σχήμα 4.15 είναι η κυκλωματική απεικόνιση ενός TRIAC. Η ορθή τάση κατάρρευσης ενός TRIAC μειώνεται όσο αυξάνεται το ρεύμα στην πύλη του στοιχείου όπως συμβαίνει και σε ένα SCR με την διαφορά πως μπορεί και λειτουργεί υπό θετικούς και αρνητικούς παλμούς ρεύματος. Σταματάει να άγει όταν η τιμή ρεύματος πέσει κάτω από το ρεύμα συγκράτησης  $I_H$ . (Σχήμα 4.16)



Σχήμα 4.15 Κυκλωματικό Σύμβολο TRIAC

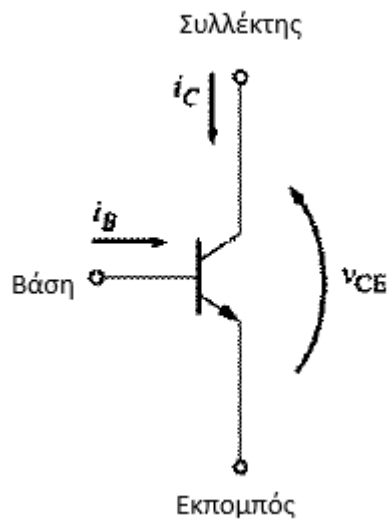


Σχήμα 4.16 Χαρακτηριστική v-i ενός TRIAC

## Τρανζίστορ Ισχύος – Power Transistors PTR

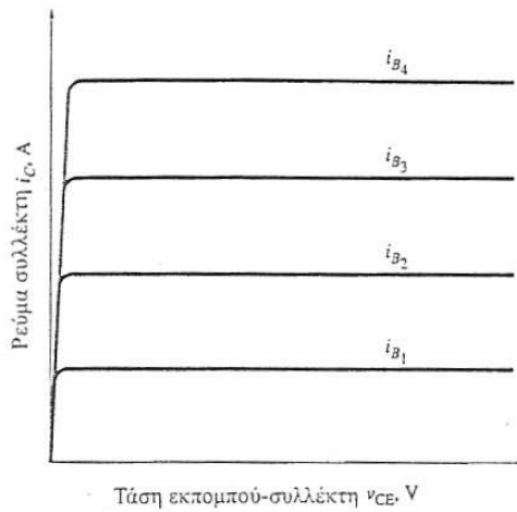
Τα τρανζίστορ ισχύος είναι ημιαγωγά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ηλεκτρικών μηχανών εκμεταλλεύοντας το γεγονός πως μπορούν να ελέγχουν υψηλές τιμές έντασης και ρεύματος. Όπως παρουσιάζεται και στο κυκλωματικό σύμβολο στο Σχήμα 4.17 το στοιχείο αποτελείται από τρεις ακροδέκτες εκπομπού (Emitter) ,βάσης (Base) και συλλέκτη (Collector) ή Πηγή (Source) Πύλη (Gate) Απαγωγός (Drain) για τα MOSFET. Εφαρμόζοντας τάση ή ρεύμα στο ένα ζεύγος ακροδεκτών μπορεί και ελέγχει τάση ή ρεύμα στο άλλο ζεύγος. Τα τρανζίστορ αυτά μπορεί να είναι NPN ή PNP . Υπάρχουν διαφορετικές κατηγορίες τρανζίστορ όπως :

- Διπολικά τρανζίστορ  
(Bipolar Junction Transistor-BJT)
- Τρανζίστορ μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού με επίδραση πεδίου  
(Metal Oxide Semiconductor Field-Effect-MOSFET)
- Τρανζίστορ στατικής επαγωγής ή επίδρασης πεδίου  
(Static Induction Transistor-SITs) or (Junction Field Effect Transistor-JFET)
- Διπολικό Τρανζίστορ Απομονωμένης Πύλης  
(Insulated Gate Bipolar Transistor-IGBTs)

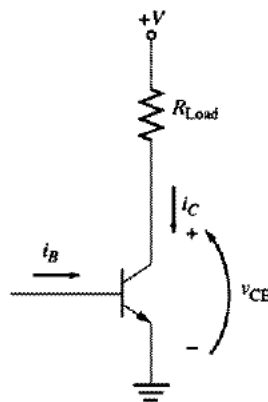


Σχήμα 4.17 Κυκλωματικό Σύμβολο PTR

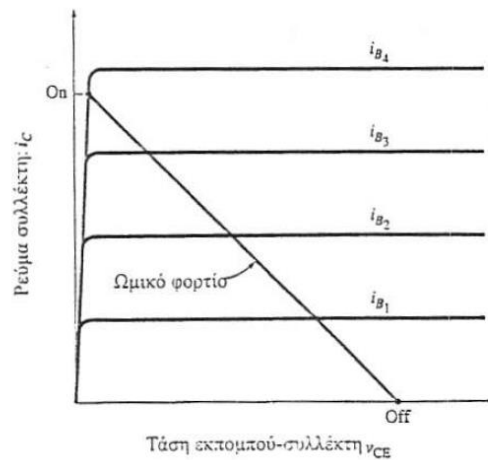
Στην χαρακτηριστική τάσεως εκπομπού συλλέκτη στο Σχήμα 4.18 το ρεύμα που διαρρέει το συλλέκτη  $i_c$  είναι ανάλογο του ρεύματος βάσεως  $i_B$ . Το στοιχείο είναι πλέον συνδεδεμένο με ωμικό φορτίο (Σχήμα 4.19) και η καινούρια χαρακτηριστική καμπύλη (Σχήμα 4.20) παρουσιάζει τη σχέση ρεύματος τάσης  $i_c$  με το εύρος των τιμών συλλέκτη εκπομπού  $v_{ce}$  μαζί με καμπύλη φορτίου. Γνωρίζοντας την διακοπτική λειτουργία ενός τρανζίστορ παρατηρείται πως η εφαρμογή ρεύματος βάσης  $i_{B4}$  βοηθάει το στοιχείο να άγει και περνά στην περιοχή αποκοπείς όταν εφαρμόζεται μηδενισμός του ρεύματος βάσης [40].



Σχήμα 4.18 Χαρακτηριστική τάση εκπομπού PTR



Σχήμα 4.19 Σύνδεση ωμικού φορτίου με τρανζίστορ



Σχήμα 4.20 Χαρακτηριστική εκπομπού συλλέκτη με συνδεδεμένο ωμικό φορτίο

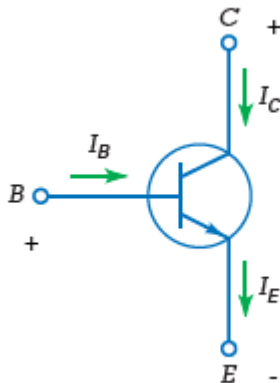
Απαραίτητη προϋπόθεση είναι το στοιχείο να εκπληρώνει τις διακοπτικές του ικανότητες χωρίς να καταναλώνει ενέργεια μα κυρίως να άγει χωρίς να καταναλώνει μεγάλα ποσά ενέργειας έτσι είναι απαραίτητη η ύπαρξη μεγάλου ρεύματος βάσης  $i_B$  ώστε να περάσει στο επίπεδο κορεσμού . Τα τρανζίστορ ισχύος καλούνται να προσφέρουν τα ποικίλα χαρακτηριστικά τους σε κυκλώματα αντιστροφών (inverters). Κατά την μετάβαση από την περιοχή αγωγιμότητας στην περιοχή αποκοπής αλλά και αντίστροφα εμφανίζονται μεγάλα ρεύματα βάσης προκαλώντας αργές μεταβάσεις μεταξύ των δύο καταστάσεων.

### Διπολικά τρανζίστορ (BJTs)

Σε αυτή την κατηγορία τα τρανζίστορ χρησιμοποιούν ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές . Κατασκευαστικά παρουσιάζεται με τρεις ζώνες ημιαγωγού στοιχείου , τρεις ακροδέκτες και σε κατηγορίες npn και pnp. Λόγω αναγκών σε ισχύ χρησιμοποιούνται είδος npn εφαρμόζοντας ορθή πόλωση. Δηλαδή θετική τάση στον συλλέκτη και στην βάση και αρνητική τάση στον εκπομπό . Όταν είναι ορθά πολωμένο ένα μικρό ρεύμα  $I_B$  κατευθύνεται από την βάση στον εκπομπό για να ρυθμίσει τη ροή του ρεύματος από τον συλλέκτη στον εκπομπό. Όσο αυξάνεται το ρεύμα βάσης έτσι ανάλογα αυξάνεται και το ρεύμα συλλέκτη  $I_C$ . Η ενίσχυση (B) εκφράζεται με το πηλίκο του ρεύματος συλλέκτη ως προς το ρεύμα βάσης. (Σχήμα 4.21) . Η λειτουργία ενός τέτοιου τρανζίστορ έχει μικρές τιμές συχνότητας λειτουργίας και μικρή αντίσταση εξόδου και χρειάζεται να γίνει έλεγχος του τρανζίστορ αλλά μεγάλες ποσότητες ισχύος [37].



$$\text{Ενίσχυση : } B = \frac{I_C}{I_B}$$



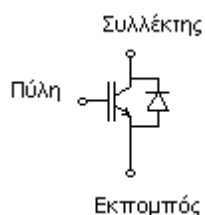
Σχήμα 4.21 Κυκλωματικό Σύμβολο ηρη τρανζίστορ ορθά πολωμένο [37]

#### Τρανζίστορ μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού με επίδραση πεδίου (MOSFET)

Αν και πλέον δεν χρησιμοποιούνται πλέον το αγώγιμο υλικό MOSFET στην ηλεκτροπρόωση γιατί έχει τεχνολογικά ξεπεραστεί θα αναφερθεί καθώς αποτελούσε ένα από τα πρωταρχικά στοιχεία εξέλιξης της ηλεκτροπρόωσης για την διαμόρφωση εύρους παλμού. Όπως προαναφέρθηκε το ημιαγωγό αυτό στοιχείο διαθέτει πηγή (source) Πύλη (Gate) απαγωγό (drain) . Κάποιες φορές ονομάζεται και μονωμένης πύλης IGFET (insulated-gate FET) λόγω του ότι διαφέρει σε σχέση με τα JFET γιατί η πύλη είναι μονωμένη από το κανάλι. Χρησιμοποιείται μονωτικό υλικό διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) με σκοπό τον έλεγχο της ροής του ρεύματος μεταξύ υποδοχής και πηγής [40]. Για αυτό τον λόγο το ρεύμα πύλης είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με ένα JFET. Τα MOSFET διακρίνονται σε τύπου αραιώσης και τύπου πύκνωσης .Τα πρώτα δεν χρησιμοποιούνται αρκετά. Τα MOSFET τύπου πύκνωσης χρησιμοποιούνται ως διακόπτες μεταγωγής ισχύος στα διακριτά κυκλώματα και ως εργαλεία ψηφιακής μεταγωγής στα ολοκληρωμένα κυκλώματα [37].

## Διπολικό Τρανζίστορ Απομονωμένης Πύλης-IGBT

Το διπολικό τρανζίστορ απομονωμένης πύλης (Σχήμα 4.22) αποτελεί προϊόν MOSFET και BJT ισχύος. Χρησιμοποιεί τα χαρακτηριστικά και των δύο υλικών για τον έλεγχο εισόδου (MOSFET) και εξόδου (BJT). Μέσω ελέγχου τάσης στην πύλη και όχι στην βάση μέσω ρεύματος για να λειτουργήσει διακοπτικά στο κύκλωμα. Το ρεύμα στην πύλη είναι αρκετά μικρό λόγω μεγάλης σύνθετης αντίστασης. Εκμεταλλεύοντας το γεγονός πως επικρατούν μικρές τιμές τάσεις ελέγχου στην πύλη και μικρό ρεύμα χρειάζεται και λιγότερο χρόνο εναλλαγής καταστάσεων, το στοιχείο IGBT είναι ιδανικό για κυκλώματα μεγάλης ισχύος και υψηλής συχνότητας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.22 υπάρχει τοποθετημένη αντιπαράλληλα μία δίοδος για να μπορεί να γίνεται γρήγορα η μετάβαση από αγωγή σε σβέση. Κατά την σβέση του ημιαγωγού με επαγωγικά φορτία χρησιμοποιείται ώστε το ρεύμα επαγωγής του φορτίου να περνά από τη δίοδο και να καταστρέφεται ο διακόπτης από τις υπερτάσεις.

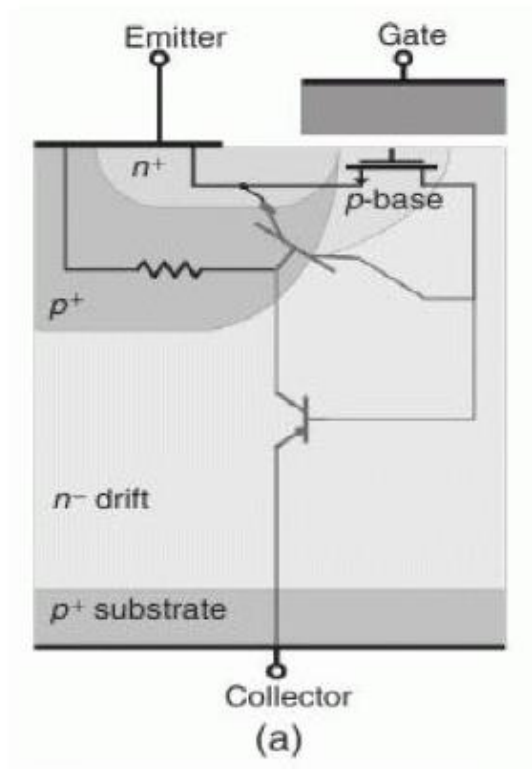


Σχήμα 4.22 Κυκλωματικό σύμβολο IGBT με δίοδο

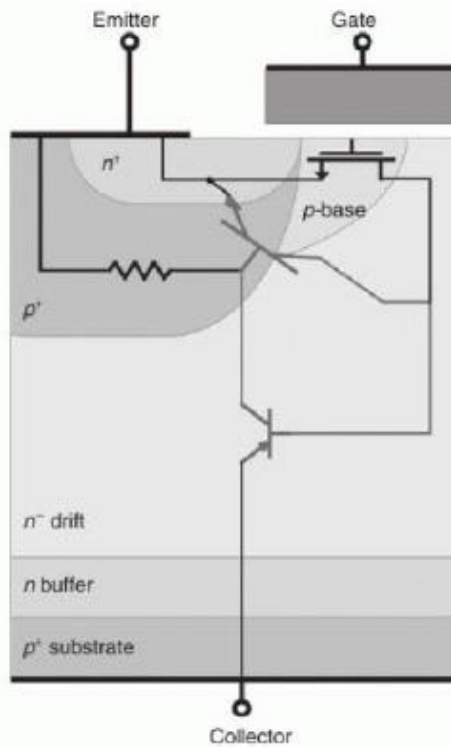


Σχήμα 4.23 IGBT εμπορίου [41]

Στο Σχήμα 4.24 παρουσιάζεται η κατασκευαστική δομή ενός IGBT. Τα υποστρώματα  $n^+$ ,  $p$ -base και  $n^-$ drift είναι μέρος του MOSFET ενώ το  $p^+$  ολοκληρώνει κατασκευαστικά το IGBT. Τα στρώματα  $p^+$ ,  $n^-$ drift,  $p^+$ substrate δημιουργούν το  $pnp$  τρανζίστορ και η πύλη του ελέγχεται από τάση στο MOSFET. Στο Σχήμα 4.25 υπάρχει μία διαφορά στην δομή. Αυτή είναι ένα επιπλέον υπόστρωμα  $n^-$  buffer το οποίο στην φάση της σβέσης δεν επιτρέπει να στα ηλεκτρόνια να άγουν στο  $p^+$  substrate και μειώνεται ο χρόνος σβέσης του ημιαγωγού [41].



Σχήμα 4.24 Δομή IGBT χωρίς buffer [41]



Σχήμα 4.25 Δομή IGBT με buffer [41]

Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένοι ηλεκτρονικοί διακόπτες ισχύος και τα χαρακτηριστικά τους. Η δίοδος αν και δεν αποτελεί ελεγχόμενο διακόπτη αναφέρεται γιατί σε πολλές περιπτώσεις αποτελεί μέρος το μετατροπέων ισχύος.

Διακόπτης	Μέγιστη Τάση Λειτουργίας (V)	Μέγιστο Ρεύμα Λειτουργίας (A)	Μέγιστη Διακοπτική Συχνότητα Λειτουργίας (Hz)	Μέγιστη Ισχύς Λειτουργίας (kW)
Δίοδος ισχύος	6600	6000	2000	1000
Θυρίστορ (SCR)	6600	6000	200	1000
BJT Τρανζίστορ <sup>(1)</sup>	1200	700	1000	1000
MOSFET Τρανζίστορ <sup>(2)</sup>	1000	150	20000	100
GTO <sup>(3)</sup>	4500	3000	800	1000
IGBT <sup>(4)</sup>	1500	800	2000	100

<sup>(1)</sup> BJT: Bipolar Junction Transistor  
<sup>(2)</sup> MOSFET: Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor  
<sup>(3)</sup> GTO: Gate Turn-off Thyristor  
<sup>(4)</sup> IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

Πίνακας 4.1 Συγκριτική παρουσίαση ηλεκτρονικών διακοπών ισχύος [34]

## Κεφάλαιο 5 Διατάξεις Μετατροπών Συχνότητας

Η διάταξη των ηλεκτρονικών ισχύος και ο έλεγχος λειτουργίας τους επιτρέπει την μετατροπή της στατικής συχνότητας . Στην ηλεκτροπρόωση χρειάζεται η μετατροπή της εναλλασσόμενης ισχύος συγκεκριμένης συχνότητας σε εναλλασσόμενη ισχύ διαφορετικής συχνότητας. Οι πιο διαδεδομένοι μέθοδοι μετατροπών συχνότητας είναι οι διατάξεις ανορθωτές- αντιστροφείς ( rectifiers-inverters) και κυκλομετατροπείς ( cycloconverters) και μητροειδείς μετατροπείς (matrix converters). Οι αντιστροφείς διακρίνονται σε εξωτερικής μετάβασης και αυτομετάβασης σύμφωνα με την τεχνική μετάβασης που χρησιμοποιούν [34].

### 5.1 Ανορθωτές

Κατασκευαστικός σκοπός ενός τριφασικού ανορθωτή είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης ισχύος σε συνεχή. Για την κάλυψη των αναγκών για έλεγχο κινητήρων χρειάζεται η χρήση θυρίστορ SCR και όχι διόδων καθώς η συνεχής τάση εξόδου είναι συγκεκριμένη για μια δεδομένη εναλλασσόμενη τάση εισόδου. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.01 υπάρχει μία τριφασική διάταξη πλήρους ανόρθωσης με θυρίστορ SCR . Ο χρόνος που σκανδαλίζονται τα θυρίστορ κατά τις θετικές ημιπεριόδους θα δημιουργήσει την μέση συνεχή τάση. Ο σκανδαλισμός κατά την αρχή της θετικής ημιπεριόδου παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με τριφασικό ανορθωτή πλήρους ανόρθωσης με διόδου. Όταν δεν σκανδαλίζονται ποτέ τότε η τιμή τάσης είναι 0V και για γωνία έναυσης μεταξύ 0 μοιρών και 180 , τότε η τάση εξόδου κυμαίνεται μεταξύ 0 Volt και της μέγιστης εκάστοτε τιμής.

#### 5.1.1 Ελεγχόμενος Τριφασικός Ανορθωτής Γέφυρας

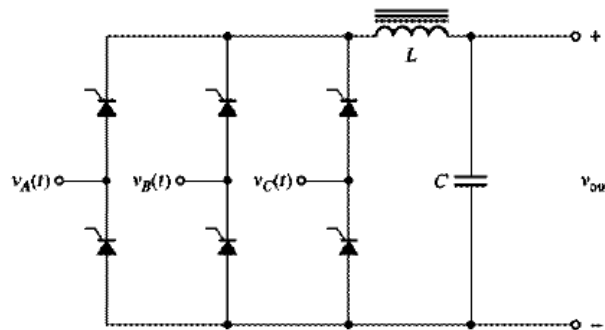
Στους μετατροπείς το κομμάτι των τριφασικών ανορθωτών στην ηλεκτροπρόωση κρίνεται απαραίτητο να είναι ελεγχόμενοι οι ανορθωτές έτσι θα γίνει ανάλυση των ανορθωτών γραμμικής μεταγωγής ( line-commutated controlled Rectifiers- thyristor rectifiers )και ανορθωτές εξαναγκασμένης μετάβασης με διαμόρφωση εύρους παλμού (force-commutated pulse width modulated PWM rectifiers.).

Στα ελεγχόμενα θυρίστορ γραμμικής μεταγωγής συγκαταλέγονται διατάξεις θυρίστορ που σχηματίζουν :

- τριφασικό ημιανορθωτή ( Three phase Half Wave Rectifier)
- ανορθωτής διπλού αστέρα ή ανορθωτής 6 παλμών ( Double Star rectifier or Six pulse)

- διπλού αστέρα ανορθωτής με ενδιάμεση σύνδεση ( Double star Rectifier with Interphase Connection)
- τριφασικός ανορθωτής πλήρους κύματος (Three phase Full wave Rectifier) ή πλήρους ανόρθωσης
- Μετατροπέας ημιελεγχόμενης γέφυρας (Half Controlled Bridge Converter)

Παρακάτω θα αναλυθεί η δομή του τριφασικού ανορθωτή πλήρους κύματος καθώς χρησιμοποιείται ευρέως στην ηλεκτροπρόωση.



Σχήμα 5.01 Τριφασικό κύκλωμα ανορθωτή με θυρίστορ SCR [16].

Λόγω του ότι χρησιμοποιούνται θυρίστορ SCR η τάση εξόδου περιέχει αρμονικές . Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται φίλτρο στην έξοδο με σκοπό να εξομαλύνει τη συνεχή τάση εξόδου .

### 5.1.1.1 Τριφασικός Ανορθωτής Πλήρους Κύματος

Η παράλληλη σύνδεση μέσω μετασχηματιστών μεταξύ των φάσεων επιτρέπει την υλοποίηση ανορθωτών για εφαρμογές υψηλού ρεύματος. Μπορεί να πραγματοποιηθεί σύνδεση σε σειρά υψηλής τάσης όπως φαίνεται στον ανορθωτή πλήρους ανόρθωσης στο Σχήμα 5.02 .Με αυτή τη διάταξη, οι τρεις κάθοδοι στο κάτω μέρος παράγουν μια θετική τάση σε σχέση με το ουδέτερο, και οι τρεις άνοδοι παράγουν μια αρνητική τάση.

Το αποτέλεσμα είναι μια τάση συνεχούς ρεύματος, διπλάσια από την τιμή του ανορθωτή μισού κύματος. Κάθε μισό της γέφυρας είναι μια ομάδα μετατροπέων τριών παλμών. Αυτή η σύνδεση γέφυρας είναι μια αμφίδρομη σύνδεση και τα εναλλασσόμενα ρεύματα ρέουν στις περιελίξεις του δευτερεύον μετασχηματιστή και στην πλευρά του ανορθωτή κατά τη διάρκεια και των δύο μισών περιόδων, αποφεύγοντας εξαρτήματα συνεχούς ρεύματος στις περιελίξεις και τον κορεσμό στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Η μέση τάση δίνεται από τον τύπο [41]:

$$\begin{aligned}
 VD &= \frac{2 V_{max}}{2 \frac{\pi}{3}} \int_{-\frac{\pi}{3+\alpha}}^{\frac{\pi}{3+\alpha}} \cos \omega t * d(\omega t) \\
 &= 2 V_{max} \frac{\sin \frac{\pi}{3}}{\frac{\pi}{3}} \cos a \approx 2.34 V_f - N(rms) \cos a \\
 &= \frac{3 \sqrt{2} * V_f - f_{sec}}{\pi} \cos a \approx 1.35 V_f - f_{sec} \cos a
 \end{aligned}$$

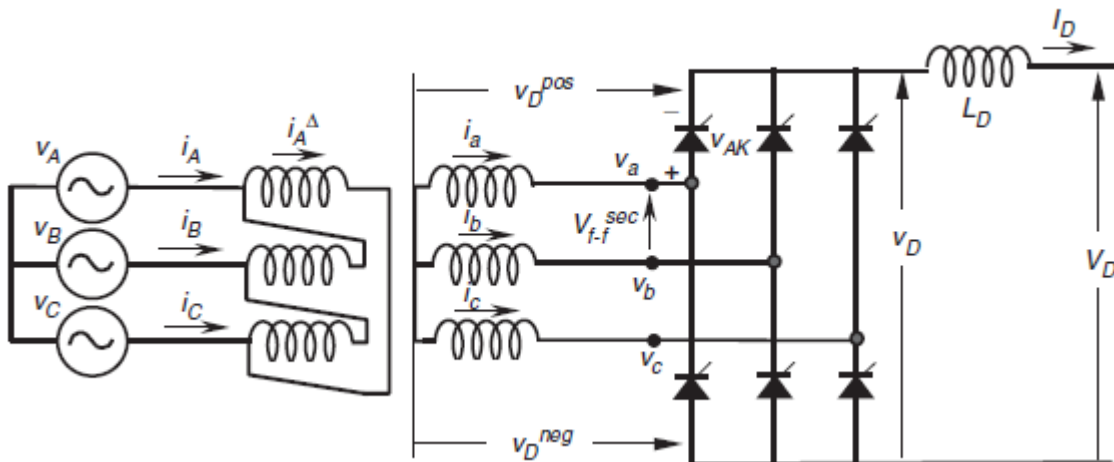
$V_{max}$  = μέγιστη φασική τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή

$V_{sec}$  = η ενεργή (rms) πολική τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή στους συνδέσμους της γέφυρας

$f$  -  $f$

$V_{rms}$  = η ενεργή φασική τάση

$f$  -  $N$



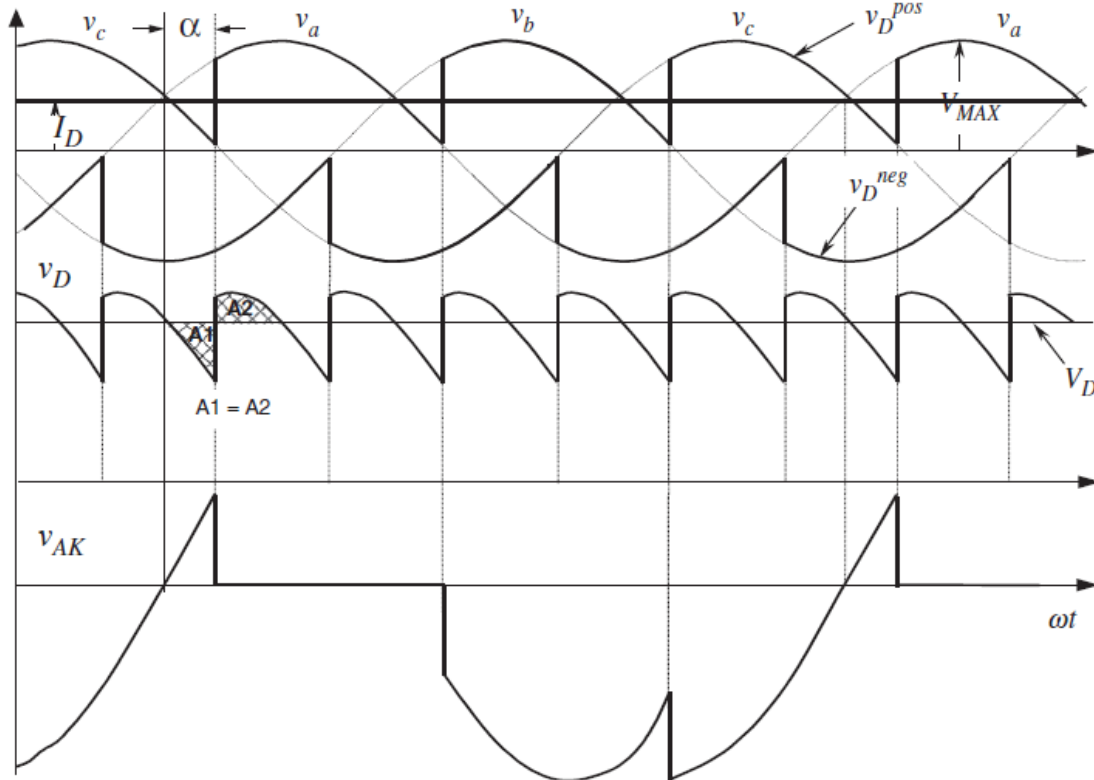
Σχήμα 5.02 Τριφασικός ανορθωτής πλήρους κύματος ή γέφυρα Graetz [41].

Στο σχήμα 5.03 φαίνονται οι τάσεις κάθε ημικύματος της κυματομορφής της γέφυρας ,  $V_{d,pos}$  και  $V_{d,neg}$  , η συνολική στιγμιαία DC τάση  $V_D$  και η ανοδική και καθοδική τάση σε ένα από τα θυρίστορ της γέφυρας  $V_{AK}$  . Η μέγιστη τιμή τάσης στα άκρα του θυρίστορ  $V_{AK}$  είναι  $\sqrt{3} \cdot V_{MAX}$  που είναι ίδια με το μετατροπέα ημικύματος και του διπλού αστέρα ανορθωτή με ενδιάμεση σύνδεση ( Double Star Rectifier with Interphase Connection ) μία άλλη τεχνική ανόρθωσης . Στο Σχήμα 5.03 δείχνει τα ρεύματα του ανορθωτή, το  $L_D$  είναι αρκετά μεγάλο για να διατηρεί το συνεχές ρεύμα σε εξομάλυνση.

Το παράδειγμα είναι για την σύνδεση του μετασχηματιστή σε αστέρα όπως φαίνεται στην τοπολογία του Σχήματος 5.02 . Μπορεί να σημειωθεί ότι τα δευτερεύοντα ρεύματα δεν φέρουν κανένα στοιχείο συνεχούς ρεύματος, αποφεύγοντας έτσι τον υπερβολικό σχεδιασμό των περιελίξεων και τον κορεσμό του μετασχηματιστή. Αυτά τα δύο σχήματα έχουν σχεδιαστεί για μια γωνία πυροδότησης (firing angle), στις 30°. Η τέλεια συμμετρία των ρευμάτων στα τυλίγματα και τις γραμμές είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους αυτός ο ανορθωτής είναι το πιο δημοφιλές στο είδος του. Τα στοιχεία του μετασχηματιστή που προκύπτουν .

$$V_{Aprim} = 1.05 \cdot PD$$

$$V_{Asec} = 1.05 \cdot PD$$



Σχήμα 5.03 Κυματομορφές τάσης για τη γέφυρα Graetz [41].



### 5.1.1.2 Τριφασικός Ελεγχόμενος Ανορθωτής Εξαναγκασμένης Μετάβασης- (Force-commutated Three Phase Controlled Rectifiers)

Οι ανορθωτές με εξαναγκασμένη μετάβαση έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν με ημιαγωγούς με δυνατότητα αποκοπής από την πύλη ( Turn Off) . Με τον έλεγχο στην πύλη δίνεται πλήρη έλεγχο του μετατροπέα δίνοντας την δυνατότητα για έναυση και σβέση της πύλης εκατοντάδες φορές σε μία περίοδο το οποίο δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί στους ελεγχόμενους ανορθωτές γραμμικής μεταγωγής όπου τα ημιαγωγά στοιχεία ανοίγουν και κλείνουν μία φορά σε ένα κύκλο. Αυτή η επιλογή έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

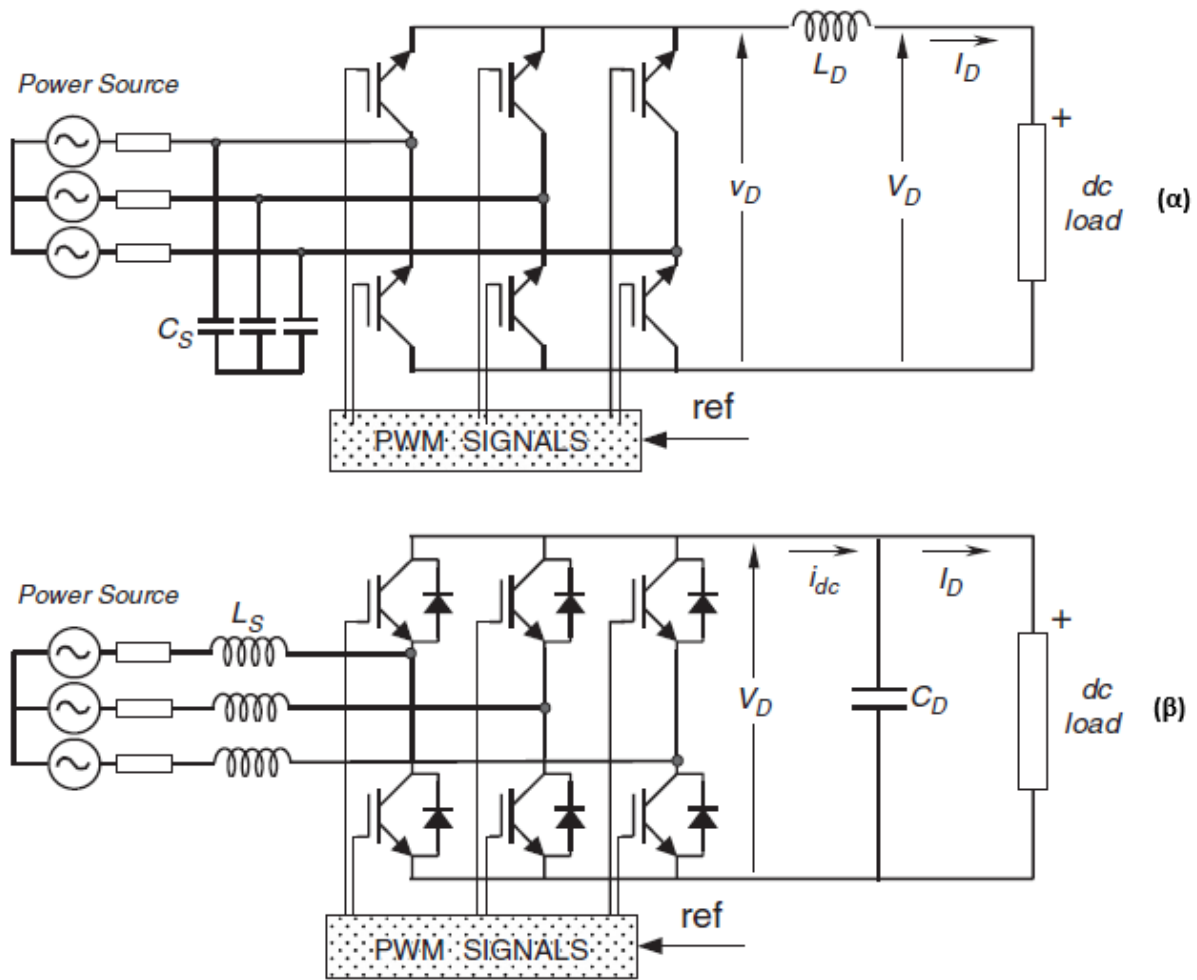
- το ρεύμα ή η τάση μπορούν να διαμορφωθούν (PWM), παράγοντας λιγότερες αρμονικές
- ο συντελεστής ισχύος μπορεί να ελεγχθεί
- μπορούν να κατασκευαστούν ανορθωτές πηγής τάσης (VCI) ή πηγής ρεύματος (CSI)
- η αναστροφή ισχύος στους ανορθωτές γίνεται με αντιστροφή της τάσης στη ζεύξη συνεχούς ρεύματος (DC-link)

Αντί αυτού μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανορθωτές εξαναγκασμένης μετάβασης και με αντιστροφή τάσης ή αντιστροφή ρεύματος.

Υπάρχουν δύο τρόποι για την εφαρμογή τριφασικών ανορθωτών εξαναγκασμένης μετάβασης :

- ως ανορθωτής πηγής ρεύματος , όπου η αναστροφή ισχύος προέρχεται από αναστροφή συνεχούς τάσης
- ως ανορθωτής πηγής τάσης , αναστροφή ισχύος προκύπτει από αναστροφή ρεύματος στον σύνδεσμο συνεχούς ρεύματος (DC-link).

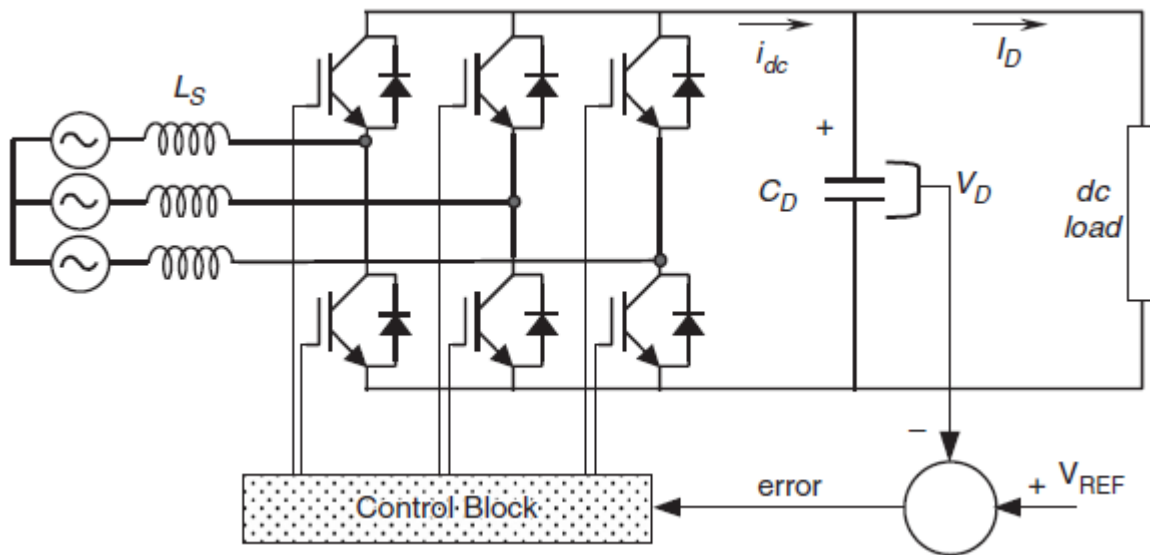
Στο Σχήμα 5.04 παρουσιάζονται τα βασικά κυκλώματα για τις παραπάνω τοπολογίες.



Σχήμα 5.04 Βασικές τοπολογίες ανορθωτών εξαναγκασμένης μετάβασης: (α) ανορθωτής πηγής ρεύματος (β) ανορθωτής πηγής τάσης [41]

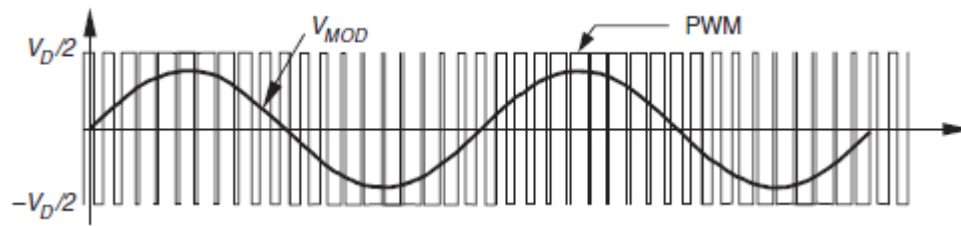
### 5.1.1.2.1 Λειτουργία Ανορθωτή Πηγής Τάσης

Ο ανορθωτής πηγής τάσης ( Voltage Source Rectifier) είναι ο πιο ευρέως διαδεδομένος ανορθωτής και χρησιμοποιείται σε μεγάλη γκάμα βιομηχανικών πεδίων συμπεριλαμβάνοντας το ναυτιλιακό πεδίο. Για αυτό και θα αναλυθεί παρακάτω. Ο ανορθωτής πηγής τάσης λειτουργεί διατηρώντας την τάση συνδέσμου (DC-link) σε μια επιθυμητή τιμή αναφοράς ( $V_{REF}$ ) χρησιμοποιώντας βρόγχο ανάδρασης (Σχήμα 5.05).



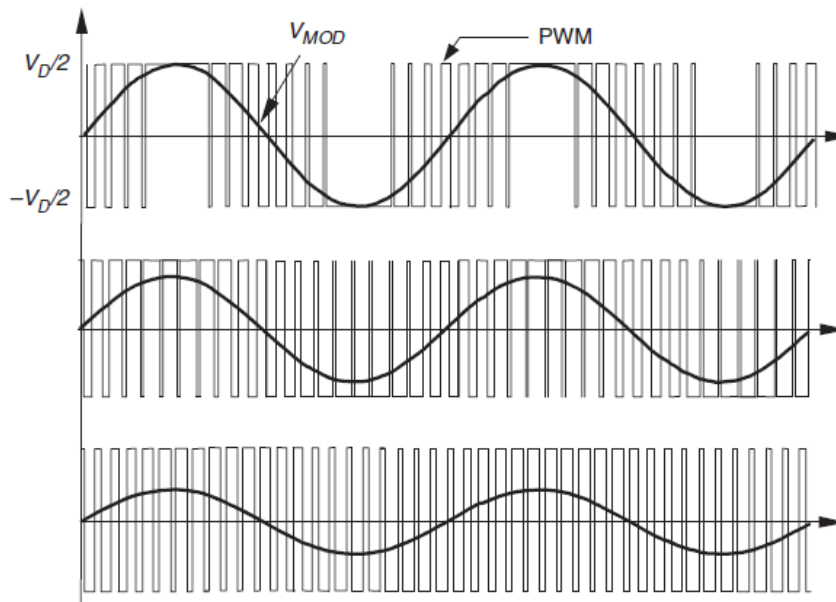
Σχήμα 5.05 Αρχή λειτουργίας ανορθωτή πηγή τάσης [41].

Για να επιτευχθεί αυτή η σταθεροποίηση της τάσης συγκρίνεται η τιμή αναφοράς ( $V_{REF}$ ) με την ενεργό τιμή (Actual Value)  $V_D$  όπως αυτή ελέγχεται και συγκρίνεται από την μέτρηση του πυκνωτή ( $C_D$ ). Το σφάλμα που προκύπτει από την σύγκριση χρησιμοποιείται ως σήμα σφάλματος για την έναυση ή σβέση των πυλών. Με αυτό τον τρόπο, η ισχύς μπορεί να επιστρέψει στην πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος. Όταν το ρεύμα  $I_D$  είναι θετικό (λειτουργία ανορθωτή) τότε ο πυκνωτής αποφορτίζεται και το σήμα σφάλματος ζητά από το κέντρο ελέγχου περισσότερη ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος. Το κέντρο παίρνει την ισχύ δίνοντας σήμα παλμού έναυσης στα ημιαγωγά στοιχεία. Όταν το ρεύμα  $I_D$  είναι αρνητικό (λειτουργία μετατροπέα) ο πυκνωτής είναι υπερφορτισμένος και το σήμα σφάλματος αιτείται στο κέντρο ελέγχου την αποφόρτιση του πυκνωτή και επιστρέφει το ρεύμα στο δίκτυο. Η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM) μπορεί να διαχειριστεί την πραγματική και άεργο ισχύ καθώς αυτή η τεχνική δίνει την δυνατότητα της διόρθωσης του συντελεστή ισχύος. Επιπλέον οι εναλλασσόμενες κυματομορφές διατηρούνται σχεδόν ημιτονοειδείς βοηθώντας έτσι στην εξομάλυνση των αρμονικών ταλαντώσεων. Η διαμόρφωση εύρους παλμού είναι η αιτία της έναυσης και σβέσης των θυρίστορ σύμφωνα με κάποιο πρότυπο. Αυτό το πρότυπο μπορεί να είναι μια ημιτονοειδής κυματομορφή τάσεως ή ρεύματος. Η διαμόρφωση εύρους παλμού όπως αυτή διαμορφώνεται στο Σχήμα 5.06 είναι μια περιοδική κυματομορφή η θεμελιώδης είναι μια τάση με την ίδια συχνότητα με αυτή του προτύπου.



Σχήμα 5.06 PWM πρότυπο και η θεμελιώδεις κυματομορφή  $V_{mod}$  [41]

Η κυματομορφή PWM είναι περιοδική όπου η θεμελιώδης κυματομορφή τάσης ίδιας συχνότητας με αυτή του προτύπου. Το πλάτος της θεμελιώδους κυματομορφή  $V_{MOD}$  είναι ανάλογη του πλάτους του προτύπου. Για να λειτουργήσει σωστά ο ανορθωτής η κυματομορφή PWM πρέπει να δημιουργήσει μία αρχική κυματομορφή ίδιας συχνότητας με την πηγή. Αλλάζοντας το πλάτος αυτής της θεμελιώδους κυματομορφής και με τη μετατόπιση φάσης του σε σχέση με το δίκτυο, ο ανορθωτής μπορεί να ελεγχθεί ώστε να λειτουργεί στα τέσσερα τεταρτημόρια. Αλλάζοντας την διαμόρφωση όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.07 τροποποιείται το πλάτος της κυματομορφής  $V_{MOD}$ . Με την μετατόπιση της PWM γίνεται αλλαγή φάσης.

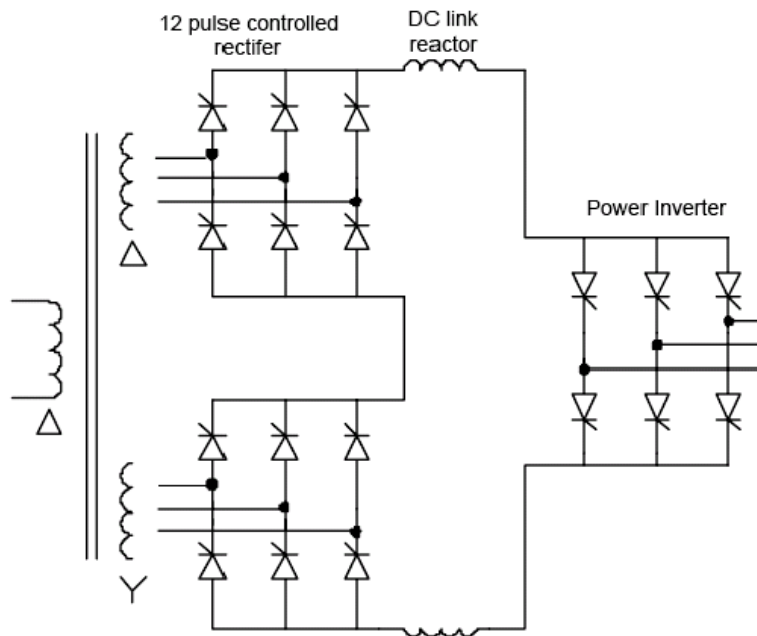


Σχήμα 5.07 Αλλαγή της κυματομορφής  $V_{MOD}$  μέσω του προτύπου PWM [41]

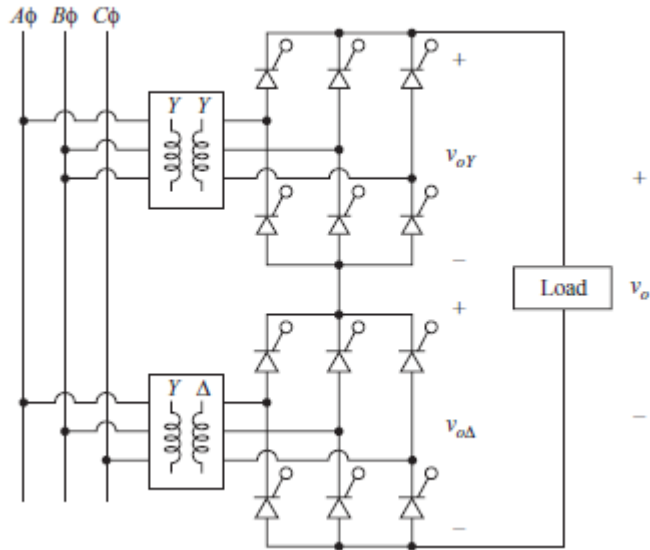
### 5.1.2 Τριφασική Γέφυρα Ανορθωτών 12 παλμών

Κατασκευαστικά ένας ανορθωτής 6 παλμών χρησιμοποιείται σε διάφορα βιομηχανικά πεδία ένα εξ' αυτών είναι και η ναυτιλία . Η γέφυρα ανορθωτών 6 παλμών έχει αναφερθεί παραπάνω ως κύριο παράδειγμα σε διάφορες κατασκευαστικές φιλοσοφίες ημικύματος ή πλήρους ανόρθωσης . Παρακάτω θα δοθεί ένα μοντέλο ανορθωτή 12 παλμών σε παράλληλη σύνδεση , καθώς και αυτή η κατασκευαστική φιλοσοφία εμφανίζεται στην ηλεκτροπρόωση.

Ο τριφασικός ανορθωτής γέφυρας έξι παλμών παρουσιάζει αξιοσημείωτη βελτίωση στην ποιότητα της εξόδου συνεχούς ρεύματος σε σχέση με αυτή του μονοφασικού ανορθωτή. Οι αρμονικές της τάσης εξόδου είναι μικρές και σε συχνότητες που είναι εξαπλάσιες της συχνότητας της πηγής. Με σκοπό την μείωση στην έξοδο των αρμονικών χρησιμοποιούνται δύο γέφυρες 6 παλμών , αυτή η διάταξη ονομάζεται μετατροπέας 12 παλμών . Η τροφοδοσία των δύο ανορθωτών μπορεί να επιτευχθεί μέσω μετασχηματιστή ή μετασχηματιστές που θα δώσουν την δυνατότητα να υπάρξει γωνιακή διαφορά  $30^\circ$  στις φάσεις των δύο ανορθωτών. Για να επιτευχθεί αυτή η γωνιακή διαφορά χρειάζεται τα δευτερεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών που τροφοδοτούν τους ανορθωτές να είναι διαφορετικής συνδεσμολογίας μεταξύ τους , έτσι επιτυγχάνεται η μετατόπιση των  $30^\circ$  [42] (Σχήμα 5.08 , Σχήμα 5.09)



Σχήμα 5.08 Συνδεσμολογία τριφασικού ανορθωτή με μετασχηματιστή διπλού τυλίγματος [43]



Σχήμα 5.09 Συνδεσμολογία τριφασικού ανορθωτή με μετασχηματιστές διαφορετικής συνδεσμολογίας στο δευτερεύον τύλιγμα.

Το ρεύμα γραμμής είναι πιο κοντά σε ημιτονοειδή μορφή σε σχέση με άλλα ρεύματα γραμμής.

Επίσης και η στιγμιαία τάση συνεχούς είναι πιο ομαλή με αυτή την 12-παλμική διάταξη.

Οι έξοδοι των δύο ανορθωτών είναι ίδια απλά μετατοπισμένες κατά  $30^\circ$ .

Η ολική έξοδος όλων των ανορθωτών είναι:

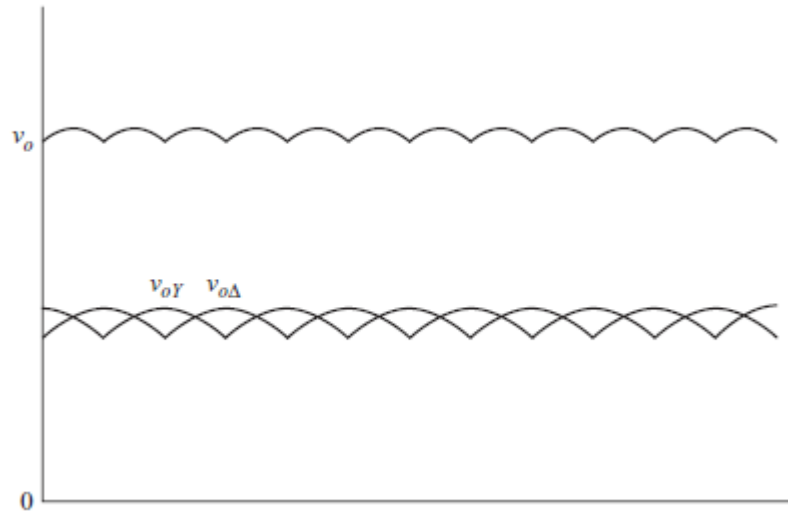
$$V_o = V_{o,Y} + V_{o,\Delta} = \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} \cos \alpha + \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} = \frac{6V_{m,L-L}}{\pi} \cos \alpha$$

Η μέγιστη τάση εξόδου του μετατροπέα 12 παλμών εμφανίζεται στη μέση μεταξύ των εναλλακτικών κορυφών των μετατροπέων 6 παλμών όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10 με γωνία καθυστέρησης  $\alpha=0$ . Τότε προκύπτει πως :

$$V_{o,peak} = 2V_{m,L-L} \cos(15^\circ) = 1,932 V_{m,L-L}$$

Δεδομένου ότι μια μετάβαση μεταξύ αγώγιμων θυρίστορ συμβαίνει κάθε  $30^\circ$ , υπάρχουν συνολικά 12 τέτοιες μεταβάσεις για κάθε περίοδο της πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος. Η έξοδος έχει αρμονικές συχνότητες που είναι πολλαπλάσιες των 12 φορές της συχνότητας πηγής ( $12k, k=1, 2, 3, \dots$ ). Το φιλτράρισμα για την παραγωγή μιας σχετικά καθαρής εξόδου DC είναι λιγότερο δαπανηρό από αυτό που απαιτείται για τον ανορθωτή 6 παλμών. Με την εφαρμογή μετατροπέα 12 παλμών επιτυγχάνονται μειωμένες αρμονικές. Το εναλλασσόμενο ρεύμα που τροφοδοτεί το τύλιγμα αστέρα και στο δευτερεύον του τυλίγματος αναδεικνύεται μέσα από ανάλυση Fourier.

$$i_Y(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_0 \left( \cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos \omega t - \dots \right)$$



Σχήμα 5.10 Τάση εξόδου με μηδενική γωνιακή καθυστέρηση

Το αντίστοιχο εναλλασσόμενο ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα του τριγώνου μέσω Fourier απεικονίζεται μαθηματικά ως:

$$i_{\Delta}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_0 \left( \cos \omega_0 t + \frac{1}{5} \cos 5\omega_0 t - \frac{1}{7} \cos 7\omega_0 t - \frac{1}{11} \cos 11\omega_0 t + \frac{1}{13} \cos \omega_0 t - \dots \right)$$

Το ρεύμα στις γραμμές τροφοδοσίας του μετασχηματιστή όπως στο Σχήμα 4.09 αναλύεται μέσω Fourier ως :

$$\begin{aligned} i_{ac}(t) &= i_Y(t) + i_{\Delta}(t) \\ &= \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_0 \left( \cos \omega_0 t - \frac{1}{11} \cos 11\omega_0 t + \frac{1}{13} \cos \omega_0 t - \dots \right) \end{aligned}$$

Έτσι, μερικές από τις αρμονικές στην πλευρά εναλλασσόμενου ρεύματος ακυρώνονται χρησιμοποιώντας το σχήμα 12 παλμών αντί του σχήματος 6 παλμών. Οι αρμονικές παραμένουν σε ένα εναλλασσόμενο σύστημα  $12k \pm 1$ . Οι ακύρωση των αρμονικών  $6(2n-1) \pm 1$  οφείλεται στον μετασχηματιστή και στην λειτουργία του μετατροπέα.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω μπορεί να δοθεί η δυνατότητα για αύξηση των αριθμών σε παλμούς προσθέτοντας περισσότερους ανορθωτές 6 παλμών και με την βοήθεια μετασχηματιστών με κατάλληλες φάσης μετατόπισης. Οι χαρακτηριστικές εναλλασσόμενες αρμονικές ενός αριθμού παλμών ο μετατροπέας θα είναι :

$$Pk \pm 1, k=1,2,3\dots$$

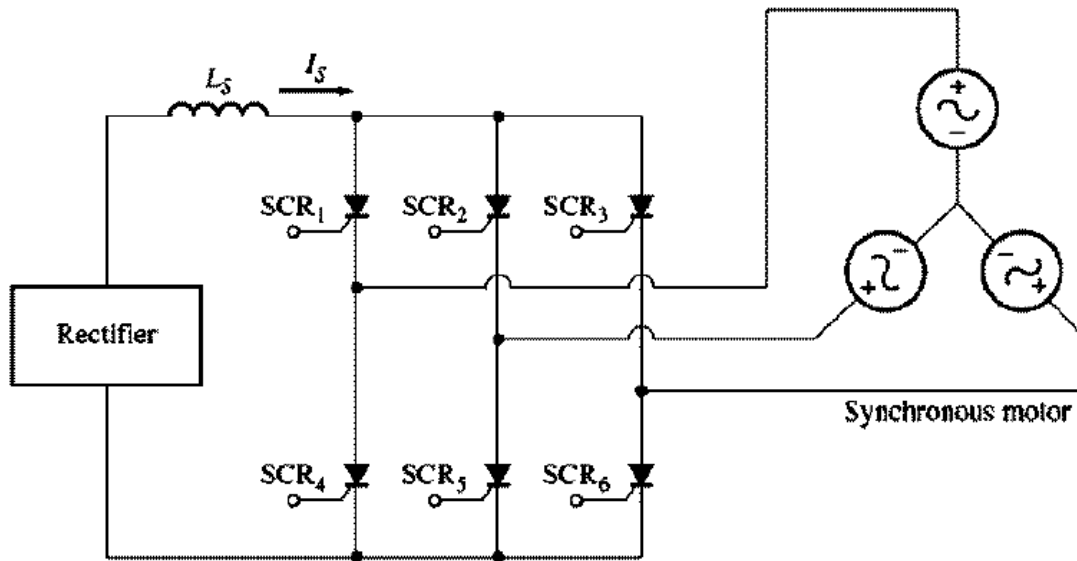
Οι μετατροπείς ισχύος έχουν πρακτικούς περιορισμούς στους 12 παλμούς εξαιτίας του κόστους παραγωγής των μετασχηματιστών υψηλών τάσεων με τις κατάλληλες φασικές μετατοπίσεις. Ωστόσο, συστήματα χαμηλών τάσεων χρησιμοποιούν μετατροπείς 48 παλμών.

## 5.2 Αντιστροφείς Εξωτερικής Μετάβασης

Εναλλακτική ονομασία είναι και ο αντιστροφέας με μετάβαση από το φορτίο (load commutated inverter-LCI) ή Συγχρομετατροπείς (Synchro-converters). Η συγκεκριμένη κατηγορία αποτελεί ειδική κατηγορία μετατροπέα πηγής ρεύματος (CSI). Οι φυσική μετάβαση των θυρίστορ επιτυγχάνεται με σύγχρονες μηχανές σε ταχύτητες άνω του 10%. Η φυσική μεταγωγή επάγεται σαν αποτέλεσμα της ηλεκτρεγερτικής δύναμης ΗΕΔ ( Electromotive Force-EMF) των κινητήρων για αυτό και αποκαλείται εναλλακτικά αντιστροφέας με μετάβαση από το φορτίο (LCI). Σε χαμηλές ταχύτητες η τάση του κινητήρα είναι πολύ χαμηλή για να προχωρήσει στην μετάβαση του μετατροπέα, για αυτό στους αντιστροφείς εξωτερική μετάβασης όπου χρησιμοποιούνται θυρίστορ SCR χρειάζεται εξωτερική πηγή ισχύος ή εξωτερικός κινητήρας για την αποκοπή των θυρίστορ, δεν απαιτούνται επιπλέον βοηθητικά κυκλώματα σβέσεως. Η μονάδα LCI καλύπτει μεγαλύτερο εύρος στροφών (έως 10.000 σ.α.λ.) με ισχύ έως 100 MW. Προσφέρει ροπή πλήρους φορτίου σε όλο το εύρος στροφών με μέτρια δυναμική απόδοση. Ο ελεύθερος σχεδιασμός κινητήρα (τόσο επαγωγικός όσο και σύγχρονος) έχει αυξήσει τη δημοτικότητα αυτών των ηλεκτροκινητήρων. Η μονάδα LCI έχει περιορισμένη απόδοση σε χαμηλές ταχύτητες. Υποφέρει επίσης από παλμούς ροπής 6 και 12 φορές μεγαλύτερους από την συχνότητα του κινητήρα. Οι κρίσιμες ταχύτητες μπορούν να διεγείρουν τον μηχανικό συντονισμό.

Ο αντιστροφέας όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.11 χρειάζεται σύνδεση με ένα τριφασικό σύγχρονο κινητήρα για να προσφέρει αντίστροφη τάση για την αποκοπή του SCR την ώρα που δέχεται παλμό έναυσης το επόμενο SCR για την συνέχιση της αλληλουχίας. Τα θυρίστορ έχουν μία συγκεκριμένη σειρά σκανδαλισμού δέχονται με σειρά έναν παλμό έναυσης ξεκινώντας από το SCR1, SCR6, SCR2, SCR4, SCR3, SCR5. Η τάση του σύγχρονου κινητήρα είναι και η τάση αποκοπής του SCR. Για παράδειγμα όταν το SCR1 δέχεται παλμό έναυσης τότε η τάση του κινητήρα θα τροφοδοτήσει την τάση αποκοπής του SCR3. Δείγμα αυτή της πολύπλοκης διαδικασίας αποτελεί το γεγονός πως εάν δεν υπήρχε συνδεδεμένο φορτίο δεν θα υπήρχε και τάση αποκοπής για κάποιο από τα SCR οπότε δεν θα αποκόπτονταν και θα δημιουργούντα βραχυκύκλωμα στα SCR1, SCR4.





Σχήμα 5.11 Τυπική διάταξη αντιστροφής με εξωτερική μετάβαση

### 5.3 Αντιστροφείς Αυτομετάβασης

Οι αντιστροφείς αυτομετάβασης χρησιμοποιούνται όταν δεν υπάρχει αντίστροφη τάση όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα για να γίνει δυνατή η αλληλουχία αποκοπής των θυρίστορ. Στην περίπτωση των αντιστροφέων αυτομετάβασης η τάση αυτή βρίσκεται μέσα από πυκνωτές για να πραγματοποιηθεί η αποκοπή των ενεργών SCR, όταν το επόμενο SCR είναι έτοιμο να άγει. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην θέση των SCR ημιαγωγοί GTO ή PTR χωρίς την χρήση πυκνωτών μετάβασης.

Οι αντιστροφείς μετάβασης διακρίνονται σε :

- Αντιστροφείς Πηγών Ρεύματος (Current Source Inverter)
- Αντιστροφείς Πηγών Τάσης (Voltage Source Inverter)
- Αντιστροφείς διαμόρφωσης εύρους παλμού (Pulse Width Modulation)

Οι κατασκευαστικές φιλοσοφίες (Πίνακας 5.01) αντιστροφέων πηγών ρεύματος και τάσης είναι πιο διαδεδομένοι και πιο απλοί στην κατασκευή τους σε σχέση με την αρχιτεκτονική των αντιστροφέων διαμόρφωσης εύρους παλμού. Οι αντιστροφείς διαμόρφωσης παλμού απαιτούν κυκλώματα ελέγχου πολύπλοκα με γρηγορότερες διακοπτικές ικανότητες. Ο έλεγχος των συχνοτήτων των αντιστροφέων

πηγών ρεύματος και τάσης επιτυγχάνεται με τον έλεγχο των παλμών έναυσης στις πύλες των θυρίστορ SCR . Αυτό το χαρακτηριστικό είναι που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής κινητήρων εναλτασομένου ρεύματος.

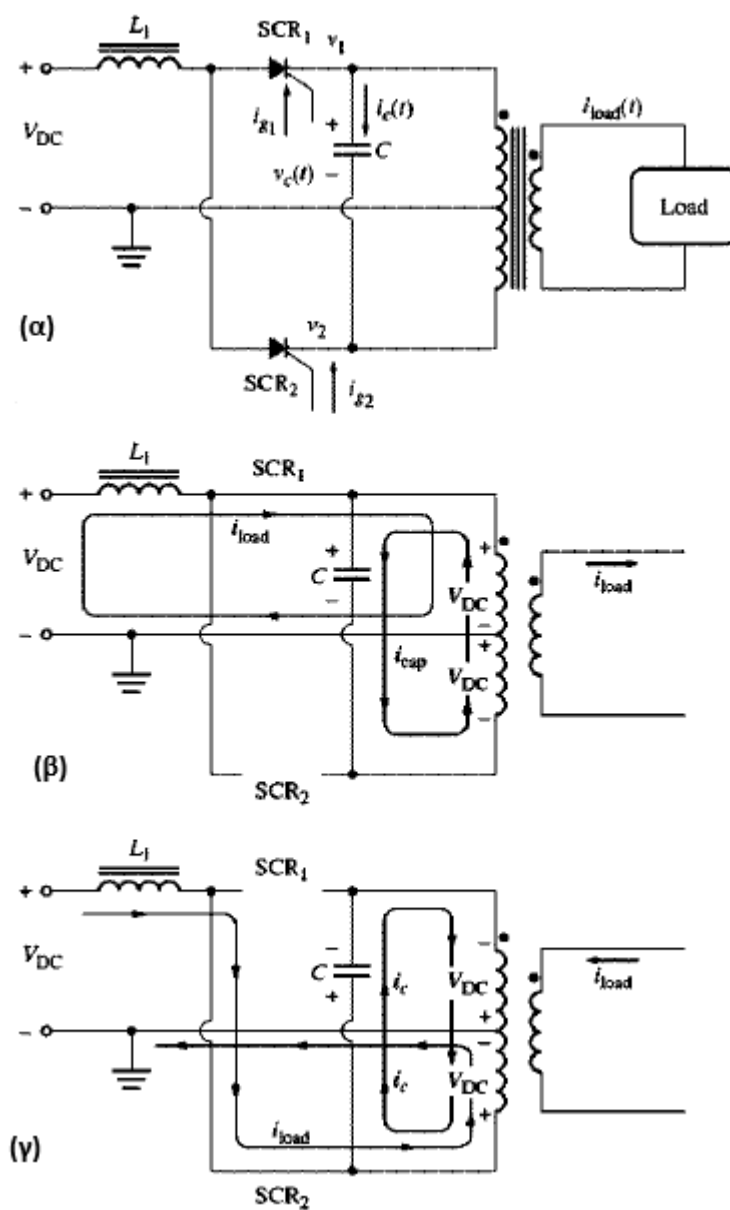
### 5.3.1 Αντιστροφείας Πηγής Ρεύματος-CSI

Στους συγκεκριμένους αντιστροφείς η πλευρά του ανορθωτή συνδέεται με τον αντιστροφέα σε σειρά μέσω πηνίου Ls. Οι τιμές αυτεπαγωγής είναι αρκετά μεγάλες και οδηγεί το συνεχές ρεύμα εξόδου του ανορθωτή σε σχεδόν σταθερές τιμές . Το ρεύμα εξόδου των θυρίστορ SCR είναι σε μορφή τετραγωνική κυματομορφή γιατί παρουσιάζεται το ρεύμα Is σταθερό στις περισσότερες καταστάσεις και συνθήκες και η τάση της γραμμής τριγωνική. Χαρακτηριστικά γνωρίσματα της κατασκευαστικής φιλοσοφίας είναι το μεγάλος εύρος τιμών που παίρνει η τάση εξόδου αναλογικά με τις μεταβολές του φορτίου αλλά και ο έλεγχος των υπερεντάσεων .

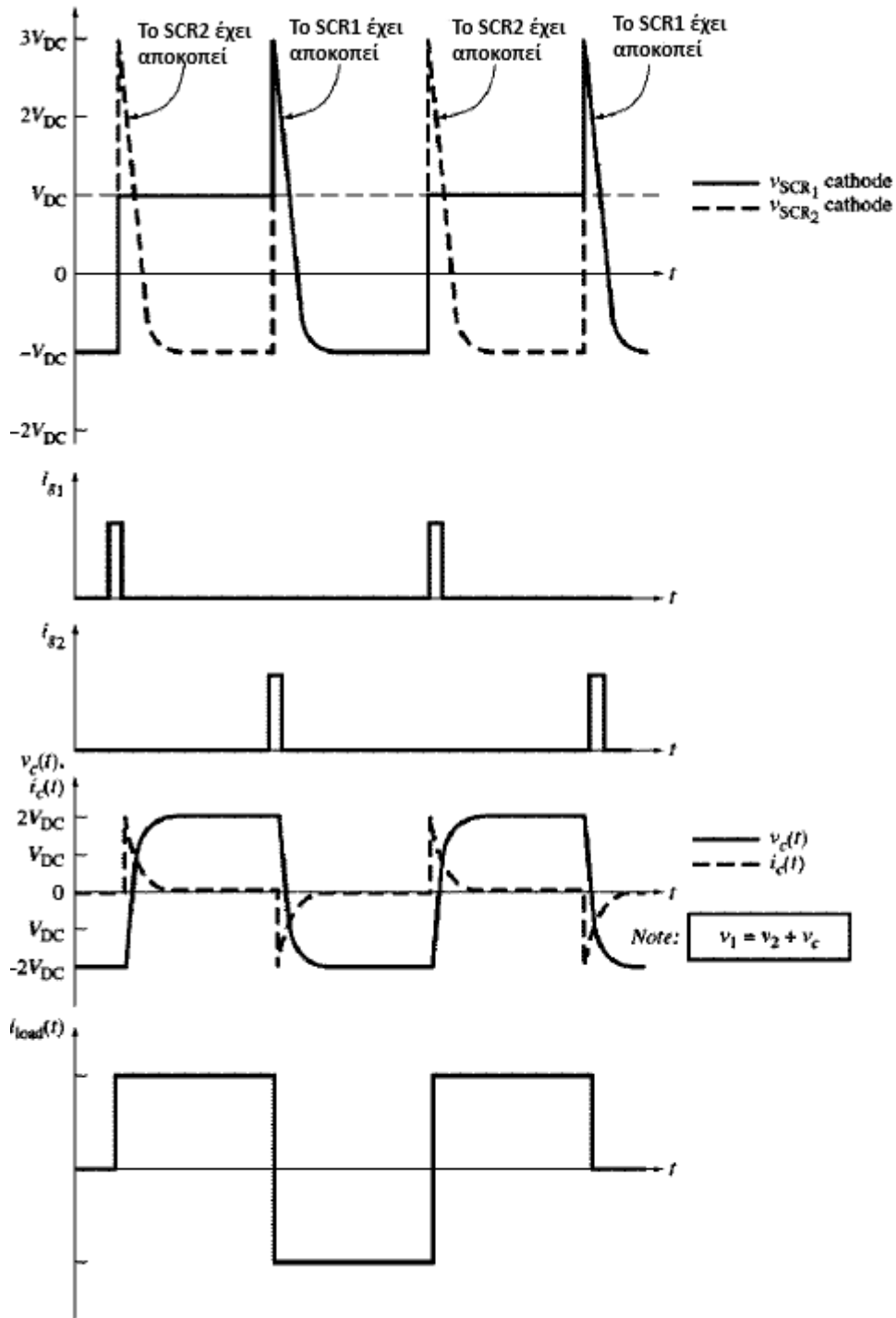
#### 5.3.1.1 Αντιστροφείας Μονοφασικής Πηγής Ρεύματος

Στους αντιστροφείς μονοφασικής πηγής ρεύματος διαθέτουν δύο θυρίστορ SCR έναν πυκνωτή μετάβασης και ένα μετασχηματιστή (Σχήμα 5.12). Όταν εφαρμοστεί στην πύλη του SCR1 ρεύμα ώστε να αρχίσει να άγει τότε αυτόματα θα υπάρξει τάση Vdc και στα άκρα του μετασχηματιστή στο πάνω μέρος. Στην συνέχεια λόγω αυτής της τάσης στο πάνω μέρος επάγεται τάση και στο κάτω μέρος του μετασχηματιστή και τάση ίση στα άκρα του πυκνωτή τιμής ίση με 2Vdc. Τα ρεύματα και οι τάσεις που επικρατούν παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.12 (β).

Εάν άγει το θυρίστορ SCR2 τότε η τάση στην κάθοδο του θυρίστορ γίνεται Vdc. Το SCR σβήνει καθώς η τάση στα άκρα του πυκνωτή δεν μεταβάλλεται άμεσα και η τάση στο άνω μέρος του γίνεται 3Vdc . Η τάση του μετασχηματιστή στο κάτω μέρος γίνεται αρνητική στο πάνω άκρο και θετική στο κάτω με τιμή τάσης Vdc. Η τάση που επάγεται στο κάτω μισό του μετασχηματιστή επάγει τέτοια στο άνω μισό με αποτέλεσμα ο πυκνωτής να φορτίζεται έως και 2Vdc . Η πολικότητα είναι τέτοια που παρουσιάζεται θετική στο κάτω άκρο (Σχήμα 5.12 (γ)). Όταν επαναληφθεί η ίδια αλληλουχία με παλμό έναυσης στο SCR1 τότε αποκόπτεται ο SCR2 λόγω της τάσης του πυκνωτή . Στο σχήμα 5.13 απεικονίζονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος όπως αυτές αναπτύσσονται κατά την εναλλαγή των καταστάσεων.



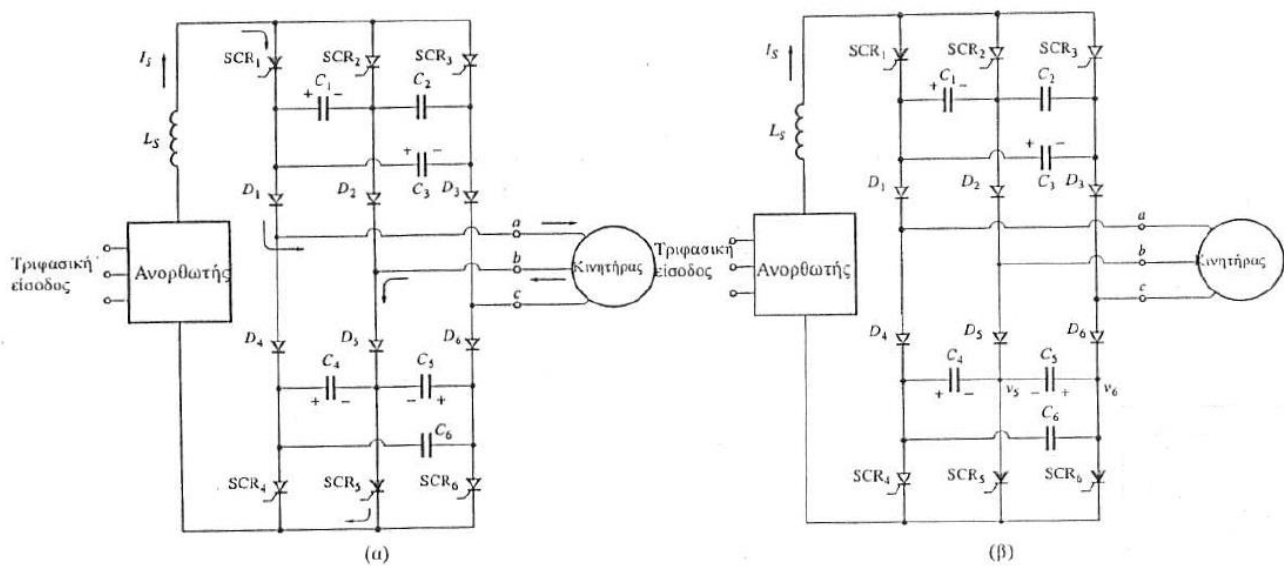
Σχήμα 5.12 (α) διάταξη μονοφασικού κυκλώματος αντιστροφέα (β) ρεύματα και τάσεις μετά το πέρας της έναυσης στο SCR<sub>1</sub> (γ) ρεύματα και τάσεις μετά το πέρας της έναυσης του SCR<sub>2</sub>



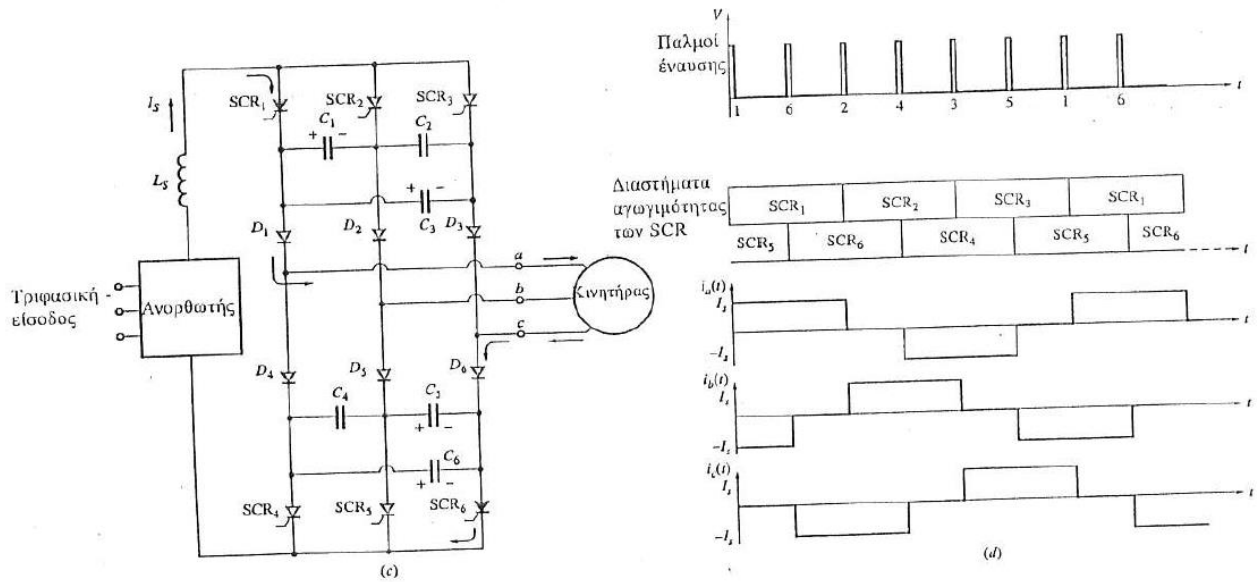
Σχήμα 5.13 Κυματομορφές ρευμάτων και τάσεων στον αντιστροφέα όταν εφαρμόζονται διαδοχικά τάσεις στις καθόδους SCR1 και SCR2 .Το iLoad τροφοδοτεί με ρεύμα το φορτίο του αντιστροφέα.

### 5.3.1.2 Αντιστροφέας Τριφασικής Πηγής Ρεύματος

Στο Σχήμα 5.14 απεικονίζεται τριφασικός αντιστροφέας τριφασικής πηγής ρεύματος όπου τα έξι θυρίστορ SCR σκανδαλίζονται δέχοντας αντίστοιχους παλμούς στην πύλη με την εξής σειρά  $SCR_1, SCR_6, SCR_2, SCR_4, SCR_3, SCR_5$ . Στο κύκλωμα υπάρχουν πυκνωτές  $C_1-C_6$  και οποίοι βοηθούν στην αποκοπή των ενεργών SCR. Στο Σχήμα 5.14 (α) οι πυκνωτές αναπτύσσουν τάση στα άκρα τους. Σε κάποια χρονική στιγμή το  $SCR_6$  δέχεται παλμό έναυσης ώστε να άγει, η τάση στον κόμβο  $V_6$  (Σχήμα 5.14 β) μηδενίζεται. Η τάση στον πυκνωτή  $C_5$  δεν μπορεί να μεταβληθεί άμεσα τότε χρειάζεται η άνοδος του  $SCR_5$  να πολωθεί αρνητικά και να αποκοπεί. Κατά την περίοδο που το  $SCR_6$  αρχίζει να άγει οι πυκνωτές φορτίζονται (Σχήμα 5.15 γ). Το  $SCR_6$  θα αποκόψει όταν το  $SCR_4$  σκανδαλιστεί. Με τον ίδιο τρόπο και αλληλουχία ενεργειών πραγματοποιείται και στην πάνω συστοιχία θυρίστορ και πυκνωτών. Στο Σχήμα 5.15 (δ) υπάρχουν τα φασικά ρεύματα και παλμοί έναυση όπως αυτά διαμορφώνονται κατά την λειτουργία.



Σχήμα 5.14 Τριφασικός αντιστροφέας CSI



Σχήμα 5.15 Τριφασικός αντιστροφέας CSI

### 5.3.2 Αντιστροφέας Πηγής Τάσης – VSI

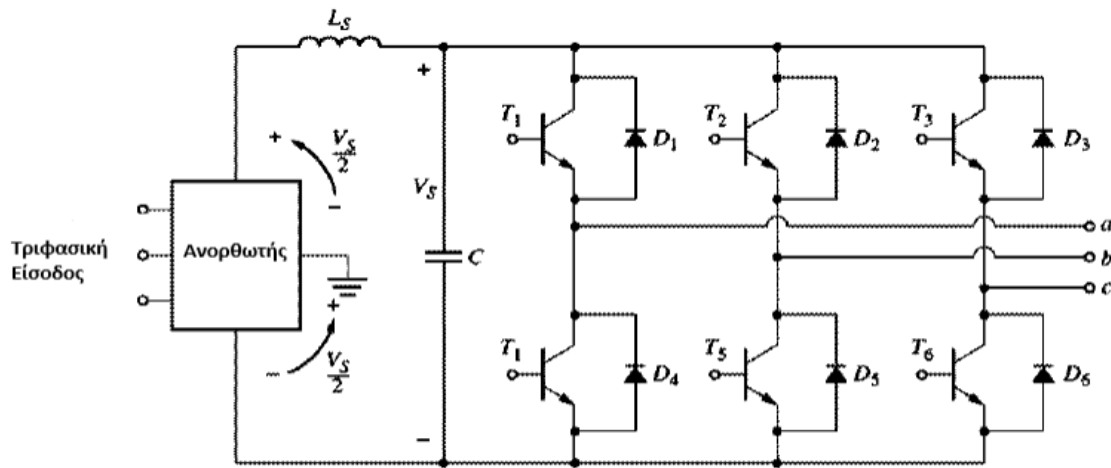
Στην σύνδεση ανορθωτή αντιστροφέα μεσολαβεί η συνδεσμολογία σε σειρά ενός πηνίου  $L_s$  και πυκνωτή  $C$  παράλληλα. Η χωρητική δυνατότητα του πυκνωτή χρειάζεται να είναι μεγάλη για να προσφέρει σταθερές τιμές τάσης. Το ρεύμα εξόδου είναι τριγωνικό κατά προσέγγιση και η κυματομορφή εξόδου των SCR θα είναι τετραγωνική καθώς η τάση  $V_c$  που εφαρμόζεται είναι σταθερή. Με αυτή την αρχιτεκτονική σχεδίαση οι μεταβολές στην τάση εξόδου είναι μικρές με την χρήση του πυκνωτή και οι τιμές των ρευμάτων μεταβάλλονται σε μεγάλο βαθμό με τις μεταβολές του φορτίου και ο περιορισμός αυτών δύσκολος λόγω του πυκνωτή.

	Αντιστροφέας πηγής ρεύματος	Αντιστροφέας πηγής τάσης
Δομή του κυρίως κυκλώματος	<p>Ανορθωτής      Αντιστροφέας</p>	<p>Ανορθωτής      Αντιστροφέας</p>
Είδος της πηγής	Πηγή ρεύματος - $I_s$ σχεδόν σταθερό	Πηγή τάσης - $V_s$ σχεδόν σταθερή
Σύνθετη αντίσταση εξόδου	Μεγάλη	Μικρή
Κυματομορφή εξόδου	<p>Τάση γραμμής </p> <p>Ρεύμα </p> <p>(120° αγωγιμότητα)</p>	<p>Τάση γραμμής </p> <p>(180° αγωγιμότητα)</p> <p>Ρεύμα </p>
Χαρακτηριστικά	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ευκολία στον έλεγχο των υπερρενμάτων μ' αυτή τη σχεδίαση</li> <li>2. Η τάση εξόδου μεταβάλλεται σημαντικά με τις αλλαγές του φορτίου</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Δύσκολος ο περιορισμός των ρευμάτων λόγω του πυκνωτή.</li> <li>2. Οι μεταβολές της τάσης εξόδου είναι μικρές λόγω του πυκνωτή.</li> </ol>

Πίνακας 5.01 Χαρακτηριστικά αντιστροφέων πηγής τάσης και πηγής ρεύματος

### 5.3.2.1 Αντιστροφέας Τριφασικής Πηγής Τάσης

Στην διάταξη όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16 ο αντιστροφέας χρησιμοποιεί τρανζίστορ ισχύος (Power Transistor). Τα PTR έχουν την δυνατότητα της αυτομετάβασης, δεν παρουσιάζονται εξαρτήματα τέτοια για μετάβαση. Η σειρά με την οποία δέχονται παλμό τα τρανζίστορ T1, T6, T2, T4, T3.

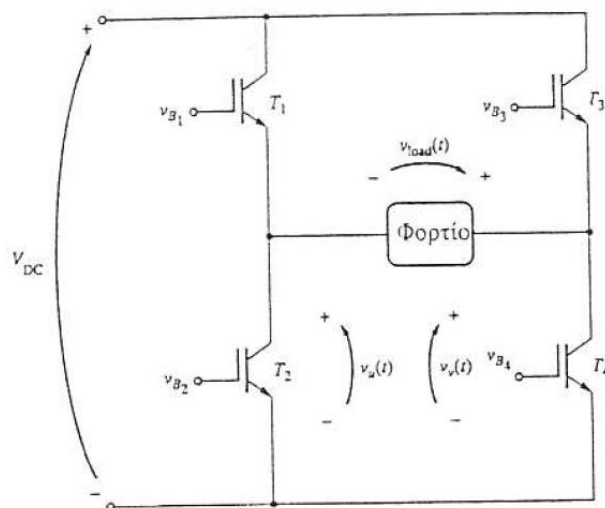


Σχήμα 5.16 Τριφασικός αντιστροφείας πηγής τάσης με PTR

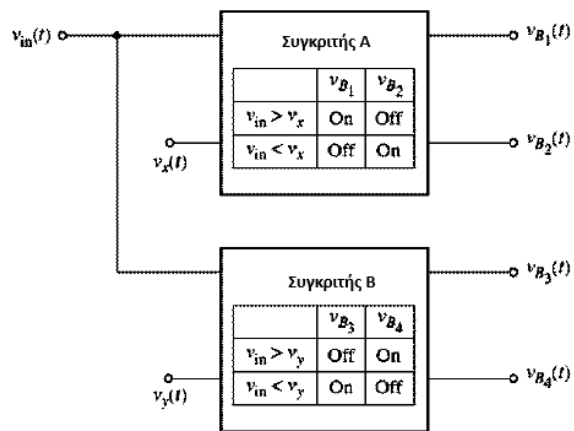
### 5.3.3 Αντιστροφείς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμού-PWM

Η μέθοδος διαμόρφωσης εύρους παλμού (pulse width modulation ) χρησιμοποιεί τον έλεγχο της διάρκειας των παλμών μιας παλμοσειράς οδηγούμενο από ένα μικρό σήμα ελέγχου. Εάν το πλάτος τάσης ελέγχου είναι μεγάλο κατά μεγαλύτερη αντιστοιχία θα είναι και το εύρος των παλμών που παράγονται. Για την οδήγηση των κινητήρων χρειάζεται , ημίτονο συγκεκριμένης συχνότητας στη θέση της τάση ελέγχου για την παραγωγή μιας κυματομορφής ισχύος όπου η μέση τιμή τάσης μεταβάλλεται ημιτονοειδώς. Στο Σχήμα 5.17 υπάρχει ένα κύκλωμα μονοφασικού αντιστροφεία διαμόρφωσης παλμού με την βοήθεια συγκριτών (Σχήμα 5.18) και των τάσεων αναφοράς (Σχήμα 5.19) στο διάγραμμα. Η τάση εισόδου ( $V_{in}$ ) και η τάση αναφοράς συγκρίνονται από του συγκριτές (comparators) και ανάλογα με το αποτέλεσμα δίνει παλμό έναυσης ή σβέσης στα τρανζίστορ. Η δουλειά του συγκριτή A είναι να συγκρίνει τις τιμές  $V_{in}(t)$  με  $V_x(t)$  και τα  $T_1, T_2$  λαμβάνοντας υπόψιν το αποτέλεσμα των συγκριτών για να οδηγήσει τα  $T_1$  και  $T_2$ . Την ίδια δουλειά έχει αναλάβει ο συγκριτής B με την σύγκριση των τιμών  $V_{in}(t)$  με  $V_y(t)$  και προβαίνει στον έλεγχο των  $T_3$  και  $T_4$ . Όταν η τιμή  $V_{in}(t)$  προκύπτει πως είναι μεγαλύτερη από την  $V_x(t)$  τότε ανεξάρτητα από τον χρόνο θα δώσει παλμό έναυσης στο  $T_1$  και ακολούθως παλμό σβέσης στο  $T_2$ . Σε άλλη περίπτωση τότε θα δώσει παλμό σβέσης στο  $T_1$  και παλμό έναυσης στο  $T_2$ . Με την ίδια φιλοσοφία αν η  $V_{in}(t)$  βρεθεί να είναι μεγαλύτερη από  $V_y(t)$  τότε ο συγκριτής B θα δώσει παλμό έναυσης στο  $T_3$  και σβέσης στο  $T_4$  όταν όμως η τιμή  $V_y(t)$  είναι μεγαλύτερη από  $V_{in}(t)$  τότε θα δοθεί παλμός σβέσης για το  $T_3$  και έναυσης για το  $T_4$ .

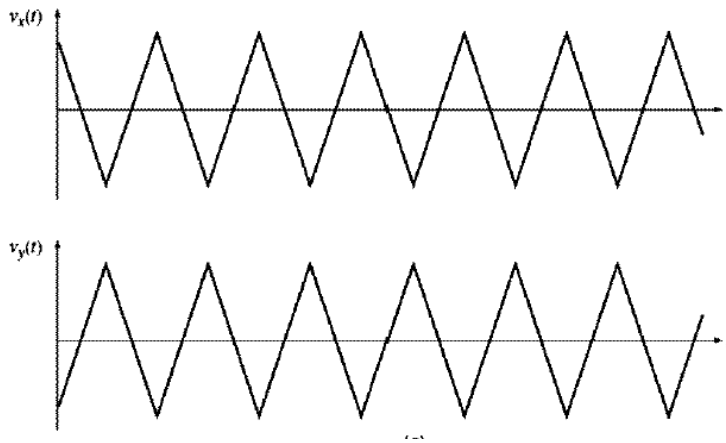




Σχήμα 5.17 Μονοφασικός Αντιστροφέας διαμόρφωσης εύρους παλμού με IGBT



Σχήμα 5.18 Συγκριτές για τον έλεγχο των τρανζίστορ



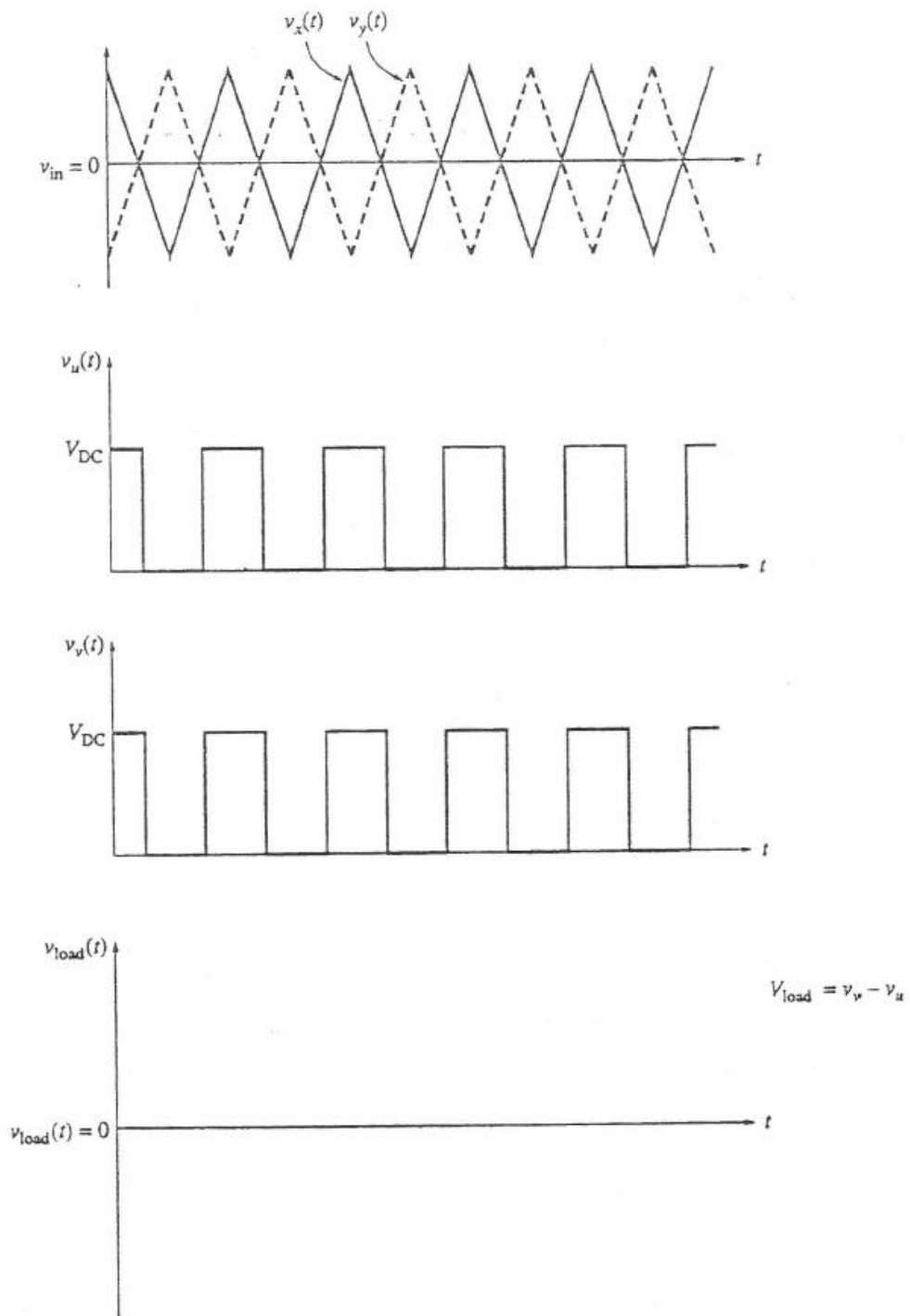
Σχήμα 5.19 Τάσεις αναφοράς

Στην περίπτωση που η τάση ελέγχου είναι 0V τότε οι τάσεις που θα προκύψουν είναι ίσες μεταξύ τους και η τιμή τάσης εξόδου  $V_{load}(t)$  είναι και αυτή μηδέν (Σχήμα 5.20).

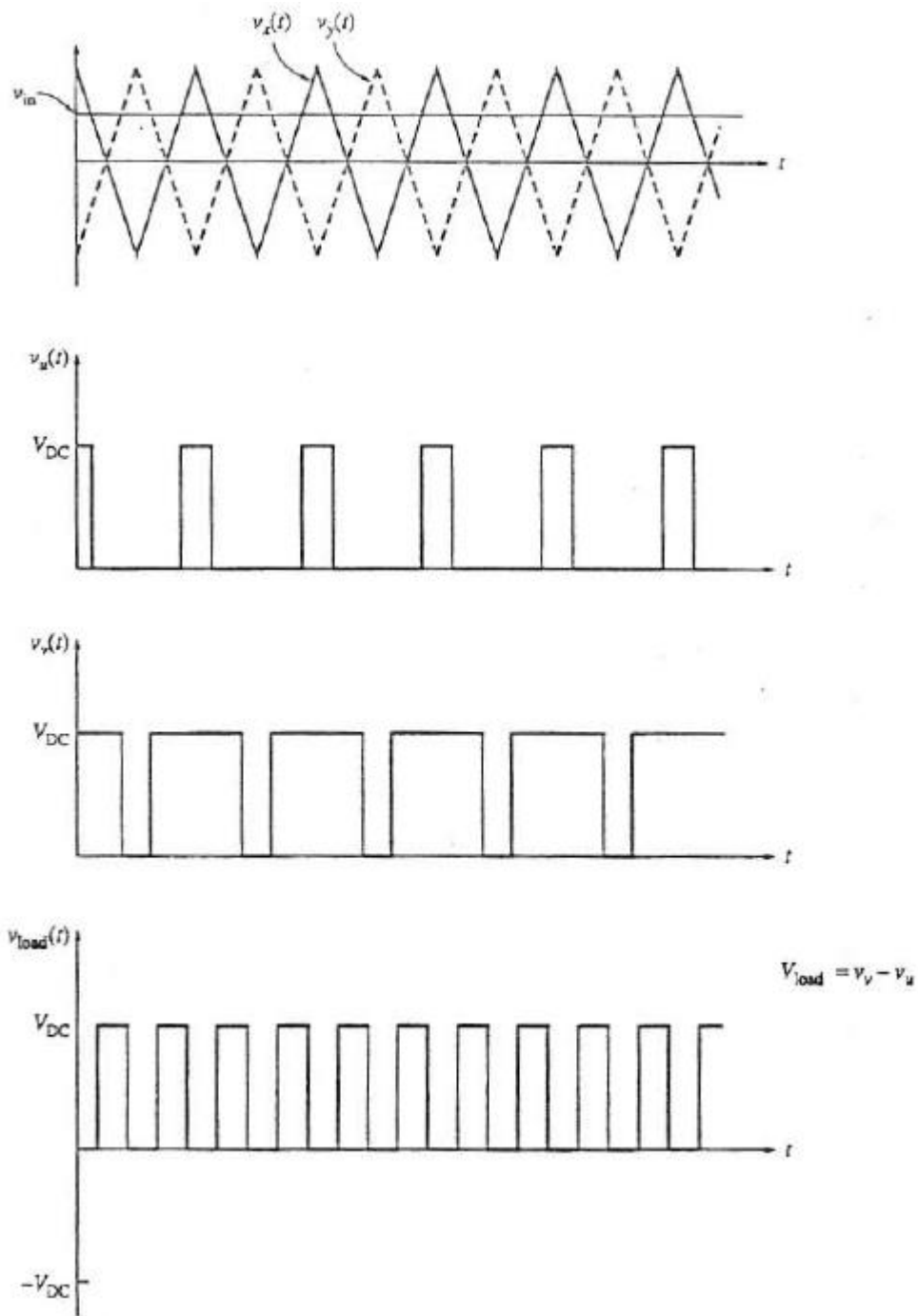
Εξετάζοντας την περίπτωση που η τιμές των τάσεων που τροφοδοτούν το κύκλωμα είναι θετική και σταθερή αλλά στο μισό της μέγιστης τιμής αναφοράς τότε η τάση εξόδου που θα προκύψει είναι παλμοσειρά με εύρος παλμών στο 50% (Σχήμα 5.21).

Όταν η τάση που εφαρμόζεται είναι ημιτονοειδής (Σχήμα 5.22) η διάρκεια της παλμοσειράς που παράγεται είναι και αυτή ημιτονοειδής. Προκύπτει λοιπόν μία κυματομορφή της οποίας η μέση τάση είναι ανάλογη της μέσης τιμής του σήματος ελέγχου στην ίδια περιοχή. Πρέπει να αναφερθεί πως και η συχνότητα είναι ίδια σε αυτό το κομμάτι δηλαδή η συχνότητα του σήματος ελέγχου είναι ίση με την βασική συχνότητα της κυματομορφής εξόδου. Στην τάση εξόδου υπάρχουν αρμονικές συνιστώσες οι οποίες μπορεί προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας του κινητήρα, για να αποφευχθεί κάτι τέτοιο συνίσταται είτε ένας κινητήρας σχεδιασμένος για τέτοιες συνθήκες είτε με τον υποβιβασμό (derating) στην ισχύ ενός απλού κινητήρα ώστε να λειτουργεί σε μικρότερη ισχύ από την ονομαστική του.

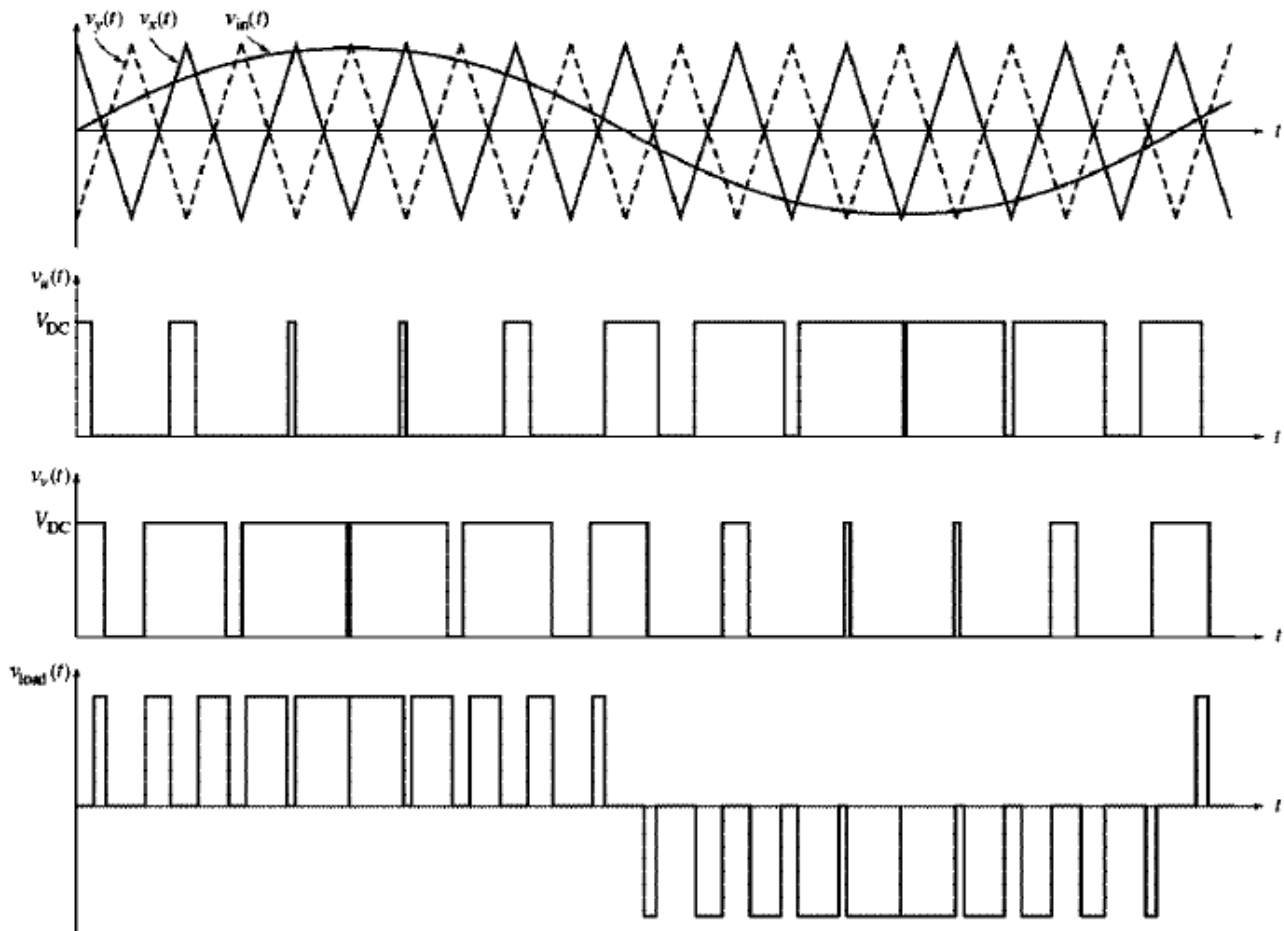
Ο έλεγχος της συχνότητας σε έναν αντιστροφέα PWM επιτυγχάνεται μέσω της μεταβολής της συχνότητας εισόδου. Ένας πλήρης τριφασικός αντιστροφέας διαμόρφωσης εύρους παλμού αποτελείται από τρεις μονοφασικούς αντιστροφείς και οι τάσεις ελέγχου είναι ημίτονα με διαφορά φάσης  $120^\circ$ .



Σχήμα 5.20 Παλμική έξοδος PWM όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου ίση με 0 V



Σχήμα 5.21 Παλμική έξοδος PWM όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου ίση με το μισό πλάτος του συγκριτή



Σχήμα 5.22 Ημιτονοειδής είσοδος και έξοδος PWM

Ως γνωστόν οι ημιαγωγοί χρειάζεται να μεταβαίνουν μεταξύ έναυσης και σβέσης πολλές φορές σε μία περίοδο κατά την παραγόμενη τάση εξόδου. Οι τάσεις αναφοράς μπορεί να φτάσουν και τα 12 kHz δηλαδή τα διακοπτικά στοιχεία αλλάζουν ως και 24000 φορές το δευτερόλεπτο. Τα διακοπτικά στοιχεία στον αναστροφέα PWM καλούνται να έχουν πολύ μεγάλη ταχύτητα μεταγωγής σε σύγκριση με τους κοινούς αντιστροφείς πηγών ρεύματος και τάσης. Σε έναν αντιστροφέα PWM τα διακοπτικά στοιχεία χρειάζεται να είναι υψηλής συχνότητας όπως IGBT , GTO , PTR.

Μικροεπεξεργαστές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της τάσης ελέγχου που με την σειρά τους τροφοδοτούν τα κυκλώματα των συγκριτών. Η τάση ελέγχου και κατ' επέκταση το εύρος των παλμών εξόδου ελέγχονται με την βοήθεια μικροεπεξεργαστή. Αυτή η τεχνολογία δίνει την δυνατότητα μετατροπής της τάση ελέγχου , με σκοπό την δημιουργία ζητούμενων τιμών συχνότητας και τάσης . Ο μικροεπεξεργαστής μπορεί μέσω αλλαγής σε παραμέτρους να χρησιμοποιεί ράμπες επιβράδυνσης και επιτάχυνσης καμπύλες τάση-συχνότητας .

## 5.4 Κυκλομετατροπείς

Βασικά, οι κυκλικοί μετατροπείς (Cyclo-Converters) είναι μετατροπείς εναλλασσόμενου ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα και χρησιμοποιούνται για τη μεταβολή της συχνότητας μιας παροχής σε μια επιθυμητή συχνότητα φορτίου. Πρόκειται για μετατροπείς συχνότητας με φυσική μεταγωγή, οι οποίοι χρησιμοποιούν θυρίστορ με φυσική μεταγωγή. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές υψηλής ισχύος έως και δεκάδες MW για τη μείωση της συχνότητας. Ορισμένες από τις εφαρμογές των κυκλικών μετατροπέων περιλαμβάνουν κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής ισχύος, συστήματα πρόωσης, επαγωγική θέρμανση υψηλής συχνότητας, σύγχρονους κινητήρες σε θαλάσσια και υποθαλάσσια οχήματα, ηλεκτρομαγνητικούς εκτοξευτές κ.λπ. Συγκρίνοντας τους κυκλομετατροπείς με άλλες διατάξεις όπως ανορθωτών-αντιστροφέων, σε αυτή την φιλοσοφία χρειάζονται αρκετά SCR με περίπλοκη συνδεσμολογία στα κυκλώματα έναυσης.

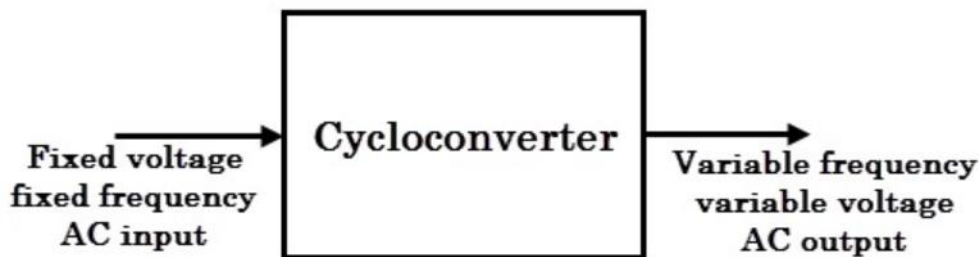
Σε θαλάσσιες εφαρμογές, έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο σύγχρονοι κινητήρες (κινητήρας AC με διέγερση DC) με κυκλομετατροπείς. Οι σύγχρονες μηχανές προτιμώνται από τους επαγωγικούς κινητήρες κλωβού (ασύγχρονα μηχανήματα) λόγω του μεγάλου διακένου αέρα τους προσδίδοντάς τους υψηλότερο βαθμό ευρωστίας. Το κύριο πλεονέκτημά του είναι η υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες με χαμηλούς παλμούς ροπής και εξαιρετική απόδοση δυναμικής απόκρισης:

- Εφαρμόζεται ως άμεση κίνηση με έλικα σε σύγχρονα παγοθραυστικά (πιθανή απελευθέρωση έλικα παγωμένη στον πάγο ή για να κόψετε ένα κομμάτι πάγου χωρίς να σταματήσει ο κινητήρας)
- σε εφαρμογές δυναμικής τοποθέτησης (Dynamic Positioning) και επιβατηγών πλοίων (όχι απαραίτητα) όπου η χαμηλή ταχύτητα / απόδοση ελιγμών είναι απαραίτητη [43]

Ο κυκλικός μετατροπέας είναι μια συσκευή που μετατρέπει την εναλλασσόμενη ισχύ ορισμένης συχνότητας σε εναλλασσόμενη ισχύ άλλης συχνότητας (συνήθως χαμηλότερης συχνότητας). Μετατρέπει τη συχνότητα χωρίς τη βοήθεια οποιουδήποτε ενδιάμεσου συνδέσμου συνεχούς ρεύματος. Υπάρχουν κυκλομετατροπείς μεταβλητής συχνότητας και σταθερής. Στην πρώτη περίπτωση η έξοδος του μετατροπέα έχει μεταβλητή συχνότητα και τάση από πηγή τροφοδοσίας με σταθερή τάση και συχνότητα ενώ στην δεύτερη περίπτωση ο μετατροπέας χρησιμοποιείται για να προσφέρει ισχύ κάποιας συχνότητας διαφορετική από την συχνότητα εισόδου. Η τάση εξόδου και η συχνότητα ενός κυκλομετατροπέα μπορούν να μεταβάλλονται συνεχώς και ανεξάρτητα με τη χρήση ενός κυκλώματος ελέγχου. Επομένως, σε αντίθεση με άλλους μετατροπείς, πρόκειται για μετατροπέα συχνότητας ενός σταδίου.

Η λειτουργία ενός κυκλομετατροπέα αποτελείται από πολύπλοκα στάδια αλλά η δομή του απλή. Γνωρίζοντας πως τροφοδοτείται από μία τριφασική είσοδο ίσες σε πλάτος και με φασική διαφορά  $120^\circ$  μεταξύ των τάσεων, ζητείται στην έξοδο του κυκλομετατροπέα κυματομορφή με ημίτονο διαφορετικής συχνότητας από αυτής της εισόδου. Ο κυκλομετατροπέας καλείται να αποδώσει στην έξοδο την ζητούμενη κυματομορφή συνδυάζοντας τις φάσεις εισόδου σε κατάλληλη χρονική στιγμή, έτσι ώστε να καλύπτει την ζητούμενη τάση εξόδου.

Οι κυκλικό μετατροπείς κατασκευάζονται με τη χρήση θυρίστορ με φυσική μεταγωγή και με εγγενή ικανότητα αμφίδρομης ροής ισχύος. Μπορεί να είναι μονοφασικοί σε μονοφασικούς, μονοφασικοί σε τριφασικούς και τριφασικοί σε τριφασικούς μετατροπείς. Έτσι, η υλοποίηση του κυκλώματος ελέγχου δεν είναι απλή, επειδή υπάρχει μεγάλος αριθμός SCR, συνήθως 4 ή 8 SCR για μονοφασική και 36 για τριφασική τροφοδοσία. Για τον εν λόγω ελεγκτή χρησιμοποιείται μικροελεγκτής ή μικροεπεξεργαστής ή DSP για την ενεργοποίηση των SCR. Βασικά, αυτοί χωρίζονται σε δύο κύριους τύπους και δίνονται παρακάτω.



Σχήμα 5.23 Γενική λειτουργία του κυκλομετατροπέα [44].

Ο μετατροπέας υποβιβασμού λειτουργεί σαν μετασχηματιστής υποβιβασμού που παρέχει συχνότητα εξόδου μικρότερη από εκείνη της εισόδου,  $f_o < f_i$ . Ενώ ο μετατροπέας ανύψωσης, παρέχει συχνότητα εξόδου μεγαλύτερη από εκείνη της εισόδου,  $f_o > f_i$ . Στην περίπτωση του κυκλικού μετατροπέα υποβιβασμού, η συχνότητα εξόδου περιορίζεται σε ένα κλάσμα της συχνότητας εισόδου, συνήθως κάτω από 20Hz σε περίπτωση συχνότητας τροφοδοσίας 50Hz. Στην περίπτωση αυτή, δεν απαιτούνται ξεχωριστά κυκλώματα μεταγωγής, καθώς οι SCR είναι συσκευές με μεταγωγή μέσω γραμμής. Στην περίπτωση όμως του κυκλικού μετατροπέα ανύψωσης, απαιτούνται κυκλώματα εξαναγκασμένης μεταγωγής για την απενεργοποίηση των SCR στην επιθυμητή συχνότητα. Αυτά τα κυκλώματα είναι σχετικά πολύ πολύπλοκα. Ως εκ τούτου, η πλειονότητα των κυκλομετατροπέων είναι τύπου υποβιβασμού που μειώνει τη συχνότητα σε σχέση με τη συχνότητα εισόδου. Τα κυκλώματα μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω στους ακόλουθους τύπους. Μονοφασικοί σε μονοφασικούς κυκλομετατροπείς, τριφασικοί σε μονοφασικούς κυκλομετατροπείς, τριφασικοί σε τριφασικούς κυκλομετατροπείς. Εκτός από τον έλεγχο συχνότητας, η τάση εξόδου του κυκλομετατροπέα μπορεί

να μεταβάλλεται με την εφαρμογή της τεχνικής ελέγχου φάσης. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος πολύ υψηλής ισχύος, χαμηλής ταχύτητας και σε συστήματα έλξης, ιδίως σε τριφασικά σε μονοφασικά συστήματα χαμηλής συχνότητας.

Οι κυκλομετατροπείς χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης χαμηλής συχνότητας. Η κύρια εφαρμογή αυτής της απαίτησης είναι το σύστημα ηλεκτρικής έλξης, όπου προτιμώνται χαμηλές συχνότητες, συνήθως 25 Hz ή 16 2/3 Hz. Σε τέτοια συστήματα, ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού ελέγχεται από κατάλληλο κύκλωμα κυκλομετατροπέα.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του κυκλικού μετατροπέα είναι ότι χρησιμοποιεί μια τεχνική γραμμικής μεταγωγής για την απενεργοποίηση των θυρίστορ, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη αναγκαστικής μεταγωγής. Και αυτοί είναι επίσης πιο αποδοτικοί από τους μετατροπείς DC link που απαιτούν δύο στάδια μετατροπής ισχύος. Αλλά, το σημαντικότερο πρόβλημα με τον κυκλικό μετατροπέα είναι ότι παράγει πολύ παραμορφωμένες κυματομορφές για υψηλότερες συχνότητες. Αυτό μπορεί να παράγει λογικά παραμορφωμένες, ημιτονοειδείς κυματομορφές μέχρι 16 2/3 Hz, πέρα από αυτή τη συχνότητα οι κυματομορφές δεν είναι πολύ καλές. Επίσης, ο συντελεστής ισχύος του συστήματος επηρεάζεται κατά τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος με τη χρήση κυκλομετατροπέα. Απαιτείται μεγάλος αριθμός θυρίστορ. Επιπλέον, αυτοί οι μετατροπείς είναι πιο δαπανηροί. Λόγω αυτών των λόγων, οι κυκλομετατροπείς έχουν περιορισμένες εφαρμογές. Σήμερα, οι περισσότεροι κυκλομετατροπείς αντικαθίστανται με μεταβλητές μονάδες οδήγησης συχνότητας.

Γενικότερα οι κυκλομετατροπείς διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες .Ο διαχωρισμός αυτός εξαρτάται από το αν το ρεύμα κυκλοφορεί στο εσωτερικό του κυκλώματος του μετατροπέα , έτσι οι κατηγορίες ονομάζονται :

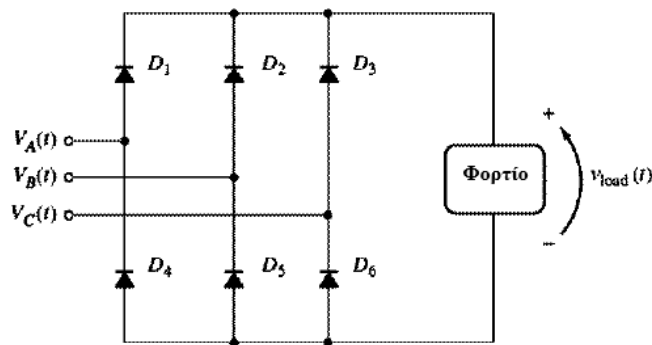
- Κυκλομετατροπείς χωρίς παρασιτικό ρεύμα (Blocking mode Cycloconverters)
- Κυκλομετατροπείς με παρασιτικό ρεύμα (Circulating Current Cycloconverters)

Πριν από αυτό θα γίνει μία επεξήγηση και αναφορά στις βασικές λειτουργίες του κυκλομετατροπέα.



### 5.4.1 Αρχές Λειτουργίας Κυκλομετατροπέα

Μελετώντας το κύκλωμα στο Σχήμα 5.24 παρατηρείται πως μία τριφασική γέφυρα πλήρους ανόρθωσης είναι συνδεδεμένο με ωμικό φορτίο. Στην συγκεκριμένη διάταξη υπάρχουν διόδοι όπου το άνω μέρος είναι συνδεδεμένο με το θετικό τμήμα και το κάτω μέρος με το αρνητικό. Στο θετικό μέρος η διόδος με την μεγαλύτερη τάση στα άκρα σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή θα άγει αλλά πολώνοντας αντίστροφα τις υπόλοιπες διόδους στο τμήμα. Από την άλλη στο αρνητικό τμήμα η διόδος που στην άκρα της θα επικρατεί η μικρότερη τάση για συγκεκριμένη χρονική στιγμή θα άγει πολώνοντας ανάποδα τις υπόλοιπες διόδους που ανήκουν και αυτές στο κάτω τμήμα. Η τάση που προκύπτει απεικονίζεται στο Σχήμα 5.25.

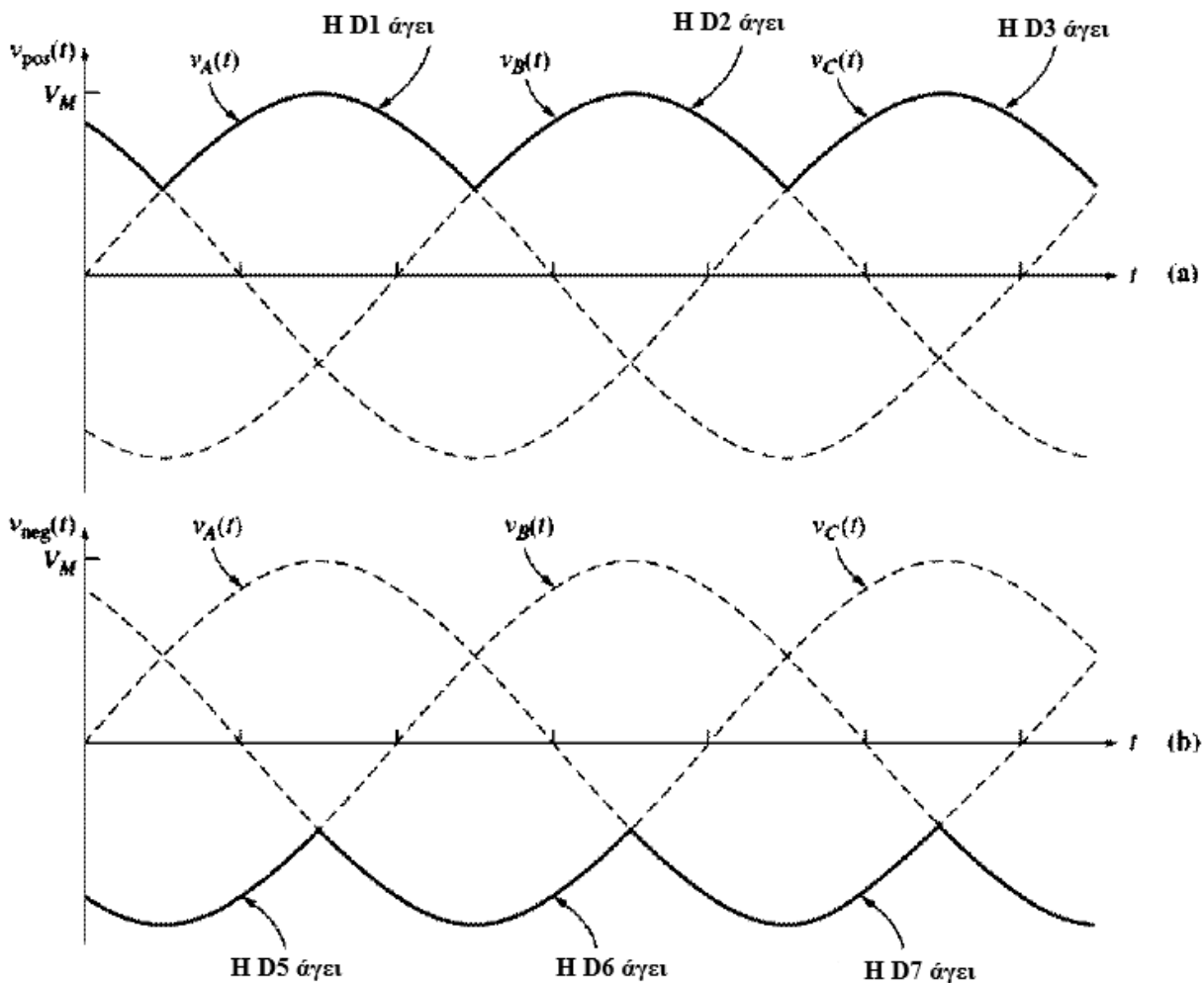


Σχήμα 5.24 Ωμικό φορτίο συνδεδεμένο με τριφασική γέφυρα πλήρους ανόρθωσης

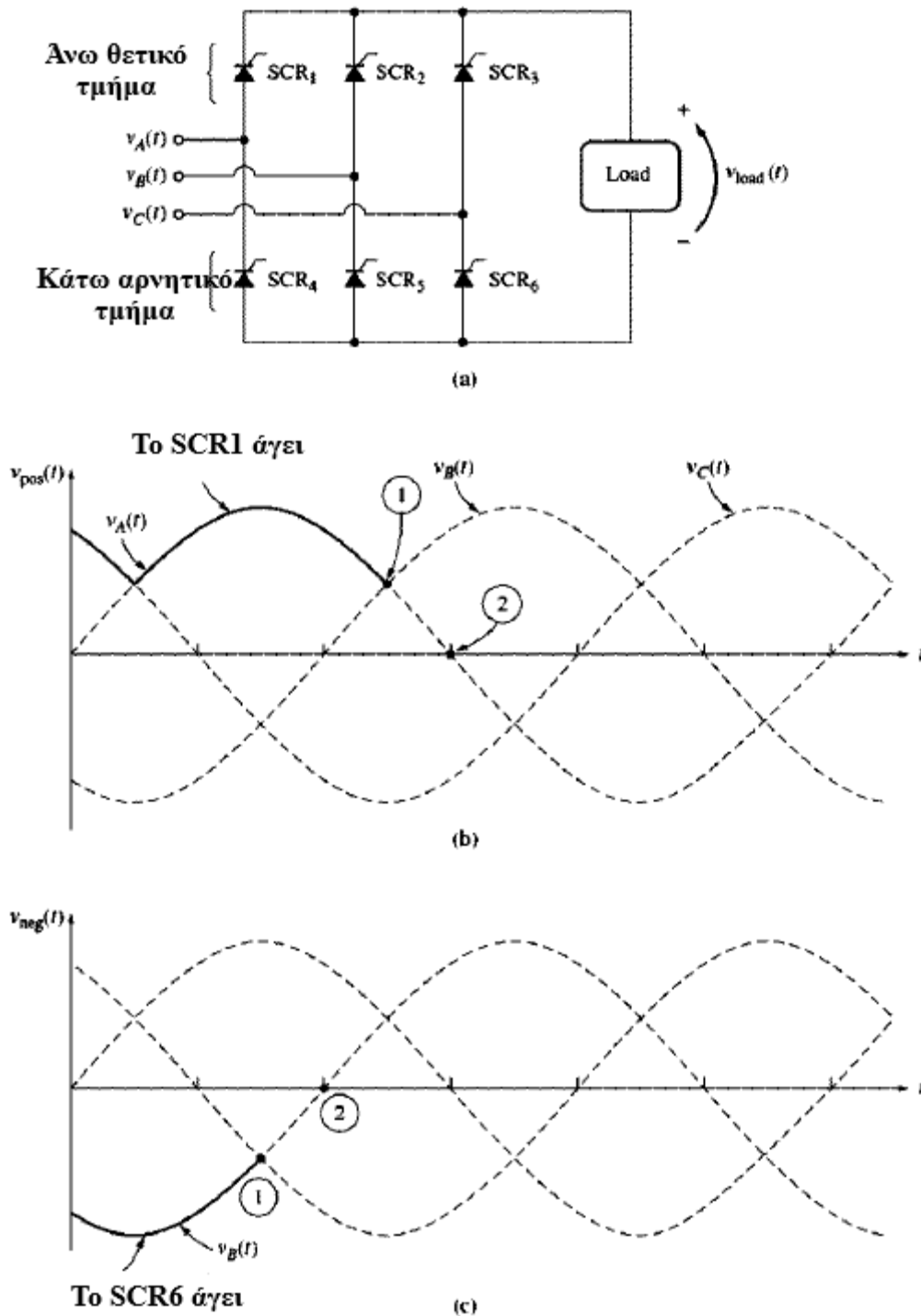
Εάν στην θέση των διόδων αντικατασταθούν από θυρίστορ SCR και τα οποία πλέον καθιστούν την τριφασική γέφυρα πλήρως ελεγχόμενη. Το SCR1 άγει (Σχήμα 5.26) και θα συνεχίσει να άγει έως ότου το ρεύμα του να μειωθεί κάτω από το ρεύμα συγκράτησης  $I_H$ . Εάν δεν σταλεί παλμός έναυσης σε κανένα άλλο θυρίστορ του πάνω τμήματος τότε το SCR1 θα αποκοπεί, αυτό για να γίνει θα πρέπει η τάση να γίνει μηδέν και στο σημείο 2 αλλάξει η πολικότητα (Σχήμα 5.26 β). Το SCR1 για να πολωθεί στιγμιαία ανάστροφα και να αποκοπεί θα πρέπει μετά το σημείο 1 σε απροσδιόριστη χρονική στιγμή να δεχθεί παλμό έναυσης το SCR2. Η διαδικασία αυτή όπου το SCR2 οδηγεί σε αποκοπή το SCR1 ονομάζεται εξαναγκασμένη μετάβαση. Στο Σχήμα 5.26 γ η συμπεριφορά των θυρίστορ στο αρνητικό μέρος είναι παρόμοια. Όταν κάποιο θυρίστορ δεχθεί παλμό έναυσης όταν η μετάβαση είναι δυνατή τότε η γέφυρα έχει έξοδο ίδια με την έξοδο μίας γέφυρας πλήρους ανόρθωσης με διόδους όπως στο Σχήμα 5.24.

Για να δημιουργηθεί μία πτωτική τάση στην έξοδο του κυκλομετατροπέα χρειάζεται το θυρίστορ SCR όταν άγει στο θετικό τμήμα της γέφυρας να αποκόπτεται αργότερα όταν η τάση στα άκρα του

είναι μικρότερη από την εκάστοτε επιθυμητή τιμή. Για να προκληθεί αυτό χρειάζεται να συνδράμει ένα άλλο θυρίστορ πραγματοποιώντας έναυση σε αυτό με μεγαλύτερη τάση από την επιθυμητή τιμή. Με τον ίδιο τρόπο ένα SCR το οποίο άγει στο αρνητικό κάτω κομμάτι της γέφυρας θα περνάει στην περιοχή της αποκοπής όταν η τάση αυξάνεται κατά πολύ πάνω από την επιθυμητή τιμή. Όταν τα SCR και των δύο τμημάτων δεχθούν παλμό έναυσης τότε είναι δυνατόν να δημιουργηθεί μία φθίνουσα τάση. Εάν συνδυαστούν δύο γέφυρες παράλληλες και με αντίθετες πολικότητες τότε δημιουργείται ένας κυκλομετατροπέας χωρίς παρασιτικό ρεύμα.



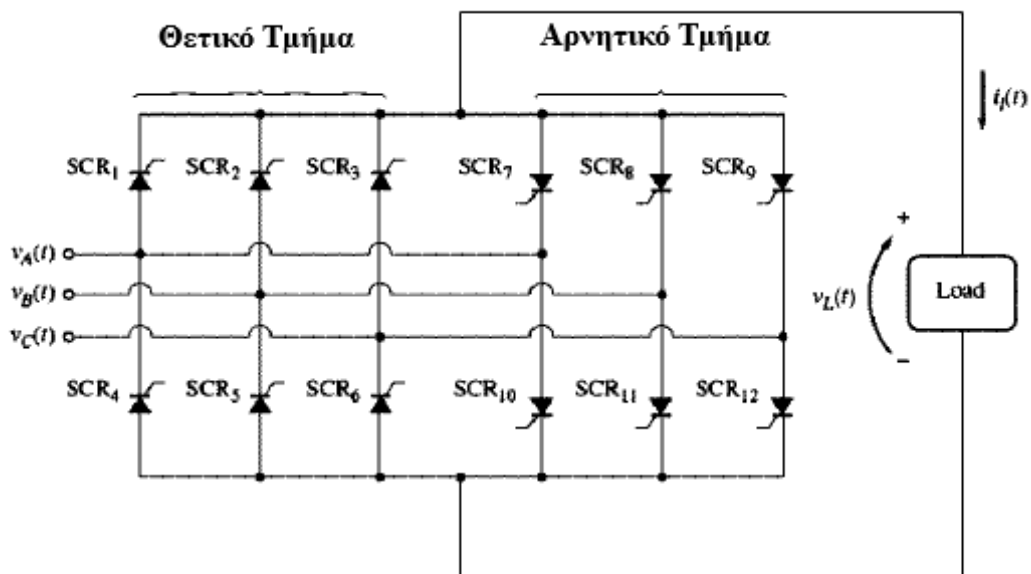
Σχήμα 5.25 (α) Η τάση εξόδου στο άνω θετικό μέρος (β) Η τάση εξόδου στο κάτω μέρος (γ) συνολική τάση που επάγεται στο φορτίο



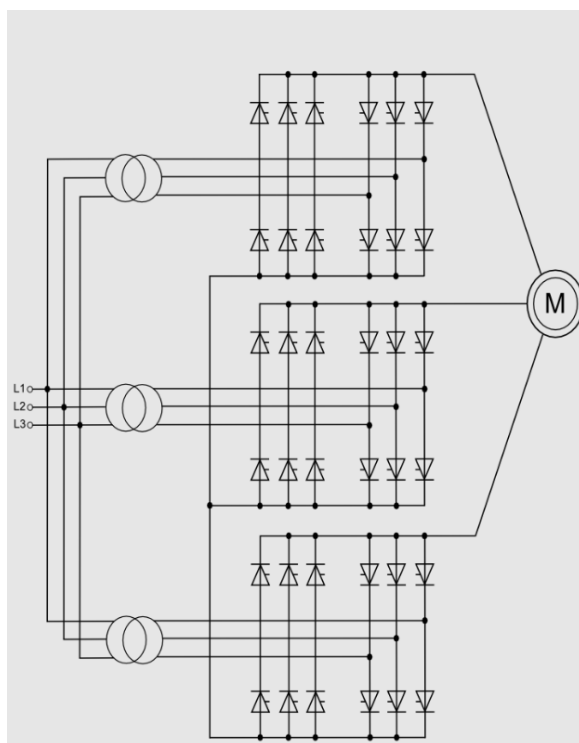
Σχήμα 5.26 (α) Τριφασική ελεγχόμενη γέφυρα ανόρθωσης (β) Θετικό άνω τμήμα για να αποκοπεί το SCR1 πρέπει το SCR6 να σκανδαλιστεί χρονικά μετά το πέρασμα από το σημείο 1 τότε το SCR1 πολώνεται ανάστροφα και αποκόπτεται (γ) Αρνητικό κάτω τμήμα το SCR6 για να αποκοπεί χρειάζεται να σκανδαλιστεί χρονικά μετά το πέρασμα από το σημείο 1 έτσι το SCR6 αντίστροφα και αποκόπτεται

## Κυκλομετατροπείς χωρίς Παρασιτικό Ρεύμα

Στο Σχήμα 5.27 απεικονίζεται ένας κυκλομετατροπέας ο οποίος είναι διατεταγμένος να υποστηρίξει μία φάση από το τριφασικό κύκλωμα (Στο Σχήμα 5.28 φαίνεται μία τριφασική διάταξη κυκλομετατροπέα). Οπότε σε μία πλήρη διάταξη κάθε ένα τέτοιο κύκλωμα καλείται να καλύψει τις τριφασικές ανάγκες, οπότε χρειάζονται τρία τέτοια κυκλώματα όμοια μεταξύ τους. Κάθε ένα τέτοιο κύκλωμα συγκροτείται από δύο πλήρεις ελεγχόμενες τριφασικές γέφυρες από θυρίστορ SCR όπου κάθε μία καλείται να άγει κατά το θετικό τμήμα (θετική φορά) και κατά το αρνητικό τμήμα (αρνητική φορά). Η επιθυμητή τάση εξόδου που παράγεται είναι προσεγγιστική σαν μια ημιτονοειδή κυματομορφή. Ο έλεγχος των θυρίστορ όπως έχει προαναφερθεί ελέγχεται από παλμούς στην πύλη οπότε τα SCR του θετικού τμήματος δέχονται παλμό όταν το ρεύμα έχει θετική φορά, ενώ όταν το ρεύμα έχει αρνητική φορά τότε δέχονται παλμό έναυσης τα SCR του αρνητικού τμήματος. Επιπλέον η κυματομορφή εξόδου από τον κυκλομετατροπέα χωρίς παρασιτικό ρεύμα παρουσιάζει αρμονικές ταλαντώσεις. Οι αρμονικές μειώνουν την συχνότητα εξόδου σε ποσοστό της τάξεως του ένα τρίτου σε σχέση με την συχνότητα εισόδου. Όταν το ρεύμα του φορτίου αλλάζει κατεύθυνση και το ρεύμα κατευθύνεται από τον θετικό στο αρνητικό τμήμα και ανάποδα. Χρειάζονται αισθητήρια για την εύρεση της αλλαγής της πολικότητας του ρεύματος για να δωθούν και οι ανάλογοι παλμοί έναυσης από τον κυκλομετατροπέα στα θυρίστορ. Μέσα από αυτές τις εναλλαγές μεταξύ του θετικού και αρνητικού τμήματος υπάρχει ένα σημείο δεν άγει σε καμία από τις δύο μεριές. Αυτό το σημείο προκαλεί δυσμορφίες στην κυματομορφή εξόδου. Λόγω των παραπάνω η χρήση τους είναι περιορισμένη και για αυτό χρησιμοποιείται φίλτρο (πηνίο ή μετασχηματιστές) ανάμεσα στην έξοδο και στο φορτίο για την καταστολή των αρμονικών.



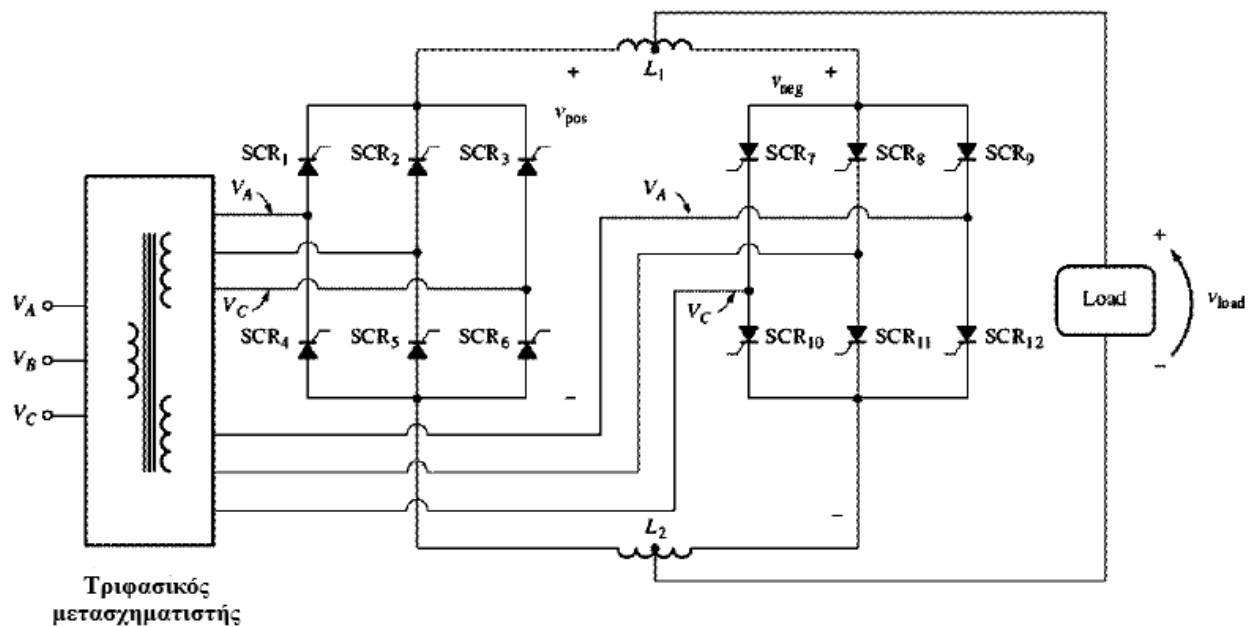
Σχήμα 5.27 Ανορθωτής για μία φάση κυκλομετατροπέα



Σχήμα 5.28 Τριφασική διάταξη κυκλομετατροπέα

## Κυκλομετατροπέας με Παρασιτικό Ρεύμα

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.29 απεικονίζεται μία φάση κυκλομετατροπέα. Σε σχέση με τον κυκλομετατροπέα χωρίς παρασιτικό ρεύμα (Blocking mode Cycloconverter) εδώ το θετικό και αρνητικό τμήμα συνδέονται μέσω πηνίων και οι μεσαίες λήψεις συνδέονται με το φορτίο. Σε αυτού του είδους κυκλομετατροπέα το κύκλωμα άγει χρονικά την ίδια στιγμή στο θετικό και αρνητικό τμήμα. Η τιμή των πηνίων θα πρέπει να είναι μεγάλη για να λειτουργεί ως ασφαλιστική διάταξη έναντι του παρασιτικού ρεύματος. Οι αρμονικές συνιστώσες είναι αισθητά μικρότερες σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο και δίνεται η δυνατότητα μεγαλύτερης μέγιστης συχνότητας. Ο συντελεστής ισχύος παρουσιάζει μικρές τιμές λόγω των μεγάλων πηνίων και για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται πυκνωτής για την διόρθωση του συντελεστή ισχύος.



Σχήμα 5.29 Κυκλομετατροπέας μίας φάσης έξι παλμών

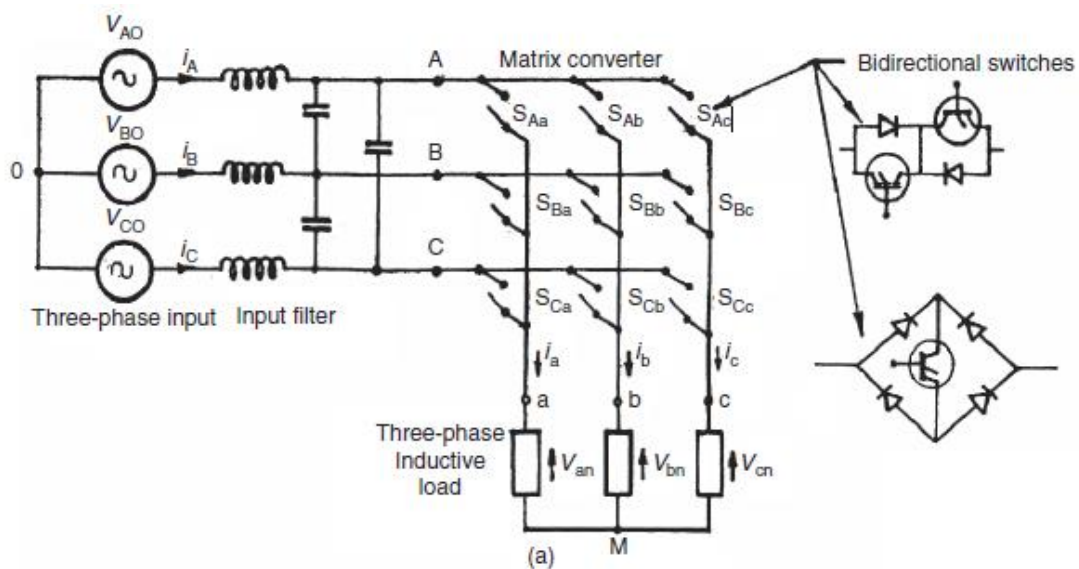
## 5.5 Μητροειδείς Μετατροπείς (Matrix Converters)

Μέσω αυτής της φιλοσοφίας δίνεται η δυνατότητα όλες οι φάσεις εξόδου να χρησιμοποιήσουν ως τροφοδοτική πηγή όλες τις φάσεις εισόδου. Έχει μια πιο παρόμοια λειτουργία με τους κυκλομετατροπείς λόγω των μεταγωγών των καταστάσεων ανάμεσα στην αγωγή και την σβέση που ελλοχεύει τον κίνδυνο βραχυκυκλωμάτων ανάμεσα στις φάσεις [34].

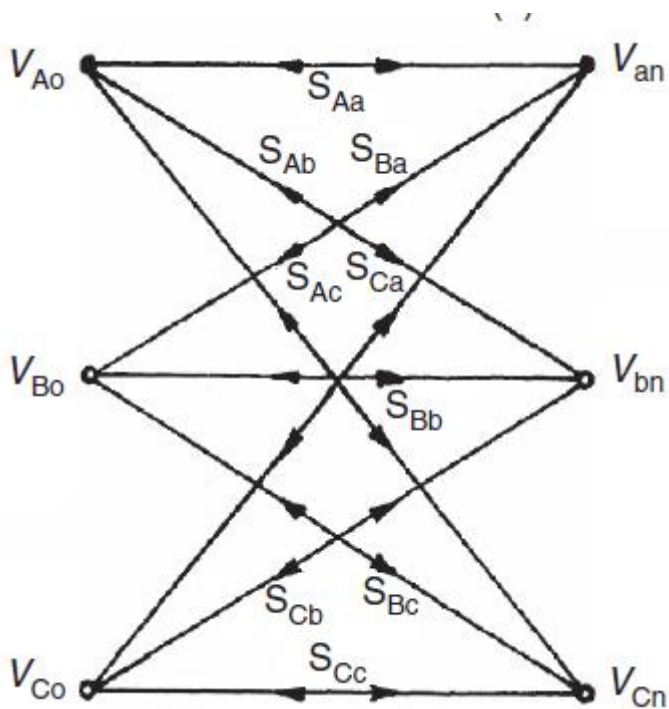
Με την αρχική πρόοδο που σημειώθηκε από την μέθοδο Venturini [19–21], έχει λάβει μεγάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια καθώς παρέχει μια καλή εναλλακτική στους ανορθωτές-μετατροπείς πηγής τάσης PWM διπλής όψης έχοντας τα πλεονεκτήματα του να είναι ένας μονοβάθμιος μετατροπέας μόνο εννέα διακόπτες για τριφασική σε τριφασική μετατροπή και εγγενής αμφίδρομη ροή ισχύος, ημιτονοειδής είσοδος/έξοδος κυματομορφές με μέτρια συχνότητα μεταγωγής, δυνατότητα συμπαγούς σχεδιασμός λόγω της απουσίας αντιδραστικών στοιχείων dc link, και ελεγχόμενος συντελεστής ισχύος εισόδου ανεξάρτητος από το ρεύμα φορτίου εξόδου.

Τα κύρια μειονεκτήματα των μητροειδών μετατροπέων που έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής είναι ο εγγενής περιορισμός του αναλογία μεταφοράς τάσης (0,866), ο περίπλοκος έλεγχος η μεταγωγή και πάνω από όλα η μη διαθεσιμότητα πλήρως ενσωματωμένων αμφίδρομων ελεγχόμενων διακοπών υψηλής συχνότητας σε ένα τσιπ πυριτίου (το triac, αν και διμερές, δεν μπορεί να είναι πλήρως ελεγχόμενο).

Το διάγραμμα κυκλώματος ισχύος του τριφασικού σε τριφασικό (3φ–3φ) μετατροπέα μήτρας εμφανίζεται στο Σχήμα 5.30 που χρησιμοποιεί εννέα αμφίδρομους διακόπτες που είναι διατεταγμένοι έτσι ώστε μπορεί να συνδεθεί οποιαδήποτε από τις τρεις φάσεις εισόδου οποιαδήποτε φάση εξόδου όπως φαίνεται στο σύμβολο του πίνακα μεταγωγής στο Σχήμα 5.31. Έτσι, η τάση σε οποιοδήποτε ακροδέκτη εισόδου μπορεί να εμφανιστεί σε οποιοδήποτε τερματικό ή τερματικό εξόδου ενώ το ρεύμα σε οποιαδήποτε φάση του φορτίου μπορεί να είναι προέρχεται από οποιαδήποτε φάση ή φάσεις της τροφοδοσίας εισόδου.



Σχήμα 5.30 Τριφασικός-Τριφασικός μιτροειδής μετατροπέας



Σχήμα 5.31 Πίνακας Μεταγωγής

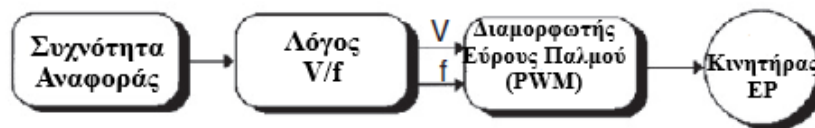


## Κεφάλαιο 6 Έλεγχος Πρόωσης – Τεχνικές Ελέγχου

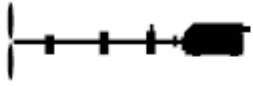


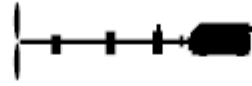
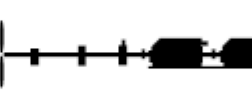

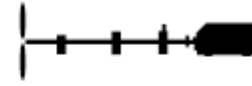
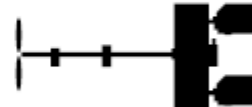

Ο έλεγχος πρόωσης και πιο συγκεκριμένα των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελεί το τεχνολογικό σημείο όπου συνοψίζονται όλες οι τεχνολογικές εξελίξεις των επιμέρους τμημάτων όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι κινητήρες τα ηλεκτρονικά ισχύος. Οι τεχνικές ελέγχου βασίζονται στον έλεγχο της ροπής και της ταχύτητας ενός κινητήρα Ε.Ρ.

Ο έλεγχος της τάσης και της συχνότητας ονομάζεται βαθμωτός έλεγχος V/F (Scalar Control) και αποτελεί έναν από τους πρώτους ελέγχους (Σχήμα 6.1). Με την μέθοδο αυτή ελέγχεται το πηλίκο (βαθμωτό) της τάσης ως προς την συχνότητα δεν προσφέρει ακρίβεια αλλά χρησιμοποιείται σε δευτερεύοντα μηχανήματα ενός πλεούμενου όπως αντλίες, ανεμιστήρες, συμπιεστές που δεν είναι τόσο απαραίτητο. Η ταχύτητα με την τάσης μεταβάλλονται αναλογικά. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου σε σύστημα ανοιχτού βρόγχου αν και είναι ζητούμενο η πραγματική ταχύτητα παρόλο αυτά δεν μετρείται και σε περιπτώσεις όπου σε σύστημα κλειστού βρόγχου ελέγχεται η πραγματική ταχύτητα και συγκρίνεται με την ταχύτητα αναφοράς και προκύπτει μετά από σύγκριση ένα σφάλμα το οποίο περνάει από ελεγκτή για να προκύψει παλμός έναυσης αλλά και σήμα για τον έλεγχο τάσης για την αποφυγή της μεταβολής της ροπής. Γίνεται όμως απλά μία αναφορά καθώς δεν αποτελεί την τεχνική που βασίζεται και χρησιμοποιείται η ηλεκτροπρόωση αλλά δίνει το έναυσμα της εξέλιξης των πρώτων ελέγχων που εφαρμόζονται σε μετατροπείς. Αργότερα εξελίχθηκε μία άλλη τεχνική γνωστή ως μέθοδος διανυσματικού ελέγχου (Vector Control) η οποία και ελέγχει την μαγνητική ροή. Επιπλέον υπάρχει και ο απευθείας έλεγχος ροπής (Direct Torque Control) όπου εξετάζεται και ελέγχεται η ροπή εξόδου και η ταχύτητα του κινητήρα.

Παρακάτω θα αναλυθούν οι προαναφερόμενοι έλεγχοι αλλά και άλλες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπρόωση ανάλογα πάντα και με τον τύπο του κινητήρα, σε αυτή την ενότητα θα εξετασθούν για σύγχρονους, επαγωγικούς, μόνιμου μαγνήτη σύγχρονους κινητήρες PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) και DC κινητήρες καθώς αυτοί χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπρόωση σε πλεούμενα ως επιβατηγά, πολεμικά, παγοθραυστικά και ερευνητικά [45](Σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.1 Έλεγχος Κινητήρα ΕΡ με σύστημα ανοιχτού βρόγχου V/F [41]

	Asynchronous = Induction motor	Permanent magnet synchronous motor	Synchronous motor
Typical motor use	 Below 6MW, <350rpm  2 x 0-13MW, <1500 rpm  Z- or L- drive thrusters	 3-4.5MW, < 250 rpm  5 – 9 MW, < 250 rpm  Azipod® C 0980-1400 sizes	 5 – 25 MW, < 200 rpm  2 x 5-25MW, < 675 rpm  Azipod® XO, Azipod®VO, Azipod® VI
Solution voltage level	Low Voltage, Medium Voltage	Low Voltage	Medium Voltage
Main benefit of technology	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicity</li> <li>• Encoder-less control</li> <li>• Good efficiency at upper half of the speed range</li> <li>• Low investment costs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicity</li> <li>• Encoder-less control</li> <li>• Good efficiency also at partial loads</li> <li>• High torque capability</li> <li>• High power factor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Good efficiency also at partial loads</li> <li>• 2-stator configuration</li> <li>• Reliable solution for high powers</li> <li>• High torque capability</li> <li>• Power factor 1.00</li> <li>• Long track record</li> </ul>
Efficiency "class" for propulsion utility *	A	AB (shaftline) ABB (Azipod® C)	AB (shaftline) ABB (Azipod®)

Σχήμα 6.2 Εξατομίκευση κινητήρων ανάλογα με τις εφαρμογές

Στην πράξη υπάρχουν τρεις διαφορετικές τεχνολογίες κινητήρα για την επιλογή του κινητήρα πρόωσης (η λύση DC είναι συνήθως δεν εξετάζεται με επιβατηγά πλοία, αν και είναι διαθέσιμο και χρησιμοποιείται σε ερευνητικά πλοία) [45].

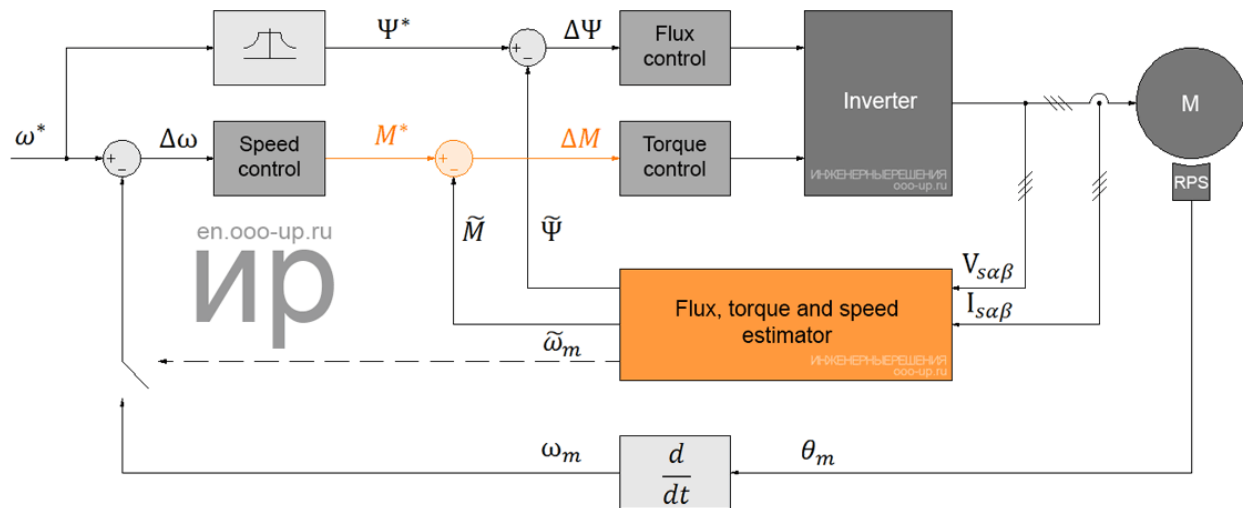
## 6.1 Διανυσματικός Έλεγχος (Vector Control)

Η κύρια ιδέα του διανυσματικού ελέγχου δεν είναι μόνο ο έλεγχος του μεγέθους και της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας αλλά και της φάσης. Με άλλα λόγια το μέγεθος και η γωνία του διανύσματος του χώρου να είναι ελεγχόμενα [46]. Ο διανυσματικός έλεγχος σε σύγκριση με τον βαθμωτό έλεγχο (Scalar Control) έχει υψηλότερη απόδοση. Στο Σχήμα 6.3 [47] παρουσιάζεται ένα τυπικό μπλοκ

διάγραμμα διανυσματικού ελέγχου. Το κύκλωμα βασίζεται στους βρόχους ελέγχου ροής και ροπής, μαζί με τη μονάδα εκτιμητή, η οποία μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Ταυτόχρονα, ο εξωτερικός βρόχος ελέγχου ταχύτητας είναι σε μεγάλο βαθμό ενοποιημένος και παράγει σήματα ελέγχου για τους ρυθμιστές ροπής  $M^*$  και ροής  $\Psi^*$  (μέσω της μονάδας προγράμματος ροής). Η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να μετρηθεί με έναν μηχανικό αισθητήρα (ταχύτητα/θέση) ή να ληφθεί μέσω ενός εκτιμητή προγράμματος που σας επιτρέπει να εφαρμόσετε έλεγχο χωρίς αισθητήρα. Σε εφαρμογές όπως αυτή της ηλεκτροπρόωσης χρησιμοποιείται κωδικοποιητής (encoder) ως ανατροφοδότηση.

Ο στιγμιαίος έλεγχος της συχνότητας με σκοπό τον έλεγχο της ταχύτητας ή της θέσης του κινητήρα δεν μπορεί να οριστεί, και επομένως, η στιγμιαία ροπή ο έλεγχος δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με βαθμωτές μεθόδους ελέγχου. Ο διανυσματικός έλεγχος επιτρέπει σε έναν επαγωγικό κινητήρα με βραχυκυκλωμένου κλωβού να οδηγείται με υψηλή δυναμική απόδοση. Στον διανυσματικό έλεγχο, το δυναμικό μοντέλο μηχανής προτιμάται αντί για μοντέλο σταθερής κατάστασης για τον σχεδιασμό του ελεγκτή. Ο ελεγκτής χρειάζεται να γνωρίζει την ταχύτητα του ρότορα (έμμεση μέθοδο) ή το διάνυσμα ροής διακένου ( άμεση μέθοδος) με ακρίβεια με την χρήση αισθητηρίων. Η τελευταία δεν αποτελεί πρακτική λύση καθώς χρειάζεται αισθητήρες ροής διακένου. Η έμμεση μέθοδος χρειάζεται να ταιριάζει ο κινητήρας με τον ελεγκτή. Αυτό συμβαίνει επειδή ο ελεγκτής πρέπει να γνωρίζει συνεχώς κάποιες παραμέτρους του ρότορα, οι οποίες μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας.

Οι μέθοδοι διανυσματικών ελέγχου βασίζονται στο δυναμικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα. Υπάρχουν τουλάχιστον τρεις ροές (ρότορα, διάκενο αέρα και στάτορα ) και τρία ρεύματα ή μαγνητεγερτικές δυνάμεις (Magnetomotive Force-MMF) (στάτορα, ρότορα και μαγνητισμού) σε επαγωγικό κινητήρα. Για υψηλή δυναμική απόκριση, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ρεύματος ροών και ταχύτητας, πρέπει να ληφθούν υπόψη ο καθορισμός κατάλληλων στρατηγικών ελέγχου. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις είναι κατανοητές μόνο μέσω του δυναμικού μοντέλου του κινητήρα. Όλες οι ροές περιστρέφονται με σύγχρονη ταχύτητα. Τα τριφασικά ρεύματα δημιουργούν μαγνητεγερτικές δυνάμεις (MMFs) (στάτορα και ρότορα) που επίσης περιστρέφονται με σύγχρονη ταχύτητα. Η μαγνητική ροή του ρότορα προσδιορίζεται από το ρεύμα που επικρατεί στον στάτη.

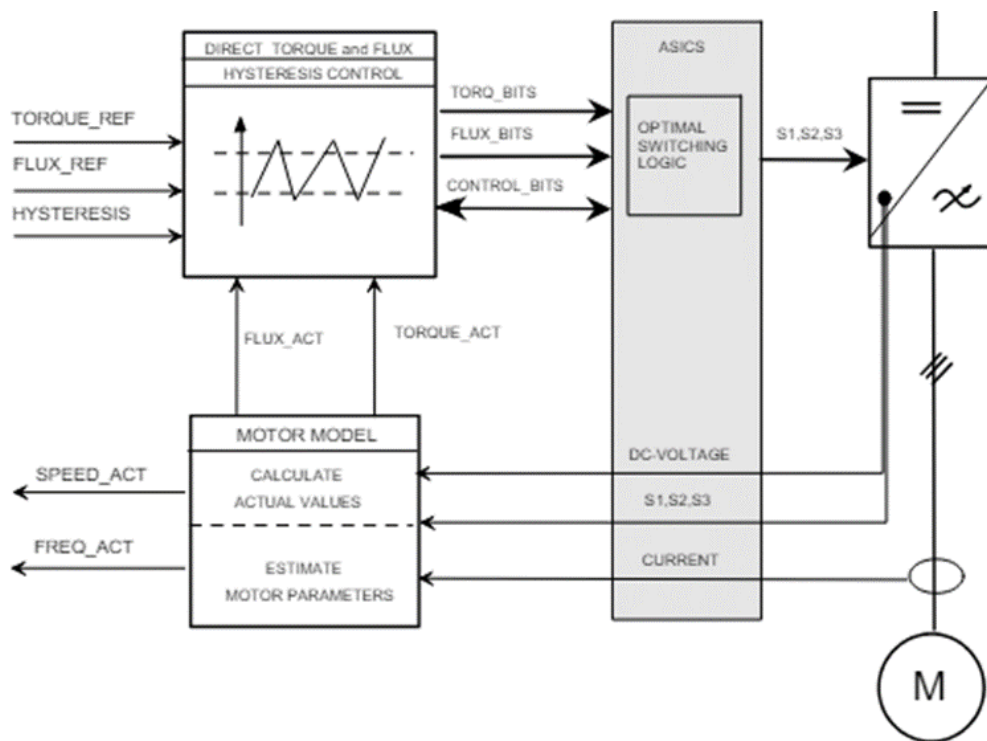


Σχήμα 6.3 Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας βαθμωτού ελέγχου

Με βάση τον τρόπο με τον οποίο ανιχνεύεται και ρυθμίζεται η ροή του ρότορα, δύο υπάρχουν διαθέσιμες μέθοδοι ελέγχου. Η μία και πιο δημοφιλής μέθοδος είναι ο έμμεσος διανυσματικός έλεγχος (Indirect Field Oriented Control-IFOC) και η μέθοδος άμεσου διανυσματικού ελέγχου (Direct Field Oriented Control-DFOC) [48]. Κατά την έμμεση μέθοδο διανυσματικού ελέγχου η μαθηματική προσέγγιση άλλων μεγεθών των τιμών ταχύτητας, της ολίσθησης αλλά και το ρεύμα των τυλιγμάτων με μέτρηση, είναι οι μεταβλητές που ορίζουν έμμεσα τη μαγνητική ροή. Στον άμεσο διανυσματικό έλεγχο η πραγματικές τιμές (real values) που προκύπτουν από ποσοτικές μετρήσεις στον κινητήρα ή με χρήση μαθηματικού μοντέλου ορίζουν το διάνυσμα ροής.

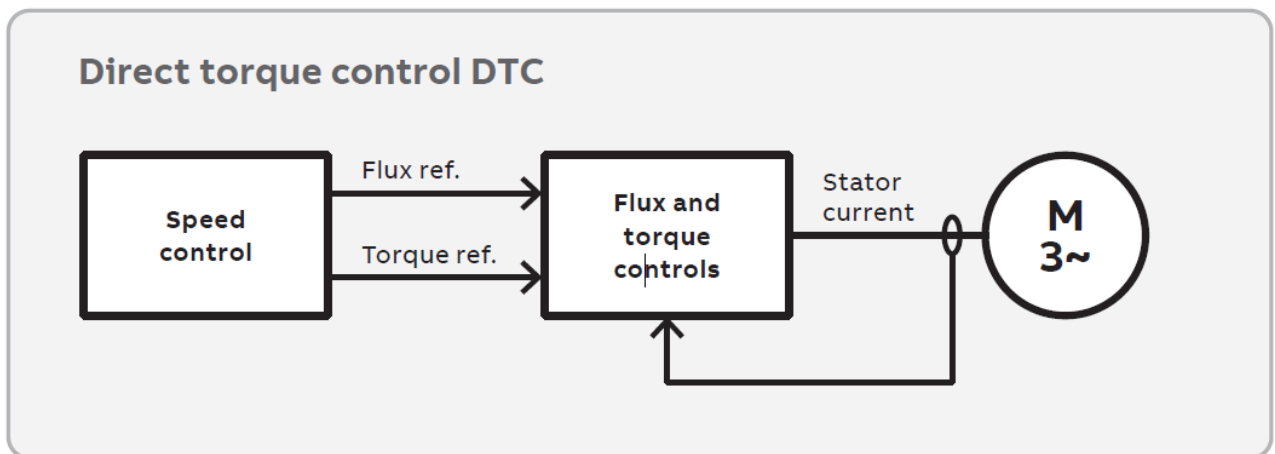
## 6.2 Απευθείας Έλεγχος Ροπής (Direct Torque Control)

Η τεχνική αυτή αποτελώντας μετεξέλιξη του διανυσματικού ελέγχου πεδίου (field oriented control) μπορεί να εφαρμοστεί σε επαγωγικούς και σύγχρονους κινητήρες. Η μαγνητική ροή και η ροπή είναι υπολογίσιμα μεγέθη. Η ροπή του κινητήρα υπολογίζεται κάθε 25  $\mu\text{s}$ . Κατά την διαμόρφωση τους εύρους παλμού τα στοιχεία της συχνότητας και τάσης εξόδου είναι κρίνουσας σημασίας σήματα ελέγχου κατά την μέθοδο απευθείας ελέγχου ροπής, η μαγνητική ροή και η ροπή συγκρίνονται με τις τιμές αναφοράς των αντίστοιχων μεγεθών στους ελεγκτές υστέρησης (Hysteresis Comparator) και ανάλογα με το σφάλμα στέλνονται από την λογική μονάδα στο τμήμα ισχύος όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4 έτσι ώστε να σταλούν παλμοί ως σήματα ελέγχου στις πύλες των ημιαγωγών στοιχείων για να προκληθεί έναυση και σβέση των στοιχείων. Η πραγματικές τιμές ροής και ροπής που προκύπτουν από το μοντέλο κινητήρα επεξεργάζονται τις DC τιμές του μετατροπέα και τις τιμές ρεύματος και τάσης του κινητήρα [49].



Σχήμα 6.4 Τυπικό μπλοκ διάγραμμα απευθείας ελέγχου ροπής [49].

Ο έλεγχος DTC δεν έχει ούτε διαμορφωτή ούτε υπολογιστικά απαιτητικούς μετασχηματισμούς συντεταγμένων. Όταν χρησιμοποιείται γρήγορη επεξεργασία ψηφιακού σήματος το αποτέλεσμα είναι ο μετατροπέας με κατάλληλη απόκριση ροπής να είναι κοντά στα όρια που θέτει ο κινητήρας. Λόγω της προηγμένης μαθηματικής κατανόησης του τρόπου λειτουργίας ενός κινητήρα, ο κωδικοποιητής θέσης για να ανατροφοδοτεί την ταχύτητα ή τη θέση του κινητήρα άξονας είναι απαραίτητος στις περισσότερες εφαρμογές. Η μαγνητική ροή του στάτη υπολογίζεται ενσωματώνοντας την τάση του. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μεγάλη ακρίβεια σε ένα μεγάλο εύρος στροφών καθώς ο μόνος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει είναι η εσωτερική αντίσταση του στάτη. Η ροπή είναι υπολογίσιμη μέσω των ρευμάτων του στάτη και της εκτιμώμενης μαγνητικής ροής του. Εάν χρησιμοποιηθούν και τα όργανα μέτρησης ρεύματος (Σχήμα 6.5) τότε η ακρίβεια στην μέτρηση της ροπής αυξάνεται [50].



Σχήμα 6.5 Έλεγχος μονάδας AC με χρήση DTC [50].

Ένα σφάλμα στην ταχύτητα χωρίς την ύπαρξη αισθητήρα ταχύτητας είναι μικρότερο από 4% όταν η ταχύτητα του κινητήρα είναι μεγαλύτερη από 5% της ονομαστικής. Ο κωδικός DTC χρησιμοποιεί έλεγχο υστέρησης για ροπή και μαγνητική ροή. Και τα δύο ελέγχονται ώστε να παραμένουν εντός των ορίων ανοχής τους επιλέγοντας έναν νέο βέλτιστο συνδυασμό τρανζίστορ του μετατροπέα. Στους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (PMSM) και κινητήρες μαγνητικής αντίστασης ( Synchronous Reluctance Motor -SynRM ) που δεν έχουν τυλίγματα στο ρότορα δεν έχουν και απώλειες στο σημείο του ρότορα, λόγω των μικρών απωλειών περισσότερη απόδοση έχει ένας ίδιος κινητήρας ίδιου μεγέθους με ένα επαγωγικό κινητήρα. Καθώς και οι δύο κινητήρες PM και SynRM είναι σύγχρονοι κινητήρες, η ταχύτητά τους είναι ακριβώς

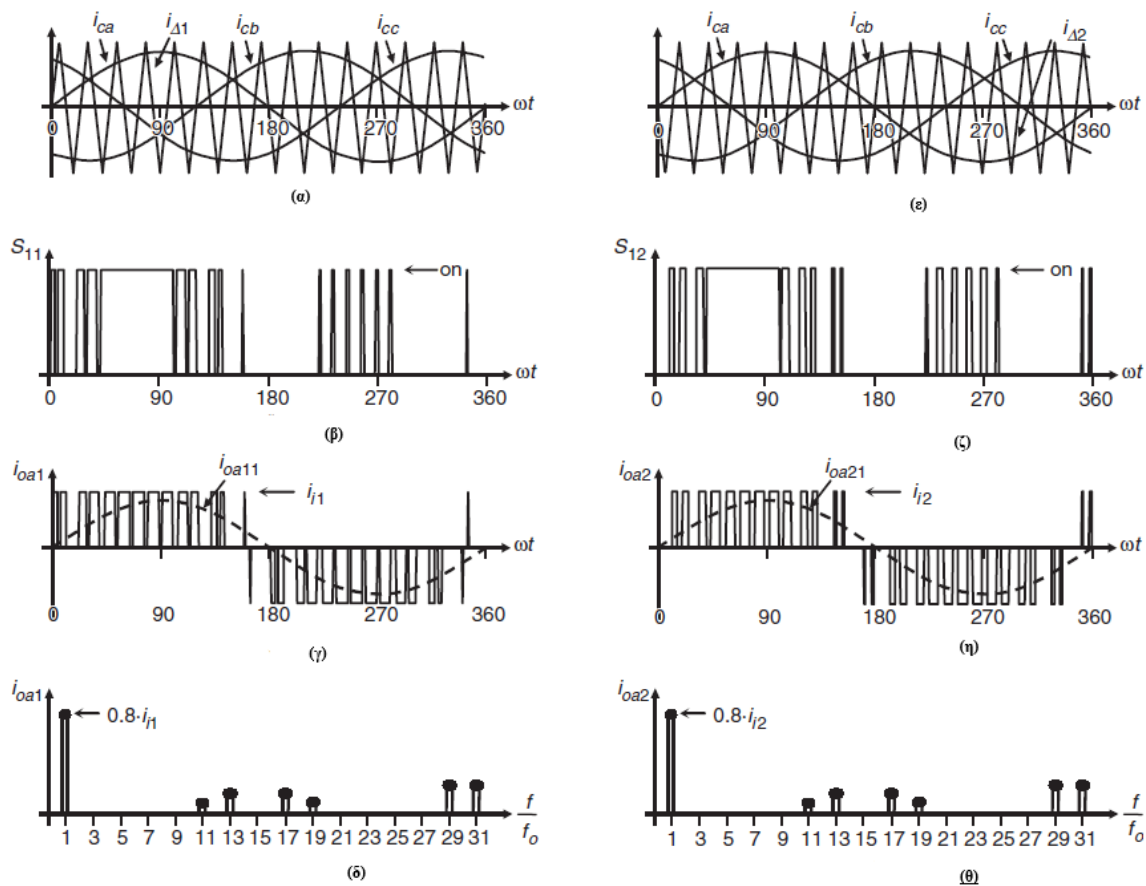
Καθώς και οι δύο κινητήρες PM και SynRM είναι σύγχρονοι κινητήρες, η ταχύτητά τους είναι ακριβώς ορίζεται από τη συχνότητα του μετατροπέα. Εξαιρετική ακρίβεια ταχύτητας επιτυγχάνεται, ακόμη και σε λειτουργία χωρίς αισθητήρα ταχύτητας [50]

Η τεχνική άμεσου ή απευθείας ελέγχου ροπής (DTC), η οποία βασίζεται σε αλγόριθμους βασισμένους σε υστέρηση, έχει το μειονέκτημα της μεταβλητής συχνότητας μεταγωγής του μετατροπέα ισχύος, επομένως απαιτεί υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας. Ωστόσο, ο διπλασιασμός της συχνότητας δειγματοληψίας μειώνει περίπου στο μισό τον κυματισμό για έναν σύγχρονο κινητήρα. Επιπλέον, κατά την εκκίνηση, η θέση του ρότορα πρέπει να είναι γνωστή, και παρόλο που το σύστημα παρουσιάζει καλή δυναμική απόκριση, παρουσιάζει κακή απόδοση σε σταθερή κατάσταση λόγω των υψηλών επιπέδων κυματισμού ρεύματος στο ρεύμα και τη ροπή του στάτη. Από την άλλη πλευρά, έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η χαμηλή πολυπλοκότητα και η απαίτηση μιας μόνο παραμέτρου κινητήρα, της αντίστασης του στάτη. Δεν χρειάζεται διαμόρφωση εύρους ζώνης διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM). Αντίθετα, ένας από τους μετατροπείς διανυσματικού χώρου τάσης (VSI) εφαρμόζεται καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου δειγματοληψίας. Ο άμεσος έλεγχος ροπής (DTC) έχει πλεονεκτήματα όπως η χαμηλή πολυπλοκότητα και η ανάγκη για μία μόνο παράμετρο κινητήρα, την αντίσταση του στάτη. Ωστόσο, έχει το μειονέκτημα της μεταβλητής συχνότητας μεταγωγής του μετατροπέα ισχύος, επομένως απαιτεί υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας.

Στην ηλεκτροπρόωση έχει εφαρμοστεί σε αζιμουθιακά συστήματα πρόωσης με σύγχρονο κινητήρα μόνιμων μαγνητών . Στην κούρσα των συγκρίσεων πλεονεκτεί έναντι του διανυσματικού ελέγχου λόγω του ότι ελέγχουν την ροπή εξόδου απευθείας , η αλληλουχία των υπολογισμών είναι μικρότερη χωρίς απαιτήσεις . Η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής δεν κρίνεται απαραίτητη και δεν εμπεριέχονται αιχμές ροπής (Torque ripples) .

### 6.3 Έλεγχος με SPWM – CSI

Όπως και στην μέθοδο VSI τριών επιπέδων, ο κύριος στόχος είναι η δημιουργία του με κατάλληλα 12 σήματα πύλης έτσι ώστε να ληφθούν θεμελιώδη ρεύματα γραμμής μετατροπέα που θα ισοδυναμούν με ένα δεδομένο σύνολο σημάτων διαμόρφωσης. Ειδικότερα, η μέθοδος ελέγχου SPWM μετατροπέα τριών επιπέδων χρησιμοποιεί ημιτονοειδές σύνολο διαμορφωτικών σημάτων. Στο Σχήμα 6.6 απεικονίζεται ο έλεγχος τριών επιπέδων αντιστροφέα πηγής ρεύματος (Current Source Inverter-CSI). Τα καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται εάν τα σήματα φορέα είναι  $180^\circ$  εκτός φάσης και να είναι περιττοί πολλαπλάσιοι της θεμελιώδους συχνότητας. Εν προκειμένω να χρησιμοποιηθεί το ίδιο σύνολο σημάτων φορέα για τη δημιουργία των παλμών για τις πύλες για τις φάσεις b και c, η θεμελιώδη συχνότητα του φέρον σήματος  $m_f$  πρέπει να είναι πολλαπλάσιο του 3 (Τριπλές Αρμονικές). Έτσι οι τιμές  $m_f$  είναι 3,9,15,21.

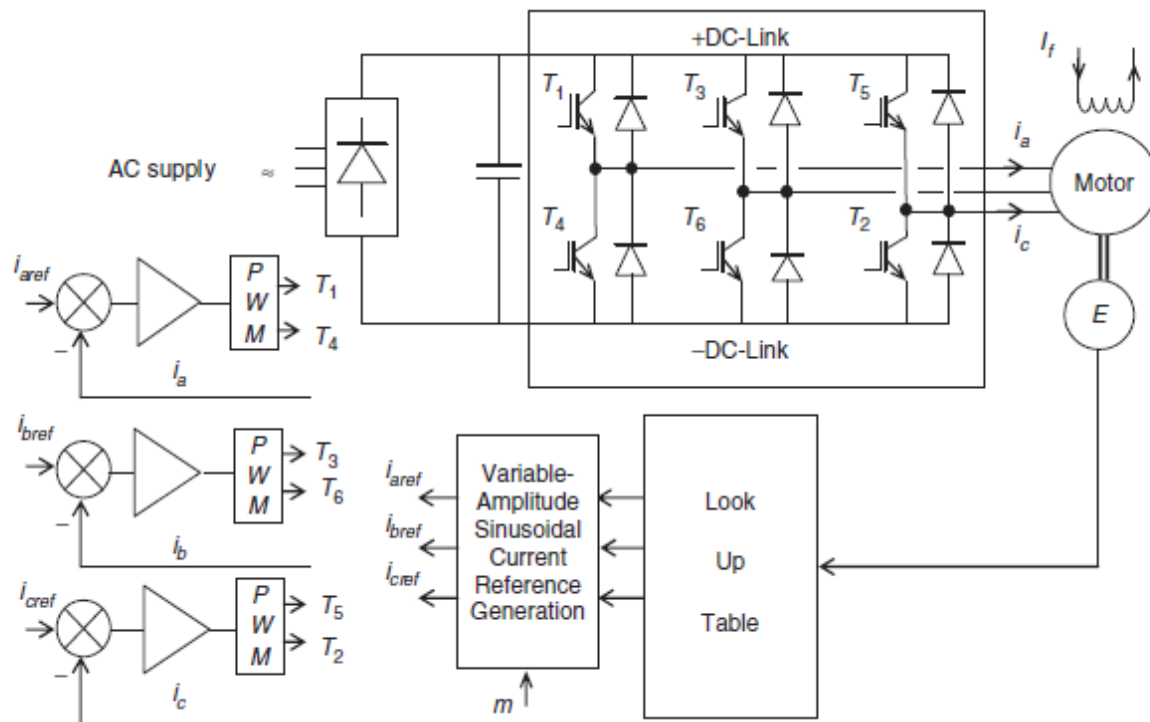


Σχήμα 6.6 Τοπολογία CSI τριών επιπέδων. Σχετικές κυματομορφές με χρήση SPWM



Με την μέθοδο ημιτονοειδής διαμόρφωσης εύρους παλμού (Sinusoidal Pulse Width Modulation) χρησιμοποιούνται δύο σήματα ένα τριγωνικό με ένα ανορθωμένο ημίτονο . Αυτή η σύγκριση του ημιτονοειδές με το τριγωνικό προκύπτει σήμα μεταβαλλόμενο πλάτους σε μία ημιπερίοδο .

Σε μονάδες για τις οποίες αναζητείται συχνά υψηλότερη δυναμική απόκριση, τα ρεύματα φάσης ρυθμίζονται εντός του μετατροπέα. Ο μετατροπέας συνήθως χρησιμοποιεί διακόπτες απενεργοποίησης πύλης, όπως το IGBT και τεχνικές διαμόρφωσης πλάτους παλμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7 . Τα ρεύματα κινητήρα ανιχνεύονται και χρησιμοποιούνται για να κλείσουν ανεξάρτητα ελεγκτές ρεύματος για κάθε φάση. Κανονικά, δύο ελεγκτές ρευμάτων επαρκούν για έναν ισορροπημένο κινητήρα συνδεδεμένο σε αστέρα. Η θέση του ρότορα υπολογίζεται συνεχώς από έναν κωδικοποιητή υψηλής ανάλυσης ( Encoder High Resolution ). Με αυτόν τον τρόπο, οι αναφορές ρεύματος και επομένως τα πραγματικά ρεύματα του στάτη συγχρονίζονται με τον ρότορα.



Σχήμα 6.7 Μπλοκ διάγραμμα CSI με SPWM

## Κεφάλαιο 7 Δυναμική Τοποθέτηση Πλοίου

Το Dynamic Positioning (DP), γνωστό και ως Δυναμική Τοποθέτηση Πλοίου, αποτελεί ένα σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιείται για την αυτόματη διατήρηση της θέσης και της πορείας ενός σκάφους. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των ενσωματωμένων προπελών και κινητήρων του σκάφους, και οι πληροφορίες για τη λειτουργία του προέρχονται από διάφορους αισθητήρες, όπως αισθητήρες θέσης, αισθητήρες αέρα και κίνησης, γυροσκόπια και πυξίδες. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιεί ο ηλεκτρονικός υπολογιστής για τη λειτουργία του συστήματος επηρεάζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σκάφους και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Τα πλοία και άλλα σκάφη που εφοδιάζονται με ένα Dynamic Positioning System διακρίνονται για την ικανότητά τους να διατηρούν τη θέση τους με ακρίβεια, ακόμα και όταν αντιμετωπίζουν αντίξοες καιρικές συνθήκες ή ρεύματα. Αυτή η τεχνολογία δεν εφαρμόζεται μόνο σε πλοία αλλά και σε υποβρύχια, πλωτά γεωτρήματα και ωκεανογραφικά σκάφη. Επιπλέον, η δυναμική τοποθέτηση επιτρέπει το σκάφος να διατηρεί ευνοϊκή θέση έναντι του ανέμου, των κυμάτων και του ρεύματος, μια διαδικασία που αναφέρεται ως "weather vaning."

Το Dynamic Positioning System χρησιμοποιείται ευρέως σε όλον τον κόσμο, κυρίως στη βιομηχανία άντλησης πετρελαίου, σε περιοχές όπως η Δυτική Αφρική, το Περσικό Κόλπο, τον κόλπο του Μεξικού και πολλές άλλες.

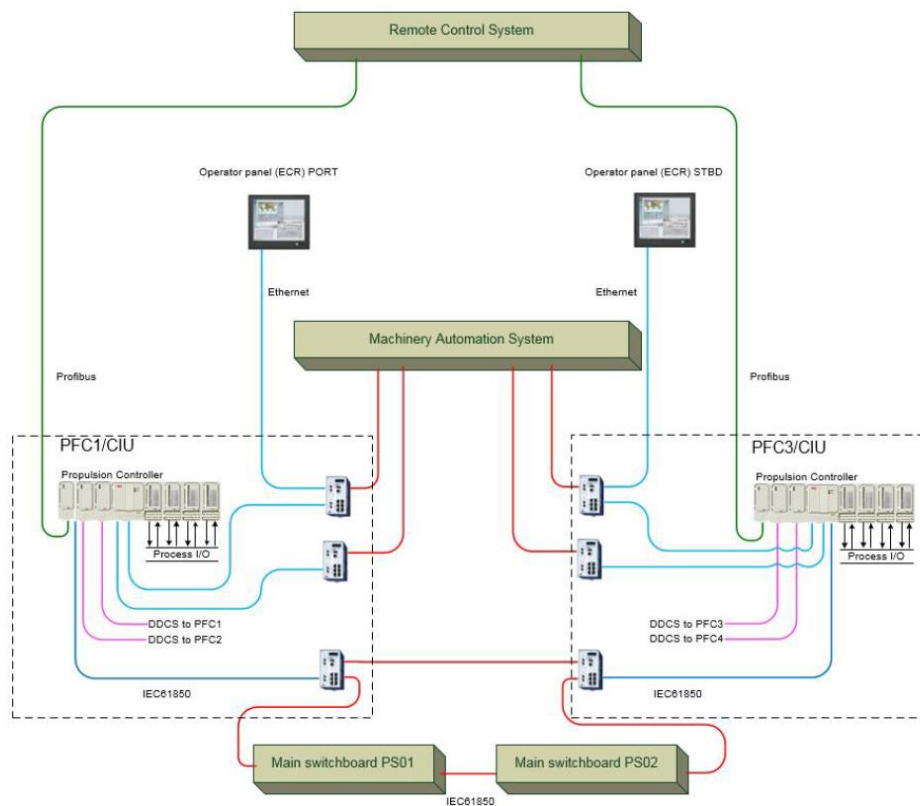
Μερικά από τα είδη που τοποθετείται το dynamic positioning παρουσιάζεται παρακάτω:

- Cable-laying
- Crane vessels
- Diving support vessels
- Dredging
- Flotels
- Maritime research
- Platform supply vessels
- Rock dumping
- Survey ships

## Κεφάλαιο 8 Αρχιτεκτονική Συστήματος Ελέγχου

Το σύστημα ελέγχου πρόωσης με το δίκτυο ελέγχου παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.01. Η επικοινωνία εξηγούνται παρακάτω. Το σύστημα ελέγχου πρόωσης χρησιμοποιεί το δίκτυο ελέγχου TCP/IP ως κύριο μέσο επικοινωνίας για την εσωτερική επικοινωνία. Το δίκτυο ελέγχου είναι ιδιοκτησία του δικτύου TCP/IP για μόνο για τις συσκευές της ABB Marine. Χρησιμοποιεί την επικοινωνία Manufacturing Message Specification (MMS) σε πρωτόκολλο Ethernet TCP/IP.

Τα ηλεκτρικά καλώδια συνδέουν τις συσκευές του δικτύου με τους διακόπτες που βρίσκονται κοντά στη συσκευή. Είναι σχεδιασμένα για τις ειδικές απαιτήσεις του βιομηχανικού αυτοματισμού. Επιπλέον, ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις σχετικών βιομηχανικών προτύπων και παρέχουν πολύ υψηλή λειτουργική αξιοπιστία, καθώς και μακροχρόνια αξιοπιστία και ευελιξία.



Σχήμα 8.01 Αρχιτεκτονική συστήματος ελέγχου πρόωσης

## Κεφάλαιο 9 Συμπεράσματα

Με την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας πραγματοποιείται μία ανάλυση της πρόωσης με μία σύντομη αναφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και εμμένοντας στην κατηγορία των ηλεκτρικών σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Machine). Οι ρυθμιστές στροφών μεταβλητής ταχύτητας συνεχίζουν να αναπτύσσονται και έχουν μεγάλα περιθώρια βελτίωσης. Οι μετατροπείς διαμόρφωσης εύρους παλμού πηγής τάσης ( PWM-VSI) είναι η τεχνική που κυριαρχεί στην ναυτιλία λόγω της ακρίβειας που δίνει στον έλεγχο στην τάση εξόδου και την συχνότητα. Η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμού μειώνει τις αρμονικές παραμορφώσεις και πολύ περισσότερο όταν εφαρμόζεται αντιστροφείς 12 παλμών με γωνιακή διαφορά  $30^\circ$ . Η ημιτονοειδής διαμόρφωσης εύρους παλμού σε μετατροπέα πηγής τάσης (SPWM-VSI) βελτιώνει τις αρμονικές και έχει καλύτερη χρήση του διαύλου DC-Link. Βελτιώνει τον έλεγχο των ρευμάτων και των τάσεων και μειώνει τις αιχμές ροπής. Η επιλογή της κατασκευαστικής φιλοσοφίας σχετίζεται άμεσα με τις αρμονικές παραμορφώσεις. Η χρήση των PMSM στην ναυτιλία έχει το πλεονεκτήματα όπως μικρό βάρος, μικρό μέγεθος, οικονομική κατανάλωση καυσίμου, υψηλή πυκνότητα ισχύος και έχει καλή δυναμική απόκριση, καθιστώντας το πολύ κατάλληλο για τη χρήση συστημάτων πρόωσης πλοίων. Επιπλέον σε σύγκριση με τους επαγωγικούς κινητήρες, οι κινητήρες PMSM έχει υψηλότερη απόδοση με μικρότερες απώλειες ρότορα. Ωστόσο, η πρόκληση του συστήματος ελέγχου για τη χρήση κινητήρων PMSM είναι μη γραμμικό μοντέλο. Είναι ένα σύνθετο λειτουργικό σχέση μεταξύ ροπής εξόδου και ρεύματος στάτη και μετασχηματισμούς μοντέλου για εφαρμογές ελέγχου. Έχουν προταθεί αρκετές ερευνητικές εφαρμογές σχετικά με τη χρήση ηλεκτρικών κινητήρων για ηλεκτροκίνηση πλοίων πρόωσης συμπεριλαμβανομένου του PMSM χωρίς αισθητήρα που εφαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο σε πρωτότυπα ηλεκτρικής πρόωσης όπως προωθητές, τεχνικές εκκίνησης κινητήρα PMSM για πρόωση πλοίου, με βάση ελεγκτή παρακολούθησης ταχύτητας.

## Βιβλιογραφία

- [1] Eurostat, «Greenhouse gas emission- emission inventories,» 2021.
- [2] J. Chen και J. Chen, Investigation on the Selection of Electric Power System Architecture for Future More Electric Aircraft, IEEE, 2018.
- [3] A. Wintrich, A. Wintrich, W. Tursky και T. Reimann, Application Manual Power Semiconductors, Germany: Semikron, 2015.
- [4] Y. J.-y. W. L. S. L.-n. Y. S.-s. RUAN Li-gang, A Novel Topology and Control Strategies for AC Solid State Power Controllers with Current-Limiting Function, China: IEEE.
- [5] Safety4Sea, «Safety4Sea,» 4 September 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://safety4sea.com/are-electric-vessels-the-future-of-shipping/>.
- [6] K. BARRY, «World's First Electric Car Ferry Recharges in 10 Minutes,» 01 February 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.wired.com/2013/02/electric-ferry/>.
- [7] T. Digalaki, «Safety4Sea,» 26 May 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://safety4sea.com/cm-powering-the-future-reducing-carbon-footprint-with-shore-power/>.
- [8] I. M. Organization, «MARPOL Annex VI-Prevention of Air Pollution from Ships,» 26 November 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.rempec.org/en/knowledge-centre/online-catalogue/3-zb-101-marpol-annex-vi-regulations-final.pdf>.
- [9] Valmet, *Valmet Marine Scrubber E&I Training material Meyer Turku NB1392*, 2018.
- [10] I. M. O. E. Team, «Improving the energy efficiency of ships,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx>.
- [11] A. BARZKAR και M. GHASSEMI, Electric Power Systems in More and All Electric Aircraft: A Review, Virginia: IEEE Access, 2020.
- [12] H. Wang και N. P. Lutsey, «Long-term potential for increased shipping efficiency through the adoption of industry-leading practices,» International Council on Clean Transportation, 2013.
- [13] F. Baldi και C. Gabrielli, «A feasibility analysis of waste heat recovery systems for marine applications,» *Energy Journal*, January 2015.
- [14] T. Uyanık, E. Ejder, Y. Arslanoğlu, Y. Yalman, Y. Terriche, C.-L. Su και J. M. Guerrero, «Thermoelectric Generators as an Alternative Energy Source in Shipboard Microgrids,» MDPI, 2022.
- [15] M. Loupis, N. Papanikolaou και J. Prousalidis, «Fuel consumption reduction in marine power systems through thermoelectric energy recovery,» σε *Ecomarine*, 2014.
- [16] S. J. Chapman, *Electrical Machinery Fundamentals Third Edition*, McGraw-Hill, 2000.
- [17] E. E. Team, «EEP,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://electrical-engineering-portal.com/download-center/books-and-guides/electrical-engineering/transformers-generators-protection>.
- [18] B. S. Guru και H. R. Hiziroglu, *Electric Machinery Fundamentals Third Edition*, New York: Oxford University Press, 2001.
- [19] A. M. E. Team, «About Motors,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://about-motors.com/motorcontrol/pmsm/>.
- [20] Y. A. K. Shigeo Morimoto και Y. Enomoto, «Recent Technical Trends in PMSM,» σε *The 2014 International Power Electronics Conference*, 2014.

- [21] S. Eriksson, Permanent Magnet Synchronous Machines, Upsala Sweden: MDPI , 2019.
- [22] M. E. Fahem, «EmWorks Blog,» 12 10 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.emworks.com/blog/electromechanical/axial-and-radial-flux-permanent-magnet-machines-what-is-the-difference>.
- [23] A. Balashanmugham και M. Maheswaran, «Permanent-Magnet Synchronous Machine Drives,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/ec25/8ae763b458145c587498e2ae6f5116200fb7.pdf>.
- [24] J. F. Gieras, Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications 3rd Edition, Rockford Illinois: CRC Press, 2010.
- [25] A. Hughes και B. Drury, Electric Motors and Drives , Fundamentals, Types and Applications, Newnes, 2019.
- [26] E. Team, «ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΙ 1ης ΕΠΑΣ ΟΑΕΔ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ,» 8 Μάρτιος 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://oadhlectrologoi.blogspot.com/2017/03/blog-post\\_9.html](https://oadhlectrologoi.blogspot.com/2017/03/blog-post_9.html).
- [27] M. H. Alhassan, «Computer Aided Design of a Permanent Magnet Synchronous Motor,» January 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/324209534\\_Computer-Aided\\_Design\\_of\\_a\\_Permanent\\_Magnet\\_synchronous\\_motor](https://www.researchgate.net/publication/324209534_Computer-Aided_Design_of_a_Permanent_Magnet_synchronous_motor).
- [28] N. MOHAN, T. M. UNDELAND και W. P. ROBBINS, POWER ELECTRONICS Converters, Applications and Design Second Edition, New York: John Willey and Sons, 1995.
- [29] C. Hodge, S. Williamson και S. Smith, «Direct Drive Marine Propulsion Motors,» Research Gate, 2002.
- [30] ABB, *Propulsion Control System Software*, ABB, 2017.
- [31] M. C. Demirci, «Naval Post,» *Propulsion Systems Used in Modern Naval Vessels*, 8 March 2021.
- [32] A. Adnanes, «Maritime Electrical Installations Lecture Slides , Marine Control Systems,» Trodheim, 2003.
- [33] T. M. ,. R. R. Vladimir Peli´ και M. Val´ci´, «Analysis of the Impact of Split Injection on Fuel Consumption and NOx Emissions of Marine Medium-Speed Diesel Engine,» 20 October 2020.
- [34] I. Π. Χ.Φραγκόπουλος, Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου, DaVinci, 2019.
- [35] N. Κορακιανίτη, «Μετάδοση Ισχύος,» 2 Σεπτέμβριος 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.metadosi-ischios.gr/architektoniki-arthrotoy-schediasmoy-ilektroproosis-v-meros/>.
- [36] T. Dr Mc Coy και J. Dr. Amy Jr, «The State-of-the-Art of Integrated Electric Power and Propulsion Systems and Technologies on Ships,» σε *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2009.
- [37] A. MALVINO και D. BATES, ELECTRONIC PRINCIPLES Eighth Edition, McGraw-Hil, 2007.
- [38] A. SCHWEIZER και E. CARROLL, «APPLICATION ASPECTS,» σε *ABB Semiconductors*, ABB publications.
- [39] ABB, «ABB,» 01 July 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=5SYA1248-01&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.

- [40] E. Τατάκης, «Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές Περιγραφή Ημιαγωγικών Στοιχείων,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://eclass.upatras.gr/courses/EE894/>.
- [41] M. Rashid, *POWER ELECTRONICS HANDBOOK*, Burlington: Elsevier, 2011.
- [42] D. W.Hart, *Power Electronics*, McGraw-Hill, 2011.
- [43] D. Radan, «POWER ELECTRONIC CONVERTERS FOR SHIP PROPULSION ELECTRIC MOTORS,» 2004.
- [44] A. M. Epemu και K. O. Enalume, «Speed Control of a Single Phase Induction Motor Using Step-down Cycloconverter,» *Science PG*, 15 May 2018.
- [45] ABB, *System Project Guide For Passenger Vessels*, 2011.
- [46] C. Busca, *Open Loop Low Speed Control for PMSM in High Dynamic Applications*, 2010.
- [47] E. Team, «About Motors,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://about-motors.com/motorcontrol/vector/>.
- [48] D. Novotny και T. LIpo, *Vector Control and Dynamics of AC Drives*, Clarendon Press, 1996.
- [49] Γ. Χριστόπουλος και Α. Σαφάκας , «ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΔΗΓΗΣΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ 315 KW ΜΕ ΚΟΙΝΟ ΑΞΟΝΑ.- ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ,» Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος ΤΕΕ.
- [50] ABB, *Direct torque control - the world's most advanced AC drive technology*, ABB, 2011.
- [51] Wartsila και J. S. A. I. Oy, *MECHANICAL POWER TO ELECTRICAL POWER*, Wartsila, 2001.
- [52] ABB, *AVR Functionality*, ABB.
- [53] Α. Ν. Σκολαρίκη, *Σχεδίαση και Ανάλυση Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών 16kW για Εφαρμογή Ηλεκτροκίνησης & Συγκριτική Μελέτη Δύο Εναλλακτικών Γεωμετριών Δρομέα*, Αθήνα, 2014.
- [54] J. Soulard, *Design Study of Different Direct-Driven Permanent-Magnet Motors for a Low Speed Application*, Research Gate, 2014.