

**ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΤ**  
**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ:**

**Θαλάσσια Συστήματα Ελέγχου**  
**Έλεγχος Πρόωσης και Κίνησης Πλοίων και Δομών Ωκεανών**

**Φοιτητής: Ζαχαρόπουλος Βασίλειος**

**Εισηγήτρια: Βελώνη Αναστασία**

**ΑΘΗΝΑ 2018**

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## Κεφάλαιο 2

### Θαλάσσια Συστήματα Ελέγχου

2.1	Εισαγωγή .....	5
2.2	Εικόνα Συστήματος .....	8
2.3	Σύστημα Ισχύος .....	10
2.4	Σύστημα Προώθησης .....	12
2.5	Θαλάσσιο Σύστημα Αυτοματισμού .....	13
2.5.1	Γενικά .....	13
2.5.2	Δίκτυο Δεδομένων και Σταθμοί Επεξεργασίας .....	15
2.5.3	Σταθμοί Χειριστών και ΗΜΙ .....	15
2.5.4	Πτυχές Ενσωμάτωσης .....	16
2.6	Δυναμικό Σύστημα Εντοπισμού Θέσης .....	16
2.6.1	Σύστημα Αναφοράς Θέσης και Αισθητήρες .....	20
2.6.2	Τρόποι Λειτουργίας .....	23
2.6.3	Λειτουργικότητα και Ενότητες .....	25
2.6.4	Συστήματα Συμβουλευτικής και Παρακολούθησης .....	29
2.6.5	Δυνατότητα DP .....	30
2.7	Διαχείριση Ισχύος και Ενέργειας .....	31
2.7.1	Αποκατάσταση Διακοπής .....	33
2.7.2	Μείωση Φορτίου και Πρόληψη Διακοπής .....	34
2.7.3	Κυβερνήτης κινητήρα ντίζελ και αντοχή σφάλματος AVR .....	37
2.8	Θαλάσσια Βιομηχανική Πληροφορική .....	39
2.9	Κανόνες και Κανονισμοί .....	45
2.9.1	Απαιτήσεις Κατηγορίας .....	45
2.9.2	Αξιοπιστία και Πλεονασμός .....	48
2.9.3	Ανάλυση Αποτυχίας .....	50
2.10	Προσομοίωση .....	51
2.10.1	Κατασκευή Προσομοιωτή .....	54
2.10.2	Ιεραρχία μονάδας .....	54
2.10.3	Πλατφόρμα υλικού και λογισμικού .....	55
2.10.4	Δοκιμές Υλικού σε Βρόχο .....	55

## Κεφάλαιο 3

### Θαλάσσιες Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις και Ηλεκτρική Προώθηση Ντίζελ

3.1	Εισαγωγή	59
3.1.1	Αντικείμενο και Στόχοι	59
3.1.2	Κίνητρα για Ηλεκτρική Προώθηση	61
3.1.3	Ροή Ισχύος και Αποδοτικότητα Ισχύος	63
3.1.4	Ιστορική Επισκόπηση της Ηλεκτρικής Προώθησης	66
3.2	Εφαρμογές	71
3.2.1	Επιβατηγά Πλοία – Κρουαζιερόπλοια και Οχηματαγωγά	71
3.2.2	Εκμετάλλευση και Εξερεύνηση Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου: Μονάδες Γεώτρησης, Πλοία Παραγωγής και Δεξαμενόπλοια	72
3.2.3	Σκάφη Υποστήριξης Πεδίου και Σκάφη Κατασκευής	74
3.2.4	Παγοθραυστικά και Πλοία Πάγου	75
3.2.5	Πολεμικά Πλοία	76
3.2.6	Ερευνητικά Σκάφη	78
3.2.7	Τάσεις και Νέες Εφαρμογές	78
3.3	Επισκόπηση του Ηλεκτρικού Συστήματος Ισχύος	80
3.3.1	Εισαγωγή	80
3.3.2	Ηλεκτρική Παραγωγή Ισχύος	81
3.3.3	Ηλεκτρική Διανομή Ισχύος	86
3.3.4	Κινητήρες για Πρόωση και Προωθητήρες	90
3.3.5	Μονάδες Προώθησης	100
3.3.6	Τάσεις και Νέες Έννοιες	104
3.4	Έλεγχος Ισχύος και Πρόωσης	107
3.4.1	Εισαγωγή – Ιεραρχία Ελέγχου	107
3.4.2	Διεπαφή Χρήστη	110
3.4.3	Υψηλό Επίπεδο Λειτουργικότητας Ελέγχου	110
3.4.4	Λειτουργικότητα Ελέγχου Χαμηλού Επιπέδου	114
3.5	Ηλεκτρικοί Κινητήρες Προώθησης	120
3.5.1	Εισαγωγή	120
3.5.2	Κινητήρες Κίνησης Μεταβλητής Ταχύτητας	120
3.6	Σχεδιασμός Συστήματος	143
3.6.1	Εισαγωγή	143
3.6.2	Αξιολόγηση του Κόστους του Κύκλου Ζωής του Εννοιολογικού Σχεδιασμού	145

3.6.3	Συνηθισμένες Μελέτες Ανάλυσης Δικτύου και Ηλεκτρικού Συστήματος Ισχύος ..	146
3.6.4	Εκτεταμένη Ανάλυση και Μελέτες .....	153
3.7	Αρμονική Παραμόρφωση .....	155
3.7.1	Αρμονικές των Μετατροπέων VSI .....	156
3.7.2	Αρμονικές των CSI Μετατροπέων .....	158
3.7.3	Αρμονικές των Κυκλομετατροπέων .....	159
3.7.4	Περιορισμοί από τις Εταιρείες Ταξινόμησης .....	159
3.7.5	Αρμονικές των Ιδανικών Μορφών Κύματος Ρεύματος 6 και 12 Παλμών .....	160
3.7.6	Υπολογισμός της Αρμονικής Παραμόρφωσης .....	163
3.7.7	Διαχείριση Αρμονικών .....	167
3.8	Παραδείγματα Διαμορφώσεων .....	173

## Κεφάλαιο 2

# Θαλάσσια Συστήματα Ελέγχου

### 2.1 Εισαγωγή

Η ιστορία του αυτοματοποιημένου ελέγχου κλειστού βρόγχου πλοίου ξεκίνησε με τον Elmer Sperry (1860-1930), ο οποίος κατασκεύασε τον πρώτο αυτόματο μηχανισμό πλοήγησης πλοίου το 1911 για τη διατήρηση της πορείας (Allensworth [5] και Bennet [22]). Αυτή η συσκευή αναφέρεται ως “Metal Mike”, και κατέγραφε μεγάλο μέρος της συμπεριφοράς ενός έμπειρου πλοηγού ή ενός πηδαλιούχου. Το “Metal Mike” αποζημίωσε για την ποικιλία των καταστάσεων των θαλασσών χρησιμοποιώντας τον έλεγχο ανατροφοδότησης και τις αυτόματες προσαρμογές κέρδους. Αργότερα το 1922, ο Nicholas Minorsky (1885-1970), παρουσίασε μια λεπτομερή ανάλυση ενός συστήματος ελέγχου ανατροφοδότησης θέσης όπου διατύπωσε έναν τριμερή νόμο ελέγχου ο οποίος σήμερα αναφέρεται ως έλεγχος Αναλογικότητας-Ακέραιου-Παραγώγου (PID) (Minorsky[190]). Αυτές οι τρεις διαφορετικές συμπεριφορές τέθηκαν σε εφαρμογή παρατηρώντας τον τρόπο με τον οποίο ένας πηδαλιούχος κατευθύνει ένα πλοίο.

Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει μια σφαιρική εικόνα των συστημάτων ελέγχου θαλάσσης τα οποία αποτελούν παράδειγμα δυναμικά τοποθετημένων (DP) πλοίων με ηλεκτρικά συστήματα προώθησης. Οι πτυχές σχεδιασμού, σχετίζονται με υψηλού επιπέδου πλοία ελέγχου όπως δείχνουν η διαχείριση ενέργειας και η DP. Οι απαιτήσεις σχεδιασμού και η ικανότητα για μετατροπή του λογισμικού για το φυσικό διαχωρισμό και τον πλεονασμό ισχύος, την προώθηση και τα συστήματα αυτοματισμού θα παρουσιαστούν. Κανόνες και κανονισμοί λειτουργίας που συμπεριλαμβάνουν δοκιμές και επαληθεύσεις των θαλάσσιων συστημάτων ελέγχου που βασίζονται στη δοκιμή Hardware-In-the-Loop (HIL) επίσης θα παρουσιαστούν. Άλλα θαλάσσια συστήματα ελέγχου, συστήματα ελέγχου προώθησης, έλεγχος των λεπτών δομών του ωκεανού, συστήματα ελέγχου για ταχύπλοα σκάφη και λεπτομέρειες για τα συστήματα DP θα παρουσιαστούν αργότερα στο κείμενο σε ξεχωριστά κεφάλαια. Τα βήματα σχεδιασμού που συνδυάζουν το λογισμικό (SW) και την αρχιτεκτονική υλικού (HW), τη μοντελοποίηση, την επεξεργασία αισθητήρα, το σχεδιασμό ελεγκτή, την προσομοίωση και τη δοκιμή θα ακολουθήσουν περισσότερο ή λιγότερο τις ίδιες αρχές.

Ωστόσο, οι απαιτήσεις όσον αφορά την απόδοση και τον πλεονασμό και ως εκ τούτου την πολυπλοκότητα, μπορεί να διαφέρουν για τις διάφορες εφαρμογές του θαλάσσιου συστήματος ελέγχου.

Η υπεράκτια εξερεύνηση και εκμετάλλευση των υδρογονανθράκων έχουν ανοίξει μια εποχή DP πλοίων. Επί του παρόντος, υπάρχουν περισσότερα από 2000 DP πλοία διαφόρων ειδών που λειτουργούν παγκοσμίως. DP συστήματα χρησιμοποιούνται για ένα ευρύ φάσμα τύπων πλοίου και θαλάσσιων λειτουργιών:

- **Παράκτια βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου:** Τυπικές εφαρμογές στην παράκτια αγορά είναι τα σκάφη ανοικτής θαλάσσης, τα δακτυλίδια και τα πλοία γεώτρησης, τα πετρελαιοφόρα, τα στρώματα καλωδίων και σωλήνων, η επιπλέουσα παραγωγή εκτός φόρτωσης και η αποθήκευση παραγωγής (FPSOs), τα γερανοφόρα και τα βαρέα ανυψωτικά πλοία, τα γεωλογικά πλοία επιθεώρησης και τα πλοία πολλαπλών χρήσεων. Η τοποθέτηση καλωδίων και σωλήνων είναι τυπικές λειτουργίες οι οποίες χρειάζονται επίσης λειτουργία παρακολούθησης.
- **Ναυτιλία:** Σήμερα υπάρχει μια τάση για πιο αυτόματο έλεγχο των θαλάσσιων/εμπορικών πλοίων, πέρα από το συμβατικό αυτόματο πιλότο. Αυτός περιλαμβάνει συστήματα καθοδήγησης σε συνδυασμό με συστήματα αυτόματης παρακολούθησης είτε σε υψηλή είτε σε χαμηλή ταχύτητα. Επιπλέον, αναμένονται πιο εξελιγμένα συστήματα καιρού και πρόβλεψης καιρού. Αυτόματα συστήματα σύνδεσης και η ανάγκη για ακριβής τοποθέτηση χρησιμοποιώντας τα συστήματα DP όταν λειτουργούν σε περιορισμένους χώρους υδάτων θα χρησιμοποιηθούν περισσότερο.
- **Κρουαζιερόπλοια και γιοτ:** Η αγορά κρουαζιερόπλοιων και γιοτ κάνει επίσης χρήση περισσότερων αυτόματων ελέγχων θέσης. Σε περιοχές όπου δεν επιτρέπονται άγκυρες εξαιτίας των ευάλωτων κοραλλιογενών υφάλων, τα DP συστήματα χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση σταθμών. Απαιτείται επίσης ακριβής τοποθέτηση για τη λειτουργία σε λιμάνια και σε περιορισμένα νερά.
- **Αλιεία:** Εφαρμογή πιο εξελιγμένων συστημάτων καθοδήγησης, πλοήγησης και συστημάτων ελέγχου για τα πλοία κατά τη διάρκεια της αλιείας θέτονται σε εφαρμογή από την ανάγκη για ακριβή τοποθέτηση, μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και έξυπνη επιλογή αλιείας.

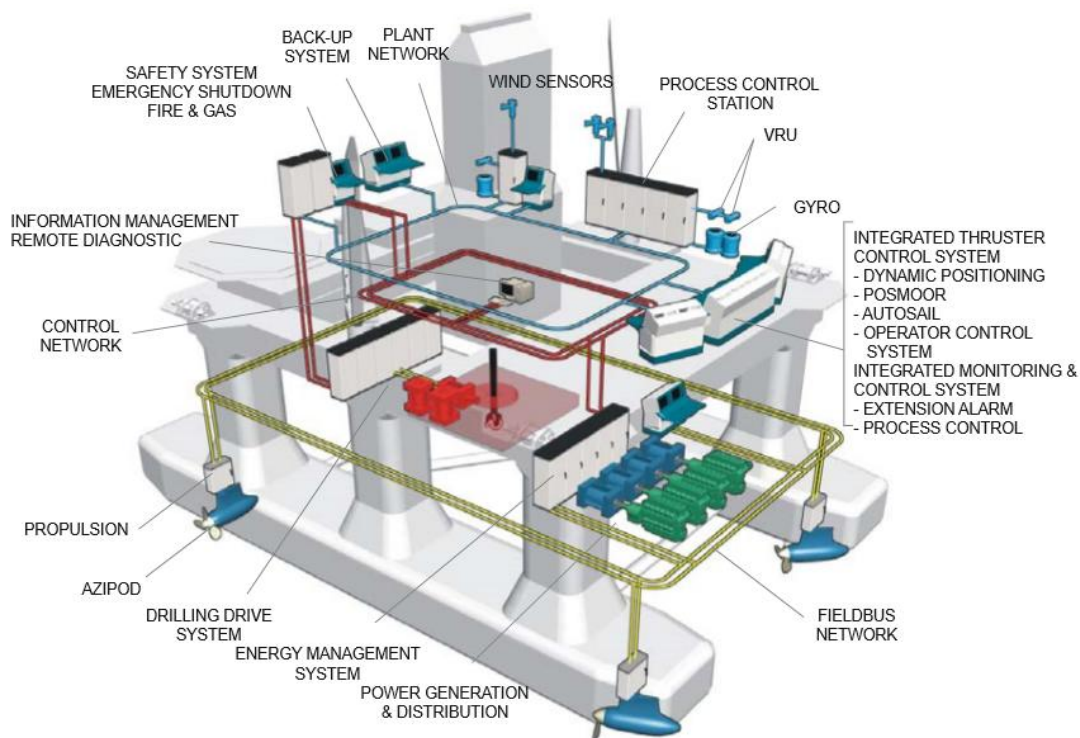
Η ηλεκτρική προώθηση δεν είναι μια πολύ νέα ιδέα. Χρησιμοποιήθηκε ήδη από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Ωστόσο, μόνο σε λίγα σκάφη μέχρι τη δεκαετία του 1920 όπου η ιδέα της γραμμής ηλεκτρικού άξονα επέτρεψε το σχεδιασμό των μεγαλύτερων υπερατλαντικών επιβατικών γραμμών. Η προωθητική μεταβλητή ταχύτητα χρησιμοποιήθηκε σε μερικές εφαρμογές κατά τις δεκαετίες 1950 και 1960, ενώ, πρώτα όταν η τεχνολογία ημιαγωγών κατέστη διαθέσιμη σε μεγάλης κλίμακας εμπορικών εφαρμογών, αυτή η τεχνολογία έγινε αποδεκτή για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η εισαγωγή των AC κινητήρων και υποβιβαστών προώθησης ήταν μια άλλη εξέλιξη στην τεχνολογία που οδήγησε στη ραγδαία αύξηση στη χρήση ηλεκτρικής προώθησης τα τελευταία 15-20 χρόνια. Τυπικά, τα πλοία με ηλεκτρική προώθηση τείνουν να έχουν περισσότερη λειτουργικότητα του συστήματος που εφαρμόζεται σε ολοκληρωμένα συστήματα αυτοματισμού, εν μέρει επειδή τέτοιες λειτουργίες θεωρούνται απαραίτητες για την ασφαλή και βέλτιστη λειτουργία, αλλά επίσης επειδή η ηλεκτρική προώθηση επιτρέπει τη χρήση τέτοιων λειτουργιών. Στην εμπορική αγορά τα παράκτια σκάφη σε συμπλήρωμα των κρουαζιερόπλοιων και των διακοπών πάγου έχουν γίνει οδηγοί της τεχνολογίας που αφορούν τον αυτοματισμό, τη δύναμη και τα συστήματα προώθησης. Χαρακτηρίζονται από την απαιτούμενη ικανότητα να εκτελούν πολύπλοκες θαλάσσιες δραστηριότητες, λειτουργική διαθεσιμότητα, επικέντρωση στην ασφάλεια, αποκλειστικότητα του κόστους και ευελιξία στο επιχειρησιακό προφίλ όσον αφορά τη διαμετακόμιση, τη διατήρηση του σταθμού, την ευελιξία και επίσης σε κάποιο βαθμό ένα σημαντικό πλοίο ή την επεξεργασία του συστήματος φορτίου. Αυτοί οι πολύπλοκοι σταθμοί παραγωγής ενέργειας άνοιξαν για την αύξηση της χρήσης των πλήρως ηλεκτρικών πλοίων και την εισαγωγή των πλήρως ενσωματωμένων ολοκληρωμένων ηλεκτρικών συστημάτων ελέγχου για να λειτουργούν με ασφάλεια και οικονομικά αποδοτικά. Τέτοιες έννοιες εφαρμόζονται σήμερα σε έναν αυξημένο αριθμό λειτουργιών του πλοίου.

Συνεπώς, η πολυπλοκότητα έχει επίσης αυξηθεί με μία ποικιλία λύσεων που αποτελούνται από αυτοδύναμα συστήματα, μερικώς ολοκληρωμένα συστήματα σε πλήρως φυσικά και λειτουργικά ενσωματωμένα συστήματα. Μέχρι τώρα έχουν ενσωματωθεί ολοκληρωμένα αυτόματα συστήματα με περιορισμένο αριθμό πωλητών. Ωστόσο, στον τομέα του αυτοματισμού υπάρχει μια τάση ανοίγματος σε πρωτόκολλα επικοινωνίας και δικτύου. Πώς αυτό θα επηρεάσει τις τεχνολογικές λύσεις και ευθύνες για τα συστήματα πολλαπλών προμηθευτών αποτελεί ακόμα αντικείμενο συζήτησης. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η εισαγωγή χαμηλού κόστους υπολογιστών που δεν είχαν αρχικά σχεδιαστεί για αυτοματισμό έχουν πλέον χρησιμοποιηθεί περισσότερο. Αυτή η εξέλιξη οφείλεται στην ανάγκη να βρεθούν πιο αποτελεσματικές λύσεις κόστους. Παρ' όλα αυτά δημιουργεί νέα ζητήματα ανησυχίας:

- Νέες διαδικασίες για σχεδιασμό και προσδιορισμό, που εξετάζουν τις πτυχές συμβατότητας και ολοκλήρωσης.
- Ανάλυση αποτυχίας και μέθοδοι δοκιμής, κατάλληλες για να εξασφαλίσουν την ανοχή σε σφάλματα στο συνολικό σύστημα.

## 2.2 Εικόνα Συστήματος

Ένα σκάφος ανοικτής θαλάσσης, στην προκειμένη περίπτωση ένα εξάρτημα γεώτρησης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1,



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα διαφόρων συστημάτων και εξαρτημάτων σε μία μεγάλη, ενσωματωμένη μονάδα (Courtesy ABB Marine).

μπορεί να περιλαμβάνει τα ακόλουθα υποσυστήματα:

- Συστήματα ισχύος.
- Θαλάσσιο σύστημα ελέγχου ή αυτοματοποιημένο σύστημα.



- Τα συστήματα εντοπισμού θέσης περιλαμβάνουν σύστημα δυναμικής τοποθέτησης (DP) για την αυτόματη διατήρηση σταθμών και τη χαμηλή ταχύτητα ελιγμών των ελεύθερων πλωτών σκαφών ή την προσανατολισμένη θέση αγκυροβολίου (PM) για αγκυροβολημένα πλοία. Αισθητήρες και συστήματα αναφοράς θέσης. Εξαρτήματα, λογισμικό και αισθητήρες για την παροχή πληροφοριών και/ή τις διορθώσεις που είναι απαραίτητες για να δώσουν πχ την ακριβή κίνηση του σκάφους, τη θέση και τις μετρήσεις πορείας.
- Αυτόματα συστήματα πλεύσης και ναυτικό σύστημα που περιλαμβάνει αυτόματο πιλότο, ραντάρ, αυτόματο σύστημα αναγνώρισης (AIS) και σύστημα πλοήγησης (GPS) για την αυτόματη διατήρηση της πορείας και την αλλαγή της πορείας για τις λειτουργίες διαμετακόμισης.
- Συστήματα χειριστηρίου για χειροκίνητο έλεγχο του συστήματος προώθησης για την τοποθέτηση του σκάφους στο κύμα, κυματισμό και στροφή/κατεύθυνση. Συχνά η αυτόματη λειτουργία ελέγχου της πορείας περιλαμβάνεται. Ένας θα πρέπει να παρατηρήσει ότι ο χειριστής δεν ελέγχει κάθε προώθηση ξεχωριστά. Ο χειριστής δίνει εντολή σε μία επιθυμητή προώθηση στο κύμα, κυματισμό και στροφή. Έπειτα, ο αλγόριθμος κατανομής ώθησης χαρτογραφεί την επιθυμητή προώθηση στο κύμα, κυματισμό και στροφή σε μεμονωμένα σημεία ώθησης του ενεργοποιημένου προωθητή.
- Το σύστημα ελέγχου χειροκίνητου προωθητήρα περιλαμβάνει ξεχωριστό έλεγχο κάθε προωθητήρα.
- Το σύστημα προώθησης και προωθητήρα περιλαμβάνει όλα τα εξαρτήματα και συστήματα που είναι απαραίτητα για την προμήθεια ενός σκάφους με ώθηση για δυναμική τοποθέτηση, ελιγμό και διέλευση. Για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης αναφέρεται στο κεφάλαιο 9.
- Πακέτα εξοπλισμού και συστήματα πχ για γεώτρηση, εκφόρτωση, εργασίες γερανών, παραγωγή πετρελαίου και αερίου.
- Σύστημα αγκυροβόλησης (ισχύει μόνο για σκάφη με αγκυροβόληση). Γενικά ένα σύστημα αγκυροβόλησης αποτελείται από (n) γραμμές που συνδέονται με τη δομή και την οριζόντια κατανομή σε ένα συγκεκριμένο μοτίβο. Στο βυθό οι γραμμές είναι συνδεδεμένες με τις άγκυρες. Τα διαδεδομένα συστήματα αγκυροβόλησης

χρησιμοποιούνται και για τα ημιυποβρύχια αλλά και για τα πλοία με αγκυροβόλιο. Στην τελευταία περίπτωση οι γραμμές άγκυρας συνδέονται με τον πυργίσκο στο πλοίο, ο οποίος μπορεί να περιστραφεί σε σχέση με το πλοίο. Ο αριθμός των γραμμών άγκυρας μπορεί να ποικίλλει τυπικά από 6 έως 12. Το μήκος των γραμμών άγκυρας ρυθμίζεται με βαρούλκα και καθορίζει την προέκταση και συνεπώς την ακαμψία του συστήματος πρόσδεσης.

- Συστήματα ασφαλείας.
- Βοηθητικά συστήματα, όπως θέρμανση, εξαερισμός και κλιματισμός (HVAC), ψύξη, υδραυλικά συστήματα, κλπ.

## 2.3 Σύστημα Ισχύος

Το σύστημα ισχύος περιλαμβάνει όλες τις μονάδες που είναι απαραίτητες για την τροφοδοσία του σκάφους με ισχύ. Τα συστήματα παραγωγής και διανομής ενέργειας χωρίζονται στα ακόλουθα κύρια μέρη, για λεπτομέρειες βλέπε Κεφάλαιο 3. Τα συστήματα παραγωγής και διανομής ισχύος χωρίζονται στα επόμενα κύρια μέρη (Hansen [105]):

- Παραγωγή ενέργειας με άριστης ποιότητας κινητήρα και γεννήτριες. Στα εμπορικά πλοία, οι βασικοί κινητήρες είναι συνήθως πετρελαιοκινητήρες μέσης ταχύτητας, εξαιτίας της υψηλής απόδοσης και του κόστους της απόδοσης. Οι αεροστρόβιλοι, καθώς επίσης και οι ατμοστρόβιλοι, χρησιμοποιούνται σε μερικές εφαρμογές πλοίων χάρη στα πλεονεκτήματά τους σε βάρος και μέγεθος. Υπάρχει έντονη έρευνα και ανάπτυξη στο πεδίο του LNG και των εφικτών κυψελών καυσίμων, όπου στο μέλλον μπορεί να εφαρμοστεί σε ευρύτερη κλίμακα απ' ό,τι σήμερα. Επί προσθέτως, οι συνδυασμένες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής εξετάζονται επίσης περισσότερο.
- Ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με κεντρικούς πίνακες και πίνακες διανομής. Το σύστημα διανομής τυπικά χωρίζεται σε δύο, τρία ή τέσσερα τμήματα, με τη δυνατότητα να συνδέουν και να χωρίζουν τα τμήματα χρησιμοποιώντας διαύλους δεσμών ή τροφοδοτικούς διαύλους. Με κατάλληλη προστασία του συστήματος και επιχειρησιακή φιλοσοφία, τα συστήματα αυτά ενδέχεται να έχουν την ευελιξία να λειτουργούν με κοινό τρόπο, συνδέοντας τη λειτουργία για βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας σε κανονικές λειτουργίες, καθώς απομονώνει τα ελαττωματικά τμήματα του συστήματος και αποκτά το σχεδιαζόμενο πλεονασμό χωρίς απώλειες

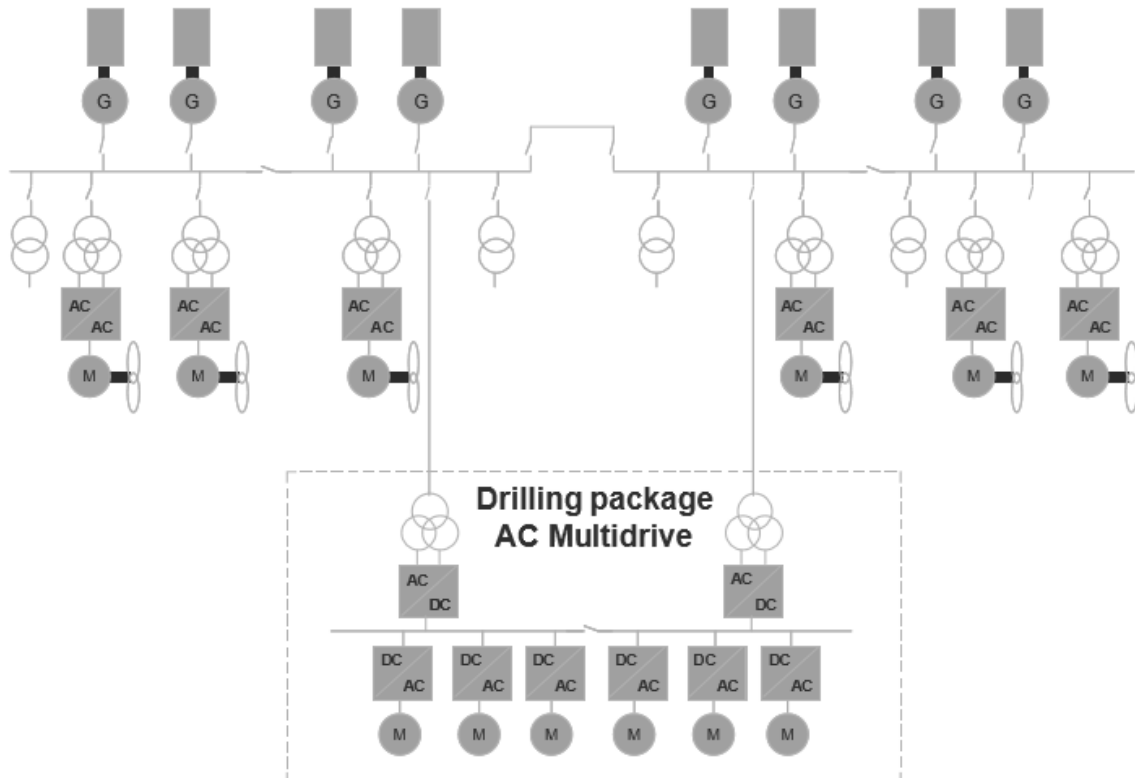
ευελιξίας ή δυνατότητα διατήρησης του σταθμού με αυτόματο διαχωρισμό και διαχωρισμό του συστήματος.

- Μετασχηματιστές για τροφοδοσία εναλλασσόμενων επιπέδων τάσης σε πίνακες κεντρικής ή χαμηλής τάσης και κέντρα ελέγχου κινητήρα.
- Αδιάλειπτη παροχή ισχύος του ευαίσθητου εξοπλισμού και των συστημάτων αυτοματισμού.
- Περιστροφικοί μετατροπείς για μετατροπή συχνότητας και καθαρό τροφοδοτικό.
- Καλωδίωση, συμπεριλαμβανομένης της δρομολόγησης καλωδίων και του διαχωρισμού.

Σε πολλά πλοία υπάρχει ένα σκάφος ή ένα σύστημα επεξεργασίας εγκαταστάσεων, το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, τέτοια συστήματα μπορεί να είναι:

- Τα φορτία ξενοδοχείου πχ για κρουαζιερόπλοια και επιβατηγά πλοία.
- Συστήματα γερανού και βαρούλκο, πχ για σκάφη υποστήριξης.
- Συστήματα γεώτρησης, πχ για γεωτρύπανο γεώτρησης.
- Παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, για FPSOs.
- Συστήματα χειρισμού φόρτωσης φορτίου, για φορτηγά πλοία και δεξαμενόπλοια.

Παρόλο που αυτά τα συστήματα ενδέχεται να μην έχουν άμεσα κριτική για την ασφαλή ικανότητα προς ελιγμό του πλοίου, μπορεί να υπάρξουν σοβαρές συνέπειες λόγω έλλειψης ελέγχου, μαζί με ανησυχία για ασφάλεια, περιβαλλοντικές και οικονομικές συνέπειες. Ως εκ τούτου, η μείωση και ο διαχωρισμός στη διαδικασία και τα συστήματα αυτοματισμού μπορεί να είναι εξίσου σημαντικά όπως στην ηλεκτρική ισχύ και στο σύστημα προώθησης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την περιττή διαμόρφωση ενός συστήματος γεώτρησης, με διπλή ανεξάρτητη παροχή ενέργειας και πιθανότητα διαχωρισμού σε ανεξάρτητα τμήματα είτε σε κανονικές συνθήκες είτε σε ελαττωματικές, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Μονογραμμικό διάγραμμα ενός συστήματος γεώτρησης.

## 2.4 Σύστημα Προώθησης

Το σύστημα προώθησης αποτελείται συνήθως από άριστης ποιότητας κινητήρες όπως κινητήρες ντίζελ, γεννήτριες, κιβώτια ταχυτήτων και προωθητήρες. Ένας προωθητήρας καθορίζεται εδώ ως η γενική έκφραση για μια μονάδα έλικα. Ένα πλοίο μπορεί να είναι εξοπλισμένο με διαφορετικούς τύπους προωθητήρων. Τα συμβατικά πλοία έχουν συνήθως μια κύρια μονάδα προώθησης που βρίσκεται στην πρόμνη. Παραδοσιακά, χρησιμοποιείται ο άξονας προώθησης με ρυθμιζόμενο πηδάλιο ή οι σταθεροί έλικες πηδαλίου, με πηδάλια για να κατευθύνουν την ώθηση. Άλλος κοινός τύπος είναι ο προωθητής σήραγγας που είναι μια έλικα μέσα σε μια σήραγγα που διέρχεται από το σκάφος και παράγει μια εγκάρσια δύναμη σταθερής κατεύθυνσης. Ο τρίτος τύπος είναι ο αζιμούθιος (περιστρεφόμενος) προωθητήρας, ο οποίος μπορεί να παράγει ώθηση προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Ενώ οι κύριοι και οι προωθητήρες σήραγγας έχουν σταθερές κατευθύνσεις δύναμης, η κατεύθυνση του προωθητή αζιμούθιου μπορεί να αλλάξει, είτε χειροκίνητα από το χειριστή είτε αυτόματα από το σύστημα ελέγχου θέσης. Τα πηδάλια σε συνεργασία με κύριες προπέλες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ενεργά στο σύστημα τοποθέτησης για να παράγουν μια εγκάρσια δύναμη

που ενεργεί στην πρύμνη. Στα συστήματα τοποθέτησης ο κύριος σκοπός είναι ο έλεγχος της δύναμης του προωθητήρα. Ωστόσο, δεδομένου ότι η προκύπτουσα δύναμη δεν μπορεί να μετρηθεί κατευθείαν, είναι σύνηθες ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του προωθητήρα (PRM έλεγχος στροφών), η κλίση των πτερυγίων προπέλας (έλεγχος κλίσης) ή αυτά σε συνεργασία (ενοποιημένος έλεγχος). Οι σερβομηχανισμοί για τις συσκευές προώθησης πρέπει να είναι σχεδιασμένοι για να δίνουν ακριβής και γρήγορες απαντήσεις. Αυτό, συχνά, αναφέρεται ως έλεγχος προώθησης χαμηλού επιπέδου, το οποίο θα εξεταστεί με λεπτομέρεια στην ενότητα 9.

## 2.5 Θαλάσσιο Σύστημα Αυτοματισμού

### 2.5.1 Γενικά

Στη ναυτιλία, υπάρχουν δύο κύριες κατευθύνσεις λύσεων για συστήματα αυτοματισμού:

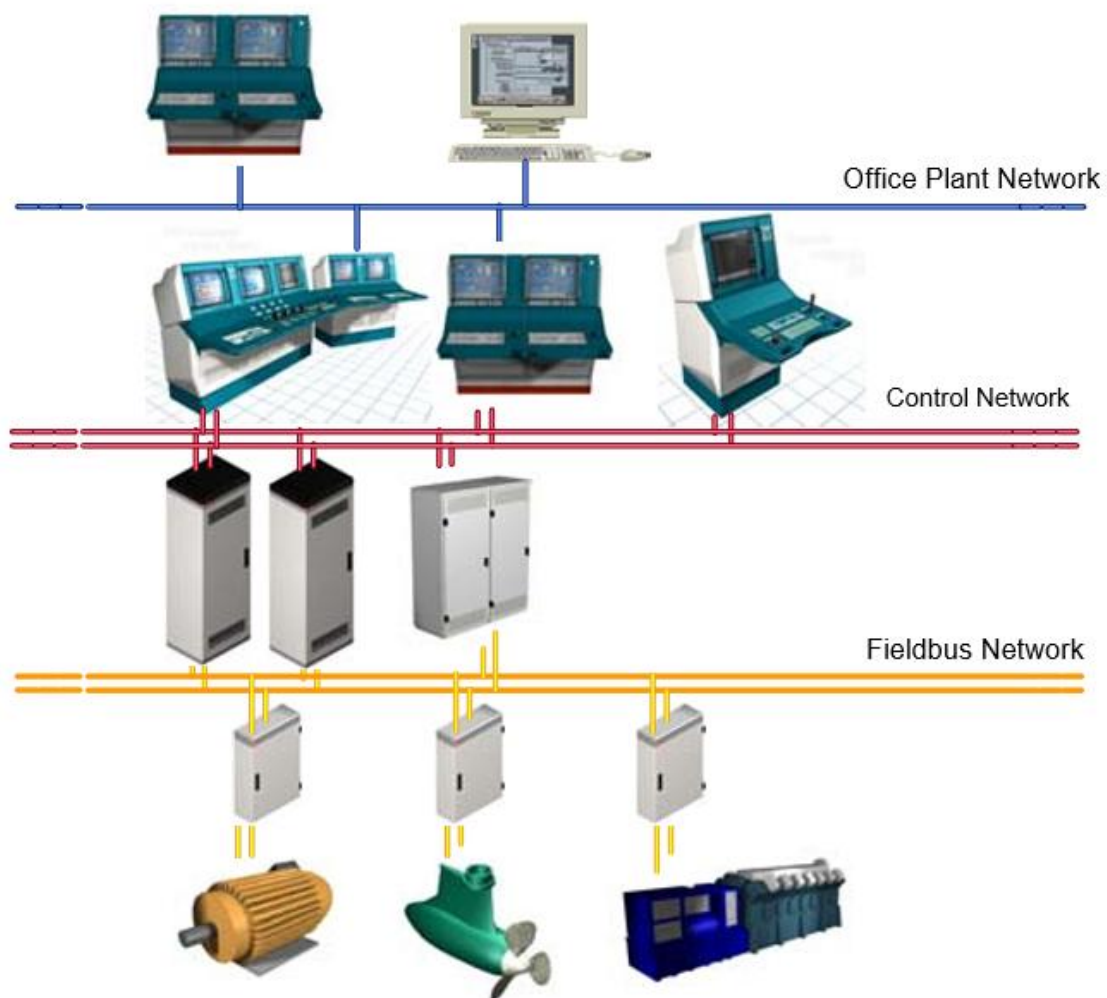
- Ολοκληρωμένα συστήματα αυτοματισμού.
- Αυτόνομα συστήματα αυτοματισμού.

Οι δύο διαφορετικές κατηγορίες λύσεων βρίσκονται στα περισσότερα είδη πλοίων. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι πολύπλοκες λειτουργίες και τα καθήκοντα αντιμετωπίζονται καλύτερα από τις ολοκληρωμένες λύσεις, είναι πιο συχνό να βρίσκονται στα πλοία με σύνθετες και προηγμένες εγκαταστάσεις προώθησης και συντήρησης σταθμών. Στη συνέχεια ακολουθεί το ολοκληρωμένο σύστημα αυτοματισμού.

Το θαλάσσιο σύστημα αυτοματισμού ή ελέγχου πλοίων περιλαμβάνει:

- Λειτουργίες ελέγχου για παράδειγμα έλεγχο HVAC, έλεγχο φορτίου και έρμα, διακοπή έκτακτης ανάγκης και ανίχνευση πυρκαγιάς και αερίου, έλεγχο εκφόρτωσης, έλεγχο κινητήρα κτλ.
- Σύστημα διαχείρισης ενέργειας (PMS) για χειρισμό γεννητριών, πρόληψη διακοπής ενέργειας, περιορισμό ισχύος, κατανομή φορτίου και απόρριψη φορτίου. Για προηγμένα σκάφη μπορεί να χρησιμοποιηθούν πιο εξελιγμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας για έξυπνο σχεδιασμό και κατανομή ενέργειας.

- Ο χειριστής έρχεται σε επαφή με το σύστημα αυτοματισμού μέσω του Ανθρώπου-Μηχανή Διασύνδεσης (HMI) με συστήματα απεικόνισης και πίνακες χειριστή, συχνά σημειωμένος ως χειριστής σταθμών.
- Κεντρικοί υπολογιστές με κλιμακούμενη επεξεργασία CPU και χωρητικότητες I/O, συχνά σημειωμένες ως ελεγκτές ή σταθμοί ελέγχου διαδικασίας (Σχήμα 2.3)



Σχήμα 2.3: Μονάδα αυτοματισμού.

- Κατανεμημένοι υπολογιστές ή PLC, τυπικά με τοπικό έλεγχο και διασυνδέσεις για επεξεργασία και σε κεντρικούς υπολογιστές.
- Δίαυλοι επικοινωνίας σε διαφορετικά επίπεδα ελέγχου.
- Σχετική καλωδίωση, διαχωρισμός και δρομολόγηση καλωδίων.

Με τη σημερινή τυποποίηση στην επικοινωνία στα συστήματα αυτοματισμού, είναι σχετικά εύκολη η σύνδεση διαφόρων υποσυστημάτων σε ένα σύστημα δικτύου επικοινωνίας. Η εξέλιξη των συστημάτων διασύνδεσης σε τέτοια δίκτυα, έχει σήμερα αναπτυχθεί ως διεθνές πρότυπο πολλών νέων κτιρίων. Πρόκειται για μια πρόκληση των σχεδιαστών, να γίνει διάκριση ανάμεσα στη βασική και τη σημαντική επικοινωνία, και να καθοριστεί το σωστό επίπεδο πλεονασμού και αλληλεξάρτησης των υποσυστημάτων.

### **2.5.2 Δίκτυο Δεδομένων και Σταθμοί Επεξεργασίας**

Στα μεγαλύτερα συστήματα η ισχύς, ο αυτοματισμός και τα διάφορα μέρη του συστήματος εντοπισμού είναι συνδεδεμένα με δίκτυα δεδομένων και τα συστήματα ελέγχου θέσης εφαρμόζονται στους τοπικούς σταθμούς επεξεργασίας. Είναι σημαντικό ότι αυτά τα συστήματα πληρούν το απαραίτητο επίπεδο πλεονασμού και επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε το σύστημα εντοπισμού να είναι αξιόπιστο. Σήμερα, έχει γίνει δεκτό να γίνει ενσωμάτωση όλων των συστημάτων αυτοματισμού σε ένα κοινό δίκτυο εγκαταστάσεων (Σχήμα 2.3).

### **2.5.3 Σταθμοί Χειριστών και ΗΜΙ**

Ο σύνδεσμος του χειριστή με το σύστημα εντοπισμού θέσης γίνεται μέσω του Ανθρώπου – Μηχανή Διασύνδεσης (ΗΜΙ) στους σταθμούς χειριστών. Στους σταθμούς λειτουργίας είναι δεκτό να κανονιστεί ένα σύστημα χειριστηρίου, δίνοντας έτσι στο χειριστή την ευκαιρία να κατευθύνει απευθείας τις δυνάμεις του προωθητήρα στο κύμα και στον κυματισμό και να κυριαρχεί στιγμιαία. Το ΗΜΙ οφείλει να είναι φιλικό προς το χρήστη και θα πρέπει να παρουσιάζονται επαρκής πληροφορίες για το χειριστή, έτσι ώστε να μπορούν να λαμβάνονται σωστές αποφάσεις.

### **2.5.4 Πτυχές Ενσωμάτωσης**

Η φυσική ενσωμάτωση που βασίζεται σε τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας, εξασφαλίζει τη συνδεσιμότητα των συσκευών και την ενσωμάτωση των ελεγκτών και των σταθμών χειριστών σε τρία επίπεδα δικτύου (Σχήμα 2.3): Δίκτυο διαύλου επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο σε χαμηλό επίπεδο μεταξύ συσκευών και ελεγκτών, δίκτυο ελέγχου σε πραγματικό χρόνο που συνδέει τους ελεγκτές και τους σταθμούς χειριστών και δίκτυο

εργοστασίου γραφείων σε διάφορα συστήματα γραφείου και συστήματα διαχείρισης πληροφοριών. Το τελευταίο επίπεδο δίνει πρόσβαση για δορυφορική επικοινωνία σε χερσαία γραφεία στους πλοιοκτήτες ή στους πωλητές. Είναι αποδεκτό να χαρακτηρίζουν το σύστημα αυτοματισμού με τον αριθμό του I/Os και χωρίζοντας τις εφαρμογές σε τμήματα χαμηλού και υψηλού τέλους. Για μια γεώτρηση όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, ο αριθμός I/O των σημάτων μπορεί να είναι πάνω από 10-15000. Για ένα συμβατό πλοίο εφοδιασμού ο I/O αριθμός είναι συνήθως μικρότερος από 1500-2000 σήματα.

## 2.6 Δυναμικό Σύστημα Εντοπισμού Θέσης

Στη δεκαετία του 1960 είχαν αναπτυχθεί συστήματα για αυτόματο έλεγχο της οριζόντιας θέσης επιπλέον της πορείας. Τέτοια συστήματα για αυτόματο έλεγχο των τριών οριζόντιων κινήσεων (κύμα, κυματισμός και κίνηση κλίσης) είναι σήμερα γνωστά ως δυναμικά συστήματα εντοπισμού θέσης (DP). Περιγραφή των συστημάτων DP συμπεριλαμβανομένης της πρώιμης ιστορίας μπορεί να βρεθεί στο FAY [74]. Στη δεκαετία του 1960, το πρώτο σύστημα DP χρησιμοποίησε αλγόριθμους ελέγχου PID ενιαίας εισόδου και εξόδου σε συνδυασμό με χαμηλή διέλευση και/ή φίλτρο εγκοπής. Στη δεκαετία του 1970 προτάθηκαν πιο εξελιγμένες μέθοδοι ελέγχου εξόδου βασισμένες σε πολλαπλό βέλτιστο έλεγχο και στη θεωρία φίλτρου Kalman. Αργότερα εφαρμόστηκε και ο μη γραμμικός έλεγχος, βλέπε Κεφάλαιο 8 για λεπτομέρειες.

**Ορισμός 2.1** Ένα σκάφος DP είναι, από τις κοινωνικές τάξεις όπως για παράδειγμα τη *Det Norske Veritas (DNV)* [54], το *Αμερικανικό Γραφείο Ναυτιλίας (ABS)* [3] και το *Lloyd's Register (LRS ή Lloyd's)* [174], καθορισμένο ως ένα σκάφος που διατηρεί αποκλειστικά τη θέση του και την πορεία (σταθερή θέση ή προκαθορισμένη διαδρομή) μέσω ενεργών προωθητών. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με την εγκατάσταση προωθητών σήραγγας επιπρόσθετα στην κύρια προπέλα(-ες) είτε χρησιμοποιώντας αζιμούθιους προωθητές, οι οποίοι μπορούν να παράγουν ώθηση σε διαφορετικές κατευθύνσεις.

Ενώ στα πλοία που χειρίζονται το DP, οι προωθητές είναι η μοναδική πηγή διατήρησης σταθμών, η βοήθεια των προωθητών είναι μόνο συμπληρωματική στο σύστημα πρόσδεσης, στην περίπτωση που ο προωθητής βοηθήσει για τη θέση στα συστήματα πρόσδεσης (PM). Εδώ, το μεγαλύτερο μέρος διατήρησης της θέσης προέρχεται από ένα αναπτυγμένο σύστημα άγκυρας. Σε σοβαρές περιβαλλοντικές συνθήκες, η βοήθεια ώθησης χρησιμοποιείται για να

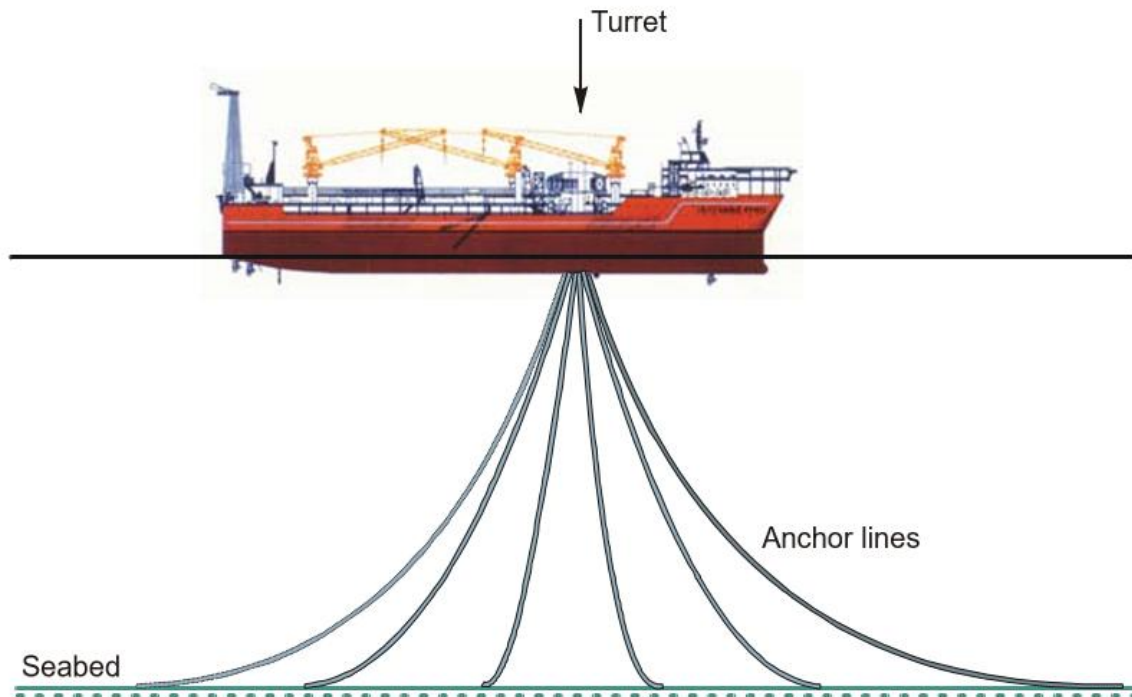


ελαχιστοποιήσει το ταξίδι του πλοίου και την τάση των γραμμών, αυξάνοντας την απόσβεση του ελέγχου ανάδρασης από άποψη ταχύτητας. Για τους πυργίσκους αγκυροβολημένων πλοίων, βλέπε Σχήματα 2.4 και 2.5, χωρίς φυσικές ιδιότητες ανεμοδεικτών, οι προωθητήρες χρησιμοποιούνται επίσης για τον αυτόματο έλεγχο της πορείας, όμοια με τα πλοία που λειτουργούν με DP.



Σχήμα 2.4: Θαλάσσιες διαδικασίες σε υπεράκτια εξερεύνηση πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Σε αυτό το κείμενο, ένα σύστημα εντοπισμού θέσης στη θάλασσα ορίζεται είτε ως ένα δυναμικό σύστημα εντοπισμού θέσης είτε ως ένα σύστημα πρόσδεσης (PM) με υποβοηθούμενη θέση.



Σχήμα 2.5: Αγκυροβολημένος πυργίσκος FPSO.

Τα συστήματα DP έχουν παραδοσιακά εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας, όπου η βασική λειτουργία DP είναι είτε να κρατήσουν μια συγκεκριμένη θέση και να κατευθυνθούν, είτε να κινηθούν αργά από τη μία τοποθεσία στην άλλη. Επιπλέον εξειδίκευσαν λειτουργίες παρακολούθησης για στρώματα καλωδίων και σωλήνων, και λειτουργίες απομακρυσμένων οχημάτων (ROV) είναι πλέον διαθέσιμες. Η παραδοσιακή λειτουργία αυτόματου πιλότου με το πέρασμα των χρόνων έχει εξελιχθεί. Συχνά, η λειτουργία διόρθωσης πορείας είναι διαθέσιμη για τη διόρθωση του φυσικού σημείου ρύθμισης εξαιτίας των περιβαλλοντικών διαταραχών και των παρασυρμών, έτσι ώστε το σκάφος να ακολουθεί μια ευθεία πορεία. Η παρακολούθηση σημείων διέλευσης χρησιμοποιείται όταν ένα σκάφος υποτίθεται ότι ακολουθεί μια προκαθορισμένη πορεία, προκαθορισμένη για παράδειγμα από πολλές συντεταγμένες σημείων. Η τάση σήμερα είναι ότι η τυπική υψηλής ταχύτητας διαδικασία λειτουργικότητας συγχωνεύεται με τη λειτουργικότητα DP, δίνοντας ένα ενοποιημένο σύστημα για όλο το φάσμα ταχυτήτων και τους τύπους λειτουργίας. Θα δοθεί ευκαιρία για περαιτέρω έρευνα σχετικά με τον υβριδικό έλεγχο.

## 2.6.1 Συστήματα Αναφοράς Θέσης και Αισθητήρες

Είναι αποδεκτό να ξεχωρίζουν τις διαφορετικές μετρήσεις που χρησιμοποιούνται από ένα σύστημα εντοπισμού θέσης στη θέση των συστημάτων αναφοράς και των συστημάτων αισθητήρων. Τα πιο συνηθισμένα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την αναφορά θέσης είναι:

- **Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (GNSS):** Το πιο συνηθισμένο σύστημα πλοήγησης που χρησιμοποιείται για θαλάσσια σκάφη είναι το Navstar GPS, το οποίο είναι ένα αμερικάνικο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης με παγκόσμια κάλυψη. Ένα εναλλακτικό σύστημα είναι το Ρωσικό σύστημα Glonass, το οποίο καλύπτει μόνο ορισμένες περιοχές του πλανήτη, βλέπε Parkinson και Spiker [220]. Ένα Ευρωπαϊκό σύστημα, το Galileo, βρίσκεται υπό κατασκευή. Για τις τοπικές επιχειρήσεις είναι τώρα πλέον πιθανό να επιτευχθεί μέτρηση με ακρίβεια χρησιμοποιώντας Διαφορικό Φορέα GPS (CDGPS). Η ανάπτυξη συστημάτων αύξησης ευρείας περιοχής (WAAS) αναμένεται να δώσει μετρητή με ακρίβεια σε ολόκληρους ηπείρους. Όταν χρησιμοποιείται ένα σύστημα δορυφορικής πλοήγησης, πρέπει τουλάχιστον τέσσερις δορυφόροι να είναι ορατοί για να υπολογιστεί μια αξιόπιστη εκτίμηση θέσης (τρεις για την πλοήγηση στη θάλασσα). Εάν το πλοίο διέρχεται σε μια μη τόσο ορατή περιοχή και τα περιττά σήματα δεν είναι διαθέσιμα, θα υπάρχει απώλεια της μέτρησης της θέσης. Άλλες αιτίες για τις υποβαθμισμένες μετρήσεις θέσεων (ή στη χειρότερη περίπτωση απώλεια ή μέτρηση) είναι οι ιονοσφαιρικές διαταραχές αντανάκλασης πάνω στην επιφάνεια νερού κλπ. Για το DGPS, η ακρίβεια είναι τυπική σε ακτίνα ενός μέτρου με 95% πιθανότητα. Πρόσφατα, το παραπλανητικό υποχρεωτικό σήμα (SA) στο σήμα του GPS αφαιρέθηκε έτσι ώστε η ακρίβεια του GPS του ίδιου χωρίς διαφορική διόρθωση να έχει βελτιωθεί δραματικά. Ανάλογα με τις κεραίες και τους δέκτες σημάτων, η τυπική ακρίβεια είναι εντός +/- 10 μέτρα. Αυτό δίνει πρόσβαση για ακόμα πιο αποδοτικό εξοπλισμό πλοήγησης στον τομέα του καθορισμού της θέσης των πλοίων.
- **Συστήματα Αναφοράς Υδροακουστικής Θέσης (HPR):** Χρησιμοποιώντας έναν ή αρκετούς αναμεταδότες τοποθετημένους σε σταθερή θέση στο βυθό της θάλασσας και έναν ή περισσότερους μορφοτροπείς τοποθετημένους κάτω από τον ύφαλο, μετράται η θέση του πλοίου. Η ακρίβεια αυτών των συστημάτων εξαρτάται από το βάθος του νερού και την οριζόντια απόσταση ανάμεσα στον αναμεταδότη και το

μορφοτροπεία. Υπάρχουν διαφορετικές αρχές για την εκτέλεση μετρήσεων, όπου τα πιο κοινά που χρησιμοποιούνται είναι πολύ σύντομα επίπεδα αναφοράς (SBL), πάρα πολύ σύντομα επίπεδα αναφοράς (S/USBL) ή μακρά επίπεδα αναφοράς (LBL).

- **Τεντωμένο καλώδιο:** Ένα σύστημα τεντωμένου καλωδίου χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της σχετικής θέσης ενός πλωτού σκάφους σε κατάσταση ηρεμίας. Αυτό το σύστημα αποτελείται από ένα βαρύ φορτίο που βρίσκεται στον πυθμένα της θάλασσας. Το φορτίο είναι συνδεδεμένο στο σκάφος με ένα καλώδιο σύρμα ή αλυσίδα βαρέων μετάλλων, το οποίο διατηρείται σε συνεχή τάση χρησιμοποιώντας ένα βαρούλκο πάνω στο σκάφος. Επιπλέον, οι γωνίες στο πάνω και κάτω μέρος του σύρματος καθώς και το μήκος του σύρματος είναι μετρημένα. Ως εκ τούτου, η σχετική θέση (x, y, z) μπορεί να υπολογιστεί με την επίλυση τριών εξισώσεων με τρεις αγνώστους.

Άλλα συστήματα αναφοράς θέσης μπορούν να είναι συστήματα μικροκυμάτων (ARTEMIS, MICRORAGER, MICRO FIX), συστήματα ραδιοσυχνοτήτων (SYLEDIS), οπτικά συστήματα (δέσμες λέιζερ) και συστήματα μέτρησης θέσης γωνίας ανύψωσης. Το τελευταίο σύστημα βασίζεται σε όργανα σε θαλάσσιο θάλαμο ανόδου που συνδέονται με το σκάφος κατά την εκτέλεση εργασιών γεώτρησης.

Τα συστήματα αισθητήρων μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Γυροσκοπική και/ή μαγνητική πυξίδα, η οποία μετράει την πορεία του σκάφους.
- Κατακόρυφη μονάδα αναφοράς (VRU), η οποία μετράει στο ελάχιστο το σκάφος να σηκώνεται, να παίρνει κλίση και να κάνει κινήσεις κλυδωνισμού. Οι γωνιακές ταχύτητες είναι επίσης συχνά διαθέσιμες. Μία από τις κύριες λειτουργίες του VRU είναι να ρυθμίζει τις μετρήσεις θέσης που παρέχονται από το GPS, τα συστήματα αναφοράς της υδροακουστικής θέσης (HPR) κλπ για τις κινήσεις κλίσης και κλυδωνισμού. Για τις λειτουργίες βαθέων υδάτων DP, η ακρίβεια των σημάτων κλίσης και κλυδωνισμού πρέπει να είναι υψηλή παρέχοντας ακριβής μετρήσεις θέσης HPR.
- Ένα IMU τυπικά περιέχει γυροσκόπια και όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης σε τρεις άξονες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν τις επιταχύνσεις του σταθερού σώματος σε κύμα, ταλάντευση και ανύψωση, τους γωνιακούς ρυθμούς σε κλίση, ταλάντευση και κλυδωνισμό και τις αντίστοιχες γωνίες Euler (Britting

[35], Titterton και Weston [313]). Το IMU μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα φίλτρο (παρατηρητή) με μετρήσεις DGPS και HPR για παράδειγμα, για να παράγει ακριβής εκτιμήσεις ταχυτήτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις μόνο οι IMU Euler γωνίες χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το DGPS. Αυτή είναι μια ελάχιστη διαμόρφωση από τις Euler γωνίες που απαιτούνται για να μεταφερθεί η θέση GPS, που μετράται και αντιστοιχεί στην κεραία GPS, κάτω από το πλοίο στο σταθερό σύστημα συντεταγμένων που βρίσκεται συνήθως στην κεντρική γραμμή του πλοίου.

- Αισθητήρες ανέμου που μετράνε την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου σε σχέση με το σκάφος.
- Ανιχνευτές βύθισης (χρησιμοποιούνται για σκάφη τα οποία λειτουργούν σε ευρύ φάσμα ρευμάτων).
- Περιβαλλοντικοί αισθητήρες: αισθητήρες κύματος (σημαντικό ύψος κύματος, κατεύθυνση, συχνότητα αιχμής), αισθητήρες ρεύματος (ταχύτητα και κατεύθυνση στην επιφάνεια της θάλασσας και σε διαφορετικά βάθη). Οι περιβαλλοντικοί αισθητήρες δεν αποτελούν απαίτηση για μία ξεχωριστή κατηγορία. Αυτοί οι αισθητήρες είναι αρκετά συνηθισμένοι στις περισσότερες εγκαταστάσεις ανοικτής θαλάσσης.
- Άλλοι αισθητήρες που εξαρτώνται από τον τύπο λειτουργίας, για παράδειγμα για τα στρώματα σωλήνων, τάση είναι επίσης να μετράται ένα σύστημα που χρησιμοποιείται από το DP σύστημα.

Σε πολλές εγκαταστάσεις είναι διαθέσιμες περιττές μετρήσεις και ο αριθμός και τα είδη των απαιτούμενων μετρήσεων καθορίζονται από ορισμένους κανόνες κλάσης, βλέπε για παράδειγμα DNV [54]. Οι περιττές μετρήσεις αυξάνουν την ασφάλεια και τη διαθεσιμότητα του συστήματος εντοπισμού θέσης.

Η πορεία του σκάφους μετράται συνήθως από ένα ή περισσότερα γυροσκόπια, που είναι δυναμικά ακριβή. Κατά τη διάρκεια των λειτουργιών ταχείας περιστροφής, ωστόσο, τα γυροσκόπια θα παράγουν μία μετατόπιση σταθερής κατάστασης, η οποία σταδιακά μειώνεται στο μηδέν όταν η πορεία είναι ξανά σταθερή. Χρησιμοποιώντας δύο κεραίες GPS, η πορεία μπορεί να μετρηθεί ακόμα περισσότερο με ακρίβεια, χωρίς την πλεούμενη επίδραση. Στην περίπτωση των αγκυροβολημένων πλοίων, οι μετρήσεις του μήκους γραμμής και της τάσης είναι συνήθως συνδεδεμένες με το PM σύστημα ελέγχου. Οποιοδήποτε σύστημα

τοποθέτησης απαιτεί μέτρηση της θέσης τους σκάφους και της πορείας. Οι αισθητήρες ανέμου, που μετρούν την ταχύτητα του ανέμου και τη σχετική κατεύθυνση, χρησιμοποιούνται συνήθως για τον έλεγχο της κίνησης του ανέμου. Στα περισσότερα εμπορικά συστήματα, οι μετρήσεις της ταχύτητας του κύματος και της ταλάντευσης, δεν είναι διαθέσιμες με επαρκή ακρίβεια και πρέπει να εκτιμώνται εκείνη τη στιγμή. Ένας κανόνας καθοδήγησης από το DNV [54] είναι ότι η ακρίβεια του δεδομένου αναφοράς θέσης πρέπει γενικά να είναι σε μια ακτίνα 2% του βάθους του νερού για τα συστήματα πυθμένα και σε μια ακτίνα 3 μέτρων για τα συστήματα επιφάνειας.

Μια ελάχιστη διαμόρφωση του αισθητήρα και της πλοήγησης για ένα σύστημα DP, αποτελείται τουλάχιστον από ένα σύστημα αναφοράς θέσης, μία πυξίδα, ένα VRU για μέτρηση της κλίσης και της ταλάντευσης και έναν αισθητήρα ανέμου. Ο πλεονασμός του συστήματος DP μπορεί φυσικά να αυξηθεί με πολλαπλές συσκευές μέτρησης. Ωστόσο, ένα θα πρέπει επίσης να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας συστήματα βασισμένα σε διαφορετικές αρχές μέτρησης, δίνοντας πλήρη πλεονασμό όχι μόνο στη διαμόρφωση του εξοπλισμού.

Η τάση σήμερα, είναι η ενοποίηση ανάμεσα στα συστήματα αισθητήρων και στα συστήματα αναφοράς θέσης. Τα τελευταία χρόνια, η τιμή των μονάδων ακριβούς αδρανειακής κίνησης (IMUs) έχει μειωθεί. Αυτή η τάση ανοίγει για την ολοκλήρωση των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης (τα οποία είναι βασισμένα στις μονάδες αισθητήρων IMU) και άλλων συστημάτων αναφοράς θέσης π.χ. GPS.

## 2.6.2 Τρόποι Λειτουργίας

Οι λειτουργίες ελέγχου DP και PM, είναι στενά συνδεδεμένες με τους βαθμούς ελευθερίας (DOF) κύματος, κυματισμού και κλίσης, η οποία μπορεί να θεωρηθεί σαν ανεξάρτητη από την πραγματική διαμόρφωση του πηδαλίου, εφόσον υπάρχει αρκετή ικανότητα ώθησης για την εκπλήρωση της δύναμης και των απαιτήσεων της στιγμής. Οι διάφοροι DOF μπορούν να ελέγχονται μεμονωμένα στους ακόλουθους τρόπους λειτουργίας:

- **Χειροκίνητος Έλεγχος:** Χρησιμοποιώντας ένα χειριστήριο και ένα διακόπτη περιστροφής, ο χειριστής του πλοίου μπορεί να δημιουργεί σημεία ισχύος σε κύμα και κυματισμό και ένα σημείο αναφοράς σε στιγμή κλίσης για χειροκίνητο έλεγχο του πλοίου.

- **Έλεγχος Απόσβεσης:** Η ανατροφοδότηση παράγεται από εκτιμώμενες ταχύτητες σκαφών χαμηλής συχνότητας και ο στόχος είναι να ρυθμιστεί το πλοίο στο συγκεκριμένο άξονα προς το μηδέν. Αυτός ο τρόπος είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμος για αγκυροβολημένα πλοία, όπου η αποτελεσματική απόσβεση θα μειώσει τις πιθανές μεγάλες ταλαντευτικές κινήσεις, που βιώνουν κατά την περίοδο συντονισμού του αγκυροβολημένου πλοίου, και έτσι θα μειώνεται το άγχος στο σύστημα πρόσδεσης. Η απόσβεση είναι επίσης χρήσιμη στη DP απόκτηση μιας ομαλής μετάβασης μεταξύ της ταχύτητας μετάβασης και των λειτουργιών σταθερής θέσης.
- **Έλεγχος Σημείου Αναφοράς:** Η ανάδραση παράγεται και από τις δύο μαζί εκτιμώμενες ταχύτητες χαμηλής συχνότητας και τη γωνία θέσης/κλίσης. Ο στόχος είναι να διατηρήσει τον πραγματικό άξονα στο καθορισμένο σημείο αναφοράς ή πορείας.
- **Έλεγχος Παρακολούθησης:** Το σκάφος παρακολουθεί μια τροχιά αναφοράς που υπολογίζεται από την παλιά στην καινούρια θέση ή την καθορισμένη πορεία.

Η πιο συνηθισμένη λειτουργία DP, είναι φυσικά ο καθορισμός σημείου ελέγχου και στους τρεις άξονες, που συχνά αναφέρεται ως διατήρηση σταθμού. Άλλοι, πλήρως αυτόματα τρόποι λειτουργίας μπορούν να είναι ο σταθμός που διατηρεί τη βέλτιστη τοποθέτηση του καιρού και η απόσβεση του κυλίνδρου. Στην πρώτη περίπτωση, το πλοίο αυτόματα τείνει προς την πορεία που ελαχιστοποιείται η επίδραση των περιβαλλοντικών φορτίων. Στην τελευταία περίπτωση, η κίνηση της κλίσης και της ταλάντευσης καταστέλλεται από την κατάλληλη δράση των συστατικών της οριζόντιας ώθησης. Ένας συνδυασμός ανάμεσα στους διάφορους τρόπους είναι κοινός, π.χ. η ημιαυτόματη λειτουργία όπου το χειριστήριο χρησιμοποιείται για χειροκίνητο έλεγχο κύματος και κυματισμού, ενώ η πορεία ελέγχεται αυτόματα. Άλλες ειδικές DP λειτουργίες υπάρχουν για λειτουργίες παρακολούθησης όπως η τοποθέτηση καλωδίων και σωλήνων, ROV λειτουργίες κλπ.

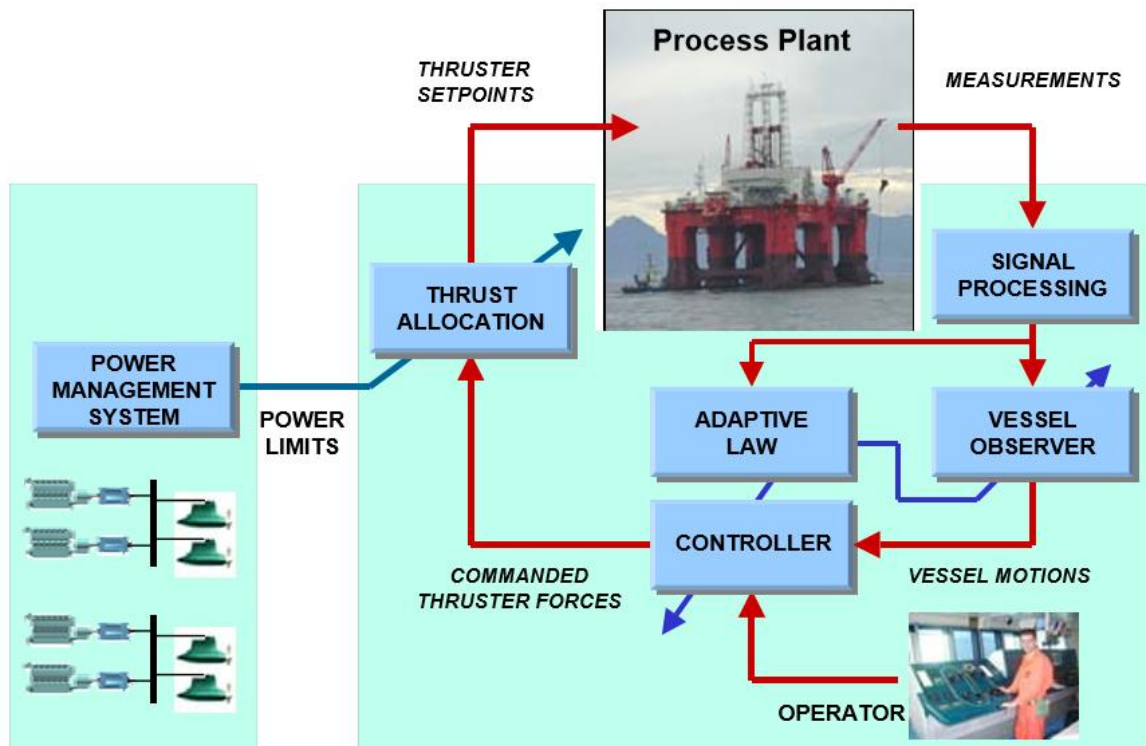
Ο συνδυασμός του ελέγχου απόσβεσης σε κύμα και κυματισμό και του ελέγχου του σημείου αναφοράς της πορείας, χρησιμοποιείται συχνά σε PM συστήματα ειδικά σε κακές καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, το σκάφος θα τείνει σε μια θέση ισορροπίας όπου οι μέσες περιβαλλοντικές δυνάμεις αντισταθμίζονται από τις δυνάμεις πρόσδεσης. Υποθέτοντας ένα κατάλληλο σημείο αναφοράς πορείας, αυτή η θέση ισορροπίας θα είναι βέλτιστη σε σχέση με τη χρήση ώθησης και την κατανάλωση καυσίμου. Για πλοία με αγκυροβόλιο, ο αυτόματος έλεγχος πορείας είναι συχνά η πιο σημαντική λειτουργία. Διατηρώντας την πορεία με τον



καλύτερο δυνατό τρόπο ενάντια στον καιρό, η επίδραση των περιβαλλοντικών φορτίων, και συνεπώς το άγχος στο σύστημα πρόσδεσης, θα ελαχιστοποιηθούν.

### 2.6.3 Λειτουργικότητα και Ενότητες

Οι διάφοροι DP πωλητές μπορεί να διαφέρουν στις μεθόδους σχεδιασμού. Ωστόσο, η βασική DP λειτουργικότητα, είναι περισσότερο ή λιγότερο βασισμένη στις ίδιες αρχές, όπως περιγράφεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Μονάδες DP SW ενσωματωμένες με το σύστημα διαχείρισης ισχύος.

### Επεξεργασία σήματος

Όλα τα σήματα από τους εξωτερικούς αισθητήρες θα πρέπει να αναλυθούν και να ελεγχθούν διεξοδικά σε ξεχωριστό σημείο επεξεργάζοντας τον τρόπο. Αυτό περιλαμβάνει τον έλεγχο των μεμονωμένων σημάτων και του σήματος του αισθητήρα που εκλέγονται και σταθμίζονται όταν οι περιττές μετρήσεις είναι διαθέσιμες. Η επαλήθευση της ποιότητας του μεμονωμένου σήματος πρέπει να περιλαμβάνει δυνάμεις για εύρος και διακύμανση σήματος, παγωμένα σήματα και άγρια σημεία σήματος. Εάν ανιχνεύεται ένα εσφαλμένο σήμα, η



μέτρηση απορρίπτεται και δε χρησιμοποιείται από το σύστημα τοποθέτησης. Τα σταθμισμένα σήματα, από κάθε ομάδα αισθητήρων, δεν πρέπει να περιέχουν βήματα ή ασυνέχειες όταν χρησιμοποιούνται περαιτέρω στο σύστημα, εξασφαλίζοντας μια ασφαλή λειτουργία.

### **Παρατηρητής σκάφους**

Το φιλτράρισμα και η εκτίμηση της κατάστασης είναι σημαντικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος εντοπισμού θέσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις σήμερα, ακριβής μετρήσεις των ταχυτήτων του πλοίου δεν είναι διαθέσιμες. Ως εκ τούτου, οι εκτιμήσεις των ταχυτήτων πρέπει να υπολογίζονται από θορυβώδη θέση και οι μετρήσεις πορείας μέσω ενός παρατηρητή. Η θέση και οι μετρήσεις πορείας είναι κατεστραμμένες με έγχρωμο θόρυβο, που προκαλείται κυρίως από άνεμο, κύματα και ρεύματα ωκεανών. Ωστόσο, μόνο οι αργά μεταβαλλόμενες διαταραχές πρέπει να εξουδετερώνονται από το σύστημα προώθησης, ενώ η κίνηση ταλάντωσης εξαιτίας των κυμάτων (κύματα φορτίου πρώτης τάξης) δεν πρέπει να εισέλθει στο κύκλωμα ανάδρασης. Η αποκαλούμενη διαμόρφωση συχνότητας κύματος των προωθητήρων θα προκαλέσει περιττή φθορά του εξοπλισμού προώθησης. Στον παρατηρητή χρησιμοποιούνται οι επονομαζόμενες τεχνικές φιλτραρίσματος κύματος, οι οποίες διαχωρίζουν τη θέση και τις μετρήσεις πορείας σε τμήμα χαμηλής συχνότητας (LF) και σε συχνότητα κύματος (WF). Η εκτιμώμενη LF θέση, η πορεία και οι ταχύτητες χρησιμοποιούνται από τον ελεγκτή ανάδρασης. Ο παρατηρητής, χρειάζεται επίσης, όταν η θέση ή οι μετρήσεις πορείας δεν είναι προσωρινά διαθέσιμες. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται νεκρός υπολογισμός και σε αυτή την περίπτωση οι προβλεπόμενες εκτιμήσεις από τον παρατηρητή χρησιμοποιούνται στο βρόχο ελέγχου. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του παρατηρητή, είναι ότι εκτιμά τα μη μοντελοποιημένα και μη μετρημένες αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις και στιγμές, κυρίως εξαιτίας φορτίων κύματος δεύτερης τάξης και ρεύματος ωκεανού.

### **Λογικές ελεγκτή**

Το σύστημα εντοπισμού θέσης μπορεί να λειτουργήσει σε διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας, βλέπε Ενότητα 2.6.2. Κάθε είδος χειρισμού της κατάστασης του εσωτερικού σήματος και των μεταβάσεων του τρόπου λειτουργίας, προσαρμογής μοντέλου κλπ, ελέγχεται από τη λογική του ελεγκτή. Αυτή περιλαμβάνει ομαλές μεταβάσεις ανάμεσα στους διάφορους τρόπους λειτουργίας, την έκδοση συναγερμού και προειδοποιήσεων και τις αλληλεπιδράσεις του χειριστή.

## **Νόμος ελέγχου ανατροφοδότησης**

Οι ελεγκτές ελέγχου θέσης είναι συχνά τύπου DP (πολλαπλών μεταβλητών ή χωρισμένοι σε κύμα, κυματισμό και κλίση), όπου η ανατροφοδότηση παράγεται από εκτιμώμενες αποκλίσεις LF θέσης και πορείας και εκτιμώμενες LF ταχύτητες. Οι υποκείμενες μέθοδοι ελέγχου μπορεί, ωστόσο, να ποικίλλουν. Παραδοσιακά, οι αποσυνδεδεμένοι ελεγκτές και οι γραμμικοί τετραγωνικοί ελεγκτές ήταν δημοφιλείς. Επιπρόσθετα στο PD μέρος, η αναπόσπαστη δράση χρειάζεται για την αντιστάθμιση του στατικού μέρους (ή αργά μεταβαλλόμενου) των περιβαλλοντικών φορτίων. Ο ελεγκτής οφείλει να βελτιστοποιηθεί σε σχέση με την ακρίβεια εντοπισμού θέσης, την κατανάλωση καυσίμου και τη φθορά του συστήματος προώθησης. Στο σχεδιασμό της τοποθέτησης του ελεγκτή, οι είσοδοι ελέγχου είναι δυνάμεις σε κύμα, κυματισμό και στιγμιαία κλίση. Στο γενικό πλαίσιο των συστημάτων εντοπισμού θέσης, αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως υψηλού επιπέδου έλεγχος, δεδομένου ότι οι πραγματικές είσοδοι ελέγχου είναι η ταχύτητα του άξονα (RPM έλεγχος) ή η κλίση των πτερυγίων προπέλας (έλεγχος κλίσης), όπου ελέγχει έμμεσα την αναπτυγμένη δύναμη. Στην περίπτωση των αζιμούθιων προωθητών, η κατεύθυνση του κάθε μηχανήματος ώθησης είναι πρόσθετες είσοδοι ελέγχου.

## **Σύστημα καθοδήγησης και τροχιές αναφοράς**

Στις λειτουργίες παρακολούθησης, όπου το πλοίο μετακινείται από μία θέση και κατευθύνεται προς μία άλλη, ένα μοντέλο αναφοράς είναι απαραίτητο για την επίτευξη μιας ομαλής μετάβασης. Στην πιο βασική περίπτωση, ο χειριστής καθορίζει μία νέα επιθυμητή θέση και πορεία, και ένα μοντέλο αναφοράς δημιουργεί ομαλές τροχιές/πορείες αναφοράς για να ακολουθήσει το πλοίο. Ένα πιο προηγμένο σύστημα πλοήγησης, περιλαμβάνει σημείο σημείο τη λειτουργία παρακολούθησης, το βέλτιστο προγραμματισμό της πορείας και τη δρομολόγηση του καιρού για μεγάλες αποστάσεις πλευσης. Το σύστημα καθοδήγησης θα μπορούσε να συνδεθεί με τα συστήματα ηλεκτρικού χάρτη.

## **Νόμοι ελέγχου και προώθησης**

Ο πιο συνηθισμένος όρος ελέγχου προώθησης είναι η αιολική προώθηση (ανεμογεννήτρια). Βασίζεται στις μετρήσεις της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου, υπολογίζονται οι εκτιμήσεις των δυνάμεων του ανέμου και η στιγμή που δρουν στο πλοίο. Σαν συνέπεια, μια γρήγορη απόρριψη διαταραχών σε σχέση με τα μεταβαλλόμενα φορτία ανέμου μπορεί να

ληφθεί. Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος κατά τη διάρκεια των λειτουργιών παρακολούθησης, υπολογίζεται μια αναφορά προώθησης. Αυτό γίνεται, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο των δυναμικών του πλοίου, αναφορά επιταχύνσεων και ταχυτήτων, που δίνεται από το μοντέλο αναφοράς. Στα PM συστήματα, η ανεμογεννήτρια είναι κανονικά ενεργοποιημένη μόνο σε κλίση, καθώς τα σταθερά φορτία ανέμου σε κύμα και κυματισμό, θα πρέπει να αντισταθμίζονται από το σύστημα πρόσδεσης. Επιπλέον, ο αλγόριθμος ανίχνευσης διακοπής γραμμής παρακολουθεί τα σήματα τάσης γραμμής και τις αντίστοιχες κινήσεις του σκάφους, προκειμένου να ανιχνευτεί αυτόματα η θραύση στις γραμμές αγκύρωσης. Όταν εντοπιστεί ένα σπάσιμο γραμμής, ο ελεγκτής της γραμμής διακοπής προώθησης θα ενεργοποιηθεί έτσι ώστε οι προωθητές να έχουν αντισταθμιστεί για τις χαμένες δυνάμεις και τη στιγμή που παράγονται από τη διακεκομμένη γραμμή. Αυτό θα μειώσει προσεκτικά το φορτίο στις γύρω γραμμές και έτσι θα αποτραπεί ακόμα ένα άλλο σπάσιμο γραμμής.

### **Κατανομή προώθησης**

Οι ανατροφοδοτήσεις υψηλού επιπέδου και οι ελεγκτές προώθησης υπολογίζουν τις ηγετικές δυνάμεις στο κύμα και κυματισμό και στιγμιαία στην κλίση. Η μονάδα κατανομής προώθησης υπολογίζει την αντίστοιχη δύναμη και τις εντολές κατεύθυνσης σε κάθε συσκευή προώθησης. Οι ελεγκτές χαμηλού επιπέδου προώθησης θα ελέγξουν έπειτα τον έλικα της προπέλας, την ταχύτητα, τη ροπή και την ισχύ που ικανοποιούν τις επιθυμητές απαιτήσεις ώθησης. Ο αλγόριθμος κατανομής προώθησης πρέπει να βελτιστοποιηθεί για την κατανάλωση καυσίμου, τη φθορά των συσκευών προώθησης και την απόκτηση της εντολής ώθησης σε κύμα, κυματισμό και κλίση. Επιπλέον, η λειτουργία θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον κορεσμό των rpm/είσοδοι κλίσης και τους απαγορευμένους κατευθυντήριους τομείς. Η μονάδα κατανομής προώθησης είναι επίσης ο κύριος σύνδεσμος μεταξύ του συστήματος εντοπισμού θέσης και του συστήματος διαχείρισης ισχύος (PMS). Το σύστημα εντοπισμού θέσης έχει πολύ υψηλή προτεραιότητα ως ένας καταναλωτής ισχύος. Σε κάθε περίπτωση, η κατανομή της ώθησης πρέπει να χειρίζεται τον περιορισμό ισχύος των προωθητήρων για να αποφεύγεται η υπερφόρτωση ή η διακοπή του συστήματος ισχύος. Η μονάδα κατανομής ώθησης λαμβάνει συχνά ενημερωμένες καταχωρήσεις από το PMS σχετικά με τη διαθέσιμη ισχύ και την επικρατούσα ισχύ διαμόρφωσης εγκαταστάσεων με κατάσταση στα δεσμά διαύλων και τις γεννήτριες. Αυτό θα εμποδίσει τη διακοπή ενέργειας και την ανεπιθύμητη απόρριψη φορτίου άλλων σημαντικών καταναλωτών ενέργειας.

## Προσαρμογή μοντέλου

Οι παράμετροι στο μαθηματικό μοντέλο που περιγράφουν τις δυναμικές του πλοίου θα ποικίλλουν με διάφορες λειτουργίες και περιβαλλοντικές συνθήκες. Σε ένα μοντέλο παρατηρητή και ελεγκτή σχεδιασμού, το σύστημα εντοπισμού θέσης θα πρέπει να παρέχει αυτόματα τις απαραίτητες διορθώσεις του μοντέλου του σκάφους, και τα κέρδη του ελεγκτή υπόκεινται σε αλλαγές στο σχέδιο πλοίου, την περιοχή του αέρα και τις μεταβολές στην κατάσταση της θάλασσας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με τεχνικές κέρδους - προγραμματισμού, είτε χρησιμοποιώντας συνεχώς μη γραμμικά και προσαρμοστικά σκευάσματα. Επιπλέον, άλλες προσαρμοστικές μέθοδοι ελέγχου και εκτίμησης μπορούν να εφαρμοστούν είτε σε ομάδες είτε σε επεξεργασία στο διαδίκτυο.

### 2.6.4 Συστήματα Συμβουλευτικής και Παρακολούθησης

Η χρήση συμβουλευτικών συστημάτων για διαγνώσεις, προσομοίωση και ανάλυση μελλοντικών επιχειρησιακών απαιτήσεων, με την επιφύλαξη διαφόρων περιβαλλοντικών και λειτουργικών συνθηκών, αποκτά όλο και μεγαλύτερη σπουδαιότητα για το βέλτιστο επιχειρησιακό προγραμματισμό. Τέτοια συστήματα ενσωματώνονται με το σύστημα εντοπισμού θέσης και τα τυπικά χαρακτηριστικά περιγράφονται παρακάτω:

- **DP και PM προσομοιωτές κίνησης πλοίου.** Τέτοιοι προσομοιωτές περιλαμβάνουν μαθηματικά μοντέλα του περιβάλλοντος και της κλίσης του πλοίου, και ο χειριστής μπορεί να προσομοιώσει την απόδοση του συστήματος εντοπισμού θέσης, είτε χρησιμοποιώντας τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες είτε προσδιορίζει οποιαδήποτε περιβαλλοντική κατάσταση. Επιπλέον, μπορούν να προσομοιωθούν διαφορετικοί τύποι σεναρίων αποτυχίας, όπως η βλάβη ισχύος ή του προωθητήρα, η κίνηση και η απόκλιση. Στα PM συστήματα, λάθη σε μία ή περισσότερες γραμμές μπορούν να προσομοιωθούν.
- **Ανάλυση συνεπειών.** Αυτή είναι μια προηγμένη έκδοση μιας ανάλυσης δυνατοτήτων θέσης, η οποία επαληθεύει συνεχώς ότι το πλοίο είναι ικανό να διατηρεί τη θέση και την πορεία για διαφορετικά σενάρια αποτυχίας κατά τις επικρατούσες συνθήκες. Αυτό μπορεί να είναι απώλεια ενός ή διαφόρων προωθητήρων, ένα μηχανοστάσιο ή γραμμές πρόσδεσης (εάν υπάρχουν). Σε πολλές περιπτώσεις, μια παρόμοια εκτός σύνδεσης έκδοση είναι επίσης διαθέσιμη, όπου

οποιαδήποτε περιβαλλοντική κατάσταση, λειτουργία ή κατάσταση αποτυχίας μπορεί να προσομοιωθεί, κατόπιν αιτήματος του χειριστή.

### 2.6.5 Δυνατότητα DP

Ο κύριος σκοπός ενός συστήματος DP, είναι να διατηρήσει τη θέση (και την πορεία) μέσα σε κάποια συγκεκριμένα όρια ταξιδιού μέσα σε ένα καθορισμένο παράθυρο καιρού ή το λεγόμενο περιβάλλον σχεδιασμού. Για να συναντήσει τη σχεδιασμένη ικανότητα καθορισμού θέσης, τα συστατικά του συστήματος θα πρέπει να είναι αξιόπιστα και να πληρούνται οι απαραίτητες απαιτήσεις πλεονασμού. Κατά τη διάρκεια της φάσης του σχεδιασμού, είναι σημαντικό να επιβεβαιώνουμε ότι η ποσότητα ισχύος και η ικανότητα ώθησης που εγκαθίστανται σε ένα σκάφος θα παράσχουν την απαραίτητη αποθηκευτική χωρητικότητα. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με στατική είτε με δυναμική ανάλυση. Σε μία στατική ανάλυση υπολογίζονται μόνο η σημασία των βραδέως μεταβαλλόμενων δυνάμεων λόγω του ανέμου, του ρεύματος και των κυμάτων. Τα στοιχεία των δεδομένων που απαιτούνται σε μια τέτοια μελέτη περιλαμβάνουν:

- Τα κύρια χαρακτηριστικά του σκάφους, όπως εκτόπιση, μήκος, πλάτος και λειτουργικό προσχέδιο.
- Καθορισμένους συντελεστές ανέμου, ρεύματος και συντελεστές κυματισμού κύματος, από τους οποίους μπορούν να υπολογιστούν οι αντίστοιχες δυνάμεις και ροπές.
- Οι μέγιστες περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες το σκάφος πρέπει να λειτουργεί σε δυναμική θέση (ταχύτητα ανέμου, σημαντικό ύψος κύματος και τρέχουσα ταχύτητα). Σημαντικές παράμετροι, κυριαρχώντας η περίοδος κύματος και η στατιστική περιγραφή των κυμάτων, συνήθως περιγράφονται από τους σχηματισμούς φάσματος κύματος όπως το φάσμα Bretschneider, το φάσμα Pierson-Moskowitz ή το Κοινό φάσμα Σχεδίου Κύματος της Βόρειας Θάλασσας (Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)).

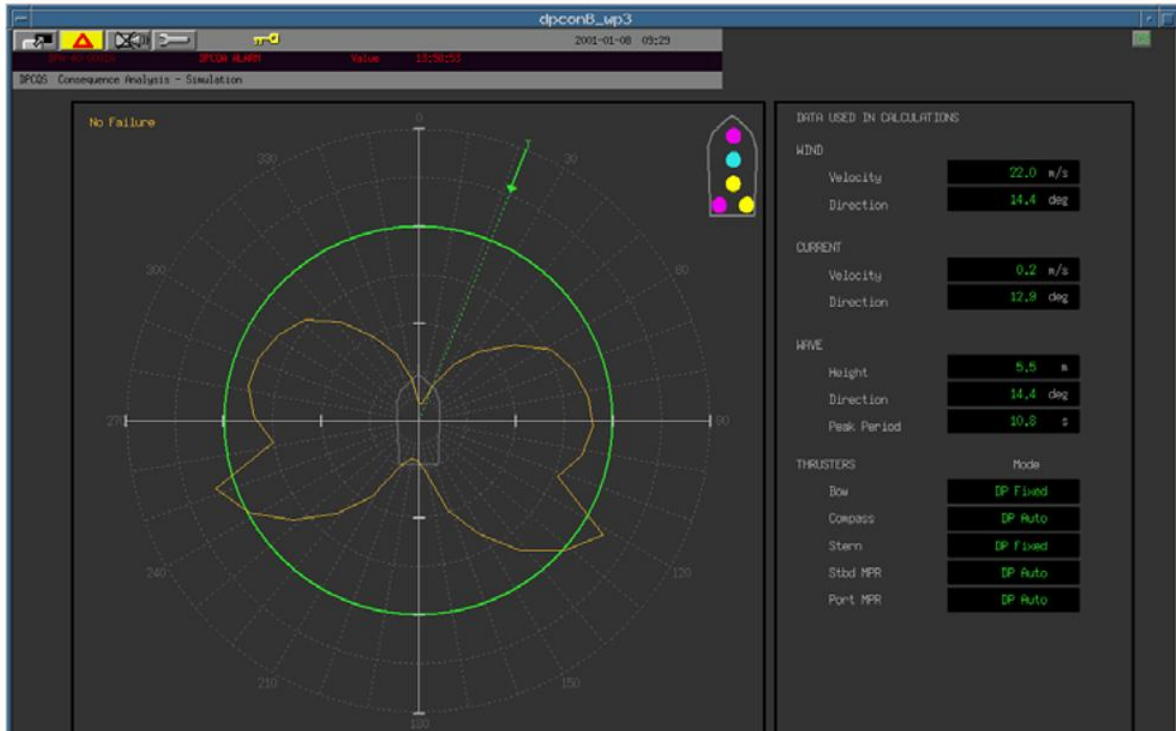
Ένας βασικός κανόνας είναι ότι ο πιο φορτωμένος προωθητής δε θα πρέπει να χρησιμοποιεί περισσότερο από το 80% της μέγιστης ώθησης στο περιβάλλον σχεδιασμού για την εξισορρόπηση των στατικών φορτίων (API). Στη συνέχεια, αφήνεται περιθώριο 20% για

αποζημίωση δυναμικών διακυμάνσεων. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας στατικής ανάλυσης μπορούν να παρουσιαστούν ως μία γραφική παράσταση ικανότητας (Σχήμα 2.7). Οι τομείς γύρω από  $120^{\circ}$ - $133^{\circ}$  και  $240^{\circ}$ - $250^{\circ}$ , όπου η καμπυλότητα “σχήμα πεταλούδας” διασχίζει την ενότητα του κύκλου, αποδεικνύουν έλλειψη ικανότητας ώθησης να διατηρεί τη θέση και την πορεία για τα περιβαλλοντικά φορτία που ενεργούν σε αυτές τις κατευθύνσεις. Τα περιβαλλοντικά δεδομένα φορτίου δίδονται στα δεξιά στο Σχήμα 2.7. Η καμπυλότητα της πεταλούδας έχει ως αποτέλεσμα την περιστροφή των περιβαλλοντικών φορτίων  $360^{\circ}$  γύρω από το σκάφος. Οι κατευθύνσεις φορτίου που δίδονται προς τα δεξιά είναι οι κατευθύνσεις που επικρατούν από μια πραγματική DP λειτουργία. Η στατική ανάλυση με περιθώριο 20% είναι συχνά πολύ συντηρητική. Αυτό δείχνει ότι η ανάλυση των δυνατοτήτων θα πρέπει να συμπληρώνεται με δυναμικές (χρονικού πλαισίου) προσομοιώσεις, όπου η κατανομή ώθησης, οι έμφυτες δυναμικές του προωθητήρα και οι δυναμικές απώλειες του προωθητήρα, οι απαγορευμένοι αζιμούθιοι τομείς και ολόκληρο το κύκλωμα ελέγχου λαμβάνονται υπόψη κατά την τελική επαλήθευση. Στην παραδοσιακή δυνατότητα προσομοιώσεων, το αποτέλεσμα του περιορισμού ισχύος συχνά παραμελείται, το οποίο στην πραγματικότητα συχνά είναι ο μεγαλύτερος περιοριστικός παράγοντας σε καταστάσεις αποτυχίας. Μία ανάλυση δυναμικότητας με περιορισμό ισχύος είναι επίσης σημαντική στο σχεδιασμό του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής: πόσοι δίαυλοι ισχύος, ποσότητα παραγωγής ισχύος σε κάθε δίαυλο, ποιος προωθητής θα συνδέεται στους διάφορους διαύλους, κλπ.

## 2.7 Διαχείριση Ισχύος και Ενέργειας

Σε ένα σύστημα εγκαταστάσεων ηλεκτρικής ενέργειας, το σύστημα αυτοματισμού σκάφους και διαδικασιών, το σύστημα DP, και τα άλλα μέρη του συστήματος αυτοματισμού, ελέγχουν τα μέρη του συστήματος ισχύος, πχ το DP σύστημα ελέγχει τις κινήσεις του προωθητήρα, το σύστημα ελέγχου εκφόρτωσης χρησιμοποιεί αντλία κινήσεων φορτίου, το σύστημα ελέγχου της διαδικασίας αλληλεπιδρά με τους συμπιεστές και τα συστήματα ψύξης/θέρμανσης κλπ. Το σημείο διασύνδεσης για όλο τον εγκατεστημένο εξοπλισμό ισχύος είναι το σύστημα διανομής ισχύος. Με την εκκίνηση και τις μεταβολές εισροής, τις μεταβολές φορτίου, και τις διαταραχές του δικτύου από τις αρμονικές συνέπειες, το φορτίο και οι γεννήτριες αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν το ένα το άλλο. Η βέλτιστη λειτουργία και ο έλεγχος του συστήματος ισχύος είναι απαραίτητος για την ασφαλή λειτουργία με ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου. Δεδομένου ότι πρόκειται για το σύστημα ελέγχου ενέργειας (σύστημα διαχείρισης ισχύος/ενέργειας- PMS/EMS), το οποίο παρακολουθεί και έχει τη συνολική λειτουργικότητα

ελέγχου του συστήματος ισχύος, θα γίνει το ενσωματωμένο στοιχείο σε ένα τελείως ενσωματωμένο σύστημα ισχύος, αυτοματισμού και DP.



Σχήμα 2.7: Τυπική γραφική παράσταση DP ικανότητας για ένα πλοίο εφοδιασμού – DP ανάλυση συνεπειών.

Ο σκοπός του PMS είναι να διασφαλίσει ότι υπάρχει επαρκής διαθέσιμη ισχύς για την πραγματική κατάσταση λειτουργίας. Αυτό επιτυγχάνεται παρακολουθώντας το φορτίο και την κατάσταση των γεννητριών, και το σύστημα ισχύος. Εάν η διαθέσιμη ισχύς γίνει τόσο μικρή, είτε εξαιτίας αυξημένου φορτίου είτε σφάλματος σε μία ομάδα γεννητριών που λειτουργούν, το PMS θα ξεκινήσει αυτόματα την επόμενη ομάδα γεννητριών στην αρχική ακολουθία. Ένα PMS μπορεί επίσης να έχει εκτεταμένη λειτουργικότητα μέσω παρακολούθησης και ελέγχου της ροής ενέργειας με τέτοιο τρόπο που να χρησιμοποιεί τον εγκατεστημένο και λειτουργικό εξοπλισμό με τη βέλτιστη εξοικονόμηση καυσίμου. Τέτοια συστήματα μπορεί να είναι τα EMS. Η διαχείριση της ενέργειας είναι μια νέα προσέγγιση να ελέγχει και να παρακολουθεί τη ροή ενέργειας στα θαλάσσια, πετρελαικά και αέρια συστήματα. Το EMS επεκτείνει την έννοια της διαχείρισης ισχύος στην κατεύθυνση ελέγχου και συντονίζοντας την παραγωγή ενέργειας και κατανάλωσης. Επιπρόσθετα, στη βελτιστοποίηση της στιγμιαίας ροής ισχύος, η ιστορική κατανάλωση ενέργειας και οι μελλοντικές απαιτήσεις ενέργειας λαμβάνονται υπόψη. Το EMS θα είναι λοιπόν το

ενσωματωμένο στοιχείο σε ένα συνολικά ενσωματωμένο σύστημα ισχύος, αυτοματισμού και DP. Για τα PMS και EMS, οι κύριες λειτουργίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε Sørensen και Ådnanes [301]:

- Διαχείριση παραγωγής ισχύος: Συνολικός έλεγχος με συχνότητα και τάση παρακολούθησης, με παρακολούθηση ενεργού και παθητικού καταμερισμού φορτίου και πιθανόν έλεγχο, και εξαρτώμενη από το φορτίο εκκίνηση και διακοπή των γεννητριών. Εφ' όσον οι λειτουργίες λογικού ελέγχου και σύνδεσης είναι ένα σημαντικό μέρος του σχεδιασμού του πίνακα διανομής του συστήματος ισχύος, το λειτουργικό αυτών των συστημάτων πρέπει να συντονιστεί.
- Διαχείριση φορτίου: Η παρακολούθηση ισχύος φορτίου και ο συντονισμός των λειτουργιών περιορισμού ισχύος σε άλλα συστήματα, η απόρριψη φορτίου και η αρχή της επίδρασης αυστηρών καταναλωτών βασίζονται σε διαθέσιμη παρακολούθηση ισχύος.
- Διαχείριση διανομής: Διαμόρφωση και έλεγχος ακολουθίας για την αναδιάταξη του συστήματος διανομής ισχύος. Το σύστημα διανομής θα πρέπει να είναι διαμορφωμένο να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις στον πραγματικό τρόπο λειτουργίας για το σκάφος.

Τα πλοία παραγωγής νέας γενιάς και επίσης τα πλοία/εξαρτήματα έχουν μία περίπλοκη διαμόρφωση του συστήματος ισχύος με προηγμένη προστασία και φιλοσοφίες αναμετάδοσης. Υπάρχουν στενές συνδέσεις μεταξύ του λειτουργικού σχεδιασμού και της απόδοσης του PMS και των λειτουργιών του συστήματος προστασίας ισχύος. Πρόκειται για μια πρόκληση για τα εμπλεκόμενα μέρη να αποκτήσουν μια βέλτιστη και λειτουργική λύση με διάφορους εμπλεκόμενους προμηθευτές και ένα ναυπηγείο που να είναι υπεύθυνο για όλο το συντονισμό.

### **2.7.1 Αποκατάσταση Διακοπής**

Η διακοπή του συστήματος παραγωγής ενέργειας είναι το πιο σοβαρό λάθος που μπορεί να συμβεί σε ένα ηλεκτρικό σύστημα προώθησης. Σε περίπτωση που συμβεί διακοπή, και δυστυχώς αυτό συμβαίνει τότε τότε, θα πρέπει κανονικά να απαιτηθεί να υπάρχει ένα σύστημα για έλεγχο αλληλουχίας των εκκινήσεων και αναδιάταξη του συστήματος ισχύος.



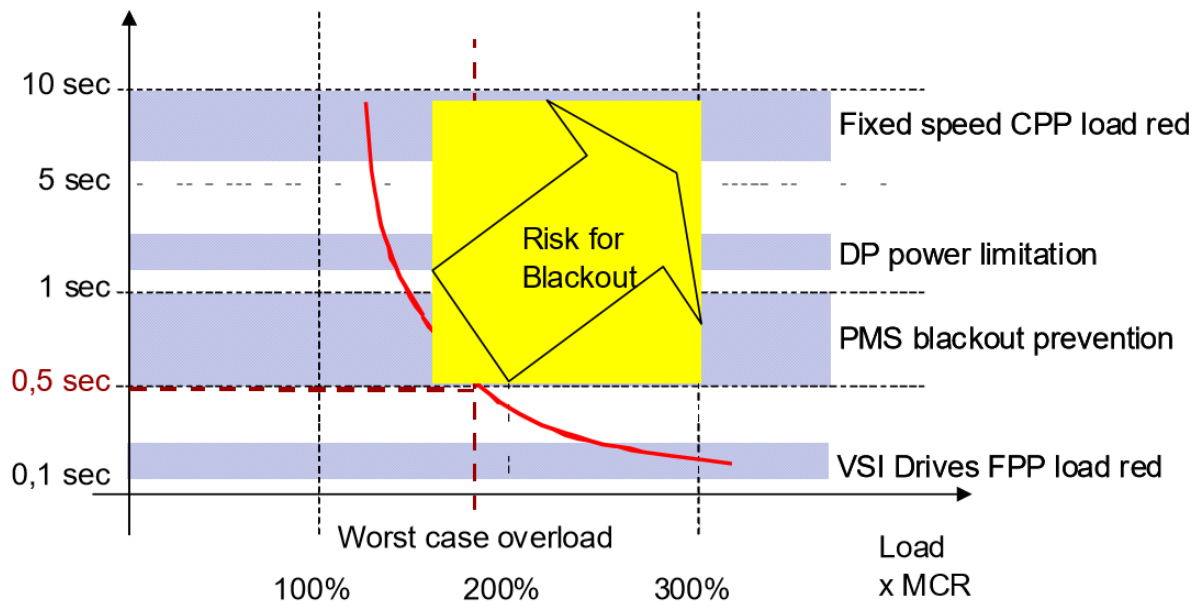
Αυτό εφαρμόζεται στο σύστημα ελέγχου επιπέδου, και περιλαμβάνει ακολουθίες για εκκίνηση και συγχρονισμό των γεννητριών και των φορτίων. Λογικά θα υπάρχει επίσης ένα σύνολο των προκαθορισμένων τρόπων λειτουργίας, π.χ. λειτουργία διαμετακόμισης, λειτουργία διατήρησης σταθμού, λειτουργία ελιγμών, κλπ με αυτόματο έλεγχο αλληλουχίας για την αναδιάταξη του συστήματος ισχύος. Μία τυπική ακολουθία για:

- Αυτόματη εκκίνηση και σύνδεση ελέγχου γεννήτριας έκτακτης ανάγκης. Ξεχωριστό σύστημα ελέγχου – δεν αποτελεί μέρος του συνολικού συστήματος ελέγχου του πλοίου.
- Αυτόματη εκκίνηση/επανασύνδεση της γεννήτριας (-ες) αναμονής.
- Επανασύνδεση των μετασχηματιστών, διακόπτες διανομής.
- Οι διακόπτες ζεύξης παραμένουν ανοικτοί εάν ενεργοποιηθούν.
- Επανεκκίνηση αντλιών καυσίμου και ψύξης.
- Επανεκκίνηση άλλων αντλιών και ανεμιστήρων σε σειρά.
- Επανεκκίνηση προωθητήρων, εάν απαιτείται.

### **2.7.2 Μείωση Φορτίου και Πρόληψη Διακοπής**

Το σύστημα ηλεκτροκίνησης – ντίζελ έχει καλύτερη απόδοση και οικονομία καυσίμου εάν το PMS ελέγχει τον αριθμό των τρεχόντων κινητήρων στο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας να ταιριάζει στη ζήτηση φορτίου με υψηλή φόρτωση στον πετρελαιοκινητήρα. Το βέλτιστο φορτίο σε σχέση με την κατανάλωση καυσίμου, τη φθορά και τη συντήρηση είναι συνήθως γύρω στο 85% της μέγιστης συνεχούς αξιολόγησης (MCR). Με ένα υψηλό φορτίο στις τρέχουσες μηχανές, το σύστημα γίνεται πιο ευάλωτο σε σφάλματα στο σύστημα, όπως ένα ξαφνικό λάθος σε μια γεννήτρια με κινητήρα ντίζελ. Οι υπόλοιποι, υγιείς κινητήρες θα βιώσουν μια αύξηση φορτίου και πιθανή υπερφόρτωση και στη χειρότερη περίπτωση, σε διαδρομή συχνότητας εάν η λειτουργικότητα στο σύστημα δε μειώσει τη δύναμη φορτίου σύμφωνα με την παραγωγική ικανότητα. Σε ένα σύγχρονο σκάφος γεώτρησης, αυτή η λειτουργία μείωσης φορτίου και πρόληψης της διακοπής ρεύματος διανέμεται και χειρίζεται από διάφορα υποσυστήματα όπως:

- Λειτουργίες διαχείρισης φορτίου της διαχείρισης ισχύος και λειτουργίες πρόληψης διακοπής.



Σχήμα 2.8: Σταθερές ρυθμίσεις χρόνου για μείωση ισχύος, με μέγιστο χρόνο απόκρισης της τάξης των 500ms (επεξηγηματικό μόνο).

- Λειτουργίες περιορισμού ισχύος του συστήματος DP.
- Μείωση φορτίου του προωθητήρα και λειτουργίες επαναφοράς φορτίου.
- Μείωση φορτίου της μονάδας γεώτρησης και λειτουργίες επαναφοράς φορτίου.

Η ικανότητα να αντέχει σε τέτοια ελαττώματα εξαρτάται επίσης σε μεγάλο βαθμό από το σχεδιασμό και τις μεθόδους και λύσεις μηχανικής, όπως:

- Δυνατότητα φόρτωσης και δυναμικών του πετρελαιοκινητήρα.
- Κυβερνήτης και AVR διαμόρφωση και ρυθμίσεις.
- Ρυθμίσεις ρελέ προστασίας γεννήτριας και πίνακα ελέγχου.
- Ο πολύ κρίσιμος εξοπλισμός πρέπει να είναι ανθεκτικός σε λάθη με την απώλεια ισχύος μέσω της λειτουργικότητας.

Στα πλοία DP με υψηλή απόδοση ταχύτητας ελεγχόμενης σταθερής κίνησης προωθητήρων, το συνολικό φορτίο κάτω από κανονική λειτουργία είναι τόσο χαμηλό, ώστε ο σταθμός

παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί βέλτιστα με λίγους, συχνά μόνο με δύο κινητήρες ντίζελ. Προκειμένου να αξιοποιηθεί αυτή η πιθανότητα εξοικονόμησης, η πρόκληση είναι να σχεδιάσουμε και να συντονίσουμε το σύστημα για να είναι σε θέση σενάρια σφαλμάτων εντός χρονικού πλαισίου, μη θέτοντας σε κίνδυνο τη σταθερότητα της τροφοδοσίας ισχύος.

Το Σχήμα 2.8 δείχνει, για παράδειγμα, την ικανότητα των κινητήρων ντίζελ να διατηρούν τη συχνότητα για το βήμα φόρτωσης που σχετίζεται με την απώλεια ενός κινητήρα με παράλληλη λειτουργία. Σε τυπικές εγκαταστάσεις, έχει παρατηρηθεί ότι οι δράσεις της μείωσης του φορτίου και η πρόληψη διακοπής πρέπει να είναι αποτελεσματικές μέσα σε λιγότερο από 500ms για να μη διακινδυνεύεται η σταθερότητα του συστήματος ισχύος και περιορίζεται η ευελιξία της λειτουργίας. Χρησιμοποιούνται πολλές λύσεις και οι χειριστές και οι ιδιοκτήτες έχουν διαφορετικές προτιμήσεις. Ωστόσο, μπορούν να βρεθούν κάποια κοινά συμπεράσματα για το τι απαιτείται συνήθως για τη λειτουργία πρόληψης διακοπής ρεύματος:

- *Προωθητήρας και τροφοδοτικό:* Οι προωθητήρες FPP με μεταβλητή ταχύτητα πρέπει να έχουν μια στρατηγική μείωσης φορτίου είτε παρακολουθώντας τη συχνότητα του δικτύου και/ή λαμβάνοντας ένα σήμα από το PMS για γρήγορη μείωση φορτίου, είτε ως σήμα απόσβεσης φάσης ισχύος, σήμα περιορισμού μέγιστης ισχύος, ή -εάν είναι καλά συντονισμένη- γρήγορη μείωση αναφοράς RPM. Για να αποφευχθούν αστάθειες στη συχνότητα δικτύου, η μείωση φορτίου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής για να εξασθενήσουν πιθανές ταλαντώσεις. Οι προωθητές CPP σταθερής ταχύτητας δεν έχουν αρκετό χρόνο απόκρισης για πρόληψη της διακοπής. Αυτά πρέπει να περιλαμβάνονται στο σχέδιο απομάκρυνσης φορτίου διαχείρισης ενέργειας.
- *Μονάδες γεώτρησης:* Παρόμοιες με τις απαιτήσεις των μονάδων τροφοδοσίας με ενσωματωμένες προτεραιότητες για τους μεμονωμένους δίσκους γεώτρησης.
- *PMS:* Σύμφωνα με τις απαιτήσεις κλάσης, το PMS πρέπει να περιλαμβάνει πρόληψη διακοπής ρεύματος με λειτουργικότητα μείωσης φορτίου/απόρριψης φορτίου. Παρατηρήθηκε, ωστόσο, ότι ο χρόνος απόκρισης σε αυτό το σύστημα ήταν πάρα πολύς για να επιτευχθεί, το επιθυμητό επίπεδο ανοχής σφάλματος χωρίς μια γρήγορη ενέργεια, αυτόνομο σύστημα μείωσης φορτίου στις μονάδες τροφοδοσίας. Με τη σημερινή γνώση, αυτό έχει δικαιωματικά λυθεί με τη χρήση ταχείας δράσης, και πιθανών αλγορίθμων μείωσης του φορτίου που προκαλείται από περιστατικό.

- *Σύστημα DP*: Το σύστημα DP είναι επίσης εξοπλισμένο με μία λειτουργία μείωσης ισχύος, κανονικά βασισμένο σε ένα επιτρεπόμενο μέγιστο σήμα κατανάλωσης ισχύος από το PMS. Γενικά, αυτό έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματικό στην αποφυγή υπερφόρτωσης της τρέχουσας μονάδας αλλά όχι αρκετά γρήγορο για την αντιμετώπιση λαθών και την απώλεια γεννητριών ντίζελ. Σημαντική επίσης είναι η δύναμη για περιορισμό του χειροκίνητου χειρισμού και του χειρισμού με το μοχλό ελέγχου των προωθητήρων.

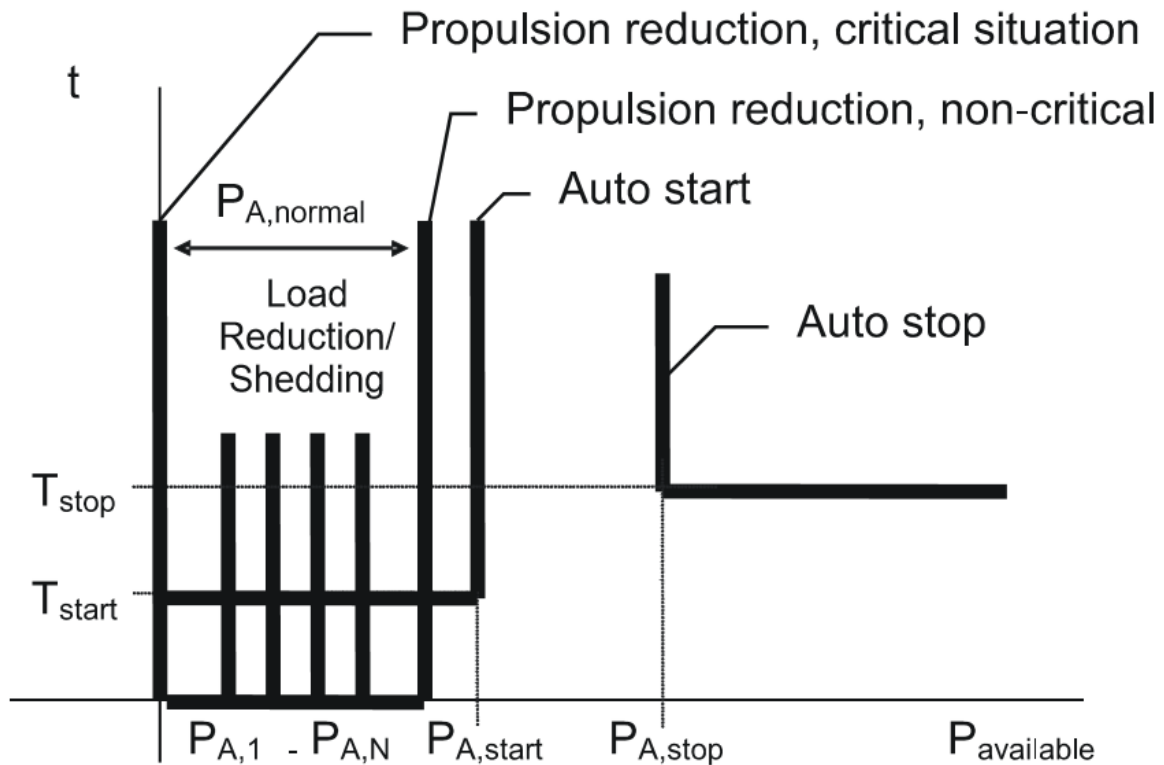
Με βάση την εμπειρία, συνιστάται ότι όλες οι λειτουργίες μείωσης φορτίου και πρόληψης διακοπής που περιγράφονται παραπάνω εγκαθίστανται και οργανώνονται καλά, συντονίζονται και δοκιμάζονται κατά τη λειτουργία και τη δοκιμή στη θάλασσα. Επίσης, η ανάγκη για επανάληψη και έλεγχο πρέπει να ληφθεί υπόψη μετά τις τροποποιήσεις στην εγκατάσταση που ενδέχεται να επηρεάσουν το συντονισμό.

Ένα τυπικό διάγραμμα συντονισμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9. Τα όρια αυτόματης εκκίνησης και διακοπής δείχνουν το επίπεδο και τις ρυθμίσεις χρόνου για αυτόματη εκκίνηση και τερματισμό λειτουργίας των κινητήρων. Η διαθέσιμη ισχύς θα είναι κάτω από κανονικές λειτουργίες εντός αυτών των ορίων. Σε ελαττώματα, και απότομη απώλεια κινητήρα, η διαθέσιμη ισχύς μειώνεται. Οι λειτουργίες μείωσης ισχύος του DP μπορεί να διακρίνεται μεταξύ κρίσιμων και μη κρίσιμων καταστάσεων, επιτρέποντας στο DP την ανάληψη όλης της διαθέσιμης ισχύος μετά από πιθανή μείωση φορτίου και απόρριψη φορτίου των μη βασικών καταναλωτών ή καταναλωτών με χαμηλότερη προτεραιότητα.

### **2.7.3 Κυβερνήτης κινητήρα ντίζελ και αντοχή σφάλματος AVR**

Παρόλο που οι κανόνες και οι κανονισμοί επέτρεψαν τις λειτουργίες DP με κλειστούς διαύλους στο σύστημα ηλεκτρικής ισχύος και σε μία γενικά συνδεδεμένη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, οι εφαρμογές μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990 ήταν να χωρίσουν το δίκτυο σε δύο ή περισσότερα ξεχωριστά τμήματα σε DP 2 ή 3 λειτουργίες. Μετά τις εξελίξεις στον πίνακα διανομής τάσης, και τις μονάδες τροφοδοσίας μαζί με το νέο PMS με πιο ακριβής και ταχύτερες λειτουργίες μείωσης φορτίου και πρόληψη διακοπής ρεύματος, αυτό έχει αλλάξει και τώρα είναι πιο συνηθισμένο να λειτουργεί με κανονικά κλειστούς διακόπτες ζεύξης διαύλου και επίσης με κλειστό δακτύλιο. Η εξέλιξη αυτή προκαλείται από τα οφέλη καλύτερης και πιο ευέλικτης χρήσης της εγκατεστημένης παραγωγικής ικανότητας και την απόκτηση μιας βελτιωμένης οικονομίας καυσίμου. Οι εξοικονομήσεις καυσίμου για

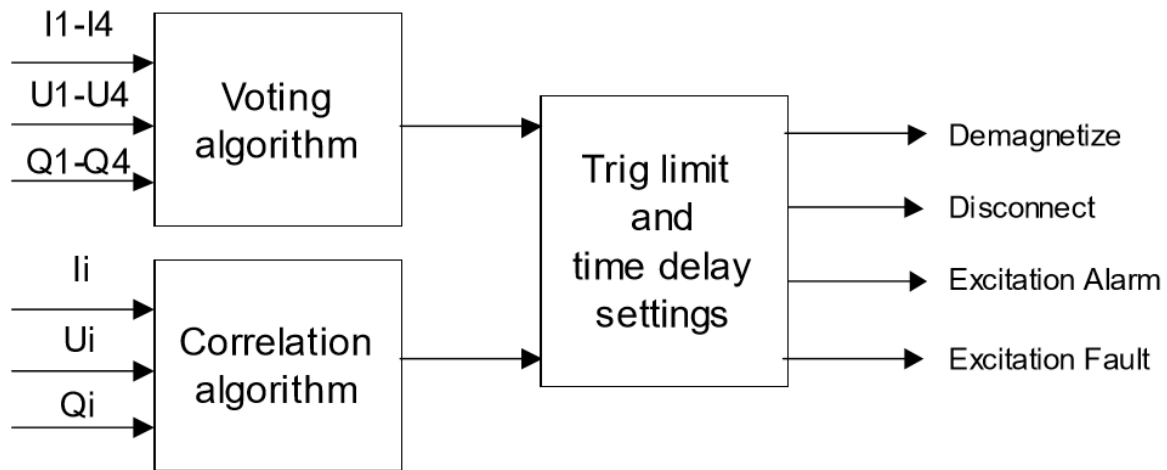
τη βελτιστοποίηση της φόρτωσης των κινητήρων που λειτουργούν, έχουν αποδειχθεί σημαντικές.



Σχήμα 2.9: Συντονισμός λειτουργιών πρόληψης αυτόματης εκκίνησης/διακοπής και διακοπής ρεύματος (παράδειγμα).

Σε τέτοια συστήματα, έχει παρατηρηθεί ότι υπό ορισμένες συνθήκες φορτίου και λειτουργίας, κάποιες βλάβες στους ρυθμιστές και στους αυτόματους ρυθμιστές τάσης, των AVR, είναι δύσκολο να εντοπιστούν με ένα σύστημα τακτικής προστασίας. Στη χειρότερη περίπτωση, τα σφάλματα έχουν φανεί να παρενοχλούν τον υγιή εξοπλισμό προκαλώντας ανεπιθύμητες διακοπές λειτουργίας, και σε μερικές περιπτώσεις, ακόμα και διακοπή ρεύματος. Εξελίξεις στα ρελέ προστασίας της ψηφιακής γεννήτριας με πολυλειτουργικές και προγραμματιζόμενες λογικές προστασίας, παρείχαν τη δυνατότητα να συνδυάσουν τις λειτουργίες προστασίας σε νέους τρόπους, και να συμπεριλάβουν τη λογική και αλγεβρική λειτουργικότητα στο σύστημα προστασίας. Αυτό έχει βελτιώσει σημαντικά την προστασία της ικανότητας του ρελέ να ανιχνεύει τις βλάβες του ρυθμιστή και του AVR, και βελτίωσε την ανοχή σφάλματος του συστήματος σε τέτοιες βλάβες. Το Σχήμα 2.10 δείχνει ένα πιθανό σχήμα παρακολούθησης για το AVR, περιλαμβάνοντας τις λειτουργίες συσχέτισης πολλών μεταβλητών και ψηφίζοντας λειτουργίες για πολλαπλές γεννήτριες. Τέτοιες λειτουργίες

μπορούν να εγκατασταθούν στα σύγχρονα προγραμματιζόμενα ρελέ πολλαπλών λειτουργιών προστασίας γεννήτριας ή σε ξεχωριστούς λογικούς ελεγκτές για εκσυγχρονισμό και αναβαθμίσεις.



Σχήμα 2.10: Ένα σχήμα παρακολούθησης για εντοπισμό βλάβης AVR.

## 2.8 Θαλάσσια Βιομηχανική Πληροφορική

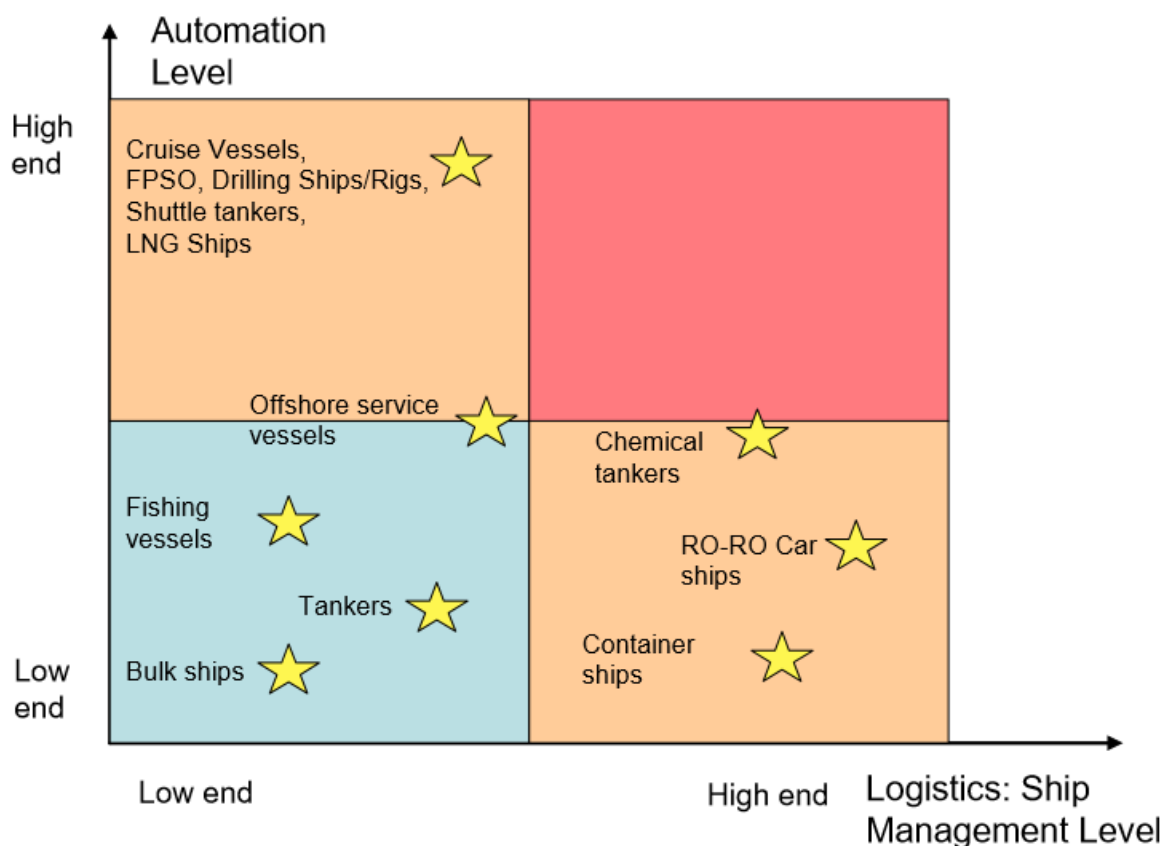
Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε, σύντομα, πτυχές που σχετίζονται με τη ροή πληροφοριών ανάμεσα στα συστήματα πραγματικού χρόνου που εξασφαλίζουν τον ηλεκτρικό έλεγχο, και στα συστήματα διαχείρισης που βελτιστοποιούν τις λειτουργίες και τις επιχειρηματικές διεργασίες. Αυτό περιλαμβάνει κατανομή του στόλου που σχετίζεται με την εφοδιαστική των μεταφορών, διαχείριση της αλυσίδας εφοδιασμού, παρακολούθηση και διαγνώσεις της τεχνικής κατάστασης του εξοπλισμού και των συστημάτων.

Όπως αναφέρθηκε στο Rensvik et al. [228] συστήματα για λειτουργική διαχείριση όπως συστήματα παρακολούθησης κατάστασης και διαγνωστικά συστήματα, συστήματα διαχείρισης της αλυσίδας εφοδιασμού, συστήματα διαχείρισης επιχειρήσεων κλπ, αύξησαν τη δυνατότητα να βελτιώσουν τη λειτουργική επίδοση, την παραγωγικότητα και τη βελτιστοποίηση του κύκλου ζωής των αποκτημάτων που σχετίζονται με τη λειτουργία των εγκαταστάσεων.

Αργότερα, οι πωλητές αυτοματισμού, κυρίως στους τομείς της χερσαίας βιομηχανίας, ξεκίνησαν το επόμενο βήμα για τη φυσική και λειτουργική ενσωμάτωση των συστημάτων ελέγχου σε πραγματικό χρόνο με τα λειτουργικά συστήματα διαχείρισης. Αυτό χαρακτηρίστηκε ως Βιομηχανική Παραγωγή. Η εισαγωγή της βιομηχανικής πληροφορικής στις θαλάσσιες εφαρμογές έχει μόλις ξεκινήσει και αποτελεί ακόμα έναν τομέα έρευνας και

ανάπτυξης. Για τους πωλητές και τους χειριστές πλοίων, αποτελεί πρόκληση να εξαντλήσουν τις δυνατότητες που προσφέρει αυτή η μετατόπιση της τεχνολογίας.

Οι θαλάσσιες βιομηχανικές λύσεις πληροφορικής για τα διάφορα τμήματα της θαλάσσιας αγοράς, θα είναι εξαρτημένες από τον τύπο του εμπορίου και τη ναύλωση, την πολυπλοκότητα του πλοίου, τις απαιτήσεις ασφάλειας και διαθεσιμότητας, το μέγεθος του στόλου, κλπ. Όσον αφορά την αυτοματοποίηση των πλοίων, εδώ θα επικεντρωθούμε σε πλοία και σκάφη που χαρακτηρίζονται ως προηγμένα και εξειδικευμένα με υψηλό αριθμό εισαγωγής/εξαγωγών (I/O) και μάλλον περίπλοκων επιχειρησιακών λειτουργιών. Αυτό χαρακτηρίζεται ως υψηλή αγορά· βλέπε επίσης Σχήμα 2.11.



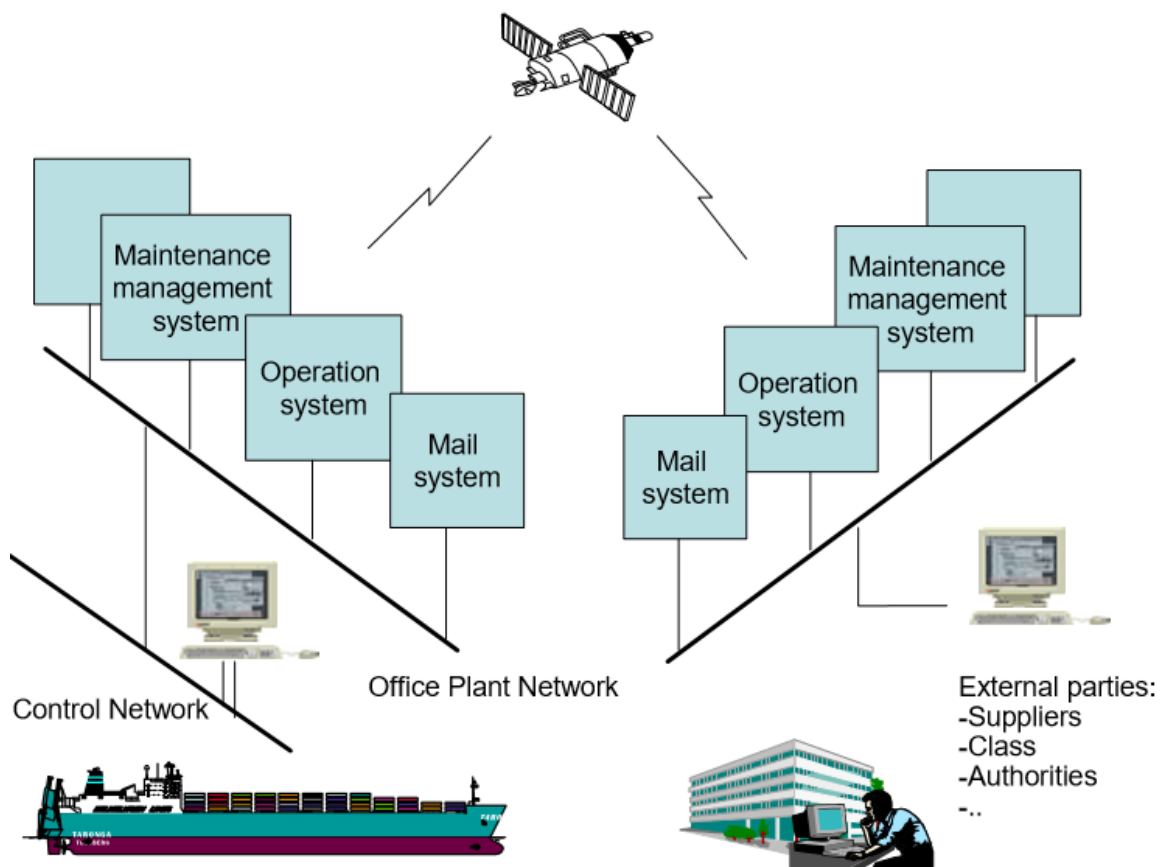
Σχήμα 2.11: Τμήματα αγοράς χαμηλού και υψηλού επιπέδου σε αυτοματοποίηση και διαχείριση πλοίου.

Παραδείγματα είναι τα πλοία (Σχήμα 2.4) και οι εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου (Σχήμα 2.1) για εξερεύνηση και εκμετάλλευση πετρελαίου και φυσικού αερίου, επιβατηγά και κρουαζιερόπλοια. Τυπικές εφαρμογές στην αγορά ανοικτής θαλάσσης είναι τα πλοία εξυπηρέτησης, τα εξαρτήματα γεώτρησης και τα πλοία, τα πετρελαιοφόρα, τα στρώματα καλωδίου και σωλήνα, οι κινητές μονάδες εκφόρτωσης και αποθήκευσης της παραγωγής

(FPSOs), ο γερανός και τα βαρέα ανυψωτικά πλοία, τα πλοία γεωλογικής έρευνας και τα πλοία πολλαπλών χρήσεων.

Ως ένα μέρος των δυνατοτήτων βιομηχανικών λύσεων πληροφορικής, ορισμένοι προμηθευτές έχουν εγκαταστήσει λειτουργίες παρακολούθησης και ελέγχου της κατάστασης τοπικά στον εξοπλισμό ισχύος και στις συσκευές πεδίου όπως αποδεικνύεται στο Σχήμα 2.3, με τη δυνατότητα για μακρινή παρακολούθηση και διαγνώσεις.

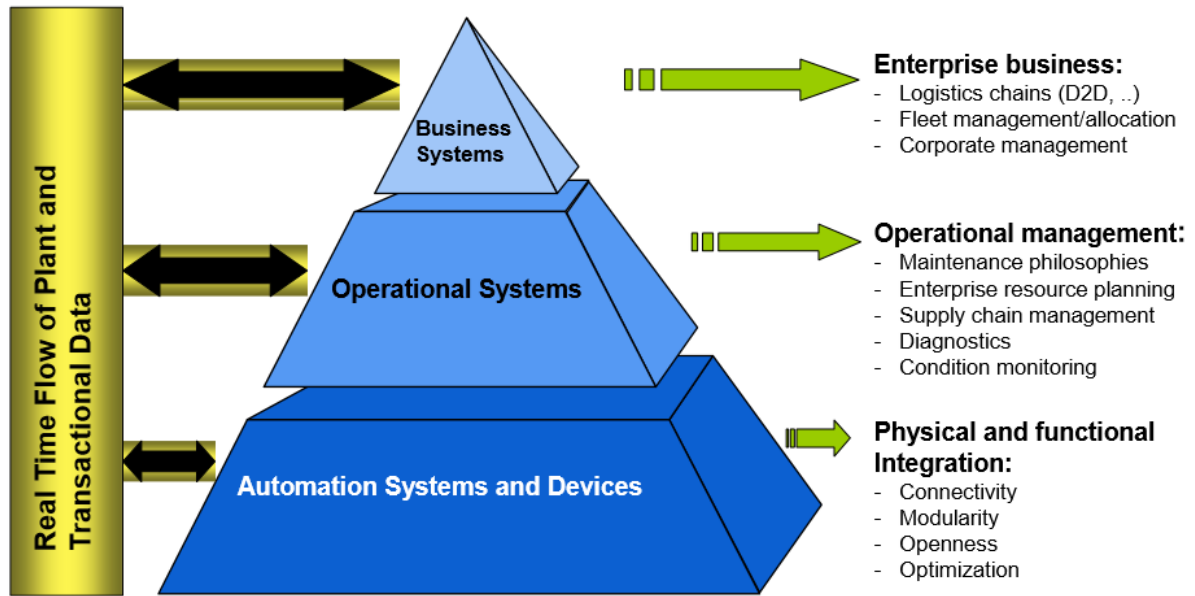
Σε πολλές εγκαταστάσεις υπάρχουν διαθέσιμα πλεονάζοντα συστήματα, και ο αριθμός και οι τύποι των απαιτούμενων μετρήσεων καθορίζονται από ορισμένους κανόνες κλάσης. Η φυσική ολοκλήρωση βασίζεται σε τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας, εξασφαλίζει συνδεσιμότητα συσκευών και ενσωμάτωση ελεγκτή και σταθμών χειριστή σε τρία επίπεδα δικτύου (Σχήμα 2.3): επικοινωνία δικτύου διαύλου πραγματικού χρόνου σε χαμηλό επίπεδο μεταξύ συσκευών και ελεγκτών, ελεγκτές σύνδεσης δικτύου ελέγχου πραγματικού χρόνου και σταθμούς χειριστή και δίκτυο εργοστασίων γραφείου σε διάφορα συστήματα γραφείου και συστήματα διαχείρισης πληροφοριών. Το τελευταίο επίπεδο ανοίγει για δορυφορική επικοινωνία σε χερσαία γραφεία σε χειριστές πλοίου ή πωλητές, βλέπε επίσης Σχήμα 2.12.



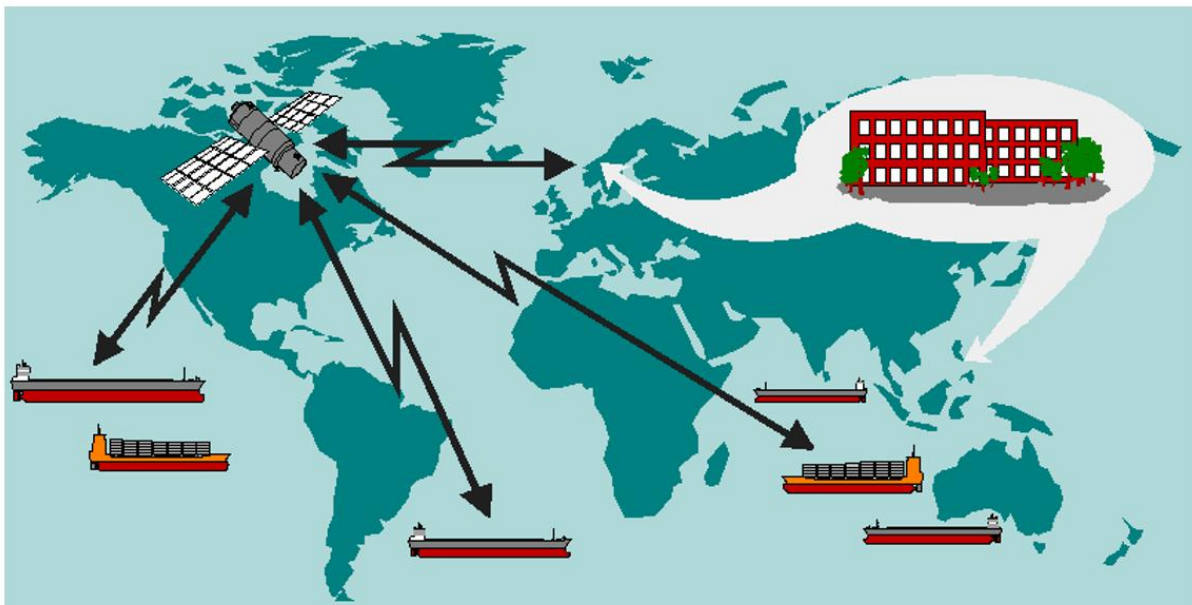
Σχήμα 2.12: Κατανεμημένα συστήματα πληροφοριών πλοίων – ακτή για ευέλικτη ροή πληροφοριών και κοινή χρήση.



Η βιομηχανική τεχνολογία πληροφορικής αναμένεται να αυξήσει την ενσωμάτωση των δεδομένων των εγκαταστάσεων πλοίου με τα συστήματα διαχείρισης της επιχείρησης, διασφαλίζοντας βελτιστοποιημένη διαχείριση του ενεργητικού, και λειτουργία του κάθε σκάφους ειδικά, και ολόκληρου του στόλου σε εταιρικό επίπεδο, βλέπε Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Βιομηχανική IT αρχιτεκτονική.

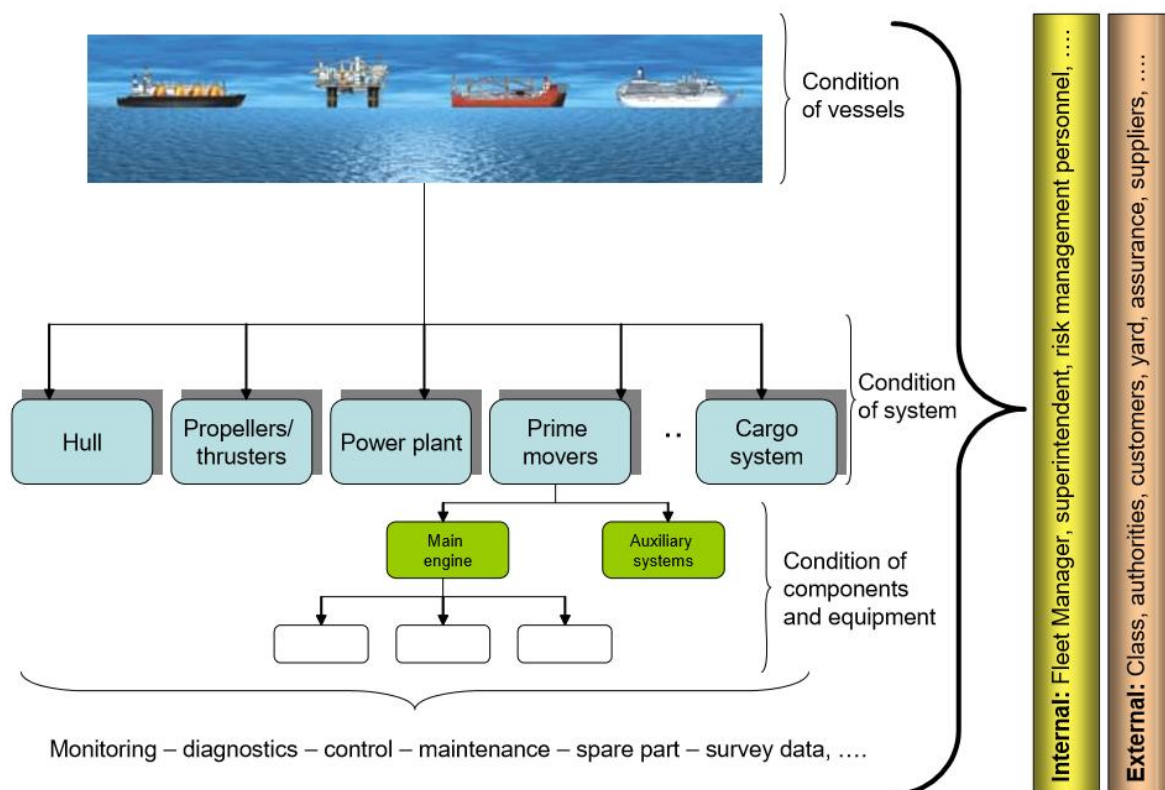


Σχήμα 2.14: Κατανομή στόλου και λειτουργίες που διαχειρίζονται σε εταιρικό επίπεδο.

Καθώς το κόστος δορυφορικής επικοινωνίας στο πλοίο προς ξηρά μειώνεται (Σχήμα 2.14) και η αρχιτεκτονική της τεχνολογίας των θαλάσσιων πληροφοριών βελτιώνεται, αυτό το είδος ροής πληροφοριών αναμένεται να λειτουργεί αδιάκοπα σε πραγματικό χρόνο, σε αντίθεση με σήμερα, όπου ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα μεταφέρεται σε ξεχωριστά γεγονότα.

Μέχρι τώρα ενσωματώθηκαν συστήματα αυτοματισμού που έχουν ιδιοκτήτη με περιορισμένο αριθμό πωλητών. Ωστόσο, στον τομέα της αυτοματοποίησης υπάρχει μια τάση προς άνοιγμα στα πρωτόκολλα επικοινωνίας και δικτύου. Το πώς αυτό θα επηρεάσει τις λύσεις τεχνολογίας και τις ευθύνες για τα συστήματα ολοκλήρωσης πολλαπλού προμηθευτή αποτελεί ακόμα αντικείμενο συζήτησης.

Η παρακολούθηση της κατάστασης και το RCM (Συντήρηση Επικεντρωμένη στην Αξιοπιστία), είναι γνωστές έννοιες σε πολλές βιομηχανίες. Αυτές οι έννοιες έχουν πλέον ενσωματωθεί στα συστήματα διαχείρισης συντήρησης πλοίου. Σήμερα, τα πλοία σε πολλά δρομολόγια έχουν μόνο πολύ μικρές περιόδους φόρτωσης και εκφόρτωσης στο λιμάνι. Αυτό σημαίνει ότι η συντήρηση που μπορεί μόνο να πραγματοποιηθεί στο λιμάνι, συμπεριλαμβανομένων των ελέγχων κατάστασης σημαίας και κλάσης, πρέπει να πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια αυτών των σύντομων περιόδων για να αποφύγουν το χρόνο διακοπής λειτουργίας. Για να βελτιωθεί αυτή η εναρμόνιση, πρέπει να είναι διαθέσιμες μέθοδοι ανάλυσης και προγραμματισμού για την παρακολούθηση της κατάστασης του σκάφους, τον προγραμματισμό των ερευνών και την πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης του πλοίου που βασίζεται σε συνεχές αναφορές και συνεχή παρακολούθηση της τεχνικής κατάστασης για δομές και εξοπλισμό (Σχήμα 2.15). Αυτή η ιδέα μπορεί να εξελιχθεί περαιτέρω σε μια "συνεχής" ανάλυση κινδύνου που βασίζεται σε αυτές τις πληροφορίες τεχνικής κατάστασης, και προσαρμόζεται στον εξοπλισμό υψηλού κινδύνου που σχετίζεται με το διαφορετικό τρόπο λειτουργίας του πλοίου, έναν τρόπο δηλαδή ενίσχυσης των μέτρων ασφαλείας. Συχνά εργαλεία στην τεχνική παρακολούθηση είναι η χρήση τεχνικών επεξεργασίας σήματος όπως η ανάλυση φάσματος και άλλες στατιστικές μέθοδοι. Παραδείγματα είναι οι μετρήσεις επιτάχυνσης για την ανάλυση κραδασμών, οι μετρήσεις θερμοκρασίας για την υπερθέρμανση, κλπ. Τελευταία, η χρήση παρατηρητών για την εκτίμηση της κατάστασης, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί.



Σχήμα 2.15: Φιλοσοφία τεχνικής κατάστασης.

## 2.9 Κανόνες και Κανονισμοί

### 2.9.1 Απαιτήσεις κατηγορίας

Σε πολλές περιπτώσεις είναι στο χέρι των ιδιοκτητών να αποφασίσουν ποιό είδος ταξινόμησης (ή να μη συζητήσουν καθόλου για έγκριση τάξης) θα εγκατασταθεί για το σύστημα εντοπισμού θέσης. Τρία παραδείγματα ταξικών κοινωνιών που έχουν κανόνες για ταξινόμηση των συστημάτων DP είναι τα DNV [54], ABS [3] και LRS [174]. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχει επίσης αναπτύξει κατευθυντήριες γραμμές για δυναμική τοποθέτηση, για να παρέχει ένα διεθνές πρότυπο για τα συστήματα DP σε όλα τα είδη των νέων πλοίων. Ο σκοπός των οδηγιών και των κανόνων κλάσης είναι να προταθούν κριτήρια σχεδιασμού, ο απαιτούμενος εξοπλισμός, οι λειτουργικές απαιτήσεις, και ένα σύστημα ελέγχου και τεκμηρίωσης για τα συστήματα DP για τη μείωση του κινδύνου στο προσωπικό, στο ίδιο το σκάφος, σε άλλα σκάφη και δομές, σε υποθαλάσσιες εγκαταστάσεις και στο περιβάλλον ενώ λειτουργούν υπό δυναμικό έλεγχο εντοπισμού θέσης. Λαμβάνοντας υπόψιν

ότι τα λειτουργικά πλοία DP συχνά λειτουργούν σε διαφορετικά μέρη του κόσμου, μια τέτοια τυποποίηση παρέχει ένα χρήσιμο εργαλείο, για τις διάφορες πλευρικές καταστάσεις, για να καθορίσουν τους τοπικούς κανόνες και κανονισμούς, καθορίζοντας τα επίπεδα των απαιτήσεων ασφαλείας, τις απαιτήσεις για πλεονασμό και τις λειτουργίες για DP πλοία. Για αγκυροβολημένα σκάφη που χρησιμοποιούν αυτόματη βοήθεια ώθησης, ο IMO δεν έχει κατευθυντήριες γραμμές. Η DNV έχει την ονομασία κλάσης που λέγεται POSMOOR ATA, DNV [55] και το Lloyd's Register of Shipping έχει το συμβολισμό PM ή PM T1, LRS. Γενικότερο έγγραφο για την ανάλυση, το σχεδιασμό και την αξιολόγηση των αγκυροβολημένων, πλωτών μονάδων δημοσιεύεται από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου [11]. Εδώ περιλαμβάνονται επίσης μερικές οδηγίες για τα DP συστήματα.

Οι απαιτήσεις για υλικό και λογισμικό σε DP συστήματα είναι στενά συνδεδεμένα στο επίπεδο πλεονασμού, το οποίο ορίζεται ως:

**Ορισμός 2.2 (Πλεονασμός)** *Πλεονασμός σημαίνει ικανότητα ενός στοιχείου ή συστήματος να διατηρεί ή να επαναφέρει τη λειτουργία του όταν έχει συμβεί ένα μόνο σφάλμα. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να επιτευχθεί με την εγκατάσταση πολλαπλών στοιχείων, συστημάτων ή εναλλακτικών μέσων εκτέλεσης μιας λειτουργίας.*

Ένα DP σύστημα αποτελείται από στοιχεία και συστήματα που δρουν μαζί για να πετυχαίνουν επαρκής αξιοπιστία ικανότητας διατήρησης θέσης. Η απαιτούμενη αξιοπιστία τέτοιων συστημάτων καθορίζεται από τη συνέπεια της απώλειας της ικανότητας διατήρησης της θέσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η συνέπεια, τόσο πιο αξιόπιστο θα πρέπει να είναι το σύστημα DP. Για να πετύχει αυτή η φιλοσοφία, οι απαιτήσεις έχουν ομαδοποιηθεί σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες εξοπλισμού. Η κατηγορία εξοπλισμού εξαρτάται από τη συγκεκριμένη DP λειτουργία, η οποία μπορεί να διέπεται από κανόνες και κανονισμούς παραλιακών θέσεων ή σε συμφωνία ανάμεσα στο χειριστή εταιρείας DP και των πελατών τους. Μια σύντομη περιγραφή των διαφορετικών τάξεων δίνεται παρακάτω.

**Κλάση 1** Για εξοπλισμό κλάσης 1, μπορεί να υπάρξει απώλεια θέσης σε περίπτωση απλής βλάβης, για παράδειγμα το σύστημα ελέγχου DP δε χρειάζεται να είναι πλεονάζον.

**Κλάση 2** Για εξοπλισμό κλάσης 2, δεν πρέπει να συμβεί απώλεια θέσης σε περίπτωση απλής βλάβης σε οποιοδήποτε ενεργό στοιχείο ή σύστημα. Το σύστημα ελέγχου DP πρέπει να έχει πλεονασμό σε όλα τα ενεργά συστατικά, για παράδειγμα το υλικό πρέπει να

αποτελείται από τουλάχιστον δύο ανεξάρτητα συστήματα υπολογιστών με ρουτίνες αυτοελέγχου και περιττές ρυθμίσεις μεταφοράς δεδομένων και διεπαφές εγκαταστάσεων. Τουλάχιστον τρία ανεξάρτητα συστήματα αναφοράς θέσης και τρία συστήματα αισθητήρων για κατακόρυφη μέτρηση κίνησης, τρία γυροσκόπια και τρεις αισθητήρες ανέμου.

**Κλάση 3** Όμοια με τη DP κλάσης 2, με πρόσθετες απαιτήσεις στον πλεονασμό στον τεχνικό σχεδιασμό και τη φυσική διάταξη.

Το σύστημα κλάσης 2 ή 3, πρέπει να περιλαμβάνει τη λειτουργία "Ανάλυση Συνεπειών", η οποία επαληθεύει συνεχώς ότι το πλοίο θα παραμείνει στη θέση του ακόμα και αν συμβεί το χειρότερο απλό λάθος. Οι κατευθυντήριες γραμμές IMO ορίζουν επίσης, τη σχέση ανάμεσα στην κλάση του εξοπλισμού και του τύπου λειτουργίας. Οι εργασίες γεώτρησης DP και η παραγωγή υδρογονανθράκων, για παράδειγμα, απαιτούν εξοπλισμό κλάσης 3, σύμφωνα με το IMO. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η συνοχή για τις σημειώσεις DP κλάσης από τα DNV, LRS, ABS και IMO.

IMO Equipment Class	DNV	Lloyds	ABS
Not applicable	Dynpos AUTS	DP CM	DPS-0
Class 1	Dynpos AUT	DP AM	DPS-1
Class 2	Dynpos AUTR	DP AA	DPS-2
Class 3	Dynpos AUTRO	DP AAA	DPS-3

Πίνακας 2.1: Πίνακας χαρτογράφησης συμβολισμού κατηγορίας DP από τους IMO, DnV, Lloyds και ABS.

Στο Σχήμα 2.16 το DNV [54], αναφέρει τις ελάχιστες απαιτήσεις για τη σημείωση κλάσης DP.

Table C1 System arrangement						
Subsystem or component		Minimum requirements for class notations				
		DYNPOS-AUTS	DYNPOS-AUT	DYNPOS-AUTR	DYNPOS-AUTRO	
		DPS 0	DPS 1	DPS 2	DPS 3	
Electrical power system	Electrical system		No-redundancy <sup>3)</sup>	No-redundancy <sup>3)</sup>	Redundancy in technical design	Redundancy in technical design and physical separation (separate compartments)
	Main switchboard		1 <sup>3)</sup>	1 <sup>3)</sup>	1	2 in separate compartments
	Bus-tie breaker		0 <sup>3)</sup>	0 <sup>3)</sup>	1	2, 1 breaker in each MSB
	Distribution system		Non-redundant <sup>3)</sup>	Non-redundant <sup>3)</sup>	Redundant	Redundant, through separate compartments
	Power management		No	No	AUTR: Yes DPS 2: No	AUTRO: Yes DPS 3: No
Thrusters	Arrangement of thrusters		No-redundancy	No-redundancy	Redundancy in technical design <sup>4)</sup>	Redundancy in technical design and physical separation (separate compartments)
	Single levers for each thruster at main DP-control centre		Yes	Yes	Yes	Yes
Positioning control system	Automatic control; number of computer systems		1	1	2	2 + 1 in alternate control centre
	Manual control; independent joystick system with automatic heading control <sup>2)</sup>		No	Yes	Yes	Yes
Sensors	Position reference systems		1	2	3	3 whereof 1 in alternate control centre
	External sensors	Wind	1	1	2	2 whereof 1 in alternate control centre
		Gyro compass	1	1	3 <sup>1)</sup>	3 <sup>1)</sup> whereof 1 in alternate control centre
		Vertical reference sensor (VRS)	1	1	AUTR: 3 DPS 2: 2 <sup>5)</sup>	3 whereof 1 in emergency control centre
UPS		0	1	2	2 + 1 in separate compartment	
Printer		Yes	Yes	Yes	Yes	
Alternate control centre for dynamic positioning control back-up unit		No	No	No	Yes	

1) One of the three required gyros may be replaced by a heading device based upon another principle, as long as this heading device is type approved as a TDH (Transmitting Heading Device) as specified in IMO Res. MSC.116 (73). For notation DYNPOS-AUTRO and DPS 3 this is not to be the gyro placed in the alternate control centre.

2) The heading input may be taken from any of the required gyro compasses.

3) When this is part of the ship normal electrical power system (i.e. used for normal ship systems, not only the DP system), then Pt.4 Ch.8 applies.

4) For DPS 2 see also B202.

5) Where necessary for the correct functioning of position reference systems, at least three vertical reference sensors are to be provided for notation DPS 2. If the DP-control system can position the ship within the operating limits without VRS corrections, only 2 VRSs are required.

Σχήμα 2.16: Ελάχιστες DNV απαιτήσεις (2010) για DP συμβολισμό κατηγορίας, εκδήλωση ευγένειας από την DNV.

## 2.9.2 Αξιοπιστία και Πλεονασμός

Από την άποψη της ασφάλειας, ένα σύστημα DP μπορεί να θεωρηθεί ως τέσσερα διαφορετικά υποσυστήματα. Κάθε υποσύστημα μπορεί έπειτα να διαιρεθεί σε υπό-υποσυστήματα. Για παράδειγμα:

- Επίπεδο 1: Σύστημα ισχύος. Επίπεδο 2: Παραγωγή ισχύος, διανομή ισχύος, μονάδες δίσκου, κλπ.

- Επίπεδο 1: Σύστημα προώθησης. Επίπεδο 2: Κύρια βίδα, προωθητήρες σήραγγας, αζιμούθιοι προωθητήρες.
- Επίπεδο 1: Σύστημα ελέγχου εντοπισμού θέσης. Επίπεδο 2: Υπολογιστής και I/O, HMI χειριστής, UPS, αλληλεπίδραση χειριστή.
- Επίπεδο 1: Σύστημα αισθητήρα. Επίπεδο 2: Γυροσκόπιο, συστήματα αναφοράς θέσης, αισθητήρες ανέμου.

Ξεκινώντας από το τέλος, η αξιοπιστία κάθε υπό-συστατικού μπορεί να προσδιοριστεί, και εξαρτώμενο από το επίπεδο πλεονασμού, η αξιοπιστία και διαθεσιμότητα του συνολικού συστήματος μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους. Κάθε συστατικό μπορεί να χαρακτηρίζεται από:

- Ποσοστό αποτυχίας  $\lambda$ , καθορισμένος μέγιστος αριθμός αποτυχιών ανά εκατομμύριο ώρες.
- Μέσος χρόνος μεταξύ αποτυχιών (MTBF), για ένα στοιχείο που δίνεται από  $MTBF = \frac{1}{\lambda}$
- Συνολικός χρόνος καθυστέρησης,  $T_d$ , ενός στοιχείου, συμπεριλαμβανομένου του μέσου χρόνου για επισκευή (MTTR).
- Διαθεσιμότητα,  $A$ , καθορισμένη ως

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

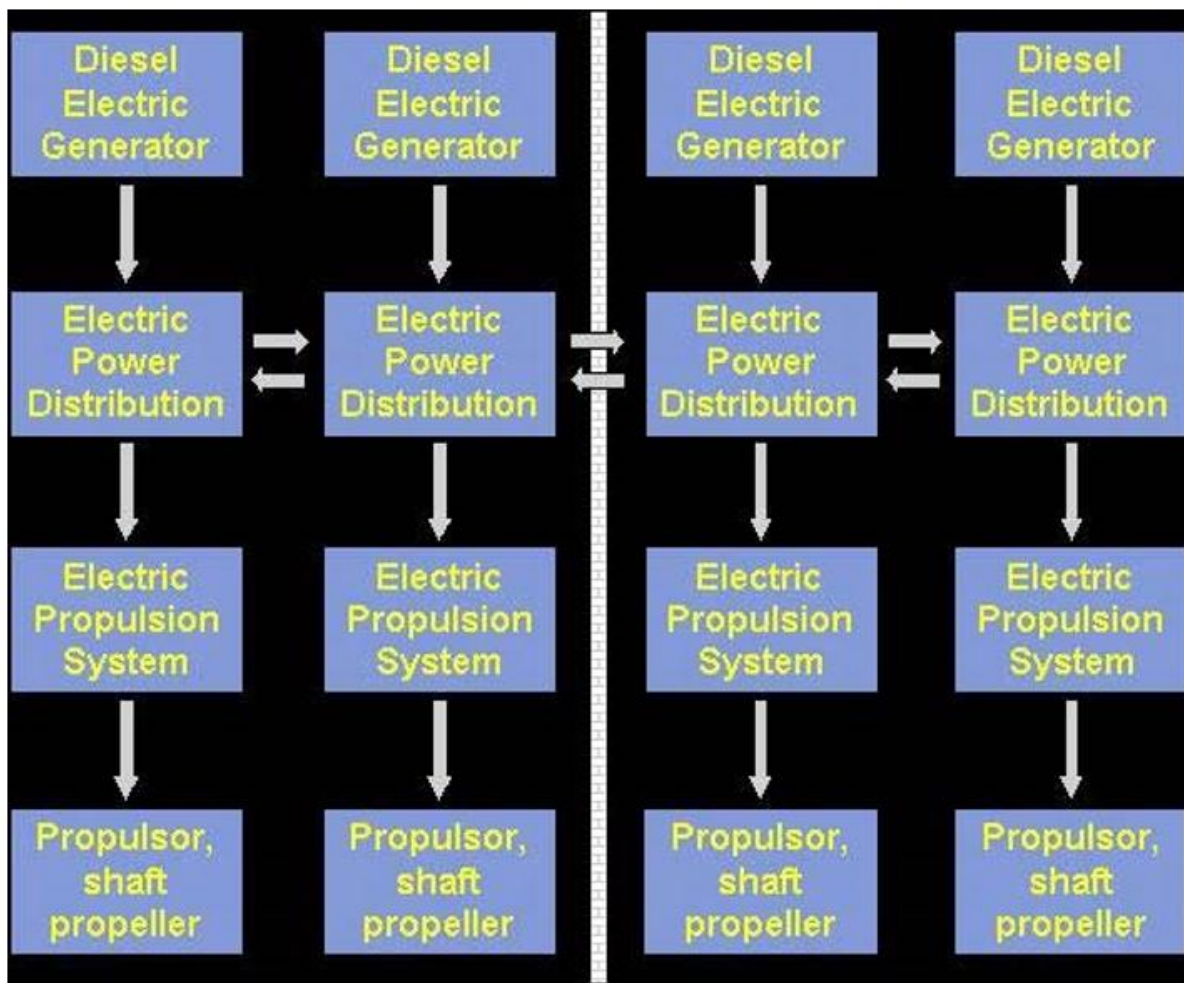
Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθορίζονται για κάθε στοιχείο ή κάθε επίπεδο σε μία ανάλυση αξιοπιστίας και θα χαρακτηρίζουν στο ανώτερο επίπεδο ολόκληρη τη μονάδα.

Η ιδέα πλεονασμού της ηλεκτρικής ισχύος και της μονάδας προώθησης, θα βασίζεται στην απαιτούμενη ικανότητα για ελιγμό και προώθηση μετά από σφάλματα στο σύστημα. Σε εμπορικά πλοία, αυτές οι απαιτήσεις καθορίζονται από εθνικές και διεθνείς νομοθεσίες, και προσδιορίζονται από τις κοινωνίες ταξινόμησης από τους διάφορους συμβολισμούς κλάσης. Ένα τυπικό διάγραμμα πλεονασμού για μια διάτρηση γεωτρήσεων κατηγορίας DP κλάσης 2/3 υποδεικνύεται στο Σχήμα 2.17. Κάθε τετράγωνο παρουσιάζει ένα μέρος του συστήματος, το οποίο είναι επιρρεπές σε μία μοναδική αποτυχία.



Στο υψηλότερο επίπεδο ελέγχων, η ιδέα πλεονασμού είναι διαφορετική και επιτυγχάνεται με την αναπαραγωγή των συστημάτων ελέγχου σε θερμή εφεδρική διαμόρφωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.18 για μία τυπική DP3 εξέδρα γεώτρησης.

Το σύστημα ελέγχου του πλοίου πρέπει να ακολουθεί τις ίδιες αρχές πλεονασμού και διαχωρισμού όπως το ηλεκτρικό σύστημα. Βασικά, αυτό επιτυγχάνεται με το σχεδιασμό της δομής ελέγχου του σκάφους σαν μια εικόνα καθρέπτη της μονάδας ηλεκτρικής ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19.



Σχήμα 2.17: Κάθε τετράγωνο αναπαριστά ένα μέρος του συστήματος το οποίο είναι ευαίσθητο σε μία μόνο αποτυχία.



### 2.9.3 Ανάλυση Αποτυχίας

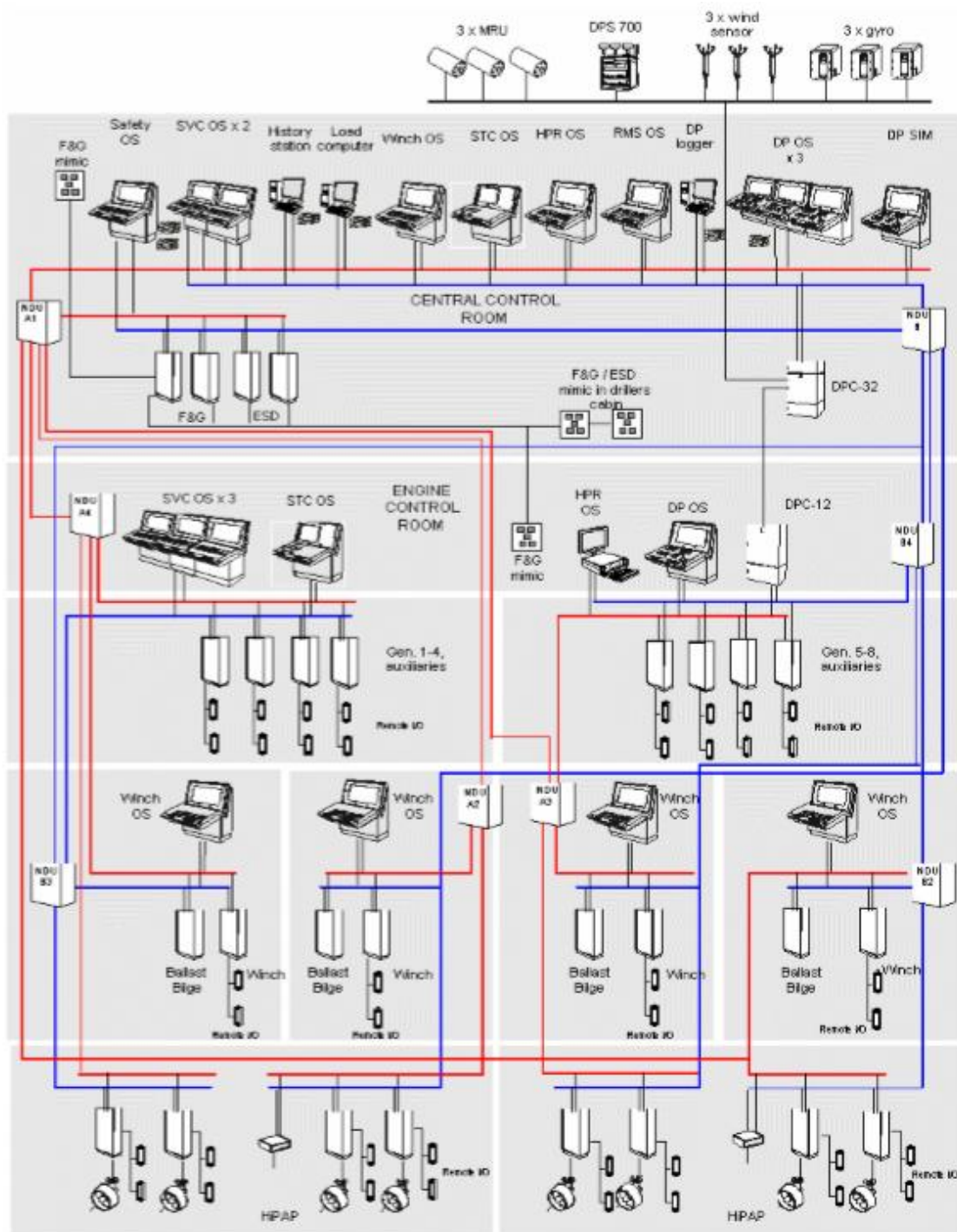
Το κόστος των αλλαγών στο σχεδιασμό κατά την αρχική φάση του έργου είναι μικρό, αλλά καθώς το έργο εξελίσσεται, το κόστος των αλλαγών σχεδιασμού αυξάνεται σημαντικά. Μικρές αλλαγές σε ένα σύστημα μπορεί να προκαλέσουν καθυστερήσεις του έργου και τεράστια πρόσθετα έξοδα κατά τη λειτουργία και τις θαλάσσιες δοκιμές. Κατά τη διάρκεια ολοκλήρωσης της φάσης σχεδιασμού νέων κτιρίων, η αξιοπιστία ολόκληρου του συστήματος μπορεί να διερευνηθεί διεξοδικά από διαφορετικές μεθοδολογίες αξιοπιστίας, για να εντοπίσουν τα λάθη του σχεδιασμού του συστήματος και έτσι να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος. Μια τέτοια ανάλυση του συστήματος DP και των υποσυστημάτων του, δεν απαιτείται από τις κοινωνίες κλάσης ή τις κατευθυντήριες γραμμές IMO. Ωστόσο, τα παράκτια κράτη, οι εταιρείες πετρελαίου ή οι πελάτες ενδέχεται να το απαιτήσουν, επιπρόσθετα στην έγκριση ταξινόμησης. Υπάρχουν διαφορετικές διαθέσιμες μέθοδοι για αξιολόγηση της αξιοπιστίας τέτοιων σύνθετων συστημάτων.

Μία κοινή μεθοδολογία είναι η μέθοδος αποτυχίας και η ανάλυση επίδρασης (FMEA). Αυτή είναι μία ποιοτική τεχνική αξιοπιστίας για συστηματική ανάλυση κάθε πιθανού τρόπου αποτυχίας μέσα σε ένα σύστημα και τον εντοπισμό της επίδρασης του αποτελέσματος σε αυτό το σύστημα, την αποστολή και το προσωπικό. Αυτή η ανάλυση μπορεί να επεκταθεί από μία ανάλυση κρισιμότητας (CA), μία ποσοτική διαδικασία η οποία κατατάσσει τους τρόπους αποτυχίας, με την πιθανότητά τους και τη συνέπειά τους.

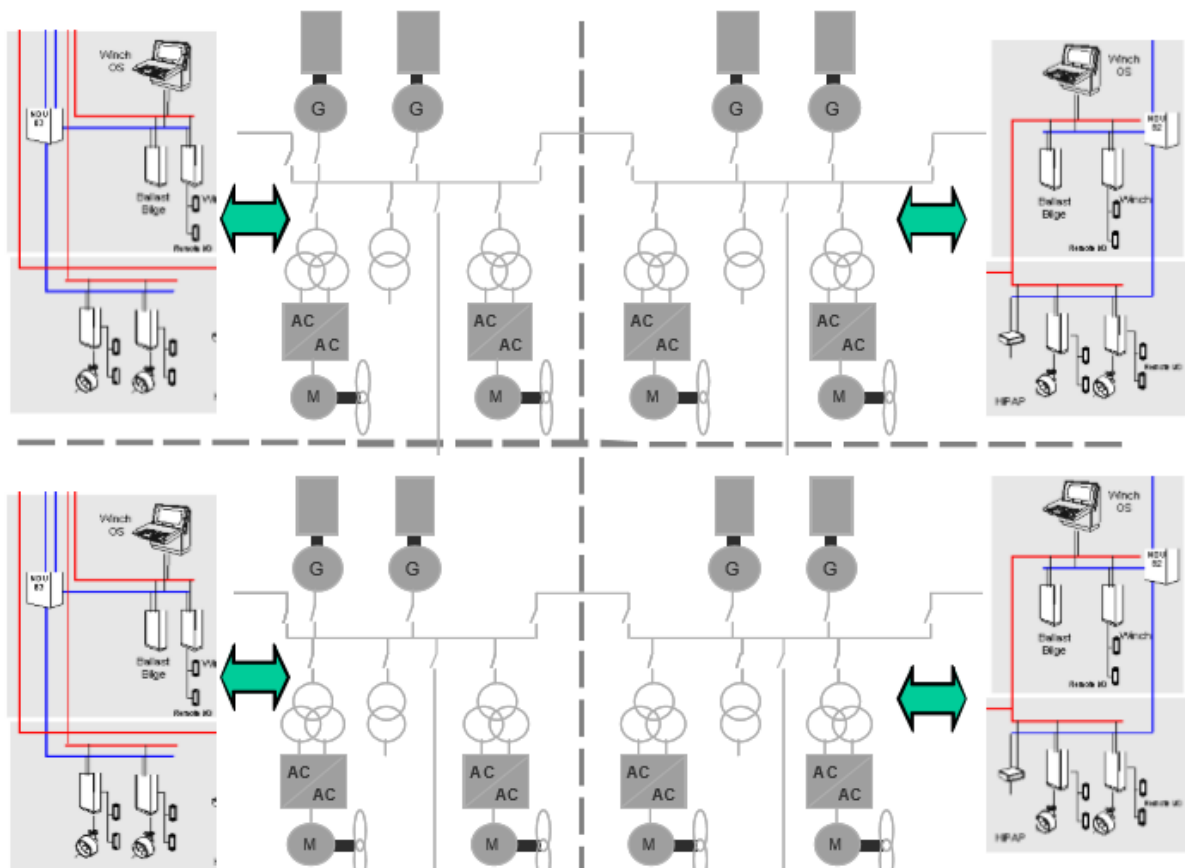
### 2.10 Προσομοίωση

Για χρόνια, αριθμητικοί προσομοιωτές έχουν χρησιμοποιηθεί ως εργαλεία στο σύστημα σχεδιασμού και ανάλυσης, τόσο στον ακαδημαϊκό χώρο όσο και στη βιομηχανία. Ο προσομοιωτής μπορεί να χρησιμοποιήσει μοντέλα ποικίλης ακρίβειας για την ανακατασκευή των πραγματικών φυσικών ιδιοτήτων ενός δυναμικού συστήματος, Sørensen et al. [298]. Για το σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου και τους στόχους δοκιμής, είναι βολικό να αναπτυχθεί ένας προσομοιωτής συστήματος πραγματικού χρόνου, Σχήμα 2.20. Για να λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο συχνά απλουστευμένα ή ισοδύναμα μοντέλα γρήγορων δυναμικών συστημάτων, όπως ηλεκτρονικά ισχύος, πολύπλοκα συστήματα όπως μέθοδος πολυδιάστατου πεπερασμένου στοιχείου (FEM), πρέπει να χρησιμοποιούνται μοντέλα κατασκευών και πίνακες υδροδυναμικής. Η μείωση και οι απλουστεύσεις του μοντέλου

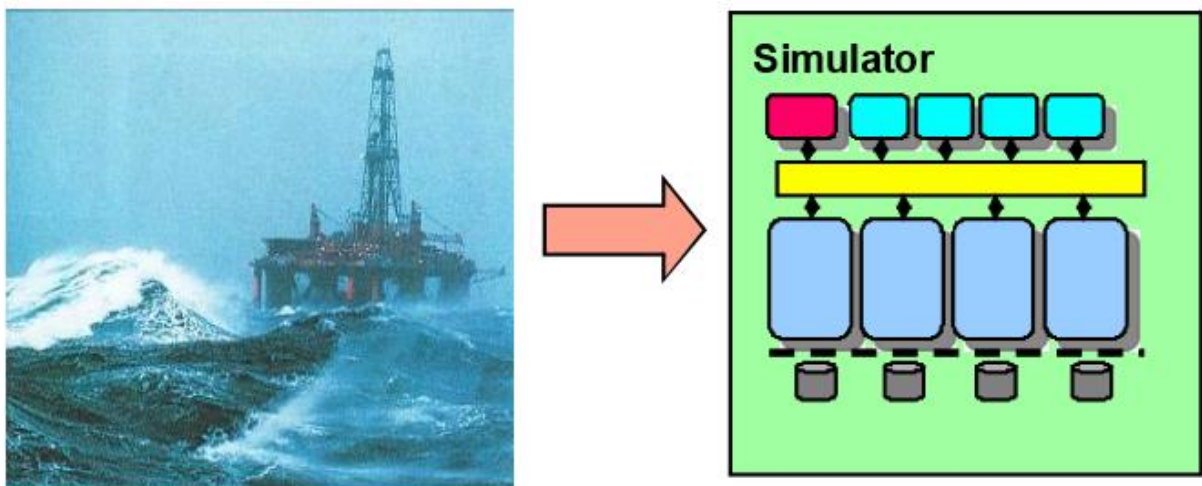
πρέπει να γίνονται με προσοχή, ώστε να μη χάνονται σημαντικές δομικές πληροφορίες και ιδιότητες του δυναμικού συστήματος.



Σχήμα 2.18: Ένα συνολικό ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου πλοίου για γεώτρηση σκαφών (Courtesy of Kongsberg Maritime).



Σχήμα 2.19: Ο σχεδιασμός καθρέπτη εικόνας του συστήματος ελέγχου πλοίου διασφαλίζει να πετύχει μία ενοποιημένη φιλοσοφία πλεονασμού και διαχωρισμού.



Σχήμα 2.20: Μαθηματικά μοντέλα λογισμικού του πλοίου, του εξοπλισμού και των συστημάτων του εφαρμόζονται και αναλύονται σύμφωνα με διαφορετικά περιβαλλοντικά φορτία, λειτουργικές απαιτήσεις και σενάρια.

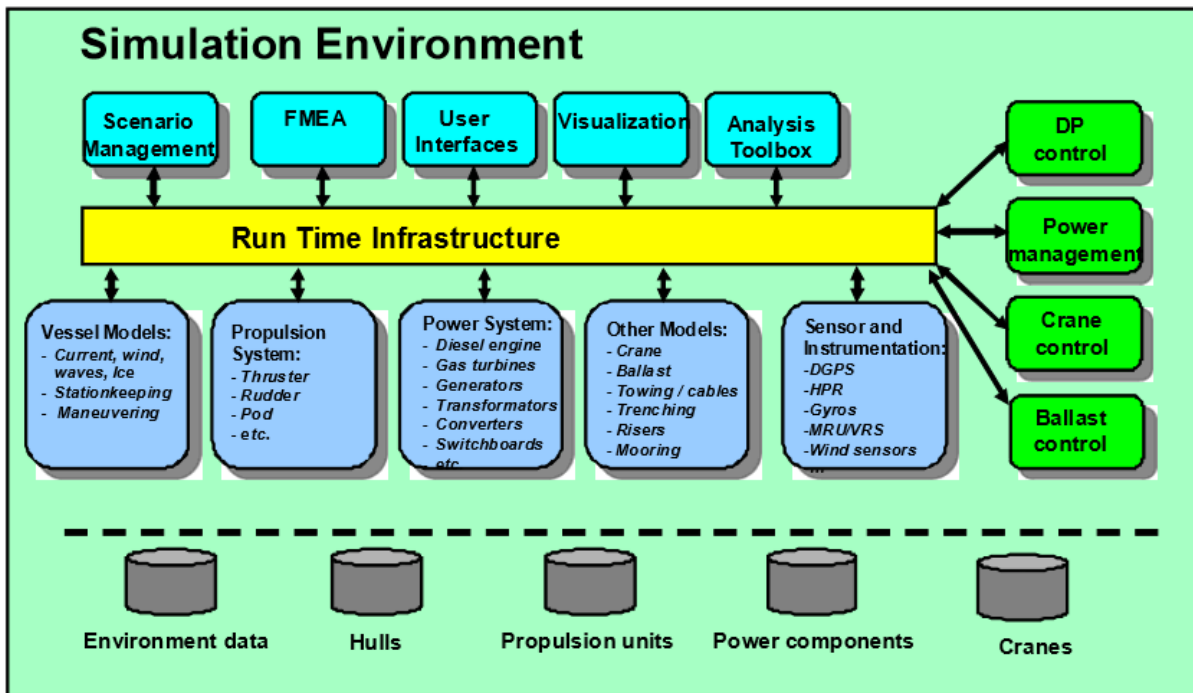
Στο NTNU ένας προσομοιωτής θαλάσσιου συστήματος όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.21, Προσομοιωτής Θαλάσσιων Συστημάτων (MSS, [195]), βασισμένος στο MATLAB/SIMULINK. MSS ενσωματώνει τις υδροδυναμικές επιστήμες, τις μηχανικές δομές, τη ναυτική μηχανή, την παραγωγή και διανομή ηλεκτρικής ισχύος, την πλοήγηση και τον αυτόματο έλεγχο των θαλάσσιων σκαφών. Ο βασικός σκοπός του MSS είναι να βελτιώσει τη συσσώρευση και την επαναχρησιμοποίηση των γνώσεων και επομένως την ποιότητα της εκπαίδευσης και της έρευνας. Ο προσομοιωτής θα αναπτύσσεται συνεχώς από φοιτητές και ερευνητές, και θα εξυπηρετεί μία ποικιλία εφαρμογών. Αυτό απαιτεί μια δομοστοιχειωτή δομή, στην οποία κάθε ενότητα είναι μια αυτόνομη μονάδα με μια καλά καθορισμένη διασύνδεση και λειτουργικότητα.

### **2.10.1 Κατασκευή Προσομοιωτή**

Ο πυρήνας του προσομοιωτή είναι τα μοντέλα των μονάδων επεξεργασίας ή τα μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία δίνουν την απαραίτητη λεπτομερή περιγραφή των δυναμικών του πλοίου, των συστημάτων και των συστατικών και του περιβάλλοντος χώρου του, βλέπε Σχήμα 2.21. Τα άλλα κύρια μέρη του προσομοιωτή είναι τα συστήματα ελέγχου που συνδέονται με τις μονάδες αισθητήρα και ενεργοποιητή. Τα συστήματα ελέγχου μπορούν για παράδειγμα να είναι σύστημα DP, σύστημα πρόσδεσης-θέση υποβοηθούμενη από το πηδάλιο, μηχανισμοί εντοπισμού θέσης και αυτόματοι πιλότοι, ελεγκτές τοπικής ώθησης, PMS, συστήματα ελέγχου γερανών, κλπ. Το MSS είναι κατασκευασμένο, εν μέρει, ως λογισμικό ανοιχτής πηγής (SW).

### **2.10.2 Ιεραρχία μονάδας**

Ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης και την απαιτούμενη ακρίβεια της λειτουργίας και της εφαρμογής που μελετάται, επιτρέπεται μια ιεραρχία στη μονάδα πολυπλοκότητας. Για κάθε εφαρμογή, ενδέχεται να υπάρχουν διάφορες μονάδες και επίπεδα απελευθέρωσης. Όλα αυτά πρέπει να καλύπτουν την ίδια βασική λειτουργικότητα και να έχουν τις ίδιες διασυνδέσεις, και ως εκ τούτου να μπορούν εύκολα να εναλλάσσονται. Το Σχήμα 2.22 δείχνει ένα παράδειγμα ιεραρχίας μονάδας, όπου η πολυπλοκότητα της μονάδας είναι σχεδιασμένη σε σχέση με το επίπεδο απελευθέρωσης και την εφαρμογή.



Σχήμα 2.21: Προσομοιωτής θαλάσσιων συστημάτων, NTNU.

### 2.10.3 Πλατφόρμα υλικού και λογισμικού

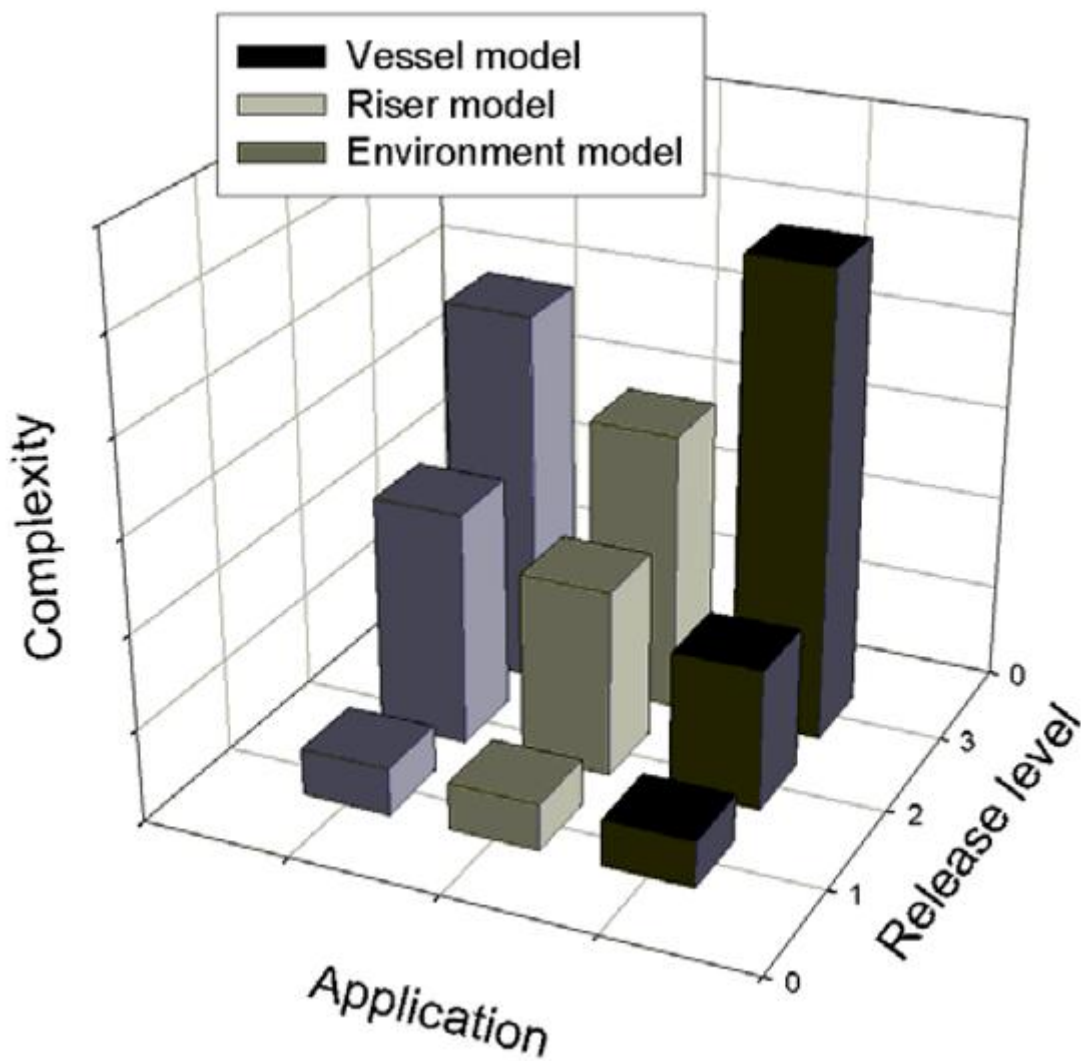
Ο προσομοιωτής αναπτύσσεται αυτή τη στιγμή σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK στην πλατφόρμα των Windows PC. Το SIMULINK επιλέχθηκε για τη λειτουργία του κύριου βρόχου προσομοίωσης εξαιτίας της ευελιξίας του προς πολλές γλώσσες προγραμματισμού. Οι εφαρμογές που είναι γραμμένες στα MATLAB, C, C++, και Fortran, μπορούν εύκολα να συνδεθούν με την προσομοίωση χρησιμοποιώντας λειτουργίες S. Αυτό είναι βολικό για τη δημιουργία μονάδων προσομοιωτή από τον υπάρχοντα κώδικα, και καθιστά την ανάπτυξη νέων μονάδων πιο φιλικές προς το χρήστη.

### 2.10.4 Δοκιμές Υλικού σε Βρόχο

Καθώς τα πλοία DP γίνονται πιο απαιτητικά και πολύπλοκα, η ασφάλεια, η αξιοπιστία και οι πτυχές ενσωμάτωσης με το σύστημα πλοήγησης, το εργοστάσιο ηλεκτρισμού, η αυτοματοποίηση του πλοίου, το σύστημα προώθησης και άλλοι καταναλωτές αποκτούν μεγαλύτερη σημασία. Για να μειωθούν αυτοί οι κίνδυνοι, οι ρυθμιστικοί φορείς, οι κοινωνικές τάξεις και οι ανεξάρτητοι σύμβουλοι αντιμετωπίζουν συνεχώς την πρόοδο των κανόνων και των κανονισμών και τις μεθοδολογίες δοκιμών και επαλήθευσης. Σε αυτό το

πλαίσιο, το καθεστώς ασφάλειας και επαλήθευσης, για τα συστήματα DP, μπορεί να θεωρηθεί ως παράδειγμα που πρέπει να ακολουθηθεί και για τα άλλα συστήματα ελέγχου κρίσιμης σημασίας.

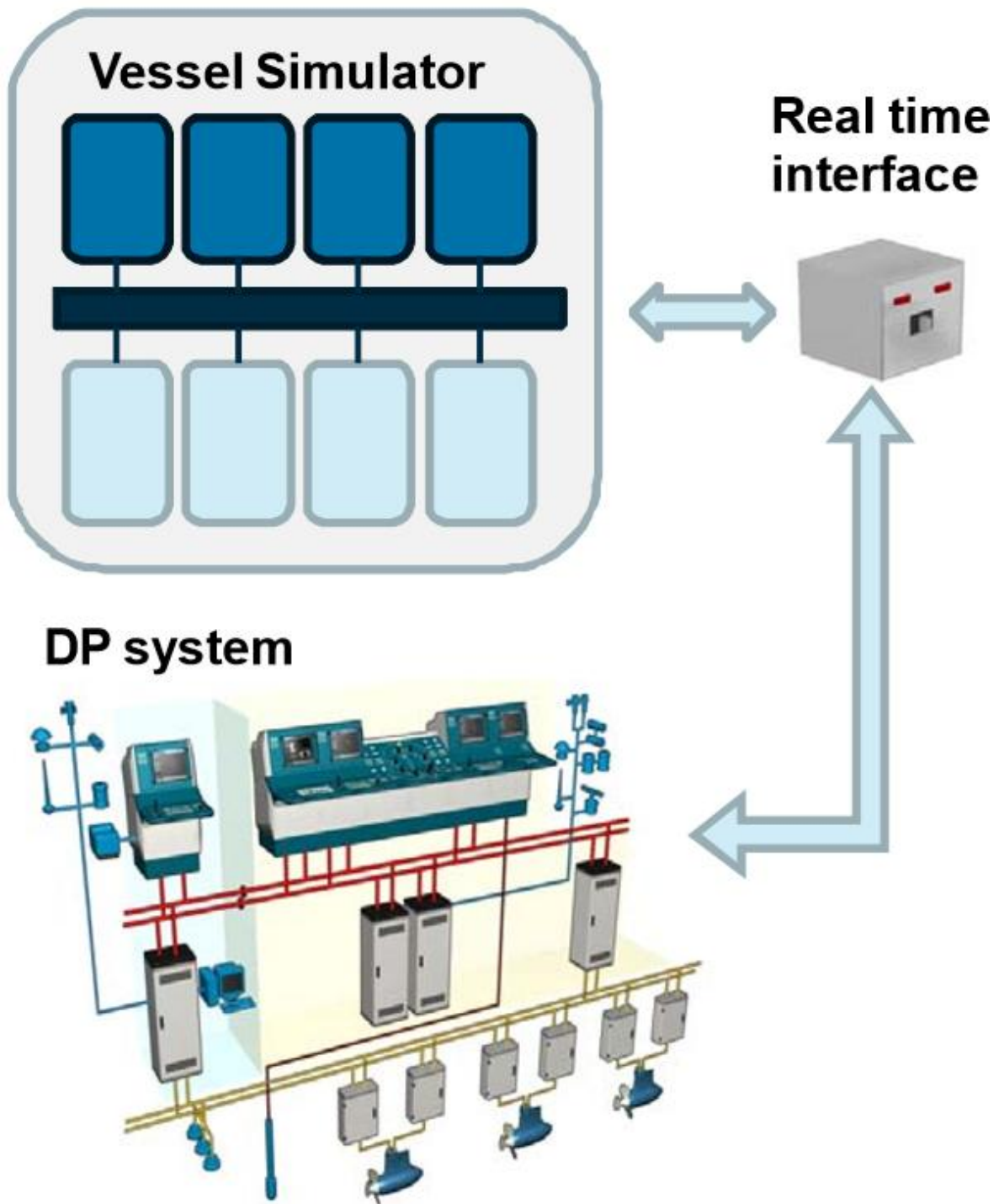
Η επιτυχημένη λειτουργία των DP πλοίων, εξαρτάται όλο και περισσότερο από την προηγμένη ολοκληρωμένη λειτουργικότητα των συστημάτων ελέγχου που βασίζονται σε λογισμικό. Συνεπώς, τα προβλήματα που σχετίζονται με το λογισμικό, συχνά σε συνδυασμό με σφάλματα υλικού και/ή ανθρώπινα λάθη, μπορούν να οδηγήσουν σε καθυστερήσεις κατασκευής πλοίου, χρόνο αργίας κατά τη διάρκεια λειτουργίας, μειωμένο εισόδημα για τους πελάτες, αυξημένο κόστος και μειωμένη ασφάλεια. Για να μειωθούν αυτοί οι κίνδυνοι, εφαρμόστηκε πρόσφατα ανεξάρτητος έλεγχος προσομοιωτή τρίτου μέρους υλικού βρόχου (Hardware-in-the-Loop (HIL)) για εκτεταμένες δοκιμές λογισμικού και επαλήθευσης συστημάτων DP σε διάφορα υπεράκτια πλοία. Στο έργο των Johansen et al. ([135], [136]), Johansen και Sørensen [137] και Smogeli [267], περιγράφεται η έννοια της HIL δοκιμής, και τα στατιστικά στοιχεία εμπειριών και ευρημάτων αναφέρονται από τη δοκιμή HIL των υπολογιστικών συστημάτων DP, τα συστήματα διαχείρισης ισχύος και διεύθυνσης, προώθησης και τα συστήματα ελέγχου προώθησης στα πλοία γεώτρησης, στην υπεράκτια υπηρεσία και στα κατασκευαστικά πλοία και δεξαμενόπλοια. Η κύρια ιδέα είναι η δοκιμή και η επαλήθευση του λογισμικού του υπολογιστή χρησιμοποιώντας προσομοιωτή ειδικά σχεδιασμένο για σκάφη (Σχήμα 2.23), ικανό να προσομοιώνει τη δυναμική απόκριση του πλοίου, του προωθητή και του συστήματος προώθησης, τους αισθητήρες, τα συστήματα αναφοράς θέσης, την παραγωγή ισχύος, τη διανομή, τους κύριους καταναλωτές και άλλο σχετικό εξοπλισμό (Sørensen et al. [298]). Ο προσομοιωτής συνδέεται μέσω διαδικτύου ή διασυνδέσεων διαύλου στο στοχευόμενο σύστημα ελέγχου, έτσι ώστε όλα τα σχετικά σήματα ανάδρασης και εντολής να προσομοιώνονται. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος δοκιμής, ο προσομοιωτής είναι σε θέση να προσομοιώνει ένα ευρύ φάσμα ρεαλιστικών σεναρίων που καθορίζονται από τους τρόπους λειτουργίας, τις επιχειρησιακές εργασίες και τις μεμονωμένες εργασίες, την κοινή λειτουργία και τις πολλαπλές λειτουργίες σφάλματος για να επαληθεύει τη σωστή λειτουργικότητα και απόδοση κατά τη διάρκεια κανονικών, μη φυσιολογικών και ελαττωματικών συνθηκών.



Σχήμα 2.22: Παράδειγμα μοντέλου ιεραρχίας.

Η δοκιμή HIL, μπορεί να διεξαχθεί σε διάφορες φάσεις ενός νέου κτιρίου ή εκσυγχρονισμού, όπου η πρώτη φάση είναι συνήθως μία εκτεταμένη δοκιμή λογισμικού που διεξάγεται στο εργοστάσιο ή σε μια εργαστηριακή εγκατάσταση. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία προσομοιωτή HIL, πραγματοποιείται εικονική δοκιμή στη θάλασσα με διεξοδικές δομές πριν κατασκευαστεί το σκάφος. Ο στόχος είναι η πλήρης λειτουργία και η δοκιμή λάθους του λογισμικού πριν από την έναρξη λειτουργίας και ολοκλήρωσης, εξασφαλίζοντας ότι το λογισμικό θα είναι πιο ολοκληρωμένο και έτοιμο για λειτουργία. Το σύστημα παρακολούθησης και ο έλεγχος ολοκλήρωσης εκτελούνται κανονικά κατά τη λειτουργία, και ένας τελικός έλεγχος της ολοκληρωμένης λειτουργικότητας πραγματοποιείται στο πλοίο στο τέλος της λειτουργίας.





Σχήμα 2.23: HIL δοκιμή.



## Κεφάλαιο 3

# Θαλάσσιες Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις και Ηλεκτρική Προώθηση Ντίζελ

Alf Kåre Ådnanes

ABB Marine, Pb. 6540 Rodeløkka, N-0501 Oslo, Norway

### 3.1 Εισαγωγή

#### 3.1.1 Αντικείμενο και Στόχοι

Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις υπάρχουν σε κάθε πλοίο, από τροφοδοσία επικοινωνίας και εξοπλισμό πλοήγησης, σύστημα συναγερμού και παρακολούθησης, λειτουργία κινητήρων για αντλίες, ανεμιστήρες ή βαρούλκα, μέχρι εγκατάσταση υψηλής ισχύος για ηλεκτρική πρόωση.

Η ηλεκτρική πρόωση είναι μια αναδυόμενη περιοχή όπου συναντιούνται διάφοροι τομείς αρμοδιοτήτων. Επιτυχημένες λύσεις για πλοία με ηλεκτρική προώθηση, βρίσκονται σε περιβάλλοντα όπου οι ναυτικοί αρχιτέκτονες, οι μηχανικοί υδροδυναμικής και προώθησης, και η τεχνογνωσία στον τομέα της ηλεκτρολογίας συνεργάζονται κάτω από κατασκευαστικές, επιχειρησιακές και οικονομικές εκτιμήσεις. Ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός και οι συμβιβασμοί μπορούν να επιτευχθούν με μία κοινή γλώσσα και την αμοιβαία κατανόηση των διαφόρων θεμάτων.

Ο σκοπός αυτού του τμήματος, είναι να δώσει μια εισαγωγή στην ηλεκτρο-τεχνολογία γενικά, και να δώσει ιδιαίτερη έμφαση στις εγκαταστάσεις για ηλεκτρική προώθηση. Στόχος είναι να δώσει στους μηχανικούς με θαλάσσια ικανότητα και υπόβαθρο, την απαραίτητη κατανόηση των σημαντικότερων ηλεκτρο-τεχνικών θεμάτων που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό και τη διαμόρφωση των πλοίων με ηλεκτρική πρόωση.

Μετά από μία εισαγωγική επισκόπηση της ιστορίας της ηλεκτρικής πρόωσης στην Ενότητα 3.1, και στους τομείς εφαρμογής ηλεκτρικής προώθησης στην Ενότητα 3.2, ακολουθεί μία

γενική περίληψη συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στην Ενότητα 3.3 και των σχετικών συστημάτων ελέγχου του στην Ενότητα 3.4 πριν τα κύρια χαρακτηριστικά των οδηγών της ηλεκτρικής προώθησης παρουσιαστούν στην Ενότητα 3.5. Σημαντικός σχεδιασμός και τεχνικές εκτιμήσεις εξετάζονται στις Ενότητες 3.6 και 3.7 πριν τελειώσουν, παρουσιάζοντας τυπικές ρυθμίσεις στην Ενότητα 3.8 με τη χρήση μονόγραμμων σχεδίων των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων σε ορισμένες σημαντικές εφαρμογές.

### **3.1.2 Κίνητρα για Ηλεκτρική Προώθηση**

Η ιδέα της ηλεκτρικής προώθησης δεν είναι καινούρια, η ιδέα ξεκίνησε πριν από περισσότερα από 100 χρόνια. Ωστόσο, με τη δυνατότητα ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων με μεταβλητή ταχύτητα σε μεγάλη κλίμακα ισχύος, με συμπαγείς, αξιόπιστες και οικονομικά ανταγωνιστικές λύσεις, η χρήση ηλεκτρικής προώθησης εμφανίστηκε σε νέους τομείς εφαρμογής κατά τις δεκαετίες του '80 και του '90.

Ηλεκτρική προώθηση με αεριοστρόβιλο ή κινητήρα παραγωγής πετρελαιοκίνητου κινητήρα χρησιμοποιείται σε εκατοντάδες πλοία διαφόρων τύπων και σε μια μεγάλη ποικιλία σχημάτων. Η εγκατεστημένη ισχύς ηλεκτρικής προώθησης στα εμπορικά πλοία, ήταν το 2002 στο εύρος των 6-7 GW (Gigawatt), σε συμπλήρωμα μιας σημαντικής εγκατάστασης σε εφαρμογές υποβρυχίου και επιφανειακού πολεμικού πλοίου.

Με την εισαγωγή των αζιμούθιων προωθητήρων και των υποβιβασμένων μονάδων ώθησης, οι διαμορφώσεις προώθησης για διέλευση, ελιγμό και διατήρηση σταθμού έχουν συγχωνευτεί σε διάφορους τύπους σκαφών, για να αξιοποιήσουν τις εγκατεστημένες μονάδες ώθησης για διέλευση, ελιγμό και δυναμική τοποθέτηση (δυναμική τοποθέτηση-DP).

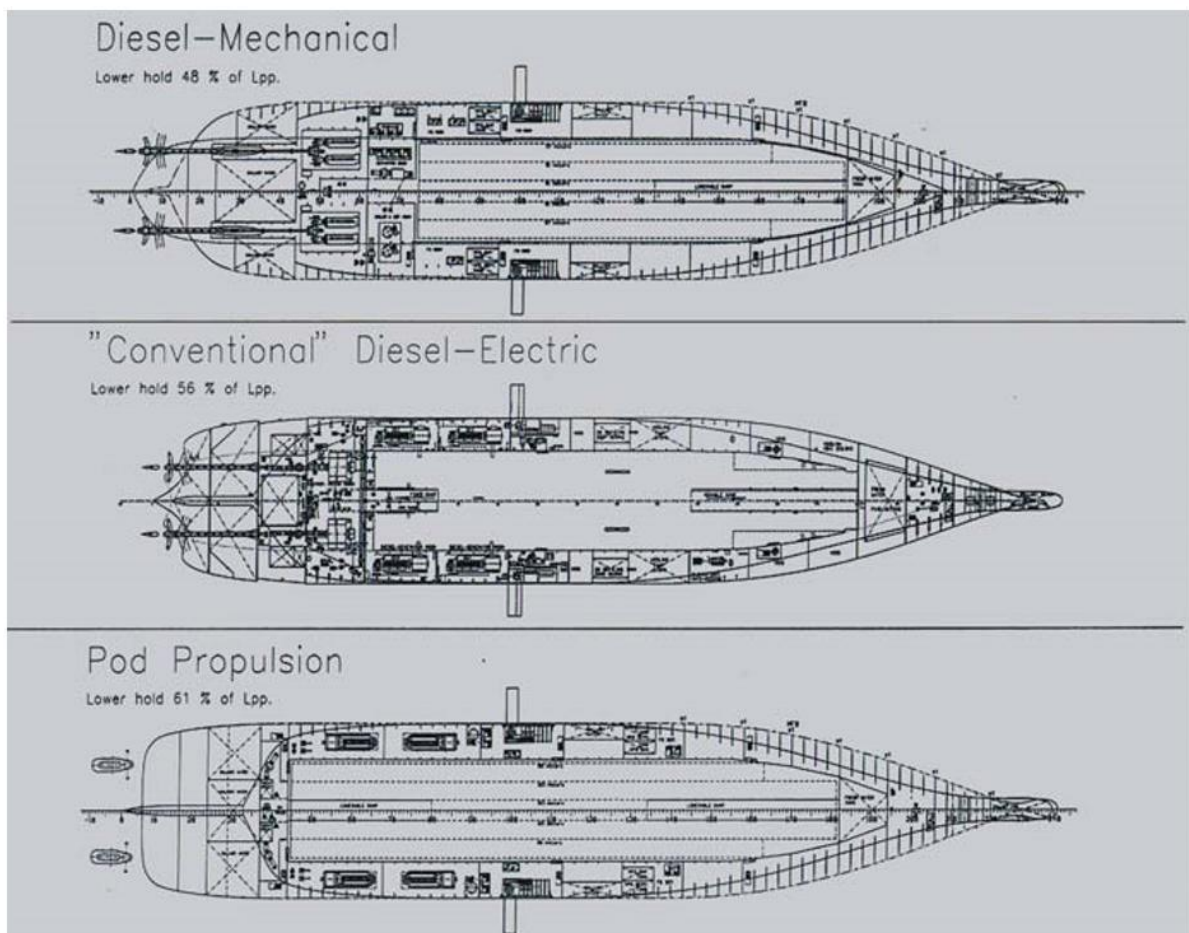
Προς το παρόν, η ηλεκτρική προώθηση εφαρμόζεται κυρίως στους ακόλουθους τύπους πλοίων: κρουαζιερόπλοια, οχηματαγωγά, σκάφη γεώτρησης DP, υποβοηθούμενο από τον προωθητή πλεούμενο πλωτό εγκαταστάσεων παραγωγής, πετρελαιοφόρα, στρώματα καλωδίου, στρώματα σωλήνα, παγοθραυστικά και άλλα πλοία πάγου, ναυτιλιακά σκάφη και πολεμικά πλοία. Υπάρχει επίσης, μία σημαντική συνεχής έρευνα και αξιολόγηση της χρήσης ηλεκτρικής προώθησης σε νέα σχέδια πλοίου για υπάρχοντες και νέους τομείς εφαρμογής.

Τα ακόλουθα χαρακτηριστικά συνοψίζουν τα κύρια οφέλη ηλεκτρικής προώθησης σε αυτούς τους τύπους πλοίων:

- Βελτιωμένο κόστος κύκλου ζωής, με μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και συντήρηση, ειδικά όπου υπάρχει μεγάλη διακύμανση στη ζήτηση φορτίου.

Παράδειγμα: για πολλά DP σκάφη, ένα τυπικά λειτουργικό προφίλ κατανέμεται εξίσου μεταξύ των λειτουργιών μεταφοράς και διατήρησης/ελιγμών του σταθμού.

- Μειωμένη ευαισθησία στην απλή αποτυχία του συστήματος και δυνατότητα βελτιστοποίησης της φόρτωσης πρωταρχικών κινητήρων (κινητήρας ντίζελ ή αεριοστρόβιλος).
- Ελαφριοί κινητήρες ντίζελ υψηλής/μεσαίας ταχύτητας.
- Λιγότερος χώρος κατανάλωσης και πιο ευέλικτη χρήση του χώρου του σκάφους, αυξάνουν το ωφέλιμο φορτίο του σκάφους, βλέπε Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Τρεις συγκριτικές έννοιες ενός σκάφους Rorax που δείχνουν πώς ο χώρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί καλύτερα με ηλεκτρική προώθηση και υποκινούμενη προώθηση.

- Ευελιξία στην τοποθεσία των συσκευών προώθησης, γιατί ο προωθητήρας τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια μέσω καλωδίων, και μπορεί να βρίσκεται πολύ ανεξάρτητος από τη θέση του κύριου κινητήρα.

- Βελτιωμένη ευελιξία χρησιμοποιώντας αζιμούθιους προωθητήρες ή υποκινούμενης προώθησης.
- Λιγότερο θόρυβο προώθησης και δονήσεις, δεδομένου ότι οι περιστρεφόμενες γραμμές άξονα είναι μικρότερες, οι πρωταρχικοί κινητήρες εκτελούνται σε σταθερή ταχύτητα, και χρησιμοποιώντας ελικοειδή τύπο έλξης, δίνει λιγότερη σπηλαίωση εξαιτίας μιας ομοιόμορφης ροής νερού.

Αυτά τα πλεονεκτήματα θα πρέπει να σταθμίζονται έναντι των υφιστάμενων κυρώσεων, όπως:

- Αυξημένα επενδυτικά κόστη. Ωστόσο, αυτό είναι συνεχώς θέμα για αναθεωρήσεις, καθώς το κόστος τείνει να μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των μονάδων που παράγονται.
- Πρόσθετα εξαρτήματα (ηλεκτρικός εξοπλισμός - γεννήτριες, μετασχηματιστές, οδηγοί και κινητήρες/μηχανές) μεταξύ του πρωταρχικού κινητήρα και της έλικας, αυξάνουν τις απώλειες μετάδοσης σε πλήρη φορτίο.
- Για νεοεισερχόμενους, ένας μεγαλύτερος αριθμός και ένας νέος τύπος εξοπλισμού, απαιτεί διαφορετική λειτουργία, επάνδρωση και στρατηγική συντήρησης.

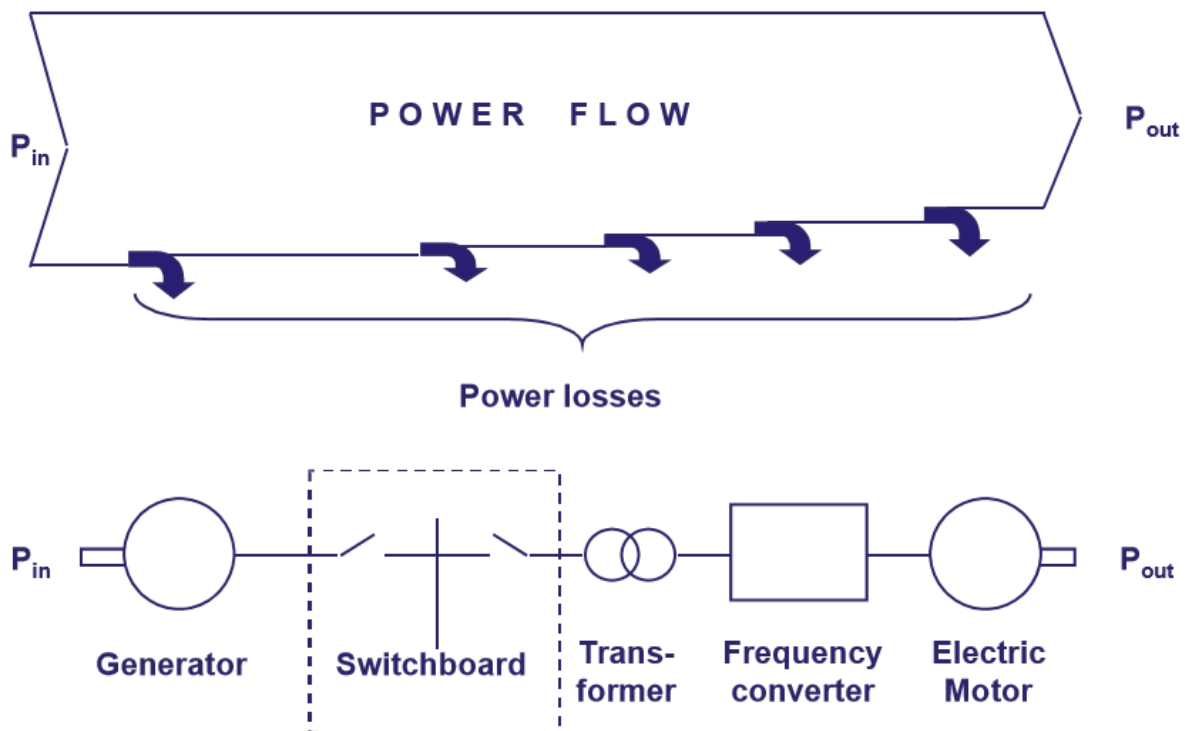
Η υψηλή διαθεσιμότητα ισχύος, η προώθηση και οι εγκαταστάσεις προωθητήρα καθώς και τα συστήματα ασφαλείας και αυτοματισμού, αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την επίτευξη του μέγιστου χρόνου λειτουργίας του σκάφους. Το σύστημα ασφαλείας και αυτοματισμού, που απαιτείται για την παρακολούθηση, την προστασία και τον έλεγχο της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και του συστήματος προωθητήρα, αποκτά όλο και μεγαλύτερη σημασία για την αξιόπιστη και βέλτιστη χρήση της εγκατάστασης (Blokland and van der Ploeg [33]).

### **3.1.3 Ροή Ισχύος και Αποδοτικότητα Ισχύος**

Σε κάθε απομονωμένο σύστημα ισχύος, η ποσότητα παραγόμενης ισχύος πρέπει να είναι ίση με την κατανάλωση ενέργειας συμπεριλαμβανομένων των απωλειών. Για ένα ηλεκτρικό σύστημα που αποτελείται από μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ένα σύστημα

διανομής, συμπεριλαμβανομένων των μετασχηματιστών διανομής, και έναν κινητήρα μεταβλητής ταχύτητας, η ροή ισχύος μπορεί να απεικονιστεί στο Σχήμα 3.2.

Οι πρώτοι κινητήρες, πχ κινητήρες ντίζελ ή αεριοστρόβιλοι, παρέχουν ισχύ στην ηλεκτρική γεννήτρια. Ο ηλεκτρικός κινητήρας, ο οποίος θα μπορούσε να είναι ο κινητήρας προώθησης, φορτίζεται με ισχύ από το φορτισμένο φορτίο του. Η απώλεια ισχύος στα εξαρτήματα μεταξύ του άξονα του κινητήρα ντίζελ και του άξονα του ηλεκτρικού κινητήρα, είναι μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες που αυξάνουν τη θερμότητα και τη θερμοκρασία στον εξοπλισμό και στο περιβάλλον. Η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος στο Σχήμα 3.2 είναι



Σχήμα 3.2: Ροή ισχύος σε ένα απλοποιημένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (3.1)$$

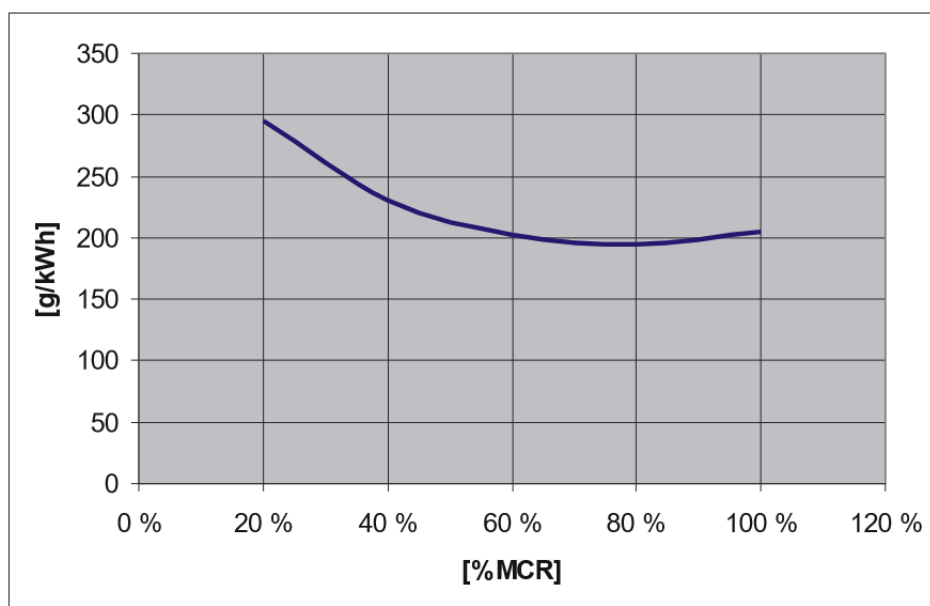
όπου  $P_{in}$  είναι η παραγόμενη ενέργεια,  $P_{out}$  είναι η μεταφερόμενη ενέργεια στο φορτίο (προωθητής), και  $P_{losses}$  είναι οι απώλειες. Για κάθε ένα από τα εξαρτήματα, η ηλεκτρική αποδοτικότητα μπορεί να υπολογιστεί, και οι τυπικές τιμές σε πλήρη (ονομαστική) ισχύ είναι:

- Γεννήτρια:  $n= 0.95 - 0.97$
- Πίνακας διανομής:  $n= 0.999$
- Μετασχηματιστής:  $n= 0.99 - 0.995$
- Μετατροπέας συχνότητας:  $n= 0.98 - 0.99$
- Ηλεκτρικός κινητήρας:  $n= 0.95 - 0.97$

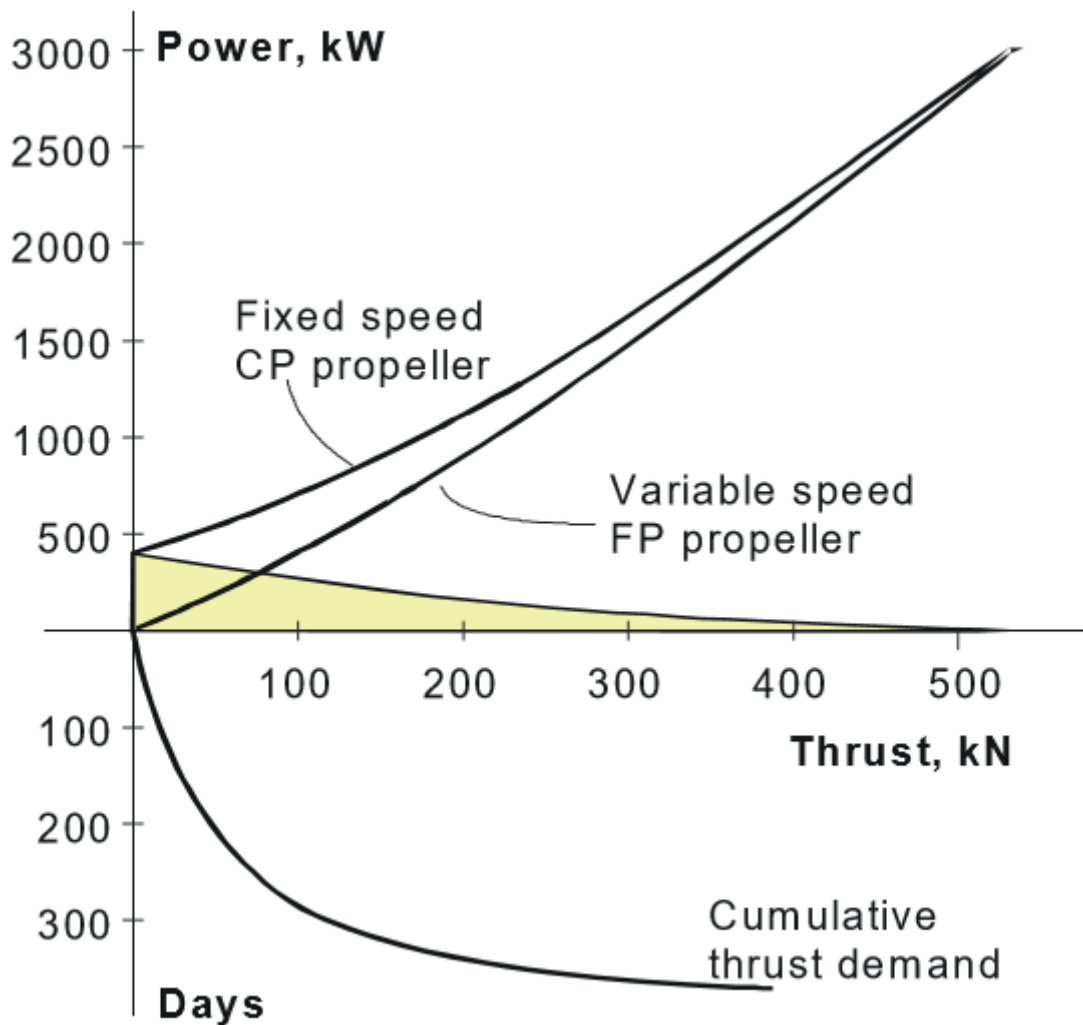
Ως εκ τούτου, η απόδοση ενός ηλεκτρικού συστήματος ντίζελ, από τον άξονα του κινητήρα ντίζελ, στον άξονα του ηλεκτρικού κινητήρα προώθησης, είναι κανονικά μεταξύ 0,88 και 0,92 με πλήρες φορτίο. Πρέπει να σημειωθεί ότι η απόδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φόρτωση του συστήματος.

Δεδομένου ότι τα επιπρόσθετα εξαρτήματα μεταξύ του κύριου κινητήρα και του άξονα έλικας σε ένα σύστημα ντίζελ ηλεκτρικής προώθησης συμβάλλουν σε συνολικές απώλειες περίπου 10%, η εξοικονόμηση καυσίμου ενδεχομένως να μην οφείλεται στο ηλεκτρικό στοιχείο. Πρέπει να ληφθεί υπόψη, η υδροδυναμική απόδοση μιας ταχύτητας ελεγχόμενης έλικας σε σύγκριση με μια προπέλα σταθερού ρυθμού ταχύτητας (CPP), και η απόδοση καυσίμου του κύριου κινητήρα όταν εγκαθίσταται σε ένα ηλεκτρικό σύστημα ντίζελ με σταθερή ταχύτητα και υψηλή φόρτωση, σε σύγκριση με ένα μηχανικό σύστημα προώθησης με έντονα μεταβαλλόμενο φορτίο. Οι διαφορές μπορεί να είναι σημαντικές, ειδικά στις χαμηλές λειτουργίες ώθησης ως DP και ελιγμό.

Το Σχήμα 3.3 δείχνει την εξοικονόμηση καυσίμου μιας τυπικής μηχανής πετρελαίου μεσαίας ταχύτητας, και το Σχήμα 3.4 μία σύγκριση ισχύος εναντίον ώθησης μιας μεταβλητής ταχύτητας και μιας έλικας ελεγχόμενου βήματος (CPP).



Σχήμα 3.3: Ειδική κατανάλωση καυσίμου κινητήρα ντίζελ (τυπική).



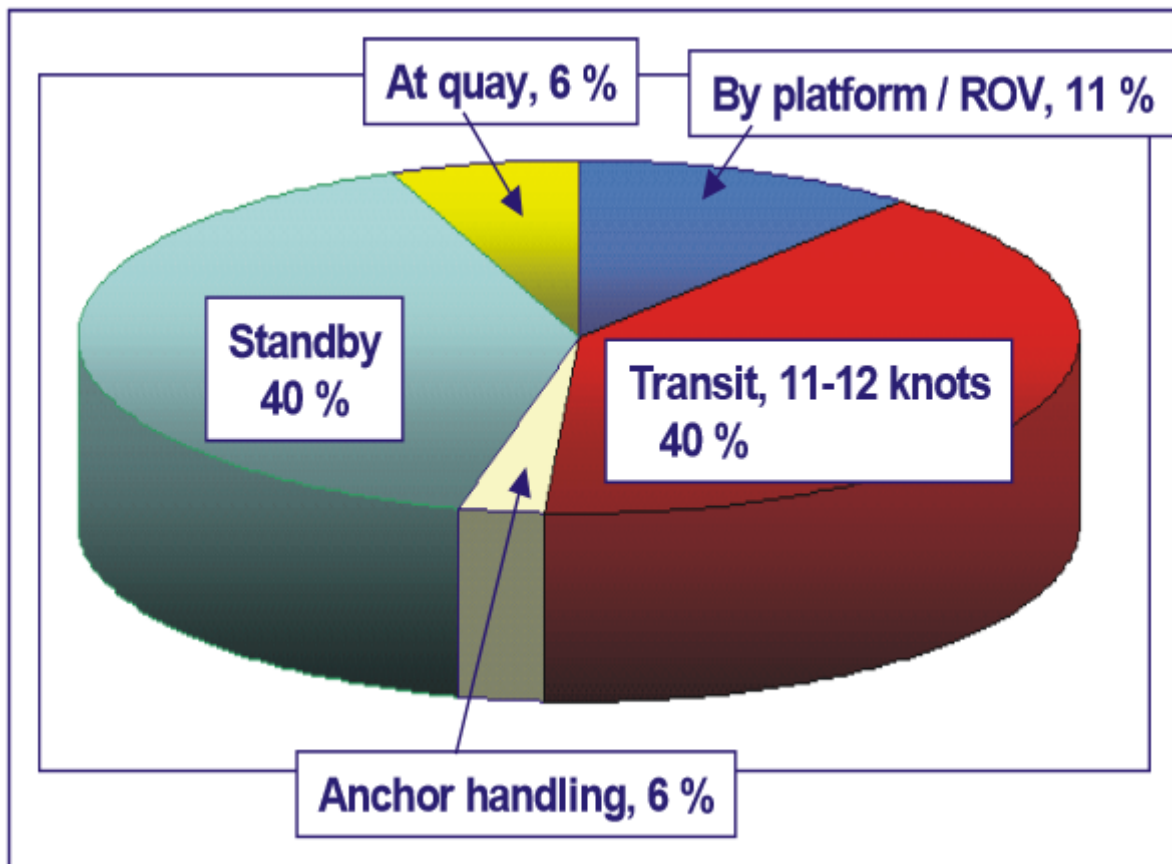
Σχήμα 3.4: Χαρακτηριστικά προπέλας ελκτικής ικανότητας (παράδειγμα).

Οι υδροδυναμικές απώλειες θα ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας για μία CPP που χρησιμοποιείται σε απευθείας οδηγούμενες λύσεις ντίτζελ σε σύγκριση με τις προπέλες σταθερού βήματος μεταβλητής ταχύτητας (FPP), που χρησιμοποιούνται κανονικά σε ηλεκτρική προώθηση. Σε κατάσταση χαμηλού φορτίου, ένας βασικός κανόνας είναι ότι οι υδροδυναμικές απώλειες μηδενικού φορτίου για ένα CPP είναι περίπου 15%, ενώ είναι κοντά στο 0 για μια ταχύτητα ελεγχόμενου FPP, βλέπε σχήμα 3.4. Παρατηρήστε ότι στις περισσότερες διαμορφώσεις CPP, η ταχύτητα της προπέλας πρέπει να διατηρείται σταθερή σε πολύ υψηλές περιστροφές ανά λεπτό (RPM), παρόλο που η ζήτηση ώθησης είναι μηδενική. Για το FPP, ο κινητήρας μεταβλητής ταχύτητας θα επιτρέπει μηδενικό RPM στη ζήτηση μηδενικής ώθησης. Το πλεονέκτημα με τη CPP, είναι ότι η αναλογία του βήματος προπέλας θα βελτιωθεί υδρο-δυναμικά για ένα ευρύτερο εύρος ταχύτητας. Μία έλικα που σχεδιάστηκε για υψηλή ταχύτητα διέλευσης, θα έχει μειωμένη απόδοση σε χαμηλή ταχύτητα και

αντίστροφα. Ως εκ τούτου, το λειτουργικό προφίλ είναι υψίστης σημασίας κατά το σχεδιασμό συστήματος προώθησης.

Τα χαρακτηριστικά απόδοσης καυσίμου του πετρελαιοκινητήρα, με μέγιστη απόδοση καυσίμου στο εύρος φορτίου από 60 έως 100% φορτίο, συμβάλλουν σημαντικά στη διαφορά στην κατανάλωση ισχύος για ένα παραδοσιακό σύστημα μηχανικής προώθησης, και ένα ηλεκτρικό σύστημα προώθησης ντίζελ. Σε μία μονάδα ισχύος για ηλεκτρική προώθηση ντίζελ, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα αποτελείται από πολλαπλούς μικρότερους κινητήρες ντίζελ, όπου ο αριθμός των τρεχόντων συνόλων μπορεί να επιλεγεί ώστε να έχει μια βέλτιστη φόρτωση για κάθε κινητήρα. Η ταξινόμηση των κινητήρων μπορεί επίσης να προσαρμοστεί για να ταιριάζει στο προβλεπόμενο επιχειρησιακό προφίλ του σκάφους, εξασφαλίζοντας ότι είναι δυνατόν να βρεθεί μια βέλτιστη διαμόρφωση για τους περισσότερους τρόπους λειτουργίας και το χρόνο.

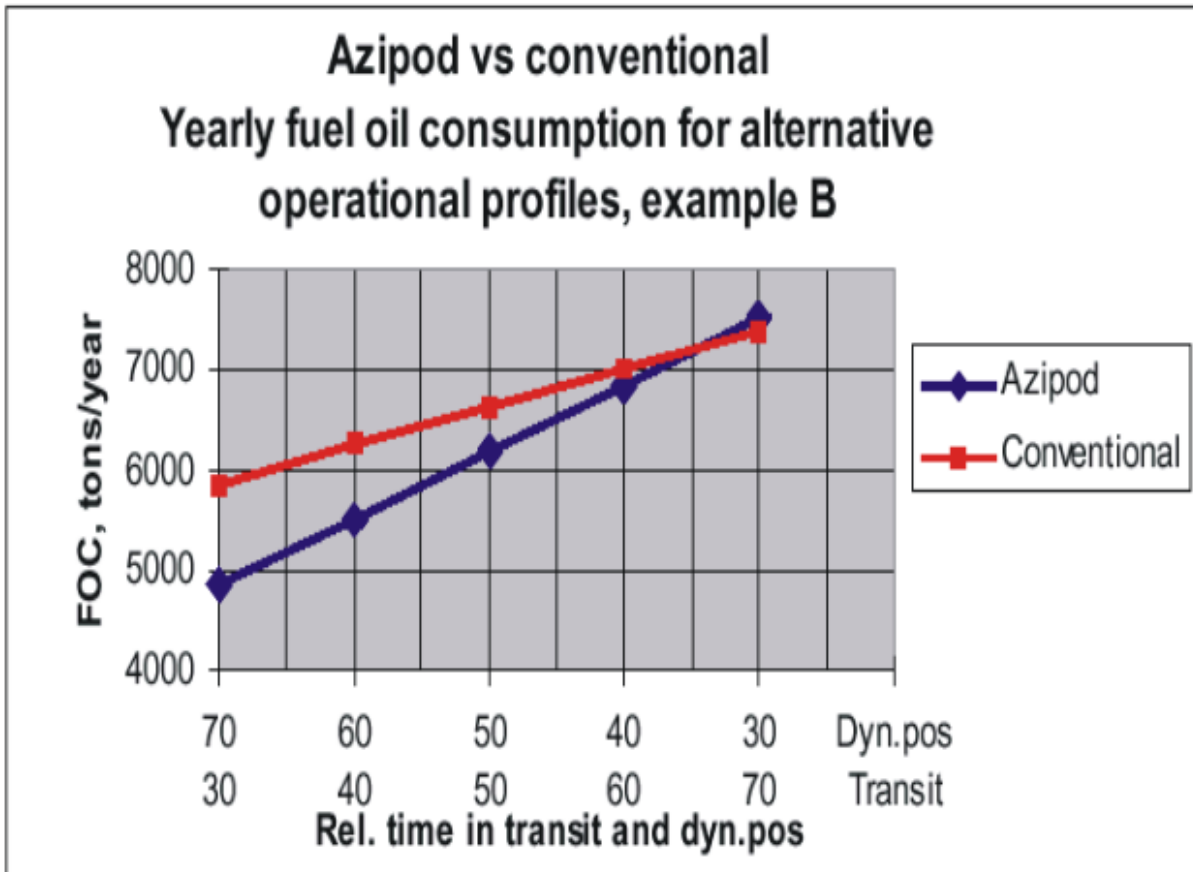
Για ένα πεδίο υποστήριξης σκάφους, με λειτουργικό προφίλ όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5, διαπιστώθηκε ότι οι εξοικονομήσεις καυσίμου με τη χρήση ηλεκτρικού κινητήρα ντίζελ ήταν στο εύρος των 700 τόνων ντίζελ το χρόνο.



Σχήμα 3.5: Λειτουργικό προφίλ για ένα πεδίο υποστήριξης σκάφους.



Με μία τιμή περίπου 3 NOK ανά λίτρο, αυτό δίνει ετήσιες εξοικονομήσεις της τάξεως των 2.1 εκατομμυρίων NOK (280.000 δολάρια ΗΠΑ). Όπως φαίνεται, οι εξοικονομήσεις θα εξαρτώνται έντονα από το λειτουργικό προφίλ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Εδώ, το επιχειρησιακό προφίλ χωρίζεται σε DP/ελιγμό και σε διαμετακόμιση, δείχνοντας πώς ένα τμήμα αύξησης των DP λειτουργιών θα αυξήσει τις εξοικονομήσεις, και αντίστροφα.



Σχήμα 3.6: Κατανάλωση καυσίμου, σε σύγκριση με ηλεκτρική πρόωση (Azipod) και συμβατική μηχανική πρόωση.

### 3.1.4 Ιστορική Επισκόπηση της Ηλεκτρικής Προώθησης

Μετά τις μάλλον πειραματικές εφαρμογές της μπαταρίας που οδήγησε σε ηλεκτρική προώθηση, στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα έλαβε χώρα στη Ρωσία και στη Γερμανία, η πρώτη γενιά ηλεκτρικής προώθησης που χρησιμοποιήθηκε στη δεκαετία του 1920 σαν αποτέλεσμα του ισχυρού ανταγωνισμού για μείωση των διατλαντικών χρόνων διέλευσης για επιβάτες. Εκείνη την εποχή, η υψηλή ζήτηση προώθησης ισχύος, θα μπορούσε να επιτευχθεί μόνο από ηλεκτροκίνητο μηχανήμα. Το “S/S Normandie” ήταν ένα από τα πιο φημισμένα. Οι γεννήτριες τουρμπίνων αέρα παρείχαν ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε για να οδηγήσει τους

29 MW σύγχρονους ηλεκτρικούς κινητήρες σε κάθε έναν από τους τέσσερις κοχλίες. Η ταχύτητα περιστροφής δόθηκε από την ηλεκτρική συχνότητα των γεννητριών. Οι γεννήτριες θα εκτελούσαν κανονικά έναν κινητήρα προώθησης η κάθε μία, αλλά υπήρχε επίσης η πιθανότητα για τροφοδοσία δύο κινητήρων προώθησης από κάθε γεννήτρια για πλεύση σε χαμηλότερες ταχύτητες.

Με την εισαγωγή υψηλής αποδοτικότητας και οικονομικά ευνοϊκών κινητήρων ντίζελ στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα, η τεχνολογία ανεμοστρόβιλου και η ηλεκτρική προώθηση εξαφανίστηκαν περισσότερο ή λιγότερο από τα εμπορικά πλοία μέχρι τη δεκαετία του 1980.

Η ανάπτυξη ηλεκτροκίνητων μεταβλητής ταχύτητας, αρχικά από τον AC/DC διορθωτή (Σιλικόνη Ελεγχόμενης Διόρθωσης – SCR) στη δεκαετία του 1970 και οι AC/DC μετατροπείς στις αρχές της δεκαετίας του 1980, ενεργοποίησαν την ηλεκτροπαραγωγή βασισμένη στο ηλεκτρικό σύστημα προώθησης, το οποίο είναι χαρακτηριστικό της δεύτερης γενιάς ηλεκτρικής προώθησης. Μία σταθερή τάση και συχνότητα μονάδας ηλεκτροπαραγωγής που αποτελείται από έναν αριθμό συνόλων-γεννητριών που τροφοδοτεί στο ίδιο δίκτυο, τροφοδότησε την προώθηση όπως επίσης και την ξενοδοχειακή και βοηθητική ισχύ. Ο έλεγχος προώθησης πραγματοποιήθηκε από τον έλεγχο ταχύτητας των προπελών σταθερού βήματος (FPP). Αυτές οι λύσεις, χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά σε ειδικά σκάφη, όπως σκάφη έρευνας και παγοθραυστικά, αλλά επίσης και σε κρουαζιερόπλοια. Το “S/S Queen Elizabeth II” μετατράπηκε σε ηλεκτρική προώθηση στα μέσα της δεκαετίας του 1980, και αργότερα ακολούθησαν τα κρουαζιερόπλοια κατηγορίας Fantasy και Princess, διάφορα DP σκάφη, και πετρελαιοφόρα. Παρατηρήστε ότι, στην άμεση κίνηση προώθησης ντίζελ, η ώθηση ελέγχεται κανονικά από ένα υδραυλικό σύστημα που μεταβάλλει τη γωνία κλίσης της προπέλας. Αυτό υποδηλώνεται ως προπέλες ελεγχόμενου βήματος (CPP).

Η υποκινούμενη προώθηση εισήχθη στις αρχές της δεκαετίας του 1990, όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι εγκατεστημένος απευθείας στον άξονα προπέλας σταθερού βήματος, σε ένα βυθισμένο, περιστρεφόμενο λοβό. Παρόλο που αυτή η ιδέα αναπτύχθηκε αρχικά για να βελτιώσει την απόδοση των παγοθραυστών, βρέθηκε γρήγορα να έχει επιπλέον πλεονεκτήματα στην υδροδυναμική απόδοση και ευελιξία. Μετά την πρώτη εφαρμογή σε ένα κρουαζιερόπλοιο, το “M/S Elation”, τα πλεονεκτήματα ήταν τόσο πειστικά, ώστε η υποκινούμενη προώθηση σχεδόν όλη τη νύχτα, έγινε ένα νέο πρότυπο στα νέα κρουαζιερόπλοια, Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Το κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation” (κάτω δεξιά) εξοπλισμένο με προώθηση Aziprod ελευθερώνει χώρο σε σύγκριση με σκάφη ίδιου τύπου (πάνω αριστερά) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άλλους σκοπούς, π.χ. γκρίζα επεξεργασία νερού.

## 3.2 Εφαρμογές

### 3.2.1 Επιβατηγά πλοία – Κρουαζιερόπλοια και Οχηματαγωγά

Τα επιβατηγά πλοία, τα κρουαζιερόπλοια και τα οχηματαγωγά πλοία, έχουν πολύ μεγάλη ανάγκη για άνεση πάνω στο πλοίο, σχετικά με το θόρυβο και τον κραδασμό. Επιπλέον, η αξιοπιστία και η διαθεσιμότητα είναι πολύ κρίσιμες για την ασφάλεια των επιβατών και του σκάφους. Συνεπώς, η ηλεκτρική προώθηση αξιολογήθηκε νωρίς για να είναι ωφέλιμη και να χρησιμοποιηθεί.

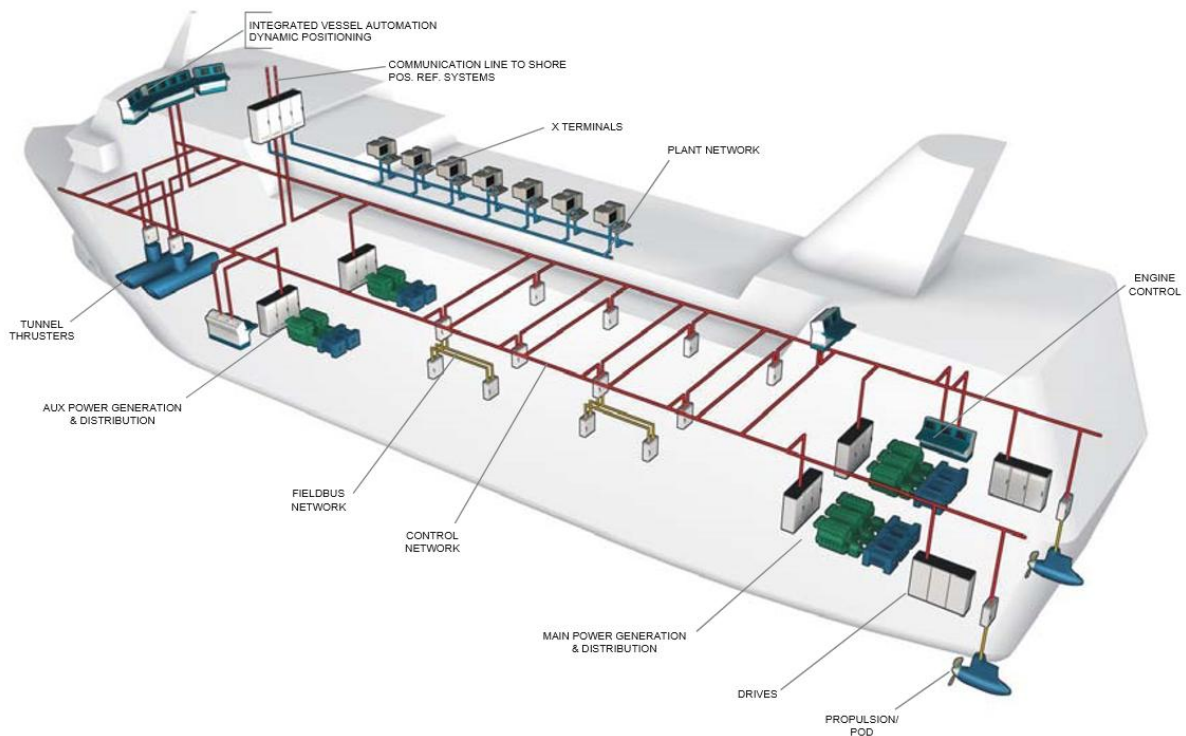
Ο κατάλογος των κρουαζιερόπλοιων με ηλεκτρική πρόωση είναι σήμερα εκτενής και αυξάνεται. Καθώς η προωθημένη πρόωση παρουσιάζει σημαντικές βελτιώσεις στην ικανότητα ελιγμού και στο κόστος καυσίμων (Kurimo [157]), ένα μεγάλο και αυξανόμενο τμήμα νέων κτιρίων προσδιορίζεται με ηλεκτρική υποβιβασμένη πρόωση.

Καθώς αυξάνεται η περιβαλλοντική ανησυχία, αυξάνονται οι απαιτήσεις μειωμένης εκπομπής, διαρροής και ζημιών σε κοραλλιογενείς υφάλους με την αγκύρωση των κρουαζιερόπλοιων. Ως εκ τούτου, το πλοίο πρέπει να διατηρεί τη θέση του μόνο με προωθητήρες που ελέγχονται από ένα σύστημα DP. Αυτό θα αυξήσει ακόμα περισσότερο την

ανάγκη για ηλεκτρική προώθηση και υποκινούμενη προώθηση στην αγορά κρουαζιερόπλοιων.

Οι ίδιοι περιορισμοί και φορολογικές κυρώσεις για τις εκπομπές αερίου (CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub>), κατέληξαν σε αυτά τα πολλά πρόσφατα νέα κτίρια των φέρι μποτ για τα φιόρδ και τη διέλευση στενών που έχουν εξοπλιστεί με ηλεκτρική πρόωση. Με συχνά δρομολόγια διέλευσης και πρόσδεση στην αποβάθρα, η βελτιωμένη ευελιξία με υποκινούμενη προώθηση έχει μειώσει σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου. Η ισχύς προώθησης ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος του σκάφους, από λίγα MW για μικρότερα οχηματαγωγά μέχρι 30-40 MW για μεγάλα κρουαζιερόπλοια. Το φορτίο του ξενοδοχείου μπορεί να είναι σημαντικό μέρος της συνολικής εγκατάστασης ισχύος, για ένα μεγάλο κρουαζιερόπλοιο συνήθως 10-15 MW.

Το Σχήμα 3.8 δείχνει μια σχηματική επισκόπηση των κυριότερων ηλεκτρικών και αυτόματων εξαρτημάτων σε ένα τυπικό κρουαζιερόπλοιο με ντίζελ-ηλεκτρική υποκινούμενη προώθηση.



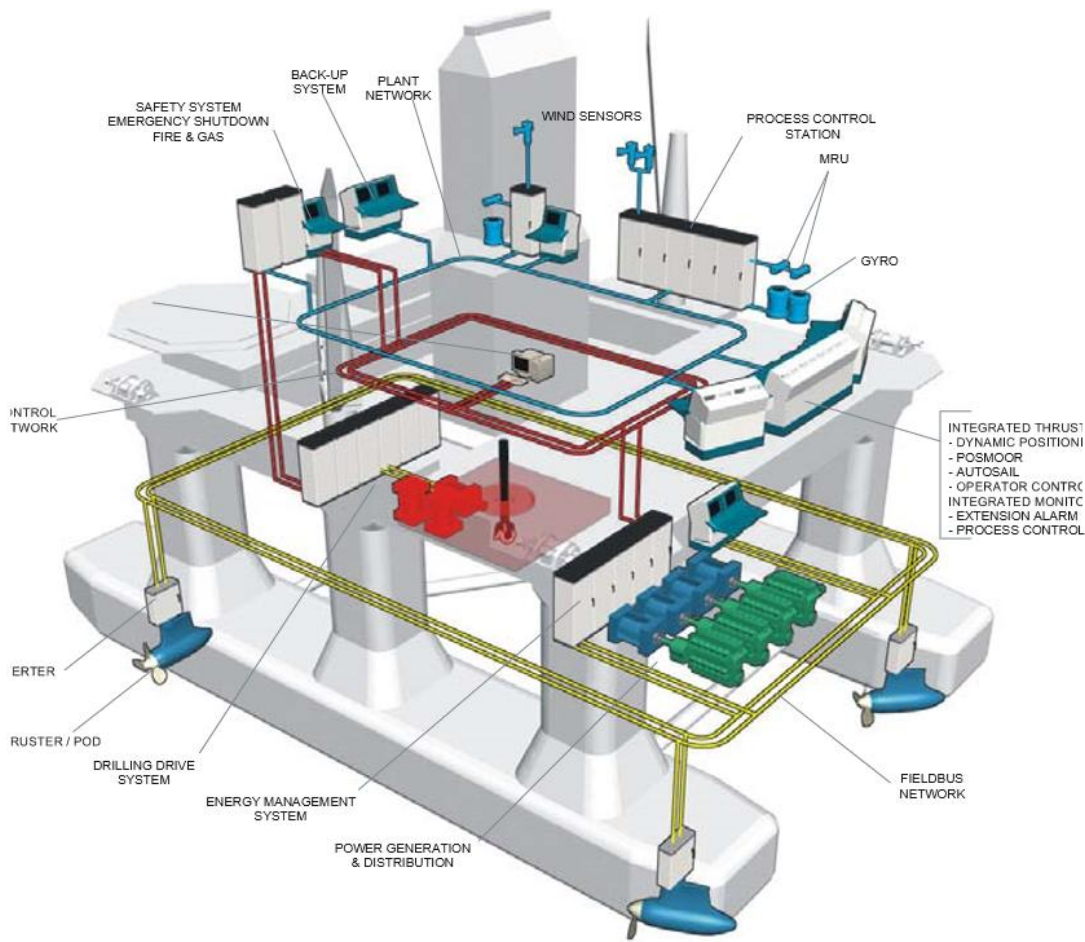
Σχήμα 3.8: Παράδειγμα διαρρύθμισης συστήματος προώθησης και ελέγχου για ένα κρουαζιερόπλοιο.

### **3.2.2 Εκμετάλλευση και Εξερεύνηση Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου: Μονάδες Γεώτρησης, Πλοία Παραγωγής και Δεξαμενόπλοια**

Πριν από μερικά χρόνια, εκτεταμένες πηγές πετρελαίου και φυσικού αερίου ήταν προσβάσιμες σε ρηχά νερά και μπορούσαν να εκμεταλλευτούν από σταθερές μονάδες γεώτρησης και παραγωγής. Στη Βόρεια Θάλασσα, στον Κόλπο του Μεξικού (GOM), και στη Βραζιλία όπως και σε πολλές άλλες περιοχές, εκείνοι οι νέοι πόροι που παραμένουν βρίσκονται σε μικρότερα και/ή λιγότερο διαθέσιμα πεδία σε βαθύτερα νερά. Αυτά τα πεδία, απαιτούν νέες οικονομικά-αποδοτικές μεθόδους για την απόκτηση αποδεκτής οικονομίας και κέρδους. Η γεώτρηση σε βαθιά νερά και η επιπλέον παραγωγή, είναι πιθανές με τη δυναμική τοποθέτηση ή την υποβοηθούμενη από το πηδάλιο πρόσδεση θέσης. Η υποβοηθούμενη από τον προωθητή τοποθέτηση, εφαρμόζεται στη Βόρεια Θάλασσα, στον Καναδά και σε περιοχές με σκληρό περιβάλλον. Στη Βραζιλία, στη Δυτική Αφρική, και στις προγραμματισμένες εγκαταστάσεις USGOM (Αμερικάνικος Κόλπος του Μεξικού), η τάση ήταν να βασιστεί στην πρόσδεση χωρίς βοήθεια του προωθητήρα για την παραγωγή πετρελαίου και τη δυναμική τοποθέτηση για γεώτρηση βαθέων υδάτων.

Οι προωθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση του σταθμού (λειτουργία DP), αποτελούν επίσης την κύρια πρόωση στη διαμετακόμιση και τον ελιγμό του σκάφους, είτε όλες είτε μόνο επιλεγμένες μονάδες.

Χαρακτηριστικό αυτών των σκαφών είναι η μεγάλη εγκατεστημένη δύναμη των προωθητήρων τους, συνήθως 20-50 MW. Μαζί με την παραγωγή, τη γεώτρηση, τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας και τα φορτία ξενοδοχείου, η εγκατεστημένη δύναμη είναι συνήθως 25-55 MW. Η τυπική εγκατάσταση έχει μία κοινή μονάδα παραγωγής ενέργειας για όλα αυτά τα φορτία, επιτρέποντας την ευελιξία στη λειτουργία με υψηλή απόδοση ενέργειας και υψηλή διαθεσιμότητα. Το Σχήμα 3.9 δείχνει μια σχηματική επισκόπηση μιας ημι-υποβρύχιας εξέδρας γεώτρησης. Βλέπε Farmer [72], Ådnanes et al [337] και Ådnanes [335].



Σχήμα 3.9: Παράδειγμα διάταξης ηλεκτρικού συστήματος για μία ημι-υποβρύχια μονάδα γεώτρησης.

Τα πετρελαιοφόρα χρησιμοποιούνται για μεταφορά πετρελαίου από μία υπεράκτια εγκατάσταση (πλατφόρμες, σημαδούρες, πύργοι ή FPSOs) σε ένα τερματικό επεξεργασίας ή αποθήκευσης στην ακτή. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι εκφόρτωσης κατά τη χρήση. Για τα περισσότερα από αυτά, τα πετρελαιοφόρα πρέπει να διατηρούν μια σταθερή θέση (διατήρηση σταθμού) με μεγάλη ακρίβεια, εξαρτώμενα από τις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Συνεπώς, τα περισσότερα από τα δεξαμενόπλοια είναι εξοπλισμένα με ένα σύστημα DP. Τα περισσότερα από τα πλοία έχουν εγκαταστήσει ηλεκτρικές σήραγγες ή αζιμούθιους προωθητήρες, από τους οποίους ορισμένοι επίσης διαθέτουν ντιζελ-ηλεκτρικά συστήματα για κύρια προώθηση, Hansa-Schiffart [104].

Για πολλές εφαρμογές, υπάρχει ένας υψηλός βαθμός πλεονασμού στην προώθηση για τη διαμετακόμιση και τη διατήρηση σταθμού. Οι λύσεις έχουν κανονικά ένα πλεονάζον

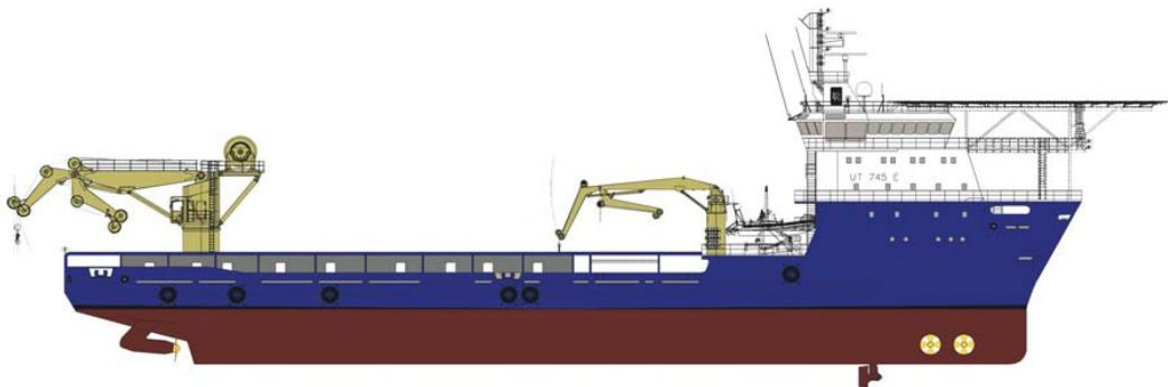


σύστημα παραγωγής και διανομής ισχύος, με περιττούς μετατροπείς προώθησης, και έναν διαδοχικό ή περιττό κινητήρα πρόωσης.

Η εισαγωγή υποκινούμενης προώθησης μπορεί να επηρεάσει το σχεδιασμό των πετρελαιοηλεκτροκίνητων δεξαμενόπλοιων, διότι μπορεί να είναι μία πιο αποδοτική λύση κόστους για την απόκτηση πλεονάζουσας προώθησης με δύο μονάδες υποβάθρου παρά με δύο συμβατικούς άξονες.

### 3.2.3 Σκάφη Υποστήριξης Πεδίου και Σκάφη Κατασκευής

Για πλοία με δυναμική τοποθέτηση (DP) ως τον κύριο τρόπο λειτουργίας, όπως σκάφη υποστήριξης κατάδυσης, γερανοφόρα πλοία και στρώματα σωλήνων (Σχήμα 3.10 και 3.11), η ηλεκτρική προώθηση χρησιμοποιήθηκε νωρίς, πρώτα με προπέλες CP σταθερής ταχύτητας και αργότερα με προωθητήρες μεταβλητής ταχύτητας.



Σχήμα 3.10: Υπεράκτιο πλοίο εφοδιασμού με ηλεκτρική προώθηση.

Η μείωση σε κατανάλωση καυσίμου και σε περιβαλλοντικές εκπομπές από ντίζελ ηλεκτρική προώθηση σε σύγκριση με τη συμβατική μηχανική προώθηση, είναι σημαντική για πλοία με ένα διαφοροποιημένο λειτουργικό προφίλ. Εξοικονομήσεις των 30-40% σε κατανάλωση καυσίμου ετησίως έχει αναφερθεί από τους πλοιοκτήτες, και με την αυξημένη εστίαση στα κόστη λειτουργίας και την περιβαλλοντική επίδραση από τη βιομηχανία πετρελαίου, έχει δώσει μία μεγάλη αύξηση στον αριθμό σκαφών υποστήριξης πεδίου, πρώτα στη Βόρεια Θάλασσα, και αργότερα σε άλλες γεωγραφικές περιοχές.



Σχήμα 3.11: Μερικά υπεράκτια και κατασκευαστικά πλοία.

Με την ταχέως αυξανόμενη ανάγκη για σύστημα επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας και ένα παγκόσμιο δίκτυο καλωδίου οπτικής ίνας, έχει δημιουργηθεί ένας μεγάλος στόλος σκαφών τοποθέτησης καλωδίου με ηλεκτρική προώθηση και δυναμική τοποθέτηση.

Αυτά τα πλοία θα διαμορφωθούν ως DP σκάφη, κλάσης 2 ή 3 (DnV [54], LRS [174] και ABS [3]), και τα περισσότερα θα έχουν ηλεκτρική πρόωση με μία συνολική ζήτηση ισχύος των 8-30 MW, που εξαρτάται από το μέγεθος και τη δυνατότητα γεώτρησης/άνυψωσης.

### 3.2.4 Παγοθραυστικά και Πλοία Πάγου

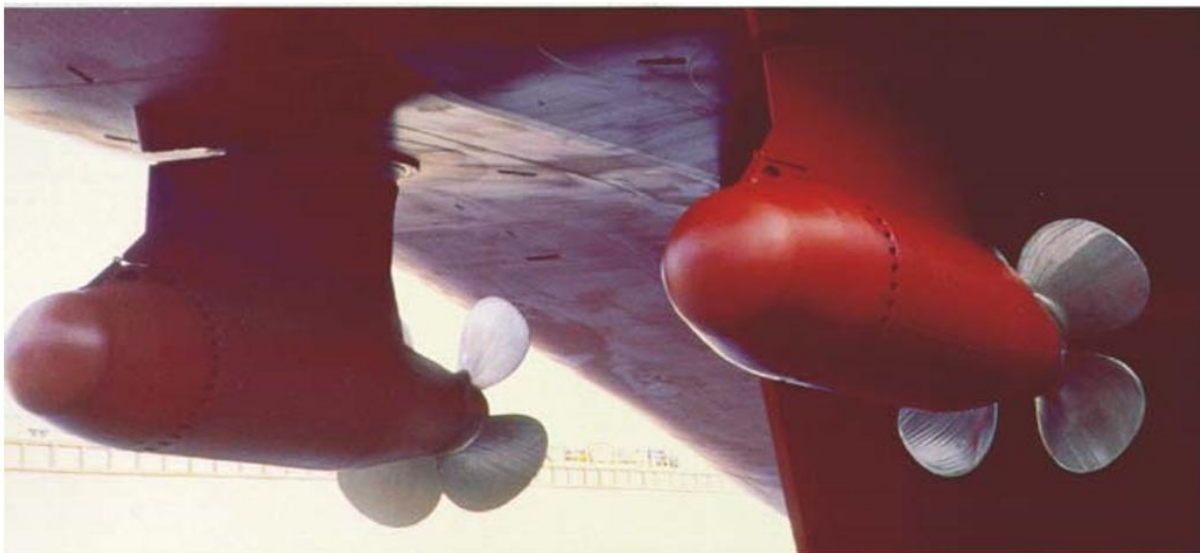
Οι δυναμικές απαιτήσεις για τους μετατροπείς συχνότητας στην εφαρμογή προώθησης είναι χαμηλές, σε σύγκριση με πολλές άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Αλλά σε πλοία πάγου και σε παγοθραυστικά (Σχήμα 3.12 και 3.13), οι μεταβολές φορτίου μπορεί να είναι σημαντικές και γρήγορες, και αυτό συνεπάγεται ότι το σύστημα προώθησης πρέπει να έχει υψηλή δυναμική απόδοση για να αποφευχθεί η υπερβολική φόρτωση των εξαρτημάτων και η ανεπιθύμητη πτώση. Η ηλεκτρική προώθηση έχει χρησιμοποιηθεί στην πλειοψηφία των νέων κτιρίων από τη δεκαετία του '80. Η βασική διαμόρφωση μπορεί να είναι όμοια όπως για τα σκάφη υπηρεσίας, με ένα πλεονάζον σύστημα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, παρόλο που κανονικά δε θα υπάρχει καμία DP απαίτηση για τα παγοθραυστικά.



Η εγκατεστημένη ισχύς προώθησης μπορεί να κυμαίνεται στα 5-15 MW, βασισμένη στη δυνατότητα θραύσης πάγου, Cegelec [44], Hill et al. [117] και MacDonald [181].



Σχήμα 3.12: “M/S Botnica”, Παγοθραύστης που λειτουργεί ως ένα σκάφος εφοδιασμού κατά τη θερινή περίοδο, εξοπλισμένο με πρόωση Azipod.



Σχήμα 3.13: Τα Azipods εγκαθίστανται σε Παγοθραυστικά.

### 3.2.5 Πολεμικά Πλοία

Παρά το μεγάλο ενδιαφέρον για την εφαρμογή της ηλεκτρικής προώθησης στα πολεμικά πλοία, υπάρχουν αρκετά συμβατικά πολεμικά πλοία επιφάνειας με καθαρή ηλεκτρική πρόωση, αλλά προβάλλονται περισσότερα. Για υποβρύχια, εφαρμόζεται ηλεκτρική πρόωση με παραγωγή κινητήρα ντίζελ και αποθήκευση μπαταρίας, πυρήνα καυσίμου ή μονάδα πυρηνικής ισχύος.

Η ηλεκτρική πρόωση για πολεμικά πλοία, δε διαφέρει πολύ εννοιολογικά από τα πλοία εμπορευμάτων, αλλά οι λύσεις ενδέχεται να διαφέρουν, δεδομένου ότι οι απαιτήσεις διαθεσιμότητας και πλεονασμού είναι συνήθως αυστηρότερες. Επίσης, η ικανότητα να αντέχουν στο σοκ και να παρέχουν χαμηλά σήματα θορύβου είναι προαπαιτούμενα για την ηλεκτρική κίνηση όταν εφαρμόζεται σε ένα πολεμικό πλοίο.

Το Σχήμα 3.14 δείχνει το K/V Svalbard, ένα πλοίο ακτοφυλακής που βρίσκεται σε υπηρεσία από το 2002 για το Νορβηγικό Ναυτικό, εξοπλισμένο με διπλό σύστημα πρόωσης Azipod, και εκπληρώνοντας εν μέρει τις στρατιωτικές απαιτήσεις.



Σχήμα 3.14: “K/V Svalbard”, Παγοθραυστικό σκάφος ακτοφυλακής με υποκινούμενη πρόωση για το Νορβηγικό Πολεμικό Ναυτικό.

### 3.2.6 Ερευνητικά Σκάφη

Τα σκάφη γεωτεχνικής έρευνας, τα ωκεανογραφικά σκάφη και τα αλιευτικά σκάφη, έχουν από κοινού πολύ αυστηρές απαιτήσεις υποβρύχιου θορύβου, συνήθως αρκετές δεκαετίες dB κάτω από τα κανονικά επίπεδα για άλλες εφαρμογές.

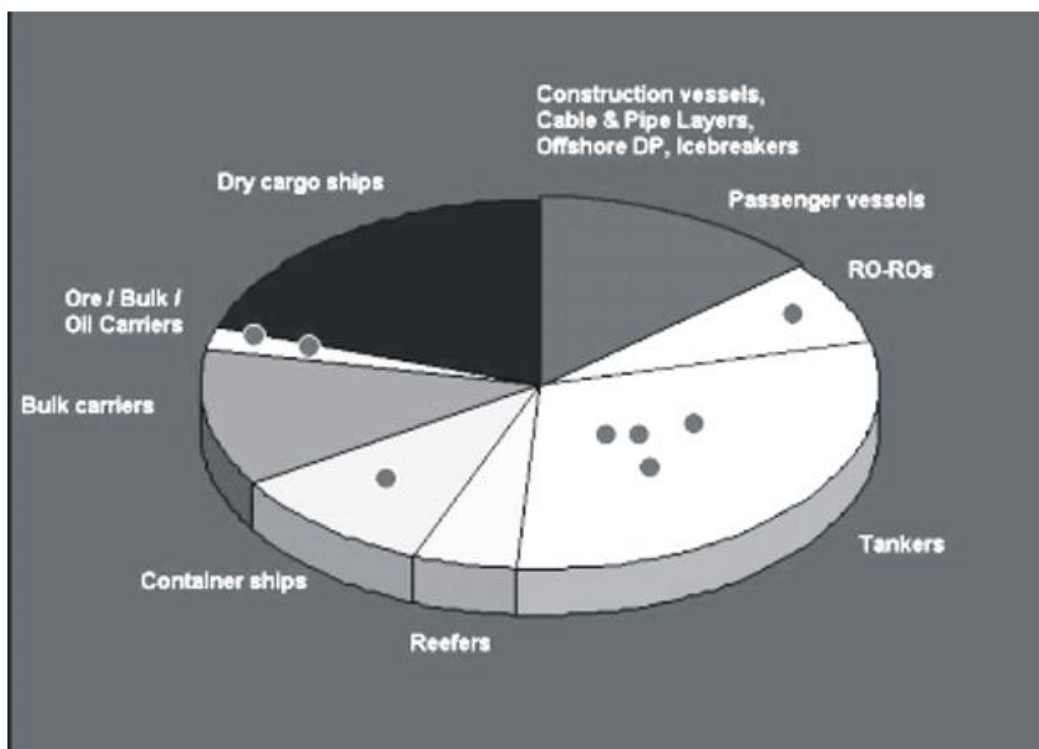
Αυτό παραδοσιακά έχει επιτευχθεί με τη χρήση άμεσης προώθησης με κινητήρες DC, ιδιαίτερες μελέτες για φιλτράρισμα και μείωση δονήσεων και μεταβολών ροπής.

Με τη χρήση σύγχρονων μετατροπέων συχνότητας και τεχνικών φιλτραρίσματος, είναι πιθανόν ότι οι κινητήρες AC θα είναι εφικτοί και για τόσο υψηλές απαιτητικές εφαρμογές.

### 3.2.7 Τάσεις και Νέες Εφαρμογές

Η ηλεκτρική πρόωση, ερευνάται συνεχώς και αξιολογείται για νέες εφαρμογές. Τα LNG και τα χημικά δεξαμενόπλοια, τα Ro-Ro πλοία, τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, τα αλιευτικά σκάφη είναι τυπικά παραδείγματα αγορών μεγάλου όγκου, όπου η ηλεκτρική πρόωση δε χρησιμοποιείται ακόμα εξαιτίας των αυξημένων επενδυτικών δαπανών.

Ωστόσο, μόνο μικρές αλλαγές στα κριτήρια λειτουργίας και σχεδιασμού, όπως τα αυξημένα κόστη καυσίμου ή εκπομπής, οι κανονιστικοί περιορισμοί, και η μείωση του κόστους εξοπλισμού, μπορεί να επιφέρουν μια τεράστια αλλαγή στην εφαρμογή τεχνολογίας για αρκετούς νέους τομείς. Το Σχήμα 3.15 δείχνει την παγκόσμια νέα αγορά κατασκευής πλοίων.



Σχήμα 3.15: Η παγκόσμια νέα αγορά κατασκευής πλοίων. Η ηλεκτρική πρόωση κυριαρχεί στους τομείς κατασκευής, των στρώσεων καλωδίου και σωλήνα, της υπεράκτιας, των παγοθραυστικών, και των επιβατηγών πλοίων. Σε άλλα τμήματα, η ηλεκτρική πρόωση χρησιμοποιείται λιγότερο, παρόλο που υπάρχει μία σημαντική αύξηση ενδιαφέροντος για εννοιολογικές μελέτες και σχέδια.

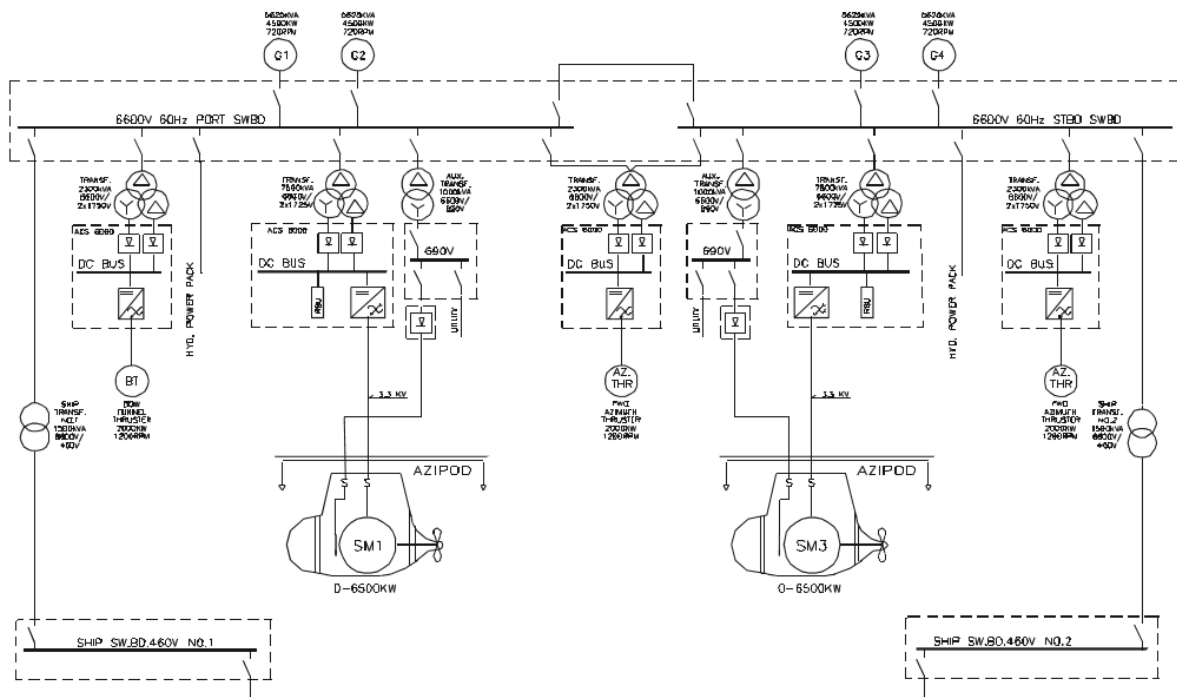
### **3.3 Επισκόπηση του Ηλεκτρικού Συστήματος Ισχύος**

#### **3.3.1 Εισαγωγή**

Η κύρια διαφορά ανάμεσα στο θαλάσσιο και σε ένα χερσαίο σύστημα ισχύος, είναι το γεγονός ότι το θαλάσσιο σύστημα ισχύος είναι ένα απομονωμένο σύστημα με μικρές αποστάσεις από την παραγόμενη ισχύ στους καταναλωτές, σε αντίθεση με το τί είναι φυσιολογικό στα χερσαία συστήματα όπου μπορεί να υπάρχουν εκατοντάδες χιλιόμετρα ανάμεσα στην παραγωγή ισχύος και στο φορτίο, με μεγάλες γραμμές μεταφοράς και μερικές μεταβολές τάσης μεταξύ τους. Το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος στα σκάφη μπορεί να είναι υψηλό και αυτό δημιουργεί ιδιαίτερες προκλήσεις για την κατασκευή τέτοιων συστημάτων. Τα υψηλά επίπεδα και οι δυνάμεις βραχυκυκλώματος πρέπει να αντιμετωπίζονται με έναν ασφαλή τρόπο. Το σύστημα ελέγχου σε ένα χερσαίο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζεται σε αρκετά χωριστά υποσυστήματα, ενώ σε ένα σκάφος υπάρχουν δυνατότητες για πιο στενή ολοκλήρωση και συντονισμό.

Ο σχεδιασμός συστημάτων ισχύος, πρόωσης και ελέγχου για ένα σκάφος έχει υποστεί σημαντικές αλλαγές και προόδους σε σχετικά πρόσφατη χρονική περίοδο. Εξαιτίας των ταχέως αναπτυσσόμενων δυνατοτήτων των υπολογιστών, των μικροεπεξεργαστών και των δικτύων επικοινωνιών, η ενσωμάτωση των συστημάτων, τα οποία ήταν παραδοσιακά χωριστά, ανεξάρτητα συστήματα, δεν είναι πλέον μόνο εφικτή, αλλά γίνονται γρήγορα βιομηχανικά πρότυπα. Η αυξανόμενη ζήτηση για πλεονάζουσα πρόωση και DP σκάφη κατηγορίας 2 και 3, απαιτεί πλεονασμό συστήματος με φυσικό διαχωρισμό. Οι διασυνδέσεις των διαφόρων συστημάτων σε ένα σκάφος γίνονται όλο και πιο πολύπλοκες, καθιστώντας το σχεδιασμό, τη μηχανική και την κατασκευή ενός σκάφους μια πιο ολοκληρωμένη προσπάθεια.

Το Σχήμα 3.16 δείχνει τις σχηματικές παραστάσεις των κύριων εγκαταστάσεων ισχύος σε ένα σκάφος με ηλεκτρική προώθηση σε ένα Διάγραμμα Μονής Γραμμής (SLD).



Σχήμα 3.16: Μονογραμμικό διάγραμμα για ένα δεξαμενόπλοιο με υποκινούμενη ηλεκτρική προώθηση. G1G4: Γεννήτριες, SWBD: Πίνακας Διανομής, TRANSF: Μετασχηματιστής, BT: Κλίση Προωθητήρα, AZ THR: Αζιμουθικός Προωθητήρας, AZIPOD®: Υποκινούμενη προώθηση.

Αυτό το κεφάλαιο, περιγράφει τα κύρια εξαρτήματα όπως αυτά εφαρμόζονται σε μια θαλάσσια ηλεκτρική εγκατάσταση:

- Ηλεκτρική Παραγωγή Ισχύος
- Ηλεκτρική Διανομή Ισχύος
- Μεταβλητή Ταχύτητα
- Προώθηση/ Μονάδες Προώθησης

### 3.3.2 Ηλεκτρική Παραγωγή Ισχύος

#### Πρωταρχικός Κινητήρας

Η πηγή για ενέργεια είναι πιο συχνά μια ομάδα γεννητριών που κινούνται από μια μηχανή καύσης, η οποία τροφοδοτείται με ντίζελ ή βαρύ μαζούτ. Περιστασιακά, κάποιος μπορεί να βρει κινητήρες αερίου, και επίσης αεριοστρόβιλους, ατμοστρόβιλους ή στροβίλους συνδυασμένου κύκλου, ειδικά για υψηλότερα επίπεδα ισχύος, στα ελαφρά ταχύπλοα σκάφη, ή όπου το φυσικό αέριο είναι μια φθηνή εναλλακτική λύση (π.χ. απόβλητα στην παραγωγή πετρελαίου, βράσιμο σε LNG μεταφορείς, κλπ.).

Σε ένα ντίζελ-ηλεκτρικό σύστημα προώθησης, οι πετρελαιοκινητήρες είναι συνήθως μηχανές μέσης έως υψηλής ταχύτητας, με χαμηλότερο βάρος και κόστη από ότι παρόμοιοι κινητήρες χαμηλής ταχύτητας που χρησιμοποιούνται για άμεση μηχανική προώθηση. Η διαθεσιμότητα στο εργοστάσιο ηλεκτρισμού προκαλεί μεγάλη ανησυχία, και σε ένα ηλεκτρικό σύστημα πετρελαίου με έναν αριθμό κινητήρων ντίζελ σε ένα πλεονάζον δίκτυο αυτό σημαίνει υψηλή αξιοπιστία αλλά και εξελιγμένα διαγνωστικά και σύντομοι χρόνοι επισκευής.

Οι κινητήρες καύσης αναπτύσσονται συνεχώς για υψηλότερη απόδοση και μειωμένες εκπομπές, και σήμερα, ένας πετρελαιοκινητήρας μέσης ταχύτητας έχει μια κατανάλωση καυσίμου μικρότερη από 200g ανά παραγόμενο kWh στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17 α). Παρόλο που αυτό θεωρείται ότι είναι ένας υψηλός συντελεστής χρήσης καυσίμου, αντιπροσωπεύει μόνο περίπου το 40% της ενέργειας στο καύσιμο, το υπόλοιπο της ενέργειας αφαιρείται από την εξάτμιση ή τη διαρροή θερμότητας.

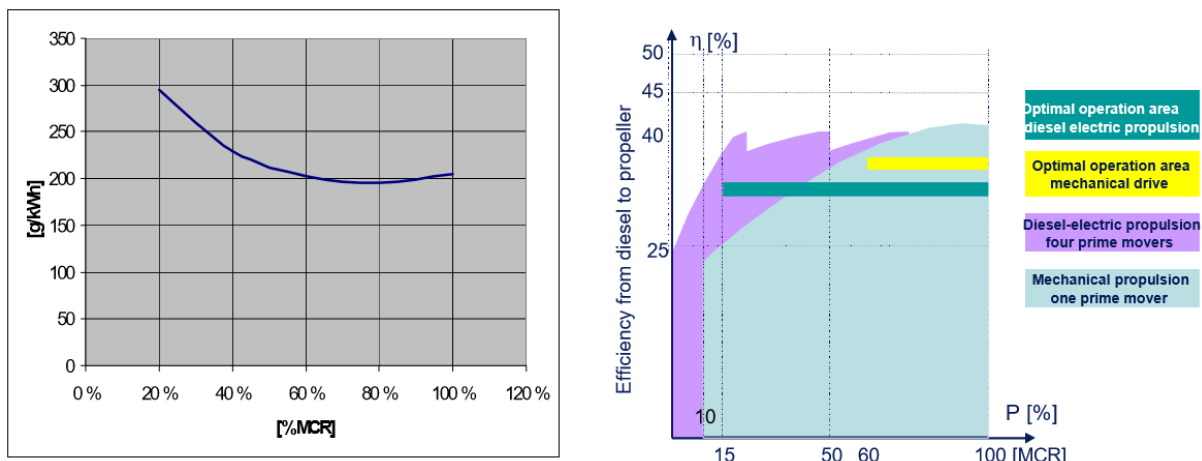
Επιπλέον, η αποδοτικότητα πέφτει γρήγορα όσο το φορτίο γίνεται χαμηλότερο από το 50% του MCR (Κύρια Συνεχής Αξιολόγηση). Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας, η καύση είναι αναποτελεσματική, με υψηλή περιεκτικότητα NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub>, και με ένα υψηλό βαθμό κατακρήμνισης (αποθέσεις άνθρακα), το οποίο αυξάνει την ανάγκη για συντήρηση. Σε ένα ντίζελ ηλεκτρικό σύστημα με διάφορους κινητήρες ντίζελ, είναι λοιπόν στόχος να διατηρηθούν οι πετρελαιοκινητήρες που φορτώνονται στις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας τους, ξεκινώντας και σταματώντας τις ομάδες γεννητριών που εξαρτώνται από το φορτίο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17 β), με σκοπό να διατηρήσει τη μέση φόρτιση κάθε κινητήρα που λειτουργεί με ντίζελ όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο βέλτιστο σημείο φόρτωσής του.

Για λεπτομερή περιγραφή σχεδιασμού και λειτουργικότητας των κινητήρων καύσης ντίζελ, βλέπε Mahon [178].

## Γεννήτριες

Η πλειοψηφία των νέων κτιρίων και όλων των εμπορικών πλοίων διαθέτει μια μονάδα παραγωγής ενέργειας AC με διανομή AC. Οι γεννήτριες είναι σύγχρονα μηχανήματα, με μια μαγνητική περιέλιξη στο ρότορα που μεταφέρει ρεύμα DC, και μια τριφασική περιέλιξη στάτορα όπου το μαγνητικό πεδίο από το ρεύμα του ρότορα προκαλεί μια τριφασική ημιτονοειδή τάση όταν ο ρότορας περιστρέφεται από τον κύριο κινητήρα. Η συχνότητα  $f$  [Hz] των επαγόμενων τάσεων είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής  $n$  [rpm] και του αριθμού πόλων  $p$  στο σύγχρονο μηχανήμα

$$f = \frac{n \cdot p}{120} \quad (3.2)$$



Σχήμα 3.17: α) (αριστερά) Παράδειγμα κατανάλωσης καυσίμου για έναν κινητήρα ντίζελ μεσαίας ταχύτητας, β) (δεξιά) Συνολική αποτελεσματικότητα από τον κινητήρα έως τον άξονα έλικας σε μία μοναδική μηχανή άμεσου συστήματος μηχανικής προώθησης και σε ένα σύστημα ηλεκτρικής προώθησης τεσσάρων μηχανών ντίζελ.

Μία γεννήτρια δύο πόλων θα παράσχει 60 Hz στα 3600 rpm, ένα τετραπολικό στα 1800 rpm, και ένα εξαπολικό στα 1200 rpm, κλπ. 50 Hz αποκτάται στα 3000 rpm, 1500 rpm, 1000 rpm για μηχανές δύο, τεσσάρων και έξι πόλων. Ένας μεγάλος κινητήρας μέσης ταχύτητας θα λειτουργεί κανονικά σε 720 rpm για δίκτυο 60 Hz (γεννήτρια 10 πόλων) ή σε 750 rpm για δίκτυα 50 Hz (γεννήτρια 8 πόλων).

Το DC ρεύμα μεταφέρθηκε νωρίτερα στις περιελίξεις μαγνητισμού του ρότορα με πινέλα και δαχτυλίδια ολίσθησης. Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι εξοπλισμένες με διέγερση χωρίς



ψήκτρες για μειωμένη συντήρηση και χρόνο μη λειτουργίας. Η μηχανή διέγερσης χωρίς ψήκτρες, είναι μια αντίστροφη σύγχρονη μηχανή με DC μαγνητισμό του στάτορα και περιστρεφόμενες τριφασικές περιελίξεις και έναν περιστρεφόμενο διορθωτή διόδου. Το διορθωμένο ρεύμα τροφοδοτεί έπειτα τις περιελίξεις μαγνητισμού.

Η διέγερση ελέγχεται από έναν αυτόματο ρυθμιστή τάσης (AVR), ο οποίος ανιχνεύει την τάση ακροδεκτών της γεννήτριας και τη συγκρίνει με μία τιμή αναφοράς. Πιο απλά, ο ελεγκτής έχει PID χαρακτηριστικά, με σταθερό περιορισμένο αποτέλεσμα ολοκλήρωσης που δίνει μία πτώση τάσης ανάλογη με το φορτίο της γεννήτριας. Η πτώση τάσης εξασφαλίζει την ισότιμη κατανομή της δύναμης αντίδρασης σε παράλληλα συνδεδεμένες γεννήτριες. Σύμφωνα με τους περισσότερους ισχύοντες κανονισμούς, η στατική μεταβολή της τάσης στους ακροδέκτες της γεννήτριας δεν πρέπει να υπερβαίνει το  $\pm 2,5\%$  της ονομαστικής τάσης. Επίσης, η μεγαλύτερη μεταβολή μεταβλητού φορτίου δεν πρέπει να παρέχει διακυμάνσεις τάσης που υπερβαίνουν το  $-15\%$  ή το  $+20\%$  της ονομαστικής τάσης, αν άλλα δεν έχουν καθοριστεί και λογιστικοποιηθεί στο συνολικό σχεδιασμό του συστήματος. Για να αποκτηθεί αυτή η μεταβατική απαίτηση, το AVR είναι κανονικά επίσης εξοπλισμένο με μία λειτουργία ελέγχου τροφοδοσίας προς τα εμπρός, που βασίζεται στη μέτρηση του ρεύματος του στάτορα.

Επιπρόσθετα στη μαγνητική περιέλιξη, ο ρότορας είναι επίσης εξοπλισμένος με μία περιέλιξη αποσβεστήρα η οποία αποτελείται από αξονικές ράβδους χαλκού που περνούν μέσω της εξωτερικής περιφέρειας των πόλων του ρότορα, και βραχυκυκλώνονται από έναν δακτύλιο χαλκού και στα δύο άκρα. Ο κύριος σκοπός αυτής της περιέλιξης είναι να εισάγει μια ηλεκτρο-μαγνητική απόσβεση στις δυναμικές του στάτορα και του ρότορα. Ένα σύγχρονο μηχάνημα χωρίς αμορτισέρ είναι εγγενώς χωρίς απόσβεση και θα προκαλούσε μεγάλες ταλαντώσεις στη συχνότητα και στην κατανομή φορτίου για οποιαδήποτε μεταβολή στο φορτίο.

Στην ενότητα 3.5, θα εισαχθούν στάσιμα, μεταβατικά και δευτερεύοντα μοντέλα. Πιο απλά θα μπορούσε κανείς να πει, ότι οι συνδέσεις ροής στην περιέλιξη του αποσβεστήρα, οι οποίες “παγιδεύονται” και αντιστέκονται στις μεταβολές λόγω βραχυκυκλώματος, χαρακτηρίζουν το υπό-παροδικό μεσοδιάστημα. Αυτό παρατηρείται ως μία εμφανής χαμηλότερη αυτεπαγωγή στη γεννήτρια, η οποία δίνει μια πιο σκληρή ηλεκτρική απόδοση κατά τη διάρκεια γρήγορων μεταβολών του φορτίου, και συμβάλλει στη μείωση των μεταβολών της μεταβατικής τάσης και των μεταβολών της τάσης λόγω της αρμονικής παραμόρφωσης στα ρεύματα φορτίου. Αυτή η επίδραση συμβάλλει μόνο σε δυναμικές μεταβολές ταχύτητας από αυτές που χαρακτηρίζονται από τη δευτερεύουσα χρονική σταθερά, όπως η πρώτη περίοδος



των μεταβατικών περιόδων εκκίνησης του κινητήρα και της εισροής του μετασχηματιστή, και για τα ρεύματα φορτίου που έχουν παραμορφωθεί αρμονικά.

Συχνά, οι γεννήτριες συνδέονται με τον άξονα του κινητήρα προώθησης, δηλαδή μια γεννήτρια άξονα. Οι γεννήτριες άξονα σε ορισμένες εφαρμογές είναι κατασκευασμένες για ροή ισχύος δύο κατευθύνσεων, που σημαίνει ότι μπορεί να λειτουργεί ως κινητήρας. Αυτή η αρχή μπορεί να ονομαστεί ΡΤΙ-ΡΤΟ έννοια (Ανάληψη Ισχύος – Αφαίρεση Ισχύος). Οι γεννήτριες άξονα έχουν το μειονέκτημα της επιβολής του κύριου έλικα να λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα εάν η έξοδος της γεννήτριας έχει σταθερή συχνότητα. Αυτό θα μειώσει την απόδοση της προπέλας σε εφαρμογές χαμηλού φορτίου. Οι στατικοί μετατροπείς μπορούν να εγκατασταθούν για να διατηρήσουν σταθερή συχνότητα για μεταβλητές ταχύτητες.

### 3.3.3 Ηλεκτρική Διανομή Ισχύος

#### Ηλεκτρικοί Πίνακες

Οι κεντρικοί πίνακες (ή γεννήτρια) διανέμονται συνήθως ή χωρίζονται σε δύο, τρία ή τέσσερα τμήματα, για να επιτευχθούν οι πλεονάζουσες απαιτήσεις του σκάφους. Σύμφωνα με τους κανόνες και τους κανονισμούς για ηλεκτρική προώθηση, κάποιος θα ανέχεται τις συνέπειες μιας αποτυχίας ενός τμήματος, πχ εξαιτίας βραχυκυκλώματος. Για αυστηρότερες απαιτήσεις πλεονασμού, κάποιος θα ανεχτεί επίσης την αποτυχία λόγω πυρκαγιάς ή πλημμύρας, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν διαχωριστές νερού και πυρίμαχα για το διαχωρισμό των τμημάτων.

Σε μια διαμόρφωση διπλού διαχωρισμού, με εξίσου κοινή χωρητικότητα γεννήτριας και φορτίο και στις δύο πλευρές, το μέγιστο σενάριο μοναδικής αποτυχίας θα είναι συνεπώς η απώλεια του 50% της χωρητικότητας και των φορτίων της γεννήτριας. Για να αποφευχθούν τα υψηλά κόστη εγκατάστασης, το σύστημα θα χωρίζεται συχνά σε τρία τέταρτα, κάτι το οποίο μειώνει τις απαιτούμενες πρόσθετες εγκαταστάσεις. Επίσης, οι διακόπτες αλλαγής, που εξασφαλίζει ότι μία γεννήτρια ή ένα φορτίο μπορεί να συνδεθεί σε δύο τμήματα του ηλεκτρικού πίνακα, θα έχουν παρόμοια αποτελέσματα μείωσης κόστους, π.χ. για αζιμούθιο προωθητήρα στο Σχήμα 3.16.

Σε λειτουργία προώθησης, οι ηλεκτρικοί πίνακες είναι κανονικά συνδεδεμένοι μεταξύ τους, κάτι το οποίο παρέχει την καλύτερη ευελιξία στη διαμόρφωση της μονάδας παραγωγής ισχύος. Τα μεταβατικά φορτία κατανέμονται σε ένα μεγάλο αριθμό γεννητριών ντίζελ, και ο βέλτιστος αριθμός μονάδων μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο.

Μια άλλη δυνατότητα είναι να πλεύσει με ανεξάρτητα τμήματα του ηλεκτρικού πίνακα, τροφοδοτώντας δύο ή περισσότερα ανεξάρτητα δίκτυα. Σε αυτή την περίπτωση, το πλοίο θεωρείται συχνά ότι είναι ουσιαστικά τεκμήριο διακοπής, που θα μπορούσε να είναι ελκυστικό σε συμφορημένα νερά. Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας, ένα δίκτυο συμπεριλαμβανομένων των συνδεδεμένων του μονάδων προώθησης χάνεται, εάν ένα τμήμα του ηλεκτρικού πίνακα αποτύχει, το άλλο ωστόσο παραμένοντας λειτουργικό. Ασκώντας πρακτικά, υπάρχουν επίσης και άλλες εκτιμήσεις που πρέπει να γίνουν για να αποκτήσει τέτοια ανεξαρτησία, ειδικά όλες οι βοηθητικές, όπως η λίπανση, η ψύξη, και ο εξαερισμός που πρέπει να γίνουν ανεξάρτητες. Επίσης, η απώλεια προώθησης ή διατήρησης σταθμού ισχύος σε ένα μέρος του συστήματος, θα έχει επίσης μέσω των συστημάτων ελέγχου, αντίκτυπο στα υπόλοιπα τμήματα, καθώς η συνολική ισχύς ή ώθηση τείνει να διατηρηθεί η ίδια, π.χ. για δυναμική τοποθέτηση.

Η κανονική λειτουργία σε DP πλοία, ειδικά για λειτουργίες κλάσης 3, είναι ο χωρισμός του δικτύου για να είναι ανεκτικό σε αποτυχία ενός τμήματος. Ωστόσο, κανόνες και κανονισμοί επιτρέπουν τώρα για λειτουργία με κλειστούς διακόπτες, εάν τα κυκλώματα προστασίας είναι σχεδιασμένα να εντοπίζουν και να απομονώνουν τα ελαττωματικά μέρη χωρίς να εμποδίζουν τα υγιή μέρη. Οι κανόνες NMD (Νορβηγική Ναυτιλιακή Διεύθυνση), έχουν μία από τις αυστηρότερες πρακτικές αυτών των κανόνων και κανονικά δε θα δέχονται συνδεδεμένα δίκτυα σε λειτουργίες κλάσης 3.

Καθώς η εγκατεστημένη ισχύς αυξάνεται, τα κανονικά ρεύματα φορτίου και τα ρεύματα βραχυκυκλώματος θα αυξάνονται. Με τα φυσικά όρια στο χειρισμό των θερμικών και μηχανικών τάσεων στις ράβδους διαύλου και την ικανότητα αλλαγής του διακόπτη, θα είναι πλεονέκτημα ή απαραίτητη η αύξηση τάσης του συστήματος ή κατά συνέπεια η μείωση των επιπέδων ρεύματος. Η μέση τάση έχει καταστεί αναγκαία για την αντιμετώπιση της αυξανόμενης ζήτησης ισχύος σε πολλές εφαρμογές. Χρησιμοποιώντας τα επίπεδα τάσης IEC, οι επόμενες εναλλακτικές είναι περισσότερο κοινές επιλεγμένες για το κύριο σύστημα διανομής, με οδηγίες εφαρμογής από τη NORSOK [207]:

- 11 kV: Δημιουργία και διανομή μέσης τάσης. Πρέπει να χρησιμοποιείται όταν η συνολική χωρητικότητα της εγκατεστημένης γεννήτριας υπερβαίνει τα 20 MW. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται για κινητήρες από 400 kW και άνω.

- 6.6 kV: Δημιουργία και διανομή μέσης τάσης. Πρέπει να χρησιμοποιείται όταν η συνολική χωρητικότητα της εγκατεστημένης γεννήτριας είναι ανάμεσα σε 4-20 MW. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται για κινητήρες από 300 kW και άνω.
- 690 V: Δημιουργία και διανομή χαμηλής τάσης. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται όταν η συνολική χωρητικότητα της εγκατεστημένης γεννήτριας είναι κάτω από 4 MW. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται για καταναλωτές κάτω από 400 kW και σαν κύρια τάση για μετατροπείς για κινητήρες γεωτρήσεων.
- Για διανομή χρησιμότητας χαμηλής τάσης χρησιμοποιείται, π.χ. 400/230 V.

Στις ΗΠΑ, ή όπου ισχύει το πρότυπο ANSI, αναγνωρίζονται αρκετά επιπρόσθετα επίπεδα τάσης, όπως στο IEEE [125]: 120V, 208V, 230V, 240V, 380V, 450V, 480V, 600V, 690V, 2400V, 3300V, 4160V, 6600V, 11000V, και 13800V. Η 3300V είναι επίσης μία κοινώς συνηθισμένη τάση συστήματος στις εφαρμογές IEC, παρόλο που δεν αναγνωρίζεται στη NORSOK [207].

Δεδομένου ότι το ρεύμα φορτίου και το ρεύμα σφάλματος καθορίζουν τον περιορισμό του εξοπλισμού, τα πραγματικά όρια ισχύος για κάθε τάση του συστήματος ενδέχεται να παρεκκλίνουν από αυτές τις συστάσεις. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στα συστήματα που ένα σημαντικό μέρος του φορτίου είναι φορτία του μετατροπέα και δε συμβάλλουν στην παροχή βραχυκυκλώματος. Καθώς αυτά δε συμβάλλουν σε ρεύματα βραχυκυκλώματος στο σύστημα διανομής, συχνά επιτρέπει την αύξηση των ορίων ισχύος για τα διαφορετικά επίπεδα τάσης.

Επίσης, η επιλογή του επιπέδου τάσης του συστήματος μπορεί να επηρεαστεί από άλλα κριτήρια, όπως η διαθεσιμότητα του εξοπλισμού. Πολλοί εξοπλισμοί πλοίου είναι διαθέσιμοι μόνο σε 440V, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να είναι δύσκολο να αποφευχθεί αυτό το επίπεδο τάσης σε εφαρμογές πλοίου.

Η ασφάλεια αποτελεί ένα ζήτημα ανησυχίας όταν οι αλλαγές των τάσεων των ναυπηγείων και των ιδιοκτητών πλοίου από χαμηλές σε υψηλότερες, συχνά οδηγούν σε μια προσπάθεια παρεξήγησης να κρατηθούν οι τάσεις όσο το δυνατόν χαμηλότερες. Στο πλαίσιο της ασφάλειας, πρέπει να θεωρηθεί ότι οι πίνακες μέσης τάσης είναι σχεδιασμένοι για να εμποδίζουν το προσωπικό να έρχεται σε επαφή με τους αγωγούς, ακόμη και για τη συντήρηση των διακοπών. Τα κανονικά ρεύματα και τα ρεύματα σφαλμάτων είναι παρομοίως μικρότερα, δίνοντας λιγότερες δυνάμεις στους αγωγούς και τα καλώδια κατά τη διάρκεια π.χ. βραχυκυκλώματος. Παρόλο που τα βραχυκυκλώματα στο εσωτερικό των ηλεκτρικών πινάκων είναι εξαιρετικά σπάνια, ο σχεδιασμός τόξου προστασίας (IEC 298-3)

είναι διαθέσιμος και θα αποτρέψει τραυματισμό ατόμου και θα περιορίσει τις ζημιές εξοπλισμού εάν συμβεί η χειρότερη περίπτωση.

Οι διακόπτες κυκλώματος χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση και αποσύνδεση μονάδων γεννήτριας ή φορτίου στους ηλεκτρικούς πίνακες, ή σε διαφορετικά μέρη των πινάκων μαζί. Εφαρμόζονται διάφορες τεχνολογίες διακόπτη κυκλώματος. Οι μονάδες με μόνωση αέρα είναι η παραδοσιακή λύση, αλλά σήμερα σπανίως εφαρμόζονται εκτός από τα χαμηλά επίπεδα τάσεων. Στις κοινά χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες SF6 και διακόπτη κενού, η διακοπή ρεύματος λαμβάνει χώρα σε έναν κλειστό θάλαμο, όπου το πρώτο γεμίζει με αέριο SF6, το οποίο έχει υψηλότερη αντοχή στη μόνωση από τον αέρα, και ο διακόπτης κενού εκκενώνεται από αέρα. Αυτοί οι σχεδιασμοί δίνουν συμπαγείς και μακροπρόθεσμες αξιόπιστες λύσεις για μεσαίες τάσεις. Κάποιος θα πρέπει να λάβει υπόψη, ότι οι διακόπτες κενού μπορεί να κόψουν το ρεύμα και να προκαλέσουν αιχμές υπέρτασης όταν σπάσει ένα επαγωγικό φορτίο με υψηλή  $di/dt$  το οποίο μπορεί να απαιτεί την εγκατάσταση περιοριστών υπέρτασης.

Για μικρότερες δυνάμεις, οι συγκολλημένοι διακόπτες είναι μία οικονομική και ωφέλιμη εναλλακτική στο διακόπτη κυκλώματος, και είναι διαθέσιμοι στον αέρα (χαμηλή τάση), SF6 ή μεμονωμένοι τύποι στο κενό. Το πρόβλημα με την εναλλαγή είναι μικρότερο με τους ενωμένους διακόπτες, καθώς η τρέχουσα διακοπή ρεύματος είναι πιο ήπια (χαμηλότερη  $di/dt$ ).

## **Μετασχηματιστές**

Ο σκοπός του μετασχηματιστή είναι να απομονώσει τα διάφορα μέρη του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ισχύος σε πολλά χωρίσματα, για να αποκτήσει κανονικά διαφορετικά επίπεδα τάσης και μερικές φορές επίσης για αλλαγή φάσης. Οι μετασχηματιστές αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να τροφοδοτούν τους μετατροπείς συχνότητας,  $px$  για τους κινητήρες προώθησης μεταβλητής ταχύτητας, για να μειωθεί η έγχυση των παραμορφωμένων ρευμάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος με την ακύρωση των πιο κυρίαρχων αρμονικών ρευμάτων. Αυτό μειώνει την παραμόρφωση τάσης για γεννήτριες και άλλους καταναλωτές. Οι μετασχηματιστές έχουν, επίσης, ένα αποτέλεσμα απόσβεσης του θορύβου που εκπέμπεται από τον αγωγό υψηλής συχνότητας, ειδικά εάν ο μετασχηματιστής είναι εξοπλισμένος με μια γειωμένη ασπίδα χαλκού μεταξύ κύριας και δευτερεύουσας περιέλιξης.

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά σχέδια μετασχηματιστών σε χρήση, και οι πιο συνηθισμένοι τύποι είναι: ξηρός τύπος με μόνωση αέρα, ρητίνη με μόνωση (εκμαγείο ή πληγή), ή πετρέλαιο/υγρό με μόνωση. Οι κανονισμοί, οι συνθήκες περιβάλλοντος, και οι προτιμήσεις του χρήστη, του ναυπηγείου, ή του προμηθευτή διέπουν την επιλογή του τύπου, του υλικού, και του σχεδίου του μετασχηματιστή.

Φυσικά, ο μετασχηματιστής κατασκευάζεται κανονικά σαν μονάδες τριφασικές, με τριφασικά πρωταρχικά πηνία και τριφασικά δευτερεύοντα πηνία γύρω από ένα μαγνητικό πυρήνα. Ο μαγνητικός πυρήνας σιδήρου αποτελεί μια κλειστή πορεία για μαγνητική ροή, κανονικά με τρία κάθετα πόδια και δύο οριζόντιους ζυγούς: ένα στο κάτω μέρος και ένα στην κορυφή. Η εσωτερική περιέλιξη αποτελεί τη χαμηλή τάση ή τις δευτερεύοντες περιελίξεις, και η εξωτερική είναι η κύρια ή η υψηλής τάσης περιέλιξη. Ο λόγος των πρωτογενών προς τις δευτερεύουσες περιελίξεις, δίνει το λόγο μετασχηματισμού. Τα πηνία μπορούν να συνδεθούν ως μία σύνδεση Υ ή Δ (λέγεται επίσης σύνδεση D). Η σύνδεση μπορεί να είναι διαφορετική στις πρωτεύουσες και δευτερεύουσες πλευρές, και σε τέτοιους μετασχηματιστές, όχι μόνο θα μετατραπεί το πλάτος τάσης, αλλά θα υπάρξει επίσης και μια μετατόπιση φάσης μεταξύ της πρωτογενούς και δευτερογενούς τάσης.

Ένας μετασχηματιστής με πρωταρχικό Δ συνδεδεμένο και δευτερεύον Υ συνδεδεμένο, λέγεται μετασχηματιστής τύπου Dy. Το πρώτο και κεφαλαίο γράμμα περιγράφει την κύρια περιέλιξη, και το δεύτερο και μικρό γράμμα περιγράφει τη δευτερεύουσα περιέλιξη. Το γράμμα n χρησιμοποιείται για να περιγράψει εάν το κοινό σημείο σε μία σύνδεση Υ είναι γειωμένο, πχ Dyn ή Ynyn.

Οι μετασχηματιστές μπορεί να σχεδιάζονται σύμφωνα με τα πρότυπα IEC. Για τους μετασχηματιστές μετατροπών, είναι σημαντικό ότι ο σχεδιασμός δικαιολογεί τις πρόσθετες θερμικές απώλειες εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας των αρμονικών ρευμάτων. Το IEC, επίσης, δίνει κανόνες σχεδίασης και οδηγίες για τέτοιες εφαρμογές.

### **3.3.4 Κινητήρες για Πρόωση και Προωθητήρες**

#### **Εισαγωγή**

Ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι η πιο κοινή συσκευή που χρησιμοποιείται για μετατροπή από ηλεκτρική σε μηχανική ισχύ και χρησιμοποιείται για ηλεκτρική πρόωση, προωθητήρες για πρόωση ή διατήρηση σταθμού, και άλλα φορτία επί του οχήματος όπως βαρούλκα, αντλίες,

ανεμιστήρες, κλπ. Συνήθως, το 80-90% των φορτίων στις εγκαταστάσεις των πλοίων θα είναι μερικοί ηλεκτρικοί κινητήρες.

Σε αυτό το κεφάλαιο, δίνεται μία σύντομη επισκόπηση των διαφορετικών κινητήρων και των εφαρμογών τους στις εγκαταστάσεις του πλοίου και για πιο λεπτομερή περιγραφή του σχεδιασμού, της απόδοσης, και των χαρακτηριστικών, γίνονται αναφορές σε άλλα βιβλία.

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες σε χρήση είναι:

- Κινητήρες DC: Ο κινητήρας DC πρέπει να τροφοδοτείται από μία DC παροχή, και εφόσον το σύστημα παραγωγής και διανομής ισχύος είναι κανονικά ένα τριφασικό σύστημα, αυτό σημαίνει ότι ένας DC κινητήρας πρέπει να τροφοδοτείται από ένα διορθωτή thyristor. Αυτό δίνει επίσης έναν έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα. Για λεπτομερή περιγραφή της ποικίλης κατασκευής του κινητήρα DC, βλέπε Fitzgerald et al. [77].
- Ασύγχρονοι (επαγωγικοί) κινητήρες: Ο ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας είναι ο κινητήριος μοχλός της βιομηχανίας. Ο ανθεκτικός και απλός σχεδιασμός του, εξασφαλίζει στις περισσότερες περιπτώσεις μεγάλη διάρκεια ζωής με ελάχιστη βλάβη και συντήρηση. Ο ασύγχρονος κινητήρας χρησιμοποιείται σε όλες τις εφαρμογές, είτε ως κινητήρας σταθερής ταχύτητας απευθείας συνδεδεμένος με το δίκτυο, είτε ως κινητήρας μεταβλητής ταχύτητας που τροφοδοτείται από έναν στατικό μετατροπέα συχνότητας. Ο Fitzgerald et al. [77] δίνει μία καλή εξήγηση για το σχεδιασμό και την απόδοση λειτουργίας των ασύγχρονων κινητήρων.
- Σύγχρονοι κινητήρες: Η σύγχρονη μηχανή δε χρησιμοποιείται κανονικά σαν ένας κινητήρας σε εφαρμογές πλοίου, με εξαίρεση τις μεγάλες μονάδες προώθησης, συνήθως λιγότερα από 5 MW συνδέονται κατευθείαν στον άξονα προπέλας, ή λιγότερα από 8-10 MW με μία σύνδεση γραναζιών. Σε περιοχή ισχύος μικρότερη από αυτή, ο ασύγχρονος κινητήρας είναι κανονικά ανταγωνιστικός από θέμα κόστους. Ο σχεδιασμός ενός σύγχρονου κινητήρα, είναι ίδιος με αυτόν μιας σύγχρονης γεννήτριας. Συνήθως δε χρησιμοποιείται χωρίς μία παροχή μετατροπέα συχνότητας για έλεγχο μεταβλητής ταχύτητας σε εφαρμογές πλοίου. Βλέπε Fitzgerald et al. [77] για σχεδιασμό και απόδοση λειτουργίας.
- Μόνιμος μαγνήτης σύγχρονων κινητήρων: Ο μόνιμος μαγνήτης σύγχρονων κινητήρων χρησιμοποιείται σε βιομηχανικούς κινητήρες για κάποιους λίγους KW

δίσκους, και για άμεσες εφαρμογές στο διαδίκτυο. Τα τελευταία χρόνια, έχει επίσης εισαχθεί για εφαρμογές μεγάλης ισχύος σε αρκετούς κινητήρες προώθησης MW, πρώτα σε ναυτικές εφαρμογές, αλλά τώρα επίσης και σε υποβιβασμένες εφαρμογές προώθησης. Το πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού, είναι η υψηλή απόδοση με συμπαγή σχεδίαση, κάνοντάς το ιδιαίτερα ενδιαφέρον για υποβιβασμένη πρόωση όπου οι διαστάσεις θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες, και η άμεση ψύξη νερού θα εξαλείψει την ανάγκη για ψύξη του κινητήρα με αέρα και θα απλοποιήσει την εργασία κατασκευής και εγκατάστασης. Βλέπε Adnanes [334] για περιγραφή σχεδιασμού και απόδοσης.

- Άλλοι κινητήρες: Μια σειρά άλλων κινητήρων χρησιμοποιείται σε εμπορικές ή πειραματικές εφαρμογές. Λίγοι από αυτούς έχουν αποκτήσει ένα υψηλό μερίδιο αγοράς, και κυρίως όχι σε θαλάσσιες εφαρμογές. Θα μπορούσε μελλοντικά να παρατηρηθούν κάποιες νέες ιδέες για τους κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας, που βασίζονται σε σχεδιασμούς κινητήρα με υψηλότερη απόδοση, μικρές διαστάσεις, ή ειδικά σχεδιασμένα για ορισμένες εφαρμογές. Θα βασίζονται όμως πιθανότατα στις αρχές που περιγράφονται παραπάνω ή σε παράγωγα αυτών.

### **Η σταθερή ταχύτητα, Κινητήρας άμεσης σύνδεσης**

Ένας ηλεκτρικός κινητήρας μπορεί να συνδεθεί απευθείας στο δίκτυο, και τέτοιοι κινητήρες άμεσης σύνδεσης (DOL) είναι συνήθως τριφασικοί ασύγχρονοι, ή κινητήρες επαγωγής. Ο ασύγχρονος κινητήρας έχει έναν ανθεκτικό και απλό σχεδιασμό, όπου οι τριφασικές περιελίξεις του στάτορα είναι παρόμοιες με μία περιέλιξη του στάτορα γεννήτριας. Ο ρότορας είναι κυλινδρικός, με έναν πλαστικοποιημένο πυρήνα από σίδηρο και μία μικρή τυλιγμένη περιέλιξη παρόμοια με την περιέλιξη του αποσβεστήρα σε μία σύγχρονη μηχανή. Χωρίς φορτίο, οι τάσεις που επιβάλλονται στην περιέλιξη του στάτορα θα δημιουργήσουν ένα μαγνητικό πεδίο στον κινητήρα, το οποίο διασχίζει το κενό αέρος και περιστρέφεται με μία ταχύτητα που δίνεται από τη συχνότητα των επιβαλλόμενων τάσεων, που λέγεται σύγχρονη συχνότητα  $f_s$ . ως εκ τούτου, η σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$  στο rpm είναι

$$n_s = \frac{120}{p} f_s \quad (3.3)$$

Καθώς ο άξονας φορτώνεται, η ταχύτητα του ρότορα θα μειωθεί, και θα προκληθούν ρεύματα στην περιέλιξη του ρότορα, καθώς αυτά περιστρέφονται σε σχέση με το σύγχρονο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο από τις περιελίξεις του στάτορα. Κάποιος ορίζει την ολίσθηση,  $s$ , καθώς και τη σχετική καθυστέρηση της ταχύτητας του κινητήρα στη σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3.4)$$

Ως εκ τούτου, η ολίσθηση ποικίλλει από 0 (χωρίς φορτίο) έως 1 (κλειστός ρότορας). Η ολίσθηση στο ονομαστικό φορτίο είναι συνήθως κάτω από 0.05 (5%) για τα περισσότερα σχέδια κινητήρα, και ακόμα χαμηλότερα (2-3%) για μεγάλους κινητήρες.

Από το ηλεκτρικό μοντέλο του ασύγχρονου κινητήρα, ένας μαθηματικός τύπος για το ρεύμα του ρότορα και του στάτορα, η ροπή του άξονα, και η ισχύς, μπορούν να αναπτυχθούν σαν μια συνάρτηση της ολίσθησης. Ένας περίπλοκος παράγοντας είναι ότι οι παράμετροι, ειδικά οι παράμετροι του ρότορα, εξαρτώνται πολύ από την ολίσθηση, δηλαδή τη συχνότητα των ρευμάτων του ρότορα, και αυτές οι εξαρτήσεις συχνοτήτων πρέπει να παρατηρούνται για να ληφθούν ακριβή αποτελέσματα.

Το Σχήμα 3.18 δείχνει τα ρεύματα του στάτορα και τη ροπή του άξονα για έναν ασύγχρονο κινητήρα, ο οποίος συνδέεται με μια σταθερή συχνότητα και ένα άκαμπτο δίκτυο, ως συνάρτηση της ταχύτητας του ρότορα ή της ολίσθησης. Αυτό επίσης υποδεικνύει την καμπύλη φορτίου για μία τυπική εφαρμογή προωθητήρα CPP με μηδενική κλίση, έτσι ώστε να διασφαλίζει ότι υπάρχει διαθέσιμο επαρκές περιθώριο ροπής για την ασφαλή εκκίνηση, και για να ελαχιστοποιεί το χρόνο εκκίνησης.

Σε σταθερές συνθήκες, η ταχύτητα του κινητήρα είναι κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, και τα επαγόμενα ρεύματα του ρότορα είναι σχεδόν ανάλογα με την ολίσθηση, και επίσης με τη ροπή του άξονα. Από το ηλεκτρικό μοντέλο στο Σχήμα C.14, μπορεί κανείς να εξάγει μια απλοποιημένη έκφραση του προκύπτοντος rms ρεύματος στάτορα,  $I_s$

$$I_s = \frac{I_r}{s} = \frac{I_r}{\frac{n_s - n}{n_s}}, \quad (3.5)$$

όπου το  $I_m$  είναι το ρεύμα μαγνητισμού που ρέει μέσω της μαγνητικής επαγωγής  $L_m$ , αγνοώντας τις μαγνητικές απώλειες στο  $R_m$ .  $I_r$  είναι το ρεύμα του ρότορα που αναφέρεται

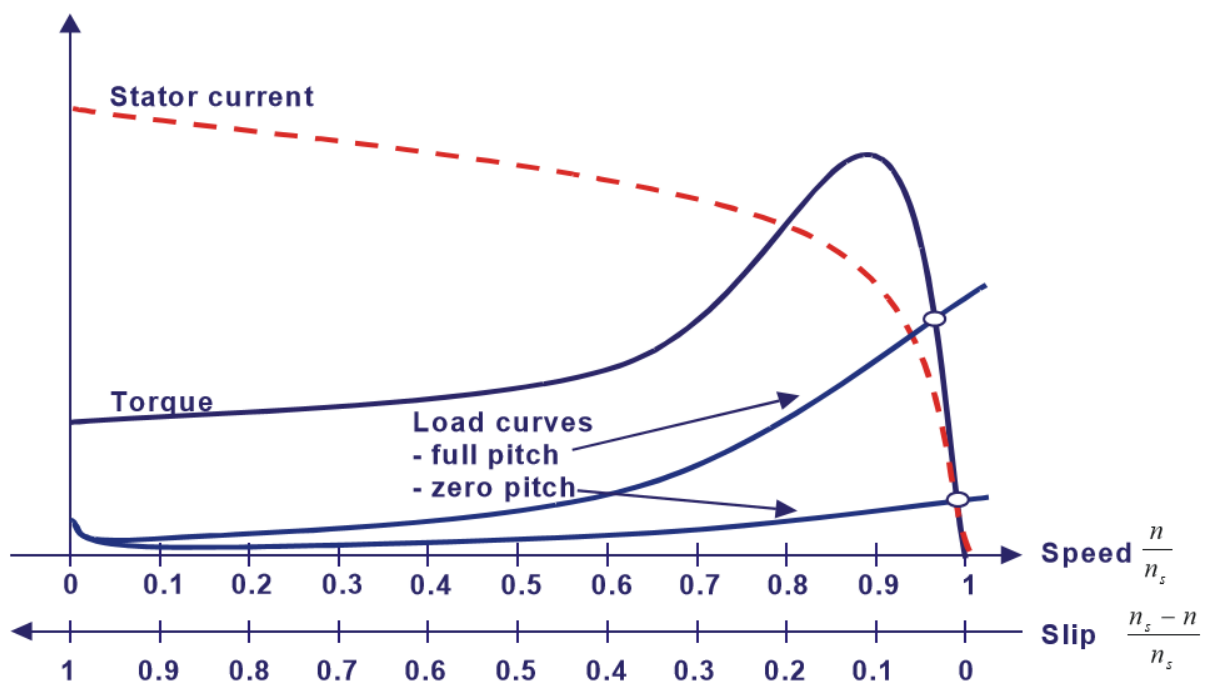


στην πλευρά του στάτορα, και  $T$  είναι η ροπή. Ένας δείκτης  $N$  σημειώνει τις ποσότητες κάτω από ονομαστικές (εκτιμώμενες) συνθήκες, και πιο απλά μπορεί κανείς να εκφράσει, αν αγνοήσει τα αποτελέσματα της επαγωγικής διαρροής στο ρότορα και στο στάτορα

$$I_{mN} = I_{sN} \cos \varnothing_N, \quad (3.6)$$

$$I_{rN} = I_{sN} \sin \varnothing_N. \quad (3.7)$$

Όταν η ολίσθηση πλησιάζει τη μέγιστη ροή και υψηλότερη, οι εικασίες δεν ισχύουν πλέον, αφού οι επιπτώσεις από τις παραμελημένες επαγωγικές διαρροές καθίστανται σημαντικές, και το ρεύμα του φορτίου του στάτορα θα ακολουθεί συνήθως τα χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.18, συνήθως με ένα αρκετά επίπεδο πλάτος ρεύματος περίπου πέντε φορές το ονομαστικό ρεύμα (κλειδωμένο ρεύμα ρότορα).



Σχήμα 3.18: Χαρακτηριστικά φορτίου για απευθείας σύνδεση ασύγχρονου κινητήρα με καμπύλες φορτίου για έναν έλικα CPP.

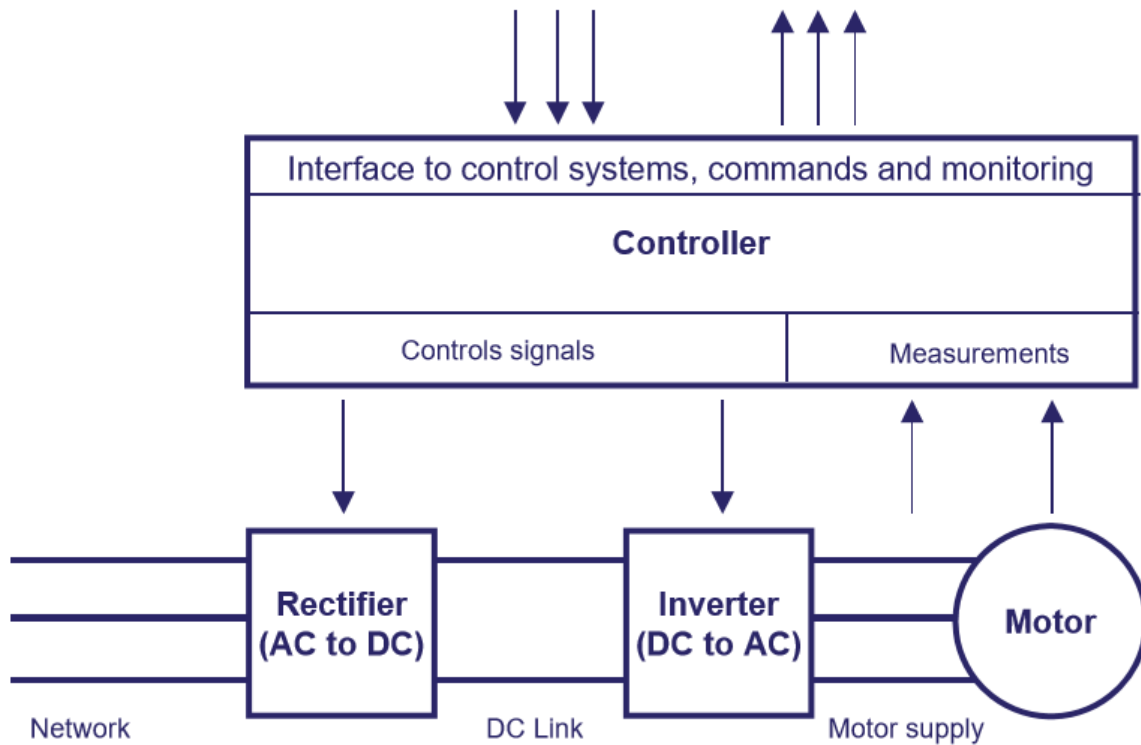
Εξαιτίας του υψηλού ρεύματος εκκίνησης ασύγχρονων μηχανών, θα είναι συχνά απαραίτητο να εγκαθίστανται συσκευές για ήπια εκκίνηση. Οι μαλακές μίζες συνήθως μειώνουν τα κλειδωμένα ρεύματα του ρότορα από 5 φορές σε 2-3 φορές το ονομαστικού ρεύματος, και έτσι μειώνουν επίσης την πτώση τάσης. Οι μαλακές μίζες πρέπει πάντα να

προσαρμόζονται στα χαρακτηριστικά του φορτίου, καθώς η αρχή τους βασίζεται στη μείωση της τάσης του κινητήρα κατά την εκκίνηση, και ως εκ τούτου στη μείωση της δυνατότητας ροπής του κινητήρα. Αυτά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά είναι:

- Σύζευξη Αστέρα – Δέλτα (Y – Δ)
- Αυτομετασχηματιστής
- Μαλακός εκκινητής ημιαγωγού (θυρίστορ)

### **Μεταβλητή ταχύτητα κινητήρων κίνησης και στρατηγικές ελέγχου**

Ο κινητήρας απευθείας σύνδεσης θα περιστρέφεται με μία ταχύτητα που καθορίζεται απευθείας από τη συχνότητα δικτύου. Για πρόωση, προωθητήρες, αντλίες, βαρούλκα κλπ, πιθανόν να υπάρχουν σημαντικές εξοικονομήσεις στην κατανάλωση ισχύος και καυσίμου, μειώνοντας τις απώλειες σε λειτουργίες που δεν εξαρτώνται από το φορτίο. Επίσης, η δυνατότητα ελέγχου του φορτίου κίνησης θα ενισχύεται σημαντικά ελέγχοντας την ταχύτητα του κινητήρα. Η ποινή είναι κυρίως οικονομική, εισάγοντας πρόσθετα επενδυτικά κόστη, καθώς και εξαρτήματα που απαιτούν συντήρηση. Η πρόσθετη επένδυση πρέπει να επιστραφεί με μειωμένα λειτουργικά κόστη ή αυξημένα κέρδη εάν η επένδυση είναι δικαιολογημένη. Με ένα κόστος ενέργειας περίπου 1NOK για κάθε kWh για την παραγόμενη ισχύ επί του σκάφους, κάποιος θα εξοικονομήσει εν συντομία 8-9MNOK ετησίως για μία μέση μείωση ενέργειας 1MW.



Σχήμα 3.19: Σχηματικές παραστάσεις ενός μηχανισμού μεταβλητής ταχύτητας, που δείχνει έναν μετατροπέα συχνότητας με DC σύνδεσμο, συνήθως για μετατροπείς τύπου VSI και CSI.

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μονάδες κινητήρα είναι:

- Μετατροπείς τύπου μετατροπέα πηγής τάσης (VSI) για AC κινητήρες, συνήθως ασύγχρονοι κινητήρες
- Μετατροπείς τύπου μετατροπέα πηγής ρεύματος (CSI) για AC κινητήρες, συνήθως σύγχρονοι κινητήρες
- Κυκλομετατροπείς (Cyclo) για AC κινητήρες, συνήθως για σύγχρονους κινητήρες
- Μετατροπείς DC, ή SCR (Ελεγχόμενος Διορθωτής Σιλικόνης) για DC κινητήρες

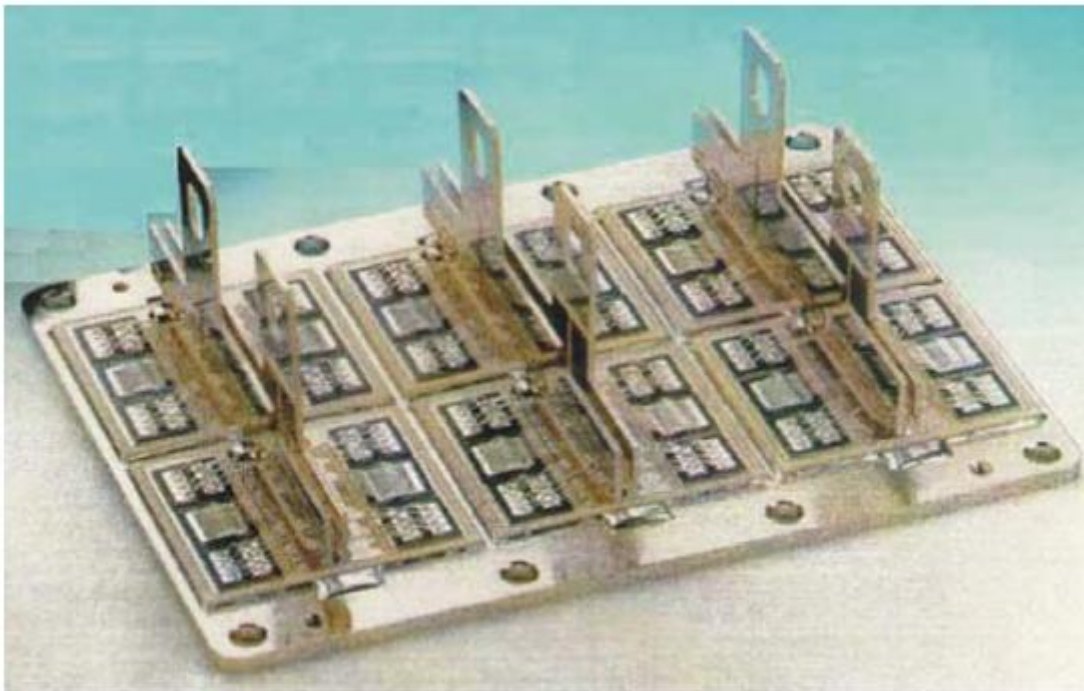
Σε πλοία, τις πιο χρησιμοποιούμενες μονάδες μεταβλητής ταχύτητας χρησιμοποιούν κινητήρες AC. Οι περισσότερες μονάδες, εκτός από τον κυκλικό μετατροπέα, θα αποτελούνται από έναν διορθωτή, ο οποίος διορθώνει την τάση γραμμής, και ένα μετατροπέα, ο οποίος παράγει τη μεταβλητή συχνότητα και την πηγή μεταβλητής τάσης για

τον κινητήρα. Πιο λεπτομερής περιγραφή αυτών των εννοιών, θα ακολουθήσει σε μία επόμενη ενότητα.

Ένας ελεγκτής κινητήρα περιέχει τον έλεγχο ταχύτητας, και τον έλεγχο των ρευμάτων του κινητήρα, ελέγχοντας τα στοιχεία αλλαγής του διορθωτή και/ή αντιστροφέα. Συνήθως απαιτείται μία διασύνδεση σε ένα σύστημα ελέγχου που υπερಿಸχύει, σύστημα διαχείρισης σκάφους, έλεγχος ελιγμών, ή δυναμικός έλεγχος θέσης. Ο ελεγκτής κινητήρα αποκτά σήματα μέτρησης και ανατροφοδότησης από αισθητήρες στη μονάδα, και στον κινητήρα. Συνήθως, μετρούνται τα ρεύματα του κινητήρα, η ταχύτητα του κινητήρα, και σε μερικές περιπτώσεις οι θερμοκρασίες και οι τάσεις.

Τα στοιχεία ημιαγωγού των ηλεκτρικών κυκλωμάτων ισχύος είναι είτε ανεξέλεγκτα (δίοδοι) είτε ελεγχόμενα (θυρίστορες, IGBT<sub>s</sub>, IGCT<sub>s</sub>). Το Σχήμα 3.20 δείχνει μία μονάδα IGBT χαμηλής τάσης, που περιέχει όλα τα στοιχεία μεταγωγής για μία μονάδα μετατροπέα 690V, και το Σχήμα 3.21 μία διακριτή μέση τάση IGCT που χρησιμοποιείται σε μετατροπείς 3300V.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος θεωρούνται σαν ένα ξεχωριστό πεδίο της επιστήμης, και για περισσότερες μελέτες μπορεί κανείς να συμβουλευτεί, τον Bose [36] και το Mohan et al. [191].

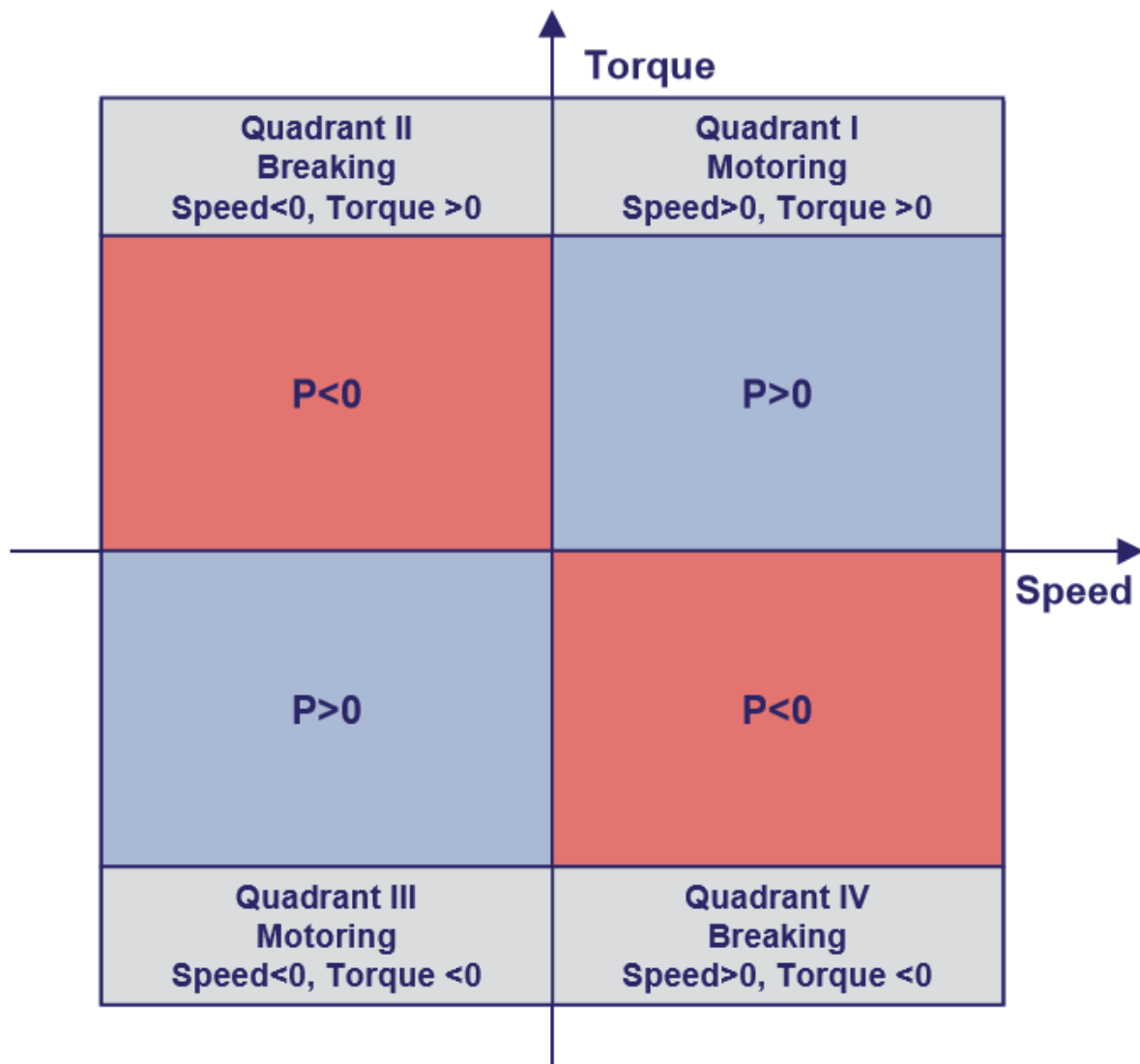


Σχήμα 3.20: Ένα IGBT με την εγκατάσταση αφαιρέθηκε. Αυτό αποτελείται από διάφορα ενσωματωμένα στοιχεία σε μία μονάδα.



Σχήμα 3.21: Το IGCT “δίσκος χόκεϋ” άνοιξε, δείχνοντας τα συστατικά του. Τα όστια σιλικόνης είναι στην κορυφή (μεσαία).

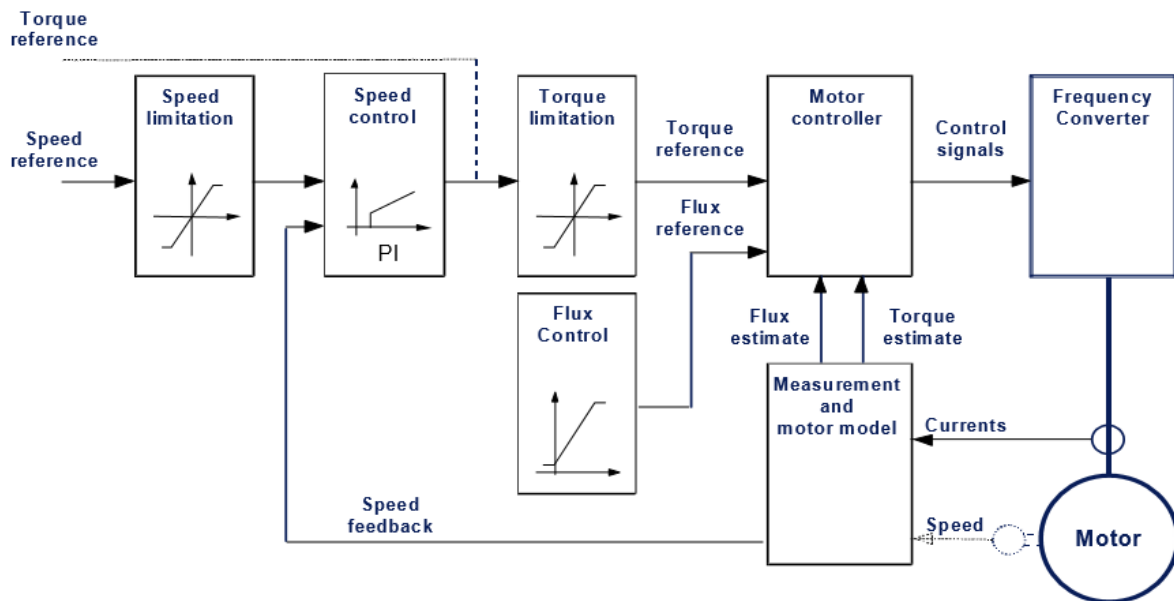
Ένας κινητήρας μπορεί, εάν έχει σχεδιαστεί γι'αυτό, να τρέχει και προς τις δύο κατευθύνσεις, είτε με οδήγηση είτε με ροπή στρέψης του άξονα. Προκειμένου να κατηγοριοποιηθούν ποιές είναι οι συνθήκες για τις οποίες έχει σχεδιαστεί η μονάδα κινητήρα, συχνά εφαρμόζονται οι όροι τεταρτημορίων. Τα τεταρτημόρια αναφέρουν τα τέσσερα τεταρτημόρια ενός διαγράμματος ροπής ταχύτητας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.22. Ο κινητήρας κινείται, δηλαδή εκτελεί το φορτίο με ισχύ εισόδου στον άξονα φορτίου, στα τεταρτημόρια I και III. Αντίθετα, ο κινητήρας σπάει, δηλαδή μεταφέρεται μηχανική ισχύς από το φορτίο στη μονάδα, όταν λειτουργεί στα τεταρτημόρια II και IV.



Σχήμα 3.22: Οι κινητήριοι μηχανισμοί ταξινομούνται συνήθως από το τεταρτημόριο στο οποίο έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν, π.χ. εάν σχεδιάζονται για να απορροφούν την αναγεννημένη ενέργεια από το φορτίο του. Τα τεταρτημόρια αναφέρονται στο διάγραμμα ροπής ταχύτητας.

Η μονάδα κινητήρα περιλαμβάνει συνήθως μια λειτουργία ελέγχου ταχύτητας, και η έξοδος από αυτή τη λειτουργία ελέγχου μπορεί να ερμηνευτεί σαν μια εντολή ροπής ή αναφοράς που είναι η είσοδος στους αλγόριθμους ελέγχου του κινητήρα. Αυτοί οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν ένα περισσότερο ή λιγότερο προηγμένο μοντέλο κινητήρα για να ελέγχουν τα ρεύματα και τις τάσεις του κινητήρα, ενεργοποιώντας ή απενεργοποιώντας τα στοιχεία μεταγωγής του διορθωτή (εάν είναι ελεγχόμενα) και του αντιστροφέα.

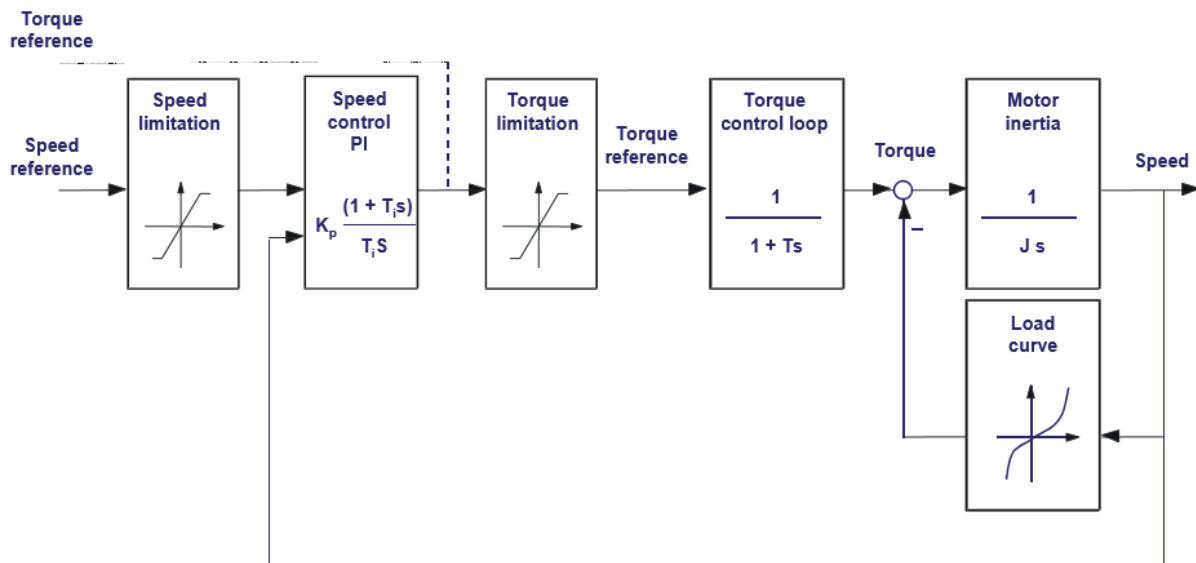
Στη αρχή, οι ελεγκτές θα έχουν κανονικά ένα διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23: Ένα γενικό και τυπικό διάγραμμα ελέγχου κυκλώματος για έναν ελεγκτή κινητήρα κίνησης.

Ο έλεγχος ροπής επιτυγχάνεται, αφαιρώντας το βρόχο ελέγχου ταχύτητας, και δίνει αναφορά ροπής σαν μια απευθείας είσοδο στη μονάδα του κινητήρα, όπως φαίνεται με διακεκομμένες γραμμές στο Σχήμα 3.24. Η ταχύτητα του κινητήρα μετριέται κανονικά, αλλά οι νέοι ελεγκτές του κινητήρα είναι εφοδιασμένοι με εκτιμητή ταχύτητας του κινητήρα ο οποίος εξαλείφει την ανάγκη για έναν ειδικό αισθητήρα ταχύτητας για περισσότερες εφαρμογές πλοίου.

Για πιο πρακτικούς λόγους, ο βρόχος ελέγχου ταχύτητας μιας μονάδας κινητήρα, μπορεί να θεωρηθεί ως ένας PI (ή PID) κλειστός ελεγχόμενος βρόχος με έναν εσωτερικό κλειστό βρόχο ελέγχου ροπής, ο οποίος για λόγους ελέγχου θεωρείται ως μία χρονική υστέρηση πρώτης τάξης. Για προσομοιώσεις και σύνθεση των υπερκείμενων βρόχων ελέγχου, πρέπει να εφαρμοστεί το απλοποιημένο διάγραμμα στο Σχήμα 3.24.



Σχήμα 3.24: Απλοποιημένο δομικό διάγραμμα για προσομοιώσεις και σύνθεση των κυριότερων βρόχων ελέγχου.

### 3.3.5 Μονάδες Προώθησης

#### Εισαγωγή

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει τις πιο κοινώς χρησιμοποιούμενες αρχές των μονάδων προώθησης σε πλοία με ηλεκτρική πρόωση. Η επισκόπηση δεν είναι πλήρης, καθώς υπάρχουν επίσης και άλλες εναλλακτικές, πχ πίδακες νερού, επίσης σε χρήση, ωστόσο μόνο για ειδικές και περιορισμένες εφαρμογές.

#### Άξονας πρόωσης

Σε ένα ντιζελ-ηλεκτρικό σύστημα ισχύος και πρόωσης με άξονα προπέλας, οι έλικες κινούνται κανονικά από ηλεκτρικούς κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας. Οι οριζόντιοι κινητήρες μπορεί να συνδέονται κατευθείαν με τον άξονα, ο οποίος οδηγεί σε μια απλή και μηχανικά ανθεκτική λύση, ή μέσω μιας ζεύξης γραναζιών, που επιτρέπει αυξημένη περιστρεφόμενη ταχύτητα του κινητήρα και οδηγεί σε έναν περισσότερο συμπαγή κινητήρα. Το μειονέκτημα είναι η αυξημένη μηχανική πολυπλοκότητα και οι αυξημένες απώλειες μηχανικής ισχύος.



Σε ντίτζελ-ηλεκτρικά πλοία, οι γραμμές του άξονα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές συνήθως, όπου η ισχύς πρόωσης είναι υψηλότερη από εκείνη που είναι διαθέσιμη για αζιμούθιους προωθητήρες, ή όπου η ικανότητα να παράγει εγκάρσια ώθηση, πχ στη διατήρηση σταθμού και ελιγμού δεν είναι απαραίτητη- ή μπορεί να παραχθεί φθηνότερα από τους προωθητήρες σήραγγας. Συνήθως, αυτό ισχύει για πετρελαιοφόρα, ερευνητικά σκάφη, μεγαλύτερα σκάφη με χειριστή άγκυρας, στρώματα καλωδίων, κλπ.

Η πρόωση της γραμμής άξονα θα συνδυάζεται πάντα με πηδάλια, ένα πηδάλιο ανά προπέλα. Με τη χρήση πηδαλίων υψηλής ανύψωσης, οι έλικες του άξονα μπορούν επίσης να χρησιμοποιούνται για να παρέχουν έναν ορισμένο βαθμό εγκάρσιας ώθησης. Εάν απαιτείται πρόσθετη εγκάρσια ώθηση για ελιγμό ή διατήρηση σταθμού, θα χρειαστεί κανονικά να εγκαταστήσουν πρόσθετους προωθητήρες σήραγγας και στην πρύμνη του σκάφους.

Η προπέλα είναι κανονικά τύπος ελεγχόμενης ταχύτητας FPP (προπέλα σταθερής κλίσης), όπου δίνει έναν απλό και στιβαρό σχεδιασμό προπέλας. Σε μερικές εφαρμογές, η προπέλα μπορεί να είναι τύπου CPP (προπέλα ελεγχόμενης κλίσης), ακόμα και εάν η ταχύτητα ελέγχεται. Σε κάποιο βαθμό, η ταχύτητα και η κλίση μπορούν να βελτιστοποιηθούν για υψηλότερη απόδοση, και ταχύτερη απόκριση σε σχέση με μία μόνο παράμετρο ελέγχου. Αυτά τα οφέλη συνήθως δε δικαιολογούν τις πρόσθετες επενδύσεις για να επιτευχθεί συνδυασμένος έλεγχος ταχύτητας και κλίσης.

Το Σχήμα 3.25 δείχνει κάποιες τυπικές διαμορφώσεις μονάδων για το σύστημα προώθησης γραμμής άξονα. Αυτά μπορούν να εγκατασταθούν σε σχεδιασμούς προπέλας μονής ακτίνας, ή σε σχέδια διπλού άξονα.

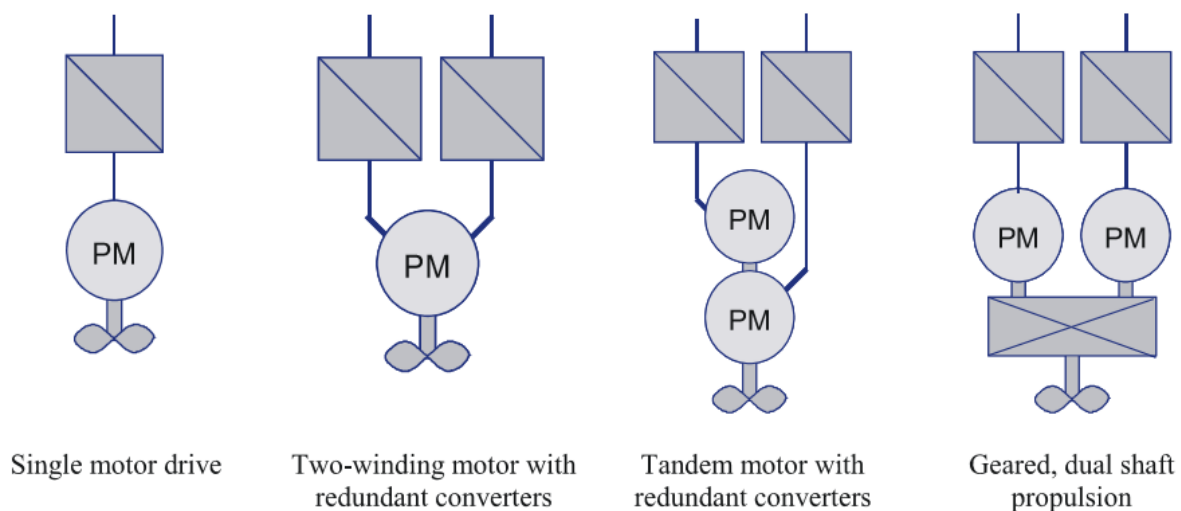
### **Αζιμούθιοι προωθητήρες**

Οι αζιμούθιοι προωθητήρες είναι προωθητήρες που μπορούν να περιστρέφονται για να παράγουν ώθηση προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Η ώθηση ελέγχεται είτε με σταθερή ταχύτητα και CPP σχεδιασμό, σχεδιασμό FPP μεταβλητής ταχύτητας, είτε σε σπάνιες περιπτώσεις με ένα συνδυασμό ελέγχου ταχύτητας και κλίσης. Τα σχέδια FPP μεταβλητής ταχύτητας έχουν μια σημαντικά απλούστερη μηχανική υποβρύχια κατασκευή με μειωμένες απώλειες χαμηλής ώθησης σε σύγκριση με τη σταθερή ταχύτητα προπελών CPP.

Σε σκάφη με αυστηρό περιορισμό του ύψους εντός του σκάφους του χώρου ώθησης, ο ηλεκτρικός κινητήρας θα είναι κανονικά οριζόντιος, και ο αζιμούθιος προωθητήρας θα αποτελείται από μία τύπου Z μετάδοση γρανάζιου. Εξαιτίας μιας απλούστερης κατασκευής με λιγότερες απώλειες μετάδοσης ισχύος, οι κάθετα τοποθετημένοι κινητήρες και η μετάδοση

γραναζιού σχήματος L, θα επιλέγονται κανονικά όταν το ύψος στο δωμάτιο προωθητήρα το επιτρέπει.

Ένας περιορισμός των αζιμούθιων προωθητήρων είναι η περιορισμένη ικανότητά τους να παράγουν ώθηση αρνητικής κλίσης ή RPM, διότι σχεδιάζονται και βελτιστοποιούνται για ώθηση μονής κατεύθυνσης. Εάν έχουν έναν ορισμένο βαθμό αρνητικής ικανότητας ώθησης, αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να διατηρηθεί η δυναμική χωρητικότητα ώθησης χωρίς να εκτελείται συνεχής αζιμούθια περιστροφή.



Σχήμα 3.25: Μερικά παραδείγματα των ρυθμίσεων κίνησης της γραμμής του άξονα.

Ο συμβατικός αζιμούθιος προωθητήρας χρησιμοποιήθηκε νωρίτερα για διατήρηση σταθμού και ελιγμό, αλλά πρόσφατα χρησιμοποιήθηκε επίσης σαν κύρια συσκευή προώθησης σε σκάφη με ηλεκτρική πρόωση. Προκειμένου να βελτιωθούν οι υδροδυναμικές και η ικανότητα πλοήγησης που απαιτείται για προώθηση, το σχήμα του προωθητήρα έχει προσαρμοστεί όπως ο “μηχανικός λοβός”. Πρόκειται για έναν αζιμούθιο προωθητήρα, ο οποίος τροφοδοτείται από έναν ενσωματωμένο, συνήθως οριζόντιο κινητήρα, και η μηχανική ισχύς μεταφέρεται λοιπόν στον έλικα με ένα γρανάζι σχήματος Z. Το υποβρύχιο σχήμα βελτιστοποιείται για χαμηλή υδροδυναμική αντίσταση σε υψηλότερη ταχύτητα πλοίου, για μεγαλύτερη απόδοση πρόωσης.

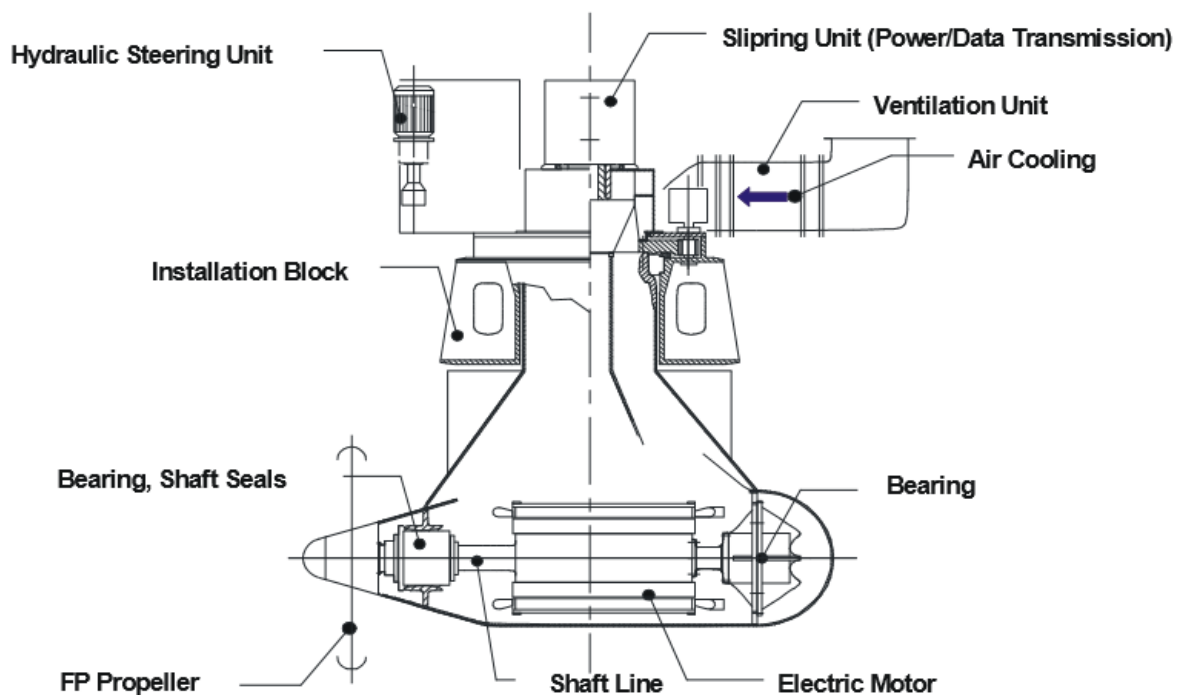
Ορισμένοι πωλητές μπορούν να προμηθεύουν συσκευές προώθησης με διπλή έλικα, είτε στον ίδιο άξονα, είτε με έλικες που αντιστρέφονται. Η αντίστροφη περιστροφή έλικα αυξάνει την υδροδυναμική απόδοση χρησιμοποιώντας την περιστροφική ενέργεια του ρεύματος εκτόξευσης από μία έλικα, για να δημιουργήσει ώθηση από την άλλη που περιστρέφεται στην

αντίθετη κατεύθυνση. Οι συμβατικοί αζιμούθιοι προωθητήρες βρίσκονται, επί του παρόντος (2002), σε χρήση, με τιμές ισχύος πάνω από 6-7 MW.

### Υποκινούμενη προώθηση

Όπως και ο συμβατικός αζιμούθιος προωθητήρας, έτσι και η υποκινούμενη μονάδα προώθησης μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα και μπορεί να παράγει ώθηση σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Η κύρια διαφορά είναι η ενσωμάτωση του ηλεκτρικού κινητήρα κατευθείαν στον άξονα της έλικας, μέσα σε μια σφραγισμένη υποενότητα που είναι βυθισμένη κάτω από το κύτος του σκάφους.

Η υψηλή υποδύναμη σχηματικά ζωγραφισμένη στο Σχήμα 3.26 δείχνει τον ηλεκτρικό κινητήρα μεταβλητής ταχύτητας, που είναι τοποθετημένος στο σφραγισμένο και συμπαγές δοκάρι. Η έλικα σταθερής κλίσης τοποθετείται απευθείας στον άξονα του κινητήρα. Μέχρι να αποφευχθεί ένα μηχανικό γρανάζι, η απόδοση μετάδοσης είναι υψηλότερη από έναν αζιμούθιο προωθητήρα. Η ηλεκτρική ισχύς μεταφέρεται στον κινητήρα μέσω εύκαμπτης καλωδίωσης ή δακτυλίων ολίσθησης για λειτουργία 360 βαθμών. Δεδομένου ότι η κλίση της έλικας είναι σταθερή και δεν υπάρχει μετάδοση γραναζιού, η μηχανική κατασκευή έχει χαμηλότερη μηχανική πολυπλοκότητα.



Σχήμα 3.26: Υποκινούμενη προώθηση.

Ο λοβός μπορεί να σχεδιαστεί για ώθηση ή τράβηγμα της λειτουργίας. Ιδιαίτερα ο τύπος λοβού έλξης δίνει στον έλικα ένα σχεδόν βέλτιστο και ομοιόμορφο πεδίο αφύπνισης, το οποίο αυξάνει την υδροδυναμική απόδοση του έλικα και μειώνει τον κίνδυνο σπηλαίωσης, και συνεπώς δίνει μειωμένο θόρυβο και δονήσεις. Μία υποκινούμενη μονάδα μπορεί να περιστρέφεται τόσο προς τα εμπρός όσο και προς τα πίσω, εάν οι τρόποι ώθησης είναι σχεδιασμένοι για αυτό. Η έλικα κανονικά βελτιστοποιείται για μια κύρια κατεύθυνση ώθησης, δίνοντας κάποια μειωμένη ικανότητα αρνητικής ώθησης αλλά χωρίς τους μηχανικούς περιορισμούς του μηχανικού προωθητήρα.

Οι υποκινούμενες μονάδες προώθησης λειτουργούν μια δεκαετία σε κρουαζιερόπλοια, παγοθραυστικά, πλοία εξυπηρέτησης και δεξαμενόπλοια. Πρόσφατα, νεόκτιστα πλοία υποστήριξης πεδίου, Σχήμα 3.10, και ημυποβρύχιες μονάδες γεώτρησης χρησιμοποιούν επίσης τώρα υποκινούμενη προώθηση ως προωθητήρες προώθησης διατήρησης σταθμού/διέλευση. Το σύστημα είναι σήμερα διαθέσιμο σε εύρος ισχύος από περίπου 1MW έως τουλάχιστον 25MW. Οι μεγαλύτερες μονάδες παρέχουν πρόσβαση στη δεξαμενή για οπτική επιθεώρηση.

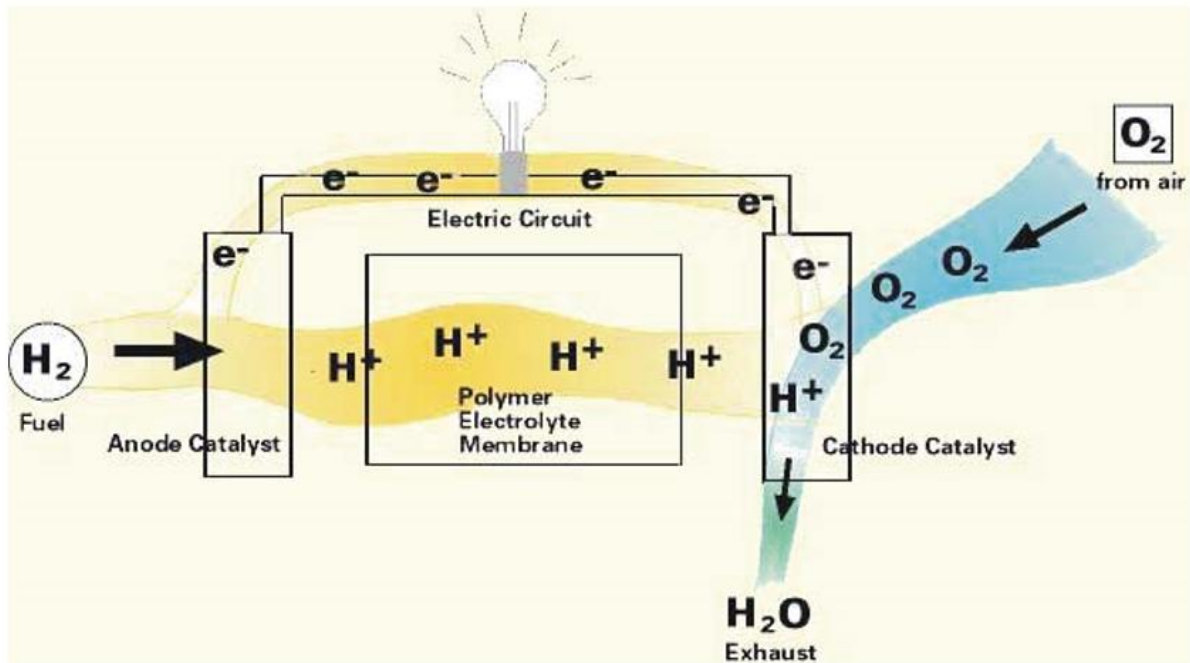
### **3.3.6 Τάσεις και Νέες Έννοιες**

#### **Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος**

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε περιστρεφόμενους κύριους κινητήρες και ηλεκτρικές γεννήτριες, είναι μια ώριμη τεχνολογία, αλλά υπάρχει συνεχώς αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων στη παραδοσιακή σύγχρονη γεννήτρια. Η τεχνολογία κυψέλης καυσίμου είναι ένας τομέας μεγάλου ενδιαφέροντος και ερευνητικής προσπάθειας, κυρίως στις αυτοκινητοβιομηχανίες.

Μία κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που αναμιγνύει ένα καύσιμο, πχ υδρογόνο, και οξυγόνο από τον αέρα για να παραχθεί ηλεκτρισμός, θερμότητα και νερό. Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν χωρίς καύση, βλέπε Σχήμα 3.27· ως εκ τούτου, μία κυψέλη καυσίμου υδρογόνου είναι ουσιαστικά απαλλαγμένη από ρύπανση. Δεδομένου ότι το καύσιμο μετατρέπεται κατευθείαν σε ηλεκτρική ενέργεια, μία κυψέλη καυσίμου μπορεί να λειτουργήσει με πολύ υψηλότερες αποδόσεις από τις μηχανές εσωτερικής καύσης, εξάγοντας περισσότερο ηλεκτρισμό από την ίδια ποσότητα καυσίμου. Η ίδια η κυψέλη καυσίμου δεν έχει κινούμενα μέρη – καθιστώντας την μία ήσυχη και αξιόπιστη πηγή ισχύος. Η κυψέλη

καυσίμου αποτελείται από μία άνοδο (ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο που απωθεί τα ηλεκτρόνια), μία μεμβράνη ηλεκτρολύτη στο κέντρο, και μία κάθοδο (ένα θετικό ηλεκτρόδιο που προσελκύει τα ηλεκτρόνια).



Σχήμα 3.27: Αρχές κυψέλης καυσίμου υδρογόνου.

Υπάρχει μία σειρά από διάφορες έννοιες κάτω από αξιολόγηση, όπως: φωσφορικό οξύ, μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων ή στερεό πολυμερές, λιωμένο ανθρακικό, στερεό οξείδιο, αλκαλικό, κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης, κυψέλες καυσίμου αέρα ψευδάργυρου, και κυψέλες πρωτονικού κεραμικού καυσίμου.

Το κοινό για όλες αυτές τις εναλλακτικές είναι ότι η τεχνολογία σήμερα έχει υψηλό κόστος παραγωγής και συντήρησης – με υψηλή τιμή ενέργειας. Η δυναμική δυνατότητα θα πρέπει να βελτιωθεί, και με την παρούσα χαμηλή πυκνότητα ισχύος της μονάδας, η χρήση περιορίζεται στην πράξη σε μικρότερες ονομαστικές τιμές ισχύος. Έχουν αναφερθεί μερικά πειραματικά σχέδια πλοίου που χρησιμοποιούν κυψέλη καυσίμου παραγωγής ισχύος, και είναι κοινώς υποτιθέμενο και αποδεκτό ότι η κυψέλη καυσίμου θα καταστεί εμπορικά εφικτή μέσα σε κάποιο χρονικό διάστημα, αλλά όχι στο άμεσο μέλλον.

Η κυψέλη καυσίμου παράγει τάση DC, και κάποιος θα μπορούσε να σκεφτεί δύο εναλλακτικές για διανομή:

- DC κατανομή και DC φορτίο – οι περισσότερες από τις αρχές του μετατροπέα για τους κινητήρες πρόωσης βασίζονται στη διόρθωση της AC παροχής πριν μετατραπούν σε μεταβλητή συχνότητα. Το πρόβλημα σχετίζεται κυρίως με την εναλλαγή και την προστασία του συστήματος διανομής, καθώς η διακοπή των υψηλών ρευμάτων DC είναι δύσκολη. Η μετατροπή σε διαφορετικά επίπεδα τάσης και η προμήθεια των καταναλωτών που χρειάζονται AC εφοδιασμό θα είναι επίσης δαπανηρή. Η κατανομή DC αξιολογήθηκε κυρίως, και χρησιμοποιήθηκε σε κάποιο βαθμό, σε στρατιωτικές εφαρμογές.
- DC-AC μετατροπή της ισχύος. Με αυτή τη λύση, τα προβλήματα με τη διανομή και παροχή τάσης θα μειωθούν, αλλά για υψηλότερα επίπεδα ισχύος, η λύση είναι ακόμα ακριβή.

Η διανομή DC, θα μπορούσε επίσης να επιτρέψει τη χρήση συμπαγούς και ελαφρού υψηλής ταχύτητας μόνιμο μαγνήτη που εξέρχεται από γεννήτριες. Καθώς η πυκνότητα ισχύος μιας περιστρεφόμενης μηχανής αυξάνεται από την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του, θα υπάρξουν σημαντικές εξοικονομήσεις βάρους και όγκου εάν η ταχύτητα μπορούσε να αυξηθεί από συνήθως 500-900 RPM σε 15000 RPM. Το μειονέκτημα θα είναι μία έξοδος υψηλής συχνότητας με ανεξέλεγκτη και μεταβαλλόμενη τάση που θα απαιτούσε μεγάλες εγκαταστάσεις μετατροπής ισχύος.

Οι εξελίξεις στην κυψέλη καυσίμου και στις ηλεκτρονικές μονάδες ισχύος ανοίγουν για μεγάλες αλλαγές στην εφαρμοσμένη τεχνολογία. Η τεχνολογία παραγωγής, διανομής, και προώθησης ηλεκτρικής ισχύος, η οποία εφαρμόστηκε μέχρι πρόσφατα, υστερεί στην έρευνα και εφαρμογή στον τομέα της βιομηχανίας και αυτοκινητοβιομηχανίας, αλλά αυτές οι τεχνολογίες θα σημειώσουν πρόοδο βήμα προς βήμα, παρόμοια με την ανάπτυξη άλλων νέων τεχνολογιών.

### **Διανομή Ηλεκτρικής Ισχύος**

Δεν είναι πιθανό, ότι θα υπάρξει μία δραματική μετατόπιση στην τεχνολογία στη διανομή ηλεκτρικής ισχύος για AC συστήματα. Μία σταδιακή εισαγωγή νέων προστατευτικών ρελέ, προγραμματιζόμενων και με πεδίο διόδου επικοινωνίας έχει ήδη ξεκινήσει και θα συνεχίσει. Αυτό σημαίνει, ότι όσο η ευελιξία θα αυξάνεται, οι συνολικές δαπάνες του έργου θα μειώνονται.

Υπάρχει έρευνα και ανάπτυξη των ηλεκτροκινητήρων, στατικοί μετατροπείς ισχύος που μετασχηματίζουν τις τάσεις με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος. Ένας μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας μπορεί να δώσει γαλβανική μόνωση και τα οφέλη θα είναι μειωμένες διαστάσεις και βάρη, και εξάλειψη των προβλημάτων εισροής των μετασχηματιστών. Είναι ακόμη έργο να γίνει, πριν οι ηλεκτροκινητήρες εφαρμοστούν σε εμπορικά πλοία, αλλά θα αποτελέσουν βασικά συστατικά για να καταστεί δυνατή η μελλοντική ανάπτυξη των DC συστημάτων διανομής.

## **Πρώθηση**

Το υποκινούμενο σύστημα πρόωσης είναι το μεγαλύτερο βήμα προόδου ως μονάδα πρόωσης τα τελευταία χρόνια. Η ιδέα δεν έχει ακόμα αναπτυχθεί πλήρως για όλες τις εφαρμογές αγοράς και ισχύος, και θα υπάρχει μια συνεχής εξέλιξη να φανεί. Αυτό μπορεί να έχει σημαντική επίπτωση στο σχεδιασμό του σκάφους και να επιτρέψει για συνολικά νέες ιδέες πλοίου για πολλούς τομείς.

Στην έννοια CPR ( Αντίθετη Περιστρεφόμενη Βάση), η υποκινούμενη πρόωση συνδυάζεται με μία παραδοσιακή γραμμή έλικα που κινείται από προπέλα που φαίνεται στο Σχήμα 3.14. Το βήμα είναι ασύμφορο και ελεγχόμενο με έναν ηλεκτρικό κινητήρα μεταβλητής ταχύτητας, και η γραμμή έλικα προπέλας μπορεί να είναι είτε με ηλεκτρικό κινητήρα ελεγχόμενης ταχύτητας, είτε μία συμβατική έλικα που κατευθύνεται απευθείας από πετρελαιοκίνητη προπέλα. Η ιδέα της CPR έχει αποδειχθεί ότι προσφέρει μία μεγάλη βελτίωση στην απόδοση πρόωσης, καθώς επίσης και αυξημένο πλεονασμό και δύναμη πρόωσης για αρκετούς τύπους πλοίου.

## **3.4 Έλεγχος Ισχύος και Πρόωσης**

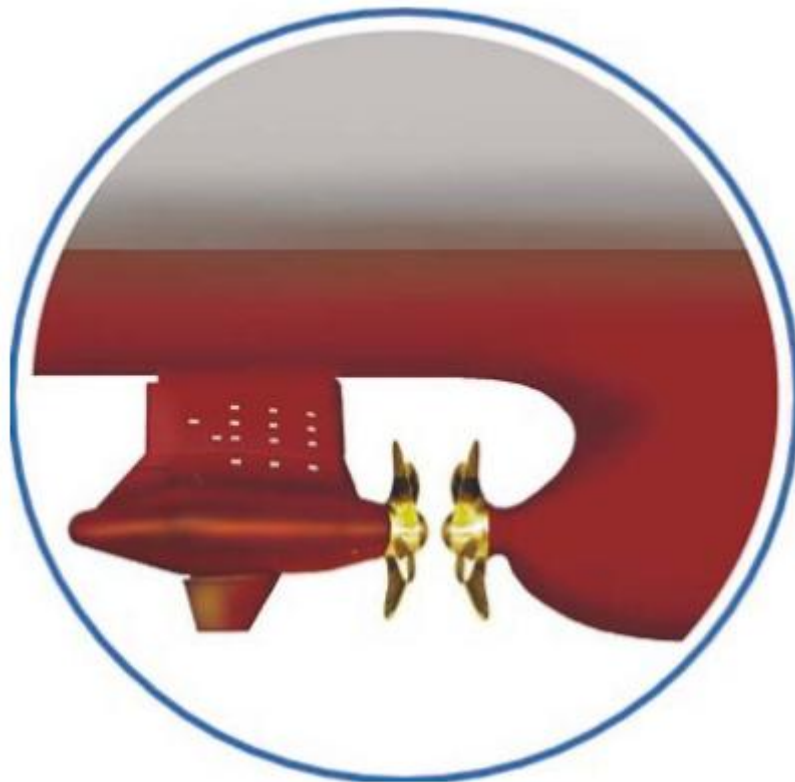
### **3.4.1 Εισαγωγή – Ιεραρχία Ελέγχου**

Το Σχήμα 3.29 μπορεί να απεικονίσει ένα σύγχρονο, ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου, παρακολούθησης και προστασίας μίας μονάδας συστήματος ισχύος και πρόωσης, και η εφαρμοσμένη λειτουργικότητα μπορεί να περιγραφεί στην ιεραρχία ελέγχου του Σχήματος 3.30.

Η διεπαφή του χρήστη με την παρουσίαση της κατάστασης και των μετρήσεων, την εισαγωγή εντολών χρήστη, το χειρισμό κινδύνου κλπ, εφαρμόζεται συχνά σε σταθμούς

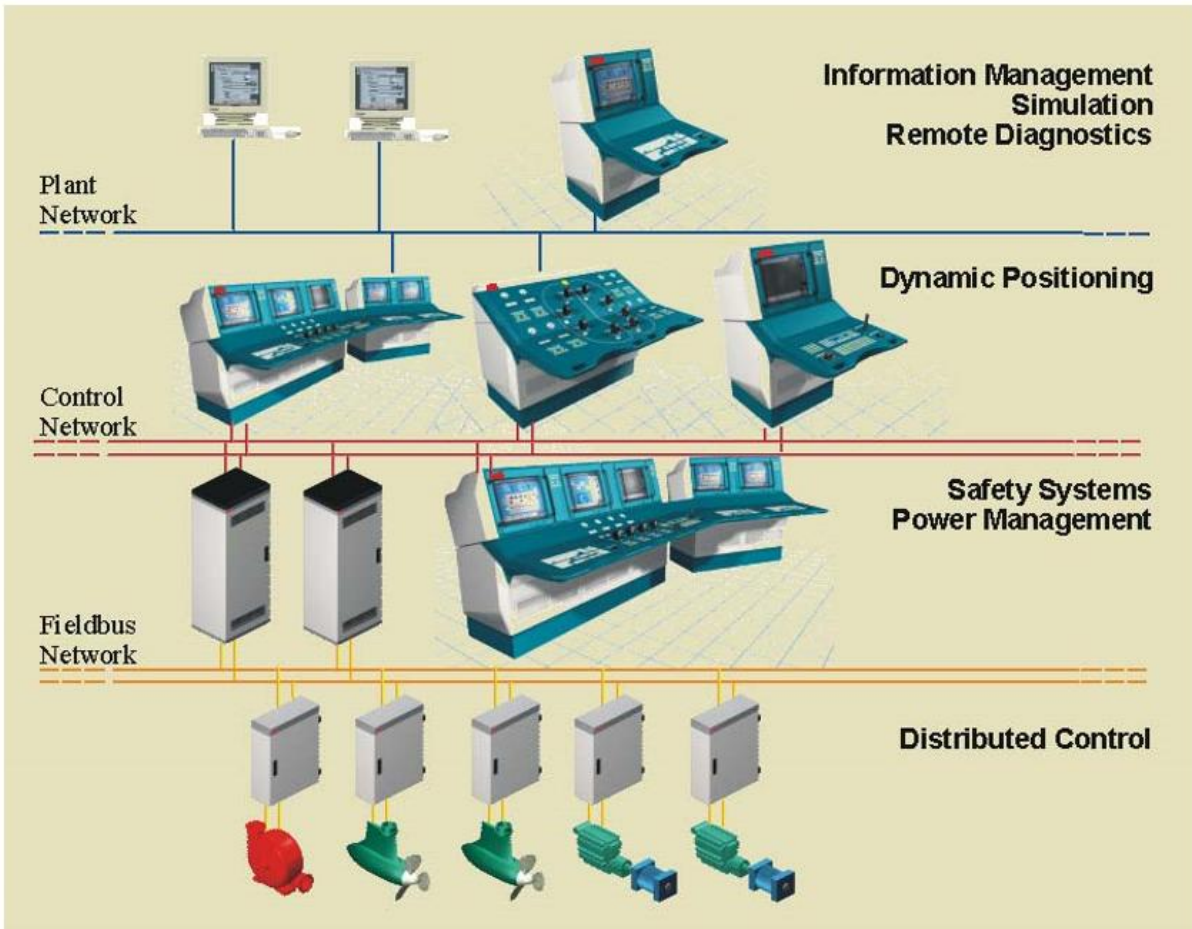
χειριστή, με γραφικό περιβάλλον χρήστη, κουμπιά, κλπ. Οι σταθμοί χειριστή τοποθετούνται σε γέφυρα, δωμάτια ελέγχου κινητήρα, κλπ.

Οι ελεγκτές επιπέδου συστήματος εφαρμόζονται σε σταθμούς ελέγχου ή PLC. Μπορούν να είναι συγκεντρωμένοι ή κατακεκολλημένοι υπολογιστές, που εξαρτώνται από τη φιλοσοφία σχεδιασμού για το πλοίο. Σε αυτές κάποιος θα βρει τις λειτουργίες διαχείρισης ενέργειας, όπως τη διαχείριση ισχύος, τις λειτουργίες πρόληψης διακοπής ρεύματος, τον έλεγχο της σειράς εκκίνησης και επανεξοπλισμού.



Σχήμα 3.28: Η ιδέα αντίστροφης περιστρεφόμενης βάσης (CRP).





Σχήμα 3.29: Ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου για ένα πλοίο, γενική διαμόρφωση.



Σχήμα 3.30: Ιεραρχία ελέγχου για μονάδα παραγωγής ενέργειας.

Εξαιτίας της ανάγκης για χωριστή δοκιμή, απαιτήσεις χρόνου απόκρισης, και ευθύνη του πωλητή, θα υπάρχει η ανάγκη για έλεγχο χαμηλού επιπέδου γρήγορης απόκρισης, παρακολούθηση, και προστασία των συσκευών. Εδώ είναι οι λειτουργίες γρήγορου ελέγχου και οι πιο βασικές λειτουργίες ασφάλειας που εφαρμόζονται. Αυτά συνδέονται με το επίπεδο ελέγχου του συστήματος μέσω διεπαφής σήματος καλωδίου ή διαύλου.

### **3.4.2 Διεπαφή Χρήστη**

Η διεπαφή χρήστη, που αντιπροσωπεύεται από τις κονσόλες γέφυρας και τις οθόνες, είναι η επαφή του πληρώματος για παρακολούθηση και έλεγχο των εγκαταστάσεων ισχύος και πρόωσης.

Έχει γίνει πιο συνηθισμένο να χρησιμοποιείται το GUI (Γραφική Διεπαφή Χρήστη) σε εφαρμογές πλοίου, όπου οι λαμπτήρες και τα κουμπιά ήταν συνηθισμένα μερικά χρόνια πριν. Αυτό επιτρέπει πολύ πιο ευέλικτες και οικονομικά αποδοτικές λύσεις, αλλά εισάγει επίσης μια πολύ μεγάλη πρόκληση για πωλητές και χρήστες να προσδιορίζουν και να σχεδιάζουν μία καλή διεπαφή χρήστη που συνδυάζει τα θέματα ασφάλειας με φιλικότητα προς το χρήστη, λογικό σχεδιασμό και εύκολη πρόσβαση σε ουσιαστικές και επιθυμητές πληροφορίες.

### **3.4.3 Υψηλό Επίπεδο Λειτουργικότητας Ελέγχου**

#### **Διαχείριση Ισχύος – Διαχείριση Ενέργειας**

Σε ένα σύστημα εγκαταστάσεων ηλεκτρικής ισχύος, σύστημα αυτοματισμού πλοίου και διαδικασίας, και σύστημα εντοπισμού θέσης, τα διάφορα μέρη του συστήματος αυτοματισμού ελέγχουν τα μέρη τους από το σύστημα ισχύος, π.χ. το σύστημα δυναμικής τοποθέτησης ελέγχει τους κινητήρες προώθησης, το σύστημα ελέγχου εκφόρτωσης χρησιμοποιεί αντλίες φορτίου, το σύστημα ελέγχου διαδικασίας αλληλεπιδρά με τους συμπιεστές και τα συστήματα ψύξης/θέρμανσης, κλπ. Το σημείο διασύνδεσης για όλο τον εγκατεστημένο εξοπλισμό ισχύος είναι το σύστημα διανομής ισχύος. Με την εκκίνηση και τις μεταβατικές εισροές, τις μεταβολές φορτίου, και τις διαταραχές του δικτύου από αρμονικές επιδράσεις, το φορτίο και οι γεννήτριες αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν το ένα το άλλο. Η βέλτιστη λειτουργία και ο έλεγχος του συστήματος ισχύος είναι απαραίτητα για ασφαλή λειτουργία με ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου. Καθώς αυτό είναι το σύστημα ελέγχου ενέργειας (σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ισχύος), το οποίο παρακολουθεί και έχει το

συνολικό έλεγχο λειτουργικότητας του συστήματος ισχύος, αυτό θα είναι το ενσωματωμένο στοιχείο σε ένα εντελώς ενσωματωμένο σύστημα ισχύος, αυτοματισμού, και τοποθέτησης.

Ο σκοπός του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (PMS) είναι να εξασφαλίσει ότι υπάρχει επαρκής διαθέσιμη ισχύς για την πραγματική κατάσταση λειτουργίας. Αυτό επιτυγχάνεται παρακολουθώντας το φορτίο και την κατάσταση των γεννητριών και του συστήματος ισχύος. Εάν η διαθέσιμη ισχύς γίνει πολύ μικρή, είτε λόγω αυξημένου φορτίου είτε λόγω σφάλματος σε μία ομάδα γεννητριών που λειτουργεί, το PMS θα ξεκινήσει αυτόματα την επόμενη ομάδα γεννήτριας στην αρχική ακολουθία. Ένα σύστημα διαχείρισης ισχύος μπορεί επίσης να έχει εκτεταμένη λειτουργικότητα με την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ροής ενέργειας με έναν τρόπο που να χρησιμοποιεί τον εγκατεστημένο και λειτουργικό εξοπλισμό με βέλτιστη απόδοση καυσίμου. Τέτοια συστήματα μπορούν να ονομάζονται Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (EMS).

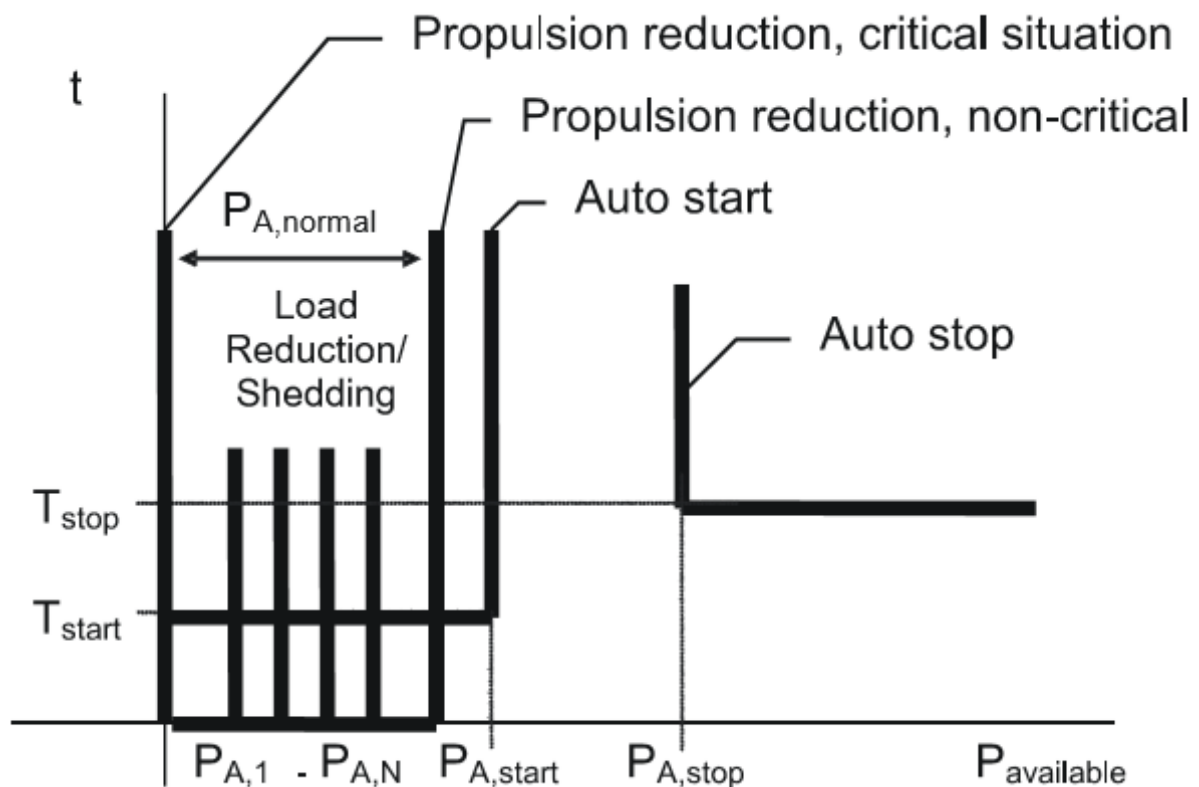
Για τα συστήματα PMS και EMS, οι κύριες λειτουργίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε:

- Διαχείριση Παραγωγής Ισχύος: Συνολικός έλεγχος με παρακολούθηση συχνότητας και τάσης, με παρακολούθηση ενεργού και παθητικού καταμερισμού φορτίου, και πιθανώς έλεγχος, και εξαρτημένη από το φορτίο εκκίνηση και διακοπή των ομάδων γεννητριών. Εφόσον η λογική ελέγχου και οι λειτουργίες σύνδεσης αποτελούν ένα σημαντικό μέρος του σχεδιασμού του πίνακα συστήματος ισχύος, η λειτουργικότητα αυτών των συστημάτων πρέπει να οργανώνεται.
- Διαχείριση φορτίου: Παρακολούθηση ισχύος φορτίου και συντονιστής των λειτουργιών περιορισμού ισχύος σε άλλα συστήματα, απόρριψη φορτίου και έναρξη σύνδεσης βαρέων καταναλωτών που βασίζεται στη διαθέσιμη παρακολούθηση ισχύος.
- Διαχείριση διανομής: Διαμόρφωση και έλεγχος σειράς για επαναρρύθμιση του συστήματος διανομής ισχύος. Το σύστημα διανομής θα πρέπει να είναι διαμορφωμένο να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις στον πραγματικό τρόπο λειτουργίας για το σκάφος.

Τα σκάφη παραγωγής νέας γενιάς καθώς και τα πλοία/εξαρτίσεις έχουν μία πολύπλοκη διαμόρφωση του συστήματος ισχύος με προηγμένες φιλοσοφίες προστασίας και αναμετάδοσης. Υπάρχουν στενές συνδέσεις ανάμεσα στο λειτουργικό σχεδιασμό και την απόδοση του συστήματος ελέγχου ενέργειας (σύστημα διαχείρισης ισχύος) και τις

λειτουργίες του συστήματος προστασίας ισχύος. Πρόκειται για μια πρόκληση για τα εμπλεκόμενα μέρη να αποκτήσουν μία βέλτιστη και λειτουργική λύση με πολλούς εμπλεκόμενους προμηθευτές και ένα ναυπηγείο που είναι υπεύθυνο για όλο το συντονισμό.

Η διακοπή του συστήματος παραγωγής ενέργειας είναι το πιο σοβαρό πρόβλημα που μπορεί να συμβεί σε ένα ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης. Διάφοροι μηχανισμοί για την αποφυγή διακοπής συνδέονται με το σύστημα διαχείρισης ισχύος, όπως οι αυτόματες λειτουργίες εκκίνησης/διακοπής, η μείωση προώθησης και άλλων φορτίων, ή η απόρριψη μη κρίσιμων φορτίων. Το Σχήμα 3.31 απεικονίζει το διάγραμμα συντονισμού για μια τυπική εγκατάσταση.



Σχήμα 3.31: Διάγραμμα συντονισμού των λειτουργιών πρόληψης διακοπής παροχής ρεύματος.

Κανονικά, η διαθέσιμη ισχύς θα ελέγχεται εντός των ορίων για αυτόματη εκκίνηση/διακοπή, αλλά εάν συμβεί μία ξαφνική αύξηση φορτίου ή διακοπή μιας ομάδας γεννήτριας, η διαθέσιμη ισχύς μπορεί να μειωθεί. Με την παρακολούθηση της ισορροπίας φορτίου και/ή της συχνότητας δικτύου, οι λειτουργίες μείωσης φορτίου και απόρριψης φορτίου θα ενεργοποιηθούν για να μειωθεί η φόρτιση και να διασφαλιστεί η παραγωγή ισχύος έως ότου μία νέα ομάδα γεννήτριας ξεκινήσει και συνδεθεί.

Σε περίπτωση που συμβεί διακοπή, και αυτό δυστυχώς συμβαίνει από ώρα σε ώρα, θα απαιτείται κανονικά να υπάρχει ένα σύστημα για έλεγχο ακολουθίας της εκκίνησης και της αναδιάταξης του συστήματος ισχύος. Αυτό εφαρμόζεται στο επίπεδο ελέγχου του συστήματος, και περιλαμβάνει ακολουθίες για εκκίνηση και των ομάδων γεννήτριας και των φορτίων. Κανονικά θα υπάρχει επίσης ένα σύνολο προκαθορισμένων τρόπων λειτουργίας, πχ λειτουργία διαμετακόμισης, λειτουργία διατήρησης σταθμού, τρόπος ελιγμών, κλπ με αυτόματο έλεγχο αλληλουχίας για αναδιαμόρφωση του συστήματος ισχύος.

### **Διαχείριση πλοίου**

Στον όρο διαχείριση πλοίου, είναι συνηθισμένο να περιλαμβάνεται χειροκίνητος, αυτόματος, και ημι-αυτόματος έλεγχος των βοηθητικών σκαφών και των βοηθητικών συστημάτων, όπως βαλβίδες, σύστημα HVAC (θέρμανση, εξαερισμός, και κλιματισμός), έλεγχος έρματος, έλεγχος φορτίου, κλπ. Επίσης, τα συστήματα συναγερμού, το σύστημα παρακολούθησης κλίσης και τα συστήματα ασφαλείας μπορούν να ενσωματωθούν στο Σύστημα Διαχείρισης Σκάφους. Οι περισσότερες από τις λειτουργίες παρακολουθούνται κανονικά και είναι πιθανές για έλεγχο από τη γέφυρα, ή τοπικά από σταθμούς ελέγχου κοντά στην αίθουσα ελέγχου του συστήματος ή του κινητήρα.

### **Έλεγχος πρόωσης και δυναμική τοποθέτηση**

Τα συστήματα ελέγχου πρόωσης αποτελούνται συνήθως από

- Σύστημα ελέγχου χειροκίνητου προωθητήρα (MTC), παρέχοντας ξεχωριστό έλεγχο των προωθητήρων και των προπελών.
- Αυτόματη πλεύση ή σύστημα αυτόματου πιλότου πραγματοποιώντας αυτόματη διατήρηση πορείας και αλλαγή πορείας κατά τη διάρκεια των εργασιών διαμετακόμισης, συχνά σε συνδυασμό με την παρακολούθηση λειτουργικότητας.

Και εάν το σκάφος προορίζεται για χρήση σε λειτουργίες διατήρησης σταθμού, είτε

- Σύστημα Δυναμικής Τοποθέτησης (Dynpos) που παρέχει χειροκίνητα ή αυτόματα τοποθέτηση μέσω κατάλληλης δράσης του συστήματος προωθητήρα, είτε

- Σύστημα Πρόσδεσης Θέσης Υποβοηθούμενη από τον Προωθητήρα (Posmoor ATA) που παρέχει χειροκίνητα (Posmoor TA) ή αυτόματα βοήθεια προωθητήρα (Posmoor ATA) για έλεγχο θέσης και πορείας των αγκυροβολημένων πλοίων.

Δεν είναι η πρόθεση αυτού του συστήματος να περιγράψει αυτά τα συστήματα ελέγχου λεπτομερώς, για περαιτέρω μελέτες μπορεί να συνιστάται το Frossen [78].

Θα πρέπει, ωστόσο, να τονιστεί ότι οι λειτουργίες ελέγχου πρόωσης και διατήρησης σταθμού είναι στις περισσότερες περιπτώσεις πολύ κρίσιμες για την ασφάλεια των λειτουργιών του σκάφους. Η ανάγκη για προσεκτική εξέταση του σχεδιασμού τους είναι φανερή, αλλά δεν πρέπει ποτέ κάποιος να υποτιμήσει την ανάγκη για αντιστοίχιση και δοκιμή αυτών των λειτουργιών ελέγχου μαζί με το σύστημα διαχείρισης ισχύος/ενέργειας, και ελεγκτές χαμηλού επιπέδου σε πίνακες διανομής και κινητήρες πρόωσης.

### **3.4.4 Λειτουργικότητα Ελέγχου Χαμηλού Επιπέδου**

Κάποιος μπορεί να διαιρέσει τους ελεγκτές χαμηλού επιπέδου σε λειτουργίες προστασίας και ελέγχου. Οι συσκευές προστασίας πρέπει να παρακολουθούν τις μονάδες για βλάβες και από περιορισμούς υπέρβασης του σχεδιασμού.

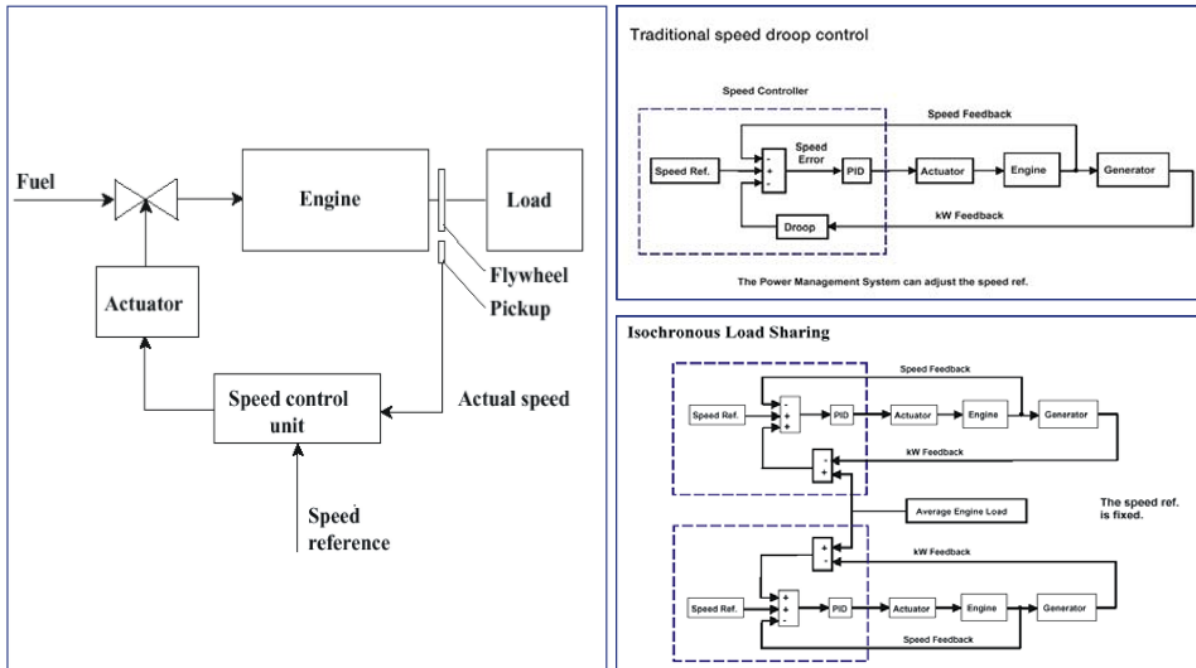
Οι ελεγκτές χαμηλού επιπέδου είναι εξειδικευμένοι ελεγκτές για το σκοπό, συχνά ενσωματωμένοι στον εξοπλισμό.

#### **Προστασία κινητήρα και ρυθμιστής**

Οι συσκευές προστασίας κινητήρα προλαμβάνουν και κλείνουν τον κινητήρα σε υπερβολική ταχύτητα, υπερβολικές θερμοκρασίες, απώλεια λίπανσης, κλπ. Η προστασία του κινητήρα συνήθως παρέχεται ως ένα αναπόσπαστο μέρος του κινητήρα, από τον πωλητή του κινητήρα, ή μερικώς ενσωματωμένη με το σύστημα διαχείρισης σκάφους.

Ο ρυθμιστής ελέγχει την παραγόμενη συχνότητα με εντολή εισόδου καυσίμου στον κύριο κινητήρα, Σχήμα 3.32. Μπορεί να είναι ο λεγόμενος τύπος “πτώση ταχύτητας”, ο οποίος υποδηλώνει ότι η συχνότητα σταθερής κατάστασης θα μειωθεί ανάλογα με το ενεργό φορτίο (kW). Η λειτουργία πτώση ταχύτητας είναι μία απλή και ισχυρή μέθοδος για την από κοινού χρήση φορτίου μεταξύ των παράλληλων συνδεδεμένων γεννητριών. Ωστόσο, οι μεταβολές συχνότητας που εξαρτώνται από το φορτίο ενδέχεται να προκαλέσουν δυσκολίες στο συγχρονισμό των γεννητριών ή των διαφόρων τμημάτων διαύλου. Η διακύμανση συχνότητας μπορεί επίσης να είναι ανεπιθύμητη από τη λειτουργία των φορτίων. Ο ισοχρονικός ρυθμιστής περιέχει ένα ρυθμιστή με ένα ενσωματωμένο αποτέλεσμα και διατηρεί τη

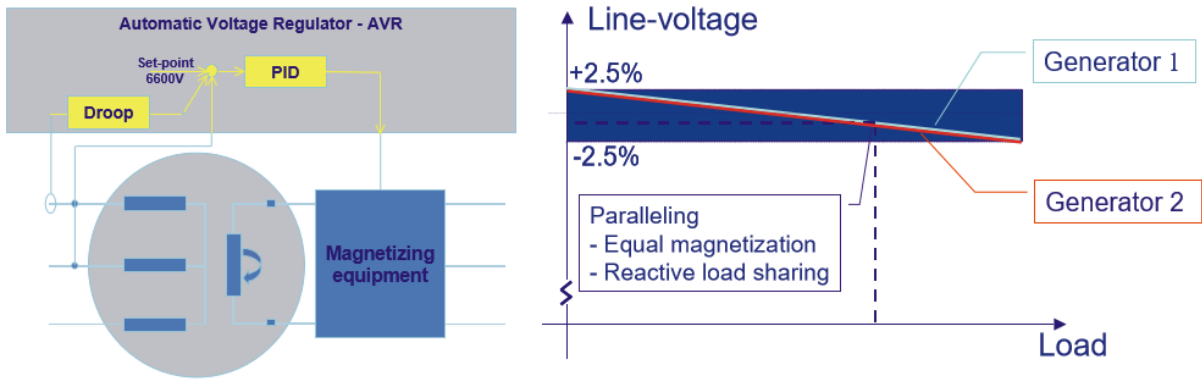
συχνότητα ίση με το καθορισμένο σημείο. Ένα σήμα, είτε καλωδιωμένο είτε μέσω υψηλής ταχύτητας επικοινωνίας διαύλου, ανάμεσα στους ρυθμιστές, εξασφαλίζει μια σωστή κατανομή φορτίου μεταξύ των κύριων κινητήρων. Οι περισσότεροι ρυθμιστές που εφαρμόζονται σε μονάδες ηλεκτρικής προώθησης διαθέτουν και τους δύο τρόπους ελέγχου.



Σχήμα 3.32: Κυβερνήτης για μία μηχανή ντίζελ, σχηματικές παραστάσεις της πτώσης ταχύτητας και των ισοχρονικών τρόπων ελέγχου.

### Αυτόματος ρυθμιστής τάσης

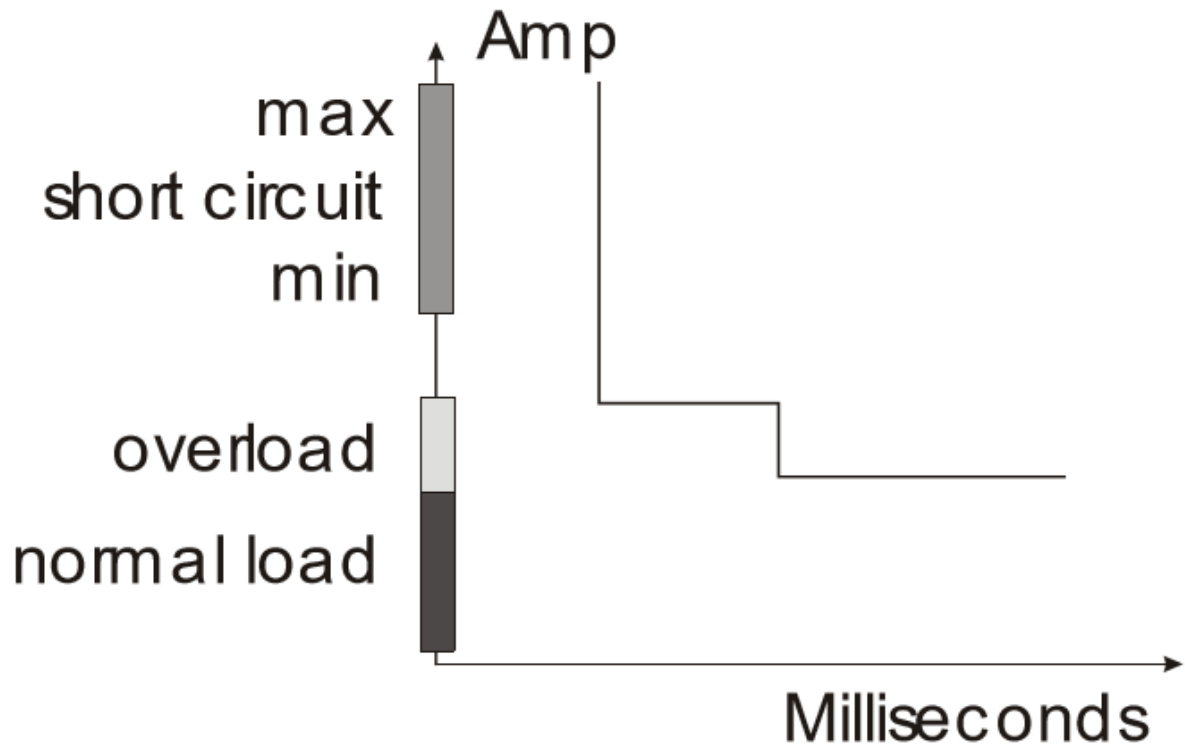
Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης, AVR (βλέπε Σχήμα 3.33), ελέγχει την τάση ελέγχοντας το μαγνητικό ρεύμα στο πεδίο περιέλιξης της γεννήτριας. Ως ρυθμιστής, ο ρυθμιστής τάσης μπορεί να ελεγχθεί σε κατάσταση πτώσης, που σημαίνει ότι η τάση ποικίλλει μερικά ποσοστά ( $\pm 2.5\%$ ) με το φορτίο. Αυτό δίνει μια ισχυρή και απλή κατανομή του αντιδραστικού φορτίου (kVAr), που είναι μία προϋπόθεση για ίση φόρτιση των γεννητριών, και οι μεταβολές τάσης δεν επηρεάζουν κανονικά το συγχρονισμό και τη λειτουργικότητα. Σε ορισμένες εφαρμογές, όπου οι μεταβολές τάσης δεν είναι αποδεκτές, ένας ελεγκτής ενσωμάτωσης θα ρυθμίσει το καθορισμένο σημείο τάσης για να διατηρήσει την τάση απόδοσης σταθερή, αλλά συνήθως προτιμάται ο έλεγχος λειτουργίας πτώσης.



Σχήμα 3.33: Προκειμένου να επιτευχθεί κατανομή φορτίου αντίδρασης.

### Ρελέ προστασίας

Η προστασία γεννήτριας αποτρέπει και αποσυνδέει τη γεννήτρια από τον πίνακα διανομής σε υπερβολικά ρεύματα στην περιέλιξη, βραχυκυκλώματα, βλάβες γείωσης, ελαττωματικό συγχρονισμό, κλπ (βλέπε Σχήμα 3.34). Το ρελέ προστασίας γεννήτριας είναι κανονικά ένα αναπόσπαστο μέρος ενός πίνακα ελέγχου της γεννήτριας στον πίνακα διανομής. Ομοίως, όλα τα τμήματα και τα καλώδια του συστήματος ισχύος και των καταναλωτών προστατεύονται για να αποφευχθεί η υπερ-φόρτωση και να μειωθούν οι συνέπειες μιας βλάβης.



Σχήμα 3.34: Απλοποιημένο διάγραμμα ρύθμισης για ένα ρελέ βραχυκυκλώματος/υπερφόρτωσης, που δείχνει τις ρυθμίσεις πλάτους και χρόνου.



Τυπικά, οι λειτουργίες προστασίας για έναν τροφοδότη, π.χ. ένας κινητήρας θα περιέχει λειτουργίες για αποτροπή υπερφόρτωσης, για απομόνωση ή συναγερμό σε γείωση και απομόνωση σε βραχυκύκλωμα. Για προστασία από βραχυκύκλωμα και υπερφόρτωση, η προστασία πρέπει να ρυθμίζεται για τις μέγιστες βαθμολογίες σφάλματος του εξοπλισμού, καθώς επίσης και να προσαρμόζεται στα ρελέ προστασίας περισσότερο πάνω ή κάτω στο σύστημα, για να διασφαλίζει την επιλεκτικότητα που απαιτείται από την κοινωνία της τάξης.

## **Ελεγκτής πρόωσης**

Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, η προώθηση ελέγχεται συνήθως με ταχύτητα. Ο ελεγκτής πρόωσης θα διατηρήσει στη συνέχεια την ταχύτητα αναφοράς όσο το δυνατόν περισσότερο εντός των ορίων ταχύτητας και ροπής, και δυναμικής ικανότητας.

Ο ελεγκτής προώθησης θα έρχεται κανονικά σε επαφή με τον προωθητή/σύστημα προώθησης, το σύστημα παραγωγής και διανομής ισχύος και/ή το σύστημα διαχείρισης ισχύος, και τα συστήματα ελέγχου γέφυρας συμπεριλαμβανομένου του χειριστηρίου ελέγχου, των συστημάτων αυτόματης πλοήγησης, της δυναμικής τοποθέτησης, κλπ.

Εφόσον η ισχύς πρόωσης αποτελεί κανονικά το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού φορτίου για τη μονάδα ισχύος, είναι επίσης σημαντικό ότι οι λειτουργίες μείωσης του φορτίου και οι λειτουργίες πρόληψης διακοπής συντονίζονται σε μεγάλο βαθμό με το σχεδιασμό της μονάδας ισχύος και με τη λειτουργία διαχείρισης ενέργειας. Με βάση τη γενική φιλοσοφία πρόληψης της διακοπής, και την ιεράρχηση των διαφόρων καταναλωτών, μπορεί να γίνει ένα πλήρες πρόγραμμα συντονισμού όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.31. Επειδή ο χρόνος απόκρισης είναι κρίσιμος για την πρόληψη διακοπής, ο συγχρονισμός μείωσης φορτίου είναι απαραίτητος. Τυπικά, ο ελεγκτής προώθησης θα περιέχει τρία επίπεδα μείωσης φορτίου στη φιλοσοφία πρόληψης της διακοπής:

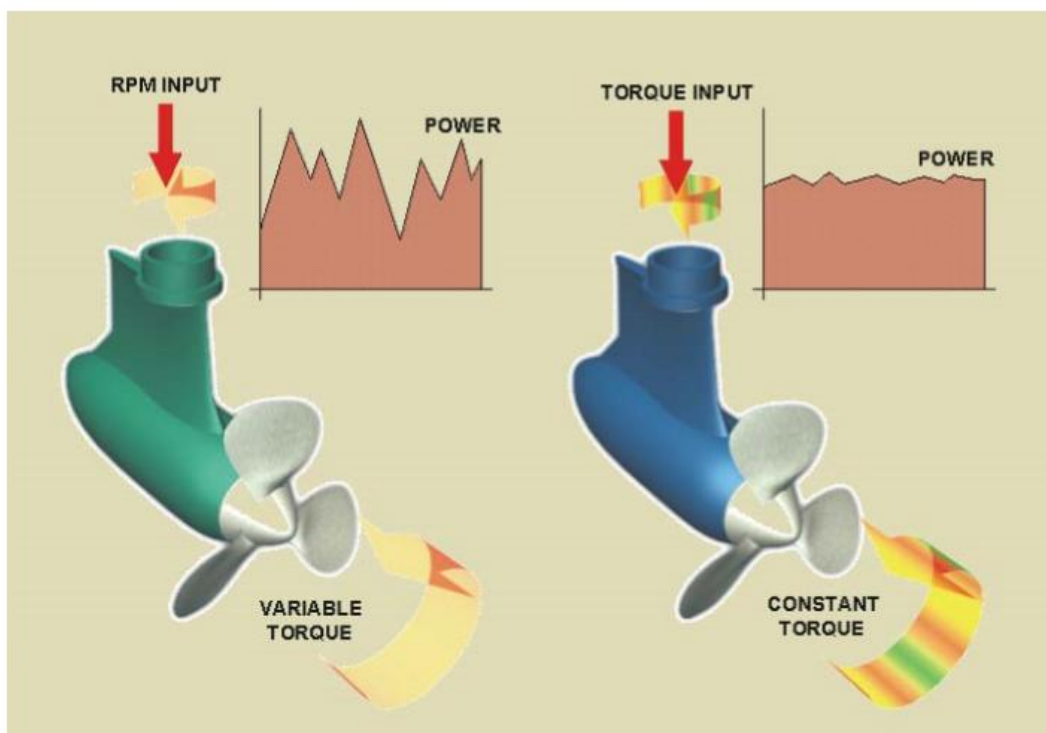
- Ο μέγιστος περιορισμός φορτίου από τον υπολογισμό της διαθέσιμης ισχύος λαμβάνεται κανονικά από το σύστημα διαχείρισης ισχύος. Αυτό δίνει το μέγιστο φορτίο kW για τη μονάδα κινητήρα, ανάλογα με την κατανομή ισχύος και την προτεραιότητα που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό του συστήματος διαχείρισης ισχύος.
- Μία γρήγορη ενέργεια, που προκαλείται από συμβάν μείωσης φορτίου, συνήθως ένα ψηφιακό σήμα πιέζοντας τη μονάδα ισχύος του κινητήρα να μειωθεί σε

προκαθορισμένο λόγο μείωσης, ή απόλυτη τιμή. Το σήμα μπορεί να προέρχεται από το σύστημα διαχείρισης ισχύος.

- Μία γρήγορη ενέργεια, η οποία προκαλείται από τη συχνότητα μείωσης του φορτίου εξαρτώμενη μόνο από τη μέτρηση της τοπικής συχνότητας στην τροφοδοσία της γραμμής της μονάδας. Κανονικά θεωρείται ως μια τελευταία προστασία κατά του ταξιδιού χαμηλής συχνότητας εξαιτίας της υπερφόρτωσης της γεννήτριας στη φιλοσοφία πρόληψης διακοπής.

Οι λειτουργίες ασφάλειας και παρακολούθησης της προώθησης που σχετίζονται με τον εξοπλισμό και τα βοηθητικά μέσα απαιτούνται σε κάποιο βαθμό από την κοινωνία ταξινόμησης. Εξαρτώμενες από το συνολικό σχεδιασμό του συστήματος, οι λειτουργίες παρακολούθησης και τερματισμού λειτουργίας μπορούν να συμπεριληφθούν ως μέρος του συστήματος ελέγχου πρόωσης, ή στο ενσωματωμένο σύστημα αυτοματισμού, ή σε συνδυασμό.

Έχει αποδειχθεί ότι η χρήση ελέγχου ροπής για πρόωση και προωθητήρες (Lauvdal et al. [162]) θα έχει μία επίδραση σταθεροποίησης στην επίδοση και στις διαταραχές δικτύου στις συνθήκες πλεύσης και διατήρησης σταθμού. Το Σχήμα 3.35 δείχνει πώς η ισχύς που αντλείται από το δίκτυο θα σταθεροποιηθεί με μία προσέγγιση ελέγχου ροπής σε σχέση με τον έλεγχο της ταχύτητας, μειώνοντας τις επιπτώσεις από το ρεύμα στη θάλασσα και την επίδραση του κύματος στα χαρακτηριστικά ωθήσεως της προπέλας.



Σχήμα 3.35: Η ροπή, ή ο έλεγχος ισχύος των προωθητήρων και της κύριας προώθησης, όχι μόνο βελτιώνει τη δυναμική απόδοση των λειτουργιών ελέγχου θέσης ή πλευσης, αλλά επίσης σταθεροποιεί την ισχύ που λαμβάνεται από το δίκτυο, και μειώνει τις διαταραχές ισχύος σε σχέση με τον καθαρό έλεγχο ταχύτητας και ακόμα περισσότερο σε σύγκριση με το βήμα ελέγχου.

## **3.5 Ηλεκτρικοί Κινητήρες Προώθησης**

### **3.5.1 Εισαγωγή**

Οι μονάδες μεταβλητής ταχύτητας έχουν μπει σε βιομηχανική χρήση εδώ και πολλές δεκαετίες, αλλά πρώτα στο τέλος της δεκαετίας του 1960 με τη χρήση ημιαγωγών ισχύος. Στην αρχή, κινητήρες DC όπου η πιο εφικτή εναλλακτική για έλεγχο προώθησης, αλλά κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, μονάδες κινητήρα AC έγιναν βιομηχανικά διαθέσιμες, και εμπορικά ανταγωνιστικές. Από τότε λοιπόν, σχεδόν όλες οι νέες παραδόσεις της ηλεκτρικής πρόωσης βασίζονται σε μία από τις τοπολογίες κίνησης AC.

### **3.5.2 Κινητήρες Κίνησης Μεταβλητής Ταχύτητας**

Οι πιο κοινά χρησιμοποιούμενοι μετατροπείς για κινητήρες κίνησης είναι με την ακόλουθη σειρά:

- Αντιστροφείας πηγής τάσης (VSI) τύπος μετατροπέων για AC κινητήρες, κανονικά ασύγχρονοι κινητήρες
- Κυκλομετατροπείς (Cyclo) για AC κινητήρες, κανονικά για σύγχρονους κινητήρες
- Αντιστροφείας πηγής ρεύματος τύπος (CSI) μετατροπέων για AC κινητήρες, κανονικά σύγχρονοι κινητήρες
- Μετατροπείς DC, ή SCR (Ελεγχόμενος Διορθωτής Σιλικόνης) για DC κινητήρες

Το θέμα θα προσεγγιστεί με αντίθετη σειρά, λόγω του ότι ο μετατροπέας DC είναι ο πιο απλός και ο πιο εύκολος να κατανοηθεί, ενώ οι άλλοι έχουν μια πιο σύνθετη διαμόρφωση, αλλά βασίζονται σε μεγάλο μέρος από τα ίδια δομικά στοιχεία όπως ο μετατροπέας DC.

### Διορθωτές θυρίστορ πλήρους γέφυρας για DC κινητήρες κίνησης (SCR)

Ο πιο κοινά χρησιμοποιούμενος DC κινητήρας είναι ο κινητήρας διακλάδωση, ο οποίος παρέχει χωριστά το πεδίο περιέλιξης και την περιέλιξη οπλισμού (ρότορας). Το ρεύμα οπλισμού μεταφέρεται από τους σταθερούς τερματικούς στο ρότορα με τη χρήση βουρτσών συνδεδεμένων στον περιστρεφόμενο μετατροπέα. Στην πράξη, το ρεύμα οπλισμού ρέει επίσης μέσω ορισμένων πρόσθετων σταθερών περιελίξεων, οι οποίες βοηθούν την επικοινωνία του ρεύματος μεταξύ των τμημάτων του μετατροπέα, αλλά αυτή η επίδραση δεν εξετάζεται εδώ.

Σε έναν κινητήρα διακλάδωσης (DC), η επαγόμενη τάση οπλισμού είναι ανάλογη με το μαγνητικό πεδίο και την ταχύτητα περιστροφής. Το μαγνητικό πεδίο είναι μία λειτουργία του ρεύματος πεδίου, και εξαιτίας των επιδράσεων κορεσμού, δεν είναι στην πράξη αναλογικοί. Ωστόσο, εάν παραμελείται ο κορεσμός, η τάση οπλισμού είναι:

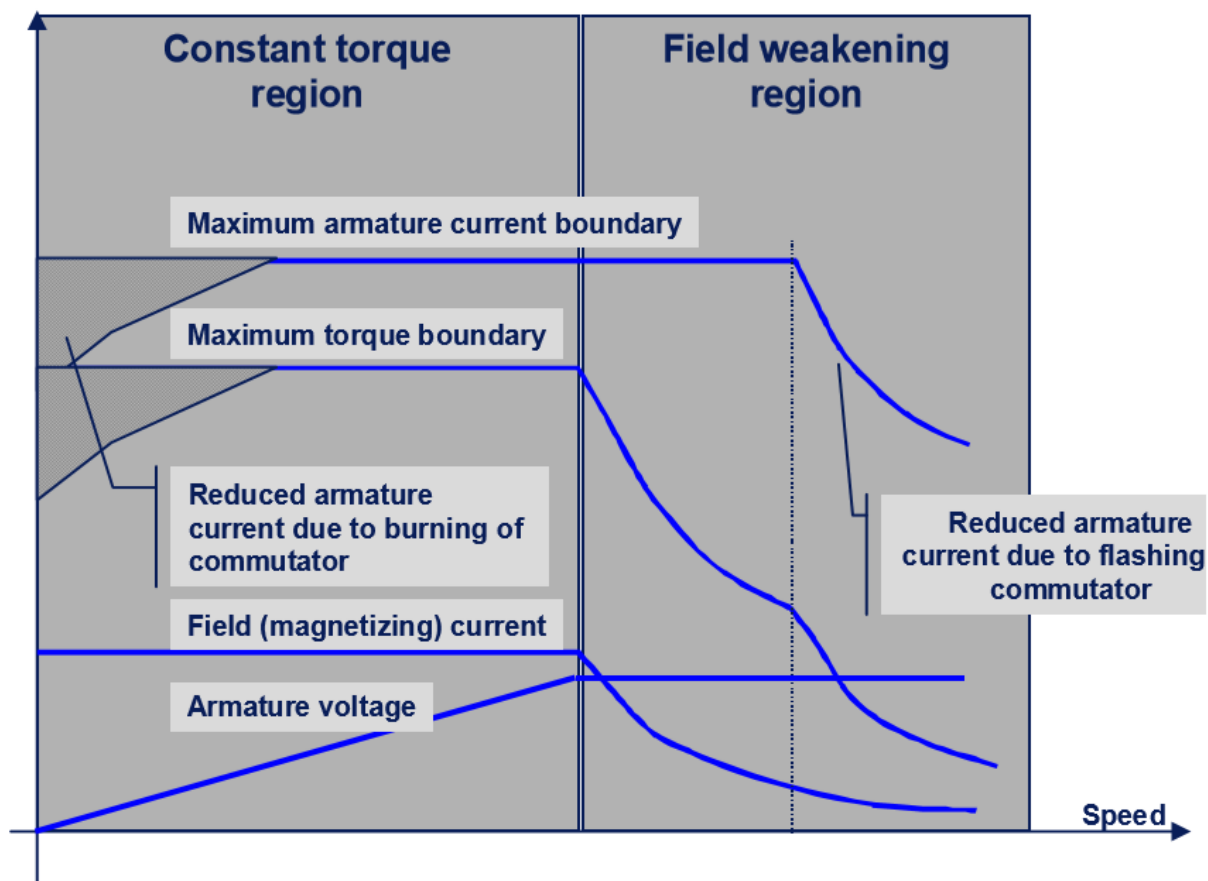
$$V_a = k\Phi(I_f)n \approx kK_\Phi I_f n = K_V I_f n, \quad (3.8)$$

όπου  $K_V$  είναι η επαγόμενη σταθερή τάση,  $I_f$  το ρεύμα μαγνητισμού (πεδίου),  $n$  η περιστρεφόμενη ταχύτητα,  $K_\Phi$  και  $K$  αναλογικές σταθερές και  $\Phi$  είναι η ροή του κινητήρα. Η αναπτυσσόμενη ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος οπλισμού και του μαγνητικού πεδίου

$$T = kI_a\Phi(I_f) \approx kI_aK_\Phi I_f = K_T I_a I_f, \quad (3.9)$$

όπου  $K_T$  είναι η σταθερή ροπή και  $I_a$  το ρεύμα οπλισμού.

Εφόσον ο κινητήρας DC πρέπει να τροφοδοτείται από μία DC πηγή με περιορισμένα ρεύματα τάσης, πεδίου και οπλισμού, το χαρακτηριστικό όριο των λειτουργιών θα είναι όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.36.

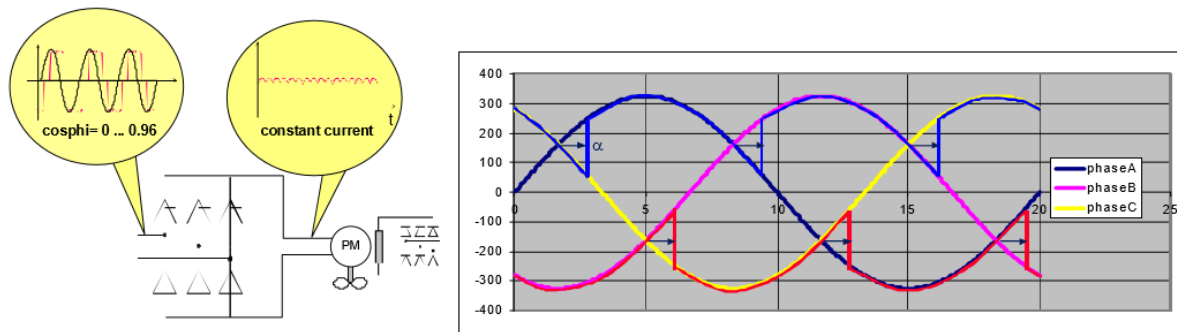


Σχήμα 3.36: Χαρακτηριστικά μέγιστων ορίων λειτουργίας για έναν παραμερισμένο κινητήρα DC.

Η λειτουργία διαιρείται σε μια περιοχή σταθερής ροπής, που χαρακτηρίζεται από ένα σταθερό ρεύμα πεδίου, και μία περιοχή πεδίου αποδυνάμωσης όπου το ρεύμα πεδίου μειώνεται για να διατηρήσει το μέγιστο επίπεδο τάσης οπλισμού καθώς αυξάνεται η ταχύτητα. Ως εκ τούτου, το μέγιστο όριο ροπής είναι καταρχήν σταθερό στην περιοχή σταθερής ροπής, και αντίστροφα ανάλογο με την ταχύτητα στην περιοχή αποδυνάμωσης του πεδίου.

Ωστόσο, στην περιοχή χαμηλότερης ταχύτητας, το ρεύμα οπλισμού πρέπει κανονικά να περιορίζεται για να αποφευχθεί η καύση του μετατροπέα, και στην περιοχή με υψηλότερη ταχύτητα, πρέπει να μειωθεί για να αποφευχθεί η αναλαμπή μεταξύ των τμημάτων του μετατροπέα. Αυτοί οι περιορισμοί υποδεικνύονται στο διάγραμμα.

Στις πιο συνηθισμένες εφαρμογές υψηλής ισχύος, ένας διορθωτής θυρίστορ πλήρους γέφυρας (Σχήμα 3.37) τροφοδοτεί τον κινητήρα DC με ένα ελεγχόμενο ρεύμα οπλισμού (περιέλιξη ρότορα).



Σχήμα 3.37: (Αριστερά) Θυρίστορ πλήρους γέφυρας κίνησης DC. (Δεξιά) Η τάση DC στον κινητήρα ελέγχεται από καθυστερημένη μετάδοση των θυρίστορ με τη γωνία δέσμης  $\alpha$  ( $\alpha=30^\circ$ ). Η μέση τάση του κινητήρα είναι  $V_{dc}=1.35V_{ll}\cos\alpha$ .

Ομοίως, η εκκαθάριση πεδίου είναι ενθουσιασμένη με ένα ρυθμιζόμενο ρεύμα πεδίου. Η ροπή ελέγχεται με ακρίβεια και με χαμηλό κυματισμό εάν η επαγωγή οπλισμού είναι υψηλή, αλλά αυτό, από την άλλη πλευρά, μειώνει τη δυναμική απόδοση, καθώς η χρονική σταθερά οπλισμού αυξάνεται. Σε αυτή την τοπολογία, η τάση DC στις περιελίξεις οπλισμού του κινητήρα ελέγχεται με τη μετατόπιση φάσης του μεσοδιαστήματος αγωγιμότητας των θυρίστορ με τη γωνία  $\alpha$  πυροδότησης της πύλης. Η γωνία πυροδότησης της πύλης μπορεί καταρχήν να ελέγχεται από 0 έως 180 μοίρες και η τάση στις περιελίξεις οπλισμού μπορεί, συνεπώς, να ρυθμιστεί από +1.35 έως -1.35 φορές την τάση γραμμής. Στην πράξη, όμως, η γωνία πυροδότησης της πύλης δε θα είναι μικρότερη από 15 μοίρες προκειμένου να εξασφαλισθεί η δυνατότητα ελέγχου του κινητήρα κίνησης επίσης με πτώσεις τάσης στο δίκτυο, και περιορισμένη στις 150 μοίρες ώστε να έχει το λεγόμενο περιθώριο ανταλλαγής.

Εφόσον το ρεύμα οπλισμού ελέγχεται με τη χρήση της γωνίας πυροδότησης των συσκευών θυρίστορ, τα ρεύματα AC θα μετατοπιστούν σταδιακά σε σχέση με τη θεμελιώδη τάση. Η γωνία φάσης του ρεύματος είναι σχεδόν ίση με τη γωνία πυροδότησης πύλης. Δεδομένου ότι η τάση οπλισμού είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής, βλέπουμε ότι η γωνία φάσης, η οποία είναι περίπου ίση με τη γωνία πυροδότησης πύλης, θα είναι επίσης περίπου ανάλογη προς την τάση και επομένως με την ταχύτητα περιστροφής. Σε έναν κινητήρα κίνησης DC, όπου η ταχύτητα κυμαίνεται από 0 έως 100%, ο συντελεστής ισχύος επομένως θα ποικίλλει επίσης από 0 έως 0.96 ( $\alpha=15$  μοίρες). Ένας χαμηλός συντελεστής ισχύος αυξάνει τις απώλειες στο σύστημα παραγωγής και διανομής και περισσότερες γεννήτριες μπορεί να πρέπει να τρέξουν παρά την ενεργή ισχύ του φορτίου που προφανώς θα απαιτούσε.

Η φθορά στις βούρτσες και στο μετατροπέα αποτελεί μία πηγή βλάβης και συντήρησης και επίσης περιορίζει την απόδοση ροπής ακινησίας. Όταν υπολογίζουν για αυτό και επίσης για το γεγονός ότι το πρακτικό όριο για τους κινητήρες κίνησης DC είναι 2-3 MW, η εφαρμογή των μονάδων προωθητήρα DC είναι περιορισμένη, με την εξαίρεση των μετατροπών, στις οποίες χρησιμοποιούνται ξανά υπάρχουσες εγκαταστάσεις.

### **Μετατροπείς πηγής ρεύματος**

Ένας σύνδεσμος ρεύματος DC που τροφοδοτείται από ένα διορθωτή ελεγχόμενου θυρίστορ και εξομαλύνεται από έναν επαγωγέα, που χαρακτηρίζει τον αντιστροφέα πηγής ρεύματος (CSI), περιστασιακά αναφέρεται ως ένας μετατροπέας φορτίου (LCI) ή Synchro. Αυτός ο μετατροπέας χρησιμοποιείται συνήθως μαζί με ένα σύγχρονο κινητήρα, αλλά μπορεί επίσης, με μερικές τροποποιήσεις, να χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση ενός ασύγχρονου κινητήρα. Η παραλλαγή ασύγχρονου κινητήρα ήταν πιο περιορισμένη στο παρελθόν, αλλά σπάνια παρατηρείται σε νέες εγκαταστάσεις.

Ο σύγχρονος κινητήρας είναι παρόμοιος με τη σύγχρονη γεννήτρια, με περιελίξεις περιστρεφόμενου πεδίου (μαγνήτιση) και περιελίξεις τριφασικού ή εξαφασικού στάτορα. Οι περιελίξεις εξαφασικού στάτορα πρέπει να τροφοδοτούνται από ένα διπλό CSI αντιστροφέα και χρησιμοποιείται για τη μείωση των αρμονικών ροπών στον άξονα.

Από την πλευρά του δικτύου, ο αντιστροφέας πηγής ρεύματος είναι πανομοιότυπος με έναν μετατροπέα θυρίστορ πλήρους γέφυρας που χρησιμοποιείται για DC κινητήρες κίνησης, και τα χαρακτηριστικά προς το δίκτυο μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι τα ίδια. Η πλευρά του αντιστροφέα, η οποία τροφοδοτεί τον κινητήρα, έχει την ίδια τοπολογία με τον διορθωτή, και χρησιμοποιεί τις επαγόμενες τάσεις από τον κινητήρα αντί της τάσης του δικτύου.

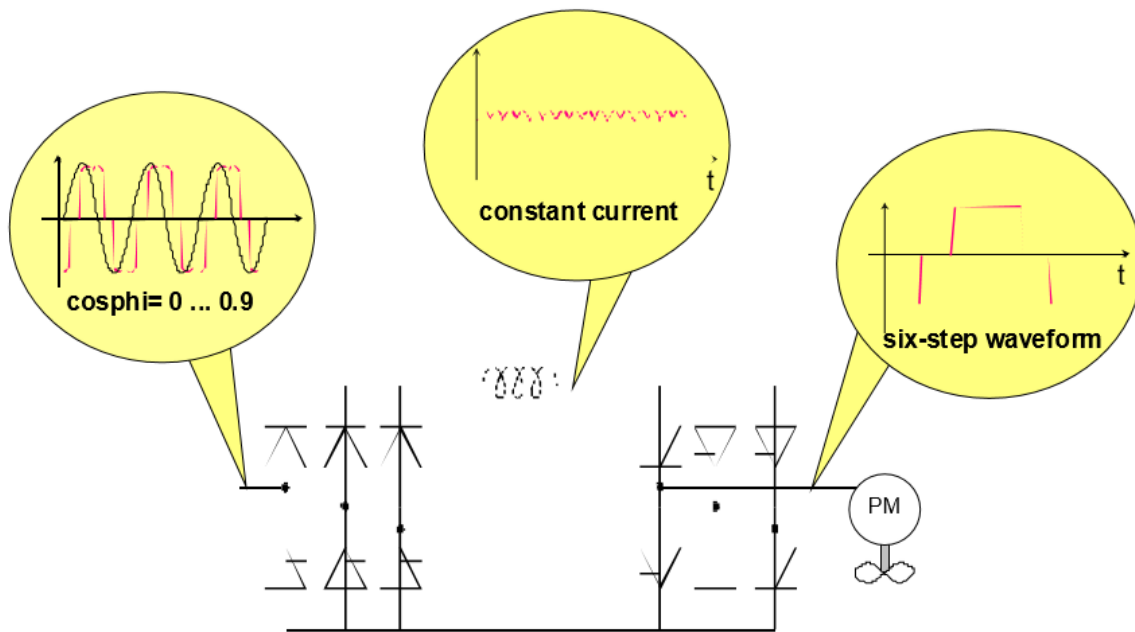
Ο διορθωτής θυρίστορ καταλήγει σε ένα μεταβλητό συντελεστή ισχύος εξαρτώμενο από την ταχύτητα, ο οποίος είναι υψηλός (0.9) στις ονομαστικές στροφές του κινητήρα, και μειώνεται προς το μηδέν για χαμηλές ταχύτητες. Το ρεύμα τροφοδοσίας περιέχει αρμονικές που πρέπει να θεωρούνται κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του συστήματος και θα πρέπει κανονικά να μειώνονται με τη χρήση μιας διαμόρφωσης 12 παλμών 6 φάσεων.

Ο DC σύνδεσμος ρεύματος κατευθύνεται μέσω των φάσεων του κινητήρα ελέγχοντας τους θυρίστορες του σταδίου μετατροπέα. Λαμβάνεται ένα ρεύμα με μορφή κύματος 6 βημάτων με αποτέλεσμα τις αρμονικές του κινητήρα και τους κυματισμούς ροπής. Το CSI απαιτεί μία συγκεκριμένη αντισταθμισμένη τάση (EMF) από τον κινητήρα για να πραγματοποιήσει μεταγωγή. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται κυρίως σε σύγχρονους κινητήρες κίνησης, στους οποίους ο κινητήρας μπορεί να λειτουργεί με χωρητικό συντελεστή ισχύος.

Σε χαμηλότερες ταχύτητες, συνήθως κάτω από 5-10% της ονομαστικής ταχύτητας, το EMF είναι πολύ χαμηλό για να πραγματοποιήσει μια φυσική εναλλαγή. Σε αυτό το εύρος ταχύτητας, το CSI εκτελείται σε παλμική λειτουργία, κατά την οποία το ρεύμα ελέγχεται σε μηδενικό επίπεδο κατά τη διάρκεια μεταγωγής του σταδίου εξόδου του μετατροπέα. Εφόσον το ρεύμα, και ως εκ τούτου η ροπή οδηγούνται σε μηδενικό επίπεδο, ο παλμός ροπής στον άξονα του κινητήρα είναι μεγάλος σε αυτήν την περιοχή λειτουργίας. Ο κυματισμός ροπής και, ως εκ τούτου, οι δονήσεις του άξονα θα πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά στο σχεδιασμό του συστήματος πρόωσης για τη μείωση δονήσεων και ακουστικού θορύβου. Αυτά μπορεί να έχουν αρνητική συνέπεια σε προσανατολισμένους προωθητήρες που λειτουργούν σε DP λειτουργία.

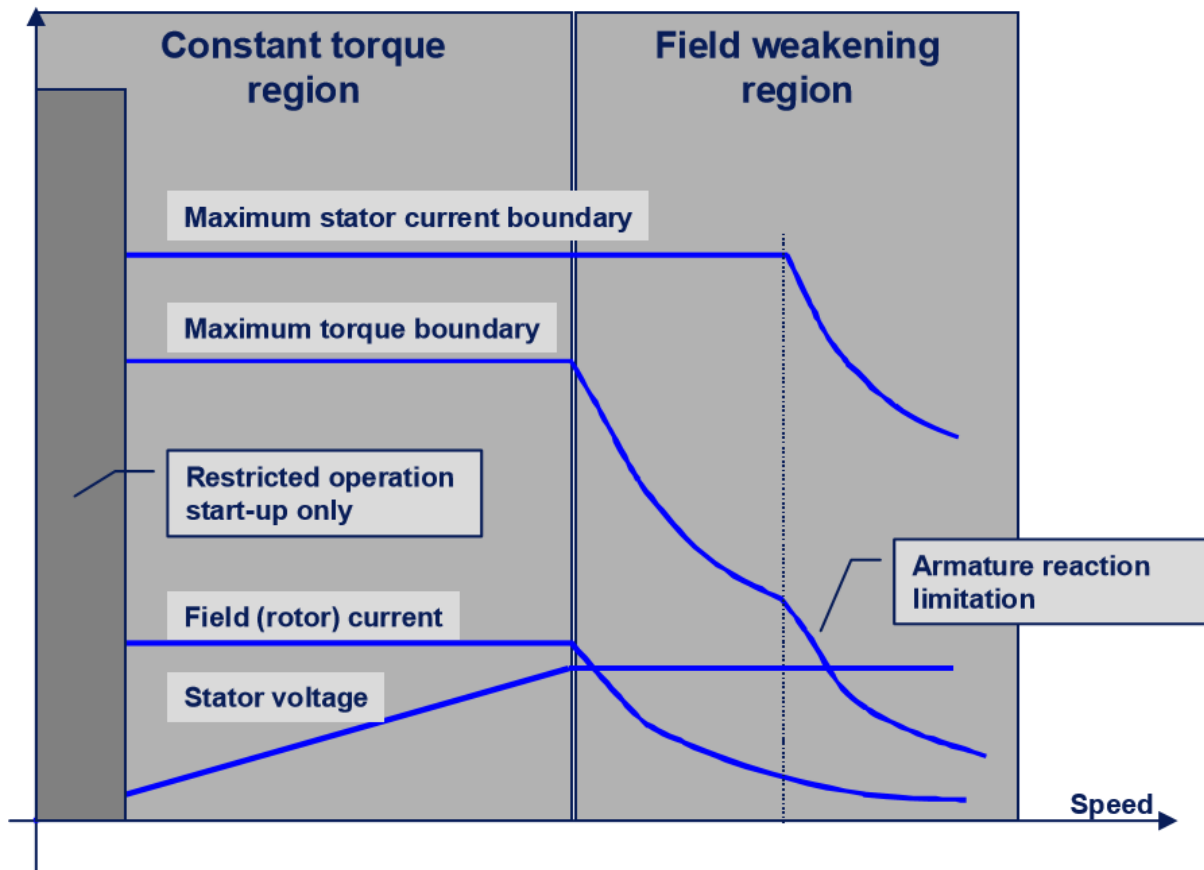
Τα χαρακτηριστικά σύνορα λειτουργίας φαίνονται στο Σχήμα 3.39 για την τροπολογία στο Σχήμα 3.38.

Το CSI χρησιμοποιείται σε μεγάλους σύγχρονους κινητήρες κίνησης· το μεγαλύτερο που παρέχεται είναι περίπου 100MW.



Σχήμα 3.38: Κινητήρας CSI (LCI)





Σχήμα 3.39: Χαρακτηριστικά ορίων λειτουργίας για ένα μετατροπέα CSI (LCI) που τροφοδοτεί σύγχρονο κινητήρα.

### Κυκλομετατροπείς

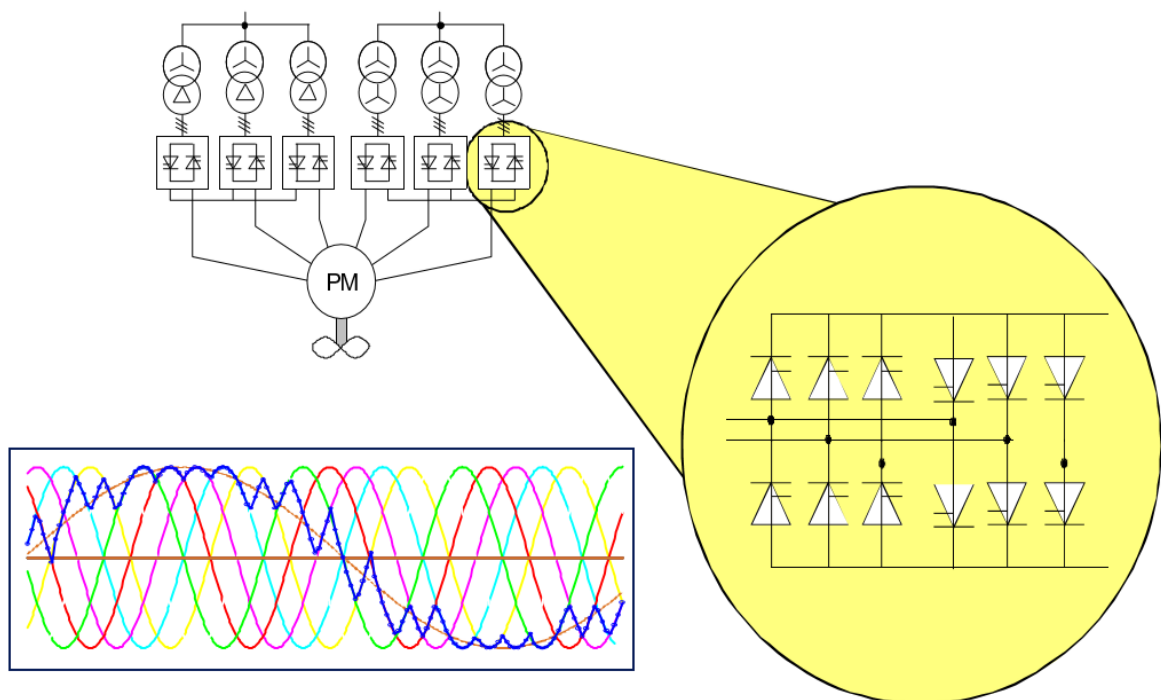
Ο κυκλομετατροπέας (Cyclo) είναι ένας άμεσος μετατροπέας χωρίς σύνδεση DC (βλέπε Σχήμα 3.40). Η τάση του κινητήρα AC κατασκευάζεται επιλέγοντας τμήματα φάσης της τάσης τροφοδοσίας ελέγχοντας την αντι-παράλληλη γέφυρα θυρίστορ. Διαμορφώνεται μία διάταξη 12 παλμών με μειωμένη αρμονική γραμμή, αλλά το κύκλωμα μπορεί επίσης να τροφοδοτηθεί σε διάταξη 6 παλμών. Σε διαμόρφωση 6 παλμών, οι μετασχηματιστές τροφοδοσίας μπορούν να αντικατασταθούν με αντιδραστήρες όταν η τάση τροφοδοσίας ταιριάζει με την τάση του αντιστροφέα.

Η τάση του κινητήρα ελέγχεται μέχρι το ένα τρίτο περίπου της συχνότητας τροφοδοσίας (περίπου 20Hz)· έτσι είναι πιο εφαρμόσιμο στους άμεσους μηχανισμούς κίνησης χωρίς άξονα. Έχει χρησιμοποιηθεί για κύρια συστήματα προώθησης, συμπεριλαμβανομένου της υποκινούμενης πρόωσης.

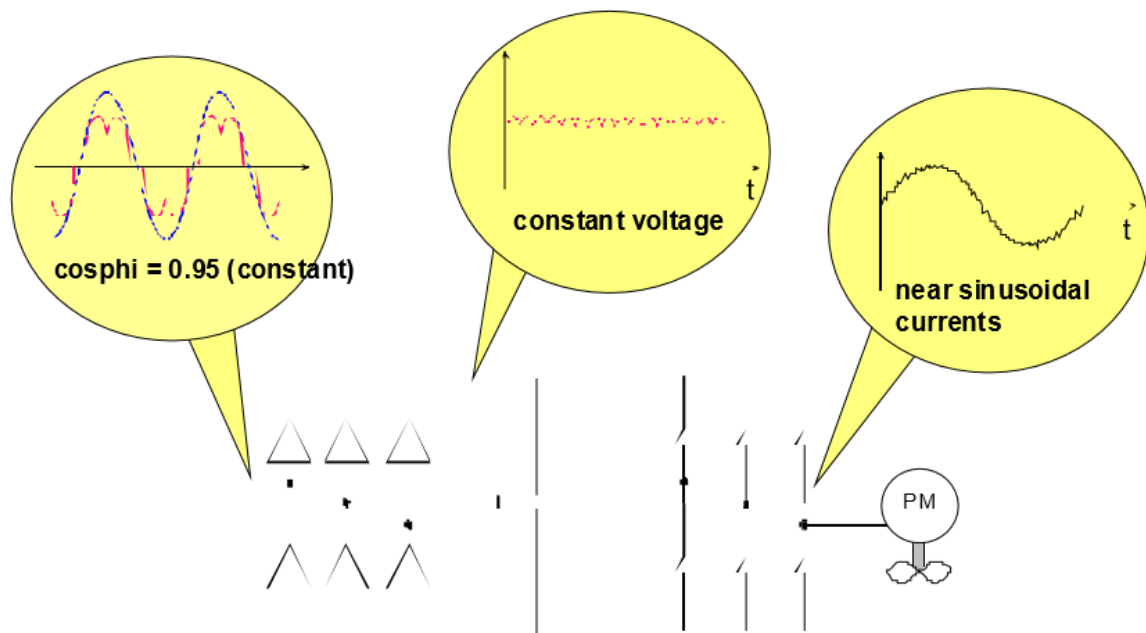
Η τάση του κινητήρα περιέχει ένα χαμηλότερο επίπεδο αρμονικών από το CSI, και ο συντελεστής ισχύος του κινητήρα μπορεί να διατηρηθεί υψηλός (ενότητα σε σύγχρονες κινητήριες μονάδες).

Ο συντελεστής ισχύος παροχής είναι εξαρτώμενος από την τάση του κινητήρα και είναι περίπου 0.76 στην περιοχή αποδυνάμωσης πεδίου. Το περιεχόμενο των αρμονικών γραμμών εξαρτάται από την ταχύτητα και πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά σε σχεδιασμό του συστήματος όταν ο κινητήρας είναι μεγάλος σε σύγκριση με την εγκατεστημένη ισχύ.

Τα όρια λειτουργίας είναι παρόμοια με εκείνα που βρίσκονται στον τύπο CSI των σύγχρονων κινητήριων μονάδων, εκτός από το ότι δεν υπάρχουν περιορισμοί χαμηλής ταχύτητας, εφόσον η μεταγωγή λαμβάνει χώρα προς τις τάσεις του δικτύου και όχι για τις τάσεις του κινητήρα. Ο κυκλικός μετατροπέας, ως εκ τούτου, έχει προτιμηθεί σε εφαρμογές όπου η λειτουργία και η απόδοση σε χαμηλή ταχύτητα είναι απαραίτητη, ιδιαίτερα σε παγοθραυστικά συστήματα ή συστήματα πάγου, αλλά επίσης και σε εφαρμογές DP και επιβατηγού πλοίου, όπου η επίδοση χαμηλής ταχύτητας/ελιγμού είναι απαραίτητη. Το Cyclo είναι διαθέσιμο σε εύρος ισχύος των 2-30MW ανά κινητήρα κίνησης.



Σχήμα 3.40: Κινητήρας κυκλομετατροπέα με κυματομορφές εισόδου και θεμελιώδους εξόδου. Η τάση εξόδου κατασκευάζεται επιλέγοντας τμήματα φάσης της τάσης παροχής.



Σχήμα 3.41: Κινητήρας PWM δύο επιπέδων.

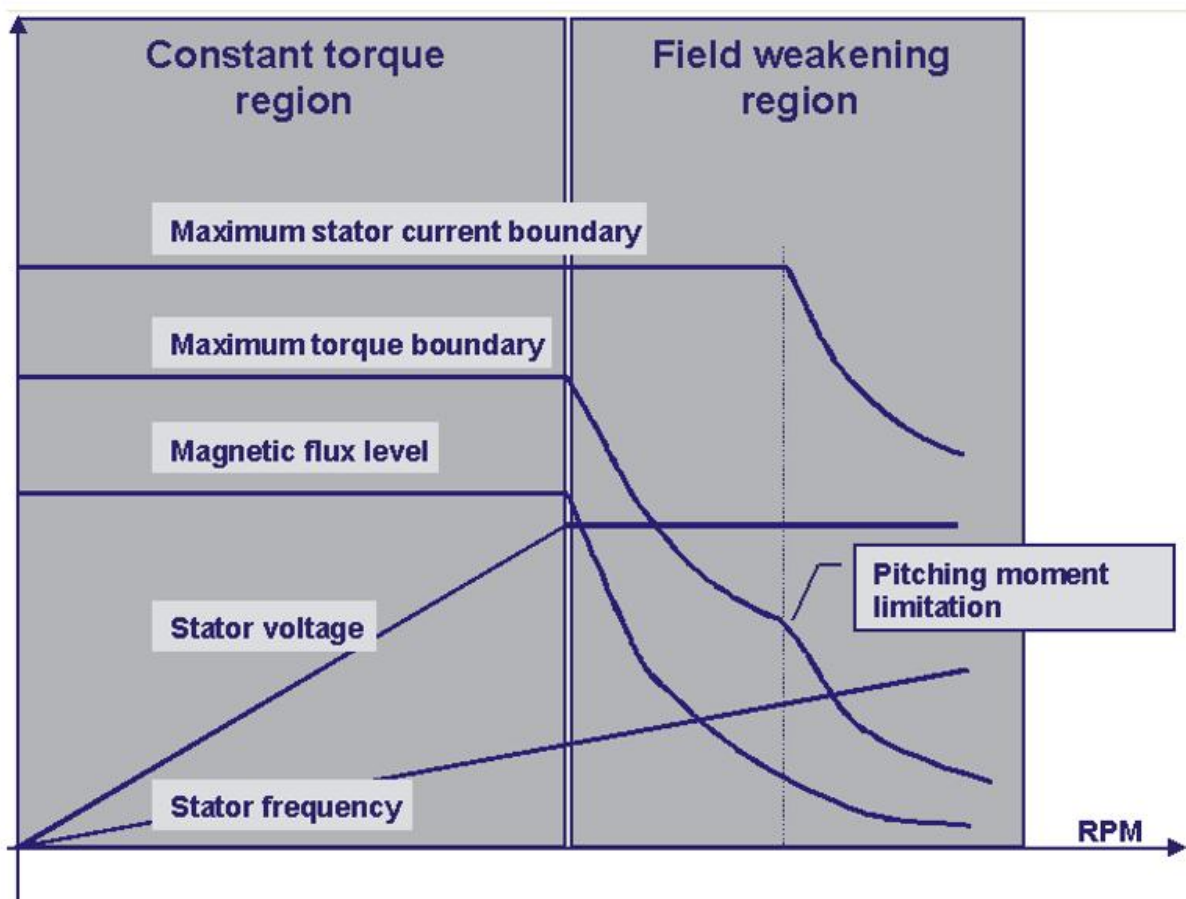
### Αντιστροφείς πηγής τάσης

Ο μετατροπέας VSI (Αντιστροφέας Πηγής Τάσης) είναι με διαφορά ο πιο χρησιμοποιούμενος μετατροπέας συχνότητας σε βιομηχανικές εφαρμογές. Παρέχει τον πιο ευέλικτο, ακριβή και υψηλής απόδοσης οδηγό, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με έναν ασύγχρονο κινητήρα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για σύγχρονα και μόνιμα μαγνητικά σύγχρονα μηχανήματα με πολύ καλύτερη απόδοση από άλλες εναλλακτικές λύσεις. Ο κύριος περιορισμός αυτής της τοπολογίας οδήγησης ήταν η διαθεσιμότητα σε εξαρτήματα υψηλής ισχύος, και η ανταγωνιστικότητά της σε σχέση με άλλες τοπολογίες κίνησης στο εύρος υψηλής ισχύος. Μέχρι πρόσφατα, το πρακτικό όριο για αυτούς τους δίσκους ήταν περίπου 8-10MW, αλλά καθώς τα νέα εξαρτήματα καθίστανται διαθέσιμα, αυτό το όριο τείνει να είναι υψηλότερο, σήμερα μέχρι και περίπου 25MW.

Το VSI χαρακτηρίζεται από έναν διορθωτή, συνήθως έναν ανεξέλεγκτο διορθωτή διόδου συνδεδεμένο στο δίκτυο. Αυτός διορθώνει την τάση του δικτύου, ο οποίος συνεπώς δίνει μια σχετικά σταθερή τάση DC, η οποία εξομαλύνεται περαιτέρω από μία τράπεζα πυκνωτών στο DC σύνδεσμο. Ο πυκνωτής στο DC σύνδεσμο εξασφαλίζει επίσης ότι η μεταβολή κυμάτωσης υψηλής συχνότητας από τη μονάδα αντιστροφέα δεν εισέρχεται στο δίκτυο. Ο μετατροπέας

VSI έξι παλμών τροφοδοτούμενου κινητήρα κίνησης είναι σχεδιασμένος στο Σχήμα 3.41 και τα χαρακτηριστικά του όρια λειτουργίας περιγράφονται στο Σχήμα 3.42.

Ο διορθωτής στο Σχήμα 3.41 αναπαριστά μία διαμόρφωση έξι παλμών που χρησιμοποιείται όπου ο μετατροπέας είναι απευθείας συνδεδεμένος στο δίκτυο. Τα κυρίαρχα αρμονικά ρεύματα είναι της 5<sup>ης</sup>, 7<sup>ης</sup>, 11<sup>ης</sup> και 13<sup>ης</sup> αρμονικής σειράς. Η αρμονική παραμόρφωση μπορεί να μειωθεί περισσότερο, όταν χρησιμοποιείται διαμόρφωση 12 παλμών με μία διπλή τροφοδοσία μέσω ενός τριφασικού μετασχηματιστή, ακυρώνοντας επομένως την 5<sup>η</sup> και 7<sup>η</sup> αρμονική. Όπου ένας μετασχηματιστής είναι απαραίτητος για προσαρμογή τάσης, η διάταξη 12 παλμών πρέπει κανονικά να χρησιμοποιηθεί. Χρησιμοποιώντας μονάδα PWM και διατάξεις 12 παλμών, η επακόλουθη αρμονική παραμόρφωση θα είναι κανονικά κοντά στα όρια που καθορίζονται από κανόνες και κατευθυντήριες γραμμές, αλλά μπορεί να απαιτούνται επιπρόσθετα μέσα, π.χ. φιλτράρισμα.

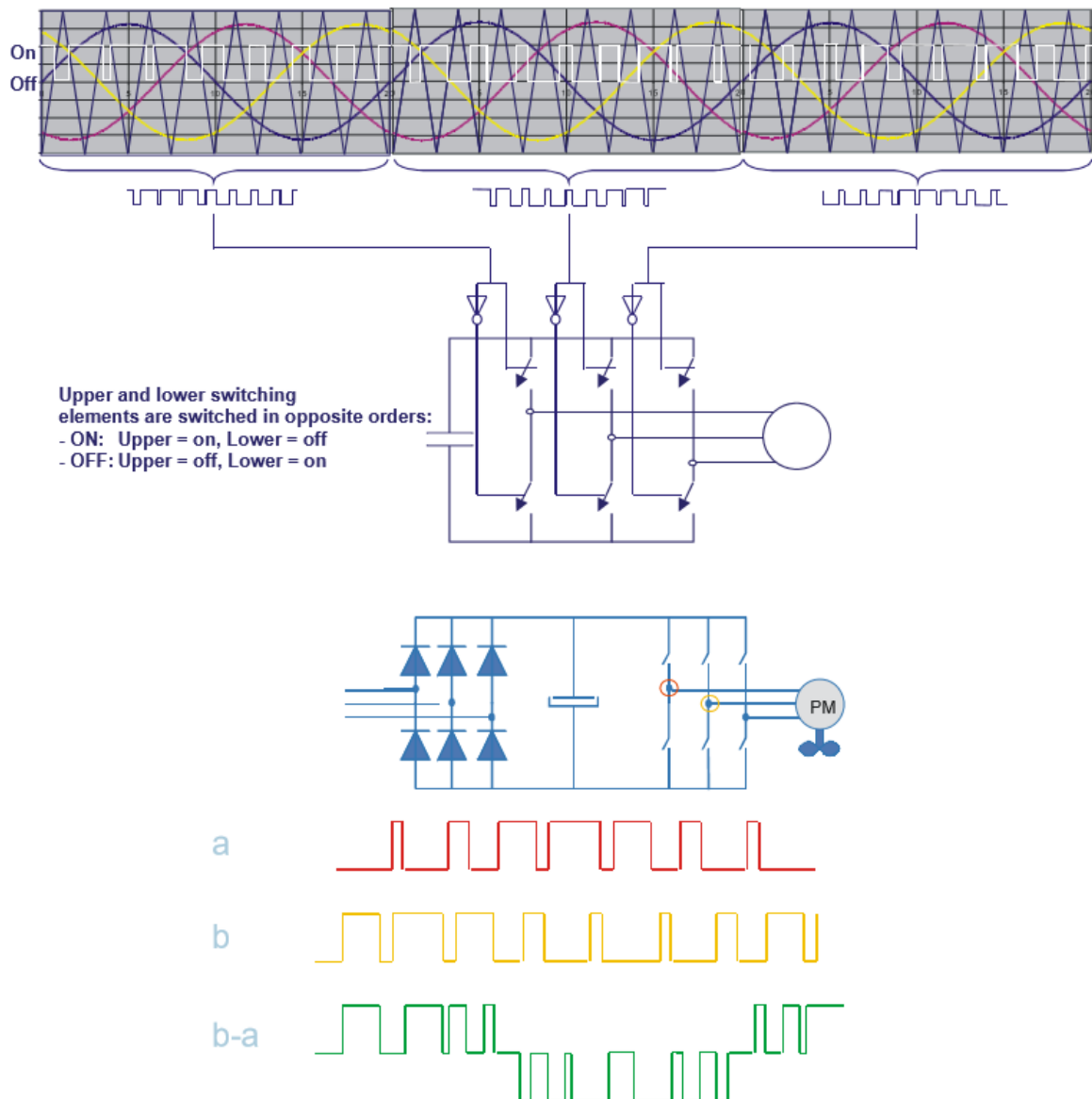


Σχήμα 3.42: Χαρακτηριστικά όρια λειτουργίας για έναν μετατροπέα VSI έξι παλμών που τροφοδοτεί τον επαγωγικό κινητήρα.

Η τοπολογία στο Σχήμα 3.41 μπορεί να κινεί τον κινητήρα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Λόγω της διόδου που διορθώνει την παροχή ισχύος, η ισχύς μπορεί ωστόσο να ληφθεί μόνο από το δίκτυο, όχι να τροφοδοτείται πίσω στο δίκτυο κατά την αναγεννητική πέδηση. Το τμήμα του αντιστροφέα, που τροφοδοτεί τον κινητήρα, έχει την ικανότητα να εκτελεί επίσης αναγεννητικό δίκτυο. Αν αυτό μπορεί να συμβεί στην τοπολογία που φαίνεται, η τάση σύνδεσης DC θα αυξηθεί, και τα εξαρτήματα ενδέχεται να υποστούν βλάβες λόγω υπέρτασης. Όλοι οι μετατροπείς έχουν μία ενσωματωμένη προστασία υπέρτασης, η οποία περιορίζει τη δύναμη θραύσης εάν η τάση σύνδεσης DC αυξάνει πάνω από ένα όριο ασφαλείας.

Για να είναι δυνατή η αναγέννηση ισχύος, π.χ. λόγω ενός ελιγμού διακοπής σύγκρουσης αντιστρέφοντας την ταχύτητα του έλικα, καθώς, είναι συνηθισμένη η κατασκευή μιας τρανζίστορ ελεγχόμενης τράπεζας αντίστασης στο σύνδεσμο DC, η οποία ενεργοποιείται πριν το όριο ασφαλείας για υπέρταση της σύνδεσης DC. Η αναγεννημένη ισχύς θα αποβληθεί έπειτα σε αυτή την αντίσταση. Εναλλακτικά, ο διορθωτής μπορεί να είναι εξοπλισμένος με ένα διορθωτή θυρίστορ πλήρους γέφυρας σε αντι-παράλληλο με το διορθωτή διόδου (βλέπε επόμενη ενότητα) ή ένα ενεργό εμπρόσθιο άκρο (παρόμοιο με τη μονάδα αντιστροφέα) μπορεί να εφαρμοστεί ως μία μονάδα διορθωτή για να τροφοδοτήσει ισχύ στο δίκτυο.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τον έλεγχο των στοιχείων μεταγωγής προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση εξόδου στον κινητήρα. Η πιο συνηθισμένη μεθοδολογία είναι να χρησιμοποιήσουν το PWM (Ρύθμιση Πλάτους Παλμού) σε κάποια παραλλαγή. Στην πιο βασική του εκδοχή, παράγεται μία τριφασική PWM τάση συγκρίνοντας τρεις τιμές ημιτονοειδούς αναφοράς με ένα υψηλής συχνότητας τριγωνικό σήμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.43. Ενώ η ημιτονοειδής αναφορά είναι υψηλότερη από το τριγωνικό σήμα, το άνω στοιχείο μεταγωγής στο σκέλος του αντιστροφέα παίρνει ένα σήμα πυροδότησης· το χαμηλότερο είναι απενεργοποιημένο, και αντίθετο όταν το ημιτονοειδές σήμα αναφοράς είναι χαμηλότερο από το τριγωνικό σήμα. Οι τάσεις από τον αντιστροφέα στους ακροδέκτες του κινητήρα ακολουθούν το ίδιο μοτίβο· με στιγμιαίες τιμές ίσα θετικά και αρνητικά επίπεδα τάσης του συνδέσμου DC για θετικό και αρνητικό σήμα ελέγχου πύλης αντίστοιχα. Η γραμμή τάσης, η οποία είναι ό,τι επηρεάζει τον κινητήρα, είναι λοιπόν η διαφορά μεταξύ δύο φάσεων τάσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.43.

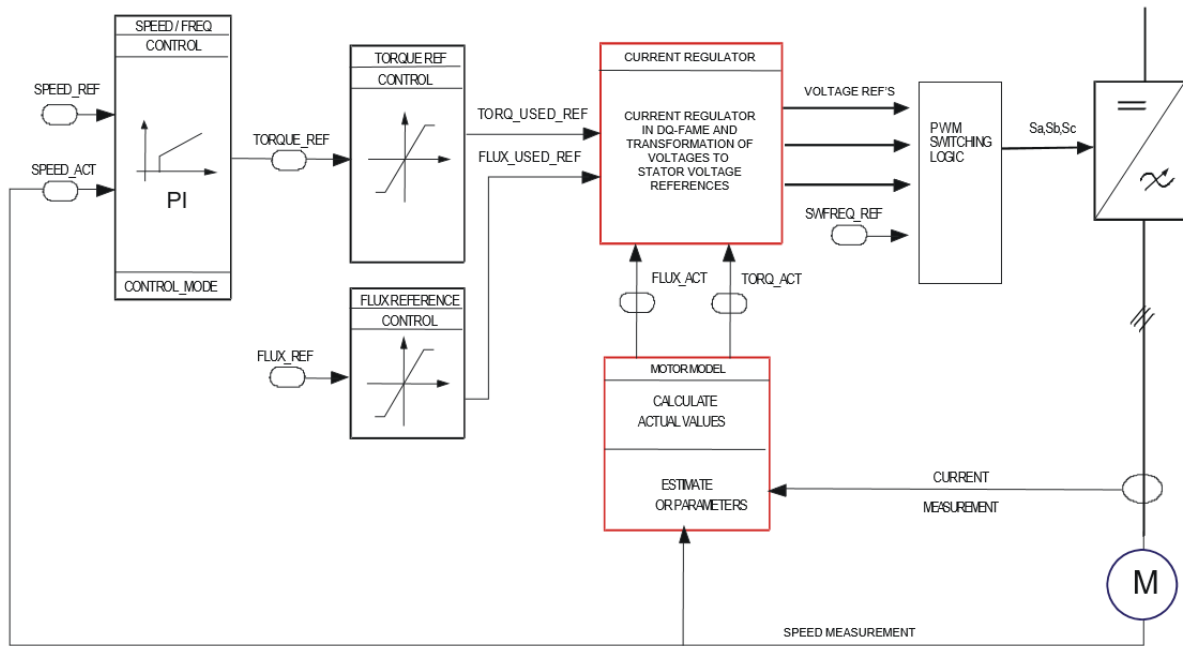


Σχήμα 3.43: Δημιουργία παλμών μεταγωγής στο διαμορφωμένο αντιστροφέα PWM, και προκύπτουσες τάσεις εξόδου στη φάση του κινητήρα και μεταξύ δύο γραμμών.

Ως μία εναλλακτική σε τέτοιες PWM μεθόδους, υπάρχουν τεχνικές διαμόρφωσης διανύσματος, και τεχνικές άμεσης διαμόρφωσης όπως στον άμεσο έλεγχο ροπής (DTC), όπου τα σήματα πυροδότησης πύλης παράγονται απευθείας υπολογίζοντας ποιό από τους 8 πιθανούς φορείς τάσης (συμπεριλαμβανομένων δύο μηδενικών διανυσμάτων) πρέπει να εφαρμοστούν στις περιελίξεις του στάτορα.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι να εφαρμόσουν τον ελεγκτή κινητήρα, ο οποίος επιχειρεί να δημιουργήσει είσοδο στον κινητήρα που δίνει την επιθυμητή ροπή:

- Κλιμακωτός έλεγχος: Ο κλιμακωτός έλεγχος είναι η πιο απλή και η πρώτη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για έλεγχο των ασύγχρονων κινητήρων. Ήταν δυνατή η εφαρμογή σε αναλογικά ηλεκτρονικά, η οποία ήταν η μόνη εφικτή στις προηγούμενες μέρες ελέγχου του κινητήρα. Ο κλιμακωτός έλεγχος βασίζεται στο στάσιμο μοντέλο του ασύγχρονου κινητήρα, και από αυτό υπολογίστηκε η αντίστοιχη τάση και συχνότητα που θα έδινε την επιθυμητή ροπή ή ταχύτητα στον κινητήρα. Το μειονέκτημα είναι ότι το μοντέλο ισχύει μόνο σε σταθερή κατάσταση, και ότι οι παράμετροι του μοντέλου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία, τη συχνότητα, κλπ. Επομένως, οι κλιμακωτές μέθοδοι έχουν μία ανεπαρκή δυναμική απόδοση, με κακή χρήση της χωρητικότητας του κινητήρα.
- Έλεγχος διανύσματος ροής ρότορα: Αυτή η μεθοδολογία αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '60 από το Γερμανό επιστήμονα Blaschke. Η μέθοδος βασίζεται σε ένα μοντέλο τάσης του κινητήρα, των ροών, και των ρευμάτων που αναφέρονται σε διανύσματα σε ένα περιστρεφόμενο σύστημα συντεταγμένης. Με τις συντεταγμένες που προσανατολίζονται σε συγχρονισμό με την περιστροφική ροή στην περιέλιξη του ρότορα, τα συστατικά του διανύσματος ρεύματος αποσυνδέονται σε ένα στοιχείο ροής και σε ένα στοιχείο ροπής, παρόμοιο με το ρεύμα πεδίου του κινητήρα DC και το ρεύμα οπλισμού. Η μέθοδος απαιτεί χωρητικότητα υπολογιστή πολύ πιο πάνω από ότι ήταν διαθέσιμη όταν αναπτύχθηκε η μεθοδολογία ελέγχου, και αυτή η μέθοδος βρήκε την εμπορική της εφαρμογή νωρίτερα από τα μέσα της δεκαετίας του '80. Ένα μειονέκτημα είναι ακόμα ότι το μοντέλο που απαιτεί να γίνει ο μετασχηματιστής του φορέα περιέχει παραμέτρους εξαιρετικά ασταθής, ιδιαίτερα η αντίσταση του ρότορα η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Για να αποκτηθεί μια καλή δυναμική απόδοση, η αντίσταση του ρότορα θα πρέπει να προσαρμόζεται στο δίκτυο ή η θερμοκρασία θα πρέπει να μετράται. Το Σχήμα 3.44 δείχνει ένα σχηματικό διάγραμμα για αυτό το σχήμα ελέγχου.



Σχήμα 3.44

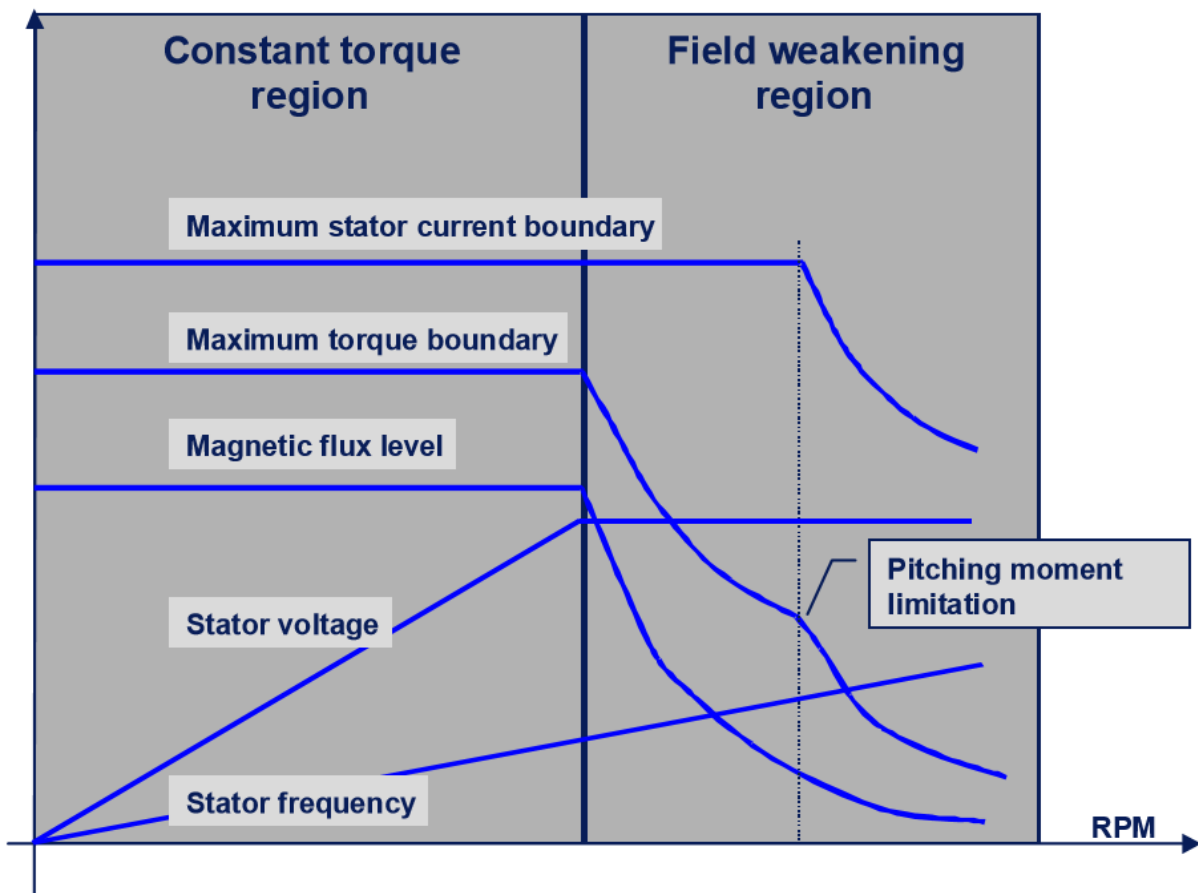
- Προηγμένος έλεγχος διανύσματος στάτορα: Η ίδια αποσύνδεση του ελέγχου ροής και ροπής μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ροών και ρευμάτων του στάτορα σε ένα σύστημα συντεταγμένων που προσανατολίζεται στο στάτορα. Αυτό το μοντέλο μπορεί να γίνει ανεξάρτητο από τις εξαιρετικά ασταθής παραμέτρους του ρότορα, αλλά απαιτεί μία πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα υπολογιστή του ελεγκτή. Με προσομοίωση, αυτή η μεθοδολογία ήταν γνωστή ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του '80. Έπειτα, στα μέσα της δεκαετίας του '90, η μέθοδος γνωστή και ως άμεσος έλεγχος ροπής (DTC), έγινε εμπορικά διαθέσιμη. Το μαθηματικό μοντέλο του ασύγχρονου κινητήρα πρέπει να λυθεί με γενικά συχνότητα δειγματοληψίας 40kHz για ακριβή έλεγχο, και έπειτα δε θα είναι σε θέση να εκτιμήσει τις ηλεκτρικές ποσότητες του κινητήρα αλλά και επίσης τη μηχανική ταχύτητα του κινητήρα. Αυτό επιτρέπει τη χρήση μονάδων χωρίς ταχύ στις περισσότερες εφαρμογές, η οποία θεωρείται ως μία σημαντική βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος.

Το Σχήμα 3.45 δείχνει τους περιορισμούς του ασύγχρονου κινητήρα κίνησης τύπου VSI. Το όριο τάσης στην τάση του στάτορα δίνεται από τη μέγιστη τάση παραγωγής από τον αντιστροφέα από τη δεδομένη, σταθερή τάση σύνδεσης DC. Η μονάδα αντιστροφέα ή το μέγιστο ρεύμα κινητήρα δίνει τους περιορισμούς σε ρεύμα και ροπή στάτορα. Κανονικά,

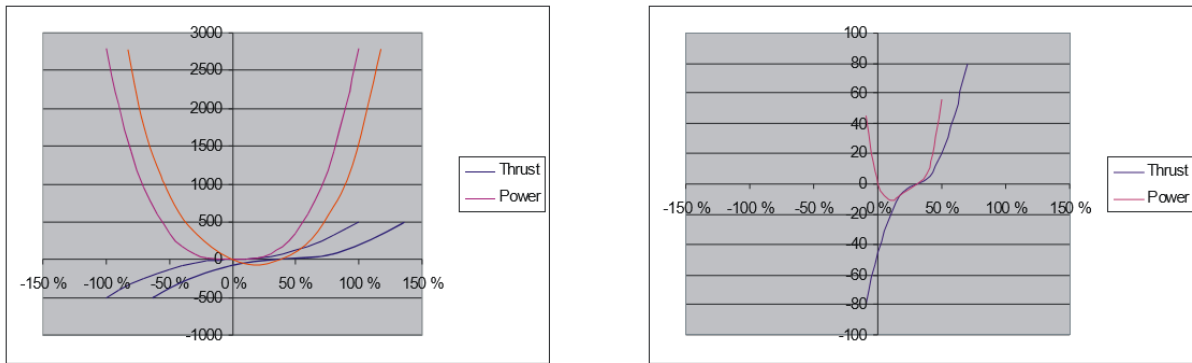


αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας μειώνει το ρεύμα και τη ροπή σε συνεχείς λειτουργίες φορτίου, και το ρεύμα του αντιστροφέα σε διακοπτόμενο φορτίο. Υπάρχει επίσης ένας άλλος περιορισμός: χαρακτηρίζεται με “περιορισμό ροπής” το οποίο είναι ένα χαρακτηριστικό του ίδιου του επαγωγικού κινητήρα. Αυτό συνήθως συμβαίνει στο 150 έως 200% της ονομαστικής ταχύτητας, η οποία κανονικά βρίσκεται εκτός του εύρους της ταχύτητας λειτουργίας ενός κινητήρα προώθησης.

Η τροπολογία στο Σχήμα 3.41 μπορεί να κινεί τον κινητήρα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Λόγω της διόδου που διορθώνει την παροχή ισχύος, η ισχύς μπορεί ωστόσο να ληφθεί μόνο από το δίκτυο, όχι να τροφοδοτείται πίσω στο δίκτυο κατά την αναγεννητική πέδηση. Το τμήμα του αντιστροφέα, που τροφοδοτεί τον κινητήρα, έχει την ικανότητα να εκτελεί επίσης αναγεννητικό δίκτυο. Αν αυτό μπορεί να συμβεί στην τοπολογία που φαίνεται, η τάση σύνδεσης DC θα αυξηθεί, και τα εξαρτήματα ενδέχεται να υποστούν βλάβες λόγω υπέρτασης. Όλοι οι μετατροπείς έχουν μία ενσωματωμένη προστασία υπέρτασης, η οποία περιορίζει τη δύναμη θραύσης εάν η τάση σύνδεσης DC αυξάνει πάνω από ένα όριο ασφαλείας.



Σχήμα 3.45: Χαρακτηριστικά μέγιστα όρια λειτουργίας για μία ασύγχρονη μονάδα κινητήρα VSI.

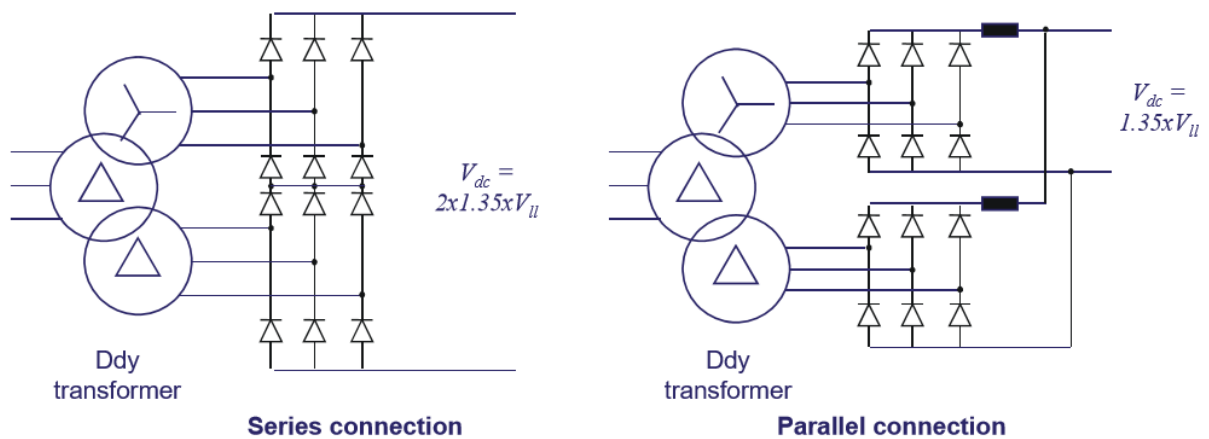


Σχήμα 3.46: Η ικανότητα θραύσης (λειτουργία 4 τεταρτημορίων) απαιτείται για τις μονάδες προώθησης, όπου ο ελιγμός διακοπής της σύγκρουσης επιτυγχάνεται με την αναστροφή της ταχύτητας της έλικας.

Για να είναι δυνατή η αναγέννηση ισχύος, πχ λόγω ενός ελιγμού διακοπής σύγκρουσης αντιστρέφοντας την ταχύτητα του έλικα, είναι συνηθισμένη η κατασκευή μιας τρανζίστορ ελεγχόμενης τράπεζας αντίστασης στο σύνδεσμο DC, η οποία ενεργοποιείται πριν το όριο ασφαλείας για υπέρταση της σύνδεσης DC. Η αναγεννημένη ισχύς θα αποβληθεί έπειτα σε αυτή την αντίσταση. Εναλλακτικά, ο διορθωτής μπορεί να είναι εξοπλισμένος με ένα διορθωτή θυρίστορ πλήρους γέφυρας σε αντι-παράλληλο με το διορθωτή διόδου (βλέπε επόμενη ενότητα) ή ένα ενεργό εμπρόσθιο άκρο (παρόμοιο με τη μονάδα αντιστροφέα) μπορεί να εφαρμοστεί ως μία μονάδα διορθωτή για να τροφοδοτήσει ισχύ στο δίκτυο.

Κάτω από την κατάσταση έλξης των μπουκαλιών, η ροή ισχύος θα είναι θετική, δηλαδή από το δίκτυο στον κινητήρα, σε ακινησία. Δυναμικά, μπορεί να υπάρξει μία δυναμική στιγμή σπασίματος, για να σταματήσει ή να μειώσει την ταχύτητα της έλικας, εάν η μείωση της ταχύτητας είναι ταχύτερη από το φορτίο από την πιθανή αντίσταση του νερού. Το Σχήμα 3.41 απεικονίζει τα τέσσερα τεταρτημόρια λειτουργίας σε ένα διάγραμμα ροπής-ταχύτητας. Η τοπολογία στο Σχήμα 3.41 μπορεί να λειτουργεί μόνο στα τεταρτημόρια I και III. Με το σπάσιμο του αντιστάτη ή του ενεργού εμπρόσθιου άκρου, ο μετατροπέας VSI μπορεί να λειτουργεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Αυτό απαιτείται συνήθως για την κύρια προώθηση, τα βαρούλκα, τους ανελκυστήρες, κλπ, ενώ οι προωθητήρες χρησιμοποιούν κανονικά ένα μετατροπέα δύο τεταρτημορίων.

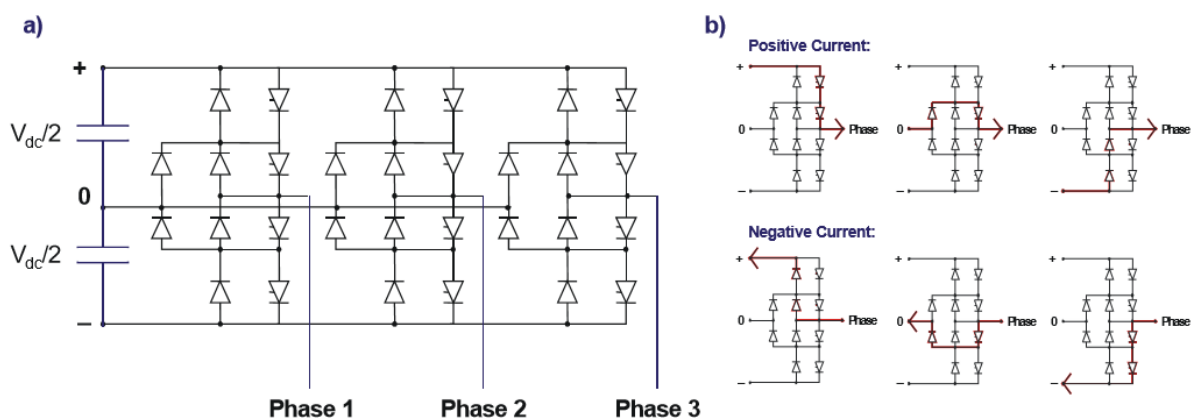
Ο μετατροπέας έξι παλμών στο Σχήμα 3.41 δεν αντλεί ένα ημιτονοειδές ρεύμα από το δίκτυο. Προκειμένου να μειωθεί η παραμόρφωση, είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται μία διάταξη 12 παλμών όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.48.



Σχήμα 3.48: Διορθωτές διόδου 12 παλμών. Η σύνδεση σειρών χρησιμοποιείται συνήθως σε μετατροπείς μέσης τάσης, παράλληλα σε μετατροπείς χαμηλής τάσης.

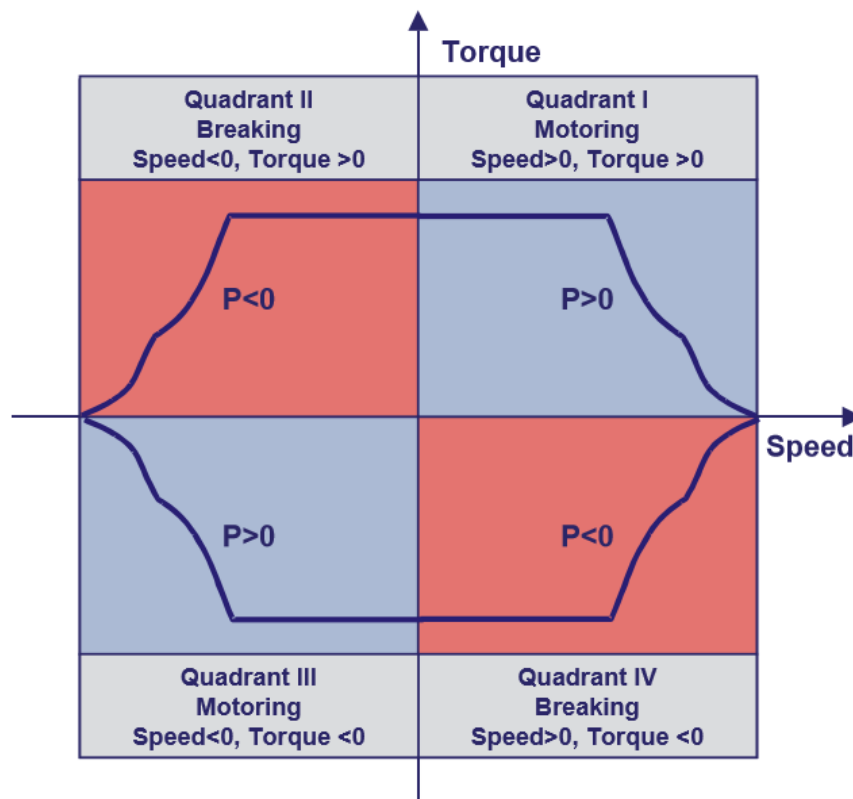
Αυτό τροφοδοτείται από ένα μετασχηματιστή με δευτερεύουσα μετατοπισμένη φάση 30 μοιρών (Ddy μετασχηματιστής) και με ακολουθία ή παράλληλη σύνδεση δύο διορθωτών διόδου έξι παλμών, η προκύπτουσα παραμόρφωση των πρωταρχικών ρευμάτων θα μειωθεί σημαντικά. Ομοίως, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει 18 παλμούς (τρεις διορθωτές διόδου και τέσσερις μετασχηματιστές περιέλιξης) ή 24 παλμούς (τέσσερις διορθωτές διόδου και πέντε περιελίξεις μετασχηματιστή) για περαιτέρω μείωση της παραμόρφωσης. Μία διάταξη 12 παλμών θα είναι κανονικά αρκετή να μειώσει την παραμόρφωση σε ένα αποδεκτό επίπεδο. Η αρμονική παραμόρφωση θα περιγραφεί λεπτομερέστερα σε μία επόμενη ενότητα.

Οι μετατροπείς μέσης τάσης είναι συνήθως μία τροποποιημένη έκδοση από αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.41. Εξαιτίας των αυξημένων τάσεων, η τάση σύνδεσης DC πρέπει να διαιρείται σε περισσότερα εξαρτήματα στη σειρά στο μέρος του αντιστροφέα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.49.

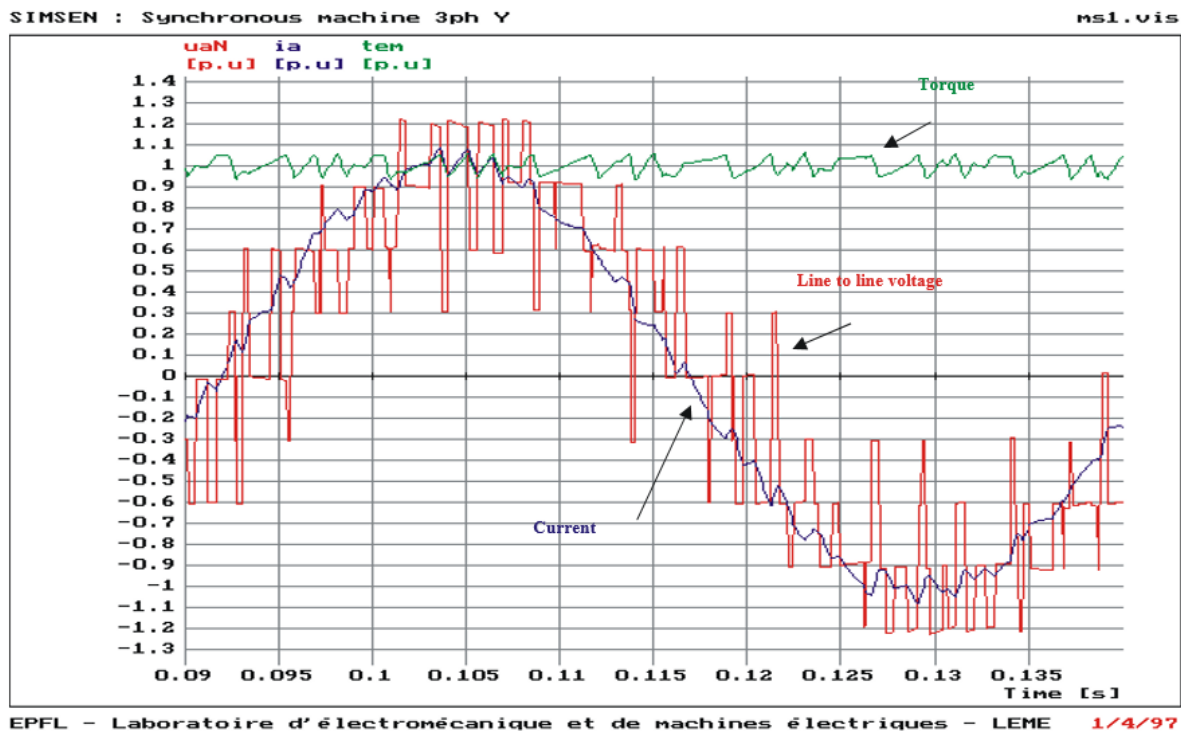


Σχήμα 3.49: α) Οι μετατροπείς τριών επιπέδων εφαρμόζονται συχνά σε μετατροπείς μέσης τάσης, καθώς η πίεση τάσης σε κάθε στοιχείο θα είναι χαμηλότερη και η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος του κινητήρα θα είναι χαμηλότερη στην ίδια συχνότητα εναλλαγής, βλέπε Σχήμα 5.13. β) Δείχνει πώς το ρεύμα μπορεί να ρέει για να αποκτήσει, από τα αριστερά, + τάση, 0 τάση, και - τάση στον κινητήρα.

Αυτό δείχνει έναν μετατροπέα τριών επιπέδων καθώς η τάση παραγωγής μπορεί τώρα να μεταβάλλεται μεταξύ τριών επιπέδων, +, 0, και -, ενώ ο μετατροπέας δύο επιπέδων στο Σχήμα 3.41 μπορεί να μεταβάλλεται μόνο μεταξύ + και -. Ο μετατροπέας τριών επιπέδων θα δώσει επίσης χαμηλότερη παραμόρφωση ρεύματος στα τροφοδοτικά ρεύματα στον κινητήρα για την ίδια συχνότητα μεταγωγής όπως ένας μετατροπέας δύο επιπέδων. Αυτό σημαίνει ότι η συχνότητα μεταγωγής μπορεί να κρατηθεί χαμηλότερη, δεδομένων των μικρότερων απωλειών στο εξάρτημα, με ένα αποδεκτό ρεύμα, και επομένως τον κυματισμό ροπής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.50. Μία μονάδα VSI, μέσης τάσης, 12 παλμών, τριών επιπέδων, για κινητήρες κίνησης επαγωγής με ψύξη νερού φαίνεται στο Σχήμα 3.51.



Σχήμα 3.47: Τα τέσσερα τεταρτημόρια των λειτουργιών με λειτουργικά όρια για τον μετατροπέα VSI.



Σχήμα 3.50



Σχήμα 3.51: Μία μέση τάση, 3300V IGCT VSI κινητήρα για κινητήρες επαγωγικού κινητήρα (ABB ACC 6000). Ερμάρια (από αριστερά): 1: Διορθωτές διόδου, 2: Τερματικό ερμάριο και μονάδες ελέγχου, 3: Μονάδα αντιστροφέα IGCT, 4: Πυκνωτές σύνδεσης DC, 5: Μονάδα ψύξης νερού με εναλλάκτη θερμότητας και αντλίες κυκλοφορίας. Το εσωτερικό νερό ψύξης πρέπει να απιονισθεί (μη αγώγιμο) αφού τα εξαρτήματα τοποθετούνται απευθείας χωρίς μόνωση στους ψήκτες ψύξης. Σε μονάδες χαμηλής τάσης, οι μονάδες ισχύος απομονώνονται κανονικά από τον ψήκτρα ψύξης, και συνεπώς μπορεί να εφαρμοστεί κανονικό φρέσκο νερό.

## Άλλοι μετατροπείς

Επιπρόσθετα στις πιο χρησιμοποιούμενες τοπολογίες που αναφέρονται εδώ, παρατηρούνται περιστασιακά και άλλες παραλλαγές. Παραδείγματα είναι το CSI με PWM ρεύμα παραγωγής, βήμα βήμα με πολλαπλή απόδοση μετασχηματιστή και εξαιρετικά χαμηλή παραμόρφωση τάσης του κινητήρα, και μετατροπείς VSI Ρυθμισμένου Πλάτους Παλμού με μία ελεγχόμενη από το θυρίστορ τάση σύνδεσης DC και μία τάση απόδοσης 6 παλμών. Η χρήση αυτών των τεχνολογιών είναι περιορισμένη και παρατηρείται μόνο σε ειδικές εφαρμογές.

## Σύγκριση εναλλακτικών ηλεκτρικού κινητήρα κίνησης

Τα χαρακτηριστικά μιας μονάδας CPP σταθερής ταχύτητας που ξεκίνησε με DOL και μιας μονάδας FPP μεταβλητής ταχύτητας συγκρίνονται στο Σχήμα 3.52. Εξαιτίας του χαμηλότερου συντελεστή ισχύος και των υψηλότερων μεταβολών εκκίνησης οι περισσότερες γεννήτριες ντίτζελ θα πρέπει, κανονικά, να συνδέονται με το δίκτυο ισχύος με προωθητήρες σταθερής ταχύτητας παρότι με προωθητήρες μεταβλητής ταχύτητας, και επομένως με κινητήρα μεταβλητής ταχύτητας και κινητήρες πρόωσης:

- Η μέση φόρτιση θα είναι μεγαλύτερη με λιγότερες ώρες λειτουργίας.
- Τα κόστη καυσίμου, η φθορά και η συντήρηση θα μειωθούν.
- Μπορούν να επιτευχθούν μικρότερες διαστάσεις της μονάδας ισχύος.

Μία μονάδα προώθησης έχει δύο τιμές: μία πριν και μία μετά την εγκατάσταση. Το κόστος εξοπλισμού των κινητήρων μεταβλητής ταχύτητας θα είναι συχνά υψηλότερο από αυτό του ελεγχόμενου βήματος προπέλας σταθερής ταχύτητας. Το κόστος συντήρησης και η κατανάλωση καυσίμου από την άλλη πλευρά θα μειωθούν, αφού σε λειτουργία DP η ισχύς του προωθητήρα χρησιμοποιείται συνήθως μόνο μερικώς.

	DOL asynchronous motor + CPP	SCR DC motor drive	Cyclo- <sup>1</sup> converter	CSI (LCI) <sup>2</sup>	VSI PWM <sup>3</sup>
Start-up amps	Typ. 5 x rated current	≈ 0 (transformer inrush)	≈ 0 (transformer inrush)	≈ 0 (transformer inrush)	≈ 0 (transformer inrush)
Start-up torque transients	Typ. 2-3 x rated torque	≈ 0	≈ 0	Up to 50% of rated torque	≈ 0
Power consumption, low thrust	≈ 15% of nominal power	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Amps at low thrust	45-55% of nominal	F(torque)	F(torque)	F(torque)	≈ 0
Power Factor - full load	≈ 0.85	> 0.9	> 0.76	> 0.9	> 0.95
Power factor variation with load (cosφ)	0.15 .. 0.85 (non-linear)	0 .. 0.9 (prop. speed)	0 .. 0.76 (prop. speed)	0 .. 0.9 (prop. speed)	> 0.95 (≅ constant)
Dynamic response (power, torque)	3-5 sec (pitch control)	< 100 ms	< 100 ms	Slower	< 50 ms
Torque ripple	None	Smooth	Smooth	Pulsating	Smooth
Zero-thrust crossing	Smooth if negative thrust allowed	Discontinuous	Smooth	Pulsating	Smooth
Efficiency at full load	High	Lower	High	High	High
Harmonic distortion: - at low speed /thrust - at full speed /thrust	None None	F(torque) F(torque)	F(torque) F(torque)	F(torque) F(torque)	≈ 0 F(power)
Short circuit contribution	Typ. 5 x nominal power	No	No	No	No
Motor matching required	-	Some	Some	Yes	No
Commutator	No	Yes	No (sliprings)	No (sliprings)	No

<sup>1</sup> With brushed synchronous motor

<sup>2</sup> With brushed synchronous motor

<sup>3</sup> With cage induction motor

Σχήμα 3.52: Συγκρίσεις εναλλακτικών μονάδας. Η χαμηλή ώθηση ισοδυναμεί με χαμηλή ταχύτητα σε κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας και μικρό βήμα σε κινητήρα σταθερής ταχύτητας για έλικα CPP.

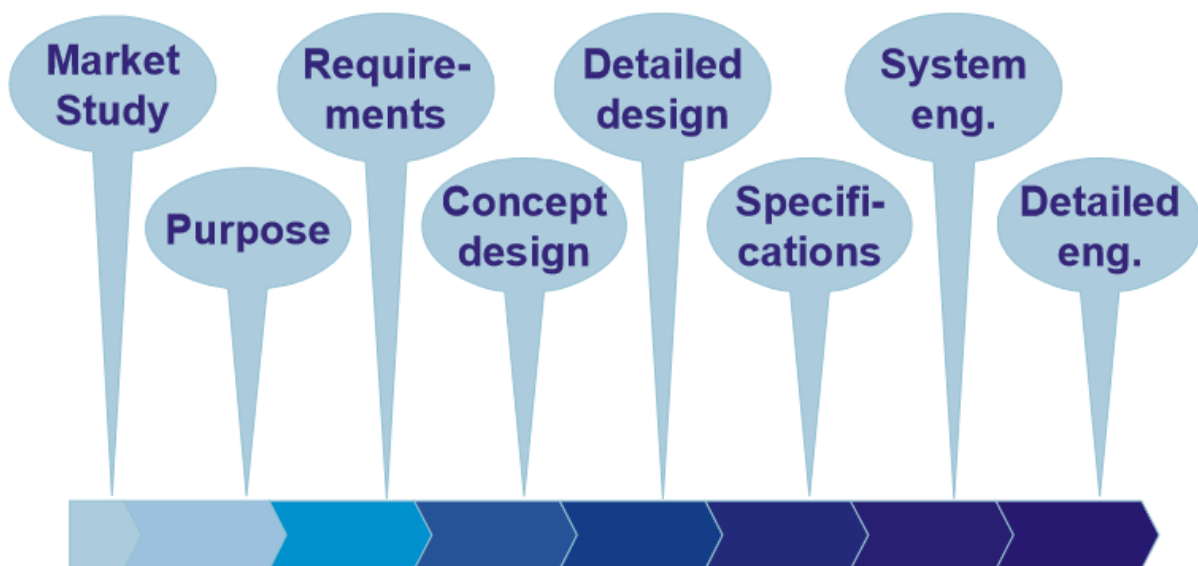
## 3.6 Σχεδιασμός Συστήματος

### 3.6.1 Εισαγωγή

Ένας από τους πιο έμπειρους επιθεωρητές τάξης δήλωσε: “Κανείς δεν πρέπει να κάνει το λάθος να υποθέσει ότι η ντίτζελ ηλεκτρική πρόωση είναι εύκολη”. Από την άλλη πλευρά, η ντίτζελ ηλεκτρική προώθηση έχει αποδειχθεί ότι είναι αξιόπιστη και δυνατή όταν όλες οι πτυχές σχεδιασμού και μηχανικής εξετάζονται επαρκώς προσεκτικά.

Η κύρια διαφορά ανάμεσα σε ένα θαλάσσιο σύστημα ισχύος και σε ένα χερσαίο σύστημα είναι το γεγονός ότι το θαλάσσιο σύστημα ισχύος είναι ένα απομονωμένο σύστημα με μικρές αποστάσεις από την παραγόμενη ισχύ στους καταναλωτές. Η ποσότητα της εγκατεστημένης ισχύος δημιουργεί ιδιαίτερες προκλήσεις για τη μηχανική τέτοιων συστημάτων.

Η φάση σχεδιασμού και μηχανικής μπορεί απλουστευμένα να απεικονισθεί στο Σχήμα 3.53. Ακόμα και πριν ξεκινήσει ο σχεδιασμός της ιδέας του σκάφους, πρέπει να γίνει ο βασικός σκοπός εκτίμησης της αγοράς και η προαπαιτούμενη προδιαγραφή για το σκάφος ως η βάση για την εργασία σχεδιασμού.



Σχήμα 3.53: Στάδια στο σχεδιασμό και στην εργασία μηχανικής.

Ο σχεδιασμός συστήματος και η μηχανική μπορούν να χωριστούν σε δύο φάσεις, ωστόσο, η πρώτη φάση δεν είναι τελείως ανεξάρτητη από τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της δεύτερης.



1. Σχεδιασμός, εννοιολογικός και λεπτομερής: Σε αυτές τις φάσεις, η ικανότητα του σκάφους πρέπει να προσδιορίζεται και να αναλύεται για να καθορίζεται το ύψος ώθησης που απαιτείται για την ιστιοπλοΐα, τον ελιγμό, και τη διατήρηση σταθμού όπως ισχύει για τις προγραμματισμένες λειτουργίες. Με βάση τους στόχους και τους σκοπούς για τις λειτουργίες του σκάφους, θα πρέπει να καθοριστεί ο τύπος προώθησης και οι μονάδες προώθησης/προωθητήρα, η κατάταξή τους και η θέση τους στο σκάφος, καθώς επίσης και η βέλτιστη διαμόρφωση και διάσπαση του συστήματος παραγωγής και διανομής ισχύος. Η φάση σχεδιασμού θα οδηγήσει σε ένα σύνολο τεχνικών προδιαγραφών για το σκάφος, το οποίο αποτελεί τη βάση για περαιτέρω μηχανική εργασία.
  
2. Μηχανική, σύστημα και λεπτομέρεια: Κατά τη διάρκεια αυτών των φάσεων μηχανικής, πρέπει να παρουσιαστούν αρκετοί αναλυτικοί και αριθμητικοί υπολογισμοί για την επίτευξη ασφαλούς και αξιόπιστης λειτουργίας, κοινώς περιγραφόμενη ως συνηθισμένη ανάλυση δικτύου ή μελέτες συστήματος ηλεκτρικής ισχύος:
  - Υπολογισμός ροής φορτίου.
  - Υπολογισμοί βραχυκυκλώματος.
  - Υπολογισμοί σφαλμάτων γείωσης.
  - Μελέτη συντονισμού ρελέ.
  - Αρμονική ανάλυση.
  - Υπολογισμός πτώσης τάσης της εισροής των μετασχηματιστών και εκκίνηση των κινητήρων.

Ανάλογα με τη διαμόρφωση του συστήματος και την εφαρμογή του σκάφους η ακόλουθη εκτεταμένη ανάλυση μπορεί επίσης να απαιτείται ή να είναι απαραίτητη:

- Μεταβατική ανάλυση της συμπεριφοράς του δικτύου μετά από διαταραχή, πχ βραχυκύκλωμα.

- Ανάλυση αξιοπιστίας ή λειτουργία αποτυχίας.

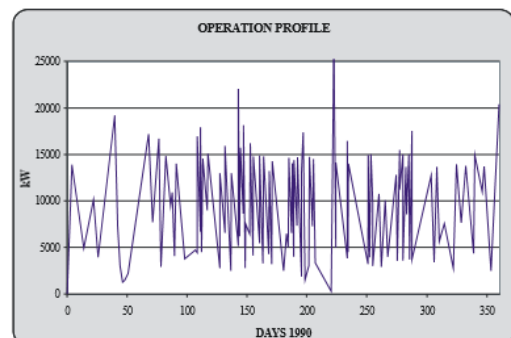
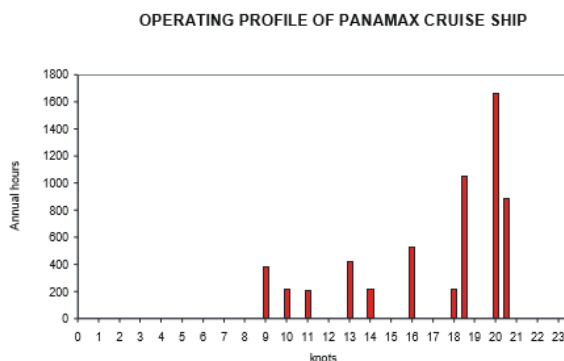
Μια λεπτομερής και ακριβής εργασία σε αυτή τη φάση είναι απαραίτητη για ασφαλείς, αξιόπιστες, και οικονομικές αποδοτικές λειτουργίες, και ευελιξία για μελλοντικές αναβαθμίσεις και τροποποιήσεις του συστήματος αργότερα κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής του σκάφους. Τέτοιες εργασίες έγιναν πολύ πιο απλές και ακριβές με τη χρήση βοηθούμενης μηχανικής και το σχεδιασμό εργαλείων με υπολογιστή, και υπάρχει μία ολόκληρη ποικιλία τέτοιων διαθέσιμων και σε καθημερινή χρήση, όπως πχ EDSA, ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ, SIMPOW, SIMSEN, κλπ.).

### 3.6.2 Αξιολόγηση του Κόστους του Κύκλου Ζωής του Εννοιολογικού Σχεδιασμού

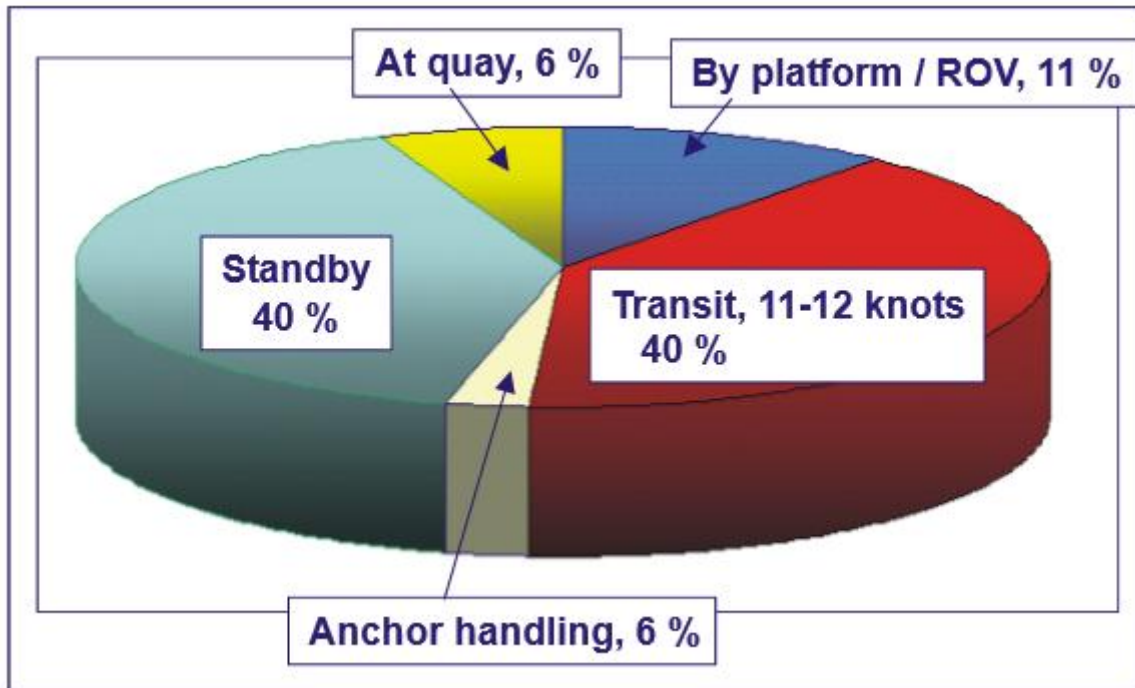
Το σημείο εκκίνησης για τον εννοιολογικό σχεδιασμό της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και του συστήματος προώθησης βασίζεται στην προβλεπόμενη λειτουργία και στο προφίλ λειτουργίας του σκάφους, τα οποία είναι τα αποτελέσματα του έργου σχεδιασμού του σκάφους και του κύτους.

Εάν το πλοίο έχει σχετικά επίπεδο προφίλ λειτουργίας, εννοώντας ότι η ισχύς πρόωσης είναι κοντά στη σταθερά για το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου ζωής, π.χ. ένα VLCC δεξαμενόπλοιο σε σταθερούς ναύλους, η ηλεκτρική πρόωση δε θα είναι κανονικά οικονομικά εφικτή εάν δεν υπάρχουν άλλες προϋποθέσεις που το καθιστούν ευεργετικό. Αυτές μπορεί να είναι μεγάλες απαιτήσεις ισχύος για άλλες διεργασίες, υψηλή ικανότητα προς ελιγμό, πλεονασμός, χαμηλό θόρυβο και δόνηση, κλπ.

Για πλοία με πιο μεταβλητό προφίλ λειτουργίας, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.54 και 3.55, η ντίτζελ ηλεκτρική προώθηση μπορεί να είναι κερδοφόρα, με εξοικονομήσεις καθαρού καυσίμου και συντήρησης, ή σε συνδυασμό με αυξημένο εισόδημα.



Σχήμα 3.54: (Αριστερά) Λειτουργικό προφίλ για ένα κρουαζιερόπλοιο (ώρες ανά έτος) και (Δεξιά) για ένα πετρελαιοφόρο στο σημείο αγοράς (ανά ημέρα πάνω από ένα χρόνο).



Σχήμα 3.55: Λειτουργικό προφίλ για ένα σκάφος υποστήριξης πεδίου.

Μία ακριβής σύγκριση των διαφορετικών εννοιών θα πρέπει να επιτευχθεί με τη χρήση μιας εκτίμησης Κόστους του Κύκλου Ζωής (LCC). Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να γίνει αυτό, και η NORSEK πρότεινε μία μέθοδο, που προορίζεται για χρήση σε υπεράκτια βιομηχανία, αλλά μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και για πλοία. Τα κύρια στοιχεία του LCC διαιρούνται σε CAPEX (Δαπάνες Κεφαλαίου), και OPEX (Δαπάνες Λειτουργίας), και παρατίθενται στο Σχήμα 3.56.

Παρόλο που το κόστος του κύκλου ζωής του πλήρους σκάφους και οι λειτουργίες του θα πρέπει να γίνονται για μια δίκαιη και ακριβή σύγκριση των διαφορετικών εννοιών, αυτό γίνεται πολύ σπάνια, κυρίως λόγω έλλειψης ικανότητας, έλλειψης αξιόπιστων στοιχείων ή έλλειψης χρόνου και πόρων σε αυτό το στάδιο, ή ένας συνδυασμός. Είναι πιθανό να πιστευτεί ότι συμβατό σύστημα προώθησης επιλέγεται συχνότερα σαν συνέπεια αυτού, παρά αντίθετα.

# Life Cycle Cost, LCC = CapEx + OpEx

## Capital Expenditures

<b>Design and administration cost</b>	The total engineering and project administration cost from the project start to operation.
<b>Equipment and material purchase cost</b>	The total purchase cost associated with the system.
<b>Fabrication cost</b>	The total fabrication cost associated with the system.
<b>Installation cost</b>	The total cost of installing the systems and equipment.
<b>Commissioning cost</b>	The total cost to commission, and when necessary certify, the installed systems and equipment.
<b>Insurance spares cost</b>	The total purchase cost for the initial spares holding for the systems and equipment, necessary to obtain the required system regularity.
<b>Reinvestment cost</b>	The total cost to remove, refurbish or purchase, install and commission systems and equipment that is predicted to exceed its design life during the life of the facility.
<b>Finance costs</b>	Finance costs during construction

## Operational Expenditures

<b>Man-hour cost</b>	Man-hour cost is defined as the cost of the needed man-hours per year to operate and maintain the facility/equipment: <ul style="list-style-type: none"><li>• Fixed crew.</li><li>• Workload dependent crew.</li><li>• Contractors.</li><li>• Vendors.</li></ul>
<b>Spare parts consumption cost</b>	The total cost of spare parts and consumables over the design life of the facility and systems, necessary to complete the predicted work load for all maintenance actions (i.e. preventive maintenance, corrective maintenance and servicing).
<b>Logistic support cost</b>	The total logistic support cost necessary to support operation and maintenance requirements for the facility and system (e.g. supply boat, diving support vessel, helicopters)
<b>Energy consumption cost</b>	The total energy consumption cost for the facility and systems. It shall include the cost of fuel required to generate the power and associated CO <sub>2</sub> tax.
<b>Insurance cost</b>	The total cost related to insurance for the production facility.
<b>Onshore support cost</b>	The total cost of the required onshore support services and administration.
<b>Cost of deferred production</b>	The total cost of deferred production due to probability of failure of system and equipment.

Σχήμα 3.56: Στοιχεία στην αξιολόγηση του κόστους του κύκλου ζωής της NORSOK.

### 3.6.3 Συνηθισμένες Μελέτες Ανάλυσης Δικτύου και Ηλεκτρικού Συστήματος Ισχύος

#### Υπολογισμοί ροής φορτίου

Ο σκοπός των υπολογισμών της ροής φορτίου και του βραχυκυκλώματος είναι να καθοριστεί εάν οι θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις στον εξοπλισμό, όπως οι γεννήτριες, τα καλώδια, οι πίνακες διανομής, και οι μετασχηματιστές, είναι κάτω από τις μέγιστες τιμές σχεδιασμού, κάτω από κανονικές συνθήκες καθώς επίσης και κάτω από συνθήκες έκτακτης ανάγκης.

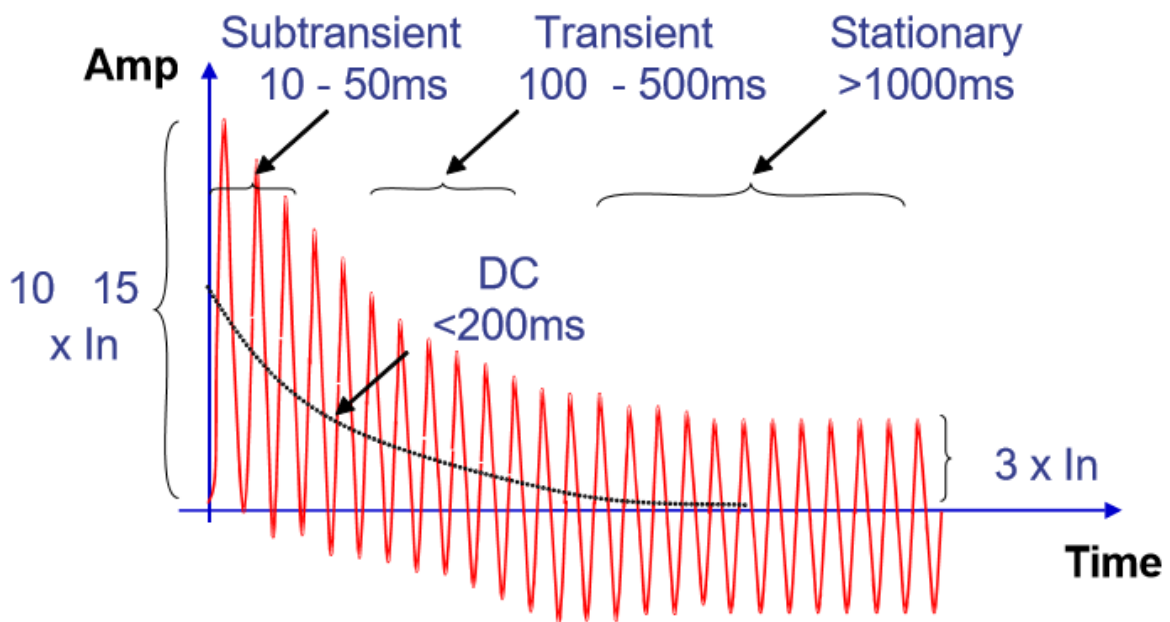
Παρέχει επίσης πληροφορίες για τη ρύθμιση των σωληνώσεων μετασχηματιστή και των ρυθμιστών τάσης που εξασφαλίζει ότι τα επίπεδα τάσης στους διαφορετικούς διαύλους διανομής και στους ακροδέκτες φορτίου βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων στατικής απόκλισης.

Οι υπολογισμοί ροής φορτίου εκτελούνται για να βρουν στάσιμες τιμές φορτίων στο δίκτυο παραγωγής και διανομής, και εφόσον το δίκτυο στα πλοία είναι κανονικά ακτινικό, είναι μια αρκετά απλή άσκηση. Συνήθως γίνεται πριν από τους υπολογισμούς βραχυκυκλώματος για να επικρατήσουν οι αρχικές του τιμές.

### Υπολογισμοί βραχυκυκλώματος

Οι υπολογισμοί βραχυκυκλώματος γίνονται για να διασφαλίσουν ότι το ρεύμα σφάλματος σε βραχυκυκλώματα δεν υπερβαίνει τις μέγιστες τιμές του διακόπτη και του άλλου εξοπλισμού. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, οι μηχανικές καταπονήσεις σε ράβδους διόδου και καλωδίωση καθίστανται πολύ υψηλότερες παρότι κάτω από κανονική λειτουργία, και οι κανόνες και τα πρότυπα κλάσης καθορίζουν ορισμένα όρια για τα οποία πρέπει να σχεδιαστεί ο εξοπλισμός.

Ένα τυπικό σχήμα κύματος ρεύματος βραχυκυκλώματος για μία γεννήτρια παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.57.



Σχήμα 3.57: Τυπικό ρεύμα βραχυκύκλωσης.

Όπως φαίνεται, το αρχικό ρεύμα έχει ένα σημαντικό DC συστατικό, το οποίο μαζί με το υποτροπικό ρεύμα βραχυκυκλώματος μπορεί να δώσει μία υψηλή τιμή αιχμής συνήθως της τάξης του 10 φορές ονομαστικού φορτίου για τις γεννήτριες. Τα ρεύματα βραχυκυκλώματος μειώνονται, καθώς το συστατικό DC αποσυντίθεται γρήγορα, συνήθως με μία χρονική σταθερά των 20-100ms. Μετά τα 300-500ms, το μεταβατικό ρεύμα βραχυκυκλώματος

μειώνεται συνήθως 3-5 φορές του ονομαστικού ρεύματος γεννήτριας, και εξαρτάται από το σχεδιασμό του συστήματος, αυτό είναι κανονικά το ρεύμα διακοπής για ένα διακόπτη κυκλώματος για ένα τμήμα.

Ένα παρατεταμένο ρεύμα βραχυκυκλώματος, θα φτάσει μετά από ένα δευτερόλεπτο ή περισσότερο, μία σταθερή τιμή, η οποία σύμφωνα με τους κανόνες και τους κανονισμούς θα είναι τουλάχιστον τρεις φορές το ονομαστικό ρεύμα για μία γεννήτρια, προκειμένου να εντοπίσει αξιόπιστα τα σφάλματα, για την εκκαθάριση ελαττωματικών τμημάτων. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος βρίσκεται με αριθμητική προσομοίωση ή με αναλυτικές μεθόδους όπως ορίζεται στο IEC.

### **Υπολογισμοί σφαλμάτων γείωσης**

Εάν μία φάση βραχυκυκλωθεί στο έδαφος, ένα ρεύμα σφάλματος γείωσης θα ρέει . Το μέγεθός του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο γείωσης του συστήματος, οι οποίες είναι:

- Αβάσιμο: Τα ρεύματα σφάλματος γείωσης θα ρέουν ακόμα λόγω της χωρητικής σύζευξης μεταξύ υγιών φάσεων και εδάφους, συνήθως με τη σειρά μερικών ενισχυτών σε μία εγκατάσταση πλοίου. Απαιτείται για δεξαμενόπλοια από τη SOLAS.
- Γείωση χαμηλής αντίστασης: Τα ρεύματα σφάλματος γείωσης θα ρέουν μέσω του σφάλματος γείωσης με μία μικρή αντίσταση γείωσης αντιστάτη περιορίζοντας το ρεύμα σφάλματος σε όχι λιγότερο από 100 A.
- Γείωση υψηλής αντίστασης: Τα ρεύματα σφάλματος γείωσης θα ρέουν μέσω του σφάλματος γείωσης, με μία υψηλή αντίσταση γείωσης αντιστάτη, περιορίζοντας το ρεύμα σφάλματος γενικά κάτω από 20 A.
- Βιδωμένη γείωση: Δημιουργήστε ένα υψηλό ρεύμα σφάλματος γείωσης, με τη σειρά ενός ρεύματος βραχυκυκλώματος.
- Γείωση πηνίου: Με μία κατάλληλη συντονισμένη γείωση πηνίου, το ρεύμα σφάλματος είναι θεωρητικά πολύ χαμηλό. Δε χρησιμοποιείται συνήθως σε πλοία, κυρίως επειδή η διαμόρφωση δικτύου ποικίλλει και ο συντονισμός του πηνίου δεν είναι πρακτικός.

Η γείωση του συστήματος σε πλοία είναι συνήθως είτε χαμηλής είτε υψηλής αντίστασης γείωσης του ουδέτερου σημείου του συστήματος ή αβάσιμη. Μπορεί επίσης να είναι ένας συνδυασμός αυτών σε διάφορα μέρη του συστήματος διανομής.

Οι υπολογισμοί σφαλμάτων γείωσης γίνονται για να διασφαλίσουν ότι το ρεύμα σφάλματος είναι αρκετά χαμηλό για να μειώσει τον κίνδυνο του βλαβερού εξοπλισμού, και να καθορίσει τα επίπεδα που είναι απαραίτητα για τη ρύθμιση των ρελέ ανίχνευσης βλάβης γείωσης.

Για ορισμένα πλοία (ειδικά δεξαμενόπλοια), μπορεί να είναι επιθυμητό ή να απαιτηθεί να λειτουργήσει με απομονωμένο ουδέτερο σημείο για να μειώσει τα ρεύματα σφάλματος στο ελάχιστο. Λόγω της χωρητικότητας του συστήματος, ένα ρεύμα σφάλματος με ένα τυπικό μέγεθος κάποιων Αμπέρ θα συνεχίσει να ρέει μέσω του σφάλματος γείωσης. Το σύστημα ισχύος μπορεί να επιτρέπεται να συνεχίσει τη λειτουργία με τέτοια χαμηλά ρεύματα σφάλματος έως ότου να είναι πιθανό να αποσυνδέσει και επισκευάσει τα ελαττωματικά μέρη χωρίς μεγάλες διαταραχές στις λειτουργίες. Τα μειονεκτήματα με αυτή τη μέθοδο γείωσης είναι ότι κάποιος μπορεί να αντιμετωπίσει υψηλές υπερτάσεις λόγω απήχησης στα κυκλώματα ρεύματος βλάβης, και μπορεί επίσης να είναι δύσκολο να προσδιορίσει σε ποιόν τομέα συνέβη το ρεύμα βλάβης.

Μία γείωση υψηλής σύνθετης αντίστασης ουδέτερου σημείου περιορίζει τα ρεύματα σφάλματος γείωσης συνήθως σε λιγότερο από 20 Α. Επίσης, με αυτό το ρεύμα σφάλματος μπορεί να επιτρέπεται να συνεχίσει η λειτουργία με βλάβη για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Ο αντιστάτης γείωσης θα μειώσει τον κίνδυνο των ταλαντώσεων απήχησης και είναι ευκολότερο να εντοπίσει και αποσυνδέσει το ελαττωματικό τμήμα του συστήματος ισχύος. Η γείωση ουδέτερου σημείου υψηλής σύνθετης αντίστασης είναι κανονικά η προτιμώμενη μέθοδος σε συστήματα μέσης τάσης.

Η γείωση ουδέτερου σημείου χαμηλής σύνθετης αντίστασης δίνει υψηλά ρεύματα βλάβης γείωσης και μία βλάβη γείωσης πρέπει να εκκαθαριστεί αποσυνδέοντας αμέσως τα ελαττωματικά μέρη (συνήθως <200ms). Σε σύγκριση με το απομονωμένο και ουδέτερο σημείο γείωσης υψηλής σύνθετης αντίστασης, αυτή η μέθοδος θα μειώσει την τάση πίεσης στις υγιείς φάσεις κατά τη διάρκεια της βλάβης.

### **Μελέτη συντονισμού/επιλεκτικότητας ρελέ**

Κάθε τροφοδότης μέσα και έξω από τον πίνακα διανομής είναι εξοπλισμένος με ρελέ προστασίας ή ασφάλειες για εντοπισμό και αποσύνδεση σε βραχυκύκλωμα, παρατεταμένες

συνθήκες υπερφόρτωσης, και σφάλμα γείωσης. Σφάλματα γείωσης με χαμηλά ρεύματα βλάβης μπορεί να γίνουν αποδεκτά για συνεχή λειτουργία.

Ένα ρελέ υψηλού ρεύματος/βραχυκυκλώματος είναι συνήθως ρυθμιζόμενο από το επίπεδο των ρευμάτων βλάβης και το χρόνο αποσύνδεσης. Οι ασφάλειες έχουν αντίστοιχα μία συγκεκριμένη χαρακτηριστική τρέχουσα ώρα που έχει επιλεγεί για την εφαρμογή. Μία κανονική κατάσταση φορτίου δεν πρέπει να ξεκινήσει μία αποσύνδεση. Εάν το ρεύμα φορτίου είναι υψηλότερο από την καθορισμένη κανονική κατάσταση, δηλαδή σε υπερφόρτωση, το ρελέ ξεκινά ένα μετρητή χρόνο, και αποσυνδέεται μετά από μία ορισμένη και προκαθορισμένη χρονική καθυστέρηση. Εάν το ρεύμα φορτίου είναι ακόμα υψηλότερο, το ρελέ ξεκινά έναν άλλο μετρητή χρόνο, ο οποίος αποσυνδέει το τμήμα μετά από μία μικρότερη χρονική περίοδο, που ορίζεται από τη μελέτη επιλεκτικότητας με τέτοιο τρόπο που θα πρέπει να ενεργοποιούνται πρώτα οι συσκευές προστασίας σε χαμηλότερα μέρη του συστήματος και αργότερα η προστασία σε υψηλότερα μέρη.

Η προσαρμογή αυτών των ρυθμίσεων ή η επιλογή των ασφαλειών πρέπει, σύμφωνα με κανόνες και κανονισμούς, να εκκαθαρίζουν κάθε βλάβη επιλεκτικά, αποσυνδέοντας ένα ελάχιστο από το σύστημα διανομής που περιορίζεται στα μέρη τα οποία επηρεάζονται άμεσα από τη βλάβη. Αποκλίσεις μπορεί να είναι απαραίτητες, εάν οι συνέπειες δε θεωρούνται κρίσιμες.

### **Αρμονική παραμόρφωση**

Το επίπεδο αρμονικής παραμόρφωσης μπορεί να είναι σημαντικό σε ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης, καθώς τα κύρια φορτία είναι συνήθως κινητήρες πρόωσης/προωθητήρας μεταβλητής ταχύτητας με μετατροπείς συχνότητας. Οι αρμονικές και η αρμονική ανάλυση περιγράφονται σε μία ξεχωριστή ενότητα.

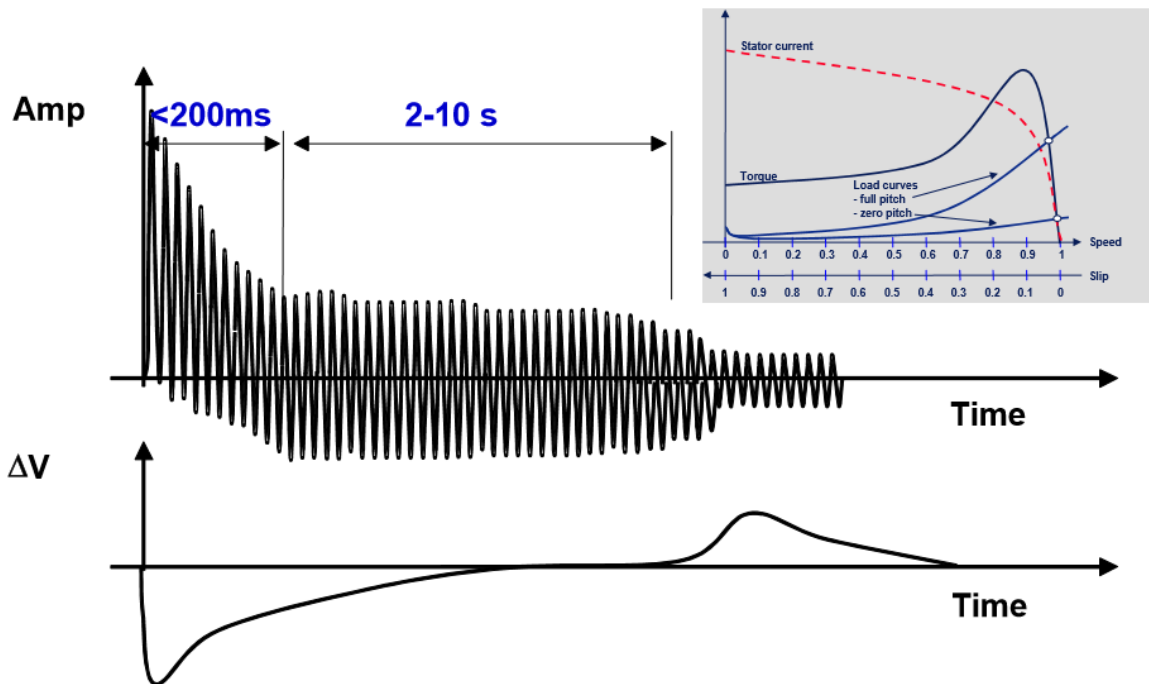
### **Υπολογισμοί πτώσης τάσης**

Κατά την εκκίνηση των βαρέων καταναλωτικών κινητήρων ή την ενεργοποίηση μεγάλων μετασχηματιστών, το μεταβατικό ρεύμα εκκίνησης μπορεί να είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα. Για έναν κινητήρα, συνήθως 5-8 φορές υψηλότερο, και για ένα μετασχηματιστή, πάνω από 10-12 φορές υψηλότερο.

Μία τυπική μεταβατική εκκίνηση του κινητήρα με έναν απευθείας σε σύνδεση κινητήρα εκκίνησης (DOL) φαίνεται στο Σχήμα 3.58. Το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα, είναι παρόμοιο με ένα βραχυκύκλωμα, μία πολύπλοκη χρονική μεταβλητή καμπύλη που περιέχει



έναν όρο DC, και μεταβατικούς όπως επίσης και σταθερούς όρους κατά τη διάρκεια του χρόνου επιτάχυνσης. Ο χρόνος για επιτάχυνση σε πλήρη ταχύτητα καθορίζεται από την ονομαστική τιμή του κινητήρα και την καμπύλη φορτίου του κινητήρα.



Σχήμα 3.58: DOL (απευθείας σύνδεση) ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα και μεταβατική τάση.

Η σχετική μεταβατική τάση εμφανίζεται ως μία σχεδόν στιγμιαία μέγιστη πτώση αμέσως μετά τη σύνδεση του κινητήρα. Έπειτα, το AVR αρχίζει να αυξάνει τη μαγνήτιση για να αντισταθμίσει τα αυξημένα ρεύματα φορτίου των γεννητριών. Όταν ο κινητήρας φτάσει τη στιγμή ανύψωσης, τα ρεύματα του στάτορα μειώνονται γρήγορα και αφού τώρα οι γεννήτριες είναι υπερ-μαγνητισμένες για το νέο φορτίο συμβαίνει μία ορισμένη υπέρβαση τάσης. Τα υψηλά ρεύματα εκκίνησης μπορεί να προκαλέσουν μία σημαντική διαταραχή τάσης στο δίκτυο, και οι απαιτήσεις κλάσης θέτουν ένα όριο για αποδεκτές μεταβολές μεταβατικής τάσης. Αυτό το όριο είναι συνήθως -15% και +20% (DnV).

Υπάρχουν αναλυτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό τέτοιων πτώσεων τάσης, αν και το πιο ακριβές αποτέλεσμα προκύπτει από αριθμητικές προσομοιώσεις.

Για να μην υπερβαίνουν τις απαιτούμενες μεταβολές τάσης, μπορεί να υπάρχει η ανάγκη να προσαρμόσουν τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας ή των μεγάλων καταναλωτών, ή να εισάγουν μέσα για να μειώσουν τα μεταβατικά βήματα εκκίνησης. Για κινητήρες, τέτοια μέσα θα μπορούσαν να είναι συσκευές ομαλής εκκίνησης, εκκινήτες αστέρα-δέλτα, ή εκκίνηση αυτο-μετασχηματιστών. Για μετασχηματιστές, θα μπορούσε να αξιολογηθεί ο προ-

μαγνητισμός. Γεννήτριες με μεταβαλλόμενη αντίδραση θα δώσουν επίσης μία χαμηλότερη μεταβατική τάση πτώσης.

### **3.6.4 Εκτεταμένη Ανάλυση και Μελέτες**

#### **Μεταβατική ανάλυση**

Επιπρόσθετα στους υπολογισμούς σφάλματος και στους υπολογισμούς πτώσης τάσης που αναφέρθηκαν, υπάρχει περιστασιακά η ανάγκη για πιο εμπειριστατωμένη ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς του δικτύου κατά τη διάρκεια και μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Τυπικά, μια τέτοια ανάλυση περιλαμβάνει σταθερότητα τάσης και συχνότητας (δηλαδή θα αποκατασταθεί η τάση και η συχνότητα των γεννητριών μετά την εκκαθάριση του σφάλματος;) και εκ νέου επιτάχυνση των φορτίων του κινητήρα (οι απαραίτητοι κινητήρες θα μπορούν να επιταχυνθούν χωρίς να σβήσουν μετά την εκκαθάριση του σφάλματος;).

Τέτοιες αναλύσεις είναι εκτεταμένες και απαιτούν ακριβή μοντελοποίηση του δικτύου και των ρυθμιστών για τάση και συχνότητα για να είναι αξιόπιστες. Συνήθως γίνεται μόνο όταν θεωρείται απαραίτητο, και σε συστήματα με μεγάλους κινητήρες.

#### **Ανάλυση αξιοπιστίας και FMEA**

Ιδιαίτερα για πλοία όπου η διαθεσιμότητα του συστήματος ισχύος είναι απαραίτητη και με απαιτήσεις πλεονασμού, υπάρχει κανονικά ένα αίτημα για ανάλυση αξιοπιστίας ή Ανάλυση Αποτυχίας Λειτουργίας και Επιπτώσεων (FMEA). Αυτά προσδιορίζουν τις συνέπειες των σφαλμάτων σε εξαρτήματα ή σύστημα, την κρισιμότητά τους και αξιολογούν την πιθανότητα για τέτοια γεγονότα. Στόχος του είναι να προσδιορίσει τα κρίσιμα χαρακτηριστικά που μπορούν να βελτιωθούν στο σχεδιασμό ή να εξεταστούν ειδικά για λειτουργίες.

Η ανάλυση αξιοπιστίας είναι μία ποσοτική προσέγγιση για να βρουν την πιθανότητα για ορισμένα σενάρια σφάλματος, όπως απώλεια τμημάτων της προώθησης ισχύος, διακοπή ρεύματος, απώλεια ικανότητας εντοπισμού θέσης, κλπ. Αυτό επιτυγχάνεται κανονικά με χρήση μιας τριπλής ανάλυσης και υπολογισμού σφάλματος, γνωστή από στατιστικές θεωρίες.

Το FMEA είναι μία πιο ποιοτική προσέγγιση, εστιάζοντας στον εντοπισμό των συνεπειών ορισμένων σεναρίων σφάλματος, με μία κατάλληλη περιγραφή του πώς τέτοια σενάρια εντοπίζονται, και αποφεύγονται/αντισταθμίζονται.

Τυπικά στοιχεία για κάθε σενάριο είναι η περιγραφή των:

1. Αρχικές συνθήκες.
2. Τρόπος αποτυχίας των εξαρτημάτων.
3. Επιδράσεις στο σύστημα.
4. Συνέπειες (Όχι, χαμηλή, υψηλή, σοβαρή, καταστροφική).
5. Περιστατικό (Σπάνια, σπάνια, κανονικά, συχνά).
6. Ανίχνευση και διορθωτικές ενέργειες.
7. Κρισιμότητα (Αποδεκτό, μη αποδεκτό).

Το αποτέλεσμα είναι κανονικά εισαγωγή σε μία συνολική ανάλυση FMEA για τη μονάδα, τεκμηριώνοντας την ανάγκη για βελτιώσεις σχεδιασμού, λειτουργικές οδηγίες, κλπ.

### **3.7 Αρμονική Παραμόρφωση**

Όταν το συνδεδεμένο φορτίο σε ένα δίκτυο δεν είναι γραμμικό, δηλαδή δεν έλκει ημιτονοειδή ρεύματα, τα ρεύματα φορτίου θα διαστρεβλώνουν τις ημιτονοειδείς τάσεις. Αυτή η απόκλιση από μία ημιτονοειδή τάση ή μορφή κύματος φορτίου ονομάζεται αρμονική παραμόρφωση.

Η παραμόρφωση της μορφής κύματος φορτίου μπορεί να οδηγήσει σε:

- Ταχύτερη γήρανση του μονωτικού υλικού: Η αυξημένη διασπορά ισχύος (απώλειες) σε εξοπλισμό που συνδέεται με το δίκτυο, όπως γεννήτριες, κινητήρες, μετασχηματιστές, καλώδια, κλπ, από τα αρμονικά ρεύματα, μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση και χειροτέρευση της μόνωσης, και μειωμένο χρόνο ζωής του εξοπλισμού.
- Υπερφόρτωση ηλεκτρονικού εξοπλισμού: Το αυξημένο ρεύμα του φορτίου του ηλεκτρονικού εξοπλισμού το οποίο έχει σχεδιαστεί για παροχή ημιτονοειδούς τάσης, μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση και δυσλειτουργία αυτού του εξοπλισμού.

- Δυσλειτουργία: Η παραμορφωμένη μορφή κύματος μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή ή εσφαλμένα σήματα μέτρησης, εάν ο εξοπλισμός δεν έχει σχεδιαστεί για την πραγματική παραμόρφωση. Είναι ιδιαίτερα απαραίτητο ότι τα συστήματα μέτρησης των συσκευών παρακολούθησης και προστασίας κατασκευάζονται για πραγματικές μετρήσεις rms έτσι ώστε να λειτουργούν κανονικά.

Το επίπεδο αρμονικής παραμόρφωσης μπορεί να είναι σημαντικό σε ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης, όπως τα κύρια φορτία είναι συνήθως μονάδες προώθησης/προωθητήρας μεταβλητής ταχύτητας με μετατροπείς συχνότητας.

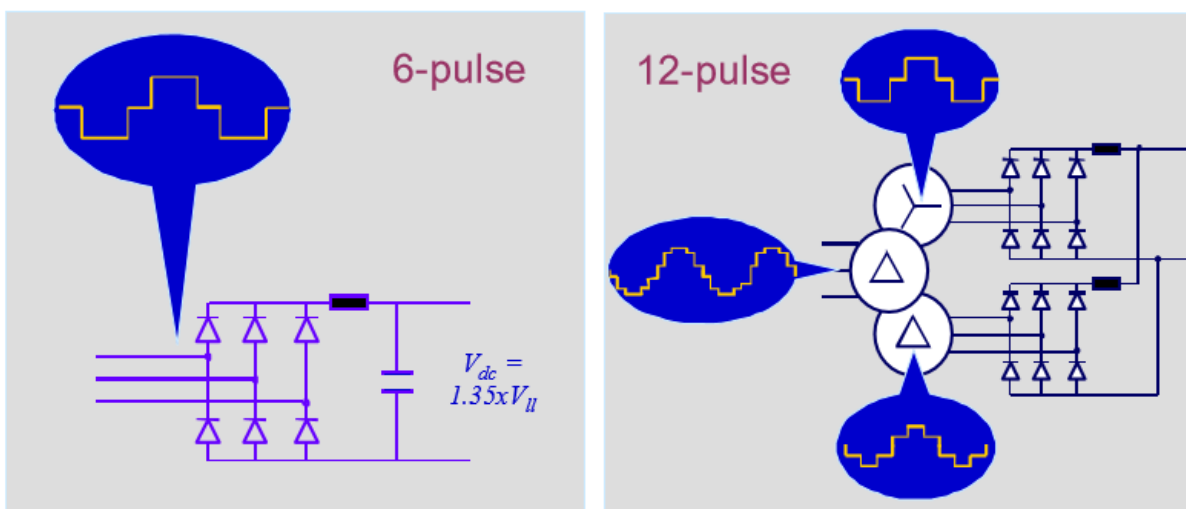
Οι κανόνες και οι κανονισμοί δίνουν συνήθως κατευθυντήριες γραμμές ή απαιτήσεις που περιορίζουν την αρμονική παραμόρφωση σε ένα δίκτυο πλοίων. Ωστόσο, αυτοί οι περιορισμοί δεν αποτελούν εγγύηση για σωστή λειτουργία. Είναι επομένως απαραίτητο να μπορεί να προβλέψει την αρμονική παραμόρφωση, να αξιολογήσει τα αποτελέσματα, και να παρουσιάσει τα κατάλληλα μέσα για τη διαχείριση της παραμόρφωσης τάσης, χωρίς λειτουργικές βλάβες καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.

### 3.7.1 Αρμονικές των Μετατροπέων VSI

Κάθε περιοδική μορφή κύματος μπορεί, γενικά, να εκφράζεται από μία σειρά Fourier, όπως η άπειρη σειρά των ημιτονοειδών συστατικών και ενός όρου DC

$$u(t) = u_{dc} + u_1 \sin \omega_1 t + u_2 \sin (2\omega_1 t + \phi_2) + u_3 \sin (3\omega_1 t + \phi_3) + \dots \quad (3.10)$$

$$+ u_h \sin (h\omega_1 t + \phi_h) + \dots$$



Σχήμα 3.59: Ιδανικές μορφές κύματος σε έναν VSI μετατροπέα 6 και 12 παλμών.

Μερικοί από τους όρους μπορεί να είναι μηδενικοί, όπως οι όροι DC στις περισσότερες AC εφαρμογές και οι τριπλές αρμονικές σε συμμετρικά τριφασικά συστήματα που είναι απομονωμένα από το έδαφος.

Οι μετατροπείς συχνότητας είναι εγγενώς μη γραμμικοί και τα ρεύματα σε μία μονάδα κινητήρα δεν είναι ημιτονοειδή αλλά παραμορφωμένα από αρμονικά συστατικά γενικώς οποιασδήποτε τάξης, αλλά όπως θα δούμε, τα περισσότερα από τα συστατικά συχνότητας είναι μηδενικά κάτω από ιδανικές συνθήκες.

Όταν αναλύεται η αρμονική παραμόρφωση της παροχής δικτύου, μπορεί κάποιος κανονικά, τουλάχιστον αρχικά, να αγνοήσει τη συμπεριφορά της πλευράς του κινητήρα, υποθέτοντας την ιδανική αποσύνδεση ανάμεσα στο δίκτυο και τις πλευρές του κινητήρα από το σύνδεσμο DC. Στο Σχήμα 3.41, ένας VSI μετατροπέας με διορθωτή διόδου και εξομαλυντικό DC επαγωγέα και πυκνωτή έχει παρουσιαστεί σε μία διαμόρφωση 6 παλμών, και μία διαμόρφωση 12 παλμών στο Σχήμα 3.48. Εάν τα συστατικά εξομάλυνσης DC είναι μεγάλα, οι μορφές κύματος ρεύματος θα πλησιάσουν τα ιδανικά σχήματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.59.

Με παρατήρηση, μπορεί κάποιος να δει ότι το ρεύμα στο διορθωτή 12 παλμών είναι ίσο με το διορθωτή 6 παλμών, αλλά η μετατόπιση φάσης του  $Y$  – του δευτερεύοντος συνδεδεμένου μετασχηματιστή θα μετατοπίσει όλες τις τάσεις και τα ρεύματα κατά  $30^\circ$ , σε σύγκριση με τον  $D$  – δευτερεύοντα συνδεδεμένο. Τα σχήματα κύματος του ρεύματος που παρουσιάζονται, είναι εκείνα των περιελίξεων του μετασχηματιστή.

Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας και ο μετασχηματιστής είναι συμμετρικά σχεδιασμένοι και ότι το στάδιο απόδοσης του μετατροπέα θεωρείται ότι αποσυνδέεται από το διορθωτή ρεύματος, μόνο τα χαρακτηριστικά αρμονικά συστατικά υπάρχουν στα ρεύματα εισόδου στην παροχή γραμμής του μετατροπέα συχνότητας. Για έναν μετατροπέα 6 παλμών αυτά είναι

$$h = 6xn \pm 1, \quad n = 1, 2, \dots \quad (3.11)$$



$$h = 5, 7, 11, 13, \dots \quad (3.12)$$

Σε έναν μετατροπέα 12 παλμών, πολλαπλάσια της έκτης ( $\pm 1$ ) αρμονίας, τα οποία βρίσκονται στις δευτερεύουσες και τριτογενείς περιελίξεις του μετασχηματιστή τροφοδοσίας,

εξαιτίας της μετατόπισης  $30^\circ$  θα ακυρωθούν στις πρωτογενείς περιελίξεις και έτσι τα εναπομείναντα συστατικά αρμονικού ρεύματος θα είναι της τάξεως

$$h = 12xn \pm 1, \quad n = 1, 2, \dots \quad (3.13)$$



$$h = 11, 13, 23, 25, \dots \quad (3.14)$$

Η συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) είναι ένα μέτρο συνολικού περιεχομένου των αρμονικών συστατικών σε ένα μετρημένο ρεύμα,  $THD(i)$ , ή τάση,  $THD(u)$

$$THD(i) = 100\% \times \frac{\text{---}}{\text{---}}, \quad (3.15)$$

και

$$THD(u) = 100\% \times \frac{\text{---}}{\text{---}}, \quad (3.16)$$

όπου  $u_1, i_1$  είναι η θεμελιώδης rms αξία της τάσης και του ρεύματος, και  $u_h, i_h$  είναι η τιμή rms της  $h^{\text{th}}$  αρμονικής της τάσης (ή του ρεύματος).

### 3.7.2 Αρμονικές των CSI Μετατροπέων

Για έναν CSI μετατροπέα, οι χαρακτηριστικές αρμονικές θα είναι παρόμοιες με έναν μετατροπέα VSI. Ωστόσο, η αποσύνδεση μεταξύ της γραμμής τροφοδοσίας και των πλευρών του κινητήρα δεν είναι τόσο ιδανική όσο για το VSI, και οι αρμονικές των γραμμικών ρευμάτων επηρεάζονται έντονα από τις αρμονικές πλευρές του κινητήρα. Επιπρόσθετα στις καθарές αρμονικές, μία μονάδα CSI παράγει επίσης μη ακέραιες αρμονικές στο δίκτυο ισχύος. Οι μη ακέραιες αρμονικές είναι παρεμβαλλόμενα συστατικά σε συχνότητες που δεν είναι ακριβή πολλαπλάσια του συστήματος συχνότητας.

Σε μία μονάδα CSI αυτές οι μη ακέραιες αρμονικές οφείλονται στις συχνότητες παλμού DC που προκαλούνται από το μετατροπέα μηχανής και γι' αυτό το λόγο είναι σύγχρονες με τη συχνότητα κινητήρα σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο

$$f_i = hf_N \pm pf_M, \quad (3.17)$$

όπου

$f_i$  Μη ακέραιο αρμονικό συστατικό.

$h$  Χαρακτηριστικό αρμονικό συστατικό από μονάδες (1, 5, 7, 11, 13 κλπ).

$f_N$  Συχνότητα δικτύου.

$p$  Αριθμός παλμού της μονάδας.

$f_M$  Συχνότητα μηχανής.

Το πλάτος των μη ακέραιων αρμονικών συστατικών καθορίζεται κυρίως από το μέγεθος του DC επαγωγέα, δηλαδή ο μεγαλύτερος επαγωγέας τα μικρότερα πλάτη. Δεύτερον, τα πλάτη είναι γενικά πολύ μικρότερα από τα ακέραια αρμονικά συστατικά.

### 3.7.3 Αρμονικές των Κυκλομετατροπέων

Για τους κυκλομετατροπείς το περιεχόμενο αρμονικού συστατικού του ρεύματος εισόδου θα είναι μία λειτουργία τόσο της συχνότητας εισόδου όσο και της συχνότητας εξόδου, για ένα κυκλομετατροπέα 6 παλμών

$$f = (6 \times n \pm 1) f_i \pm (6 \times p) f_o, \quad n=1, 2, \dots, \quad p=0, 1, \dots \quad (3.18)$$

όπου  $f_i$  είναι η θεμελιώδης συχνότητα εισόδου και  $f_o$  είναι η θεμελιώδης συχνότητα εξόδου. Όπως φαίνεται, υπάρχει και εδώ ένα πλούσιο περιεχόμενο τόσο των αρμονικών όσο και των μη ακέραιων αρμονικών στο ρεύμα, και συνεπώς στα σχήματα κύματος τάσης.

Το πλάτος των μη ακέραιων αρμονικών είναι κανονικά σημαντικά υψηλό, και θεωρείται γενικά δύσκολο να καθιερωθεί ένας αποδοτικός συντονισμός ενός παθητικού φίλτρου για να μειώσει το αρμονικό επίπεδο με φορτία κυκλομετατροπέα.

### 3.7.4 Περιορισμοί από τις Εταιρείες Ταξινόμησης

Οι εταιρείες ταξινόμησης έχουν πρόσφατα ξεκινήσει να ορίζουν περιορισμό των επιτρεπόμενων μορφών κύματος THD για τάση στους πίνακες διανομής. Για παράδειγμα, το DnV λέει ότι για τα συστήματα διανομής, το THDv δεν πρέπει κανονικά να υπερβαίνει το 5%, εκτός και αν τεκμηριώνεται ότι ο επηρεασμένος εξοπλισμός σχεδιάζεται και δοκιμάζεται

σύμφωνα με τις πραγματικές συνθήκες. Δεν καθορίζεται το πώς πρέπει να γίνει η τεκμηρίωση και η δοκιμή.

Μία μελέτη αρμονικής ανάλυσης απαιτείται συνήθως για τεκμηρίωση του επιπέδου αρμονικής παραμόρφωσης και για να βρεθούν κριτήρια διαστασιολόγησης για γεννήτριες, μετασχηματιστές, και εάν είναι απαραίτητο, φίλτρα για μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης.

### 3.7.5 Αρμονικές των Ιδανικών Μορφών Κύματος Ρεύματος 6 και 12 Παλμών

Για τις εξιδανικευμένες μορφές κύματος ρεύματος στο Σχήμα 3.59 α), κάποιος μπορεί να διαπιστώσει το αρμονικό φάσμα από την ακόλουθη σχέση (εφόσον η μορφή κύματος είναι μία περίεργη λειτουργία με μηδενικό μέσο όρο)

$$I_h = - \quad \text{---} \quad (3.19)$$

Χρησιμοποιώντας αυτή τη σχέση, κάποιος βρίσκει το ακόλουθο φάσμα, όπου  $\hat{I}$  είναι το πλάτος κύματος

$$\begin{aligned} i_1 &= \hat{I}, \\ i_2 &= i_3 = i_4 = 0, \\ i_5 &= - \\ i_6 &= 0, \\ i_7 &= - \\ i_8 &= i_9 = i_{10} = 0, \\ i_{11} &= - \\ i_{12} &= 0, \\ &\cdot \\ &\cdot \end{aligned}$$

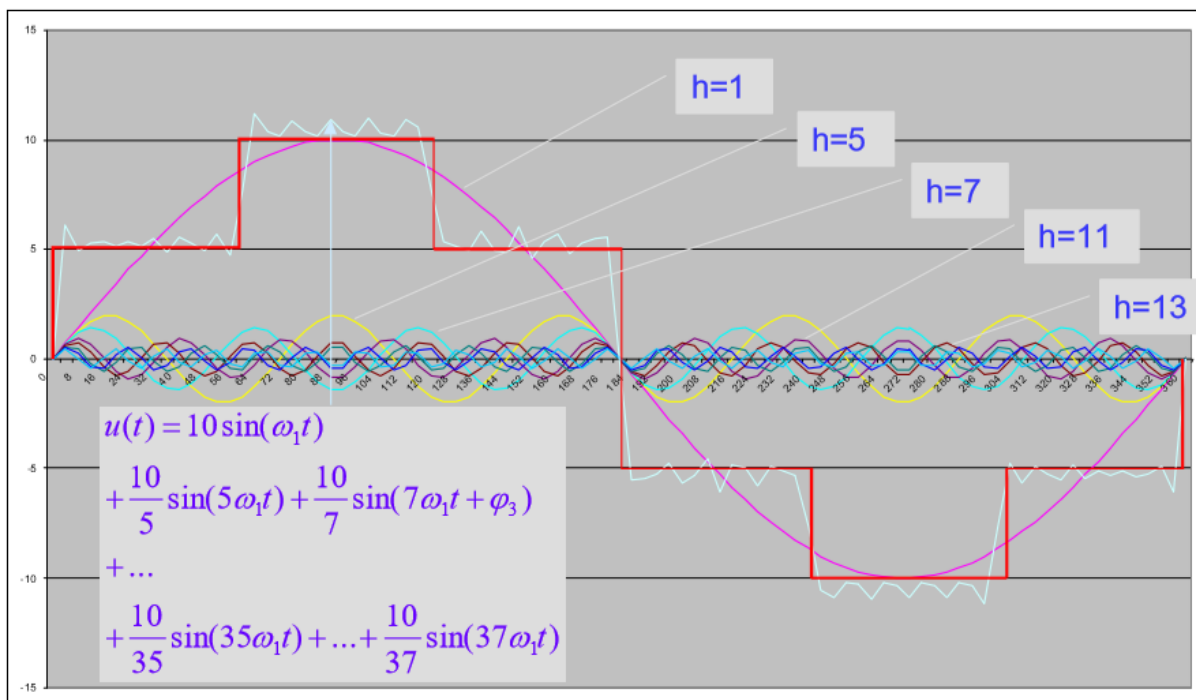


Αυτό είναι

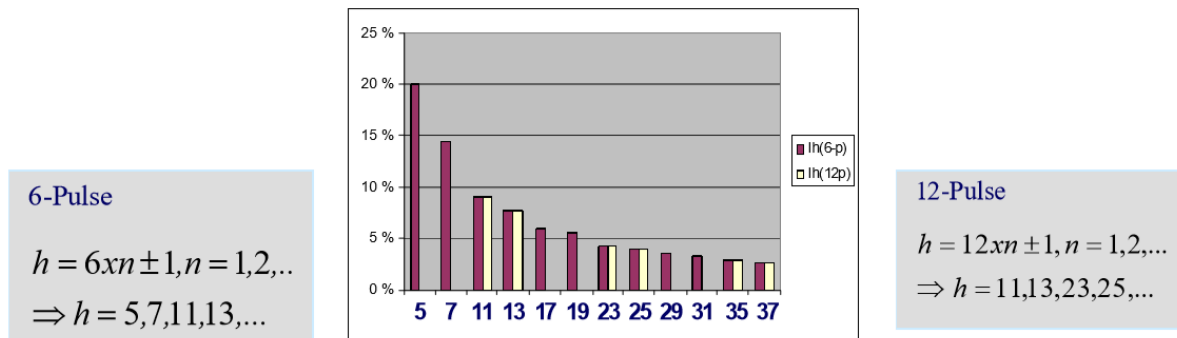
$$i(t) = \hat{I} \sum_{n=1, 2, 3, 4, \dots} \dots \quad (3.20)$$

Το Σχήμα 3.20 παρουσιάζει το αποτέλεσμα αυτής της σειράς, όπου περιλαμβάνονται οι όροι πάνω από την 37<sup>η</sup> αρμονική, που δείχνουν πώς η προκύπτουσα μορφή κύματος συγκλίνει προς το αρχικό σχήμα έξι παλμών.

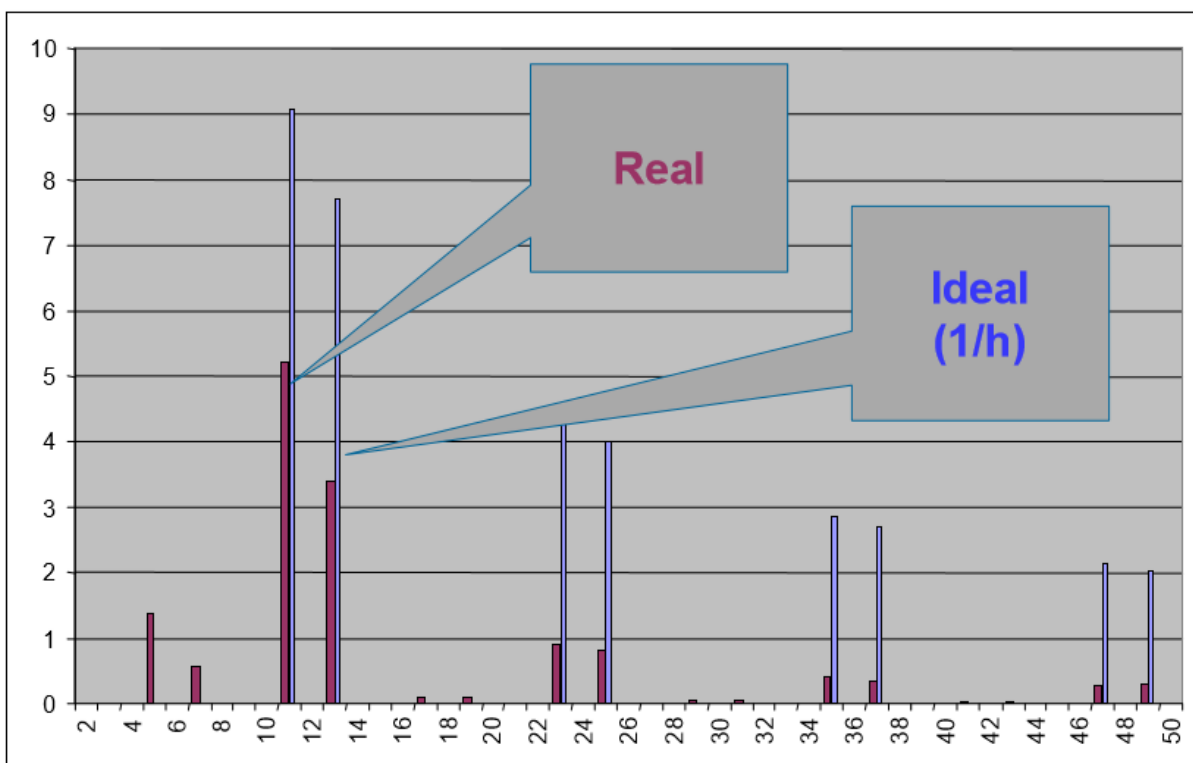
Στη μορφή κύματος ρεύματος 12 παλμών, οι αρμονικές της τάξης 5, 7, 17, 19, κλπ, ακυρώνονται λόγω της μετατόπισης φάσης 30° του τριφασικού μετασχηματιστή. Αυτές οι αρμονικές θα ρέουν στις περιελίξεις του μετασχηματιστή, αλλά με αντίθετη φάση, στις δευτερεύουσες περιελίξεις του μετασχηματιστή, και με το άθροισμα, θα κυκλοφορούν μόνο μέσα στο μετασχηματιστή, και δε θα ρέουν μέσα στο δίκτυο. Η συνολική αρμονική παραμόρφωση αυτών των μορφών κύματος ρεύματος μπορεί να βρεθεί με τη σχέση που δίνεται στο (3.15), η οποία επιφέρει THD(i) περίπου 30% για το ρεύμα 6 παλμών, και 15% για το ρεύμα 12 παλμών.



Σχήμα 3.60: Αρμονικές έως και την 37<sup>η</sup> μιας κυματομορφής ρεύματος 6 παλμών.

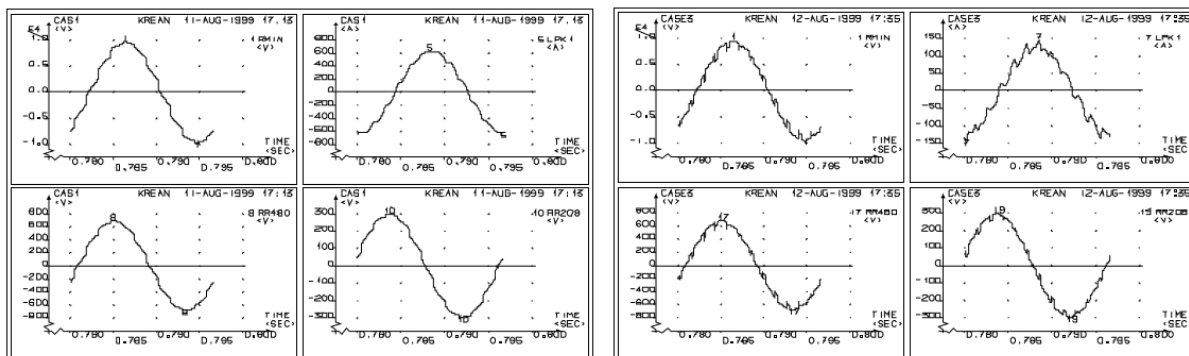


Σχήμα 3.61: Χαρακτηριστικές αρμονικές κυματομορφής ρεύματος 6 και 12 παλμών.



Σχήμα 3.62: Χαρακτηριστικές αρμονικές μιας κυματομορφής ρεύματος 12 παλμών, συγκρίνοντας τις πραγματικές τιμές μιας πραγματικής εγκατάστασης με τα ιδανικά πλάτη του Σχήματος 3.61.

Αυτές είναι οι ιδανικές μορφές κύματος ρεύματος. Στην πράξη, η σύνθετη αντίσταση που οφείλεται στην αυτεπαγωγή, την αντίσταση, και τη χωρητικότητα αλλάζει το τρέχον σχήμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.63. Το αντίστοιχο αρμονικό φάσμα που μπορεί να μετρηθεί σε μία τυπική εγκατάσταση με μετατροπείς VSI παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.62.



Σχήμα 3.63: (α): Παράδειγμα κυματομορφών τάσης πίνακα ελέγχου για ένα σύστημα με μετατροπείς με διορθωτές διόδου γέφυρας. Η THD είναι περίπου 7%. (β): Παράδειγμα κυματομορφών τάσης πίνακα για ένα σύστημα με μετατροπείς μαζί και με διορθωτές διόδου και με θυρίστορ γέφυρας. Η THD είναι περίπου 9%.

Είναι προφανές ότι οι χαρακτηριστικές αρμονικές είναι μικρότερες από τις αναμενόμενες από τις ιδανικές καμπύλες, και ότι οι μη χαρακτηριστικές αρμονικές, εδώ 5<sup>η</sup>, 7<sup>η</sup>, κλπ, οφείλονται σε μη ιδανικούς μετασχηματιστές και σε ανομοιόμορφη κατανομή φορτίου των παράλληλων συνδεδεμένων διορθωτών στο μετατροπέα 12 παλμών.

### 3.7.6 Υπολογισμός της Αρμονικής Παραμόρφωσης

#### Βασικά

Τα αρμονικά ρεύματα που προσελκύνονται από ένα μη γραμμικό φορτίο από το δίκτυο θα διανεμηθούν στο δίκτυο και θα ρέουν μέσω του άλλου εξοπλισμού στο δίκτυο ισχύος. Εάν θεωρηθεί ότι είναι μία πηγή ρεύματος των αρμονικών συστατικών ρεύματος, είναι προφανές, ότι τα αρμονικά ρεύματα θα ρέουν δια μέσου των διαδρομών με τη χαμηλότερη σύνθετη αντίσταση για τις αρμονικές. Αυτές είναι συνήθως οι γεννήτριες λειτουργίας, οι μεγάλοι κινητήρες, και οι μεγάλοι μετασχηματιστές διανομής σε άλλα (υψηλότερα ή χαμηλότερα) επίπεδα τάσης.

Υπάρχουν δύο τύποι εργαλείων προσομοίωσης διαθέσιμοι: η προσομοίωση τομέα χρόνου και η πιο κοινώς εφαρμοσμένη, η οποία υπολογίζει τον τομέα συχνότητας. Το πλεονέκτημα των εργαλείων υπολογισμού του τομέα συχνότητας είναι ότι ο χρόνος και η εργασία για μοντελοποίηση και υπολογισμό των μεγάλων συστημάτων είναι πολύ πιο μικρή από εκείνη για μία προσομοίωση του τομέα χρόνου. Ωστόσο, η ακρίβεια θα είναι συνήθως χαμηλότερη, αφού κάποιος πρέπει να αποφασίσει το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος φορτίου, το

οποίο στην πραγματικότητα εξαρτάται από τη διαμόρφωση δικτύου και μπορεί να προσδιοριστεί με προσομοίωση τομέα χρόνου ή με ισοδύναμα στοιχεία από παρόμοια συστήματα. Θα πρέπει να ληφθούν ιδιαίτερες σκέψεις για τον τύπο PWM των ελεγκτών και τη χρήση των παθητικών φίλτρων, όπου συνιστώνται έντονα προσομοιώσεις τομέα χρόνου για να αποκτώνται αποτελέσματα που είναι απαραίτητα για σωστό σχεδιασμό και διαστασιολόγηση.

Τα κυκλώματα προσομοίωσης μπορούν κανονικά να θεωρηθούν ιδανικά, με συμμετρική παροχή και παραμελημένη σύνθετη αντίδραση σε πίνακες διανομής και καλώδια. Στην πράξη, οι μετασχηματιστές και οι μετατροπείς δεν είναι ιδανικά συμμετρικοί, ούτε είναι η σύνθετη αντίσταση του δικτύου. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να υποθεθεί ότι υπάρχουν μη χαρακτηριστικά συστατικά ρεύματος. Αυτά τα αποτελέσματα θα έχουν συνήθως μία αμελητέα επίδραση, εάν δε διεγερθούν οι συχνότητες απήχησης.

Το καλώδιο και η έντονη αντίσταση φορτίου, ιδιαίτερα τα χωρητικά στοιχεία, μπορεί να αυξήσουν την παραμόρφωση σε διανομές χαμηλής τάσης. Σε δίκτυο με παραμόρφωση υψηλής τάσης θα πρέπει κάποιος να αποφεύγει τη χρήση φωτισμού αγωγού με χωρητικούς αντισταθμιστές.

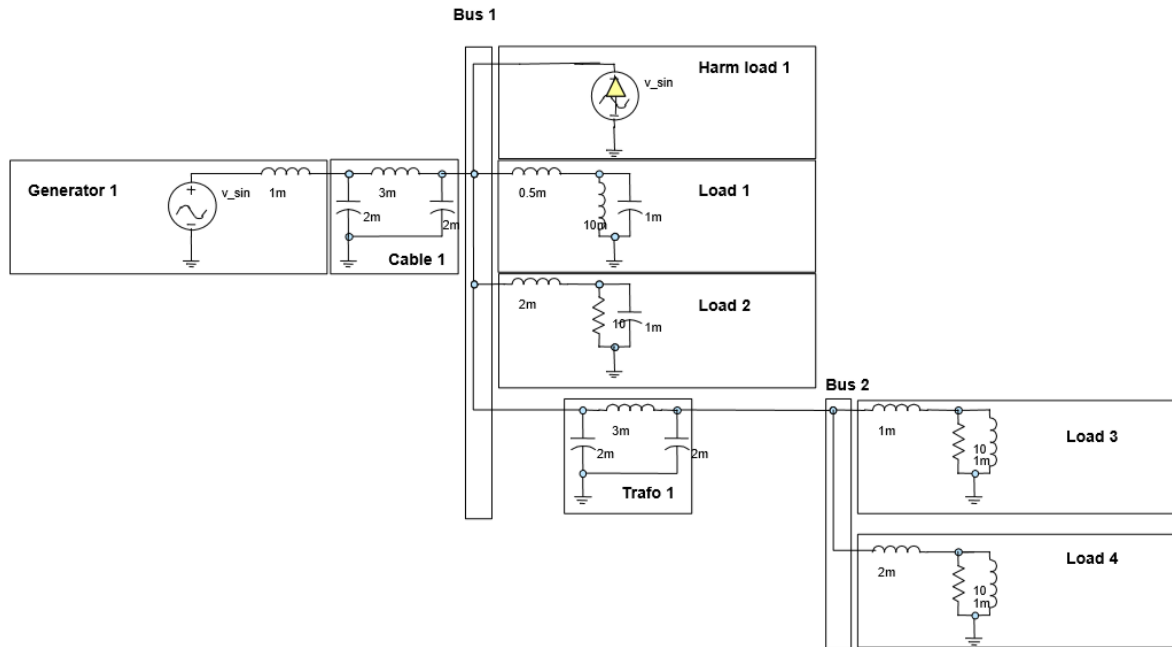
Ένα παράδειγμα των μορφών κύματος της τάσης και των ρευμάτων του πίνακα διανομής προς τον προωθητήρα υπολογίζεται από το πρόγραμμα ανάλυσης πεδίου χρόνου KREAN και παρουσιάζεται στα δύο Σχήματα παρακάτω. Το Σχήμα 3.63α) δείχνει μία προσομοίωση μόνο με μονάδες τροφοδοσίας με μετατροπείς γέφυρας διόδου. Το Σχήμα 3.63β) δείχνει μία προσομοίωση όπου οι μονάδες τροφοδοσίας με γέφυρα διόδου και μονάδες γεώτρησης με γέφυρα θυρίστορ λειτουργούν ταυτόχρονα.

### **Τομέας Συχνότητας – Αρμονική Εισαγωγή**

Σε αυτή τη μέθοδο, το μη γραμμικό φορτίο αντιπροσωπεύεται από μία αρμονική πηγή ρεύματος, εισάγοντας αρμονικά ρεύματα στο δίκτυο. Το δίκτυο σε όρους γίνεται υπόδειγμα ενός συστήματος όπου τα διάφορα μέρη του, η γεννήτρια, το καλώδιο, ο μετασχηματιστής, κλπ, διαμορφώνονται με ένα κατάλληλο μοντέλο σύνθετης αντίστασης, διαμορφώνοντας την ισχυρή αντίσταση για τα αρμονικά ρεύματα συχνότητας που εισέρχονται από την αρμονική πηγή ρεύματος.

Ένα παράδειγμα τέτοιων μοντέλων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.64, με μία αρμονική πηγή ρεύματος, αντιπροσωπεύοντας το μετατροπέα συχνότητας, και τα μοντέλα σύνθετης αντίστασης για γεννήτρια, καλώδιο, μετασχηματιστές, και φορτία, π.χ. κινητήρες.

Υπολογίζοντας τις προκύπτουσες τάσεις από τα αρμονικά ρεύματα, οι αρμονικές τάσεις βρίσκονται στους κλάδους ή στα σημεία ενδιαφέροντος. Συνοψίζοντας αυτά, η αρμονική παραμόρφωση της τάσης τελικά βρίσκεται.



Σχήμα 3.64: Μοντέλο σύνθετης αντίστασης ενός δικτύου που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του πλαισίου συχνότητας της αρμονικής παραμόρφωσης.

Υπάρχουν αρκετά προγράμματα λογισμικού υπολογισμού που βοηθούν στη δημιουργία και τον υπολογισμό της αρμονικής παραμόρφωσης στον τομέα συχνότητας. Η δημιουργία μεγάλων δικτύων είναι αρκετά απλή από μοντέλα βιβλιοθήκης, και οι χρόνοι υπολογισμού είναι σύντομοι.

Η κύρια πρόκληση είναι να βρεθεί μία καλή αρμονική αναπαράσταση του μετατροπέα, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται τύποι μετατροπέα όπου το αρμονικό φάσμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το δίκτυο, όπως με μετατροπείς VSI. Τα μοντέλα βιβλιοθήκης δεν είναι πάντα αξιόπιστα.

### Τομέας Χρόνου – Προσομοίωση Δικτύου

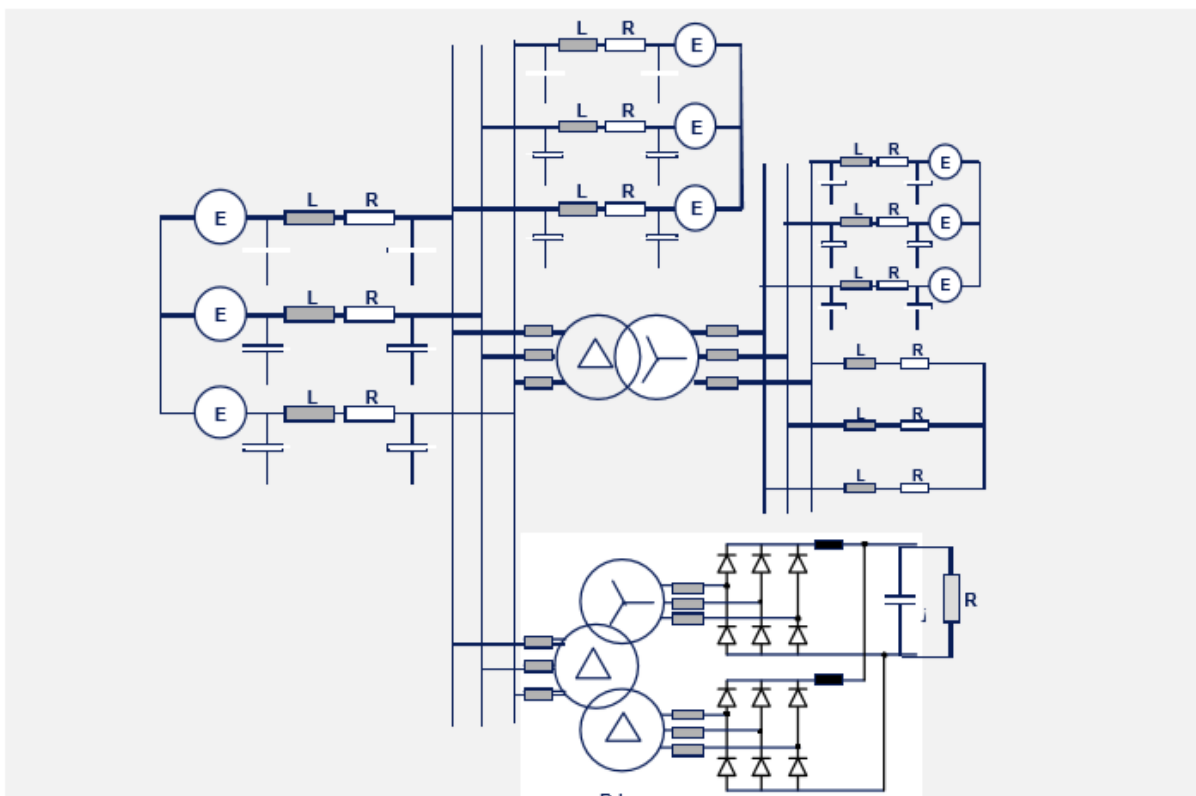
Με την κατασκευή ενός μοντέλου κυκλώματος του δικτύου, με χωριστά μοντέλα σύνθετης αντίστασης, μπορεί κάποιος να εκτελέσει μία προσομοίωση του τομέα χρόνου του συστήματος. Οι αρχικές τιμές τάσεων και ρευμάτων επιλέγονται, και μετά από κάποιο χρόνο

προσομοίωσης, το σύστημα έχει σταθεροποιηθεί επαρκώς ώστε να απεικονίζει σταθερές συνθήκες.

Λαμβάνοντας μία θεμελιώδη περίοδο της τάσης ή της μορφής κύματος ρεύματος ενδιαφέροντος, τότε μπορεί κανείς να εκτελέσει μετασχηματισμό Fourier και να βρει το αρμονικό φάσμα σε οποιοδήποτε σημείο ή κλάδο του συστήματος.

Ένα απλοποιημένο μοντέλο κυκλώματος για το ίδιο σύστημα όπως στο Σχήμα 3.64 παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.65. Είναι αρκετά προφανές ότι ένα πολύπλοκο δίκτυο είναι περίπλοκο στο μοντέλο και στο χρόνο που καταναλώνει για προσομοίωση. Το χρονικό βήμα στην προσομοίωση πρέπει επίσης να είναι σχετικά σύντομο για να δώσει ακριβή αποτελέσματα.

Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι, το μοντέλο αυτό δίνει έναν ακριβή υπολογισμό των τάσεων και των ρευμάτων, και επιπλέον του αρμονικού φάσματος των μη γραμμικών φορτίων.



Σχήμα 3.65: Απλοποιημένο μοντέλο κυκλώματος ενός δικτύου που χρησιμοποιείται σε προσομοίωση χρονικής περιοχής της αρμονικής παραμόρφωσης.

## **Σύγκριση της προσομοίωσης τομέα συχνότητας και χρόνου**

Οι υπολογισμοί τομέα συχνότητας χρησιμοποιούνται ευρέως εξαιτίας απλής μοντελοποίησης και σύντομων χρόνων υπολογισμού. Εάν η αρμονική αναπαράσταση των ρευμάτων μετατροπέα είναι ακριβής, τα αποτελέσματα είναι επίσης ακριβή. Δεν είναι πάντα ξεκάθαρο να βρεθεί η αρμονική αναπαράσταση, η οποία μπορεί έντονα να επηρεαστεί από τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Έπειτα, μία προσομοίωση τομέα χρόνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί, είτε για έναν πλήρη υπολογισμό, είτε για ένα μέρος του συστήματος που είναι αρκετά αντιπροσωπευτικό για να δώσει ένα καλό αρμονικό μοντέλο του μετατροπέα, και να τροφοδοτήσει τα αποτελέσματα αυτά σε έναν υπολογισμό τομέα συχνότητας για το πλήρες σύστημα.

Για την απεικόνιση των πιθανών βλαβών, εάν συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του τομέα χρόνου στο Σχήμα 3.63α) με έναν αντίστοιχο υπολογισμό τομέα συχνότητας του ίδιου συστήματος με τα ιδανικά αρμονικά ρεύματα ενός διορθωτή 12 παλμών στο Σχήμα 3.61, η πραγματική παραμόρφωση τάσης δίνει THD=8%, ενώ ο υπολογισμός τομέα συχνότητας με ιδανικές μορφές κύματος ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα το 20%. Αυτή η διαφορά είναι φυσικά τόσο μεγάλη ώστε το αποτέλεσμα από τον τελευταίο υπολογισμό είναι λιγότερο χρήσιμο για κάθε πτυχή μηχανικής.

### **3.7.7 Διαχείριση Αρμονικών**

Σε ένα πλοίο με ντίζελ ηλεκτρική προώθηση, οι μετατροπείς συχνότητας μπορεί να αποτελούν μέχρι και το 80-90% του πραγματικού φορτίου των γεννητριών. Τα αρμονικά αποτελέσματα πρέπει να εξεταστούν, και να αντιμετωπιστούν, για να αποφευχθεί η χειροτέρευση και η δυσλειτουργία του εξοπλισμού, και να πληρούν τις απαιτήσεις των κανόνων και των κανονισμών για επίπεδα αρμονικής παραμόρφωσης.

Υπάρχουν ορισμένες απόψεις μηχανικής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη των στόχων, οι οποίες συζητούνται παρακάτω.

### **Σύνθετη αντίσταση γεννήτριας**

Τα αρμονικά ρεύματα που εισάγονται στο σύστημα διανομής ισχύος θα ακολουθούν κυρίως τις χαμηλότερες οδούς σύνθετης αντίστασης, που συνήθως είναι οι γεννήτριες.

Για τις συχνότητες ενδιαφέροντος στην αρμονική ανάλυση, χρησιμοποιείται η γεννήτρια υπο-παροδικής σύνθετης αντίστασης. Οι d- και q- άξονες υπο-μεταβατικής επαγωγής είναι

κανονικά διαφορετικοί, ειδικά σε μία γεννήτρια με σημαντικούς πόλους, και ο μέσος όρος αυτών,  $x_d$  και  $x_q$  χρησιμοποιούνται κανονικά, εναλλακτικά η αρνητική ακολουθία σύνθετης αντίστασης,  $x_-$ .

Μία γεννήτρια με χαμηλή υπο-μεταβατική επαγωγή είναι κανονικά μεγαλύτερη από μία με μεγαλύτερες υπο-μεταβάσεις. Κανονικά, η τιμή είναι περίπου στο 20%, ενώ είναι σχετικά εφικτό να μειωθεί αυτή στο 15% ή ακόμα χαμηλότερα.

Ένα άλλο αποτέλεσμα της μείωσης της υπο-μεταβατικής επαγωγής είναι ότι το επίπεδο ρεύματος βραχυκυκλώματος αυξάνεται. Γι' αυτό το λόγο πρέπει κάποιος πάντα να κάνει ένα συμβιβασμό με το τι είναι επιθυμητό από την άποψη της αρμονικής παραμόρφωσης, την αξιολόγηση εξοπλισμού για ρεύματα βραχυκυκλώματος, και τα σχετικά συνολικά κόστη.

### **Τοπολογία μετατροπέα**

Οι διαφορετικές τοπολογίες μετατροπέα δίνουν διαφορετική αρμονική παραμόρφωση. Κανονικά η αξιολόγηση ισχύος και η εφαρμογή καθορίζουν την επιλογή, αλλά εάν είναι δυνατό, θα πρέπει να επιλεγεί ένας μετατροπέας με χαμηλότερη αρμονική παραμόρφωση για να διαχειρίζεται τα συνολικά επίπεδα παραμόρφωσης. Κανονικά, ένας μετατροπέας τύπου VSI δίνει τη χαμηλότερη παραμόρφωση σε εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης.

Αυξάνοντας τους αριθμούς των παλμών του διορθωτή δίνει επίσης μία μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης, αλλά πρέπει να συμβιβάζεται με τα αντίστοιχα κόστη των μετασχηματιστών και του μετατροπέα.

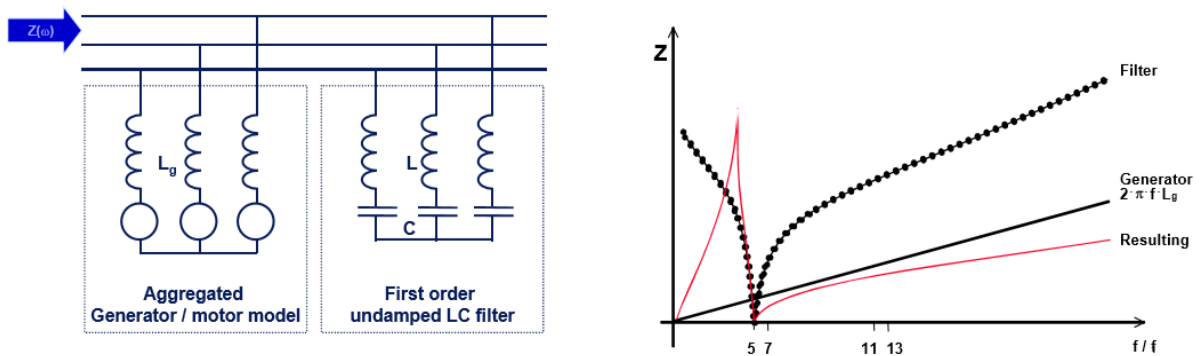
Υπάρχουν επίσης μετατροπείς με ένα ενεργό εμπρόσθιο άκρο, που αποτελείται από στοιχεία μεταγωγής αντί διόδους. Αυτό το είδος μετατροπέων δίνει ένα πολύ πιο ημιτονοειδή σχήμα ρεύματος προς το δίκτυο, παρόμοιο με αυτό του κινητήρα. Ωστόσο, τα κόστη αυτών των προϊόντων είναι πολύ υψηλότερα παρότι με τους διορθωτές διόδου.

### **Σχεδιασμός της παροχής του μετασχηματιστή**

Όταν ο μετασχηματιστής τροφοδοτεί το μετατροπέα, η σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή πρέπει να επιλεγεί υψηλή για να εξομαλύνει το ρεύμα φορτίου και να μειώσει το αρμονικό περιεχόμενο. Δεν πρέπει να επιλέγεται τόσο υψηλό, ώστε η πτώση τάσης πάνω στο μετασχηματιστή με πλήρες φορτίο να μειώνει τη δυνατότητα ισχύος του μετατροπέα κάτω από την καθορισμένη τιμή. Κανονικά, το βραχυκύκλωμα σύνθετης αντίστασης θα επιλεγθεί ανάμεσα στο 5 και 8%. Ένας τυπικός μετασχηματιστής διανομής θα υπερβεί σπάνια το 4%.



Έτσι, ο μετασχηματιστής πρέπει να είναι εφοδιασμένος με ένα αγωγίμο φύλλο ανάμεσα στις κύριες και δευτερεύουσες περιελίξεις, γειωμένος με έναν αποτελεσματικό μίαντα γείωσης υψηλής συχνότητας. Αυτό δε θα επηρεάσει τη χαμηλότερη αρμονική μεταφορά από δευτερεύουσες σε κύριες περιελίξεις, αφού αυτά είναι μαγνητικά συζευγμένα. Για τις πολύ υψηλές συχνότητες, συνήθως πάνω από το εύρος MHz, η σύζευξη είναι πιο χωρητική, και το γειωμένο φύλλο θα λειτουργεί σαν μία οθόνη για χωρητικά ρεύματα, οδηγώντας τους στο έδαφος αντί στο πρωτεύον. Τέτοιες οθόνες απαιτούνται κανονικά για να πραγματοποιούν τους κανονισμούς EMC (Ηλεκτρο-Μαγνητική Συμβατότητα), και θα βοηθούν επίσης σαν μια προστασία ενάντια στο φλας από μία υψηλή τάση πρωταρχικού σε χαμηλή τάση δευτερεύοντος εάν η μόνωση αποτύχει.



Σχήμα 3.66: Παθητικό φίλτρο σε ένα δίκτυο με μία γεννήτρια. Το  $Z(\omega)$  συμβολίζει την προκύπτουσα συχνότητα μεταξύ δύο γραμμών, όπως υφίσταται από ένα μετατροπέα συχνότητας συνδεδεμένο στο δίκτυο. (α) διάγραμμα κυκλώματος. (β) απόκριση συχνότητας.

### Παθητικά φίλτρα

Ένα παθητικό φίλτρο αποτελείται από επαγωγές, χωρητικότητες, και μερικές φορές επίσης από αντιστάσεις. Το Σχήμα 3.66 δείχνει το διάγραμμα κυκλώματος για ένα φίλτρο LC πρώτης σειράς. Η σύνθετη αντίσταση σε έναν από αυτούς τους κλάδους για μία συγκεκριμένη συχνότητα  $f$  είναι (όπου  $\omega=2\pi f$ )

$$Z_{\text{filter}}(\omega) = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = j\omega L \left(1 - \frac{1}{\omega^2 LC}\right) \quad (3.21)$$

Όπως φαίνεται, η σύνθετη αντίσταση έχει μία ακολουθία απήχησης, δηλαδή μία συχνότητα μηδενικής σύνθετης αντίστασης, για

$$\omega = \frac{1}{T} \quad (3.22)$$

Για ρεύματα με αυτή τη συχνότητα η σύνθετη αντίσταση μέσω του παθητικού φίλτρου προσεγγίζει το μηδέν, και το φίλτρο ιδανικά θα προσελκύσει όλα τα ρεύματα αυτής της συχνότητας από το δίκτυο χωρίς παραμόρφωση. Όταν συντονιστούν στην πιο σημαντική αρμονική συχνότητα, η παραμόρφωση της τάσης με αυτόν τον τρόπο θα μειωθεί.

Εάν υπάρχουν πολλές αρμονικές με σημαντική τιμή, μπορεί να χρησιμοποιηθούν αρκετά παράλληλα συνδεδεμένα φίλτρα, το καθένα συντονισμένο για μία αρμονική συχνότητα.

Συνδέοντας το φίλτρο στο δίκτυο, η σύνθετη αντίδρασή του θα έρθει παράλληλα με τη σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας. Η προκύπτουσα σύνθετη αντίσταση του δικτύου θα είναι τότε μία παράλληλη σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας και του φίλτρου

$$Z(\omega) = Z_{\text{gen}}(\omega) \parallel Z_{\text{filter}}(\omega) = \frac{Z_{\text{gen}}(\omega) Z_{\text{filter}}(\omega)}{Z_{\text{gen}}(\omega) + Z_{\text{filter}}(\omega)} \quad (3.23)$$

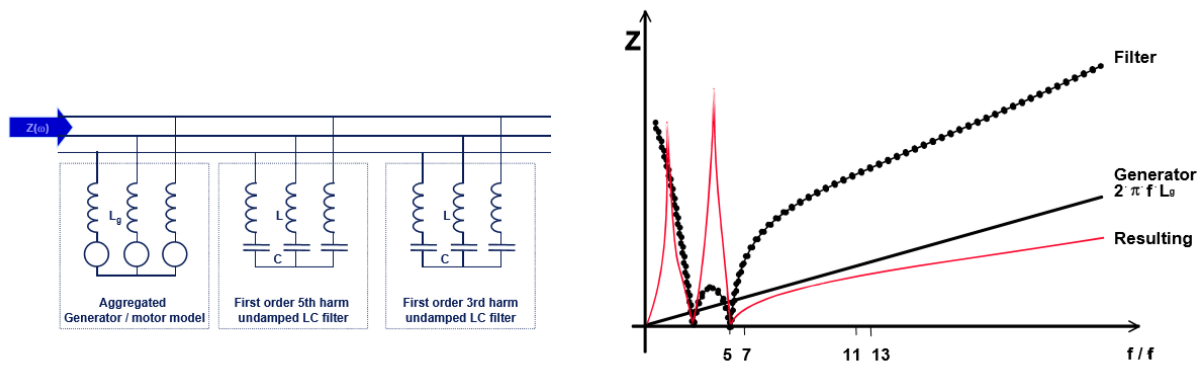
Επιπρόσθετα στη σειρά απήχησης με μία μηδενική σύνθετη αντίσταση στο  $\omega = \frac{1}{T}$ , αυτό έχει επίσης μία παράλληλη απήχηση στο  $\omega = \frac{1}{T}$ , που σημαίνει ότι η σύνθετη

αντίσταση των αρμονικών με αυτή τη συχνότητα προσεγγίζει άπειρες υψηλές τιμές. Εάν αυτό το δίκτυο εγχυθεί από αρμονικά ρεύματα αυτής της συγκεκριμένης συχνότητας, το αποτέλεσμα μπορεί να είναι η υπερβολική αρμονική παραμόρφωση και χειροτέρευση του εξοπλισμού. Παράλληλος συντονισμός θα συμβαίνει πάντα όταν εφαρμόζονται παθητικά φίλτρα, ο στόχος είναι να εξασφαλιστεί ότι δε θα διεγείρεται από οποιοδήποτε αρμονικό ρεύμα.

Στην πράξη, τόσο οι σειρές όσο και η παράλληλη απήχηση πλησιάζουν τις τελικές τιμές εξαιτίας των αποτελεσμάτων απόσβεσης από τα συστατικά αντίστασης στη σύνθετη αντίσταση του δικτύου. Το Σχήμα 3.66β) δείχνει μία τυπική καμπύλη σύνθετης αντίστασης για ένα δίκτυο με γεννήτριες και ένα παθητικό φίλτρο συντονισμένο στην 5<sup>η</sup> αρμονική. Όπως φαίνεται, η μηδενική σύνθετη αντίσταση συμπίπτει με την 5<sup>η</sup> αρμονική, αλλά έχει επίσης

μειωτικές επιδράσεις στην 7<sup>η</sup> και υψηλότερες αρμονικές λόγω της παράλληλης του επαγωγής με τη γεννήτρια.

Επίσης, φαίνεται ότι ένας συντονισμός σειράς συμβαίνει στην 3<sup>η</sup> περίπου αρμονική. Αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα εάν κάποιος αναμένει ότι το δίκτυο υπόκειται σε τρίτα αρμονικά ρεύματα, π.χ. από εισροή μετασχηματιστή. Αυτή η συχνότητα συντονισμού μπορεί να μετατοπιστεί με την προσθήκη ενός 3<sup>ου</sup> αρμονικού φίλτρου στο δίκτυο παράλληλα στο 5<sup>ο</sup> αρμονικό δίκτυο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.67, με την προκύπτουσα συχνότητα όπως φαίνεται.



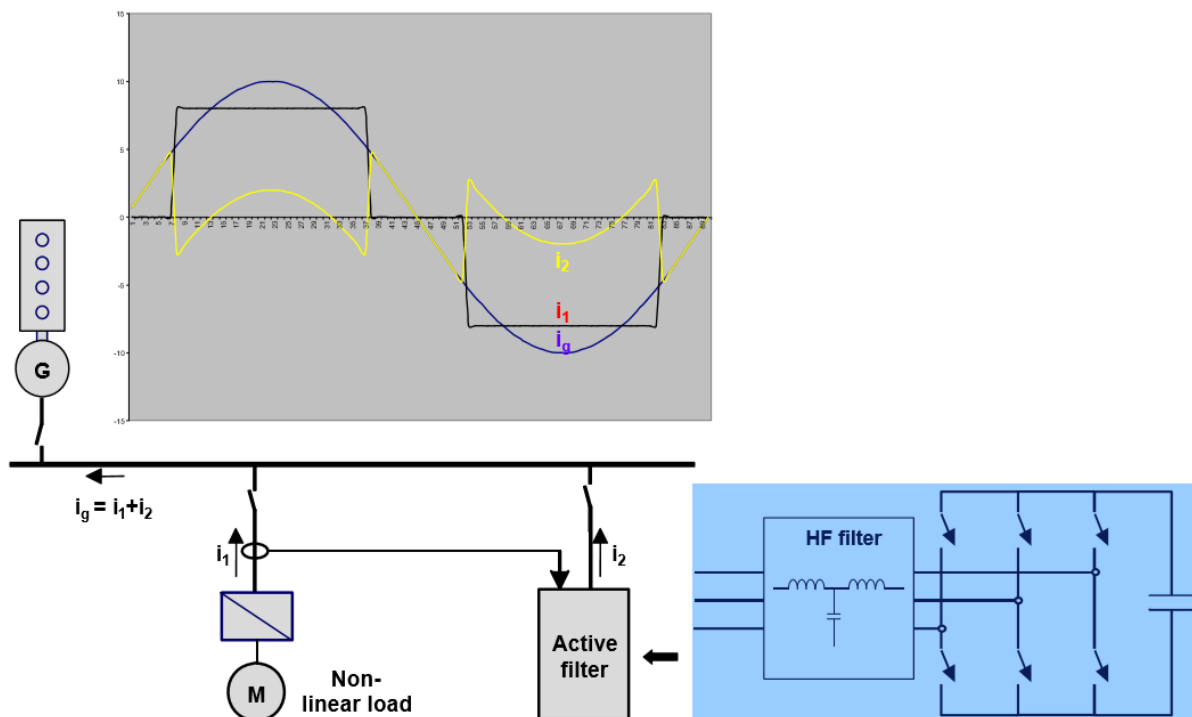
Σχήμα 3.67: Παθητικό φίλτρο σε ένα δίκτυο με μία γεννήτρια. Το  $Z(\omega)$  συμβολίζει την προκύπτουσα συχνότητα μεταξύ δύο γραμμών, όπως υφίσταται από έναν μετατροπέα συχνότητας συνδεδεμένο στο δίκτυο. (α) διάγραμμα κυκλώματος. (β) απόκριση συχνότητας.

Τα παθητικά φίλτρα μπορεί να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος να μειώσουν την αρμονική παραμόρφωση. Ο σχεδιασμός μπορεί να είναι δύσκολος, ειδικά εάν το δίκτυο είναι πολύπλοκο, υπό την έννοια πολλών πιθανών εναλλακτικών διαμόρφωσης. Ο παραλληλισμός των μονάδων φίλτρου, οι ελάχιστες και οι μέγιστες διαμορφώσεις γεννήτριας, η μέγιστη χωρητική φόρτιση, κλπ. αποτελούν σημαντικές πτυχές στο σχεδιασμό. Επίσης, η προσθήκη φίλτρων στο δίκτυο θα μεταβάλλει τις μορφές κύματος ρεύματος φορτίου των μετατροπέων, και ο σχεδιασμός φίλτρου θα είναι πάντα μία επαναλαμβανόμενη προσέγγιση πριν την εύρεση του τελικού σχεδιασμού.

### Ενεργά φίλτρα

Ένα ενεργό φίλτρο είναι μία ηλεκτρονική μονάδα ισχύος συνδεδεμένη με τη διανομή ισχύος με εξαρτήματα μεταγωγής, όπως το IGBTs, παρόμοια με το στάδιο αντιστροφεία μιας μονάδας κινητήρα. Αυτό τροφοδοτεί μία τράπεζα πυκνωτών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.68.

Με τη χρήση των στοιχείων μεταγωγής, κάποιος μπορεί να ορίσει ένα σχήμα ρευμάτων που θα ρέουν από το ενεργό φίλτρο προς το δίκτυο. Εάν μετράται το ρεύμα φορτίου ενός μη γραμμικού φορτίου, π.χ. μία μονάδα κινητήρα, το ενεργό φίλτρο μπορεί τότε να χρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει τις αρμονικές του μη γραμμικού φορτίου, έτσι ώστε το προκύπτον ρεύμα του μη γραμμικού φορτίου και του ενεργού φίλτρου να γίνει ημιτονοειδές. Εξαιτίας της μεταγωγής των ημιαγωγών ισχύος, είναι απαραίτητο ένα φίλτρο υψηλής συχνότητας για να αφαιρεί τον υψηλό συχνό θόρυβο.



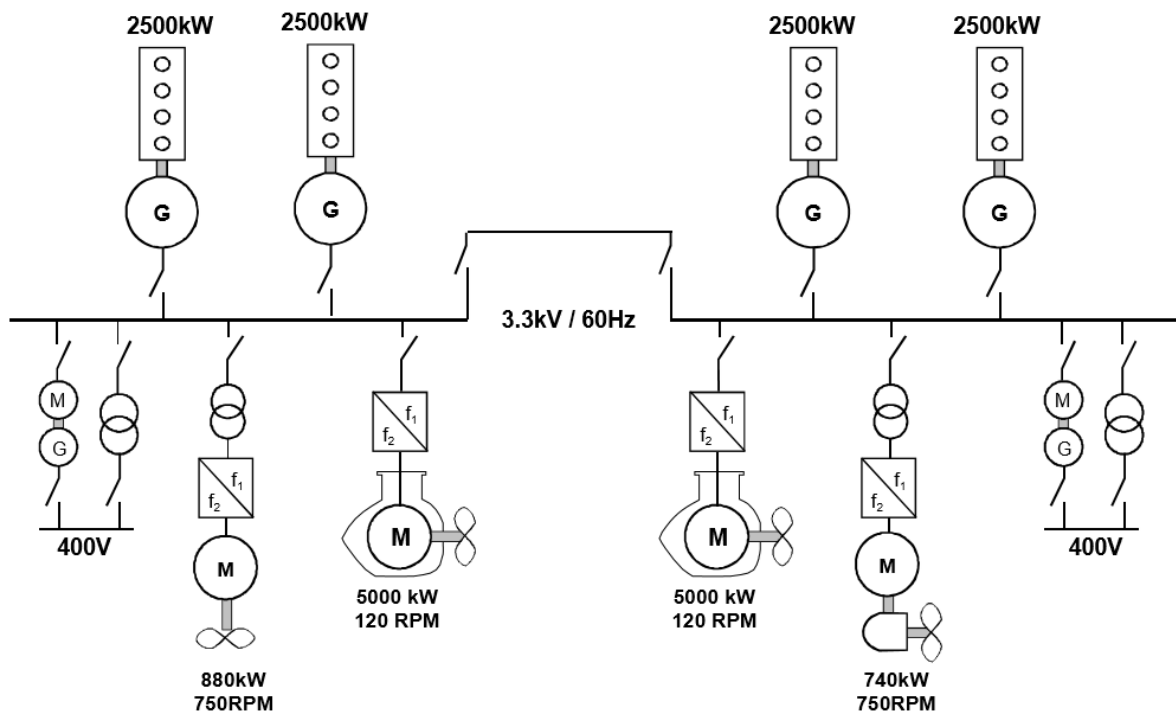
Σχήμα 3.68: Ένα ενεργό φίλτρο που συνδέεται με έναν μετατροπέα 6 παλμών, δημιουργώντας τα αρμονικά ρεύματα που αντισταθμίζουν όλες τις αρμονικές του φορτίου μη γραμμικού μετατροπέα. Το προκύπτον ρεύμα που τρέχει στο δίκτυο και τη γεννήτρια ιδανικά γίνεται ημιτονοειδές.

Το ενεργό φιλτράρισμα είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος απομάκρυνσης της αρμονικής παραμόρφωσης. Ωστόσο, η αξιολόγηση του φίλτρου είναι σχετικά υψηλή σε σύγκριση με το μη γραμμικό φορτίο υποτιθέμενο σε φίλτρο, και το κόστος τείνει να είναι υψηλότερο από πολλές άλλες εναλλακτικές.

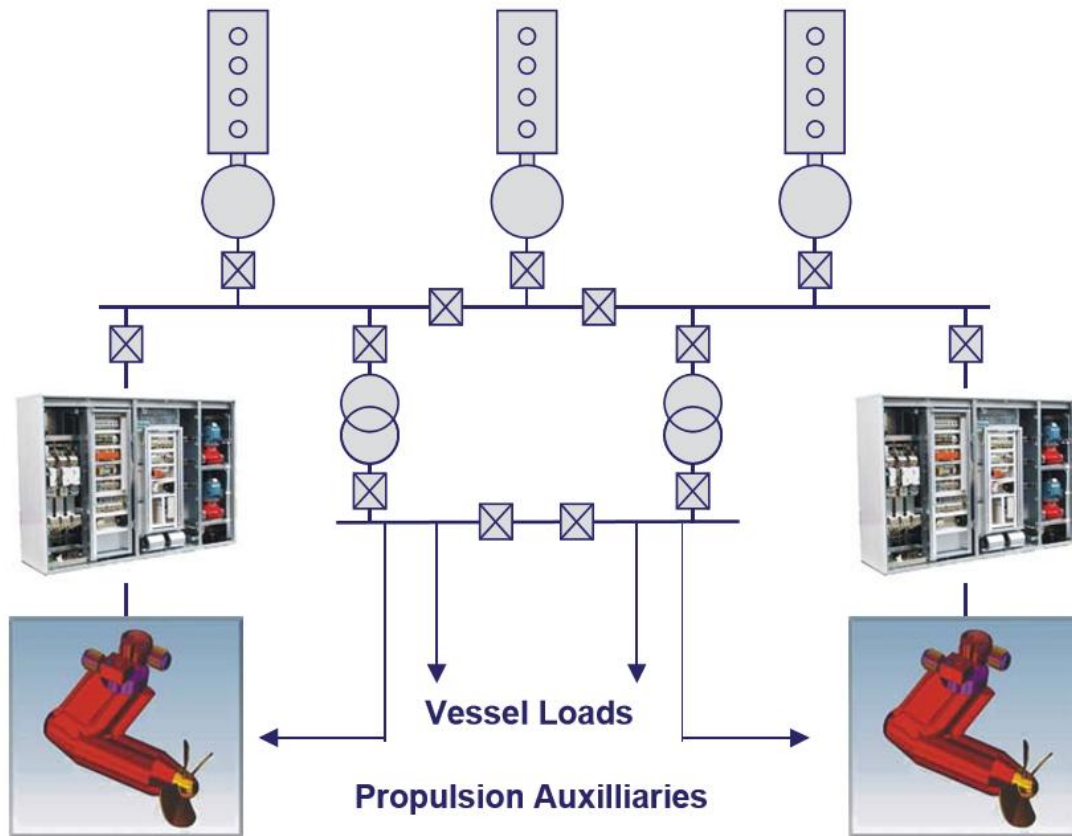
### 3.8 Παραδείγματα Διαμορφώσεων

Παραδείγματα διαμορφώσεων βρίσκονται σε Σχήματα:

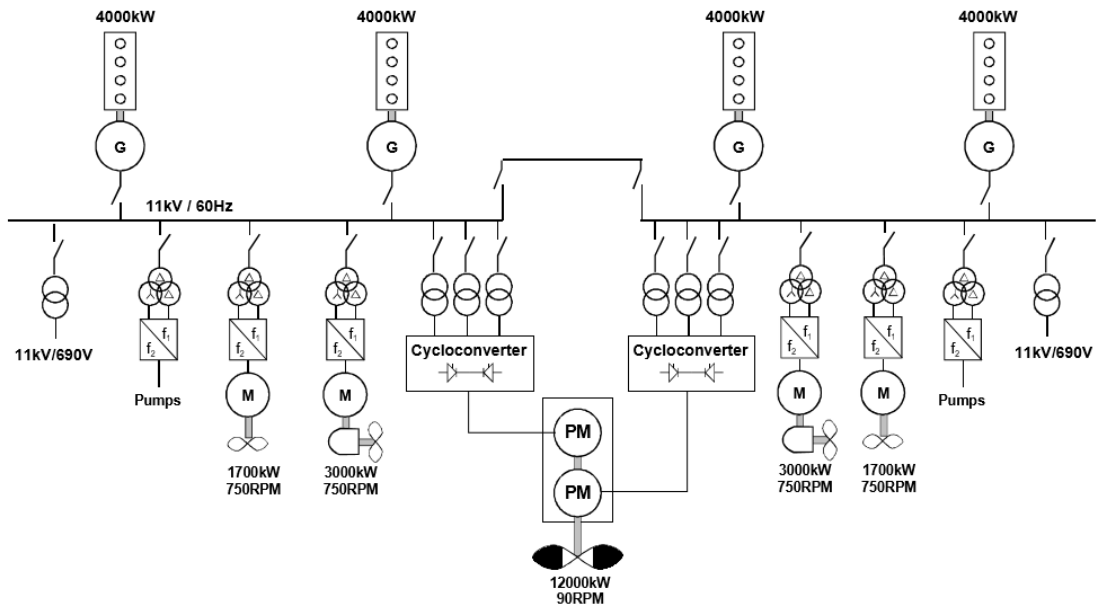
- 3.69: Υπεράκτιος εφοδιασμός / Αγκυροβολή.
- 3.70: Φέρι μποτ.
- 3.71: Δεξαμενόπλοιο. Η διαμόρφωση που παρουσιάζεται εδώ έχει εγκατασταθεί σε διάφορα δεξαμενόπλοια και σε δεξαμενόπλοια πολλαπλών χρήσεων που λειτουργούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Βόρειας Θάλασσας, τα οποία παραδόθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του '90. Σήμερα, είναι πιο πιθανό να κατασκευαστεί μία λύση με υποβιβασμένη προώθηση όπως στο Σχήμα 3.16.
- 3.72: Ημι-υποβρύχια εξέδρα γεώτρησης.
- 3.73: Πλωτό σκάφος παραγωγής.



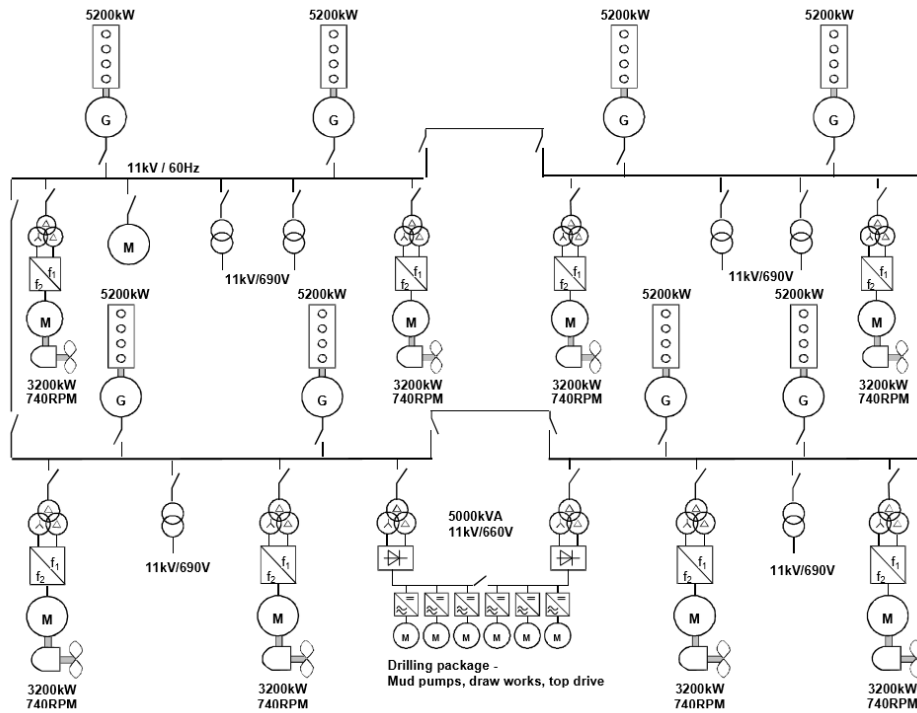
Σχήμα 3.69: Παράδειγμα διαγράμματος μιας γραμμής μιας μονάδας ισχύος δύο τμημάτων για ένα υπεράκτιο σκάφος τροφοδοσίας με τέσσερα σετ γεννήτριας ντίζελ, δύο Azipods, έναν αζιμούθιο προωθητή και ένα προωθητή σήραγγας.



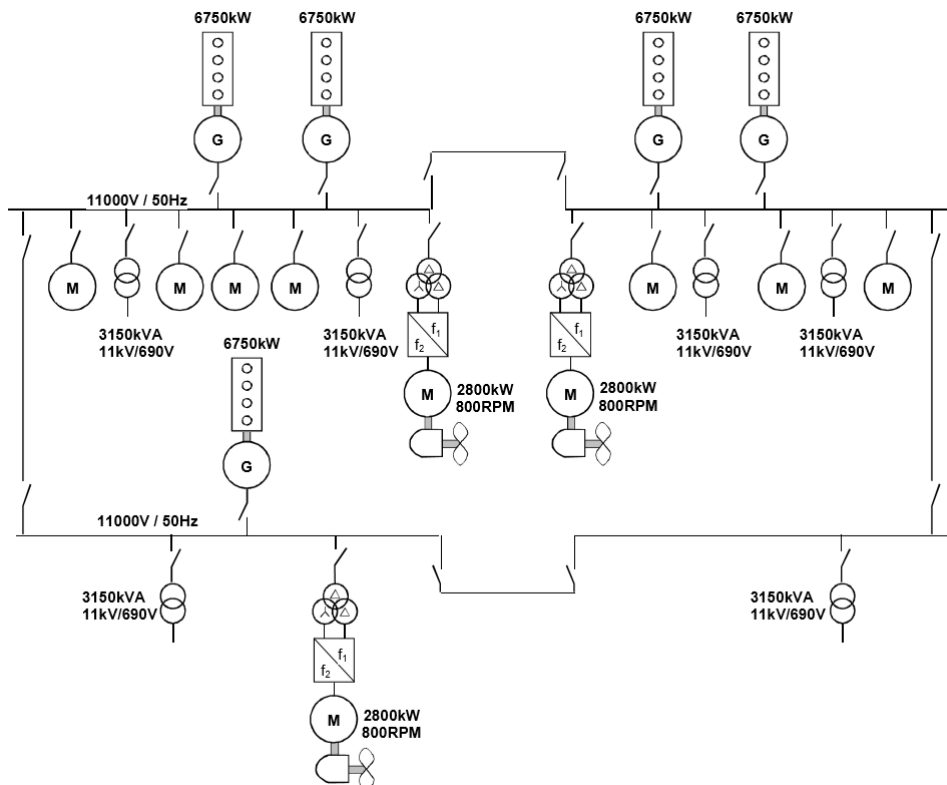
Σχήμα 3.70: Παράδειγμα ενός διαγράμματος μιας γραμμής για ένα πορθμείο.



Σχήμα 3.71: Παράδειγμα ενός διαγράμματος μιας γραμμής μιας μονάδας ισχύος δύο τμημάτων για ένα δεξαμενόπλοιο με τέσσερα σετ γεννήτριας ντίζελ, μία κύρια μονάδα πρόωσης, δύο αξιμουθικούς προωθητήρες και δύο προωθητήρες σήραγγας.



Σχήμα 3.72: Παράδειγμα ενός διαγράμματος μιας γραμμής μιας μονάδας ισχύος τεσσάρων τμημάτων για μία εγκατάσταση γεώτρησης με οκτώ σετ γεννήτριας ντίζελ και οκτώ αζιμουθικούς προωθητήρες.



Σχήμα 3.73: Παράδειγμα ενός διαγράμματος μονής γραμμής μιας μονάδας ισχύος δύο τμημάτων για ένα FPSO με πέντε σετ γεννήτριας ντίζελ και τρεις αζιμουθικούς προωθητήρες.

## Βιοβλιογραφία

- [3] American Bureau of Shipping (ABS). Guide for Thrusters and Dynamic Positioning Systems. New York, US, 1994.
- [5] Allensworth, T. A Short History of Sperry Marine. <http://www.sperrymarine.com/pages/history.html>, Litton Marine Systems, 1999.
- [11] American Petroleum Institute (API). Recommended Practice for Design and Analysis of Station keeping Systems for Floating Structures. Exploration and Production Department, API Recommended Practice 2SK, First Edition, US, 1995.
- [22] Bennet, S. A History of Control Engineering 1800-1930. Peter Peregrinus, London, 1979.
- [33] Blokland, A.J. and B. van der Ploeg. Electric ship propulsion. In Proc. of EPE '95. 6th European Conference on Power Electronics and Applications, Vol. (3), pp. 29-32, 1995.
- [35] Britting, K. R. Inertial Navigation System Analysis. Wiley Interscience, 1971.
- [36] Bose, B.K. Power Electronics and AVC drives. Prentice-Hall, IEEE press, 1997.
- [44] Cegelec Projects. Power and propulsion system for RRS James Clark Ross. Cegelec Controls, Publication No. 499, 1994.
- [54] Det Norske Veritas (DNV). Rules for Classification of SHIPS Newbuildings, Special Equipment and Systems. Additional Class, Part 6, Chapter 7: Dynamic Positioning Systems (DP). Norway, July 2010. [55] Det Norske Veritas (DNV). Rules and Regulations of Mobile Offshore Units, Special Equipment and Systems. Additional Class, Part 6, Chapter 2: Position Mooring (POSMOOR). Norway, 1996.
- [72] Farmer, R. Twin 40-MW gensets give Terra Nova FPSO production/propulsion options. Gas Turbine World, pp. 16-20, September-October 1998.
- [74] Fay, H. Dynamic Positioning Systems, Principles, Design and Applications. Editions Technip, Paris, France, 1989, ISBN : 2-7108-0580-4
- [77] Fitzgerald, A. E., C. H. Kingsley and S. D. Umans. Electric Machinery. Fifth edition, McGraw-Hill, 1992.
- [78] Fossen, T. I. Guidance and Control of Ocean Vehicles. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, 1994.
- [105] Hansen, J. F. Optimal Power Control of Marine Systems. Ph.D. thesis, Dept. of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2000.



- [117] Hill, W.A., G. Creelman and L. Mischke. Control strategy for an icebreaker propulsion system. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.(28), No 4, pp. 887-892, July/August 1992.
- [135] Johansen, T. A., T. I. Fossen, B. Vik. Hardware-In-the-Loop Testing of DP systems. DP Conference, Houston, US, 2005.
- [136] Johansen, T. A., A. J. Sørensen, O. J. Nordahl, O. Mo and T. I. Fossen. Experiences from Hardware-In-the-Loop (HIL) Testing of Dynamic Positioning and Power Management Systems. OSV Singapore, 2007. 481
- [137] Johansen, T. J. and A. J. Sørensen. Experiences with HIL Simulator Testing of Power Management Systems. Dynamic Positioning Conference, Marine Technology Society, Houston, US, 13-14 October, 2009.
- [162] Lauvdal, T., A. J. Sørensen, A. K. Ådnanes, J. P. Strand, J. F. Hansen and O. J. Sjørdalen. Marintronics: Optimizing Marine Power and Automation Systems Through Industrial IT. ABB Review, No. 1/2000.
- [174] Lloyd's Register of Shipping (LRS). Rules and Regulations for the Classification of Ships. Part 7, Chapter 4: Rules for the Construction and Classification of Dynamic Positioning Systems Installed in Ships. UK, 1997.
- [178] Mahon, L. L. J. Diesel Generator Handbook. Butterworth and Heinemann, 1992/1996.
- [181] MacDonald, J. New propulsion control system for the C.S.S. Hudson. Canadian Maritime Industries association, 45th annual technical conference, section B3.
- [190] Minorsky, N. Directional Stability of Automatic Steered Bodies. J. Amer. Soc. of Naval engineers, 34(2):280-309, 1922.
- [191] Mohan, N. and T. M. Underland and W. P. Robbins. Power Electronics: Converters, Applications and Design. John Wiley & Sons, 1989.
- [195] Marine Systems Simulator (MSS), <http://www.marinecontrol.org>, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2011
- [207] NORSOK. NORSOK STANDARDS, <http://www.nts.no/norsok>.
- [220] Parkinson, B. W. and J. J. Spiker (eds.). The Global Positioning System: Theory and Applications. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 1996.
- [228] Rensvik, E., A. J. Sørensen and M. Rasmussen. Maritime Industrial IT. 9th International Conference on Marine Engineering Systems (ICMES), the Helsinki University of Technology (HUT) Ship Laboratory and on board MS SILJA SERENADE, Finland, Paper B5, 19-21 May, 2003.

- [267] Smogeli, Ø. N. Experiences From Five Years of DP Software Testing. European DP Conference, London, UK, 2010.
- [298] Sørensen, A. J., E. Pedersen and Ø. Smogeli. Simulation-Based Design and Testing of Dynamically Positioned Marine Vessels. In Proceedings of International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability, MARSIM'03, August 25 - 28, 2003, Kanazawa, Japan.
- [313] Titterton, D. H. and J. L. Weston. Strapdown Inertial Navigation Technology. IEE, London, UK, 1997.
- [334] Ådnanes, A. K. High efficiency, high performance permanent magnet synchronous motor drives. PhD dissertation, NTNU 1991:60.
- [335] Ådnanes, A. K. Variable speed FP vs. fixed speed CP. In proc. of IMCA Station Keeping Seminar and Workshop, Houston, USA, 31.oct-1.nov 1996.
- [337] Ådnanes, A. K., A. J. Sørensen and T. Hackman. Essential characteristics of electric propulsion and thruster drives in DP vessels. In proc. of Dynamic Positioning Conference, Houston, USA, 22-23 October 1997.