



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

«Πρόωση Πλοίου: ΜΕΚ, Υβριδικού και Αμιγώς Ηλεκτρικού»
«Ship Propulsion: ICE, Hybrid and Pure Electric»

Υπό
ΝΑΤΑΛΙΑ ΓΟΥΛΑ

Πτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την
απόκτηση του Πτυχίου του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας

Λάρισα, 2024

Εγκρίθηκε από τον επιβλέποντα καθηγητή:

Δρ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΖΑΟΥΤΣΟΣ

Καθηγητής Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή

Τεχνολογίας

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Με το παρόν κείμενο βεβαιώνω ότι ο κάτωθι υπογράφων είμαι συγγραφέας της παρούσης πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η οποία παραδόθηκε, μετά από έγκριση του επιβλέποντας καθηγητή μου, σε έντυπη και ψηφιακή μορφή στη Γραμματεία του Τμήματος. Επίσης δηλώνω πως κάθε πηγή που χρησιμοποίησα (βιβλιογραφία, αρθρογραφία, δικτυογραφία), για την υποστήριξη των υποθέσεων της μελέτης και της ερευνάς μου, είναι πλήρως συμβατή με τα ακολουθούμενα επιστημονικά πρότυπα και, επιπλέον, αναφέρεται ρητά, υπό μορφή αναφοράς-παραπομπής, σε όλο το φάσμα κειμένων της παρούσης εργασίας. Το αυτό ισχύει για τη χρήση δευτερογενών δεδομένων (πινάκων, διαγραμμάτων και εικόνων), ιδεών και λέξεων, τα οποία και αναφέρονται είτε ακριβώς όπως υπάρχουν στις πηγές είτε μεθερμηνεύονται από εμένα.

ΕΠΩΝΥΜΟ	ΓΟΥΛΑ
ΟΝΟΜΑ	ΝΑΤΑΛΑ
ΑΡΘΡΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2919158
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	24-06-2024
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

© 2023. ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας της Σχολής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	4
Κατάλογος Πινάκων	6
Κατάλογος Σχημάτων	7
Κατάλογος Συντομογραφιών	8
Περίληψη.....	10
Abstract	11
Ε ΣΑΓΩΓΗ	12
Κεφάλαιο 1. Εξελίξεις και εφαρμογές των συστημάτων υβριδικής πρόωσης στα πλοία	15
1.1 ιστορική αναδρομή	18
1.2 Ενεργειακά συστήματα πλοίων	26
1.3 Ανάλυση ενός Συστήματος Ηλεκτροπρόωσης	28
Κεφάλαιο 2. Συστήματα μηχανικής πρόωσης.....	35
2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μηχανικής πρόωσης	39
2.2 Εφαρμογή μηχανικής πρόωσης	41
2.3 Στρατηγικές που στοχεύουν στον έλεγχο των συστημάτων μηχανικής πρόωσης ..	42
Κεφάλαιο 3. Συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης	52
3.1 Οφέλη και προκλήσεις της ηλεκτρικής πρόωσης	52
3.2 Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης	54
3.3 Στρατηγικές ελέγχου για τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης	57
Κεφάλαιο 4. Συστήματα υβριδικής πρόωσης	61
4.1 Οφέλη και προκλήσεις της υβριδικής πρόωσης	61
4.2 Εφαρμογές της υβριδικής πρόωσης	63
4.3 Στρατηγικές ελέγχου για την υβριδική πρόωση	65
Κεφάλαιο 5. Ηλεκτρική πρόωση με υβριδικό σύστημα παροχής ισχύος	67
5.1 Οφέλη και προκλήσεις της ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδικό σύστημα ισχύος.....	68
5.2 Εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδικό σύστημα παροχής ισχύος	70
Κεφάλαιο 6. Υβριδική πρόωση με υβριδικό σύστημα ισχύος	72
6.1 Εφαρμογή της υβριδικής πρόωσης με υβριδική παροχή ισχύος	72
Κεφάλαιο 7. Ηλεκτρική πρόωση με υβριδικό σύστημα συνεχούς ρεύματος (DC)	74
7.1 Οφέλη του υβριδικού συστήματος ισχύος DC	75
7.2 Εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδικό σύστημα παροχής ενέργειας συνεχούς ρεύματος	76
Συμπεράσματα	
78 Προτάσεις για μελλοντική βελτίωση	80
Βιβλιογραφία	85

Κατάλογος Πινάκων

Εικόνα 1. HNLMS Rotterdam φέρει ηλεκτρική πρόωση (10)	14
Εικόνα 2. Ποταμόπλοιο Vandal (17)	17
Εικόνα 3. USS Jupiter (17)	17
Εικόνα 4. Υπερωκεάνιο Normandie 1932 (18)	18
Εικόνα 5. SISU (IMO: 7359656) (18)	19
Εικόνα 6. Παγοθραυστικό Voima 1954 (15)	21
Εικόνα 7. MS Ampere 2018 (19)	22
Εικόνα 8. Συμβατικό Ενεργειακό Σύστημα (20)	24
Εικόνα 9. Διαμόρφωση ενός ενεργειακού συστήματος	25
Εικόνα 10. Τα κύρια μέρη ενός συστήματος ηλεκτροπρόωσης (10)	25
Εικόνα 11. Μηχανικό σύστημα πρόωσης (10)	33
Εικόνα 12. Σενάριο: τρεις καμπύλες προπέλας, γραμμή φορτίου της γεννήτριας και διάγραμμα SFC, που το καθένα αντιπροσωπεύει τους φακέλους λειτουργίας τριών κινητήρων ντίζελ. (12)	35
Εικόνα 13. Καμπύλη συνδυαστή	43
Εικόνα 14. Φόρτιση κινητήρα με την καμπύλη συνδυαστή (10)	44
Εικόνα 15. Το διάγραμμα επίπεδης φάσης απεικονίζει τη δυναμική υπερφόρτωση που προκαλείται από την κατάσταση της θάλασσας (10)	45
Εικόνα 16. Δημιουργία ενός απλού συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης (10)	50
Εικόνα 17. Διάταξη ηλεκτρικής πρόωσης με άξονες διαφορετικής φάσης (10)	53
Εικόνα 18. Αεροπλανοφόρο Queen Elizabeth (46)	54
Εικόνα 19. Αντιτορπικό Type 45 του Βασιλικού Ναυτικού της μεγάλης Βρετανίας (46)	54
Εικόνα 20. Υβριδικό Ενεργειακό Σύστημα (52)	60
Εικόνα 21. Υβριδικό σύστημα πρόωσης (10)	61
Εικόνα 22. Σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδική παροχή ισχύος (10)	65
Εικόνα 23. Ferry τύπου Hallaig (10)	68
Εικόνα 24. Σύστημα υβριδικής πρόωσης με υβριδική παροχή ισχύος (10)	69
Εικόνα 25. Απεικόνιση ενός ρυμουλκού υβριδικής πρόωσης με υβριδική παροχή ισχύος (10)	70
Εικόνα 26. Ηλεκτρική πρόωση με υβριδικό σύστημα ισχύος, σταθερού ρεύματος	72

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Βρόχος ελέγχου για τη μηχανική πρόωση με έλικα σταθερού βήματος (10).....	40
Σχήμα 2. Βρόχος ελέγχου για έλεγχο ανατροφοδότησης κατάστασης (36)	41
Σχήμα 3. Βρόχος ελέγχου για τη μηχανική πρόωση με ελεγχόμενο βήμα (10)	43
Σχήμα 4. Βρόχος ελέγχου για τη βέλτιστη ταχύτητα και τον έλεγχο του βήματος (10)	47
Σχήμα 5. Βρόχος ελέγχου για τον έλεγχο της γωνίας ΑΟΑ (34)	49
Σχήμα 6. Τυπική διάταξη στρατηγικής ελέγχου για δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος AC σταθερής συχνότητας (10)	57

Κατάλογος Συντομογραφιών

AC: Alternating Current (Εναλλασσόμενο ρεύμα)

CO: Carbon Monoxide (Μονοξείδιο του άνθρακα)

CO₂: Carbon Dioxide (Διοξείδιο του άνθρακα)

CODLOD: Combined Diesel Electric or Diesel (Συνδυασμός Ντίζελ μηχανή με Ηλεκτρικό Κινητήρα)

DC: Direct Current (Συνεχές Ρεύμα)

DP Dynamic positioning (Δυναμική Ναυσιπλοΐα)

ECAs: Emission Control Areas (Περιοχές ελεγχόμενων εκπομπών ρύπων) EEDI: Energy Efficiency Design Index (Δείκτης σχεδιαστικής ενεργειακής απόδοσης).

EGR: Exhaust Gas Recirculation (Ανακυκλοφορία καυσαερίων)

EMS: Energy Management Strategy (Στρατηγική διαχείρισης ενέργειας).

FC: Fuel Cell Κυψέλες καυσίμου

IMO: International Maritime Organisation (Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας)

ISO: International Organization for Standardization (Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης)

LNG: Liquefied Natural Gas (Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο)

LPG: Liquefied Petroleum Gas (Υγραέριο)

MARPOL: Marine Pollution Regulation (Κανονισμός Θαλάσσιας ρύπανσης)

MDO: Marine Diesel Oil (Πετρέλαιο Ναυτιλίας)

MEPC: Marine Environmental Protection Committee (Επιτροπή προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος)

NO_x: Nitrogen Oxides (Οξείδια του αζώτου)

SECA: Sulphur Emission Control Area (Περιοχή ελέγχου εκπομπών θείου)

SEEMP: Ship Energy Efficiency Management Plan (Σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής απόδοσης πλοίου)

SCR: Selective Catalytic Reduction (Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή)

SFC: Specific Fuel Consumption (Ειδική κατανάλωση καυσίμου)

SO₂: Sulphur Dioxide (Διοξείδιο του θείου.)

SOC State of Charge (Κατάσταση Φόρτισης)

UPS: Uninterruptible power supply (Αδιάλειπτη τροφοδοσία ρεύματος)

VSD: Variable speed drives (Κινητήρας Μεταβλητής ταχύτητας)

Περίληψη

Όσον αφορά την οικονομική κλίμακα, η ναυτιλιακή βιομηχανία αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες πηγές απασχόλησης. Κάθε χρόνο, αγαθά αξίας εκατοντάδων δισεκατομμυρίων δολαρίων μεταφέρονται σε όλο τον κόσμο μέσω της ναυτιλίας, εξασφαλίζοντας πρόσβαση σε βασικά προϊόντα όπως το πετρέλαιο, τα αυτοκίνητα, τα σιτηρά και τα ρούχα σε κάθε γωνιά του πλανήτη. Για να επιτευχθεί αυτό το κατόρθωμα απαιτείται ένας τεράστιος στόλος που αποτελείται από χιλιάδες μεγάλα πλοία, που συμπληρώνονται από έναν ακόμη μεγαλύτερο αριθμό μικρότερων σκαφών.

Η παρουσία πολυάριθμων πλοίων, συμπεριλαμβανομένων πλοίων για επιβάτες, εμπορικούς και στρατιωτικούς σκοπούς, είχε ως αποτέλεσμα ένα πολύ γνωστό φαινόμενο στον σύγχρονο κόσμο μας: την κλιματική αλλαγή. Οι εκπομπές που απελευθερώνονται από αυτά τα πλοία παίζουν ρόλο στην κρίση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, καθιστώντας απολύτως λογικό να υποστηρίξουμε τη μείωση της ρύπανσης και την κατασκευή φιλικών προς το περιβάλλον, βιώσιμων πλοίων.

Οι προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην αντιμετώπιση των εκπομπών των πλοίων τα τελευταία χρόνια, με έμφαση στη μείωση των εκπομπών μέσω εναλλακτικών μεθόδων πρόωσης ή της εφαρμογής φίλτρων εκπομπών στα τρέχοντα συστήματα.

Η εφαρμογή υβριδικών/ηλεκτρικών τεχνολογιών στην κυκλοφορία των πλοίων δεν πρέπει να περιορίζεται μόνο σε περιβαλλοντικούς λόγους. Είναι σημαντικό να αξιολογηθούν τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν και να προσδιοριστεί η αποτελεσματικότητά τους στην κάλυψη των ειδικών αναγκών διαφορετικών τύπων πλοίων. Η διαθεσιμότητα, η εφεδρική χωρητικότητα και οι απαιτήσεις ταχύτητας ποικίλλουν μεταξύ των πλοίων, καθιστώντας αβέβαιο εάν ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να ανταποκριθεί επαρκώς σε αυτές τις απαιτήσεις.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει τη σκοπιμότητα εφαρμογής υβριδικής και ηλεκτρικής τεχνολογίας σε ορισμένους τύπους πλοίων και να αναλύσει τις πιθανές επιπτώσεις της στην απόδοση καυσίμου, οδηγώντας έτσι σε μείωση των εκπομπών ρύπων, ιδιαίτερα του διοξειδίου του άνθρακα.

Λέξεις κλειδιά: ηλεκτροπρόωση πλοίων, υβριδική πρόωση, ενέργεια, κινητήρας, εγκαταστάσεις, ναυτική βιομηχανία, τεχνολογία

Abstract

In terms of economic scale, the shipping industry is one of the largest sources of employment. Every year, hundreds of billions of dollars worth of goods are shipped around the world via shipping, providing access to essential commodities such as oil, cars, grain and clothing to every corner of the globe. To achieve this feat requires a huge fleet consisting of thousands of large ships, complemented by an even larger number of smaller vessels.

The presence of numerous ships, including passenger, commercial and military vessels, has resulted in a well-known phenomenon in our modern world: climate change. The emissions released by these ships play a role in the global warming crisis, making it perfectly reasonable to advocate for the reduction of pollution and the construction of environmentally friendly, sustainable ships.

Efforts have focused on addressing ship emissions in recent years, with an emphasis on reducing emissions through alternative propulsion methods or the application of emission filters to current systems.

The application of hybrid/electric technologies in ship traffic should not be limited to environmental considerations. It is important to evaluate the advantages they offer and to determine their effectiveness in meeting the specific needs of different types of ships. Availability, spare capacity and speed requirements vary between ships, making it uncertain whether a hybrid system can adequately meet these requirements.

The aim of this thesis is to examine the feasibility of implementing hybrid and electric technology on certain types of ships and to quantify its potential impact on fuel efficiency, leading to a reduction in emissions, particularly carbon dioxide

Key Words: Ship electric propulsion, hybrid propulsion, energy, power plant, facilities, installations, maritime industry, technology

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παγκόσμιο εμπόριο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη ναυτιλιακή βιομηχανία, η οποία όχι μόνο διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο, αλλά αφήνει επίσης σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, συμβάλλοντας περίπου στο 3% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η επείγουσα ανάγκη αντιμετώπισης της μείωσης των εκπομπών και η ενίσχυση της βιωσιμότητας της ναυτιλιακής βιομηχανίας γίνεται όλο και πιο επιτακτική τα τελευταία χρόνια.

Καθώς η ζήτηση για πιο αποδοτικά και φιλικά προς το περιβάλλον πλοία αυξάνεται, η ναυτιλιακή βιομηχανία έρχεται αντιμέτωπη με νέα εμπόδια [1]. Ωστόσο, υπάρχει η ελπίδα με τη μορφή ηλεκτροπρόωσης, η οποία έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη λύση. Τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης προσφέρουν πολυάριθμα οφέλη σε σύγκριση με την παραδοσιακή πρόωση ορυκτών καυσίμων, όπως βελτιωμένη απόδοση, μειωμένες εκπομπές ρύπων και χαμηλότερο κόστος συντήρησης. Χρησιμοποιώντας ηλεκτρικούς κινητήρες αντί για κινητήρες εσωτερικής καύσης, τα πλοία μπορούν να παράγουν την ισχύ που απαιτείται για την κίνηση. Αυτό έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον μεταξύ των πλοιοκτητών και των φορέων εκμετάλλευσης πλοίων που επιδιώκουν να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις και να βελτιώσουν τις οικονομικές τους επιδόσεις. Για να καθιερωθεί η ηλεκτρική πρόωση ως βιώσιμη και αποτελεσματική τεχνολογία για τα πλοία, είναι απαραίτητο να διερευνήσουμε τις δυνατότητές της. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι υπάρχουν προκλήσεις και ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν παράλληλα με αυτά τα πλεονεκτήματα.

Τα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης εκτείνονται πέρα από τα μεγάλα εμπορικά πλοία και ισχύουν και για μικρότερα πλοία όπως ferry boat, ρυμουλκά και παράκτια πλοία [1]. Στην πραγματικότητα, αυτά τα μικρότερα πλοία μπορούν να αποκομίσουν σημαντικά οφέλη από την ηλεκτρική πρόωση, χάρη στις μικρότερες διαδρομές τους και στην περιορισμένη χωρητικότητα αποθήκευσης καυσίμου.

Η βιομηχανία κρουαζιέρας γνώρισε αξιοσημείωτη ανάπτυξη στον τομέα της ηλεκτρικής πρόωσης. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στα θετικά χαρακτηριστικά των κρουαζιερόπλοιων, όπως οι σημαντικές διαστάσεις τους και οι τακτικές στάσεις σε λιμάνια, που επιτρέπουν την επαναφόρτιση της μπαταρίας [1]. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού είναι η νορβηγική γραμμή κρουαζιέρας *Hurtigruten*, η οποία έχει ήδη μετατρέψει με επιτυχία πολλά πλοία με ηλεκτρική πρόωση και έχει θέσει ως στόχο να μετατρέψει ολόκληρο τον στόλο της μέχρι το έτος 2026 [2].

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η ηλεκτρική πρόωση δεν είναι μια λύση καθολικής εφαρμογής, καθώς υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα παραδοσιακά μηχανικά συστήματα πρόωσης είναι πιο κατάλληλα. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι τα φορτηγά πλοία μεγάλων αποστάσεων που περνούν μεγάλες περιόδους στη θάλασσα, καθώς μπορεί να εξακολουθούν να βασίζονται στην ανώτερη ενεργειακή πυκνότητα των ορυκτών καυσίμων για την αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων πρόωσής τους [1].

Συνοψίζοντας, η ηλεκτροπρόωση παρουσιάζει μια ελπιδοφόρα προοπτική που θα μπορούσε να αλλάξει πλήρως τον ναυτιλιακό τομέα [1]. Η αξιοσημείωτη απόδοση και προσαρμοστικότητά της, σε συνδυασμό με την επιλογή χρήσης βιώσιμων πηγών ενέργειας, την καθιστούν μια δελεαστική επιλογή για τους δημιουργούς και τους ιδιοκτήτες πλοίων.

Παρά την ύπαρξη αξιοσημείωτων εμποδίων, όπως οι περιορισμένες δυνατότητες απόστασης και η ζήτηση για σημαντική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, η ηλεκτροπρόωση παραμένει μια πολλά υποσχόμενη προοπτική για το μέλλον των θαλάσσιων μεταφορών. Μέσω της συνεχούς μελέτης και προόδου, η ηλεκτροπρόωση έχει την ικανότητα να γίνει θεμελιώδες στοιχείο της ναυτιλιακής βιομηχανίας.

Ως εκ τούτου, αυτή η μελέτη στοχεύει όχι μόνο να διερευνήσει τις προόδους και την εφαρμογή υβριδικών συστημάτων στην ισχύ και στην πρόωση πλοίων, αλλά και να αναπτύξει αποτελεσματικές στρατηγικές ελέγχου που βελτιστοποιούν την κατανάλωση καυσίμου και την απόδοση.

Η έρευνα ταξινομεί τα μέσα πρόωσης σε τρεις κατηγορίες: μηχανική, ηλεκτρική και υβριδική πρόωση. Ομοίως, το σύστημα ισχύος κατηγοριοποιείται σε τέσσερις κατηγορίες [3]: τροφοδοτικό καύσης, παροχή ηλεκτροχημικής ισχύος, παροχή αποθηκευμένης ενέργειας και υβριδική παροχή ρεύματος. Επιπλέον, η παρούσα εργασία διερευνά συνδυασμένες προοπτικές συστημάτων, συμπεριλαμβανομένης της υβριδικής παροχής ισχύος και της υβριδικής πρόωσης. Επιπλέον, η έρευνα εξετάζει την πιθανή χρήση συνεχούς ρεύματος σε ένα υβριδικό σύστημα πρόωσης.

Η εργασία δεν εξετάζει μόνο τις στρατηγικές ελέγχου, αλλά παρέχει επίσης μια περίληψη των προόδων, των πλεονεκτημάτων, των μειονεκτημάτων και των τάσεων στη διάταξη των συστημάτων ισχύος και πρόωσης. Επιπλέον, εξετάζονται διεξοδικά οι διαθέσιμες στρατηγικές ελέγχου και τα οφέλη τους, ενώ παρατίθενται και τα συμπεράσματα της μελέτης.

Κεφάλαιο 1. Εξελίξεις και εφαρμογές των συστημάτων υβριδικής πρόωσης στα πλοία

Παρόμοια με πολλές άλλες βιομηχανίες, ο ναυτιλιακός τομέας αντιμετωπίζει τεράστια πίεση για να ελαχιστοποιήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του. Η αποτυχία ανάληψης δράσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε εκπληκτική αύξηση κατά 50-250% στις εκπομπές CO₂ έως το 2050, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τις ουσιαστικές μειώσεις που απαιτούνται από τη Συμφωνία του Παρισιού για την επίτευξη του στόχου για την υπερθέρμανση του πλανήτη κατά 2°C [4]. Επιπλέον, η ναυτιλιακή βιομηχανία αντιπροσωπεύει επί του παρόντος το 15% των παγκόσμιων εκπομπών NO_x. Χωρίς την εφαρμογή μέτρων για τον περιορισμό των εκπομπών, το ποσοστό αυτό αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά στο μέλλον. Ωστόσο, οι εξελίξεις στα συστήματα ισχύος και πρόωσης, σε συνδυασμό με βελτιώσεις στη διαχείριση ενέργειας, έχουν τη δυνατότητα να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση τόσο του CO₂ όσο και των NO_x [5].

Προκειμένου να σημειωθεί πρόοδος σε αυτόν τον τομέα, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχει θεσπίσει ένα αυστηρό πλαίσιο με στόχο τον έλεγχο των εκπομπών των πλοίων [6]. Το αρχικό βήμα, που περιγράφεται στο Παράρτημα VI του Κώδικα MO, επιβάλλει κανονισμούς για την επιτρεπόμενη ποσότητα εκπομπών οξειδίων του αζώτου από κινητήρες ντίζελ σε πλοία που ναυπηγήθηκαν μετά τον ανουάριο του 2011. Αυτά τα πλοία, που αναφέρονται ως Βαθμίδα 2 (Tier 2), υπόκεινται σε όρια εκπομπών 7,7 g /kWh για κινητήρες υψηλής ταχύτητας και 14,4 g/kWh για κινητήρες χαμηλής ταχύτητας.

Από τον ανουάριο του 2016, όταν αναφερόμαστε σε περιοχές ελέγχου εκπομπών γνωστές ως *Κλάση 3*, οι περιορισμοί μειώνονται σε 2,0 g/kWh και 3,4 g/kWh αντίστοιχα [6]. Αυτοί οι περιορισμοί επικεντρώνονται επί του παρόντος αποκλειστικά στις εκπομπές NO_x που παράγονται από τους κινητήρες και δεν περιλαμβάνουν τη συνολική ισχύ και το σύστημα πρόωσης των πλοίων. Ωστόσο, οι εξελίξεις στην τεχνολογία που στοχεύουν στην αντιμετώπιση των εκπομπών NO_x ανά μίλι στα αυτοκίνητα, καθώς και της δημόσιας ζήτησης για ρεαλιστικές συνθήκες οδήγησης, ενδέχεται να οδηγήσουν σε μελλοντικούς κανονισμούς για τις εκπομπές NO_x ανά μίλι στη ναυτιλία [7]. Κατά συνέπεια, ο κύριος τομέας μελέτης για τη μείωση των εκπομπών NO_x στα συστήματα παραγωγής ισχύος και πρόωσης κινητήρων ντίζελ αναφέρεται σε τεχνολογίες μείωσης όπως η Ανακυκλοφορία των Καυσαερίων [8] [9] [10].

Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των επιβλαβών εκπομπών ρύπων στα πλοία αποτελεί προτεραιότητα για τη Marpol, η οποία έχει εφαρμόσει κανονισμούς και

συγκεκριμένους στόχους [4]. Ένας τέτοιος στόχος είναι ο δείκτης σχεδιασμού ενεργειακής απόδοσης (EEDI), ο οποίος μετρά την ποσότητα CO₂ που εκπέμπεται από ένα εμπορικό πλοίο ανά ναυτικό μίλι και ανά τόνο μεταφερόμενων εμπορευμάτων. Τα νέα εμπορικά πλοία έχουν ήδη επιτύχει μείωση της EEDI κατά 10% σε σύγκριση με το σημείο αναφοράς που καθορίστηκε το 2013 και ο στόχος είναι η περαιτέρω μείωση κατά 30% έως το 2030. Τα μέτρα αυτά αναμένεται να επεκταθούν και σε άλλους τύπους πλοίων. Προκειμένου να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι, τα συστήματα πρόωσης και παραγωγής ενέργειας στα πλοία θα πρέπει να είναι εξοπλισμένα με τεχνολογίες όπως η Ανακυκλοφορία Καυσαερίων (EGR) και η Επιλεκτική Καταλυτική Μείωση (SCR), που μειώνουν σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων [10].

Καθώς η ζήτηση για μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών συνεχίζει να αυξάνεται, τα πλοία είναι πλέον επιφορτισμένα με ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών. Από τη μεταφορά έως τις εργασίες δυναμικής τοποθέτησης (DP), όπως αυτές που εκτελούνται από πλοία εξοπλισμένα με μεγάλους γερανούς όπως το *Pioneering Spirit*, υπάρχει σαφής ανάγκη για αυξημένες δυνατότητες στις υπεράκτιες δραστηριότητες [11]. Ακόμη, τα πλοία του πολεμικού ναυτικού όχι μόνο εκτελούν εργασίες περιπολίας στην ανοικτή θάλασσα, αλλά και σε παράκτιες επιχειρήσεις, ενώ τα ρυμουλκά απαιτούν μέγιστη ώθηση για ρυμούλκηση και περιορισμένη ισχύ για κίνηση ή αναμονή. Δεδομένης της ποικιλομορφίας αυτών των λειτουργιών, οι μονάδες πρόωσης και παραγωγής ενέργειας πρέπει να πληρούν πολλαπλά κριτήρια, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών, της κατανάλωσης καυσίμου, των επιπέδων θορύβου, της διαθεσιμότητας συστήματος, της ικανότητας ελιγμών και της άνεσης όσον αφορά τον ελάχιστο θόρυβο, κραδασμούς και οσμές [11]. Επιπλέον, το κόστος συντήρησης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη λόγω της θερμικής και μηχανικής καταπόνησης που ασκείται στο μηχανήμα, μαζί με τα αρχικά έξοδα αγοράς.

Θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθεί ότι τα διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά αποτελούν πρόκληση για την αποτελεσματική βελτιστοποίηση της μονάδας ισχύος και πρόωσης κατά τη φάση σχεδιασμού του πλοίου [11]. Από τη δεκαετία του 1990, η ηλεκτρική πρόωση έχει αποκτήσει δημοτικότητα σε διαφορετικούς τύπους σκαφών, συμπεριλαμβανομένων πολεμικών πλοίων και κρουαζιερόπλοιων, λόγω του ευέλικτου επιχειρησιακού προφίλ της [5]. Ωστόσο, ενώ το σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης θεωρείται πιο αποτελεσματικό σε χαμηλότερες ταχύτητες, υφίσταται απώλειες μετατροπής 3-15% στην ισχύ εξόδου του κινητήρα, της γεννήτριας ή των ηλεκτρικών εξαρτημάτων που εμπλέκονται στη διαδικασία μετατροπής ισχύος [11].

Για να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ αποτελεσματικότητας και προσαρμοστικότητας σε διαφορετικά λειτουργικά προφίλ, επιδιώχθηκε ένας συμβιβασμός, με αποτέλεσμα ένα ευρύ φάσμα ρυθμίσεων ισχύος και πρόωσης. Αυτές οι ρυθμίσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κύριους τύπους [11]: μηχανική πρόωση, ηλεκτρική πρόωση (όπως το HNLMS Rotterdam που φαίνεται στην *Εικόνα 1*) ή υβριδικός σχεδιασμός. Επιπλέον, η παραγωγή ισχύος του κινητήρα μπορεί να επιτευχθεί μέσω καύσης, κελιών καυσίμου, αποθήκευσης ενέργειας ή συνδυασμού αυτών των μεθόδων. Η επιλογή μεταξύ εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος είναι επίσης ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη.



Εικόνα 1. HNLMS Rotterdam φέρει ηλεκτρική πρόωση [11]

Καθώς η διάταξη του συστήματος γίνεται πιο περίπλοκη, οι επιλογές ελέγχου αυξάνονται. Ωστόσο, ακόμη και τα πιο προηγμένα και περίπλοκα συστήματα πρόωσης εξακολουθούν να βασίζονται σε κλασικές τεχνικές ελέγχου, όπως οι καμπύλες σταθερής συχνότητας. Από την άλλη πλευρά, πρόσφατη έρευνα τόσο στην ναυσιπλοΐα όσο και στην αυτοκίνηση έχει δείξει ότι ο συνδυασμός προηγμένων συστημάτων πρόωσης με παραδοσιακές στρατηγικές ελέγχου δεν οδηγεί σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης καυσίμου ή των εκπομπών ρύπων [12]. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ αυτά τα συστήματα μπορεί να προσφέρουν πλεονεκτήματα, έχουν επίσης αυξημένο κόστος και πολυπλοκότητα στην εφαρμογή τους.

Έχει διεξαχθεί περιορισμένη έρευνα σχετικά με τη βελτιστοποίηση της χρήσης μπαταριών και την έξυπνη χρήση συστημάτων ισχύος DC (συνεχούς ρεύματος). Ωστόσο, έχει διαπιστωθεί ότι η εφαρμογή στρατηγικών έξυπνου ελέγχου μπορεί να

οδηγήσει σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, που κυμαίνεται από 10 έως 35% [11]. Κατά συνέπεια, αυτή η μείωση στην κατανάλωση καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα και αντίστοιχη μείωση των ρύπων. Δυστυχώς, υπήρξε ανεπαρκής κάλυψη και ανάλυση του αντίκτυπου σε άλλα κριτήρια [13].

Η αναγκαιότητα μιας ενδεδειγμένης έρευνας σχετικά με τις τακτικές ευφυούς ελέγχου είναι εμφανής από τις προαναφερθείσες πληροφορίες [14]. Κατά συνέπεια, μπορεί να επιτευχθεί η βελτίωση της απόδοσης, όπως αξιολογείται χρησιμοποιώντας διάφορα σημεία αναφοράς, και να πραγματοποιηθεί η επιθυμητή διαμόρφωση του συστήματος.

Ενώ υπάρχουν πολυάριθμες ολοκληρωμένες αξιολογήσεις διαθέσιμες για τα υβριδικά ηλεκτρικά συστήματα και τις μεθόδους ελέγχου τους στην αυτοκινητοβιομηχανία, υπάρχει αξιοσημείωτη απουσία τέτοιων αναθεωρήσεων για συστήματα ισχύος και πρόωσης στα πλοία [12]. Επιπλέον, η ταξινόμηση των υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων σε σειριακές και σειριακές-παράλληλες διαμορφώσεις δεν περιλαμβάνει με ακρίβεια τη μεγάλη γκάμα συσκευών που βρίσκονται στα πλοία, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλούς κινητήρες, ηλεκτροκινητήρες πρόωσης, γεννήτριες ντίζελ, κυψέλες καυσίμου και αποθήκευση ενέργειας συστήματα [15].

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η ηλεκτρική πρόωση στα πλοία άρχισε να αξιοποιείται προς τα τέλη του 1800. Παρά την εξέλιξη αυτή, τα κύρια μέσα προώθησης των πλοίων, όπως οι κινητήρες ντίζελ, οι αεριοστρόβιλοι και οι ατμοστρόβιλοι, παρέμειναν αμετάβλητα. Το *USS Oregon*, ένα σκάφος που ανήκει στο Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ, ήταν από τους πρωτοπόρους στην αποτελεσματική χρήση ηλεκτρικής πρόωσης [16]. Κυκλοφόρησε το 1896 και χρησιμοποίησε ηλεκτρική πρόωση για να οδηγήσει τα βοηθητικά μηχανήματα του.

Ηλεκτροκίνητα βοηθητικά μηχανήματα, συμπεριλαμβανομένων αντλιών, βαρούλκων και ανελκυστήρων, εγκαταστάθηκαν στο *USS Oregon*. Η εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης σε αυτό το σκάφος σηματοδότησε ένα σημαντικό ορόσημο στην πρόοδο της ηλεκτρικής πρόωσης και ανέδειξε τη σκοπιμότητα χρήσης ηλεκτρικών κινητήρων για την προώθηση πλοίων [16].

Η εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης στο *USS Oregon* σηματοδότησε μια αξιοσημείωτη πρόοδο από τα ατμοκίνητα βοηθητικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενα σκάφη. Η ηλεκτρική πρόωση παρείχε μια πιο αθόρυβη, πιο αποτελεσματική και πιο αξιόπιστη εναλλακτική λύση στα συστήματα που κινούνται με ατμό [16].

Το *USS Oregon* διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην προώθηση της χρήσης ηλεκτρικής πρόωσης για πλοία, ειδικά μέσω της επιτυχημένης εφαρμογής του στα βοηθητικά μηχανήματα. Αυτό το επίτευγμα όχι μόνο απέδειξε τη σκοπιμότητα της ηλεκτρικής πρόωσης αλλά τόνισε και τα πολυάριθμα οφέλη που προσφέρει [16]. Ως αποτέλεσμα, το *USS Oregon* λειτούργησε ως καταλύτης για τη συνεχή ανάπτυξη και υιοθέτηση της ηλεκτρικής πρόωσης στη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1900, η χρήση της ηλεκτρικής πρόωσης περιοριζόταν κυρίως σε μικρότερα θαλάσσια πλοία όπως ferry boat και ρυμουλκά. Αυτό οφείλεται κυρίως στην περιορισμένη εμβέλεια και ισχύ των αρχικών ηλεκτροκινητήρων. Ένα υποδειγματικό παράδειγμα αυτού είναι το *SS Koondooloo*, ένα ηλεκτρικό ατμοπλοϊκό επιβατηγό πλοίο που απέπλευσε το 1905 από το Σίδνεϊ της Αυστραλίας [17]. Ήταν ένα από τα πρωτοποριακά πλοία μεγάλης κλίμακας που χρησιμοποιούσαν ηλεκτρική πρόωση και οι τεχνολογικές του εξελίξεις θεωρήθηκαν ευρέως εκπληκτικές εκείνη την εποχή.

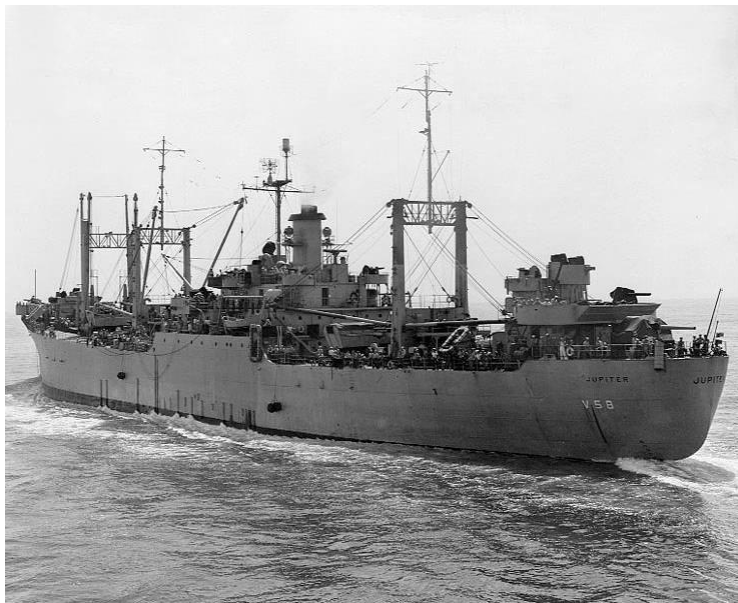
Εξοπλισμένο με μια σημαντική μπαταρία, το *SS Koondooloo* χρησιμοποίησε ένα ζεύγος ηλεκτροκινητήρων για πρόωση, γεγονός που το σηματοδότησε ως πρωτοπόρο στο βασίλειο των ηλεκτροκίνητων θαλάσσιων μεταφορών [17].

Το *SS Koondooloo*, ειδικά σχεδιασμένο για τη μεταφορά επιβατών σε σύντομα ταξίδια στο λιμάνι του Σίδνεϊ, εφάρμοσε ένα σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης που κέρδισε μεγάλη αναγνώριση για την ικανότητά του να προσφέρει στους επιβάτες ένα γαλήνιο και άνετο ταξίδι. Αυτή η καινοτόμος χρήση ηλεκτρικής πρόωσης, αν και επιτυχής, δεν κέρδισε ευρεία υιοθέτηση μεταξύ άλλων σκαφών [17]. Ένας παράγοντας που συνέβαλε στην περιορισμένη υιοθέτησή του ήταν η περιορισμένη εμβέλεια του πλοίου, η οποία υπαγορευόταν από τη χωρητικότητα της μπαταρίας του. Ωστόσο, οι εξελίξεις στην τεχνολογία των μπαταριών, στα ηλεκτρονικά ισχύος και στο σχεδιασμό του κινητήρα κατά τα μέσα του 20^{ου} αιώνα άνοιξαν το δρόμο για τη χρήση της ηλεκτρικής πρόωσης και σε μεγαλύτερα σκάφη [18].

Το ποταμόπλοιο *Vandal* (Εικόνα 2), το οποίο ήταν το εναρκτήριο ντίζελ-ηλεκτρικό σκάφος, δημιουργήθηκε το 1903 [18]. Μετά την επιτυχή δημιουργία ενός σημαντικού ηλεκτρικού κινητήρα και γεννήτριας το 1910, εφαρμόστηκαν ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης για την πρόωση πλοίων σε διάφορες τοποθεσίες, συμπεριλαμβανομένων των Ηνωμένων Πολιτειών. Το *USS Jupiter* (Εικόνα 3), το πρώτο σκάφος του Πολεμικού Ναυτικού που χρησιμοποίησε σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης, κατελκύστηκε το 1912 [18].



Εικόνα 2. Ποταμόπλοιο Vandal [18]

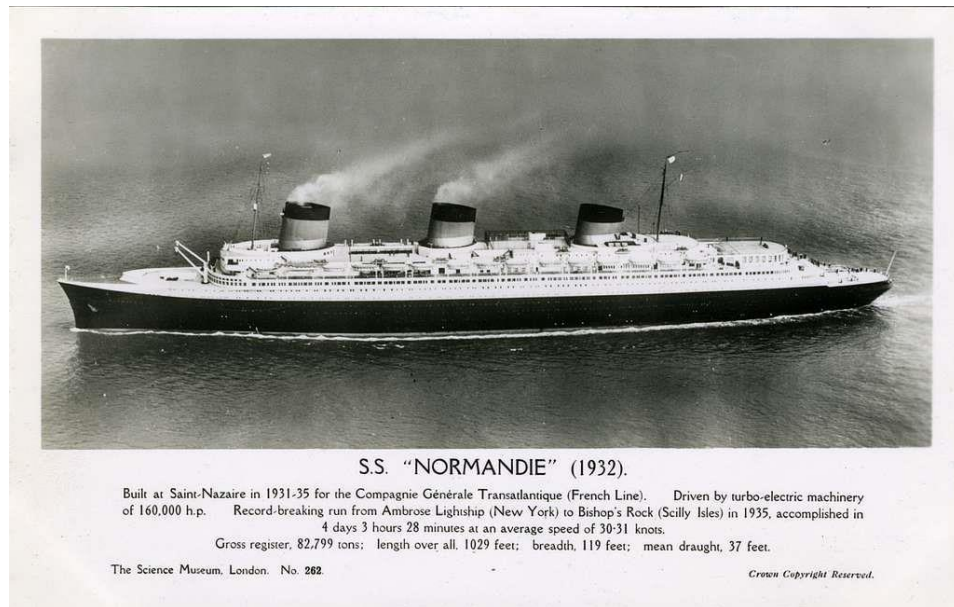


Εικόνα 3. USS Jupiter [18]

Μέχρι τη δεκαετία του 1920, υπήρχε ένας ανταγωνισμός μεταξύ μηχανικής/συμβατικής πρόωσης και συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης. Ωστόσο, οι Βρετανοί εισήγαγαν ένα «ελαφρύ» και εξαιρετικά αποδοτικό μηχανικό σύστημα πρόωσης που γρήγορα έγινε η κυρίαρχη τεχνολογία για την πρόωση πλοίων παγκοσμίως [18]. Εν τω μεταξύ, οι ναυτιλιακές εταιρείες συμμετείχαν σε έναν ανταγωνισμό για τη μείωση της διάρκειας των υπερατλαντικών ταξιδιών. Για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των μεγάλων ποντοπόρων επιβατηγών πλοίων, χρησιμοποιήθηκαν στροβιλοηλεκτρικά συστήματα και διαμορφώσεις.

Η ταχύτητα περιστροφής των ηλεκτροκινητήρων βασιζόταν στις γεννήτριες ατμού που παρείχαν την ισχύ τους [1]. Συνήθως, κάθε κινητήρας πρόωσης λειτουργούσε ανεξάρτητα, αντλώντας ισχύ από το δικό του σύνολο γεννητριών. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις όπου η ταχύτητα δεν ήταν προτεραιότητα, ήταν εφικτό δύο κινητήρες να τροφοδοτούνται από μία μόνο γεννήτρια κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού.

Το *Normandie* (Εικόνα 4), ένα υπέροχο γαλλικό υπερωκεάνιο που έκανε το ντεμπούτο του το 1932, κατέχει τη διάκριση του πρωτοπόρου στη χρήση ενός υπερτροφοδοτούμενου ηλεκτρικού συστήματος πρόωσης για ένα σκάφος μεγάλης κλίμακας [19]. Αυτό το τεχνολογικό θαύμα ώθησε το *Normandie* να γίνει ένα από τα πιο πολυτελή και επεκτατικά πλοία της εποχής της.



Εικόνα 4. Υπερωκεάνιο *Normandie* 1932 [19]

Χρησιμοποιώντας τέσσερις γεννήτριες στροβίλου, το πλοίο αξιοποίησε τη δύναμή τους για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια, η οποία με τη σειρά της προωθούσε τους ηλεκτρικούς κινητήρες που ήταν συνδεδεμένοι με τους έλικες του πλοίου. Αυτό το καινοτόμο σύστημα όχι μόνο παρείχε ένα σύστημα πρόωσης που ήταν πιο αποτελεσματικό και αξιόπιστο, αλλά συνέβαλε επίσης σε μια πιο αθόρυβη και πιο απρόσκοπτη λειτουργία [19]. Το στροβιλοηλεκτρικό σύστημα πρόωσης που εφαρμόστηκε στο *Normandie* ήταν ένα σημαντικό τεχνολογικό ορόσημο κατά τη διάρκεια εκείνης της εποχής, χρησιμεύοντας ως καταλύτης για μελλοντικές εξελίξεις στην ηλεκτρική πρόωση για πλοία και διάφορους άλλους τρόπους μεταφοράς.

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, το Ναυτικό των ΗΠΑ αναγνώρισε την ανάγκη να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη της τεχνολογίας ηλεκτροπρόωσης ως αποτέλεσμα της περιορισμένης πρόσβασης σε γρανάζια και των επακόλουθων ελλείψεων στα μηχανικά συστήματα πρόωσης [19]. Αυτό σηματοδότησε μια άρδην αλλαγή από το προηγούμενος κυρίαρχο σύστημα μηχανικής πρόωσης. Η εναρκτήρια χρήση της ηλεκτρικής πρόωσης σε παγοθραυστικά πλοία χρονολογείται από το 1939, όταν το φινλανδικό παγοθραυστικό *SISU* χρησιμοποίησε ένα σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης «Ward Leonard DC» [19]. Έκτοτε, ένα ευρύ φάσμα συστημάτων ηλεκτρικής

πρόωσης έχει χρησιμοποιηθεί σε πολυάριθμα παγοθραυστικά και παγοδρομικά πλοία, με ισχύ πρόωσης έως και 50 MW.



Εικόνα 5. SISU (IMO: 7359656) [19]

Μετά την ολοκλήρωση του Πολέμου, οι εξελίξεις στην τεχνολογία της μηχανικής κίνησης παρέμειναν και διατήρησαν την υπεροχή τους. Η ανάπτυξη των κινητήρων ντίζελ έλαβε μεγάλη αναγνωρισιμότητα, οδηγώντας σε σταδιακή μείωση της χρήσης ηλεκτρικής πρόωσης στην εμπορική ναυτιλία [16]. Ωστόσο, η χρήση της τεχνολογίας ηλεκτρικής πρόωσης βρήκε πρωταρχικά τη θέση της στα υποβρύχια, επιτρέποντάς τους να λειτουργούν εντός του νερού προσωρινά μέσω ισχύος μπαταρίας, αντισταθμίζοντας την απουσία οξυγόνου και την αδυναμία χρήσης καύσης ντίζελ.

Στα μέσα του 20^{ου} αιώνα, οι εξελίξεις στα ηλεκτρονικά ισχύος, στα συστήματα πλοήγησης και ο αποτελεσματικός έλεγχος των διακυμάνσεων της ταχύτητας στους ηλεκτρικούς κινητήρες οδήγησαν στην αυξανόμενη δημοτικότητα του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης ντίζελ [16]. Αυτό το σύστημα συνδύαζε τα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης, όπως η αθόρυβη λειτουργία, με την εκτεταμένη εμβέλεια και την αξιοπιστία των κινητήρων ντίζελ. Τα υποβρύχια, ειδικότερα, επωφελήθηκαν σε μεγάλο βαθμό από αυτή την τεχνολογία λόγω της κρίσιμης ανάγκης για αθόρυβη λειτουργία.

Μετά τη δεκαετία του 1980, υπήρξε μια στροφή στη χρήση των κινητήρων ντίζελ κυρίως για την πρόωση πλοίων, με αποτέλεσμα να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στην ηλεκτροπρόωση. Κατά συνέπεια, η τροφοδοσία για το σύστημα πρόωσης των πλωτών σκαφών βασίζεται πλέον σε ένα ισχυρό δίκτυο που διατηρεί σταθερή τάση και συχνότητα. Ταυτόχρονα, οι ηλεκτροκινητήρες λειτουργούν σε συγκεκριμένες στροφές ενώ οι έλικες, με σταθερό βήμα, περιστρέφονται ανάλογα. Αξίζει να αναφερθεί ότι ένας αυξανόμενος αριθμός παγοθραυστικών, ερευνητικών πλοίων και κρουαζιερόπλοιων έχουν υιοθετήσει αυτή τη μορφή πρόωσης [16].

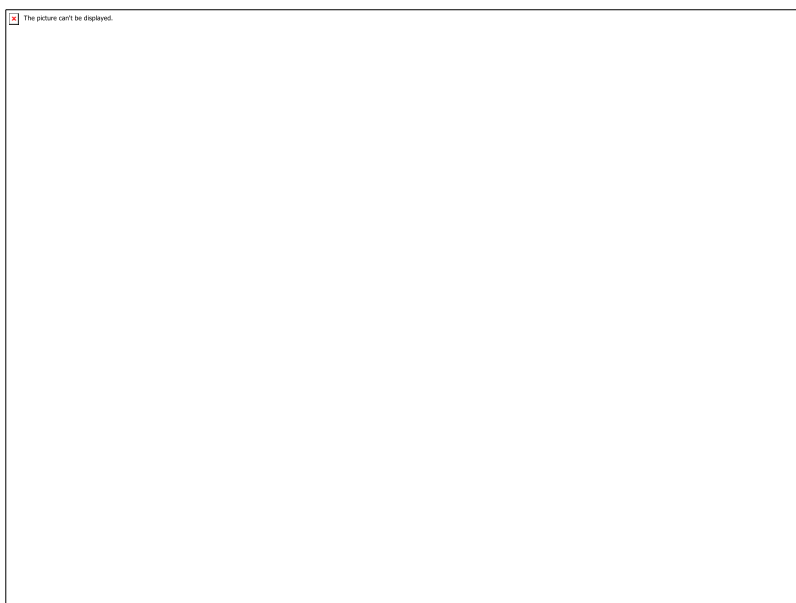
Ταυτόχρονα, υπάρχει μια αυξανόμενη χρήση των προπελών μεταβλητού βήματος, οι οποίες συνδέονται στενά με την τεχνική πρόωσης ντίζελ [16]. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει

τη ρύθμιση της ώσης μέσω ενός συστήματος που μεταβάλλει το βήμα των ελίκων του πλοίου.

Στη δεκαετία του 1950, υπήρξε μια σημαντική πρόοδος στην ηλεκτρική πρόωση με την επιτυχή προσαρμογή του συστήματος πρόωσης αζιμουθίου για θαλάσσιες εφαρμογές. Αυτή η τεχνολογία, που αρχικά σχεδιάστηκε και δημιουργήθηκε από τον Σουηδό μηχανικό Josef Ressel στις αρχές του 1900, υποβλήθηκε σε βελτίωση και εξειδίκευση για να γίνει εμπορικά εφικτή [16].

Το σύστημα λειτουργεί συνδυάζοντας τα συστήματα κινητήρα και προπέλας σε μια ενιαία μονάδα, η οποία βυθίζεται στο νερό και τοποθετείται στο πίσω μέρος του σκάφους. Μέσω της χρήσης ενός ή δύο ελίκων, το σύστημα μπορεί να περιστρέφεται ομαλά οριζόντια προς οποιαδήποτε κατεύθυνση [16]. Ως αποτέλεσμα, το πλοίο αποκτά βελτιωμένη ικανότητα ελιγμών, εξαλείφει το αξονικό σύστημα και εξαλείφει την απαίτηση για μηχανισμό διεύθυνσης.

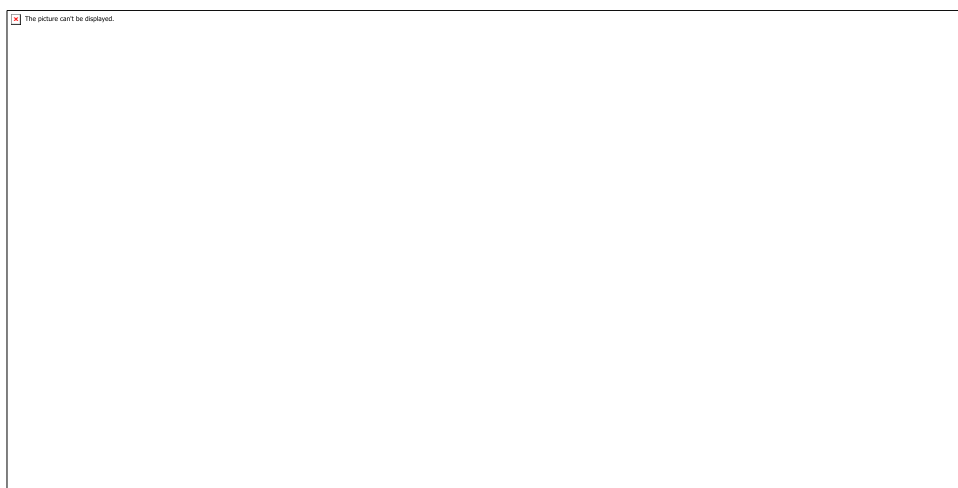
Η *Wärtsilä*, μια ναυπηγική εταιρεία με έδρα τη Φινλανδία, πιστώνεται με την πρωτοπορία του συστήματος πρόωσης αζιμουθίου για εμπορική χρήση. Αυτή η πρωτοποριακή τεχνολογία εισήχθη τη δεκαετία του 1950 [16]. Το φινλανδικό παγοθραυστικό *Voima*, που κατελκύστηκε το 1954, ήταν το πρώτο πλοίο που εξοπλίστηκε με αζιμουθιακό προωθητή. Με την εγκατάσταση δύο αζιμουθιακών προωθητών, το *Voima* απέκτησε εξαιρετική ευελιξία, επιτρέποντας την ομαλή πλοήγηση ακόμη και σε συνθήκες παγετού.



Εικόνα 6. Παγοθραυστικό *Voima* 1954 [16]

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση του συστήματος πρόωσης αζιμουθίου έχει κερδίσει σημαντική έλξη σε διάφορους τύπους σκαφών, συμπεριλαμβανομένων των ρυμουλκών, των υπεράκτιων σκαφών υποστήριξης, των καταδρομικών και των παγοθραυστικών. Καθώς ο χρόνος προχωρούσε, προέκυψαν εξελίξεις στα υλικά, στο σχεδιασμό και στα συστήματα ελέγχου, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της απόδοσης και της συνολικής απόδοσης.

Υπό το πρίσμα των αυξανόμενων ανησυχιών σχετικά με τις οικολογικές συνέπειες των κινητήρων ντίζελ, έχει επικεντρωθεί η προσοχή εκ νέου στη χρήση αμιγώς ηλεκτρικών συστημάτων πρόωσης τα τελευταία χρόνια. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα αυτής της τάσης είναι η εισαγωγή του *MS Ampere*, του εναρκτήριου ηλεκτρικού επιβατηγού πλοίου στον κόσμο, το οποίο έκανε το ντεμπούτο του στη Νορβηγία το 2018 [20]. Τροφοδοτούμενο από μπαταρίες ιόντων λιθίου, αυτό το πλοίο παρείχε φιλικές προς το περιβάλλον επιλογές μεταφοράς στους επιβάτες του, με βασικό χαρακτηριστικό τις μηδενικές εκπομπές ρύπων.



Εικόνα 7. *MS Ampere* 2018 [20]

Η εισαγωγή του συγκεκριμένου σκάφους σηματοδότησε μια πρωτοποριακή πρόοδο στην ηλεκτρική πρόωση του ναυτιλιακού τομέα. Γνωστό ως ένα από τα πιο αιχμής πλοία ηλεκτρικών οχημάτων παγκοσμίως, το *MS Ampere* κατασκευάστηκε στο Sognefjord της Νορβηγίας [20]. Η ισχύς του προέρχεται από ένα σύστημα μπαταρίας και δύο ηλεκτροκινητήρες. Αυτό το πλοίο, με τον μηχανισμό ηλεκτρικής πρόωσής του, παρουσιάζει μια βιώσιμη, οικολογική συνείδηση, χωρίς εκπομπές και εξαιρετικά αποτελεσματική μέθοδο για τη μεταφορά επιβατών και εμπορευμάτων.

Η επαναστατική εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης στο *MS Ampere* έχει κερδίσει ευρεία αναγνώριση, σηματοδοτώντας μια σημαντική πρόοδο στον τομέα της πρόωσης πλοίων. Αυτό το αξιοσημείωτο επίτευγμα όχι μόνο έχει δημιουργήσει ενθουσιασμό για

την ηλεκτρική πρόωση σε άλλα πλοία και ferry boat, αλλά έχει επίσης αποδείξει τη βιωσιμότητα και τα πλεονεκτήματα της χρήσης ηλεκτρικής πρόωσης στη ναυτιλιακή βιομηχανία [20].

Η πρόοδος της τεχνολογίας ηλεκτρικής πρόωσης προωθήθηκε σημαντικά από την εμφάνιση των μπαταριών ιόντων λιθίου κατά τις δεκαετίες του 1990 και του 2000 [18]. Αυτές οι μπαταρίες, που διακρίνονται για την ανώτερη ενεργειακή τους πυκνότητα και την εκτεταμένη διάρκεια ζωής τους σε σύγκριση με παλαιότερες τεχνολογίες μπαταριών, έγιναν η βέλτιστη επιλογή για συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης. Κατά συνέπεια, αυτή η σημαντική ανακάλυψη διευκόλυνε τη δημιουργία συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης για διάφορα οχήματα, συμπεριλαμβανομένων των πλοίων.

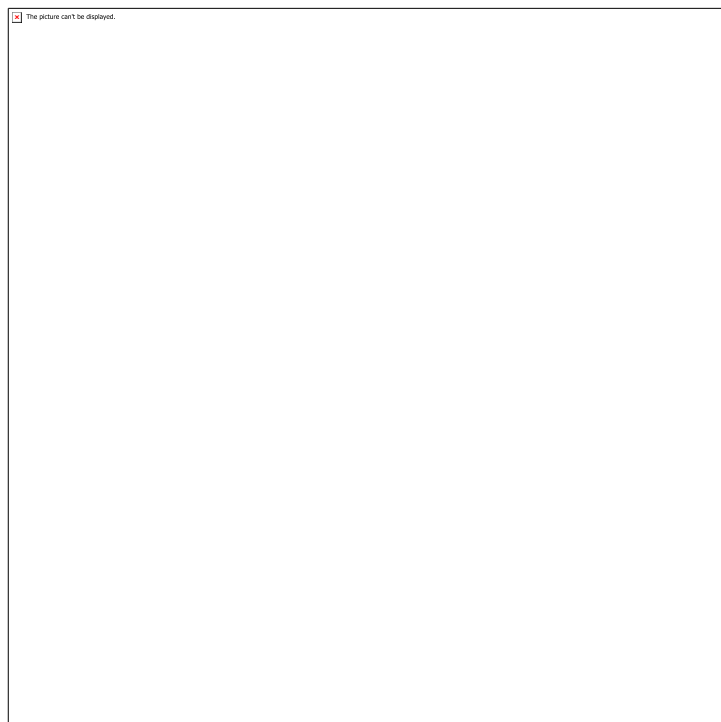
Η χρήση της ηλεκτρικής πρόωσης στα πλοία έχει γνωρίσει αξιοσημείωτη αύξηση τα τελευταία χρόνια. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στις τεχνολογικές προόδους, στην αυξανόμενη ανησυχία σχετικά με τις οικολογικές συνέπειες των συμβατικών συστημάτων πρόωσης και στην ύπαρξη οικονομικών κινήτρων που προωθούν την υιοθέτηση τεχνολογιών με περιβαλλοντική συνείδηση. Επιπλέον, η ενσωμάτωση συστημάτων πρόωσης αξιμουθίου έχει καταστεί εφικτή, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση των δυνατοτήτων ηλεκτρικής πρόωσης και την ευρεία εφαρμογή της ως το κύριο μέσο πρόωσης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις ισχύος εμπίπτουν στην περιοχή των 6MW έως 7MW [16].

Σε όλο το εκτεταμένο και ιστορικό παρελθόν του, το πεδίο της ηλεκτροπρόωσης έχει βαθιές ρίζες που μπορούν να αναχθούν στα τέλη του 1800. Καθώς η τεχνολογία έχει προχωρήσει και η προστασία του περιβάλλοντος έχει αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία, η ηλεκτρική πρόωση έχει αναδειχθεί ως μια ολοένα και πιο προτιμώμενη επιλογή για την προώθηση διαφόρων τρόπων μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένων των πλοίων.

1.2 Ενεργειακά συστήματα πλοίων

Το σύστημα ισχύος ενός παραδοσιακού πλοίου (όπως φαίνεται στην *Εικόνα 8*) αποτελείται από ένα κύριο σύστημα πρόωσης, που φέρει κινητήρες ντίζελ, καθώς και βοηθητικά συστήματα όπως γεννήτριες, αντλίες και μονάδες θέρμανσης και ψύξης [21]. Το κύριο σύστημα πρόωσης μετατρέπει το καύσιμο σε μηχανική ενέργεια για να προωθήσει το πλοίο προς τα εμπρός, ενώ τα βοηθητικά συστήματα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για την τροφοδοσία διαφόρων συστημάτων και εξοπλισμού επί του σκάφους. Για την κάλυψη των απαιτήσεων θέρμανσης, χρησιμοποιούνται λέβητες ντίζελ. Το καύσιμο για το σύστημα πρόωσης και τη γεννήτρια ντίζελ αποθηκεύεται στις δεξαμενές του πλοίου και παρέχεται στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ανάλογα με

τις ανάγκες. Γεννήτριες, που τροφοδοτούνται από το κύριο σύστημα πρόωσης ή βοηθητικούς κινητήρες, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για βασικές λειτουργίες και ανέσεις. Εν τω μεταξύ, οι κινητήρες ντίζελ χρησιμεύουν ως κινητήρια δύναμη στο πλοίο και οι γεννήτριες ντίζελ παρέχουν την απαραίτητη ηλεκτρική ισχύ [22]. Για την κάλυψη των θερμικών αναγκών, το νερό θερμαίνεται από βοηθητικούς λέβητες που λειτουργούν με ντίζελ.



Εικόνα 8. Συμβατικό Ενεργειακό Σύστημα [21]

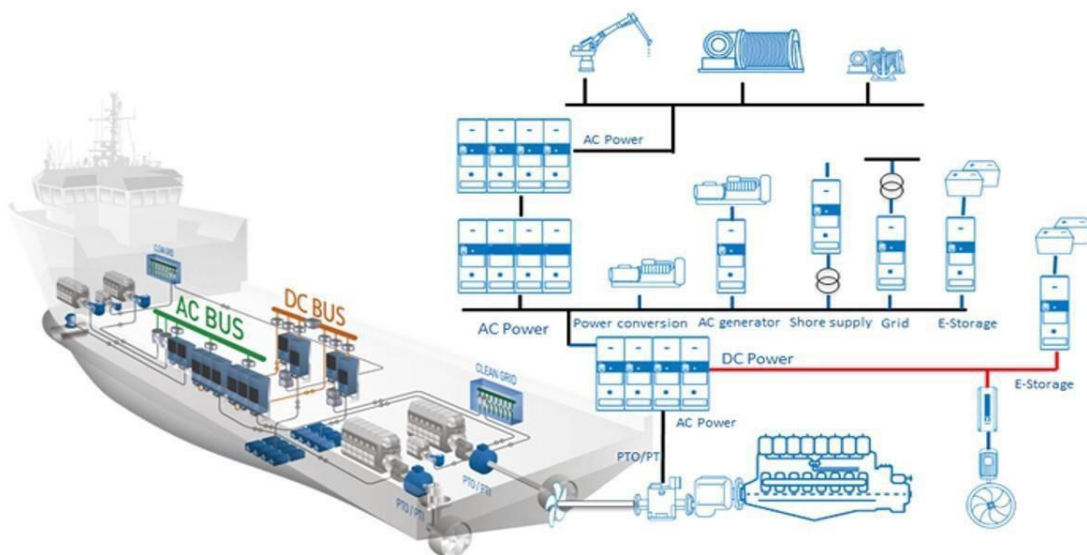
Η βάση για το σύστημα πλοίων ηλεκτρικής πρόωσης, το οποίο αναπτύχθηκε αργότερα, μπορεί να αναχθεί σε μια επιστημονική δημοσίευση με τίτλο «Διαχρονική βελτιστοποίηση σύνθεσης, σχεδίασης και λειτουργίας ολοκληρωμένων ενεργειακών συστημάτων πλοίων: Γενική μέθοδος και εφαρμογή σε σύστημα με κύριες μηχανές ντίζελ» [23]. Αυτή η δημοσίευση διερευνά το μέγεθος των διαφόρων εξαρτημάτων του πλοίου με βάση τις ενεργειακές απαιτήσεις και τις δαπάνες καυσίμων. Η μοναδική πτυχή αυτού του συστήματος, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά πλοία, έγκειται στη χρήση της θερμικής ενέργειας που υπάρχει στα καυσαέρια (που αντιπροσωπεύονται από κόκκινες διακεκομμένες γραμμές) που εκπέμπουν οι κύριοι κινητήρες κατά τη λειτουργία τους. Με την αξιοποίηση της θερμότητας από αυτά τα καυσαέρια, καθίσταται δυνατή η παραγωγή υπέρθερμου ατμού (που αντιπροσωπεύεται από μπλε διακεκομμένες γραμμές, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 9*) μέσω της θέρμανσης του νερού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα σύστημα Heat Recovery Steam Generator (HRSG) [23]. Η θερμική ισχύς από τα καυσαέρια μπορεί στη συνέχεια να

χρησιμοποιηθεί για την εκπλήρωση ενός θερμικού φορτίου ή την κατεύθυνση του ατμού προς έναν στρόβιλο, παράγοντας έτσι μηχανικό ή/και ηλεκτρικό έργο παρόμοιο με μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου (CCP) [23].



Εικόνα 9. Διαμόρφωση ενός ενεργειακού συστήματος [24]

1.3 Ανάλυση ενός Συστήματος Ηλεκτροπρόωσης



Εικόνα 10. Τα κύρια μέρη ενός συστήματος ηλεκτροπρόωσης [11]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 10, τα κύρια μέρη του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης ενός πλοίου περιλαμβάνουν συνήθως τα ακόλουθα στοιχεία [25]:

α) Ηλεκτρικούς κινητήρες. Αυτοί οι κινητήρες χρησιμεύουν ως ο πυρήνας του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης, παρέχοντας την απαραίτητη ισχύ για την προώθηση του πλοίου προς τα εμπρός. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες, σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης, τείνουν να παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση και αξιοπιστία ενώ εκπέμπουν μηδενικές επιβλαβείς ουσίες [25]. Οι ηλεκτροκινητήρες που χρησιμοποιούνται σε πλοία περιλαμβάνουν γενικά επαγωγικούς κινητήρες, γνωστούς και ως ασύγχρονους κινητήρες [25]. Αυτοί οι κινητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης πλοίων λόγω της φήμης τους για αξιοπιστία, απόδοση και ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης. Λειτουργώντας με βάση την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, οι επαγωγικοί κινητήρες δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο μέσω της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός αγωγού που μεταφέρει ρεύμα και ενός μαγνητικού πεδίου.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του στάτορα και του ρότορα στους επαγωγικούς κινητήρες έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου [26]. Ο στάτορας, ο οποίος παραμένει ακίνητος, παίρνει τη μορφή ενός κυλίνδρου που φέρει τρία πηνία που τροφοδοτούνται με ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή η διάταξη δημιουργεί το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Από την άλλη πλευρά, ο ρότορας είναι το εξάρτημα που περιστρέφεται και κινείται μέσα στον κινητήρα. Το προαναφερθέν περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί μια τάση στον ρότορα, γνωστή ως ηλεκτροκινητική δύναμη. Αυτή η τάση, με τη σειρά της, προκαλεί τη ροή ρεύματος, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη της δύναμης Lorentz που ωθεί την περιστροφή του ρότορα. Αυτή η περιστροφική κίνηση είναι υπεύθυνη για την οδήγηση του συστήματος πρόωσης του πλοίου. Αυτοί οι κινητήρες αναφέρονται ως επαγωγικοί επειδή το ρεύμα, η τάση και το μαγνητικό πεδίο που παράγονται από τον ρότορα είναι άμεσο αποτέλεσμα αυτών που παράγονται από τον στάτορα [25]. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται ως ασύγχρονοι επειδή το περιστροφικό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον ρότορα λειτουργεί με ελαφρώς χαμηλότερη ταχύτητα σε σύγκριση με αυτή του στάτορα. Ένα αξιοσημείωτο πλεονέκτημα των επαγωγικών κινητήρων είναι η καλύτερη απόδοσή τους. Είναι ικανοί να λειτουργούν αποτελεσματικά σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας και μπορούν να σχεδιαστούν για να χειρίζονται υψηλά επίπεδα ισχύος. Οι επαγωγικοί κινητήρες έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι εύκολο να σχεδιαστούν και μπορούν να κατασκευαστούν με οικονομικό κόστος. Επιπλέον, παρουσιάζουν ανθεκτικότητα και αξιοπιστία, με μεγάλη διάρκεια ζωής και ελάχιστες ανάγκες συντήρησης [25].

Η καταλληλότητα των επαγωγικών κινητήρων για συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης πηγάζει από την εγγενή τους ικανότητα να ελέγχονται με ευκολία και ακρίβεια. Μέσω

του χειρισμού του ρεύματος στις περιελίξεις του στάτη, η ταχύτητα και η ροπή του κινητήρα μπορούν να ρυθμιστούν με ακρίβεια, μια κρίσιμη πτυχή για τη λειτουργία του συστήματος πρόωσης ενός πλοίου. Λόγω της εξαιρετικής τους απόδοσης, αξιοπιστίας και ευκολίας ελέγχου, οι επαγωγικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως για ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης πλοίων.

β) Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, που χρησιμοποιούνται σε συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης πλοίων, λειτουργούν με διαφορετική αρχή σε σύγκριση με τους επαγωγικούς κινητήρες. Ενώ και οι δύο τύποι διαθέτουν στάτορα και ρότορα, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες αντί να βασίζονται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή για να δημιουργήσουν ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο [25]. Αυτοί οι μαγνήτες, που συνήθως αποτελούνται από υλικά σπάνιων γαιών όπως νεοδύμιο-σίδηρος-βόριο (NdFeB) ή σαμάριο-κοβάλτιο (SmCo), διαθέτουν εξαιρετική μαγνητική ισχύ και είναι ικανοί να παράγουν ισχυρά μαγνητικά πεδία. Η αυξανόμενη χρήση κραμάτων στην παραγωγή μόνιμων μαγνητών έχει συμβάλει στην αυξανόμενη επικράτηση αυτών των κινητήρων. Συγκεκριμένα, αυτοί οι κινητήρες αναφέρονται ως «σύγχρονοι» λόγω της έλλειψης ολίσθησης [25].

Το κύριο πλεονέκτημα των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη έγκειται στην αξιοσημείωτη απόδοσή τους. Αυτοί οι κινητήρες μπορούν να διατηρήσουν υψηλό επίπεδο απόδοσης σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας και η απόδοσή τους παραμένει σχετικά ανεπηρέαστη από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας και του φορτίου, διακρίνοντάς τους από τους κινητήρες επαγωγής [12].

Επιπλέον, η χρήση μόνιμων μαγνητών για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου επιτρέπει τη μείωση τόσο του μεγέθους όσο και του βάρους του κινητήρα, διακρίνοντάς τον από τους επαγωγικούς κινητήρες με ισοδύναμη ισχύ [25]. Αυτό το χαρακτηριστικό το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο σε περιπτώσεις με καθορισμένους περιορισμούς σε χώρο και βάρος, όπως στα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης πλοίων. Επιπλέον, η ενσωμάτωση σπάνιων γαιών επιτρέπει τη μείωση της ανάγκης για ψύξη.

Ο συντελεστής ισχύος των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη έχει πολλά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ελαχιστοποίηση των ηλεκτρικών απωλειών και την ενίσχυση της απόδοσης [25]. Επιπλέον, η απουσία ρεύματος που απαιτείται για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου μειώνει σημαντικά τις θερμικές απώλειες.

Ωστόσο, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν μερικά μειονεκτήματα. Το κύριο μειονέκτημα είναι το υψηλότερο κόστος τους σε σύγκριση με τους επαγωγικούς κινητήρες [25]. Η τιμή των μόνιμων μαγνητών και των εξειδικευμένων υλικών που απαιτούνται για την παραγωγή τους μπορεί να είναι πολλή υψηλή. Επιπλέον, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη είναι πιο ευαίσθητοι στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας από τους επαγωγικούς κινητήρες, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την απόδοσή τους. Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε την πολιτική πτυχή της εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς ο έλεγχος της πλειοψηφίας των μόνιμων μαγνητών ανήκει στη Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας [25].

Συνοψίζοντας, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη είναι ένα σύνολο ηλεκτροκινητήρων που παρέχει ανώτερη πυκνότητα ισχύος και απόδοση σε σύγκριση με τους επαγωγικούς κινητήρες. Αυτοί οι κινητήρες είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης πλοίων που έχουν περιορισμούς στο χώρο και στο βάρος. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι έχουν υψηλότερο κόστος και είναι πιο ευαίσθητοι στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σε σύγκριση με τους επαγωγικούς κινητήρες.

γ) Η μαγνητική ροή στους γραμμικούς κινητήρες αξονικής ροής ρέει ακτινικά, παρέχοντάς τους ένα σαφές πλεονέκτημα όσον αφορά την πυκνότητα ισχύος και ροπής σε σύγκριση με τους κινητήρες που αναφέρθηκαν προηγουμένως [27]. Αυτοί οι κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν με 5, 10 ή 15 φάσεις, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται προηγμένα ηλεκτρονικά ισχύος, τα οποία θα διερευνηθούν περαιτέρω. Αντίθετα, οι επαγωγικοί κινητήρες λειτουργούν συνήθως με μόνο 3 φάσεις.

Όσον αφορά τους κινητήρες, υπάρχουν δύο τύποι που ξεχωρίζουν: γραμμικοί πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής και κινητήρες εγκάρσιας ροής πολλαπλών σταδίων [27]. Ο πρώτος τύπος χρησιμοποιεί μόνιμους μαγνήτες που είναι στρατηγικά προσανατολισμένοι για να ευθυγραμμίσουν τη μαγνητική ροή παράλληλα με τον άξονα του κινητήρα. Αυτός ο προσανατολισμός επιτυγχάνεται με τη χρήση πολλαπλών σταδίων. Από την άλλη πλευρά, ο δεύτερος τύπος χρησιμοποιεί μόνιμους μαγνήτες στον ρότορα, επίσης με συγκεκριμένο προσανατολισμό, για να εξασφαλίσει μια μαγνητική ροή κατά μήκος του άξονα του κινητήρα [25]. Αυτοί οι κινητήρες χρησιμοποιούνται συνήθως όταν υπάρχει ανάγκη σύνδεσης και λειτουργίας εξαρτημάτων. Όσον αφορά την απόδοση, οι πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής προτιμώνται έναντι των κινητήρων αξονικής ροής.

Οι έλικες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης που δημιουργείται από τον ηλεκτροκινητήρα στην απαραίτητη ώθηση προς τα εμπρός για

την προώθηση του πλοίου μέσα στο νερό [27]. Συνήθως, οι έλικες συνδέονται με έναν άξονα που εκτείνεται από τον ηλεκτροκινητήρα μέχρι την πρύμνη του σκάφους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγεθος της μηχανικής ροπής είναι ευθέως ανάλογο με το τετράγωνο της μηχανικής ταχύτητας, αντικατοπτρίζοντας τη συμπεριφορά που παρατηρείται σε φυγόκεντρες αντλίες και ανεμιστήρες.

Η μεγιστοποίηση της απόδοσης και της απόδοσης του συστήματος είναι υψίστης σημασίας στα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης, γι' αυτό και η επιλογή προπέλας έχει καθοριστικό ρόλο [27]. Ο σχεδιασμός της προπέλας επηρεάζει άμεσα την ώθηση που δημιουργείται, την απόδοση του συστήματος πρόωσης και την κατανάλωση καυσίμου του πλοίου συνολικά.

Κατά την επιλογή της προπέλας για ένα σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης, η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα είναι κρίσιμης σημασίας [27]. Είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί η έλικα με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργεί την κατάλληλη ποσότητα ώσης για να αντιστοιχεί στην ισχύ εξόδου του ηλεκτροκινητήρα. Εάν η προπέλα είναι μικρή ως προς το μέγεθος, ο ηλεκτροκινητήρας θα υπερφορτωθεί, με αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση και την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Αντίθετα, εάν η προπέλα είναι αρκετά μεγάλη ως προς το μέγεθος, ο ηλεκτροκινητήρας θα δυσκολευτεί να παράγει επαρκή ισχύ για να την περιστρέψει, οδηγώντας σε μείωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος.

Τα ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης προσφέρουν ένα σύνολο επιλογών προπέλας, όπως προπέλες σταθερού βήματος και μεταβλητού βήματος, καθεμία από τις οποίες εξυπηρετεί έναν ξεχωριστό σκοπό [27].

Η πιο οικονομική και απλή επιλογή για προπέλα είναι οι έλικες σταθερού βήματος, αν και δεν είναι τόσο αποδοτικοί όσο άλλες επιλογές [25]. Αυτές οι έλικες έχουν σχεδιαστεί για να χειρίζονται τη μέγιστη συνεχή απορρόφηση ισχύος, ειδικά σε περιπτώσεις όπου το φορτίο είναι στο μέγιστο και οι καιρικές συνθήκες είναι ήρεμες.

Ωστόσο, σε δυσμενείς συνθήκες, η προπέλα και το σύστημα κινητήρα πρέπει να είναι υπερμεγέθη κατά 10% έως 20% προκειμένου να λειτουργούν με πλήρη ισχύ [27].

Η χρήση ελίκων μεταβλητού βήματος επιτρέπει τη ρύθμιση της γωνίας κλίσης του πτερυγίου, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος πρόωσης [25]. Αυτή η βελτιστοποίηση της απόδοσης επηρεάζει τη λειτουργική πολυπλοκότητα και το κόστος αυτών των ελίκων.

δ) Μπαταρίες. Οι ηλεκτροκινητήρες του πλοίου τροφοδοτούνται από τις μπαταρίες, οι οποίες αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια [28]. Οι μπαταρίες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης και έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να ανταποκρίνονται στις λειτουργικές απαιτήσεις του πλοίου παρέχοντας μια καθορισμένη ποσότητα ενέργειας. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης λόγω της εκτεταμένης διάρκειας ζωής τους και της υψηλής ενεργειακής πυκνότητάς τους.

Το σύστημα πρόωσης ενός πλοίου παράγει μηχανική ενέργεια που στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από γεννήτριες [28]. Αυτή η ηλεκτρική ενέργεια είναι ζωτικής σημασίας για τη φόρτιση των μπαταριών του πλοίου, ειδικά κατά τη διάρκεια μεγάλων ταξιδιών. Διάφοροι τύποι γεννητριών, όπως γεννήτριες ντίζελ, αεριοστρόβιλοι και κυψέλες καυσίμου, χρησιμοποιούνται σε συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης.

ε) Ηλεκτρονικά σχύος. Περιλαμβάνει τη συλλογή ηλεκτρονικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της κίνησης της ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ μπαταριών, γεννητριών και ηλεκτροκινητήρων [29]. Αυτά τα ηλεκτρονικά ισχύος έχουν τεράστια σημασία στη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης, καθώς εγγυώνται την αποδοτική και αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος. Οι μετατροπείς τάσης, οι ανορθωτές και οι μετατροπείς είναι μεταξύ των ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά την παραγωγή, τη μεταφορά, τη διανομή, αποθήκευση και τη ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι δυνατότητες αυτών των συσκευών περιλαμβάνουν [29]:

1. Τροποποίηση τάσεων και ρευμάτων DC (συνεχούς ρεύματος).
2. Μετατροπή AC (εναλλασσόμενου ρεύματος) σε DC (συνεχούς ρεύματος).
3. Ρύθμιση του πλάτους του AC (εναλλασσόμενου ρεύματος).
4. Μετατροπή DC (συνεχούς ρεύματος) σε AC (εναλλασσόμενου ρεύματος).

στ) Το σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης του πλοίου βασίζεται σε συστήματα διαχείρισης ενέργειας για την επίβλεψη και τη ρύθμιση της ροής ενέργειας [30]. Χρησιμοποιώντας αλγόριθμους ελέγχου και παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, αυτά τα συστήματα βελτιστοποιούν τη χρήση των μπαταριών του πλοίου και άλλων πηγών ενέργειας, με αποτέλεσμα βελτιωμένη απόδοση και μείωση του κόστους. Τα συστήματα διαχείρισης

ενέργειας διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη μεγιστοποίηση της απόδοσης και στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Οι ηλεκτροκινητήρες και το σύστημα πρόωσης του πλοίου ρυθμίζονται από συστήματα ελέγχου πρόωσης. Αυτά τα συστήματα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης και της απόδοσης του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης, καθώς και στη βελτιστοποίηση της ταχύτητας και της ικανότητας ελιγμών του πλοίου. Τα συστήματα ελέγχου πρόωσης αποτελούνται από ελεγκτές, αισθητήρες και ενεργοποιητές και συχνά χρησιμοποιούν προηγμένους αλγόριθμους ελέγχου για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος.

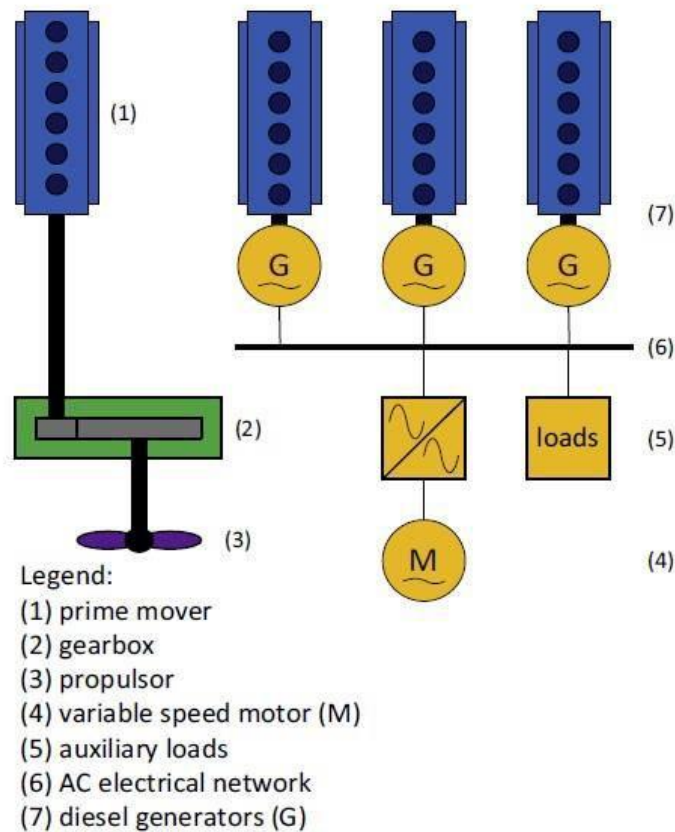
z) Συστήματα ελέγχου πρόωσης. Οι ειδικές ανάγκες και απαιτήσεις ενός πλοίου υπαγορεύουν τη σύνθεση του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσής του [31]. Ο πρωταρχικός στόχος αυτών των συστημάτων είναι να παρέχουν ένα αξιόπιστο και αποτελεσματικό μέσο πρόωσης, ελαχιστοποιώντας έτσι το οικολογικό αποτύπωμα του ναυτιλιακού τομέα και ενισχύοντας την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα.

Κεφάλαιο 2. Συστήματα μηχανικής πρόωσης

Σε όλη την ιστορία, τα πλοία βασίζονταν σε έναν συνδυασμό κουπιών και πανιών για να ταξιδέψουν στις θάλασσες, αξιοποιώντας τη δύναμη του ανέμου και τον 3^ο νόμο του Νεύτωνα για την πρόωση. Ωστόσο, με την έλευση της Βιομηχανικής Επανάστασης, η εισαγωγή των μηχανημάτων έφερε επανάσταση στις μεταφορές. Η ατμομηχανή εμφανίστηκε ως αντικατάσταση των παραδοσιακών πανιών και κουπιών, εγκαινιάζοντας μια νέα εποχή μηχανικής πρόωσης για τα πλοία [13]. Όμως οι εξελίξεις δεν τελείωσαν εκεί. Η πρωτοποριακή εφεύρεση των κινητήρων εσωτερικής καύσης οδήγησε στην ενσωμάτωση των κινητήρων ντίζελ στα πλοία, ήδη από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα.

Παρά τις πολυάριθμες προόδους και βελτιώσεις που έγιναν στους κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICE) με την πάροδο του χρόνου, η θεμελιώδης ιδέα της χρήσης τους για πρόωση παρέμεινε σε μεγάλο βαθμό αναλλοίωτη [32]. Ένα σημαντικό μέρος του παγκόσμιου στόλου εξακολουθεί να βασίζεται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης για την ισχύ του. Ενώ υπήρξαν αξιοσημείωτες προσθήκες όπως αεριοστρόβιλοι, πυρηνικά και ηλεκτροκίνητα πλοία, τα οφέλη των κινητήρων ντίζελ εξακολουθούν να υφίστανται, καθιστώντας τους μια βολική, οικονομικά αποδοτική και πρακτική επιλογή για θαλάσσιες μεταφορές.

Η *Εικόνα 11* παρουσιάζει μια σχηματική αναπαράσταση ενός μηχανικού συστήματος πρόωσης που χρησιμοποιείται σε πλοία. Αυτό το σύστημα περιλαμβάνει έναν πρωτεύοντα κινητήρα, συνήθως έναν κινητήρα ντίζελ, που ωθεί το πλοίο εμπρός [11]. Για να διευκολυνθεί αυτή η διαδικασία, ένας μειωτήρας ταχύτητας είναι ενσωματωμένος μεταξύ του κινητήρα και της προπέλας. Αυτός ο μειωτήρας ταχύτητας λειτουργεί παρόμοια με αυτούς που υπάρχουν στα αυτοκίνητα, καθώς ρυθμίζει την κατανομή ισχύος από τον στροφαλοφόρο άξονα του κινητήρα ντίζελ στον έλικα, ενώ ταυτόχρονα μετατρέπει την περιστροφική κίνηση από τον έναν άξονα στον άλλο.



Εικόνα 11. Μηχανικό σύστημα πρόωσης [11]

Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις ισχύος του πλοίου, ένα δίκτυο AC είναι απαραίτητο σε αυτές τις ρυθμίσεις. Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας διευκολύνεται μέσω γεννητριών ντίζελ, οι οποίες μετατρέπουν την περιστροφική κίνηση στον άξονά τους σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω μετασχηματιστών.

Στην περίπτωση των μεγάλων εμπορικών σκαφών, δεν υπάρχει ανάγκη για μειωτήρα ταχύτητας, καθώς η αντιστροφή της περιστροφής του κινητήρα επιτρέπει στο πλοίο να κινείται αντίστροφα. Αντίθετα, τα μικρότερα πλοία βασίζονται σε μειωτήρες ταχύτητας για να μειώσουν την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και να ενισχύσουν τη ροπή, καθώς είναι εξοπλισμένα με κινητήρες ντίζελ μέσης ή υψηλής ταχύτητας [11]. Το κιβώτιο ταχυτήτων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να αντιστρέψει την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και να επιτρέψει την κίνηση του πλοίου προς τα πίσω.

Η προπέλα σταθερού βήματος είναι η κυρίαρχη μέθοδος μηχανικής πρόωσης. Για να διευκολυνθεί η λειτουργία του, είναι απαραίτητος ένας μειωτήρας ταχύτητας μεταξύ της προπέλας και του κινητήρα [3]. Αυτό το εξάρτημα όχι μόνο επιτρέπει τη μεταφορά ισχύος μεταξύ των αξόνων αλλά έχει επίσης τη δυνατότητα να εμποδίσει την ταχύτητα του πλοίου ή ακόμη και να προκαλέσει την περιστροφή της προπέλας προς την αντίθετη κατεύθυνση, με αποτέλεσμα την κίνηση προς τα πίσω.

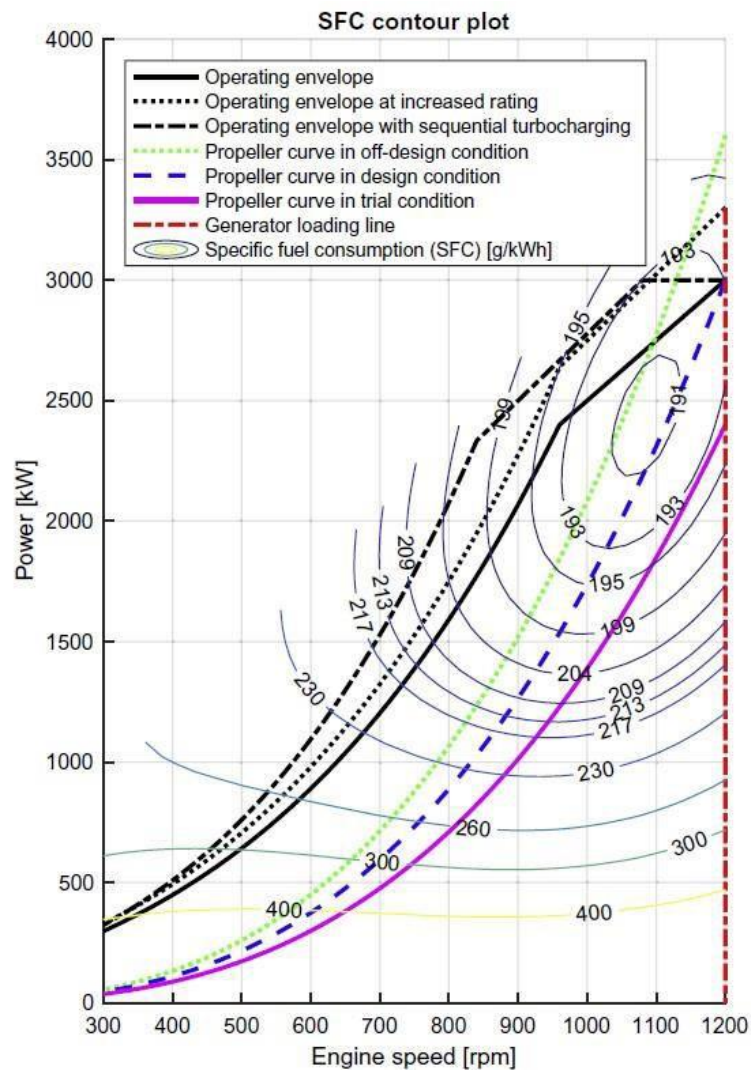
Τα χαρακτηριστικά φορτίου του κινητήρα ντίζελ καθορίζονται από την αντίσταση του πλοίου, της προπέλας και του μειωτήρα ταχύτητας όταν η προπέλα σε μια μηχανική μονάδα πρόωσης είναι σταθερού βήματος [32]. Αυτό το χαρακτηριστικό φορτίου είναι κοινώς γνωστό ως «καμπύλη έλικας».

Η *Εικόνα 12* εμφανίζει τρεις καμπύλες που απεικονίζουν το φορτίο που επιβάλλεται στον κινητήρα ντίζελ κατά τη διάρκεια σεναρίων δοκιμής και σχεδίασης.

Ο φάκελος λειτουργίας του κινητήρα περιέχει τις καμπύλες της προπέλας, οι οποίες απεικονίζουν τους περιορισμούς ισχύος του κινητήρα σε διαφορετικές ταχύτητες [11]. Μέσα σε αυτό το φάκελο, απεικονίζεται η μέγιστη ισχύς εξόδου του κινητήρα. Επιπλέον, η παρακάτω εικόνα (*Εικόνα 12*) δείχνει την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFC) του κινητήρα του πλοίου σε σχέση με την ισχύ εξόδου και την ταχύτητά του. Αυτό το διάγραμμα βασίζεται σε ένα μοντέλο τετραγωνικής τοποθέτησης που αντιπροσωπεύει τη λειτουργία ενός τυπικού κινητήρα ντίζελ μέσης ταχύτητας.

Οι καμπύλες για την προπέλα, τον φάκελο λειτουργίας και την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFC) αντιπροσωπεύουν στατικές καταστάσεις, χωρίς επιτάχυνση ή επιβράδυνση. Όταν οι κινητήρες ντίζελ λειτουργούν υπό στατικές συνθήκες, διατηρούν σταθερή ισχύ και ταχύτητα. Για παράδειγμα, στις 1125 rpm και 2500 kW, μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή ταχύτητα [11]. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες σχεδιασμού, η συνολική κατανάλωση καυσίμου καταγράφεται στα 191 g/kWh. Ωστόσο, οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες σε καταστάσεις εκτός σχεδίασης έχουν ως αποτέλεσμα η ταχύτητα να επιτυγχάνεται στις 1125 rpm και στα 3000 kW, με αποτέλεσμα ειδική κατανάλωση καυσίμου 193 g/kWh.

Σε αντίξοες καιρικές συνθήκες, όπως κατά την ιστιοπλοΐα, το φορτίο στην προπέλα κυμαίνεται αλλά τείνει να επικεντρώνεται γύρω από ένα μέσο σημείο λειτουργίας. Η *Εικόνα 12* απεικονίζει ένα συγκεκριμένο σενάριο σχεδιασμού που δείχνει τη μέση αύξηση του φορτίου [13]. Για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση, είναι σημαντικό να διατηρηθεί ένα επαρκές περιθώριο μεταξύ της καμπύλης της προπέλας και του εύρους λειτουργίας του κινητήρα, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα γύρω από το μέσο φορτίο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας έναν κινητήρα με βελτιωμένη αξιοπιστία.



Εικόνα 12. Σενάριο: τρεις καμπύλες προπέλας, γραμμή φορτίου της γεννήτριας και διάγραμμα SFC, που το καθένα αντιπροσωπεύει τους φακέλους λειτουργίας τριών κινητήρων ντίζελ. [13] Η αύξηση του μεγέθους ενός κινητήρα μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο κόστος για τη μονάδα πρόωσης και αυξημένη κατανάλωση καυσίμου. Αυτό συμβαίνει επειδή ο κινητήρας μπορεί να λειτουργεί πιο μακριά από το σημείο βέλτιστης κατανάλωσης καυσίμου, το οποίο είναι συνήθως κοντά στη γραμμή μέγιστου φορτίου [11]. Ωστόσο, υπάρχει μια εναλλακτική προσέγγιση που έχει κερδίσει την αναγνώριση τα τελευταία χρόνια. Η επιλογή ενός κινητήρα με μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας, ιδιαίτερα σε μερικό φορτίο, έχει θεωρηθεί βιώσιμη λύση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω μεθόδων όπως η σειριακή υπερφόρτιση ή ένας στρόβιλος μεταβλητής γεωμετρίας. Η σειριακή υπερφόρτιση, για παράδειγμα, επεκτείνει το φάκελο λειτουργίας απενεργοποιώντας το σύστημα turbo όταν η ροή των καυσαερίων είναι ανεπαρκής για βέλτιστη απόδοση. Συνοψίζοντας, οι προκλήσεις που σχετίζονται με μια προπέλα σταθερού βήματος περιλαμβάνουν την ανάγκη ευθυγράμμισης του κινητήρα ντίζελ, του κιβωτίου ταχυτήτων, της προπέλας και της αντίστασης του πλοίου, προκειμένου να διασφαλιστεί

ότι ο κινητήρας λειτουργεί με ασφάλεια εντός του καθορισμένου εύρους λειτουργίας και ταχύτητας. Η ελάχιστη ταχύτητα κάθε πλοίου ρυθμίζεται με τον καθορισμό ενός ορίου στις στροφές του κινητήρα. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η αντίστροφη κίνηση του πλοίου, είτε το κιβώτιο ταχυτήτων είτε ο κινητήρας πρέπει να διαθέτουν την ικανότητα να λειτουργούν με όπισθεν [13].

Προκειμένου να ξεπεραστούν τα εμπόδια που αναφέρθηκαν παραπάνω, μια πιθανή λύση είναι η εφαρμογή μιας προπέλας μεταβλητού βήματος (CPP), η οποία προσφέρει ένα επιπλέον επίπεδο ελέγχου [32]. Μειώνοντας το βήμα της προπέλας, τόσο η ώθηση που δημιουργείται από την έλικα όσο και η ισχύς που καταναλώνεται από τον κινητήρα σε μια δεδομένη ταχύτητα άξονα μπορούν να μειωθούν. Αυτή η ρύθμιση επιτρέπει στην ώθηση να πέσει κάτω από τις ελάχιστες στροφές του κινητήρα και το πλήρες βήμα.

Επιπλέον, η ικανότητα αντιστροφής της ώθησης επιτυγχάνεται μέσω της αναστροφής του βήματος, εξαλείφοντας την ανάγκη αντιστροφής τόσο του κινητήρα όσο και του μειωτήρα ταχύτητας. Αυτή η άμεση βελτίωση στην ευελιξία καθίσταται δυνατή από την έλικα μεταβλητού βήματος και η απόδοση μπορεί να βελτιστοποιηθεί περαιτέρω μέσω της εφαρμογής μιας κατάλληλης στρατηγικής ελέγχου [32].

2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μηχανικής πρόωσης

Η μηχανική πρόωση επιδεικνύει εξαιρετικές επιδόσεις εντός του εύρους στροφών από 80 έως 100% της μέγιστης ταχύτητάς της [33]. Μέσα σε αυτό το εύρος, ο κινητήρας ντίζελ λειτουργεί στο βέλτιστο επίπεδο απόδοσης. Επιπλέον, η μηχανική πρόωση απλοποιεί τη διαδικασία μετατροπής ισχύος χρησιμοποιώντας μόνο τρία εξαρτήματα: τον κύριο κινητήρα, τον μειωτήρα και την προπέλα.

Όταν ένα πλοίο υπόκειται σε περιορισμούς στους ρύπους που μπορεί να εκλύσει, ιδιαίτερα τις εκπομπές NO_x, που αποτελούν τη μεγαλύτερη πρόκληση για τους κινητήρες ντίζελ και μετρώνται σε g/kWh, είναι σημαντικό να λειτουργεί το πλοίο με την πιο αποδοτική ταχύτητα και αλλά και το πιο αποδοτικό φορτίο από άποψη των εκπομπών [33]. Αν και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη ισχύ εξόδου, οδηγεί επίσης σε σημαντική μείωση των εκπομπών NO_x που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Τα μηχανικά συστήματα πρόωσης είναι ικανά να επιτύχουν αυτόν τον στόχο.

Η προσιτή τιμή της μηχανικής πρόωσης είναι ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό, καθώς συνεπάγεται χαμηλά έξοδα για την απόκτηση, τη λειτουργία και τη συντήρηση [33]. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στον απλό σχεδιασμό του. Αυτοί οι παράγοντες

καθιστούν τη μηχανική πρόωση κατάλληλη επιλογή για πλοία, όπως αποδεικνύεται από μια ενεργειακή ανάλυση που διεξήχθη σε ένα σκάφος που μετατρέπει ένα αξιοσημείωτο 88% της ενέργειας της κύριας μηχανής σε προωθητική δύναμη. Αξιοποιώντας τη θερμότητα από τα καυσαέρια και το ψυκτικό υγρό, είναι δυνατό να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές ρύπων. Αυτή η ανακτώμενη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την παροχή θέρμανσης μέσα στο πλοίο.

Η βελτιστοποίηση του κινητήρα για ευθυγράμμιση με την ταχύτητα σχεδιασμού όχι μόνο βελτιώνει την απόδοση της μονάδας εντός του προβλεπόμενου εύρους της, αλλά βελτιώνει επίσης τη συμπεριφορά της σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Η εισαγωγή ενός συστήματος έλικας μεταβλητού βήματος παρέχει μεγαλύτερο έλεγχο στην πρόωση, αν και με κόστος αυξημένης πολυπλοκότητας του συστήματος. Ωστόσο, με την εφαρμογή μιας αποτελεσματικής στρατηγικής ελέγχου, η χρήση μιας προπέλας μεταβλητού βήματος μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τα στατικά και δυναμικά φορτία στο σύστημα.

Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η μηχανική πρόωση [11]:

- Όταν τα πλοία λειτουργούν με ταχύτητες κάτω του 70% της μέγιστης χωρητικότητάς τους, η μηχανική πρόωση έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου και, στη συνέχεια, αυξημένη ρύπανση.
- Σε περίπτωση βλάβης σε οποιοδήποτε εξάρτημα του συστήματος μηχανικής πρόωσης, ολόκληρο το σύστημα παύει να λειτουργεί, αφήνοντας το πλοίο χωρίς κανένα μέσο πρόωσης.
- Υψηλά επίπεδα εκπομπών NO_x μπορεί να προκύψουν κατά τη φάση επιτάχυνσης ενός κινητήρα ντίζελ, κυρίως λόγω των υψηλών θερμοκρασιών εντός των κυλίνδρων. Αυτή η αύξηση θερμοκρασίας αποδίδεται στην καθυστέρηση της ενεργοποίησης του συστήματος υπερτροφοδότησης (turbo).
- Λόγω των πολυάριθμων μηχανικών στοιχείων της, η μηχανική πρόωση δημιουργεί σημαντικά επίπεδα θορύβου, που ενισχύεται περαιτέρω από φαινόμενα όπως η σπηλαίωση.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά οι προαναφερθείσες ανησυχίες, είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί μια ολοκληρωμένη και αποτελεσματική στρατηγική ελέγχου.

2.2 Εφαρμογή μηχανικής πρόωσης

Η αρχική εμφάνιση της μηχανικής πρόωσης μπορεί να αναχθεί στην εμφάνιση των ατμόπλοιων. Ωστόσο, στη σύγχρονη εποχή, τα ηλεκτρικά συστήματα έχουν αντικαταστήσει ή συμπληρώσει σε μεγάλο βαθμό τη μηχανική πρόωση, προσφέροντας λύσεις σε βασικές προκλήσεις που σχετίζονται με αυτή τη μορφή πρόωσης. Ωστόσο, η μηχανική πρόωση παραμένει η κυρίαρχη και προτιμώμενη επιλογή για πλοία που συνήθως διατηρούν σταθερή ταχύτητα καθ' όλη τη διάρκεια του ταξιδιού τους. Αυτό οφείλεται κυρίως στην εξαιρετική απόδοση καυσίμου, ιδιαίτερα όταν λειτουργεί υπό υψηλά φορτία κινητήρα [34]. Για παράδειγμα, τα εμπορικά πλοία που πραγματοποιούν πολήμερα ταξίδια σε ανοιχτά νερά, απαιτώντας αρκετές ώρες σταθερής ταχύτητας, βασίζονται στη μηχανική πρόωση για τους προαναφερθέντες λόγους.

Ενώ υπάρχουν πρόσθετες κατηγορίες σκαφών που χρησιμοποιούν μηχανική πρόωση, τα φορτία του κινητήρα τους παραμένουν χαμηλά. Όπως για παράδειγμα τα ρυμουλκά πλοία, τα οποία απαιτούν μόνο το 20% της μέγιστης ισχύος τους για ρυμούλκηση ενώ βρίσκονται σε κίνηση [34]. Στα συγκεκριμένα πλοία, η χρήση μηχανικής πρόωσης οδηγεί σε αξιοσημείωτη αύξηση τόσο της κατανάλωσης καυσίμου όσο και της εκπομπής ρύπων.

Σε καταστάσεις όπως αυτές, η υβριδική ή/και ηλεκτρική πρόωση είναι η προτιμώμενη επιλογή λόγω της ικανότητάς της να βελτιώνει την απόδοση καυσίμου κατά τη διάρκεια μερικών φορτίων. Ωστόσο, ακόμη και με αυτό το μειονέκτημα, η μηχανική πρόωση παραμένει η προτιμώμενη επιλογή για το 50% των σκαφών, συμπεριλαμβανομένων των ρυμουλκών.

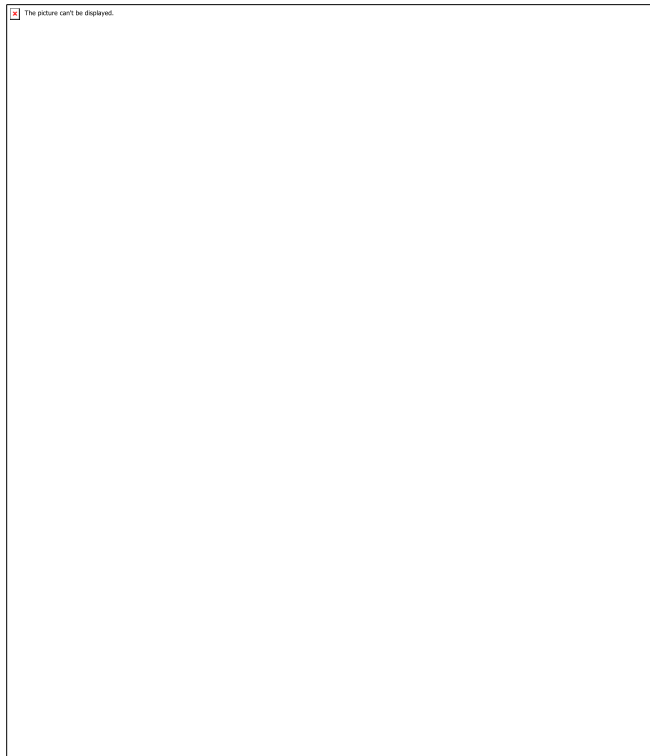
Τα συστήματα μηχανικής πρόωσης με πολλαπλούς άξονες ή/και κινητήρες συνδεδεμένους μέσω μειωτικών γραναζιών μπορεί να είναι πλεονεκτικά για σκάφη που έχουν περιορισμένες συνθήκες λειτουργίας [34]. Αυτοί οι κινητήρες μπορεί να είναι πανομοιότυποι ή διαφορετικοί μεταξύ τους. Τέτοιες διατάξεις πολλαπλών κινητήρων και αξόνων μπορούν επίσης να βελτιώσουν τη διαθεσιμότητα της πρόωσης. Για παράδειγμα, οι φρεγάτες χρησιμοποιούν συχνά έναν συνδυασμό κινητήρων ντίζελ ή αεριοστροβίλου (CODOG) και έναν συνδυασμό τουρμπίνων ντίζελ και αερίου (CODAG) για την πρόωσή τους [34]. Ενώ τα υβριδικά ή ηλεκτρικά συστήματα ευνοούνται από πολλές ευρωπαϊκές χώρες και το Ναυτικό των ΗΠΑ στα νέα τους σχέδια, τα μικρότερα ναυτικά σώματα συνεχίζουν να βασίζονται στη μηχανική πρόωση, ακόμη και για τα νεότερα πλοία τους.

Η μηχανική πρόωση και η μηχανική κίνηση των αντλιών βυθοκόρησης εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται από τα σκάφη βυθοκόρησης [34]. Αυτά τα πλοία έχουν διάφορες εφαρμογές, όπως βυθοκόρηση, καθαρισμό βυθού και δημιουργία και διαπλάτυνση ακτογραμμών για την ανάπτυξη λιμανιών, τουριστικών εγχειρημάτων και άλλων έργων. Οι αντλίες που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εργασίες υφίστανται δυναμικές αλλαγές στο προφίλ λειτουργίας τους, καθώς το μίγμα βυθοκόρησης είναι συχνά εξαιρετικά ετερογενές.

Η ηλεκτρική πρόωση προσφέρει πιθανές λύσεις στις προκλήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ενώ πολλά γιγιο βασίζονται επί του παρόντος στη μηχανική πρόωση, η διαδικασία σχεδιασμού για σκάφη αναψυχής δίνει προτεραιότητα στην επίτευξη των επιθυμητών κορυφαίων ταχυτήτων με ελάχιστη ισχύ κινητήρα. Η μηχανική πρόωση μπορεί να είναι αποτελεσματική για το σχεδιασμό ενός πλοίου, επιτρέποντας τις επιθυμητές ταχύτητες ελαχιστοποιώντας την ισχύ του κινητήρα [34]. Ωστόσο, η ανάγκη για βελτιωμένη άνεση στις χαμηλές ταχύτητες και βελτιωμένη λειτουργική ευελιξία οδήγησε στην εμφάνιση υβριδικών συστημάτων για σκάφη αναψυχής.

2.3 Στρατηγικές που στοχεύουν στον έλεγχο των συστημάτων μηχανικής πρόωσης

Στον τομέα της μηχανικής πρόωσης που χρησιμοποιεί μια προπέλα σταθερού βήματος, η συνήθης προσέγγιση για τον έλεγχο περιλαμβάνει την προσαρμογή της ταχύτητας του κινητήρα με βάση τη ρύθμιση του επιλογέα ταχύτητας του πλοίου στη γέφυρα. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με τη χρήση ενός ελεγκτή PID εντός του ελεγκτή στροφών του κινητήρα ντίζελ [11]. Τα περισσότερα πλοία είναι εξοπλισμένα με έναν επιλογέα που επιτρέπει τη ρύθμιση της ταχύτητας αναφοράς ως ποσοστό της πλήρους ταχύτητας. Εναλλακτικά, η πραγματική ταχύτητα αναφοράς μπορεί να εισαχθεί χειροκίνητα. Μια άλλη μέθοδος ελέγχου είναι μέσω της χρήσης ενός συστήματος δυναμικής πλοήγησης (DP) [11]. Αυτό το σύστημα υπολογίζει την κατάλληλη ρύθμιση για την περιστροφή του άξονα ή την ταχύτητα του κινητήρα. Ο βρόχος ελέγχου, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1*, απεικονίζει την τυπική διαδικασία.

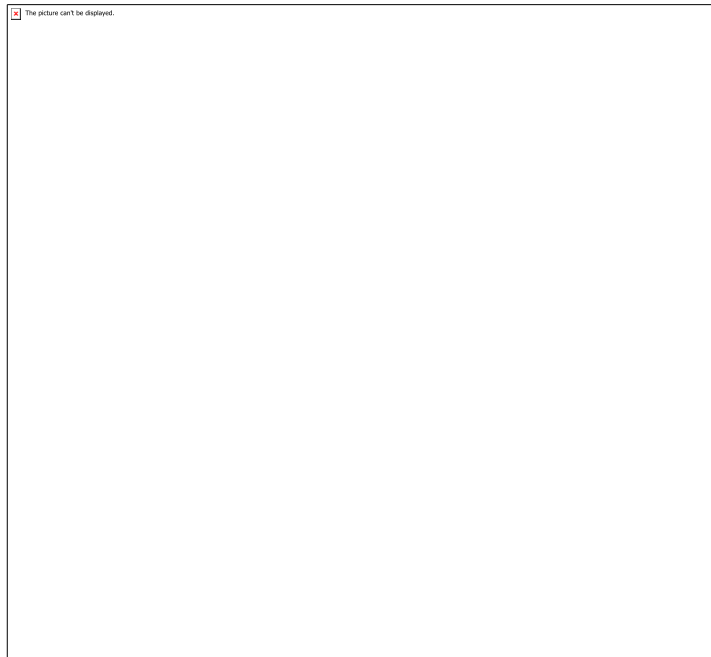


Σχήμα 1. Βρόχος ελέγχου για τη μηχανική πρόωση με έλικα σταθερού βήματος [11]

Διάφορες μελέτες έχουν καταλήξει στη συναίνεση ότι η ρύθμιση της ταχύτητας οδηγεί σε δυσμενείς διαταραχές στην υπερφόρτωση του κινητήρα [35] [36]. Χρησιμοποιώντας ένα σταθερό σύστημα έγχυσης καυσίμου, ένας κινητήρας μπορεί να διατηρήσει ένα σταθερό θερμικό φορτίο, βελτιώνοντας έτσι την οικονομία καυσίμου. Με άλλα λόγια, η απόδοση κατανάλωσης καυσίμου του κινητήρα βελτιώνεται διατηρώντας το ίδιο επίπεδο θερμικού φορτίου.

Ο πρωταρχικός σκοπός του ελέγχου ταχύτητας είναι να παρέχει προστασία από υπερβολικά υψηλές ταχύτητες, διατηρώντας παράλληλα μια άμεση σχέση μεταξύ της επιθυμητής ταχύτητας και της πραγματικής ταχύτητας του πλοίου.

Μια άλλη προσέγγιση περιλαμβάνει την εφαρμογή ενός ελεγκτή ανατροφοδότησης [37] κατάστασης που χρησιμοποιεί μεταβλητές όπως η ταχύτητα του κινητήρα και το σύστημα πλήρωσης. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτής της προσέγγισης μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχές, όπως η καταπόνηση της έλικας, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη θέσπιση διακριτών κανονισμών για τις συνθήκες διακύμανσης. Το Σχήμα 2 απεικονίζει μια σχηματική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας ενός ελεγκτή ανατροφοδότησης κατάστασης. Αν και αυτή η μέθοδος προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα, επί του παρόντος υπάρχει έλλειψη ποσοτικών δεδομένων για την υποστήριξη αυτών των πλεονεκτημάτων, καθώς η έρευνα σε αυτόν τον τομέα βρίσκεται ακόμη στα αρχικά της στάδια.



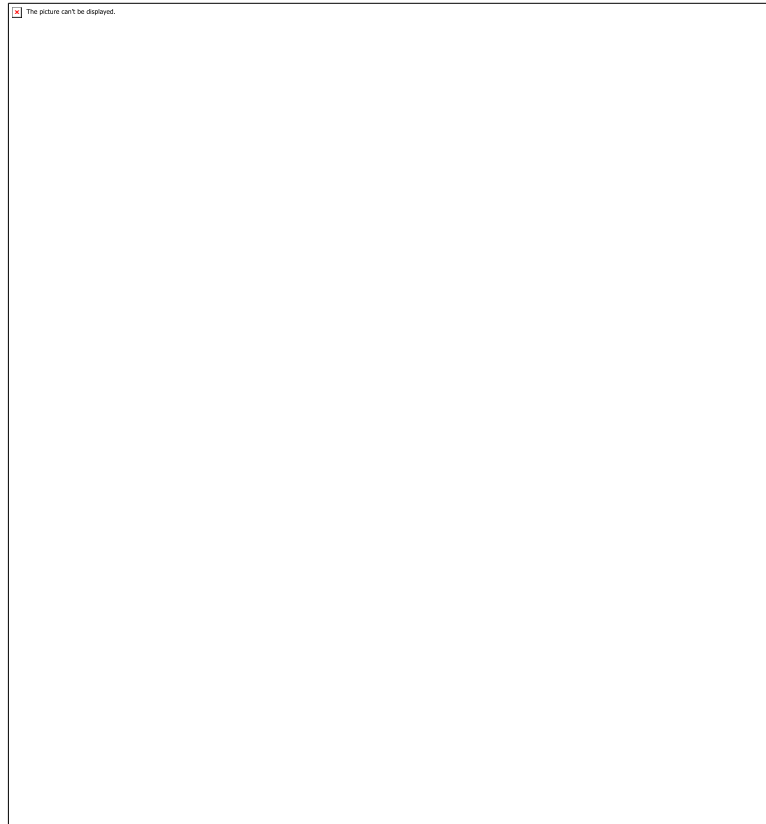
Σχήμα 2. Βρόχος ελέγχου για έλεγχο ανατροφοδότησης κατάστασης [37]

Όταν ένα μηχανικό σύστημα πρόωσης βασίζεται αποκλειστικά σε μια προπέλα σταθερού βήματος, υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς όσον αφορά τον έλεγχο. Επιπλέον, ο βρόχος ελέγχου ταχύτητας έχει σχεδιαστεί για να διατηρεί σταθερή την ταχύτητα του κινητήρα, με αποτέλεσμα να υφίστανται σημαντικές διακυμάνσεις στη φόρτιση του κινητήρα όταν αντιμετωπίζονται δυσκολίες και ελιγμοί κυμάτων. Το Βασιλικό Ναυτικό της Ολλανδίας (RNLN) και οι καναδικές φρεγάτες που κινούνται με μηχανική πρόωση έχουν αντιμετωπίσει σημαντικές αυξομειώσεις κόστους ως αποτέλεσμα της δυναμικής υπερφόρτωσης του κινητήρα [35].

Ένας προτεινόμενος ελεγκτής ταχύτητας για κινητήρες ντίζελ στοχεύει στη βελτιστοποίηση της απόδοσης ρυθμίζοντας το σήμα ανάδρασης μέσω ενός ενισχυτή. Ο ενισχυτής ρυθμίζεται στη βέλτιστη τιμή του σε πραγματικό χρόνο, βάσει μιας συνάρτησης που ελαχιστοποιεί τις διακυμάνσεις της ταχύτητας χρησιμοποιώντας στατιστικά μοντέλα και ιστορικά δεδομένα. Για την εκτίμηση των διαταραχών φορτίου κινητήρα, χρησιμοποιείται ένα φίλτρο Kalman υπό συνθήκες πραγματικού χρόνου [35]. Με την ανάλυση της αυτοσυσχέτισης των στατιστικών δεδομένων, μπορούν να προβλεφθούν μελλοντικές διαταραχές φορτίου, με έμφαση στις ήδη εκτιμώμενες διακυμάνσεις.

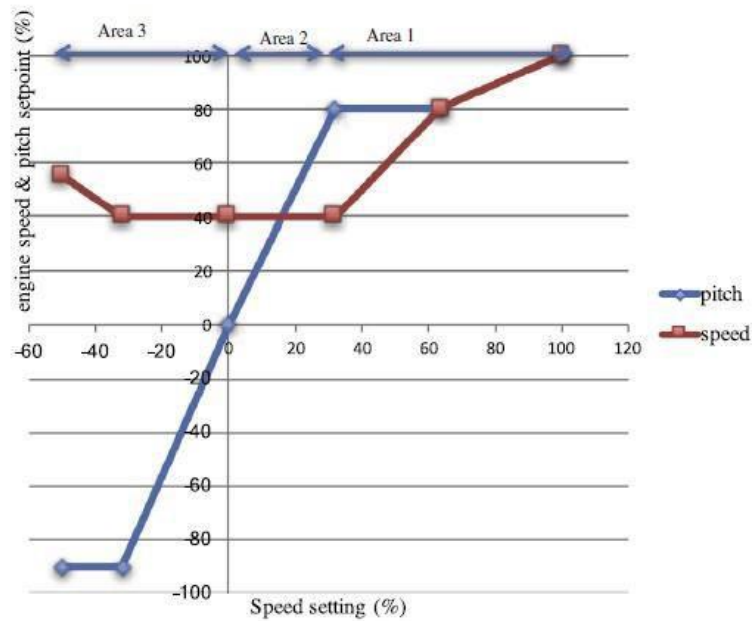
Ο πρωταρχικός στόχος της στρατηγικής ελέγχου της έλικας μεταβλητού βήματος είναι η δημιουργία μιας συνεπούς καμπύλης συνδυαστή [11]. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας σύνδεσης μεταξύ της ταχύτητας αναφοράς του κινητήρα, του βήματος της προπέλας και της ταχύτητας του αεροσκάφους.

Η διαχείριση των βρόχων ελέγχου για το βήμα της προπέλας και την ταχύτητα του κινητήρα γίνεται ανεξάρτητα, όπως απεικονίζεται στο *Σχήμα 3*. Ο συνδυασμός αυτών των βρόχων διακρίνεται από την καμπύλη συνδυαστή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3. Βρόχος ελέγχου για τη μηχανική πρόωση με ελεγχόμενο βήμα [11]

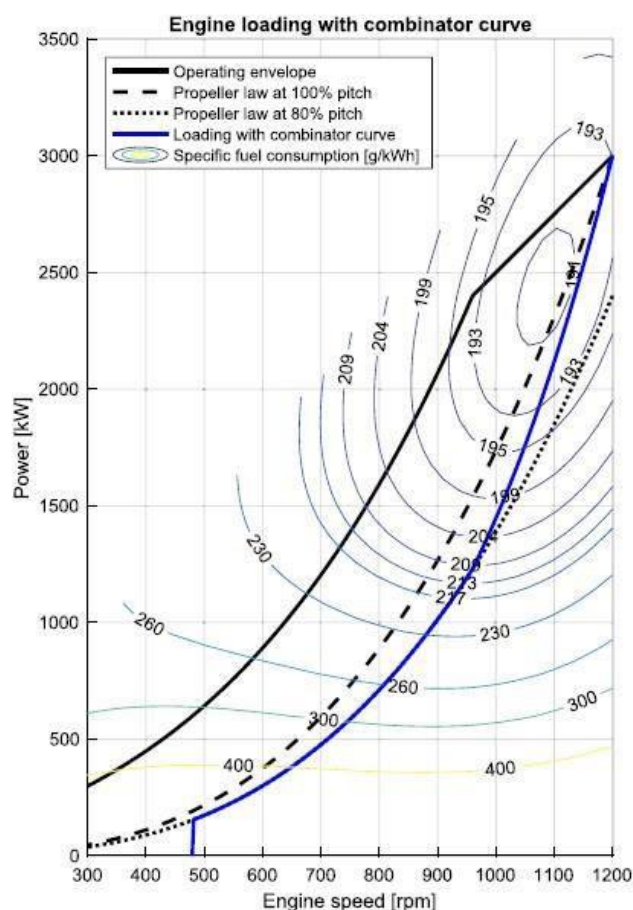
Στην *Εικόνα 13*, παρουσιάζονται διάφορες δυνατότητες της καμπύλης του συνδιαστή [11]. Πρώτον, η μείωση του φορτίου του κινητήρα μπορεί να επιτευχθεί μειώνοντας το βήμα της προπέλας, όπως φαίνεται στην περιοχή 1. Επιπλέον, η ώθηση της προπέλας μπορεί να ελεγχθεί κάτω από την ελάχιστη ταχύτητα κινητήρα, ρυθμίζοντας το βήμα της προπέλας ώστε να ταιριάζει με την ελάχιστη ταχύτητα κινητήρα, όπως απεικονίζεται στην περιοχή 2. Τέλος, η ικανότητα αντίστροφης ώθησης χωρίς αναστροφή του κινητήρα ή του κιβωτίου ταχυτήτων παρουσιάζεται ως παράδειγμα στην περιοχή 3. Προχωρώντας στην *Εικόνα 14*, παρουσιάζεται οπτικά η γραμμή στατικού φορτίου του κινητήρα.



Area 1: reduce pitch to reduce engine load
 Area 2: control propeller thrust below minimum engine speed by reducing pitch
 Area 3: reverse thrust without reversing engine speed

Εικόνα 13. Καμπύλη συνδυαστή

Η συσχέτιση μεταξύ φορτίου κινητήρα και της καμπύλης του συνδυαστή απεικονίζεται στην Εικόνα 14. Αυτή η καμπύλη μπορεί να ρυθμιστεί με ακρίβεια για να βελτιώσει την απόδοση καυσίμου, να διαχειριστεί το φορτίο του κινητήρα και να αποτρέψει τη σπηλαίωση [38]. Παρόλα αυτά, το σημείο λειτουργίας του πλοίου επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό τόσο από την κατάσταση του όσο και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες του περιβάλλοντος.



Εικόνα 14. Φόρτιση κινητήρα με την καμπύλη συνδυαστή [11]

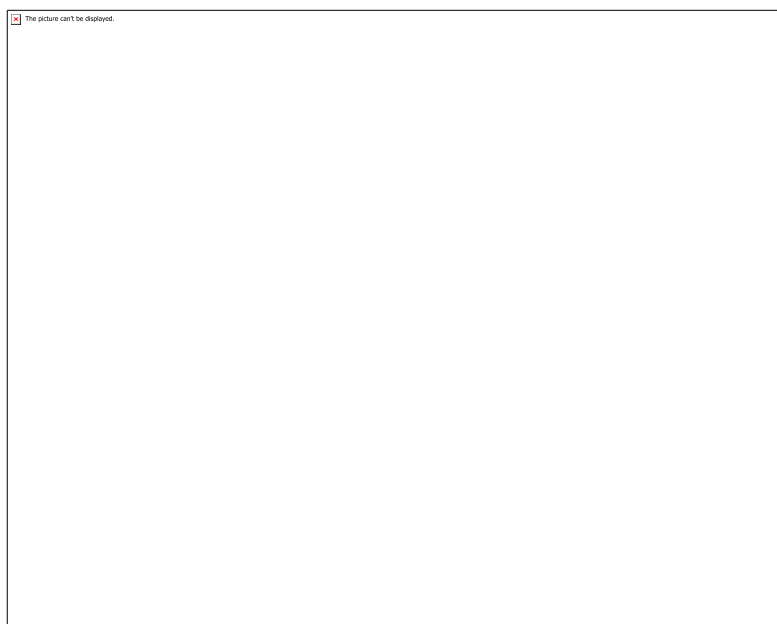
Γίνεται ο ισχυρισμός ότι η στήριξη σε μια μοναδική, αμετάβλητη καμπύλη συνδυαστή δεν μπορεί να εγγυηθεί ότι η απόδοση του κινητήρα θα ικανοποιεί σταθερά τα κριτήρια φορτίου και σπηλαιώσης. Αυτό το επιχείρημα υποστηρίζεται με τη χρήση μιας πραγματικής απεικόνισης που περιλαμβάνει μια φρεγάτα. Για την αντιμετώπιση των περιορισμών μιας μοναδικής καμπύλης συνδυαστή, εισάγεται ως μερική λύση η προσέγγιση της χρήσης πολλαπλών στατικών καμπυλών συνδυαστή για διάφορες συνθήκες λειτουργίας ενός σκάφους.

Σε περιπτώσεις όπου το πλοίο χρειάζεται να κάνει ελιγμούς, ο κινητήρας αναγκάζεται να λειτουργεί με υψηλές ταχύτητες για να δημιουργήσει την απαραίτητη πρόωση. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την υπερβολική κατανάλωση καυσίμου και δεν λαμβάνει υπόψη τον αντίκτυπο των περιβαλλοντικών παραγόντων στην απόδοση της προπέλας [11]. Κατά συνέπεια, η συνολική αποτελεσματικότητα μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο υπό ορισμένες συνθήκες.

Για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση του κινητήρα, μια πρόσθετη τεχνική περιλαμβάνει τη μείωση του βήματος της προπέλας όταν ο κινητήρας φτάσει στο όριο υπερφόρτωσης. Αυτή η μέθοδος, παρόμοια με τον προαναφερόμενο φάκελο

λειτουργίας, χρησιμεύει ως εναλλακτικό όριο για τη φόρτιση του κινητήρα. Οι φρεγάτες M-class του Βασιλικού Ναυτικού της Ολλανδίας και οι φρεγάτες της Καναδικής Ακτοφυλακής έχουν εφαρμόσει αυτήν την προσέγγιση [38]. Ενώ αποτρέπει αποτελεσματικά την υπερφόρτωση του κινητήρα, έχει αρνητικές επιπτώσεις στο μηχανικό σύστημα πρόωσης, με αποτέλεσμα τη σπηλαίωση και τον περιορισμό της ικανότητας του πλοίου να επιταχύνει.

Για να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη συμπεριφορά κινητήρα σε δυναμικές συνθήκες, είναι σημαντικό να εφαρμοστεί μια στρατηγική ελέγχου που δίνει προτεραιότητα στη ρύθμιση της ταχύτητας [38]. Η *Εικόνα 15* παρέχει μια οπτική αναπαράσταση των αλλαγών στη θέση του καυσίμου και στις περιστροφές του άξονα ειδικά για μια φρεγάτα M-class που ανήκει στο ολλανδικό ναυτικό.

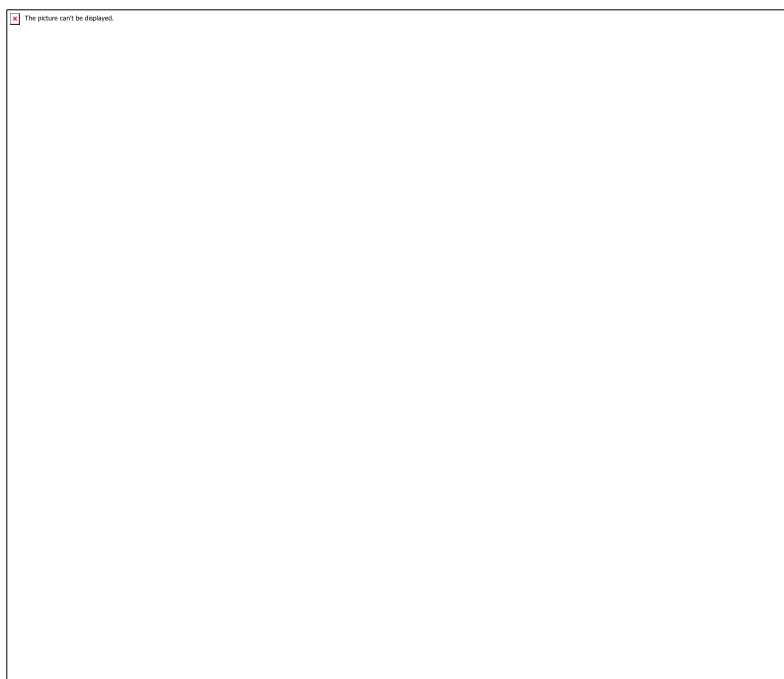


Εικόνα 15. Το διάγραμμα επίπεδης φάσης απεικονίζει τη δυναμική υπερφόρτωση που προκαλείται από την κατάσταση της θάλασσας [11]

Έχουν παρατηρηθεί συχνά περιστατικά υπερφόρτωσης, με αποτέλεσμα υψηλότερα έξοδα συντήρησης. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, η προτεινόμενη προσέγγιση περιλαμβάνει τη χρήση εισόδων ελέγχου τόσο για τον διανομέα καυσίμου όσο και για το βήμα της προπέλας [38].

Ο πρωταρχικός στόχος του συστήματος ελέγχου είναι να μετριάσει τις αρνητικές επιπτώσεις των περιβαλλοντικών παραγόντων στις στροφές του κινητήρα, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί τόσο η επιτάχυνση όσο και η επιβράδυνση. Το *Σχήμα 4* παρέχει μια οπτική αναπαράσταση του βρόχου ελέγχου, ο οποίος περιλαμβάνει διασφαλίσεις για την αποτροπή λειτουργίας του κινητήρα υπό υπερβολικά φορτία. Για να διασφαλιστεί

αυτό, το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί στενά τη ροπή εξόδου του κινητήρα, εμποδίζοντάς τον να εισέλθει σε περιοχή υπερφόρτωσης.



Σχήμα 4. Βρόχος ελέγχου για τη βέλτιστη ταχύτητα και τον έλεγχο του βήματος [11] Στο τρέχον στάδιο, ο προτεινόμενος σχεδιασμός διαχειρίζεται με επιτυχία πολλαπλές εισόδους και εξόδους, αποτρέποντας αποτελεσματικά την υπερφόρτωση του κινητήρα και βελτιώνοντας την απόδοση της επιτάχυνσης [3]. Ωστόσο, ο στόχος της στρατηγικής ελέγχου για την ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων των στροφών του κινητήρα έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές αλλαγές στην έγχυση του καυσίμου και στη ροπή της προπέλας. Ο κυμαινόμενος ψεκασμός καυσίμου μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη κατανάλωση καυσίμου, ενώ σημαντικές διακυμάνσεις της ροπής μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένη θερμική φόρτιση και αυξημένα επίπεδα θορύβου [11]. Αυτά τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα είναι συνέπεια της ελαχιστοποίησης της διακύμανσης της ταχύτητας του κινητήρα, ενώ, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η διακύμανση της ταχύτητας του άξονα δεν απαιτεί ελαχιστοποίηση.

Για την ελαχιστοποίηση της εμφάνισης ανεπιθύμητης σπηλαιώσης σε ένα σύστημα πρόωσης υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, έχει σχεδιαστεί μια στρατηγική ελέγχου. Αυτή η στρατηγική περιλαμβάνει την αλλαγή του βήματος της έλικας για την επίτευξη της βέλτιστης γωνίας προσβολής, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα σπηλαιώσης [38]. Η γωνία προσβολής αναφέρεται στη γωνία με την οποία το υγρό (σε αυτήν την περίπτωση, το νερό) εισέρχεται στην επιφάνεια της λεπίδας της προπέλας και θεωρείται κρίσιμη σε αυτό το πλαίσιο.

$$\frac{\theta - \theta_0}{\theta_{nom} - \theta_0} n_{virt} =$$

Το Σχήμα 5 απεικονίζει την οπτική αναπαράσταση του συγκεκριμένου βρόχου ελέγχου. Η φρεγάτα χρησιμεύει ως το πεδίο δοκιμών για τη διεξαγωγή πειραμάτων, τα οποία εκτελούνται ταυτόχρονα με την ανάλυση των προσομοιώσεων. Μέσω σύγκρισης μεταξύ της πειραματικής και της υπολογιστικής προσέγγισης, καθορίζεται ότι αυτή η στρατηγική ελέγχου ελαχιστοποιεί αποτελεσματικά την εμφάνιση σπηλαίωσης, ενισχύει την απόδοση της επιτάχυνσης και διασφαλίζει ότι ο κινητήρας δεν λειτουργεί παραπάνω από το επιτρεπόμενο (υπό τις καθορισμένες πειραματικές συνθήκες) [35].



Κεφάλαιο 3. Συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Η ηλεκτρική πρόωση υπάρχει από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 και έχει κερδίσει σημαντική αναγνώριση στη βιομηχανία κρουαζιέρας καθώς και στη σφαίρα των μεγάλων πολεμικών πλοίων. Η *Εικόνα 16* απεικονίζει μια τυπική διαμόρφωση ηλεκτρικής πρόωσης. Σε αυτή τη ρύθμιση, πολλά σετ γεννητριών ντίζελ παρέχουν ισχύ σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο υψηλής τάσης που λειτουργεί σε σταθερή συχνότητα. Αυτό το δίκτυο παρέχει ηλεκτρική ενέργεια στον κινητήρα καθώς και στα περιφερειακά φορτία, συνήθως με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή [11].

3.1 Οφέλη και προκλήσεις της ηλεκτρικής πρόωσης

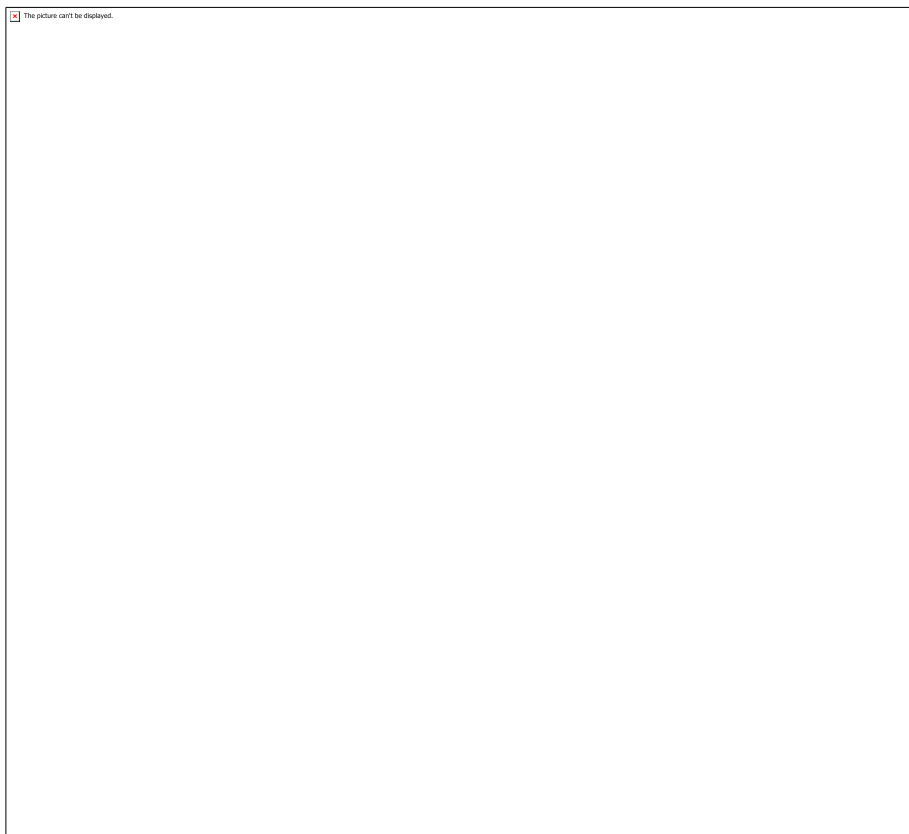
Όταν η πλειονότητα της απαιτούμενης ισχύος είναι υπό μορφή ηλεκτρικού φορτίου, η ηλεκτρική πρόωση αποδεικνύεται εξαιρετικά αποδοτική όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για πλοία που υφίστανται σημαντικές αλλαγές στα προφίλ λειτουργίας τους, καθώς η γεννήτρια μπορεί να εξυπηρετήσει τον διπλό σκοπό της παροχής ισχύος στα βοηθητικά συστήματα του πλοίου και της ώθησής του προς τα εμπρός.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου, καθίσταται απαραίτητη η εφαρμογή ενός Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (PMS). Το PMS ρυθμίζει αποτελεσματικά τις ανάγκες ισχύος και πρόωσης των κινητήρων, εξασφαλίζοντας βέλτιστη απόδοση και αποτρέποντας κάθε περιττή λειτουργία ή την μειωμένη απόδοση όταν λειτουργεί με λιγότερη από την πλήρη χωρητικότητα [29].

Όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων, η ηλεκτρική πρόωση είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον από τη μηχανική πρόωση όσον αφορά την παραγωγή NOx [39]. Ωστόσο, αυτό ισχύει μόνο όταν οι απαιτήσεις ισχύος κατανέμονται μεταξύ πολλών κινητήρων, ειδικά με πλήρη ταχύτητα πρόωσης. Σε αυτό το σενάριο, κάθε κινητήρας λειτουργεί με υψηλότερες στροφές λόγω της χαμηλότερης ζήτησης ισχύος. Για παράδειγμα, σε ένα κρουαζιερόπλοιο εξοπλισμένο με σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης και συνολικής ισχύος 20 MW, υπάρχουν συνήθως 5 γεννήτριες ντίζελ που λειτουργούν στις 720 rpm. Από την άλλη πλευρά, ένα παρόμοιο πλοίο με την ίδια ισχύ αλλά με μηχανικό σύστημα πρόωσης θα απαιτούσε δύο κινητήρες 20 MW που λειτουργούν στις 500 rpm για τετράχρονο ή 80 rpm για δίχρονο κινητήρα.

Στην περίπτωση των πλοίων Tier 2, η χρήση γεννητριών ντίζελ ηλεκτρικής πρόωσης έχει ως αποτέλεσμα μέση παραγωγή NOx 9,7 g/kWh ανά κύκλο. Από την άλλη πλευρά, οι τετράχρονοι και δίχρονοι κινητήρες ντίζελ με μηχανική πρόωση παρουσιάζουν ρυθμούς παραγωγής NOx 10,5/14,4 g/kWh [11]. Ο σχεδιασμός του συστήματος

ηλεκτρικής πρόωσης επιτρέπει μειωμένες εκπομπές NOx από τις γεννήτριες ντίζελ. Επιπλέον, σε αντίθεση με τα μηχανικά συστήματα πρόωσης που λειτουργούν με μειωμένη ταχύτητα υπό μερικό φορτίο, η σταθερή ταχύτητα των γεννητριών ντίζελ στα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης οδηγεί σε χαμηλότερη παραγωγή NOx λόγω της παρατεταμένης διάρκειας που απαιτείται για το σχηματισμό τους.



Εικόνα 16. Δημιουργία ενός απλού συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης [11]

Ένα άλλο πλεονέκτημα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι οι μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης σε σύγκριση με τη μηχανική πρόωση. Αυτό συμβαίνει επειδή οι κινητήρες στα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης μοιράζονται τις απαιτήσεις πρόωσης και του βοηθητικού φορτίου και όταν δεν χρειάζεται ένας κινητήρας, διακόπτεται η λειτουργία του [12].

Επιπλέον, η απουσία μηχανικής μετάδοσης ισχύος, όπως γρανάζια, μεταξύ του κινητήρα και της προπέλας στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης οδηγεί σε μείωση του παραγόμενου θορύβου. Ωστόσο, για να επιτευχθεί σημαντική μείωση του θορύβου, είναι σημαντικό να σχεδιαστεί προσεκτικά ο μετατροπέας ισχύος και οι κινητήρες ώστε να χειρίζονται αποτελεσματικά διάφορες διακυμάνσεις ροπής [8].

Η πιθανή διαθεσιμότητα συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης, που μελετάται επί του παρόντος, είναι ένα αξιοσημείωτο πλεονέκτημα, ιδιαίτερα όταν λαμβάνεται υπόψη ο σχεδιασμός του σταθμού παραγωγής ενέργειας και του συστήματος πρόωσης [40].

Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης παρουσιάζουν επίσης ορισμένα μειονεκτήματα και προκλήσεις. Πρώτον, υπάρχει αύξηση των απωλειών λόγω των πολλαπλών σταδίων μετατροπής ισχύος και των εγγενών απωλειών στους ηλεκτροκινητήρες. Ως αποτέλεσμα, η ειδική κατανάλωση του συστήματος τείνει να αυξάνεται. Επιπλέον, όταν χρησιμοποιούνται πρόσθετοι κινητήρες για την επίτευξη της μέγιστης διαθεσιμότητας πρόωσης κατά τη δυναμική πλοήγησης, αυτοί οι κινητήρες λειτουργούν σε χαμηλά φορτία. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου και επακόλουθες εκπομπές ρύπων. Επιπλέον, τα πλοία που είναι εξοπλισμένα με ηλεκτρική πρόωση χρησιμοποιούν συνήθως μια προπέλα σταθερού βήματος, καθώς οι ηλεκτροκινητήρες έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν μέγιστη ροπή σε οποιαδήποτε ταχύτητα και αντίστροφα. Εάν χρησιμοποιείται προπέλα σταθερού βήματος σε συνδυασμό με έλεγχο ταχύτητας, μια στρατηγική που χρησιμοποιείται συχνά με ηλεκτρικούς κινητήρες, υπάρχει πιθανότητα αυξημένου θορύβου σπηλαίωσης. Επομένως, υπό την ηλεκτρική πρόωση με στρατηγική ελέγχου ταχύτητας και έλικα σταθερού βήματος, η σπηλαίωση μπορεί να είναι πιο έντονη [37].

Για να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά αυτά τα εμπόδια, είναι ζωτικής σημασίας να υιοθετηθεί μια στρατηγική ελέγχου που να εστιάζει άμεσα στην αντιμετώπισή τους. Ωστόσο, εάν αυτή η συγκεκριμένη μέθοδος αποδειχθεί αναποτελεσματική για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη μια εναλλακτική διαμόρφωση.

3.2 Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης

Η ηλεκτρική πρόωση έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική στη βιομηχανία κρουαζιέρας, παρά το γεγονός ότι η εξοικονόμηση καυσίμου μπορεί να μειωθεί αισθητά λόγω ηλεκτρικών απωλειών [41]. Ο βασικός παράγοντας που συμβάλλει στην επιτυχία του είναι η αποτελεσματική διάταξη της ηλεκτρικής μονάδας, η οποία διασφαλίζει ότι η λειτουργία του πλοίου παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεπηρέαστη ακόμη και σε περίπτωση βλάβης της γεννήτριας ντίζελ.

Επιπλέον, η διάταξη του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στην τοποθέτηση των κινητήρων μέσα στο σκάφος [41]. Σε αντίθεση με τη μηχανική πρόωση, η οποία περιορίζεται από την παρουσία ενός άξονα που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη διάταξη του μηχανοστασίου, η ηλεκτρική πρόωση προσφέρει μεγαλύτερη ελευθερία. Επιπλέον, η απουσία αυτού του άξονα επιτρέπει την εφαρμογή

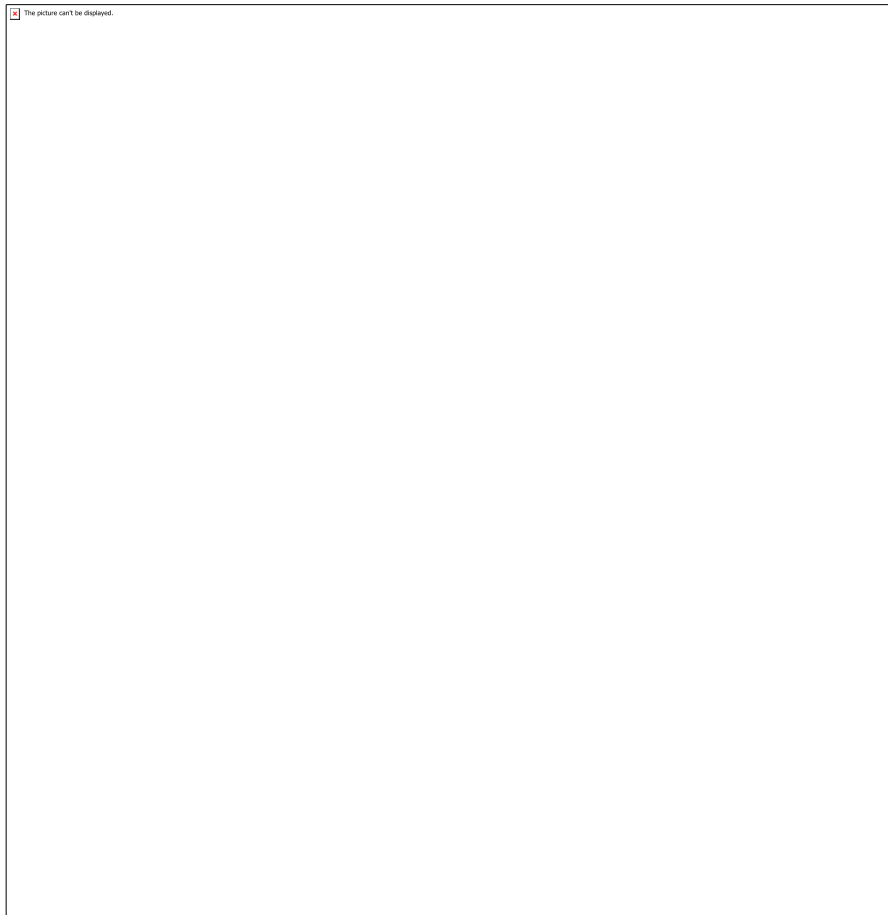
ενισχυμένων ηχομονωτικών μέτρων για τους κινητήρες, με αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών θορύβου.

Η τεχνολογία ηλεκτρικής πρόωσης δεν είναι διαδεδομένη μόνο σε κρουαζιερόπλοια, αλλά μπορεί επίσης να βρεθεί σε διάφορους άλλους τύπους πλοίων, συμπεριλαμβανομένων παγοθραυστικών και πολεμικών πλοίων [41]. Για να προσδιοριστεί η πιθανή χρήση της τεχνολογίας ηλεκτρικής πρόωσης, είναι απαραίτητη μια ολοκληρωμένη εξέταση των εφαρμογών και των τεχνολογικών προόδων της. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του πλοίου παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του βαθμού στον οποίο θα εφαρμοστεί η τεχνολογία ηλεκτρικής πρόωσης.

Η τεχνολογία της ηλεκτρικής πρόωσης παρουσιάζει ένα επιπλέον πλεονέκτημα όσον αφορά την ευελιξία στο να προσθέτει ή να αφαιρεί εξαρτήματα στη διάταξή της [25]. Αυτό σημαίνει ότι οι γεννήτριες, οι κινητήρες και οι έλικες μπορούν να αντικατασταθούν χωρίς κόπο. Αυτή η συγκεκριμένη πτυχή της ηλεκτρικής πρόωσης διασφαλίζει ότι ένα πλοίο μπορεί να διατηρήσει τη θέση του, ακόμη και σε περίπτωση βλάβης. Για παράδειγμα, η συμπερίληψη επιπλέον κινητήρων για πλεονασμό εγγυάται συνεχή παροχή ρεύματος σε τέτοιες περιπτώσεις.

Όταν χρησιμοποιούνται πρόσθετοι κινητήρες, πραγματοποιείται κατανομή ισχύος μεταξύ των κινητήρων, με αποτέλεσμα να λειτουργούν με μικρότερη από την πλήρη χωρητικότητα. Αυτή η κατάσταση οδηγεί σε μείωση της απόδοσης του κινητήρα, αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου και, στη συνέχεια, αύξηση των εκπομπών NOx [7].

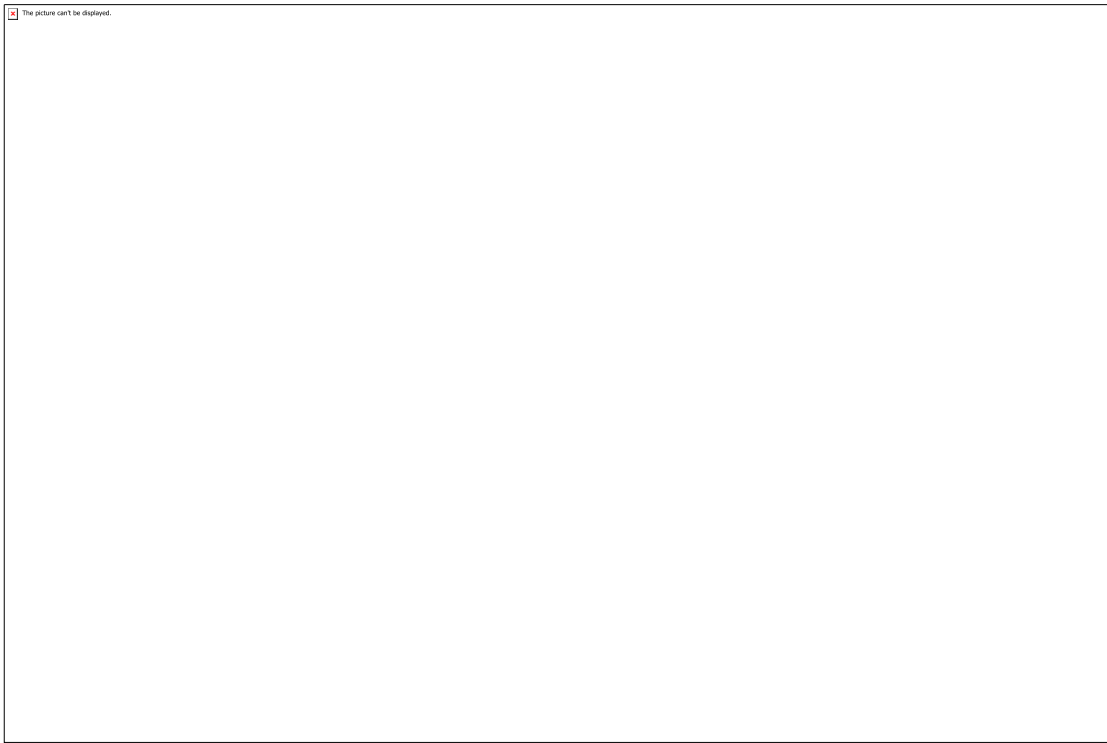
Επιπλέον, το κόστος της επένδυσης σε ένα πλοίο επηρεάζεται από την απαίτηση για επαρκή εφεδρική ισχύ και εγκατεστημένη χωρητικότητα ώστε να διασφαλίζεται η συνεχής λειτουργία, ακόμη και στην περίπτωση του χειρότερου σεναρίου [33]. Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, έχει προταθεί μια εναλλακτική διάταξη, όπως απεικονίζεται στην *Εικόνα 17*. Αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί την απαίτηση για μετασχηματιστές φάσης και μετριάξει τον αντίκτυπο μιας βλάβης, περιορίζοντας την μόνο στο $\frac{1}{4}$ της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος.



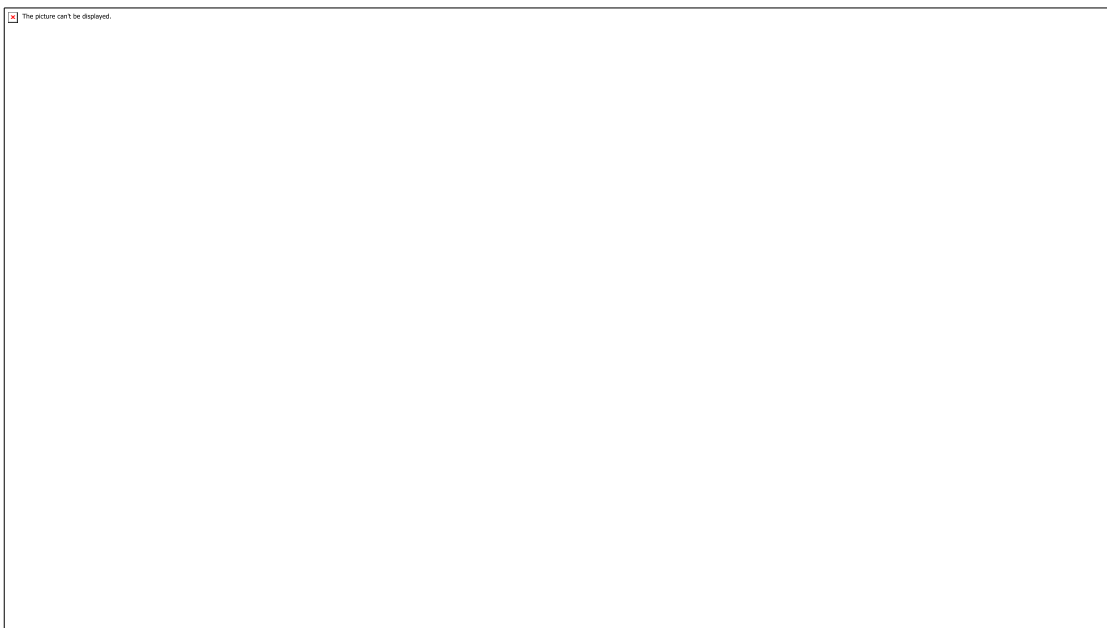
Εικόνα 17. Διάταξη ηλεκτρικής πρόωσης με άξονες διαφορετικής φάσης [11]

Η υιοθέτηση της ηλεκτρικής πρόωσης σε πολεμικά πλοία, ιδιαίτερα σε αντιτορπιτικά, οφείλεται στην επιτυχία που έχει επιτύχει στα εμπορικά πλοία [19]. Ωστόσο, για να εφαρμοστεί αυτή η τεχνολογία σε πολεμικά πλοία, πρέπει να αναπτυχθούν συγκεκριμένες τεχνικές και προγράμματα προσαρμοσμένα σε αυτόν τον τύπο σκάφους.

Στόχος αυτών των προγραμμάτων είναι η ενίσχυση της πυκνότητας ισχύος μέσω της χρήσης τεχνολογιών αιχμής, ενσωματώνοντας έναν νέο μόνιμο μαγνήτη και υπεραγωγούς υψηλής θερμοκρασίας στον κινητήρα, επιτρέποντας την εγκατάσταση ηλεκτρικής πρόωσης [42] [43] [44] [45] [46]. Αξιοσημείωτα παραδείγματα αυτών των προγραμμάτων μπορούν να βρεθούν στο αεροπλανοφόρο *Queen Elizabeth* και στα αντιτορπιτικά Type 45 στο Βασιλικό Ναυτικό του Ηνωμένου Βασιλείου. Αυτές οι συγκεκριμένες εφαρμογές βασίζονται στη χρήση προηγμένων επαγωγικών κινητήρων, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν μια σημαντικά προηγμένη μορφή τεχνολογίας ηλεκτροκινητήρων. Σε θαλάσσια περιβάλλοντα, χρησιμοποιούνται πολυάριθμες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής συχνότητας και υψηλής τάσης, που λειτουργούν σύμφωνα με συμβατικές στρατηγικές ελέγχου.



Εικόνα 18. Αεροπλανοφόρο Queen Elizabeth [47]



Εικόνα 19. Αντιτορπιλικό Type 45 του Βασιλικού Ναυτικού της μεγάλης Βρετανίας [47]

3.3 Στρατηγικές ελέγχου για τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Στα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης, οι στρατηγικές ελέγχου μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικά στοιχεία [48]: τον έλεγχο του ηλεκτρικού δικτύου σταθερής συχνότητας, που διασφαλίζει την αξιόπιστη παροχή ρεύματος σε όλους τους χρήστες και τον έλεγχο πρόωσης, ο οποίος εστιάζει στην κίνηση του πλοίου σύμφωνα με την επιθυμητή ταχύτητα και κατεύθυνση.

Έλεγχος τάσης και συχνότητας

Τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης συνήθως χρησιμοποιούν δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος AC με σταθερή συχνότητα. Η συχνότητα διατηρείται σε σταθερό επίπεδο μέσω του ελέγχου ταχύτητας, ο οποίος επιτυγχάνεται είτε εντός των ελεγκτών είτε μέσω ηλεκτρικά ισόχρονου μοιρασμού μεταξύ του φορτίου και των ελεγκτών [49]. Στο πρώτο σενάριο, οι ελεγκτές ρυθμίζουν την κατανομή του φορτίου μεταξύ των γεννητριών. Ομοίως, ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της απαιτούμενης τάσης και επίσης για τη διαχείριση της κατανομής του φορτίου σε παράλληλες συνδεδεμένες γεννήτριες. Αυτοί οι βρόχοι ελέγχου χρησιμεύουν ως το πρωταρχικό επίπεδο ελέγχου στα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης.

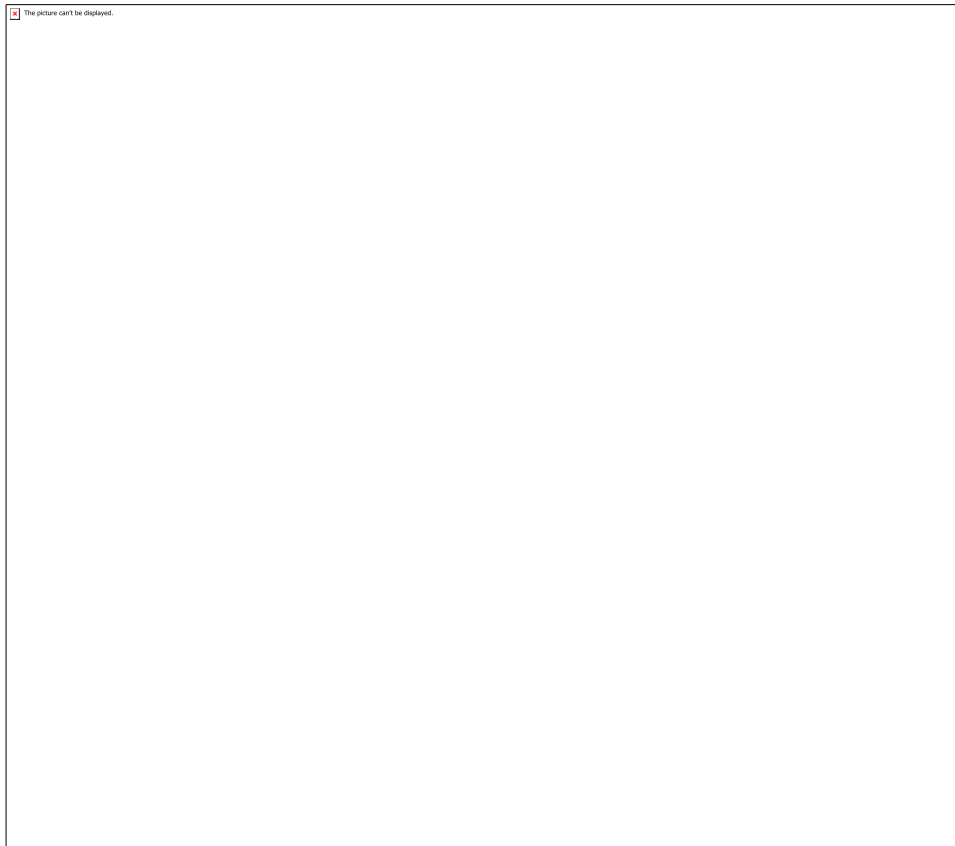
Σε αυτή την περίπτωση, το κύριο μειονέκτημα είναι ότι η γεννήτρια ντίζελ λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου, όπως απεικονίζεται στο *Σχήμα 6*, είναι μεγαλύτερη όταν ο κινητήρας λειτουργεί με μειωμένο φορτίο σε σύγκριση με όταν λειτουργεί κατά μήκος της καμπύλης λειτουργίας της προπέλας [11].

Επιπλέον, η λειτουργία του κινητήρα στην καμπύλη της γεννήτριας έχει ως αποτέλεσμα μειωμένες εκπομπές NOx και CO₂ [7]. Ωστόσο, αυτό οδηγεί επίσης σε αυξημένη φθορά μέσα στον κινητήρα λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων όταν λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα και μερικό φορτίο. Μια εναλλακτική λύση είναι η χρήση ενός δικτύου μεταβλητής συχνότητας, το οποίο έχει τη δυνατότητα να εξοικονομήσει περίπου το 5% του καυσίμου σε σύγκριση με ένα δίκτυο σταθερής συχνότητας. Δυστυχώς, οι τρέχοντες περιορισμοί εμποδίζουν την ανάπτυξη ενός εμπορικά διαθέσιμου δικτύου μεταβλητής συχνότητας αυτή τη στιγμή.

Επιπλέον, εάν προκύψει μια τέτοια κατάσταση, θα υπάρξει ανάγκη για επιπλέον μετατροπή ισχύος για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα βοηθητικά φορτία σταθερής συχνότητας, με αποτέλεσμα μεγαλύτερες απώλειες μετατροπής. Μια άλλη εναλλακτική λύση θα ήταν η επιλογή ενός δικτύου συνεχούς ρεύματος.

Δευτερεύων έλεγχος διαχείρισης ισχύος

Το *Σχήμα 6* απεικονίζει την στρατηγική του ελέγχου διαχείρισης ισχύος. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη ρύθμιση των καθορισμένων σημείων ταχύτητας και τάσης για να διασφαλιστεί ότι τόσο η συχνότητα όσο και η τάση παραμένουν εντός αποδεκτών ορίων κατά τη λειτουργία του συστήματος, ακόμη και όταν υπόκεινται σε δυναμικά φορτία [50].



Σχήμα 6. Τυπική διάταξη στρατηγικής ελέγχου για δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος AC σταθερής συχνότητας [11]

Επιπλέον, όταν υπάρχουν διακυμάνσεις στο φορτίο, το σύστημα διαχείρισης ισχύος (PMS: Power Management Systems) ξεκινά και τερματίζει τη λειτουργία των σετ γεννήτριας αυτόματα [50]. Προστατεύει επίσης από την υπερφόρτωση των ενεργών κινητήρων ρυθμίζοντας τους κινητήρες πρόωσης και άλλα φορτία όπως απαιτείται. Τέλος, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας είναι σε θέση να εκτελεί προστατευτικά μέτρα, όπως η αποφυγή διακοπής ρεύματος, η απενεργοποίηση των δυσλειτουργικών συστημάτων και η αποκατάσταση του ηλεκτρικού δικτύου μετά από διακοπή ρεύματος. Αυτές οι διαδικασίες ελέγχου βασίζονται γενικά σε κανόνες και μπορούν επίσης να πραγματοποιηθούν από τον χειριστή.

Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (PMS) διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο σε πλοία που απαιτούν υψηλό επίπεδο ισχύος [50]. Ο πρωταρχικός του στόχος είναι να εγγυηθεί άφθονη παροχή στροφών κινητήρα για την κάλυψη των απαιτήσεων ισχύος. Επιπλέον, υπάρχουν διάφορες προηγμένες στρατηγικές ελέγχου που μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση του PMS. Αυτές οι στρατηγικές είναι ιδιαίτερα ωφέλιμες σε καταστάσεις όπου συμβαίνουν βλάβες του συστήματος, καθώς συμβάλλουν στη διατήρηση σταθερής τάσης και συχνότητας.

Διαχείριση ισχύος βασισμένη σε μοντέλο πραγματικού χρόνου

Για να επιτευχθεί η επιθυμητή συνολική συχνότητα, μια πιθανή προσέγγιση είναι η χρήση υπομοντέλων για φορτία και πηγές ενέργειας [51]. Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό της βέλτιστης συχνότητας για κάθε πηγή ρεύματος, διασφαλίζοντας ότι παραμένει εντός ενός αποδεκτού εύρους ακόμη και μετά από διακοπή ρεύματος. Χωρίς αυτή τη μεθοδολογία, ένα σύστημα που δεν διαθέτει δευτερεύοντα έλεγχο και είναι εξοπλισμένο αποκλειστικά με ελεγκτές ταχύτητας θα αποτύχει να ανταποκριθεί στην καθορισμένη ελάχιστη απαίτηση συχνότητας.

Παρακολούθηση ισχύος

Μια εναλλακτική μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση πολλαπλών χρονικών σημείων για την παρακολούθηση ισχύος, ενσωματώνοντας δύο διαφορετικές πηγές ενέργειας με ποικίλα δυναμικά χαρακτηριστικά [50]. Η μελέτη τους δείχνει ότι αυτή η προσέγγιση προσφέρει γρήγορη και αποτελεσματική παρακολούθηση ισχύος, χάρη στην υπολογιστική της απόδοση. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η διάταξη του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνά τους είναι σημαντικά απλοποιημένη και φαίνεται ότι δεν ελήφθησαν υπόψη περιορισμοί που σχετίζονται με το φορτίο του κινητήρα, όπως αποδεικνύεται από την απότομη αύξηση του φορτίου του κινητήρα που παρατηρείται στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται.

Κεφάλαιο 4. Συστήματα υβριδικής πρόωσης

Σε περιπτώσεις όπου η ισχύς που απαιτείται για τα βοηθητικά συστήματα αποτελεί μόνο ένα κλάσμα της ισχύος που απαιτείται για την πρόωση, η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας στα ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης προκαλεί πρόσθετη κατανάλωση καυσίμου λόγω απωλειών [52]. Επιπλέον, η συμπερίληψη συμπληρωματικού ηλεκτρικού εξοπλισμού συμβάλλει στο αυξημένο βάρος, μέγεθος και κόστος.

Τα υβριδικά συστήματα πρόωσης προσφέρουν συνδυασμό μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος για βελτιστοποίηση της απόδοσης σε διαφορετικές ταχύτητες [52]. Ο μηχανικός κινητήρας είναι υπεύθυνος για την παροχή άμεσης πρόωσης σε υψηλές ταχύτητες με μέγιστη απόδοση. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της χαμηλής απόδοσης υπό μερικό φορτίο, ένας ηλεκτροκινητήρας είναι ενσωματωμένος στο σύστημα. Αυτός ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να συνδεθεί στον ίδιο άξονα με τον μηχανικό κινητήρα μέσω ενός μειωτήρα ή απευθείας στον άξονα της προπέλας. Με αυτόν τον τρόπο, ο ηλεκτροκινητήρας αναλαμβάνει την πρόωση σε χαμηλές ταχύτητες, επιτρέποντας στον κύριο κινητήρα να αποφύγει τη λειτουργία με μειωμένη απόδοση. Η *Εικόνα 20* απεικονίζει μια τυπική διαμόρφωση αυτού του υβριδικού συστήματος πρόωσης.

Ενώ ο μηχανικός κινητήρας βρίσκεται σε λειτουργία, το συγκεκριμένο σύστημα επιτρέπει την παραγωγή ισχύος είτε από τον ηλεκτροκινητήρα είτε από το σετ γεννήτριας.

4.1 Οφέλη και προκλήσεις της υβριδικής πρόωσης

Τα υβριδικά συστήματα πρόωσης συνδυάζουν μηχανική και ηλεκτρική πρόωση, επιτρέποντας στα πλοία να εκμεταλλευτούν τα μοναδικά πλεονεκτήματα και των δύο συστημάτων. Ωστόσο, για να αξιοποιηθούν αυτά τα πλεονεκτήματα, είναι ζωτικής σημασίας ένας ορθός σχεδιασμός, ο οποίος επιτυγχάνει μια αρμονική ισορροπία μεταξύ των μηχανικών και των ηλεκτρικών εξαρτημάτων [52]. Το κλειδί βρίσκεται στην εφαρμογή μιας στρατηγικής ελέγχου που επιτυγχάνει αυτόν τον βέλτιστο συμβιβασμό, καθώς η πρόκληση έγκειται στη διαχείριση των αντισταθμίσεων που είναι εγγενείς στις επιμέρους απαιτήσεις και στην κατασκευή μιας στρατηγικής ελέγχου που τις αντιμετωπίζει αποτελεσματικά.

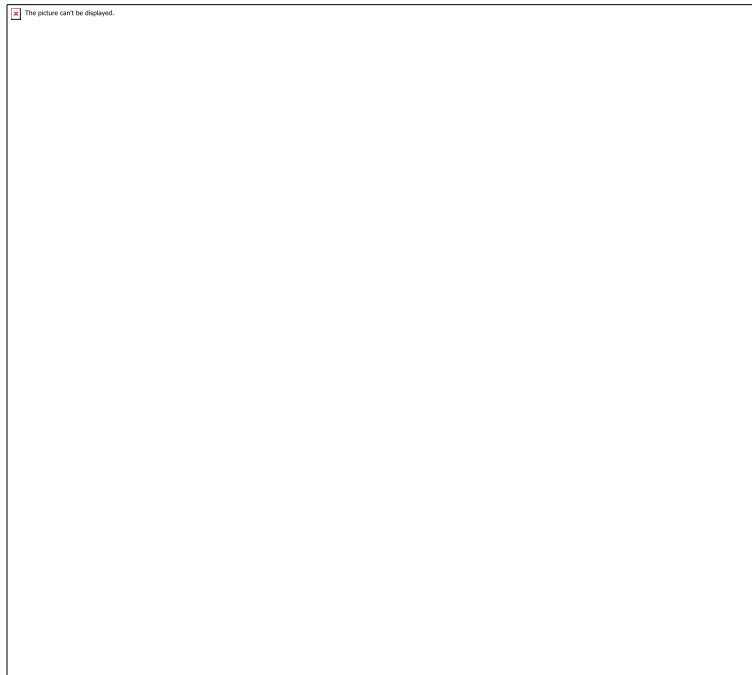
Το υβριδικό σύστημα επέκτασης της αυτονομίας, που συνήθως αναφέρεται ως υβριδικό σύστημα πρόωσης σειράς, λειτουργεί διαφορετικά από τα παραδοσιακά υβριδικά συστήματα. Σε αυτόν τον τύπο συστήματος, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης δεν έχει άμεση σύνδεση με το σύστημα μετάδοσης κίνησης [53]. Αντίθετα, η κύρια λειτουργία

του είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη συνέχεια διανέμεται τόσο στον ηλεκτρικό κινητήρα που είναι υπεύθυνος για την πρόωση όσο και στα βοηθητικά φορτία μέσα στο πλοίο.

Όσον αφορά τη σχεδίαση του συστήματος μετάδοσης κίνησης, η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προσφέρει αυξημένη ευελιξία [54]. Επιτρέπει τη βελτιστοποίηση του κινητήρα εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και του ηλεκτροκινητήρα για την πρόωση. Με την εξάλειψη της ανάγκης για άμεση σύνδεση μεταξύ του κινητήρα εσωτερικής καύσης και του συστήματος μετάδοσης κίνησης, καθίσταται δυνατό να έχουμε μια μικρότερη και πιο αποτελεσματική διάταξη μηχανοστασίου. Τα οφέλη των υβριδικών συστημάτων σειράς είναι πολλά. Πρώτα και κύρια, υπάρχει βελτίωση στην απόδοση καυσίμου [54]. Αυτό επιτυγχάνεται επιτρέποντας στον κινητήρα εσωτερικής καύσης να λειτουργεί στο πιο αποδοτικό του σημείο, το οποίο είναι συνήθως σε χαμηλότερες στροφές ανά λεπτό από αυτό που απαιτείται για την πρόωση. Επιπλέον, οι εκπομπές μειώνονται καθώς ο κινητήρας εσωτερικής καύσης παράγει αποκλειστικά ηλεκτρική ενέργεια και δεν τροφοδοτεί άμεσα το όχημα. Τέλος, παρατηρείται μείωση της μηχανικής υπερφόρτωσης καθώς ο κινητήρας εσωτερικής καύσης δεν συνδέεται άμεσα με τον άξονα της προπέλας, επιτρέποντάς του να λειτουργεί υπό βέλτιστες συνθήκες.

Υπάρχουν πολλά μειονεκτήματα που σχετίζονται με τα σειριακά υβριδικά συστήματα πρόωσης. Πρώτον, τείνουν να είναι πιο δαπανηρά σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ή παράλληλα υβριδικά συστήματα λόγω της ανάγκης για πρόσθετα εξαρτήματα, όπως γεννήτριες συνδεδεμένες σε κάθε κινητήρα ντίζελ και ηλεκτρονικά αυξημένης ισχύος [54]. Επιπλέον, τα υβριδικά οχήματα σειράς έχουν περιορισμένη ηλεκτρική ισχύς, καθώς το μέγεθος της μπαταρίας είναι συνήθως μικρότερο από το ρεζερβουάρ καυσίμου, εμποδίζοντάς τους να καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, παρά τη βελτιωμένη απόδοση καυσίμου που προσφέρει η υβριδική τεχνολογία, τα σειριακά υβριδικά εξακολουθούν να βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα ως την κύρια πηγή ενέργειας για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης τους.

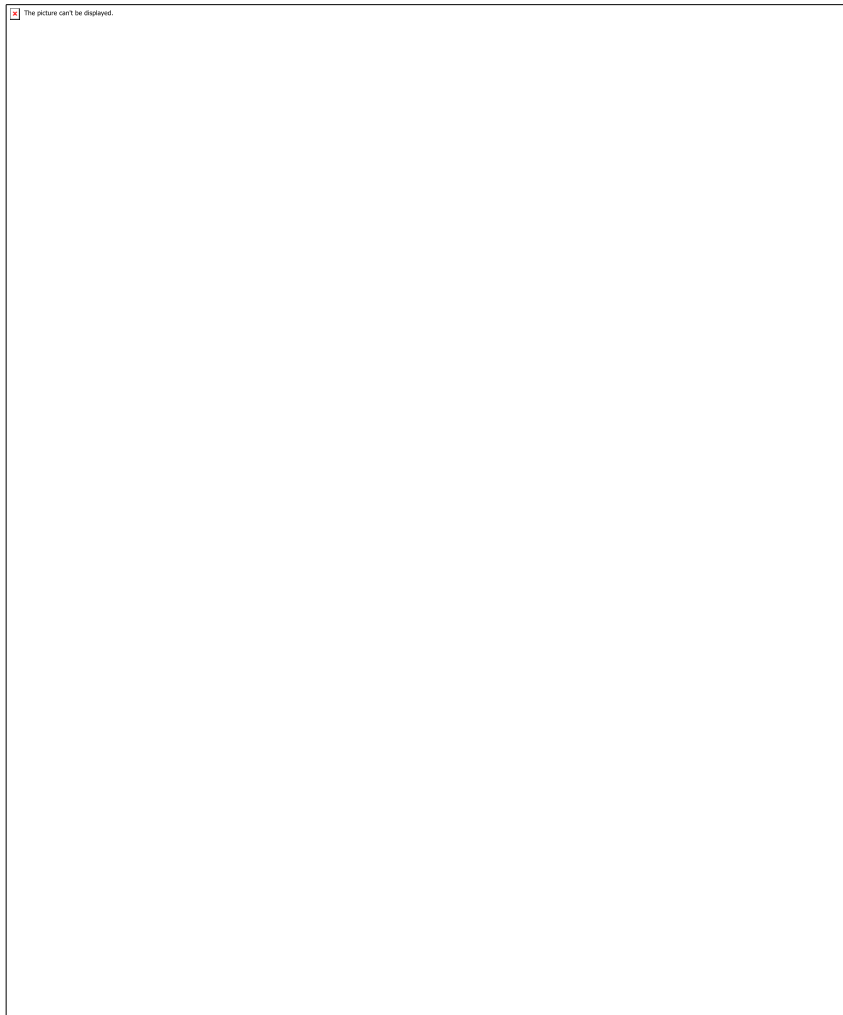
Η απόφαση για την εφαρμογή του συστήματος υβριδικής σειράς βασίστηκε στην ικανότητά του να προσαρμόζεται στις τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία αποθήκευσης, μειώνοντας την εξάρτηση από συγκεκριμένα συστήματα. Επιπλέον, με την αποσύνδεση του κινητήρα από τον άξονα της προπέλας, όλοι οι κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν σε διαφορετικές ταχύτητες, με αποτέλεσμα την βελτιωμένη απόδοση καυσίμου.



Εικόνα 20. Υβριδικό Ενεργειακό Σύστημα [53]

4.2 Εφαρμογές της υβριδικής πρόωσης

Τα υβριδικά συστήματα ισχύος και πρόωσης βρίσκουν κοινή χρήση σε διάφορα σκάφη, συμπεριλαμβανομένων φρεγατών, αντιτορπιλικών, ρυμουλκών και εμπορικών πλοίων [55]. Τα πιθανά οικονομικά πλεονεκτήματα της χρήσης υβριδικής πρόωσης στην κλάση DDG-51 του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ συζητούνται, υποθέτοντας την εφαρμογή ελέγχου βάσει κανόνων [56]. Το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ βασίζεται σε αεροστρόβιλους όχι μόνο ως κύρια μηχανή αλλά και για την παραγωγή ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι αεροστρόβιλοι παρουσιάζουν χαμηλή απόδοση καυσίμου υπό μερικά φορτία, πολύ κατώτερη από αυτή των κινητήρων ντίζελ [57]. Με την ενσωμάτωση υβριδικών συστημάτων πρόωσης, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου σε πλοία που τροφοδοτούνται από αεροστρόβιλους.



Εικόνα 21. Υβριδικό σύστημα πρόωσης [11]

Επιπλέον, γίνεται σύγκριση μεταξύ διαφόρων υβριδικών συστημάτων πρόωσης για ρυμουλκά έκτακτης ανάγκης ως προς τα οικονομικά τους πλεονεκτήματα [57]. Αυτά τα πλοία λειτουργούν συνήθως με ισχύ κινητήρα στο 20% ή και κάτω από 20%, για το 90% του χρόνου λειτουργίας τους. Μετά από αξιολόγηση διαφορετικών διαμορφώσεων, καθορίστηκε ότι η πιο οικονομική διάταξη για αυτόν τον τύπο λειτουργικού προφίλ είναι ένα υβριδικό σύστημα πρόωσης με έναν μεγάλο και έναν μικρό κινητήρα σε κάθε άξονα [58]. Αυτή η ρύθμιση επιτρέπει την αποτελεσματική περιπολία σε μέτριες ταχύτητες (αποτελούν το 45% του χρόνου), ενώ χρησιμοποιεί ηλεκτρική πρόωση για περιπολίες χαμηλής ταχύτητας και ταχύτητες ρελαντί (που αντιπροσωπεύουν το 45% του χρόνου). Τα ευρήματα από αυτές τις μελέτες δείχνουν ότι η υβριδική πρόωση μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση καυσίμου 10% ή περισσότερο, καθιστώντας την ως μια οικονομικά βιώσιμη λύση.

4.3 Στρατηγικές ελέγχου για την υβριδική πρόωση

Ομοίως, αρκετοί μηχανικοί υποστηρίζουν ότι η χρήση υβριδικής πρόωσης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου για τα πλοία λειτουργώντας στο 40%

της μέγιστης ταχύτητάς τους για μεγάλη διάρκεια [35]. Η υβριδική πρόωση συνεπάγεται τη χρήση στρατηγικών ελέγχου τόσο στον ηλεκτροκινητήρα όσο και στο σύστημα μηχανικής πρόωσης. Οι στρατηγικές ελέγχου που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3 ισχύουν και για τον ηλεκτροκινητήρα σε αυτό το πλαίσιο. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν περιορισμένες περιπτώσεις όπου ο ηλεκτροκινητήρας χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη MEK και αυτές οι περιπτώσεις θα εξεταστούν παρακάτω.

Σε περίπτωση που ο κύριος κινητήρας του πλοίου κριθεί ικανός να καλύψει επαρκώς τις απαιτήσεις του φορτίου, ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να χρησιμεύσει ως γεννήτρια ροπής για τον άξονα [20]. Για παράδειγμα, η ιταλική φρεγάτα *FREMM*, είναι εξοπλισμένη με έναν αεριοστρόβιλο ως κύριο κινητήρα και φέρει έναν στρόβιλο ελεύθερης ισχύος. Αυτή η διαμόρφωση επιτρέπει την επίτευξη μέγιστης ισχύος κινητήρα σε οποιαδήποτε ταχύτητα. Κατά συνέπεια, ο κινητήρας μπορεί πάντα να ανταποκρίνεται σε πρόσθετες απαιτήσεις φορτίου, εκτός εάν η φρεγάτα λειτουργεί με τη μέγιστη ταχύτητα ή υπό συνθήκες που υπερβαίνουν τις σχεδιαστικές παραμέτρους του συστήματος [30]. Σε αυτά τα συγκεκριμένα σενάρια, ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να αναλάβει το ρόλο μιας γεννήτριας ροπής.

Για την αποτελεσματική λειτουργία του μετατροπέα της γεννήτριας στροφών, εφαρμόζεται μια στρατηγική ελέγχου για τη ρύθμιση τόσο της ταχύτητας όσο και της τάσης στην πλευρά παραγωγής ενέργειας [30]. Επιπλέον, το ηλεκτρικό σκέλος του μετατροπέα χρησιμοποιεί έλεγχο πεδίου για τη διαχείριση του ρεύματος από το σκέλος παραγωγής ενέργειας και τη διασφάλιση της σταθερότητας της τάσης συνεχούς ρεύματος. Συνδυάζοντας αυτές τις στρατηγικές, καθίσταται δυνατή η επιτυχής λειτουργία μιας γεννήτριας άξονα και μιας γεννήτριας ντίτζελ ταυτόχρονα.

Το φορτίο μοιράζεται μεταξύ της γεννήτριας ντίτζελ και της γεννήτριας άξονα λόγω της τάσης, με αποτέλεσμα ο αεριοστρόβιλος να λειτουργεί υπό λιγότερο από ιδανικές συνθήκες. Ο αεριοστρόβιλος είναι καλύτερα εξοπλισμένος για να χειρίζεται το δυναμικό φορτίο σε σύγκριση με τη γεννήτρια ντίτζελ [30]. Μια άλλη δυνατότητα περιλαμβάνει τη λειτουργία της γεννήτριας ντίτζελ, τον έλεγχο ταχύτητας και τον έλεγχο χρόνου της γεννήτριας άξονα. Ωστόσο, απαιτείται πρόσθετη έρευνα για να διαπιστωθεί εάν αυτό το σενάριο μπορεί να εφαρμοστεί ως στρατηγική σταθερού ελέγχου.

Όταν το σύστημα ηλεκτροκινητήρα έχει διαμορφωθεί ώστε να λειτουργεί παράλληλα με μια μηχανική μονάδα, έχει τη δυνατότητα να ενισχύσει τη μέγιστη ταχύτητα του πλοίου και να μειώσει τη θερμική καταπόνηση του κινητήρα. Μια προτεινόμενη

προσέγγιση για να επιτευχθεί αυτό είναι η χρήση της ροπής που παράγεται από τον ηλεκτροκινητήρα για να μειωθεί ο λόγος περίσσειας αέρα του κύριου κινητήρα [30]. Ο λόγος περίσσειας αέρα επηρεάζει άμεσα την ποσότητα αέρα που υπάρχει στον κύλινδρο του κινητήρα κατά την καύση και χρησιμεύει ως δείκτης του θερμικού φορτίου του κινητήρα.

Με την εφαρμογή της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου, καθίσταται δυνατή η ενίσχυση της ροπής εξόδου του ηλεκτροκινητήρα και η διατήρηση μιας επιθυμητής τιμής του λόγου περίσσειας αέρα. Αυτή η τιμή λαμβάνεται μέσω στατικών χαρτών που λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως η ροπή του κινητήρα, η πίεση και η ταχύτητα. Πολυάριθμες προσομοιώσεις έχουν δείξει ότι κατά τη φάση της επιτάχυνσης, αυτή η στρατηγική μπορεί να οδηγήσει σε αξιοσημείωτη μείωση κατά 16% στις εκπομπές NO_x, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει την ελάχιστη αναλογία περίσσειας αέρα κατά 0,25 [7]. Κατά συνέπεια, κατά τη φάση αυτή επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του θερμικού φορτίου. Η προτεινόμενη προσέγγιση υπογραμμίζει τη δυνατότητα βελτίωσης της συνολικής απόδοσης με τη χρήση του ηλεκτροκινητήρα σε συνδυασμό με τον θερμικό κινητήρα ντίζελ.

Κεφάλαιο 5. Ηλεκτρική πρόωση με υβριδικό σύστημα παροχής ισχύος

Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε υβριδικά συστήματα τροφοδοσίας για ηλεκτρική πρόωση περιλαμβάνει τη χρήση πολλαπλών τύπων πηγών ισχύος. Η ταξινόμηση της τροφοδοσίας δύναται να γίνει σε τρεις κατηγορίες [59]:

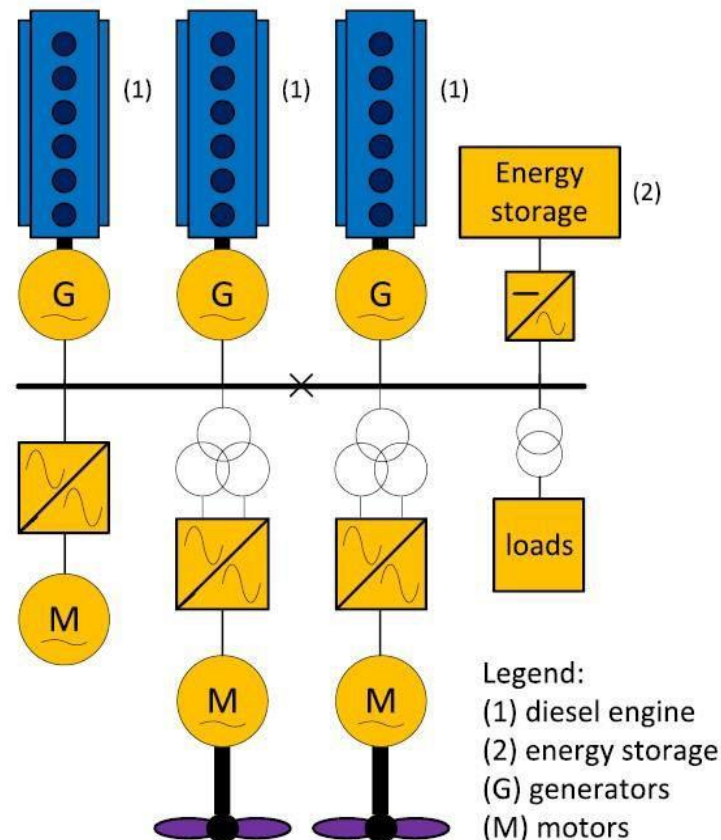
- α) Παροχή ισχύος καύσης, η οποία μπορεί να προέρχεται από κινητήρα ντίζελ, αεριοστρόβιλο ή ατμοστρόβιλο,
- β) Ηλεκτροχημική τροφοδοσία, η οποία λαμβάνεται από κυψέλες καυσίμου και
- γ) Αποθηκευμένη ισχύς, η οποία προέρχεται από συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως μπαταρίες, σφόνδυλοι ή υπερπυκνωτές.

Αυτή η ανασκόπηση εξετάζει τη χρήση συστημάτων κυψελών καυσίμου στη ναυσιπλοΐα, διερευνώντας συγκεκριμένα τις ερευνητικές εφαρμογές των κυψελών καυσίμου στα πλοία. Επί του παρόντος, η χρήση συστοιχιών κυψελών καυσίμου στα πλοία περιορίζεται κυρίως στην πρόωση των υποβρυχίων, καθώς η αποθήκευση καυσίμου υδρογόνου επιβάλλει περιορισμούς στη διαθέσιμη παροχή ενέργειας χωρίς την ανάγκη ανεφοδιασμού [59]. Ωστόσο, η συνεχιζόμενη έρευνα επικεντρώνεται τώρα στην ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών μεθόδων αποθήκευσης υδρογόνου, καθώς και στη διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης κυψελών καυσίμου με ή χωρίς αναμορφωτές που μπορούν να χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα όπως μεθανόλη, LNG (φυσικό αέριο) ή ακόμα και ντίζελ [60]. Επιπλέον, οι ερευνητές διερευνούν τον συνδυασμό κυψελών καυσίμου με κινητήρες ντίζελ ή αεριοστρόβιλους για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης, ενώ εξετάζουν επίσης την ενσωμάτωση κυψελών υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας.

Εκτεταμένη έρευνα διεξάγεται στον τομέα της παροχής αποθηκευμένης ενέργειας στην αυτοκίνηση και στον τομέα των εφαρμογών παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο, η χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας αποκλειστικά για σκοπούς πλοήγησης περιορίζεται επί του παρόντος στο πλοίο *MV Ampere*, καθώς έχει περιορισμένη εμβέλεια [59]. Περαιτέρω μελέτες βρίσκονται σε εξέλιξη για τη διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης της αποθηκευμένης ενέργειας σε άλλες εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Το πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας στα πλοία είναι σημαντικά περιορισμένο, με κύρια εστίαση στη χρήση τεχνολογιών μπαταριών [28]. Ωστόσο, έχουν διεξαχθεί μελέτες σχετικά με το μέγεθος ενός υβριδικού συστήματος

που συνδυάζει καύση, φωτοβολταϊκά και αποθήκευση ενέργειας [54]. Η ιδέα της χρήσης της αποθηκευμένης ενέργειας της μπαταρίας για την πρόωση αντλεί έμπνευση από την αυτοκινητοβιομηχανία, όπου οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την αποθήκευση της ενέργειας πέδησης αντί για τη σπατάλη της. Αυτό επιτρέπει στον κινητήρα να λειτουργεί σε πιο αποδοτικό σημείο και επιτρέπει στον κύριο κινητήρα να «σβήσει», ιδιαίτερα όταν λειτουργεί με μερικό ή χωρίς φορτίο. Η *Εικόνα 16* απεικονίζει μια τυπική διαμόρφωση μιας μονάδας ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδικό τροφοδοτικό.



Εικόνα 22. Σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδική παροχή ισχύος [11]

5.1 Οφέλη και προκλήσεις της ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδικό σύστημα ισχύος

Η χρήση ενός υβριδικού συστήματος που ενσωματώνει αποθηκευμένη ενέργεια προσφέρει ευδιάκριτα οφέλη για τις μονάδες πρόωσης. Με την αξιοποίηση της αποθήκευσης ενέργειας, καθίσταται δυνατή η παροχή της απαραίτητης ηλεκτρικής ισχύος και η απενεργοποίηση ενός ή περισσότερων κινητήρων που διαφορετικά θα λειτουργούσαν αναποτελεσματικά υπό μερικό φορτίο. Η επαναφόρτιση του μέσου αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να συμβεί σε περιόδους χαμηλότερης κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών ρύπων [61]. Αυτή η διαδικασία όχι μόνο εξοικονομεί καύσιμα και μειώνει τις εκπομπές ρύπων, αλλά επίσης μειώνει τα επίπεδα θορύβου και βελτιώνει

τη συνολική εμπειρία ιστιοπλοΐας. Επιπλέον, επιτρέπει την πλεύση χωρίς ρύπανση για περιορισμένη διάρκεια.

Με τη χρήση της μπαταρίας, καθίσταται εφικτό να αυξηθεί το φορτίο και να χειριστεί κανείς αποτελεσματικά τυχόν διακυμάνσεις του ρεύματος [28]. Ως αποτέλεσμα, οι κινητήρες είναι σε θέση να διατηρούν σταθερό φορτίο, οδηγώντας σε μια πιο βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας.

Με τη χρήση μιας μπαταρίας, καθίσταται δυνατή η αποτελεσματική αντιμετώπιση των αυξήσεων της ζήτησης ενέργειας. Η μπαταρία παρέχει ρεύμα σε περιόδους υψηλής ζήτησης και επαναφορτίζεται όταν οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι χαμηλότερες. Αυτή η προσέγγιση βελτιστοποιεί την απόδοση του κινητήρα και ελαχιστοποιεί την ανάγκη για υπερβολική εγκατεστημένη ισχύ.

Ενώ ο ηλεκτροκινητήρας βρίσκεται σε λειτουργία, οι μπαταρίες έχουν τη δυνατότητα να δεσμεύουν και να διατηρούν ένα μέρος της ενέργειας που διαφορετικά θα χανόταν [61]. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας από αυτή τη διαδικασία είναι κάπως περιορισμένη λόγω της σπάνιας συχνότητας με την οποία ένα πλοίο χρειάζεται να επιβραδύνει. Ωστόσο, όταν το πλοίο ενεργοποιεί το σύστημα πέδησής του, μπορεί να ανακτηθεί σημαντική ποσότητα ενέργειας.

Σε περίπτωση βλάβης της μονάδας εσωτερικής καύσης (όπως οι γεννήτριες ντίζελ), η μπαταρία μπορεί να χρησιμεύσει ως αξιόπιστη εφεδρική πηγή ενέργειας [61]. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη λειτουργίας επιπλέον κινητήρων ντίζελ για εφεδρική ταχύτητα και έχει τη δυνατότητα να μειώσει την απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύ σε σκάφη που έχουν απαιτητικές ανάγκες διαθεσιμότητας πρόωσης, όπως τα πλοία DP (Dynamic Positioning, Δυναμικής Μετατόπισης).

Όταν μια μπαταρία ενσωματώνεται σε υβριδικά συστήματα, λειτουργεί ταυτόχρονα παράλληλα με τις γεννήτριες, με αποτέλεσμα να υπάρξουν μερικές προκλήσεις που περιγράφονται ως εξής [61]:

- Ο πρωταρχικός στόχος της στρατηγικής ελέγχου είναι η βελτιστοποίηση της απόδοσης καυσίμου μέσω στρατηγικής διαχείρισης της φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας.
- Οι διακυμάνσεις του φορτίου στους κινητήρες ντίζελ έχουν ως αποτέλεσμα υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου, αυξημένες εκπομπές ρύπων και μεγαλύτερες απαιτήσεις συντήρησης. Επομένως, είναι ζωτικής σημασίας για τη στρατηγική ελέγχου

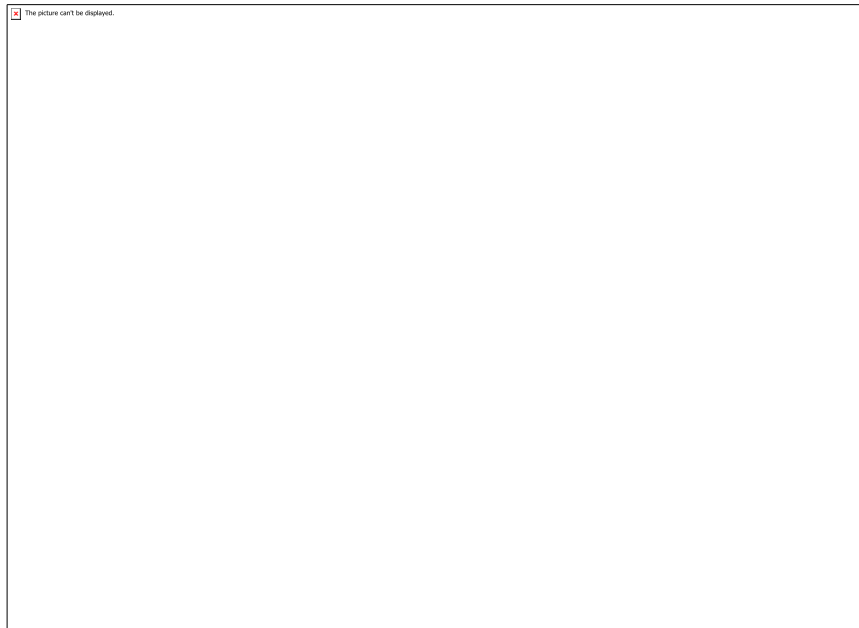
να κατανέμει αποτελεσματικά το φορτίο μεταξύ της μπαταρίας και του κινητήρα, διασφαλίζοντας ότι η κατανάλωση καυσίμου, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οι απαιτήσεις συντήρησης ολόκληρου του συστήματος παροχής ισχύος ελαχιστοποιούνται.

5.2 Εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδικό σύστημα παροχής ισχύος

Η χρήση μπαταριών σε θαλάσσιες εφαρμογές είναι μια σχετικά νέα εξέλιξη, αλλά η αποδοχή και η ζήτηση της αυξάνονται ραγδαία. Τα ρυμουλκά και τα ferry boat, ειδικότερα, υιοθετούν υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας που ενσωματώνουν ηλεκτρική πρόωση για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου και των περιβαλλοντικών ρύπων. Αυτή η στροφή προς την ηλεκτρική πρόωση οδήγησε στην ευρεία χρήση μπαταριών σε αυτά τα συστήματα, σε συνδυασμό με συνεχές ρεύμα.

Επιπλέον, διεξήχθη ανάλυση για την αξιολόγηση των οικονομικών πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή ηλεκτρικής πρόωσης σε συνδυασμό με ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας σε ferry boat [59] και ρυμουλκά.

Η χρήση μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας, σε συνδυασμό με μια συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου, έχει διερευνηθεί σε διάφορες μελέτες. Η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται σε περιόδους που η μπαταρία δεν επαναφορτίζεται είναι ελάχιστη. Παρ' όλα αυτά, υπήρξε έλλειψη διερεύνησης των παραγόντων που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στο σύστημα, καθώς και της επιρροής του επιχειρησιακού προφίλ του πλοίου [55]. Το πλοίο τύπου *Hallaig* χρησιμοποιεί το προαναφερθέν σύστημα, μαζί με προηγμένες τεχνικές ελέγχου. Μια οπτική αναπαράσταση του πλοίου απεικονίζεται στην *Εικόνα 23*.

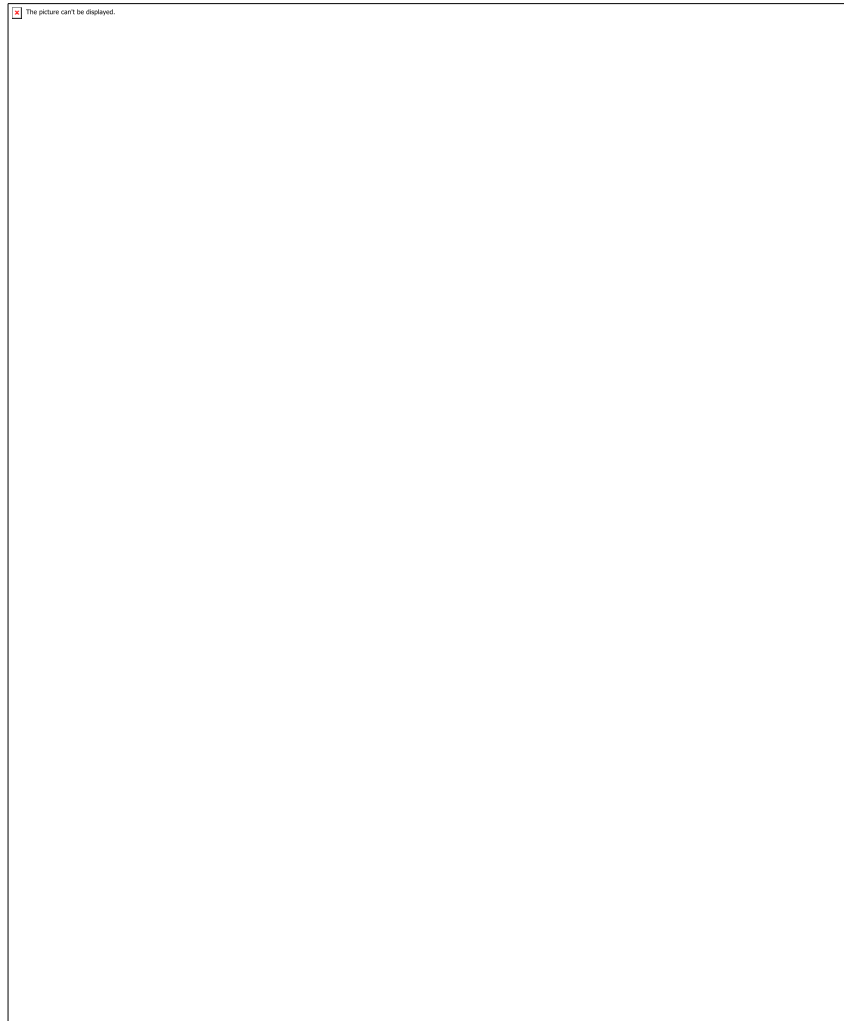


Εικόνα 23. Ferry τύπου Hallaig [11]

Κατά τη φάση δοκιμών αυτού του πλοίου, το οποίο ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2014, παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη βελτίωση της απόδοσης καυσίμου κατά 35% [24]. Αυτό το αξιοσημείωτο επίτευγμα μπορεί να αποδοθεί σε δύο βασικούς παράγοντες. Πρώτον, οι μπαταρίες του πλοίου φορτίζονταν αποκλειστικά κατά τις νυχτερινές ώρες, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 24%. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η φόρτιση από χερσαίους σταθμούς ενδέχεται να εισάγει ρύπους στο σύστημα κατά τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής της στεριάς. Ωστόσο, η εφαρμογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο δικτύου μετριάζει σημαντικά τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις [24].

Κεφάλαιο 6. Υβριδική πρόωση με υβριδικό σύστημα ισχύος

Χρησιμοποιώντας ένα υβριδικό σύστημα ισχύος, η υβριδική πρόωση βελτιστοποιεί την απόδοση της άμεσης μηχανικής μετάδοσης κίνησης ενώ εκμεταλλεύεται την ευελιξία του συνδυασμού της ισχύος καύσης από έναν κύριο κινητήρα με την αποθηκευμένη ενέργεια από τις μπαταρίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [11]. Σε περιόδους πρόωσης χαμηλής ισχύος, δουλεύει μόνο ο ηλεκτροκινητήρας, επιτρέποντας στον κύριο κινητήρα να σβήσει ενώ ταυτόχρονα τροφοδοτεί ηλεκτρισμό στο πλοίο και τα δευτερεύοντα φορτία του. Η *Εικόνα 24* απεικονίζει τη διάταξη αυτού του συστήματος.

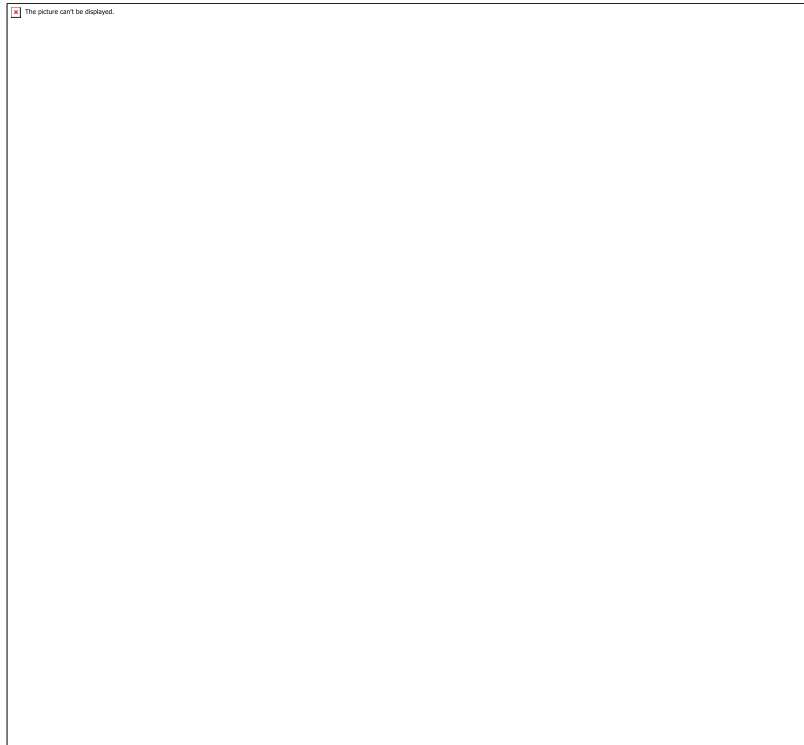


Εικόνα 24. Σύστημα υβριδικής πρόωσης με υβριδική παροχή ισχύος [11]

6.1 Εφαρμογή της υβριδικής πρόωσης με υβριδική παροχή ισχύος

Η πρωτοποριακή χρήση της υβριδικής πρόωσης και της παροχής υβριδικής ισχύος στα πλοία ξεκίνησε με τα ρυμουλκά των λιμανιών. Το 2014, η εταιρεία που ηγείται της έρευνας παρήγγειλε το πρώτο τρέιλερ εξοπλισμένο με υβριδικό σύστημα πρόωσης και υβριδικό τροφοδοτικό. Η *Εικόνα 25* απεικονίζει τη σχηματική αναπαράσταση του συστήματος που είναι εγκατεστημένο σε αυτό το πλοίο [13]. Επιπλέον, το 2015 κυκλοφόρησε το σκάφος με το όνομα *Savannah*, το οποίο διαθέτει το ίδιο υβριδικό

σύστημα. Ωστόσο, με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, παραμένει ασαφές εάν άλλα σκάφη, εκτός από ρυμουλκά, έχουν ενσωματωμένη υβριδική πρόωση με υβριδική παροχή ισχύος μέχρι αυτό το σημείο.



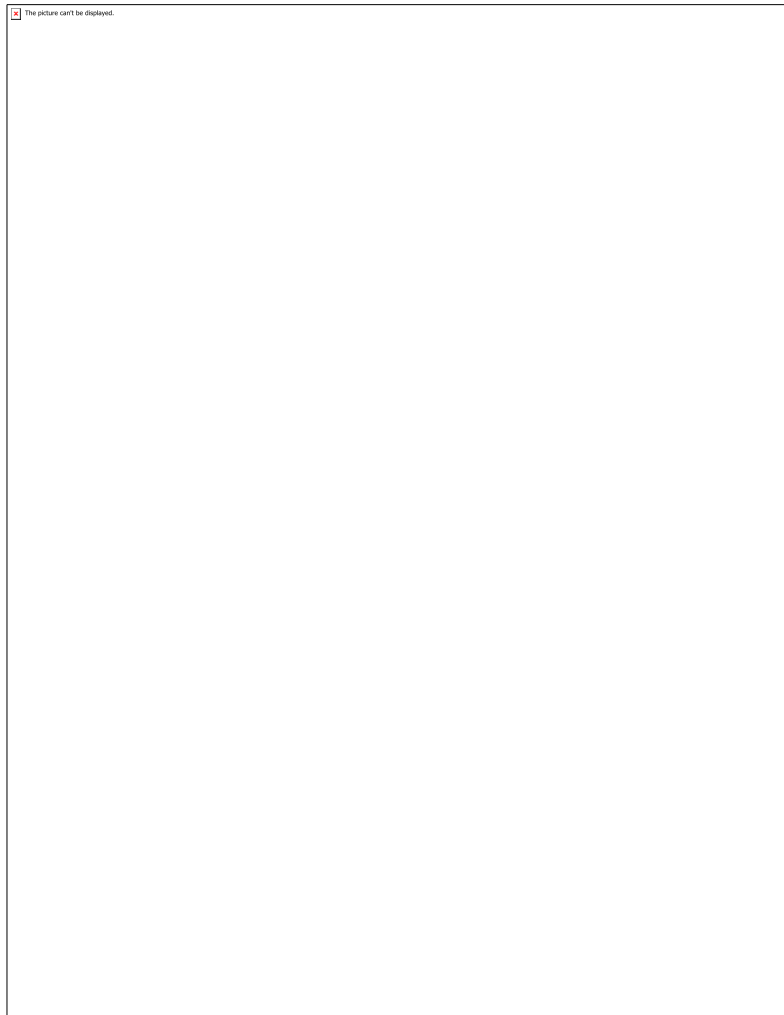
Εικόνα 25. Απεικόνιση ενός ρυμουλκού υβριδικής πρόωσης με υβριδική παροχή ισχύος [11]

Κεφάλαιο 7. Ηλεκτρική πρόωση με υβριδικό σύστημα συνεχούς ρεύματος (DC)

Όσον αφορά την ηλεκτρική πρόωση, ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι η αυξημένη κατανάλωση καυσίμου κατά τη λειτουργία μερικού φορτίου με σταθερή ταχύτητα, σε αντίθεση με τη μεταβλητή ταχύτητα. Αυτό το μειονέκτημα υπογραμμίζει τη σημασία των ηλεκτρικών δικτύων μεταβλητής συχνότητας στο πλαίσιο της ηλεκτρικής πρόωσης [45]. Τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος έχουν περιορισμένες εφαρμογές λόγω των ποικίλων απαιτήσεων κατανάλωσης για ρεύμα σταθερής συχνότητας. Ωστόσο, με το πέρας των ετών έχουν βρει χρησιμότητα σε ορισμένους τομείς, όπως τα υποβρύχια.

Ωστόσο, η ευρεία χρήση συστημάτων συνεχούς ρεύματος έχει περιοριστεί λόγω περιορισμών στην προστασία από σφάλματα και στη σταθερότητα του συστήματος ισχύος. Ωστόσο, οι εξελίξεις στα ηλεκτρονικά συστήματα και οι έξυπνες προσεγγίσεις για την προστασία από σφάλματα και τη διατήρηση της σταθερότητας του συστήματος ισχύος έχουν επιτρέψει την ευρύτερη εφαρμογή συστημάτων DC [14].

Η *Εικόνα 26* απεικονίζει ένα τυπικό σύστημα ηλεκτροπρόωσης με υβριδικό σύστημα ισχύος σταθερού ρεύματος.



Εικόνα 26. Ηλεκτρική πρόωση με υβριδικό σύστημα ισχύος, σταθερού ρεύματος [11]

7.1 Οφέλη του υβριδικού συστήματος ισχύος DC

Η εφαρμογή συστημάτων συνεχούς ρεύματος εξυπηρετεί δύο κρίσιμους σκοπούς [14]: τη βελτίωση της απόδοσης καυσίμου και την ελαχιστοποίηση των απωλειών μετατροπής ισχύος. Όταν πρόκειται για πλοία ηλεκτρικής πρόωσης, η εφαρμογή ενός υβριδικού συστήματος ισχύος με συνεχές ρεύμα προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, τα οποία περιλαμβάνουν [62]:

- Η χρήση της διάταξης DC παρέχει την ευελιξία για τη λειτουργία του κινητήρα ντίζελ σε διαφορετικές ταχύτητες, γεγονός που θεωρητικά έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη κατανάλωση καυσίμου, εκπομπές ρύπων, θόρυβο και υπερβολική λειτουργία των εξαρτημάτων του κινητήρα.
- Η ανοχή σφαλμάτων των συσκευών DC αποδίδεται στα ηλεκτρονικά τους συστήματα, επιτρέποντας τον άμεσο έλεγχο των ηλεκτρικών μεταβλητών. Οι βλάβες σε αυτές τις συσκευές δεν εξαπλώνονται μέσω του ηλεκτρικού δικτύου, αποτρέποντας έτσι διακοπές στην τάση και στη συχνότητα του δικτύου.

- Η ενσωμάτωση ηλεκτρονικών συστημάτων προσφέρει προστασία έναντι αστοχίας, μειώνοντας πιθανώς την ποσότητα και τις διαστάσεις του εξοπλισμού και των διακοπών που απαιτούνται.

Ενώ οι συσκευές DC προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε και να ξεπεράσουμε τις προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή τους.

Πρώτον, η σύνδεση πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και φορτίων στο δίκτυο συνεχούς ρεύματος απαιτεί τη χρήση μετατροπών [11]. Σε σενάρια όπου υπάρχει σημαντική ζήτηση για εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερής συχνότητας, ενδέχεται να υπάρξουν σημαντικές απώλειες ενέργειας. Αντίθετα, εάν ένα σημαντικό μέρος του φορτίου βασίζεται σε κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας, η υιοθέτηση μιας διαμόρφωσης DC μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του κόστους.

Δεύτερον, για να καταστούν βιώσιμες οι συσκευές DC, είναι σημαντικό να βρεθούν αποτελεσματικές λύσεις για την προστασία από πιθανές ζημιές [11].

Τρίτον, για την αντιμετώπιση προβλημάτων σταθερότητας και απόδοσης, είναι ζωτικής σημασίας να εφαρμοστεί μια καλά συντονισμένη στρατηγική ελέγχου για αυτά τα συστήματα. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική ανάγκη να ληφθούν υπόψη τα κριτήρια που περιγράφονται στην αρχική ενότητα αυτής της εργασίας.

7.2 Εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδικό σύστημα παροχής ενέργειας συνεχούς ρεύματος

στορικά, τα υποβρύχια βασίζονται σε συστήματα ισχύος συνεχούς ρεύματος σε συνδυασμό με μεγάλες μπαταρίες για να επιτρέψουν την πρόωση ανεξάρτητα από τον αέρα [45]. Πιο πρόσφατα, τα αντιτορπιλικά DDG-1000 του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ έχουν επίσης ενσωματώσει ένα σύστημα διανομής DC [38]. Ομοίως, το Βασιλικό Ναυτικό έχει διερευνήσει τη δυνατότητα εφαρμογής συστημάτων συνεχούς ρεύματος στις φρεγάτες του, με ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα ανάπτυξης, αν και δεν έχει ακόμη τεθεί σε εφαρμογή. Και οι δύο αυτές ναυτικές δυνάμεις έχουν υιοθετήσει επί του παρόντος συστήματα ισχύος συνεχούς ρεύματος λόγω της αξιοπιστίας και της ικανότητάς τους να χειρίζονται παλμικά φορτία ισχύος [49]. Τα σχέδια ενσωματώνουν σημαντική ποσότητα ηλεκτρικού εξοπλισμού για τις μετατροπές, που χρησιμεύουν στο διαχωρισμό της τάσης και της συχνότητας διαφορετικών εξαρτημάτων, εξασφαλίζοντας έτσι βελτιωμένη σταθερότητα. Ένα βασικό χαρακτηριστικό αυτών των θαλάσσιων συστημάτων DC είναι η κατανεμημένη φύση τους.

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση ηλεκτρικών συστημάτων συνεχούς ρεύματος έχει γίνει ολοένα και πιο διαδεδομένη μεταξύ των ferry boat και των πλοίων υποστήριξης ανοικτής θαλάσσης. Το 2012, η *Alewijnse* εφάρμοσε με επιτυχία ένα σύστημα ισχύος συνεχούς ρεύματος στη *MV Jaguar* [34]. Το επόμενο έτος, η *Siemens* υιοθέτησε την τάση των ηλεκτρικών συστημάτων παρέχοντας το εναρκτήριο σύστημα DC για υβριδική τροφοδοσία στο *MV Edda Ferd* [34]. Η *ABB* άφησε επίσης το στίγμα της το 2013 παρέχοντας το πρώτο της δίκτυο DC στην *MV Dina Star* [34]. Επιπλέον, η τεχνολογία DC έχει χρησιμοποιηθεί για την πρωτοποριακή ανάπτυξη του πρώτου μεγάλης κλίμακας πλήρως ηλεκτροδοτημένου πλοίου, ενός πορθμείου στη Νορβηγία. Η *Siemens* διαδραμάτισε κρίσιμο ρόλο σε αυτό το επίτευγμα, παραδίδοντας το πλοίο *MF Ampere* το 2015, εξοπλισμένο με δίκτυο DC μόνο με μπαταρίες [34].

Η χρήση δικτύων συνεχούς ρεύματος στα πλοία έχει γίνει ολοένα και πιο δημοφιλής λόγω ενός βασικού παράγοντα: της κυρίαρχης χρήσης κινητήρων μεταβλητής ταχύτητας από τους κύριους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας επί του πλοίου. Αυτό ευθυγραμμίζεται άψογα με τη διαμόρφωση συνεχούς ρεύματος, η οποία βασίζεται στην καλωδίωση συνεχούς ρεύματος. Επιπλέον, υπάρχουν μεγάλες δυνατότητες για υβριδικά συστήματα ισχύος DC σε πολυτελή γιοτ, καθώς προσφέρουν την ευκαιρία να βελτιώσουν τα επίπεδα άνεσης διατηρώντας παράλληλα τη βέλτιστη απόδοση.

Συμπεράσματα

Μετά από εκτενή έρευνα της διαθέσιμης βιβλιογραφίας για την υβριδική/ηλεκτρική τεχνολογία στη ναυτιλιακή βιομηχανία, είναι προφανές ότι αυτός ο τομέας υπόσχεται πολλά για ένα πιο οικονομικό και περιβαλλοντικά συνειδητό μέλλον στη ναυτιλία. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτές οι εξελίξεις εξακολουθούν να βρίσκονται στη σφαίρα των μελλοντικών δυνατοτήτων. Επί του παρόντος, τα υβριδικά/ηλεκτρικά συστήματα είναι βιώσιμα μόνο για ορισμένους τύπους σκαφών και συγκεκριμένα επιχειρησιακά σενάρια και διαμορφώσεις. Επιπλέον, η πιθανή εξοικονόμηση κόστους που αναφέρθηκε προηγουμένως, αν και είναι αξιοσημείωτη, τείνει να είναι μικρότερη από 10% όταν χρησιμοποιείται η τρέχουσα τεχνολογία, η οποία μπορεί να μην είναι επαρκής για τη ναυτιλιακή βιομηχανία να μειώσει αποτελεσματικά το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα.

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι αυτές οι τεχνολογίες θα υποστούν αναμφίβολα βελτιώσεις, καθώς προχωρούν οι αποδοτικότητες των συστημάτων, αναδύονται νέα υλικά και τα πεδία υπολογιστών διευκολύνουν τον ενισχυμένο έλεγχο αυτών των συστημάτων. Μέσω της προόδου στη μηχανική και στην ανάλυση δεδομένων, υπάρχει η δυνατότητα για περαιτέρω βελτιστοποίηση αυτών των συστημάτων στο μέλλον, με αποτέλεσμα αυξημένη απόδοση και βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση.

Η ενσωμάτωση της υβριδικής τεχνολογίας στη ναυτιλιακή βιομηχανία αναμένεται να ακολουθήσει παρόμοια τροχιά όπως και στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Χρησιμοποιώντας μπαταρίες για αποθήκευση και παροχή πρόσθετης ισχύος όταν χρειάζεται, τα πλοία μπορούν να αποφύγουν τις ανεπάρκειες που σχετίζονται με τη λειτουργία επιπλέον κινητήρων. Ενώ αυτή η προσέγγιση προσφέρει πολλά οφέλη, εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετά σημαντικά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου να επιτευχθούν φιλικές προς το περιβάλλον πρακτικές ναυτιλίας. Ένα κρίσιμο ζήτημα είναι η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), τόσο από χερσαία δίκτυα για τη φόρτιση μπαταριών στα λιμάνια όσο και επί των πλοίων μέσω της εφαρμογής φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η σταδιακή υιοθέτηση των ΑΠΕ από τα προηγμένα έθνη, η οποία μειώνει την εξάρτηση από τον άνθρακα και το πετρέλαιο, μπορεί να διευκολύνει την πρώτη πτυχή. Ωστόσο, η σκοπιμότητα και η βιωσιμότητα της χρήσης ΑΠΕ στα πλοία εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο συνεχούς έρευνας και συζήτησης.

Ο κλάδος στο σύνολό του κινείται προς τη σωστή κατεύθυνση, ακολουθώντας το παράδειγμα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Αν και είναι ζωτικής σημασίας για την

κοινωνία, η αυτοκινητοβιομηχανία είναι επίσης μια από τις πιο καταστροφικές για το περιβάλλον βιομηχανίες παγκοσμίως. Ομοίως, η ναυτιλιακή βιομηχανία βρίσκεται σε μια κρίσιμη καμπή, καθώς η έλλειψη πετρελαίου στο μέλλον καθιστά αναγκαία μια στροφή προς στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως την ηλιακή, τον άνεμο και το νερό για να διασφαλιστεί η επιβίωσή μας.

Ένας πιθανός τομέας για μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να αντιμετωπίσει τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πλοίων. Από τη στιγμή της κατασκευής τους, τα πλοία συμβάλλουν στην απελευθέρωση εκατομμυρίων τόνων CO₂ στον αέρα και δεν είναι μόνο η εξάρτησή τους από ορυκτά καύσιμα που τα καθιστά επιβλαβή για το περιβάλλον. Μια επικείμενη, εκτενής μελέτη θα πρέπει να επικεντρωθεί στις συλλογικές εκπομπές που αποδίδονται στη ναυτιλιακή βιομηχανία και να εφαρμόσει ένα ολοκληρωμένο σύνολο στρατηγικών για τον μετριασμό και τη ρύθμισή τους.

Ταυτόχρονα, η διεξοδική εξέταση των νέων προόδων στις τεχνολογίες υβριδικής και ηλεκτρικής πρόωσης θα προσφέρει λύσεις σχετικά με τη βιωσιμότητα και την οικονομική και περιβαλλοντική απόδοση των σκαφών. Το αδιαμφισβήτητο εύρημα, μετά από εκτενή ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας, είναι ότι η ναυτιλιακή βιομηχανία έχει τη δυνατότητα να υιοθετήσει πρακτικές φιλικές προς το περιβάλλον, ενώ παραμένει επωφελής για την κοινωνία και οικονομικά προσοδοφόρα. Ωστόσο, η επίτευξη ενός πιο πράσινου προφίλ απαιτεί τόσο τεχνολογικές προόδους όσο και προθυμία να τις υιοθετήσουμε.

Προτάσεις για μελλοντική βελτίωση

Καθώς η ναυτιλιακή βιομηχανία αντιμετωπίζει αυξανόμενες πιέσεις για να ελαχιστοποιήσει το οικολογικό της αποτύπωμα και να τηρήσει πιο αυστηρά πρότυπα εκπομπών, η ζήτηση για καθαρές και αποδοτικές πηγές ενέργειας στα πλοία αυξάνεται σταθερά. Αυτό παρουσιάζει μια πολλά υποσχόμενη προοπτική για το μέλλον της ηλεκτρικής ενέργειας στο πλοίο, καθώς η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην επίτευξη αυτών των περιβαλλοντικών στόχων [63] [23].

Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια εξαιρετικά ενθαρρυντική πρόοδος στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία [64]. Η αποτελεσματικότητα και η αξιοπιστία των ανεμογεννητριών και των ηλιακών συλλεκτών στα πλοία έχουν ήδη τεκμηριωθεί, ενώ οι συνεχείς ερευνητικές προσπάθειες προσπαθούν να βελτιώσουν την απόδοση και την αξιοπιστία τους. Με την εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών στο κατάστρωμα, στο κύτος ή στο αμπάρι του πλοίου, καθίσταται δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η μείωση της εξάρτησης από συμβατικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που εξαρτώνται από τα ορυκτά καύσιμα. Ως αποτέλεσμα, η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές ρύπων μειώνονται.

Η χρήση μπαταριών και κυψελών καυσίμου για αποθήκευση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία είναι ένας επιπλέον τομέας προόδου [28]. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, μπορούν να αποθηκεύσουν αποτελεσματικά το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές και να προσφέρουν μια αξιόπιστη πηγή ενέργειας σε περιόδους περιορισμένης παραγωγής. Αυτό συμβάλλει στη συνεπή και αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία, με αποτέλεσμα τη μείωση της χρήσης καυσίμου και των εκπομπών.

Η ελκυστικότητα της χρήσης μπαταριών σε θαλάσσιες εφαρμογές έχει αυξηθεί λόγω της προόδου στην τεχνολογία μπαταριών. Συγκεκριμένα, η ανάπτυξη μπαταριών ιόντων λιθίου με μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και εκτεταμένη διάρκεια ζωής συνέβαλε σε αυτήν την απήχηση [28]. Επιπλέον, οι κυψέλες καυσίμου διερευνώνται ως μια καθαρή και αποτελεσματική εναλλακτική λύση για την παραγωγή ενέργειας στα πλοία. Αυτές οι κυψέλες χρησιμοποιούν υδρογόνο ή άλλα καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας αποτελεσματικά τις εκπομπές και την κατανάλωση καυσίμου. Με τη μετατροπή των καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια, οι κυψέλες

καυσίμου προσφέρουν μια βιώσιμη λύση για την ενσωματωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον, υπάρχει μια αυξανόμενη γοητεία με τα υβριδικά και ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Με την ενσωμάτωση συμβατικών κινητήρων με ηλεκτροκινητήρες, αυτά τα συστήματα έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν σημαντικά τόσο την κατανάλωση καυσίμου όσο και τις εκπομπές ρύπων [65]. Επί του παρόντος, αυτή η τεχνολογία εφαρμόζεται ήδη σε ορισμένα πορθμεία και μικρότερα πλοία, αλλά υπάρχει μια πολλά υποσχόμενη ευκαιρία για εφαρμογή της σε μεγαλύτερα πλοία στο μέλλον.

Παράλληλα με αυτές τις προόδους στην τεχνολογία, υπάρχει μια αυξανόμενη εστίαση στην ψηφιοποίηση και την αυτοματοποίηση του ναυτιλιακού τομέα, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να ενισχύσει τη χρήση ενέργειας στα πλοία. Η εφαρμογή ψηφιακών λύσεων, όπως τα εξελιγμένα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου, μπορεί να εντοπίσει αποτελεσματικά περιοχές όπου η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να ελαχιστοποιηθεί και τα ενσωματωμένα συστήματα μπορούν να βελτιστοποιηθούν για βελτιωμένη απόδοση [64].

Το μέλλον της ναυτιλιακής βιομηχανίας εξαρτάται από την κρίσιμη πτυχή της έρευνας και της ανάπτυξης. Είναι επιτακτική ανάγκη να διατεθούν περισσότεροι πόροι για τη δημιουργία καινοτόμων, φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών που μπορούν να παράγουν ενέργεια επί του σκάφους. Ως μία από τις κορυφαίες πηγές παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, η ναυτιλιακή βιομηχανία πρέπει να δώσει προτεραιότητα στην ανάπτυξη αποτελεσματικών και καθαρών μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επί του πλοίου [6]. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να μειώσουμε αποτελεσματικά αυτές τις εκπομπές και να ενισχύσουμε τη βιωσιμότητα στον κλάδο.

Η επένδυση στην έρευνα και στην ανάπτυξη έχει τη δυνατότητα να αποφέρει πρωτοποριακές τεχνολογίες που ξεπερνούν την αποτελεσματικότητα και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο των συμβατικών συστημάτων που εξαρτώνται από ορυκτά καύσιμα. Μέσω της έρευνας και της ανάπτυξης, μπορούμε να ανακαλύψουμε και να δημιουργήσουμε νέες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, οι οποίες είναι ικανές να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια σε θαλάσσια πλοία [66]. Επιπλέον, αυτή η επένδυση μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία πιο προηγμένων και φιλικών προς το περιβάλλον κινητήρων εσωτερικής καύσης ή κυψελών καυσίμου, που μπορούν να λειτουργούν με εναλλακτικά καύσιμα όπως το υδρογόνο ή τα βιοκαύσιμα, βελτιώνοντας την απόδοση και μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων.

Η κατανομή περισσότερων πόρων για έρευνα και ανάπτυξη έχει τη δυνατότητα να διευκολύνει την ενσωμάτωση αυτών των αναδυόμενων τεχνολογιών στην αγορά, με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος και αυξημένη προσβασιμότητα για τις βιομηχανίες. Επιπλέον, εστιάζοντας στην έρευνα και στην ανάπτυξη, μπορούμε να αντιμετωπίσουμε αποτελεσματικά τα τεχνικά και μηχανικά εμπόδια που προκύπτουν κατά τη δημιουργία και την υιοθέτηση αυτών των καινοτομιών, διασφαλίζοντας την ασφάλεια, την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητά τους.

Επιπλέον, η διάθεση πόρων σε πρωτοβουλίες έρευνας και ανάπτυξης είναι ζωτικής σημασίας για τη ναυτιλιακή βιομηχανία προκειμένου να διατηρήσει την ανταγωνιστικότητά της σε μια ταχέως εξελισσόμενη παγκόσμια αγορά. Σε αυτήν την αγορά, οι πελάτες, οι επενδυτές και οι ρυθμιστικές αρχές δίνουν αυξανόμενη έμφαση στις βιώσιμες πρακτικές και τεχνολογίες. Κατευθύνοντας τις επενδύσεις προς την ανάπτυξη καινοτόμων, φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών, η ναυτιλιακή βιομηχανία μπορεί να καθιερωθεί ως πρωτοπόρος στις βιώσιμες μεταφορές, ενισχύοντας έτσι τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και επέκτασή τους.

Για να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική εφαρμογή και λειτουργία νέων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία, είναι ζωτικής σημασίας να παρέχεται η κατάλληλη εκπαίδευση στα μέλη του πληρώματος. Αυτό θα τους καταρτίσει με τις απαραίτητες γνώσεις και δεξιότητες για να αξιοποιήσουν τις νέες τεχνολογίες και να υιοθετήσουν βέλτιστες πρακτικές για αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας [64]. Η διεθνής συνεργασία είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή πρόοδο και ενσωμάτωση των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επί του οχήματος στον παγκόσμιο ναυτιλιακό τομέα.

Η παγκόσμια ναυτιλιακή βιομηχανία μπορεί να επωφεληθεί σε μεγάλο βαθμό από τη διεθνή συνεργασία και τον συντονισμό για την προώθηση και την εφαρμογή νέων τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επί του πλοίου. Αυτή η συνεργασία μπορεί να διασφαλίσει ότι αυτές οι τεχνολογίες είναι προσβάσιμες και οικονομικά αποδοτικές για τη βιομηχανία παγκοσμίως. Υποστηρίζοντας την ανάπτυξη και τη χρήση αυτών των τεχνολογιών, οι χώρες και οι οργανισμοί μπορούν να δημιουργήσουν οικονομίες κλίμακας, χαμηλότερο κόστος και να αυξήσουν τη διαθεσιμότητά τους για τον κλάδο. Επιπλέον, η διεθνής συνεργασία μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά κοινά εμπόδια, όπως κανονιστικές απαιτήσεις και ανάπτυξη υποδομών, που μπορεί να εμποδίσουν την πρόοδο των νέων τεχνολογιών [66]. Με τη συνεργασία, τα έθνη και οι θεσμοί έχουν τη δυνατότητα να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά αυτές τις προκλήσεις,

οδηγώντας σε μειώσεις κόστους και ευρεία αποδοχή αυτών των πρωτοποριακών τεχνολογιών.

Ο κλάδος μπορεί να επωφεληθεί από τη ρυθμιστική υποστήριξη, καθώς μπορεί να επιταχύνει την αποδοχή καινοτόμων και φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών για την παραγωγή ενέργειας επί του σκάφους. Με τη θέσπιση κανονισμών, μπορεί να ενισχυθεί ένα δίκαιο ανταγωνιστικό περιβάλλον, ενθαρρύνοντας τη βιομηχανία να επενδύσει στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που συμμορφώνονται με τα πρότυπα ασφάλειας και περιβάλλοντος. Επιπλέον, οι κανονισμοί μπορούν να παρέχουν κίνητρα για την πρόοδο αυτών των τεχνολογιών, οδηγώντας περαιτέρω την εφαρμογή τους.

Η εφαρμογή των κανονισμών μπορεί επίσης να χρησιμεύσει ως πολύτιμος πόρος για την πρόοδο και τη χρήση των αναδυόμενων τεχνολογιών, διασφαλίζοντας την τήρησή τους στην ασφάλεια, στην αξιοπιστία και στην αποτελεσματικότητά τους. Αυτοί οι κανονισμοί μπορεί να περιλαμβάνουν εντολές για τη χρήση πιστοποιημένων και διεξοδικά ελεγμένων τεχνολογιών, τη θέσπιση σημείων αναφοράς απόδοσης και την παροχή ολοκληρωμένων οδηγιών για την εγκατάσταση και τη λειτουργικότητα καινοτόμων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επί του οχήματος [66].

Επιπλέον, η εφαρμογή ρυθμιστικών μέτρων μπορεί να επιταχύνει την αποδοχή των αναδυόμενων τεχνολογιών μειώνοντας τα εμπόδια στην είσοδο και προσφέροντας ανταμοιβές για την πρόοδό τους. Φορολογικές μειώσεις, επιχορηγήσεις και διάφορα οικονομικά κίνητρα μπορούν να διευκολυνθούν μέσω κανονισμών για την ενθάρρυνση της δημιουργίας και εφαρμογής νέων τεχνολογιών, μειώνοντας έτσι τις δαπάνες και ενθαρρύνοντας την ευρεία υιοθέτησή τους [67].

Η ανάπτυξη και η πρόοδος των νέων τεχνολογιών μπορεί να προωθηθεί μέσω της ρυθμιστικής υποστήριξης, η οποία δημιουργεί ένα ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξή τους. Οι κανονισμοί που προάγουν τη δικαιοσύνη δημιουργούν ίσες ευκαιρίες για τις νέες τεχνολογίες να ανταγωνιστούν τα καθιερωμένα συστήματα που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, ενθαρρύνοντας έτσι τις επενδύσεις σε καινοτόμες εξελίξεις.

Η εφαρμογή κινήτρων, όπως μειώσεις των φόρων ή άλλες οικονομικές ανταμοιβές, μπορεί να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στην προώθηση καινοτόμων και φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επί του σκάφους. Αυτά τα κίνητρα όχι μόνο επιταχύνουν την υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών αλλά συμβάλλουν επίσης στη μείωση του κόστους.

Βιβλιογραφία

- [1] J. Sriram, (2013). Electric Propulsion for Ships - An Overview, *Journal of Marine*, τόμ. 12, αρ. 1, pp. 1-7, 2013.
- [2] J. Flynn, (2019). Hurtigruten Plans World's First Electric-Powered Cruise Fleet by 2026. *Forbes*.
- [3] J. Carlton, Marine Propellers and Propulsion, 3rd Edition επιμ., London: Butterworth Heinemann, 2012.
- [4] IMO, (2014). *Third IMO greenhouse gas study 2014, executive summary and final report*, London: International Maritime.
- [5] Roskilly, R. P. J. Y. P. A.P., (2015). Novel technologies and strategies for clean transport systems. *Applied Energy*, τόμ. 151, pp. 563-566.
- [6] IMO (2011). *International convention for the prevention of pollution from ships (MARPOL) annex VI*, Consolidated edition επιμ., International Maritime Organization.
- [7] Jinyoung, J. D. J. W. M. C.-L. K. S. P. S. Ko, (2017). Comparative investigation of NOx emission characteristics from a Euro 6-compliant diesel passenger car over the NEDC and WLTC at various ambient temperatures. *Applied Energy*, τόμ. 187, pp. 652-662.
- [8] Spiridon Raptotasios, N. S. P. R. H. D., (2017). Application of a multi-zone combustion model to investigate the NOx reduction potential of two-stroke marine diesel engines using EGR. *Applied Energy*, τόμ. 157, pp. 814-823.
- [9] Usman Asad ,M. Z., (2014). Exhaust gas recirculation for advanced diesel combustion cycles,» *Applied Energy*, τόμ. 123, pp. 242-252.
- [10] Roel Verschaeren ,W. S. T. S. M. B. L. V. S. V., (2014) Experimental study of NOx reduction on a medium speed heavy duty diesel engine by the application of EGR (exhaust gas recirculation) and Miller timing. *ENERGY*, τόμ. 76, pp. 614621.
- [11] Geertsma, R., D., N. K. V. J. H. R.D., (2017). Parallel Control for Hybrid Propulsion of Multifunction Ships. *IFAC-PapersOnLine*, τόμ. 50, αρ. 1, pp. 2296-2303.

- [12] Sciarretta , L. S. P. D. P. T. E. B. C. B. L. C. P. E. L. E. T. H. ,. M. H. ,. P. I. F. L. A. L. H. L. ,. D. M., T. N. A., (2014). A control benchmark on the energy management of a plug-in hybrid electric vehicle,» *Control Engineering Practice*, τόμ. 29, pp. 287-298.
- [13] R.D. Geertsma ,R. N. K. V. J. H., (2017). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Applied Energy*, τόμ. 194, pp. 30-54.
- [14] Bijan Zahedi, L. E. N., K. B. L.,(2014) «Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems,» *Journal of Power Sources*, τόμ. 255, pp. 341-354.
- [15] Silvas ,E. H. T. S. A. &. S. M., (2015). Functional and cost-based automatic generator for hybrid vehicles topologies. *IEEE/ASME Trans Mechatronics*, τόμ. 20, αρ. 4, pp. 1561-1572.
- [16] Bhatia, C. B. S. (2009). Electric Propulsion for Marine Applications. *Journal of Marine Science and Technology*, τόμ. 14, αρ. 2, pp. 143-153.
- [17] D. Bainbridge, «The SS Koondooloo: The World's First Electric Steamship?,» *ScienceAlert*, 2014.
- [18] J. Sriram, (2013). Electric Propulsion for Ships - An Overview. *Journal of Marine*, τόμ. 12, αρ. 1, pp. 1-7.
- [19] C. Fitzgerald, «War History Online,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.warhistoryonline.com/ships/ss-normandie.html>. [Πρόσβαση 14 March 2023].
- [20] Chong, J. L. H. S. Y., (2019). All-electric ships: Challenges, prospects and the way forward. *Applied Energy*, τόμ. 239, pp. 631-646.
- [21] Camara M, B., B. D., (2023). Coordinated Control of the Hybrid Electric Ship Power-Based Batteries/Supercapacitors/Variable Speed Diesel Generator. *Energies*, τόμ. 16, αρ. 18, p. 6666.
- [22] Simone Castellan, R. M. A. T. F. L. T. M., (2018). A review of power electronics equipment for all-electric ship MVDC power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, τόμ. 96, pp. 306-323.

- [23] George N. Sakalis ,C. A. F.,(2018). Intertemporal optimization of synthesis, design and operation of integrated energy systems of ships: General method and application on a system with Diesel main engines. *Applied Energy*, τόμ. 226, pp. 991-1008.
- [24] Caledonian Maritime Assets Limited, «CMAL Caledonian Maritime Assets Ltd,» 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.cmassets.co.uk/project/hybridferries-project/>. [Πρόσβαση March 2015].
- [25] S. M. Robinson, *Electric Ship Propulsion (Classic Reprint)*, Forgotten Books, 2019.
- [26] Ajioka, K. O. Y., (2023). Electric propulsion systems for ships,» *Ocean Engineering*, τόμ. 62, αρ. 3, pp. 231-232.
- [27] T. I. Fossen, «Part One: Marine Craft Hydrodynamics,» σε *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, John Wiley & Sons, Ltd, 2011, pp. 1225.
- [28] Daljit Kaur, M. S. S. S., «Lithium–sulfur batteries for marine applications,» σε *Lithium-Sulfur Batteries*, 2022, pp. 549-577.
- [29] Wang, X. W. L. Y. (2020). An Overview of Electric Propulsion for Ships,» *Energies*, τόμ. 13, αρ. 3, p. 648.
- [30] Haotian C., X. H. (2024) Research on Predictive Control Energy Management Strategy for Composite Electric Ship Based on Power Forecasting, *EAI Endorsed Transactions on Energy Web 11*, τόμ. 11.
- [31] Mylonopoulos, F., H. P. (2023). A Comprehensive Review of Modeling and Optimization Methods for Ship Energy Systems. *IEEE Access*, τόμ. 11.
- [32] Klein Woud, D. S. H, *Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems*, London: IMarEST, 2019.
- [33] Baldi F., H. J. C. G. K. A., (2014). Energy Analysis of Ship Energy Systems – The Case of a Chemical Tanker. *Energy Procedia*, τόμ. 61.

- [34] van Loon. Z. P. P.T., (2016). From operational profile to hybrid propulsion. In Proceedings of the 24th international HISWA symposium on yacht design and yacht construction, Amsterdam: The Netherlands, pp. 1-13.
- [35] B. P. Guillemette JR, *Proposed optimal controller for the Canadian patrol frigate diesel propulsion system*, Proceedings of the 11th Ship Control Symposium, 1997.
- [36] G. H. Stapersma D, *A fresh view on propulsion control II. Proceedings of the 14th international ship control systems symposium*, Ottawa, 2009.
- [37] N. Xiros, *Robust Control of Diesel Ship Propulsion*, New Orleans: University of New Orleans, 2002.
- [38] Arthur Vrijdag, D. S. T. v. T., «Tradeoffs in ship propulsion control: engine overloading and cavitation inception in operational conditions,» Conference: 9th International Naval Engineering Conference At: Hamburg, 2008.
- [39] Baldi F., H. J. C. G. K. A., (2014). Energy Analysis of Ship Energy Systems – The Case of a Chemical Tanker. *Energy Procedia*, Taipei, Taiwan.
- [40] Hai Lan, S. W. Y.-Y. H. D. C. Y. L. Z., (2015). Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system,» *Applied Energy*, τόμ. 158, pp. 26-34.
- [41] L. L. J. Mahon, *Diesel Generator Handbook*, 1st Edition επιμ., Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992.
- [42] Parker, C. H. D.S., «The electric warship,» IEEE Xplore, Electrical Machines and Drives, 1997.
- [43] M. D. Hodge CG, «The electric warship V,» IMarE Trans, 2000.
- [44] M. D. Hodge CG, «The electric warship IV,» IMarE Trans, 1999.
- [45] M. D. Hodge CG, «The electric warship III,» IMarE Trans, 1998.
- [46] M. D. Hodge CG, «The electric warship VI,» IMarE Trans, 2001.
- [47] Jin , G. S. R. C. L. M. J. C. V. a. J. M. G. Z., (2016). Next-Generation Shipboard DC Power System: Introduction Smart Grid and dc Microgrid Technologies into Maritime Electrical Networks. *IEEE Electrification Magazine*, τόμ. 4, αρ. 2, pp. 45-57.

- [48] Elsaiah, C. B.-A. S., (2018). Reluctance Motor Drive System for Future Applications. *2018 North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-5.
- [49] R. D. Geertsma, (2020). Naval Engineering and Ship Control Special. *Journal of Marine Engineering & Technology*, τόμ. 19, αρ. 1, pp. 1-4.
- [50] Karim, R. L. K. F. A. N., (2002). Rule-based power management for the allelectric ship. Australian University power engineering conference 2002, Melbourne.
- [51] Amgai R., A. S., (2014). Power management of shipboard power systems using interaction balance principle. Proceedings of the 2014 North American power symposium.
- [52] Gemmell G., M. B. R. M., (2014). Is IFEP a realistic future propulsion system for flexible frigates and destroyers,» Proceeding of the 12th international naval engineering conference.
- [53] Kanellos, G. T. a. F., (2013). Optimal operation of ship electrical,» *WSEAS Transactions on Power Systems*, τόμ. 8, αρ. 4, p. 145 – 155.
- [54] Hyun-Keun K., C.-H. P. a. J.-M. K., (2022). Full simulation modeling of allelectric ship with medium voltage dc power system,» *Energies*, τόμ. 15, αρ. 12, p. 4184.
- [55] Castles., G. R. R. P. G., (2009). Economic benefits of hybrid drive propulsion for naval ships. *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, pp. 515-520.
- [56] S. C. M. A. D. B. G. Sulligoi, «Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigates integrated power system: Modeling and validation,» Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on, 2012.
- [57] Wijsmuller M., H. T., (2007). Optimisation of the propulsion arrangement in emergency towing vessels,» J-GLOBAL.
- [58] Soon Ho Hong, D. M. K. S. J. K., (2024). A Back–Forward Approach-Based Efficiency Performance Analysis Model for Hybrid Electric Propulsion Ships Using the Holtrop–Mennen Method,» *J. Mar. Sci. Eng.* τόμ. 12, αρ. 1, p. 9.

- [59] van Biert., M. G. , K. V. P. A. L., (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications,» *Journal of Power Sources*, τόμ. 327, pp. 345-364.
- [60] Keno, L., A. B. M. D. S. K., (2012). SchIBZ - Design Of Different Diesel Based Fuel Cell Systems for Seagoing Vessels and Their Evaluation,» *ECS Transactions*, τόμ. 42, αρ. 1, pp. 49-58.
- [61] Dedes E., K., D. A. H. S. R. T., (2012). Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping,» *Energy Policy*, τόμ. 40, pp. 204-218.
- [62] Butcher M., R. P. P., *Compact DC power and propulsion systems – the definitive solution? Proceedings of the 3rd engine as a weapon conference.*, Portsmouth, 2009.
- [63] Ναυτικά Χρόνια, «Στόχος της Fincantieri τα πλοία του μέλλοντος,» Αθήνα, 2022.
- [64] International Renewable Energy Agency, «Offshore Renewables: An Action Agenda for Deployment,» 2019.
- [65] International Maritime Organization (IMO) (2018). Initial IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships.
- [66] The International Association of Classification Societies, «The Future of Marine Propulsion,» 2020.
- [67] World Maritime News, «Digitalisation in Maritime Industry,» 2020.