



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών

«Ενεργειακά υβριδικά συστήματα πρόωσης πλοίου και έξυπνα πλοία»

Συγγραφέας: Άντζελα Μπίμπλι
Α.Μ.:51114065

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δρ. Γεώργιος Λιβανός

Αιγάλεω, Μάρτιος, 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Τίτλος : Ενεργειακά υβριδικά συστήματα πρόωσης πλοίου και έξυπνα πλοία

Συγγραφέας

Αντζελα Μπίμπλι

A.M.:51114065

Επιβλέπων

Δρ. Λιβανός Γεώργιος

Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑ.ΔΑ

Ημερομηνία εξέτασης

09/03/2023

Εξεταστική Επιτροπή

Λιβανός Γεώργιος

Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑ.ΔΑ

Παγώνης Δημήτριος-Νικόλαος

Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑ.ΔΑ

Σέρρης Μιχαήλ

Λέκτορας ΠΑ.ΔΑ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Μπίμπλι Άντζελα Του Ρενατο, με αριθμό μητρώου 51114065 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών , δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Η Δηλούσα
ΜΠΙΜΠΛΙ ΑΝΤΖΕΛΑ



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξη καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου . Η εκπόνηση της Διπλωματικής μου εργασίας έγινε με την επίβλεψη του Δρ. Γεώργιου Λιβανού τον οποίο ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια, τις συμβουλές και την καθοδήγησή. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολο το διδακτικό προσωπικό της Σχολής , τους συμφοιτητές και φίλους μου καθώς και όλους όσους με βοήθησαν και μου έδωσαν ευκαιρίες.

Περίληψη

Ο τομέας της ναυτιλίας είναι ένας από τους μεγαλύτερους κλάδους απασχόλησης από πλευράς οικονομικών μεγεθών. Εκατοντάδες δις δολάρια σε αξία αγαθών διακινούνται σε ετήσια βάση μέσω της ναυτιλίας, φροντίζοντας πως κάθε γωνιά του πλανήτη θα έχει πρόσβαση σε αγαθά όπως το πετρέλαιο, τα αυτοκίνητα, τα σιτηρά, τα ρούχα κ.λπ. Για να επιτευχθεί αυτό, ωστόσο απαιτείται ένας τεράστιος παγκόσμιος στόλος, χιλιάδων μεγάλων πλοίων, την υποστήριξη των οποίων καλούνται να αναλάβουν ακόμα περισσότερα μικρότερα πλοία. Επίσης, οι περισσότερες χώρες του κόσμου διαθέτουν πολεμικά πλοία, κάτι που επίσης συνεισφέρει στο τελικό αριθμό των πλοίων.

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

Έτσι, τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες στο μέτωπο της αντιμετώπισης των εκπομπών ρύπων των πλοίων, είτε με την εφαρμογή μεθόδων για πρόωση με λιγότερες εκπομπές ή για φιλτράρισμα των εκπομπών σε ήδη υπάρχοντα συστήματα. Στην πρώτη λογική, την απάντηση έρχεται να δώσει η ηλεκτρική και υβριδική τεχνολογία, η οποία έχει εισαχθεί για τα καλά στην αυτοκίνηση, δίνοντας υποσχέσεις για πιθανή ενσωμάτωση και στα πλοία.

Πλοία που τροφοδοτούνται και με ηλεκτρικό ρεύμα από ΑΠΕ και μπαταρίες, μπορούν να οδηγήσουν σε μικρότερη κατανάλωση καυσίμου για την κίνησή τους και όλες τις επιπλέον ανάγκες που υπάρχουν πάνω σε αυτά (κλιματισμός, εξαερισμός, φωτισμός, ηλεκτρικές συσκευές, κτλ). Η χαμηλότερη κατανάλωση από τα πλοία μεταφράζεται σε λιγότερες εκπομπές ρύπων διοξειδίου του άνθρακα, αλλά και σε μικρότερη διαρκή ζήτηση για πετρέλαιο, το οποίο πλέον χρησιμοποιείται για μια πληθώρα εφαρμογών (θέρμανση, παραγωγή ενέργειας, πλαστικά, χημική βιομηχανία), οδηγώντας σε συνεχή εκμετάλλευση των κοιτασμάτων και καταστροφή φυσικού περιβάλλοντος.

Ωστόσο, οι υβριδικές/ηλεκτρικές τεχνολογίες δεν δύνανται να εφαρμοστούν μόνο και μόνο προς χάριν της «πράσινης» κίνησης των πλοίων. Θα πρέπει να εντοπίζονται τα οφέλη τους και σε ποιο βαθμό αυτά επιτυγχάνονται, δεδομένων των συνθηκών υπό των οποίων κάθε τύπος πλοίου λειτουργεί σήμερα. Δεν έχουν όλα τα πλοία τις ίδιες απαιτήσεις σε διαθεσιμότητα, εφεδρεία και ταχύτητα, κάτι που σημαίνει ότι δεν είναι βέβαιο πως ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να ανταπεξέλθει σε αυτές.

Έτσι, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνηθεί το κατά πόσο είναι βιώσιμη η υβριδική και ηλεκτρική τεχνολογία σε συγκεκριμένα πλοία και πόσο μπορεί να συνεισφέρει στην εξοικονόμηση καυσίμου, άρα και στη μείωση των εκπομπών ρύπων (διοξείδιο του άνθρακα).

Abstract

The shipping sector is one of the largest employment sectors in terms of economic size . Hundreds of billions of dollars in value of goods are being traded annually through shipping, making sure every corner of the globe has access to goods like oil, cars, grain, clothing, etc. To achieve this, however, a huge global fleet of thousands of large ships is required, and support from many smaller ships is also required.

Most countries in the world have warships, which also contributes to the final number of ships. This enormous number of ships, both commercial, and warships have been driving a familiar phenomenon in global society over the last few years: climate change. With ship emissions contributing to global warming, the call to limit pollutant emissions and build more green, environmentally friendly ships is reasonable.

In recent years, therefore, efforts have been made to address ship pollutant emissions by applying methods to reduce emissions or filtering emissions to existing systems. In the first sense, the answer comes from electrical and hybrid technology, which has been well introduced into automobiles, promising possible integration into ships as well.

Ships that are also powered by RES and batteries, can lead to lower fuel consumption for their movement and all the additional needs that exist on them (air conditioning, ventilation, lighting, electrical appliances, etc.). Lower vessel consumption results in lower CO2 emissions and lowers sustained demand for oil, which is now used for a variety of applications (heating, energy production, plastics, chemical industry) leading to continuous exploitation of the deposits and destruction of the natural environment.

However, hybrid/electrical technologies cannot be applied solely for the sake of the ship's 'green' revolution. Their benefits should be identified and to what extent they are achieved, given the conditions under which each type of ship operates today. Not all ships have the same requirements in terms of availability, redundancy, and speed, which means that it is uncertain how a hybrid system can cope with them.

Thus, the aim of this diplomatic work is to investigate whether hybrid and electrical technology are viable in specific ships and how much it can contribute to fuel savings and thus to the reduction of pollutant emissions (carbon dioxide).

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	6
Abstract	8
Κατάλογος Συντομογραφιών	11
1. Εξελίξεις και εφαρμογές των συστημάτων υβριδικής πρόωσης στα έξυπνα πλοία	12
2. Συστήματα μηχανικής πρόωσης	18
2.1 Έλικα σταθερού βήματος (FPP)	20
2.2 Έλικα μεταβλητού βήματος (CPP)	23
2.3 Οφέλη και προκλήσεις της μηχανικής πρόωσης	23
2.4 Εφαρμογή της μηχανικής πρόωσης	25
2.5. Στρατηγικές ελέγχου για τη μηχανική πρόωση	27
2.5.1 Έλεγχος ταχύτητας	27
2.5.2 Έλεγχος ανατροφοδότησης κατάστασης με μέτρηση της ταχύτητας στον κινητήρα και το σύστημα υπερπλήρωσής (turbo).....	29
2.5.3 Προσαρμοστικός έλεγχος ταχύτητας	29
2.5.4 Έλεγχος συνδυαστή καμπύλης.....	30
2.5.5 Έλεγχος καμπύλης συνδυαστή με μείωση του βήματος της έλικας.....	34
2.5.6 Βέλτιστη ταχύτητα και έλεγχος H_{00} βήματος	35
2.5.7 Έλεγχος της γωνίας προσβολής	37
3. Συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης	39
3.1 Οφέλη και προκλήσεις της ηλεκτρικής πρόωσης	39
3.2 Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης	42
3.3 Στρατηγικές ελέγχου για τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης.....	44
3.3.1 Έλεγχος τάσης και συχνότητας.....	44
3.3.2 Δευτερεύων έλεγχος διαχείρισης ισχύος.....	45

3.3.3 Διαχείριση ισχύος βασισμένη σε μοντέλο πραγματικού χρόνου	46
3.3.4 Παρακολούθηση ισχύος.....	46
4. Συστήματα υβριδικής πρόωσης.....	48
4.1 Οφέλη και προκλήσεις της υβριδικής πρόωσης	48
4.2 Εφαρμογές της υβριδικής πρόωσης	49
4.3 Στρατηγικές ελέγχου για την υβριδική πρόωση	51
4.3.1 Έλεγχος γεννήτριας στροφών για τον άξονα	51
4.3.2 Υποβοήθηση ηλεκτροκινητήρα.....	52
5. Ηλεκτρική πρόωση με υβριδικό σύστημα παροχής ισχύος	53
5.1 Οφέλη και προκλήσεις της ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδικό σύστημα ισχύος	55
5.2 Εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδικό σύστημα παροχής ισχύος.....	56
6. Υβριδική πρόωση με υβριδικό σύστημα ισχύος.....	58
6.1 Εφαρμογή της υβριδικής πρόωσης με υβριδική παροχή ισχύος	59
7. Ηλεκτρική πρόωση με υβριδικό σύστημα συνεχούς ρεύματος (DC)	60
7.1 Οφέλη του υβριδικού συστήματος ισχύος DC.....	60
7.2 Εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδικό σύστημα παροχής ενέργειας συνεχούς ρεύματος	62
8. Συμπεράσματα και προτάσεις.....	64
Βιβλιογραφία.....	66

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).
EU: European Union (Ευρωπαϊκή Ένωση)
FC: Fuel Cell Κυψέλες καυσίμου
FESS Flywheel energy storage system (Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο)
GHG: Greenhouse Gases (Αέρια θερμοκηπίου)
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)

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

Η βιομηχανία των πλοίων, όπως και πολλές άλλες βιομηχανίες, βρίσκεται υπό μεγάλη πίεση να μειώσει τον αντίκτυπό της στο περιβάλλον. Εάν δεν ληφθούν μέτρα, οι εκπομπές CO₂ αναμένεται να αυξηθούν έως 50-250 % μέχρι το 2050, ενώ η Συνθήκη του Παρισιού απαιτεί τεράστιες μειώσεις ώστε να επιτευχθεί ο στόχος των 2 °C της παγκόσμιας υπερθέρμανσης (IMO, 2014). Επίσης, μέχρι σήμερα, ο κλάδος της ναυτιλίας συμβάλλει στο 15% των εκπομπών NO_x σε παγκόσμια κλίμακα. Εάν δε ληφθούν μέτρα για τον περιορισμό των εκπομπών, τότε το ποσοστό αυτό ενδέχεται να αυξηθεί σημαντικά στο μέλλον. Οι εξελίξεις στα συστήματα ισχύος και πρόωσης και οι βελτιώσεις στη διαχείριση ενέργειας, ωστόσο, μπορούν σημαντικά να συνεισφέρουν στη μείωση, τόσο του CO₂ όσο και των NO_x (Roskilly AP, Palacin R, Yan J, 2015).

Για να υπάρξουν θετικά βήματα στο μέτωπο αυτό, ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοιας (International Maritime Organization, IMO) έχει θέσει ένα αυστηρό πλαίσιο για να περιορίσει τις εκπομπές των πλοίων (IMO, International convention for the prevention of pollution from ships (MARPOL) annex VI. Consolidated edition, 2011). Αρχικά, στο παράρτημα VI του κώδικα του IMO, τίθεται περιορισμοί σχετικά με τον επιτρεπτό όγκο εκπομπών οξειδίων του αζώτου στους κινητήρες ντίζελ, για πλοία τα οποία κατασκευάζονται μετά τον Ιανουάριο του 2011. Τα συγκεκριμένα πλοία, που ονομάζονται Τάξης 2 (Tier 2), έχουν όριο εκπομπών τα 7,7 g/kWh για ταχύστροφες μηχανές και για αργόστροφες τα 14,4 g/kWh.

Στις περιοχές ελέγχου εκπομπών, από τον Ιανουάριο 2016, που αναφέρονται ως Τάξης 3, οι περιορισμοί αυτοί πέφτουν στα 2.0 g/kWh και 3.4 g/kWh αντίστοιχα (IMO, International convention for the prevention of pollution from ships (MARPOL) annex VI. Consolidated edition, 2011). Τα όρια αυτά προς το παρόν αντιμετωπίζουν τις εκπομπές NO_x που παράγουν οι κινητήρες και όχι το συνολικό σύστημα ισχύος και πρόωσης των πλοίων. Ωστόσο, οι τεχνολογικές εξελίξεις ώστε να αντιμετωπιστεί η παραγωγή NO_x ανά μίλι στα αυτοκίνητα και η δημόσια κατακραυγή για καθορισμό προτύπων για ρεαλιστικές συνθήκες οδήγησης, ίσως οδηγήσουν σε μελλοντικούς περιορισμούς στη ναυσιπλοΐα για την παραγωγή NO_x ανά μίλι (Ko J, Jin D, Jang W,

Myung C-L, Kwon S, Park S, 2017). Και πάλι, το πιο σημαντικό πεδίο έρευνας για τη μείωση των εκπομπών NOx στα συστήματα παραγωγής ισχύος και πρόωσης των μηχανών ντίζελ είναι οι τεχνολογίες μείωσης, όπως η Ανακυκλοφορία των Καυσαερίων (EGR) και η Επιλεκτική Καταλυτική Μείωση (SCR) (Raptosasios S, Sakellaridis NF, Papagiannakis RG, Hountalas DT., 2015) (Asad U, Zheng M., 2014) (Verschaeren R, Schaepdryver W, Serruys T, Bastiaen M, Vervaeke L, Verhelst S., 2014).

Και η Marpol έχει εκδώσει σχετικούς κανονισμούς, θέτοντας συγκεκριμένους στόχους, οι οποίοι αφορούν τον δείκτη σχεδιασμού ενεργειακής απόδοσης στα νέα πλοία. Ο δείκτης αυτός είναι ένα μέτρο εκτίμησης της ποσότητας CO₂ που ένα εμπορικό πλοίο παράγει ανά ναυτικό μίλι και ανά τόνο μεταφερόμενων αγαθών. Τα νέα εμπορικά πλοία έχουν μειώσει τον EEDI τους από το 10% σε σύγκριση με τα εμπορικά πλοία που αποτελούσαν το σημείο αναφοράς κατά την εισαγωγή του μέτρου το 2013 σε 30% μέχρι το 2030. Παρομοίως, τέτοια μέτρα αναμένεται να θεσπιστούν και για πλοία άλλων κατηγοριών. Στο μέλλον, τα συστήματα πρόωσης και παραγωγής ισχύος στα πλοία θα πρέπει να έχουν εγκατεστημένα συστήματα που θα μειώνουν σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές βλαβερών ρύπων.

Ενώ η πίεση για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και εκπομπών έχει αυξηθεί, το λειτουργικό προφίλ των πλοίων έχει γίνει αυξανόμενα ποικιλόμορφο: τα πλοία εκτελούν πολλές διαφορετικές εργασίες, όπως τις επιχειρήσεις μεταφορές και καίριας δυναμικής τοποθέτησης (DP) (R., 2013): πλοία με μεγάλους γερανούς, όπως το *Pioneering Spirit*, επιδεικνύουν μια αυξημένη ικανότητα και πολυπλοκότητα για διάφορες υπεράκτιες εργασίες. τα πλοία του ναυτικού εκτελούν εργασίες περιπολίας σε ανοιχτή θάλασσα, αλλά επίσης επιχειρούν και σε παράκτιες δράσεις, ενώ τα ρυμουλκά απαιτούν μέγιστη ώση όταν ρυμουλκούν ένα άλλο πλοίο και περιορισμένη ισχύ κατά τη μετακίνηση ή αναμονή τους (T.). Λόγω του πολύμορφου προφίλ λειτουργίας, οι μονάδες που χρησιμοποιούνται για την πρόωση και την παραγωγή ισχύος θα πρέπει ταυτόχρονα και να αποδίδουν τα αναμενόμενα, αλλά και να λαμβάνουν υπόψη κριτήρια όπως:

- Τις εκπομπές ρύπων
- Την κατανάλωση καυσίμου

- Τον εκπεμπόμενο θόρυβο
- Τη διαθεσιμότητα του συστήματος πρόωσης
- Δυνατότητα ελιγμών
- Άνεση λόγω ελάχιστου θορύβου, δονήσεων και οσμών
- Κόστος συντήρησης λόγω του θερμικού και μηχανικού φορτίου της μηχανής
- Κόστος αγοράς

Επιπλέον, τα διαφορετικά αυτά λειτουργικά προφίλ κάνουν δύσκολη τη βελτιστοποίηση της μονάδας ισχύος και πρόωσης σε μια συγκεκριμένη φάση του σχεδιασμού του πλοίου, όπως γινόταν παραδοσιακά.

Από τη δεκαετία του '90 και έπειτα, η ηλεκτρική πρόωση αρχίζει να χρησιμοποιείται σε διάφορες κατηγορίες πλοίων, όπως τα πολεμικά πλοία και τα κρουαζιερόπλοια, λόγω του προφίλ λειτουργίας της που προσφέρει ευελιξία. Ωστόσο, αν και το σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης θεωρείται πιο αποδοτικό υπό μικρές ταχύτητες, οδηγεί σε επιπλέον απώλειες μετατροπής, της τάξης του 3-15% επί της ισχύος πρόωσης του κινητήρα ή της γεννήτριας ή των μετατροπών ισχύος, γενικά των ηλεκτρικών συνιστωσών του συστήματος.

Αυτός ο συμβιβασμός που επιδιώκεται μεταξύ αποδοτικότητας και προσαρμογής στα διάφορα προφίλ λειτουργίας, έχει δώσει μια μεγάλη ποικιλία διατάξεων για την ισχύ και την πρόωση, η οποία κατηγοριοποιείται ως εξής:

- Μηχανική πρόωση, ηλεκτρική πρόωση ή υβριδικός σχεδιασμός.
- Παραγωγή ισχύος με μηχανές καύσης, κελιά καυσίμων, αποθήκευση ενέργειας ή υβριδικό συνδυασμό.
- Χρήση εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος.



Εικόνα 1: Το HNLMS Rotterdam με ηλεκτρική πρόωση (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

Καθώς αυξάνεται η πολυπλοκότητα της διάταξης του συστήματος, οι βαθμοί ελευθερίας στον έλεγχο αυξάνουν. Ωστόσο, ακόμα και τα πιο προηγμένα και σύνθετα συστήματα πρόωσης χρησιμοποιούν κλασικές τεχνικές ελέγχου, όπως οι σταθερές καμπύλες συχνότητων. Ως αντίλογο όμως, η σύγχρονη έρευνα, τόσο στη ναυσιπλοΐα όσο και στην αυτοκίνηση, έχει οδηγήσει στο συμπέρασμα πως τα προηγμένα συστήματα πρόωσης, σε συνδυασμό με παραδοσιακές στρατηγικές ελέγχου, δεν οδηγούν σε αξιοσημείωτη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και, κατά συνέπεια, μείωση των εκπομπών ρύπων. Το συνολικό κόστος όμως του συστήματος και η πολυπλοκότητα στη χρήση του αυξάνονται (Τ.) (Sciarretta A, Serrao L, et al, 2014).

Οι έρευνες που διεξάγονται γύρω από τη βελτιστοποίηση της χρήσης μπαταριών αλλά και στην έξυπνη χρήση των συστημάτων DC ρεύματος είναι περιορισμένες μέχρι στιγμής, με το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουν να είναι πως οι στρατηγικές έξυπνου ελέγχου μπορούν να πετύχουν μείωση στην κατανάλωση καυσίμου από 10 έως και 35%, άρα και σε αντίστοιχη μείωση ρύπων (Breijs A, Amam EE., 2016) (Rampen P, Breijs A., 2014) (Bosich D, Sulligoi G., 2013) (Butcher M, Maltby R, Parvin PS., 2009) (Zadeh MK, Zahedi B, Molinas M, Norum LE., 2013) (Zahedi B,

Norum LE, Ludwigsen KB, 2014) (Zahedi B, Norum LE., 2013). Η ανάλυση επιπτώσεων στα άλλα κριτήρια έχει καλυφθεί ελάχιστα ως ζήτημα.

Από τα προηγούμενα, μπορεί να γίνει αντιληπτή η ανάγκη για διενέργεια μιας ολοκληρωμένης έρευνας γύρω από τις στρατηγικές έξυπνου ελέγχου. Έτσι, η απόδοση που υπολογίζεται με βάση διαφορετικά κριτήρια να βελτιωθεί και να υλοποιηθεί η διάταξη του συστήματος που είναι επιθυμητός.

Αν και εκτενείς ανασκοπήσεις είναι διαθέσιμες πάνω στις υβριδικές ηλεκτρικές διατάξεις στην αυτοκίνηση και τις στρατηγικές ελέγχου τους, μια τέτοια ανασκόπηση εκλείπει για τις διατάξεις ισχύος και πρόωσης στα πλοία (Sciarretta A, Serrao L, et al, 2014) (Emadi A, Rajashekara K, Williamson SS, Lukic SM, 2005) (Wirasingha SG, Emadi A., 2011) (Koot M, Kessels J, de Jager B, Heemels W, van den Bosch W, Steinbuch M, 2005). Επιπλέον, η κατηγοριοποίηση σε παράλληλα (Emadi A, Rajashekara K, Williamson SS, Lukic SM, 2005) (Silvas E, Hofman T, Serebrenik A, Steinbuch M, 2015), σειριακά και σειριακά-παράλληλα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα δεν εφαρμόζεται στις διατάξεις των πλοίων, καθώς αυτά μπορούν να έχουν πολλαπλούς κινητήρες, ηλεκτρικούς κινητήρες για την πρόωση, γεννήτριες ντίζελ, κελιά καυσίμου και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Συνεπώς, μέσα από την παρούσα μελέτη, η έρευνα που γίνεται επικεντρώνεται όχι μόνο στην εξέλιξη και την εφαρμογή των υβριδικών διατάξεων στα συστήματα ισχύος και πρόωσης των πλοίων, αλλά και στην εξέλιξη στρατηγικών ελέγχου που θα εφαρμόζονται για καλύτερα αποτελέσματα γύρω από την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές.

Στην έρευνα αυτή, η μέθοδος πρόωσης κατηγοριοποιείται στη μηχανική πρόωση, ηλεκτρική πρόωση και υβριδική πρόωση, ενώ το σύστημα ισχύος διαχωρίζεται σε παροχή ισχύος μέσω καύσης, ηλεκτροχημική παροχή ισχύος, παροχή αποθηκευμένης ενέργειας και παροχή υβριδικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, μέσα από την έρευνα εξετάζεται το πεδίο των συνδυασμένων διατάξεων των συστημάτων, όπως είναι για παράδειγμα, η υβριδική παροχή ισχύος και η υβριδική πρόωση. Επίσης, εξετάζεται και η χρήση ρεύματος συνεχούς τάσης σε ένα υβριδικό σύστημα πρόωσης.

Επίσης, εξετάζονται και στρατηγικές ελέγχου, ενώ, τέλος, η έρευνα συνοψίζει τις εξελίξεις, τα οφέλη, τα μειονεκτήματα και τις τάσεις στις διατάξεις των συστημάτων

ισχύος και πρόωσης και εξετάζει τις διαθέσιμες στρατηγικές ελέγχου και τα οφέλη τους, καθώς παρατίθενται και τα συμπεράσματα των ανωτέρω .

2. Συστήματα μηχανικής πρόωσης

Τα πλοία, είτε ως μέσο μεταφοράς ανθρώπων και αγαθών είτε ως πολεμικά, λειτουργούσαν, εξ' αρχαιοτάτων χρόνων, με κουπιά και πανιά, αξιοποιώντας την αιολική ενέργεια και τον 3^ο Νόμο του Νεύτωνα για την κίνησή τους. Από τη Βιομηχανική Επανάσταση και μετά όμως, η είσοδος της μηχανής στην ανθρώπινη δραστηριότητα επηρέασε και τις μετακινήσεις. Έτσι, τη θέση των πανιών και των κουπιών πήρε η ατμομηχανή, εισάγοντας τη μηχανική πρόωση στην κίνηση των πλοίων. Η εξέλιξη όμως δεν σταμάτησε εκεί για τα πλοία. Η επαναστατική εφεύρεση των μηχανών εσωτερικής καύσης, έφερε και την ένταξη των κινητήρων ντίζελ στα πλοία, ήδη από τα πρώτα χρόνια του 20^{ου} αιώνα.

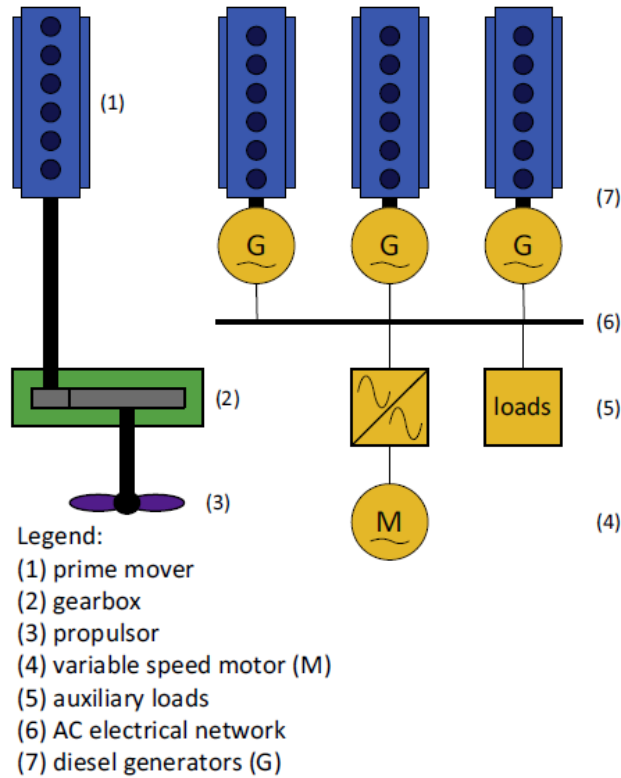
Η χρήση των μηχανών εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) για την κίνηση, παρά τις αναρίθμητες βελτιώσεις και εξελίξεις που έχει δεχτεί ανά τα χρόνια, παραμένει έκτοτε ουσιαστικά अपαράλαχτη ως φιλοσοφία, με ένα μεγάλο ποσοστό του παγκόσμιου στόλου να χρησιμοποιεί κινητήρες εσωτερικής καύσης για την κίνησή του. Βέβαια, από τον πρότυπο κινητήρα του Diesel μέχρι σήμερα, η ένταξη αεριοστροβίλων, πυρηνοκίνητων και ηλεκτροκίνητων πλοίων είναι μια πραγματικότητα. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα των κινητήρων ντίζελ, συνεχίζουν τα τους καθιστούν μια εύκολη, οικονομική και πρακτική επιλογή για τη ναυσιπλοΐα.

Στην Εικόνα 2 που παρατίθεται ευθύς αμέσως, μπορεί να φανεί και σχηματικά μια διάταξη μηχανικής πρόωσης σε ένα πλοίο. Ο κύριος κινητήρας του πλοίου (συνθά κινητήρας ντίζελ) δίνει κίνηση στην έλικα η οποία και κινεί το πλοίο. Ενδιάμεσά τους παρεμβάλλεται και ένας μειωτήρας στροφών. Η αρχή λειτουργίας είναι ίδια με αυτά που βρίσκονται στην αυτοκίνηση, ελέγχει δηλαδή τη διανομή ισχύος από τον στροφαλοφόρο άξονα ενός κινητήρα ντίζελ στην έλικα, ενώ μετατρέπει την περιστροφική κίνηση από έναν άξονα σε έναν άλλο άξονα.

Σε τέτοιες διατάξεις, αναγκαία είναι και η χρήση ενός δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) για την παροχή ηλεκτρικής ισχύος στο πλοίο για τις ανάγκες του. Αυτό γίνεται με τη χρήση γεννητριών ντίζελ, με την περιστροφική κίνηση στον άξονά τους να μετατρέπεται μέσω μετασχηματιστών σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Για μεγάλα εμπορικά πλοία, δεν απαιτείται μειωτήρας στροφών και η ανάποδη κίνηση του πλοίου μπορεί να επιτευχθεί με την αναστροφή της περιστροφής του κινητήρα.

Από την άλλη, τα μικρότερα πλοία απαιτούν μειωτήρα στροφών , για τη μείωση της περιστροφικής ταχύτητας του κινητήρα και την αύξηση της ροπής, καθώς αυτά (μικρότερα πλοία) κινούνται με μεσόστροφες ή ταχύστροφες μηχανές ντίζελ. Το κιβώτιο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αντιστροφή της περιστροφικής ταχύτητας των μηχανών και την κίνηση του πλοίου ανάποδα (προς τα πίσω).



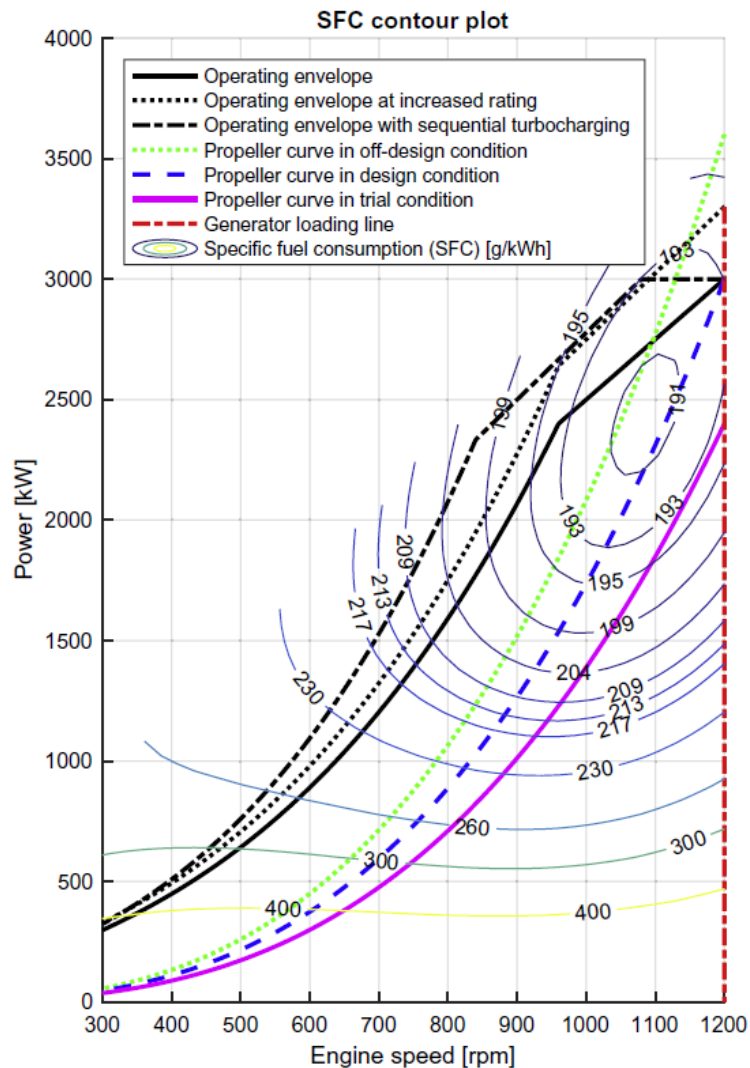
Εικόνα 2: Τυπικό μηχανικό σύστημα πρόωσης (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

Το πιο συχνό μέσο μηχανικής πρόωσης είναι η έλικα σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propeller - FPP) (JS, 2012). Όπως αναφέρθηκε, μεταξύ έλικας και κινητήρα, απαιτείται η ύπαρξη μειωτήρα στροφών . Αυτό, πέραν της μεταφοράς ισχύος από άξονα σε άξονα ανάλογα τις απαιτήσεις, μπορεί να επιβραδύνει και να ακινητοποιήσει ένα πλοίο ή να αναγκάσει την έλικα να κινηθεί αντίρροπα, άρα πραγματοποιώντας κίνηση ανάποδα (προς τα πίσω).

2.1 Έλικα σταθερού βήματος (FPP)

Όταν η έλικα σε μια μονάδα μηχανικής πρόωσης είναι σταθερού βήματος, η αντίσταση του πλοίου, η έλικα και ο μειωτήρας στροφών καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του φορτίου του κινητήρα ντίζελ. Αυτό το χαρακτηριστικό του φορτίου αναφέρεται και ως η *καμπύλη έλικας* (Klein Woud H, Stapersma D., 2012). Στην Εικ. 3, τρεις καμπύλες έλικας έχουν αποτυπωθεί, αναπαριστώντας το φορτίο που λαμβάνουν από τον κινητήρα ντίζελ σε συνθήκες δοκιμής, σχεδιασμού και εκτός σχεδιασμού (D., 2005).

Οι καμπύλες έλικας έχουν αποτυπωθεί εντός του φακέλου λειτουργίας του κινητήρα. Ο φάκελος αυτός δείχνει τη μέγιστη ισχύ που ένας κινητήρας μπορεί να δώσει συναρτήσει της ταχύτητάς του. Επιπροσθέτως, η εικόνα που ακολουθεί απεικονίζει και την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFC) του κινητήρα του πλοίου, συναρτήσει της αποδιδόμενης ισχύος και της ταχύτητας του. Το διάγραμμα αυτό, προκύπτει από ένα μοντέλο τετραγωνικής προσαρμογής που αφορά στην λειτουργία ενός τυπικού κινητήρα ντίζελ, μέσης ταχύτητας.



Εικόνα 3: Τρεις καμπύλες έλικας και η γραμμή φόρτισης γεννήτριας για τρεις φακέλους λειτουργίας κινητήρων ντίζελ με τυπικό διάγραμμα SFC (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

Οι καμπύλες έλικας, ο φάκελος λειτουργίας και η περιοχή των καμπυλών ειδικής κατανάλωσης καυσίμου SFC αναπαριστούν στατικές συνθήκες, χωρίς επιτάχυνση ή επιβράδυνση. Σε περίπτωση, που οι κινητήρες ντίζελ λειτουργούν σε στατικές συνθήκες, τότε διαπιστώνεται ότι αποδίδουν μια σταθερή έξοδο ισχύος, έχοντας μία σταθερή ταχύτητα. Παραδείγματος χάριν, στο λειτουργικό σημείο των 1125 rpm και 2500 kW, θα μπορούσε να επιτευχθεί η ταχύτητα σχεδιασμού. Υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες σχεδιασμού, η συνολική κατανάλωση του καυσίμου, φτάνει τα 191 g/kWh. Από την άλλη πλευρά, λόγω του κακού καιρού σε κατάσταση εκτός σχεδίασης, η ταχύτητα επιτυγχάνεται στο σημείο της λειτουργίας των 1125 rpm και 3000 kW

οδηγώντας με αυτό τον τρόπο σε μια ειδική κατανάλωση καυσίμου της τάξεως των 193 g/kWh.

Ωστόσο, σε δυναμικές συνθήκες, όπως η ναυσιπλοΐα σε κακό καιρό το πραγματικά φορτίο κυμαίνεται γύρω από ένα μέσο σημείο λειτουργίας της καμπύλης έλικας. Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται μια συγκεκριμένη κατάσταση σχεδιασμού, μέσω της οποίας αναπαρίσταται η μέση αύξηση στο φορτίο. Για την αποφυγή της υπερφόρτισης, από την διακύμανση γύρω από το μέσο φορτίο κρίνεται ως αναγκαίο αρκετό περιθώριο ανάμεσα στην καμπύλη έλικας αλλά και το φάκελο λειτουργίας του κινητήρα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της επιλογής ενός κινητήρα, ο οποίος έχει αυξημένη αξιοπιστία.

Ωστόσο, ένας υπερδιαστασιολογημένος κινητήρας αυξάνει το κόστος της μονάδας πρόωσης και την κατανάλωση καυσίμου, μιας και το μέσο σημείο λειτουργίας πλέον μπορεί να απέχει περισσότερο από τη βέλτιστη κατανάλωση καυσίμου, η οποία είναι κοντά στη γραμμή μέγιστης φόρτισης (Van Spronsen P, Toussain R, 2001). Εναλλακτικά, η επιλογή ενός κινητήρα οποίος έχει μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας ιδίως στο μερικό φορτίο, κατά τα τελευταία έτη έχει χαρακτηριστεί ως μία εφικτή λύση. Ένας μεγαλύτερος φάκελος λειτουργίας μπορεί να επιτευχθεί με την σειριακή υπερπλήρωση ή τουρμπίνα μεταβλητής γεωμετρίας (Klein Woud H, Stapersma D., 2012). Για παράδειγμα, η σειριακή υπερπλήρωση (STC) διευρύνει τον φάκελο λειτουργίας απενεργοποιώντας το σύστημα υπερπλήρωσης (turbo) όταν η ροή καυσαερίων είναι υπερβολικά χαμηλή για αποτελεσματική επίδοση.

Εν κατακλείδι, οι δυσκολίες με μια έλικα σταθερού βήματος είναι το να ταιριάζει ο κινητήρας ντίζελ, το κιβώτιο, η έλικα και η αντίσταση του πλοίου ώστε ο κινητήρας να λειτουργεί με ασφάλεια εντός του φακέλου λειτουργίας και στο εύρος ταχυτήτων του κινητήρα. Ο περιορισμός της ελάχιστης ταχύτητας του εκάστοτε πλοίου, γίνεται μέσω του ελάχιστου ορίου ταχύτητας κινητήρα. Για να μπορέσει να αξιοποιήσει την κίνηση του πλοίου ανάποδα (προς τα πίσω), είτε το κιβώτιο είτε ο κινητήρας, απαραίτητως θα πρέπει να είναι αναστρέψιμοι.

2.2 Έλικα μεταβλητού βήματος (CPP)

Για να ξεπεραστούν οι προαναφερόμενες προκλήσεις, είναι εφικτή η χρήση μιας έλικας μεταβλητού βήματος (CPP) (Klein Woud H, Stapersma D., 2012), καθώς προσθέτουν έναν επιπλέον βαθμό ελέγχου. Με τη μείωση του βήματος της έλικας, μειώνεται η ώση της έλικας και η ισχύς που απορροφάται από τον κινητήρα για συγκεκριμένη ταχύτητα άξονα. Η διαδικασία αυτή, δίνει τη δυνατότητα στην ώση να μειώνεται κάτω από την τιμή της ελάχιστης ταχύτητας κινητήρα και πλήρους βήματος.

Επιπλέον, η αναστροφή του βήματος επιτρέπει στην ώση να αναστραφεί χωρίς να πρέπει να αναστραφεί ο κινητήρας ή ο μειωτήρας στροφών. Η έλικα μεταβλητού βήματος βελτιώνει επομένως, αμέσως τη δυνατότητα για ελιγμούς και κατάλληλη στρατηγική ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της επίδοσης.

2.3 Οφέλη και προκλήσεις της μηχανικής πρόωσης

Η μηχανική πρόωση είναι ιδιαίτερα αποδοτική σε ταχύτητες σχεδιασμού, μεταξύ του 80 και 100 % της μέγιστης ταχύτητας. Στο εύρος αυτό ο κινητήρας ντίζελ λειτουργεί στο πιο αποδοτικό σημείο λειτουργίας. Επιπλέον, η μηχανική πρόωση αποτελείται μόνο από τρία στάδια για την μετατροπής ισχύος: τον κύριο κινητήρα, τον μειωτήρα και την έλικα.

Εάν υπάρχουν περιορισμοί σε ένα πλοίο αναφορικά με τους ρύπους που επιτρέπεται να εκπέμπει (και κυρίως σχετικά με τις εκπομπές NOx που είναι το μεγαλύτερο πρόβλημα με τους κινητήρες ντίζελ), οι οποίοι μετρούνται σε g/kWh, τότε θα πρέπει να λειτουργήσει το πλοίο υπό τη βέλτιστη, από πλευράς εκπομπών ρύπων, ταχύτητα και φορτίο. Αυτό αφενός οδηγεί σε μικρότερη απόδοση ισχύος, αφετέρου όμως σε λιγότερες εκπομπές NOx στην ατμόσφαιρα. Η μηχανική πρόωση μπορεί να προσφέρει τη δυνατότητα αυτή.

Ακόμα, η μηχανική πρόωση χαρακτηρίζεται από το μικρό κόστος αγοράς, λειτουργίας και συντήρησης, κυρίως λόγω του ότι έχει αρκετά απλή διάταξη . Αυτό δικαιολογεί και την εφαρμογή της μηχανικής πρόωσης στα πλοία, όπως αποτυπώνεται και από την ενεργειακή ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε πλοίο το οποίο μετατρέπει το 88% της ενέργειας της κύριας μηχανής του πλοίου σε πρόωση. Η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές ρύπων μπορούν να μειωθούν εάν υπάρξει ανάκτηση ενέργειας από τη θερμότητα των απορριπτόμενων καυσαερίων και του ψυκτικού ρευστού. Με την ενέργεια αυτή μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς αλλά και θέρμανση εντός του πλοίου (Francesco Baldi, Hannes Johnson, Cecilia Gabrielli, Karin Andersson, 2014).

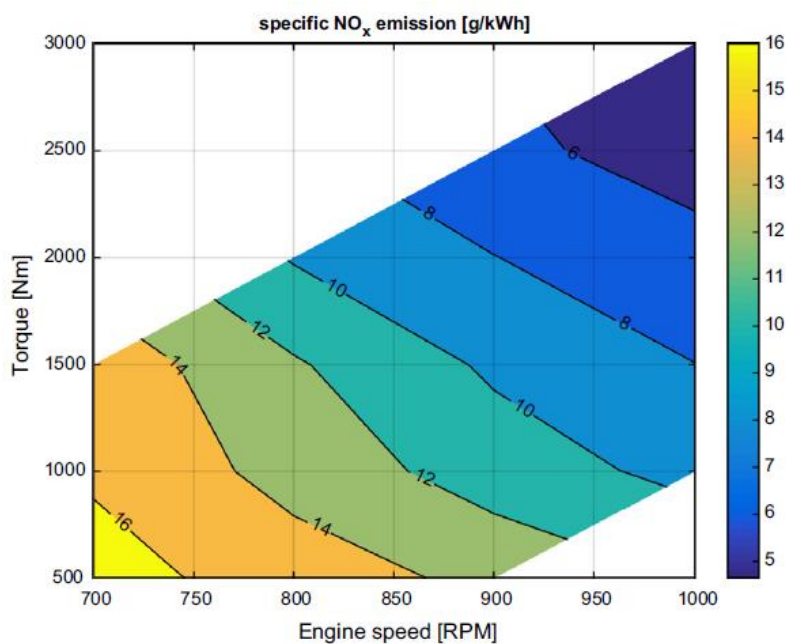
Ωστόσο, το να ταιριάζει ο κινητήρας για την ταχύτητα σχεδιασμού επίσης βελτιώνει τη συμπεριφορά της μονάδας και για τον υπόλοιπο φάκελο λειτουργίας.

Με την εφαρμογή ενός συστήματος με έλικα μεταβλητού βήματος , προστίθεται μεγαλύτερη ελευθερία στον έλεγχο της πρόωσης, με το μειονέκτημα όμως πως αυξάνεται η πολυπλοκότητα του συστήματος. Με την κατάλληλη στρατηγική ελέγχου στο σύστημα πρόωσης, μπορούν να μειωθούν οι στατικές και δυναμικές φορτίσεις που επενεργούν στο σύστημα, εάν αξιοποιηθεί μια έλικα μεταβλητού βήματος.

Και πάλι όμως, η μηχανική πρόωση αντιμετωπίζει τις παρακάτω δυσκολίες:

- Για πλοία που κινούνται με ταχύτητες κάτω του 70% της μέγιστης ταχύτητας τους, η μηχανική πρόωση οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση καυσίμου, άρα και ρύπους.
- Εάν ένα από τα εξαρτήματα του συστήματος μηχανικής πρόωσης αστοχήσει, τότε όλο το σύστημα πρέπει να παύσει τη λειτουργία του, άρα το πλοίο δεν έχει πρόωση (D., 2005) (Van Spronsen P, Toussain R, 2001).
- Κατά την επιτάχυνση, η μηχανική πρόωση σε έναν κινητήρα ντίζελ ενδέχεται να οδηγήσει σε υψηλές εκπομπές NOx. Αυτό συμβαίνει λόγω των υψηλών θερμοκρασιών εντός των κυλίνδρων, για τις οποίες ευθύνεται η υστέρηση του συστήματος υπερπλήρωσης (turbo).
- Η μηχανική πρόωση, δεδομένου ότι έχει πολλά μηχανικά, κινητά μέρη, έχει υψηλά επίπεδα εκπεμπόμενου θορύβου, ο οποίος αυξάνεται σημαντικά από φαινόμενα όπως η σπηλαιώση.

Για να αντιμετωπιστούν σωστά τα ανωτέρω ζητήματα, θα πρέπει να υπάρχει μια επαρκής και αποτελεσματική στρατηγική ελέγχου.



Εικόνα 4: Αποτελέσματα μετρήσεων NO_x στον ερευνητικό κινητήρα MAN4L20/27 στην Ακαδημία Άμυνας της Ολλανδίας (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

2.4 Εφαρμογή της μηχανικής πρόωσης

Η μηχανική πρόωση εμφανίστηκε για πρώτη φορά στα ατμόπλοια. Σήμερα, μεγάλο μέρος της μηχανικής πρόωσης, είτε έχει αντικατασταθεί είτε υποβοηθείται από ηλεκτρικά συστήματα, τα οποία δίνουν απαντήσεις σε ορισμένα, σημαντικά, προβλήματα της μηχανικής πρόωσης. Και πάλι όμως, στην πλειοψηφία, τα συστήματα μηχανικής πρόωσης διατηρούνται ως η βασική και προτιμώμενη πρόωση για πλοία που συνήθως πλέουν υπό σταθερή ταχύτητα στο μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής τους. Η απόδοση της κατανάλωσης καυσίμου, ιδίως σε υψηλό φορτίο λειτουργίας κινητήρα είναι μεγάλη. Για παράδειγμα, τα εμπορικά πλοία, που κάνουν πολυήμερα ταξίδια σε

ανοιχτές θάλασσες, διατηρώντας για πολλές συνεχόμενες ώρες σταθερή ταχύτητα, χρησιμοποιούν μηχανική πρόωση για τους προαναφερθέντες λόγους (van Loon PT, van Zon P, 2016).

Υπάρχουν και άλλοι τύποι πλοίων που χρησιμοποιούν τη μηχανική πρόωση, σε μικρά όμως φορτία κινητήρα. Για παράδειγμα, τα ρυμουλκά θέλουν μόνο το 20% της μέγιστης ισχύος που έχουν διαθέσιμη για ρυμούλκηση, κατά τη φάση της μετακίνησής τους. Σε τέτοια πλοία, η μηχανική πρόωση αυξάνει σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου αλλά και τις εκπομπές ρύπων.

Άρα, στις περιπτώσεις αυτές, προτιμώμενη είναι η υβριδική ή/και ηλεκτρική πρόωση, καθώς αυξάνει τη συνολική αποδοτικότητα καυσίμου υπό μερικό φορτίο. Και πάλι όμως, παρά το μειονέκτημά της εδώ, η μηχανική πρόωση εξακολουθεί να προτιμάται από το 50% πλοίων όπως τα ρυμουλκά.

Εναλλακτικά, τα πλοία με περιορισμένο αριθμό σαφών συνθηκών λειτουργίας μπορούν να επωφεληθούν από τη μηχανική πρόωση με πολλαπλούς άξονες και/ή πολλαπλούς κινητήρες στον ένα άξονα, μέσω μειωτήρα. Οι πολλαπλοί κινητήρες μπορεί να είναι ακριβώς ίδιοι ή ακόμα και διαφορετικοί. Τέτοιες διατάξεις με πολλαπλούς κινητήρες και άξονες μπορεί να βελτιώσουν και τη διαθεσιμότητα πρόωσης. Για παράδειγμα, πολλές φρεγάτες χρησιμοποιούν συνδυασμό κινητήρων ντίζελ ή αεριοστροβίλων (CODOG) και συνδυασμό ντίζελ και αεριοστροβίλων (CODAG) για την πρόωσή τους. Αν και πολλές ευρωπαϊκές χώρες και το Ναυτικό των ΗΠΑ προτιμούν υβριδικά ή ηλεκτρικά συστήματα στα νέα τους σχέδια, πολλά ναυτικά σώματα μικρότερων χωρών χρησιμοποιούν μηχανική πρόωση, ακόμα και σε σχετικά νέα πλοία.

Τα πλοία βυθοκόρησης χρησιμοποιούν ακόμα μηχανική πρόωση, μαζί με μηχανική κίνηση των αντλιών βυθοκόρησης. Τα πλοία αυτά χρησιμοποιούνται για εκβαθύνσεις, διανοίξεις, διαπλατύνσεις και γενικά τον καθαρισμό των βυθών, την αξιοποίηση και διαμόρφωση ακτών για κατασκευή λιμενικών, τουριστικών κλπ. έργων. Αυτό γίνεται γιατί το προφίλ λειτουργίας των αντλιών αυτών παρουσιάζει αρκετές εναλλαγές (δυναμικό προφίλ), ενώ και το μίγμα από τη βυθοκόρηση είναι αρκετά ανομοιογενές. Έτσι, η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να δώσει λύσεις στις προκλήσεις αυτές.

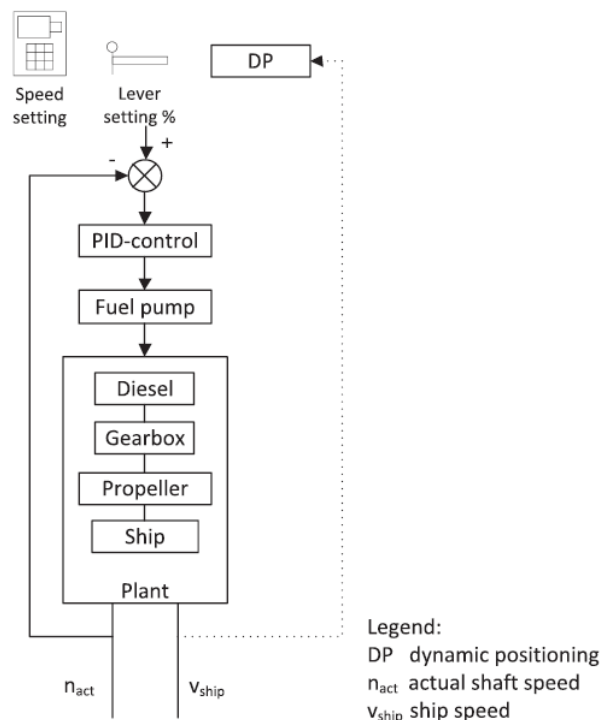
Εν τέλει, πολλά σκάφη αναψυχής (yacht) χρησιμοποιούν μηχανική πρόωση. Κατά τη φάση σχεδιασμού ενός σκάφους αναψυχής, δίνεται μεγάλη έμφαση στο πώς θα μπορέσει να επιτευχθεί η επιθυμητή τελική ταχύτητα κίνησης, με τη μικρότερη δυνατή υποδύναμη στους κινητήρες. Με τη μηχανική πρόωση, η οποία μπορεί να δώσει υψηλές αποδόσεις για το σημείο σχεδιασμού ενός πλοίου, μπορούν οι ταχύτητες που επιδιώκονται να επιτευχθούν, ελαχιστοποιώντας την ισχύ των μηχανών που πρέπει να εγκατασταθούν. Ωστόσο, οι απαιτήσεις για τη βελτίωση της άνεσης κατά την πλεύση με χαμηλές ταχύτητες και τη βελτίωση της ευελιξίας στη λειτουργία, έχουν οδηγήσει στην εξέλιξη υβριδικών συστημάτων για τα yacht.

2.5. Στρατηγικές ελέγχου για τη μηχανική πρόωση

Στην παράγραφο που ακολουθεί, καλύπτονται οι στρατηγικές ελέγχου που αφορούν την μηχανική πρόωση η οποία εφαρμόζεται σε πλοία.

2.5.1 Έλεγχος ταχύτητας

Η τυπική στρατηγική ελέγχου για τη μηχανική πρόωση με μια έλικα σταθερού βήματος, είναι το να ελεγχθεί η ταχύτητα του κινητήρα ως συνάρτηση της ρύθμισης του επιλογέα ταχύτητας του πλοίου στη γέφυρα. Ο ελεγκτής ταχύτητας του κινητήρα ντίτζελ, τυπικά εκπληρώνει αυτή την εργασία με έναν ελεγκτή PID. Τα περισσότερα πλοία είναι εξοπλισμένα με έναν επιλογέα που θέτει την ταχύτητα αναφοράς ως ποσοστό της πλήρους ταχύτητας. Εναλλακτικά, η πραγματική ταχύτητα αναφοράς μπορεί να εισαχθεί. Τα πλοία μπορούν επίσης να ελεγχθούν και με ένα σύστημα δυναμικής ναυσιπλοΐας (DP). Στη συνέχεια, το σύστημα δυναμικής ναυσιπλοΐας, παράγει τη σωστή ρύθμιση για την περιστροφή του άξονα ή την ταχύτητα του κινητήρα. Ο τυπικός βρόγχος ελέγχου φαίνεται και στην Εικ. 5.



Εικόνα 5: Βρόχος ελέγχου για τη μηχανική πρόωση με έλικα σταθερού βήματος (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

Πολλές δημοσιεύσεις έχουν καταλήξει στο ότι ο έλεγχος ταχύτητας οδηγεί σε μη επιθυμητές διαταραχές στο φορτίο του κινητήρα (Van Spronsen P, Toussain R, 2001) (Guillemette JR, Bussi eres P, 1997) (Stapersma D, Schulten PJM, Grimmelius HT, 2004) (Stapersma D, Grimmelius HT., 2009). Ένας κινητήρας που λειτουργεί υπό σταθερό ψεκασμό καυσίμου, μπορεί να διατηρεί σταθερό θερμικό φορτίο, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη αποδοτικότητα καυσίμου. Δηλαδή, για το ίδιο θερμικό φορτίο, αυξάνεται το πόσο αποδοτικά καταναλώνει το καύσιμο ο κινητήρας.

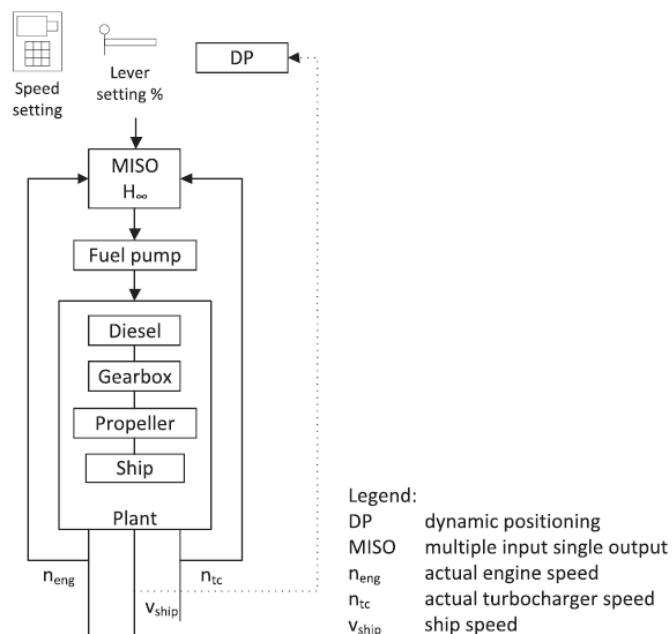
Ωστόσο, χρησιμοποιείται κυρίως ο έλεγχος ταχύτητας, μιας και δίνει προστασία έναντι στις πολύ υψηλές ταχύτητες και σχεδόν γραμμική σχέση στη ρύθμιση της επιθυμητής ταχύτητας και την ταχύτητα που εν τέλει έχει το πλοίο.

2.5.2 Έλεγχος ανατροφοδότησης κατάστασης με μέτρηση της ταχύτητας στον κινητήρα και το σύστημα υπερπλήρωσης (turbo)

Μια άλλη προτεινομένη μέθοδος είναι η σύνθεση ενός ελεγκτή ανατροφοδότησης κατάστασης, με τη χρήση της ταχύτητας του κινητήρα και του συστήματος πλήρωσης, ως μεταβλητές (N., 2002). Η μέθοδος αυτή μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση μιας πηγής διαταραχών, όπως είναι το φορτίο της έλικας. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή επιτρέπει ξεχωριστές κλιμακωτές απαιτήσεις της νόρμας για τις μεταβλητές κατάστασης. Στην Εικόνα 6 που ακολουθεί, φαίνεται και μια σχηματική αναπαράσταση του πώς λειτουργεί ένας ελεγκτής ανατροφοδότησης κατάστασης. Με τη μέθοδο αυτή, αν και είναι σαφές πως υπάρχουν πλεονεκτήματα, δεν έχουν ακόμα καταγραφεί με ποσοτικά δεδομένα τα οφέλη αυτά, με την έρευνα ακόμα να είναι σε πρώιμο στάδιο στον τομέα αυτό.

2.5.3 Προσαρμοστικός έλεγχος ταχύτητας

Εάν ένα σύστημα μηχανικής πρόωσης αποτελείται μόνο από μια έλικα σταθερού βήματος, τότε υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στο κατά πόσο μπορεί αυτό το σύστημα να ελεγχθεί. Επιπλέον, ο βρόχος ελέγχου ταχύτητας στοχεύει να διατηρήσει την ταχύτητα του κινητήρα ίδια, προκαλώντας σημαντική διακύμανση στη φόρτιση του κινητήρα κατά τη διάρκεια διαταραχών από κύματα και ελιγμούς (Van Spronsen P, Toussain R, 2001). Τόσο το Βασιλικό Ναυτικό της Ολλανδίας (RNLN) και οι Καναδικές φρεγάτες με μηχανική πρόωση έχουν αντιμετωπίσει προβλήματα από τα σημαντικά αυξημένα κόστη λόγω της δυναμικής υπερφόρτισης του κινητήρα (Van Spronsen P, Toussain R, 2001) (Guillemette JR, Bussièeres P, 1997) (A, 2009).



Εικόνα 6: Βρόχος ελέγχου για έλεγχο ανατροφοδότησης κατάστασης (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

Προτείνεται έτσι (Guillemette JR, Bussi eres P, 1997),  νας «βέλτιστος» ελεγκτής ταχύτητας που προσαρμόζει το σήμα επιστροφής για την ταχύτητα ενός κινητήρα ντίζελ στον ελεγκτή μέσω ενός ενισχυτή. Με τον τρόπο αυτό, δίνεται, σε συνθήκες πραγματικού χρόνου, η βέλτιστη τιμή του ενισχυτή. Αυτό γίνεται μέσω συνάρτησης η οποία εξισορροπεί τις διακυμάνσεις στην ταχύτητα σε μελλοντικό χρόνο, για τις οποίες γίνεται πρόβλεψη με στατιστικά μοντέλα και παλαιότερα δεδομένα. Με τη χρήση ενός φίλτρου Kalman, εκτιμώνται οι διαταραχές στο φορτίο του κινητήρα υπό συνθήκες πραγματικού χρόνου (Guillemette JR, Bussi eres P, 1997) (A, 2009). Οι μελλοντικές διαταραχές στο φορτίο προβλέπονται με αυτοσυσχέτιση των στατιστικών δεδομένων, με το σημείο αναφοράς να είναι οι διακυμάνσεις που έχουν ήδη εκτιμηθεί.

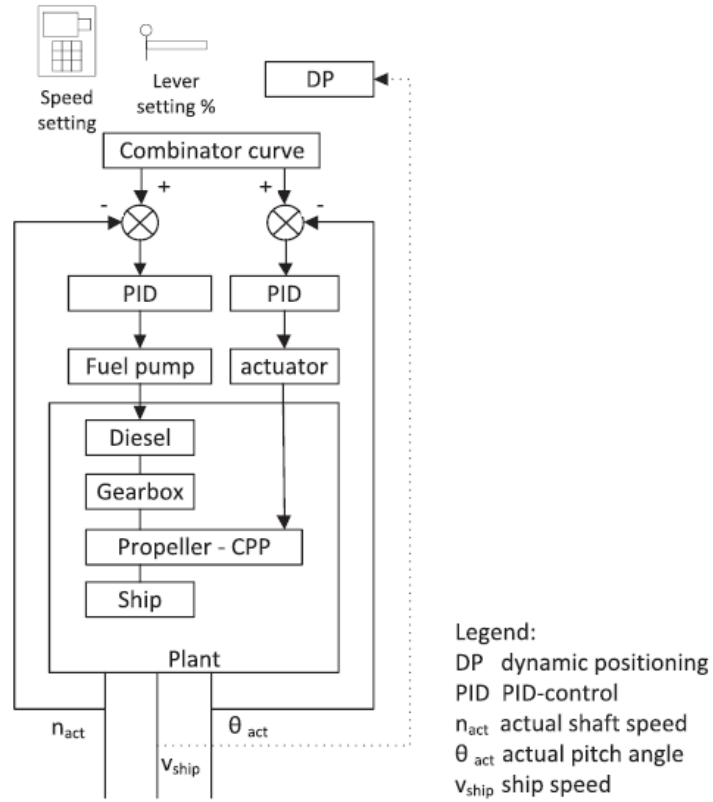
2.5.4 Έλεγχος συνδυαστή καμπύλης

Η στρατηγική ελέγχου  λικας μεταβλητού βήματος,  χει να κάνει με τον προσδιορισμό μιας σταθερής καμπύλης συνδυαστή. Η διαδικασία αυτή συσχετίζει την ταχύτητα, το βήμα της  λικας αλλά και την ταχύτητα αναφοράς του κινητήρα (A, 2009).

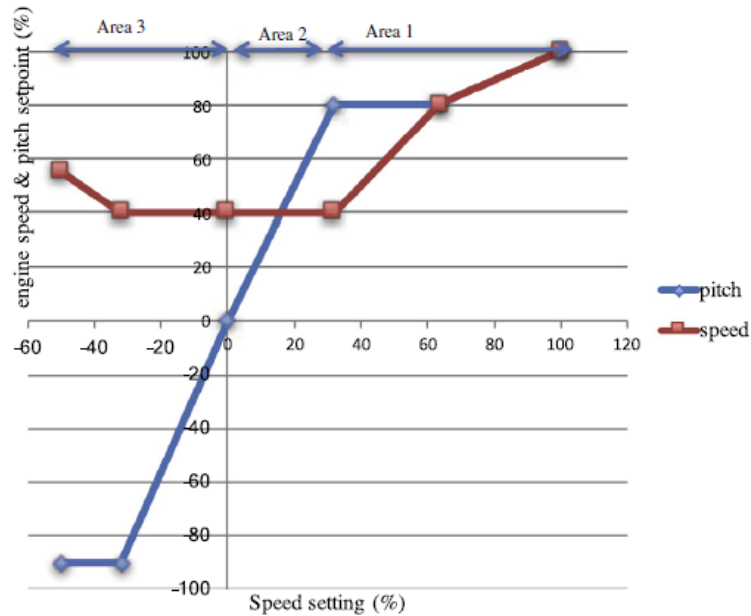
Το βήμα της έλικας και η ταχύτητα του κινητήρα ελέγχονται από ξεχωριστούς βρόχους ελέγχου, όπως φαίνεται και στην Εικ. 7. Η καμπύλη του συνδυαστή, που φαίνεται στην Εικ. 8 επιτρέπει: το φορτίο του κινητήρα να μειωθεί, μειώνοντας το βήμα της έλικας (περιοχή 1), την ώση της έλικας να ελεγχθεί κάτω από την ελάχιστη ταχύτητα κινητήρα μειώνοντας το βήμα της έλικας στην ελάχιστη ταχύτητα κινητήρα (περιοχή 2), και την ώση να αναστραφεί χωρίς την αναστροφή του κινητήρα ή του μειωτήρα στροφών (περιοχή 3). Ακολούθως, στην Εικόνα 9, απεικονίζεται η γραμμή στατικής φόρτισης του κινητήρα

Στην εικόνα 9 στη συνέχεια, απεικονίζεται η καμπύλη του συνδυαστή, η οποία συσχετίζεται με τη φόρτιση του κινητήρα (ισχύ και $irms$). Η καμπύλη αυτή μπορεί να βελτιστοποιηθεί ως προς παράγοντες όπως η αποδοτικότητα κατανάλωσης καυσίμου, η φόρτιση του κινητήρα και η αποφυγή του φαινομένου της σπηλαιώσης. Ωστόσο, η κατάσταση του πλοίου και οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά το σημείο λειτουργίας του.

Αντίστοιχα, επιχειρηματολογείται πως μια μονή σταθερή καμπύλη συνδυαστή δεν μπορεί να διασφαλίσει πως η λειτουργία του κινητήρα θα ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του φορτίου και της σπηλαιώσης υπό κάθε περίπτωση: το δείχνουν αυτό με το πρακτικό παράδειγμα μιας φρεγάτας (Vrijdag A, Stapersma D, van Terwisga T, 2008).



Εικόνα 7: Βρόχος ελέγχου για τη μηχανική πρόωση με ελεγχόμενο βήμα (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

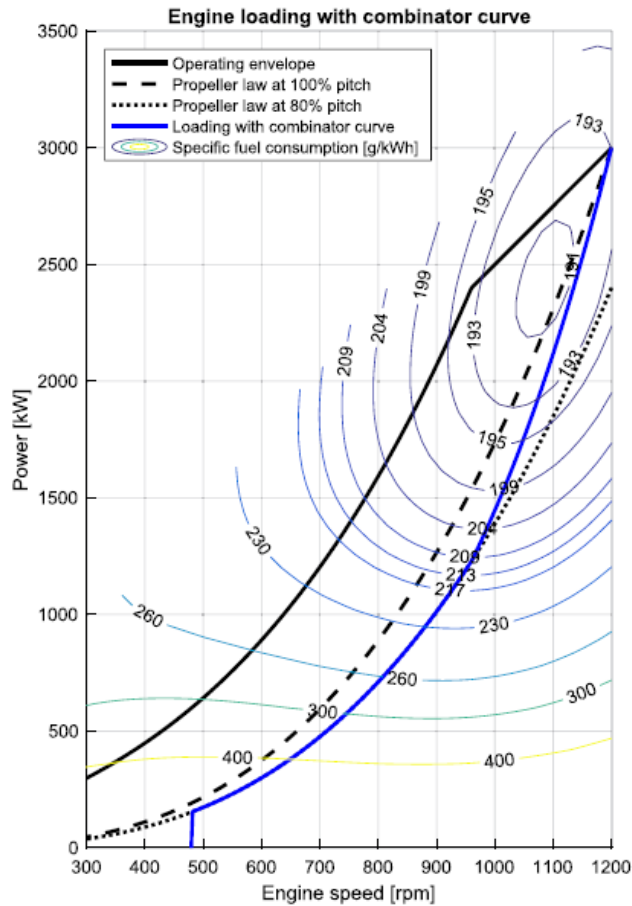


Area 1: reduce pitch to reduce engine load
 Area 2: control propeller thrust below minimum engine speed by reducing pitch
 Area 3: reverse thrust without reversing engine speed

Εικόνα 8: Τυπική καμπύλη συνδυαστή (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

Ο περιορισμός της μονής καμπύλης συνδυαστή έχει εν μέρει ξεπεραστεί έχοντας έναν αριθμό στατικών καμπυλών συνδυαστή για διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας ενός πλοίου.

Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις που πρέπει το πλοίο να κάνει ελιγμούς, ο κινητήρας πρέπει να λειτουργεί υπό μεγάλες ταχύτητες, ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη επιτάχυνση. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή οδηγεί σε μεγάλη κατανάλωση και δεν λαμβάνονται υπόψη οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επηρεάζουν την καμπύλη λειτουργίας της έλικας. Έτσι, υπό συνθήκες, ενδέχεται η συνολική απόδοση να είναι χαμηλή.



Εικόνα 9: Φόρτιση κινητήρα με την καμπύλη συνδυαστή της Εικ. 8 (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

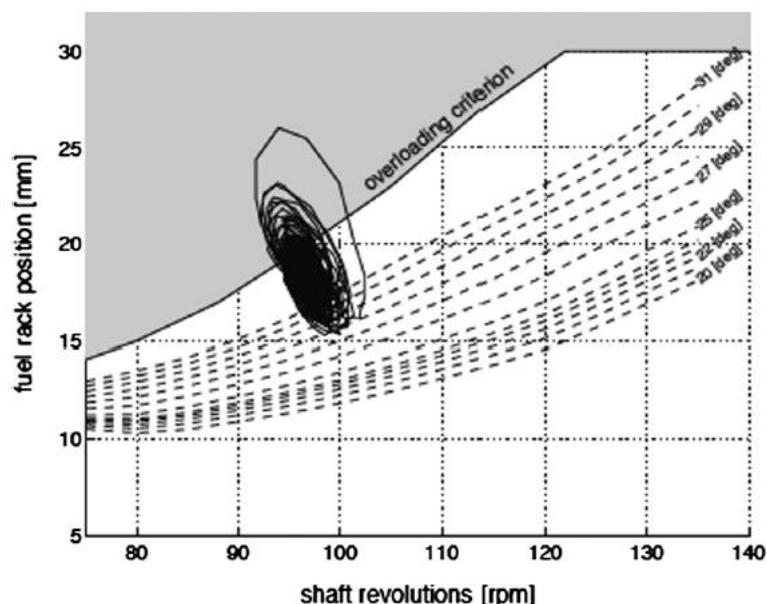
2.5.5 Έλεγχος καμπύλης συνδυαστή με μείωση του βήματος της έλικας

Ακόμα μια στρατηγική για την αποφυγή της υπερφόρτισης είναι το να εφαρμοστεί μείωση του βήματος της έλικας όταν ο κινητήρας υπεισέρχεται στο κριτήριο υπερφόρτισης, ένα εναλλακτικό όριο φόρτισης του κινητήρα, συγκρίσιμο με τον φάκελο λειτουργίας που εισήχθη νωρίτερα. Η προσέγγιση αυτή εφαρμόζεται στις φρεγάτες M κλάσης του Βασιλικού Πολεμικού Ναυτικού της Ολλανδίας και τις φρεγάτες του Καναδικού Λιμενικού (Vrijdag A, Stapersma D, van Terwisga T, 2008) (Guillemette JR, Bussi eres P, 1997). Αν και η συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου

γίνεται για να προληφθεί η υπερφόρτιση του κινητήρα, επιδρά αρνητικά στη μηχανική πρόωση, οδηγώντας σε εμφάνιση σπηλαιώσης αλλά και περιορίζοντας την επιτάχυνση του πλοίου (A, 2009) (Van Spronsen P, Toussain R, 2001).

2.5.6 Βέλτιστη ταχύτητα και έλεγχος H_{00} βήματος

Η στρατηγική ελέγχου που εστιάζει στη ρύθμιση της ταχύτητας είναι αναγκαία για την επίτευξη της επιθυμητής συμπεριφοράς του κινητήρα υπό δυναμικές συνθήκες. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα, όπου απεικονίζονται οι διακυμάνσεις της θέσης του καυσίμου αλλά και των περιστροφών του άξονα για μια φρεγάτα Μ κλάσης του Πολεμικού Ναυτικού της Ολλανδίας (Van Spronsen P, Toussain R, 2001). Παρατηρείται πως υπάρχει συχνή παραμονή σε συνθήκες υπερφόρτισης, κάτι που οδηγεί σε αυξημένα κόστη συντήρησης (Van Spronsen P, Toussain R, 2001).

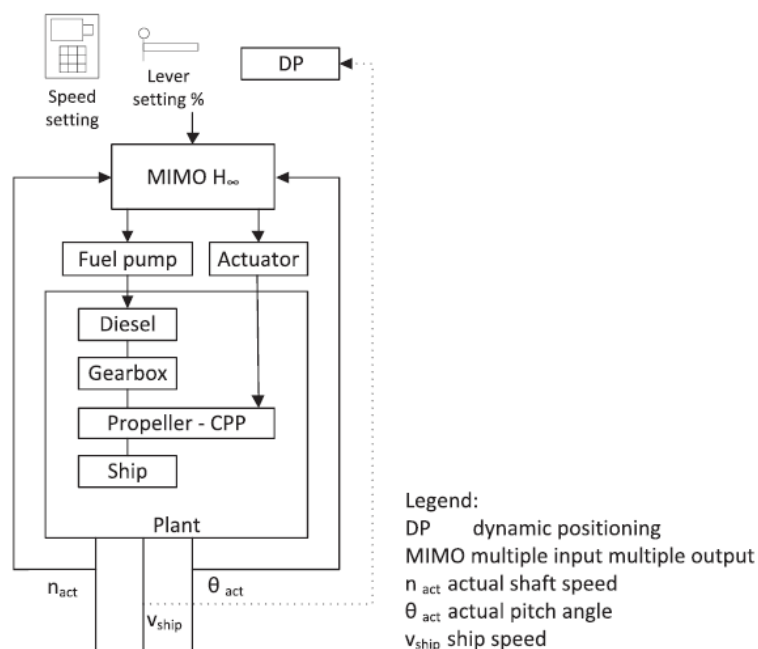


Εικόνα 10: Δυναμική υπερφόρτιση λόγω της κατάστασης της θάλασσας όπως σκιαγραφείται στο επίπεδο διάγραμμα φάσης (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

Η προτεινομένη στρατηγική ελέγχου είναι χρησιμοποιεί τις εισόδους ελέγχου στον διανεμητή καυσίμου και στο βήμα της έλικας.

Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκε πως στόχος του ελέγχου είναι η ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιδράσεων των περιβαλλοντικών συνθηκών στην ταχύτητα υπό την οποία λειτουργούν οι κινητήρες, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της επιτάχυνσης και επιβράδυνσης. Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται μια απεικόνιση του βρόγχου του

συγκεκριμένου ελέγχου, ο οποίος έχει περιορισμούς για την αποφυγή της λειτουργίας του κινητήρα σε καταστάσεις υπερφόρτισης. Ο συγκεκριμένος περιορισμός εξετάζει την αποδιδόμενη από τον κινητήρα ροπή, ώστε αυτή να μην εισέλθει σε περιοχή υπερφόρτισης.



Εικόνα 11: Βρόχος ελέγχου για τη βέλτιστη ταχύτητα και τον έλεγχο του βήματος (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

Το προτεινόμενο σχέδιο στο σημείο αυτό αναφορικά με την πολλαπλή είσοδο και έξοδο, επιτυγχάνει ένα σημαντικό έλεγχο απόδοσης μέσα από τον οποίο δίνεται η δυνατότητα της αποφυγής υπερφόρτισης του κινητήρα ενώ παράλληλα, παρατηρείται μία αύξηση στην επίδοση της επιτάχυνσης.

Ωστόσο, η στρατηγική ελέγχου στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων της ταχύτητας του κινητήρα και έτσι, προκαλεί σημαντική διακύμανση στην έγχυση καυσίμου και τη ροπή της έλικας. Η κυμαινόμενη έγχυση καυσίμου μπορεί να προκαλέσει υψηλή συνολική κατανάλωση. Επίσης, οι μεγάλες διακυμάνσεις στη ροπή μπορούν να οδηγήσουν σε αυξανόμενη θερμική φόρτιση και υψηλότερα επίπεδα εκπεμπόμενου θορύβου. Αυτές οι συνέπειες της ελαχιστοποίησης της διακύμανσης της ταχύτητας του κινητήρα είναι ανεπιθύμητες, ενώ, όπως διατυπώθηκε και πριν, η διακύμανση της ταχύτητας του άξονα δεν χρειάζεται να ελαχιστοποιηθεί.

2.5.7 Έλεγχος της γωνίας προσβολής

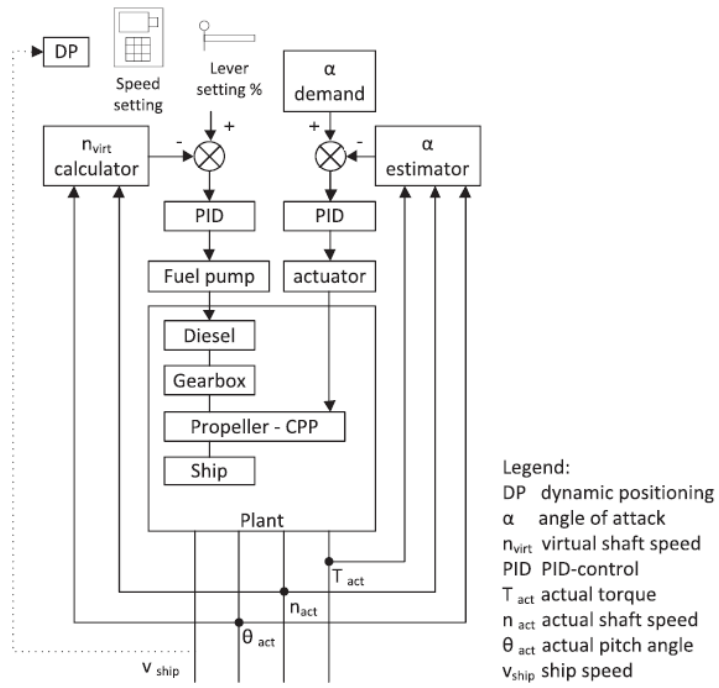
Έχει αναπτυχθεί μια στρατηγική ελέγχου για την ελαχιστοποίηση της ανεπιθύμητης σπηλαιώσης για δεδομένες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος πρόωσης (A, 2009). Με τη συγκεκριμένη στρατηγική, μεταβάλλεται το βήμα της έλικας, ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη γωνία προσβολής (Angle of Attack) που θα ελαχιστοποιήσει τις πιθανότητες εμφάνισης σπηλαιώσης. Η γωνία προσβολής τονίζεται πως είναι η γωνία υπό την οποία το ρευστό (νερό στην περίπτωση της έλικας) εισέρχεται στην επιφάνεια των πτερύγιων της.

Αυξάνοντας, τώρα, την ταχύτητα του κινητήρα για να αναπληρωθεί το μειωμένο βήμα λόγω της στρατηγικής ελέγχου, οδηγεί στην απαιτούμενη θεωρητική ταχύτητα άξονα, με το μέγεθος αυτό να ορίζεται ως εξής:

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

όπου n_{virt} είναι η θεωρητική ταχύτητα άξονα, θ το πραγματικό βήμα, θ_0 το βήμα στο οποίο επιτυγχάνεται μηδενική ώση, θ_{nom} είναι το ονομαστικό βήμα της έλικας και n είναι η πραγματική ταχύτητα άξονα. Ο βρόχος ελέγχου ταχύτητας κινητήρα διατηρείται ώστε να επιτρέπονται δοκιμές πάνω στη φρεγάτα Μ κλάσης του RNLN.

Στην Εικόνα 12, απεικονίζεται ο συγκεκριμένος βρόχος ελέγχου. Οι δοκιμές γίνονται πάνω στη φρεγάτα, παράλληλα με την ανάλυση των προσομοιώσεων. Με τη σύγκριση πειράματος και υπολογιστικής μεθόδου, καταλήγουν στο συμπέρασμα πως η στρατηγική ελέγχου αυτή μειώνει τον χρόνο που είναι πιθανό να υπάρξει σπηλαιώση, ενώ βελτιώνει την αποδοτικότητα στην επιτάχυνση, χωρίς να υπερφορτίζει τον κινητήρα (για τις συνθήκες του πειράματος πάντα).



Εικόνα 12: Βρόχος ελέγχου για τον έλεγχο της γωνίας AOA (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

3. Συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης

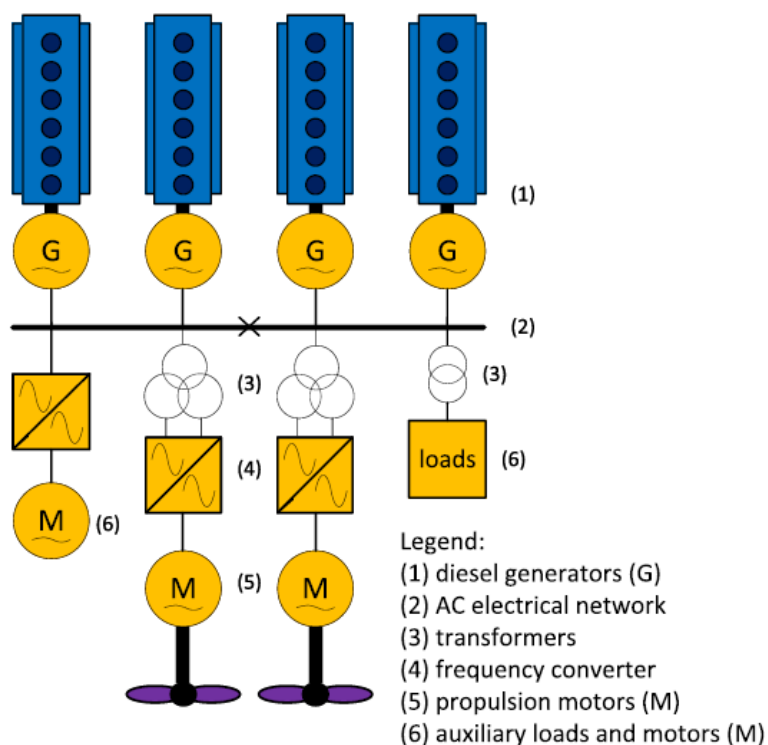
Η ηλεκτρική πρόωση υπάρχει ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1990. Τη δεκαετία του '90, η ηλεκτρική πρόωση ενισχύθηκε αρκετά στη βιομηχανία της κρουαζιέρας και στα μεγάλα πολεμικά πλοία. Μια τυπική διάταξη της ηλεκτρικής πρόωσης αναπαρίσταται στην Εικ. 12. Πολλαπλά σετ γεννητριών ντίζελ (1) τροφοδοτούν ένα ηλεκτρικό δίκτυο σταθερής συχνότητας και υψηλής τάσης. Το δίκτυο τροφοδοτεί τον κινητήρα (5) και τα περιφερειακά φορτία (6), τις περισσότερες φορές μέσω ενός μετασχηματιστή (3).

3.1 Οφέλη και προκλήσεις της ηλεκτρικής πρόωσης

Η ηλεκτρική πρόωση είναι αρκετά αποδοτική ως προς την κατανάλωση καυσίμου όταν το ηλεκτρικό φορτίο είναι μεγάλο ποσοστό της απαιτούμενης ισχύος. Επίσης, είναι αποτελεσματική για προφίλ λειτουργίας πλοίων που χαρακτηρίζονται από μεγάλες εναλλαγές, αφού η ηλεκτρογεννήτρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την παροχή ισχύος στα βοηθητικά συστήματα του πλοίου όσο και για την πρόωση αυτού (R, 1998). Για να επιτευχθεί όμως κάτι τέτοιο, απαιτείται η ύπαρξη ενός συστήματος διαχείρισης ισχύος (Power Management System, PMS), το οποίο αποδίδει τις απαιτήσεις ανά πάσα στιγμή για πρόωση και παροχή ισχύος στους υπάρχοντες κινητήρες. Η συγκεκριμένη στρατηγική διασφαλίζει πως δεν θα υπάρχει περιττή λειτουργία των κινητήρων και μειωμένη απόδοσή τους υπό μερικό φορτίο.

Αναφορικά τώρα με τις εκπομπές, η ηλεκτρική πρόωση οδηγεί σε παραγωγή και εκπομπή μικρότερων ποσοτήτων NOx απ' ό,τι η μηχανική πρόωση. Αυτό συμβαίνει όμως μόνο όταν διαχωρίζονται οι απαιτήσεις για ισχύ σε πολλούς κινητήρες, υπό πλήρη ταχύτητα πρόωσης, όπου κάθε κινητήρας λόγω της χαμηλής ισχύος λειτουργεί με μεγαλύτερη ταχύτητα. Για παράδειγμα, σε ένα κρουαζιερόπλοιο με ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης, συνολικής ισχύος 20 MW, υπάρχουν συνήθως 5 γεννήτριες ντίζελ που λειτουργούν στις 720 rpm. Αντίστοιχα, ένα πλοίο, ίδιου τύπου, ίδιας ισχύος, αλλά με μηχανικό σύστημα πρόωσης, θα πρέπει να διαθέτει δύο μηχανές των 20 MW που η καθεμία να λειτουργεί στις 500 rpm εάν είναι τετράχρονη ή στις 80 rpm αν είναι δίχρονη.

Για πλοία Κατηγορίας 2 (Tier 2), κάτι τέτοιο θα σήμαινε μέση παραγωγή NOx/κύκλο ίση με 9,7 g/kWh για τις γεννήτριες ντίζελ με ηλεκτρική πρόωση και 10.5/14.4 g/kWh για τις τετράχρονες και δίχρονες μηχανές ντίζελ με μηχανική πρόωση. Επίσης, λόγω του σχεδιασμού του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης, οι γεννήτριες ντίζελ παράγουν λιγότερα NOx. Ακόμα, αντίθετα από τη μηχανική πρόωση όπου υπό μερικό φορτίο οι κινητήρες λειτουργούν με μειωμένη ταχύτητα, οι γεννήτριες ντίζελ εδώ λειτουργούν υπό καθορισμένη ταχύτητα, παράγοντας άρα και λιγότερα NOx, λόγω του μεγαλύτερου χρόνου που απαιτείται για τον σχηματισμό τους.



Εικόνα 13: Σχηματισμός ενός τυπικού συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

Τρίτο πλεονέκτημα της ηλεκτρικής πρόωσης, είναι οι λιγότερες ανάγκες για συντήρηση, εν συγκρίσει με τη μηχανική πρόωση, καθώς στην περίπτωσή της, οι κινητήρες μοιράζονται μεταξύ τους τις απαιτήσεις για πρόωση και βοηθητικά φορτία, ενώ όταν κάποιος απ' αυτούς δεν χρειάζεται, παύει την λειτουργία του.

Ακολουθως, το σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης οδηγεί σε λιγότερο παραγόμενο θόρυβο, καθώς εδώ δεν υπάρχει μετάδοση ισχύος με μηχανικά μέσα (ήτοι γρανάζια) από τον κινητήρα στην έλικα . Για να είναι μειωμένος αρκετά ο θόρυβος, όμως θα πρέπει ο μετατροπέας ισχύος και τα μοτέρ να σχεδιάζονται υπό το πρίσμα της βελτιστοποίησης για ένα εύρος διακυμάνσεων στις ροπές.

Ένα ακόμη όφελος των συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης, που βρίσκεται ακόμα υπό μελέτη, είναι η μεγάλη δυναμική τους διαθεσιμότητα, τουλάχιστον όταν η μονάδα παραγωγής ισχύος και το σύστημα πρόωσης σχεδιάζονται με τον στόχο αυτό.

Τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης, ωστόσο, έχουν και ορισμένα μειονεκτήματα και δυσκολίες, οι οποίες είναι:

- Υπάρχουν αυξημένες απώλειες, καθώς η μετατροπή της ισχύος περνά από πολλά στάδια, ενώ και τα ηλεκτρικά μοτέρ έχουν απώλειες.
- Αυξάνεται, λόγω των ανωτέρω απωλειών, η ειδική κατανάλωση του συστήματος.
- Όταν λειτουργούν επιπλέον κινητήρες για να επιτευχθεί η μέγιστη διαθεσιμότητα πρόωσης, το οποίο απαιτείται σε περίπτωση δυναμικής ναυσιπλοΐας , οι κινητήρες λειτουργούν υπό χαμηλό φορτίο. Αυτό, ενδέχεται να αυξήσει την κατανάλωση καυσίμου, άρα και τις εκπομπές.
- Στα πλοία με ηλεκτρική πρόωση, χρησιμοποιείται συνήθως έλικα σταθερού βήματος. Αυτό συμβαίνει εφόσον τα ηλεκτρικά μοτέρ, μπορούν να δώσουν μέγιστη ροπή υπό οποιαδήποτε ταχύτητα και να λειτουργήσουν αντίστροφα . Ο εκπεμπόμενος, λόγω σπηλαιώσης, θόρυβος, μπορεί να αυξηθεί σε περίπτωση χρήσης έλικας σταθερού βήματος και χρήσης ελέγχου ταχύτητας, μια στρατηγική που συναντάται συχνά στους ηλεκτρικούς κινητήρες. Κατά συνέπεια, η σπηλαιώση μπορεί να είναι εντονότερη υπό την ηλεκτρική πρόωση με στρατηγική ελέγχου ταχύτητας και έλικα σταθερού βήματος (A, 2009).

Επομένως , η στρατηγική ελέγχου που υιοθετείται, θα πρέπει να στοχεύει στην αντιμετώπιση τέτοιων δυσκολιών. Αντιθέτως, εάν η στρατηγική αυτή δεν οδηγεί σε βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, τότε θα πρέπει να επιλεγεί διαφορετική διάταξη στο σύστημα .

3.2 Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης

Ακόμα και εάν η εξοικονόμηση καυσίμου που αποδίδεται στην ηλεκτρική πρόωση συχνά είναι μικρότερη λόγω των ηλεκτρικών απωλειών, η ηλεκτρική πρόωση είναι αρκετά πετυχημένη στη βιομηχανία της κρουαζιέρας (R. V. , 1998). Αυτό αποδίδεται κυρίως στην αποτελεσματικότητα της διάταξης της ηλεκτρικής μονάδας: η αστοχία μιας γεννήτριας ντίζελ έχει ελάχιστες επιπτώσεις στη λειτουργία του πλοίου .

Επίσης, η διάταξη της ηλεκτρικής πρόωσης δίνει μεγαλύτερη ευελιξία στη χωροθέτηση των μηχανών εντός του πλοίου. Σε αυτό οφείλεται η απουσία του άξονα που υπάρχει στη μηχανική πρόωση, και η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη χωροταξία εντός του μηχανοστασίου. Επίσης, η απουσία του δίνει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί αποτελεσματικότερη ηχομόνωση στους κινητήρες, μειώνοντας άρα τα επίπεδα του εκπεμπόμενου θορύβου.

Πέραν της επιτυχίας της στα κρουαζιερόπλοια, η ηλεκτρική πρόωση απαντάται και σε πλοία άλλου τύπου, όπως παγοθραυστικά και πολεμικά πλοία. Κάνοντας μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στις εφαρμογές της ηλεκτρικής πρόωσης και την τεχνολογική της εξέλιξη, το κατά πόσο θα χρησιμοποιηθεί ως τεχνολογία πρόωσης η ηλεκτρική , επηρεάζεται από το προφίλ λειτουργίας του πλοίου .

Ένα άλλο πλεονέκτημα που προσφέρει η ηλεκτρική πρόωση έχει να κάνει με την ευκολία που επιτρέπει στην προσθαφαίρεση εξαρτημάτων εντός της διάταξης της (επεκτασιμότητα). Μπορούν δηλαδή να γίνουν εύκολα εναλλαγές στις γεννήτριες, τους κινητήρες , και τις έλικες . Αυτό το χαρακτηριστικό της ηλεκτρική πρόωσης εξασφαλίζει τη διατήρηση της θέσης ενός πλοίου , ακόμα και υπό συνθήκες αστοχίας. Παραδείγματος χάριν, η ύπαρξη επιπλέον κινητήρων για συμπληρωματικότητα εγγυάται τη διαθεσιμότητα ισχύος σε συνθήκες αστοχίας.

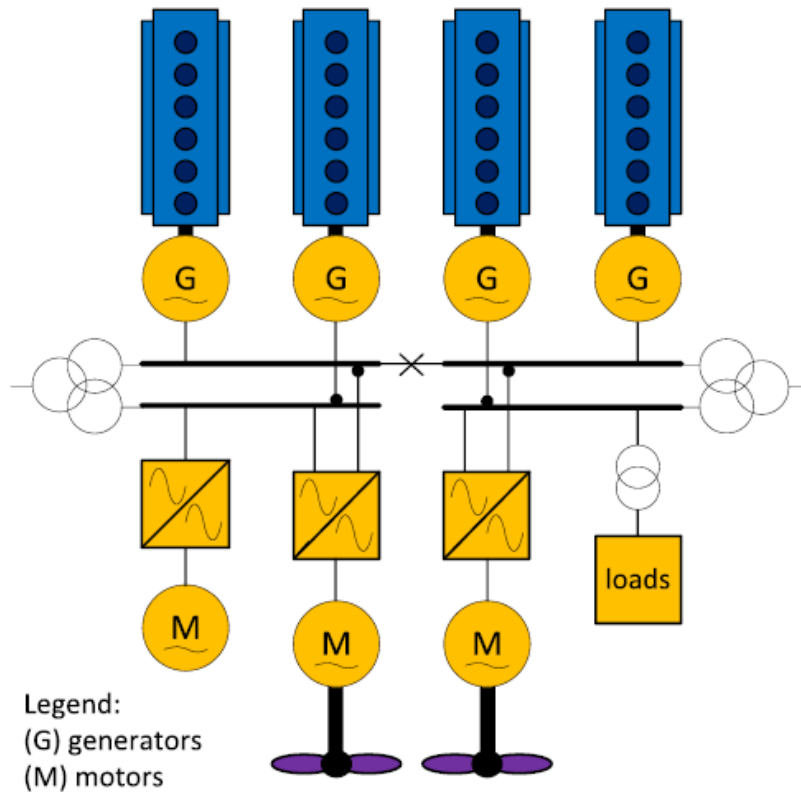
Ωστόσο, η λειτουργία πρόσθετων κινητήρων οδηγεί στον διαμοιρασμό της ισχύος στους κινητήρες, οι οποίοι λειτουργούν υπό μερικό φορτίο. Οι συνθήκες αυτές μειώνουν την αποδοτικότητα του κινητήρα, αυξάνουν την κατανάλωση, άρα και την εκπομπή των NOx.

Επιπλέον, η απαίτηση για επαρκή εφεδρική ενέργεια και εγκατεστημένη ισχύ για να διατηρηθεί η δυνατότητα του πλοίου να λειτουργεί ακόμα και στο σενάριο χειρότερης αστοχίας, καθορίζει την εγκατεστημένη ισχύ, άρα και το κόστος επένδυσης.

Για να αντιμετωπιστεί η δυσκολία αυτή, έχει προταθεί μια εναλλακτική διάταξη. Η διάταξη αυτή μπορεί να φανεί στην Εικόνα 14. Η διαδικασία αυτή περιορίζει τις ανάγκες για μετασχηματιστές φάσης, ενώ μειώνει και τις αρνητικές συνέπειες μιας αστοχίας, περιορίζοντάς τες στο $\frac{1}{4}$ της εγκατεστημένης ισχύος (Öster H., 2019) (Skaar I, Angeltveit K, Urheim M. Wärtsilä, 2012).

Η επιτυχία της ηλεκτρικής πρόωσης στα εμπορικά πλοία, έχει αποτελέσει κίνητρο και για την υιοθέτησή της σε πολεμικά πλοία, κυρίως αντιτορπιλικά (Hodge CG, Mattick DJ, 1996) (Hodge CG, Mattick DJ. , 1997) (Hodge CG, Mattick DJ, 1998) (Hodge CG, Mattick DJ, 1999) (Hodge CG, Mattick DJ, 2000) (Hodge CG, Mattick DJ. , 2001) (Danan FGA, Weston AV, Longepéré BNJ, 2005) (Mattick D, Benatmane M, McVea N, Gerrard R, 2005) (Hodge CG, Mattick DJ., 2008) (R O. , 2009). Ωστόσο, για να γίνει αυτό πρέπει να αναπτυχθούν τεχνικές και προγράμματα κατάλληλα για αυτού του τύπου πλοία.

Τα προγράμματα αυτά εξέλιξης, στοχεύουν στο να αυξηθεί η πυκνότητα ισχύος με προηγμένες τεχνολογίες, αποτελούμενα από έναν μόνιμο, νέο μαγνήτη και υπεραγωγούς υψηλής θερμοκρασίας στον κινητήρα ώστε να μπορεί να εγκατασταθεί η ηλεκτρική πρόωση. Τέτοια παραδείγματα προγραμμάτων υπάρχουν στο αεροπλανοφόρο Queen Elizabeth αλλά και στα Type 45 αντιτορπιλικά (Vanderpump D, Benatmane M, Murray PT, 2002) (Loyd C, Simpson R, Reid G, 2003) του Βασιλικού Ναυτικού του Ηνωμένου Βασιλείου . Οι εφαρμογές αυτές έχουν τη βάση τους στον κινητήρα προηγμένης επαγωγής. Ο κινητήρας αυτός είναι μια αρκετά προηγμένη τεχνολογία των ηλεκτρικών μηχανών. Στις ναυτικές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται πολλές γεννήτριες AC, σταθερής συχνότητας και υψηλής τάσης, που λειτουργούν με συμβατικές στρατηγικές ελέγχου .



Εικόνα 14: Διάταξη ηλεκτρικής πρόωσης με άξονες διαφορετικής φάσης (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

3.3 Στρατηγικές ελέγχου για τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Οι στρατηγικές ελέγχου που συναντώνται στα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης, αποτελούνται από δύο μέρη: τον έλεγχο του ηλεκτρικού δικτύου σταθερής συχνότητας, το οποίο στοχεύει στην ικανοποιητική παροχή ισχύος σε όλους τους χρήστες, και τον έλεγχο της πρόωσης, το οποίο στοχεύει στην κίνηση του πλοίου υπό την απαιτούμενη ταχύτητα και διεύθυνση.

3.3.1 Έλεγχος τάσης και συχνότητας

Τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης αποτελούνται από δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος AC, σταθερής συχνότητας. Η συχνότητα διατηρείται σταθερή από τον έλεγχο ταχύτητας, ο οποίος γίνεται στους ελεγκτές ή από ηλεκτρικά ισόχρονο διαμοιρασμό μεταξύ φορτίου και ελεγκτών. Στην πρώτη περίπτωση, ο ελεγκτής ελέγχει τον διαμοιρασμό του φορτίου ανάμεσα στις γεννήτριες. Παρομοίως, ο αυτόματος

ρυθμιστής τάσης χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της τάσης που απαιτείται αλλά και για τον έλεγχο του διαμοιρασμού των φορτίων στις παράλληλα συνδεδεμένες γεννήτριες. Αυτοί οι βρόχοι ελέγχου αποτελούν και το πρωταρχικό επίπεδο ελέγχου (LLJ., 1992).

Εδώ, ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα είναι ότι η γεννήτρια ντίζελ λειτουργεί υπό μία, καθορισμένη ταχύτητα. Στην Εικόνα 15 απεικονίζεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου, η οποία είναι υψηλότερη όταν ο κινητήρας λειτουργεί υπό μειωμένο φορτίο, σε σχέση με όταν λειτουργεί πάνω στην καμπύλη λειτουργίας της έλικας .

Επίσης, όταν ο κινητήρας λειτουργεί πάνω στην καμπύλη της γεννήτριας, εκπέμπονται και λιγότερα NOx και CO₂, ενώ η φθορά από τις φυγοκεντρικές δυνάμεις, εντός του κινητήρα, είναι μεγαλύτερες όταν αυτός λειτουργεί υπό σταθερή, καθορισμένη ταχύτητα και μερικό φορτίο.

Η εναλλακτική στο παραπάνω είναι η χρήση δικτύου μεταβλητής συχνότητας (OJ., 2014). Το συγκεκριμένο δίκτυο μπορεί εξοικονομήσει αρκετό καύσιμο, της τάξης του 5% σε σχέση με τη σταθερή συχνότητα. Ωστόσο, δεν είναι παντελώς εφικτός, με τα τωρινά μέσα, ο σχεδιασμός ενός τέτοιου, εμπορικά διαθέσιμου δικτύου μεταβλητής συχνότητας.

Επιπλέον, θα απαιτείται σε μια τέτοια περίπτωση επιπλέον μετατροπή ισχύος ώστε να παρασχεθεί ρεύμα στα βοηθητικά φορτία που είναι σταθερής συχνότητας, οδηγώντας σε αυξημένες απώλειες μετατροπής. Εναλλακτικά, μπορεί να επιλεγεί η χρήση δικτύου συνεχούς ρεύματος.

3.3.2 Δευτερεύων έλεγχος διαχείρισης ισχύος

Ο έλεγχος διαχείρισης ισχύος απεικονίζεται στην Εικόνα 15. Μέσω της διαδικασίας αυτής, ελέγχονται καθορισμένα σημεία ταχύτητας και τάσης, ώστε τόσο η συχνότητα όσο και η ίδια η τάση να διατηρούνται εντός των αποδεκτών ορίων λειτουργίας του συστήματος υπό δυναμικές φορτίσεις.

Επιπλέον, κατά τις αλλαγές φορτίων, το σύστημα διαχείρισης ισχύος (PMS: Power Management Systems) δίνει αυτόματη έναρξη και παύση των σετ γεννητριών και διασφαλίζει πως οι ενεργοί κινητήρες δεν υπερφορτώνονται, περιορίζοντας τους

κινητήρες πρόωσης και άλλα φορτία κατά το δοκούν (Karim N, Lisner R, Kazemi H, Annaz F, 2002). Τέλος, το σύστημα διαχείρισης ισχύος μπορεί να εκτελέσει διαδικασίες προστασίας όπως η αποφυγή διακοπής ρεύματος (blackout), την απενεργοποίηση ελαττωματικών συστημάτων και την αναδιάταξη του ηλεκτρικού δικτύου μετά από διακοπή ρεύματος. Αυτές οι ενέργειες ελέγχου τυπικά είναι βασισμένες σε κανόνες και μπορούν επίσης να γίνουν και από τον χειριστή.

Πιο συγκεκριμένα, στα πλοία με υψηλές απαιτήσεις για διαθεσιμότητα ισχύος, το σύστημα διαχείρισης ισχύος είναι αυτό που θα διασφαλίσει πως υπάρχει περίσσεια στροφών λειτουργίας του κινητήρα για να επιτυγχάνεται η διαθεσιμότητα. Παρακάτω, γίνεται αναφορά και σε ορισμένες προηγμένες στρατηγικές ελέγχου, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος διαχείρισης ισχύος (PMS), ώστε αυτό να διατηρεί την τάση και τη συχνότητα του ρεύματος, κυρίως σε καταστάσεις αστοχίας του συστήματος.

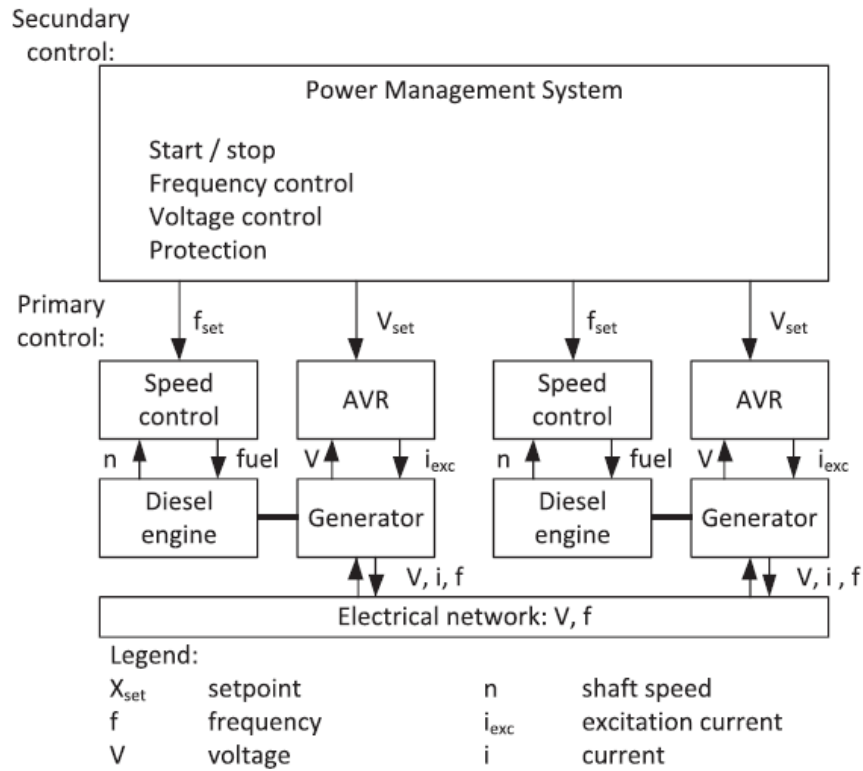
3.3.3 Διαχείριση ισχύος βασισμένη σε μοντέλο πραγματικού χρόνου

Μια άλλη πρόταση είναι η χρήση υπό-μοντέλων των φορτίων και των πηγών ενέργειας, ώστε να υπολογιστεί η βέλτιστη συχνότητα για κάθε πηγή ισχύος και να επιτευχθεί ο συνολικά ορισμένος στόχος για τη συχνότητα (Amgai R, Abdelwahed S., 2014). Η συγκεκριμένη μεθοδολογία μπορεί να διατηρήσει τη συχνότητα στο σύστημα μετά από διακοπή ρεύματος στις γεννήτριες εντός ενός αποδεκτού εύρους. Σε μια τέτοια περίπτωση, ένα σύστημα με ελεγκτές ταχύτητας που δεν έχει δευτερεύον έλεγχο θα έπεφτε κάτω από το καθορισμένο ελάχιστο σημείο για τη συχνότητα.

3.3.4 Παρακολούθηση ισχύος

Μια άλλη προσέγγιση είναι αυτή των πολλαπλών χρονικών σημείων για την παρακολούθηση της ισχύος με δύο πηγές ισχύος με διαφορετικές δυναμικές ιδιότητες (Seenumani G, Sun J, Peng H.). Η έρευνά τους δείχνει πως αυτή η προσέγγιση μπορεί να διασφαλίσει ταχεία και αποτελεσματική παρακολούθηση της ισχύος λόγω της υπολογιστικής της αποδοτικότητας. Ωστόσο, η διάταξη του συστήματος είναι αρκετά απλοποιημένη και περιορισμοί αναφορικά με τη φόρτιση του κινητήρα φαίνεται να μην

έχουν χρησιμοποιηθεί, καθώς η αύξηση του φορτίου του κινητήρα είναι πολύ απότομη στα αποτελέσματα που παρουσιάζουν.



Εικόνα 15: Τυπική διάταξη στρατηγικής ελέγχου για δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος AC σταθερής συχνότητας (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

4. Συστήματα υβριδικής πρόωσης

Όταν η ισχύς που απαιτείται για να καλυφθούν οι ανάγκες των βοηθητικών συστημάτων είναι ένα μικρό ποσοστό μόνο της απαιτούμενης ισχύος για πρόωση, οι απώλειες που σχετίζονται με την ηλεκτρική μετατροπή οδηγούν σε αυξημένη κατανάλωση καυσίμου στα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης. Ο επιπλέον ηλεκτρικός εξοπλισμός οδηγεί επίσης σε αυξημένη βάρος, μέγεθος και κόστος (Gemmell G, McIntyre B, Reilly M., 2014).

Στην υβριδική πρόωση, ένας μηχανικός κινητήρας (1) δίνει απευθείας πρόωση για μεγάλες ταχύτητες με μεγάλη αποδοτικότητα. Επιπρόσθετα, ένας ηλεκτροκινητήρας (2), ο οποίος συζευγνύεται με τον ίδιο άξονα μέσω ενός μειωτήρα (3) ή απευθείας στον άξονα που κινεί την έλικα, δίνει πρόωση στις χαμηλές ταχύτητες, αποφεύγοντας έτσι τη λειτουργία του κύριου κινητήρα με κακή απόδοση υπό μερικό φορτίο. Μια τυπική διάταξη για ένα τέτοιο σύστημα υβριδικής πρόωσης παρουσιάζεται στην Εικ. 17.

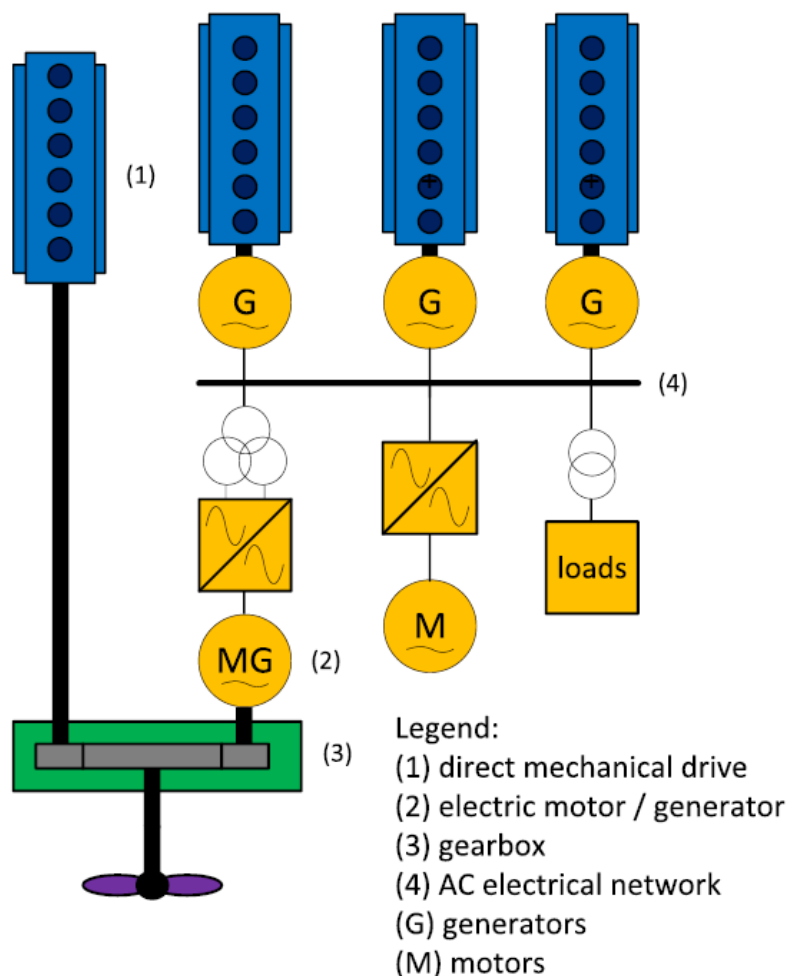
Όταν ο μηχανικός κινητήρας λειτουργεί, το σύστημα αυτό επιτρέπει την παραγωγή ισχύος είτε από την ηλεκτροκινητήρα είτε από το σετ γεννητριών

4.1 Οφέλη και προκλήσεις της υβριδικής πρόωσης

Τα συστήματα υβριδικής πρόωσης αποτελούν έναν συνδυασμό μηχανικής και ηλεκτρικής πρόωσης. Έτσι, μπορεί ένα πλοίο να επωφεληθεί από τα επιμέρους πλεονεκτήματα του κάθε συστήματος. Ωστόσο, για να υπάρξουν τα οφέλη αυτά, πρέπει να γίνει σωστός σχεδιασμός, που να γίνει ένας καλός συμβιβασμός ανάμεσα στη συνιστώσα της μηχανικής και της ηλεκτρικής πρόωσης. Η στρατηγική ελέγχου που εφαρμόζεται δίνει τη δυνατότητα να επιτευχθεί αυτός ο βέλτιστος συμβιβασμός. Η κύρια δυσκολία στον σχεδιασμό της υβριδικής πρόωσης είναι το πώς θα εξισορροπηθούν οι συμβιβασμοί που αφορούν τις επιμέρους απαιτήσεις αλλά και πως θα καταστρωθεί και εφαρμοστεί μια στρατηγική ελέγχου η οποία θα πετυχαίνει το βέλτιστο συμβιβασμό.

4.2 Εφαρμογές της υβριδικής πρόωσης

Οι τυπικές εφαρμογές υβριδικών συστημάτων ισχύος και πρόωσης είναι οι φρεγάτες και τα αντιτορπιλικά, τα ρυμουλκά και τα εμπορικά πλοία (Castles G, Bendre A, 2009) (Sulligoi G, Castellan S, Aizza M, Bosisch D, Piva L, Lipardi G, 2012) (Wijismuller M, Hasselaar T, 2007) (R. B. , 2013). Περιγράφονται τα οικονομικά οφέλη της υβριδικής πρόωσης για το DDG-51 class του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ, υποθέτοντας έλεγχο βασισμένο σε κανόνες. Το Ναυτικό των ΗΠΑ χρησιμοποιεί αεροστρόβιλους ως κύρια μηχανή, καθώς επίσης και για τις γεννήτριες του. Η ειδική κατανάλωση των αεροστροβίλων υπό μερικό φορτίο είναι πολύ κακή, πολύ χειρότερη από αυτή των κινητήρων ντίζελ. Με τους αεροστρόβιλους, η υβριδική πρόωση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου.



Εικόνα 16: Τυπικό υβριδικό σύστημα πρόωσης (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

Επιπλέον, συγκρίνονται τα οικονομικά οφέλη αρκετών διατάξεων υβριδικής πρόωσης για ρυμουλκά έκτακτης ανάγκης (Wijsmuller M, Hasselaar T., 2007). Με το επιχειρησιακό προφίλ των πλοίων αυτών, η ισχύς του κινητήρα είναι στο 20% ή και λιγότερο για το 90% του χρόνου λειτουργίας του. Η πιο οικονομική διάταξη για τέτοιου τύπου λειτουργικό προφίλ ήταν η υβριδική πρόωση με έναν μεγάλο και έναν μικρό κινητήρα σε κάθε άξονα, υποστηρίζοντας μέτριες ταχύτητες περιπολίας (45% του χρόνου) αποδοτικά, και χρησιμοποιώντας ηλεκτρική πρόωση για περιπολίες χαμηλών ταχυτήτων και ταχύτητες ρελαντί (45% του χρόνου). Από τις παραπάνω μελέτες, έγινε σαφές πως με την υβριδική πρόωση μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση καυσίμου της τάξης του 10% και πάνω, καθιστώντας τη μια οικονομικά βιώσιμη λύση.

Στο ίδιο μοτίβο, υποστηρίζεται πως με την υβριδική πρόωση μπορεί ένα πλοίο να εξοικονομήσει αρκετό καύσιμο εάν για μεγάλο μέρος του χρόνου κίνησής του αυτό κινείται στο 40% της μέγιστης ταχύτητας (de Waard DS, 2015).

4.3 Στρατηγικές ελέγχου για την υβριδική πρόωση

Στην υβριδική πρόωση, οι στρατηγικές ελέγχου που εφαρμόζονται, απαντώνται τόσο στον ηλεκτροκινητήρα όσο και στο σύστημα μηχανικής πρόωσης. Αρχικά, οι στρατηγικές ελέγχου του 3^{ου} κεφαλαίου ισχύουν εδώ και για τον ηλεκτροκινητήρα. Αντίστοιχα, οι στρατηγικές που αναφέρθηκαν στο 2^ο κεφάλαιο για τη μηχανική πρόωση ισχύουν επίσης και εδώ. Ωστόσο, λίγες είναι οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν τον ηλεκτροκινητήρα παράλληλα με τη MEK και θα αναλυθούν εν συνεχεία.

4.3.1 Έλεγχος γεννήτριας στροφών για τον άξονα

Ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως γεννήτρια στροφών για τον άξονα, εάν η κύρια μηχανή του πλοίου θεωρείται πως μπορεί με άνεση να ανταποκριθεί στη ζήτηση για φορτίο. Για παράδειγμα, στην ιταλική φρεγάτα FREMM, η κύρια μηχανή του άξονα είναι αεριοστρόβιλος, με τουρμπίνα ελεύθερης ισχύος. Λόγω της τουρμπίνας αυτής, η μέγιστη ισχύς του κινητήρα μπορεί να επιτευχθεί σε οποιαδήποτε ταχύτητα. Έτσι, υπάρχει πάντα η δυνατότητα ανταπόκρισης του κινητήρα σε πρόσθετη ζήτηση για φορτίο, εκτός από περιπτώσεις που η φρεγάτα πλέει υπό μέγιστη ταχύτητα και σε συνθήκες που βρίσκονται εκτός σχεδιασμού του συστήματος (Sulligoi G, Castellan S, Aizza M, Bosisch D, Piva L, Lipardi G, 2012). Έτσι, ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να γίνει γεννήτρια στροφών σε μια τέτοια περίπτωση.

Η στρατηγική ελέγχου που εφαρμόζεται στον μετατροπέα της γεννήτριας στροφών είναι έλεγχος ταχύτητας και τάσης για την πλευράς της μονάδας που έχει να κάνει με την παραγωγή ισχύος. Επιπλέον, το ηλεκτρικό σκέλος του μετατροπέα χρησιμοποιεί έλεγχο προσανατολισμένου προς το πεδίο, ο οποίος προσαρμόζεται για το ρεύμα που τροφοδοτείται από το σκέλος της παραγωγής ισχύος του μετατροπέα, ώστε να διατηρείται η τάση του συνεχούς ρεύματος DC. Οι στρατηγικές αυτές συνδυασμένες,

αποδεικνύονται επιτυχημένες στο να λειτουργούν εν παραλλήλω μια γεννήτρια άξονα και μια γεννήτρια ντίζελ (Sulligoi G, Castellan S, Aizza M, Bosisch D, Piva L, Lipardi G, 2012).

Ωστόσο, λόγω της τάσης το φορτίο διαμοιράζεται μεταξύ της γεννήτριας ντίζελ και της γεννήτριας άξονα. Αυτό αναγκάζει τον αεριοστρόβιλο να μην λειτουργεί υπό βέλτιστες συνθήκες, καθώς μπορεί να διαχειριστεί το δυναμικό φορτίο πιο εύκολα σε σχέση με μια γεννήτρια ντίζελ. Εναλλακτικό σενάριο, έχει να κάνει με τη λειτουργία γεννήτριας ντίζελ, μαζί με έλεγχο ταχύτητας και της γεννήτριας άξονα με έλεγχο χρόνου. Όμως, απαιτείται επιπλέον έρευνα για τον καθορισμό του κατά πόσο ένα τέτοιο σενάριο οδηγεί σε σταθερή στρατηγική ελέγχου.

4.3.2 Υποβοήθηση ηλεκτροκινητήρα

Εάν το σύστημα του ηλεκτροκινητήρα σχεδιαστεί για παράλληλη λειτουργία με μηχανική μονάδα, τότε μπορεί αυτό να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της τελικής ταχύτητας του πλοίου αλλά και για τη μείωση του θερμικού φορτίου στον κινητήρα.

Η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιεί τη ροπή του ηλεκτροκινητήρα ώστε να μειώσει τον λόγο της περίσσειας αέρα του κύριου κινητήρα, λ, ο οποίος και καθορίζει το ποσό του διαθέσιμου αέρα στον κύλινδρο του κινητήρα κατά τη διάρκεια της καύσης, και άρα είναι μέτρο της θερμικής φόρτισης του κινητήρα (Topaloglou S, Paplambrou G, Kyrtatos N, 2016).

Η στρατηγική ελέγχου που προτείνεται μπορεί να αυξήσει τη ροπή στον ηλεκτροκινητήρα, ώστε να διατηρηθεί μια τιμή αναφοράς του λ. Αυτή προκύπτει από στατικούς χάρτες, συναρτήσει της ροπής του κινητήρα, της πίεσης αλλά και της ταχύτητας. Κατά τη φάση επιτάχυνσης, μετά από προσομοιώσεις που έγιναν, η στρατηγική αυτή μπορεί να μειώσει τις εκπομπές NOx μέχρι 16%, αυξάνοντας παράλληλα κατά 0,25 τον ελάχιστο λόγο περίσσειας αέρα. Έτσι, συμβαίνει σημαντική μείωση του θερμικού φορτίου κατά τη φάση επιτάχυνσης. Η στρατηγική που προτείνεται, άρα, αναδεικνύει τις προοπτικές για τη βελτίωση της επίδοσης εάν ο ηλεκτροκινητήρας αξιοποιείται εν παραλλήλω με τον θερμικό ντίζελ κινητήρα.

5. Ηλεκτρική πρόωση με υβριδικό σύστημα παροχής ισχύος

Στην ηλεκτρική πρόωση με υβριδικό σύστημα παροχής ισχύος, ένας συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων παροχής ισχύος μπορεί να αποδώσει ηλεκτρική ισχύ. Προτείνουμε μια κατηγοριοποίηση των πηγών ισχύος σε:

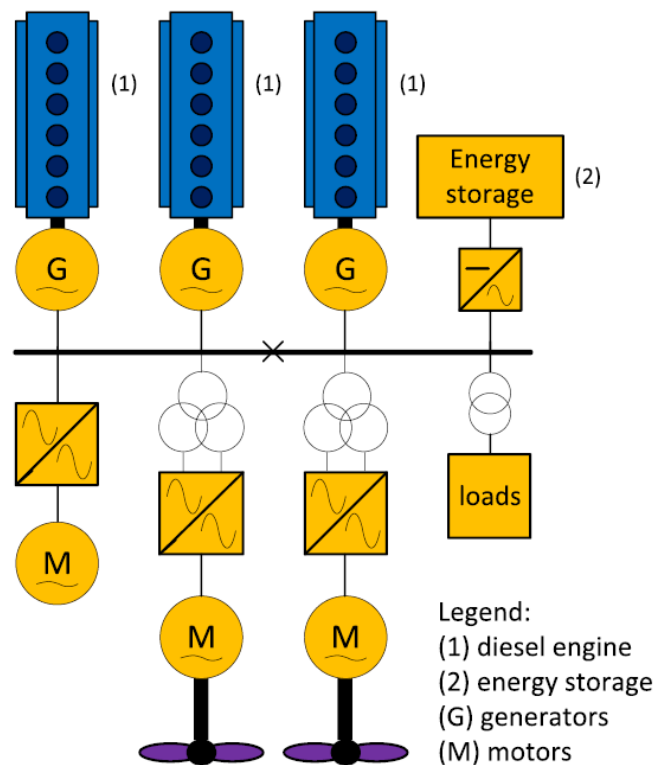
- Παροχή ισχύος από καύση, από κινητήρα ντίζελ (1), αεριοστρόβιλο ή ατμοστρόβιλο
- Ηλεκτροχημική παροχή ισχύος από κυψέλες καυσίμων
- Αποθηκευμένη παροχή ισχύος από συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (2), όπως μπαταρίες, σφονδύλους ή υπερπυκνωτές

Γίνεται μια ανασκόπηση των συστημάτων κυψελών καυσίμου στις ναυτικές εφαρμογές, η οποία περιλαμβάνει μια ανασκόπηση των ερευνητικών εφαρμογών πάνω σε κυψέλες καυσίμου στη ναυσιπλοΐα. Η εφαρμογή σειρών κυψελών καυσίμου πάνω στα πλοία έχει περιοριστεί στην πρόωση των υποβρυχίων, που γίνεται ανεξαρτήτως ύπαρξης αέρα, μιας και η αποθήκευση του καυσίμου υδρογόνου περιορίζει την ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να δοθεί χωρίς ανεφοδιασμό (Van Biert L, Godjevac M, Visser K, Aravind PV, 2016) (G., 2000) (Psoma A, Sattler G., 2002). Η έρευνα πλέον εστιάζει στην πιο συμπακνωμένη αποθήκευση του υδρογόνου (G., 2000), σε κυψέλες καυσίμου με ή χωρίς αναμορφωτές που μπορούν να χρησιμοποιούν άλλα καύσιμα, όπως μεθανόλη, LNG ή ακόμα και ντίζελ (Leites K, Bauschulte A, Dragon M, Krummrich S, Nehter P. Schibz, 2012) και κυψέλες καυσίμου που συνδυάζονται με κινητήρες ντίζελ ή αεριοστρόβιλους ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη αποδοτικότητα, χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα και πιο ενεργειακά πυκνές κυψέλες (Van Biert L, Godjevac M, Visser K, Aravind PV, 2016).

Η εξέλιξη της παροχής αποθηκευμένης ενέργειας στην αυτοκίνηση και της εφαρμογής παραγωγής ενέργειας είναι ένας τομέας εκτενούς έρευνας. Ωστόσο, η αποκλειστική εφαρμογή αποθηκευμένης παροχής ενέργειας στη ναυσιπλοΐα περιορίζεται μονάχα στο ferry MV Ampere, λόγω του περιορισμένου εύρους της. Η έρευνα πάνω στην τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας στα πλοία είναι σημαντικά πιο περιορισμένη και

εστιάζει πρωταρχικά στη χρήση τεχνολογιών μπαταρίας (Lan H, Wen S, Hong Y-Y, Yu DC, Zhang L., 2015) (Ovrum E, Bergh TF, 2015) (Dedes EK, Hudson DA, Turnock SR., 2012), αν και υπάρχουν έρευνες (Lan H, Wen S, Hong Y-Y, Yu DC, Zhang L., 2015) που αναφέρονται στην διαστασιολόγηση ενός υβριδικού συστήματος καύσης, φωτοβολταϊκών (PV) και αποθηκευμένης ενέργειας.

Η ιδέα για χρήση αποθηκευμένης ενέργειας μπαταριών για την πρόωση προέρχεται από τον τομέα της αυτοκίνησης, όπου χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο μπαταρίες για την αποθήκευση ενέργειας από το φρενάρισμα αντί για σπάταλη της, ώστε να λειτουργεί ο κινητήρας σε ένα πιο αποδοτικό σημείο λειτουργίας και να επιτρέπεται το σβήσιμο του κύριου κινητήρα, ειδικά όταν λειτουργεί υπό μερικό ή καθόλου φορτίο. Μια τυπική διάταξη μιας μονάδας ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδική παροχή ισχύος παρατίθεται στην Εικ. 18.



Εικόνα 17: Τυπικό σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδική παροχή ισχύος (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

5.1 Οφέλη και προκλήσεις της ηλεκτρικής πρόωση με υβριδικό σύστημα ισχύος

Η χρήση ενός υβριδικού συστήματος που αξιοποιεί αποθηκευμένη ενέργεια, οδηγεί σε συγκεκριμένα πλεονεκτήματα στις μονάδες πρόωσης, όπως:

- Η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να δώσει την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ και να επιτρέψει το σβήσιμο ενός ή περισσότερων κινητήρων όταν αυτοί αλλιώς θα λειτουργούσαν μη αποδοτικά υπό μερικό φορτίο. Το μέσο αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να φορτίζεται εκ νέου όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε σημείο χαμηλότερης κατανάλωσης και εκπομπών. Με τη διαδικασία αυτή γίνεται εξοικονόμηση καυσίμου, μείωση εκπομπών ρύπων, μείωση θορύβου, ενώ αυξάνεται η αντιλαμβανόμενη άνεση στην πλεύση και επιτρέπεται, για μικρό χρονικό διάστημα, η πλεύση χωρίς ρύπους (Zahedi B, Norum LE., 2013).
- Η μπαταρία παρέχει την δυνατότητα για αύξηση του φορτίου, διαχειριζόμενη τις διακυμάνσεις στο ρεύμα. Αυτό οδηγεί σε ένα σταθερό φορτίο στους κινητήρες, διατηρώντας ένα πιο αποδοτικό προφίλ λειτουργίας έτσι.
- Η μπαταρία επιτρέπει την ανταπόκριση σε αιχμές στη ζήτηση: η μπαταρία δίνει ενέργεια σε περιόδους όπου οι απαιτήσεις είναι ψηλές και επαναφορτίζει όταν απαιτείται λιγότερη ενέργεια. Η στρατηγική αυτή μπορεί να λειτουργεί τους κινητήρες πιο αποδοτικά και να μειώσει την εγκατεστημένη ισχύ (Dedes EK, Hudson DA, Turnock SR., 2012).
- Όταν ο ηλεκτροκινητήρας βρίσκεται σε λειτουργία, οι μπαταρίες μπορούν να αποθηκεύσουν μέρος της ενέργειας που χάνεται. Ωστόσο η εξοικονόμηση ενέργειας από τη συγκεκριμένη πρακτική περιορίζεται απ' το γεγονός πως ένα πλοίο δεν καλείται να επιβραδύνει συχνά. Ωστόσο, όταν αυτό κληθεί να προβεί σε πέδηση του κινητήρα του, γίνεται σημαντική ανάκτηση ενέργειας.
- Η μπαταρία μπορεί να δώσει εφεδρική ισχύ κατά τη διάρκεια αστοχίας των μονάδων εσωτερικής καύσης (γεννήτριες ντίζελ). Αυτό μπορεί να παραλείψει την ανάγκη για την λειτουργία επιπλέον κινητήρων ντίζελ για εφεδρεία στροφών και μπορεί εν δυνάμει να μειώσει την εγκατεστημένη ισχύ στα πλοία με απαιτήσεις για μεγάλη διαθεσιμότητα ως προς την πρόωση, για παράδειγμα τα πλοία DP (Dynamic Positioning, Δυναμικής Μετατόπισης) (Dedes EK, Hudson DA, Turnock SR., 2012).

Στα υβριδικά συστήματα με μπαταρία, αυτή λειτουργεί εν παραλλήλω με τις γεννήτριες. Αυτό προκαλεί ορισμένα προβλήματα, που παρατίθενται ακολούθως:

- Η στρατηγική ελέγχου θα πρέπει να ελαχιστοποιεί την κατανάλωση καυσίμου, φορτίζοντας και αποφορτίζοντας τη μπαταρία τις πιο κατάλληλες στιγμές.
- Στους κινητήρες ντίζελ, η διακύμανση του φορτίου αυξάνει την κατανάλωση, τις εκπομπές και τις απαιτήσεις για συντήρηση. Έτσι, θα πρέπει η στρατηγική ελέγχου να εξισορροπεί και να μοιράζει καταλλήλως το φορτίο ανάμεσα σε μπαταρία και κινητήρα, ώστε η κατανάλωση καυσίμου, οι ρύποι και οι ανάγκες συντήρησης για το συνολικό σύστημα παροχής ισχύος να ελαχιστοποιούνται.

5.2 Εφαρμογή της ηλεκτρικής πρόωσης με υβριδικό σύστημα παροχής ισχύος

Οι μπαταρίες έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται πρόσφατα σε ναυτικές εφαρμογές, αλλά η δημοτικότητά τους μεγαλώνει πολύ γρήγορα.

Για τα ρυμουλκά πλοία και τα τύπου ferry, η μείωση κατανάλωσης καυσίμου και ρύπων κάνει αναγκαία την υιοθέτηση των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ισχύος, με χρήση ηλεκτρικής πρόωσης (T.) (Breijs A, Amam EE., 2016). Σε τέτοια συστήματα, έχει αρχίσει και απαντάται όλο και συχνότερα η χρήση μπαταριών, οι οποίες, ωστόσο, συνοδεύονται από χρήση συνεχούς ρεύματος.

Εξετάστηκαν και τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση ηλεκτρικής πρόωσης μαζί με υβριδικό σύστημα παραγωγής ισχύος σε ferry και ρυμουλκά (T.). Οι μελέτες συμπεριλαμβάνουν χρήση μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας σε συνδυασμό με καθορισμένη στρατηγική ελέγχου. Η εξοικονόμηση ενέργειας, όταν η μπαταρία δεν επαναφορτίζεται είναι οριακή. Ωστόσο, στις περιπτώσεις αυτές, δεν έχει διενεργηθεί μελέτη ευαισθησίας, ώστε να φανεί ποιες παράμετροι επηρεάζουν περισσότερο το σύστημα, ενώ σημαντική είναι και η διαφοροποίηση που προκαλεί το εκάστοτε προφίλ λειτουργίας του πλοίου.

Στο ferry τύπου Hallaig, χρησιμοποιείται το ανωτέρω σύστημα, μαζί με προηγμένες στρατηγικές ελέγχου. Το πλοίο μπορεί να φανεί και στην Εικόνα 19.

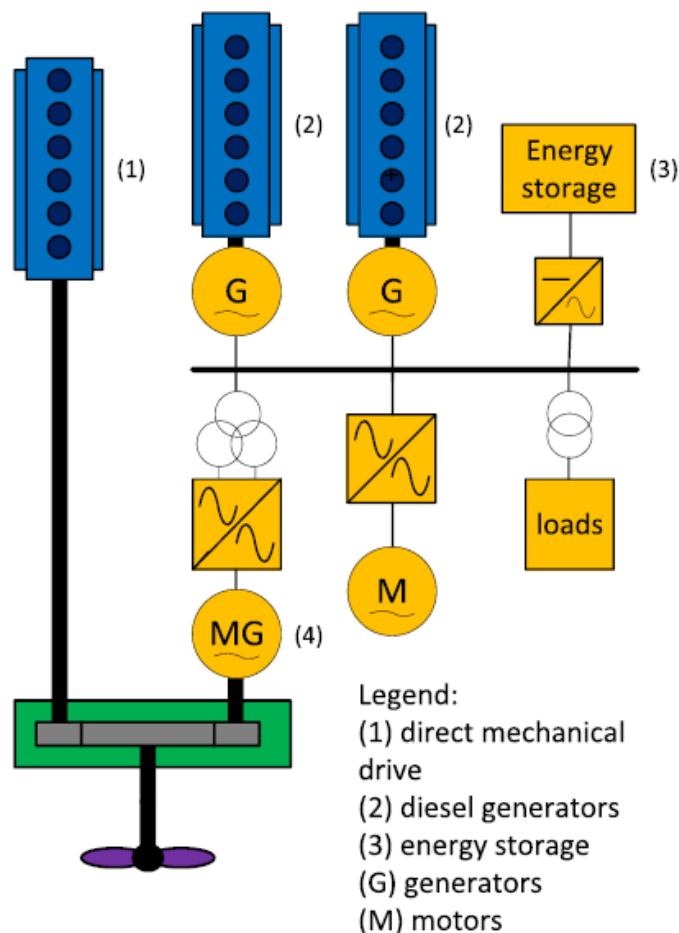


Εικόνα 18: Ferry με ηλεκτρική πρόωση και υβριδικό σύστημα παροχής ισχύος (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

Στο ferry αυτό, το οποίο παραδόθηκε σε λειτουργία το 2014, επιτεύχθηκε κατά τις δοκιμές εξοικονόμηση καυσίμου ίση με 35%. Το συγκεκριμένο κέρδος οφείλεται σε δύο αιτίες: Αρχικά, η φόρτιση των μπαταριών του γινόταν νύχτα οδηγώντας σε μείωση καυσίμου κατά 24%. Η φόρτιση, ωστόσο, γινόταν από επίγειους σταθμούς, κάτι που ενδέχεται να εισάγει στο σύστημα τους ρύπους κατά τη φάση παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα χερσαίο εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής. Ωστόσο, με τη χρήση ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή σε επίπεδο ηλεκτρικού δικτύου, μειώνεται σημαντικά ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος (Limited, 2015).

6. Υβριδική πρόωση με υβριδικό σύστημα ισχύος

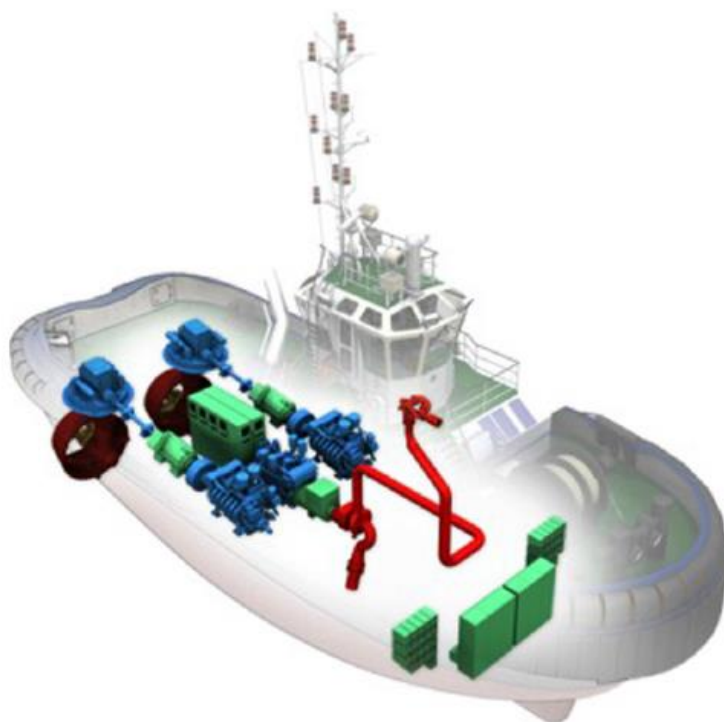
Η υβριδική πρόωση με υβριδικό σύστημα ισχύος χρησιμοποιεί τη μέγιστη αποδοτικότητα της απευθείας μηχανικής κίνησης (1) και την ευελιξία του συνδυασμού της ισχύος καύσης από μια κύρια μηχανή (2) και την αποθηκευμένη ενέργεια από τις μπαταρίες (3) για ηλεκτρισμό. Όταν υπάρχει πρόωση υπό χαμηλή ισχύ, ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνει αυτός την πρόωση και ο κύριος κινητήρας να παύει τη λειτουργία του, προμηθεύοντας παράλληλα με ηλεκτρισμό το πλοίο και τα δευτερεύοντα φορτία του. Στην Εικόνα 21 που ακολουθεί, απεικονίζεται η διάταξη ενός τέτοιου συστήματος.



Εικόνα 19: Τυπικό σύστημα υβριδικής πρόωσης με υβριδική παροχή ισχύος (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

6.1 Εφαρμογή της υβριδικής πρόωσης με υβριδική παροχή ισχύος

Τα ρυμουλκά πλοία στα λιμάνια ήταν ο πρώτος τύπος πλοίου στο οποίο εφαρμόστηκε η υβριδική πρόωση υπό την υβριδική παροχή ισχύος. Η εταιρεία που έκανε τη σχετική έρευνα, έδωσε προς χρήση το 2014 το πρώτο ρυμουλκό με υβριδικό σύστημα πρόωσης και υβριδική παροχή ισχύος. Στην Εικόνα 22, που ακολουθεί, απεικονίζεται σχηματικά το σύστημα που υπάρχει πάνω σε αυτό το πλοίο. Το 2015 (van Loon PT, van Zon P, 2016), επίσης, κατελκύστηκε το σκάφος Savannah, το οποίο επίσης φέρει ίδιο σύστημα. Με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, δεν έχει γίνει γνωστό το εάν υπάρχουν άλλα σκάφη μέχρι σήμερα, πέραν των ρυμουλκών και των σκαφών, που να συνδυάζουν υβριδική πρόωση με υβριδική παροχή ισχύος.



Εικόνα 20: Επισκόπηση του υβριδικού ρυμουλκού (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

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

Αναφορικά με την ηλεκτρική πρόωση, ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματά της είναι πως όταν ο κινητήρας λειτουργεί υπό μερικό φορτίο, οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου για λειτουργία υπό σταθερή ταχύτητα, σε σχέση με μεταβλητή. Το συγκεκριμένο μειονέκτημα της ηλεκτρικής πρόωσης, έχει ως αποτέλεσμα να δίνεται περισσότερη έμφαση στα ηλεκτρικά δίκτυα μεταβλητής συχνότητας. Τα ηλεκτρικά δίκτυα συνεχούς ρεύματος έχουν περιορισμένη χρήση, καθώς οι διάφοροι καταναλωτές έχουν διαφορετικές ανάγκες σε ρεύμα σταθερής συχνότητας. Ωστόσο, διαχρονικά εφαρμόζονται σε τομείς όπως τα υποβρύχια.

Όμως η προστασία έναντι βλάβης και ζητήματα περί σταθερότητας των συστημάτων ρεύματος έχουν περιορίσει τις εφαρμογές του. Η συνεχής εξέλιξη των ηλεκτρονικών συστημάτων και των ευφυών στρατηγικών για προστασία έναντι των βλαβών και τη διασφάλιση της σταθερότητας των συστημάτων ενέργειας, έχει οδηγήσει σε πιο διαδεδομένη εφαρμογή συστημάτων συνεχούς ρεύματος (Hodge CG, Mattick DJ., 2008) (Butcher M, Maltby R, Parvin PS., 2009) (Herrera L, Zhang W, Wang J., 2017). Οι σημαντικότεροι λόγοι που εφαρμόζονται τα συστήματα συνεχούς ρεύματος, αφορούν στην αύξηση της αποδοτικότητας των καυσίμων, και στις μειωμένες απώλειες μέσα από την μετατροπή της ισχύος (Zahedi B, Norum LE., 2013).

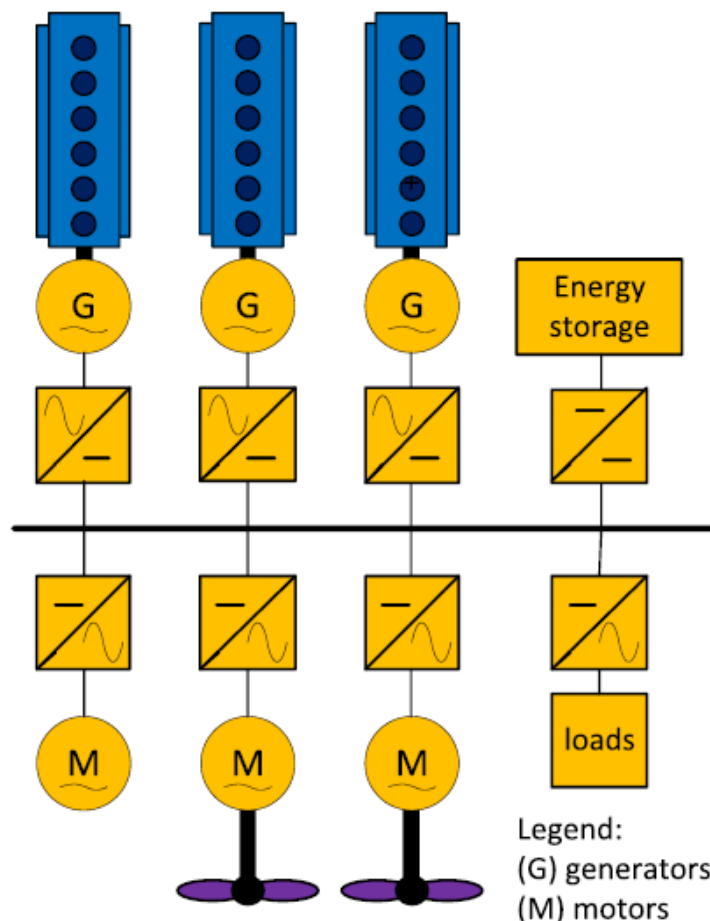
7.1 Οφέλη του υβριδικού συστήματος ισχύος DC

Τα οφέλη της εφαρμογής ενός υβριδικού συστήματος ισχύος με συνεχές ρεύμα σε πλοία με ηλεκτρική πρόωση είναι τα ακόλουθα:

- Η διάταξη συνεχούς ρεύματος επιτρέπει τη λειτουργία του κινητήρα ντίζελ σε μεταβλητή ταχύτητα, θεωρητικά οδηγώντας σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, τις εκπομπές, τον θόρυβο και τη θερμική και μηχανική καταπόνηση του κινητήρα

- Οι διατάξεις συνεχούς ρεύματος είναι ανθεκτικές προς την αστοχία, επειδή τα ηλεκτρονικά συστήματα επιτρέπουν τον στιγμιαίο έλεγχο των ηλεκτρικών μεταβλητών και οι αστοχίες δεν εξαπλώνονται στο ηλεκτρικό δίκτυο και δεν διαταράζουν την τάση και τη συχνότητα του δικτύου.
- Ο αριθμός και το μέγεθος των εξοπλισμού και διακοπών θεωρητικά μειώνεται όταν τα ηλεκτρονικά του συστήματος επιτελούν προστασία έναντι βλάβης (Butcher M, Maltby R, Parvin PS., 2009).

Αν και οι διατάξεις συνεχούς ρεύματος δίνουν σημαντικά οφέλη, οι ακόλουθες προκλήσεις θα πρέπει να αντιμετωπιστούν για την περίπτωση τους:



Εικόνα 21: Ηλεκτρική πρόωση με υβριδικό σύστημα ισχύος, σταθερού ρεύματος (R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, 2017)

- Θα πρέπει όλες οι πηγές παραγωγής ισχύος και τα φορτία να συνδέονται πάνω στο δίκτυο συνεχούς ρεύματος μέσω μετατροπέων. Εάν υπάρξει μεγάλο φορτίο εναλλασσόμενου ρεύματος , σταθερής συχνότητας, μπορεί να υπάρξουν μεγάλες απώλειες. Ωστόσο, εάν μεγάλο μέρος του φορτίου τροφοδοτείται από κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας , τότε μια διάταξη συνεχούς ρεύματος μπορεί να συρρικνώσει το κόστος (Parker MN, Geertsma RD, Hodge CG, Macalindin A, Simmonds OJ, 2009).
- Για να μπορούν να γίνουν εφικτές οι διατάξεις συνεχούς ρεύματος , θα πρέπει να επιλυθεί το ζήτημα της προστασίας έναντι στη βλάβη (Butcher M, Maltby R, Parvin PS., 2009) (Herrera L, Zhang W, Wang J., 2017).
- Θα πρέπει να εφαρμόζεται σε τέτοια συστήματα μια συντονισμένη στρατηγική ελέγχου, ώστε να επιλύονται θέματα σταθερότητας και βελτίωσης απόδοσης (Zadeh MK, Zahedi B, Molinas M, Norum LE., 2013). Άρα, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, κριτήρια που αναφέρθηκαν στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας.

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

Παραδοσιακά, τα συστήματα ισχύος συνεχούς ρεύματος εφαρμόζονται σε υποβρύχια, σε συνδυασμό με μεγάλους συσσωρευτές ώστε να επιτρέπεται η ανεξάρτητη του αέρα πρόωση. Πιο πρόσφατα, το Ναυτικό των ΗΠΑ έχει επίσης εφαρμόσει ένα σύστημα διανομής συνεχούς ρεύματος στα DDG-1000 αντιτορπιλικά (R O. , 2009) ((NSSC), 2007) (Doerry N, Robey H, Amy J, Petry C., 1996). Παρομοίως, το Βασιλικό Ναυτικό έχει σκεφτεί τη χρήση συστημάτων συνεχούς ρεύματος στις φρεγάτες του, με ένα εκτεταμένο πρόγραμμα εξέλιξής τους, ωστόσο ακόμα δεν το έχει εφαρμόσει. Και τα δύο ναυτικά αυτά έχουν εφαρμόσει ή βρίσκονται στη φάση αξιολόγησης συστημάτων ισχύος συνεχούς ρεύματος λόγω της σταθερότητάς τους και του ότι επιτρέπουν παλμικά φορτία ισχύος (Hodge CG, Mattick DJ, 1998) (Hodge CG, Mattick DJ, 1999) (Hodge CG, Mattick DJ, 2000) (Hodge CG, Mattick DJ. , 2001) (Hodge CG, Mattick DJ, 1996) (Hodge CG, Mattick DJ. , 1997) (Danan FGA, Weston AV, Longepéré BNJ,

2005) (Mattick D, Benatmane M, McVea N, Gerrard R, 2005) (Hodge CG, Mattick DJ., 2008). Τα σχέδια περιέχουν ένα μεγάλο μέρος ηλεκτρικό εξοπλισμό για τις μετατροπές, ο οποίος χρησιμοποιείται για την απόξεση της τάσης και της συχνότητας των διαφόρων μερών του συστήματος, πετυχαίνοντας άρα αυξημένη σταθερότητα. Σημαντικός παράγοντας των ναυτικών αυτών συστημάτων συνεχούς ρεύματος είναι η κατανομημένη τους φύση.

Τα ηλεκτρικά συστήματα DC έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια σε ferry και σε πλοία υποστήριξης υπεράκτιων εγκαταστάσεων . Η Alewijnse παρέδωσε ένα σύστημα ισχύος συνεχούς ρεύματος στο MV Jaguar το 2012, η Siemens έδωσε το πρώτο της σύστημα συνεχούς ρεύματος για υβριδική παροχή ισχύος στο MV Edda Ferd το 2013 και, τέλος, η ABB παρέδωσε το πρώτο της δίκτυο συνεχούς ρεύματος το 2013 για το MV Dina Star. Το συνεχές ρεύμα εφαρμόστηκε επίσης και στο πρώτο μεγάλης κλίμακας πλήρως διηλεκτρισμένο πλοίο, ένα ferry στη Νορβηγία, με τη Siemens να παραδίδει το πλοίο MF Ampere το 2015 με ένα δίκτυο συνεχούς ρεύματος που τροφοδοτείται μονάχα από μπαταρίες.

Ένα επιθυμητό στοιχείο που έχει οδηγήσει στην εφαρμογή των δικτύων συνεχούς ρεύματος στα πλοία , είναι πως οι κύριοι καταναλωτές ηλεκτρισμού σε αυτά χρησιμοποιούν κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας, το οποίο είναι και η βάση για την διάταξη συνεχούς ρεύματος λόγω της συνδεσμολογίας συνεχούς ρεύματος .

Τέλος, οι υβριδικές διατάξεις παροχής ισχύος με συνεχές ρεύμα φαίνονται πολλά υποσχόμενες για τα σκάφη πολυτελείας, κυρίως για αύξηση της άνεσης, χωρίς την απώλεια επίδοσης (Bosich D, Sulligoi G., 2013) (van Loon PT, van Zon P, 2016).

8. Συμπεράσματα και προτάσεις

Έχοντας προσπελάσει και μελετήσει μεγάλο μέρος της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με την υβριδική/ηλεκτρική τεχνολογία στα πλοία, είναι ασφαλές να ειπωθεί πως πρόκειται για έναν πολλά υποσχόμενο τομέα για τη ναυτιλία, ώστε να βρεθεί σε ένα πιο οικονομικό και φιλικό προς το περιβάλλον, μέλλον.

Ωστόσο, αυτό είναι μια μελλοντική κατάσταση, καθώς με την παρούσα τεχνολογία, τέτοια συστήματα είναι εφικτά μόνο σε συγκεκριμένα είδη πλοίων και υπό συγκεκριμένα προφίλ λειτουργίας και διατάξεων. Επίσης, η εξοικονόμηση που μπορεί να επιτευχθεί, απ' ότι παρουσιάστηκε και ανωτέρω, είναι σημαντική, ωστόσο γίνεται λόγος για ποσοστά συνήθως κάτω του 10% με την παρούσα τεχνολογία, κάτι που ενδέχεται να μην είναι επαρκές για τη ναυτιλία ώστε να μειώσει όσο χρειάζεται το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα.

Είναι βέβαιο ωστόσο, πως οι τεχνολογίες αυτές αναμένεται να βελτιωθούν, με τις αποδόσεις των συστημάτων να βελτιώνονται, νέα υλικά να κάνουν την εμφάνισή τους και τομείς των υπολογιστών να οδηγούν σε πολύ καλύτερο έλεγχο τέτοιων συστημάτων. Με την πρόοδο σε τομείς όπως η μηχανική και η ανάλυση δεδομένων, είναι εφικτό τα συστήματα αυτά να βελτιστοποιηθούν ακόμα περισσότερο στο μέλλον, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερες επιδόσεις και ενεργειακές αποδόσεις.

Συμπεραίνεται λοιπόν πως η υβριδική τεχνολογία αναμένεται να συνδεθεί στενά με τη ναυτιλία, όπως έχει καταφέρει και με την αυτοκίνηση τα τελευταία περίπου 20 χρόνια. Η χρήση μπαταριών για την αποθήκευση ενέργειας και την υποβοήθηση υπό συγκεκριμένες συνθήκες, αποφεύγοντας την αναποτελεσματική λειτουργία επιπρόσθετων κινητήρων, μπορεί να δώσει οφέλη, ωστόσο υπάρχουν και πολλά ζητήματα που πρέπει να αποσαφηνιστούν καθ' οδόν προς την πράσινη ναυτιλία. Ένα πολύ σημαντικό είναι η χρήση ΑΠΕ, τόσο από επίγεια δίκτυα κατά την φόρτιση των μπαταριών σε λιμάνια, όσο και πάνω στα πλοία, κυρίως υπό τη μορφή φωτοβολταϊκών πάνελ. Το πρώτο, είναι επιτεύξιμο σταδιακά, καθώς ολοένα και περισσότερο, οι προηγμένες χώρες στρέφονται σε ένα ενεργειακό μίγμα που περιλαμβάνει περισσότερες ΑΠΕ, μειώνοντας την εξάρτηση από τον άνθρακα και το πετρέλαιο. Το δεύτερο, είναι ένα αντικείμενο που ακόμα βρίσκεται υπό μελέτη και συζήτηση, ώστε να διακριβωθεί το εάν οδηγεί σε βιώσιμες οικονομικά και περιβαλλοντικά λύσεις.

Πρόκειται ωστόσο για μια σωστή κατεύθυνση στην οποία κινείται συνολικά ο κλάδος, παίρνοντας το παράδειγμα από την αυτοκίνηση, η οποία αφ' ενός είναι καίριας σημασίας για τον άνθρωπο και τη σύγχρονη κοινωνία και αφ' ετέρου είναι από τους πιο ρυπογόνους κλάδους παγκοσμίως. Η ναυτιλία βρίσκεται τα τελευταία χρόνια μπροστά σε ένα σταυροδρόμι που θα καθορίσει τη βιωσιμότητά της, με το πετρέλαιο να αναμένεται να αποτελέσει αγαθό πολυτελείας τις επόμενες δεκαετίες, και την ανθρωπότητα να πρέπει κατ' επείγοντως να στραφεί στον ήλιο, τον άνεμο και το νερό για την επιβίωσή της με τα παρόντα πρότυπα.

Μελλοντικές μελέτες σε σχετικό ζήτημα θα μπορούσαν να καταπιαστούν με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των πλοίων συνολικά. Από την κατασκευή τους, τα πλοία ευθύνονται για την παραγωγή εκατομμυρίων τόνων CO₂ στην ατμόσφαιρα, και δεν είναι μόνο η λειτουργία τους με ορυκτά καύσιμα που τα καθιστά ρυπογόνα. Μια μελλοντική, εμπειριστατωμένη μελέτη, θα πρέπει να εστιάσει συνολικά στις εκπομπές για τις οποίες συνολικά ευθύνεται η ναυσιπλοΐα και να ληφθεί ένα συνολικό πακέτο μέτρων για τον περιορισμό και έλεγχο αυτών.

Παράλληλα, η διαρκής μελέτη των τεχνολογιών που ανακύπτουν για την υβριδική και ηλεκτρική κίνηση θα μπορούν να δώσουν απαντήσεις σε ερωτήματα βιωσιμότητας και οικονομικής και περιβαλλοντικής απόδοσης των πλοίων.

Το απόλυτα βέβαιο συμπέρασμα, μετά και τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε, είναι πως η ναυτιλία έχει μπροστά της τον τρόπο να γίνει «πράσινη» και να συνεχίσει να είναι χρήσιμη για τον άνθρωπο και επικερδής για την ίδια, ωστόσο απαιτείται τεχνολογική πρόοδος και θέληση για υιοθέτηση ενός πιο οικολογικού προφίλ.

Βιβλιογραφία

- (NSSC), N. S. (2007). *Next generation integrated power system technology development roadmap*.
- A, V. (2009). *Control of propeller cavitation in operational conditions*. DELFT University of Technology.
- Amgai R, Abdelwahed S. (2014). Power management of shipboard power systems using interaction balance principle. *Proceedings of the 2014 North American power symposium*.
- Asad U, Zheng M. (2014). Exhaust gas recirculation for advanced diesel combustion cycles. *Applied Energy* .
- Bosich D, Sulligoi G. (2013). Voltage control on a refitted luxury yacht using hybrid. *Proceedings of the 8th international conference on ecological vehicles and renewable energies*. Monaco.
- Breijns A, Amam EE. (2016). Energy management – adapt your engine to every mission. *Proceedings of the 13th international naval engineering conference*;
- Butcher M, Maltby R, Parvin PS. (2009). Compact DC power and propulsion systems – the definitive solution? *Proceedings of the 3rd engine as a weapon conference*. Portsmouth.
- Castles G, Bendre A. (2009). Economic benefits of hybrid drive propulsion for naval ships. *2009 IEEE electric ship technologies symposium*.
- D., S. (2005). Matching propulsion engine with propulsor. *Proceedings of the Institute of Marine Engineering, Science, and Technology. Part A, Journal of marine engineering and technology*.
- Danan FGA, Weston AV, Longepépé BNJ. (2005). The electric ship technology demonstrator or how two mods are derisking the all electric warship concept. *IMarEST all electric ship conference 2005*. Versailles,.
- de Waard DS. (2015). Parameterization of ship propulsion drives and their fuel efficiency under different operational modes and configurations. *Proceedings of the engine as a weapon VI conference*.
- Dedes EK, Hudson DA, Turnock SR. (2012). Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping. *Energy Policy* .
- Doerry N, Robey H, Amy J, Petry C. (1996). Powering the future with the integrated power system. *Nav Eng J*.
- Emadi A, Rajashekara K, Williamson SS, Lukic SM. (2005). Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations. *IEEE Trans Veh Technol*.

- Francesco Baldi, Hannes Johnson, Cecilia Gabriellii, Karin Andersson. (2014). Energy analysis of ship energy systems – the case of a chemical tanker. *Energy Procedia*.
- G., S. (2000). Fuel cells going on-board. *Power Sources*.
- Gemmell G, McIntyre B, Reilly M. (2014). Is IFEP a realistic future propulsion system for flexible frigates and destroyers. *Proceeding of the 12th international naval engineering conference*.
- Guillemette JR, Bussi eres P. (1997). Proposed optimal controller for the Canadian patrol frigate diesel propulsion system. *Proceedings of the 11th Ship Control Symposium*.
- Herrera L, Zhang W, Wang J. (2017). Stability analysis and controller design of DC microgrids with constant power loads. *IEEE Trans Smart Grid*.
- Hodge CG, Mattick DJ. (2000). The electric warship V. *IMarE Trans*.
- Hodge CG, Mattick DJ. (1996). The electric warship. *IMarE Trans*.
- Hodge CG, Mattick DJ. (1998). The electric warship III. *IMarE Trans*.
- Hodge CG, Mattick DJ. (1999). The electric warship IV. *IMarE Trans*.
- Hodge CG, Mattick DJ. (1997). The electric warship II. *IMarE Trans*.
- Hodge CG, Mattick DJ. (2001). The electric warship VI. *IMarE Trans 2001*.
- Hodge CG, Mattick DJ. (2008). The electric warship then, now and later. *9th international naval engineering conference*.
- IMO. (2011). *International convention for the prevention of pollution from ships (MARPOL) annex VI. Consolidated edition*. International Maritime Organization.
- IMO. (2014). *Third IMO greenhouse gas study 2014, executive summary and final report*. London: International Maritime Organisation.
- JS, C. (2012). *Marine propulsion and propellers* (3rd εκδ.). London: Butterworth Heinemann.
- Karim N, Lisner R, Kazemi H, Annaz F. (2002). Rule-based power management for the all-electric ship. *Australian University power engineering conference 2002*. Melbourne.
- Klein Woud H, Stapersma D. (2012). *Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems*. London: IMarEST.
- Ko J, Jin D, Jang W, Myung C-L, Kwon S, Park S. (2017). Comparative investigation of NO_x emission characteristics from a Euro 6-compliant diesel passenger car over the NEDC and WLTC at various ambient temperatures. *Applied Energy*.
- Koot M, Kessels J, de Jager B, Heemels W, van den Bosch W, Steinbuch M. (2005). Energy management strategies for vehicular electric power systems. *IEEE Trans Veh Technol*.
- Lan H, Wen S, Hong Y-Y, Yu DC, Zhang L. (2015). Optimal sizing of hybrid PV/ diesel/battery in ship power system. *Appl Energy*.

- Leites K, Bauschulte A, Dragon M, Krummrich S, Nehter P. Schibz. (2012). design of different diesel based fuel cell systems for seagoing vessels and their evaluation. *ECS transactions*.
- Limited, C. M. (2015). *Hybrid ferries project*. Ανάκτηση από <http://www.cmassets.co.uk/project/hybrid-ferries-project/>
- LLJ., M. (1992). *Diesel generator handbook* (Τόμ. 1st ed). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Loyd C, Simpson R, Reid G. (2003). The Type 45 destroyer – powering to success. *Proceedings of the all electric ship conference*. London.
- Mattick D, Benatmane M, McVea N, Gerrard R. (2005). The electric ship technology demonstrator: 12 inches to the foot. *IMarEST all electric ship conference 2005*. Versailles.
- N., X. (2002). *Robust Control of Diesel Ship Propulsion - Advances in Industrial Control*. London: Springer-Verlag.
- OJ., S. (2014). DC: is it the alternative choice for naval power distribution? *12th international naval engineering conference*. Amsterdam.
- Öster H. (2019). Low loss concept offers improved performance at lower cost. *Twentyfour7, Wärtsilä stakeholder magazine*.
- Ovrum E, Bergh TF. (2015). Modelling lithium-ion battery hybrid ship crane operation. *Appl Energy*.
- Parker MN, Geertsma RD, Hodge CG, Macalindin A, Simmonds OJ. (2009). The impact of future combat system loads on power system design. *Proceedings of the engine as a weapon III conference*. Portsmouth.
- Psoma A, Sattler G. (2002). Fuel cell systems for submarines: from the first idea to serial production. *Power Sources*.
- R, O. (2009). Navy DDG-1000 and DDG-51 destroyer programs: background, oversight issues, and options for congress. *Congressional research service, report ADA 500951*.
- R, V. (1998). Commercial experience with electric propulsion on passenger cruise vessel. *Proceedings of the IMarE all electric ship conference*. London.
- R., B. (2013). The hybrid propulsion system as an alternative for offshore vessels servicing and supporting remote oil field operations. *Annual offshore technology conference*.
- R., V. (1998). Commercial experience with electric propulsion on passenger cruise vessels. *IMarE all electric ship conference*. London.
- R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman. (2017). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart. *Applied Energy*.
- Rampen P, Breijs A. (2014). *Energy management system optimising trial results*.

- Raptosiasios S, Sakellaridis NF, Papagiannakis RG, Hountalas DT. (2015). Application of a multi-zone combustion model to investigate the NO_x reduction potential of two-stroke marine diesel engines using EGR. *Applied Energy*.
- Roskilly AP, Palacin R, Yan J. (2015). Novel technologies and strategies for clean transport systems. *Applied Energy*.
- Sciarretta A, Serrao L, et al. (2014). A control benchmark on the energy management of a plug in hybrid electric vehicle. *Control engineering practice*.
- Seenumani G, Sun J, Peng H. (χ.χ.). Real-time power management of integrated power systems in all electric ship leveraging multi time scale property. *Trans Contr Syst Technol*.
- Silvas E, Hofman T, Serebrenik A, Steinbuch M. (2015). Functional and cost-based automatic generator for hybrid vehicles topologies. *IEEE/ASME Trans Mechatronics*.
- Skaar I, Angeltveit K, Urheim M. Wärtsilä. (2012). LLC helps achieve highest possible ERN number. *Wärtsilä Tech J*.
- Stapersma D, Grimmeliuss HT. (2009). A fresh view on propulsion control II. *Proceedings of the 14th international ship control systems symposium*. Ottawa.
- Stapersma D, Schulten PJM, Grimmeliuss HT. (2004). A fresh view on propulsion control. *Proceedings of the 7th international naval engineering*.
- Sulligoi G, Castellan S, Aizza M, Bosisch D, Piva L, Lipardi G. (2012). Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigates integrated power system: Modelling and validation. *21st international symposium on power electronics, electrical drives, automation and motion*.
- T., V. (χ.χ.). *Hybrid propulsion concepts on ships*. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni.
- Topaloglou S, Paplambrou G, Kyrtatos N. (2016). Energy management controller design for hybrid ship propulsion during transient operation. *Proceedings of 28th CIMAC congress*.
- Van Biert L, Godjevac M, Visser K, Aravind PV. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Power Sources*.
- van Loon PT, van Zon P. (2016). From operational profile to hybrid propulsion. *Proceedings of the 24th international HISWA symposium on yacht design and*. Amsterdam.
- Van Spronsen P, Toussain R. (2001). An optimal control approach to preventing. *Proceedings of the IFAC conference on control applications in marine*. Glasgow.
- Vanderpump D, Benatmane M, Murray PT. (2002). The Type 45 destroyer power and propulsion system. *Proceedings of the 6th international naval engineering conference*.

- Verschaeren R, Schaepdryver W, Serruys T, Bastiaen M, Vervaeke L, Verhelst S. (2014). Experimental study of NOx reduction on a medium speed heavy duty diesel engine. *Energy*.
- Vrijdag A, Stapersma D, van Terwisga T. (2008). Trade-offs in ship propulsion control: engine overloading and cavitation inception in operational conditions. *Proceedings of the 9th international naval engineering conference*. Hamburg.
- Wijsmuller M, Hasselaar T. (2007). Optimisation of the propulsion arrangement in emergency towing vessels. *Ship and boat international*.
- Wijsmuller M, Hasselaar T. (2007). Optimisation of the propulsion arrangement in emergency towing vessels. *Ship and boat international*.
- Wirasingha SG, Emadi A. (2011). Classification and review of control strategies for plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Trans Veh Technol*.
- Zadeh MK, Zahedi B, Molinas M, Norum LE. (2013). Centralised stabilizer for marine DC microgrid. *Proceedings of the 39th annual conference of the IEEE industrial electronics society*. Vienna.
- Zahedi B, Norum LE, Ludwigsen KB. (2014). Optimised efficiency of all-electric ship by DC hybrid power systems. *Power Sources*.
- Zahedi B, Norum LE. (2013). Modelling and simulation of all-electric ships with low voltage. *IEEE Trans Power Electron*.