

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών



Διπλωματική εργασία

«Διερεύνηση αξιοποίησης συστημάτων αξονικών γεννητριών
(ΡΤΙ/ΡΤΟ) σε δεξαμενόπλοια τύπου VLCC»

Όνοματεπώνυμο: Γεώργιος Προμπονάς

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Προυσαλίδης

Μάρτιος 2021

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Ιωάννη Προυσαλίδη για την άψογη συνεργασία και το συντονισμό που παρείχε καθ' όλα τα στάδια της μελέτης και της συγγραφής. Η συνεχής και άμεση βοήθεια που προσέφερε με τις γνώσεις του υπήρξε καθοριστική για το αποτέλεσμα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κύριο Γιώργο Δημόπουλο από τον νηογνώμονα DNV GL, για τη διάθεση πολύτιμων δεδομένων και πληροφοριών, καθώς και για τον χρόνο που αφιέρωσε σε προβληματισμούς που προέκυπταν κατά την εξέλιξη της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα αγαπημένα μου πρόσωπα και κυρίως την οικογένεια μου για την συνεχή στήριξη και ενθάρρυνσή τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου και της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει από οικονομική σκοπιά, την εγκατάσταση ενός συστήματος αξονικής γεννήτριας με διαθέσιμη την λειτουργία PTO (Power Take Off), σε ένα δεξαμενόπλοιο τύπου VLCC, για την κάλυψη των απαιτήσεών του σε ηλεκτρικό φορτίο. Αρχικά, γίνεται εισαγωγή στην έννοια των γεννητριών άξονα και στα οφέλη που προκύπτουν από τις διάφορες λειτουργίες τους, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στις διαφορετικές κατηγορίες και διατάξεις που παρουσιάζει η λειτουργία PTO. Επιπλέον, περιγράφεται η αλληλεπίδραση μεταξύ της κύριας μηχανής και της αξονικής γεννήτριας, καθώς και τα κριτήρια τα οποία είναι ανάγκη να πληρούνται, προκειμένου να καθίσταται δυνατή η αξιόπιστη λειτουργία και των δύο μηχανολογικών συστημάτων. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η μελέτη της εν λόγω εφαρμογής στο υπό μελέτη πλοίο. Για την διαστασιολόγηση της εγκατάστασης, λαμβάνονται υπόψη το προφίλ λειτουργίας του πλοίου, το σχέδιο ηλεκτρικού ισολογισμού και τα εγχειρίδια λειτουργίας του κινητήρα και των ηλεκτρομηχανών. Με όλα τα απαραίτητα στοιχεία διαθέσιμα, λοιπόν, πραγματοποιείται η οικονομική ανάλυση της εφαρμογής, της οποίας τα αποτελέσματα αποδεικνύονται κερδοφόρα. Αναφορά γίνεται επίσης και στην εγκατάσταση μπαταριών στο σύστημα, ώστε να εξετασθεί αν είναι δυνατή και συμφέρουσα η εκμετάλλευση της περίσσιας ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας άξονα. Τέλος, προσδιορίζεται η θετική συνεισφορά της επιλεγμένης διάταξης στον υπολογισμό του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας EEDI.

Abstract

This diploma thesis refers to the installation of a shaft generator system with an available PTO (Power Take Off) mode at a type VLCC oil tanker for the coverage of the electronic load requirements, from an economic perspective. First of all, the concept of shaft generators and their benefits are introduced focusing on the different types and configurations of the PTO operation. In addition, the interaction of the main engine and the shaft generator as well as the fulfilment of the criteria for the effective operation of both machines are outlined and followed by the study of this application in the under study vessel. The vessel operation profile, the electronic load analysis plan and the operation manuals of the main engine and the diesel generators are taken into account for the dimensioning of the installation. Having access in all the information required, the economic analysis of the implementation is fulfilled showing profitable results. The study is also referred to the implementation of batteries in the system in order to consider if the use of the surplus electrical power of the shaft generator is possible and economically advantageous. However, in the present case the results do not present profit. Finally, the study defines the positive contribution of the shaft generator configuration to the calculation of the energy efficiency design index EEDI.

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|--|----|
| Πρόλογος..... | 7 |
| 1. Εισαγωγή..... | 9 |
| 1.1. Ιστορική αναδρομή..... | 9 |
| 1.2. Λειτουργίες αξονικών γεννητριών..... | 10 |
| 1.2.1. Power Take off (PTO)..... | 11 |
| 1.2.2. Power Take in (PTI)..... | 11 |
| 1.2.3. Υβριδική λειτουργία | 12 |
| 1.3. Επιδράσεις των γεννητριών άξονα στη σημερινή εποχή..... | 13 |
| 1.3.1. Slow Steaming..... | 13 |
| 1.3.2. Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EEDI)..... | 14 |
| 2. Τύποι και διατάξεις αξονικών γεννητριών λειτουργίας PTO..... | 17 |
| 2.1. Τύποι αξονικών γεννητριών..... | 17 |
| 2.1.1. PTO/GCR (Gear Constant Ratio)..... | 17 |
| 2.1.2. PTO/RCF (Renk Constant Frequency)..... | 19 |
| 2.1.3. PTO/CFE (Constant Frequency Electrical)..... | 20 |
| 2.2. Διατάξεις αξονικών γεννητριών..... | 23 |
| 2.2.1. Σύστημα PTO εγκατεστημένο πλώρα και εντός της κύριας μηχανής (BW I)..... | 24 |
| 2.2.2. Σύστημα PTO εγκατεστημένο πλώρα και εκτός της κύριας μηχανής (BW II)..... | 24 |
| 2.2.3. Σύστημα PTO εγκατεστημένο πλώρα και πλευρικά της κύριας μηχανής (BW III)..... | 25 |
| 2.2.4. Σύστημα PTO εγκατεστημένο πρύμνα και πλευρικά της κύριας μηχανής (BW IV)..... | 25 |
| 2.2.5. Σύστημα PTO εγκατεστημένο πάνω στον ενδιάμεσο άξονα (SMG)..... | 26 |
| 2.2.6. Σύστημα PTO εγκατεστημένο πλώρα του στροφαλοφόρου άξονα (DMG)..... | 28 |
| 3. Επίδραση της λειτουργίας PTO στη φόρτιση της κύριας μηχανής..... | 29 |
| 3.1. Περιθώρια ισχύος και στροφών κύριας μηχανής και έλικας..... | 29 |
| 3.2. Διάγραμμα φόρτισης κινητήρα με εγκατεστημένη λειτουργία PTO..... | 32 |
| 4. Μελέτη εγκατάστασης συστήματος αξονικής γεννήτριας PTO σε δεξαμενόπλοιο τύπου VLCC..... | 37 |
| 4.1. Το υπό μελέτη πλοίο..... | 37 |
| 4.2. Προφίλ λειτουργίας..... | 39 |
| 4.3. Διάγραμμα φόρτισης κινητήρα..... | 42 |
| 4.4. Διαστασιολόγηση του συστήματος PTO..... | 45 |
| 4.4.1. Γεννήτρια άξονα..... | 46 |
| 4.4.2. Σύστημα γραναζοκιβωτίων..... | 50 |
| 4.4.3. Σύγχρονος πυκνωτής..... | 52 |
| 4.5. Οφέλη της επιλεγμένης εγκατάστασης PTO..... | 53 |

| | | |
|----------|---|----|
| 4.5.1. | Κατανάλωση καυσίμου..... | 53 |
| 4.5.2. | Ώρες λειτουργίας γεννητριών ντίζελ..... | 58 |
| 4.6. | Οικονομική ανάλυση των αποτελεσμάτων..... | 59 |
| 5. | Σύστημα μπαταριών..... | 64 |
| 5.1. | Τεχνολογία μπαταριών..... | 64 |
| 5.1.1. | Μπαταρίες ιόντων λιθίου..... | 65 |
| 5.1.1.1. | Κάθοδος νικελίου-μαγνησίου-κοβαλτίου (NMC)..... | 66 |
| 5.1.1.2. | Κάθοδος λιθίου-σιδήρου-φωσφόρου (LFP)..... | 67 |
| 5.2. | Διαστασιολόγηση διάταξης μπαταριών στο υπό μελέτη πλοίο..... | 67 |
| 5.3. | Εξέταση της βιωσιμότητας της επένδυσης..... | 69 |
| 6. | Επίδραση της λειτουργίας ΡΤΟ στην τιμή του δείκτη EEDI..... | 73 |
| 6.1. | Υπολογισμός απαιτούμενης τιμής του δείκτη EEDI για το υπό μελέτη πλοίο..... | 73 |
| 6.2. | Αναλυτικός τύπος υπολογισμού του δείκτη EEDI και περιγραφή των παραγόντων του..... | 74 |
| 6.3. | Υπολογισμός του δείκτη EEDI του υπό μελέτη πλοίου χωρίς την εγκατάσταση αξονικής γεννήτριας..... | 77 |
| 6.4. | Υπολογισμός του δείκτη EEDI του υπό μελέτη πλοίου με εγκατεστημένο σύστημα αξονικής γεννήτριας..... | 78 |
| 7. | Συμπεράσματα..... | 81 |
| 7.1. | Προτάσεις για επόμενη εργασία..... | 81 |
| | Βιβλιογραφία..... | 83 |
| | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Απαιτήσεις άεργου ισχύος υπό μελέτη πλοίου στη κατάσταση εν πλω..... | 85 |

Πρόλογος

Οι γεννήτριες άξονα, πρόκεινται, κατά κανόνα, για σύγχρονες γεννήτριες οι οποίες λαμβάνουν την μηχανική ισχύ από την κύρια μηχανή πρόωσης του πλοίου και όχι από μια δευτερεύουσα μηχανή εσωτερικής καύσης. Η ανάπτυξη τους ξεκίνησε την δεκαετία του 1980 εξαιτίας τα ανάγκης που υπήρχε για εξοικονόμηση καυσίμου. Η υψηλότερη αποδοτικότητα που παρουσιάζει η κύρια μηχανή συγκριτικά με τις γεννήτριες ντίζελ όσον αφορά την ειδική κατανάλωση καυσίμου, αποτελεί το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της εν λόγω μεθόδου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία καλείται λειτουργία “Power Take Off” (PTO mode). Ωστόσο, ζητήματα όπως η μεταβολή της συχνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος, εξαιτίας της διακύμανσης του φορτίου της έλικας και οι περιορισμοί που προκύπτουν εξαιτίας της άμεσης σύνδεσης με την κύρια μηχανή, συχνά προβληματίζουν στην επιλογή τους. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό, πως απαιτείται μελέτη και ανάλυση, προκειμένου να εξετασθεί αν η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω αξονικών γεννητριών αποτελεί κερδοφόρα επένδυση για ένα πλοίο.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, λοιπόν, είναι η τεχνοοικονομική μελέτη της εφαρμογής PTO, σε ένα δεξαμενόπλοιο τύπου VLCC με κύρια μηχανή ισχύος 24020 kW (MCR) και απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ 1146.8 kW όταν βρίσκεται εν πλω. Επιπλέον, εξετάζεται η εγκατάσταση μπαταριών ιόντων λιθίου χωρητικότητας 4,86 MWh για την αποθήκευση περίσσιας παραγόμενης ενέργειας του συστήματος και την εκμετάλλευση της σε περιπτώσεις που η λειτουργία της γεννήτριας άξονα δεν καθίσταται δυνατή. Η μείωση του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας EEDI είναι ακόμη ένα σημαντικό όφελος της λειτουργίας PTO, το οποίο αποδεικνύεται και για το υπό μελέτη πλοίο.

Στη συνέχεια δίνεται μια σύντομη περιγραφή της δομής της εργασίας:

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η εξέλιξη των γεννητριών άξονα από την αρχή της εμφάνισής τους στον χώρο της ναυτηλίας έως σήμερα, με ιδιαίτερη αναφορά να δίνεται στις διαθέσιμες λειτουργίες των γεννητριών και στην επίδρασή τους στην σύγχρονη πρακτική του Slow Steaming και στην τιμή του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας EEDI.

Στο κεφάλαιο 2 αναπτύσσονται οι διάφοροι τύποι και διατάξεις των γεννητριών άξονα λειτουργίας PTO σύμφωνα με την MAN B&W.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η αλληλεπίδραση μεταξύ της κύριας μηχανής και της αξονικής γεννήτριας και δίνεται βαρύτητα στο τρόπο με τον οποίο μεταβάλλονται οι καμπύλες του διαγράμματος φόρτισης του κινητήρα εξαιτίας της λειτουργίας PTO.

Στο κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται η μελέτη και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εγκατάσταση ενός συστήματος αξονικής γεννήτριας στο υπό μελέτη δεξαμενόπλοιο VLCC. Καταρχάς, γίνεται η διαστασιολόγηση της γεννήτριας, του αυξητήρα στροφών και του σύγχρονου πυκνωτή, ενώ στην συνέχεια εξετάζεται αν η επένδυση χαρακτηρίζεται κερδοφόρα, συγκρίνοντας τα έξοδα λειτουργίας του πλοίου πριν και μετά την εγκατάσταση.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται μια προσπάθεια εκμετάλλευσης της περίσσιας ισχύος της αξονικής γεννήτριας αποθηκεύοντας την ενέργεια που προκύπτει σε συστήματα μπαταριών.

Στο κεφάλαιο 6 συγκρίνονται οι τιμές του δείκτη EEDI του υπό μελέτη πλοίου, πριν και μετά την εφαρμογή της λειτουργίας PTO.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη και την ανάλυση της εφαρμογής των αξονικών γεννητριών και ακόμη παρατίθενται προτάσεις μελέτης και έρευνας που θα μπορούσαν να απασχολήσουν επόμενη εργασία.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται οι απαιτήσεις σε άεργο ισχύ όλων των μηχανημάτων του πλοίου στην κατάσταση εν πλω, στην οποία λειτουργεί η αξονική γεννήτρια, από το άθροισμα

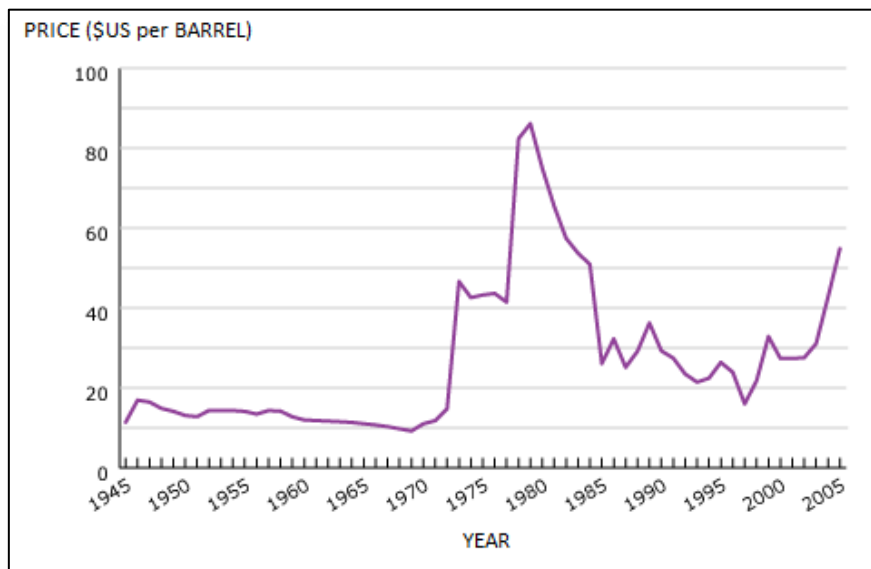
των οποίων προκύπτει η τιμή της συνολικής απαίτησης σε άεργο ισχύ που είναι πολύ χρήσιμη για την διαστασιολόγηση του σύγχρονου πυκνωτή.

1. Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια σε ένα πλοίο είναι ζωτικής σημασίας για την ομαλή και την ασφαλή λειτουργία του και η παραγωγή της αποτελεί συχνά αντικείμενο μελέτης, ώστε να γίνεται όσο το δυνατόν πιο οικονομικά. Οι δυο βασικοί τρόποι με τους οποίους παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια σε ένα πλοίο είναι οι γεννήτριες ντίζελ και οι αξονικές γεννήτριες (shaft generators). Η κύρια διαφορά τους παρουσιάζεται στο γεγονός πως οι γεννήτριες άξονα λαμβάνουν την απαιτούμενη μηχανική ισχύ από το αξονικό σύστημα προώσεως του πλοίου, σε αντίθεση με τις ντιζελογεννήτριες που, ως γνωστόν, παρουσιάζουν πλήρη ανεξαρτησία από το εν λόγω σύστημα.

1.1. Ιστορική αναδρομή

Οι δεκαετίες του 1970 και 1980 στιγμάτισαν την ναυτιλία, εξαιτίας της πετρελαϊκής κρίσης (Οκτώβριος 1973 – Μάρτιος 1974), όταν τα μέλη του Οργανισμού Εξαγωγών Πετρελαιοπαραγωγών Χωρών (OPEC), αποτελούμενου από τις αραβικές χώρες του περσικού κόλπου, την Συρία, την Αίγυπτο και την Τυνησία, διακήρυξαν εμπάργκο πετρελαίου. Αποτέλεσμα της κρίσης, ήταν η μεγάλη αύξηση στην τιμή του πετρελαίου, όπως παρατηρείται και στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 1.1). Συνεπώς, η ανάγκη για την εύρεση τρόπων εξοικονόμησης καυσίμου ήταν επιτακτική, για την βιωσιμότητα των εταιριών και γενικότερα του εμπορίου.



Σχήμα 1.1: Μεταβολή παγκόσμιας τιμής του πετρελαίου [1]

Μία από τις κυριότερες πρακτικές, που καθιερώθηκε εκείνη την χρονική περίοδο, ήταν η ευρεία χρήση αξονικών γεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με μεγάλες δίχρονες κύριες μηχανές ντίζελ. Το μεγάλο πλεονέκτημα ήταν το γεγονός πως οι γεννήτριες άξονα, καθώς λαμβάνουν μηχανική ισχύ από τις κύριες δίχρονες μηχανές, λειτουργούσαν με βαρύ πετρέλαιο το οποίο ήταν, με σημαντική διαφορά, το οικονομικότερο είδος πετρελαίου, το οποίο οι τετράχρονες ντιζελογεννήτριες αδυνατούσαν να

καταναλώσουν εκείνη την εποχή. Επίσης, ο βαθμός απόδοσης των δίχρονων κινητήρων ντίζελ είχε υψηλότερες τιμές από τον αντίστοιχο των τετράχρονων, με αποτέλεσμα η ειδική κατανάλωση του καυσίμου να είναι μικρότερη στην πρώτη περίπτωση, γεγονός το οποίο παρατηρείται και σήμερα. Επομένως, η ώθηση των εταιριών στην χρήση αξονικών γεννητριών οφείλεται κυρίως σε οικονομικούς λόγους.

Παρά τα σημαντικά οικονομικά οφέλη της μεθόδου των γεννητριών άξονα για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα πλοίο, αρκετά ήταν τα προβλήματα τα οποία παρατηρούνταν. Το σημαντικότερο εξ αυτών, ήταν η άμεση εξάρτηση των στροφών της γεννήτριας από τις στροφές της έλικας του πλοίου. Οι μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής του ελικοφόρου άξονα σε περιπτώσεις ελιγμών, καιρού και διέλευσης καναλιών οδηγούσαν είτε σε αδυναμία λειτουργίας της γεννήτριας άξονα εξαιτίας υπερφόρτωσης του κινητήρα, είτε σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταβαλλόμενης τάσης και συχνότητας με την οποία είναι αδύνατη η λειτουργία των περισσότερων ηλεκτρικών μηχανημάτων του σκάφους. Επίσης, για την λειτουργία της γεννήτριας όταν το πλοίο βρισκόταν αγκυροβολημένο στο λιμάνι απαιτείτο η χρήση συμπλέκτη για την επιτυχή αποσύμπλεξη του άξονα της έλικας από τον άξονα της γεννήτριας, κάτι το οποίο αποφεύγεται ακόμα και σήμερα κυρίως λόγω κόστους και πολυπλοκότητας κατασκευής.

Το παραπάνω πρόβλημα των μεταβλητών στροφών οδήγησε στην επιτακτική ανάγκη εύρεσης μιας λύσης, έτσι ώστε να καθίσταται συμφέρουσα και αξιόπιστη η χρήση γεννήτριας άξονα για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι βασικές λύσεις αφορούν, μεμονωμένα ή συνδυαστικά, είτε στην σταθεροποίηση των στροφών της γεννήτριας με την τοποθέτηση κατάλληλων γραναζοκηβωτίων και συνδυασμό γραναζιών μεταξύ της γεννήτριας και του ελικοφόρου άξονα για κατάλληλη μετάδοση της κίνησης, είτε στην σταθεροποίηση της μεταβλητής τάσης και συχνότητας του ρεύματος της γεννήτριας με τοποθέτηση ενός συστήματος θιρίστορς και σύγχρονου πυκνωτή. Οι δύο μέθοδοι, οι οποίες θα περιγραφούν αναλυτικά στην συνέχεια, έλυσαν σε μεγάλο βαθμό το πρόβλημα, αλλά όχι εξ ολοκλήρου. Με τα διάφορα μηχανήματα τα οποία παρεμβάλλονταν μεταξύ του ελικοφόρου, της γεννήτριας και του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου συχνά ανακύπτουν ζητήματα, όπως η μειωμένη απόδοση του συστήματος και η χαμηλή ποιότητα ηλεκτρικού ρεύματος.

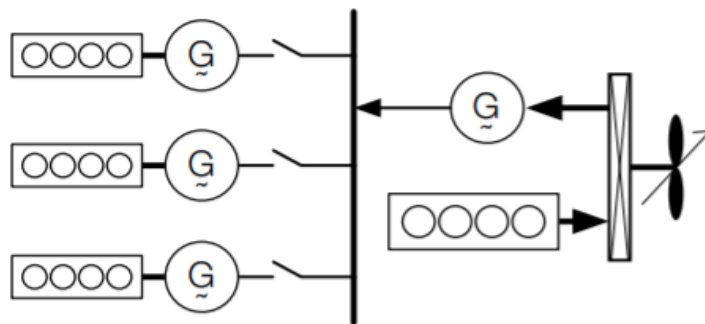
Σήμερα, η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει δώσει την δυνατότητα στις γεννήτριες ντίζελ να είναι αποδοτικότερες από ότι ήταν παλαιότερα και να λειτουργούν με το ίδιο καύσιμο που λειτουργούν και οι μεγάλοι δίχρονοι κινητήρες. Το καύσιμο αυτό, μετά τον νέο κανονισμό του IMO, ο οποίος τέθηκε σε ισχύ από τη 1 Ιανουαρίου 2020, δεν μπορεί να ξεπερνάει το 0.5% περιεκτικότητας σε θείο. Επομένως, το οικονομικό βαρύ πετρέλαιο (HFO), το οποίο έχει περιεκτικότητα σε θείο περίπου 3.5%, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την λειτουργία της κύριας μηχανής και των γεννητριών ντίζελ μόνο σε περίπτωση τοποθέτησης ενός συστήματος scrubbers για το φιλτράρισμα των καυσαερίων. Η νέα αυτή συνθήκη λειτουργίας των ντιζελογεννητριών, σε συνδυασμό με τα προαναφερθέντα προβλήματα των αξονικών γεννητριών, θέτουν το ερώτημα αν πλέον οι γεννήτριες άξονα είναι περισσότερο συμφέρουσες από τις ντιζελογεννήτριες για να καλύψουν τις ανάγκες του πλοίου σε ηλεκτρική ενέργεια. Πάνω στον προβληματισμό αυτό θα βασιστεί η παρούσα εργασία.

1.2. Λειτουργίες Αξονικών Γεννητριών

Οι γεννήτριες άξονα έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν με δύο διαφορετικούς τρόπους, μεμονωμένα αλλά και συνδυαστικά. Οι δύο βασικές λειτουργίες είναι η Power Take Off (PTO) και η Power Take In (PTI).

1.2.1. Power Take Off (PTO)

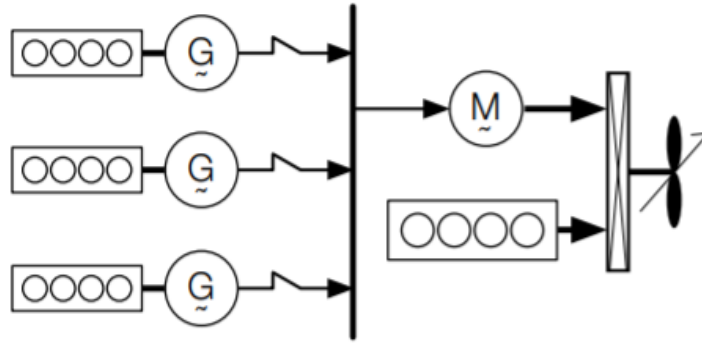
Η PTO είναι λειτουργία που αναφέρθηκε προηγουμένως και πάνω στην οποία θα βασιστεί η μελέτη της παρούσας εργασίας. Η αξονική γεννήτρια λειτουργεί ως γεννήτρια η οποία λαμβάνει μηχανική ισχύ από τον άξονα της κύριας μηχανής και παράγει ηλεκτρική ενέργεια που είτε οδηγείται στο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου καλύπτοντας τις ανάγκες του σε ηλεκτρισμό, είτε αποθηκεύεται σε κατάλληλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες. Βασικό πλεονέκτημα είναι η αύξηση του φορτίου της κύριας μηχανής, η οποία έχει χαμηλότερες τιμές ειδικής κατανάλωσης καυσίμου από τις ντιζελογεννήτριες, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση καυσίμου και τη μείωση των εκπομπών ριπών. Επιπλέον, τα έξοδα συντήρησης των γεννητριών ντιζελ μπορούν να μειωθούν σημαντικά, απενεργοποιώντας τις όταν οι αξονικές γεννήτριες αναλαμβάνουν όλες τις απαιτήσεις του πλοίου σε ηλεκτρισμό και η λειτουργία των πρώτων δεν είναι απαραίτητη.



Σχήμα 1.2: Λειτουργία Power Take off (PTO mode) [2]

1.2.2. Power Take In (PTI)

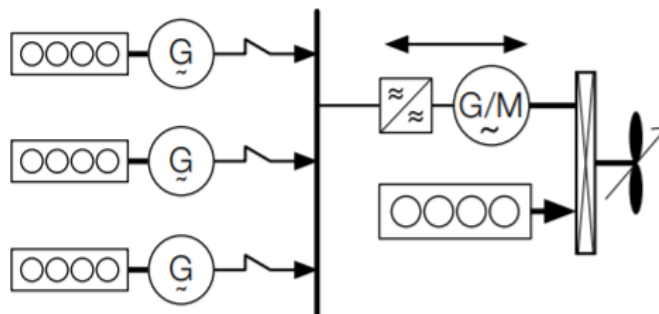
Η PTI λειτουργία δεν θα απασχολήσει την παρούσα εργασία, παρόλα αυτά αξίζει να αναφερθεί στο πλαίσιο της μελέτης των αξονικών γεννητριών. Στη προκειμένη περίπτωση η αξονική γεννήτρια λειτουργεί ως ηλεκτρικός κινητήρας (μοτέρ), ο οποίος λαμβάνει ηλεκτρική ενέργεια από τις γεννήτριες ντιζελ και προσδίδει μηχανική ισχύ στον άξονα της κύριας μηχανής. Επομένως, η έλικα του πλοίου δε κινείται αποκλειστικά από την κύρια μηχανή, αλλά δέχεται και υποβοήθεια από την αξονική γεννήτρια/μοτέρ που κινείται από τις ντιζελογεννήτριες. Η λειτουργία PTI προσφέρει αρκετά μεγαλύτερη ευελιξία στο σύστημα προώσεως του πλοίου, καθώς είναι δυνατή η επίτευξη υψηλών ταχυτήτων χωρίς να υπερφορτώνεται η κύρια μηχανή, γεγονός χρήσιμο σε αρκετές περιπτώσεις όπως σε συνθήκες κακοκαιρίας. Επιπλέον, η μείωση του φορτίου της κύριας μηχανής επιφέρει ελάττωση των δονήσεων και των θορύβων που προέρχονται από το μηχανοστάσιο, γεγονός σημαντικό σε επιβατηγά πλοία και δεξαμενόπλοια για την μεγαλύτερη άνεση των επιβατών/πελατών. Ωστόσο, το αυξημένο φορτίο των λιγότερο αποδοτικών -συγκριτικά με τη κύρια μηχανή- ντιζελογεννητριών έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση καυσίμου και εκπομπών ριπών, γεγονός που περιορίζει την χρήση της λειτουργίας PTI σε μικρό αριθμό περιπτώσεων.



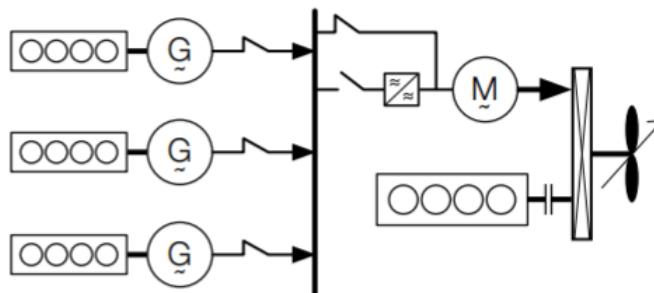
Σχήμα 1.3: Λειτουργία Power Take In (PTI mode) [2]

1.2.3. Υβριδική Λειτουργία

Υβριδική λειτουργία καλείται ο συνδυασμός των δύο παραπάνω λειτουργιών (PTO, PTI). Η αξονική γεννήτρια λειτουργεί ως γεννήτρια αλλά και ως ηλεκτρικός κινητήρας με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται αύξηση της αποδοτικότητας και της ευελιξίας του συστήματος πρόωσης παράλληλα. Στο μηχανισμό αυτό περιλαμβάνεται και η λειτουργία Power Take Home (PTH), η οποία παρέχει την δυνατότητα κυρίως σε μικρά πλοία χωρίς πολύ μεγάλες απαιτήσεις ισχύος ρυμούλκησης, η έλικα να κινείται αποκλειστικά από την γεννήτρια/μοτέρ άξονα, με αποτέλεσμα να καθίσταται δυνατή η κίνηση του πλοίου σε επείγουσα κατάσταση βλάβης της κύριας μηχανής. Επιπλέον, είναι δυνατή η χρήση της γεννήτριας άξονα ως ενίσχυση για την ταχεία πτώση των στροφών της κύριας μηχανής σε περίπτωση που αυτή είναι αναγκαία για την αποφυγή ατυχήματος (crash stop).



Σχήμα 1.4: Υβριδική λειτουργία (Hybrid Mode) [2]



Σχήμα 1.5: Λειτουργία Power Take Home (PTH mode) [2]

1.3. Επίδραση των γεννητριών άξονα τη σημερινή εποχή

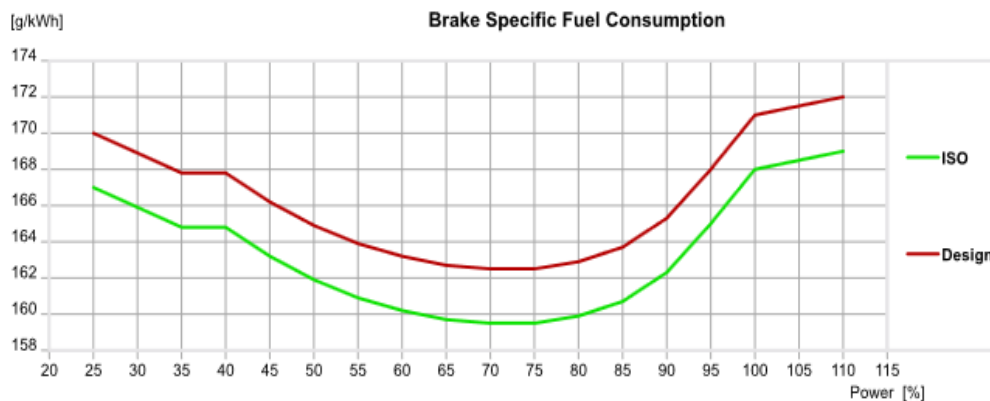
Την τελευταία δεκαετία παρατηρούνται στο χώρο της ναυτιλίας συνεχείς αλλαγές που έχουν ως στόχο την εξοικονόμηση καυσίμου και την προστασία του περιβάλλοντος από την εκπομπή ριπών. Δύο από αυτές τις αλλαγές, τις οποίες είναι δυνατόν να επηρεάσει η χρήση των αξονικών γεννητριών, είναι το φαινόμενο του slow steaming και η καθιέρωση του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας (EEDI) από τον IMO.

1.3.1. Slow Steaming

Ο όρος του slow steaming αναφέρεται στην πρακτική κατά την οποία τα μεγάλα υπερωκεάνια φορτηγά πλοία, κυρίως τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships), λειτουργούν με ταχύτητα πλεύσης σημαντικά μικρότερη από την μέγιστη ταχύτητα τους με κύριο στόχο την εξοικονόμηση καυσίμου. Το φαινόμενο αυτό βασίζεται στην σχέση που συνδέει την αντίσταση που δέχεται το πλοίο από το νερό με την ταχύτητα του, η οποία σύμφωνα με τις αρχές της ρευστομηχανικής, είναι εκθετική. Συνεπώς, με την μείωση της ταχύτητας υπηρεσίας μειώνεται εκθετικά η αντίσταση του πλοίου, με αποτέλεσμα η ισχύς ρυμούλκησης που απαιτείται, και ορίζεται ως το γινόμενο των δυο μεγεθών, να μειώνεται επίσης σε μεγάλο βαθμό και, τέλος, να επιτυγχάνεται ελάττωση της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου.

Το slow steaming προσέφερε σημαντικά οικονομικά οφέλη στις εταιρίες εξαιτίας της εξοικονόμησης του καυσίμου, του οποίου η τιμή μετά την κρίση του 2008 έχει παρουσιάσει μεγάλη αύξηση. Παρόλα αυτά, το γεγονός πως η κύρια μηχανή λειτουργεί με πολύ χαμηλή ισχύ, σε επίπεδα χαμηλότερα του 60% της μέγιστης προβλεπόμενης τιμής του κατασκευαστή, προκαλεί αρκετά προβλήματα.

Εκτός από μηχανολογικά ζητήματα που αφορούν κυρίως στην λειτουργία του υπερπληρωτή και του συστήματος λιπάνσεως των κυλίνδρων, τα οποία δεν θα απασχολήσουν την παρούσα μελέτη, σημαντική είναι η μείωση της αποδοτικότητας του κινητήρα. Ο βαθμός απόδοσης της κύριας μηχανής περιορίζεται ιδιαίτερα και, συνεπώς, η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται σε μη επιθυμητά επίπεδα. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.6), στο οποίο παρουσιάζεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου μιας μηχανής της WIN GD -για καταστάσεις ISO και σχεδίασης- σε συνάρτηση με την ισχύ της και το οποίο είναι αντίστοιχο ποιοτικά για τις περισσότερες δίχρονες ναυτικές μηχανές, παρατηρείται πως καθώς η ισχύς μειώνεται σε τιμές μικρότερες του 70% της μέγιστης, η ειδική κατανάλωση αυξάνεται.



Σχήμα 1.6: Ενδεικτική τιμή ειδική κατανάλωση καυσίμου κύριας μηχανής συναρτήσει της ισχύος λειτουργίας της [3]

Η χρήση αξονικών γεννητρών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (λειτουργία ΡΤΟ) έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά οφέλη όσον αφορά το παραπάνω θέμα. Με την εκμετάλλευση της περίσσιας ισχύος που προκύπτει λόγω του slow steaming, προκαλείται αύξηση του φορτίου του κινητήρα και συνεπώς και της ισχύος του, καθώς πέρα από τις απαιτήσεις για την ρυμούλκηση του πλοίου καλείται να καλύψει και τις απαιτήσεις της γεννήτριας άξονα για μηχανική ισχύ. Το σημαντικό είναι πως παράλληλα με την αύξηση του φορτίου, οι στροφές και η ταχύτητα του πλοίου δεν μεταβάλλονται, αλλά παραμένουν στα επιθυμητά, για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, επίπεδα. Επομένως, η χρήση αξονικών γεννητριών προκαλεί μείωση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου και αύξηση της αποδοτικότητας του κινητήρα στην περίπτωση του slow steaming, γεγονός με σημαντικό οικονομικό αντίκτυπο στην λειτουργία ενός πλοίου.

1.3.2. Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EEDI)

Ως γνωστόν, το φαινόμενο του θερμοκηπίου στις μέρες μας έχει δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον και κατ' επέκταση στην ζωή των ανθρώπων. Πρόσφατες μελέτες του IMO έδειξαν πως η συμβολή της ναυτιλίας, σε σχέση με την παγκόσμια παραγωγή αερίων που συμβάλουν σε αυτό το φαινόμενο, ανέρχεται στο 2.1% [4]. Συνεπώς, τέθηκε η ανάγκη αναζήτησης λύσεων, προκειμένου να περιοριστεί η εν λόγω ρύπανση.

Στο πλαίσιο αυτό, η ναυτική επιτροπή προστασίας περιβάλλοντος (Marine Environment Protection Committee - MEPC), μετά από αριθμό συνεδριάσεων ανέπτυξε τον Δείκτη Σχεδίασης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency Design Index, EEDI). Ο EEDI αποτελεί έναν μαθηματικό τύπο ο οποίος εκφράζει την αναλογία μεταξύ του κόστους, που στην προκειμένη περίπτωση είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα CO₂, και του κέρδους που παράγεται, το οποίο εκφράζεται ως η ικανότητα μεταφοράς αγαθών του πλοίου. Οι εκπομπές CO₂ θεωρείται ότι προέρχονται από τις κύριες και από τις βοηθητικές μηχανές (δευτερεύουσες), ενώ η μεταφορική ικανότητα του πλοίου ορίζεται ως το γινόμενο του μεταφερόμενου φορτίου επί την ταχύτητά του. Ο ορισμός του δείκτη EEDI φαίνεται στον παρακάτω τύπο, του οποίου οι όροι θα αναλυθούν και θα υπολογιστούν αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο για την μελέτη της περίπτωσης της παρούσας εργασίας.

$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ emissions}}{\text{Transport work}}$$

Πρωταρχικός σκοπός του δείκτη είναι η μείωση των εκπομπών CO₂ της ναυτιλίας με παράλληλη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των νέων κατασκευών. Για τον λόγο αυτό έχει οριστεί ένα ανώτατο επιτρεπόμενο όριο, που ο δείκτης EEDI ενός πλοίου δεν πρέπει να υπερβεί και το οποίο ορίζεται ως:

$$\text{Required EEDI} = a * b^{-c}$$

Οι συντελεστές a, b, c είναι διαφορετικοί ανάλογα με το είδος και την χωρητικότητα κάθε πλοίου, όπως παρατηρείται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.1).

Πίνακας 1.1: Τιμές συντελεστών a, b, c για τον υπολογισμό του απαιτούμενου δείκτη EEDI [5]

| Ship type | a | b | c |
|--------------------------|--|-----|-------|
| Bulk carriers | 961.79 | DWT | 0.477 |
| Gas carriers | 1120.20 | DWT | 0.456 |
| Tankers | 1218.80 | DWT | 0.488 |
| Container ships | 174.22 | DWT | 0.201 |
| General cargo ships | 107.48 | DWT | 0.216 |
| Refrigerated cargo ships | 227.01 | DWT | 0.244 |
| Combination carriers | 1219.00 | DWT | 0.488 |
| Vehicle / car carriers | (DWT/GT)-0.7 · 780.36 where DWT/GT < 0.3; (DWT/GT)-0.7 · 1812.63 where DWT/GT ≥ 0.3 | DWT | 0.471 |

Επιπλέον, η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του EEDI ενός πλοίου μειώνεται με βάση έναν παράγοντα μείωσης Χ% κάθε 5 χρόνια. Ο παράγοντας μείωσης όπως φαίνεται στον πίνακα 1.2 παίρνει διαφορετικές τιμές ανάλογα με το είδος, την χωρητικότητα και την χρονική περίοδο λειτουργίας ενός πλοίου. Για πλοία με πρόσθετο βάρος (DWT) μεγαλύτερο από αυτό που αναγράφεται στον πίνακα, η μείωση που επέρχεται είναι η μέγιστη ανάλογα με την χρονική περίοδο (phase) λειτουργίας.

Πίνακας 1.2: Τιμές παράγοντα μείωσης Χ% [5]

| Ship type | Size in DWT | Phase 0 1 Jan 2013 – 31 Dec 2014 | Phase 1 1 Jan 2015 – 31 Dec 2019 | Phase 2 1 Jan 2020 – 31 Dec 2024 | Phase 3 1 Jan 2025 and onwards |
|-------------------------------------|------------------|--|--|--|--------------------------------------|
| Bulk carriers | 10.000 – 20.000 | n/a | 0-10 | 0-20 | 0-30 |
| Tankers | 2.000 – 10.000 | n/a | 0-10 | 0-20 | 0-30 |
| Gas carries | 4.000 – 20.000 | n/a | 0-10 | 0-20 | 0-30 |
| Container ships | 10.000 – 15.000 | n/a | 0-10 | 0-20 | 0-30 |
| General cargo ships | 3.000 – 15.000 | n/a | 0-10 | 0-20 | 0-30 |
| Refrigerated cargo ships | 3.000 – 5.000 | n/a | 0-10 | 0-20 | 0-30 |
| Combined carrier | 4.000 – 20.000 | n/a | 0-10 | 0-20 | 0-30 |
| Vehicle / car carriers ² | 10.000 and above | n/a | 5 | 15 | 30 |
| Ro-Ro cargo ships | 1.000 – 2.000 | n/a | 0-5 | 0-20 | 0-30 |
| LNG carries ³ | 10.000 and above | n/a | 10 | 20 | 30 |

Γίνεται εύκολα αντιληπτό λοιπόν, πως οι εταιρίες αναζητούν τρόπους με τους οποίους είναι δυνατή η μείωση του EEDI ενός πλοίου, προκειμένου να τηρούν το παραπάνω κριτήριο και να συμμορφώνονται στον εν λόγω κανονισμό. Ένας από αυτούς, ο οποίος αναγνωρίζεται και επίσημα από τους νηογνώμονες, είναι η χρήση γεννήτριας άξονα σε λειτουργία PTO για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του πλοίου σε ηλεκτρική ενέργεια. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά την λειτουργία PTO είναι δυνατή η απενεργοποίηση των γεννητριών ντίζελ των οποίων η ειδική κατανάλωση καυσίμου είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη της κύριας μηχανής. Επιπλέον, οι κανονισμοί επιτρέπουν την αφαίρεση ενός ποσού στον αριθμητή του τύπου του EEDI, που αντιστοιχεί σε ένα σημαντικό ποσοστό της ισχύος που παράγει η αξονική γεννήτρια. Συνεπώς, παρά την μικρή μείωση που παρατηρείται στην ταχύτητα του πλοίου για μια δεδομένη τιμή ισχύος της κύριας μηχανής λόγω της αύξησης του φορτίου της, η λειτουργία PTO προκαλεί συνολικά μείωση της τιμής του EEDI, γεγονός που καθιστά τις αξονικές γεννήτριες ιδιαίτερα συμφέρουσες για τις ναυτιλιακές εταιρίες στο συγκεκριμένο τομέα.

2. Τύποι και διατάξεις αξονικών γεννητριών λειτουργίας ΡΤΟ

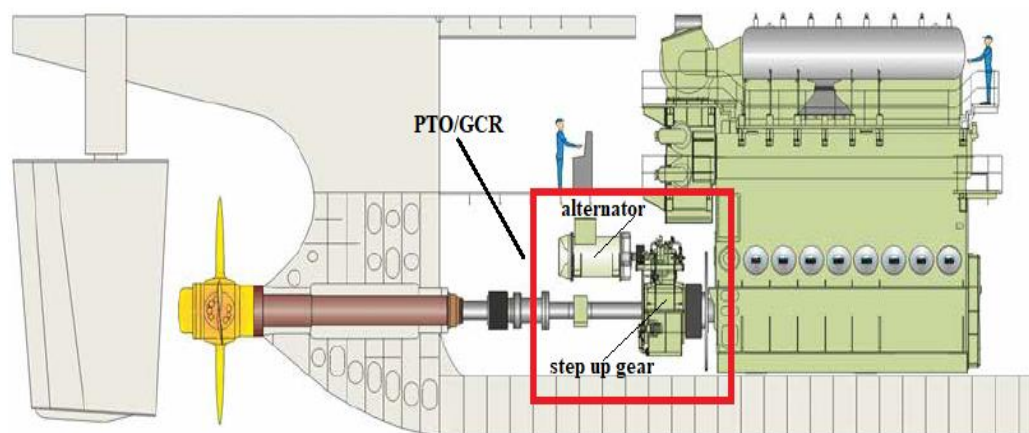
Οι γεννήτριες παραγωγής εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις σύγχρονες και τις ασύγχρονες. Σύγχρονες ονομάζονται οι γεννήτριες οι οποίες παράγουν ρεύμα και τάση των οποίων η συχνότητα είναι ανάλογη της περιστροφής του δρομέα τους, με αποτέλεσμα η τιμή της να είναι σταθερή. Ασύγχρονες, αντίθετα, καλούνται οι γεννήτριες οι οποίες παράγουν ρεύμα και τάση με συχνότητα ανεξάρτητή του δρομέα τους. Στη πράξη για παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά σύγχρονες γεννήτριες. Οι ασύγχρονες χρησιμοποιούνται σπάνια, εξαιτίας της παραγωγής ρεύματος μη σταθερής συχνότητας, κυρίως σε εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών. Οι γεννήτριες άξονα ανήκουν στην κατηγορία των σύγχρονων γεννητριών χρησιμοποιώντας ως δρομέα, έμμεσα ή άμεσα, τον άξονα της κύριας μηχανής του πλοίου.

2.1. Τύποι αξονικών γεννητριών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα πλοίο μέσω γεννητριών άξονα (λειτουργία ΡΤΟ). Η κατηγοριοποίηση γίνεται σύμφωνα με την εταιρία MAN B&W [6] και βασίζεται στα χαρακτηριστικά του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος που παρατηρούνται στην κάθε περίπτωση, καθώς και στα διάφορα συστήματα που παρεμβάλλονται μεταξύ του άξονα της κύριας μηχανής, της γεννήτριας και του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου.

2.1.1. ΡΤΟ/ΓCΡ (Gear Constant Ratio)

Το ΡΤΟ/ΓCΡ είναι το απλούστερο και οικονομικότερο σύστημα γεννητριών άξονα, καθώς αποτελείται από μία σύγχρονη γεννήτρια (alternator) και έναν αυξητήρα στροφών (step up gear). Η απλότητα της κατασκευής και της εγκατάστασής του προσελκύει αρκετές φορές τους πλοιοκτήτες να το χρησιμοποιούν για την κάλυψη των αναγκών ενός πλοίου σε ηλεκτρική ενέργεια, δίνοντας την δυνατότητα στις γεννήτριες ντίζελ να είναι απενεργοποιημένες για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ενός ταξιδιού.



Σχήμα 2.1: Διάταξη συστήματος τύπου ΡΤΟ/ΓCΡ σε μηχανοστάσιο πλοίου [6]

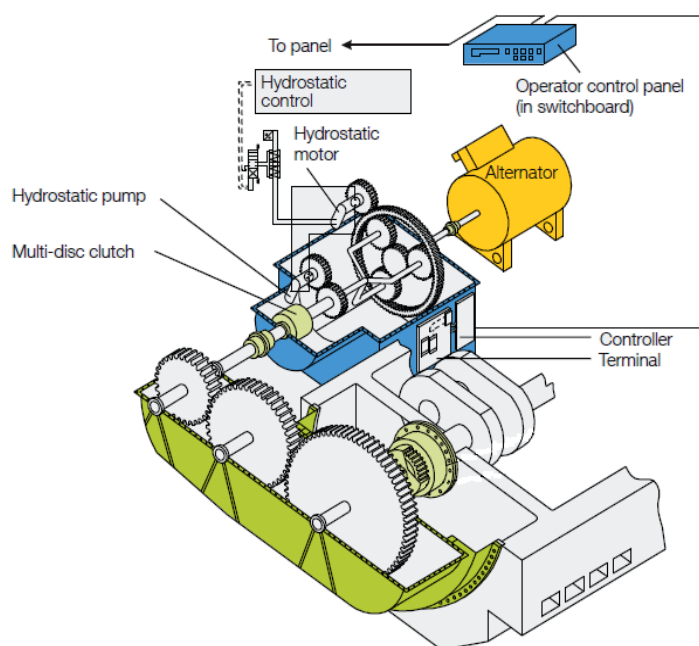
Καθώς οι στροφές στις οποίες λειτουργεί η γεννήτρια είναι ανάλογες με τις αντίστοιχες της κύριας μηχανής, η συχνότητα των δύο θα είναι επίσης ανάλογη, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαίο η ταχύτητα του ελικοφόρου άξονα να παραμένει σταθερή προκειμένου να παράγεται ρεύμα σταθερής συχνότητας από την γεννήτρια. Για αυτόν το λόγο, αρκετές είναι οι περιπτώσεις στις οποίες τα πλοία που χρησιμοποιούν το εν λόγω σύστημα, είναι εξοπλισμένα με έλικα μεταβλητού βήματος, ώστε να έχουν την ευελιξία να πλέουν σε διαφορετικά εύρη ταχυτήτων χωρίς να μεταβάλλονται οι στροφές της κύριας μηχανής.

Ως γνωστόν, τα περισσότερα ηλεκτρικά μηχανήματα ενός πλοίου λειτουργούν αξιόπιστα με εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 50 ως 60 Hz. Σύμφωνα με την θεμελιώδη σχέση $f = \frac{p \cdot N}{120}$, η οποία συνδέει την συχνότητα (f), τις στροφές (N) και τον αριθμό των πόλων (p) μιας σύγχρονης γεννήτριας, γίνεται αντιληπτό πως, προκειμένου να επιτευχθούν οι ζητούμενες τιμές συχνότητας (50-60 Hz) μέσω των χαμηλών στροφών του άξονα της κύριας μηχανής απαιτείται η χρήση γεννητριών με πολύ υψηλό αριθμό πόλων και συνεπώς πολύ μεγάλης διαμέτρου ρότορα, γεγονός που προκαλεί αρκετά σημαντικά κατασκευαστικά και χωροταξικά προβλήματα. Για τον λόγο αυτό, είναι αναγκαία η εγκατάσταση ενός συστήματος αύξησης στροφών, το οποίο θα παρεμβάλλεται μεταξύ του ελικοφόρου άξονα και της γεννήτριας, ώστε οι στροφές του δρομέα της να είναι αυξημένες σε σχέση με τις στροφές του κινητήρα κατά έναν βαθμό, σύμφωνα με τον λόγο αύξησης που επιτυγχάνεται από το σύστημα γραναζιών του αυξητήρα. Θεωρώντας τις απώλειες ισχύος του αυξητήρα και της γεννήτριας 2% και 6% αντίστοιχα, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος PTO/GCR ανέρχεται στο 92%. Επιπλέον, σύμφωνα με την MAN B&W [6], για την παραγωγή ρεύματος με τις παραπάνω επιθυμητές τιμές συχνότητας, καθώς και για την αποφυγή υπερφόρτωσης του κινητήρα, η κύρια μηχανή χρειάζεται να λειτουργεί σε τιμές ισχύος μεταξύ 52% και 90% της μέγιστης δυνατής λειτουργίας της, οι οποίες αντιστοιχούν σε εύρος στροφών του κύριου άξονα μεταξύ 80% και 97% των μέγιστων δυνατών. Οι τιμές αυτές του εύρους ισχύος και στροφών του κινητήρα, είναι σε μεγάλο βαθμό όμοιες για τις περισσότερες κοινές δίχρονες μηχανές παρά τις μικρές αποκλίσεις που δύναται να παρατηρούνται.

Προκειμένου, λοιπόν, να λειτουργήσει αποτελεσματικά και αξιόπιστα αυτό το σύστημα της γεννήτριας άξονα, το πλοίο πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση εν πλω με την ισχύ της κύριας μηχανής να κυμαίνεται στα εν λόγω επίπεδα. Σε καταστάσεις ελιγμών που παρατηρείται μεγάλη αυξομείωση στη τιμή των στροφών της έλικας η λειτουργία των γεννητριών GCR είναι δυνατή μόνο για την τροφοδοσία ρεύματος σε μηχανήματα, τα οποία έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν με μεταβαλλόμενη συχνότητα, όπως οι πρωραίοι βοηθητικοί προωστήρες (bow thrusters). Αντίθετα, σε καταστάσεις καιρού όπου το φορτίο της μηχανής λαμβάνει πολύ υψηλά επίπεδα, καθώς και σε καταστάσεις διέλευσης καναλιών όπου οι στροφές της έλικας λαμβάνουν τιμές χαμηλότερες από τις επιτρεπόμενες, το σύστημα PTO/GCR αδυνατεί να λειτουργήσει και οι ανάγκες του πλοίου σε ηλεκτρισμό χρειάζεται να καλύπτονται αποκλειστικά από τις γεννήτριες ντίζελ. Για τον λόγο αυτό, είναι χρήσιμη η παρουσία συμπλέκτη στο σύστημα αύξησης των στροφών, ώστε να είναι δυνατή η αποσύμπλεξη της γεννήτριας άξονα από τον άξονα της έλικας, στις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν. Τέλος, η αδυναμία σταθεροποίησης της συχνότητας σε περιπτώσεις μεταβολής του φορτίου καθιστούν την παράλληλη λειτουργία του συστήματος PTO/GCR με τις ντιζελογεννήτριες αδύνατη, ακόμη και σε πλοία με έλικα μεταβλητού βήματος.

2.1.2. PTO/RCF (RENK Constant Frequency)

Το σύστημα PTO/RCF βασίζεται στη σταθεροποίηση της ταχύτητας του άξονα της κύριας μηχανής του πλοίου, προκειμένου να είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σταθερής συχνότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση ενός συστήματος γρاناζοκιβωτίων μεταξύ του κυρίου άξονα και της γεννήτριας (alternator), το οποίο, αποτελούμενο από πλήθος γρاناζιών και πλανητικών συστημάτων, έχει την δυνατότητα λαμβάνοντας, ανάλογα με την ταχύτητα της έλικας, ως είσοδο εύρος στροφών έως και 35% των μέγιστων δυνατών, να τις προσαρμόζει σε μία σταθερή τιμή με βάση τις απαιτήσεις της γεννήτριας. Το εν λόγω σύστημα, το οποίο απεικονίζεται παρακάτω (Σχήμα 2.2), έχει αναπτυχθεί από την εταιρία RENK, και είναι διαθέσιμο αποκλειστικά από αυτήν. Όπως παρατηρείται, ο μηχανισμός βασίζεται σε υδραυλικά και ηλεκτρονικά συστήματα αυτόματου ελέγχου τα οποία λαμβάνουν κατάλληλα σήματα από την λειτουργία της κύριας μηχανής και προσαρμόζουν την διάταξη των γραναζιών, προκειμένου να επιτευχθεί στην έξοδο ο απαιτούμενος αριθμός στροφών. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος εξαρτάται από την τιμή των στροφών που λειτουργεί ο κινητήρας σε σχέση με τις αντίστοιχες της μέγιστης δυνατής λειτουργίας του (MCR) και κυμαίνεται μεταξύ 88% και 91%.



Σχήμα 2.2: Διάταξη συστήματος αύξησης στροφών της RENK για τον τύπο PTO/RCF [6]

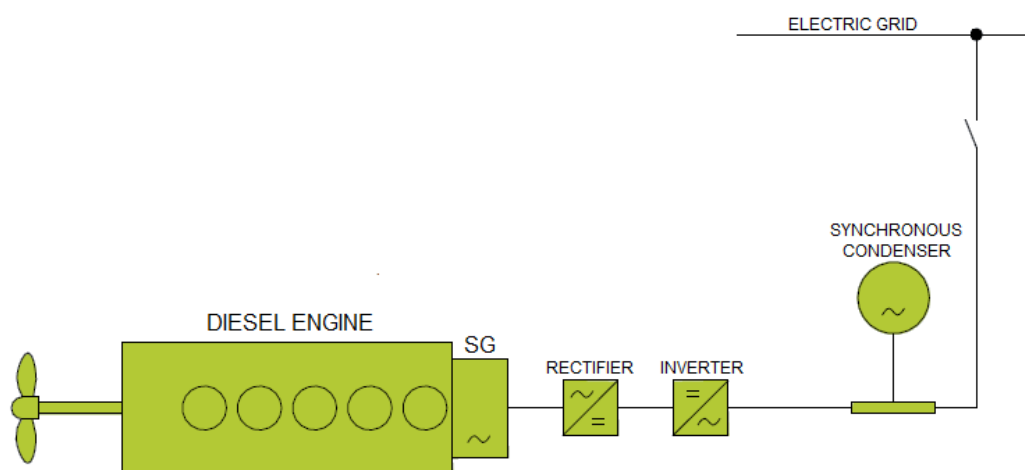
Για την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος των γραναζιών, καθώς και για την παραγωγή ρεύματος με τις επιθυμητές τιμές συχνότητας (50-60 Hz), η κύρια μηχανή χρειάζεται να λειτουργεί σε τιμές ισχύος μεταξύ 30% και 105% της μέγιστης δυνατής λειτουργίας της, οι οποίες αντιστοιχούν σε εύρος στροφών του κύριου άξονα μεταξύ 70% και 105% των μέγιστων δυνατών. Για τις τιμές αυτών των ποσοστών ισχύος και στροφών, για διαφορετικούς κινητήρες ισχύει ό,τι και στην περίπτωση του συστήματος PTO/GCR.

Η δυνατότητα σταθεροποίησης ικανοποιητικού εύρους στροφών της κύριας μηχανής, επιτρέπει στα πλοία να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα σταθερής τάσης και συχνότητας μέσω των γεννητριών άξονα, για διαφορετικές τιμές της ταχύτητάς τους, ακόμη και σε περιπτώσεις

έλικας σταθερού βήματος. Επιπλέον, η ευελιξία που παρέχεται στην πιθανή αυξομείωση των στροφών της έλικας λόγω αλλαγής του φορτίου της, δίνει την δυνατότητα στο σύστημα PTO/RCF να λειτουργεί παράλληλα με τις γεννήτριες ντίζελ για την κάλυψη των αναγκών του πλοίου σε ηλεκτρισμό. Η παρουσία συμπλέκτη στο εσωτερικό των γραναζοκιβωτίων επιτρέπει, επίσης, την αποσύμπλεξη του άξονα της γεννήτριας από το υπόλοιπο σύστημα, σε περιπτώσεις που τα επίπεδα ισχύος της κύριας μηχανής δεν επαρκούν για την λειτουργία του ($P_{\text{λειτουργίας}} < 30\%$). Παρόλα αυτά, η αυξημένη πολυπλοκότητα, σε συνδυασμό με την μικρή διαθεσιμότητα του, καθιστούν τα έξοδα της επένδυσης και της συντήρησης του αρκετά υψηλά, με αποτέλεσμα να προτιμάται σε περιορισμένο αριθμό περιπτώσεων.

2.1.3. PTO/CFE (Constant Frequency Electrical)

Το PTO/CFE αποτελεί την πιο συνηθισμένη και αξιόπιστη κατηγορία συστήματος αξονικών γεννητριών. Η διάταξη του, η οποία βασίζεται στην σταθεροποίηση της συχνότητας του ρεύματος, το οποίο παράγεται από την γεννήτρια άξονα του πλοίου, απεικονίζεται παρακάτω (Σχήμα 2.3) και αποτελείται από έναν ανορθωτή (rectifier), έναν μετατροπέα (inverter) και έναν σύγχρονο πυκνωτή (synchronous condenser).



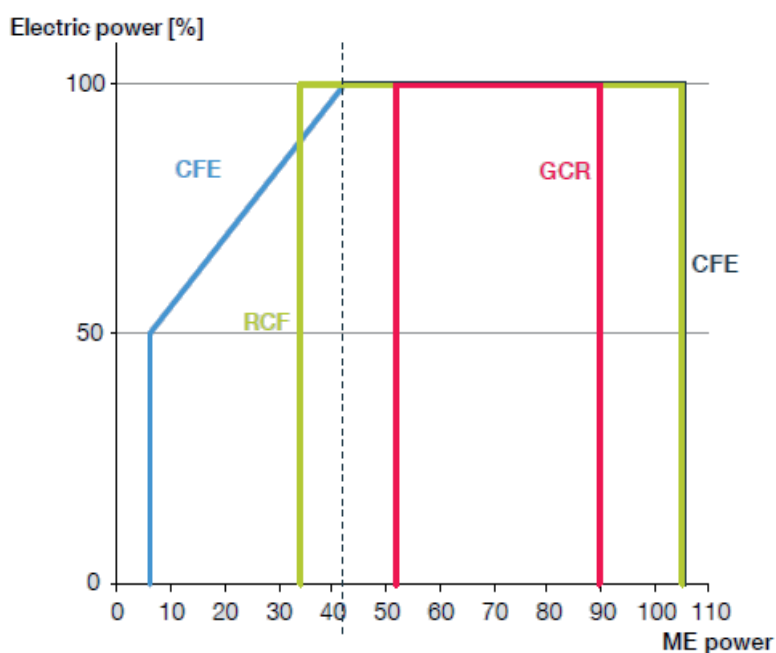
Σχήμα 2.3: Διάταξη τύπου σταθερής συχνότητας PTO/CFE (DMG) [6]

Η αξονική γεννήτρια, εφόσον δεν διαθέτει σύστημα σταθεροποίησης των στροφών της κύριας μηχανής, παράγει εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μεταβλητής τάσης και συχνότητας, εξαιτίας της αυξομείωσης του φορτίου και των στροφών της. Στη συνέχεια το ρεύμα αυτό, το οποίο είναι αδύνατο να καταναλωθεί από τα ηλεκτρικά μηχανήματα του πλοίου, λαμβάνεται από τον ανορθωτή ο οποίος το μετατρέπει από εναλλασσόμενο σε συνεχές. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι διότι το συνεχές ρεύμα είναι αρκετά πιο εύκολο στον χειρισμό του σε σχέση με το εναλλασσόμενο, προκειμένου στη συνέχεια να σταθεροποιηθεί η συχνότητά του. Το συνεχές ρεύμα, συνεπώς, έχοντας πλέον σταθερή συχνότητα οδηγείται στον μετατροπέα, όπου μετατρέπεται και πάλι σε εναλλασσόμενο. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της παρουσίας του δικτύου συνεχούς ρεύματος η άεργος ισχύς του εναλλασσόμενου ρεύματος που παράγεται στην έξοδο του συστήματος των θυρίστωρ είναι μηδενική, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η κατανάλωση του ρεύματος από το δίκτυο του πλοίου, παρά το γεγονός πως η συχνότητά του είναι σταθερή. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η χρήση ενός σύγχρονου πυκνωτή, ο οποίος στην ουσία αποτελεί έναν σύγχρονο κινητήρα που δεν παράγει μηχανική ισχύ αλλά είναι υπεύθυνος για την ρύθμιση της άεργους ισχύος, ενώ παράλληλα έχει την δυνατότητα να προσαρμόζει την τιμή της τάσης στις απαιτήσεις του συστήματος. Συνεπώς, ύστερα από την συμβολή και του σύγχρονου πυκνωτή

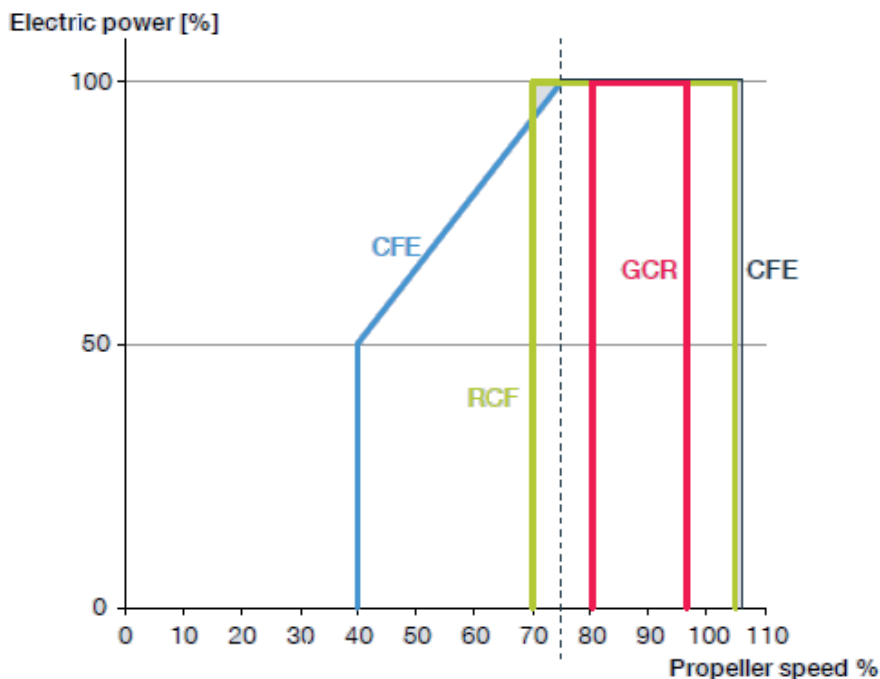
το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα σταθερής τάσης και συχνότητας είναι διαθέσιμο για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του πλοίου σε ηλεκτρισμό.

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 84% και 88% ανάλογα με τις στροφές της έλικας τιμές, οι οποίες είναι μικρότερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες των δύο προαναφερθέντων συστημάτων. Παρά τις μειωμένες τιμές της απόδοσης, όμως, αρκετοί είναι οι λόγοι οι οποίοι οδηγούν τους πλοιοκτήτες στην προτίμηση του.

Ένα από τα σημαντικότερα οφέλη του ΡΤΟ/CFE είναι η αξιοπιστία και η ευελιξία της λειτουργίας του. Το σύστημα ανταποκρίνεται με επιτυχία σε απότομες μεταβολές της ταχύτητας του πλοίου και του φορτίου της κύριας μηχανής, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η παράλληλη λειτουργία με τις γεννήτριες ντίζελ. Επίσης, οι γεννήτριες άξονα έχουν την ικανότητα να λειτουργούν στην μέγιστη δυνατή λειτουργία τους, όταν η κύρια μηχανή λειτουργεί σε τιμές ισχύος μεταξύ 40% και 105% της λειτουργίας MCR, οι οποίες αντιστοιχούν σε εύρος στροφών του κύριου άξονα μεταξύ 75% και 105%. Η διαφορά με τα προηγούμενα συστήματα, τα οποία μπορούν να παράγουν την μέγιστη δυνατή ηλεκτρική τους ισχύ για ένα παρόμοιο εύρος ισχύος και στροφών του κινητήρα, έγκειται στο γεγονός πως στο σύστημα CFE οι γεννήτριες άξονα έχουν δυνατότητα να λειτουργούν, επιπλέον, σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος για μικρότερες τιμές εύρους, γεγονός που προσφέρει μεγάλη ευελιξία στην εφαρμογή τους. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 2.4/2.5) της MAN B&W, στα οποία απεικονίζεται η σχέση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των γεννητριών άξονα με την ισχύ και τις στροφές του κινητήρα του πλοίου, σε κάθε μια από τις τρεις περιπτώσεις συστημάτων. Οι τιμές των διαγραμμάτων, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, είναι ενδεικτικές και συνεπώς μπορεί να παρουσιάζουν μικρές διαφορές για κύριες μηχανές με διαφορετικά διαγράμματα φόρτισης.



Σχήμα 2.4: Μέγιστη δυνατή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς αξονικής γεννήτριας συναρτήσει της ισχύος της κύριας μηχανής ανάλογα με τον τύπο συστήματος ΡΤΟ [6]



Σχήμα 2.5: Μέγιστη δυνατή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς αξονικής γεννήτριας συναρτήσει ταχύτητας της έλικας ανάλογα με τον τύπο συστήματος PTO [6]

Επιπλέον, η μετατροπή του εναλλασσόμενου σε συνεχές ρεύμα επιτρέπει την αποθήκευση του σε συστήματα μπαταριών, σε περίπτωση που η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την γεννήτρια άξονα είναι σημαντικά παραπλήσια της απαιτούμενης από το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου, ώστε να εμφανίζεται περίσσια. Το αποθηκευμένο αυτό ρεύμα των μπαταριών έχει την δυνατότητα να καλύπτει για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, ανάλογα με τη χωρητικότητά τους, τις ανάγκες ορισμένων ή όλων των μηχανημάτων του πλοίου σε ηλεκτρισμό, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μείωση στον χρόνο λειτουργίας των ντιζελογεννητριών και εξοικονόμηση καυσίμου, σε περιπτώσεις που οι γεννήτριες άξονα αδυνατούν να λειτουργήσουν, λόγω πολύ μικρών ή μηδενικών στροφών του κινητήρα.

Όσον αφορά την διάταξη του συστήματος PTO/CFE, οι αξονικές γεννήτριες είναι δυνατόν να είναι συνδεδεμένες με τον κύριο άξονα πρόωσης είτε μέσω ενός αυξητήρα στροφών, είτε να είναι ενσωματωμένες σε αυτόν χρησιμοποιώντας τον ως δρομέα. Η πρώτη διάταξη η οποία αποτελεί συνδυασμό του εν λόγω συστήματος με το PTO/GCR, καθιστά την σταθεροποίηση της συχνότητας του ρεύματος ευκολότερη, καθώς οι αυξημένες στροφές της γεννήτριας έχουν ως αποτέλεσμα τιμές συχνότητας οι οποίες παρά την μεταβλητότητα τους παρουσιάζουν μικρότερες αποκλίσεις από τις απαιτούμενες (50-60 Hz). Αντίθετα, στην δεύτερη διάταξη, παρά την ανάγκη χρήσης πολυπλοκότερου συστήματος σταθεροποίησης συχνότητας σε περίπτωση βραδύστροφων δίχρονων μηχανών, καθώς και την έλλειψη δυνατότητας αποσύμπλεξης σε περίπτωση μη δυνατής λειτουργίας, η απουσία του συστήματος γρναζοκιβωτίων αύξησης στροφών, προκαλεί οφέλη, όπως η οικονομία χώρου αλλά και η αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος καθώς απουσιάζουν οι μηχανικές απώλειες του αυξητήρα.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί, πως τα τελευταία χρόνια έχει κάνει την εμφάνισή του στην ναυτιλία ένα νέο σύστημα με το οποίο είναι δυνατή η σταθεροποίηση της συχνότητας του ρεύματος που παράγεται από τις γεννήτριες άξονα, βασιζόμενο στην τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM). Με τη συγκεκριμένη τεχνική, σε αντίθεση με την παραδοσιακή των θυρίστωρ που αναφέρθηκε προηγουμένως, επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ενεργούς και της άεργους ισχύος του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, με αποτέλεσμα να σταθεροποιείται

η συχνότητα αλλά παράλληλα και η τάση του στα επιθυμητά επίπεδα. Συνεπώς, τα πλοία που είναι εξοπλισμένα με σύστημα PWM, παρά το αυξημένο κόστος της επένδυσής του, έχουν την δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος σταθερής τάσης και συχνότητας χωρίς την παρουσία ενός σύγχρονου πυκνωτή, γεγονός που απλοποιεί την διάταξη και την εγκατάστασή και μειώνει τα έξοδα συντήρησης του συστήματος.

2.2. Διατάξεις αξονικών γεννητριών

Πέρα από την κατηγοριοποίηση των αξονικών γεννητριών σύμφωνα τις πρακτικές που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σταθερής τάσης και συχνότητας, χρειάζεται να αναφερθούν και οι διάφορες διατάξεις σχεδίασης οι οποίες είναι δυνατές. Στο σχήμα 2.6 απεικονίζονται, σύμφωνα και πάλι με την εταιρία MAN B&W [6], οι εν λόγω διατάξεις, οι οποίες θα περιγραφούν στην συνέχεια και όπως φαίνεται βασίζονται στη θέση που καταλαμβάνει η γεννήτρια και ο αυξητήρας στροφών σε σχέση με την κινητήρια μηχανή του πλοίου.

| Alternative types and layouts of shaft generators | | Design | Seating | Total efficiency (%) |
|---|--------|--------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| PTO/RCF | 1a 1b | BW I/RCF | On engine (vertical generator) | 88-91 |
| | 2a 2b | BW II/RCF | On tank top | 88-91 |
| | 3a 3b | BW III/RCF | On engine | 88-91 |
| | 4a 4b | BW IV/RCF | On tank top | 88-91 |
| PTO/CFE | 5a 5b | DMG/CFE | On engine | 84-88 |
| | 6a 6b | SMG/CFE | On tank top | 84-88 |
| PTO/GCR PTO/CFE | 7 | BW I/GCR BW-I/CFE | On engine (vertical generator) | 92 81-85 |
| | 8 | BW II/GCR BW-II/CFE | On tank top | 92 81-85 |
| | 9 | BW III/GCR BW-III/CFE | On engine | 92 81-85 |
| | 10 | BW IV/GCR BW-IV/CFE | On tank top | 92 81-85 |

Σχήμα 2.6: Στοιχεία διατάξεων συστημάτων λειτουργίας PTO [6]

2.2.1. Σύστημα PTO εγκατεστημένο πρώρα και εντός της κύριας μηχανής (BW I)

Η διάταξη BW I είναι διαθέσιμη για τους τύπους συστημάτων PTO/GCR και PTO/RCF και περιλαμβάνει συστήματα γραναζιών λοξών οδοντώσεων και αύξησης στροφών, τα οποία είναι εγκατεστημένα απευθείας πρωραία του στροφαλοφόρου άξονα του κινητήρα, αποτελώντας κατά έναν τρόπο τμήμα του. Το σύστημα αύξησης στροφών χρησιμοποιείται για την επίτευξη των απαιτούμενων τιμών συχνότητας στην είσοδο της γεννήτριας, ενώ η πλάγια οδόντωση επιτρέπει την κατακόρυφη τοποθέτηση της γεννήτριας πάνω από τα γρανάζια, εξοικονομώντας χώρο. Η λίπανση τους, επιπλέον, επιτυγχάνεται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων με το σύστημα λίπανσης της κύριας μηχανής.

Όσον αφορά την σύνδεση του στροφαλοφόρου με τον άξονα των γραναζιών, είναι αναγκαίο να παρουσιάζεται ευελιξία προκειμένου να αποφεύγεται η μετάδοση των ταλαντώσεων και των δονήσεων από τον πρώτο στον δεύτερο. Η ευελιξία αυτή επιτυγχάνεται με την κατάλληλη χρήση ελατηρίων μεταξύ των δύο αξόνων, για την απόσβεση των εν λόγω ταλαντώσεων. Επίσης, είναι δυνατή η τοποθέτηση ενός σφονδύλου (tuning wheel) στο ελεύθερο άκρο του στροφαλοφόρου, προκειμένου να επέλθει αύξηση της ροπής αδράνειας του συστήματος και συνεπώς περαιτέρω απόσβεση των δονήσεων του σε περίπτωση που καθίσταται αναγκαία.

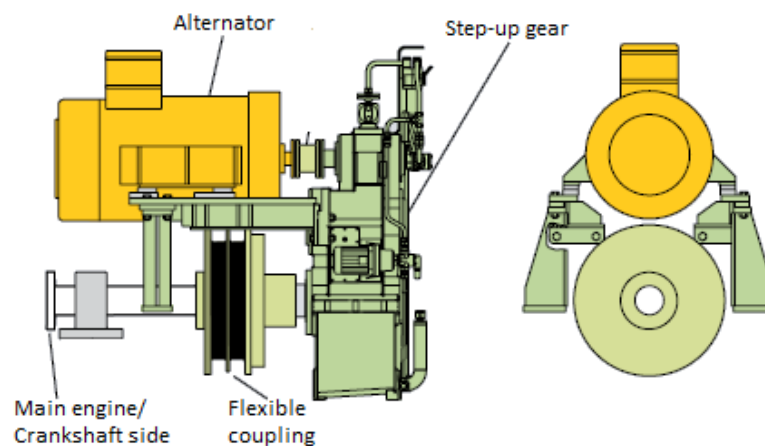
Τέλος, ο συμπλέκτης του συστήματος, ο οποίος είναι απαραίτητος, όπως έχει προαναφερθεί σε περίπτωση που είναι αδύνατη η λειτουργία των γεννητριών, εγκαθίσταται μεταξύ του συστήματος γραναζιών και της αξονικής γεννήτριας για τον τύπο PTO/GCR, ενώ για τον PTO/RCF παρατηρείται πριν το γραναζοκιβώτιο σταθεροποίησης στροφών της RENK.

2.2.2. Σύστημα PTO εγκατεστημένο πρώρα και εκτός της κύριας μηχανής (BW II)

Η διάταξη BW II παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με την προηγούμενη BW I, καθώς είναι διαθέσιμη για τους ίδιους τύπους συστημάτων PTO/GCR και PTO/RCF και είναι τοποθετημένη πρώρα της κύριας μηχανής. Η βασική διαφορά είναι πως στη παρούσα διάταξη το σύστημα των γραναζοκιβωτίων αύξησης στροφών παρουσιάζει ανεξαρτησία σε σχέση με την βάση και την κατασκευή που περικλείει την κύρια μηχανή.

Η εν λόγω ανεξαρτησία έχει αρκετά θετικά αποτελέσματα, όπως η μείωση, σε σημαντικό βαθμό, των δονήσεων και των αξονικών και στρεπτικών ταλαντώσεων που προκύπτουν από τον στροφαλοφόρο άξονα με αποτέλεσμα να καθίσταται ευκολότερη και απλούστερη η απόσβεσή τους. Επιπλέον, η λίπανση των γραναζιών γίνεται, αντίθετα με το BW I με ξεχωριστό αυτόνομο σύστημα λίπανσης. Τα γεγονότα αυτά διευκολύνουν και μειώνουν σημαντικά τις εργασίες και τις προετοιμασίες που πρέπει να γίνουν στην κύρια μηχανή και το μηχανοστάσιο προκειμένου να λειτουργήσει αξιόπιστα το σύστημα.

Παρόλα αυτά, η διάταξη αυτή αυξάνει σημαντικά το μήκος του συστήματος προώσεως του πλοίου και αρκετές είναι οι περιπτώσεις που δεν είναι δυνατό να υπάρξει επαρκής χώρος για την εγκατάσταση του εξαιτίας της παρουσίας της εγκάρσιας φραχτής που διαχωρίζει το μηχανοστάσιο από τους χώρους φορτίου. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί με σχεδιάσεις όπως αυτή που απεικονίζεται στο σχήμα 2.7 σε πλάγια όψη και σε πρόσοψη, όπου η αξονική γεννήτρια τοποθετείται μεταξύ του γραναζοκιβωτίου και του κινητήρα, ή με χρήση γραναζιών με λοξές οδοντώσεις προκειμένου η γεννήτρια να τοποθετηθεί κατακόρυφα πάνω από αυτά. Και στις δύο περιπτώσεις, όμως, το πρόβλημα δεν λύνεται εξ ολοκλήρου και το, ακόμα και σε μικρότερο βαθμό, αυξημένο μήκος του συστήματος δύναται να συνεχίσει να αποτελεί πρόβλημα σε περιπτώσεις υψηλά περιορισμένου χώρου.



Σχήμα 2.7: Μορφή διάταξης PTO πλώρα και εκτός της κύριας μηχανής (PTO/BW II) [6]

2.2.3. Σύστημα PTO εγκατεστημένο πλώρα και πλευρικά της κύριας μηχανής (BW III)

Στη διάταξη BW III, η οποία επίσης είναι διαθέσιμη για τους τύπους PTO/GCR και PTO/RCF, το σύστημα γραναζιών αύξησης στροφών είναι εγκατεστημένο πλώρα της κύριας μηχανής στο ελεύθερο άκρο του στροφαλοφόρου παρόμοια με την διάταξη BW I, ενώ η αξονική γεννήτρια τοποθετείται πλευρικά του κινητήρα. Με τον σχεδιασμό αυτό στην ουσία επιτυγχάνεται ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων των δύο προηγούμενων διατάξεων καθώς η εγκατάσταση γίνεται ευκολότερη και απλούστερη αφού δεν απαιτείται η χρήση γραναζιών με πλάγια οδόντωση και η κατασκευή συστημάτων για την έδραση της γεννήτριας πλώρα της μηχανής, ενώ παράλληλα η αύξηση του μήκους του συστήματος είναι αμελητέα. Το γεγονός αυτό καθιστά την επένδυση της διάταξης BW III ακριβότερη από τις δύο προηγούμενες, όμως επιτρέπει παράλληλα και την γρήγορη απόσβεση του κόστους της εξαιτίας των σημαντικών οφελών της.

2.2.4. Σύστημα PTO εγκατεστημένο πρύμνα και πλευρικά της κύριας μηχανής (BW IV)

Η διάταξη BW IV είναι η μοναδική από τις διατάξεις οι οποίες είναι διαθέσιμες για τους τύπους PTO/GCR και PTO/RCF, στην οποία το σύστημα των γραναζοκιβωτίων εγκαθίσταται πρύμνα της κύριας μηχανής, στον κύριο άξονα πρόωσης του πλοίου. Η αξονική γεννήτρια έχει την δυνατότητα να εδράζεται δίπλα στον ενδιάμεσο άξονα αλλά και πάνω από αυτόν σε κατάλληλη πλατφόρμα. Για να είναι αποτελεσματική και αξιόπιστη η σύνδεση των γραναζοκιβωτίων με τον ενδιάμεσο άξονα, το σύστημα περιλαμβάνει ένα γρανάζι ενσωματωμένο σε έναν κοίλο άξονα με διάμετρο μεγάλη αρκετά, ώστε να είναι δυνατόν να τον διαπεράσει η φλάντζα του άξονα της μηχανής και συνεπώς με την βοήθεια μιας ή περισσοτέρων σφηνών να επέλθει η σύνδεση. Η συνδεσμολογία αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

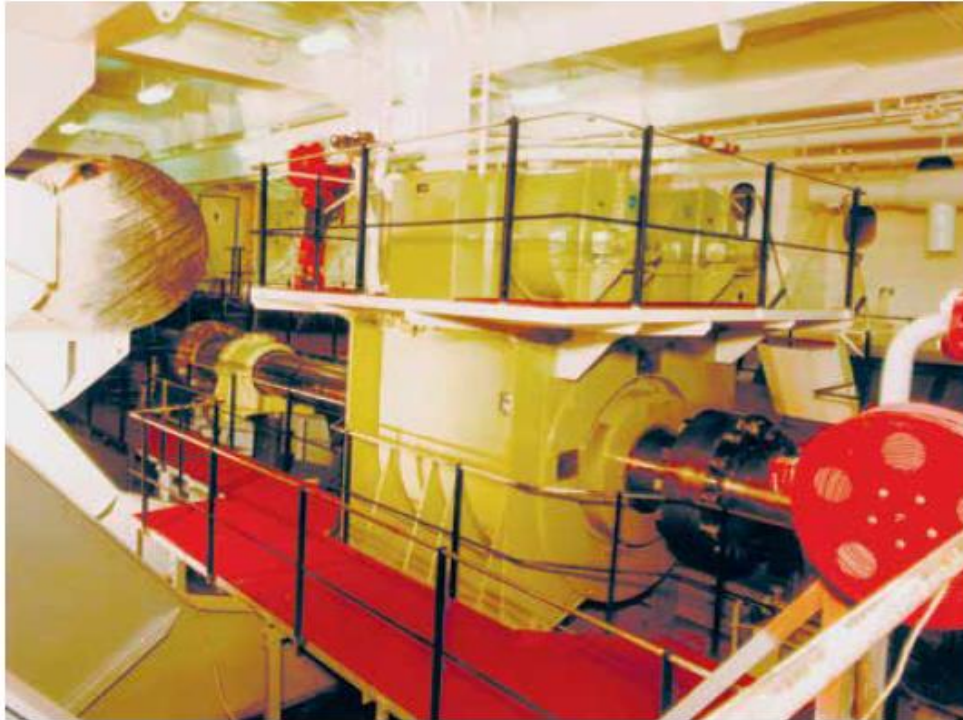


Σχήμα 2.8: Διάταξη ελαστικής σύνδεσης των γραναζοκιβωτίων αύξησης στροφών με τον ενδιάμεσο άξονα [6]

Το βασικό πλεονέκτημα της σχεδίασης BW IV είναι η πλήρης ανεξαρτησία που παρέχει στους αυξητήρες στροφών από τον στροφαλοφόρο άξονα, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά τις μελέτες για την απόσβεση των ταλαντώσεων και των δονήσεων που προκύπτουν από αυτόν. Επιπλέον, η απουσία των γραναζοκιβωτίων στο πρωραίο τμήμα της μηχανής εξαλείφει το πρόσθετο μήκος που προκύπτει στις προηγούμενες διατάξεις (σε διαφορετικό βαθμό στην κάθε μια), με αποτέλεσμα να εξοικονομείται χώρος και να προσφέρεται ευελιξία σε αρκετές περιπτώσεις που είναι απαραίτητος, όπως η ανάγκη τοποθέτησης ενός σφονδύλου στο ελεύθερο άκρο του στροφαλοφόρου άξονα για την αύξηση της ροπής αδρανείας του. Παρόλα αυτά, η ανάγκη για κατασκευή επιπέδου έδρασης της γεννήτριας όταν αυτή απαιτείται να τοποθετείται πάνω από τον άξονα πρόωσης, καθώς και η αύξηση της πολυπλοκότητας στο τμήμα του ενδιάμεσου άξονα λόγω της συνδεσμολογίας που αναφέρθηκε προηγουμένως, συχνά προβληματίζουν όταν εξετάζεται η εγκατάσταση της παρούσας διάταξης.

2.2.5. Σύστημα PTO εγκατεστημένο πάνω στον ενδιάμεσο άξονα (SMG)

Η διάταξη SMG (Shaft Mounted Generator), σε αντίθεση με αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δεν απαιτεί την χρήση γραναζοκιβωτίων αύξησης στροφών και συνεπώς είναι διαθέσιμη και κατάλληλη για τον τύπο συστήματος PTO/CFE. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι το γεγονός πως η αξονική γεννήτρια είναι εγκατεστημένη πάνω στον άξονα πρόωσης του πλοίου. Ο ρότορας της είναι ενσωματωμένος στον ελικοφόρο άξονα, ενώ ο στάτης εγκαθίσταται και περικλείεται σε ξεχωριστή κατάλληλη κατασκευή όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.9. Ο ενδιάμεσος άξονας του πλοίου, λοιπόν, αποτελεί τμήμα της αξονικής γεννήτριας της διάταξης, με αποτέλεσμα οι στροφές της να ταυτίζονται με τις στροφές της έλικας, γεγονός που καθιστά αναγκαία την λειτουργία του συστήματος CFE για την σταθεροποίηση της μεταβλητής συχνότητας του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος.



Σχήμα 2.9: Διάταξη αξονικής γεννήτριας εγκατεστημένη πάνω στον ενδιάμεσο άξονα (SMG) [6]

Η απλότητα της σχεδίασης της διάταξης, η απουσία γραναζιών αύξησης στροφών και συνεπώς της ανάγκης για κατάλληλη και ευέλικτη σύνδεση τους με τον στροφαλοφόρο ή τον ελικοφόρο άξονα, καθώς και η απουσία άμεσης επαφής με την κύρια μηχανή του πλοίου, μειώνει σε σημαντικό βαθμό τα έξοδα συντήρησης του συστήματος και το καθιστά ιδιαίτερα συμφέρουσα επιλογή. Επίσης, οι δονήσεις και οι ταλαντώσεις του στροφαλοφόρου δεν επηρεάζουν τη λειτουργία της γεννήτριας, σε αντίθεση με τις προηγούμενες διατάξεις, και συνεπώς χρειάζεται να λαμβάνονται υπόψη για τη σχεδίαση μονάχα οι στρεπτικές ταλαντώσεις του ενδιάμεσου άξονα οι οποίες εξαιτίας της αύξησης της ροπής αδρανείας του, λόγω της παρουσίας του ρότορα, δύναται να παρουσιάζουν μείωση.

Βασικά ζητήματα, παρόλα αυτά, προκύπτουν από την ενσωμάτωση του ρότορα της γεννήτριας στον ενδιάμεσο άξονα πρόωσης. Η ταύτιση που υφίσταται μεταξύ των στροφών της γεννήτριας και του κινητήρα έχει ως αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνονται οι απαιτούμενες τιμές συχνότητας (50-60 Hz) για δίχρονους βραδύστροφους κινητήρες, με συνέπεια να απαιτείται, είτε η μεγάλη αύξηση του αριθμού των πόλων της γεννήτριας και συνεπώς και της διαμέτρου του ρότορά της, πού τις περισσότερες φορές δεν είναι δυνατή λόγω περιορισμένου χώρου, είτε η τοποθέτηση ενός συστήματος μετατροπής συχνότητας αυξάνοντας το κόστος της εγκατάστασης. Επιπλέον, σε περίπτωση βλάβης του ρότορα η αντικατάστασή του καθίσταται αρκετά ασύμφορη και δύσκολη διαδικασία, εξαιτίας της άμεσης σχέσης του με τον ελικοφόρο άξονα. Η απουσία γραναζιών και συνεπώς συμπλέκτη έχει ως αποτέλεσμα, επίσης, την αύξηση του φορτίου της κύριας μηχανής, ακόμη και σε περιπτώσεις που η οι χαμηλές στροφές της δεν επιτρέπουν την αποτελεσματική λειτουργία της αξονικής γεννήτριας.

Παρά τα αρκετά παραπάνω ζητήματα, όμως, η απλότητα και η ανεξαρτησία που προσφέρει η διάταξη SMG οδηγούν αρκετές φορές τους πλοιοκτήτες στην προτίμηση της έναντι των διατάξεων γραναζοκιβωτίων.

2.2.6. Σύστημα ΡΤΟ εγκατεστημένο πλώρα του στροφαλοφόρου άξονα (DMG)

Η διάταξη DMG (Direct Mounted Generator) αποτελείται από μια αξονική γεννήτρια της οποίας ο ρότορας είναι συνδεδεμένος στο ελεύθερο άκρο του στροφαλοφόρου άξονα αποτελώντας στην ουσία επέκταση του, ενώ ο στάτης της περικλείεται από μια ανεξάρτητη πρόσθετη κατασκευή πλώρα της αντίστοιχης της κύριας μηχανής, κατά παρόμοιο τρόπο με την διάταξη ΡΤΟ/BW I. Η παρουσία γραναζιών αύξησης στροφών δεν απαιτείται και συνεπώς η διάταξη είναι διαθέσιμη μόνο για τύπους συστημάτων ΡΤΟ/CFE.

Η αξονική γεννήτρια, παρόλο που συνδέεται απευθείας με τον στροφαλοφόρο, διαχωρίζεται κατά έναν τρόπο από αυτόν με την βοήθεια ενός συστήματος πλακών στεγανοποίησης, προκειμένου να αποφευχθεί η άμεση επαφή του ρότορα της γεννήτριας με τον στροφαλοθάλαμο. Επιπλέον, με την εν λόγω σύνδεση είναι δυνατή η εγκατάσταση σφονδύλου μεταξύ των δύο αξόνων, σε περίπτωση που καθίσταται αναγκαία για την απόσβεση των ταλαντώσεων και δονήσεων του στροφαλοφόρου.

Η απουσία γραναζοκιβωτίων έχει ως αποτέλεσμα την ταύτιση των στροφών του κινητήρα και της γεννήτριας και συνεπώς, οδηγεί στα ίδια ζητήματα που προκύπτουν και στην διάταξη SMG, όσον αφορά την δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με τα επιθυμητά επίπεδα συχνότητας.

Τέλος, η συνδεσμολογία που αναφέρθηκε μεταξύ του ρότορα της γεννήτριας και του στροφαλοφόρου, προσφέρει σημαντικά μεγαλύτερη ευελιξία, σε σχέση με την διάταξη SMG, σε περίπτωση ανάγκης για επισκευή ή βελτιστοποίηση του συστήματος. Η παράλληλη αύξηση, όμως, που προκαλείται στην πολυπλοκότητα της σχεδίασης και της εγκατάστασης, καθιστά την διάταξη SMG οικονομικότερη, με αποτέλεσμα να προτιμάται και να εμφανίζεται σε μεγαλύτερη συχνότητα σε εγκαταστάσεις αξονικών γεννητριών τύπου ΡΤΟ/CFE.

3. Επίδραση της λειτουργίας ΡΤΟ στη φόρτιση της κύριας μηχανής

Η επιλογή του σωστού τύπου και της κατάλληλης διάταξης αξονικών γεννητριών, ανάλογα με τις παραμέτρους που παρουσιάζονται σε μία περίπτωση, είναι πολύ σημαντική, προκειμένου να λειτουργήσει το σύστημα αξιόπιστα και να αντικαταστήσει με αποτελεσματικότητα τις γεννήτριες ντίζελ, όποτε αυτό καθίσταται δυνατό. Παρόλα αυτά, ιδιαίτερη βαρύτητα χρειάζεται να δοθεί και στην μελέτη της επιρροής που έχει η εγκατάσταση αυτή στην λειτουργία του κινητήρα του πλοίου, στον τρόπο με τον οποίο αυτός μπορεί να την υποστηρίξει, καθώς και στις συνέπειες που προκύπτουν από την αύξηση του φορτίου του. Τα εν λόγω ζητήματα θα απασχολήσουν στο παρών κεφάλαιο, στο οποίο θα αναλυθούν τα περιθώρια ισχύος της κύριας μηχανής και η τροποποίηση που λαμβάνει το διάγραμμα φορτίσεώς της, εξαιτίας της λειτουργίας των γεννητριών άξονα.

3.1. Περιθώρια ισχύος και στροφών κύριας μηχανής και έλικας

Κατά την διαδικασία σχεδίασης ενός πλοίου καθίσταται αναγκαίος ο προσδιορισμός της αντίστασης που δέχεται από την θάλασσα, προκειμένου να υπολογιστούν οι στρόφες και η ώση που απαιτούνται από την έλικα, για να την υπερνικήσει και να πλέει το πλοίο στις ζητούμενες τιμές της ταχύτητας υπηρεσίας. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει στην συνέχεια τον υπολογισμό της ισχύος που απορροφά η έλικα από την μηχανή για να επιτύχει τις απαραίτητες τιμές στροφών και ώσης. Με τον προσδιορισμό λοιπόν των στροφών και της ισχύος που χρειάζεται να λειτουργεί ο κινητήρας, επιλέγεται ο κατάλληλος ώστε να είναι ικανός να λειτουργεί σε αυτό το ζεύγος τιμών και βελτιστοποιείται από τον κατασκευαστή προκειμένου να το επιτύχει όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά.

Οι αναλύσεις, όμως, και τα πειράματα αυτά γίνονται για ιδανικές συνθήκες λειτουργίας, στις οποίες η έλικα και η γάστρα του πλοίου είναι σε πρότυπη κατάσταση και επιπλέον, οι απρόβλεπτες καιρικές συνθήκες δεν μπορούν να αναπαρασταθούν και να μοντελοποιηθούν με απόλυτη επιτυχία. Συνεπώς, είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψη περιθώρια, προκειμένου να είναι δυνατή η παρουσία περίσσιας ισχύος και φορτίου στο κινητήρα ώστε να μην παρουσιαστεί πρόβλημα υπερφόρτωσης, είτε σε επείγουσες καταστάσεις κατά την διάρκεια ενός ταξιδιού, είτε μακροχρόνια όπου η ρύπανση της γάστρας και της έλικας θα είναι αναπόφευκτη και θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης του πλοίου.

Τα εν λόγω περιθώρια ισχύος και στροφών, αποτελούν τον κυριότερο λόγο για τον οποίο καθίσταται δυνατή η λειτουργία Power Take off των αξονικών γεννητριών χωρίς να επιβαρύνεται δυσμενώς η κύρια μηχανή. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες αναφέρονται με τους αγγλικούς όρους "sea margin", "light running margin" και "engine margin" και θα αναλυθούν στην συνέχεια [7].

- **Sea Margin**

Το sea margin είναι το περιθώριο ισχύος της κύριας μηχανής το οποίο είναι απαραίτητο προκειμένου να επιτρέπεται στο πλοίο να διατηρεί την ταχύτητα υπηρεσίας που έχει σε ήρεμο νερό κατά την διάρκεια των θαλάσσιων δοκιμών, ακόμα και σε περιπτώσεις που η αντίστασή του αυξάνεται. Αυτή η αύξηση της αντίστασης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μπορεί να παρατηρείται είτε για πεπερασμένο χρονικό διάστημα κατά την

διάρκεια μιας θαλασσοταραχής, είτε μακροχρόνια εξαιτίας της ρύπανσης της γάστρας και της έλικας από την παρουσία μικροοργανισμών, διάβρωσης ή λόγω του φαινομένου της σπηλαιώσης. Και στις δύο περιπτώσεις είναι φανερό πως η ισχύς που χρειάζεται να απορροφήσει η έλικα από τον κινητήρα, ώστε να διατηρήσει την ταχύτητα του πλοίου, αυξάνεται και συνεπώς καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη του περιθωρίου ισχύος για να συνεχίσει η κύρια μηχανή να λειτουργεί αποδοτικά και αξιόπιστα χωρίς υπερφορτώσεις.

Η τιμή του εν λόγω περιθωρίου εξαρτάται από τις απαιτήσεις του εκάστοτε πλοιοκτήτη και την γραμμή δρομολογίων που καλείται να εκτελέσει το πλοίο, καθώς και την εποχή που αυτό εκτελεί το ταξίδι. Κυμαίνεται στα επίπεδα του 15% της ισχύος της κύριας μηχανής που απαιτείται για την επίτευξη της ταχύτητας υπηρεσίας στις πρότυπες συνθήκες και η τελική τιμή καθορίζεται από τον πλοιοκτήτη και το υπεύθυνο ναυπηγείο. Ο στόχος της τιμής του περιθωρίου είναι, η περίσσια της ισχύος να είναι επαρκής μέχρι το πλοίο να οδηγηθεί σε δεξαμενισμό όπου η έλικα και η γάστρα του πλοίου επισκευάζονται και επιδιορθώνονται με κατάλληλες κατεργασίες, ώστε να παρουσιάσουν όσο το δυνατό γίνεται τα αρχικά τους πρότυπα χαρακτηριστικά. Στις μέρες μας, με την ανάπτυξη προηγμένων και αντιρρυπαντικών βαφών της γάστρας, υπολογίζεται πως με περιθώριο ισχύος (sea margin) της τάξεως του 15%, οι δεξαμενισμοί έχουν την δυνατότητα να πραγματοποιούνται κάθε 4 με 5 χρόνια, χωρίς να λειτουργεί σε δυσμενή επίπεδα ο κινητήρας του πλοίου.

• Light Running Margin

Είναι φανερό, πως για την ίδια τιμή ισχύος του κινητήρα οι στροφές που επιτυγχάνονται πριν από έναν δεξαμενισμό είναι μικρότερες από αυτές που επιτυγχάνονται μετά από αυτόν, όπου η επιφάνειες της έλικας και της γάστρας έχουν στεγανοποιηθεί και καθαριστεί από τους ρύπους που είχαν προέλθει από την έκθεση του πλοίου στο θαλάσσιο περιβάλλον και τυχόν βλάβες της κύριας μηχανής έχουν επισκευαστεί. Το light running margin, λοιπόν, αναφέρεται στην ποσοστιαία διαφορά που παρατηρείται στις στροφές της έλικας στις δύο αυτές περιπτώσεις.

Σύμφωνα με τη σχέση $P = T \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60}$, που συνδέει την ισχύ P , με την ροπή T και τις στροφές n του κινητήρα, παρατηρείται πως για σταθερή τιμή ισχύος, η σχέση της ροπής με τις στροφές είναι αντιστρόφως ανάλογη. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως με την μείωση των στροφών για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η ροπή του κινητήρα αυξάνεται με κίνδυνο να ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια. Συνεπώς, σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, όπου ήταν αναγκαία η περίσσια ισχύος, στη παρούσα καθίσταται αναγκαία η περίσσια ροπής, ώστε να αποφευχθεί η υπερφόρτωση της κύριας μηχανής, σε περίπτωση που η αύξηση της ισχύος της δεν είναι δυνατή. Η εν λόγω περίσσια επιτυγχάνεται με την μείωση των στροφών που λειτουργεί ο κινητήρας στη κατάσταση καθαρής γάστρας και έλικας, κατά ένα ποσοστό που αντιστοιχεί στην τιμή του light running margin.

Το περιθώριο αυτό, σύμφωνα με τους περισσότερους κατασκευαστές κινητήρων προτείνεται μεταξύ 4% και 10%, ανάλογα με την ταχύτητα, τη γραμμή δρομολογίων και το είδος του πλοίου, την ποιότητα των κατεργασιών επισκευής και συντήρησης των δεξαμενισμών, καθώς και την λειτουργία του συστήματος αξονικής γεννήτριας, σε περίπτωση που είναι εγκατεστημένη. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από το άθροισμα των παραγόντων που ακολουθούν:

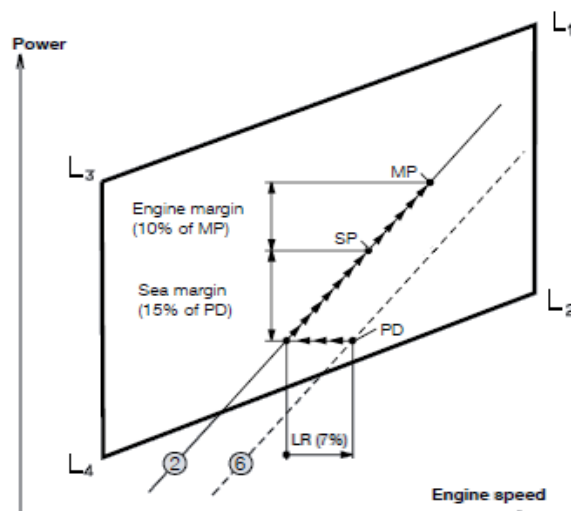
- 1,5-2%, λόγω επίδρασης του ανέμου, των κυματισμών και γενικότερα του καιρού στη ροή του νερού που λαμβάνει η έλικα.
- 1,5-2%, λόγω αύξησης της αντίστασης που δέχεται το πλοίο εξαιτίας των κυματισμών, της ρύπανσης της γάστρας, καθώς και εξαιτίας φαινομένων όπως η έμπλορη διαγωγή που οδηγεί σε βύθιση της βολβοειδούς πλώρης.
- 1%, λόγω της ρύπανσης της έλικας και κατ' επέκταση της μειωμένη απόδοσης της.

- 1%, λόγω μειωμένης απόδοσης της κύριας μηχανής, εξαιτίας προβλημάτων που είναι πιθανόν να παρουσιαστούν στον υπερπληρωτή, στο σύστημα λίπανσης ή στο σύστημα έκχυσης καυσίμου.
- 2-4%, λόγω της λειτουργίας power take off σε περίπτωση που αξονική γεννήτρια είναι εγκατεστημένη.

- **Engine Margin**

Το engine margin είναι περιθώριο ισχύος της κύριας μηχανής, που στην ουσία αποτελεί προσαύξηση του sea margin που αναφέρθηκε προηγουμένως. Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που το πλοίο χρειάζεται να πλέει με μεγαλύτερη ταχύτητα από την ταχύτητα υπηρεσίας του, είτε για να αναπληρώσει τις καθυστερήσεις που έχουν επέλθει στο χρονοδιάγραμμα του, είτε για την αποφυγή ενός ατυχήματος. Η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 10% και 15%, γεγονός που σημαίνει πως ο κινητήρας λειτουργεί στο 85% με 90% της μέγιστης δυνατής λειτουργίας του για να επιτευχθεί η ταχύτητα υπηρεσίας, ενώ η περίσσια της ισχύος χρησιμοποιείται για τους λόγους που αναφέρθηκαν. Το περιθώριο αυτό έχει την μικρότερη σημασία από τα δύο προηγούμενα για την κύρια μηχανή και δεν σχετίζεται με την λειτουργία των αξονικών γεννητριών που μελετάται στη παρούσα διπλωματική εργασία.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα περιοχής λειτουργίας ενός κινητήρα και η επιρροή που έχουν τα προαναφερθέντα περιθώρια προκειμένου να προσδιοριστεί το μέγιστο σημείο συνεχούς λειτουργίας του (MCR).



Σχήμα 3.1 Επίδραση των περιθωρίων ισχύος και στροφών στο προσδιορισμό του σημείου MCR του κινητήρα [6]

Το σημείο PD (propeller design point) αναφέρεται στο ζεύγος ισχύος και στροφών του κινητήρα σε ιδανικές συνθήκες καιρού και κατάστασης έλικας και γάστρας. Με τον προσδιορισμό του σημείου αυτού είναι δυνατή επίσης η κατασκευή της διακεκομμένης καμπύλης 6, η οποία αναπαριστά τις απαιτήσεις της έλικας σε ισχύ για διαφορετικές τιμές στροφών στις εν λόγω συνθήκες. Η καμπύλη σχεδιάζεται σύμφωνα την θεμελιώδη σχέση του νόμου της έλικας $P=C \cdot n^3$, όπου η σταθερά C εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά, την γεωμετρία της έλικας και τις συνθήκες λειτουργίας της κύριας μηχανής.

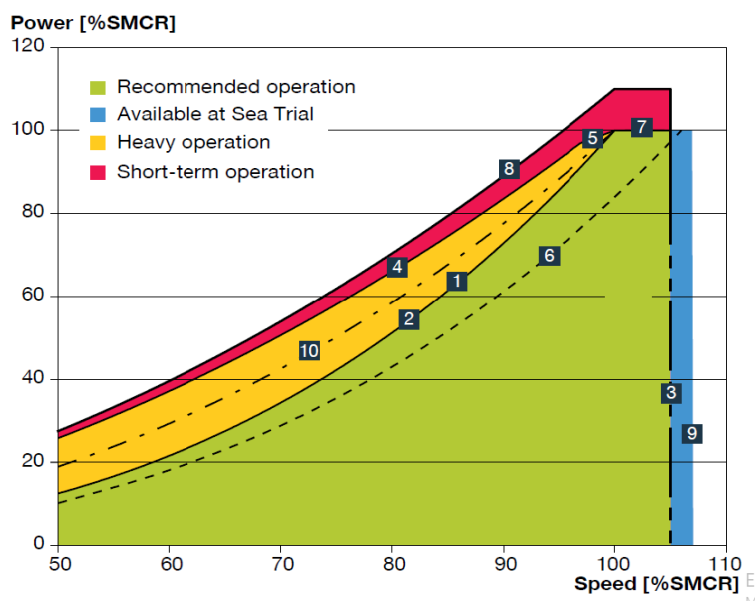
Στη συνέχεια, παρατηρείται μετατόπιση του σημείου PD προς τα δεξιά επιφέροντας μείωση στην τιμή των στροφών διατηρώντας σταθερή την ισχύ. Η μείωση αυτή λαμβάνεται σύμφωνα με το light running margin (LR) που στην προκειμένη περίπτωση έχει ληφθεί ίσο με 7%. Η σχεδίαση της καμπύλης 2, η οποία απεικονίζει τις απαιτήσεις της έλικας σε καταστάσεις καιρού και ρυπασμένης έλικας και γάστρας, είναι πλέον εφικτή με την χρήση

της θεμελιώδους σχέσης που προαναφέρθηκε. Έπειτα, επέρχεται επιπλέον αύξηση της ισχύος, εξαιτίας του sea margin, κατά 15% της αντίστοιχης του σημείου PD. Το σημείο SP (service propulsion point) αναφέρεται στο ζεύγος ισχύος και στροφών του κινητήρα για την επίτευξη της ταχύτητας υπηρεσίας και προκύπτει, ως το σημείο της καμπύλης 2 με την αυξημένη τιμή της ισχύος εξαιτίας του sea margin. Τέλος, με αύξηση 10% που αντιστοιχεί στο engine margin προκύπτει με παρόμοια διαδικασία το σημείο MP (MCR point) το οποίο είναι το σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας του κινητήρα και βάσει του οποίου θα γίνει η διαστασιολόγηση της κύριας μηχανής του πλοίου. Γίνεται ευκολά αντιληπτή λοιπόν, η σημασία των εν λόγω περιθωρίων προκειμένου να λειτουργεί σε ασφαλή επίπεδα ισχύος και στροφών ο κινητήρας και να καθίσταται δυνατή η εγκατάσταση αξονικών γεννητριών σε λειτουργία PTO χωρίς να προκαλείται υπερφόρτωση του.

3.2. Διάγραμμα φόρτισης κινητήρα με εγκατεστημένη λειτουργία PTO

Το διάγραμμα φόρτισης (load diagram) καθορίζει τα όρια της ισχύος και των στροφών ενός κινητήρα, ο οποίος έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με το σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας (MCR), που έχει προσδιοριστεί με βάση τις απαιτήσεις του πλοίου και τα περιθώρια που αναφέρθηκαν στη προηγούμενη παράγραφο. Η ανάλυση του εν λόγω διαγράμματος είναι ιδιαίτερα σημαντική, σε περίπτωση που μελετάται η εγκατάσταση ενός συστήματος αξονικής γεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (PTO mode), προκειμένου η αύξηση το φορτίου του κινητήρα να μην επιφέρει κινδύνους υπερφόρτωσης. Επιπλέον, η οριοθέτηση που παρατηρείται στο διάγραμμα οδηγεί και στην κατανόηση της μεγάλης σημασίας και ευελιξίας που προσφέρει το περιθώριο ήπιας λειτουργίας (light running margin).

Παρακάτω, απεικονίζεται το διάγραμμα φόρτισης ενός κινητήρα της MAN B&W, όπου οι αριθμημένες καμπύλες καθορίζουν τα όρια ισχύος και στροφών για την λειτουργία του.



Σχήμα 3.2: Ενδεικτικό διάγραμμα φόρτισης κύριας μηχανής [8]

Το διάγραμμα είναι ποιοτικά όμοιο για κάθε κινητήρα ανεξάρτητα από το μοντέλο του και τις συντεταγμένες του σημείου μέγιστης συνεχούς λειτουργίας του. Στην συνέχεια, θα αναλυθεί η σημασία της κάθε γραμμής και η επιρροή της λειτουργίας PTO στην σχεδιάσή τους [8].

- Γραμμή 1: Προσδιορίζει την καμπύλη λειτουργίας του κινητήρα, δηλαδή τις στροφές που αντιστοιχούν για κάθε τιμή ισχύος. Σχεδιάζεται σύμφωνα με τον νόμο της έλικας που αναφέρθηκε προηγουμένως ($P=C \cdot n^3$) και λαμβάνοντας υπόψη το σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας (MCR) που βρίσκεται πάνω σε αυτήν. Εξαιτίας, λοιπόν, της παρουσίας των προαναφερθέντων περιθωρίων στις συντεταγμένες του σημείου MCR, οι μηχανές οι οποίες δεν έχουν εγκατεστημένο σύστημα ΡΤΟ, λειτουργούν στα δεξιά της εν λόγω καμπύλης για το μεγαλύτερο διάστημα του χρόνου λειτουργίας τους.
- Γραμμή 2: Είναι η καμπύλη η οποία αναφέρεται στις απαιτήσεις της έλικας σε μηχανική ισχύ για συνθήκες ρυπασμένης γάστρας και έλικας και έντονων καιρικών φαινομένων. Σχεδιάζεται σύμφωνα με τον νόμο της έλικας και με βάση την τιμή του light running margin καθώς στην ουσία περιγράφει την καμπύλη ήπιας λειτουργίας 6 μετατοπισμένη κατά την τιμή του περιθωρίου αυτού. Η γραμμή 2 λοιπόν προσδιορίζει τις απαιτήσεις σε μηχανική που χρειάζεται να καλύψει ο κινητήρας για την πρόωση του πλοίου σε συνθήκες επιβαρυσμένης λειτουργίας και συνεπώς συμπίπτει με την γραμμή 1 σε περίπτωση που δεν παρατηρείται αξονική γεννήτρια στο σύστημα. Επιπλέον, διαχωρίζει την περιοχή ήπιας (recommended operation) από την περιοχή επιβαρυσμένης λειτουργίας (heavy operation) όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο διάγραμμα.
- Γραμμή 3: Προσδιορίζει τη μέγιστη τιμή των στροφών που είναι δυνατόν να επιτύχει ο κινητήρας για συνεχή λειτουργία. Δεν επηρεάζει, ούτε επηρεάζεται από την λειτουργία ΡΤΟ και δεν θα αναλυθεί περαιτέρω.
- Γραμμή 4: Προσδιορίζει τα όρια της ροπής που είναι δυνατόν να φέρει ο κινητήρας χωρίς να υπάρξει υπερφόρτωση του. Παρόλο που η μεθοδολογία σχεδίασης της είναι διαφορετική για κάθε κατασκευαστή, οι διαφορές που παρουσιάζονται ποιοτικά είναι ελάχιστες. Η σημασία της καμπύλης είναι προφανώς πολύ μεγάλη, καθώς σε περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί σε περιοχές αριστερά από αυτήν επέρχεται υπερφόρτωση, η οποία άμα έχει μεγάλη διάρκεια μπορεί να προκαλέσει αρκετά προβλήματα στη λειτουργία των στοιχείων μηχανών του.
- Γραμμή 5: Προσδιορίζει την μέγιστη δυνατή μέση πίεση που είναι ικανή να λειτουργήσει η κύρια μηχανή χωρίς να προκληθεί υπερφόρτωση. Λαμβάνεται υπόψη μόνο σε περιπτώσεις υψηλής ισχύος και στροφών καθώς για μικρότερες τιμές η γραμμή 4 αποτελεί αυστηρότερο όριο υπερφόρτωσης του κινητήρα, όπως παρατηρείται και στο διάγραμμα.
- Γραμμή 6: Είναι η καμπύλη η οποία σχεδιάζεται σύμφωνα με τον νόμο της έλικας και αναφέρεται στις απαιτήσεις της έλικας σε μηχανική ισχύ για συνθήκες ήπιας λειτουργίας του πλοίου σε ήρεμη θάλασσα με καθαρή γάστρα και έλικα. Η ποσοστιαία διαφορά των στροφών της καμπύλης αυτής με τις αντίστοιχες της καμπύλης 2 για δεδομένη τιμή ισχύος αποτελεί το light running margin. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, πως όσο μεγαλύτερο είναι το περιθώριο αυτό η καμπύλη 6 μετατοπίζεται προς τα δεξιά με αποτέλεσμα να απομακρύνεται από το όριο υπερφόρτωσης (καμπύλη 4) και συνεπώς παρατηρείται μεγαλύτερη περίσσια ισχύος και ροπής σε περίπτωση που καθίσταται αναγκαία για την λειτουργία ενός συστήματος αξονικής γεννήτριας. Ασφαλώς, όμως, το περιθώριο δεν είναι δυνατό να πάρει πάρα πολύ μεγάλες τιμές καθώς επιδρά αρνητικά στην αποδοτικότητα του κινητήρα.

- Γραμμή 7: Προσδιορίζει τη μέγιστη τιμή της ισχύος που είναι δυνατόν να επιτύχει ο κινητήρας για συνεχή λειτουργία.
- Γραμμή 8: Προσδιορίζει το όριο της υπερφόρτωσης που μπορεί να υποστεί ο κινητήρας σε περίπτωση που αυτή καθίσταται αναπόφευκτη. Η λειτουργία του κινητήρα στη περιοχή που ορίζουν οι καμπύλες 8 και 4 πρέπει να αποφεύγεται και είναι δυνατή μόνο για περιορισμένο χρονικό διάστημα (1 ώρα περίπου) σε περιπτώσεις ανάγκης. Για τις μεθόδους σχεδίασης της ισχύει ό,τι και στην καμπύλη 4.
- Γραμμή 9: Περιγράφει τη μέγιστη τιμή των στροφών που είναι δυνατόν να επιτύχει ο κινητήρας σε καταστάσεις δοκιμών.
- Γραμμή 10: Η καμπύλη αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για το σύστημα των αξονικών γεννητριών καθώς περιγράφει την μέγιστη ισχύ σε συνδυασμό με στροφές, που είναι δυνατόν να διαθέσει ο κινητήρας σε συνεχή λειτουργία, σε περίπτωση που είναι διαθέσιμη η λειτουργία PTO, χωρίς να προκληθεί κίνδυνος υπερφόρτωσης. Στη συνέχεια, θα περιγραφούν οι τρόποι σχεδίασης της εν λόγω καμπύλης, η σχέση της με το light running margin και η σημασία της για την σχεδίαση του συστήματος PTO.

Η καμπύλη 10 σχεδιάζεται με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με τον κατασκευαστή του κινητήρα. Η MAN B&W χρησιμοποιεί την σχέση :

$$PTO_{layout\ limit} = P_{MCR} \cdot \left(\frac{n}{n_{MCR}}\right)^{2.4} \quad [9]$$

Αντίθετα, η WIN GD χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό εξισώσεων δευτέρου βαθμού με κατάλληλες σταθερές. Παρά τις διαφορετικές μεθοδολογίες η μορφή της καμπύλης δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές στις δύο περιπτώσεις. Επιπλέον, οι σχέσεις ισχύουν ασφαλώς για εύρη ισχύος και στροφών για τα οποία είναι δυνατή η λειτουργία PTO, ανάλογα με τον τύπο αξονικών γεννητριών που είναι εγκατεστημένος, όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.

Παράλληλα, σπουδαία σημασία έχει ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται η καμπύλη 10 με την καμπύλη 6 της έλικας. Η κατακόρυφη απόσταση, δηλαδή η αλγεβρική διαφορά των συντεταγμένων των σημείων των δυο καμπυλών, προσδιορίζει την μέγιστη δυνατή μηχανική ισχύ που μπορεί να διαθέσει ο κινητήρας για το σύστημα της αξονικής γεννήτριας. Συνεπώς, είναι δυνατή η διαστασιολόγηση της γεννήτριας καθώς και των γριναζοκιβωτίων αύξησης στροφών σε περίπτωση που είναι εγκατεστημένα. Η MAN B&W, λοιπόν, προτείνει την παρακάτω σχέση η οποία χρειάζεται να ισχύει για κάθε τιμή στροφών του κινητήρα (n), όπου επιτρέπεται η λειτουργία του συστήματος:

$$PTO_M(n) \leq P_{MCR} \cdot \left(\frac{n}{n_{MCR}}\right)^{2.4} - P_{MCR} \cdot \left(\frac{n}{n_{MCR} \cdot (1 + LRM\%)}\right)^3 \quad [9]$$

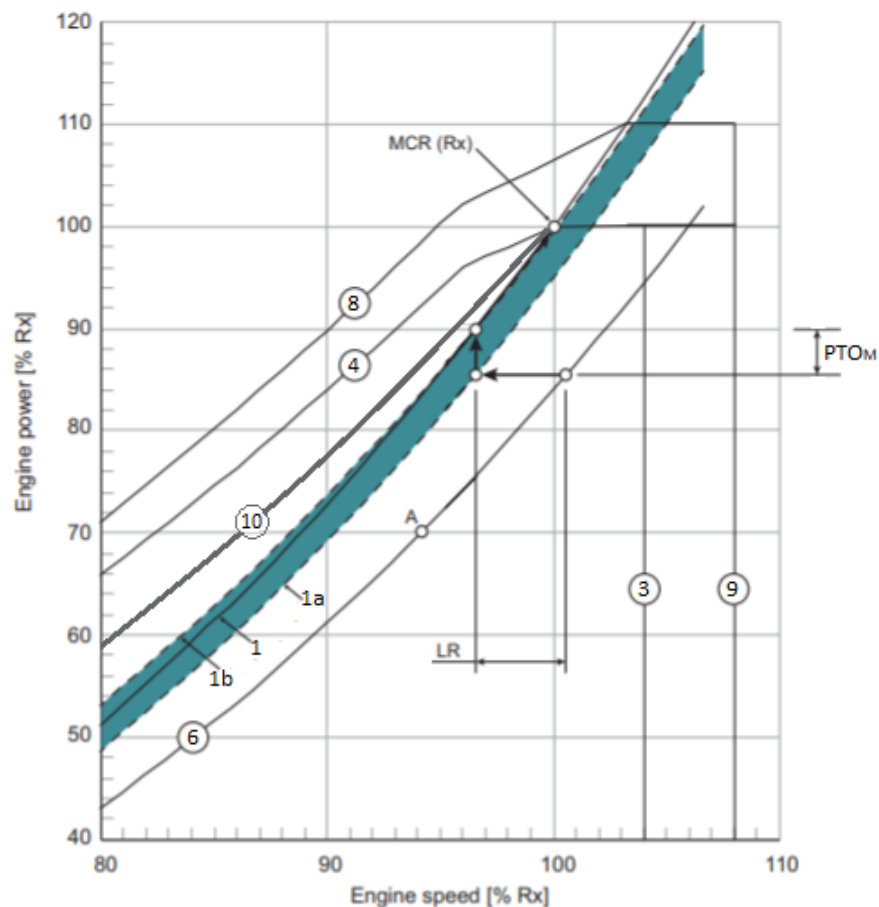
Στο αριστερό μέρος της ανισότητας ο όρος PTO_M αντιστοιχεί στην μηχανική ισχύ που απορροφά το σύστημα της αξονικής γεννήτριας από τον κινητήρα και προκύπτει από τον λόγο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος PTO_E προς τον βαθμό απόδοσης η_{PTO} του συστήματος :

$$PTO_M = \frac{P_E}{\eta_{PTO}}$$

Το δεξί μέρος της ανισότητας αναφέρεται στην διαφορά δύο όρων, όπου ο πρώτος αντιπροσωπεύει την καμπύλη 10 και προκύπτει από την εξίσωση που αναφέρθηκε προηγουμένως, ενώ ο δεύτερος αντιπροσωπεύει την καμπύλη 6 και προκύπτει από τον νόμο της έλικας ($P=C \cdot n^3$) στο σημείο ήπιας λειτουργίας του κινητήρα με συντεταγμένες $(P, n) = (P_{MCR}, n_{MCR} \cdot (1 + LRM\%))$. Ο όρος LRM% αντιστοιχεί στο light running margin της έλικας, γεγονός που υποδεικνύει για ακόμη μια φορά τη σημασία του εν λόγω περιθωρίου, καθώς η αύξησή του επιφέρει μείωση του αφαιρούμενου όρου της ανισότητας και συνεπώς αυξάνει την μέγιστη δυνατή ισχύ που μπορεί να απορροφήσει το σύστημα PTO από τον κινητήρα.

Αυτή η μεγάλης σημασίας ανισότητα είναι παρόμοια και στη περίπτωση που ο κατασκευαστής της μηχανής είναι η WIN GD ή κάποια άλλη εταιρία, με την μόνη διαφορά να παρουσιάζεται στον πρώτο όρο της αφαίρεσης που αντιστοιχεί στην καμπύλη 10, καθώς όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ο τρόπος αναπαράστασής της διαφέρει για κάθε κατασκευαστή. Ωστόσο, τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζουν πολύ μικρές ποιοτικές αποκλίσεις.

Συνεπώς, η ισχύς που απορροφά το σύστημα PTO (PTO_M) οριοθετείται από τις καμπύλες 6 και 10. Το γεγονός πως η οριοθέτηση πραγματοποιείται από την καμπύλη 10 και όχι από τις 4 και 5, οι οποίες αποτελούν το όριο υπερφόρτωσης του κινητήρα, προσδίδει ευελιξία στο σύστημα και καθιστά την λειτουργία του δυνατή ακόμη και σε περιπτώσεις επιβαρυσμένης λειτουργίας όπου το light running margin δύναται να έχει υποχωρήσει αισθητά. Παρόλα αυτά, σε καταστάσεις έντονης κακοκαιρίας ή σοβαρής βλάβης, όπου το φορτίο της μηχανής αυξάνεται σε πολύ υψηλό βαθμό, η λειτουργία της γεννήτριας άξονα χρειάζεται να σταματήσει και οι απαιτήσεις του πλοίου σε ηλεκτρικό ρεύμα να καλύπτονται εξ ολοκλήρου από τις γεννήτριες ντίζελ.



Σχήμα 3.3: Επίδραση της λειτουργίας PTO στην καμπύλη λειτουργίας του κινητήρα [10]

Τέλος, η καμπύλη λειτουργίας του κινητήρα προκύπτει, πλέον, από το άθροισμα της ισχύος που απορροφά η έλικα για την πρόωση του πλοίου, με την ισχύ P_{TO_M} . Το γεγονός αυτό γίνεται κατανοητό και στο παράδειγμα διαγράμματος φόρτισης που απεικονίζεται παραπάνω (Σχήμα 3.3). Η καμπύλη 1a αντιστοιχεί στην καμπύλη λειτουργίας του κινητήρα απόντος του συστήματος PTO, ενώ η καμπύλη 1b είναι η νέα καμπύλη, η οποία όπως παρατηρείται προκύπτει από την κατακόρυφη μετατόπιση της καμπύλης 1a κατά την τιμή της ισχύος P_{TO_M} .

4. Μελέτη εγκατάστασης συστήματος αξονικής γεννήτριας ΡΤΟ σε δεξαμενόπλοιο τύπου VLCC.

Αφού έχουν αναλυθεί τα οφέλη και τα ζητήματα που προκύπτουν από την λειτουργία των γεννητριών άξονα, καθώς και οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους καθίσταται δυνατή η λειτουργία τους, στο παρόν κεφάλαιο θα εξετασθούν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την εγκατάσταση του εν λόγω συστήματος σε ένα δεξαμενόπλοιο VLCC. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί, ασφαλώς, στην διάταξη της εγκατάστασης και στο κατά πόσο η λειτουργία της καθίσταται οικονομικά συμφέρουσα για την λειτουργία του πλοίου.

4.1. Το υπό μελέτη πλοίο



Σχήμα 4.1: Δεξαμενόπλοιο τύπου VLCC.

Το πλοίο στο οποίο θα εξετασθεί η περίπτωση της λειτουργίας ΡΤΟ είναι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεξαμενόπλοιο τύπου VLCC. Τα δεξαμενόπλοια είναι πλοία σχεδιασμένα για την μεταφορά πετρελαίου χύδην, μέσα σε κατάλληλα διαμορφωμένες δεξαμενές. Ο όρος VLCC αναφέρεται στο πολύ μεγάλο μέγεθος των πλοίων αυτών (Very Large Crude Carriers), καθώς το μήκος τους ξεπερνάει συνήθως τα 300m, ενώ το πρόσθετο βάρος (Deadweight) τους κυμαίνεται μεταξύ 180000 και 320000 τόνους. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του εν λόγω τύπου πλοίου. Ακολούθως, στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου και των κύριων και βοηθητικών μηχανών του, τα οποία αντλήθηκαν σύμφωνα με δεδομένα του νορβηγικού νηογνώμονα DNV GL.

Πίνακας 4.1: Κύρια χαρακτηριστικά υπό μελέτη πλοίου VLCC.

| ΚΥΡΙΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ | |
|---------------------------------------|------------------------|
| Ολικό μήκος | $L_{oa}=333,08$ m |
| Μήκος μεταξύ καθέτων | $L_{bp}=322$ m |
| Πλάτος | $B=60$ m |
| Κοίλο | $D=29,4$ m |
| Βύθισμα σχεδίασης | $T_{design}=20,5$ m |
| Μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα | $T_{scantling}=21,6$ m |
| ΚΥΡΙΑ ΜΗΧΑΝΗ ΠΡΩΩΣΗΣ | |
| Μοντέλο | Wartsila W7X82-B |
| Ισχύς μέγιστης συνεχούς λειτουργίας | $P_{MCR}=24020$ kW |
| Στροφές μέγιστης συνεχούς λειτουργίας | $n_{MCR}=65.7$ rpm |
| ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ | |
| Μοντέλο Γεννήτριας | Himsen 9H21/32 |
| Αριθμός set | 3 |
| Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς γεννήτριας | $P_e=1450$ kW |
| Τάση | $V=450$ V |
| Χωρητικότητα | 1812.5 kVA |
| Συντελεστής ισχύος | $\Sigma I = 0,8$ |
| Φάση/Συχνότητα | 3PH/f=60 Hz |
| Στροφές λειτουργίας | $n=900$ rpm |
| Κινητήρας | Μηχανή Diesel |
| Μέγιστη μηχανική ισχύς κινητήρα | $P_m=1530$ kW |

Πολύ σημαντική, επιπλέον, για την εξέταση του φαινομένου, είναι η ανάλυση των απαιτήσεων του πλοίου σε ηλεκτρισμό για διαφορετικές λειτουργίες του και η κατανομή φορτίου των ντιζελογεννητριών, προκειμένου να καλυφθούν οι εν λόγω ανάγκες σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Τα στοιχεία αυτά προκύπτουν από το σχέδιο "Electric Load Analysis" του πλοίου και παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.2: Απαιτήσεις υπό μελέτη πλοίο σε ηλεκτρικό φορτίο.

| Λειτουργία | Απαιτούμενο ηλεκτρικό φορτίο | Αριθμός γεννητριών σε λειτουργία | Κατανομή φορτίου κάθε γεννήτριας |
|--|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Εν πλω | 1146,8 kW | 1 | 79,10% |
| Εν όρμω (Παραμονή στο λιμάνι) | 670,2 kW | 1 | 46,20% |
| Φόρτωση | 1317,2 kW | 2 | 45,40% |
| Εκφόρτωση | 2450,5 kW | 2 | 84,50% |
| Είσοδος/Εξοδος από το λιμάνι | 1735 kW | 2 | 59,80% |
| Επικάλυψη δεξαμενών φορτίου με αδρανές αέριο | 1371,7 kW | 2 | 47,30% |
| Καθαρισμός Δεξαμενών | 1551,2 kW | 2 | 53,50% |

Όπως προκύπτει από την ανάλυση των προηγούμενων κεφαλαίων, η κατάσταση η οποία θα ληφθεί υπόψη για την μελέτη της εγκατάστασης συστήματος αξονικής γεννήτριας είναι η κατάσταση εν πλω, καθώς όταν το πλοίο εισέρχεται ή εξέρχεται από ένα λιμάνι η τιμή των στροφών της κύριας μηχανής είναι πολύ μικρή για να λειτουργήσει το σύστημα, ενώ στις άλλες περιπτώσεις η αντίστοιχη τιμή είναι μηδενική. Συνεπώς, το σύστημα της γεννήτριας άξονα πρέπει να διαστασιολογηθεί, ώστε κατά την λειτουργία ΡΤΟ να είναι δυνατή η παραγωγή της ηλεκτρικής ισχύος που απαιτείται κατά την πλεύση του πλοίου, η τιμή της οποίας ανέρχεται στα 1146,8 kW, όπως παρατηρείται στον παραπάνω πίνακα.

4.2. Προφίλ λειτουργίας

Το προφίλ λειτουργίας ενός πλοίου δίνει πληροφορίες σχετικά με βασικά χαρακτηριστικά του, όπως η ταχύτητα του και η ισχύς λειτουργίας της κύριας μηχανής, καθώς και την συχνότητα με την οποία αυτά εμφανίζονται κατά την διάρκεια των ταξιδιών του. Γίνεται εύκολα αντιληπτό λοιπόν, πως καθίσταται απαραίτητο, προκειμένου να εξετασθεί σε πρωταρχικό στάδιο, αν κατά την διάρκεια του ταξιδιού του υπό μελέτη πλοίου παρατηρείται περίσσια ισχύος, καθώς και απαιτούμενος αριθμός στροφών του κινητήρα, ώστε να είναι δυνατή η εγκατάσταση ενός συστήματος ΡΤΟ το οποίο θα λειτουργεί αξιόπιστα.

Παρακάτω, απεικονίζεται, σύμφωνα με τα δεδομένα του DNV GL, το προφίλ λειτουργίας του πλοίου, του οποίου τα στοιχεία θα αναλυθούν περαιτέρω.

Πίνακας 4.3: Προφίλ λειτουργίας υπό μελέτη πλοίου σε κατάσταση ερματισμού (Ballast).

| Condition | Sailing mode | Condition port | LOG Speed [knots] | Frequency [year] | ME power (measured onboard) [kW] | Load Factor |
|--|--------------|----------------|-------------------|------------------|----------------------------------|-------------|
| B A L L A S T | Port | Harbour | 0 | 3,75% | 0 | 0% |
| | Port | Loading | 0 | 1,42% | 0 | 0% |
| | Manoeuvring | At Sea | 1 | 0,13% | 1808 | 8% |
| | Manoeuvring | At Sea | 2 | 0,11% | 3827 | 16% |
| | Manoeuvring | At Sea | 3 | 0,15% | 6113 | 25% |
| | Manoeuvring | At Sea | 4 | 2,56% | 1227 | 5% |
| | Manoeuvring | At Sea | 5 | 2,11% | 1401 | 6% |
| | Manoeuvring | At Sea | 6 | 2,11% | 1959 | 8% |
| | Manoeuvring | At Sea | 7 | 0,40% | 3893 | 16% |
| | Sailing | At Sea | 8 | 0,89% | 4949 | 21% |
| | Sailing | At Sea | 9 | 4,35% | 4911 | 20% |
| | Sailing | At Sea | 10 | 1,86% | 6746 | 28% |
| | Sailing | At Sea | 11 | 2,78% | 8507 | 35% |
| | Sailing | At Sea | 12 | 9,03% | 10324 | 43% |
| | Sailing | At Sea | 13 | 3,85% | 11147 | 46% |
| | Sailing | At Sea | 14 | 1,76% | 13448 | 56% |
| | Sailing | At Sea | 15 | 1,34% | 15218 | 63% |
| Sailing | At Sea | 16 | 1,72% | 17459 | 73% | |

Πίνακας 4.4: Προφίλ λειτουργίας υπό μελέτη πλοίου σε έμφορτη κατάσταση (Laden).

| Condition | Sailing mode | Condition port | LOG Speed [knots] | Frequency [year] | ME power (measured onboard) [kW] | Load Factor |
|----------------------------------|--------------|----------------|-------------------|------------------|----------------------------------|-------------|
| L A D E N | Port | Harbour | 0 | 10,97% | 0 | 0% |
| | Port | Unloading | 0 | 0,77% | 0 | 0% |
| | Manoeuvring | At Sea | 1 | 0,13% | 3463 | 14% |
| | Manoeuvring | At Sea | 2 | 0,08% | 2469 | 10% |
| | Manoeuvring | At Sea | 3 | 0,04% | 2485 | 10% |
| | Manoeuvring | At Sea | 4 | 0,02% | 5042 | 21% |
| | Manoeuvring | At Sea | 5 | 0,11% | 5942 | 25% |
| | Manoeuvring | At Sea | 6 | 0,20% | 6035 | 25% |
| | Manoeuvring | At Sea | 7 | 0,34% | 7565 | 31% |
| | Sailing | At Sea | 8 | 0,53% | 9303 | 39% |
| | Sailing | At Sea | 9 | 0,75% | 8780 | 37% |
| | Sailing | At Sea | 10 | 3,38% | 11246 | 47% |
| | Sailing | At Sea | 11 | 18,77% | 12613 | 53% |
| | Sailing | At Sea | 12 | 12,44% | 12188 | 51% |
| | Sailing | At Sea | 13 | 6,38% | 14476 | 60% |
| | Sailing | At Sea | 14 | 4,67% | 15645 | 65% |
| | Sailing | At Sea | 15 | 0,04% | 15654 | 65% |

Στην πρώτη στήλη των πινάκων προσδιορίζεται η κατάσταση φόρτωσης του δεξαμενόπλοιου, αν βρίσκεται, δηλαδή, σε κατάσταση ερματισμού (ballast) ή είναι φορτωμένο (laden). Αξίζει να παρατηρηθεί, πως για όμοιες τιμές ταχύτητας πλεύσης απαιτούνται μεγαλύτερα ποσά ισχύος στην φορτωμένη κατάσταση, καθώς η αύξηση του εκτοπίσματος του πλοίου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βυθίσματός του, της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας και συνεπώς της αντίστασης τριβής λόγω συνεκτικότητας που δέχεται από την θάλασσα.

Στην δεύτερη στήλη αναφέρονται οι λειτουργίες του πλοίου όταν αυτό βρίσκεται εν πλω, διαχωρίζοντας την κατάσταση ελιγμών (manoeuvring) από την απλή πλεύση στην ανοιχτή θάλασσα (sailing), ενώ στην τρίτη αναφέρονται λειτουργίες όταν βρίσκεται εν όρμω, διαχωρίζοντας την διαδικασία φόρτωσης (loading), εκφόρτωσης (unloading), καθώς και την περίπτωση που το πλοίο παραμένει αγκυροβολημένο στο λιμάνι (harbor).

Στις επόμενες στήλες προσδιορίζονται οι ταχύτητες που λειτουργεί το πλοίο, οι οποίες έχουν υπολογισθεί με δρομόμετρο (log), καθώς και οι αντίστοιχες συχνότητες για τις οποίες αυτές επιτυγχάνονται κατά την διάρκεια ενός χρόνου. Παρατηρείται, πώς και στις δύο καταστάσεις φόρτωσης, οι ταχύτητες οι οποίες επιτυγχάνονται συχνότερα κυμαίνονται μεταξύ 11 και 13 κόμβων.

Στην συνέχεια, φαίνεται η ισχύς του κινητήρα η οποία απαιτείται για την επίτευξη κάθε ταχύτητας και κατάσταση φόρτωσης, και τέλος, η ποσοστιαία σχέση της κάθε ισχύος με την αντίστοιχη της μέγιστης συνεχούς λειτουργίας της κύριας μηχανής, η οποία, όπως προκύπτει από τις κύριες διαστάσεις του πλοίου, αντιστοιχεί σε 24020 kW.

Για την μελέτη της εγκατάστασης συστήματος PTO, λοιπόν, παρατηρείται πως το φορτίο της κύριας μηχανής δεν ξεπερνάει το 75% του μέγιστου, γεγονός που οδηγεί σε επαρκή

περίσσια ισχύος, η οποία μπορεί να διατεθεί για την λειτουργία γεννήτριας άξονα χωρίς τον κίνδυνο υπερφόρτωσης. Τα χαμηλά επίπεδα ισχύος οδηγούν, επιπλέον, στο συμπέρασμα πως το υπό μελέτη δεξαμενόπλοιο εφαρμόζει την πρακτική του "slow steaming", της οποίας τα χαρακτηριστικά και η σχέση με το σύστημα ΡΤΟ αναφέρθηκαν στην εισαγωγή τη εργασίας. Όσον αφορά την ύπαρξη επαρκούς αριθμού στροφών, προκειμένου να λειτουργεί αξιόπιστα και αποτελεσματικά το εν λόγω σύστημα, δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα τα οποία να προσδιορίζουν τις στροφές τις έλικας του πλοίου για τις αντίστοιχες τιμές ισχύος της κύριας μηχανής. Οι τιμές των στροφών, λοιπόν, θα προσεγγισθούν στη συνέχεια, σύμφωνα με το διάγραμμα φόρτισης του κινητήρα. Παρόλα αυτά, από το προφίλ λειτουργίας υπολογίζεται, πως ο κινητήρας του πλοίου λειτουργεί με ισχύ μεγαλύτερη του 40% της MCR για συχνότητες αθροιστικά ίσες με περίπου 60%, τιμή που αντιστοιχεί σε περισσότερο από μισό χρόνο. Η τιμή του 40% της ισχύος είναι το όριο με το οποίο προσεγγίζει η MAN B&W την δυνατότητα της γεννήτριας άξονα (κατηγορίας RCF και CFE) να παράγει το 100% της ηλεκτρικής ισχύος που είναι ικανή, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο 2. Συνεπώς, με μια πρωταρχική μελέτη, τα επίπεδα ισχύος που παρατηρούνται τη μεγαλύτερη διάρκεια ενός χρόνου καθιστούν δυνατή την λειτουργία ενός συστήματος ΡΤΟ, γεγονός που ωθεί σε περαιτέρω ανάλυση, ώστε να επιτευχθεί η διαστασιολόγησή του.

Τέλος, η μεγάλη ποσότητα των τιμών των ταχυτήτων και των αντίστοιχων συχνοτήτων και ισχύων της κύριας μηχανής του προφίλ λειτουργίας, οδηγεί σε υπερανάλυση των δεδομένων, η οποία δεν είναι απαραίτητη για την επερχόμενη μελέτη και παράλληλα την καθιστά ιδιαίτερα χρονοβόρα και πολύπλοκη. Για τον λόγο αυτό, υφίσταται η ανάγκη υπολογισμού μέσων όρων των παραπάνω μεγεθών, με κατάλληλο τρόπο, ώστε να συμπυκνούνται τα δεδομένα του πίνακα χωρίς να παρατηρηθεί αλλοίωση των πληροφοριών που προκύπτουν από αυτά. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την χρήση του σταθμισμένου μέσου, του οποίου ο τύπος απεικονίζεται παρακάτω:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k (w_i x_i)}{\sum_{i=1}^k (w_i)}$$

όπου w_i ονομάζεται ο συντελεστής βαρύτητας του i στοιχείου x_i .

Στη προκειμένη περίπτωση θα οριστούν οι σταθμισμένοι μέσοι των ταχυτήτων και των ισχύων του κινητήρα, θέτοντας τις τιμές της συχνότητας ως τους αντίστοιχους συντελεστές βαρύτητας. Βασικός στόχος, είναι ο υπολογισμός τριών ταχυτήτων και ισχύων για κάθε κατάσταση φόρτωσης, από τις οποίες η μία θα αντιπροσωπεύει την κατάσταση ελιγμών ενώ οι άλλες δύο την απλή πλεύση του πλοίου.

Συνεπώς, υπολογίσθηκε ο σταθμισμένος μέσος των ταχυτήτων:

- 1 έως 7 κόμβων, που αντιστοιχούν στις ταχύτητες ελιγμού του πλοίου
- 8 έως 11 κόμβων, που αντιστοιχούν στις ταχύτητες στη κατάσταση πλεύσης, για τις οποίες η απαιτούμενη ισχύς είναι χαμηλότερη του 40% του MCR
- 12 έως 16 κόμβων

Όμοια για την έμφορτη κατάσταση προέκυψε ο σταθμισμένος μέσος των ταχυτήτων:

- 1 έως 7 κόμβων, που αντιστοιχούν στις ταχύτητες ελιγμού
- 8 έως 12 κόμβων
- 13 έως 15 κόμβων

Στην περίπτωση της κατάστασης ερματισμού ο διαχωρισμός των ταχυτήτων πλεύσης 8 έως 11 κόμβων πραγματοποιείται, διότι οι συγκεκριμένες αντιστοιχούν σε επίπεδα ισχύος του κινητήρα μικρότερα του 40% του MCR. Το κριτήριο αυτό παρατηρείται για δύο μονάχα

ταχύτητες σε μικρή συχνότητα όταν το πλοίο είναι φορτωμένο και συνεπώς δεν λαμβάνεται υπόψη στην κατάσταση αυτή.

Παράλληλα, υπολογίζονται και οι σταθμισμένοι μέσοι των ισχύων που αντιστοιχούν στις παραπάνω έξι κατηγορίες ταχυτήτων, ενώ η συχνότητα κάθε κατηγορίας προκύπτει αθροιστικά, αποτελώντας στην ουσία τον παρονομαστή του τύπου του σταθμισμένου μέσου.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, ο οποίος στο εξής θα αντιπροσωπεύει το προφίλ λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου.

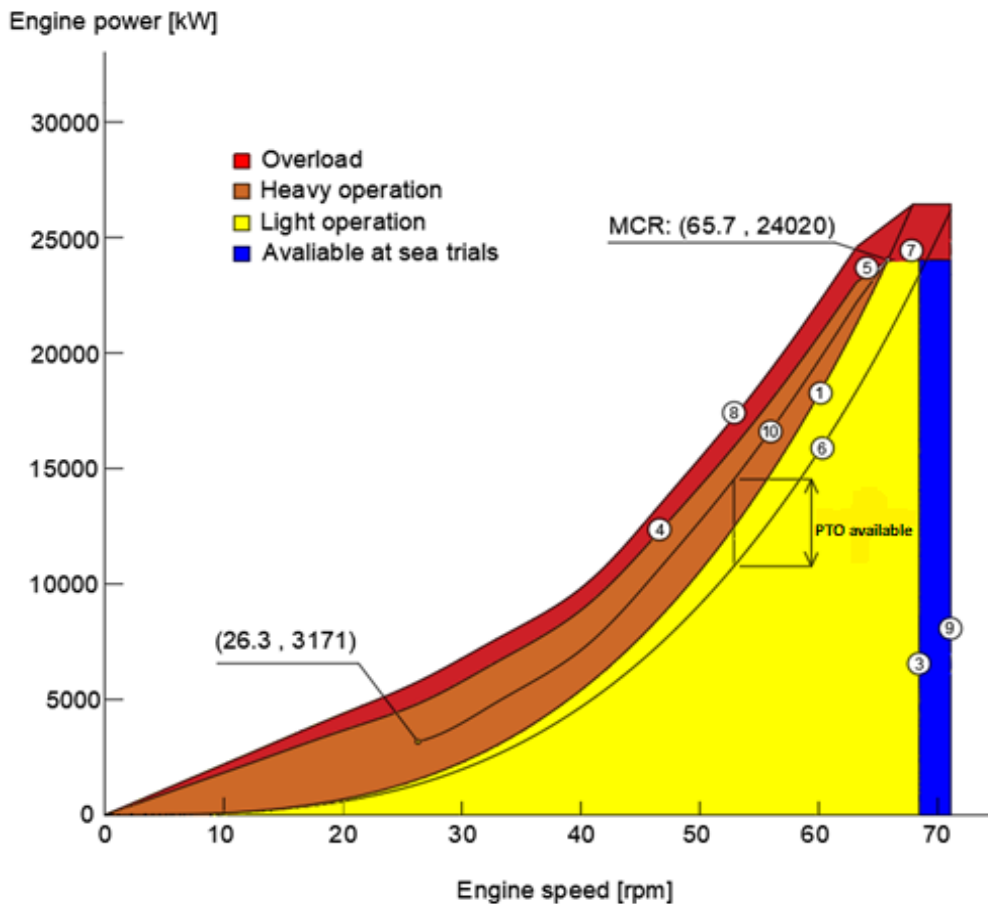
Πίνακας 4.5: Ισοδύναμο προφίλ λειτουργίας υπό μελέτη πλοίου.

| Condition | Sailing mode | Condition port | LOG Speed [knots] | Frequency [year] | M/E Power [kW] | Load Factor |
|-----------|--------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|-------------|
| Ballast | Port | Harbour | 0 | 3,75% | 0 | 0% |
| | Port | Loading | 0 | 1,50% | 0 | 0% |
| | Manoeuv. | At Sea | 5 | 7,50% | 1765 | 7% |
| | Sailing | At Sea | 9,5 | 10,00% | 6270 | 26% |
| | Sailing | At Sea | 13 | 17,50% | 11875 | 49% |
| Laden | Port | Harbour | 0 | 11,00% | 0 | 0% |
| | Port | Unloading | 0 | 0,75% | 0 | 0% |
| | Manoeuv. | At Sea | 5 | 1,00% | 5740 | 24% |
| | Sailing | At Sea | 11 | 36,00% | 12210 | 51% |
| | Sailing | At Sea | 13,5 | 11,00% | 14970 | 62% |

Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, πως οι ταχύτητες οι οποίες θα απασχολήσουν για την μελέτη της εγκατάστασης του συστήματος της γεννήτριας άξονα είναι οι 13 κόμβοι στην κατάσταση ερματισμού και οι 11 και 13.5 κόμβοι στην έμφορτη κατάσταση, για τις οποίες η ισχύς του κινητήρα ξεπερνάει το 40% της αντίστοιχης του MCR. Στη περίπτωση ελιγμών του πλοίου, η ισχύς λαμβάνει πολύ χαμηλές τιμές όταν πλοίο είναι άφορτο, ενώ όταν είναι φορτωμένο η εν λόγω κατάσταση παρατηρείται σε συχνότητα 1% γεγονός που δεν καθιστά αξιόλογη την ανάλυσή της. Τέλος, η περίπτωση της ταχύτητας των 9,5 κόμβων θα αναφερθεί στην συνέχεια, καθώς το 26% της ισχύος του κινητήρα καθιστά την λειτουργία ενός συστήματος PTO δυνατή σε συγκεκριμένο τύπο αξονικών γεννητριών και με περιορισμένη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, όπως περιγράφηκε στο δεύτερο κεφάλαιο.

4.3. Διάγραμμα φόρτισης κινητήρα

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μελέτη του διαγράμματος φόρτισης ενός κινητήρα είναι αναγκαία, προκειμένου να διαστασιολογηθεί το σύστημα της αξονικής γεννήτριας. Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα φόρτισης της κύριας μηχανής W7X82-B του υπό μελέτη πλοίου, το οποίο σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα AutoCAD σύμφωνα με το "Marine Installation Manual" του συγκεκριμένου μοντέλου της WIN GD, για το δεδομένο σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας MCR [11].



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα φόρτισης κινητήρα W7X82-B

Η κόκκινη περιοχή του διαγράμματος προσδιορίζει την κατάσταση υπερφόρτωσης του κινητήρα, ενώ η μπλε τις στροφές που επιτυγχάνονται στις θαλάσσιες δοκιμές. Οι επιφάνειες αυτές δεν θα απασχολήσουν, καθώς στην πρώτη η λειτουργία του κινητήρα καθίσταται απαγορευτική, ενώ η δεύτερη δεν αντιπροσωπεύει τη κατάσταση που επικρατεί κατά την διάρκεια ενός ταξιδιού. Οι γραμμές 4, 5, 7, 3, 9, 8, που τις οριοθετούν, σχεδιάστηκαν με συνδυασμό εξισώσεων 1ου και 2ου βαθμού σύμφωνα με το εγχειρίδιο εγκατάστασης του κινητήρα. Η σημασία της κάθε καμπύλης έχει αναφερθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

Η κίτρινη και η πορτοκαλί επιφάνεια, λοιπόν, αποτελούν τις επιτρεπτές περιοχές λειτουργίας της κύριας μηχανής. Διαχωρίζονται σε περιοχή ήπιας και επιβαρυσμένης λειτουργίας από την καμπύλη 1, η οποία αποτελεί την καμπύλη λειτουργίας του κινητήρα. Η γραμμή αυτή σχεδιάζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, που προκύπτει από το νόμο της έλικας και τις συντεταγμένες του MCR που αποτελεί σημείο της.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1(n) = C \cdot n^3 \\ P_{MCR} = C \cdot n_{MCR}^3 \end{array} \right\} \Rightarrow P_1(n) = \frac{P_{MCR}}{n_{MCR}^3} \cdot n^3 = \frac{24020}{65,7^3} \cdot n^3 \Rightarrow P_1(n) = 0,0847 \cdot n^3$$

Η καμπύλη 6, ως γνωστόν, αναφέρεται στις απαιτήσεις ισχύος της έλικας για την περίπτωση καθαρής γάστρας, έλικας και ήρεμης θάλασσας και προσδιορίζεται από το "light running margin" της προπέλας. Ωστόσο, στη παρούσα μελέτη δεν υπάρχουν δεδομένα για την ακριβή τιμή αυτού του περιθωρίου. Για τον λόγο αυτό, λαμβάνοντας υπόψη το εγχειρίδιο του κινητήρα, στο οποίο η τιμή του προτείνεται μεταξύ 4% και 7%, το light running margin της έλικας του υπό μελέτη πλοίου λαμβάνεται 5%. Συνεπώς, η καμπύλη προκύπτει από την

παρακάτω σχέση, η οποία όπως παρατηρείται προέρχεται ξανά από το νόμο της έλικας και το σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας μετατοπισμένο κατά το προαναφερθέν περιθώριο ήπιας λειτουργίας.

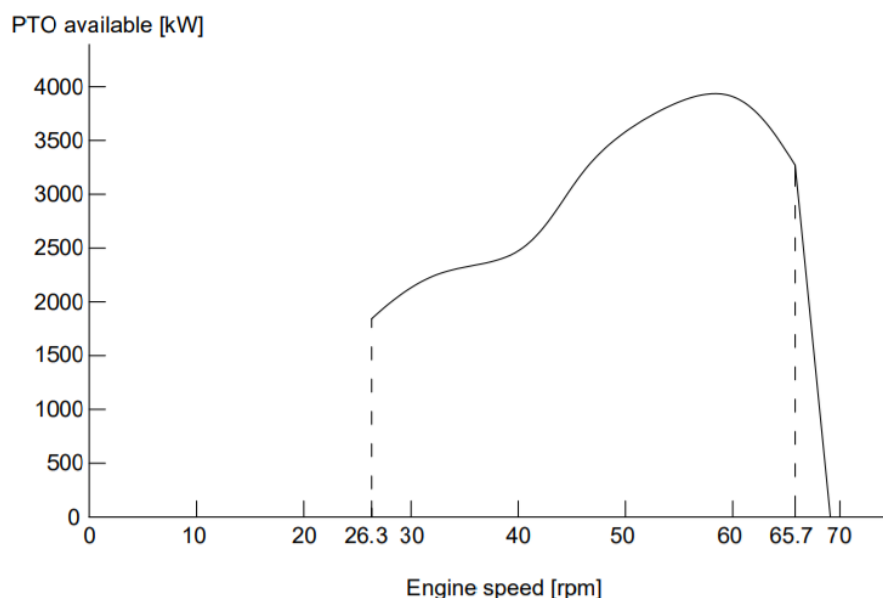
$$\left\{ \begin{array}{l} P_6(n) = C' \cdot n^3 \\ P_{MCR} = C' \cdot (n_{MCR} \cdot (1 + LR))^3 \\ LR = 5\% \end{array} \right\} \Rightarrow P_6(n) = \frac{P_{MCR}}{(n_{MCR} \cdot (1 + LR))^3} \cdot n^3 = \frac{24020}{(65,7 \cdot 1,05)^3} \cdot n^3 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_6(n) = 0,0732 \cdot n^3$$

Τέλος, η καμπύλη 10 αποτελεί το όριο φόρτισης του κινητήρα όταν η λειτουργία PTO είναι διαθέσιμη. Όπως παρατηρείται, η λειτουργία αυτή καθίσταται δυνατή για στροφές της κύριας μηχανής μεγαλύτερες από 26,3, τιμή που αντιστοιχεί στο 40% των στροφών της μέγιστης συνεχούς λειτουργίας. Ο κατασκευαστής της κύριας μηχανής του πλοίου είναι η WIN GD, με αποτέλεσμα η καμπύλης 10 να σχεδιάζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση, που αναφέρεται στο εγχειρίδιο εγκατάστασης [11], και όχι με τη σχέση που χρησιμοποιεί η MAN B&W και περιγράφηκε στο 3ο κεφάλαιο.

$$P_{10}(n) = \begin{cases} P_{MCR} \cdot (0,75 \cdot \left(\frac{n}{n_{MCR}}\right)^2 + 0,03 \cdot \frac{n}{n_{MCR}}), & 26,3 \leq n \leq 39,42 \\ P_{MCR} \cdot (1,336 \cdot \left(\frac{n}{n_{MCR}}\right)^2 - 0,321 \cdot \frac{n}{n_{MCR}}), & 39,42 \leq n \leq 63 \\ P_{MCR} \cdot (1,941 \cdot \frac{n}{n_{MCR}} - 0,941) & , \quad 63 \leq n \leq 65,7 \\ P_{MCR} & , \quad 65,7 \leq n \leq 69 \end{cases}$$

Η σημασία των καμπυλών 10 και 6 είναι μεγάλη για την διαστασιολόγηση του συστήματος της αξονικής γεννήτριας, καθώς η αλγεβρική διαφορά των τεταγμένων τους προσδιορίζει την διαθέσιμη ισχύ που δύναται να διατεθεί από τον κινητήρα για την λειτουργία PTO. Παρακάτω, χρησιμοποιώντας την σχέση $PTO_{available}(n) = P_{10}(n) - P_6(n)$, απεικονίζεται η εν λόγω διαθέσιμη ισχύς.



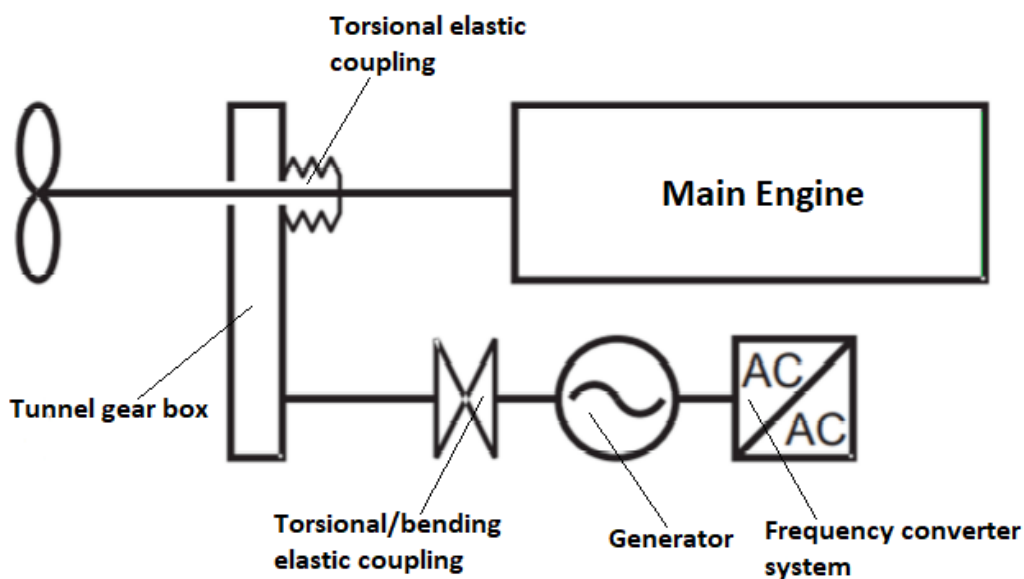
Σχήμα 4.3: Μέγιστη ισχύς που δύναται να διαθέσει η κύρια μηχανή για την λειτουργία PTO συναρτήσει των στροφών της

Όπως παρατηρείται, η διαθέσιμη ισχύς κυμαίνεται σε τιμές από 2000 kW σε χαμηλές τιμές στροφών ως και 4000 kW σε υψηλότερες. Οι τιμές αυτές θα ληφθούν ασφαλώς υπόψη για την διαστασιολόγηση του συστήματος, ωστόσο αποτελούν ένδειξη της παρουσίας επαρκούς ισχύος για την κάλυψη των απαιτήσεων του πλοίου σε ηλεκτρικό ρεύμα, οι οποίες όταν βρίσκεται εν πλω ανέρχονται σε 1146,8 kW.

4.4. Διαστασιολόγηση του συστήματος PTO

Στο πρώτο στάδιο της διαστασιολόγησης απαιτείται η επιλογή κατάλληλου τύπου και διάταξης του συστήματος PTO. Βασικός στόχος είναι η επίτευξη αξιοπιστίας, ώστε να παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα σταθερής τάσης και συχνότητας, ενώ παράλληλα και ευελιξίας, προκειμένου η λειτουργία της γεννήτριας να καθίσταται δυνατή σε ικανοποιητικό εύρος στροφών της κύριας μηχανής, χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά από τις μεταβολές και τις διακυμάνσεις του φορτίου της έλικας.

Σύμφωνα, λοιπόν, με τις εν λόγω απαιτήσεις το σύστημα που επιλέχθηκε απεικονίζεται παρακάτω. Η διάταξη αυτή προτείνεται από το "Marine Installation Manual" του κινητήρα [12], για την εγκατάσταση συστήματος Power Take off σε πλοία εξοπλισμένα με έλικα σταθερού βήματος, όπως το υπό μελέτη πλοίο.



Σχήμα 4.4: Διάταξη επιλεγμένου συστήματος PTO και σύνδεση με την κύρια μηχανή του υπό μελέτη πλοίου.

Όπως παρατηρείται και σύμφωνα με τη θεωρία του δευτέρου κεφαλαίου, ο τύπος του συστήματος πρόκειται για συνδυασμό των τύπων PTO/GCR και PTO/CFE. Τα κύρια στοιχεία που το αποτελούν είναι μια εγκατάσταση γρاناζοκιβωτίων (tunnel gear), η γεννήτρια άξονα και ένα σύστημα μετατροπής και σταθεροποίησης της συχνότητας και της τάσης του παραγόμενου εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος.

Το σύστημα γρاناζοκιβωτίων λαμβάνει στην είσοδό του τις στροφές του άξονα της κύριας μηχανής και στην έξοδό του επιφέρει τις στροφές λειτουργίας της αξονικής γεννήτριας. Στόχος του είναι, με την χρήση κατάλληλης διάταξης γρاناζιών, η αύξηση των στροφών της γεννήτριας σε σχέση με τις χαμηλές αντίστοιχες τιμές του ελικοφόρου άξονα, προκειμένου

να επιτυγχάνονται τα επιθυμητά επίπεδα συχνότητας 50 έως 60 Hz, ώστε να καθίσταται δυνατή η λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανημάτων του πλοίου.

Το σύστημα μετατροπής συχνότητας έχει ως στόχο την αντιμετώπιση των διακυμάνσεων φορτίου και στροφών της έλικας σταθεροποιώντας και ρυθμίζοντας την συχνότητα και την τάση του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος στις επιθυμητές τιμές. Αποτελείται από έναν ανορθωτή ο οποίος μετατρέπει το παραγόμενο εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα σε συνεχές και από έναν μετατροπέα ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο σταθερής συχνότητας. Απαραίτητη είναι, επιπλέον, η εγκατάσταση σύγχρονου πυκνωτή για την ρύθμιση της τάσης και της άεργου ισχύος του ρεύματος, η οποία χάνεται κατά την μετατροπή του σε συνεχές. Το σύστημα μετατροπής συχνότητας δύναται να χρησιμοποιηθεί επίσης, σε περίπτωση που η εγκατάσταση μπαταριών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας καθίσταται συμφέρουσα για την λειτουργία του πλοίου, γεγονός που θα εξετασθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Όσον αφορά την διάταξη αυτή είναι όμοια με την διάταξη BW IV που περιγράφηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Το σύστημα αύξησης στροφών είναι εγκατεστημένο πρύμνα της κύριας μηχανής στον ενδιάμεσο άξονα του πλοίου. Η σύνδεση του με τον άξονα επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλης διάταξης ελαστικών δίσκων και ελατηρίων (elastic coupling), προκειμένου να προκαλείται απόσβεση των στρεπτικών ταλαντώσεων του ελικοφόρου άξονα, οι οποίες σε διαφορετική περίπτωση είναι δυνατόν να επιφέρουν προβλήματα αντοχής και λειτουργίας στο σύστημα. Ο άξονας εξόδου του αυξητήρα με τη σειρά του συνδέεται με τον άξονα-δρομέα της γεννήτριας μέσω μιας παρόμοιας ελαστικής σύνδεσης, ώστε να επέλθει απόσβεση των στρεπτικών αλλά και καμπτικών ταλαντώσεων που προέρχονται πλέον από την λειτουργία των γραναζιών των γραναζοκιβωτίων.

Αξίζει να σημειωθεί πως το "Marine Installation Manual" του κινητήρα επιτρέπει και την διάταξη BW III στην οποία ο αυξητήρας στροφών είναι εγκατεστημένος πλώρα της κύριας μηχανής, στο ελεύθερο άκρο του στροφαλοφόρου. Ωστόσο, ο λόγος που δεν προτιμήθηκε είναι η μικρή αύξηση του μήκους του συστήματος πρόωσης, αλλά κυρίως οι επιπλέον ενέργειες που πρέπει να γίνουν για την αποφυγή των αξονικών ή ακτινικών μετατοπίσεων που είναι δυνατόν να προβεί ο άξονας του συστήματος, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον στροφαλοφόρο, εξαιτίας των δυναμικών φορτίσεων της κύριας μηχανής.

Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί η διαστασιολόγηση των βασικών στοιχείων της διάταξης που επιλέχθηκε για το υπό μελέτη πλοίο.

4.4.1. Γεννήτρια Άξονα

Για την διαστασιολόγηση της αξονικής γεννήτριας του συστήματος είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος, που χρειάζεται να παράγεται για την κάλυψη των αναγκών του πλοίου σε ηλεκτρισμό όταν βρίσκεται εν πλω. Σύμφωνα, λοιπόν, με τις απαιτήσεις του υπό μελέτη πλοίου σε ηλεκτρικό φορτίο, που περιγράφηκαν στην αρχή του κεφαλαίου, η ηλεκτρική ισχύς που απορροφάται από το ηλεκτρικό δίκτυο στην κατάσταση πλεύσης ανέρχεται στα 1146.8 kW. Λαμβάνοντας, επιπλέον, υπόψη τις απώλειες που προκαλούνται λόγω της παρουσίας του ανορθωτή, του μετατροπέα και της σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο, οι οποίες θεωρούνται 2% για κάθε περίπτωση, η απαιτούμενη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας άξονα υπολογίζεται ως εξής:

$$PTO_{e,output} = \frac{1146,8}{\eta_{rectifier} \cdot \eta_{converter} \cdot \eta_{grid}} = \frac{1146,8}{0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,98} = 1218,5 \text{ kW}$$

Συνεπώς, η ενεργός ισχύς στην έξοδο της επιλεγμένης γεννήτριας απαιτείται να είναι μεγαλύτερη από 1218.5 kW. Η εν λόγω τιμή για συντελεστή ισχύος ίσο με 0.8 αντιστοιχεί σε φαινόμενη ισχύ (S):

$$S = \frac{PTO_{e,output}}{\Sigma I} = \frac{1218,5}{0,8} = 1523 \text{ kVA}$$

Επιπλέον, σημαντικός παράγοντας για την κατάλληλη επιλογή είναι ο αριθμός των στροφών, στις οποίες λειτουργεί η γεννήτρια. Η επιθυμητή συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος επιδιώκεται να μην επιτυγχάνεται με μεγάλο αριθμό στροφών, ώστε να αποφεύγεται η χρήση υψηλού βαθμού αύξησης των στροφών, η οποία οδηγεί σε μείωση της απόδοσης του συστήματος και σε ακριβότερη εγκατάσταση γραναζοκιβωτίων.

Με βάση λοιπόν τις εν λόγω απαιτήσεις, η γεννήτρια η οποία επιλέχθηκε είναι το μοντέλο **HFC7 632-10** της **HYUNDAI**, η οποία συνιστάται για ναυτιλιακές εφαρμογές, όπως η λειτουργία PTO. Τα χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.6: Κύρια χαρακτηριστικά επιλεγμένης γεννήτριας άξονα [13].

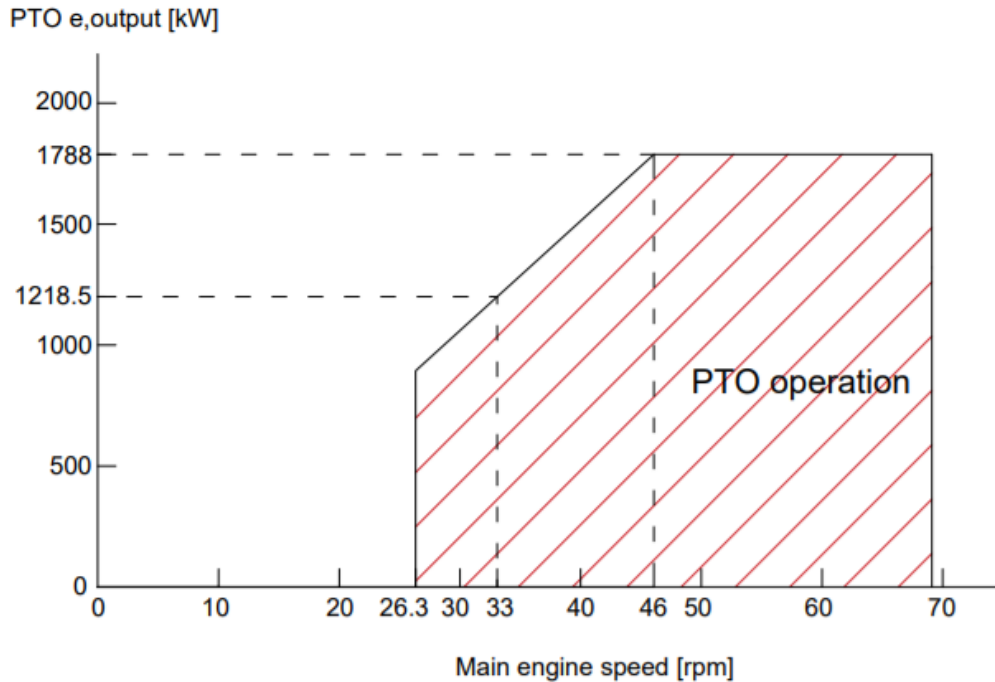
| HYUNDAI | HFC7 632-10 |
|--------------------------------------|-------------|
| Παραγόμενη φαινόμενη ηλεκτρική ισχύς | S=2235 kVA |
| Τάση | V=450 V |
| Συχνότητα | f=60 Hz |
| Ένταση ρεύματος | I=2280 A |
| Στροφές λειτουργίας | n=720 rpm |
| Συντελεστής ισχύος | ΣI=0,8 |
| Αριθμός πόλων | p=10 |
| Βάρος | W=7300 kg |

Με την χρήση της φαινόμενης ισχύος και του συντελεστή ισχύος υπολογίζεται και η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ενεργός ισχύς $PTO_{e,output,max}$:

$$PTO_{e,output,max} = S \cdot \Sigma I = 2235 \cdot 0,8 = 1788 \text{ kW}$$

Όπως παρατηρείται, η τιμή της ισχύος είναι επαρκής για την κάλυψη των αναγκών του ηλεκτρικού δικτύου καθώς ισχύει η αναγκαία συνθήκη $PTO_{e,output,max} > PTO_{e,output}$. Ο λόγος για τον οποίο η γεννήτρια που επιλέχθηκε παρουσιάζει αισθητή περίσσια ισχύος μεταξύ της μέγιστης λειτουργίας της ($PTO_{e,output,max}$) και της απαιτούμενης ($PTO_{e,output}$), είναι για την εκμετάλλευση επιπέδων στροφών του κινητήρα όπου δεν είναι δυνατή η λειτουργία του συστήματος στο 100%, καθώς και η ευελιξία που προσφέρει σε περίπτωση αύξησης του ηλεκτρικού φορτίου, όπως και σε περίπτωση όπου η αποθήκευση ενέργειας καθίσταται συμφέρουσα.

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα λειτουργίας της γεννήτριας άξονα, στο οποίο περιγράφεται η σχέση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος με τις στροφές του άξονα της κύριας μηχανής. Η σχεδιάσή του πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του τύπου CFE που περιγράφηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο.



Σχήμα 4.5: Περιοχή λειτουργίας της επιλεγμένης αξονικής γεννήτριας (οριοθετείται από τις 4 ευθείες που προσδιορίζουν την μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ συναρτήσει των στροφών της κύριας μηχανής).

Το σύστημα, όπως φαίνεται έχει τη δυνατότητα να παράγει το 100% της ηλεκτρικής του ισχύος ($PTO_{e,output,max}$) όταν οι στροφές της κύριας μηχανής ξεπερνούν τις 46 (70% των στροφών της μέγιστης συνεχούς λειτουργίας), ενώ για χαμηλότερες τιμές μέχρι και 26.3 (40% του MCR), η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μειώνεται γραμμικά.

Επιπλέον, παρατηρείται πως η παραγωγή της απαιτούμενης από το ηλεκτρικό δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος ($PTO_{e,output}$) των 1218,5 kW είναι δυνατή για στροφές του κινητήρα μεγαλύτερες από 33. Η εν λόγω τιμή των στροφών είναι προσεγγιστική, καθώς δεν υπάρχουν ακριβή δεδομένα για την γραμμική μείωση της ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας. Ωστόσο, παρουσιάζει χρήσιμη ένδειξη για το όριο των στροφών που καθίσταται δυνατή η ικανοποίηση των αναγκών του πλοίου σε ηλεκτρισμό μέσω της λειτουργίας PTO.

Στον πίνακα 4.7 παρουσιάζονται σύμφωνα με την εξίσωση $P_1(n) = 0,0847 \cdot n^3$ της καμπύλης λειτουργίας του κινητήρα (καμπύλη 1), οι στροφές της έλικας που αντιστοιχούν στις καταστάσεις πλεύσης του προφίλ λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου, προκειμένου να εξετασθεί αν το κριτήριο των στροφών που περιγράφηκε προηγουμένως ικανοποιείται, ώστε να παράγει η γεννήτρια άξονα την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ για το δίκτυο.

Πίνακας 4.7: Στροφές της έλικας που αντιστοιχούν στις καταστάσεις πλεύσης του προφίλ λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου

| Condition | LOG Speed [knots] | Frequency [year] | M/E Power [kW] | Load Factor | M/E Speed [rpm] | M/E Speed [%n _{MCR}] |
|-----------|-------------------|------------------|----------------|-------------|-----------------|--------------------------------|
| Ballast | 9.5 | 10,00% | 6270 | 26% | 42 | 63% |
| | 13 | 17,50% | 11875 | 49% | 52 | 79% |
| Laden | 11 | 36,00% | 12210 | 51% | 52,4 | 80% |
| | 13.5 | 11,00% | 14970 | 62% | 56,1 | 84% |

Όπως παρατηρείται, και στις 4 καταστάσεις πλεύσης που έχουν προσδιορισθεί, οι στροφές της κύριας μηχανής ξεπερνούν το όριο των 33. Επομένως, όταν το υπό μελέτη πλοίο βρίσκεται εν πλω είναι δυνατή η ικανοποίηση των αναγκών του πλοίου σε ηλεκτρισμό εξ ολοκλήρου από την γεννήτρια άξονα, γεγονός που επιτρέπει την απενεργοποίηση των ντιζελογεννητριών.

Τέλος, χρειάζεται να προσδιορισθεί η συνολική ισχύς η οποία απορροφά το σύστημα PTO από την κύρια μηχανή και να εξετασθεί, αν υπερβαίνει την μέγιστη διαθέσιμη $PTO_{available}$, που έχει υπολογιστεί προηγουμένως σύμφωνα με τις καμπύλες 10 και 6 του διαγράμματος φόρτισης. Η απορροφούμενη ισχύς $PTO_{absorbed}$ προκύπτει από την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, διαιρεμένη με τους βαθμούς απόδοσης της γεννήτριας και του συστήματος αύξησης στροφών, οι οποίοι λαμβάνονται 95% και για τα δύο μηχανήματα.

$$PTO_{absorbed} = \frac{PTO_{e,output}}{\eta_{generator} \cdot \eta_{tunnel\ gear}} = \frac{1218,5}{0,95 \cdot 0,95} = 1350\ kW$$

Στη συνέχεια, συγκρίνεται η προκύπτουσα απορροφούμενη ισχύς, με την διαθέσιμη $PTO_{available}$, για κάθε μια από τις καταστάσεις πλεύσης που επιλέχθηκαν για την λειτουργία της γεννήτριας άξονα, προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει κίνδυνος υπερφόρτωσης του κινητήρα.

Πίνακας 4.8: Σύγκριση της ισχύος που απορροφάται από το σύστημα PTO με την αντίστοιχη μέγιστη διαθέσιμη από την κύρια μηχανή για τις 4 καταστάσεις πλεύσης του υπό μελέτη πλοίου.

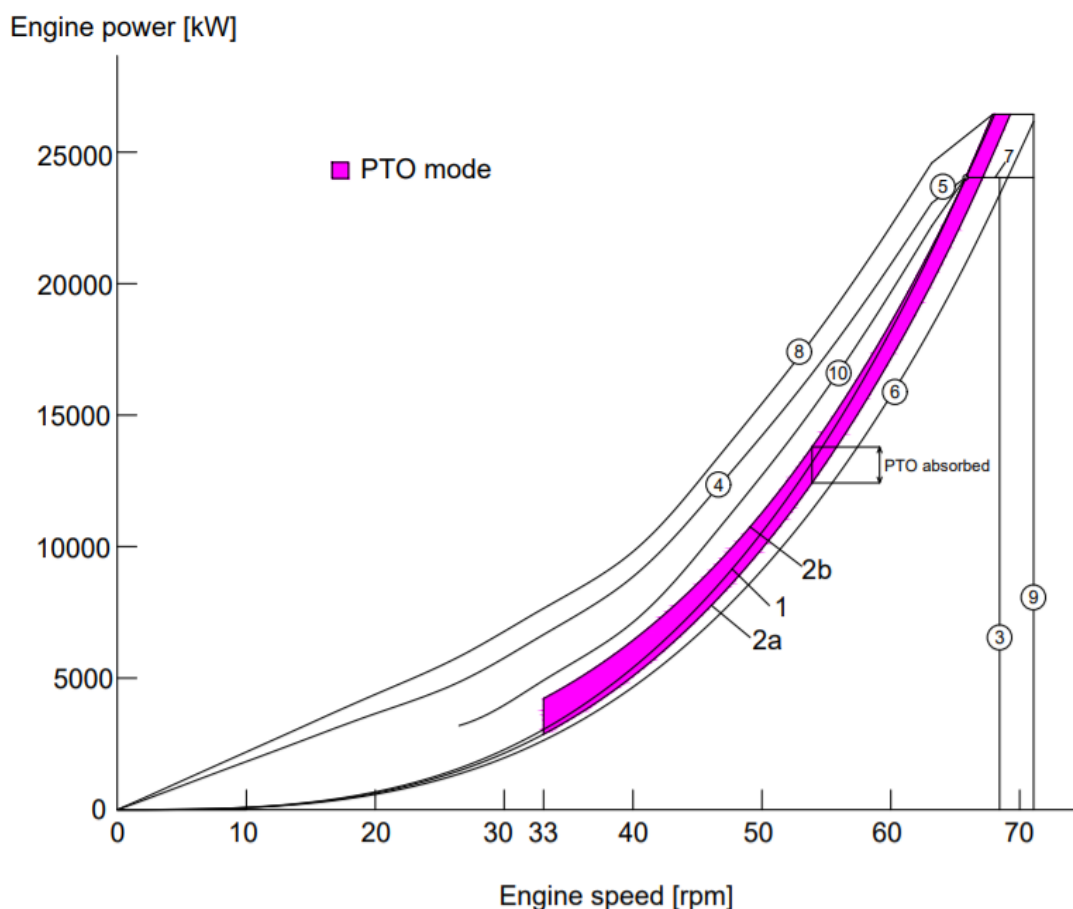
| Condition | LOG Speed [knots] | M/E Speed [rpm] | PTO available [kW] | PTO absorbed [kW] | PTO margin [kW] |
|-----------|-------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| Ballast | 9.5 | 42 | 2656 | 1350 | + 1306 |
| | 13 | 52 | 3707,6 | 1350 | + 2245 |
| Laden | 11 | 52,4 | 3731,8 | 1350 | + 2269,2 |
| | 13.5 | 56,1 | 3890 | 1350 | + 2427,4 |

Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, πως παρουσιάζεται σημαντική περίσσια (PTO margin) της διαθέσιμης ισχύος PTO, με αποτέλεσμα η αύξηση που προκαλείται στο φορτίο της κύριας μηχανής, εξαιτίας της λειτουργίας του συστήματος της αξονικής γεννήτριας, να απέχει σημαντικά από τα απαγορευτικά επίπεδα και στις τέσσερις καταστάσεις πλεύσης. Το γεγονός αυτό συνεπώς, καθιστά την επιλεγμένη εγκατάσταση ασφαλή για την λειτουργία του κινητήρα.

Χρειάζεται να αναφερθεί επίσης, πως οι τιμές των στροφών για την κάθε ταχύτητα αντιστοιχούν στην καμπύλη λειτουργίας του κινητήρα στο σημείο MCR και όχι στις πραγματικές απαιτήσεις της έλικας του υπό μελέτη πλοίου, καθώς για αυτές δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα. Σύμφωνα, λοιπόν, με τη θεωρία του 3^{ου} κεφαλαίου των διαγραμμάτων φόρτισης, η καμπύλη λειτουργίας του κινητήρα στο MCR αντιστοιχεί στις απαιτήσεις της έλικας σε επιβαρυμένη λειτουργία για ρυπασμένη γάστρα και έλικα. Συνεπώς, κατά την πλεύση του πλοίου στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, η καμπύλη της έλικας θα βρίσκεται δεξιά της καμπύλης του κινητήρα (καμπύλη 1), με αποτέλεσμα οι στροφές των τεσσάρων καταστάσεων πλεύσης να παρουσιάζουν μικρή αύξηση, η οποία ωστόσο δεν δύναται να

επηρεάσει το συμπέρασμα που έχει προκύψει από τους παραπάνω υπολογισμούς, καθώς οι τιμές του περιθωρίου (PTO_{margin}) της διαθέσιμης ισχύος PTO είναι αρκετά υψηλές.

Έχοντας υπολογίσει την ισχύ που προσδίδει η κύρια μηχανή στο εγκατεστημένο σύστημα, στο παρακάτω διάγραμμα φόρτισης παρουσιάζεται για μια τυχαία χρονική στιγμή ενός ταξιδιού, η νέα καμπύλη λειτουργίας του κινητήρα (2b), η οποία στην ουσία προκύπτει από την καμπύλη απαιτήσεων της έλικας (2a), αυξημένη κατά την απορροφούμενη ισχύ $PTO_{absorbed}$, στις στροφές όπου η αξονική γεννήτρια λειτουργεί. Για τις απαιτήσεις της έλικας την τυχαία χρονική στιγμή, θεωρείται πως η αρχική τιμή του “light running margin” έχει μειωθεί από 5% σε 2%.

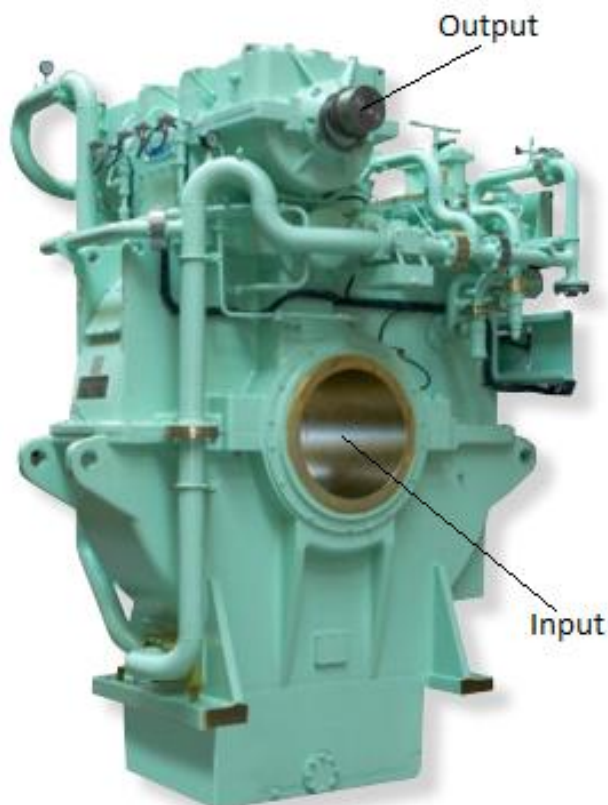


Σχήμα 4.6: Επίδραση της λειτουργίας PTO στη καμπύλη λειτουργίας του κινητήρα του υπό μελέτη πλοίου

4.4.2. Σύστημα γραναζοκιβωτίων

Το σύστημα των γραναζοκιβωτίων (tunnel gear), όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιείται για την μεταβολή των χαμηλών στροφών του κινητήρα σε υψηλότερες για την λειτουργία της

αξονικής γεννήτριας, ώστε να παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα 50 ως 60 Hz. Στο σχήμα 4.7 απεικονίζεται ένα παράδειγμα αυτής της μορφής συστήματος της εταιρίας RENK.



Εικόνα 4.7: Σύστημα γρναζοκιβωτίων αύξησης στροφών της RENK [14]

Στη παρούσα περίπτωση ο αυξητήρας λαμβάνει ως είσοδο στροφές της κύριας μηχανής μεταξύ 33 rpm και 65.7 rpm. Ωστόσο, εφόσον οι καταστάσεις πλεύσης του υπό μελέτη πλοίου, που λειτουργεί η αξονική γεννήτρια, αντιστοιχούν σε 42, 52, 52.4 και 56.1 rpm στροφές του κινητήρα σε επιβαρυμένη κατάσταση, το σύστημα των γρναζοκιβωτίων δύναται να διαστασιολογηθεί για εύρος στροφών εισόδου από 40 ως 60 rpm. Στην έξοδο πρέπει να επιτυγχάνονται οι στροφές λειτουργίας της επιλεγμένης γεννήτριας οι οποίες ανέρχονται σε 720 rpm. Συνεπώς, η διάταξη των γρναζιών χρειάζεται να επιφέρει λόγο αύξησης στροφών μεταξύ 1:12 έως 1:18, ανάλογα με την τιμή των στροφών του κινητήρα. Επιπλέον, το σύστημα είναι αναγκαίο, ασφαλώς, να έχει τη δυνατότητα να απορροφά την απαραίτητη ισχύ $PTO_{absorbed}$ για να λειτουργήσει η αξονική γεννήτρια, η οποία υπολογίστηκε 1350 kW. Τέλος, απαραίτητη είναι και η παρουσία συμπλέκτη, ώστε να επιτυγχάνεται η αποσύμπλεξη του συστήματος από τον άξονα της κύριας μηχανής, σε περίπτωση που η τιμή των στροφών της δεν επιτρέπουν την λειτουργία του.

Οι απαιτήσεις αυτές αρκούν για την συνέχεια της παρούσας μελέτης και συνεπώς, δεν θα προσδιοριστούν τυποποιημένες διαστάσεις για το σύστημα των γρναζοκιβωτίων της επιλεγμένης διάταξης PTO.

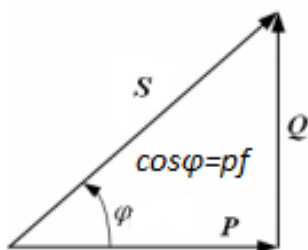
4.4.3. Σύγχρονος πυκνωτής

Ο σύγχρονος πυκνωτής στην ουσία πρόκειται για έναν σύγχρονο κινητήρα, ο οποίος έχει σχεδόν μηδενικό συντελεστή ισχύος, με αποτέλεσμα να μην παράγει μηχανική ισχύ παρά μόνο άεργο. Η λειτουργία του βασίζεται στην ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης μέσω ενός ρυθμιστή τάσεως (voltage regulator) και ενός ανορθωτή.

Ο ρόλος του σύγχρονου πυκνωτή είναι απαραίτητος στην λειτουργία του συστήματος, καθώς είναι υπεύθυνος για την ρύθμιση της άεργου ισχύος του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία χάνεται κατά την μετατροπή του από εναλλασσόμενο σε συνεχές. Επιπλέον, με την λειτουργία επιτυγχάνεται η ρύθμιση και η διατήρηση της τάσεως των 450 V του ρεύματος που παράγεται από την αξονική γεννήτρια. Τέλος, κατά την εμφάνιση ενός βραχυκυκλώματος, έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτεί το βραχυκύκλωμα με ρεύμα σφάλματος, επιτρέποντας έτσι τον εντοπισμό του σφάλματος από το σύστημα προστασίας.

Για την διαστασιολόγηση της εν λόγω μηχανής, λοιπόν, είναι αναγκαίο να προσδιοριστούν οι απαιτήσεις του πλοίου σε άεργο ισχύ για τις καταστάσεις πλεύσεις στις οποίες λειτουργεί το επιλεγμένο σύστημα αξονικής γεννήτριας. Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α παρουσιάζονται οι απαιτήσεις των βοηθητικών μηχανημάτων σε άεργο ισχύ, οι οποίες υπολογίστηκαν σύμφωνα με το σχέδιο ηλεκτρικού ισολογισμού του υπό μελέτη πλοίου. Όπως παρατηρείται, άεργο ισχύ χρειάζονται τα μηχανήματα των οποίων η λειτουργία βασίζεται σε μια κινητήρια δύναμη και συνεπώς στην κατανάλωση μηχανικής ισχύος. Επομένως, στο παράρτημα αναφέρονται στοιχεία για τις αντλίες, τους ανεμιστήρες, και τους συμπιεστές του πλοίου και όχι για διατάξεις φωτισμού ή άλλων ηλεκτρονικών εγκαταστάσεων (MGPS).

Η απαίτηση κάθε μηχανήματος σε άεργο ισχύ ($Q_{operation}$) υπολογίζεται με βάση το τρίγωνο ισχύος και τον τύπο:



$$Q_{operation} = \tan(\cos^{-1}(pf)) \cdot P_{operation}$$

Όπου:

- pf: ο συντελεστής ισχύος του αντίστοιχου μηχανήματος, ο οποίος προκύπτει από την σχέση:

$$I = \frac{P_{input}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot pf} \Rightarrow pf = \frac{P_{input}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot I} ,$$

όπου I, V, P_{input} η ένταση του ρεύματος, η τάση και η απορροφούμενη ισχύς αντίστοιχα, κάθε καταναλωτή, τιμές των οποίων λαμβάνονται από τον ηλεκτρικό ισολογισμό του πλοίου.

- $P_{operation}$: ισχύς λειτουργίας κάθε καταναλωτή, η οποία λαμβάνεται από τον ισολογισμό του πλοίου και προκύπτει από το γινόμενο της απορροφούμενης ισχύος με τον συντελεστή λειτουργίας και το πλήθος των ταυτόχρονα λειτουργούντων φορτίων.

Αθροίζοντας τις απαιτήσεις κάθε καταναλωτή σε άεργο ισχύ (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α), η συνολική απαίτηση προκύπτει ίση με $Q_{TOT}=480,29 \text{ kVAr}$. Λαμβάνοντας υπόψη και απώλειες της τάξεως του 10%, καθώς ο συντελεστής ισχύος του σύγχρονου πυκνωτή δεν είναι απολύτως 0, η επιλογή έγινε για απαιτήσεις άεργου ισχύος:

$$Q_{design} = \frac{Q_{TOT}}{0.9} = 534 \text{ kVAr}$$

Ο σύγχρονος πυκνωτής ο οποίος επιλέχθηκε είναι το μοντέλο **HFC7 402-4** της **HUYNDAI** τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.10: Κύρια στοιχεία επιλεγμένου σύγχρονου πυκνωτή [13].

| HYUNDAI | HFC7 402-4 |
|-------------------------|------------|
| Παραγόμενη άεργος ισχύς | Q=600 kVAr |
| Τάση | V=450 V |
| Συχνότητα | f=60 Hz |
| Ένταση ρεύματος | I=834 A |
| Στροφές λειτουργίας | n=1800 rpm |
| Αριθμός πόλων | p=4 |
| Βάρος | W=1820 kg |

4.5. Οφέλη της επιλεγμένης εγκατάστασης PTO

Αφού πραγματοποιήθηκε, λοιπόν, η διαστασιολόγηση του συστήματος PTO και των μηχανημάτων που το αποτελούν και προσδιορίστηκαν οι καταστάσεις φόρτωσης και οι ταχύτητες στις οποίες τίθεται σε λειτουργία, είναι αναγκαίο να εξετασθεί αν η επιλογή του και η εγκατάστασή του καθίσταται κερδοφόρα για την λειτουργία του υπό μελέτη πλοίου.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στην θεωρία, το κέρδος που προκύπτει από την λειτουργία της αξονικής γεννήτριας αναφέρεται στην μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και στην ελάττωση του χρόνου λειτουργίας των γεννητριών ντίζελ και κατ' επέκταση των εξόδων συντήρησής τους. Συνεπώς, πρέπει να εξετασθεί αν τα εν λόγω προκύπτοντα κέρδη δύναται να αντισταθμίσουν τα έξοδα της επένδυσης.

4.5.1. Κατανάλωση καυσίμου

Στους πίνακες 4.12 και 4.13 παρουσιάζεται για την περίπτωση λειτουργίας του κινητήρα χωρίς και με εγκατάσταση συστήματος αξονικής γεννήτριας αντίστοιχα, ο αριθμός των τόνων καυσίμου που καταναλώνονται από την κύρια μηχανή για κάθε κατάσταση του προφίλ λειτουργίας του. Η κατανάλωση σε κάθε περίπτωση υπολογίζεται σε τόνους ανά χρόνο, σύμφωνα με την ειδική κατανάλωση καυσίμου (BSFC), την ισχύ (P) της κύριας μηχανής και τις μέρες (days) που αντιστοιχούν στην εν λόγω περίπτωση, με την παρακάτω σχέση:

$$\text{Fuel Consumption [tonnes/year]} = \frac{BSFC \cdot P \cdot 24 \cdot \text{days}}{10^6}$$

Η τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου λαμβάνεται για κάθε τιμή ισχύος σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$BSFC = BSFC_{ISO} \cdot \frac{\theta_{u ISO}}{\theta_{u HFO}}$$

Όπου:

- $BSFC_{ISO}$: ειδική κατανάλωση καυσίμου στις καταστάσεις ISO, που λαμβάνεται από την πλατφόρμα GTD της WIN GD, για το μοντέλο κινητήρα και το σημείο MCR του υπό μελέτη πλοίου. Τα χαρακτηριστικά των καταστάσεων ISO [3] παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.11: Χαρακτηριστικά καταστάσεων ISO για την μέτρηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

| ISO | |
|---|-------------|
| Θερμοκρασία αέρα σάρωσης πριν την είσοδο στον υπερπληρωτή | 25 °C |
| Θερμοκρασία ψυκτικού στην είσοδο του ψυγείου του αέρα σάρωσης | 29 °C |
| Κατώτατη θερμογόνος ικανότητα καυσίμου | 42700 kJ/kg |

- $\theta_{u ISO}$: θερμογόνος ικανότητα καυσίμου στις καταστάσεις ISO ίση με 42700 kJ/kg.
- $\theta_{u HFO}$: θερμογόνος ικανότητα του βαρέος καυσίμου που καταναλώνει η κύρια μηχανή ίση με 39550 kJ/kg.

Πίνακας 4.12: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής χωρίς διαθέσιμη την λειτουργία PTO.

| MAIN ENGINE WITHOUT SHAFT GENERATOR SYSTEM | | | | | | | | |
|--|--------------|---------|-----------|-------------|-----------|------------------|------------|--------------|
| | Sailing mode | Speed | Frequency | | M/E Power | Fuel Consumption | | |
| | | [knots] | [%year] | [days/year] | [kW] | [g/kWh] | [t/day] | [t/year] |
| B A L L A S T | Port | 0 | 3,75% | 13,69 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Port | 0 | 1,50% | 5,48 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Manoeuv. | 5 | 7,50% | 27,38 | 1765 | 182,46 | 7,73 | 211,65 |
| | Sailing | 9,5 | 10,00% | 36,50 | 6270 | 177,92 | 26,77 | 977,11 |
| | Sailing | 13 | 17,50% | 63,88 | 11875 | 173,12 | 49,34 | 3151,84 |
| L A D E N | Port | 0 | 11,00% | 40,15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Port | 0 | 0,75% | 2,74 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Manoeuv. | 5 | 1,00% | 3,65 | 5740 | 178,46 | 24,58 | 89,72 |
| | Sailing | 11 | 36,00% | 131,40 | 12210 | 172,74 | 50,62 | 6651,47 |
| | Sailing | 13,5 | 11,00% | 40,15 | 14970 | 169,94 | 61,05 | 2451,16 |
| | | | | | | | SUM | 13533 |

Πίνακας 4.13: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής με διαθέσιμη την λειτουργία PTO.

| MAIN ENGINE WITH SHAFT GENERATOR SYSTEM | | | | | | | | |
|---|--------------|---------|-----------|-------------|-----------|------------------|------------|--------------|
| | Sailing mode | Speed | Frequency | | M/E Power | Fuel Consumption | | |
| | | [knots] | [%year] | [days/year] | [kW] | [g/kWh] | [t/day] | [t/year] |
| B A L L A S T | Port | 0 | 3,75% | 13,69 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Port | 0 | 1,50% | 5,48 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Manoeuv. | 5 | 7,50% | 27,38 | 1765 | 182,46 | 7,73 | 211,65 |
| | Sailing | 9,5 | 10,00% | 36,50 | 7620 | 176,85 | 32,34 | 1180,41 |
| | Sailing | 13 | 17,50% | 63,88 | 13225 | 171,66 | 54,48 | 3480,18 |
| L A D E N | Port | 0 | 11,00% | 40,15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Port | 0 | 0,75% | 2,74 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Manoeuv. | 5 | 1,00% | 3,65 | 5740 | 178,46 | 24,58 | 89,72 |
| | Sailing | 11 | 36,00% | 131,40 | 13560 | 171,29 | 55,74 | 7324,24 |
| | Sailing | 13,5 | 11,00% | 40,15 | 16320 | 168,86 | 66,14 | 2655,52 |
| | | | | | | | SUM | 14942 |

Διαφορά στις καταναλώσεις στις περιπτώσεις των δύο πινάκων παρατηρείται μονάχα στις κίτρινες περιοχές του δεύτερου πίνακα, όπου η ισχύς της κύριας μηχανής αυξάνεται, εξαιτίας του επιπλέον φορτίου που επιβάλλεται με την λειτουργία της αξονικής γεννήτριας. Οι αυξημένες τιμές της ισχύος, λοιπόν, οι οποίες στην ουσία προκύπτουν από το άθροισμα της ισχύος του πρώτου πίνακα που αντιστοιχεί στην ισχύ προώσεως με την ισχύ που απορροφάει η διάταξη PTO ($PTO_{\text{absorbed}}=1350 \text{ kW}$), έχουν ως αποτέλεσμα όπως φαίνεται την μείωση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου. Ωστόσο, παρά την εν λόγω μείωση, το γεγονός πως ο κινητήρας λειτουργεί σε υψηλότερο φορτίο, οδηγεί στην συνολική αύξηση στην κατανάλωση καυσίμου η οποία ανέρχεται στους 1409 τόνους. Συμπερασματικά, με την εγκατάσταση του επιλεγμένου συστήματος PTO η κύρια μηχανή καταναλώνει ετήσια 1409 τόνους περισσότερο καύσιμο.

Στην συνέχεια, εξετάζεται και συγκρίνεται με παρόμοιο τρόπο η ετήσια κατανάλωση καυσίμου των γεννητριών ντίζελ στις δύο περιπτώσεις. Το φορτίο, καθώς και ο αριθμός των μηχανών που λειτουργούν προκύπτουν από τις απαιτήσεις του πλοίου σε ηλεκτρισμό, όπως περιγράφηκαν στον πίνακα 4.2 στην αρχή του κεφαλαίου. Ωστόσο, η τελική τιμή της ισχύος για κάθε κατάσταση, υπολογίζεται από το πηλίκο των απαιτήσεων προς τον βαθμό απόδοσης της ντιζελογεννήτριας ($\eta_{D/G}$), ο οποίος προκύπτει από τον λόγο της ονομαστικής παραγόμενης

ηλεκτρικής ισχύος προς την μηχανική ισχύ, σύμφωνα και πάλι με τα δεδομένα του πίνακα ως εξής:

$$\eta_{D/G} = \frac{P_e}{P_m} = \frac{1450}{1530} = 0,947$$

Για την ειδική κατανάλωση του μοντέλου Himsen 9H21/32 της ντιζελογεννήτριας του υπό μελέτη πλοίου, δεδομένα εντοπίστηκαν από εγχειρίδια της μηχανής [15], μόνο για την λειτουργία στο 100% της μέγιστης δυνατής. Για την μέγιστη λειτουργία, λοιπόν, η ειδική κατανάλωση ανέρχεται στα 183 g/kWh σε καταστάσεις ISO, ενώ για μικρότερα φορτία, όπως αυτά που παρατηρούνται στη παρούσα μελέτη, προσδιορίστηκε προσεγγιστικά, σύμφωνα με δεδομένα άλλων αντίστοιχων ναυτικών ντιζελογεννητριών. Οι τιμές αυτές μετατρέπονται στις τελικές τιμές κατανάλωσης των πινάκων 4.14 και 4.15 σύμφωνα με την κατώτατη θερμογόνο ικανότητα του βαρέος καυσίμου, όπως στην περίπτωση της κατανάλωσης της κύρια μηχανής.

Πίνακας 4.14: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου γεννητριών ντιζελ χωρίς διαθέσιμη την λειτουργία PTO.

| DIESEL GENERATOR WITHOUT SHAFT GENERATOR SYSTEM | | | | | | | | |
|---|--------------------|---------|-------------|----------------|----------------|------------------|---------|-------------|
| | Sailing mode | Speed | Frequency | No 1 D/G Power | No 2 D/G Power | Fuel Consumption | | |
| | | [knots] | [days/year] | [kW] | [kW] | [g/kWh] | [t/day] | [t/year] |
| B A L L A S T | Port/ Harbour | 0 | 13,69 | 707,18 | 0 | 212,69 | 3,61 | 49,42 |
| | Port/ Loading | 0 | 5,48 | 694,94 | 694,94 | 212,69 | 7,09 | 38,85 |
| | Manoeuv. | 5 | 27,38 | 915,36 | 915,36 | 209,45 | 9,20 | 251,90 |
| | Sailing | 9,5 | 36,50 | 1210 | 0 | 200,81 | 5,83 | 212,79 |
| | Sailing | 13 | 63,88 | 1210 | 0 | 200,81 | 5,83 | 372,42 |
| L A D E N | Port/ Harbour | 0 | 40,15 | 707,18 | 0 | 212,69 | 3,61 | 144,95 |
| | Port/ Unloading | 0 | 2,74 | 1364,18 | 1364,18 | 199,73 | 12,39 | 33,95 |
| | Manoeuv. | 5 | 3,65 | 915,36 | 915,36 | 209,45 | 9,20 | 33,58 |
| | Sailing | 11 | 131,40 | 1210 | 0 | 200,81 | 5,83 | 766,06 |
| | Sailing | 13,5 | 40,15 | 1210 | 0 | 200,81 | 5,83 | 234,07 |
| SUM | | | | | | | | 2138 |

Πίνακας 4.15: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου γεννητριών ντίζελ με διαθέσιμη την λειτουργία PTO.

| DIESEL GENERATOR WITH SHAFT GENERATOR SYSTEM | | | | | | | | |
|--|--------------------|---------|-------------|----------------|----------------|------------------|------------|----------|
| | Sailing mode | Speed | Frequency | No 1 D/G Power | No 2 D/G Power | Fuel Consumption | | |
| | | [knots] | [days/year] | [kW] | [kW] | [g/kWh] | [t/day] | [t/year] |
| B A L L A S T | Port/ Harbour | 0 | 13,69 | 707,18 | 0 | 212,69 | 3,61 | 49,42 |
| | Port/ Loading | 0 | 5,48 | 694,94 | 694,94 | 212,69 | 7,09 | 38,85 |
| | Manoeuv. | 5 | 27,38 | 915,36 | 915,36 | 209,45 | 9,20 | 251,90 |
| | Sailing | 9,5 | 36,50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Sailing | 13 | 63,88 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| L A D E N | Port/ Harbour | 0 | 40,15 | 707,18 | 0 | 212,69 | 3,61 | 144,95 |
| | Port/ Unloading | 0 | 2,74 | 1364,18 | 1364,18 | 199,73 | 12,39 | 33,95 |
| | Manoeuv. | 5 | 3,65 | 915,36 | 915,36 | 209,45 | 9,20 | 33,58 |
| | Sailing | 11 | 131,40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Sailing | 13,5 | 40,15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SUM | | | | | | | 553 | |

Όπως παρατηρείται, στις καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος PTO, οι ντιζελογεννήτριες απενεργοποιούνται, με αποτέλεσμα να μην καταναλώνεται καύσιμο. Συνεπώς, η ετήσια κατανάλωση των γεννητριών ντίζελ, ελαττώνεται από 2138 τόνους, όταν δεν είναι εγκατεστημένο το σύστημα PTO, σε 553 γεγονός που αντιστοιχεί σε κέρδος 1585 τόνων καυσίμου ετησίως.

Λαμβάνοντας υπόψη, τη ύπαρξη συστήματος φιλτραρίσματος καυσαερίων (scrubber) στο υπό μελέτη πλοίο, καθώς και τη δυνατότητα του κινητήρα και των ντιζελογεννητριών που διαθέτει να καταναλώνουν βαρύ πετρέλαιο (heavy fuel oil), καθίσταται δυνατός ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για την κατανάλωση και των δύο μηχανών.

Επομένως, η εγκατάσταση ενός συστήματος PTO για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, προκαλεί αύξηση στην κατανάλωση του κινητήρα ετησίως κατά 1409 τόνους, ενώ παράλληλα επιφέρει μείωση στην κατανάλωση των γεννητριών ντίζελ κατά 1585 τόνους. Συμπερασματικά, η συνολική κατανάλωση καυσίμου του πλοίου μειώνεται κατά 176 τόνους ετησίως, τιμή που αντιστοιχεί στο 1,12 % της ετήσιας κατανάλωσης. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 4.16.

Πίνακας 4.16: Ετήσια εξοικονόμηση καυσίμου από την εφαρμογή της λειτουργίας ΡΤΟ.

| Ετήσια κατανάλωση τόνων καυσίμου | | | |
|----------------------------------|--------------|-------------------------------|---------------|
| | Κύρια μηχανή | Ντιζελογεννήτριες | Σύνολο |
| Δίχως εγκατεστημένο σύστημα ΡΤΟ | 13533 | 2138 | 15671 |
| Εγκατεστημένο σύστημα ΡΤΟ | 14942 | 553 | 15495 |
| | | Κέρδος λειτουργίας ΡΤΟ | 176 |
| | | | 1,12 % |

4.5.2. Ώρες λειτουργίας γεννητριών ντίζελ

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η δυνατότητα απενεργοποίησης των ντιζελογεννητριών κατά την διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος ΡΤΟ στις τρεις γνωστές καταστάσεις πλεύσης, επιδράει θετικά όχι μόνο στην εξοικονόμηση καυσίμου, αλλά και στην ελάττωση του κόστους συντήρησής τους. Το γεγονός πως η μηχανική ισχύς της αξονικής γεννήτριας προσφέρεται από την κύρια μηχανή και όχι από ανεξάρτητες μηχανές εσωτερικής καύσης, μειώνει σημαντικά τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας συγκριτικά με τις γεννήτριες ντίζελ. Στους παρακάτω πίνακες, λοιπόν, παρουσιάζεται ο ετήσιος χρόνος λειτουργίας των ντιζελογεννητριών και της αξονικής γεννήτριας για την περίπτωση χωρίς και με χρήση του συστήματος ΡΤΟ. Η ισχύς της αξονικής γεννήτριας λαμβάνεται η ισχύς εισόδου αμέσως μετά την έξοδο από τον αυξητήρα, η οποία προκύπτει από το γινόμενο της απορροφούμενης ισχύος ΡΤΟ_{absorbed}, με τον βαθμό απόδοσης των γρναζωκιβωτίων $\eta_{\text{tunnelgear}}$.

Πίνακας 4.17: Ετήσιες ώρες λειτουργίας γεννητριών ντίζελ χωρίς διαθέσιμη την λειτουργία ΡΤΟ.

| DIESEL GENERATOR WITHOUT SHAFT GENERATOR SYSTEM | | | | | | | |
|---|----------------------|-------------|-----------|---------------------|-----------|-----------------|----------|
| | Sailing Mode | Frequency | D/G Power | No of operating D/G | S/G Power | Operating Hours | |
| | | [days/year] | [Kw] | | [Kw] | D/G | S/G |
| B A L L A S T | Port/Harbour | 13,69 | 707,18 | 1 | 0 | 328,56 | 0 |
| | Port/Loading | 5,48 | 1389,88 | 2 | 0 | 131,52 | 0 |
| | Manoeuv. (5 knots) | 27,38 | 1830,72 | 2 | 0 | 657,12 | 0 |
| | Sailing (9,5 knots) | 36,5 | 1210 | 1 | 0 | 876 | 0 |
| | Sailing (13 knots) | 63,88 | 1210 | 1 | 0 | 1533,12 | 0 |
| L A D E N | Port/Harbour | 40,15 | 707,18 | 1 | 0 | 963,6 | 0 |
| | Port/Unloading | 2,74 | 2728,36 | 2 | 0 | 65,76 | 0 |
| | Manoeuv. (5 knots) | 3,65 | 1830,72 | 2 | 0 | 87,6 | 0 |
| | Sailing (11knots) | 131,4 | 1210 | 1 | 0 | 3153,6 | 0 |
| | Sailing (13,5 knots) | 40,15 | 1210 | 1 | 0 | 963,6 | 0 |
| SUM | | | | | | 9702,48 | 0 |

Πίνακας 4.18: Ετήσιες ώρες λειτουργίας γεννητριών ντίζελ με διαθέσιμη την λειτουργία PTO.

| DIESEL GENERATOR WITH SHAFT GENERATOR SYSTEM | | | | | | | |
|--|----------------------|-------------|-----------|---------------------|------------|-----------------|----------------|
| | Sailing Mode | Frequency | D/G Power | No of operating D/G | S/G Power | Operating Hours | |
| | | [days/year] | [Kw] | | [Kw] | D/G | S/G |
| B | Port/Harbour | 13,69 | 707,18 | 1 | 0 | 328,56 | 0 |
| A | Port/Loading | 5,48 | 1389,88 | 2 | 0 | 131,52 | 0 |
| L | Manoeuv. (5 knots) | 27,38 | 1830,72 | 2 | 0 | 657,12 | 0 |
| S | Sailing (9,5 knots) | 36,5 | 0 | 0 | 1282,5 | 0 | 876 |
| T | Sailing (13 knots) | 63,88 | 0 | 0 | 1282,5 | 0 | 1533,12 |
| L | Port/Harbour | 40,15 | 707,18 | 1 | 0 | 963,6 | 0 |
| A | Port/Unloading | 2,74 | 2728,36 | 2 | 0 | 65,76 | 0 |
| D | Manoeuv. (5 knots) | 3,65 | 1830,72 | 2 | 0 | 87,6 | 0 |
| E | Sailing (11knots) | 131,4 | 0 | 0 | 1282,5 | 0 | 3153,6 |
| N | Sailing (13,5 knots) | 40,15 | 0 | 0 | 1282,5 | 0 | 963,6 |
| | | | | | SUM | 3176,16 | 6526,32 |

Επομένως, με την εγκατάσταση του επιλεγμένου συστήματος PTO παρατηρείται μείωση στην ετήσια λειτουργία των γεννητριών ντίζελ κατά 6526,2 ώρες, τιμή που αντιστοιχεί στο 67% των συνολικών ωρών. Στην ουσία πρόκειται για τις ώρες τις οποίες η λειτουργία της αξονικής γεννήτριας αντικαθιστά την αντίστοιχη των ντιζελογεννητριών. Το οικονομικό αντίκτυπο του εν λόγω αποτελέσματος θα περιγραφεί στην επόμενη υποπαράγραφο.

4.6. Οικονομική ανάλυση των αποτελεσμάτων

Προκειμένου να εξετασθεί αν η εγκατάσταση της επιλεγμένης γεννήτριας άξονα καθίσταται συμφέρουσα εφαρμογή για το υπό μελέτη δεξαμενόπλοιο, είναι ανάγκη να προσδιορισθεί το ετήσιο κόστος λειτουργίας, το οποίο δύναται να επηρεαστεί από την παρουσία του συστήματος PTO. Για τον υπολογισμό του εν λόγω κόστους, λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα που προέκυψαν προηγουμένως όσον αφορά την εξοικονόμηση καυσίμου και χρόνου λειτουργίας των γεννητριών ντίζελ. Παρακάτω, παρουσιάζεται η σχέση υπολογισμού του κόστους, η οποία στην ουσία πρόκειται για το άθροισμα τεσσάρων παραγόντων, των οποίων η ανάλυση και ο προσδιορισμός θα πραγματοποιηθεί στη συνέχεια.

$$Annual\ Cost = FO_{cost} + Carbon\ Tax + DG\ O\&M_{cost} + SG\ O\&M_{cost}$$

- FO_{cost} : αναφέρεται στο κόστος του βαρέος καυσίμου που καταναλώνει η κύρια και οι βοηθητικές μηχανές του πλοίου. Λαμβάνεται σύμφωνα με τα δεδομένα των "bunkers" [16] για το βαρύ καύσιμο (IFO 380) ίσο με 450 δολάρια ανά τόνο καυσίμου (450 \$/mt). Ασφαλώς, η εν λόγω τιμή είναι μέση ενδεικτική, καθώς εξαρτάται από το λιμάνι στο οποίο γίνεται ο ανεφοδιασμός και επιπλέον μεταβάλλεται με μεγάλη συχνότητα κατά την διάρκεια του χρόνου.
- Carbon Tax: αναφέρεται στον φόρο που δύναται να επιβάλλεται, όσον αφορά τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα CO_2 της κύριας και των βοηθητικών μηχανών του πλοίου. Η τιμή του στην παρούσα μελέτη θεωρείται ίση με 55 δολάρια ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπεται (55 \$/t- CO_2) [17]. Ο υπολογισμός του παραγόμενου CO_2 πραγματοποιείται σύμφωνα με τον αδιάστατο συντελεστή C_f , ο οποίος μετατρέπει τους τόνους καυσίμου που καταναλώνονται, ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε άνθρακα, σε τόνους CO_2 . Για την περίπτωση του βαρέος καυσίμου ισχύει $C_f=3,114 \text{ t-}CO_2/\text{t-fuel}$ [5].
- $DG \text{ O\&M}_{cost}$: αναφέρεται στα λειτουργικά κόστη και τα κόστη συντήρησης (Operational & Maintenance Cost) των ντιζελογεννητριών. Αποτελείται κυρίως από το κόστος του κυλινδρελαίου, του λιπαντικού των εδράνων, καθώς και ασφαλώς της συντήρησης που απαιτείται για τα διάφορα στοιχεία μηχανών που συνθέτουν τις γεννήτριες. Η τιμή σύμφωνα με την εταιρία FMD [18] λαμβάνεται ίση με 0,01 \$ ανά κιλοβατώρα λειτουργίας (0,01 \$/kWh).
- $SG \text{ O\&M}_{cost}$: αναφέρεται στα λειτουργικά κόστη και κόστη συντήρησης του εγκατεστημένου συστήματος της αξονικής γεννήτριας. Τα εν λόγω κόστη παρουσιάζουν σημαντική μείωση συγκριτικά με τα αντίστοιχα των γεννητριών ντίζελ, καθώς δεν απαιτείται η λειτουργία μηχανής εσωτερικής καύσης, με αποτέλεσμα να απουσιάζουν τα έξοδα του κυλινδρελαίου καθώς και της συντήρησης πολλών στοιχείων μηχανών. Σύμφωνα με μελέτη της εταιρίας "General Electric" [19] τα κόστη για την λειτουργία και την συντήρηση αξονικών γεννητριών εκτιμήθηκε ότι αντιστοιχεί προσεγγιστικά στο 4% του αντίστοιχου κόστους των ντιζελογεννητριών. Προσθέτοντας και ένα ποσοστό της τάξεως του 1%, εξαιτίας της παρουσίας συστήματος αύξησης στροφών στην επιλεγμένη διάταξη PTO, η τιμή του παρόντος κόστους λαμβάνεται ίση με 0,0005 δολάρια ανά κιλοβατώρα λειτουργίας (0,0005 \$/kWh).

Ασφαλώς οι τέσσερις ομάδες κόστους που αναφέρθηκαν δεν είναι οι μόνες οι οποίες συνθέτουν το ετήσιο κόστος λειτουργίας ενός πλοίου. Ωστόσο, είναι αυτές οι οποίες επηρεάζονται από την λειτουργία PTO του συστήματος της αξονικής γεννήτριας που επιλέχθηκε, με αποτέλεσμα οι υπόλοιπες να μην απασχολούν στην παρούσα μελέτη. Όσον αφορά τα λειτουργικά κόστη και τα κόστη συντήρησης της κύριας μηχανής, αυτά δεν επηρεάζονται από την αύξηση που επιφέρει η λειτουργία PTO στο φορτίο της, καθώς αυτή είναι αρκετά μικρή συγκριτικά με το συνολικό φορτίο και επιπλέον θεωρείται πως αντισταθμίζεται, λόγω της λειτουργίας του κινητήρα σε πιο αποδοτικά επίπεδα.

Σύμφωνα, λοιπόν, με τους παράγοντες που προσδιορίστηκαν για τον υπολογισμό του ετήσιου κόστους, καθώς και των καταναλώσεων και του χρόνου λειτουργίας της κύριας και των βοηθητικών μηχανών, στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο αναλυτικός υπολογισμός του ετήσιου κόστους λειτουργίας του πλοίου, που δύναται να επηρεαστεί από την εγκατάσταση αξονικής γεννήτριας.

Πίνακας 4.19: Ετήσιο οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή της λειτουργίας PTO

| | ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ | | | | | | | | |
|--------|---------------------------|---------|---|---------|-----------------------------|---------|-------------------------------|---------|---------------|
| | FUEL COST (\$450/mt) | | CARBON TAX (\$55/t-CO ₂) | | DG O&M COST (\$0,01/kWh) | | SG O&M COST (\$0,0005/kWh) | | SUM |
| | mt/year | \$/year | t-CO ₂ /year | \$/year | kWh/year | \$/year | kWh/year | \$/year | \$/year |
| NO SG | 15671 | 7051950 | 48800 | 2684000 | 1.04E+07 | 103549 | 0 | 0 | 9839499 |
| SG | 15495 | 6972750 | 48251 | 2653832 | 2.64E+06 | 26394 | 8370000 | 4185 | 9657161 |
| PROFIT | | 79200 | | 30167 | | 77155 | | -4185 | 182338 |

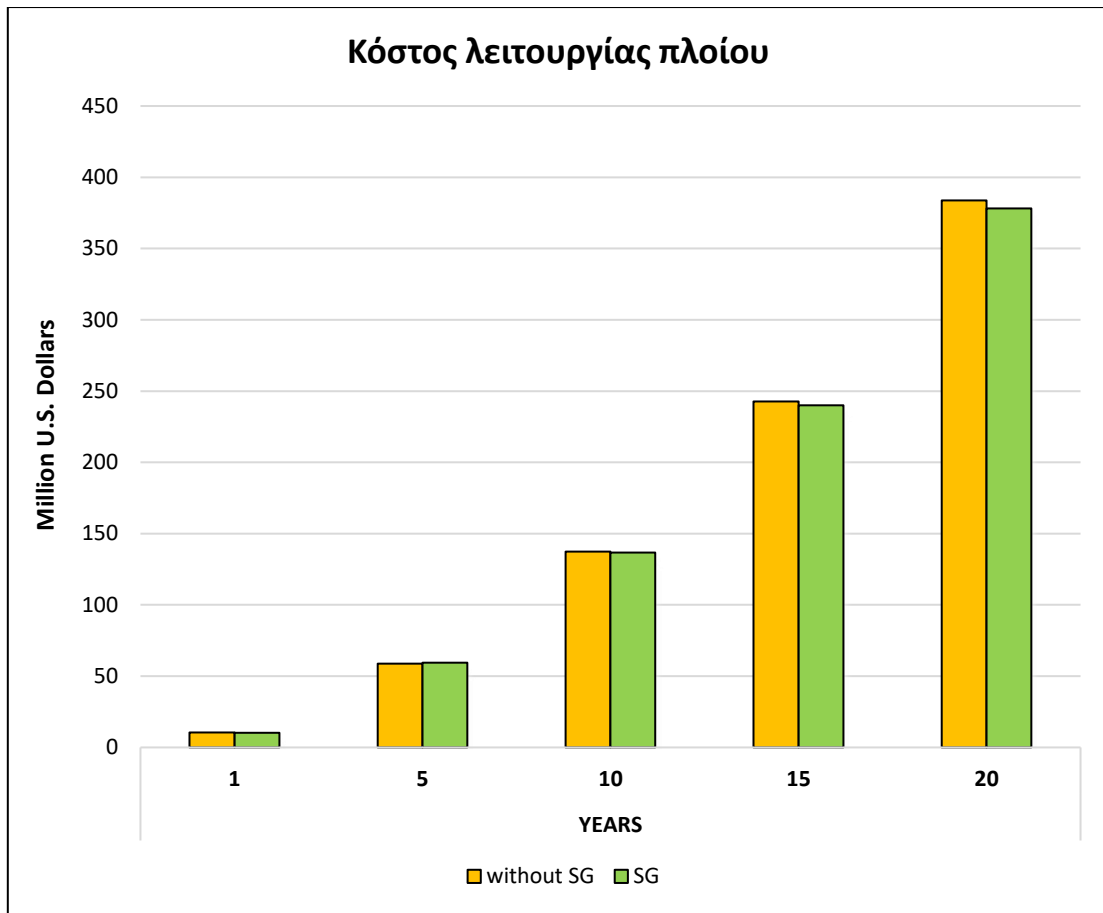
Όπως παρατηρείται, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως με την εγκατάσταση του επιλεγμένου συστήματος τη αξονικής γεννήτριας εξοικονομούνται ετησίως \$ 182338.

Το κόστος της επένδυσης εκτιμάται σε 1,7Μ\$ για το σύστημα PTO που επιλέχθηκε με αξονική γεννήτρια ισχύος 17888 kW. Η εκτίμηση πραγματοποιήθηκε με εκθετική παρεμβολή σε δεδομένα κόστους αντίστοιχων εγκαταστάσεων, τα οποία λήφθηκαν με την βοήθεια του νηογνώμονα DNV GL. Συγκεκριμένα, η παρεμβολή έγινε με εκθέτη 0,8 μεταξύ των ζεύγων τιμών (4000 kW, 2,8Μ\$) και (5000 kW, 3,7Μ\$).

Επομένως, στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται το κέρδος που αποκομίζεται από το σύστημα της αξονικής γεννήτριας σε διάρκεια 20 χρόνων. Το κέρδος προκύπτει, ασφαλώς, συγκρίνοντας τα κόστη κάθε έτους της περίπτωσης που δεν είναι εγκατεστημένη η διάταξη PTO με την περίπτωση που είναι. Στα κόστη της περίπτωσης λειτουργίας της γεννήτριας άξονα προστίθενται ακόμη και το κόστος της επένδυσης, όπως εκτιμήθηκε προηγουμένως. Τέλος, τα ετήσια κόστη και στις δύο περιπτώσεις μεταβάλλονται ανά έτος, με βάση τον συντελεστή ανατοκισμού r ως εξής:

$$F = P \cdot (1 + r)^N ,$$

όπου F η μελλοντική αξία της παρούσας τιμής P μετά από N χρόνια [20]. Ο συντελεστής ανατοκισμού στην παρούσα μελέτη θεωρείται ίσος με $r=6\%$.



Σχήμα 4.8: Σύγκριση κόστους λειτουργίας πλοίου χωρίς (πορτοκαλί) και με (πράσινο) την εγκατάσταση ΡΤΟ διαθέσιμη, σε διάρκεια 20-ετίας



Σχήμα 4.9: Συνολικό κέρδος εφαρμογής ΡΤΟ σε διάρκεια 20-ετίας

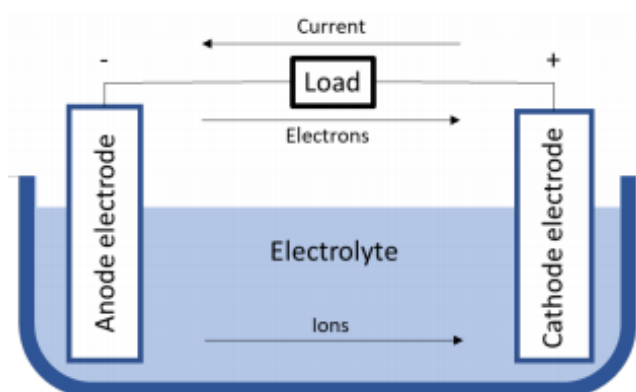
Όπως παρατηρείται από το συγκριτικό γράφημα, μεταξύ 5-ετίας και 10-ετίας από την χρονική στιγμή που πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση και η δυνατότητα λειτουργίας του συστήματος ΡΤΟ, τα συνολικά κόστη λειτουργίας του πλοίου εμφανίζονται χαμηλότερα από τα αντίστοιχα που θα προέκυπταν σε περίπτωση που δεν ήταν διαθέσιμη η διάταξη. Το γεγονός αυτό γίνεται αντιληπτό και στο διάγραμμα όπου παρουσιάζεται το κέρδος που επιφέρει το σύστημα της αξονικής γεννήτριας σε διάρκεια εικοσαετίας από την χρονιά της επένδυσης. Το 7^ο έτος είναι εκείνο κατά το οποίο η εγκατάσταση ξεκινά να εμφανίζεται κερδοφόρα, με το συνολικό κέρδος να τείνει σε τιμές των 5Μ\$ δολαρίων το 20^ο έτος λειτουργίας.

Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν δύνανται ασφαλώς να παρουσιάζουν ένα ποσοστό απόκλισης, καθώς αρκετές τιμές που ήταν αναγκαίες για τον υπολογισμό λήφθηκαν κατά προσέγγιση. Ωστόσο, καθίσταται σαφές και δίχως αμφιβολία το γεγονός πως η επιλεγμένη εγκατάσταση αποτελεί μία βιώσιμη και κερδοφόρα επένδυση για την λειτουργία του υπό μελέτη δεξαμενοπλοίου, με τα κέρδη να φτάνουν σε αρκετά υψηλές τιμές σε διάρκεια εικοσαετίας.

5. Σύστημα μπαταριών

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάστηκαν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εγκατάσταση ενός συστήματος αξονικής γεννήτριας για την ικανοποίηση των αναγκών του υπό μελέτη πλοίου VLCC σε ηλεκτρισμό. Το σύστημα που επιλέχθηκε, λοιπόν, αποτελείται από αξονική γεννήτρια η οποία έχει τη δυνατότητα να παράγει ηλεκτρική ισχύ 1788 kW, την στιγμή που όπως υπολογίστηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πλοίου και την αποδοτικότητα του συστήματος η ισχύς που παράγεται ανέρχεται σε 1218,5 kW. Το περιθώριο που παρατηρείται μεταξύ των δύο τιμών ισχύος, καθώς και η παρουσία συστήματος μετατροπής του εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος σε συνεχές, καθιστούν δυνατή την εγκατάσταση μπαταριών για την αποθήκευση της εν λόγω περίσσειας ενέργειας. Η ενέργεια αυτή στη συνέχεια συνδέοντας την διάταξη των μπαταριών με το δίκτυο του πλοίου, δύναται να αντικαταστήσει τις γεννήτριες ντίζελ για ένα χρονικό διάστημα ανάλογο με την χωρητικότητα των επιλεγμένων μπαταριών, εξοικονομώντας επιπλέον τόνους καυσίμου και έξοδα συντήρησης και λειτουργίας. Το φαινόμενο αυτό θα εξετασθεί στο παρόν κεφάλαιο για το υπό μελέτη πλοίο, αφού πρώτα αναφερθούν οι βασικές αρχές λειτουργίας και η τεχνολογία των μπαταριών σε ναυτικές εφαρμογές [21].

5.1. Τεχνολογία μπαταριών



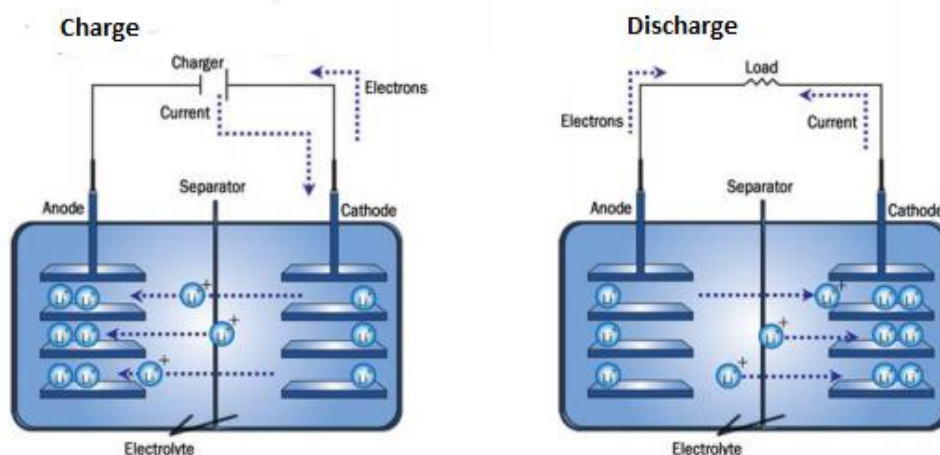
Σχήμα 5.1: Αρχή λειτουργίας μπαταριών [21]

Τα βασικά στοιχεία τα οποία συνθέτουν μια μπαταρία απεικονίζονται στο παραπάνω σχήμα. Μια μπαταρία, λοιπόν, αποτελείται από δύο διαφορετικά φορτισμένους πόλους, οι οποίοι αντιστοιχούν σε ένα θετικό ηλεκτρόδιο, το οποίο καλείται κάθοδος και πρόκειται για ένα μέταλλο με την τάση να λαμβάνει ηλεκτρόνια, και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο καλείται άνοδος και πρόκειται για ένα μέταλλο που έχει την τάση να απελευθερώνει ηλεκτρόνια. Επιπλέον, στο εσωτερικό της χρησιμοποιείται ένα υλικό, το οποίο καλείται ηλεκτρολύτης και ο ρόλος του είναι να επιτρέπει την μεταφορά των θετικών ιόντων μεταξύ των δύο πόλων μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Τέλος, μια διαχωριστική επιφάνεια (separator) τοποθετείται συνήθως ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο, προκειμένου να αποτρέψει την επαφή τους. Επομένως, συνδέοντας τους δύο πόλους με ένα ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό, επιτυγχάνεται ροή ηλεκτρονίων μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, ενώ παράλληλα τα θετικά ιόντα ρέουν μέσω του ηλεκτρολύτη. Όταν η ροή αυτή των ηλεκτρονίων, λοιπόν, γίνεται αυτόματα με φορά από την άνοδο προς την κάθοδο (εκφόρτιση) είναι δυνατή

η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ όταν γίνεται αντίστροφα, με την επιβολή μιας εξωτερικής πηγής (φόρτιση) είναι δυνατή η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα υλικά που συνθέτουν τον αγωγό ηλεκτρονίων, τα ηλεκτρόδια και τον ηλεκτρολύτη, καθώς και η μορφή και η διάταξη των ηλεκτροδίων διαχωρίζουν τις μπαταρίες και καθορίζουν τις ιδιότητες τους. Η πιο διαδεδομένη κατηγορία μπαταριών είναι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion), οι οποίες θα απασχολήσουν στην παρούσα μελέτη και η σύνθεση και οι ιδιότητές τους θα αναλυθούν παρακάτω.

5.1.1. Μπαταρίες ιόντων λιθίου

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου δύνανται να αποτελούνται από ηλεκτρόδια και ηλεκτρολύτη διαφόρων υλικών σύνθεσης. Ωστόσο, το κοινό που τις συνδέει είναι η μεταφορά ιόντων λιθίου μέσω του ηλεκτρολύτη. Κατά την φόρτιση, λοιπόν, θετικά φορτισμένα ιόντα λιθίου (κατιόντα) διαπερνούν τον διαχωριστή και μεταφέρονται από το θετικό προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο, αποθηκεύοντας με τον τρόπο αυτό ενέργεια. Για να επιτευχθεί η διαδικασία αυτή, όπως προαναφέρθηκε είναι αναγκαία η προσφορά ενέργειας μέσω μίας πηγής (φορτιστή). Στη συνέχεια, μόλις επιτευχθεί εξ ολοκλήρου η φόρτιση και τα ιόντα του λιθίου έχουν συγκεντρωθεί στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνδέοντας ένα φορτίο μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Η παραγωγή της ενέργειας αυτής ολοκληρώνεται, την στιγμή που όλα τα ιόντα του λιθίου μεταφερθούν ξανά από την άνοδο στην κάθοδο, όπου η εκφόρτιση θα έχει ολοκληρωθεί και συνεπώς για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά η μπαταρία χρειάζεται επιπλέον φόρτιση. Οι διαδικασίες αυτές αποτελούν τον κύκλο λειτουργίας των μπαταριών ιόντων λιθίου και απεικονίζονται παρακάτω.



Σχήμα 5.2: Φόρτιση/Εκφόρτιση μπαταριών ιόντων λιθίου [21]

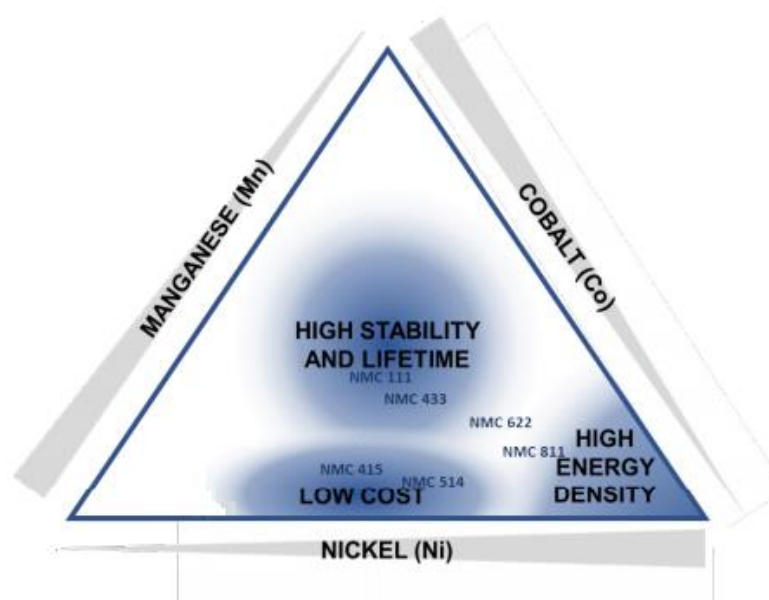
Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι η υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας που παρουσιάζουν συγκριτικά με τα άλλα είδη μπαταριών της παγκόσμιας αγοράς. Πυκνότητα ενέργειας ορίζεται το μέγεθος το οποίο προσδιορίζει την αποθηκευτική ικανότητα των μπαταριών σε ενέργεια ανάλογα με τον όγκο τους και υπολογίζεται σε κιλοβατώρες ανά λίτρα (kWh/l). Το αντίστοιχο μέγεθος που αναφέρεται στο βάρος καλείται ειδική ενέργεια, μετριέται σε κιλοβατώρες ανά κιλογραμμάρια (kWh/kg) και οι εν λόγω μπαταρίες παρουσιάζουν επίσης τα υψηλότερα επίπεδα. Επιπλέον, αρκετά υψηλός είναι και ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/ξεφόρτισης που δύνανται να επιτευχθούν πριν επέλθει βλάβη.

Παρόλα αυτά, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου παρουσιάζουν και κάποια ζητήματα τα οποία είναι ανάγκη να λαμβάνονται υπόψη. Τα κυριότερα από αυτά είναι το υψηλό κόστος και η χαμηλή διαθεσιμότητα που παρατηρείται στα υλικά που συνθέτουν τα συστατικά τους. Επίσης, ο ηλεκτρολύτης τις περισσότερες φορές αποτελείται από εύφλεκτα πολυμερή υλικά αυξάνοντας τον κίνδυνο αναφλεξιμότητας.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι άνοδοι και οι κάθοδοι των μπαταριών ιόντων λιθίου δύναται να αποτελούνται από διαφορετικά υλικά. Ωστόσο, οι άνοδοι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων έχουν ως βάση τον άνθρακα ή τον γραφίτη με αποτέλεσμα η διαφοροποίηση των μπαταριών να προκύπτει από το υλικό των καθόδων. Παρακάτω θα αναλυθούν οι 2 βασικότερες κατηγορίες μπαταριών ιόντων λιθίου, οι οποίες θα απασχολήσουν και στην συνέχεια της μελέτης. Στη πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται ως κάθοδος κράμα νικελίου-μαγνησίου-κοβαλτίου (NMC), ενώ στην δεύτερη κράμα λιθίου-σιδήρου και ανιόντων φωσφόρου (LFP).

5.1.1.1. Κάθοδος νικελίου-μαγνησίου-κοβαλτίου (NMC)

Οι μπαταρίες NMC αποτελούν μία από τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στη τεχνολογία των μπαταριών και στις μέρες μας χρησιμοποιούνται με μεγαλύτερη συχνότητα σε ηλεκτρονικές εφαρμογές συγκριτικά με άλλα είδη μπαταριών. Τα μεγάλα πλεονεκτήματά τους προκύπτουν από την σύνθεση τους, καθώς το νικέλιο και το κοβάλτιο χαρακτηρίζονται από υψηλή ειδική ενέργεια, ενώ το μαγνήσιο προσφέρει σταθερότητα και αξιοπιστία στην χημική αντίδραση. Επιπλέον, έχουν την δυνατότητα να αποθηκεύουν το μεγαλύτερο ηλεκτροχημικό δυναμικό (τάση), με αποτέλεσμα να παράγονται υψηλά επίπεδα ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, το οξειδίο που παρατηρείται στο ηλεκτρόδιο της καθόδου αυξάνει τον κίνδυνο ανάφλεξης στη περίπτωση παρουσίας υψηλών θερμοκρασιών, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή προφυλάξεων για τον περιορισμό του κινδύνου.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα σύνθεσης μπαταριών NMC [21]

Η διαφορετική αναλογία της σύνθεσης των μπαταριών NMC δύναται να προσαρμόσει σε διαφορετικά επίπεδα τις ιδιότητές τους. Η αναλογία του κάθε στοιχείου καθορίζει, επιπλέον, και την ονοματολογία των μπαταριών. Παραδείγματος χάρη, οι μπαταρίες NMC333

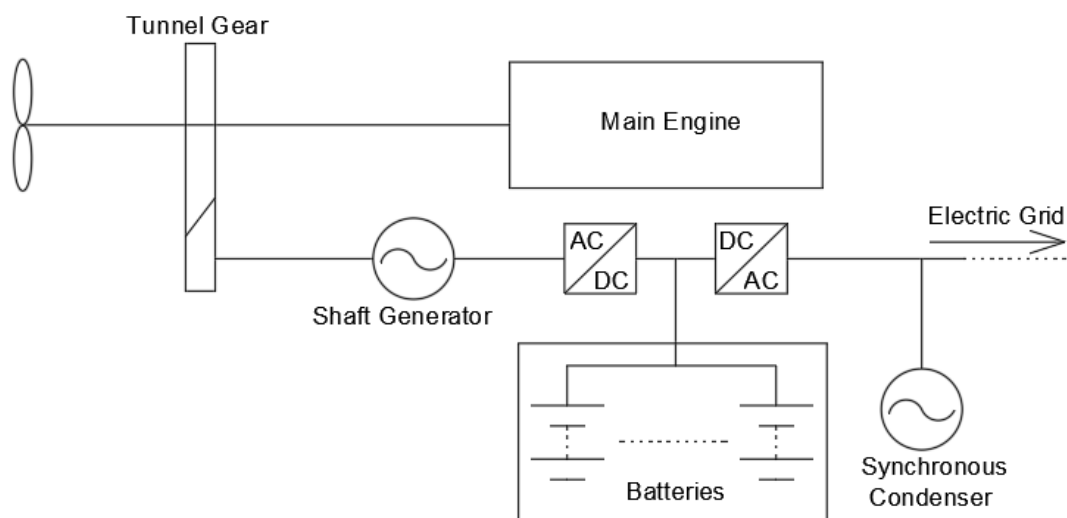
αποτελούνται από ισόποσες αναλογίες νικελίου, κοβαλτίου και μαγνησίου, ενώ οι NMC811 αποτελούνται από 80% νικέλιο, 10% μαγνήσιο και 10% κοβάλτιο. Στο σχήμα 5.3 απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο οι ιδιότητες των εν λόγω μπαταριών μεταβάλλονται ανάλογα με την περιεκτικότητα του κάθε ενός από τα τρία χημικά στοιχεία. Όπως παρατηρείται, οι βασικές ιδιότητες προσδιορίζονται κυρίως από το μαγνήσιο και το κοβάλτιο. Υψηλή περιεκτικότητα νικελίου αντιστοιχεί σε υψηλή πυκνότητα ενέργειας, ενώ όσον αφορά το κοβάλτιο, χαμηλή περιεκτικότητα οδηγεί σε υψηλή πυκνότητα και μειωμένο κόστος, επιδρώντας ωστόσο αρνητικά στην σταθερότητα και τον χρόνο ζωής της μπαταρίας.

5.1.1.2. Κάθοδος λιθίου-σιδήρου-φωσφόρου (LFP)

Η βασική διαφορά των μπαταριών LFP παρατηρείται στην δομή της καθόδου, η οποία αποτελείται από φώσφορο και ολιβίνη (phosphorous olivine) και όχι από μεταλλικά οξείδια όπως στην περίπτωση των NMC. Η έλλειψη αυτή του οξυγόνου μειώνει δραματικά το μέγεθος της διακινδύνευσης σε περίπτωση υψηλής θερμικής καταπόνησης. Επιπλέον, οι εν λόγω μπαταρίες, προσφέρουν μεγάλη ευελιξία και αξιοπιστία σε περίπτωση υψηλών θερμοκρασιακών μεταβολών. Η ειδική ενέργεια, όμως, και η δυνατότητα αποθήκευσης παρουσιάζουν αρκετά χαμηλά επίπεδα, συγκριτικά με τις άλλες μπαταρίες της αγοράς, όπως και η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να παραχθεί. Τα μεγέθη αυτά, ωστόσο, δύναται να αυξηθούν ως ένα βαθμό προσθέτοντας στην δομή της καθόδου κατάλληλα στοιχεία και ενώσεις, χωρίς όμως να επιτευχθούν τα επίπεδα που παρουσιάζονται στις μπαταρίες NMC. Παρόλα αυτά η αξιοπιστία και η ασφάλεια που επιφέρουν οι μπαταρίες LFP, καθώς και η τεχνογνωσία που επικρατεί για αυτές, τις κατατάσσουν αρκετές φορές υψηλότερα στη προτίμηση των καταναλωτών.

5.2. Διαστασιολόγηση διάταξης μπαταριών στο υπό μελέτη πλοίο

Στο σχήμα 5.4 απεικονίζεται η εγκατάσταση της διάταξης των μπαταριών και η σύνδεσή τους με το επιλεγμένο σύστημα της αξονικής γεννήτριας του υπό μελέτη πλοίου, το οποίο διαστασιολογήθηκε στο 4^ο κεφάλαιο.



Σχήμα 5.4: Σύστημα PTO υπό μελέτη πλοίου με εγκατεστημένη διάταξη μπαταριών

Όπως παρατηρείται, η σύνδεση των μπαταριών με το υπόλοιπο σύστημα πραγματοποιείται μεταξύ του ανορθωτή ρεύματος (rectifier) και του μετατροπέα (converter). Το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μεταβλητής συχνότητας που παράγεται από την γεννήτρια άξονα, μετατρέπεται σε συνεχές μέσω του ανορθωτή, σταθεροποιείται και στη συνέχεια, η απαραίτητη ποσότητα μετατρέπεται ξανά σε εναλλασσόμενο και μεταφέρεται στο δίκτυο (electric grid) προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες του πλοίου σε ηλεκτρισμό, ενώ η περίσσια αποθηκεύεται στο σύστημα των μπαταριών φορτίζοντάς τις. Η εν λόγω διαμοίραση των τιμών ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο και τις μπαταρίες γίνεται μέσω ενός συστήματος διαχείρισης ισχύος (power management system). Η περίσσια ισχύος η οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί για την φόρτιση των μπαταριών υπολογίζεται παρακάτω, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό απόδοσης του ανορθωτή και την διαφορά της μέγιστης παραγόμενης ισχύος της γεννήτριας άξονα από την αντίστοιχη απαιτούμενη για την λειτουργία του πλοίου:

$$P_{SG_{margin}} = (P_{e,output,max} - P_{e,output}) \cdot \eta_{rectifier} = (1788 - 1218,5) \cdot 0,98 \Rightarrow \\ \Rightarrow P_{SG_{margin}} = 558 \text{ kW}$$

Επομένως, για την φόρτιση των μπαταριών είναι δυνατόν να διατεθεί ηλεκτρική ισχύς των 558 kW. Η εν λόγω τιμή αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον προσδιορισμό του χρόνου φόρτισης και γενικότερα για την μελέτη της εφαρμογής των μπαταριών.

Η διαστασιολόγηση της διάταξης έγινε με την προϋπόθεση η συνολική χωρητικότητα να μην ξεπεράσει τις 5000 kWh εξαιτίας κυρίως του κόστους της επένδυσης, το οποίο για μπαταρίες ιόντων λιθίου, κυμαίνεται μεταξύ \$400 και \$500, ανά κιλοβατώρα, ανάλογα με τη σύνθεσή τους. Προκειμένου λοιπόν να πληρείται το εν λόγω κριτήριο επιλέχθηκε κατάλληλος αριθμός μπαταριών διατεταγμένων σε m παράλληλες συνδέσεις και n συνδέσεις σε σειρά. Το γινόμενο του αριθμού n με την ονομαστική τάση της κάθε μπαταρίας, αντιστοιχεί στη συνολική τάση του συστήματος, ενώ του αριθμού m με την χωρητικότητα της κάθε μπαταρίας σε αμπερώρια, στη συνολική αντίστοιχη χωρητικότητα. Τέλος η μέγιστη ενέργεια που δύναται να αποθηκεύσει η εγκατάσταση σε κιλοβατώρες υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{Stored Energy [kWh]} = m \cdot n \cdot V \cdot I$$

Στον πίνακα 5.1, λοιπόν, παρουσιάζονται τα κύρια στοιχεία του συστήματος μπαταριών που επιλέχθηκε για το υπό μελέτη πλοίο. Η διαστασιολόγηση πραγματοποιείται ξεχωριστά για μπαταρίες NMC και LFP, προκειμένου να εξετασθούν και να συγκριθούν οι δύο κατηγορίες. Ο αριθμός των συνδέσεων σε σειρά n προσδιορίστηκε, ώστε να επιτυγχάνεται η τιμή της τάσης του δικτύου του πλοίου των 450 V, ενώ ο αριθμός των παράλληλων συνδέσεων m έγινε προκειμένου οι τιμή της αποθηκευτικής ικανότητας της διάταξης να προσεγγίζει τις 5000 kWh.

Πίνακας 5.1: Στοιχεία μπαταριών επιλεγμένης διάταξης υπό μελέτη πλοίου [23], [24]

| | NMC | LFP |
|---------------------------|--------|-------|
| per battery | | |
| Voltage [V] | 48 | 48 |
| Capacity [Ah] | 60 | 75 |
| Storage Energy [kWh] | 2,88 | 3,6 |
| Weight [kg] | 16.55 | 32 |
| Volume [cub. metres] | 0,012 | 0,033 |
| Cycle life [no of cycles] | 1000+ | 2000 |
| Discharge Current [A] | 60 | 70 |
| Charge Current [A] | 10 | 20 |
| sum of system | | |
| n | 10 | 10 |
| m | 168 | 135 |
| No of Batteries (m x n) | 1680 | 1350 |
| Voltage [V] | 480 | 480 |
| Storage Energy [kWh] | 4838,4 | 4860 |
| Weight [tones] | 27,8 | 43.2 |
| Volume [cub. metres] | 20,46 | 45,35 |

Όπως παρατηρείται, η βασική διαφορά των δύο τύπων μπαταριών ιόντων λιθίου παρουσιάζεται στο συνολικό βάρος και όγκο του συστήματος. Το συνολικό βάρος και ο όγκος της διάταξης που αποτελείται από τις μπαταρίες LFP είναι περίπου 2 φορές μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα μεγέθη των NMC για παρόμοια αποθηκευτική ικανότητα, γεγονός που αναμενόταν σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στη περιγραφή των ιδιοτήτων των δύο τύπων στην αρχή του κεφαλαίου. Ωστόσο, για την περίπτωση του πλοίου VLCC δεν υπάρχουν μεγάλοι περιορισμοί όσον αφορά τον διαθέσιμο όγκο και βάρος, εξαιτίας των μεγάλων διαστάσεών του, με αποτέλεσμα η ασφάλεια και η σταθερότητα που προσφέρουν οι μπαταρίες LFP να τις καθιστούν καταλληλότερες για την παρούσα εφαρμογή. Επομένως, στο εξής η έρευνα θα πραγματοποιηθεί για την εγκατάσταση με τις μπαταρίες LFP.

5.3. Εξέταση της βιωσιμότητας της επένδυσης

Για την μελέτη του οικονομικού αντίκτυπου της διάταξης των μπαταριών LFP, η οποία διαστασιολογήθηκε στην προηγούμενη υποπαράγραφο, λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα τρία σενάρια εφαρμογών τα οποία θα αναλυθούν εκτενώς στη συνέχεια.

1. Συμμετοχή των μπαταριών στην κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του πλοίου κατά την παραμονή του στο λιμάνι.
2. Συμμετοχή των μπαταριών στην κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του πλοίου σε καταστάσεις ελιγμών.
3. Συμμετοχή των μπαταριών στην κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του πλοίου σε διακοπτόμενο φορτίο στην κατάσταση εν πλω.

➤ Σενάριο 1

Στην παρούσα εφαρμογή οι μπαταρίες φορτίζονται κατά την πλεύση του πλοίου με την χρήση της περίσσιας ισχύος της αξονικής γεννήτριας, όπως έχει προαναφερθεί. Η συχνότητα που το υπό μελέτη πλοίο βρίσκεται εν πλω είναι αρκετά υψηλή, με αποτέλεσμα να μην απασχολεί ο χρόνος φόρτισης στην προκειμένη περίπτωση. Στη συνέχεια, η ενέργεια των 4860 kWh που έχει αποθηκευτεί χρησιμοποιείται προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες του πλοίου σε ηλεκτρισμό κατά την παραμονή του στο λιμάνι (670.2 kW), μέχρι να επέλθει η εκφόρτισή των μπαταριών. Για τον υπολογισμό του χρόνου εκφόρτισης χρειάζεται να προσδιορισθεί η ένταση του ρεύματος εκφόρτισης κάθε μπαταρίας κατά την λειτουργία τους στην εν λόγω εφαρμογή ως εξής:

$$\text{Discharging Current} = \frac{P_{\text{output}}}{V \cdot m} = \frac{670,2 \cdot 1000}{450 \cdot 135 \cdot 0,98 \cdot 0,98} = 11,5 \text{ A}$$

Η τιμή της έντασης του ρεύματος εκφόρτισης είναι μικρότερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη (70 A) και συνεπώς, με βάση την χωρητικότητα της κάθε μπαταρίας 75 Ah, προκύπτει πως η εγκατεστημένη διάταξη δύναται να καλύπτει για ένα ταξίδι τις ανάγκες του πλοίου σε ηλεκτρικό φορτίο κατά τη παραμονή του στο λιμάνι, αντικαθιστώντας τις γεννήτριες ντίζελ, για περίπου 6,5 ώρες. Η τιμή αυτή, υποθέτοντας πως το υπό μελέτη πλοίο VLCC εκτελεί 10 ταξίδια ετησίως και λαμβάνοντας υπόψη τις καταναλώσεις των ντιζελογεννητριών κατά τη λειτουργία τους στο λιμάνι (3,6 tones/day), αντιστοιχεί σε ετήσια εξοικονόμηση 10 τόνων καυσίμου. Είναι σαφές, λοιπόν, πως κατά την εφαρμογή του εν λόγω σεναρίου η επένδυση της διάταξης των μπαταριών είναι αδύνατο να αποβεί κερδοφόρα, ακόμη και συνυπολογίζοντας τα “carbon taxes” και την εξοικονόμηση των 65 ωρών λειτουργίας της γεννήτριας ντίζελ.

➤ Σενάριο 2

Στη παρούσα εφαρμογή η διαδικασία της φόρτισης των μπαταριών καθίσταται πανομοιότυπη με την αντίστοιχη του προηγούμενου σεναρίου. Ωστόσο, η λειτουργία των μπαταριών δεν εξετάζεται στο λιμάνι αντικαθιστώντας εξ ολοκλήρου την ντιζελογεννήτρια, αλλά ως υποβοήθεια για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του πλοίου σε καταστάσεις ελιγμών.

Όπως προκύπτει από τη κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου του πλοίου που παρουσιάστηκε στο 4^ο κεφάλαιο, κατά την περίοδο ελιγμών οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ ανέρχονται σε 1735 kW και για την κάλυψή τους απαιτείται η λειτουργία και των δύο γεννητριών ντίζελ στο 60%, καταναλώνοντας 9,2 τόνους καυσίμου ημερησίως. Ωστόσο, σύμφωνα με το σχέδιο ηλεκτρικού ισολογισμού, τα 332 kW διαχωρίζονται και αντιστοιχούν σε απαιτήσεις μηχανολογικού εξοπλισμού του καταστρώματος. Επομένως, με την χρήση της επιλεγμένης διάταξης μπαταριών, εξετάζεται η κάλυψη της εν λόγω ισχύος των 332 kW από την αποθηκευμένη ενέργεια των 4860 kWh, ώστε για την παραγωγή της υπολειπόμενης ισχύος των 1403 kW να απαιτείται η λειτουργία μίας γεννήτριας σε πολύ αποδοτικότερα επίπεδα. Ο χρόνος εκφόρτισης υπολογίζεται αντίστοιχα με το 1^ο σενάριο ίση με 13 και τα αποτελέσματα της εφαρμογής παρουσιάζονται ακολούθως στον πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 : Αποτελέσματα της εφαρμογής των μπαταριών στην κατάσταση ελιγμών

| | Αρχική κατάσταση | Εφαρμογή μπαταριών |
|---|-------------------|--------------------|
| Συχνότητα κατάστασης ελιγμών | 31 μέρες ανά έτος | |
| Αριθμός γεννητριών σε λειτουργία | 2 | 1 |
| Ισχύς λειτουργίας κάθε γεννήτριας | 867,5 kW | 1403 kW |
| Ημερήσια κατανάλωση καυσίμου | 9,2 τόνοι | 7 τόνοι |
| Χρόνος λειτουργίας μπαταριών ανά ταξίδι | | 13 ώρες |
| Αριθμός ταξιδιών | 10 | |
| Ετήσια κατανάλωση καυσίμου | 285,2 τόνοι | 273,2 τόνοι |
| Εξοικονόμηση καυσίμου | | 12 τόνοι |

Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα της δεύτερης εφαρμογής όσον αφορά την ετήσια κατανάλωση καυσίμου, παρουσιάζουν ελάχιστη βελτίωση σε σχέση με τα αντίστοιχα της πρώτης. Επομένως, η επένδυση δεν δύναται να παρουσιαστεί βιώσιμη ούτε στην εν λόγω περίπτωση.

➤ Σενάριο 3

Στο παρόν σενάριο έγινε προσπάθεια για την εκμετάλλευση των μπαταριών όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω. Οι μπαταρίες φορτίζονται μέσω της αξονικής γεννήτριας και στη συνέχεια συμμετέχουν αναλαμβάνοντας την κάλυψη του διακοπτόμενου φορτίου, το οποίο ανέρχεται σε 154,6 kW. Με την πρακτική αυτή επιτυγχάνεται η αποφόρτιση κατά ένα βαθμό της κύριας μηχανής κατά την διάρκεια της λειτουργίας των μπαταριών, καθώς το φορτίο που χρειάζεται να καλύψει η γεννήτρια άξονα ελαττώνεται κατά 154,6 kW. Η πρακτική αυτή δύναται να εφαρμόζεται καθ' όλο το χρόνο της πλεύσης του πλοίου πραγματοποιώντας στην ουσία έναν αριθμό κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης των μπαταριών. Ωστόσο, όπως υπολογίστηκε η αύξηση που επέρχεται στο φορτίο της κύριας μηχανής κατά την φόρτιση, στην ουσία αντισταθμίζει το όφελος από της αποφόρτισής της, με αποτέλεσμα η συνολική εξοικονόμηση καυσίμου να προκύπτει της τάξεως των 5 τόνων ετησίως. Επομένως είναι προφανές, πως το εν λόγω σενάριο δεν δύναται να παρουσιάσει κάποιο οικονομικό όφελος, ακόμη και αν είναι δυνατός ο συνδυασμός του με μία εκ των δύο εφαρμογών που αναλύθηκαν στα δύο προηγούμενα σενάρια.

Όπως προκύπτει λοιπόν από την εξέταση των παραπάνω σεναρίων εφαρμογών, η επιλεγμένη διάταξη των μπαταριών δεν είναι ικανή να αποβεί κερδοφόρα για την λειτουργία

του υπό μελέτη πλοίου. Ο περιορισμός της αποθηκευτικής ικανότητας των 5000 kWh, που επιβάλλει το υψηλό κόστος του συστήματος, έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία εκφόρτισή του και κατ' επέκταση την εξοικονόμηση λιγιστών τόνων καυσίμου ετησίως. Ωστόσο, η μείωση του κόστους των μπαταριών, η οποία είναι πιθανό να επέλθει σε σημαντικό βαθμό τα επόμενα χρόνια είναι δυνατόν να παρουσιάζει διαφορετικά πιο ευνοϊκά αποτελέσματα στις παρούσες ή σε αντίστοιχες εφαρμογές.

6. Επίδραση της λειτουργίας ΡΤΟ στην τιμή του δείκτη EEDI

Η εγκατάσταση του συστήματος της αξονικής γεννήτριας για την κάλυψη των αναγκών του πλοίου σε ηλεκτρισμό στη κατάσταση εν πλω, πέρα από το οικονομικό αντίκτυπο που έχει στα λειτουργικά κόστη της κύριας και των βοηθητικών μηχανών, όπως αναλύθηκε στο 4^ο κεφάλαιο, επηρεάζει και την τιμή του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας (EEDI). Ο ρόλος και η σημασία του δείκτη για την ναυτιλία περιγράφηκε στην εισαγωγή της διπλωματικής στην υποπαράγραφο 1.6, όπως και οι πρωταρχικές σχέσεις για τον υπολογισμό του και την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του. Στο παρών κεφάλαιο, λοιπόν, θα προσδιοριστεί αναλυτικά η τιμή του δείκτη EEDI για το υπό μελέτη πλοίο, για τις περιπτώσεις που είναι και δεν είναι αντίστοιχα διαθέσιμη η λειτουργία ΡΤΟ, προκειμένου να προκύψουν τα κατάλληλα συμπεράσματα από την σύγκρισή τους. Επιπλέον, θα υπολογιστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του δείκτη, ώστε να εξετασθεί αν οι προκύπτουσες τιμές του πληρούν το κριτήριο.

6.1. Υπολογισμός απαιτούμενης τιμής του δείκτη EEDI για το υπό μελέτη πλοίο.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην υποπαράγραφο 1.6, η τιμή του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας δεν επιτρέπεται να ξεπερνάει μια απαιτούμενη τιμή (Required EEDI) η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο [5]:

$$Required\ EEDI = a \cdot b^{-c} \cdot \left(1 - \frac{X}{100}\right)$$

Οι παράγοντες a , b , c , X προκύπτουν από τους πίνακες της υποπαράγραφου 1.6. και για το υπό μελέτη πλοίο προσδιορίζονται παρακάτω:

- a : για δεξαμενόπλοια αντιστοιχεί στην τιμή **$a=1218,8$** .
- c : για δεξαμενόπλοια αντιστοιχεί στην τιμή **$c=0,488$** .
- b : αντιστοιχεί στο πρόσθετο βάρος του πλοίου (DWT) στο μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα ($T_{scantling}$) και εφόσον δεν υπάρχουν δεδομένα για την τιμή του προσεγγίζεται ως εξής [22]:

Από τις κύριες διαστάσεις του πλοίου λαμβάνονται οι τιμές του πλάτους B , του μήκους μεταξύ καθέτων L_{BP} και του μέγιστου επιτρεπόμενου βυθίσματος $T_{scantling}$. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία πλοίων παρόμοιου τύπου (VLCC) με διαστάσεις που παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις από τις αντίστοιχες του υπό μελέτη θεωρούνται προσεγγιστικά ο συντελεστής γάστρας $C_B=0,83$ και το καθαρό βάρος μεταλλικής κατασκευής Lightship(LS)=43000 tones. Συνεπώς, με τα υπάρχοντα δεδομένα υπολογίζεται η τιμή του πρόσθετου βάρους DWT σύμφωνα με τις παρακάτω γνωστές σχέσεις της υδροστατικής και της μελέτης πλοίου:

$$\begin{aligned} \text{Εκτόπισμα } (\Delta) &= C_B \cdot 1.028 \cdot L_{BP} \cdot B \cdot T_{scantling} \Rightarrow \\ \Rightarrow DWT + LS &= C_B \cdot 1.028 \cdot L_{BP} \cdot B \cdot T_{scantling} \Rightarrow \\ \Rightarrow DWT &= 0,83 \cdot 1,028 \cdot 322 \cdot 60 \cdot 21,6 \Rightarrow \mathbf{DWT = 313067,3\ tones} \end{aligned}$$

Επομένως, **$b=313067,3$** .

- Ο συντελεστής X προκύπτει για την φάση 2 (1 Ιανουαρίου 2020 – 31 Δεκεμβρίου 2024), για δεξαμενόπλοια με πρόσθετο βάρος μεγαλύτερο των 10000 τόνων, όπως το υπό μελέτη, ίσος με $X=20$.

Ο απαιτούμενος δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας, λοιπόν, του υπό μελέτη δεξαμενοπλοίου υπολογίζεται:

$$Required\ EEDI = a \cdot b^{-c} \cdot \left(1 - \frac{X}{100}\right) = 1218,8 \cdot 313067,3^{-0,488} \cdot \left(1 - \frac{20}{100}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \mathbf{Required\ EEDI = 2,03}$$

Συμπερασματικά οι τιμές που θα προκύψουν στην συνέχεια για τον δείκτη EEDI δεν πρέπει να ξεπερνούν το 2,03.

6.2. Αναλυτικός τύπος υπολογισμού του δείκτη EEDI και περιγραφή των παραγόντων του

Ο τύπος υπολογισμού του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας έχει δεχθεί αρκετές τροποποιήσεις από την καθιέρωσή του. Ο τελικός τύπος, ο οποίος χρησιμοποιείται πλέον, πήρε τη τελική του μορφή στη 59^η σύνοδο της ναυτικής επιτροπής προστασίας περιβάλλοντος (MEPC 59) [5] και παρουσιάζεται παρακάτω:

$$EEDI = \left\{ \left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) + \left(\left(\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum f_{eff(i)} \cdot P_{AE_{eff}(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) \right\} \cdot \frac{1}{f_i \cdot f_w \cdot f_c \cdot Capacity \cdot V_{ref}}$$

Ο αναλυτικός προσδιορισμός των όρων της σχέσης αναφέρεται παρακάτω [5]:

- C_F : αδιάστατος συντελεστής, με τον οποίο επιτυγχάνεται η μετατροπή του καυσίμου που καταναλώνεται, με βάση τη περιεκτικότητά του σε άνθρακα, σε τόνους διοξειδίου του άνθρακα. Οι δείκτες ME και AE αναφέρονται στο καύσιμο της κύριας μηχανής και των βοηθητικών μηχανημάτων αντίστοιχα. Η τιμή του λαμβάνεται από τον πίνακα 6.1 ανάλογα με το είδος του καυσίμου.

Πίνακας 6.1: Τιμές συντελεστή C_F

| Type of fuel | Reference | Carbon Content | C_F [t-CO ₂ / t-Fuel] |
|-------------------------------|----------------------------|------------------|---------------------------------------|
| Diesel/Gas Oil | ISO 8217 Grades DMX to DMB | 0.8744 | 3.206 |
| Light Fuel Oil (LFO) | ISO 8217 Grades RMA to RMD | 0.8594 | 3.151 |
| Heavy Fuel Oil (HFO) | ISO 8217 Grades RME to RMK | 0.8493 | 3.114 |
| Liquefied Petroleum Gas (LPG) | Propane Butane | 0.8182 0.8264 | 3.000 3.030 |
| Liquefied Natural Gas (LNG) | | 0.7500 | 2.750 |

- SFC_{ME} : η ειδική κατανάλωση καυσίμου της κύριας μηχανής μετρούμενη σε g/kWh στο 75% του MCR σύμφωνα με το πιστοποιητικό EIAAP της μηχανής και τον τεχνικό κώδικα NOx.
- $P_{ME(i)}$: το 75% της μέγιστης ισχύος (MCR) κάθε κύριας μηχανής (i) αφαιρούμενη κατά την παραγόμενη ισχύ P_{PTO} κάθε εγκατεστημένης αξονικής γεννήτριας. Η ισχύς P_{PTO} ορίζεται ως το 75% της ισχύος εξόδου της αξονικής γεννήτριας διαιρούμενη με τον βαθμό απόδοσής της. Ωστόσο δεν πρέπει να ξεπερνάει την τιμή της ισχύος P_{AE} των βοηθητικών μηχανημάτων η οποία θα αναφερθεί στην συνέχεια. Για τον παράγοντα $P_{ME(i)}$ ισχύει λοιπόν:

$$P_{ME(i)} = 0.75 \cdot (P_{MCR(i)} - P_{PTO(i)})$$

- f_j = διορθωτικός παράγοντας που λαμβάνει υπόψη ειδικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του πλοίου. Σε περίπτωση που δεν παρατηρούνται εν λόγω χαρακτηριστικά η τιμή του λαμβάνεται ίση με 1. Για ice classed πλοία προκύπτει από το μέγιστο των τιμών f_{j0} και $f_{j,min}$ του παρακάτω πίνακα, αλλά όχι μεγαλύτερος του 1.

Πίνακας 6.2: Τιμές διορθωτικού συντελεστή f_j [5]

| Ship type | f_j | f_{jmin} depending on ice class notion | | | |
|--------------------|--|--|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | E4 | E3 | E2 | E1 |
| Tanker | $\frac{0.308L_{pp}^{1.920}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$ | $0.15L_{pp}^{0.30}$ | $0.27L_{pp}^{0.21}$ | $0.45L_{pp}^{0.13}$ | $0.70L_{pp}^{0.06}$ |
| Bulk carrier | $\frac{0.639L_{pp}^{1.754}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$ | $0.47L_{pp}^{0.09}$ | $0.58L_{pp}^{0.07}$ | $0.79L_{pp}^{0.04}$ | $0.87L_{pp}^{0.02}$ |
| General cargo ship | $\frac{0.0227L_{pp}^{2.483}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$ | $0.31L_{pp}^{0.16}$ | $0.43L_{pp}^{0.12}$ | $0.56L_{pp}^{0.09}$ | $0.67L_{pp}^{0.07}$ |

- n_{ME} : αριθμός εγκατεστημένων κυρίων μηχανών
- SFC_{AE} : η ειδική κατανάλωση καυσίμου των βοηθητικών μηχανημάτων μετρούμενη σε g/kWh στο 50% του MCR τους σύμφωνα με το πιστοποιητικό EIAAP των μηχανών και τον τεχνικό κώδικα NOx, όπως και στη περίπτωση της κύριας μηχανής. Στη περίπτωση όπου η ισχύς P_{AE} παρέχεται από σύστημα αξονικών γεννητριών, η τιμή SFC_{ME} αντικαθιστά την SFC_{AE} για το μερίδιο του φορτίου το οποίο καλύπτεται.
- P_{AE} : η απαιτούμενη βοηθητική ισχύς η οποία απαιτείται για την λειτουργία της κύριας μηχανής και υπολογίζεται σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$P_{AE} = \left(0.025 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{MCR,ME} + \frac{\sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)}}{0.75} \right) \right) + 250 \quad , \quad \text{για } P_{MCR,ME} > 10000kW$$

$$P_{AE} = 0.05 \cdot \left(P_{MCR,ME} + \frac{\sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)}}{0.75} \right) \quad , \quad \text{για } P_{MCR,ME} > 10000kW$$

- P_{PTI} : το 75% της ονομαστικής παραγόμενης ισχύος των αξονικών γεννητριών στη περίπτωση που λειτουργούν ως ηλεκτρικοί κινητήρες υποβοηθώντας στην πρόωση του πλοίου (λειτουργία PTI), διαιρεμένη με τον βαθμό απόδοσης των γεννητριών.

- f_{AEff} , f_{eff} : παράγοντας διαθεσιμότητας κάθε καινοτόμου τεχνολογίας ενεργειακής αποδοτικότητας (σύστημα ανάκτησης θερμότητας, αιολική υποβοήθεια πρόωσης, σύστημα μπαταριών). Η τιμή του προσδιορίζεται σύμφωνα με κατάλληλους πίνακες ανάλογα με την κατηγορία της τεχνολογίας και δεν μπορεί να ξεπεράσει την μονάδα.
- $P_{AEff(i)}$: η μείωση της βοηθητικής ισχύος εξαιτίας της παρουσίας καινοτόμων ηλεκτρολογικών τεχνολογιών ενεργειακής αποδοτικότητας.
- $P_{eff(i)}$: το 75% της μείωσης της ισχύος της κύριας μηχανής εξαιτίας της παρουσίας καινοτόμων μηχανολογικών τεχνολογιών ενεργειακής αποδοτικότητας.
- Capacity: εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου ως εξής:
 - Για επιβατηγά πλοία, δεξαμενόπλοια και ro-ro, ορίζεται ως η ολική χωρητικότητα του πλοίου (gross tonnage).
 - Για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ορίζεται ως το 70% του πρόσθετου βάρους (DWT) στο μεγαλύτερο επιτρεπόμενο βύθισμα λειτουργίας ($T_{scantling}$).
 - Για όλους τους υπόλοιπους τύπους πλοίων ορίζεται ως το πρόσθετο βάρος (DWT) στο μεγαλύτερο επιτρεπόμενο βύθισμα λειτουργίας ($T_{scantling}$).
- V_{ref} : η ταχύτητα του πλοίου μετρούμενη σε κόμβους, όταν αυτό πλέει σε κατάσταση φόρτωσης (Capacity) όπως ορίστηκε παραπάνω, με την κύρια μηχανή να λειτουργεί στην προαναφερόμενη τιμή $P_{ME(i)}$ της ισχύος της και εν τη απουσία ανέμων και κυματισμών. Τα απαραίτητα στοιχεία λαμβάνονται από το εγχειρίδιο ευστάθειας του πλοίου.
- f_i : διορθωτικός συντελεστής χωρητικότητας για οποιονδήποτε τεχνικό ή κανονιστικό περιορισμό που δύναται να μειώσει την χωρητικότητα. Εάν δεν προκύπτει ανάγκη για την χρήση του λαμβάνεται ίσος με 1, ενώ σε αντίθεση περίπτωση προσδιορίζεται ως το ελάχιστο των τιμών f_{i0} , $f_{i,max}$ του παρακάτω πίνακα για ice-classed πλοία. Ωστόσο δεν μπορεί να ληφθεί μικρότερος του 1.

Πίνακας 6.3: Τιμές διορθωτικού συντελεστή f_i [5]

| Ship type | f_i | $f_{i,max}$ depending on ice class notion | | | |
|--------------------|--|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | E4 | E3 | E2 | E1 |
| Tanker | $\frac{0.00138L_{pp}^{3.331}}{capacity}$ | $2.10L_{pp}^{-0.11}$ | $1.71L_{pp}^{-0.08}$ | $1.47L_{pp}^{-0.06}$ | $1.27L_{pp}^{-0.04}$ |
| Bulk carrier | $\frac{0.00403L_{pp}^{3.123}}{capacity}$ | $2.10L_{pp}^{-0.11}$ | $1.80L_{pp}^{-0.09}$ | $1.54L_{pp}^{-0.07}$ | $1.31L_{pp}^{-0.05}$ |
| General cargo ship | $\frac{0.0377L_{pp}^{2.625}}{capacity}$ | $2.18L_{pp}^{-0.11}$ | $1.77L_{pp}^{-0.08}$ | $1.51L_{pp}^{-0.06}$ | $1.28L_{pp}^{-0.04}$ |
| Container ship | $\frac{0.0377L_{pp}^{2.329}}{capacity}$ | $2.10L_{pp}^{-0.11}$ | $1.71L_{pp}^{-0.08}$ | $1.47L_{pp}^{-0.06}$ | $1.27L_{pp}^{-0.04}$ |
| Gas carrier | $\frac{0.0474L_{pp}^{2.590}}{capacity}$ | 1.25 | $2.10L_{pp}^{-0.12}$ | $1.60L_{pp}^{-0.08}$ | $1.25L_{pp}^{-0.04}$ |

- f_w : διορθωτικός αδιάστατος συντελεστής, ο οποίος προσεγγίζει την μείωση της ταχύτητας σε αντιπροσωπευτικές καταστάσεις θάλασσας και ορίζεται ως:

$$f_w = \frac{V_W}{V_{ref}}, \text{ όπου } V_W \text{ η ταχύτητα σε καταστάσεις θάλασσας για } 75\% \text{ MCR}$$

Η ταχύτητα V_w προσεγγίζεται σύμφωνα με κατάλληλο διάγραμμα που παρέχεται από οδηγίες του IMO για κάθε τύπο πλοίου. Σε περίπτωση που εν λόγω διαγράμματα δεν είναι διαθέσιμα ο συντελεστής f_w λαμβάνεται ίσος με 1.

- f_c : διορθωτικός συντελεστής χωρητικότητας για δεξαμενόπλοια μεταφοράς χημικών προϊόντων (chemical tankers) και πλοία μεταφοράς υγροποιημένων αερίων (gas carriers).

6.3. Υπολογισμός του δείκτη EEDI του υπό μελέτη πλοίου χωρίς την εγκατάσταση αξονικής γεννήτριας.

Στη παρούσα υποπαράγραφο θα προσδιορισθεί η τιμή του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας EEDI του υπό πλοίου δίχως την εγκατάσταση της λειτουργίας PTO, προκειμένου στη συνέχεια να είναι δυνατή η σύγκρισή του με την περίπτωση της αντίστοιχης εγκατάστασης. Για τον υπολογισμό λαμβάνονται υπόψη οι κύριες διαστάσεις του πλοίου και τα χαρακτηριστικά της κύριας μηχανής, καθώς και οι τρόποι υπολογισμού των παραγόντων του δείκτη, όπως περιγράφηκαν στην υποπαράγραφο 6.2.. Στη συνέχεια θα προσδιορισθεί ο κάθε παράγοντας ξεχωριστά:

- C_F : Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 4 το υπό μελέτη δεξαμενόπλοιο VLCC διαθέτει σύστημα scrubbers για το φιλτράρισμα των καυσαερίων με αποτέλεσμα η κύρια μηχανή να έχει την δυνατότητα να καταναλώνει βαρύ καύσιμο HFO. Το ίδιο ισχύει και για τις βοηθητικές μηχανές εφόσον προβλέπεται από τον κατασκευαστή τους η κατανάλωση του εν λόγω καυσίμου. Συνεπώς, η τιμή του αδιάστατου συντελεστή μετατροπής C_F είναι όμοια και για τα δύο είδη μηχανημάτων και λαμβάνεται από τον πίνακα για την περίπτωση του βαρέος καυσίμου HFO: **$C_{FME} = C_{FAE} = 3,114$** .
- SFC_{ME} : Στην παρούσα εργασία δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα για το πιστοποιητικό EEIAP του κινητήρα με αποτέλεσμα η τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου στο 75% του MCR να λαμβάνεται από την πλατφόρμα GTD της WIN GD για το μοντέλο W7X82 B και τις αντίστοιχες συντεταγμένες MCR, για καταστάσεις ISO. Επομένως προκύπτει **$SFC_{ME} = 168,53 \text{ g/kWh}$** .
- $P_{ME(i)}$: Όπως αναφέρθηκε, σύστημα αξονικών γεννητριών απουσιάζει και συνεπώς:

$$P_{ME(i)} = 0,75 \cdot P_{MCR(i)} = 0,75 \cdot 24020 \Rightarrow P_{ME} = 18015 \text{ kW}$$

- **$\eta_{ME} = 1$**
- SFC_{AE} : Η ειδική κατανάλωση των βοηθητικών μηχανημάτων (ντιζελογεννητριών) στο 50% της μέγιστης λειτουργίας τους, υπολογίζεται με όμοιο τρόπο με τον οποίο προσδιορίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές σε καταστάσεις ISI για διαφορετικά εύρη λειτουργίας στο 4^ο κεφάλαιο κατά την μελέτη της εξοικονόμησης καυσίμου των εν λόγω μηχανών εξαιτίας της λειτουργίας PTO. Προκύπτει, λοιπόν **$SFC_{AE} = 211,61 \text{ g/kWh}$** .

- P_{AE} : Η ισχύς της κύριας μηχανής στο MCR είναι μεγαλύτερη από 10000 kW και η λειτουργία PTI δεν είναι διαθέσιμη, με αποτέλεσμα η ισχύς των βοηθητικών μηχανημάτων που απαιτείται για την λειτουργία της κύριας μηχανής να υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{AE} = 0,025 \cdot P_{MCR,ME} + 250 = 0,025 \cdot 24020 + 250 \Rightarrow P_{AE} = 850,5 \text{ kW}$$

- Capacity: Εφόσον το υπό μελέτη πλοίο δεν αποτελεί ούτε επιβατηγό πλοίο ούτε πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, η τιμή της χωρητικότητας αντιστοιχεί στο πρόσθετο βάρος DWT για το μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα. Η τιμή αυτή υπολογίστηκε προσεγγίστηκε προηγουμένως και συνεπώς προκύπτει **Capacity=313067,3 tones**.
- V_{ref} : για την ταχύτητα του δεδομένα είναι δυνατόν να προκύψουν μόνο από το αναλυτικό προφίλ λειτουργίας του πλοίου για την έμφορτη κατάστασή του. Τιμές δεν παρατηρούνται για ισχύ λειτουργίας στο 75% του MCR, συνεπώς η ταχύτητα αναφοράς, λαμβάνοντας υπόψη τις υπόλοιπες ταχύτητες του προφίλ λειτουργίας, προσεγγίζεται **$V_{ref}=16 \text{ knots}$** .

Στο πλοίο δεν παρατηρούνται εγκαταστάσεις λειτουργίας PTI, ούτε καινοτόμες τεχνολογίες ενεργειακής αποδοτικότητας με αποτέλεσμα να μην λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του δείκτη EEDI οι παράγοντες P_{PTI} , f_{AEff} , f_{eff} , $P_{AEff(i)}$, $P_{eff(i)}$. Επιπλέον, λόγω απουσίας ειδικών σχεδιαστικών χαρακτηριστικών, τεχνικών περιορισμών και διαγραμμάτων ταχύτητας, οι αδιάστατοι συντελεστές f_j , f_w , f_i λαμβάνονται ίσοι με 1.

Σύμφωνα, λοιπόν, με τις τιμές των παραγόντων που προσδιορίστηκαν παραπάνω ο συντελεστής EEDI του υπό μελέτη πλοίου υπολογίζεται ως εξής:

$$EEDI = \frac{P_{ME} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} + P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{Capacity \cdot V_{ref}} =$$

$$= \frac{18015 \cdot 3.114 \cdot 168,53 + 850,5 \cdot 3.114 \cdot 211,61}{313067,3 \cdot 16} \Rightarrow EEDI = 2,00$$

Όπως διαπιστώνεται $EEDI < \text{Required EEDI}$ με αποτέλεσμα το κριτήριο του δείκτη να πληρείται. Ωστόσο το περιθώριο που παρουσιάζεται είναι πολύ χαμηλό, με αποτέλεσμα να υπάρχει ανάγκη για ελάττωση της τιμής του δείκτη.

6.4. Υπολογισμός του δείκτη EEDI του υπό μελέτη πλοίου με εγκατεστημένο σύστημα αξονικής γεννήτριας.

Στη παρούσα υποπαράγραφο θα υπολογισθεί η τιμή του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας του δεξαμενοπλοίου για τη περίπτωση που η λειτουργία PTO είναι διαθέσιμη μέσω του αξονικού συστήματος που διαστασιολογήθηκε στο 4ο κεφάλαιο. Στόχος είναι να εξετασθεί η επιρροή του εν λόγω συστήματος στην τιμή του δείκτη, συγκρίνοντάς

την με την αντίστοιχη που προσδιορίστηκε προηγουμένως. Ωστόσο, αναμένεται μικρή μείωση με βάση όσα αναφέρθηκαν στην εισαγωγή της εργασίας.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο υπολογισμός των παραγόντων του δείκτη EEDI για την συγκεκριμένη περίπτωση:

- P_{ME} : Για τον υπολογισμό της ισχύος P_{ME} αρχικά χρειάζεται να προσδιορισθεί η τιμή της ισχύος P_{PTO} εφόσον η λειτουργία είναι διαθέσιμη. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην περιγραφή του εν λόγω παράγοντα:

$$P_{PTO} = 0,75 \cdot \frac{PTO_{e,output}}{\eta_{generator} \cdot \eta_{tunnel\ gear}} = 0,75 \cdot \frac{1320}{0,95 \cdot 0,95} = 1097\ kW$$

Ωστόσο, η τιμή της ισχύος P_{PTO} δεν δύναται να ξεπερνάει την αντίστοιχη P_{AE} των βοηθητικών μηχανημάτων, η οποία είναι όμοια με την προηγούμενη περίπτωση και ίση με 850.5 kW. Συνεπώς, η P_{ME} υπολογίζεται:

$$P_{ME} = 0,75 \cdot (P_{MCR} - P_{PTO}) = 0,75 \cdot (24020 - 850,5) = \mathbf{17377\ kW}$$

- SFC_{AE} : Εφόσον η ηλεκτρική ενέργεια στο πλοίο παράγεται εξ ολοκλήρου από την αξονική γεννήτρια στη κατάσταση που ορίζει δείκτης EEDI (75% MCR, $T_{scantling}$), η ειδική κατανάλωση καυσίμου των βοηθητικών μηχανημάτων δύναται να αντικατασταθεί από την αντίστοιχη SFC_{ME} της κύριας μηχανής, όπως προσδιορίστηκε στη προηγούμενη περίπτωση. Το ίδιο ισχύει και για τον παράγοντα C_{FAE} παρόλο που στη προκειμένη περίπτωση δεν παρουσιάζεται κάποια διαφορά, καθώς η κύρια και οι βοηθητικές μηχανές καταναλώνουν ίδιο είδους καύσιμο.
- V_{ref} : η ταχύτητα αναφοράς για ισχύ $P_{ME}=17377\ kW$ προσεγγίζεται, με όμοιο τρόπο όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ίση με 15 κόμβους ($V_{ref}=\mathbf{15,5\ knots}$).

Οι υπόλοιποι παράγοντες του τύπου υπολογισμού δεν επηρεάζονται από την λειτουργία PTO και οι τιμές τους είναι όμοιες με τις αντίστοιχες που υπολογίστηκαν στην προηγούμενη υποπαράγραφο. Επομένως η νέα τιμή του δείκτη EEDI προκύπτει:

$$EEDI_{PTO} = \frac{(P_{ME} + P_{AE}) \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}}{Capacity \cdot V_{ref}} = \frac{(17377 + 850,5) \cdot 3,114 \cdot 168,53}{313067,3 \cdot 15,5} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \mathbf{EEDI_{PTO} = 1,97}$$

Η σύγκριση των παραγόντων και των τελικών τιμών του δείκτη EEDI για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4: Τιμές συντελεστή EEDI για το υπό μελέτη πλοίο χωρίς και με διαθέσιμη την λειτουργία PTO.

| | without PTO | with PTO |
|---------------|--------------|-------------|
| P_{ME} | 18015 kW | 17377 kW |
| P_{AE} | 850,5 kW | |
| SFC_{ME} | 156,1 g/kWh | |
| SFC_{AE} | 196 g/kWh | SFC_{ME} |
| C_{FME} | 3,114 | |
| C_{FAE} | 3,114 | |
| Capacity | 313067 tones | |
| V_{ref} | 16 kn | 15,5 kn |
| $f_j/f_i/f_w$ | 1 | |
| EEDI | 2.00 | 1.97 |

Όπως παρατηρείται η λειτουργία PTO της εγκατάστασης των αξονικών γεννητριών προκαλεί μείωση στην τιμή του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας κατά 1,5% (από 2.00 σε 1,97). Η εν λόγω μείωση μπορεί να μη θεωρείται μεγάλη, ωστόσο δύναται να προσφέρει ευελιξία στη λειτουργία του πλοίου, προκειμένου ο δείκτης EEDI να μην υπερβεί την απαιτούμενη τιμή του. Επομένως, η επίδραση της λειτουργίας PTO της αξονικής γεννήτριας στην τελική τιμή του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας, αποτελεί ακόμη ένα όφελος του μελετώμενου συστήματος.

7. Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας την μελέτη της λειτουργίας Power Take Off των αξονικών γεννητριών για την κάλυψη των αναγκών του πλοίου σε ηλεκτρισμό, θα ήταν σκόπιμο να γίνει μια συνοπτική παρουσίαση των κύριων σημείων της ανάλυσης και των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για δεξαμενόπλοιο τύπου VLCC με κύρια μηχανή ισχύος 24020 kW (MCR).

Για την διαστασιολόγηση του συστήματος λήφθηκαν υπόψη το σχέδιο ηλεκτρικού ισολογισμού του πλοίου, το προφίλ λειτουργίας του και τα εγχειρίδια λειτουργίας της κύριας και των βοηθητικών μηχανών του. Το σύστημα που επιλέχθηκε λοιπόν αποτελείται από ένα σύστημα γριναζοκιβωτίων αύξησης στροφών, μία γεννήτρια με δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος 1788 kW, ένα σύστημα ανορθωτή και μετατροπέα για την σταθεροποίηση της συχνότητας του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος και έναν σύγχρονο πυκνωτή για την κάλυψη των αναγκών των μηχανημάτων του πλοίου σε άεργο ισχύ.

Με την εφαρμογή της λειτουργίας του συστήματος αποδείχθηκε πως είναι δυνατή η εξοικονόμηση 176 τόνων καυσίμου ετησίως και η μείωση των ωρών λειτουργίας των γεννητριών ντίζελ κατά 67%. Τα νούμερα αυτά αντιστοιχούν σε ετήσια εξοικονόμηση \$182338 λαμβάνοντας υπόψη το κόστος του καυσίμου, τα λειτουργικά κόστη των γεννητριών και έναν φόρο για τις εκπομπές του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα. Με το κόστος της επένδυσης, λοιπόν, να ανέρχεται στα 1,7Μ\$ και με συντελεστή ετήσιου ανατοκισμού 6%, υπολογίσθηκε πως η εγκατάσταση ξεκινά να καθίσταται κερδοφόρα μετά το 7^ο έτος, με κέρδος που δύναται να ανέρχεται στα 5Μ\$ σε διάρκεια 20-ετίας, γεγονός που αποδεικνύει σε μεγάλο βαθμό την βιωσιμότητά της.

Η εγκατάσταση διάταξης μπαταριών τεχνολογίας LFP χωρητικότητας 4860 kWh, που εξετάσθηκε στη συνέχεια για την εκμετάλλευση της περίσσιας ισχύος της αξονικής γεννήτριας, αποδείχθηκε, πως δεν δύναται να παρουσιάσει ικανοποιητικό οικονομικό όφελος, καθώς η ετήσια εξοικονόμηση καυσίμου που προέκυπτε δεν ξεπερνούσε τους 12 τόνους. Σημαντικότερο αίτιο στο εν λόγω συμπέρασμα αποτελεί ο περιορισμός της αποθηκευτικής ικανότητας των 5000 kWh, που επιβάλλει το πολύ υψηλό κόστος των μπαταριών.

Τέλος, αποδείχθηκε η μείωση που επιφέρει η εφαρμογή της λειτουργίας PTO του διαστασιολογημένου συστήματος της αξονικής γεννήτριας στην τιμή του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας EEDI από 2 σε 1,97, γεγονός που δύναται να επιφέρει σε αρκετές περιπτώσεις ευελιξία στην λειτουργία του υπό μελέτη πλοίου.

7.1. Προτάσεις για επόμενη εργασία

Στο σημείο αυτό, θα μπορούσε να γίνει κάποια πρόταση για περαιτέρω επεξεργασία και μελέτη της εγκατάστασης των γεννητριών άξονα. Στη παρούσα εργασία έγινε μελέτη της λειτουργίας Power Take Off για διάταξη αξονικής γεννήτριας συνδεδεμένη με τον ενδιάμεσο άξονα της κύριας μηχανής μέσω αυξητήρα στροφών. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και η

ανάλυση των διατάξεων SMG και DMG όπου τα γραναζοκιβώτια απουσιάζουν και η γεννήτρια είναι ενσωματωμένη επάνω στον ενδιάμεσο άξονα και τον στροφαλοφόρο αντίστοιχα. Επιπλέον, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη η περαιτέρω έρευνα όσον αφορά την εκμετάλλευση της περίσσιας ισχύος της αξονικής γεννήτριας. Τέλος, αντικείμενο μελέτης θα ήταν δυνατό να αποτελέσει και η λειτουργία Power Take In, κυρίως σε πλοία με μικρότερες απαιτήσεις σε ισχύ προώσεως από τις αντίστοιχες των δεξαμενοπλοίων VLCC.

Βιβλιογραφία

- [1] Story: Oil and Gas, Oil prices, 1946-2005 [Online]. Available: <https://teara.govt.nz/en/graph/8904/oil-prices-1946-2005>.
- [2] Hybrid Propulsion, Flexibility and maximum efficiency optimally combined, by MAN Diesel & Turbo [Online]. Available: <https://docplayer.net/21239699-Hybrid-propulsion-flexibility-and-maximum-efficiency-optimally-combined.html>.
- [3] GTD-General Technical Data for Wing GD 2-Stroke Engines (W7X82-B_24020 kW_66 rpm_Standarnd)
- [4] Μελέτη και Εξοπλισμός Πλοίου II, Μέρος Γ, Κεφάλαιο 7: Η διεθνής σύμβαση για την αποφυγή της ρύπανσης από τα πλοία – MARPOL 73/78 (Κων/νος Σπύρου, Καθηγητής Ιανουάριος 2020)
- [5] Rules for classification and construction, Additional Rules and Guidelines, Energy Efficiency, Guidelines for Determination of the Energy Efficiency Design Index (Edition 2013), by DNV GL [Online]. Available: http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/gl/maritimerules2016July/gl_vi-13-1_e.pdf
- [6] Shaft generators for Low Speed Main Engines, by MAN Diesel & Turbo
- [7] Marine-Chief-Engineer: Propeller curves. The safety margins in relation to the propeller [Online]. Available: <https://meoclass1.wordpress.com/2015/05/13/propeller-curves-the-safety-margins-in-relation-to-the-propeller/>
- [8] Basic principles of ship propulsion, Optimization of hull, propeller and engine interactions for maximum efficiency, by MAN Energy Solutions, Chapter 3.7: Engine Load Diagram and Consideration of PTO
- [9] MAN B&W G60ME-C10.5, Project Guide, by MAN Energy Solutions, Chapter 4: Electricity Production
- [10] WIN GD X82-B, Marine Installation Manual, Figure 2.5: Power range diagram of an engine with main-engine driven generator
- [11] WIN GD X82-B, Marine Installation Manual, Chapter 2: General Engine Data
- [12] WIN GD X82-B, Marine Installation Manual, Chapter 4.10: PTO, PTI, PTH and primary generator applications
- [13] Three-Phase Brushless, Synchronous Alternators, HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO.,LTD
- [14] RENK, Tunnel Gearboxes for Power-Take-Off Power-Take-Home Systems for Slow Speed Engines
- [15] HYUNDAI ENGINE & MACHINERY PROGRAMME 2020, by HYUNDAI HIMSEN
- [16] Ship & Bunker, Average Bunker Prices [Online]. Available: <https://shipandbunker.com/prices/av>

- [17] CARBON TAXES, How the World Puts a Price on Carbon [Online]. Available: <https://www.statista.com/chart/17095/highest-carbon-taxes-in-the-world/>
- [18] Facilities explore new technologies, cost benefits and the maintenance impact of onsite power alternatives [Online]. Available: <https://www.facilitiesnet.com/powercommunication/article/Onsite-Options--1679>
- [19] LNG-PTO System, GE Power Conversion
- [20] Συστημική Μεθοδολογία και Τεχνική Οικονομική, Κεφάλαιο 5: Η αξία των εκρών-οικονομική αξιολόγηση δραστηριότητας (Δημήτριος Χ. Παναγιωτακόπουλος Καθηγητής, 2008)
- [21] European Maritime Safety Agency. Study on Electrical Energy Storage for Ships/ Battery Systems for Maritime Applications – Technology, Sustainability and Safety (EMSA, May 2020)
- [22] Μελέτη Πλοίου Μεθοδολογίες Προμελέτης, Τεύχος 1 (Αποστόλου Δ. Παπανικολάου Καθηγητής, Ιούλιος 2009)
- [23] <https://www.aegisbattery.com/products/48v-60ah-li-ion-battery-pvc>
- [24] <https://www.bpsbatteries.com/lifepo4-battery-pack.html>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Απαιτήσεις έργου ισχύος υπό μελέτη πλοίου στη κατάσταση εν πλω

| | I [A] | Voltage [V] | P _{input} [kW] | pf | P _{operation} [kW] | Q _{operation} [kVAr] |
|--------------------------------|----------|----------------|----------------------------|------|--------------------------------|----------------------------------|
| E/R TOILET FAN | 1,3 | 440 | 0,5 | 0,50 | 0,4 | 0,68 |
| MAIN LO PUMP | 225 | 440 | 159,6 | 0,93 | 127,7 | 50,16 |
| STERN TUBE LO PUMP | 4,7 | 440 | 3 | 0,84 | 2,4 | 1,57 |
| M/E FO BOOSTER PUMP | 7,7 | 440 | 5,5 | 0,94 | 4,4 | 1,64 |
| M/E FO FEED PUMP | 7,7 | 440 | 5,5 | 0,94 | 4,4 | 1,64 |
| M/E JACKET CFW PUMP | 50 | 440 | 32,6 | 0,86 | 26,1 | 15,80 |
| CENTRAL CFW PUMP | 105 | 440 | 69,9 | 0,87 | 111,8 | 62,30 |
| MAIN CSW PUMP | 105 | 440 | 69,9 | 0,87 | 111,8 | 62,30 |
| STEERING GEAR | 255 | 440 | 170,2 | 0,88 | 42,6 | 23,48 |
| COMP. BOILER FEED WATER PUMP | 20 | 440 | 12,2 | 0,80 | 9,8 | 7,34 |
| G/E FO BOOSTER PUMP | 6,8 | 440 | 4,3 | 0,83 | 3,4 | 2,29 |
| G/E FO SUPPLY PUMP | 3,7 | 440 | 1,8 | 0,64 | 1,5 | 1,81 |
| DECK SEAL SW PUMP | 6,8 | 440 | 4,3 | 0,83 | 3,4 | 2,29 |
| E/R VENTILATION FAN | 50 | 440 | 32,6 | 0,86 | 104,3 | 63,12 |
| GARBAGE LOCKER ROOM FAN | 2,13 | 440 | 1,6 | 0,99 | 1,3 | 0,22 |
| FW GENERATOR EJECTOR PUMP | 50 | 440 | 32,6 | 0,86 | 26,1 | 15,80 |
| F.W. GENERATOR DISTILLATE PUMP | 3,4 | 440 | 1,8 | 0,69 | 1,5 | 1,55 |
| G/E PRIMARY LO PUMP | 2,2 | 440 | 0,9 | 0,54 | 1,5 | 2,36 |

| | I [A] | Voltage [V] | P _{input} [kW] | pf | P _{operation} [kW] | Q _{operation} [kVAr] |
|--------------------------------------|----------|----------------|----------------------------|------|--------------------------------|----------------------------------|
| HFO TRANSFER PUMP | 42,1 | 440 | 28,1 | 0,88 | 22,5 | 12,40 |
| OILY BILGE PUMP | 3,5 | 440 | 1,8 | 0,67 | 1,5 | 1,64 |
| BILGE CIRCULAT. PUMP | 2,2 | 440 | 0,9 | 0,54 | 0,7 | 1,10 |
| TOPPING UP AIR COMPRESSOR | 72 | 440 | 46,7 | 0,85 | 37,4 | 23,07 |
| HFO PURIFIER | 34,4 | 440 | 23,1 | 0,88 | 17,3 | 9,28 |
| HFO PURIFIER SUPPLY PUMP | 8,2 | 440 | 5,5 | 0,88 | 4,4 | 2,37 |
| LO PURIFIER | 20 | 440 | 12,2 | 0,80 | 9,8 | 7,34 |
| LO PURIFIER SUPPLY PUMP | 4,7 | 440 | 3 | 0,84 | 2,4 | 1,57 |
| PURIFIER ROOM EXHAUST FAN | 10,5 | 440 | 6,3 | 0,79 | 5,1 | 3,99 |
| G/E LO PURIFIER | 20 | 440 | 12,2 | 0,80 | 9,8 | 7,34 |
| G/E LO PURIFIER SUPPLY PUMP | 4,7 | 440 | 2,1 | 0,59 | 1,7 | 2,35 |
| HOT WATER CIRCUL. PUMP | 1,2 | 440 | 0,5 | 0,55 | 0,4 | 0,61 |
| FW HYDROPHORE UNIT PUMP | 7 | 440 | 4,3 | 0,81 | 3,4 | 2,50 |
| DW HYDROPHORE UNIT PUMP | 7 | 440 | 4,3 | 0,81 | 3,4 | 2,50 |
| W/H PACKAGE UNIT COOLER BOOSTER PUMP | 4,2 | 440 | 2,6 | 0,81 | 2,1 | 1,51 |
| A/C COMPRESSOR | 96 | 440 | 64,2 | 0,88 | 102,7 | 56,13 |
| A/C CENTRAL UNIT FAN | 29,2 | 440 | 19,8 | 0,89 | 31,6 | 16,21 |
| GALLEY EXHAUST FAN | 2,2 | 440 | 0,9 | 0,54 | 0,7 | 1,10 |
| GALLEY SUPPLY FAN | 1,7 | 440 | 0,5 | 0,39 | 0,4 | 0,96 |
| SANITARY SPACE FAN | 4,8 | 440 | 2,6 | 0,71 | 2,1 | 2,08 |
| PAINT STORE FAN | 3,5 | 440 | 1,8 | 0,67 | 1,5 | 1,64 |
| CO2 ROOM FAN | 3,5 | 440 | 1,8 | 0,67 | 1,5 | 1,64 |

| | I [A] | Voltage [V] | P _{input} [kW] | pf | P _{operation} [kW] | Q _{operation} [kVAr] |
|-----------------------------|----------|----------------|----------------------------|------|--------------------------------|----------------------------------|
| A/C ROOM EXHAUST FAN | 2,2 | 440 | 0,9 | 0,54 | 0,7 | 1,10 |
| BOSUN STORE FAN | 7 | 440 | 4,3 | 0,81 | 3,4 | 2,50 |
| WELDING AREA EXHAUST FAN | 2,1 | 440 | 0,9 | 0,56 | 0,7 | 1,03 |
| | | | | | SUM | 480,29 |