ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗΣ Ν. ΝΙΚΟΛΑΚΑΚΗΣ

Επιβλέπων: Ιωάννης Προυσαλίδης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗΣ Ν. ΝΙΚΟΛΑΚΑΚΗΣ

Επιβλέπων: Ιωάννης Προυσαλίδης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 26η Μαρτίου 2013:

…….	…….	…….
Ι.Προυσαλίδης	Α.Κλαδάς	Χ.Παπαδόπουλος
Αν.Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π	Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

……

Θεμιστοκλής Ν. Νικολακάκης

Διπλωματούχος Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Θεμιστοκλής Νικολακάκης, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Εκφράζω τις ευχαριστίες μου :

Στον Αν. Καθηγητή Ε.Μ.Π. Ιωάννη Προυσαλίδη για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής, καθώς και για το κλίμα συνεργασίας που είχαμε.

Στον Καθηγητή Ε.Μ.Π. Αντώνιο Κλαδά και το Λέκτορα Ε.Μ.Π. Χρήστο Παπαδόπουλο για την παρουσία τους στην εξεταστική επιτροπή.

Στο Λέκτορα Σ.Ν.Δ. Γεώργιο Τσεκούρα για το χρόνο που αφιέρωσε καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε με τις υποδείξεις και τις παρεμβάσεις του.

Στη μητέρα μου για τους διαχρονικότερους των λόγων που ένας γιος ευχαριστεί τη μάνα του, στη σύζυγο μου Ευσταθία για την ήρεμη καθημερινότητα που μου προσφέρει καθώς και στα παιδιά μου Νίκο, Λευτέρη και Κρυσταλλένια για το χαμόγελό τους, που αφειδώς μου χαρίζουν γεμίζοντάς με δύναμη και υπομονή.

Και τέλος ,

Τη χαρά της ολοκλήρωσης αυτού του κύκλου σπουδών την αφιερώνω στη μνήμη του πατέρα μου .

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της συνεχούς προσπάθειας μείωσης του λειτουργικού κόστους των πλοίων, αλλά και της εναρμόνισης με τους κανονισμούς του Διεθνή Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO), εξετάζονται διάφοροι μηχανισμοί και διερευνώνται διάφορες μέθοδοι με σκοπό τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος των πλοίων.

Προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα μείωσης των ενεργειακών απαιτήσεων ενός επαγωγικού κινητήρα με περιέλιξη κλωβού στην κατάσταση μόνιμης λειτουργίας εξετάζεται η σκοπιμότητα χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος. Εξαιτίας τούτου αναπτύχθηκε μία πειραματική διάταξη όπου, ένας μικρός, τριφασικός επαγωγικός κινητήρας ονομαστικής ισχύος 175 W, συνδέεται με ένα ηλεκτροδυναμόμετρο, που προσομοιώνει μια βοηθητική αντλία επάνω σε πλοίο. Αρχικά η τροφοδότηση του κινητήρα γίνεται απευθείας από την τριφασική πηγή τάσης, ενώ στο επόμενο στάδιο γίνεται μέσω του ηλεκτρονικού ισχύος που παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής τάσεως και του κινητήρα. Οι λειτουργικές παράμετροι της διάταξης καταγράφονται και μετά την επεξεργασία τους μελετάται η απόδοση του συστήματος μετατροπέα-ηλεκτροκινητήρα-ηλεκτροδυναμομέτρου.

Μετρήσεις λήφθησαν για τις παρακάτω καταστάσεις:

- Χωρίς λειτουργία του μετατροπέα ισχύος,
- Με λειτουργία του μετατροπέα ισχύος με ρύθμιση τάσεως-συχνότητας με βάση το επίπεδο ζήτησης μηχανικού φορτίου,
- Με λειτουργία του μετατροπέα ισχύος χωρίς ρύθμιση τάσεως-συχνότητας.

Οι μετρήσεις λήφθησαν για διάφορα επίπεδα ισχύος μηχανικού φορτίου από 0% έως και 120% του «ονομαστικού μηχανικού φορτίου», το οποίο ορίζεται ως το μηχανικό φορτίο που αποδίδεται στο ηλεκτροδυναμόμετρο υπό τις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας τάσης και ρεύματος του επαγωγικού κινητήρα.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψε ότι σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης του ηλεκτροδυναμόμετρου (έως περίπου 60%) η χρήση μετατροπέα ισχύος με ρυθμιζόμενη τάση-συχνότητα με βάση το επίπεδο του μηχανικού φορτίου οδηγεί σε εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας ως και 35%.

Λέξεις – κλειδιά : Επαγωγικός κινητήρας κλωβού, μετατροπέας ac/dc/ac, εξοικονόμηση ενέργειας, σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου.

ABSTRACT

Following a constant attempt to reduce the functional cost of ships while abiding by the regulations of the International Maritime Organization (IMO), a number of mechanisms are being examined and a number of methods are being studied which aim at reducing the ships carbon footprint.

In order to explore the possibility of reducing the energy demands of squirrel induction motor in permanent operation, the use of power electronics is being considered. For the purpose of our study, we have developed an experimental arrangement where a small, three-phase squirrel induction motor of nominal power 175W is connected to an electrodynamometer, which simulates an auxiliary pump aboard a ship. Initially, the motor is powered directly from the three-phase voltage source, while at the next stage this is achieved by the electronic power which comes in between the voltage source and the motor. Once the functional parameters of this arrangement have been recorded and processed, the performance of the system converter-electromotor- electrodynamometer is being studied.

We have measured and recorded the operational parameters of the following situations:

- Without the power converter in operation
- With the power converter in operation adjusting voltage and frequency according to the demand level of the mechanical load
- With the power converter in operation without adjusting voltage and frequency

The measurements obtained refer to various levels of the power mechanical load ranging from 0% to 120% of the “nominal mechanical load”, which is defined as the mechanical load attributed to the electrodynamometer under the nominal operational conditions of voltage and power of the induction motor.

After processing the measurements, we have concluded that in low load levels of the electrodynamometer (up to about 60%), the use of a power converter adjusting voltage and frequency according to the level of the mechanical load reduces energy consumption up to 35%.

Keywords : squirrel induction motor, ac/dc/ac converter, energy efficiency, ship electric power system.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ……...9
1.1 Εισαγωγή ……..……...9
1.2 Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου ……..……10
1.3 Τα Αέρια του Θερμοκηπίου ……..11
1.4 Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου Στις Θαλάσσιες Μεταφορές ……11
1.5 Θεσμικά Μέτρα του ΙΜΟ για τις Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου από Πλοία ……..13
1.6 Σχεδιαστικός Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EEDI) και Λειτουργικός Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EEOI)……...15
1.7 Νέες Πρακτικές Βελτίωσης EEDI και EEOI ……....18

2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ ΠΛΟΙΩΝ ……20
2.1 Εισαγωγή …….……20
2.2 Τάσεις Παροχής Ηλεκτρικού Ρεύματος ……..21
2.3 Καταναλωτές Ισχύος ……22
2.3.1 Μηχανήματα Προώσεως ……...22
2.3.2 Μηχανήματα Χειρισμών……..……..24
2.3.3 Μηχανήματα Ασφαλείας ……..……25
2.3.4 Μηχανήματα Βοηθητικών Χρήσεων ……26
2.3.5 Μηχανήματα Φορτίου ……...29
2.4 Συστήματα Ναυσιπλοΐας – Τηλεπικοινωνιών ……30
2.5 Φωτισμός ……33
2.5.1 Φωτισμός Ανάγκης ……...33
2.6 Παράδειγμα Ηλεκτρικού Ισολογισμού Πλοίου ……...34

3. ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ……44
3.1 Εισαγωγή ……..44
3.2 Δομή Επαγωγικού Κινητήρα ……47
3.3 Έννοιες Σύγχρονης Ταχύτητας και Ολίσθησης ……50
3.4 Απλοποιημένο Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρα Επαγωγής ……51
3.5 Ισχύς, Απώλεια Ισχύος & Ροπή Ασύγχρονων Κινητήρων ……...52
3.6 Καμπύλη Ροπής – Ολίσθησης ……..56
3.7 Περιοχές Λειτουργιάς Μηχανής Επαγωγής ……57
3.8 Μέγιστη Ροπή για Λειτουργία Κινητήρα ……60
3.9 Συνδεσμολογία Αστέρα – Τριγώνου ……61
3.10 Λειτουργιά των Κινητήρων με Φορτία ……...64
3.11 Έλεγχος της Ταχύτητας των Επαγωγικών Κινητήρων ……...65
3.12 Έλεγχος της Ταχύτητας με Ρύθμιση της Αντίστασης του Δρομέα ……....66
3.13 Έλεγχος της Ταχύτητας με Ρύθμιση της Τάσης του Στάτη ……67
3.14 Έλεγχος της Ταχύτητας με Μεταβολή του Αριθμού των Πόλων ……..68
3.15 Έλεγχος της Ταχύτητας με τη Μεταβολή της Συχνότητας ……69

3.16 Μεταβολή των Στροφών με Συνδυασμό Μεταβολής Συχνότητας και Τάσης Τροφοδοσίας (Voltage – Frequency Converter) …….70

4. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ …….73
4.1 Εισαγωγή ……..73
4.2 Πεδία Εφαρμογών των Ηλεκτρονικών Ισχύος …….76
4.3 Είδη Μετατροπέων Ηλεκτρικής Ενέργειας ……..78
4.4 Ημιαγωγοί Διακόπτες Ισχύος……....81
4.5 Καταστάσεις Λειτουργιάς Διακοπτών Ισχύος……...82
4.6 Τρόποι Μετάβασης Διακοπτών Ισχύος ……84
4.7 Μεταβολή των Στροφών Ασύγχρονου Κινητήρα με Συνδυασμό Μεταβολής Συχνότητας και Τάση Τροφοδοσίας και Χρήση της Μεθόδου PWM ……85

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ…….90
5.1 Εισαγωγή ……..90
5.2 Πειραματική Διάταξη……....91
5.2.1 Βασική Δομή …….91
5.2.2 Διαδικασία Μετρήσεων ……97
5.2.3 Μελέτη Αρμονικών Μέσω Fourier …….100
5.2.4 Ενδεικτικά Αποτελέσματα του Ψηφιακού Οργάνου Συλλογής Δεδομένων……101
5.3 Επεξεργασία και Ανάλυση Αποτελεσμάτων Μετρήσεων …….106
5.4 Συμπεράσματα…….128

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ ……..129
6.1 Σύνοψη - Συμπεράσματα ……129
6.2 Περιοχές για Περαιτέρω Έρευνα ……131

Βιβλιογραφία……..132

1. ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

1.1. Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα παγκόσμιας κλίμακας που οι αρνητικές του συνέπειες φαίνονται στις μέρες μας. Τα αέρια του θερμοκηπίου όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και το όζον (O_3) που εκπέμπονται από τα πλοία συντελούν αρνητικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) εργάζεται για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και τον έλεγχο των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) που εκπέμπονται από πλοία που συμμετέχουν στο διεθνές εμπόριο.

Στα πλαίσια αυτά ένας από τους σημαντικότερους στόχους του IMO για τη ναυτιλία είναι ο περιορισμός των εκπομπών του CO_2. Για τη μείωση των εκπομπών του CO_2 έχουν θεσπιστεί κανονισμοί στο Παράρτημα VI της διεθνούς Σύμβασης MARPOL 73/78 οι οποίοι τροποποιούνται συνεχώς.

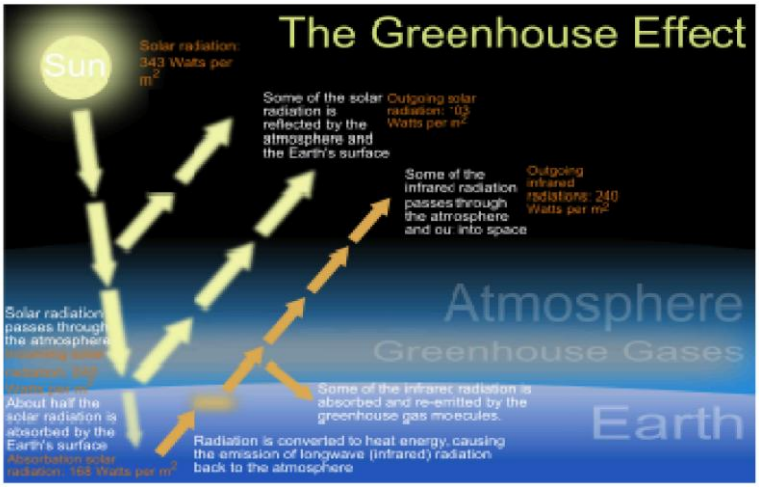
Οι πρόσφατες τροποποιήσεις στο παράρτημα VI της διεθνούς Σύμβασης MARPOL περιλαμβάνουν ένα σύστημα για τον προσδιορισμό της ενεργειακής αποδοτικότητας των νέων πλοίων μέσω του σχεδιαστικού Δείκτη Ενεργειακής Αποδοτικότητας (attained EEDI). Ο δείκτης αυτός εκφράζεται σε g-CO_2/ton·mile που εκπέμπονται από ένα πλοίο και πρέπει να είναι μικρότερος από μία ορισμένη τιμή (required EEDI) που εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου, τη χωρητικότητα ή το deadweight του πλοίου. Ένας άλλος δείκτης που έχει υιοθετηθεί από τον IMO, ο οποίος στην παρούσα φάση είναι εθελοντικής χρήσης είναι ο Λειτουργικός Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EEOI) ο οποίος, εκφράζεται σε g-CO_2/ton·mile που εκπέμπονται από ένα πλοίο και μπορεί να βοηθήσει τους πλοιοκτήτες και τους διαχειριστές πλοίων στην αξιολόγηση της απόδοσης του στόλου τους όσο αφορά τις εκπομπές CO_2. Δεδομένου ότι το ποσό του CO_2 που εκπέμπεται από ένα σκάφος συσχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση των καυσίμων, ο δείκτης EEOI μπορεί επίσης να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την απόδοση ενός σκάφους όσον αφορά την αποδοτικότητα των καυσίμων.

1.2. Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μια φυσική διαδικασία. Είναι αναγκαίο για να διατηρηθεί η Γη ζεστή, ώστε να υπάρχει ζωή και ανάπτυξη. Δίχως αυτό, η Γη θα ήταν κρύα, περίπου σε θερμοκρασία -20°C και δε θα μπορούσε να υπάρχει ζωή σ' αυτήν. Αντιθέτως, η μέση θερμοκρασία της Γης διατηρείται στο επίπεδο των 15°C, χάρη στο φαινόμενο αυτό.

Τα αέρια του θερμοκηπίου (που περιλαμβάνουν κυρίως το CO_2 και τους υδρατμούς) σχηματίζουν ένα 'στρώμα' πάνω από το έδαφος της Γης σε ένα ορισμένο ύψος ώστε, αφού επιτρέψουν να εισέλθει η υπέρυθρη ακτινοβολία του ήλιου, αυτή απορροφάται κατά ένα μέρος από τη γη και την ατμόσφαιρα.

Αυτό το μέρος που απορροφάται από την ατμόσφαιρα, τη θερμαίνει και επανεκπέμπεται στην επιφάνεια του εδάφους. Το στρώμα των αερίων, επιτρέπει τη διέλευση της ακτινοβολίας, αλλά ταυτόχρονα την εγκλωβίζει, μοιάζει με τη λειτουργία ενός θερμοκηπίου και ο Γάλλος μαθηματικός Fourier το ονόμασε το 1822 φαινόμενο του θερμοκηπίου.



Εικόνα 1.1: Απλοποιημένο Διάγραμμα του Φαινόμενου του Θερμοκηπίου.

Τα τελευταία χρόνια λέγοντας «Φαινόμενο Θερμοκηπίου» δεν αναφερόμαστε στη φυσική διεργασία, αλλά στην έξαρση αυτής, λόγω της ρύπανσης της ατμόσφαιρας από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

1.3. Τα Αέρια του Θερμοκηπίου

Τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου και η αντίστοιχη συμβολή τους στο φαινόμενο είναι: οι υδρατμοί (36-70%), το διοξείδιο του άνθρακα (9-26%), το μεθάνιο CH_4 (4-9%) και το όζον O_3 (3-7%). Άλλα αέρια του θερμοκηπίου με μικρότερη επιρροή στο φαινόμενο είναι το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), οι υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs) οι υπερφθοράνθρακες (PFCs), οι υδροφθοράνθρακες (HFCs) και το εξαφθοριούχο θείο (SF_6).

Τα τελευταία χρόνια, καταγράφεται μία αύξηση στη συγκέντρωση αρκετών αερίων του θερμοκηπίου, ενώ ειδικότερα στην περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα, η αύξηση αυτή ήταν 31% την περίοδο 1998. Τα τρία τέταρτα της ανθρωπογενούς παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα, οφείλεται σε χρήση ορυκτών καυσίμων, ενώ το υπόλοιπο μέρος προέρχεται από αλλαγές που συντελούνται στο έδαφος, κυρίως μέσω της αποδάσωσης.

Ενώ η ορολογία «μείωση αερίου θερμοκηπίου» χρησιμοποιείται συχνά, πολλές, αν όχι όλες, οι υπάρχουσες προσπάθειες εστιάζουν πρώτιστα στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Αυτό γίνεται επειδή οι εκπομπές CO_2 έχουν εμφανίσει το γρηγορότερο ποσοστό αύξησης από όλα τα αέρια θερμοκηπίου.

Υπολογίζεται ότι η σφαιρική συγκέντρωση του CO_2 στην ατμόσφαιρα πρέπει να κρατιέται σε περίπου 550 μέρη ανά εκατομμύριο (parts per million) για να αποφευχθεί η επιβλαβής αλλαγή του κλίματος. Με βάση τα τρέχοντα στοιχεία, αυτό δημιουργεί την ανάγκη να μειωθούν τα τρέχοντα επίπεδα εκπομπών κατά τουλάχιστον 80% .

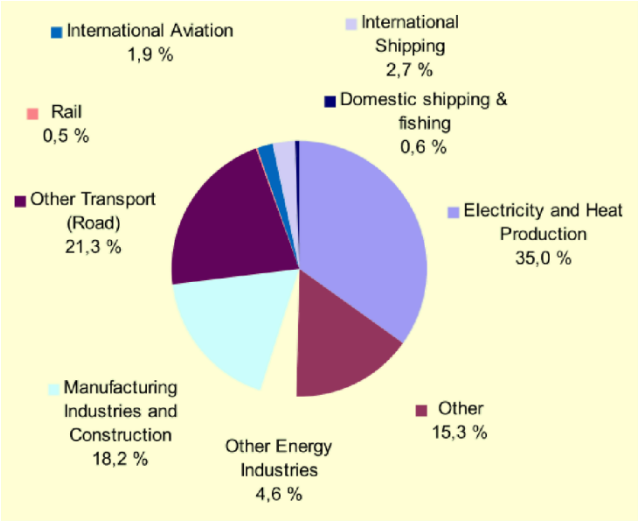
1.4. Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου Στις Θαλάσσιες Μεταφορές

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί πλέον ένα από τα κυριότερα περιβαλλοντικά προβλήματα της ανθρωπότητας τα αρνητικά αποτελέσματα της οποίας είναι ορατά σε όλον τον πλανήτη και επηρεάζει τόσο τις σύγχρονες γενιές, αλλά κυρίως τις επόμενες. Τα τελευταία χρόνια έχουν σημειωθεί αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, ενισχύοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο αποτελεί βασικό λόγο εμφάνισης της κλιματικής αλλαγής.

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι το πιο σημαντικό αέριο του θερμοκηπίου, που εκπέμπεται από τα πλοία, μέσω των καυσαερίων των μηχανών εσωτερικής καύσης. Οι άλλες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι λιγότερο σημαντικές, τόσο από την άποψη της ποσότητας, όσο και της δυνατότητας θέρμανσης του πλανήτη.

Οι διεθνείς μεταφορές μέσω θαλάσσης έχουν αποδειχθεί εν γένει, ότι είναι ο πιο ενεργειακά αποδοτικός τρόπος μαζικής μεταφοράς και συνεισφέρουν ελαφρώς στο σύνολο των εκπομπών CO_2 παγκοσμίως, ενώ μεταφέρουν το 90% του παγκόσμιου εμπορίου.

Σήμερα, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από την παγκόσμια ναυτιλία εκτιμούνται περί τους 870 εκατομμύρια τόνους αποτελώντας περίπου το 3% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών ενώ εκφράζονται φόβοι ότι οι συνολικές εκπομπές από την ναυτιλία μπορεί να τριπλασιαστούν μέχρι το 2050, εάν δε ληφθούν άμεσα μέτρα.



Εικόνα 1.2: Οι εκπομπές CO_2 από τα πλοία σε σύγκριση με το σύνολο των παγκόσμιων εκπομπών.

Οι θαλάσσιες μεταφορές προβλέπεται να συνεχίσουν να αυξάνονται σημαντικά σύμφωνα με το παγκόσμιο εμπόριο.

1.5. Θεσμικά Μέτρα του IMO για τις Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου από Πλοία

Στο πλαίσιο των προσπαθειών του IMO για τον περιορισμό των εκπομπών του CO_2 η αρμόδια επιτροπή του για την προστασία του θαλασσίου περιβάλλοντος στην 62η σύνοδο του Ιουλίου του 2012 συμφώνησε ένα περιεκτικό πακέτο κανονισμών για τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα CO_2 από τη ναυτιλία το οποίο ισχύει από τον Ιανουάριο του 2013.Οι τροποποιήσεις στο παράρτημα VI της Διεθνούς σύμβασης MARPOL περιλαμβάνουν:

- **Τεχνικά μέτρα**: Ένα σύστημα για προσδιορισμό της ενεργειακής αποδοτικότητας των νέων πλοίων μέσω του σχεδιαστικού Δείκτη Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EEDI). Ο δείκτης αυτός (attained EEDI) εκφράζεται σε g-CO_2/ton·mile που εκπέμπονται από τα πλοία και πρέπει να είναι μικρότερος από μια ορισμένη τιμή που εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου, τη χωρητικότητα ή το deadweight του πλοίου. Ο EEDI θα οδηγήσει σε μείωση περί του 25 με 30% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το έτος 2030.
- **Λειτουργικά μέτρα:** Τον κανονισμό 22 ο οποίος ορίζει ότι κάθε πλοίο πρέπει να φέρει ένα σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας (Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP) το οποίο πρέπει να είναι συγκεκριμένο για κάθε πλοίο και το οποίο περιλαμβάνει βέλτιστες πρακτικές. Το σχέδιο αυτό πρέπει να είναι σύμφωνο με τις σχετικές οδηγίες του IMO. Μέσω του SEEMP οι εταιρίες και τα πλοία μπορούν να παρακολουθούν και να βελτιώνουν την απόδοση σε σχέση με διάφορους παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να συμβάλλουν στις εκπομπές CO_2. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν μεταξύ των άλλων βελτιωμένο σχεδιασμό ταξιδιού, διαχείριση ταχύτητας πλοίου, σχεδιασμό ταξιδιού με βάση τις καιρικές συνθήκες (weather routing), βελτιστοποίηση της ισχύς της κύριας μηχανής, του πηδαλίου και της προπέλας, συντήρηση γάστρας, καθώς και χρησιμοποίηση διάφορων τύπων καυσίμων.

Επίσης , η επιτροπή προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος του IMO στην 62η σύνοδό της εξέδωσε οδηγίες για εθελοντική χρήση του Λειτουργικού Δείκτη Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EEOI) των πλοίων, το οποίο είναι ένα λειτουργικό μέτρο. Ο δείκτης αυτός εκφράζεται σε g-CO_2/ton·mile που εκπέμπονται από ένα πλοίο και μπορεί να βοηθήσει τους πλοιοκτήτες , τους διαχειριστές πλοίων καθώς και

άλλους ενδιαφερόμενους στην αξιολόγηση τους στόλου τους όσον αφορά τις εκπομπές CO_2. Δεδομένου ότι το ποσό του CO_2 που εκπέμπεται από ένα σκάφος συσχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση των καυσίμων, ο δείκτης EEOI μπορεί επίσης να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την απόδοση ενός σκάφους όσον αφορά την αποδοτικότητα των καυσίμων. Πρέπει να σημειωθεί ότι, αν και προς το παρόν ο δείκτης EEOI είναι εθελοντικός ο ρόλος του στη ναυτιλία στο μέλλον μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Ο EEOI ενδεχομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο επιβολής σε όσους ενδεχομένως είναι πάνω από το μέσο όρο για κάθε τύπο πλοίου.

Η επιτροπή προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος του IMO μελετά τώρα τους τρόπους της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα βάση των μηχανισμών αγοράς ρύπων (Market-based mechanisms-MBMs). Σε ένα αριθμό διάφορων μηχανισμών ρύπων που υποβλήθηκαν για μελέτη ο EEOI μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα θεμελιώδες κριτήριο για ένα πλοίο, έτσι ώστε να αποφασιστεί η αναγκαιότητα για αγορά εκπομπής ρύπων CO_2. Έτσι με βάση τα παραπάνω η ακρίβεια της μεθόδους εκτίμησης του δείκτη EEOI είναι σημαντική.

Κανονισμοί σε ισχύ για πάνω από το 90% του παγκόσμιου στόλου Το Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) καθίσταται υποχρεωτικό για όλα τα πλοία	Ο Δείκτης EEDI απαιτεί τα νέα πλοία να συμμορφώνονται με συμφωνημένους στόχους αποδοτικότητας	Τα νέα πλοία πρέπει να βελτιώσουν την αποδοτικότητά τους 10% Ο στόχος είναι να έχουμε 20% μείωση στις εκπομπές του CO_2 ανά τόνο/km	Τα νέα πλοία πρέπει να βελτιώσουν την αποδοτικότητά τους 20%	Τα νέα πλοία πρέπει να βελτιώσουν την αποδοτικότητά τους 30%	Ο στόχος είναι να έχουμε 50% μείωση στις εκπομπές του CO_2 ανά τόνο/km
2013 ⇨	2015 ⇨	2020 ⇨	2025 ⇨	2030 ⇨	⇨ 2050

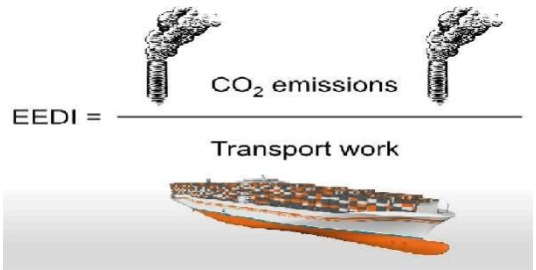
Πίνακας 1.1 : Χρονοδιάγραμμα Εφαρμογής Κανονισμών IMO για μείωση εκπομπών CO_2

1.6. Σχεδιαστικός Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EEDI) και Λειτουργικός Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EEOI)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως σύμφωνα με την πολιτική του IMO, η απόδοση του πλοίου πρέπει να αξιολογείται ποσοτικά μέσω των ακόλουθων δεικτών :

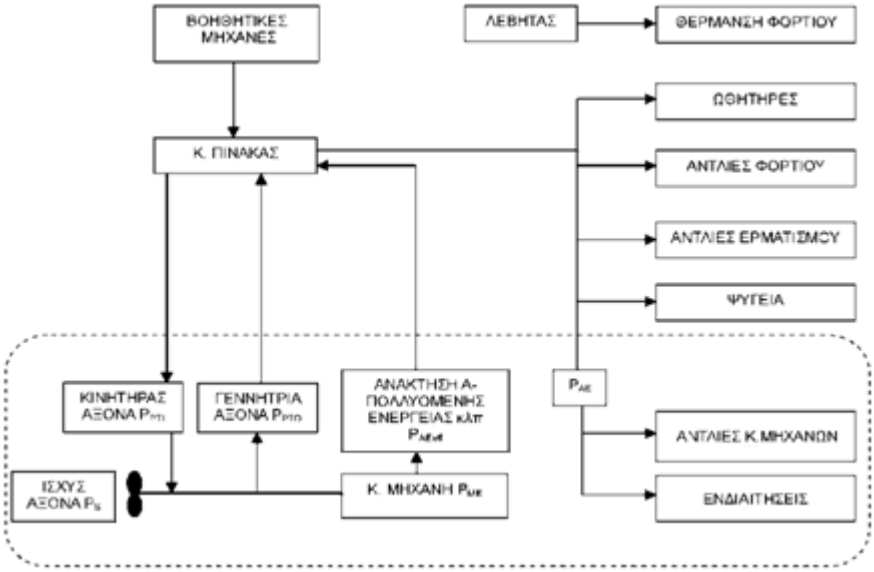
– Energy Efficiency Design Index (EEDI)
  Σχεδιαστικός Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας για νέες κατασκευές.
– Energy Efficiency Operation Index (EEOI)
  Λειτουργικός Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας για υπάρχουσες κατασκευές

Αποτελεί ένα μαθηματικό τύπο, ο οποίος εκφράζει την αναλογία μεταξύ του κόστους (δηλ. εκπομπή CO_2) και του κέρδους που παράγεται, το οποίο εκφράζεται ως ικανότητα μεταφοράς αγαθών από τη λειτουργία του πλοίου.



Εικόνα 1.3: Σχηματική παράσταση της θεμελιώδους αρχής του EEDI

Οι εκπομπές CO_2 θεωρείται ότι προέρχονται από τις κύριες μηχανές και από τις βοηθητικές μηχανές, που χρησιμοποιούνται ως κινητήρια δύναμη για τις ηλεκτρικές γεννήτριες μετά την αφαίρεση των εκπομπών που αναλογούν στην ισχύ που προσφέρεται από τη χρήση αντίστοιχων καινοτόμων τεχνολογιών ανάκτησης ισχύος. Το κέρδος που παράγεται θεωρείται ότι αποτελείται από το μεταφερόμενο φορτίο επί την ταχύτητα του πλοίου.

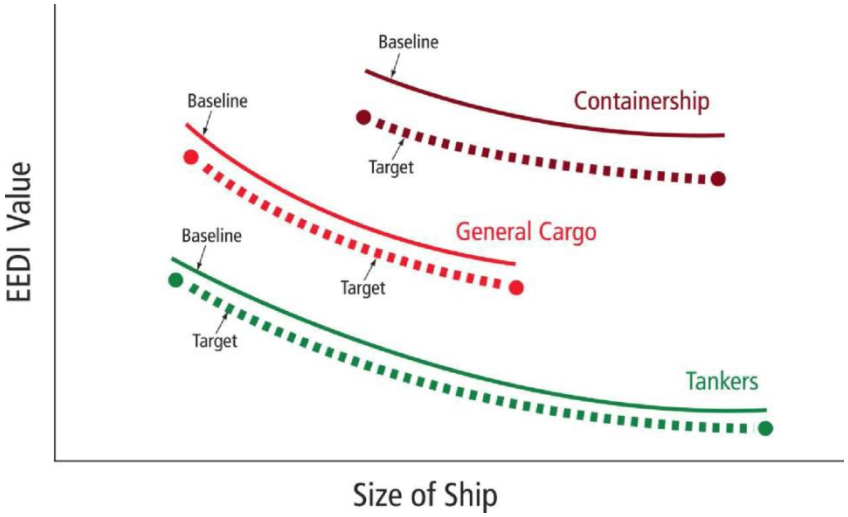


Σχήμα 1.1 : Απλοποιημένη γενική διάταξη προώσεως πλοίου

Ο EEDI εκφράζει τις εκπομπές του CO_2 από ένα πλοίο κάτω από ειδικές συνθήκες (π.χ. φορτίο μηχανών, έλξη, αέρας, κύματα, κ.λπ.) σε σχέση με ένα ονομαστικό ποσοστό μεταφοράς. Η μονάδα του EEDI είναι "γραμμάρια CO_2 ανά χωρητικότητα-μίλι", όπου "χωρητικότητα" είναι μια έκφραση της ικανότητας μεταφοράς του φορτίου, για το οποίο το πλοίο έχει σχεδιαστεί να μεταφέρει. Για τα περισσότερα σκάφη, η "χωρητικότητα" εκφράζεται ως πρόσθετο βάρος (deadweight).

Ο πρωταρχικός σκοπός του EEDI είναι να μειώσει τις εκπομπές CO_2 από τη ναυτιλία, βελτιώνοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα των νέων κατασκευών. Για το σκοπό αυτό ο EEDI υπολογίζεται για τα νέα πλοία, τα οποία είναι εξαναγκασμένα να έχουν EEDI μικρότερο, κατά ένα ποσοστό μείωσης, από μια γραμμή αναφοράς (baseline), η οποία αντιπροσωπεύει τη μέση αποδοτικότητα για πλοία χτισμένα μεταξύ 1999 και 2009. Η βασική ιδέα είναι ότι η τιμή του EEDI ενός νέου πλοίου πρέπει να είναι ίση ή μικρότερη από την απαιτούμενη τιμή (τιμή στόχο) του EEDI.

Με βάση τον τύπο και το μέγεθος του πλοίου, η ενεργειακή απόδοση του πλοίου θα μετράται με το ποσοστό μείωσης που μπορεί να επιτευχθεί από τη γραμμή αναφοράς.



Εικόνα 1.4: Σύγκριση της απαιτούμενης τιμής (τιμή στόχος) EEDI με την αντίστοιχη γραμμή αναφοράς

Ο υπολογισμός του EEDI βασίζεται απλώς στα δεδομένα σχεδιασμού του πλοίου και αντιπροσωπεύει τις εκπομπές CO_2 σε ένα μόνο σημείο του σχεδιασμού και όχι για την πλήρη λειτουργία και άλλα προφίλ επίπεδα λειτουργίας. Ο EEDI μετριέται σε γραμμάρια CO_2 ανά τόνο βάρους που μεταφέρεται ανά ναυτικό μίλι (g CO_2 / t · nm).

Η θέσπιση του EEDI είναι μια ενέργεια προς τη σωστή κατεύθυνση στα πλαίσια της προσπάθειας που γίνεται για τη μείωση των εκπομπών CO_2 από τη θαλάσσια βιομηχανία. Ωστόσο, οι πραγματικές εκπομπές που παράγονται από ένα σκάφος μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικές από εκείνες που δείχνει ο EEDI.

Για την περιγραφή των πραγματικών εκπομπών CO_2 κατά ένα συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης του πλοίου έχει αναπτυχθεί ο EEOI όπου έχει οριστεί ως ο λόγος .

$$EEOI = \frac{mCO_2}{transport\ work}$$ δηλαδή, g-CO_2/ton·mile.

Όπου, mCO_2 είναι η μάζα του εκπεμπόμενου CO_2 . Αυτός ο δείκτης μπορεί να τροποποιηθεί ελαφρώς για να διευκολυνθεί η διαδικασία βελτιστοποίησης εάν αναφέρεται σε αυθαίρετο χρόνο παρατήρησης Δt, ως εξής:

$$EEOI = \frac{mCO_2 \cdot \Delta t}{LF \cdot V \cdot \Delta t} = \frac{c \cdot P \cdot FC(P)}{LF \cdot V}$$

όπου, FC είναι ειδική κατανάλωση καυσίμου ανά μία kWh (gr / kWh), P είναι η πραγματική παραγόμενη ισχύς (kW), V είναι η μέση ταχύτητα του πλοίου (kn) για

χρονικό διάστημα Δt και c είναι ένας συντελεστής μετατροπής του καυσίμου σε γραμμάρια εκπεμπόμενου CO_2 (gr_{CO2} / $g_{καυσίμου}$) και LF είναι ο παράγοντας φόρτωσης του πλοίου. Ο LF εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου, π.χ. tanker ή επιβατηγό. Η κατανάλωση καυσίμου, FC, εξαρτάται προφανώς από τη τρέχουσα συνολική παραγωγή ενέργειας και την κατανομή της ισχύος μεταξύ των γεννητριών.

Ο EEDI είναι ένας μη καθοδηγητικός μηχανισμός, βασισμένος στην επίδοση, ο οποίος αφήνει την επιλογή των τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν στο σχεδιαστή ή στο ναυπηγείο. Καθώς το απαιτούμενο επίπεδο ενεργειακής αποδοτικότητας επιτυγχάνεται, οι σχεδιαστές και οι κατασκευαστές είναι ελεύθεροι να χρησιμοποιήσουν τις πιο αποδοτικές από άποψη κόστους μεθόδους, προκειμένου το πλοίο να συμμορφώνεται με τους κανονισμούς.

1.7. Νέες Πρακτικές Βελτίωσης EEDI και EEOI

Γίνεται φανερό ότι η εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών που θα μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την κατανάλωση καυσίμων, γίνεται επιτακτική. Γι' αυτό καθίσταται πλέον σαφές, ότι :

- Η ναυπηγική βιομηχανία πρέπει να συνεχίσει να βελτιώνει τους παραδοσιακούς τύπους πλοίων με στόχους την αυξημένη ασφάλεια και την περιβαλλοντική προστασία.
- Τα υπάρχοντα πλοία να γίνουν πιο αποδοτικά ενεργειακά, προκειμένου να είναι ανταγωνιστικά για το υπόλοιπο του κύκλου ζωής τους.

Αρκετές πρακτικές είναι υπό μελέτη για τη βελτίωση των δεικτών αποδοτικότητας EEDI και EEOI. Μερικές από αυτές είναι:

- Διαχείριση Ενέργειας και Απόδοσης του Σκάφους: Περιλαμβάνει την παρακολούθηση της κατανάλωσης καυσίμων των κύριων και βοηθητικών μηχανών και συνοδεύεται από ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται.
- Βελτιστοποίηση Διαδρομής και Αποδοτικότητας Ταξιδίου.
- Αργή Πλεύση: (μείωση της ταχύτητας πλεύσης των πλοίων).
- Μέσα έξυπνης παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία υποδιαιρούνται σε:

Παροχή από στεριά

Προηγμένα συστήματα γεννήτριας άξονα,

Συσκευές Εξοικονόμησης Ηλεκτρικής Ενέργειας (EESD),

Προηγμένα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας.

Ορισμένα πρόσθετα μέτρα που θα αυξήσουν την αποδοτικότητα του πλοίου αναφέρονται στη συνέχεια:

- Μία συστοιχία πυκνωτών μαζί με έναν αυτομετασχηματιστή πολλών βημάτων που χρησιμοποιείται για την εκκίνηση μεγάλου κινητήρα (π.χ. κίνηση μονάδας πρόωσης) εκτός από τον περιορισμό σημαντικών προβλημάτων ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να εξοικονομήσει τη λειτουργία της εφεδρικής γεννήτριας, που χρησιμοποιείται αποκλειστικά για το σκοπό αυτό.
- Η εγκατάσταση ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος που ρυθμίζει την ταχύτητα κινητήρα που κινεί συσκευή με υψηλές απαιτήσεις σε απόδοση (π.χ. αντλία φορτίου ή έρματος ή συμπιεστής αερίου) μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια, αφού καταργούνται τα μεταβατικά με υπερ-υψηλές απαιτήσεις ισχύος.
- Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος ως διεπαφές EESD μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σύζευξη οποιωνδήποτε ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (με ελάχιστες αν όχι μηδενικές εκπομπές) με το υπόλοιπο του ηλεκτρικού δικτύου. Τυπικά παραδείγματα περιλαμβάνουν ηλιακούς συλλέκτες εγκαταστημένους στο επάνω κατάστρωμα του πλοίου, ή μονάδες κυψελών καυσίμου.

2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ ΠΛΟΙΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι ζωτικής σημασίας προκειμένου ένα σκάφος να μπορεί να πλέει με ασφάλεια και να εκπληρώνει τις επιχειρησιακές του απαιτήσεις.

Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αποτελείται από τρία κύρια υποσυστήματα : Ισχύος, φωτισμού και επικοινωνιών ναυσιπλοΐας. Είναι η πιο μεγάλη βοηθητική εγκατάσταση, από την οποία εξαρτώνται το μεγαλύτερο μέρος των βοηθητικών λειτουργιών του πλοίου που σχετίζονται με την ασφάλεια , τους χειρισμούς και το φορτίο. Σε ορισμένες περιπτώσεις εξαρτάται ακόμη και η λειτουργία της εγκαταστάσεως προώσεως.

Εικόνα 2.1 : Κύριος Πίνακας

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ηλεκτρογεννήτριες πετρελαιοκίνητες ή ατμοκίνητες. Στην περίπτωση των ατμοκίνητων ηλεκτρογεννητριών, υφίσταται και εφεδρική πετρελαιοκίνητη για χρήση, όταν δεν βρίσκεται σε ενέργεια λέβητας.

Οι κύριες γεννήτριες πρέπει να αποδίδουν ισχύ τόση, που να καλύπτει όλα τα φορτία του πλοίου στη δυσμενέστερη αναμενόμενη περίπτωση. Για λόγους ασφαλείας, υπάρχουν τουλάχιστον δύο κύριες ηλεκτρογεννήτριες (εγκατεστημένες στο ηλεκτροστάσιο) και μία πηγή ασφαλείας εγκατεστημένη εκτός ηλεκτροστασίου. Η πηγή αυτή είναι συνήθως γεννήτρια, που κινείται αποκλειστικά με δικό της κινητήρα Diesel. Μόνο σε πολύ μικρά σκάφη επιτρέπονται συσσωρευτές ως πηγή ασφαλείας.

Εικόνα 2.2 : Ηλεκτροπαραγωγά Ζεύγη

Ο αριθμός και η ισχύς των γεννητριών πρέπει να ικανοποιούν την ακόλουθη απαίτηση: Με μία γεννήτρια εκτός λειτουργίας, πρέπει να είναι δυνατή η τροφοδότηση όλων των μηχανημάτων που είναι απαραίτητα για την ασφάλεια και πρόωση του πλοίου και τη διατήρηση του φορτίου σε καλή κατάσταση.

Επίσης στην ηλεκτρολογική εγκατάσταση ανήκουν ο κύριος πίνακας διανομής, ο πίνακας γεννήτριας κινδύνου και άλλοι βοηθητικοί πίνακες διανομής των διαφόρων υποσταθμών ελέγχου του πλοίου. Τέλος η εγκατάσταση ολοκληρώνεται από τις απαραίτητες ηλεκτρικές καλωδιώσεις, τους ηλεκτροκινητήρες των διαφόρων μηχανημάτων και τους πίνακες ελέγχου αυτών.

2.2 Τάσεις Παροχής Ηλεκτρικού Ρεύματος

Η κύρια παρεχόμενη τάση είναι Εναλλασσόμενου Ρεύματος 440 Volts, τριών φάσεων, 60 Hz ή 380 Volts, τριών φάσεων, 50 Hz για όλες τις κύριες καταναλώσεις. Οι εγκαταστάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος έχουν μικρό βάρος και μεγάλη αξιοπιστία. Υπάρχουν όμως και καταναλώσεις που εξυπηρετούνται από άλλες τάσεις όπως :

Τάση 110Volts, τριών φάσεων, 60 Hz ή 220Volts, τριών φάσεων, 50 Hz για μικρή ισχύ και φωτισμό.

Τάση 440Volts, τριών φάσεων, 400 Hz, που χρησιμοποιείται συνήθως για γυροσκοπικές πυξίδες και οπλικά συστήματα, η οποία παρέχεται μέσω στατών μετατροπέων.

Τάση 24Volts DC για φωτισμό ανάγκης, εσωτερικές επικοινωνίες, για ενδείξεις, προειδοποιητικών alarms και τηλεχειρισμούς, η οποία παρέχεται μέσω συσσωρευτών με ανορθωτικά φορτίσεως.

Τάση 48 Volts DC για συστήματα ελέγχου προώσεως, η οποία παρέχεται μέσω συσσωρευτών με ανορθωτικά φορτίσεως.

2.3 Καταναλωτές Ισχύος

Με τον όρο βοηθητικά μηχανήματα πλοίου εννοούνται όλα τα εγκατεστημένα ή φορητά μηχανήματα και συσκευές που είναι απαραίτητα για την πρόωση και τις λοιπές λειτουργίες του σκάφους. Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρουν τα ηλεκτροτροφοδοτούμενα βοηθητικά μηχανήματα.

Οι βασικές κατηγορίες των βοηθητικών μηχανημάτων που είναι εγκατεστημένες σ' ένα πλοίο είναι οι κάτωθι :

- Μηχανήματα προώσεως.
- Μηχανήματα χειρισμών.
- Μηχανήματα ασφαλείας.
- Μηχανήματα βοηθητικών χρήσεων.
- Μηχανήματα φορτίου.

2.3.1 Μηχανήματα Προώσεως

- **Αντλίες,** είναι μηχανές που χρησιμοποιούνται για να μετακινούν υγρά εκτελώντας βασική ενεργειακή μετατροπή, καθότι προσθέτουν ενέργεια στο ρευστό μετατρέποντας τη μηχανική ενέργεια του κινητήρα σε δυναμική και κινητική ενέργεια του ρευστού.

Η φυγοκεντρική αντλία είναι ο πλέον διαδεδομένος τύπος στις εφαρμογές επί πλοίων.

Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα των φυγόκεντρων αντλιών.

Η απλότητα της κατασκευής τους.

Το συμπαγές της κατασκευής τους .

Το ταχύστροφό τους.

Οικονομία σε όγκο και βάρος και χαμηλό κόστος.

Υψηλή και συνεχής παροχή.

Ομαλή λειτουργία.

Εικόνα 2.3 : Αντλία με ηλεκτροκινητήρα

- **Αντλία παροχής ή τροφοδότησης πετρελαίου**. Είναι η ηλεκτροκίνητη αντλία που αναρροφά το πετρέλαιο (το ήδη επεξεργασμένο από τους φυγοκεντρικούς διαχωριστήρες) από τη δεξαμενή χρήσεως (service tank) και το καταθλίβει στο δίκτυο αναρροφήσεως των αντλιών μηχανικής εγχύσεως του πετρελαίου της κύριας μηχανής.
- **Αντλία λαδιού λίπανσης.** Είναι ηλεκτροκίνητη αντλία που χρησιμεύει για την παροχή λιπαντικού λαδιού υπό πίεση στα λιπαινόμενα μέρη της κύριας μηχανής.
- **Αντλία ψύξεως κυλίνδρων και πωμάτων**. Αναρροφά αποσταγμένο νερό και το κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα που διαθέτει δεξαμενή διαστολής, μέσα στους περιχιτώνιους χώρους και στα πώματα της κύριας μηχανής. Από διακλαδώσεις από το ίδιο κύκλωμα ψύχονται και οι καυστήρες ή εγχυτήρες πετρελαίου και οι βαλβίδες εξαγωγής των καυσαερίων των κυλίνδρων, όταν προβλέπεται ψύξη τους. Καμιά φορά, σε ορισμένες μηχανές οι καυστήρες ψύχονται με κυκλοφορία πετρελαίου χαμηλής θερμοκρασίας.
- **Αντλία ψύξεως εμβόλων κύριας μηχανής.** Κυκλοφορεί αποσταγμένο νερό ή λάδι στους χώρους ψύξεως των εμβόλων της κύριας μηχανής για την προστασία τους από υπερθέρμανση και πιθανή καταστροφή τους κατά τη λειτουργία της.
- **Αντλία κυκλοφορίας θαλασσινού νερού**. Είναι ηλεκτροκίνητη και αναρροφά θαλασσινό νερό κάτω από την ίσαλο και το διοχετεύει στα ψυγεία νερού και λαδιού.
- **Φυγοκεντρικός διαχωριστήρας πετρελαίου.** Αποτελείται από αντλίες, προθερμαντήρες, φίλτρα και ρυθμιστές. Το συγκρότημα αυτό επεξεργάζεται το πετρέλαιο, ώστε να αποκτήσει κατάλληλη καθαρότητα για τέλεια ψέκαση μέσα στους κυλίνδρους**.**
- **Φυγοκεντρικός διαχωριστήρας ελαίου.** Αυτός, μαζί με τις αντλίες του και τους προθερμαντήρες λαδιού, χρησιμεύει για το συνεχή καθαρισμό του λαδιού λιπάνσεως κατά τον πλου.

Εικόνα 2.4 : Φυγοκεντρικός διαχωριστής

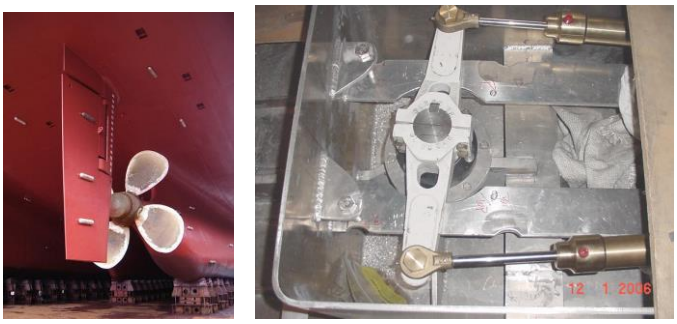
- **Αεροσυμπιεστές.** Ηλεκτροκίνητοι ή ατμοκίνητοι για την παραγωγή πεπιεσμένου αέρα προκίνησης και χειρισμών της κύριας μηχανής και προκίνησης των πετρελαιο-γεννητριών. Βοηθητικός ηλεκτροκίνητος αεροσυμπιεστής αυτόματης εκκίνησης-κράτησης προορίζεται για την τήρηση της πίεσης του πεπιεσμένου αέρα, ώστε να λειτουργούν οι διάφοροι αυτόματοι ρυθμιστικοί μηχανισμοί.

Εικόνα 2.5 : Αεροσυμπιεστής

2.3.2 Μηχανήματα Χειρισμών

Τα μηχανήματα αυτά είναι ανεξάρτητα από το σύστημα προώσεως του πλοίου είναι:

- **Μηχανήματα πηδαλιουχήσεως.** Πρόκειται για συγκρότημα μηχανημάτων και μηχανισμών, με τους οποίους εκτελείται ο χειρισμός του πηδαλίου ή των πηδαλίων του πλοίου.



Εικόνα 2.6 : Μηχανισμός πηδαλίου

- **Πρωραία έλικα χειρισμών (**forward maneuvering propeller). Καλείται και απωθητής πρώρας (bow thruster). Είναι έλικα μεταβλητού βήματος και φοράς πτερυγίων και βρίσκεται μέσα σε οριζόντιο οχετό που διαπερνά το σκάφος εγκάρσια στο πρωραίο κάτω από την ίσαλο τμήμα του. Τα πτερύγιά της στρέφονται από μηχάνημα που βρίσκεται ακριβώς πρύμα της πρωραίας δεξαμενής ζυγοσταθμίσεως (forward trimming tank) και ελέγχεται από τη γέφυρα ή και επιτόπια. Περιστρέφοντας την έλικα πάντα κατά την ίδια φορά και μεταβάλλοντας τη φορά των πτερυγίων, δημιουργείται κατά βούληση ωστική δύναμη που στρέφει την πλώρη προς τα δεξιά ή

Εικόνα 2.7 : Bow thruster

αριστερά ανάλογα. Έτσι διευκολύνεται κατά πολύ η προσέγγιση της πλώρης προς, ή η απώθησή της από κρηπίδωμα ή σημαντήρα, ή πρόσδεση, ή άπαρση και γενικά οι χειρισμοί του πλοίου ακριβώς, όπως αν χρησιμοποιούσαμε ρυμουλκό.

- **Σταθεροποιητής (stabilizer).** Εγκατάσταση που αποσκοπεί στην ελάττωση του διατοιχισμού του πλοίου. Τα αντιδιατοιχιστικά πτερύγια, εξέχουν από το σκάφος σαν πλευρικά πηδάλια κάτω από την ίσαλο και κινούνται από εσωτερικά εγκατεστημένο μηχάνημα έτσι, ώστε να δημιουργούν ωθήσεις στο σκάφος, αντίθετες από αυτές που δημιουργούνται από το κύμα.

Εικόνα 2.8 : Stabilizer

- **Εργάτες και βαρούλκα προσδέσεως.** Μηχανήματα ηλεκτροκίνητα, υδραυλικά ή ηλεκτροϋδραυλικά που χρησιμοποιούνται για την αγκυροβολία, πρυμνοδέτηση ή πλαγιοδέτηση.

Εικόνα 2.9 : Εργάτης άγκυρας

2.3.3 Μηχανήματα Ασφαλείας

Τα μηχανήματα αυτά βρίσκονται σε όλα σχεδόν τα πλοία. Μερικά από αυτά εξυπηρετούν έμμεσα και την προωστήρια εγκατάσταση και είναι:

- **Αντλία πυρκαϊάς.** Αναρροφά θαλασσινό νερό και το καταθλίβει στο δίκτυο πυρκαϊάς του πλοίου. Το δίκτυο αυτό σε καίρια σημεία (σταθμούς) φέρει λήψεις με οθώνινους σωλήνες και ακροσωλήνια κοινά ή σύνθετα. Η αντλία τροφοδοτεί ακόμη την εγκατάσταση παραγωγής και εκτοξεύσεως αφρού για κατάσβεση της πυρκαϊάς. Η αντλία πυρκαϊάς συνδέεται συνήθως με τα δίκτυα νερού, ψύξεως, πλύσεως και εξαντλήσεως κυτών, οπότε και ονομάζεται και αντλία **κύτους- πυρκαϊάς.**
- **Αντλία ραντισμού νερού κατασβέσεως της πυρκαϊάς** (sprinkler pump). Τροφοδοτεί ειδικό δίκτυο κατασβέσεως της πυρκαϊάς με ραντισμό με νερό, εγκαταστημένο σε όλους τους χώρους ενδιαιτήσεως πληρώματος των επιβατηγών πλοίων. Το δίκτυο ή σύστημα sprinkler περιλαμβάνει και διατάξεις που ειδοποιούν για την έναρξη της πυρκαϊάς, της οποίας η θέση φαίνεται σε συγκεντρωτικό ενδεικτικό

πίνακα. Έτσι είναι δυνατή η άμεση κινητοποίηση και ορθή κατεύθυνση του αγήματος πυροσβεστών προς το σημείο, όπου εμφανίσθηκε η πυρκαϊά.

- **Αντλία κύτους.** Αναρροφά τα ακάθαρτα νερά κυτών μηχανοστασίου-λεβητοστασίου, καθώς και κιβωτίων δαπέδων, κυτών, φορτίου και κιβωτίων συγκεντρώσεως ακαθάρτων νερών των λοιπών διαμερισμάτων και τα καταθλίβει έξω από το πλοίο. Η αντλία αυτή έχει μεγάλη σημασία για την ασφάλεια του πλοίου. Συχνά είναι διπλής χρήσεως, δηλαδή κύτους- πυρκαϊάς. Σε μερικά πλοία το νερό ορισμένων διαμερισμάτων εξαντλείται και με εγχυτήρες που λειτουργούν με ατμό ή με νερό υπό πίεση.
- **Αντλία κινδύνου εξαντλήσεως κυτών.** Είναι αντλία ειδικής κατασκευής ικανή να λειτουργεί και όταν ακόμα είναι βυθισμένη μέσα στο νερό. Χρησιμοποιείται σε ώρα κινδύνου για την εξάντληση του νερού από το κύτος, όπου βρίσκεται και η ίδια η αντλία, και όταν ακόμη έχει αυτό κατακλυσθεί λόγω διαρροής.
- **Μηχανήματα τηλεχειρισμού θυρών στεγανών φρακτών.** Σε περίπτωση σοβαρού κινδύνου του πλοίου λόγω διαρροής είναι αναγκαίο τα συγκοινωνούντα διαμερίσματα της στεγανής υποδιαιρέσεως του να απομονωθούν και να καταστούν στεγανά μεταξύ τους. Γι' αυτό στις αντίστοιχες φρακτές υπάρχουν ισχυρές συρταρωτές θύρες που κλείνουν στεγανά είτε επιτόπια, είτε από απόσταση. Για το χειρισμό τους χρησιμοποιούνται κατάλληλοι ηλεκτροκινητήρες, ή υδραυλικοί κινητήρες. Ο χειρισμός εκτελείται από κατάλληλο σταθμό ελέγχου από τη γέφυρα ή επιτόπια. Ο επιτόπιος χειρισμός στην ανάγκη μπορεί να εκτελεσθεί και με τη βοήθεια κατάλληλου χειροσφόνδυλου. Κατά το χειρισμό των θυρών ενεργοποιούνται κατάλληλες διατάξεις που εκπέμπουν φωτεινά ή ηχητικά σήματα για να ειδοποιείται το προσωπικό έγκαιρα και να αποφευχθεί ο εγκλεισμός του σ' ένα από τα απομονούμενα διαμερίσματα. Προβλέπεται και έξοδος ασφαλείας που οδηγεί από το διαμέρισμα στο κατάστρωμα μέσω κατακόρυφου φρεατίου διαφυγής και κατάλληλης κλίμακας.

2.3.4 Μηχανήματα Βοηθητικών Χρήσεων

Τα μηχανήματα βοηθητικών χρήσεων ανεξάρτητα από το σύστημα προώσεως αφορούν όλα τα πλοία. Πάρα πολλά δε από τα μηχανήματα αυτά εξυπηρετούν έμμεσα και την προωστήρια εγκατάσταση. Αυτά είναι:

- **Αντλία γενικής χρήσεως.** Παρέχει θαλασσινό νερό στα ψυγεία λαδιού των ηλεκτρογεννητριών, των στροβιλαντλιών φορτίου, στη ψυκτική εγκατάσταση και στο

δίκτυο καταστρώματος για πλύση καταστρωμάτων, αλυσίδων, αγκυρών κλπ. Το δίκτυο καταθλίψεώς της συνδέεται με αυτό της κύριας αντλίας κυκλοφορίας, καθώς επίσης και με τα δίκτυα πυρκαϊάς και υγιεινής. Η αναρρόφησή της τέλος συνδυάζεται και με το δίκτυο εξαντλήσεως των κυτών του πλοίου.

- **Αντλία υγιεινής.** Παρέχει θαλασσινό νερό στα αφοδευτήρια του πλοίου και σε ανάγκη εξυπηρετεί και τα βοηθητικά δίκτυα ψύξεως. Σε όλα σχεδόν τα σύγχρονα πλοία είναι ηλεκτροκίνητη με αυτόματη εκκίνηση- κράτηση που ενεργείται με τη μεταβολή της πιέσεως αέρα πάνω από τη στάθμη του νερού, το οποίο βρίσκεται μέσα σε κλειστή δεξαμενή που καλείται αεροκώδωνας ή πνεύμονας (pneupress). Στον πνεύμονα αυτόν καταθλίβει η αντλία υγιεινής και από αυτόν, με την πίεση του αέρα του αεροθαλάμου του, διανέμει το νερό προς το δίκτυο υγιεινής. Τα όρια πιέσεως του πνεύμονα για την αυτόματη εκκίνηση και κράτηση της αντλίας ρυθμίζονται κατά βούληση, ώστε να τηρείται σταθερή σχεδόν στάθμη θάλασσας σ' αυτόν και το δίκτυο να εξυπηρετείται συνεχώς.
- **Αντλία πόσιμου νερού.** Είναι ηλεκτροκίνητη και παρέχει πόσιμο νερό στο αντίστοιχο δίκτυο του πλοίου, το οποίο και διατηρεί συνεχώς υπό πίεση με τη βοήθεια **πνεύμονα** και αυτόματου μηχανισμού εκκινήσεως- κρατήσεως, όπως και η αντλία υγιεινής.
- **Αντλίες έρματος.** Χρησιμεύουν για τη πλήρωση ή εξάντληση ή μεταφορά έρματος από δεξαμενής σε δεξαμενή. Για τον ερματισμό των πλοίων (σαβούρωμα) χρησιμοποιείται θαλασσινό νερό, που εισάγεται στις λεγόμενες δεξαμενές έρματος**.**
- **Αντλία μεταγγίσεως πετρελαίου.** Χρησιμεύει για μετάγγιση του πετρελαίου (δηλαδή του καυσίμου του πλοίου) από μία δεξαμενή σε άλλη για ην κατάθλιψή του στις δεξαμενές κατακαθίσεως (settling) και ημερήσιας χρήσεως (daily tanks). Χρησιμεύουν επίσης και για την παράδοση πετρελαίου σε άλλο πλοίο ή στη ξηρά.
- **Ψυκτική εγκατάσταση.** Αποτελείται από συγκρότημα μηχανημάτων, συσκευών και από θερμικά μονωμένους θαλάμους και αποσκοπεί στη διατήρηση καταλλήλων θερμοκρασιών μέσα στους θαλάμους, όπου και αποθηκεύονται τα διάφορα τρόφιμα του πλοίου. Η όλη ψυκτική εγκατάσταση συνδυάζει και την ψύξη πόσιμου νερού και και την παραγωγή πάγου.

- **Αφαλατωτής.** Ο αφαλατωτής είναι το σύστημα μέσω του οποίου το θαλασσινό νερό επεξεργαζόμενο γίνεται κατάλληλο για χρήση από το προσωπικό. Ο τύπου Reverse Osmosis (R.O.) διαθέτει αντλία υψηλής πίεσης κατάθλιψης μέσω τις οποίας οδηγεί το θαλασσινό νερό στα διάφορα φίλτρα για επεξεργασία.

Εικόνα 2.10 : Σύστημα Αφαλάτωσης

- **Εγκατάσταση κλιματισμού.** Αποτελείται από συγκρότημα μηχανημάτων και συσκευών, με το οποίο δημιουργείται και κυκλοφορεί στους χώρους ενδιαιτήσεως του πλοίου θερμός ή ψυχρός αέρας. Ορισμένες εγκαταστάσεις κλιματισμού παράγουν μόνο ψυχρό αέρα, ενώ στην περίπτωση αυτή η θέρμανση γίνεται με κυκλοφορία ατμού Χ.Π ή θερμού νερού σε θερμαντικά σώματα.

Εικόνα 2.11 : Κλιματιστική μονάδα

- **Εγκατάσταση αερισμού.** Αποτελείται από ένα ή περισσότερους ηλεκτροκίνητους ανεμιστήρες, που παρέχουν ατμοσφαιρικό αέρα στους χώρους ενδιαιτήσεως μέσω δικτύου αγωγών. Ειδικότερα για το μηχανοστάσιο - λεβητοστάσιο καθώς και το αντλιοστάσιο των δεξαμενοπλοίων, υπάρχουν ιδιαίτεροι ισχυροί ανεμιστήρες, από τους οποίους ορισμένοι καταθλίβουν μόνο αέρα (καταθλιπτικοί) και ορισμένοι αναρροφούν (αναρροφητικοί ή εξαεριστήρες), ενώ σε άλλες περιπτώσεις υπάρχουν και ανεμιστήρες διπλής φοράς περιστροφής (αναστρεφόμενοι), οι οποίοι μπορούν και να καταθλίβουν και να αναρροφούν. Η εγκατάσταση και άρτια λειτουργία αερισμού είναι τελείως αναγκαία για τη διαβίωση του προσωπικού και κάθε ατόμου που είναι δυνατό να εργάζεται στους χώρους αυτούς. Από το δίκτυο αερισμού εξυπηρετείται και η ψύξη των αερόψυκτων συμπιεστών αέρα στο μηχανοστάσιο, καθώς και οι αερόψυκτοι συμπιεστές της ψυκτικής εγκαταστάσεως.

Εικόνα 2.12 : Ηλεκτροκίνητος ανεμιστήρας

- **Μηχανήματα καθαρισμού νερού κυτών.** Είναι συγκρότημα συνδυαζόμενο με ειδική δεξαμενή αποχωρισμού λαδιού από το νερό κυτών, ώστε κατά την εξάντλησή τους να μη ρυπαίνεται ο γύρω από το πλοίο θαλάσσιος χώρος μέσα σε λιμάνια ή κοντά στις ακτές.

- **Αντλία εξαερισμού δικτύου κύτους.** Αναρροφά τυχόν αέρα του δικτύου κύτους, ώστε να διευκολύνεται η αναρρόφηση της αντλίας εξαντλήσεως κυτών.

2.3.5 Μηχανήματα Φορτίου

Τα μηχανήματα αυτά αποσκοπούν στην παραλαβή, αποθήκευση, μετακίνηση, εκφόρτωση του φορτίου ή και του έρματος (μόνο σε δεξαμενόπλοια).

Σ' αυτά προκειμένου για δεξαμενόπλοια, περιλαμβάνονται και όσα αφορούν την πλύση και τον εξαερισμό των δεξαμενών και τον τηλεχειρισμό των διαφόρων επιστομίων. Αυτά είναι τα εξής:

- **Μέσα φορτοεκφόρτωσης.** Ατμοκίνητα, ηλεκτρικά, υδραυλικά ή ηλεκτροϋδραυλικά για τη φόρτωση, μετακίνηση, εκφόρτωση ξηρών φορτίων. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία από αυτά. Μερικά σύγχρονα πλοία διαθέτουν κινητή γερανογέφυρα.
- **Μηχανήματα χειρισμού καλυμμάτων στομίων κυτών.** Και αυτά ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του πώματος του κύτους.

Εικόνα 2.13 : Hatch Cover

- **Αντλίες υγρών φορτίων.** Είναι αντλίες εμβολοφόρες ή φυγοκεντρικές που χρησιμεύουν για την εκφόρτωση υγρών φορτίων, καθώς επίσης και για ερματισμό και αφερματισμό.
- **Αντλίες αποστραγγίσεως (**stripping pumps). Για την αποστράγγιση των υπολοίπων, που παραμένουν στις δεξαμενές υγρών φορτίων και τα οποία οι κύριες αντλίες αδυνατούν να αναρροφήσουν, όταν είναι φυγοκεντρικές.
- **Εγκατάσταση πλύσεως δεξαμενών.** Αποτελείται από αντλία με προθερμαντήρα του θαλασσινού νερού στο κατάστρωμα των δεξαμενοπλοίων για την αποτελεσματική πλύση των δεξαμενών φορτίου.

- **Εγκατάσταση τηλεχειρισμού επιστομίων φορτίου.** Είναι συνηθισμένη στα δεξαμενόπλοια. Αποτελείται από συγκρότημα αντλιών λαδιού, το οποίο μέσω κατάλληλων σωληνώσεων ενεργεί υπό πίεση μέσα σε ειδικούς ελαιοκίνητους μηχανισμούς που βρίσκονται επάνω από το επιστόμιο και που ανοίγουν ή κλείνουν το επιστόμιο. Ο χειρισμός πραγματοποιείται από ειδικό διαμέρισμα ελέγχου, στο οποίο υπάρχει ενδεικτικός πίνακας όπου εμφανίζονται τα ανοικτά ή κλειστά επιστόμια. Στο ίδιο διαμέρισμα υπάρχουν ενδεικτικά όργανα για την από απόσταση ανάγνωση της στάθμης σε κάθε δεξαμενή, καθώς και του πρωραίου και του πρυμναίου βυθίσματος του πλοίου.

Εικόνα 2.14 : Τηλεχειριζόμενο επιστόμιο

- **Εγκατάσταση φορτοεκφορτώσεων αερίων φορτίων.** Συνήθως τα πλοία μεταφοράς αερίων καλούμενα LPG Tankers (Liquiffed Petroleum Gas Tankers) ή δεξαμενόπλοια μεταφοράς υγροποιημένων αερίων προϊόντων πετρελαίου μεταφέρουν αμμωνία, προπάνιο ή βουτάνιο.

2.4 Συστήματα Ναυσιπλοΐας – Τηλεπικοινωνιών

- **Ραντάρ Ναυσιπλοΐας.** Τα ραντάρ ναυσιπλοΐας, ανιχνεύουν την επιφάνεια της θάλασσας. Ανιχνεύουν όμως και τον εναέριο χώρο, αλλά σε μικρό ύψος.

Εντοπίζουν στερεά αντικείμενα από σχετικά αγώγιμο υλικό (στόχους), που βρίσκονται στην επιφάνεια της θάλασσας ή σε μικρό ύψος και παρέχουν ακριβείς πληροφορίες αποστάσεων και διοπτεύσεων των στόχων που εντοπίζουν. Ο εντοπισμός των στόχων επιτυγχάνεται ανεξάρτητα από τις συνθήκες ορατότητας και σε αποστάσεις μεγαλύτερες από αυτές του ορατού ορίζοντα. Χρησιμοποιούνται για να διασφαλίζουν την ασφαλή ναυσιπλοΐα, τον εντοπισμό εχθρικών ή μη πλοίων και την ύπαρξη ή μη αντικειμένων (στόχων) στην επιφάνεια της θάλασσας.

Εικόνα 2.15α : Ραντάρ ναυσιπλοΐας

Εικόνα 2.15β : Επαναλήπτης Ραντάρ ναυσιπλοΐας

- **Γυροσκοπικές Πυξίδες** Η πυξίδα είναι όργανο με το οποίο επιτυγχάνεται ο προσανατολισμός του χρήστη, δείχνοντάς του την κατεύθυνση του Βορρά. Ιδιαίτερα όμως στη ναυσιπλοΐα αποτελεί το σημαντικότερο "ναυτιλιακό βοήθημα" με το οποίο μετρούνται και πραγματοποιούνται τόσο οι πορείες των πλοίων, όσο και οι διοπτεύσεις.

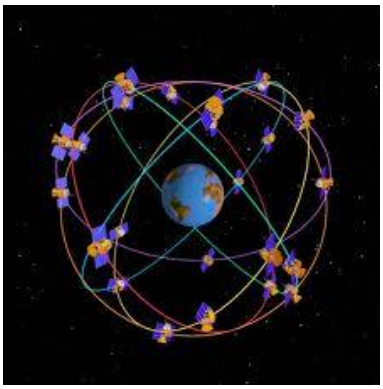
Εικόνα 2.16 : Γυροσκοπική πυξίδα

Η ναυτική πυξίδα σήμερα διακρίνεται στη μαγνητική πυξίδα (magnetic compass) που βασίζεται στη λειτουργία της μαγνητικής βελόνης και είναι η πλέον διαδεδομένη, και στη γυροσκοπική πυξίδα (gyro compass) που βασίζεται στην ταχεία περιστροφή του ελεύθερου γυροσκοπίου με μηδενικό σχεδόν σφάλμα.

- **Ηλεκτρονικά Συστήματα Απεικόνισης Χαρτών και Πληροφοριών** Το ECDIS (Electronic Chart Display and Information Systems) είναι συνδυασμός πολλών διαφορετικών ναυτιλιακών βοηθημάτων, συσκευών και οργάνων (ηλεκτρονικοί χάρτες ναυσιπλοΐας, RADAR/ARPA, GPS, πυξίδα, βυθόμετρο) σε μια κεντρική οθόνη από όπου μπορεί να παρακολουθείται πλήρως ο πλους και να ρυθμίζονται τα στοιχεία του. Η άμεση απεικόνιση στην οθόνη του συστήματος όλων των βασικών στοιχείων του πλου (στίγμα, πορείες, ταχύτητες, αληθής και σχετική κίνηση στόχων) μειώνει σημαντικά την ένταση εργασίας στη γέφυρα και συμβάλλει στην ασφάλεια της ναυσιπλοΐας παρέχοντας τη δυνατότητα λήψεως άμεσων και σωστών αποφάσεων

Εικόνα 2.17 : ECDIS

- **Συσκευές εντοπισμού στίγματος GPS.** Το GPS (Global Positioning System) ή αλλιώς το Παγκόσμιο Σύστημα Θεσιθεσίας είναι ένα παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης, το οποίο βασίζεται σε ένα "πλέγμα" εικοσιτεσσάρων δορυφόρων της Γης, στους οποίους υπάρχουν ειδικές συσκευές, οι οποίες ονομάζονται "δέκτες GPS". Οι δέκτες αυτοί παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για τη θέση ενός σημείου, το υψόμετρό του, την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης του. Επίσης, σε συνδυασμό με ειδικό λογισμικό χαρτογράφησης μπορούν να απεικονίσουν γραφικά τις πληροφορίες αυτές.



Εικόνα 2.18 : Δορυφόροι GPS

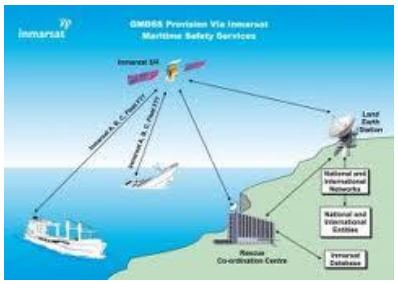
Το σύστημα ξεκίνησε από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ και ονομάστηκε "NAVSTAR GPS" (Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System). Το δορυφορικό αυτό σύστημα ρυθμίζεται καθημερινά από τη Βάση Πολεμικής Αεροπορίας Σρίβερ (Schriever) με κόστος 400 εκατομμύρια δολάρια το χρόνο.

Εικόνα 2.19 : GPS

- **Δορυφορικές επικοινωνίες** Ο INMARSAT (International Maritime Satellite Organization) είναι διεθνής οργανισμός με έδρα το Λονδίνο, και ως σκοπό έχει την παροχή παγκόσμιων δορυφορικών επικοινωνιών στον τομέα της Ναυτιλίας. Ιδρύθηκε το 1979 και χρηματοδότες του είναι 86 κράτη - μέλη μεταξύ αυτών και η Ελλάδα.

Υπηρεσίες:

- Τηλετυπικές
- Τηλεφωνικές
- Τηλεγραφικές
- Φαξ
- Εικόνα αργής σάρωσης
- Κίνδυνος και ασφάλεια



Εικόνα 2.20 : Αρχή λειτουργίας δορυφορικών επικοινωνιών

Εικόνα 2.21 : Σύστημα δορυφορικών επικοινωνιών

Και μια σειρά από σύγχρονες υπηρεσίες:

- Ηλεκτρονικό Ταχυδρομείο
- Πληροφορίες καιρού σε πραγματικό χρόνο
- Ασφάλεια GMDSS
- Απομακρυσμένη πρόσβαση στο διαδίκτυο
- Ασφαλείς επικοινωνίες
- Μεταφορά μεγάλων αρχείων
- Επικοινωνίες για το πλήρωμα
- Τηλεμετρία σκάφους/μηχανής
- Αποστολή SMS και άμεσων μηνυμάτων
- Βιντεοκλήσεις
- Βίντεο αποθήκευσης και προώθησης

2.5 Φωτισμός

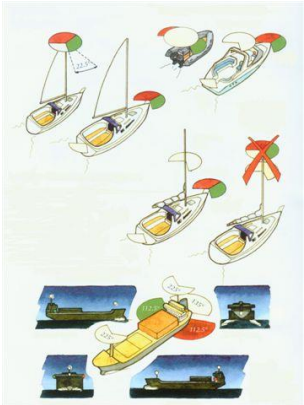
Εξυπηρετείται συνήθως από τάση 110Volts, τριών φάσεων, 60 Hz ή 220Volts, τριών φάσεων, 50 Hz. Το κάθε φωτιστικό σώμα συνδέεται μεταξύ δύο φάσεων. Από τα φωτιστικά στοιχεία τα περισσότερα είναι λαμπτήρες φθορισμού.

2.5.1 Φωτισμός Ανάγκης

Ο φωτισμός ανάγκης συνήθως πραγματοποιείται με λάμπες φθορισμού, οι οποίες τροφοδοτούνται από αποκλειστικό κύκλωμα συσσωρευτών 12Volts DC. Η τροφοδότηση των συστοιχιών γίνεται από μονάδες τροφοδοτήσεως κάθε μια από τις οποίες είναι ικανή για τη σύνδεση μιας, δύο ή τριών συστοιχιών. Η μονάδα τροφοδοτήσεως είναι εφοδιασμένη με αλκαλικά (συνήθως) αεροστεγή στοιχεία και ένα κύκλωμα, το οποίο με τη διακοπή της πρωτεύουσας τροφοδοτήσεως αυτόματα ανάβει τις λάμπες φωτισμού ανάγκης, ενώ, όταν ξαναρχίζει η πρωτεύουσα τροφοδότηση, 'γυρίζει' στην κατάσταση φορτίσεως της μπαταρίας.

Ακόμα παρέχονται:

α. επιχειρησιακός φωτισμός
β. φώτα καταστρωμάτων και ιστών
γ. προβολείς σημάτων
δ. φωτοστολισμός
ε. φωτισμός προσανατολισμού.



Εικόνα 2.22 : Πλοϊκά φώτα

2.6 Παράδειγμα Ηλεκτρικού Ισολογισμού Πλοίου

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η ευρύτητα χρήσης των επαγωγικών κινητήρων επί ενός πλοίου, παρατίθεται παρακάτω ηλεκτρικός ισολογισμός ενός ντιζελοκίνητου πλοίου που έχει ανεξάρτητες ηλεκτροκίνητες αντλίες νερού και λαδιού για τις ακόλουθες καταστάσεις:

α. κανονικής πορείας,

β. χειρισμών,

γ. εν όρμω,

δ. ανάγκης - πυρκαγιάς

Αναλυτικά οι καταναλωτές καταγράφονται στον πίνακα 1.

$0^{η}$ στήλη: Αύξων αριθμός καταναλωτή

$1^{η}$ στήλη: Είδος καταναλωτή

$2^{η}$ στήλη: Βαθμός απόδοσης καταναλωτή **η** . Τέθηκε 0,85 για πάσης φύσεως κινητήρες και 1,00 για ωμικά φορτία.

$3^{η}$ στήλη: Πλήθος συσκευών **N** .

$4^{η}$ στήλη: Ονομαστική αποδιδόμενη ισχύς σε HP ανά συσκευή $\mathbf{P_{ον.αποδ.}}$ [HP]

$5^{η}$ στήλη: Ονομαστική αποδιδόμενη ισχύς σε kW ανά συσκευή $\mathbf{P_{ον.αποδ.}}$ [kW], όπου:

$$\mathbf{P_{ον.αποδ.}}\ [kW] = \mathbf{P_{ον.αποδ.}}\ [HP] * 0{,}736 \qquad (2.1)$$

$6^{η}$ στήλη: Ονομαστική απορροφώμενη ισχύς σε HP ανά συσκευή $\mathbf{P_{ον.απορροφ.}}$ [kW], όπου:

$$\mathbf{P_{ον.απορροφ.}}\ [kW] = \mathbf{P_{ον.αποδ.}}\ [kW] / \boldsymbol{\eta} \qquad (2.2)$$

$7^{η}$ στήλη: Εγκατεστημένη ισχύς σε kW ανά κατηγορία συσκευής $\mathbf{P_{εγκατ.}}$ [kW], όπου:

$$\mathbf{P_{εγκατ.}}\ [kW] = \mathbf{P_{ον.απορροφ.}}\ [kW] * \mathbf{N} \qquad (2.3)$$

$8^{η}$ στήλη: Πλήθος κινητήρων **N** σε λειτουργία κατά την κατάσταση κανονικής πορείας.

$9^{η}$ στήλη: Συντελεστής λειτουργίας κάθε συσκευής $\mathbf{f_s}$ κατά την κατάσταση κανονικής πορείας. Ο ορθός τρόπος υπολογισμού γίνεται με μελέτη της εκάστοτε συσκευής και δίνεται από τη σχέση:

$$f_s = \frac{\text{Μέσο φορτίο 24}-\text{ώρου}}{\text{Ονομαστικό φορτίο}} = \frac{\sum_i P_i \cdot t_i}{24 \cdot P_{ον.αποδ.}} \qquad (2.4)$$

Όπου P_i είναι η ισχύς λειτουργίας κατά τη χρονική περίοδο i του 24ώρου και t_i οι ώρες λειτουργίας με ισχύ P_i κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου.

10η στήλη: Ισχύς σε λειτουργία σε kW ανά κατηγορία συσκευής $\mathbf{P_{λειτ.}}$ [kW] κατά την κατάσταση κανονικής πορείας, όπου:

$$\mathbf{P_{λειτ.}}\ [kW] = \mathbf{P_{ον.απορροφ.}}\ [kW] * \mathbf{f_S} * \mathbf{N} \qquad (2.5)$$

11η στήλη: Πλήθος κινητήρων **N** σε λειτουργία κατά την κατάσταση χειρισμών.

12η στήλη: Συντελεστής λειτουργίας κάθε συσκευής $\mathbf{f_s}$ κατά την κατάσταση χειρισμών.

13η στήλη: Ισχύς σε λειτουργία σε kW ανά κατηγορία συσκευής $\mathbf{P_{λειτ.}}$ [kW] κατά την κατάσταση χειρισμών με βάση τη σχέση (2.5).

14η στήλη: Πλήθος κινητήρων **N** σε λειτουργία κατά την κατάσταση «εν όρμω».

15η στήλη: Συντελεστής λειτουργίας κάθε συσκευής $\mathbf{f_s}$ κατά την κατάσταση «εν όρμω».

16η στήλη: Ισχύς σε λειτουργία σε kW ανά κατηγορία συσκευής $\mathbf{P_{λειτ.}}$ [kW] κατά την κατάσταση «εν όρμω» με βάση τη σχέση (2.5).

Τα ηλεκτρικά φορτία κατηγοριοποιούνται ως ακολούθως :

- Βοηθητικά πρόωσης
- Πίνακας βοηθητικών μηχανοστασίου
- Βοηθητικά σκάφους
- Βοηθητικά χώρων ενδιαίτησης
- Συσκευές μαγειρείου
- Πίνακες φωτισμού
- Πίνακας οργάνων ναυσιπλοΐας
- Εφεδρική παροχή

Πίνακας 1: Λεπτομερής Ηλεκτρικός Ισολογισμός

	ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ	η	N	Εγκατεστημένη Ισχύς				Ισχυς Κανονικης Πορείας			Ισχύς Χειρισμών			Ισχύς εν όρμω		
				$P_{ον.αποδ.}$		$P_{ον.απορροφ.}$	$P_{εγκατ.}$	N	f_s	$P_{λειτ.}$	N	f_s	$P_{λειτ.}$	N	f_s	$P_{λειτ.}$
				PS	kW	kW	kW			kW			kW			kW
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΟΩΣΗΣ															
1	*Κύριοι Αεροσυμπιεστές*	0,850	2	25	18,40	21,65	43,29	1	0,10	2,16	1	0,85	18,40	1	0,10	2,16
2	*Αντλίες λαδιού λίπανσης Κ.Μ.*	0,850	2	45	33,12	38,96	77,93	1	0,85	33,12	1	0,85	33,12	0	0,00	0,00
3	*Διαχωριστήρες πετρελαίου*	0,850	3	20	14,72	17,32	51,95	1	0,70	12,12	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
4	*Αντλία Μετάγγισης Πετρελαίου Diesel*	0,850	1	5	3,68	4,33	4,329	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	1	0,10	0,43
5	*Αεροσυμπιεστές Εκκινήσεως*	0,850	2	40	29,44	34,64	69,27	1	0,10	3,46	1	0,85	29,44	1	0,10	3,46
6	*Αεροσυμπιεστής Αυτοματισμού*	0,850	1	35	25,76	30,31	30,31	1	0,20	6,06	1	0,20	6,06	1	0,20	6,06
7	*Αντλία Συμπυκνώματος*	0,850	2	12	8,83	10,39	20,78	1	0,40	4,16	1	0,40	4,16	0	0,00	0,00
8	*Κινητήρες Μηχανισμού Πηδαλίου*	0,850	2	35	25,76	30,31	60,61	1	0,10	3,03	1	0,20	6,06	0	0,00	0,00
9	*Μηχανισμοί περιστροφής άξονα*	0,850	2	10	7,36	8,66	17,32	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	1	0,80	6,93
10	*Ανεμιστήρας Προσαγωγής Αέρα Λέβητα*	0,850	1	4	2,94	3,46	3,464	1	0,50	1,73	1	0,50	1,73	1	0,20	0,69
11	*Αντλίες Κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων Κ.Μ.*	0,850	2	35	25,76	30,31	60,61	1	0,85	25,76	1	0,85	25,76	0	0,00	0,00
12	*Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου*	0,850	2	10	7,36	8,66	17,32	1	0,80	6,93	1	0,80	6,93	0	0,00	0,00
13	*Θερμαντήρες καυσίμου*	1,000	2		15,00	15,00	30	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	1	0,10	1,50
14	*Αντλίες μετάγγισης βαρέως πετρελαιου*	0,850	2	20	14,72	17,32	34,64	1	0,10	1,73	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
15	*Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλ. Νερου*	0,850	3	85	62,56	73,60	220,8	2	0,85	125,12	2	0,85	125,1	0	0,00	0,00
16	*Αντλίες ψύξης βαλβίδων Κ.Μ*	0,850	2	25	18,40	21,65	43,29	1	0,85	18,40	1	0,85	18,40	0	0,00	0,00
17	*Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα*	0,850	2	8	5,89	6,93	13,85	1	0,85	5,89	1	0,85	5,89	0	0,00	0,00
18	*Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου*	0,850	4	40	29,44	34,64	138,5	3	0,85	88,32	3	0,85	88,32	2	0,20	13,85

19	*Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης*	0,850	2	14	10,30	12,12	24,24	1	0,35	4,24	1	0,35	4,24	0	0	0
										342,24			**373,63**			**35,10**
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ															
1	*Γερανογέφυρα*	0,850	1	15	11,04	12,99	12,99	1	0,50	6,49	1	0,50	6,49	1	0,00	0,00
2	*Τόρνος*	0,850	1	5	3,68	4,33	4,329	1	0,10	0,43	0	0,00	0,00	1	0,10	0,43
3	*Δράπανο*	0,850	1	2	1,47	1,73	1,732	1	0,10	0,17	0	0,00	0,00	1	0,10	0,17
4	*Συσκευή συγκολλήσεων*	0,850	1		20,00	23,53	23,53	1	0,10	2,35	0	0,00	0,00	1	0,10	2,35
5	*Μονάδα επεξεργασίας Αποβλήτων*	0,850	2		18,00	21,18	42,35	1	0,40	8,47	1	0,40	8,47	1	0,40	8,47
6	*Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες*	0,850	4	20	14,72	17,32	69,27	1	0,10	1,73	1	0,00	0,00	1	0,10	1,73
7	*Εφεδρική παροχή*	0,850	2		15,00	17,65	35,29	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
										19,66			**14,96**			**13,16**
	ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ															
1	*Αντλία κύτους*	0,850	1	20	14,72	17,32	17,32	1	0,20	3,46	0	0,00	0,00	1	0,20	3,46
2	*Αντλία πυρκαγιάς*	0,850	1	45	33,12	38,96	38,96	1	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
3	*Αντλίες γενικής χρήσης*	0,850	2	50	36,80	43,29	86,59	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
4	*Εργάτης άγκυρας*	0,850	2	40	29,44	34,64	69,27	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	1	0,10	3,46
5	*Εργάτες πρυμνησίων*	0,850	1	45	33,12	38,96	77,93	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	1	0,20	7,79
6	*Αντλία ποσίμου νερού*	0,850	2	15	11,04	12,99	25,98	1	0,50	6,49	1	0,50	6,49	1	0,50	6,49
7	*Αντλία κυκλ. ζεστού νερού*	0,850	1	5	3,68	4,33	4,329	1	0,70	3,03	1	0,70	3,03	1	0,70	3,03
8	*Αντλία πλυσίματος καταστρώματος*	0,850	1	15	11,04	12,99	12,99	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
9	*Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης*	0,850	1	20	14,72	17,32	17,32	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	1	0,10	1,73
10	*Αντλίες υγιεινής*	0,850	2	10	7,36	8,66	17,32	2	0,40	6,93	2	0,40	6,93	2	0,40	6,93
11	*Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας*	0,850	2	25	18,40	21,65	43,29	2	0,10	4,33	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00

12	*Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων*	0,850	4	20	14,72	17,32	69,27	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
13	*Αντλία στεγανών θυρών*	0,850	1	5	3,68	4,33	4,329	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
14	*Αντλία πυρκαγιάς garage*	0,850	4	30	22,08	25,98	25,98	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
										24,24			**16,45**			**32,90**
	ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ															
1	*Συμπιεστές κλιματισμού*	0,850	2	***35***	25,76	30,31	60,61	1	0,75	22,73	1	0,75	22,73	1	0,75	22,73
2	*Συμπιεστές ψυκτικής*	0,850	2	10	7,36	8,66	17,32	2	0,40	6,93	2	0,40	6,93	2	0,40	6,93
3	*Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού*	0,850	2	20	14,72	17,32	34,64	2	0,75	25,98	2	0,75	25,98	2	0,75	25,98
4	*Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού*	0,850	2	15	11,04	12,99	25,98	2	0,75	19,48	2	0,75	19,48	2	0,75	19,48
5	*Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής*	0,850	2	2	1,47	1,73	3,464	2	0,40	1,39	2	0,40	1,39	2	0,40	1,39
6	*Αντλίες πόσιμου νερού*	0,850	2	4	2,94	3,46	6,927	2	0,50	3,46	2	0,50	3,46	2	0,50	3,46
7	*Αντλίες αποχέτευσης*	0,850	2	10	7,36	8,66	17,32	2	0,70	12,12	2	0,70	12,12	2	0,70	12,12
8	*Αντλίες θερμού νερού*	0,850	2	3	2,21	2,60	5,195	2	0,70	3,64	2	0,70	3,64	2	0,70	3,64
9	*Συμπιεστής παγωτομηχανής*	0,850	1	1,5	1,10	1,30	1,299	1	0,80	1,04	1	0,80	1,04	1	0,80	1,04
10	*Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων*	0,850	12	1	0,74	0,87	10,39	12	0,80	8,31	12	0,80	8,31	12	0,80	8,31
11	*Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης*	0,850	12	5	3,68	4,33	51,95	12	0,85	44,16	12	0,85	44,16	12	0,85	44,16
12	*Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες*	0,850	7	10	7,36	8,66	60,61	7	0,40	24,24	7	0,40	24,24	7	0,40	24,24
13	*Ανελκυστήρας*	0,850	2	15	11,04	12,99	25,98	2	0,20	5,20	0	0,00	0,00	2	0,50	12,99
										178,67			**173,48**			**186,47**
	ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ															
1	*Κουζίνα*	1,000	2		30,00	30,00	60	2	0,30	18,00	1	0,30	9,00	1	0,30	9,00
2	*Εστίες*	1,000	2		20,00	20,00	40	2	0,30	12,00	1	0,30	6,00	1	0,30	6,00
3	*Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα*	0,850	1	6	4,42	5,20	5,195	1	0,30	1,56	1	0,30	1,56	1	0,30	1,56

4	*Εξαεριστήρας*	0,850	1	15	11,04	12,99	12,99	1	0,30	3,90	1	0,30	3,90	1	0,30	3,90
5	*Πλυντήριο πιάτων*	0,850	1	2	1,47	1,73	1,732	1	0,20	0,35	1	0,00	0,00	1	0,20	0,35
6	*Διάφορες συσκευές*	0,850	4		2,00	2,35	9,412	4	0,30	2,82	2	0,30	1,41	2	0,30	1,41
										38,62			**21,87**			**22,21**
	ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ															
1	*Μηχανοστάσιο*	1,000	1		22,00	22,00	22	1	1,00	22,00	1	1,00	22,00	1	1,00	22,0
2	*Γέφυρα*	1,000	1		15,00	15,00	15	1	0,50	7,50	1	0,50	7,50	1	0,50	7,5
3	*Χώροι ενδιάιτησης*	1,000	2		12,00	12,00	24	2	0,40	9,60	2	0,40	9,60	2	0,40	9,6
4	*Καταστρώματος*	1,000	2		9,00	9,00	18	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	2	0,90	16,2
										39,10			**39,10**			**55,30**
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΝΑΥΣΙΠΛΟΙΑΣ	0,850	1		18,00	21,18	21,18	1	0,50	10,59	1	0,50	10,59	1	0,25	5,3
										10,59			**10,59**			**5,29**
	ΕΦΕΔΡΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ	0,850	1		15,00	17,65	17,65	0	0,00	8,82	0	0,00	0,00	0	0,0	0,0
										0,00			**0,00**			**0,00**
	ΣΥΝΟΛΟ									**653,1**			**650,1**			**350,4**

Η συνολική καταναλισκόμενη ισχύς είναι:

- Κατάσταση κανονικής πορείας = 653,1 kW
- Κατάσταση χειρισμών = 650,1 kW
- Κατάσταση εν όρμω = 350,4 kW

Το πλοίο έχει εξοπλιστεί με δύο ντιζελογεννήτριες των 500 kW ως κύριες ηλεκτρογεννήτριες, γιατί:

Με μία γεννήτρια εκτός λειτουργίας πρέπει να είναι δυνατή η τροφοδότηση όλων των μηχανημάτων που είναι απαραίτητα για την ασφάλεια και πρόωση και τη διατήρηση του φορτίου.

Το συνολικό φορτίο είναι μικρότερο των 2200 kW επιλέγεται πλήθος γεννητριών ίσο με **2.**

Πρόκειται για ένα ντιζελοκίνητο πλοίο άρα θα χρησιμοποιηθούν ντιζελογεννήτριες.

Ακόμα και αν μία γεννήτρια τεθεί εκτός λειτουργίας, μένει σε λειτουργία ή άλλη γεννήτρια, η οποία μπορεί να καλύψει το φορτίο κανονικής πορείας της τάξης 70%-80%, πράγμα το οποίο ισχύει γιατί:

653,1 kW * 0,70 = 457,2 kW
653,1 kW * 0,80 = 522,5 kW

Το πλοίο έχει εξοπλιστεί με μία ντιζελογεννήτρια ***ασφαλείας ονομαστική***ς ισχύος 500 kW, γιατί:

Επιπλέον των στοιχείων του πίνακα 2, είναι γνωστή η ισχύς του φωτισμού που καλύπτεται από τη γεννήτρια ασφαλείας: 10 kW, άρα η συνολική μέγιστη ισχύς ανέρχεται σε 497,5 kW.

Πίνακας 2: Ηλεκτρικός ισολογισμός σε κατάσταση ανάγκης – πυρκαγιάς

	ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ	**η**	**N**	**Εγκατεστημένη Ισχύς**				**Ισχύς κατάστασης ανάγκης-πυρκαγιάς**		
				$P_{ον.αποδ.}$		**$P_{ον.απορροφ.}$**	**$P_{εγκατ.}$**	**N**	**f_s**	**$P_{λειτ.}$**
				PS	**kW**	**kW**	**kW**			**kW**
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΟΩΣΗΣ									
1	*Κύριοι Αεροσυμπιεστές*	0,850	2	***25***	18,40	21,65	43,29	1	0,10	2,16
2	*Αντλίες λαδιού λίπανσης Κ.Μ.*	0,850	2	45	33,12	38,96	77,93	1	0,85	33,12
3	*Διαχωριστήρες πετρελαίου*	0,850	3	20	14,72	17,32	51,95	1	0,70	12,12
4	*Αντλία Μετάγγισης Πετρελαίου Diesel*	0,850	1	5	3,68	4,33	4,329	0	0,00	0,00
5	*Αεροσυμπιεστές Εκκινήσεως*	0,850	2	40	29,44	34,64	69,27	1	0,10	3,46
6	*Αεροσυμπιεστής Αυτοματισμού*	0,850	1	35	25,76	30,31	30,31	1	0,20	6,06
7	*Αντλία Συμπυκνώματος*	0,850	2	12	8,83	10,39	20,78	1	0,40	4,16
8	*Κινητήρες Μηχανισμού Πηδαλίου*	0,850	2	35	25,76	30,31	60,61	1	0,10	3,03
9	*Μηχανισμοί περιστροφής άξονα*	0,850	2	10	7,36	8,66	17,32	0	0,00	0,00
10	*Ανεμιστήρας Προσαγωγής Αέρα Λέβητα*	0,850	1	4	2,94	3,46	3,464	1	0,50	1,73
11	*Αντλίες Κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων Κ.Μ.*	0,850	2	35	25,76	30,31	60,61	1	0,85	25,76
12	*Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου*	0,850	2	10	7,36	8,66	17,32	1	0,80	6,93
13	*Θερμαντήρες καυσίμου*	1,000	2		15,00	15,00	30	0	0,00	0,00

14	*Αντλίες μετάγγισης βαρέως πετρελαιου*	0,850	2	20	14,72	17,32	34,64	0	0,00	0,00
15	*Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλ. Νερου*	0,850	3	***85***	62,56	73,60	220,8	2	0,85	125,12
16	*Αντλίες ψύξης βαλβίδων Κ.Μ.*	0,850	2	25	18,40	21,65	43,29	1	0,85	18,40
17	*Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα*	0,850	2	8	5,89	6,93	13,85	1	0,85	5,89
18	*Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου*	0,850	4	40	29,44	34,64	138,5	2	0.85	58.88
19	*Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης*	0,850	2	14	10,30	12,12	24,24	1	0.35	4.24
										311,07
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ									
1	*Γερανογέφυρα*	0,850	1	15	11,04	12,99	12,99	0	0,00	0,00
2	*Τόρνος*	0,850	1	5	3,68	4,33	4,329	0	0,00	0,00
3	*Δράπανο*	0,850	1	2	1,47	1,73	1,732	0	0,00	0,00
4	*Συσκευή συγκολλήσεων*	0,850	1		20,00	23,53	23,53	0	0,00	0,00
5	*Μονάδα επεξεργασίας Αποβλήτων*	0,850	2		18,00	21,18	42,35	0	0,00	0,00
6	*Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες*	0,850	4	20	14,72	17,32	69,27	0	0,00	0,00
7	*Εφεδρική παροχή*	0,850	2		15,00	17,65	35,29	0	0,00	0,00
										0,00
	ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ									
1	*Αντλία κύτους*	0,850	1	20	14,72	17,32	17,32	1	0,20	3,46
2	*Αντλία πυρκαγιάς*	0,850	1	45	33,12	38,96	38,96	1	0,75	29,22
3	*Αντλίες γενικής χρήσης*	0,850	2	50	36,80	43,29	86,59	1	0,50	21,65
4	*Εργάτης άγκυρας*	0,850	2	40	29,44	34,64	69,27	0	0,00	0,00
5	*Εργάτες πρυμνησίων*	0,850	1	***45***	33,12	38,96	77,93	0	0,00	0,00
6	*Αντλία ποσίμου νερού*	0,850	2	15	11,04	12,99	25,98	1	0,25	3,25
7	*Αντλία κυκλ. ζεστού νερού*	0,850	1	5	3,68	4,33	4,329	0	0,00	0,00
8	*Αντλία πλυσίματος καταστρώματος*	0,850	1	15	11,04	12,99	12,99	1	0,50	6,49
9	*Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης*	0,850	1	20	14,72	17,32	17,32	0	0,00	0,00
10	*Αντλίες υγιεινής*	0,850	2	10	7,36	8,66	17,32	1	0,40	3,46
11	*Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας*	0,850	2	25	18,40	21,65	43,29	2	0,10	4,33
12	*Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων*	0,850	4	20	14,72	17,32	69,27	4	0,05	3,46
13	*Αντλία στεγανών θυρών*	0,850	1	5	3,68	4,33	4,329	1	0,05	0,22
14	*Αντλία πυρκαγιάς garage*	0,850	4	30	22,08	25,98	25,98	1	0,75	19,48
										95,03

	ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ									
1	*Συμπιεστές κλιματισμού*	0,850	2	***35***	25,76	30,31	60,61	0	0,00	0,00
2	*Συμπιεστές ψυκτικής*	0,850	2	10	7,36	8,66	17,32	0	0,00	0,00
3	*Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού*	0,850	2	20	14,72	17,32	34,64	0	0,00	0,00
4	*Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού*	0,850	2	15	11,04	12,99	25,98	0	0,00	0,00
5	*Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής*	0,850	2	2	1,47	1,73	3,464	0	0,00	0,00
6	*Αντλίες πόσιμου νερού*	0,850	2	4	2,94	3,46	6,927	1	0,50	1,73
7	*Αντλίες αποχέτευσης*	0,850	2	10	7,36	8,66	17,32	1	0,70	6,06
8	*Αντλίες θερμού νερού*	0,850	2	3	2,21	2,60	5,195	0	0,00	0,00
9	*Συμπιεστής παγωτομηχανής*	0,850	1	1,5	1,10	1,30	1,299	0	0,00	0,00
10	*Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων*	0,850	12	1	0,74	0,87	10,39	0	0,00	0,00
11	*Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης*	0,850	12	5	3,68	4,33	51,95	6	0,85	22,08
12	*Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες*	0,850	7	10	7,36	8,66	60,61	0	0,00	0,00
13	*Ανελκυστήρας*	0,850	2	15	11,04	12,99	25,98	0	0,00	0,00
										29,87
	ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ									
1	*Κουζίνα*	1,000	2		30,00	30,00	60	0	0,00	0,00
2	*Εστίες*	1,000	2		20,00	20,00	40	0	0,00	0,00
3	*Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα*	0,850	1	6	4,42	5,20	5,195	0	0,00	0,00
4	*Εξαεριστήρας*	0,850	1	15	11,04	12,99	12,99	0	0,00	0,00
5	*Πλυντήριο πιάτων*	0,850	1	2	1,47	1,73	1,732	0	0,00	0,00
6	*Διάφορες συσκευές*	0,850	4		2,00	2,35	9,412	0	0,00	0,00
										0,00
	ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ									
1	Μηχανοστάσιο	1,000	1		22,00	22,00	22	1	1,00	22,00
2	Γέφυρα	1,000	1		15,00	15,00	15	1	0,50	7,50
3	Χώροι ενδιάιτησης	1,000	2		12,00	12,00	24	2	0,40	9,60
4	Καταστρώματος	1,000	2		9,00	9,00	18	2	0,10	1,80
										40,90
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΝΑΥΣΙΠΛΟΙΑΣ	0,850	1		18,00	21,18	21,18	1	0,50	10,59
										10,59
	ΕΦΕΔΡΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ	0,850	1		15,00	17,65	17,65	0	0,0	0,00
										0,00
	ΣΥΝΟΛΟ									**487,5**

Η κατάσταση εγκατάλειψης σκάφους δεν μελετάται, διότι προκύπτει πάντα μικρότερη ζήτηση ισχύος (άλλωστε λήφθηκε ήδη υπόψη η λειτουργία των βαρούλκων σωσίβιων λέμβων).

Από το ανωτέρω παράδειγμα του ηλεκτρικού ισολογισμού διαπιστώνεται το πλήθος και η σημαντικότητα των επαγωγικών κινητήρων που συναντά κανείς στο πλοίο, καθώς καλύπτουν το 77% με 90% των ηλεκτρικών αναγκών του πλοίου για διάφορες καταστάσεις.

3. ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

3.1 Εισαγωγή

Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις σύγχρονες (synchronous) και τις ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές. Οι σύγχρονες μηχανές, αντίθετα από τις επαγωγικές, χρησιμοποιούνται κυρίως ως γεννήτριες. Στην πρώτη περίπτωση το ρεύμα διέγερσης προέρχεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος (ΣΡ), ενώ στη δεύτερη περίπτωση το ρεύμα επάγεται στο κύκλωμα της διέγερσης. Επιπλέον, στις σύγχρονες μηχανές η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίδια με αυτή του πεδίου του στάτη, ενώ στις ασύγχρονες μηχανές είναι μικρότερη και εξαρτάται από το φορτίο. Σε αντίθεση με τις μηχανές ΣΡ, στις περισσότερες περιπτώσεις των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ), τα κυκλώματα διέγερσης βρίσκονται στο δρομέα και όχι στο στάτη.

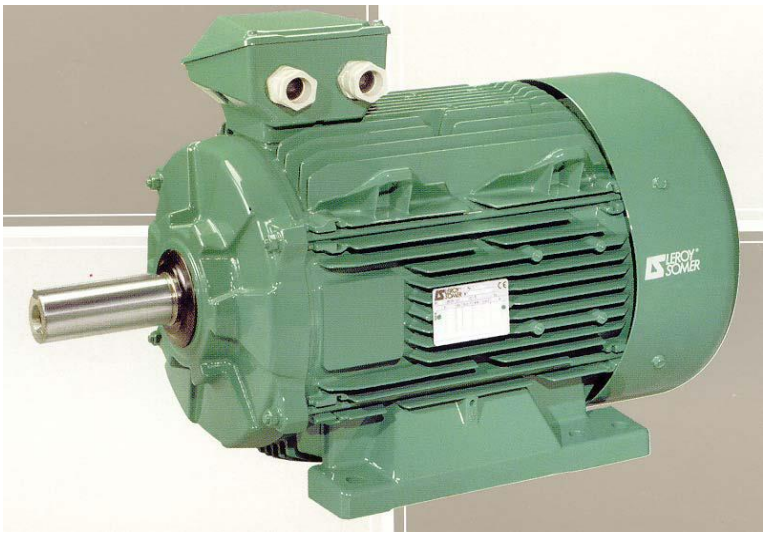
Οι τριφασικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όλων των κατηγοριών, έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας σύμφωνα με την οποία, λόγω του περιστρεφόμενου τριφασικού μαγνητικού πεδίου του στάτη επάγεται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη στο τύλιγμα του δρομέα. Το αποτέλεσμα είναι η ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο τύλιγμα του δρομέα, το μαγνητικό πεδίο του οποίου σε συνδυασμό με το μαγνητικό πεδίο του στάτη, δημιουργεί μια ροπή, η οποία θέτει σε περιστροφική κίνηση το δρομέα.

Στην περίπτωση των επαγωγικών κινητήρων η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα διαφέρει από την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη. Ο δρομέας περιστρέφεται ασύγχρονα σε σχέση με το περιστρεφόμενο πεδίο του στάτη. Αναλυτικότερα, το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται με συμμετρικά τριφασικά εναλλασσόμενα ρεύματα. Το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ρεύματα εξ επαγωγής σε συχνότητα διαφορετική από τη συχνότητα του στάτη και συγκεκριμένα στη συχνότητα ολίσθησης που αντιστοιχεί στη διαφορά ανάμεσα στη σύγχρονη ταχύτητα και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Έτσι, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγουν τα ρεύματα εξ επαγωγής περιστρέφεται ως προς το δρομέα με την ταχύτητα ολίσθησης και έχει τελικά την ίδια ταχύτητα περιστροφής με το πεδίο του στάτη. Τα δύο πεδία παραμένουν ακίνητα το ένα ως προς το άλλο και υπάρχουν οι συνθήκες για ανάπτυξη σταθερής ροπής.

Η ροπή αυτή τείνει να ευθυγραμμίσει τα μαγνητικά πεδία του αναπτύσσουν τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Αν το μαγνητικό πεδίο του στάτη μπορούσε

να στραφεί, τότε η αναπτυσσόμενη ροπή θα ανάγκαζε το δρομέα να ακολουθεί το μαγνητικό πεδίο του στάτη.

Επομένως, η λειτουργία των επαγωγικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος στηρίζεται στη δυνατότητα παραγωγής από το τύλιγμα του στάτη ενός στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 3.1 : Τυπική εξωτερική δομή ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα υψηλής απόδοσης.

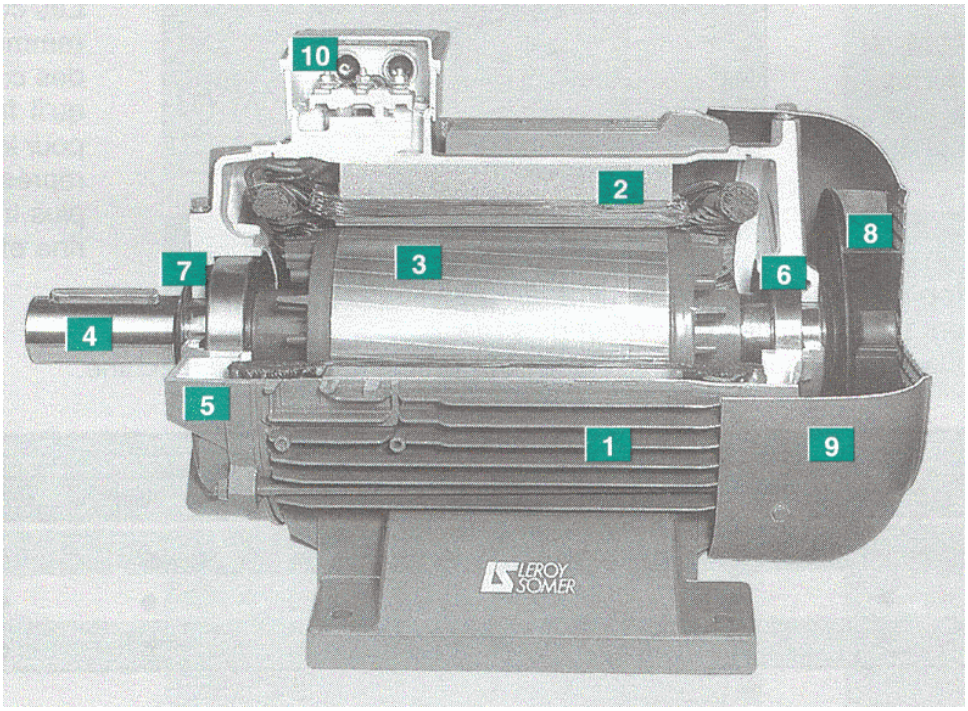
Οι κινητήρες επαγωγής αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τύπο ηλεκτρικού κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος και πιο συγκεκριμένα ο ασύγχρονος κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα έχει εκτοπίσει όλους τους άλλους τύπους κινητήρων και χρησιμοποιείται σήμερα σε ποσοστό μέχρι και 95% στις εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης, επειδή είναι φθηνός στην κατασκευή του, απλός και ασφαλής στη λειτουργία του.

Κύριο πλεονέκτημά του απέναντι στον κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι η έλλειψη συλλέκτη, αιτία πολλών κατασκευαστικών και λειτουργικών μειονεκτημάτων στη μηχανή συνεχούς ρεύματος. Επίσης πλεονεκτεί έναντι των σύγχρονων κινητήρων λόγω της μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής που έχει, δηλαδή υπάρχουν διατάξεις μέσω των οποίων μπορεί να επιτευχθεί μεταβλητός αριθμός στροφών, καθώς δεν χρειάζεται ειδικό σύστημα διέγερσης στο δρομέα.

Το μειονέκτημά του αντίστοιχα είναι ότι δεν μπορεί να διορθώσει ο ίδιος το συντελεστή ισχύος και γι' αυτό χρειάζεται ανεξάρτητη άεργο αντιστάθμιση που γίνεται συνήθως στους μεγάλους κινητήρες μέσω συστοιχίας πυκνωτών.

Σήμερα οι ηλεκτρικές μηχανές που κατασκευάζονται σε βιομηχανική κλίμακα είναι κυρίως οι εξής:

- Οι «Σύγχρονες μηχανές» που κυρίως χρησιμοποιούνται ως γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Οι «Ασύγχρονες μηχανές» που κυρίως χρησιμοποιούνται ως κινητήρες σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.
- Οι «Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος» των οποίων η χρήση περιορίζεται όπου απαιτείται έλεγχος στροφών.
- Οι «Κινητήρες Έλξεως» που χρησιμοποιούνται σε μεταφορικά μέσα που λειτουργούν με συχνότητα $16^{2/3}$ ή 25Hz.
- Οι «Κινητήρες Μικρής Ισχύος» που χρησιμοποιούνται στις οικιακές και παρόμοιες συσκευές, καθώς και ειδικοί ελεγχόμενοι μικροί κινητήρες με μεγάλες απαιτήσεις ακριβείας που χρησιμοποιούνται σε ιατρικά μηχανήματα.



Εικόνα 3.2 : Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας με βραχυκυκλωμένο κλωβό. Διακρίνονται τα παρακάτω μέρη: 1–Πτερύγια ψύξης του στάτη, 2–Ελάσματα του στάτη και το τύλιγμα, 3–Δρομέας, 4–Άξονας, 5–9–Κέλυφος, 6–7– Ρουλεμάν, 8–Ανεμιστήρας, 10–Κιβώτιο ηλεκτρικής σύνδεσης.

3.2 Δομή Επαγωγικού Κινητήρα

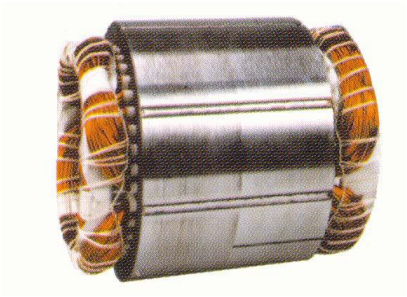
Οι επαγωγικοί κινητήρες ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής της συνδεσμολογίας του δρομέα χωρίζονται στις εξής βασικές κατηγορίες:

- βραχυκυκλωμένου δρομέα,
- δακτυλιοφόρου δρομέα

Ο επαγωγικός κινητήρας απαρτίζεται από δύο μέρη, από το στάτη (δηλαδή το ακίνητο τμήμα) και το δρομέα (δηλαδή το κινούμενο τμήμα).

Εικόνα 3.3 : Δομή επαγωγικού

Ο στάτης όλων των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος έχει την ίδια κατασκευαστική δομή. Έχει μια κυλινδρική δομή από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους. Στο εσωτερικό του φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται το τύλιγμα του στάτη, όπως εικονίζεται στην Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.4 : Εξωτερική δομή στάτη

Εικόνα 3.5 : Εσωτερική δομή στάτη

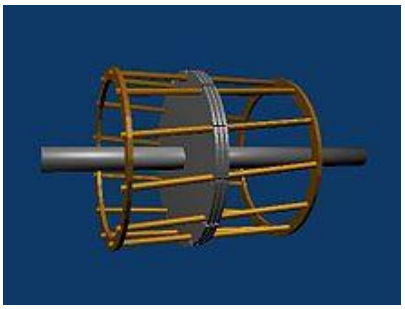
Όταν το τύλιγμα του στάτη είναι *τριφασικό*, η μηχανή χαρακτηρίζεται ως τριφασική. Όταν το τριφασικό τύλιγμα του στάτη διαρρέεται από ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, αναπτύσσεται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Οι επαγωγικοί κινητήρες ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής του τυλίγματος του δρομέα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες :

- **Ασύγχρονες Μηχανές Βραχυκυκλωμένου Δρομέα.**

Ο δρομέας των μηχανών αυτών είναι συμπαγής σχήματος κλωβού. Αντί για περιέλιξη φέρει αλουμινένια ελάσματα (ράβδους), τα οποία είναι κυκλικά τοποθετημένα σχηματίζοντας έναν κύλινδρο σχήματος κλωβού. Τα άκρα των αλουμινένιων ράβδων (παλαιότερα από χαλκό ή ορείχαλκο) είναι βραχυκυκλωμένα με αλουμινένιες στεφάνες. Στις επίπεδες επιφάνειες του κλωβού υπάρχουν πτερύγια από αλουμίνιο για τη δημιουργία ρεύματος αέρος (ψύξη) στο εσωτερικό της μηχανής. Μεγάλο του πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρα με οποιοδήποτε αριθμό πόλων.

Εικόνα 3.6 : Βραχυκυκλωμένος δρομέας



Εικόνα 3.7 : Κλωβός

- **Ασύγχρονες Μηχανές Τυλιγμένου Δρομέα**

Ο δρομέας των μηχανών αυτών διαθέτει αυλάκια εντός των οποίων τοποθετείται μία τριφασική περιέλιξη όμοια με αυτή του στάτη. Η περιέλιξη του δρομέα είναι συνδεδεμένη σε αστέρα. Τα τρία ελεύθερα άκρα της περιέλιξης οδηγούνται σε τρία δακτυλίδια από χαλκό.

Τα δακτυλίδια είναι τοποθετημένα γύρω από τον άξονα της μηχανής, έξω από την επιφάνεια του στάτη και είναι μονωμένα ως προς τον άξονα.

Εικόνα 3.8 : Τυλιγμένος δρομέας

Πάνω στα δακτυλίδια ακουμπούν τρεις ψήκτρες (κοινώς καρβουνάκια), οι οποίες καθώς περιστρέφεται ο άξονας, γλιστρούν πάνω στη λεία επιφάνεια των δακτυλιδιών.

Οι ψήκτρες είναι συνδεδεμένες σε αγωγούς, τα άκρα των οποίων οδηγούνται στο ακροκιβώτιο αποκτώντας πρόσβαση στην περιέλιξη του δρομέα. Ο δρομέας με δακτυλίους συγκρινόμενος με το δρομέα κλωβού είναι πιο ακριβός, διότι απαιτεί δακτυλίους, ψήκτρες και αντιστάσεις εκκινήσεως. Πλην αυτών συχνά προβλέπονται διατάξεις, οι οποίες επιτρέπουν μια ανύψωση των ψηκτρών και βραχυκύκλωση των δακτυλίων μετά την επίτευξη της εκκινήσεως. Επιπλέον το τύλιγμα κλωβού έχει λιγότερο αγώγιμο υλικό από το τύλιγμα δρομέα με δακτυλίους για την ίδια ισχύ. Εντούτοις κινητήρες με δακτυλιοφόρου δρομέα εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται λόγω των ιδιοτήτων τους κατά την εκκίνηση.

Εικόνα 3.9 : Ψήκτρες

- **Ασύγχρονες Μηχανές Με Δρομέα Χωρίς Αύλακες.**

Οι δρομείς αυτοί κατασκευάζονται συνήθως από ολόσωμο σίδηρο όπου επάγονται δινορρεύματα, ώστε να προκύψει χρήσιμη ροπή. Εντούτοις ο βαθμός απόδοσης, ο συντελεστής ισχύος και η ικανότητα υπερφόρτισης ενός τέτοιου κινητήρα είναι περιορισμένοι. Οι κινητήρες με ολόσωμους δρομείς χρησιμοποιούνται για συστήματα κίνησης με υψηλό αριθμό στροφών ανά λεπτό, επειδή έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή. Αναπτύσσουν σχετικώς μεγάλη ροπή εκκινήσεως και μικρό ρεύμα εκκινήσεως. Για τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους κατασκευάζεται ο δρομέας από στρώματα κατάλληλων υλικών. Η απλούστερη κατασκευή αυτού του τύπου είναι η τοποθέτηση φύλλου χαλκού επί της κυλινδρικής επιφάνειας ολόσωμου σιδήρου. Οι κινητήρες πολύ μικρής ισχύος για τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου έχουν το σίδηρο στο δρομέα ακίνητο, ενώ το στρεφόμενο μέρος του δρομέα κατασκευάζεται από αλουμίνιο, έχει τη μορφή κυπέλλου με ένα μόνο έδρανο. Το κύπελλο περιβάλλει το σιδερένιο ακίνητο μέρος του δρομέα, ενώ ο στάτης από σίδηρο περιβάλλει το κύπελλο.

3.3 Έννοιες Σύγχρονης Ταχύτητας και Ολίσθησης

Στον επαγωγικό κινητήρα, η ανάπτυξη της ροπής οφείλεται στην αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα. Όμως, το πεδίο του δρομέα οφείλεται στις τάσεις εξ επαγωγής, οι οποίες αναπτύσσονται στο δρομέα μόνο όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του δρομέα και του στρεφόμενου πεδίου. Επομένως, η ταχύτητα του δρομέα δεν μπορεί να είναι ίση με τη σύγχρονη, καθώς τότε δεν θα επάγονταν τάσεις στο δρομέα, με συνέπεια το ρεύμα και η ροή του δρομέα να ήταν μηδενικά. Έτσι, η ροπή θα μηδενιζόταν και η ταχύτητα του κινητήρα θα μειωνόταν σε μια τιμή μικρότερη από τη σύγχρονη.

Το κύμα μαγνητεργετικής δύναμης (ΜΕΔ), το οποίο παράγει το τριφασικό τύλιγμα του στάτη, στρέφεται, με τη σύγχρονη ταχύτητα (σε στροφές ανά λεπτό).

$$n_s = \frac{120f}{P} \qquad (3.1)$$

Όπου f η συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας και P ο αριθμός των πόλων.

Αντίστοιχα σε rad/sec η σύγχρονη ταχύτητα είναι :

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{P/2} \qquad (3.2)$$

Αν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ***n,*** η ολίσθηση ***s*** ορίζεται από τη σχέση:

$$\mathrm{s} = \frac{n_s - n}{n_s} \qquad (3.3)$$

Δηλαδή η ολίσθηση, είναι η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα n_s σε ποσοστό της τελευταίας. Από τον ορισμό της ολίσθησης προκύπτουν αμέσως οι παρακάτω σχέσεις:

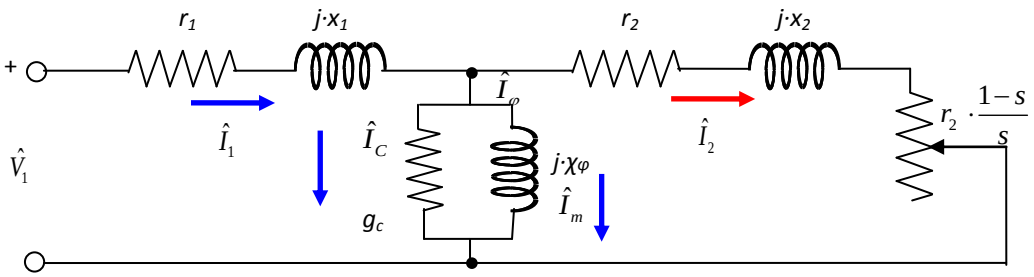
$$n = (1 - s)n_s \qquad (3.4)$$

$$\omega_m = (1 - s)\omega_s \qquad (3.5)$$

όπου ω_m είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε rad/sec και ω_S η αντίστοιχη σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα.

3.4 Απλοποιημένο Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρα Επαγωγής

Στις μηχανές επαγωγής η μαγνητική αντίσταση που συναντά το κύμα μαγνητεργετικής δύναμης (ΜΕΔ) είναι υπολογίσιμη λόγω της παρεμβολής του διάκενου αέρα. Έτσι, απαιτείται ένα σημαντικό ρεύμα διέγερσης I_φ για να υπερνικήσει τη μαγνητική αντίσταση και να εγκαταστήσει το συνιστάμενο κύμα μαγνητικής ροής. Αυτό εμφανίζεται στον εγκάρσιο κλάδο του ισοδύναμου κυκλώματος.



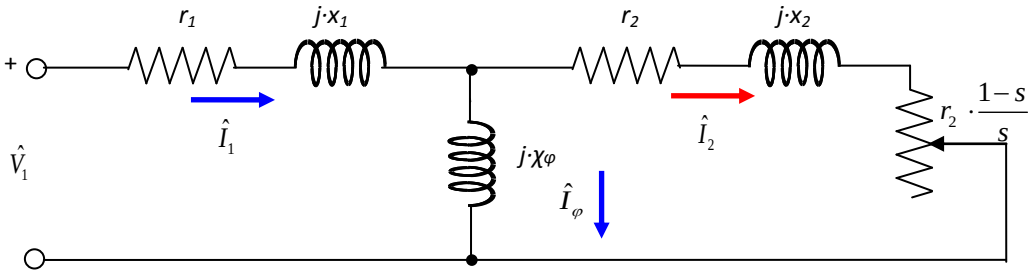
Σχήμα 3.1 : Μονοφασικό ισοδύναμο ενός τριφασικού κινητήρα επαγωγής, ο οποίος τροφοδοτείται από μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης φασικής ενεργού τάσης $\tilde{V}_1$ με ονομαστική συχνότητα λειτουργίας *f*.

Όπου,

- r_1 είναι η ωμική αντίσταση του στάτη ανά φάση,
- x_1 είναι η επαγωγική αντίδραση σκέδασης του στάτη ανά φάση,
- g_c είναι η αγωγιμότητα απωλειών πυρήνα $g_c(=1/r_o)$ του κινητήρα ανά φάση (λόγω δινορρευμάτων και υστερήσεως), η οποία εκφράζεται συνήθως και ως ωμική αντίσταση απωλειών πυρήνα r_o και αρκετές φορές αγνοείται,
- x_φ είναι η επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης του στάτη ανά φάση, η οποία εκφράζεται συνήθως και ως επαγωγική αγωγιμότητα μαγνήτισης $b_m(=1/x_\varphi)$ και αρκετές φορές αγνοείται,
- r_2 είναι η ωμική αντίσταση του δρομέα ανά φάση ανηγμένη στο στάτη,
- x_2 είναι η επαγωγική αντίδραση σκέδασης του δρομέα ανά φάση ανηγμένη στο στάτη.

Ωστόσο μια απλοποίηση μπορεί να γίνει, όπως προαναφέρθηκε, αν αμεληθούν οι ούτως ή άλλως μικρές απώλειες πυρήνα πάνω στην αγωγιμότητα g_c. Οι απώλειες πυρήνα μπορούν σ' αυτήν την περίπτωση να συνυπολογιστούν μαζί με τις μηχανικές απώλειες στο συνολικό ισολογισμό της ισχύος. Με την παράλειψη της ωμικής

αγωγιμότητας g_c , το ισοδύναμο κύκλωμα της-μηχανής επαγωγής μπορεί να πάρει τη μορφή του σχήματος 3.2.



Σχήμα 3.2 : Απλοποιημένο μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα επαγωγής.

Στο απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.2 η αντίσταση r_2/s έχει χωριστεί στα δύο: η αντίσταση r_2 εκφράζει απλώς τις ωμικές απώλειες του τυλίγματος του δρομέα, ενώ η υπόλοιπη αντίσταση $(r_2/s - r_2)$ αντιστοιχεί στην εσωτερική ισχύ του κινητήρα, όπως θα φανεί στην επόμενη παράγραφο.

3.5 Ισχύς, Απώλεια Ισχύος & Ροπή Ασύγχρονων Κινητήρων

Όπως σε κάθε μετατροπέα ενέργειας δημιουργούνται απώλειες, έτσι και στον ασύγχρονο κινητήρα κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική εμφανίζονται διάφορες απώλειες με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του.

Οι πιο σημαντικές απώλειες είναι:

Θερμικές απώλειες λόγω χαλκού (P_{Cu}): Οι απώλειες αυτές εμφανίζονται λόγω ύπαρξης ωμικής αντίστασης στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Συγκεκριμένα οι απώλειες είναι οι ακόλουθες:

$$P_{Cu1} = 3 \cdot \tilde{I}_1^2 \cdot R_1 \quad (3.6) \quad \text{(θερμικές απώλειες του στάτη)}$$

$$P_{Cu2} = 3 \cdot \tilde{I}_2^2 \cdot R_2 \quad (3.7) \quad \text{(θερμικές απώλειες του δρομέα)}$$

- **Απώλειες σιδήρου (P_{Fe}):** Οι απώλειες αυτές είναι κυρίως απώλειες λόγω δινορρευμάτων και μαγνητικής υστέρησης στον πυρήνα του στάτη. Οι απώλειες σιδήρου εξαρτώνται από τη συχνότητα του ρεύματος του στάτη I_1 και από το μέγεθος της μαγνητικής ροής του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου Φ_Σ. Η

ροή Φ_Σ είναι σχεδόν ανεξάρτητη από το φορτίο καθώς δεν εξαρτάται άμεσα από την ενεργό τιμή I_1. Αντίθετα οι απώλειες σιδήρου του δρομέα θεωρούνται αμελητέες λόγω της μικρής συχνότητας του ρεύματος κατά την ονομαστική λειτουργία. Η μαγνητική ροή Φ_Σ είναι ανάλογη προς την τάση τροφοδοσίας $\tilde{V}_1$ και αντιστρόφως ανάλογη προς τη συχνότητα f της τάσης του στάτη $\tilde{V}_1$, σύμφωνα με την επόμενη σχέση:

$$\Phi_\Sigma = \frac{\tilde{V}_1}{4,44 \cdot N_1 \cdot f} \qquad (3.8)$$

Έτσι όταν αυξάνεται η τάση τροφοδοσίας $\tilde{V}_1$ πάνω από την ονομαστική της τιμή αυξάνουν οι απώλειες σιδήρου και ο κινητήρας θερμαίνεται λόγω αύξησης της αντίστοιχης μαγνητικής ροής.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση ενός μαγνητικού κυκλώματος με ενιαία διατομή, η αντίστοιχες απώλειες σιδήρου P_{Fe} ποικίλλουν παρόμοια με την αντίστοιχη σύζευξη μαγνητικής ροής Φ_Σ σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P_{Fe} = \sum_i (k_H \cdot f_i + k_{EC} \cdot f_i^2) \cdot {\Phi_\Sigma}^2 \qquad (3.9)$$

Όπου f_i είναι η συχνότητα της i-οστής αρμονικής συνιστώσας του ρεύματος, k_H και k_{EC} είναι οι σταθερές απώλειας που συνδέονται με τη μαγνητική υστέρηση και τα δινορρεύματα, αντίστοιχα.

Είναι επίσης γνωστό ότι στα διηλεκτρικά και αγώγιμα μέσα το επιδερμικό βάθος δ_i για τη συχνότητα f_i της i-οστής αρμονικής συνιστώσας του ρεύματος, υπολογίζεται ως εξής: $$\delta_i = 1/\sqrt{\pi \cdot f_i \cdot \sigma \cdot \mu} \qquad (3.10)$$

Όπου σ και μ είναι η αγωγιμότητα και η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού περιέλιξης. Καθώς αυξάνει η συχνότητα, το ρεύμα καταστέλλεται κοντά στον εξωτερικό χώρο της διατομής της περιέλιξης.

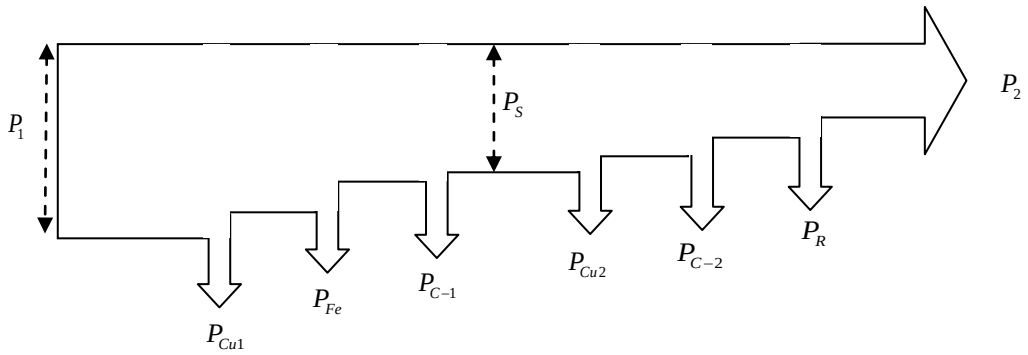
- **Απώλειες τριβής-μηχανικές (P_R):** Οι απώλειες αυτές προέρχονται από την επαφή του άξονα του δρομέα με το σταθερό τμήμα του στάτη (ρουλεμάν) πάνω στο οποίο εδράζεται και περιστρέφεται ο δρομέας και από την αντίσταση του

αέρα. Οι απώλειες τριβής θεωρούνται σταθερές εντός της περιοχής ονομαστικής λειτουργίας.

- **Πρόσθετες απώλειες – κατανεμημένες (P_C):** Οι πρόσθετες απώλειες είναι κυρίως απώλειες λόγω ροής σκέδασης και λόγω ανώτερων αρμονικών της μαγνητικής ροής. Οι πρόσθετες απώλειες είναι εξαρτώμενες από το φορτίο και υπολογίζονται προσεγγιστικά στο 0,5% της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα.

Με βάση τις παραπάνω διαπιστώσεις σχετικά με τις απώλειες μπορεί να σχεδιαστεί το διάγραμμα των απωλειών ισχύος έχοντας δεχθεί ότι P_1 είναι η ισχύς δικτύου (που λαμβάνει ο κινητήρας από το δίκτυο), P_2 η μηχανική ισχύς στον άξονα του κινητήρα, P_S η ισχύς διάκενου, P_{Fe} οι μαγνητικές απώλειες, P_{Cu-1} θερμικές ωμικές απώλειες στάτη, P_{Cu-2} θερμικές ωμικές απώλειες δρομέα, P_R οι απώλειες ισχύος λόγω τριβής, P_C πρόσθετες απώλειες, P_V συνολική ισχύς απωλειών.

Στη συνέχεια αναλύεται η λειτουργία του κινητήρα επαγωγής με τη βοήθεια του ισοδύναμου κυκλώματος. Οι συμβατικές φορές των ρευμάτων και ισχύων θα είναι πάντα αυτές που αντιστοιχούν σε λειτουργία κινητήρα.



Σχήμα 3.3 : Διάγραμμα απωλειών ισχύος ασύγχρονου κινητήρα

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.2 φαίνεται ότι η ολική ισχύς P_s που μεταφέρεται διαμέσου του διάκενου αέρα από το στάτη στο δρομέα είναι (σε φυσικές μονάδες, δηλαδή σε W και λαμβάνοντας υπόψη και τις τρεις φάσεις της μηχανής)

$$P_s = 3I_2^2 \frac{r_s}{s} \qquad (3.11)$$

Οι απώλειες χαλκού του δρομέα είναι

$$P_{Cu-2} = 3I_2^2 r_2 = sP_s \qquad (3.12)$$

και κατά συνέπεια η εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύς του κινητήρα είναι

$$P_e = 3I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s} = (1-s)P_s \qquad (3.13)$$

Η τελευταία σχέση αντιστοιχεί ακριβώς στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.2.

Στις σχέσεις (3.12) και (3.13) παρατηρείται επίσης ότι από την ολική ισχύ P_s που περνάει από το στάτη στο δρομέα, ποσοστό (1 - s) μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ και ποσοστό s είναι απώλειες χαλκού του κυκλώματος του δρομέα. Απ' αυτό είναι προφανές ότι ο κινητήρας επαγωγής λειτουργεί πιο αποδοτικά, όταν λειτουργεί με μικρή ολίσθηση. Επίσης ότι ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα επαγωγής δεν μπορεί να υπερβεί το l-s:

η < l - s.

Το μηχανικό φορτίο του κινητήρα διαφέρει από την εσωτερική ισχύ κατά τις απώλειες περιστροφής, οι οποίες οφείλονται στις τριβές, τον ανεμισμό κ.λπ.

$$P_2 = P_e - P_{\alpha\pi} \qquad (3.14)$$

Στις απώλειες $P_{\alpha\pi}$ συμπεριλαμβάνονται οι πρόσθετες απώλειες και οι απώλειες σιδήρου, εφόσον η αγωγιμότητα απωλειών πυρήνα έχει αμεληθεί.

Η εσωτερική ηλεκτρομαγνητική ροπή προκύπτει από την εσωτερική ισχύ και την ταχύτητα περιστροφής

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{P_e}{(l-s)\omega_s} = \frac{P_s}{\omega_s} \qquad (3.15)$$

Συναρτήσει του ρεύματος I_2 η εσωτερική ροπή γράφεται:

$$T_e = \frac{3}{\omega_s} I_2^2 \frac{r_2}{s} \qquad (3.16)$$

Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα επαγωγής είναι κατά τα γνωστά ο λόγος της αποδιδόμενης μηχανικής ισχύς στο φορτίο P_m προς την εισερχόμενη στο στάτη ηλεκτρική ισχύ P_1.

$$\eta = \frac{P_m}{P_1} \qquad (3.17)$$

όπου η ισχύς εισόδου P_1 αποτελείται από τις απώλειες του στάτη και την ισχύ διακένου $P_1 = 3V_1I_1\cos\varphi_1 = P_S + 3I^2_1r_1$

Συνήθεις θεωρητικές τιμές είναι: $s=0{,}05\sim0{,}01 \Rightarrow \eta=0{,}95\sim0{,}99$

Στην πράξη οι τιμές αυτές είναι: $\eta=0{,}80\sim0{,}95$

3.6 Καμπύλη Ροπής – Ολίσθησης

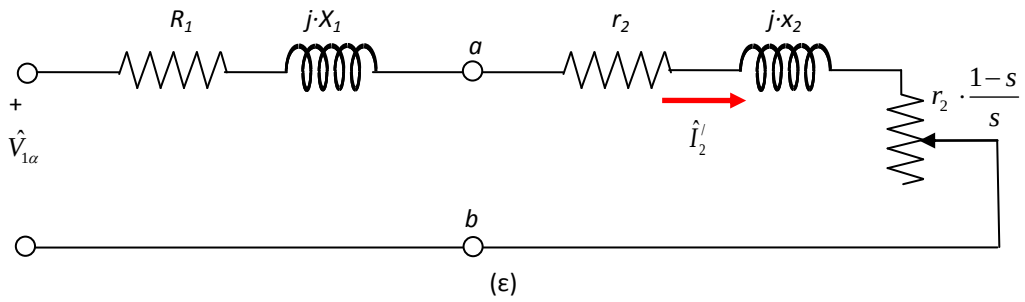
Ισοδύναμο Thevenin και υπολογισμός ροπής

Το ισοδύναμο κύκλωμα του σχ.3.2 μπορεί να αντικατασταθεί με το κύκλωμα αριστερά από τα σημεία ***a, b*** με το ισοδύναμο Thevenin του σχ. 3.4 Η τάση Thevenin $\hat{V}_{1a}$ είναι

$$\hat{V}_{1a} = \frac{jx_\varphi}{r_1+j(x_1+x_\varphi)}\hat{V}_1 \qquad (3.18)$$

και η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση

$$R_1 + jX_1 = \frac{jx_\varphi(r_1+jx_1)}{r_1+j(x_1+x_\varphi)} \qquad (3.19)$$



Σχήμα 3.4 : Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα τριφασικού επαγωγικού κινητήρα με εφαρμογή θεωρήματος Thevenin.

Με τη μέθοδο αυτή το ισοδύναμο κύκλωμα μετατρέπεται σε κύκλωμα σειράς και το ρεύμα $\hat{I}_2$ μπορεί τώρα να καθοριστεί αμέσως συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης στο στάτη, των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του κινητήρα και της ολίσθησης .

Πράγματι, από το σχ. 3.4 προκύπτει:

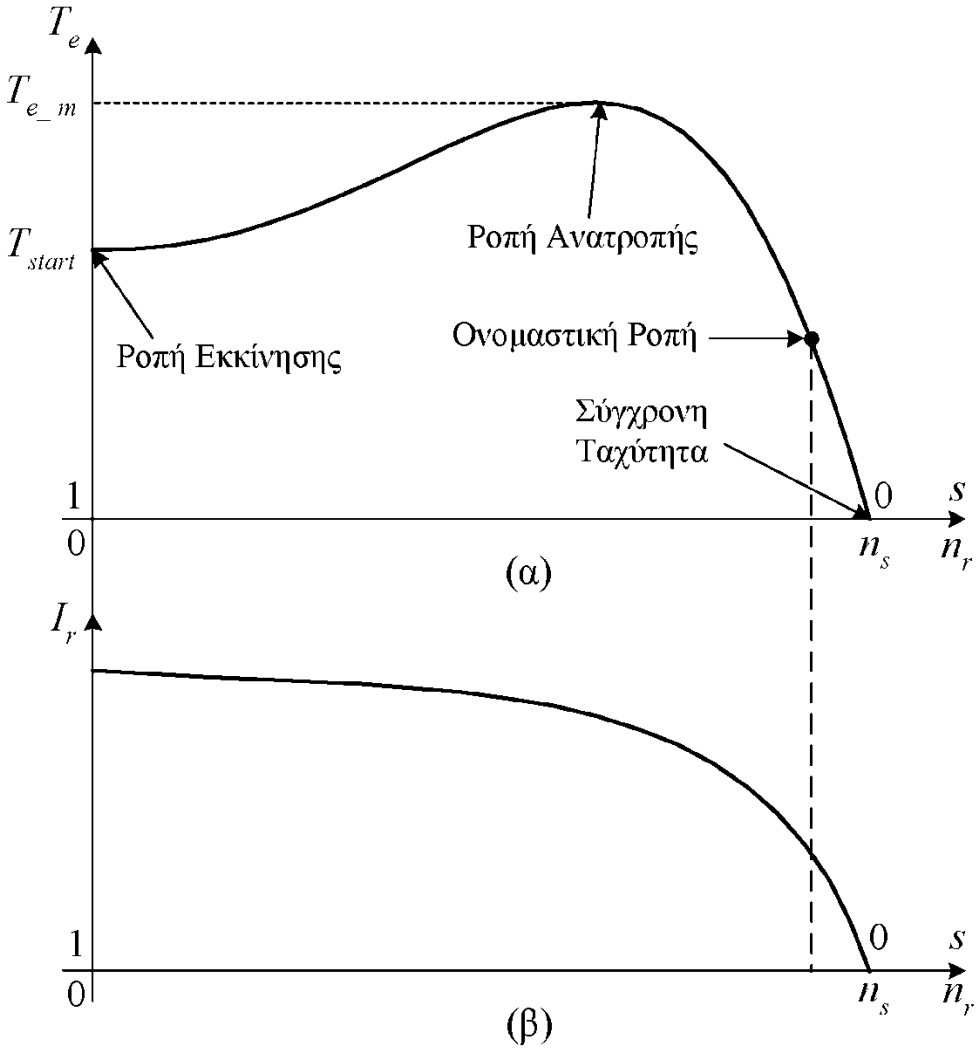
$$\tilde{I}_2^{\,2} = \frac{V_{1a}^2}{(R_1+\frac{r_2}{s})^2+(X_1+x_2)^2} \qquad (3.20)$$

Από την έκφραση της εσωτερικής ροπής προκύπτει:

$$T_e = \frac{1}{\omega_s}\frac{3V_{1a}^2(r_2/s)}{(R_1+r_2/s)^2+(X_1+x_2)^2} \qquad (3.21)$$

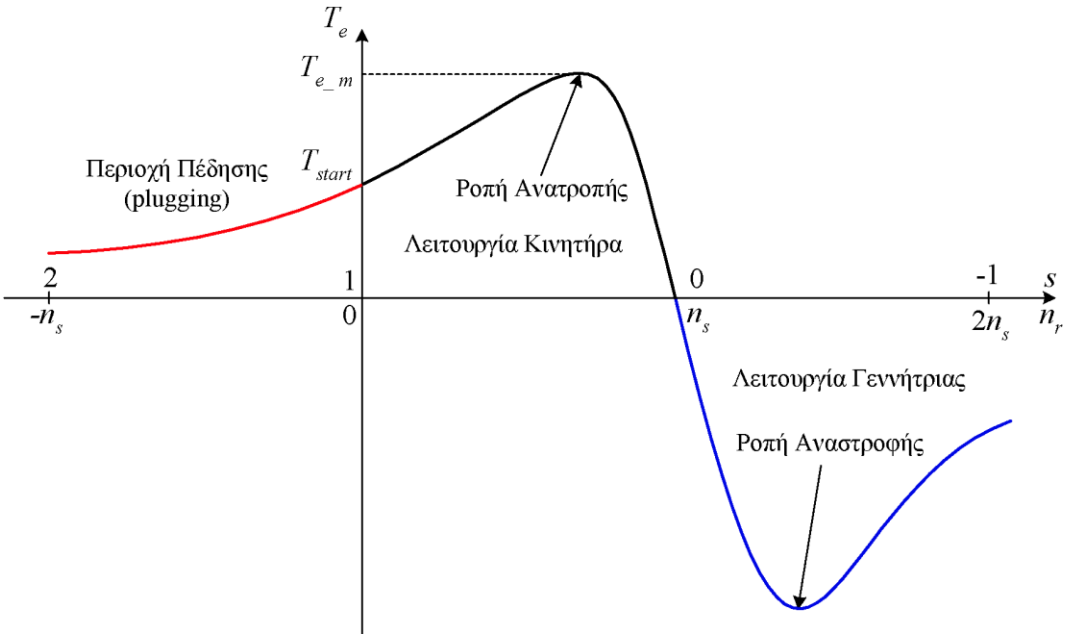
3.7 Περιοχές Λειτουργιάς Μηχανής Επαγωγής

Η σχέση (3.21) είναι μια αναλυτική σχέση μεταξύ της εσωτερικής ροπής $\mathbf{T_e}$ και της ολίσθησης s (και επομένως και της ταχύτητας περιστροφής n). Η σχέση αυτή φαίνεται στη γραφική παράσταση του σχήματος 3.5, η οποία ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη ροπής- ολίσθησης. Επίσης στο ίδιο σχήμα 3.5 παρουσιάζεται και η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα I_2 σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 3.5 (α) : Τυπική χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων και **(β)** μεταβολή του ρεύματος του δρομέα με την ταχύτητα.

Στο σχήμα 3.6 έχει περιληφθεί και η περιοχή λειτουργίας γεννήτριας, για την οποία η ολίσθηση είναι αρνητική (δηλαδή ο δρομέας περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από το στάτη). Η αντίσταση r_2/s γίνεται σ' αυτήν την περίπτωση αρνητική και η μηχανή αποδίδει ισχύ στο στάτη σύμφωνα με τη (3.21). Αν και η ύπαρξη αρνητικής αντίστασης φαίνεται εκ πρώτης όψεως παράδοξη, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το ισοδύναμο κύκλωμα είναι απόλυτα σωστά και για τη λειτουργία γεννήτριας. Συγκεκριμένα, αρνητική γίνεται η αντίσταση r_2 (1 - s)/s πάνω στην οποία γίνεται η ηλεκτρομηχανική μετατροπή, ενώ η $\mathbf{r_2}$ παραμένει θετική. Έτσι, χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα του σχ. 3.4 για όλες τις καταστάσεις λειτουργίας της μηχανής επαγωγής κρατώντας τη φορά αναφοράς των ρευμάτων που αντιστοιχούν σε κατανάλωση ισχύος (λειτουργία κινητήρα).



Σχήμα 3.6 : Πλήρης χαρακτηριστική ροπής–ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, όπου περικλείονται οι περιοχές πέδησης και γεννήτριας

Στο σχήμα 3.6 έχει περιληφθεί και η λειτουργία πέδης, όπου η ταχύτητα γίνεται αρνητική και συνεπώς βάσει της σχέσης (3.3) η ολίσθηση είναι μεγαλύτερη της μονάδος ($s > 1$). Στην περίπτωση αυτή, ενώ η ροπή είναι θετική, η ω_m είναι αρνητική, άρα η αποδιδόμενη ισχύς στο μηχανικό μέρος προκύπτει αρνητική. Συνεπώς η μηχανή απορροφά ισχύ τόσο από το μηχανικό, όσο και από το ηλεκτρικό μέρος της, την οποία μετατρέπει σε απώλειες θερμότητας.

Σε αντίθεση με το σύγχρονο κινητήρα, ο οποίος δεν έχει ροπή εκκίνησης, η μηχανή επαγωγής αναπτύσσει ροπή σε όλες τις ταχύτητες πλην της σύγχρονης. Έτσι, αναπτύσσει ροπή και κατά την εκκίνηση, όπου $n = 0$ και συνεπώς βάση της σχέσης (3.3) $s = 1$. Η ροπή εκκίνησης βρίσκεται αν αντικατασταθεί στη σχέση (3.21) η ολίσθηση με τη μονάδα:

$$T_{start} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{1a}^2 r_2}{(R_1+r_2)^2+(X_1+x_2)^2} \qquad (3.22)$$

3.8 Μέγιστη Ροπή για Λειτουργία Κινητήρα

Από τη σχέση (3.21) και το σχήμα 3.6 είναι φανερό πως η ροπή μηδενίζεται στη σύγχρονη ταχύτητα (για $s = 0$), αλλά τείνει επίσης στο 0 για πολύ μεγάλη ολίσθηση (για λειτουργία πέδης). Είναι, συνεπώς, φανερό ότι υπάρχει μια μέγιστη τιμή T_{max} για κάποια ολίσθηση s_{maxT} ανάμεσα στο 0 και το άπειρο. Η μέγιστη ροπή που μπορεί να αναπτύξει μια μηχανή επαγωγής ονομάζεται και ροπή ανατροπής.

Για να προσδιοριστεί η μέγιστη ροπή, παραγωγίζεται η (3.21), αφού πρώτα γίνουν οι ακόλουθες αντικαταστάσεις προς διευκόλυνση των πράξεων.

$$z = r_2/s$$

$$R = R_1$$

$$X = X_1 + x_2$$

Η παράγωγος της ροπής ως προς z είναι:

$$\frac{dT_e}{dz} = \frac{3V_{la}^2}{\omega_s}\frac{R^2 + X^2 - z^2}{[(R+z)^2 + X^2]^2},$$

η οποία μηδενίζεται όταν:

$$z = z_{maxT} = \pm\sqrt{R^2 + X^2} \qquad (3.23)$$

Λύνοντας ως προς την ολίσθηση μέγιστης ροπής βρίσκεται ότι:

$$s_{maxT} = \pm\frac{r_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + x_2)^2}} \qquad (3.24)$$

Η αρνητική ολίσθηση $-s_{maxT}$ αντιστοιχεί σε λειτουργία γεννήτριας. Η δεύτερη παράγωγος στα σημεία $z = z_{maxT}$ είναι

$$\frac{d^2T_e}{dz^2}(z_{maxT}) = \frac{3V_{la}^2}{\omega_s}\frac{-2z_{maxT}}{[(R+z)^2 + X^2]^2}$$

Συνεπώς για λειτουργία κινητήρα (θετική ολίσθηση) υπάρχει μέγιστο και για λειτουργία γεννήτριας (αρνητική ολίσθηση) υπάρχει ελάχιστο, δηλαδή μέγιστη αρνητική ροπή.

Η μέγιστη ροπή για λειτουργία κινητήρα προκύπτει :

$$T_{e_max} = \frac{1}{\omega_s} \frac{(3/2)V_{la}^2}{\sqrt{R_1^2+(X_1+x_2)^2}+R_1} \qquad (3.25)$$

Η ελάχιστη ροπή, δηλαδή η μέγιστη αρνητική ροπή για λειτουργία γεννήτριας:

$$T_{e_min} = \frac{1}{\omega_s} \frac{-(3/2)V_{la}^2}{\sqrt{R_1^2+(X_1+x_2)^2}-R_1} \qquad (3.26)$$

Όπως φαίνεται από τη σύγκριση (3.25) και (3.26), η μέγιστη ροπή για λειτουργία γεννήτριας είναι μεγαλύτερη κατ' απόλυτη τιμή από τη μέγιστη ροπή για λειτουργία κινητήρα, όταν η ωμική αντίσταση του στάτη είναι διάφορη του μηδενός.

3.9 Συνδεσμολογία Αστέρα – Τριγώνου

Ακολούθως διευκρινίζεται το θέμα της συνδεσμολογίας του τυλίγματος του στάτη. Στις μηχανές επαγωγής οι συνδεσμολογίες αστέρα και τριγώνου χρησιμοποιούνται το ίδιο συχνά και πολλές φορές μάλιστα και στην ίδια μηχανή, προκειμένου να αλλάξει η τάση τροφοδοσίας κατά την εκκίνηση. Ο λόγος, όπως θα φανεί και στη συνέχεια είναι ο ακόλουθος.

Κατά την εκκίνηση (επειδή η ολίσθηση έχει την τιμή 1 αντί για ένα πολύ μικρό αριθμό, όπως κατά την κανονική λειτουργία) η συνολική σύνθετη αντίσταση που βλέπει ο στάτης είναι πολλές φορές μικρότερη κατά μέτρο απ' ότι στην κανονική λειτουργία. Αυτό έχει ως συνέπεια την εμφάνιση ρεύματος εκκίνησης πολλαπλάσιου από αυτό που αντιστοιχεί στην ονομαστική λειτουργία του κινητήρα. Αν ο κινητήρας τόσο στην εκκίνηση, όσο και στην κανονική λειτουργία έχει την ίδια αντίσταση δρομέα και την ίδια συνδεσμολογία, τότε θα πρέπει η εγκατάσταση στην οποία συνδέεται να επιτρέπει τη λειτουργία με το σημαντικά αυξημένο ρεύμα εκκίνησης. Αυτό με τη σειρά του συνεπάγεται μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης.

Για να αποφευχθεί αυτό το πρόσθετο κόστος, μπορεί ένας κινητήρας που σε κανονικές συνθήκες λειτουργεί σε συνδεσμολογία τριγώνου να συνδέεται κατά την

εκκίνηση του σε αστέρα. Με τον τρόπο αυτό το ρεύμα εκκίνησης μειώνεται, αλλά επίσης μειώνεται και η αναπτυσσόμενη ροπή. Όταν ο κινητήρας φτάσει κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, οπότε η ολίσθηση είναι πολύ μικρή, η συνδεσμολογία επανέρχεται σε τρίγωνο, ώστε ο κινητήρας να αναπτύσσει πάλι την κανονική του ροπή. Οι αλλαγές αυτές συνδεσμολογίας επιτυγχάνονται με ειδικό διακόπτη αστέρα - τριγώνου. Αν διατηρηθούν σταθερές οι αντιστάσεις και οι αντιδράσεις του ισοδύναμου κυκλώματος (σε Ω ανηγμένα στο στάτη), η διαφορά των δύο συνδεσμολογιών (αστέρα και τριγώνου) περιορίζεται στην επιβαλλόμενη τάση στα άκρα του ισοδύναμου κυκλώματος:

- στη συνδεσμολογία αστέρα η επιβαλλόμενη τάση είναι η φασική:

$$V_1 = V_\varphi \qquad (3.27)$$

- στη συνδεσμολογία τριγώνου η επιβαλλόμενη τάση είναι η πολική:

$$V_1 = V_\pi = \sqrt{3}V_\varphi \qquad (3.28)$$

Στη δεύτερη περίπτωση το ρεύμα σε κάθε φάση της μηχανής είναι κατά $\sqrt{3}$ φορές μεγαλύτερο απ' ό,τι στη συνδεσμολογία αστέρα. Το ρεύμα γραμμής, όμως, το οποίο, είναι με τη σειρά του κατά $\sqrt{3}$ φορές μεγαλύτερο του φασικού ρεύματος, όταν ο κινητήρας συνδέεται κατά τρίγωνο. Αυτό έχει ως συνέπεια το ρεύμα γραμμής στη συνδεσμολογία τριγώνου να είναι 3 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ρεύμα της συνδεσμολογίας αστέρα.

Το ίδιο συμπέρασμα μπορούσε φυσικά να βγει μετατρέποντας τη σύνθετη αντίσταση του κινητήρα συνδεσμολογίας τριγώνου σε αστέρα: η αντίσταση διαιρείται δια τρία, συνεπώς το ρεύμα γραμμής γίνεται τριπλάσιο απ' ό,τι σε συνδεσμολογία αστέρα. Το ίδιο συμβαίνει και με την απορροφούμενη ισχύ και την αναπτυσσόμενη ροπή: είναι τρεις φορές μεγαλύτερες στη συνδεσμολογία τριγώνου.

Συμπέρασμα : Όταν ο κινητήρας συνδέεται στο δίκτυο σε αστέρα απορροφά το ένα τρίτο του ρεύματος που θα απορροφούσε αν συνδεόταν σε τρίγωνο. Επειδή η ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος (T~I), έπεται ότι και για τις ροπές εκκίνησης $T_{START-Y}$ και $T_{START-\Delta}$ ισχύει αντίστοιχα:

$$\frac{\tilde{I}_{\gamma\rho\alpha\mu\mu\acute{\eta}\varsigma-\Delta}}{\tilde{I}_{\gamma\rho\alpha\mu\mu\acute{\eta}\varsigma-Y}} = 3 \qquad \frac{T_{START-\Delta}}{T_{START-Y}} = 3$$

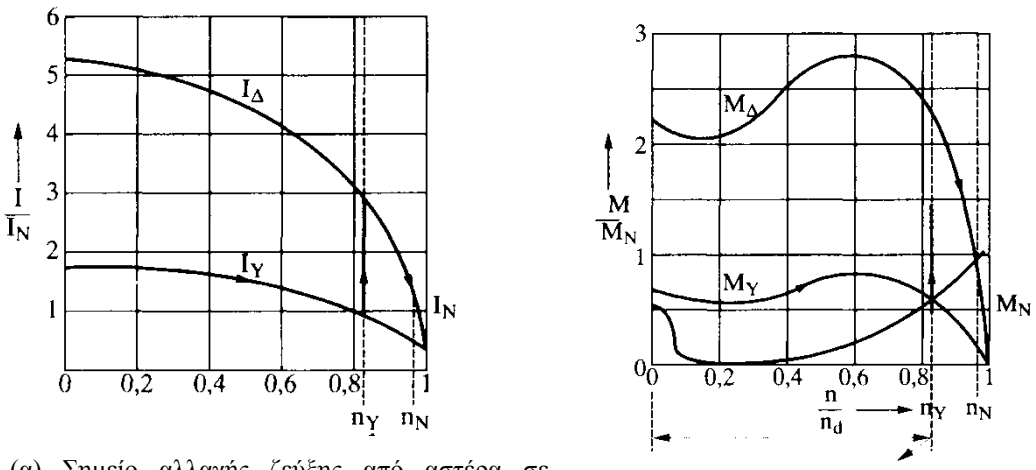
Επίσης, επειδή με τη μέθοδο αυτή εκτός από το φασικό ρεύμα μειώνεται και η φασική τάση, λαμβάνεται γενικά:

$$\frac{T'}{T_N} = \left(\frac{\tilde{U}'}{\tilde{U}_N}\right)^2$$

Όπου T' η ροπή του ασύγχρονου κινητήρα με τάση στάτη ίση με $\tilde{U}'$ και T_N η ονομαστική ροπή με ονομαστική τάση στο στάτη $\tilde{U}_N$, η οποία στην παρούσα περίπτωση ταυτίζεται με την πολική τάση του δικτύου τροφοδοσίας (δηλαδή με την ονομαστική τάση συνδεσμολογίας τριγώνου).

Με βάση τη σχέση $\frac{T'}{T_N} = \left(\frac{\tilde{U}'}{\tilde{U}_N}\right)^2$ προκύπτει ότι τόσο η ροπή εκκίνησης, όσο και γενικότερα η ροπή μεταβάλλεται με το τετράγωνο της τάσης του στάτη. Οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις ροπών και ρευμάτων δίνονται στο σχήμα 3.7.

Σημειώνεται ότι ένας ασύγχρονος κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα, που χρησιμοποιεί ως μέθοδο εκκίνησης τη μέθοδο αστέρα / τριγώνου, είναι υπολογισμένος να αντέχει την τάση του δικτύου (πολική τάση).



(α) Σημείο αλλαγής ζεύξης από αστέρα σε τρίγωνο

(β) Σημείο αλλαγής ζεύξης από αστέρα σε τρίγωνο

Σχήμα 3.7: Χαρακτηριστικές ρεύματος – ροπής ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα με διακόπτη αστέρα –τρίγωνο.

3.10 Λειτουργιά των Κινητήρων με Φορτία

Η λειτουργία μόνιμης κατάστασης ενός οποιουδήποτε κινητήρα, ανεξαρτήτως της αρχής λειτουργίας του, χαρακτηρίζεται από τη σχέση μεταξύ ροπής και ταχύτητας περιστροφής. Η σχέση αυτή, καθορίζει αν ο κινητήρας είναι κατάλληλος για μια συγκεκριμένη εφαρμογή ή όχι.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες των τριφασικών κινητήρων επαγωγής μπορούν να αλλάξουν κατά περίπτωση με τη βοήθεια ελέγχου διαφόρων μεγεθών όπως: της τάσης και της συχνότητας τροφοδοσίας, των αντιστάσεων των τυλιγμάτων, του ρεύματος στα τυλίγματα των μηχανών κ.λπ.

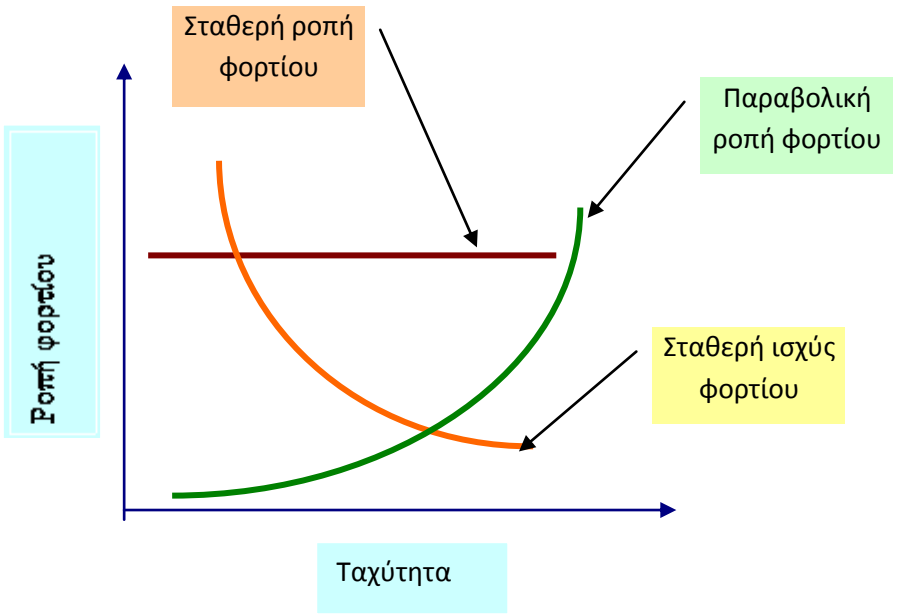
Όλες οι συσκευές οι οποίες κινούνται από ηλεκτροκινητήρες ονομάζονται φορτία. Τα φορτία έχουν ευρύ φάσμα χαρακτηριστικών, (σχήμα 3.8) όπως:

Σταθερή μηχανική ισχύ. Τέτοιου τύπου φορτία είναι οι περισσότερες εργαλειομηχανές.

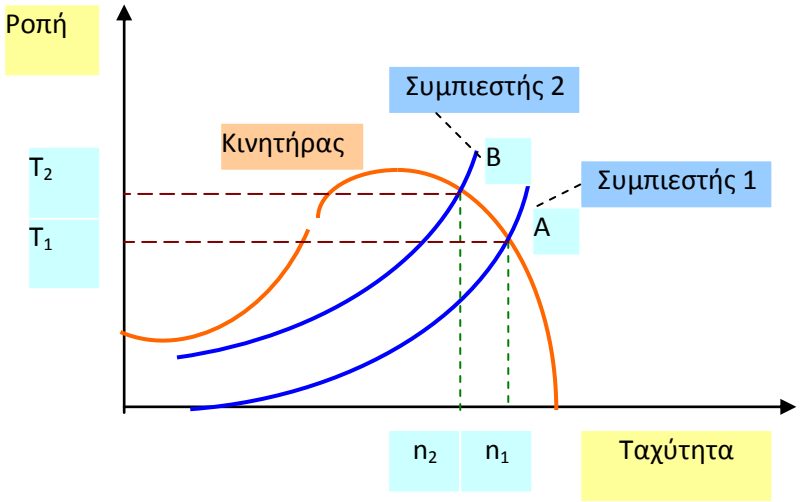
Σταθερή ροπή του φορτίου. Στον τύπο αυτό υπάγονται οι ταινιομεταφορείς.

Παραβολική ροπή του φορτίου. Τα φορτία αυτά είναι συμπιεστές, ανεμιστήρες και αντλίες.

Το σημείο τομής των δύο χαρακτηριστικών, του κινητήρα και του φορτίου ονομάζεται **σημείο λειτουργίας,**



Σχήμα 3.8 : Διάφορα φορτία



Σχήμα 3.9 : Λειτουργία του τριφασικού κινητήρα επαγωγής με δύο φορτία (συμπιεστές).
Ο συμπιεστής 2 είναι μεγαλύτερης ιπποδύναμης και ροπής από το συμπιεστή 1. Ο συμπιεστής 1 λειτουργεί στο σημείο λειτουργίας A με ροπή T_1 και ταχύτητα n_1. Ο συμπιεστής 2 λειτουργεί στο σημείο λειτουργίας B με ροπή T_2 και ταχύτητα n_2. Στο σχήμα φαίνεται ότι η ροπή $T_2>T_1$ προκαλεί ταχύτητα $n_2<n_1$.

3.11 Έλεγχος της Ταχύτητας των Επαγωγικών Κινητήρων

Όταν ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας τροφοδοτείται από το δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας, στρέφεται με μια ταχύτητα η οποία είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη. Η μεταβολή της ταχύτητας από τη σύγχρονη εξαρτάται από το φορτίο και είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο υψηλότερη είναι η αντίσταση του δρομέα. Όμως, η λειτουργία του κινητήρα με μειωμένη ταχύτητα σημαίνει αύξηση της ολίσθησης και των απωλειών χαλκού στο δρομέα, με συνέπεια τη μείωση του βαθμού απόδοσης.

Ο έλεγχος ενός κινητήρα εφαρμόζεται όταν υπάρχουν συχνές μεταβολές της ροπής και της ισχύος του φορτίου για να αποφευχθεί η υπερφόρτιση του κινητήρα, η υπερθέρμανση και η υπερβολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

Με τη ρύθμιση της ολίσθησης.

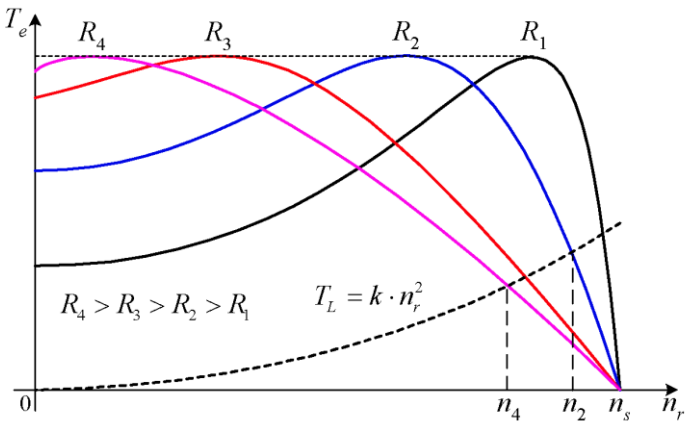
Με τη ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας.

Η ρύθμιση της ολίσθησης, για δεδομένη ροπή φορτίου, επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα στον κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα και με τον έλεγχο της τάσης τροφοδοσίας στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού.

Η ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας από τη σχέση $n_s = \frac{120f}{P}$, επιτυγχάνεται είτε με τη μεταβολή του αριθμού των πόλων του τυλίγματος του στάτη ή με τη μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας.

3.12 Έλεγχος της Ταχύτητας με Ρύθμιση της Αντίστασης του Δρομέα

Η ταχύτητα των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα ρυθμίζεται με την εισαγωγή μεταβλητών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής–ταχύτητας του κινητήρα.

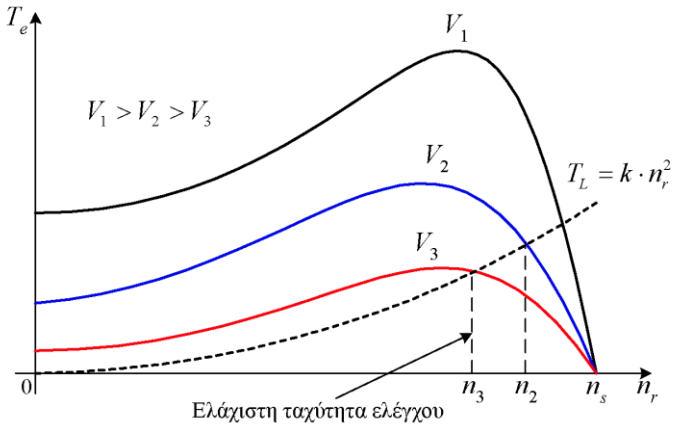


Σχήμα 3.10 : Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα.

Στο σχ.3.10 εικονίζονται οι χαρακτηριστικές του κινητήρα για τέσσερις τιμές της αντίστασης του δρομέα, μαζί με τη χαρακτηριστική του φορτίου. Η ροπή του φορτίου μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας. Αυτή η χαρακτηριστική φορτίου είναι πολύ κοινή και απαντάται στις αντλίες, τους ανεμιστήρες και τα ανυψωτικά. Η μεταβολή της ταχύτητας με τη ρύθμιση της αντίστασης είναι φανερή. Η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται από την τιμή n_2 όταν $R_r = R_2$ στην τιμή n_4 όταν $R_r = R_4$. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι, ο βαθμός απόδοσης της διάταξης μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας εξαιτίας των εξωτερικών αντιστάσεων.

3.13 Έλεγχος της Ταχύτητας με Ρύθμιση της Τάσης του Στάτη

Στους επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού η ρύθμιση της ολίσθησης (ταχύτητας) επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη. Η συχνότητα των τάσεων είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Καθώς η ροπή που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης του στάτη, οι χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας μεταβάλλονται όπως στο σχ. 3.11, για διάφορες τιμές της τάσης. Η ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας. Από το σχ. 3.11 είναι φανερό ότι, η ταχύτητα του κινητήρα δεν μπορεί να ελεγχθεί σε τιμές πολύ μικρότερες από τη σύγχρονη. Η ελάχιστη δυνατή ταχύτητα είναι η n_3, που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής για την τάση V_3. Ακόμη, το ρεύμα του κινητήρα είναι ανάλογο της τάσης. Έτσι, ο λόγος ροπής προς ρεύμα, η μέγιστη ροπή, ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης, μειώνονται με τη μείωση της ταχύτητας. Επομένως, ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη δεν είναι αποτελεσματικός. Ο έλεγχος της τάσης στα τυλίγματα του στάτη επιτυγχάνεται είτε με κατάλληλους μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται *ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης* (*ac voltage controllers*), είτε με αυτομετασχηματιστές.



Σχήμα 3.11 : Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, με τη μεταβολή της τάσης του στάτη

Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται συνήθως στον έλεγχο της ταχύτητας επαγωγικών κινητήρων κλάσης D, σε εφαρμογές αντλιών και ανεμιστήρων, όπου δεν απαιτείται έλεγχος της ταχύτητας σε μικρές τιμές. Όμως, η

κυριότερη εφαρμογή τους είναι στην εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων όλων των κατηγοριών, οπότε ονομάζονται soft starters.

Οι ηλεκτρονικοί εκκινητές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους εκκίνησης, με αυτομετασχηματιστή ή διακόπτη αστέρα–τριγώνου. Κάποια από τα πλεονεκτήματα είναι: η ομαλή επιτάχυνση και επιβράδυνση, ο έλεγχος του ρεύματος, η μειωμένη συντήρηση, η προστασία από έλλειψη ή ασυμμετρία των φάσεων. Επιπλέον, ένας εκκινητής με ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του επαγωγικού κινητήρα, λειτουργώντας τον κινητήρα με μειωμένη τάση σε μικρά φορτία. Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί με το μέγιστο βαθμό απόδοσης στο ονομαστικό φορτίο, όπου η κατανομή των επιμέρους απωλειών του είναι η βέλτιστη. Όταν το φορτίο μειώνεται, η βέλτιστη κατανομή των απωλειών διαταράσσεται και ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα ανάλογα με το φορτίο του, ώστε η μαγνητική ροή στο διάκενο να έχει πάντα τη βέλτιστη τιμή, επιτυγχάνουμε το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Η βέλτιστη τιμή της μαγνητικής ροής εξαρτάται από το φορτίο και την ταχύτητα του κινητήρα.

3.14 Έλεγχος της Ταχύτητας με Μεταβολή του Αριθμού των Πόλων

Ο αριθμός των μαγνητικών πόλων που αναπτύσσονται από το τριφασικό τύλιγμα του στάτη μπορεί να μεταβληθεί, με τη μέθοδο των *διαδοχικών πόλων* (*consequent poles*), ή τοποθετώντας *πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη (multiple stator windings).*

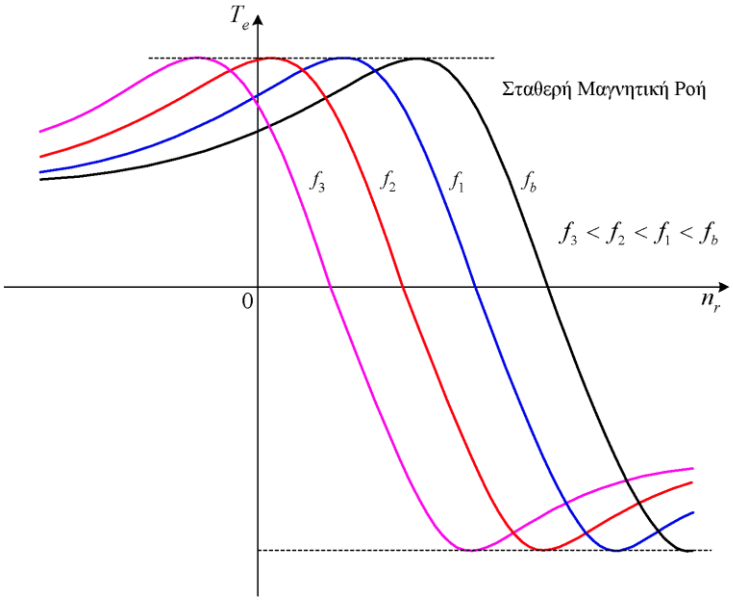
Στη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, με κάποιες απλές αλλαγές στη σύνδεση των ομάδων του τυλίγματος του στάτη, ο αριθμός των πόλων του μεταβάλλεται με ένα λόγο 2 προς 1. Έτσι, ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να έχει δύο ή τέσσερις πόλους και σύγχρονη ταχύτητα 3000rpm ή 1500rpm αντίστοιχα.

Όταν ο λόγος 2 προς 1 στην ταχύτητα δεν είναι βολικός, τοποθετούνται στο στάτη περισσότερα από ένα ανεξάρτητα τριφασικά τυλίγματα, με τον επιθυμητό αριθμό πόλων. Ανάλογα με τη ζητούμενη ταχύτητα, τροφοδοτείται κάθε φορά το κατάλληλο τύλιγμα. Το μειονέκτημα των πολλαπλών τυλιγμάτων είναι ότι αυξάνουν το κόστος του κινητήρα. Ακόμη, η μέθοδος των πολλαπλών τυλιγμάτων μπορεί να

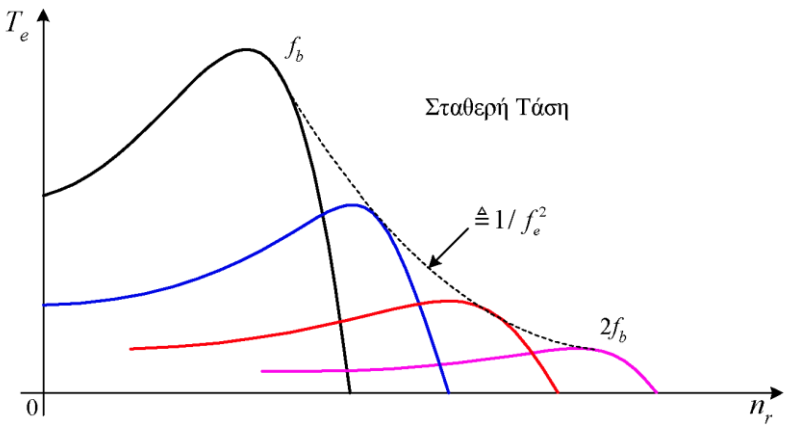
συνδυασθεί με τη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, για τη λειτουργία του κινητήρα σε περισσότερες ταχύτητες. Πρέπει να σημειωθεί ότι, η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη μεταβολή του αριθμών των πόλων, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε επαγωγικούς κινητήρες με βραχυκυκλωμένο κλωβό. Ο δρομέας των κινητήρων αυτών αναπτύσσει πάντα τόσους πόλους, όσοι είναι και οι πόλοι του στάτη. Αυτό δεν ισχύει στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα, όπου το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ένα καθορισμένο αριθμό πόλων ανάλογο με την κατασκευή του.

3.15 Έλεγχος της Ταχύτητας με τη Μεταβολή της Συχνότητας

Η βέλτιστη μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων κάθε είδους, είναι με τη ρύθμιση της συχνότητας τροφοδοσίας του στάτη. Έτσι, μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων και μαζί τους η ταχύτητα του κινητήρα. Η σύγχρονη ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ονομαστική συχνότητα f_b ονομάζεται *βασική (base)*.



Σχήμα 3.12α : Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας σε τιμές μικρότερες από τη βασική με σταθερή τη μαγνητική ροή



Σχήμα 3.12β : Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας σε τιμές μεγαλύτερες από τη βασική, με σταθερή την τάση.

Καθώς η συχνότητα των τάσεων τροφοδοσίας μπορεί να ρυθμιστεί σε τιμές μικρότερες, αλλά και μεγαλύτερες της ονομαστικής, η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να μεταβληθεί από το μηδέν, μέχρι μια τιμή πολλαπλάσια της βασικής. Το άνω όριο της ταχύτητας περιορίζεται από τη μηχανική αντοχή του κινητήρα. Εκτός από την ευρεία περιοχή ρύθμισης της ταχύτητας, η μέθοδος εξασφαλίζει τη λειτουργία του κινητήρα με μικρή ολίσθηση σε κάθε ταχύτητα. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης διατηρείται υψηλός.

3.16 Μεταβολή των Στροφών με Συνδυασμό Μεταβολής Συχνότητας και Τάσης Τροφοδοσίας (Voltage – Frequency Converter)

Θεωρητικά είναι γνωστό ότι κατά την εξήγηση της δημιουργίας του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου διαπιστώθηκε ότι η σύγχρονη ταχύτητα n_s του πεδίου είναι ανάλογη της συχνότητας f τροφοδοσίας του στάτη. Οπότε η ταχύτητα περιστροφής n του δρομέα είναι επίσης ανάλογη της συχνότητας f τροφοδοσίας του στάτη λόγω των σχέσεων, δηλαδή ισχύει ότι:

$$n = (1-s)\cdot n_s = (1-s)\cdot \frac{60\cdot f}{p}$$

Η ροπή ανατροπής ή μέγιστη ροπή εναλλακτικά δίνεται από τη σχέση:

$$T_{e_max} = \frac{1}{\omega_s}\frac{(3/2)V_{la}^2}{\sqrt{R_1^2+(X_1+x_2)^2}} \qquad (3.29)$$

Αν αγνοηθεί η ωμική ισοδύναμη αντίσταση του στάτη R_1 κατά Thevenin ως πολύ μικρή και η επαγωγική αντίδραση λόγω μαγνήτισης X_φ ως πολύ μεγάλη, τότε η ροπή ανατροπής T_{e_max} της σχέσης μεταπίπτει σε:

$$T_{e_\max} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{\left(3/2\right) \cdot \tilde{U}_1^2}{\left(X_1 + x_2\right)} \qquad (3.30)$$

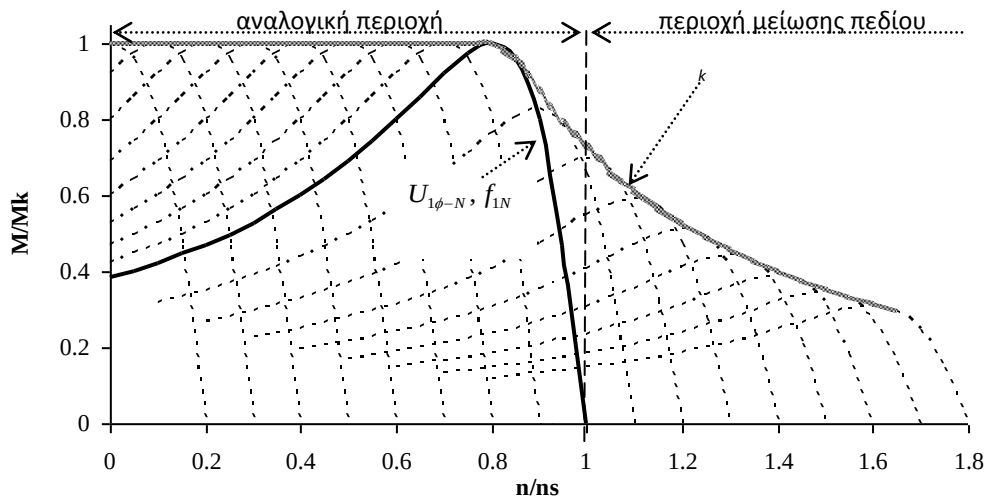
Δηλαδή διαπιστώνεται ότι η ροπή ανατροπής T_{e_max} της σχέσης είναι ανάλογη του τετραγώνου της φασικής τάσης του δικτύου $\tilde{U}_1$ και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας του δικτύου *f*. Συνοπτικά ισχύει ότι:

$$T_{e_\max} \propto \tilde{U}_1^2 \quad \text{και} \quad T_{e_\max} \propto \frac{1}{f^2}$$

Όταν η ταχύτητα του κινητήρα ρυθμίζεται σε τιμές μικρότερες της βασικής, η μείωση της συχνότητας συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της τάσης. Ειδικότερα, ο λόγος της τάσης προς τη συχνότητα *V/fe* διατηρείται σταθερός. Με τον τρόπο αυτό η μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα παραμένει περίπου σταθερή ($\varphi_\Sigma = V/fe$). Στο σχ. 3.12α εικονίζονται οι χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας του κινητήρα, σε διάφορες συχνότητες μικρότερες από τη βασική, όταν μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή. Παρατηρείται ότι η ροπή ανατροπής (μέγιστη ροπή), δε μεταβάλλεται με τη μεταβολή της συχνότητας. Έτσι, ο κινητήρας μπορεί να ελέγξει φορτία, τα οποία απαιτούν μεγάλη ροπή σε μικρές ταχύτητες. Επιπλέον, η δυναμική συμπεριφορά του κινητήρα είναι εξαιρετική.

Στην ονομαστική ταχύτητα, ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και τη βασική συχνότητα. Για την αύξηση της ταχύτητας, σε τιμές πέρα από την ονομαστική, η συχνότητα γίνεται μεγαλύτερη από τη βασική. Όμως, η τάση τροφοδοσίας διατηρείται σταθερή στην ονομαστική τιμή για την προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων. Επειδή η τάση δεν ακολουθεί την αύξηση της συχνότητας, η μαγνητική ροή μειώνεται, καθώς η συχνότητα αυξάνει. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της μέγιστης ροπής ανατροπής με το τετράγωνο της συχνότητας, όπως εικονίζεται στο σχ. 3.12β.

Στο σχήμα 3.13 συνδυάζεται ο έλεγχος ταχύτητας για τις δύο περιοχές ρύθμισης της μαγνητικής ροής (Φ_Σ = σταθερή και Φ_Σ = μειούμενη) και αντιστοίχως της συχνότητας (κάτω και άνω από την ονομαστική).



Σχήμα 3.13: Χαρακτηριστική ροπής –στροφών με μεταβολή συχνότητας και τάσης τροφοδοσίας $\tilde{U}_{1\phi}$, όπου υπάρχουν δύο περιοχές (με f_N και $\tilde{U}_{1-N}$ τα αντίστοιχα ονομαστικά μεγέθη):

Αναλογική περιοχή: f< f_N , $\tilde{U}_1 < \tilde{U}_{1-N}$, Περιοχή μείωσης πεδίου: f > f_N , $\tilde{U}_1 = \tilde{U}_{1-N}$

Αν και η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη ρύθμιση της συχνότητας προσφέρει πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας απ' όλες τις άλλες μεθόδους, η χρήση της έχει γενικευτεί μόλις τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται στην κατασκευή των κατάλληλων μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται *αντιστροφείς* (*inverters*), με λογικό κόστος και υψηλή αξιοπιστία. Οι προαναφερθέντες μετατροπείς ισχύος θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

4. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

4.1 Εισαγωγή

Γενικά με τον όρο «ηλεκτρονικά» εννοούνται τα ηλεκτρονικά δομικά στοιχεία και οι συσκευές που στηρίζονται στις ιδιότητες των ημιαγωγικών υλικών, τα οποία, από την άποψη των δυνατοτήτων δημιουργίας ηλεκτρικού ρεύματος, βρίσκονται μεταξύ των μεταλλικών αγωγών και των μονωτικών υλικών. Οι ημιαγωγοί διακρίνονται από τα αγώγιμα μέταλλα ως προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία είναι πολύ μικρότερη εκείνης των μετάλλων, καθώς και ως προς τη χαρακτηριστική ιδιότητα ότι διαθέτουν φορείς αρνητικού και θετικού φορτίου, αλλά και τη δυνατότητα επηρεασμού της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η τιμή της αγωγιμότητας μπορεί να μεταβάλλεται εντός μίας ευρείας περιοχής.

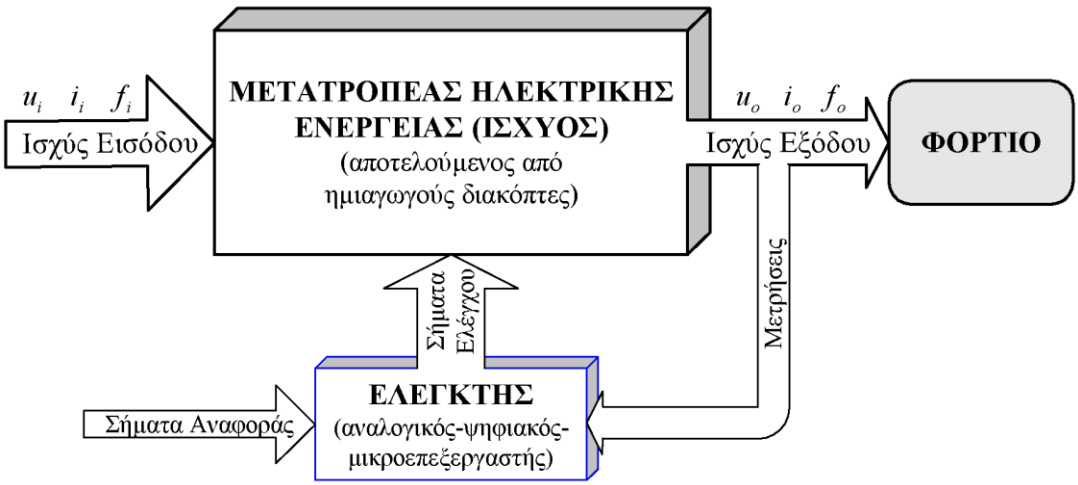
Με βάση αυτή τη δυνατότητα επιτυγχάνεται ο μηδενισμός του ρεύματος που ρέει μέσα στα ημιαγωγικά στοιχεία, καθώς και η επιλογή ρεύματος μιας επιθυμητής τιμής, φθάνοντας μέχρι μία ανώτατη επιτρεπτέα τιμή. Η ελεγξιμότητα της ροής του ρεύματος με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια αποτέλεσε την ιδιότητα κλειδί για την «επαναστατική» ηλεκτρονική τεχνολογία των τελευταίων δεκαετιών.

Η συνολική περιοχή των ηλεκτρονικών μπορεί να θεωρηθεί ως σύνθεση δύο μεγάλων υποπεριοχών, δηλ. της περιοχής των ηλεκτρονικών για την επεξεργασία πληροφοριών, όπου κυριαρχεί η απαίτηση να μην υπάρχουν απώλειες πληροφοριών, και της περιοχής των ηλεκτρονικών ισχύος για το μετασχηματισμό και τον έλεγχο της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας. Στη δεύτερη περιοχή κυρίαρχη απαίτηση είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενέργειας και η επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης, παρέχοντας με αξιοπιστία την εκάστοτε επιθυμητή ποσότητα ενέργειας. Η κατάταξη αυτή φαίνεται παραστατικά στο διάγραμμα του σχήματος 4.1, όπου διακρίνονται οι κατηγορίες των ιδιαίτερων γνωστικών περιοχών και αντικειμένων έρευνας και ανάπτυξης, που σχετίζονται με τα Ηλεκτρονικά Ισχύος.

Μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος αναφέρεται και ως μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας σημαντικός λόγος για τον οποίο κατασκευάζονται συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος είναι η επεξεργασία και ο έλεγχος της ηλεκτρικής ενέργειας.

Σχήμα 4.1 : Σχηματική παράσταση των περιοχών επιστήμης και τεχνολογίας των Ηλεκτρονικών

Η ανάγκη για την επεξεργασία της ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει από το γεγονός ότι η ηλεκτρική ισχύς παρέχεται με σταθερά χαρακτηριστικά. Συνήθως η διαθέσιμη πηγή ισχύος (δίκτυο ισχύος) είναι μια τριφασική πηγή σταθερής τάσης και συχνότητας. Όταν οι απαιτήσεις του φορτίου δεν είναι συμβατές με τα χαρακτηριστικά του διαθέσιμου δικτύου, είναι αναγκαία η χρήση ενός μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας (Μ.Η.Ε.). Στο σχ.4.2 παρουσιάζεται το γενικό λειτουργικό διάγραμμα του Μ.Η.Ε. Η διάταξη ισχύος μορφοποιεί κατάλληλα τις παραμέτρους εξόδου (τάση, ένταση, συχνότητα) έτσι, ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του φορτίου.



Σχήμα 4.2 : Γενικό λειτουργικό διάγραμμα των μετατροπέων ηλεκτρικής ενέργειας.

Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του μετασχηματισμού των κυματομορφών των ηλεκτρικών μεγεθών, όπως είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή, ή αντίστροφα η μετατροπή συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη, μεταβάλλοντας τη συχνότητα και την ενεργό τιμή αυτής. Μέσω αυτών των μετατροπών επιτυγχάνεται η τροφοδοσία των διαφόρων ηλεκτρικών φορτιών π.χ. μηχανών συνεχούς ρεύματος, μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος κ.λπ., όπου ιδιαίτερη σημασία έχει ο έλεγχος της ποσότητας ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του χρήστη, οι οποίες συνήθως είναι αρκετά πολύπλοκες.

Δηλαδή η έξοδος είναι επεξεργασμένη έτσι, ώστε να είναι αυτή που ταιριάζει στο εκάστοτε φορτίο.

Επιπλέον, οι διαδικασίες μετατροπής των ηλεκτρικών μεγεθών με ταυτόχρονη μετατροπή της ενέργειας, π.χ. από ηλεκτρική σε μηχανική, πρέπει να διεκπεραιώνεται γρήγορα, αξιόπιστα, με υψηλές τιμές βαθμού απόδοσης και του συντελεστή ισχύος, καθώς και με μικρό κόστος. Σε κάθε διαδικασία μετατροπής ισχύος οι απώλειες πρέπει να είναι μικρές και η απόδοση μεγάλη. Αυτό είναι σημαντικό, λόγω του κόστους της ενέργειας και της δυσκολίας απαγωγής της θερμότητας που παράγεται από την κατανάλωση ενέργειας. Άλλοι σπουδαίοι παράγοντες είναι η ελάττωση του όγκου, του βάρους και του κόστους. Ο συντελεστής ισχύος βελτιώνεται εάν αυξηθεί η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας των στοιχείων του μετατροπέα, διότι μειώνεται το περιεχόμενο των ανώτερων αρμονικών, οι οποίες συνοδεύουν τα ρεύματα και διαχέονται στο δίκτυο. Έτσι προκύπτει ποιοτικό όφελος για το συνολικό ενεργειακό σύστημα, που έχει ενσωματωμένους τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Επίσης πρέπει να επισημανθεί ότι, αν και οι δομές των ηλεκτρονικών μετατροπέων δεν αλλάζουν με ρυθμούς αντίστοιχους εκείνων των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος, εντούτοις γίνεται έρευνα για τη δημιουργία νέων τοπολογιών, αλλά κυρίως για βελτίωση των μεθόδων παλμοδότησης των διακοπτικών στοιχείων (π.χ. διάφοροι μέθοδοι PWM). Με την κατάλληλη διακοπτική λειτουργία των στοιχείων βελτιώνονται οι κυματομορφές ρευμάτων και τάσεων και συνεπώς βελτιώνονται τα ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία των ενεργειακών μεγεθών.

Στα περισσότερα συστήματα οι παραπάνω στόχοι δεν μπορούν να επιτευχθούν με αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα, στα οποία τα ηλεκτρονικά στοιχεία λειτουργούν στις γραμμικές (ενεργές) περιοχές λειτουργίας και ανάμεσα σ' αυτά και το δίκτυο πρέπει να παρεμβάλλεται ένας μετασχηματιστής (συνήθως αρκετά ογκώδης), ώστε να υπάρχει ηλεκτρική απομόνωση.

Στις εφαρμογές τα συστήματα με ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος εκτείνονται από την περιοχή των μικρών μεγεθών ισχύος (mW) μέχρι πολύ μεγάλες τιμές (τάξεως εκατοντάδων MW).

Από τη συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε εναλλασσόμενη μορφή, ένα ποσοστό της τάξης από 30% ως 40% , το οποίο αυξάνεται συνεχώς, υφίσταται κάποιου είδους μετατροπή.

4.2 Πεδία Εφαρμογών των Ηλεκτρονικών Ισχύος

Μερικά πεδία εφαρμογών των ηλεκτρονικών ισχύος είναι:

- **Τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS).** Η πρόοδος της τεχνολογίας και της μικροηλεκτρονικής οδήγησε στην κατασκευή συστημάτων που απαιτούν σταθεροποιημένη και συχνά αδιάλειπτη τροφοδοσία.
- **Εξοικονόμηση ενέργειας.** Το αυξανόμενο κόστος της ενέργειας και η ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος έδωσαν προτεραιότητα στην εξοικονόμηση ενέργειας. Μια τέτοια εφαρμογή των ηλεκτρονικών ισχύος αναφέρεται στον έλεγχο των ηλεκτρικών κινητήρων. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία ηλεκτροκινητήρων. Για κάθε τύπο κινητήρα έχουν αναπτυχθεί κατάλληλοι μετατροπείς, μέσω των οποίων ελέγχονται τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά (ροπή, ταχύτητα περιστροφής). Ακόμη, με τον έλεγχο της ταχύτητας των κινητήρων είναι δυνατή η σημαντική εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας. Η πλέον χαρακτηριστική εφαρμογή είναι το σύστημα κινητήρα-αντλίας. Στα συμβατικά συστήματα άντλησης ο κινητήρας τροφοδοτείται απευθείας από το δίκτυο και στρέφεται σταθερή ταχύτητα, ενώ η παροχή της αντλίας ρυθμίζεται με βάνες. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας προκαλεί μεγάλη σπατάλη ενέργειας, όταν η επιθυμητή παροχή από την αντλία είναι σημαντικά μικρότερη της ονομαστικής. Ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο την ίδια περίπου ισχύ, όπως και στην περίπτωση της ονομαστικής ροής, η οποία καταναλώνεται στις βάνες. Οι απώλειες ισχύος στις βάνες αποφεύγονται ρυθμίζοντας την ταχύτητα του κινητήρα μέσω ενός μετατροπέα ισχύος. Έτσι, η ρύθμιση της παροχής επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, χωρίς τη χρήση βανών. Μερικά άλλα παραδείγματα εφαρμογής των ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος για την εξοικονόμηση ενέργειας είναι οι αντλίες θερμότητας, τα

κλιματιστικά μηχανήματα, η λειτουργία των λυχνιών φθορισμού σε υψηλή συχνότητα (μεγαλύτερη των 20 kHz).

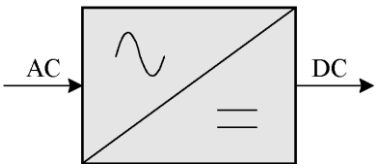
- **Έλεγχος διαδικασιών και βιομηχανικοί αυτοματισμοί.** Στον έλεγχο διαδικασιών υπάρχει αυξημένη ζήτηση για τον έλεγχο φορτίων μεταβαλλόμενου μεγέθους, εξαιτίας της υψηλής τους απόδοσης. Στις αυτοματοποιημένες βιομηχανίες τα robot, για τον έλεγχο της θέσης και της ταχύτητας, κινούνται με ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα υψηλής απόδοσης (servo drive). Πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση υπολογιστών στη βιομηχανία είναι ένας σημαντικός παράγοντας, που καθιστά δυνατό τον έλεγχο διαδικασιών και την αυτοματοποίηση της βιομηχανίας.
- **Μεταφορές.** Σε ορισμένες χώρες τα ηλεκτρικά τρένα χρησιμοποιούνται ευρέως εδώ και πολλά χρόνια. Σήμερα, υπάρχει δυνατότητα χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων στις μεγάλες πόλεις για τη μείωση των καυσαερίων και της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Επιπλέον, τα ηλεκτρικά οχήματα απαιτούν φορτιστές μπαταριών, οι οποίοι χρησιμοποιούν ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος.
- **Ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές.** Περιλαμβάνουν τις συγκολλήσεις, τις επιμεταλλώσεις και την επαγωγική θέρμανση.
- **Εφαρμογές σχετικές με το σύστημα παραγωγής μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας**. Μια τέτοια εφαρμογή αναφέρεται στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με γραμμές μεταφοράς υψηλής dc τάσης (HVDC). Στην αρχή της γραμμής μεταφοράς η τάση και το ρεύμα με τη συχνότητα της γραμμής μετατρέπονται σε dc. Στο τέλος της γραμμής το dc μετατρέπεται και πάλι σε ac με τη συχνότητα του δικτύου. Επίσης, οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας προσπαθούν να αξιοποιήσουν παραγωγικότερα το υπάρχον δίκτυο μεταφοράς.

4.3 Είδη Μετατροπέων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας (ισχύος) διακρίνονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες, ανάλογα με τη μορφή της ισχύος εισόδου και εξόδου. Αυτές είναι:

- **Μετατροπείς ac-dc ή Ανορθωτές (Rectifiers).**

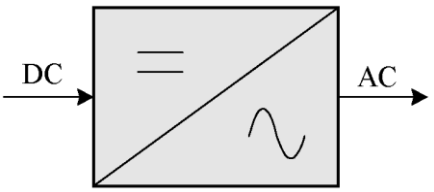
Ανορθωτές ονομάζονται οι διατάξεις ισχύος, οι οποίες μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Ανάλογα με τη μορφή της εναλλασσόμενης εισόδου οι ανορθωτές διακρίνονται σε μονοφασικούς και πολυφασικούς (διφασικούς, τριφασικούς, εξαφασικούς). Ακόμη διακρίνονται σε ελεγχόμενους και μη ελεγχόμενους, ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι μεταβαλλόμενη ή σταθερή. Το γενικό σύμβολο των μετατροπέων ac-dc εικονίζεται στο σχ. 4.3.



Σχήμα 4.3 : Γενικό σύμβολο του ανορθωτή

- **Μετατροπείς dc-ac ή Αντιστροφείς (Inverters).**

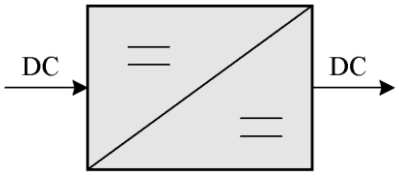
Οι αντιστροφείς μετατρέπουν το ρεύμα / την τάση συνεχούς μορφής σε εναλλασσόμενη. Η λειτουργία τους δηλαδή είναι αντίθετη από εκείνη των ανορθωτών. Η έξοδος των αντιστροφέων είναι είτε μονοφασική, τάση, είτε πολυφασική (συνήθως τριφασική). Επίσης, η συχνότητα και το πλάτος της τάσης ή του ρεύματος εξόδου είναι ελεγχόμενα. Το γενικό σύμβολο των αντιστροφέων εικονίζεται στο Σχ. 4.4.



Σχήμα 4.4 : Γενικό σύμβολο του αντιστροφέα

- **Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (dc-dc converters, choppers).**

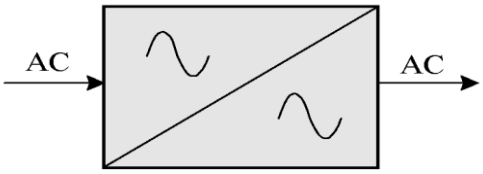
Οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος μετατρέπουν τη συνεχή τάση με ορισμένο πλάτος και πολικότητα σε συνεχή τάση με διαφορετικό πλάτος ή/και πολικότητα. Διακρίνονται σε μετατροπείς υποβιβασμού (step-down) και ανύψωσης (step-up) της τάσης, ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της τάσης εισόδου. Ακόμη, διακρίνονται σε μετατροπείς με απομόνωση και χωρίς απομόνωση της εξόδου από την είσοδό τους. Το γενικό σύμβολο των μετατροπέων συνεχούς ρεύματος δίνεται στο σχ. 4.5.



Σχήμα 4.5 : Γενικό σύμβολο του μετατροπέα συνεχούς ρεύματος

- **Μετατροπείς εναλλασσομένου ρεύματος ή Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters).**

Οι κυκλομετατροπείς μετατρέπουν απευθείας, την εναλλασσόμενη τάση σταθερού πλάτους και συχνότητας, σε εναλλασσόμενη τάση με ρυθμιζόμενο πλάτος και συχνότητα. Ο κυκλομετατροπέας ονομάζεται υποβιβασμού συχνότητας (step-down) όταν η συχνότητα εξόδου είναι μικρότερη της συχνότητας εισόδου. Διαφορετικά χαρακτηρίζεται ως ανύψωσης συχνότητας (step-up). Οι κυκλομετατροπείς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πολύ μεγάλης ισχύος.

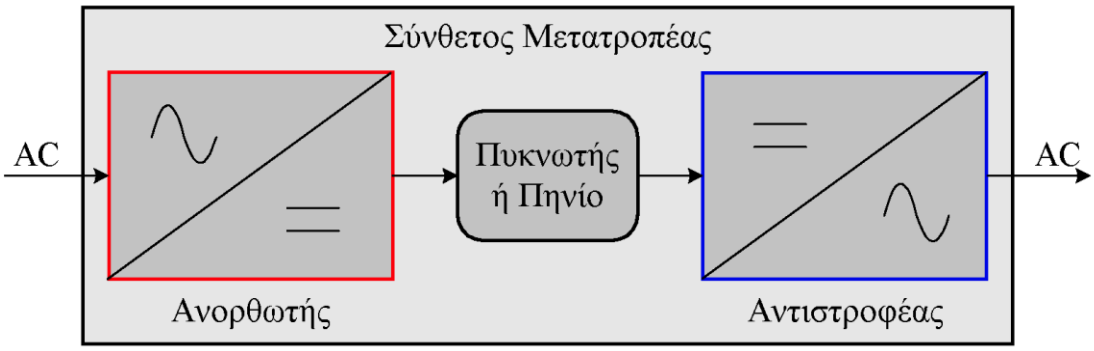


Σχήμα 4.6 : Γενικό σύμβολο του κυκλομετατροπέα

Μια ειδική κατηγορία των μετατροπέων εναλλασσομένου ρεύματος είναι οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (ac voltage controllers). Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης παρέχουν στην έξοδό τους μια τάση μεταβαλλόμενου πλάτους, η συχνότητα της οποίας είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα της ac πηγής εισόδου.

Ένας πρακτικός μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας συχνά περιλαμβάνει περισσότερους από ένα στοιχειώδης μετατροπέα ισχύος. Έτσι η συνεχής τάση εισόδου των αντιστροφέων παρέχεται συνήθως από ένα ανορθωτή, καθώς το διαθέσιμο δίκτυο ισχύος είναι εναλλασσόμενο (σχ. 4.7). Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η αποσύζευξη των δύο μετατροπέων. Η αποσύζευξη εξασφαλίζει ότι η

λειτουργία του κάθε μετατροπέα δεν επηρεάζει τους υπόλοιπους. Η αποσύζευξη επιτυγχάνεται με την προσθήκη μεταξύ των μετατροπέων στοιχείων που αποθηκεύουν ενέργεια, δηλαδή πυκνωτών ή πηνίων.



Σχήμα 4.7 : Λειτουργικό διάγραμμα ενός σύνθετου μετατροπέα, ο οποίος αποτελείται από ένα ανορθωτή και ένα αντιστροφέα. Αξιοσημείωτη είναι η παρουσία του στοιχείου που αποθηκεύει ενέργεια (πυκνωτής ή πηνίο), το οποίο απεμπλέκει τη λειτουργία των δύο μετατροπέων

Οι μετατροπείς ισχύος διακρίνονται ακόμη σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο μετάβασης των διακοπτικών στοιχείων τους:

- **Μετατροπείς με φασικό έλεγχο (natural, line, load commutated ή phase controlled converters).** Οι διακόπτες των μετατροπέων με φασικό έλεγχο ανοίγουν ή και κλείνουν με τη βοήθεια της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου (εισόδου) ή των συνθηκών που επιβάλλει το φορτίο. Οι μετατροπείς με φασικό έλεγχο έχουν περιορισμένες δυνατότητες και χρήσεις. Η εξέλιξή τους έχει σημειωθεί άλλωστε πριν από αρκετές δεκαετίες, με την κατασκευή του θυρίστορ πυριτίου (*SCR).* Η τάση εξόδου των μετατροπέων με φασική μετάβαση αποτελείται από τμήματα της τάσης εισόδου, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ισχυρές αρμονικές συνιστώσες στην είσοδο και την έξοδο του μετατροπέα. Έτσι, ένας αντιστροφέας τάσης δεν μπορεί να ανήκει στην κατηγορία των μετατροπέων με φασική μετάβαση. Αντίθετα, οι τυπικοί ανορθωτές με διόδους ή *SCR* και οι κυκλομετατροπείς υποβιβασμού της συχνότητας είναι μετατροπείς με φασική μετάβαση.
- **Μετατροπείς με εξαναγκασμένη μετάβαση (force commutated ή switchmode converters).** Η κατάσταση των διακοπτών στους μετατροπείς με εξαναγκασμένη μετάβαση ορίζεται αποκλειστικά από τη μονάδα ελέγχου της διάταξης ισχύος. Οι διακόπτες των μετατροπέων αυτών λειτουργούν συνήθως σε υψηλές συχνότητες και έτσι μπορούν να θεωρηθούν ως διακοπτικοί ενισχυτές ισχύος με υψηλό κέρδος *(switching-mode power amplifiers).*

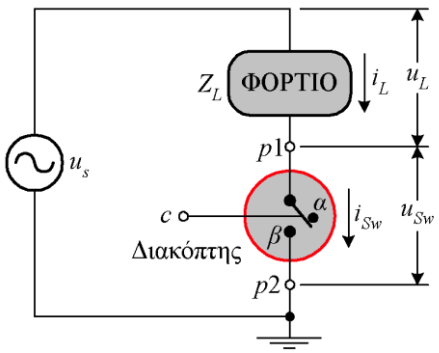
- **Μετατροπείς συντονισμού (resonant converters*)*.** Η έναυση και η σβέση των διακοπτών στους μετατροπείς συντονισμού επιτελείται όταν η τάση στα άκρα τους, ή/και το ρεύμα που τους διαρρέει, είναι μηδέν. Επειδή οι περισσότερες τοπολογίες των μετατροπέων αυτών απαιτούν κάποιο κύκλωμα συντονισμού *LC*, επικράτησε να ονομάζονται μετατροπείς συντονισμού. Τα πλεονεκτήματα των μετατροπέων συντονισμού έναντι των δύο προηγούμενων τύπων είναι ότι περιορίζονται δραστικά οι μεταβατικές απώλειες ισχύος στους διακόπτες και η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή.

4.4 Ημιαγωγοί Διακόπτες Ισχύος

Οι μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας υλοποιούνται με τη χρήση ημιαγωγών στοιχείων ισχύος, τα οποία λειτουργούν ως διακόπτες. Η χρήση των διακοπτών στην κατασκευή των μετατροπέων ισχύος είναι αναγκαία, προκειμένου ο βαθμός απόδοσης να είναι υψηλός. Ο υψηλός βαθμός απόδοσης σημαίνει αποδοτική χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας περιορίζοντας τις απώλειες ισχύος. Επιπλέον, οι απώλειες ισχύος προκαλούν τη θέρμανση του μετατροπέα, με αποτέλεσμα να απαιτείται η χρησιμοποίηση ψυκτικών μέσων είτε με φυσική ή εξαναγκασμένη ροή αέρα, είτε νερού για την απαγωγή της θερμότητας. Οι διατάξεις ψύξης είναι ανεπιθύμητες, καθώς αυξάνουν τον όγκο και το κόστος των συστημάτων ισχύος. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό κάθε ημιαγωγού διακόπτη ισχύος πρέπει να διατηρείται μικρότερη από κάποια μέγιστη τιμή για την ασφαλή λειτουργία του. Η απαίτηση για υψηλό βαθμό απόδοσης είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο υψηλότερη είναι η ισχύς που χειρίζεται ο μετατροπέας. Έτσι ένας μετατροπέας που ελέγχει μια ποσότητα ισχύος 100MW, ακόμη και αν έχει βαθμό απόδοσης 99% προκαλεί απώλειες 1MW. Για την απαγωγή του 1MW από τη διάταξη του μετατροπέα απαιτούνται εξαιρετικά δαπανηρά συστήματα. Οι κυριότεροι ημιαγωγοί διακόπτες είναι η δίοδος, διάφορα είδη transistors, ο *SCR* και το *GTO (Gate Turn-Off).*

4.5 Καταστάσεις Λειτουργιάς Διακοπτών Ισχύος

Οι διακόπτες ισχύος έχουν δύο καταστάσεις λειτουργίας, την *κατάσταση αποκοπής* και την *κατάσταση αγωγιμότητας ή αγωγής*. Τα transistors έχουν μια επιπλέον περιοχή λειτουργίας, την *ενεργό περιοχή*. Η λειτουργία των transistors ισχύος στην ενεργό περιοχή δεν είναι επιθυμητή, εξαιτίας των υψηλών απωλειών ισχύος σ' αυτή. Ο ημιαγωγός διακόπτης κάθε είδους παριστάνεται συχνά για τη διευκόλυνση της ανάλυση των μετατροπέων ισχύος ως μηχανικός διακόπτης με ιδανικά λειτουργικά χαρακτηριστικά, όπως στο σχ. 4.8.



Σχήμα 4.8 : Κύκλωμα ισχύος στο οποίο ο ημιαγωγός διακόπτης κάθε είδους παριστάνεται ως ένας μηχανικός διακόπτης. Ο ακροδέκτης ελέγχου *c* υπάρχει σε ορισμένους τύπους διακοπτών

Η θέση *α* αντιστοιχεί στην κατάσταση αποκοπής του διακόπτη, ή κατάσταση OFF. Στην κατάσταση αποκοπής ο διακόπτης δεν επιτρέπει τη ροή του ρεύματος ($i_{Sw} = i_L = 0$), ενώ η τάση στα άκρα ισχύος του διακόπτη (*p* 1 και *p* 2) είναι ίση με την τάση της πηγής τροφοδοσίας του κυκλώματος ($u_{Sw} = u_s$). Η τάση στα άκρα του φορτίου είναι μηδενική, όταν ο διακόπτης είναι στην κατάσταση αποκοπής ($u_L = 0$).

Η παραπάνω περιγραφή αναφέρεται σ' ένα *ιδανικό διακόπτη* ισχύος. Στους πραγματικούς ημιαγωγούς διακόπτες υπάρχει ένα ρεύμα *διαρροής* στην κατάσταση αποκοπής, το οποίο είναι εξαιρετικά μικρό. Η τάση της πηγής τροφοδοσίας πρέπει να είναι μικρότερη από μια μέγιστη τιμή, η οποία είναι χαρακτηριστική για τον κάθε διακόπτη και ονομάζεται *τάση διάσπασης* ή *τάση αποκοπής (blocking voltage)*. Αν η τάση της πηγής u_s υπερβεί την τάση διάσπασης του διακόπτη, τότε ο διακόπτης καταστρέφεται από υπερθέρμανση. Επιπλέον, η πολικότητα της πηγής πρέπει να είναι η κατάλληλη. Έτσι, κάποια είδη διακοπτών, όπως τα transistor, απαιτούν συνεχή τάση τροφοδοσίας. Αντίθετα, η τάση της πηγής μπορεί να είναι εναλλασσόμενη στη δίοδο και το *SCR*.

Στη θέση αγωγής β ή κατάσταση ON, ο διακόπτης επιτρέπει τη ροή του ρεύματος. Η τιμή του ρεύματος δεν εξαρτάται από το διακόπτη, αλλά αποκλειστικά από το εξωτερικό κύκλωμα ισχύος, σύμφωνα με τη σχέση

$$I_{SwF} = I_L = \frac{V_S}{Z_L} \qquad (4.1)$$

Η τιμή του ρεύματος αγωγιμότητας I_{SwF} μαζί με την τάση διάσπασης αποτελούν τα δύο κυριότερα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε διακόπτη ισχύος. Η τάση στα άκρα του ιδανικού διακόπτη στην κατάσταση αγωγής είναι μηδενική (u_{Sw} = 0). Αντίθετα, η τάση στα άκρα ενός πραγματικού ημιαγωγού διακόπτη στην αγώγιμη κατάσταση, η οποία ονομάζεται *τάση αγωγιμότητας,* είναι μη μηδενική. Η τιμή της τάσης αγωγιμότητας έχει καθοριστική επίδραση στις απώλειες ισχύος του διακόπτη. Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές για την υλοποίηση διακοπτών με την ελάχιστη δυνατή τάση αγωγιμότητας.

Οι καταστάσεις αποκοπής και αγωγιμότητας αποτελούν τις δύο καταστάσεις μόνιμης λειτουργίας κάθε διακόπτη. Η διαδικασία της μετάβασης ενός διακόπτη από τη μια μόνιμη κατάσταση στην άλλη έχει καθοριστική επίδραση στη λειτουργία του μετατροπέα ισχύος, ιδιαίτερα όταν η συχνότητα των μεταβάσεων είναι υψηλή.

Στον ιδανικό διακόπτη ο χρόνος μετάβασης είναι μηδέν. Αντίθετα, το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη μετάβαση ενός πραγματικού διακόπτη, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους του. Κατά το διάστημα της μετάβασης, ο διακόπτης υπόκειται ταυτόχρονα σε υψηλές τάσεις και ρεύματα. Επομένως, ο χρόνος μετάβασης του διακόπτη πρέπει να είναι πολύ μικρότερος από το διάστημα της μόνιμης λειτουργίας (ON ή OFF), καθώς οι απώλειες ισχύος κατά τη μετάβαση είναι πολλαπλάσιες των απωλειών αγωγιμότητας. Μεγάλη σημασία, εκτός από το χρονικό διάστημα της μετάβασης, έχει ο τρόπος που μεταβάλλονται η τάση και το ρεύμα, έτσι ώστε να μην προκληθούν υπερτάσεις ή υψηλά ρεύματα στη διάταξη ισχύος. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε ημιαγωγού διακόπτη ισχύος συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη των ημιαγωγών διακοπτών.

Τάση διάσπασης ή αποκοπής	Είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να επιβληθεί στα άκρα ισχύος του διακόπτη σε κατάσταση αποκοπής.
Ρεύμα αγωγής	Είναι το μέγιστο ρεύμα που επιτρέπεται να ρέει μέσω του διακόπτη σε κατάσταση αγωγιμότητας.
Χρόνοι μετάβασης	Ορίζονται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη μετάβαση του διακόπτη από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγής (χρόνος έναυσης) και το αντίθετο (χρόνος σβέσης). Οι χρόνοι μετάβασης είναι μηδενικοί στον ιδανικό διακόπτη.
Τάση αγωγιμότητας	Είναι η πτώση τάσης στα άκρα ισχύος του διακόπτη σε κατάσταση αγωγιμότητας. Η τάση αγωγιμότητας είναι μηδέν στον ιδανικό διακόπτη.
Ρεύμα διαρροής	Είναι το ρεύμα μέσω του διακόπτη σε κατάσταση αποκοπής. Ο ιδανικός διακόπτης έχει μηδενικό ρεύμα διαρροής.

4.6 Τρόποι Μετάβασης Διακοπτών Ισχύος

Η διαδικασία μετάβασης ενός διακόπτη από την κατάσταση αποκοπής στην οποία ο διακόπτης δεν επιτρέπει τη ροή του ρεύματος, στην κατάσταση αγωγιμότητας όπου ο διακόπτης διαρρέεται από το υψηλό ρεύμα του φορτίου, ονομάζεται *έναυση (turn-on)*. Αντίστοιχα, η μετάβαση του διακόπτη από την κατάσταση αγωγής στην κατάσταση αποκοπής ονομάζεται *σβέση (turn-off)*. Η σβέση των διακοπτών είναι περισσότερο δύσκολη και χρονοβόρα από την έναυση. Οι διακόπτες ισχύος διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο που επιτελείται η διαδικασία της έναυσης και της σβέσης :

- **Μη ελεγχόμενοι διακόπτες.** Η έναυση και η σβέση στους μη ελεγχόμενους διακόπτες επιβάλλεται από το κύκλωμα ισχύος. Επομένως, οι μη ελεγχόμενοι διακόπτες δεν έχουν ακροδέκτη ελέγχου, αλλά μόνο ακροδέκτες ισχύος. Η δίοδος είναι ο κυριότερος διακόπτης αυτής της κατηγορίας.

- **Πλήρως ελεγχόμενοι διακόπτες**. Η έναυση και η σβέση στους πλήρως ελεγχόμενους διακόπτες καθορίζεται από ένα σήμα οδήγησης σε μορφή παλμού, το οποίο επιβάλλεται στον ακροδέκτη ελέγχου του διακόπτη *c* (σχ. 4.8). Τα transistors είναι οι πλέον διαδεδομένοι πλήρως ελεγχόμενοι διακόπτες.
- **Μερικώς ελεγχόμενοι ή ημιελεγχόμενοι διακόπτες.** Οι διακόπτες της κατηγορίας αυτής διαθέτουν ακροδέκτη ελέγχου, μέσω του οποίου ελέγχεται μόνο η διαδικασία της έναυσης. Αντίθετα, η σβέση του διακόπτη επιβάλλεται από την τάση ή το ρεύμα του κυκλώματος ισχύος. Το *thyristor* είναι ο σημαντικότερος ημιελεγχόμενος διακόπτης.

4.7 Μεταβολή των Στροφών Ασύγχρονου Κινητήρα με Συνδυασμό Μεταβολής Συχνότητας και Τάση Τροφοδοσίας και Χρήση της Μεθόδου PWM

Ένας τρόπος τροφοδότησης του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα με τριφασική τάση μεταβλητού πλάτους και συχνότητας είναι η εφαρμογή της μεθόδου «Pulse width modulation- PWM», δηλαδή της μεθόδου διαμόρφωσης πλάτους παλμών**.**

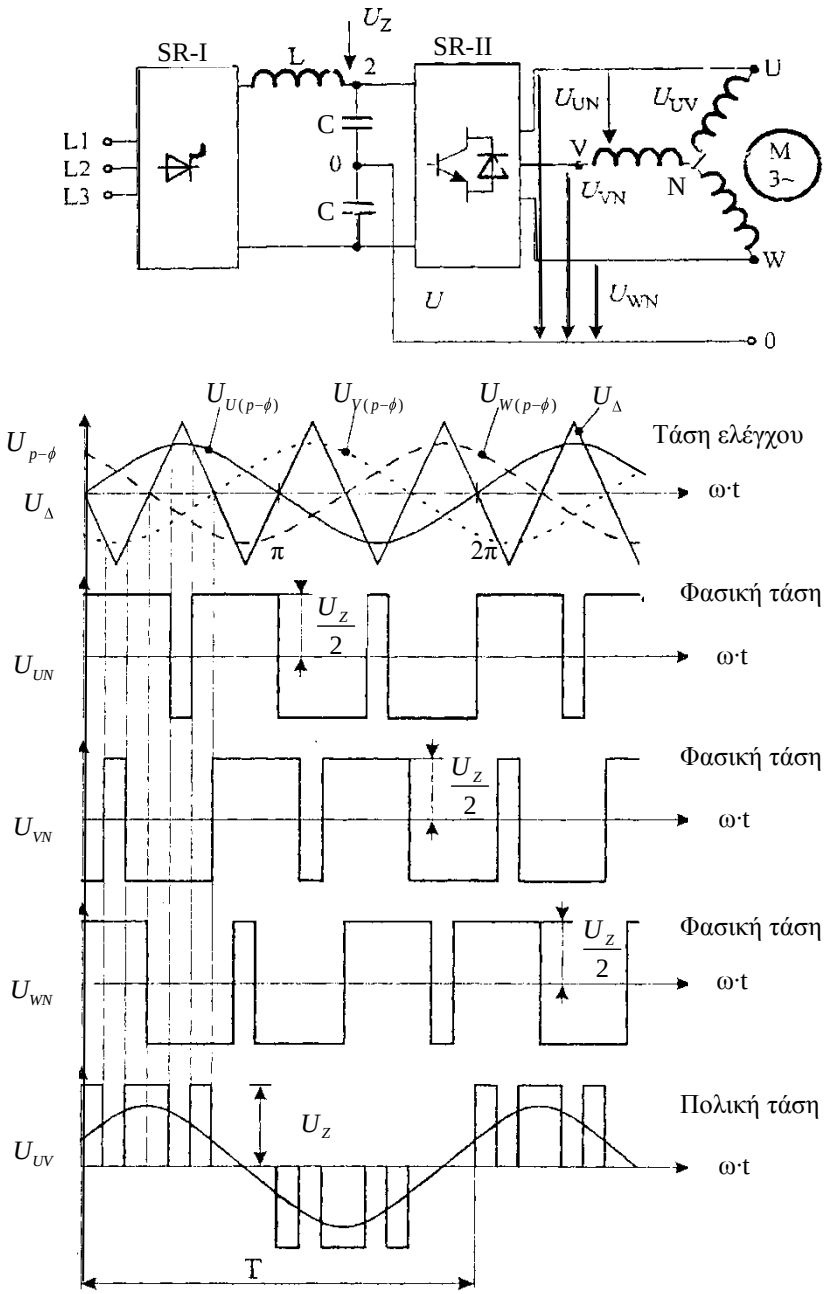
Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η αντίστοιχη διάταξη μαζί με τις βασικές κυματομορφές τάσεων της μεθόδου διαμόρφωσης πλάτους παλμών.

Μία τέτοια διάταξη με την οποία επιτυγχάνεται η μεταβολή της συχνότητας και της τάσης τροφοδοσίας του ασύγχρονου κινητήρα φαίνεται στο σχήμα 4.10 με χρήση ενός μετατροπέα συχνότητας με ενδιάμεση συνεχή τάση.

Ο μετατροπέας συχνότητας αποτελείται από τρία βασικά κυκλώματα:

- **τον ανορθωτή:** Ανορθώνει την τριφασική τάση σε συνεχή τάση U_{di} με διακύμανση. Ο ανορθωτής αυτός αποτελείται από μία γέφυρα τύπου – B6 από διόδους ή από θυρίστορς. Στην περίπτωση που το δίκτυο είναι μονοφασικό, τότε έχουμε γέφυρα - B2.
- **το ενδιάμεσο κύκλωμα:** Αποτελείται από έναν πυκνωτή *C* που κρατάει τη συνεχή τάση U_Z σταθερή. Ενδέχεται να υπάρχει ένα πηνίο εξομάλυνσης *L* της τάσης U_{di} πριν από τον πυκνωτή *C*.
- **τον αντιστροφέα:** Μετατρέπει τη συνεχή τάση U_Z σε τριφασική τάση διαφορετικής συχνότητας και πλάτους από την αρχική. Ο αντιστροφέας αποτελείται

από μία γέφυρα – B6 με τρανζίστορ ισχύος ή MOSFET ή IGBT. Αντιπαράλληλα σε κάθε τρανζίστορ είναι συνδεδεμένη μία δίοδος ελεύθερης αγωγής. Τα τρανζίστορ λειτουργούν σαν διακόπτες, δηλαδή πραγματοποιούν μία *ON-OFF* λειτουργία.



Σχήμα 4.9: Συντμημένη διάταξη τροφοδότησης ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα με διαμόρφωση τάσης και συχνότητας δικτύου και βασική αρχή περιγραφή λειτουργίας της μεθόδου διαμόρφωσης πλάτους τάσης PWM

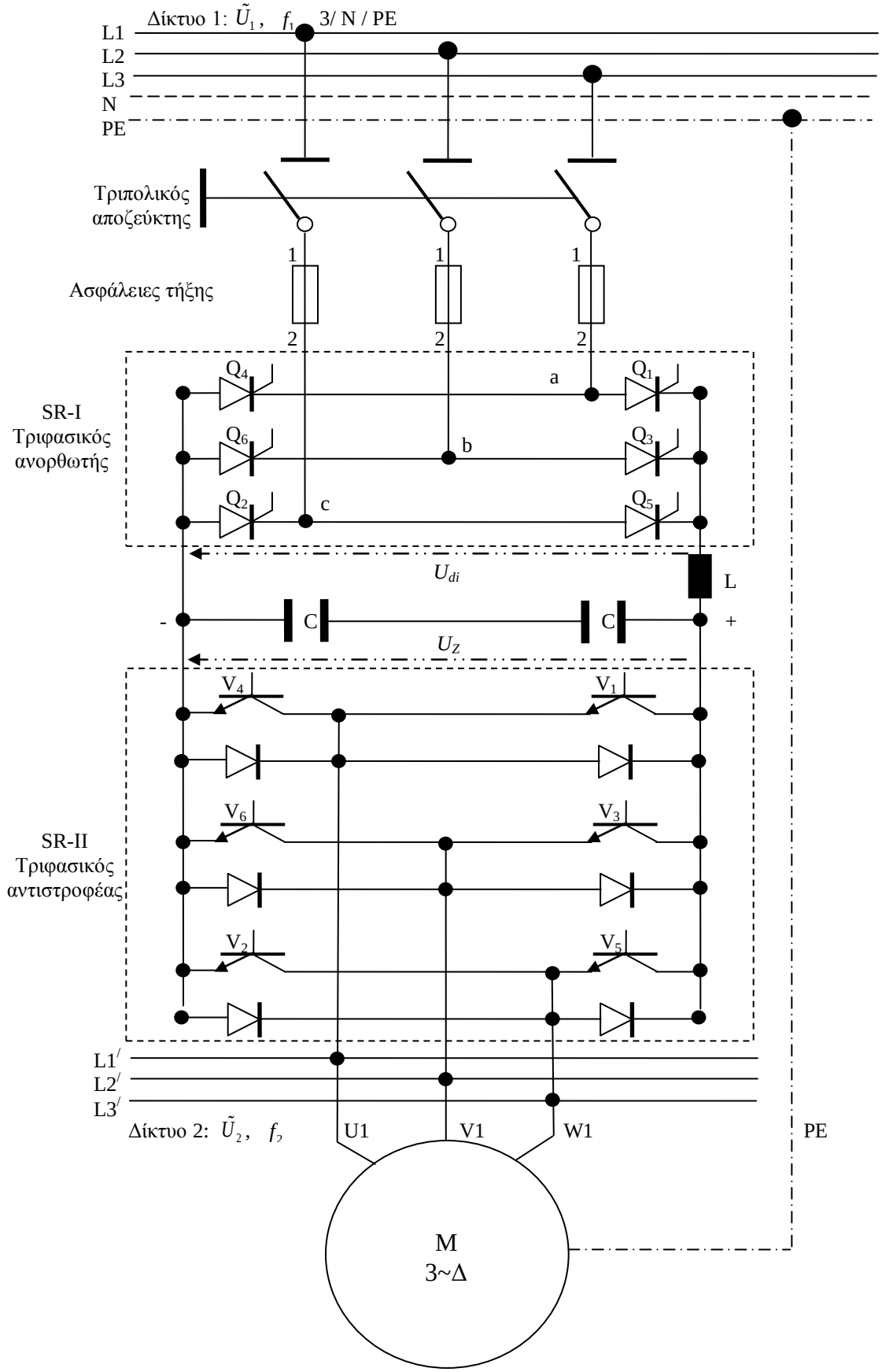
Το κύκλωμα της τριφασικής ανόρθωσης που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10 αποτελεί την καλύτερη λύση μετατροπής εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Αυτό οφείλεται στις δυνατότητες παροχής υψηλής ισχύος εξόδου και της μικρής

κυμάτωσης της τάσης εξόδου. Επίσης ένα μεγάλο πλεονέκτημα της ανόρθωσης αυτής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει μετασχηματιστή εισόδου χωρίς να υπάρχει το πρόβλημα του μαγνητικού κορεσμού, όπως στην περίπτωση της τριφασικής ανόρθωσης κοινού σημείου. Οι διάφορες τάσεις εισόδου εφαρμόζονται στην έξοδο ως εξής:

- V_{cb} μέσω των θυρίστορ Q5,Q6,
- V_{ab} μέσω των θυρίστορ Q6,Q1,
- V_{ac} μέσω των θυρίστορ Q1,Q2,
- V_{bc} μέσω των θυρίστορ Q2,Q3,
- V_{ba} μέσω των θυρίστορ Q3,Q4,
- V_{ca} μέσω των θυρίστορ Q4,Q5.

Τα θυρίστορ Q1, Q3, Q5 ονομάζονται θετική ομάδα της ανόρθωσης, επειδή άγουν κατά τη θετική ημιπερίοδο των τάσεων εισόδου. Ομοίως τα θυρίστορ Q4, Q6,Q2 ονομάζονται αρνητική ομάδα, επειδή άγουν κατά την αρνητική ημιπερίοδο των τάσεων εισόδου.

Κατά την τριφασική ανόρθωση η γωνία έναυσης *α* των θυρίστορ μετράται από τη γωνία $\omega t=30^o$ των αντίστοιχων φασικών τάσεων τους. Οι παλμοί έναυσης των θυρίστορ μιας ομάδας έχουν μεταξύ τους μια διαφορά φάσης 120°, όπως συμβαίνει και με τις αντίστοιχες φασικές τους τάσεις. Επομένως κάθε θυρίστορ άγει για 120°. Τα θυρίστορς της αρνητικής ομάδας αρχίζουν να άγουν μετά από 180° σε σχέση με τα αντίστοιχα τους θυρίστορς της θετικής ομάδας. Δηλαδή, αν το θυρίστορ Q1 αρχίζει να άγει σε μια γωνία *α*, τότε το αντίστοιχο του θυρίστορ από την αρνητική ομάδα, το οποίο είναι το Q4, θα αρχίσει να άγει στη γωνία $\alpha+180^o$. Για κάθε περίοδο της τάσης εισόδου η τάση εξόδου έχει έξι παλμούς. Για το λόγο αυτό η ανόρθωση αυτή ονομάζεται πολλές φορές ανόρθωση έξι παλμών. Όταν η γωνία έναυσης είναι μηδέν, τότε η ανόρθωση λειτουργεί σαν μη ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση γέφυρας.



Σχήμα 4.10: Διάταξη τροφοδότησης ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα με διαμόρφωση τάσης και συχνότητας δικτύου μέσω μετατροπέα συχνότητας με ενδιάμεση συνεχή τάση

Το ενδιάμεσο κύκλωμα απλώς μειώνει τη διακύμανση της τάσης του τριφασικού ανορθωτή (ουσιαστικά πρόκειται για ένα φίλτρο).

Ακολουθεί ο τριφασικός αντιστροφέας, ο οποίος μέσω κατάλληλης λειτουργίας των τρανζίστορ ισχύος V_1 , V_2 , V_3 , V_4 , V_5 , V_6, σχηματίζονται τετραγωνικοί παλμοί τάσης μεταβαλλόμενης διάρκειας όπως του σχήματος 4.9, που τελικά τροφοδοτούν το εκάστοτε φορτίο.

Μία τέτοια διάταξη χρησιμοποιείται προς διερεύνηση της δυνατότητας εξοικονόμησης ενέργειας στην περίπτωση τροφοδότησης ενός επαγωγικού κινητήρα, όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

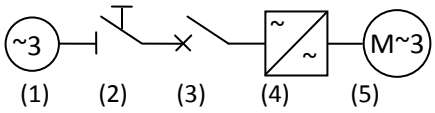
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

5.1. Εισαγωγή

Τα σύγχρονα πλοία είναι εξοπλισμένα με πολλούς επαγωγικούς κινητήρες διαφόρων τιμών ονομαστικής ισχύος που κυμαίνονται από μερικές εκατοντάδες Watts μέχρι αρκετά MW. Οι περισσότεροι από αυτούς είναι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες τύπου κλωβού, με εξαίρεση μικρούς μονοφασικούς κινητήρες που χρησιμοποιούνται κυρίως σε χώρους ενδιαίτησης και κάποιους πολυφασικούς κινητήρες ποικίλων δομών που χρησιμοποιούνται ως κινητήρες πρόωσης.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του επαγωγικού κινητήρα είναι η απλότητα κατασκευής και λειτουργίας του, η αντοχή του και το χαμηλό κόστος κατασκευής του. Ωστόσο, έχουν και μειονεκτήματα, όπως μεγάλα ρεύματα εκκίνησης – τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές πτώσεις τάσης – μικρή ροπή εκκίνησης και η μικρή σταθερότητα ταχύτητας περιστροφής, καθώς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το φορτίο. Η απόδοση του επαγωγικού κινητήρα είναι αρκετά ικανοποιητική, αν λειτουργεί κοντά στην ονομαστική ισχύ και την ταχύτητά του.

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος έχει μειώσει σημαντικά τα προβλήματα του υψηλού ρεύματος εκκίνησης και της χαμηλής ροπής εκκίνησης. Ωστόσο, τα ηλεκτρονικά ισχύος προκαλούν ποιοτικά προβλήματα, όπως η δημιουργία αρμονικών. Η ύπαρξη αρμονικών ρεύματος (ή τάσης) στην έξοδο των ηλεκτρονικών ισχύος (βλ. Σχήμα 5.1 μεταξύ (4) & (5)) προκαλούν πρόσθετη απώλεια ισχύος στον επαγωγικό κινητήρα, λόγω των απωλειών μαγνητικής υστέρησης, των δινορρευμάτων στον πυρήνα και του επιδερμικού φαινομένου στις περιελίξεις από χαλκό.



Σχήμα 5.1. Τοπολογία επαγωγικού κινητήρα τροφοδοτούμενου μέσω ηλεκτρονικών ισχύος: (1) τριφασική τροφοδοσία, (2) αποζεύκτης, (3) διακόπτης κυκλώματος, (4),μετατροπέας AC/AC, (5) επαγωγικός κινητήρας.

Ωστόσο, σε άλλες περιπτώσεις, όπως η συνεχής λειτουργία κοντά στην ονομαστική ροπή φορτίου, τα ηλεκτρονικά ισχύος μπορούν να μειώσουν τη συνολική απόδοση η, που είναι ο λόγος μεταξύ της ισχύος φορτίου εξόδου P_{out} και της ισχύος εισόδου P_{in} :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{5.1}$$

5.2. Πειραματική Διάταξη

5.2.1 Βασική Δομή

Προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα μείωσης των ενεργειακών απαιτήσεων ενός επαγωγικού κινητήρα με περιέλιξη κλωβού στην κατάσταση μόνιμης λειτουργίας εξετάζεται η σκοπιμότητα χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος. Εξαιτίας τούτου αναπτύχθηκε μία πειραματική διάταξη όπου, ένας μικρός, τριφασικός επαγωγικός κινητήρας ονομαστικής ισχύος 175 W, συνδέεται με ένα ηλεκτροδυναμόμετρο, που προσομοιώνει μια βοηθητική αντλία επάνω σε πλοίο. Αρχικά η τροφοδότηση του κινητήρα γίνεται απευθείας από την τριφασική πηγή τάσης, ενώ στο επόμενο στάδιο γίνεται μέσω του ηλεκτρονικού ισχύος που παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής τάσεως και του κινητήρα. Οι λειτουργικές παράμετροι της διάταξης καταγράφονται και μετά την επεξεργασία τους μελετάται η απόδοση του συστήματος μετατροπέα-ηλεκτροκινητήρα-ηλεκτροδυναμομέτρου.

Μετρήσεις-καταγραφή λειτουργικών παραμέτρων λήφθησαν για τις παρακάτω καταστάσεις:

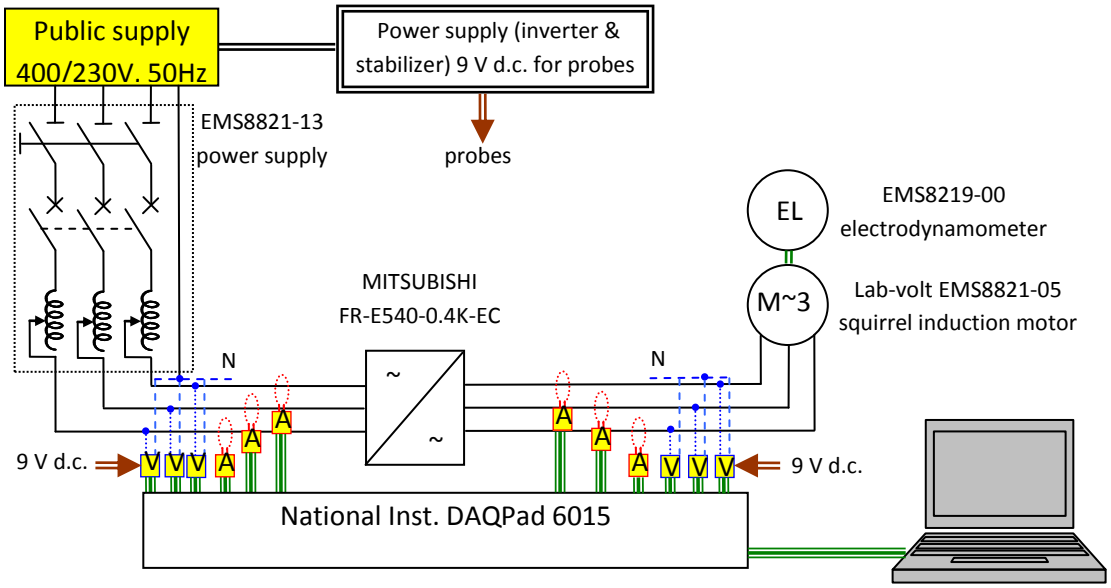
- Χωρίς λειτουργία του μετατροπέα ισχύος (Σενάριο (1)),
- Με λειτουργία του μετατροπέα ισχύος χωρίς ρύθμιση τάσεως-συχνότητας (Σενάριο (2)),
- Με λειτουργία του μετατροπέα ισχύος με ρύθμιση τάσεως-συχνότητας με βάση το επίπεδο ζήτησης μηχανικού φορτίου (Σενάριο (3)),

Οι μετρήσεις λήφθησαν για διάφορα επίπεδα ισχύος μηχανικού φορτίου από 0% έως και 120% του «ονομαστικού μηχανικού φορτίου», το οποίο ορίζεται ως το μηχανικό φορτίο που αποδίδεται στο ηλεκτροδυναμόμετρο υπό τις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας τάσης και ρεύματος του επαγωγικού κινητήρα.

Η συνολική κατανάλωση ισχύος καταγράφεται μέσω ενός ψηφιακού συστήματος συλλογής δεδομένων και ελέγχεται ταυτόχρονα η προκύπτουσα τιμή από

ένα μετρητή ισχύος (βαττόμετρο) που είναι συνδεδεμένος στην έξοδο τροφοδοσίας της διάταξη.

Η βασική διάταξη έχει ήδη παρουσιαστεί στο Σχήμα 5.1, ενώ στο Σχήμα 5.2 φαίνεται το διάγραμμα της διάταξης του πειράματος ως προς τα στοιχεία του αυτόματου ψηφιακού συστήματος συλλογής δεδομένων. Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η αντίστοιχη διάταξη από τη μεριά της χρήσης των αναλογικών και ψηφιακών οργάνων μαζί με το σύστημα του μεταγωγικού διακόπτη. Το τελευταίο διαμορφώθηκε ώστε οι μετρήσεις για τα διάφορα σενάρια να λαμβάνονται στα ίδια επίπεδα φόρτισης. Τα κύρια μέρη του είναι τα εξής:



Σχήμα 5.2 : Διάγραμμα της πειραματικής διάταξης που αποτελείται από έναν επαγωγικό κινητήρα με τροφοδότηση μέσω ηλεκτρονικών ισχύος (δεν εμφανίζονται η ξεχωριστή τροφοδοσία 230 V / 50 Hz για την περιέλιξη της διέγερσης του ηλεκτροδυναμόμετρου, ο μεταγωγικός διακόπτης, τα απλά ψηφιακά και αναλογικά όργανα).

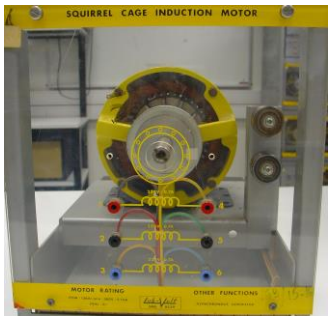
- Μία τριφασική παροχή μεταβλητής τάσης Lab-Volt EMS 8821-13 (0÷380)V μέσω αυτομετασχηματιστή, 3A/50 Hz και αποζεύκτη κυκλώματος. Αυτό παριστάνει τη σταθερή τάση τροφοδοσίας του κινητήρα,

Εικόνα 5.1 : πηγή τροφοδοσίας

- Οι διακόπτες και ηλεκτρονόμοις (relay) που υλοποιούν τους δύο μεταγωγικούς διακόπτες με τους οποίους πραγματοποιείται η παράκαμψη του ηλεκτρονικού ισχύος.

Εικόνα 5.2 : Ρελέ και διακόπτες

- Ένα τριφασικό επαγωγικό κινητήρα περιέλιξης κλωβού με συνδεσμολογία αστέρα Lab-Volt EMS 8821-05 με ονομαστική ισχύ 175 W , 380 V, 0,52 A, 50 Hz, 1360 στροφές ανά λεπτό. Παριστάνει ένα βοηθητικό ηλεκτροκινητήρα πλοίου, όπως μία αντλία υγιεινής, μία αντλία κυκλοφορίας νερού ή ένα κινητήρα ενός διαχωριστήρα πετρελαίου,



Εικόνα 5.3 : Επαγωγικός κινητήρας

- Ένα ηλεκτροδυναμόμετρο Lab-Volt EMS 8219-00 με ροπή 0 ÷ 3 N•m και ταχύτητα περιστροφής 0 ÷ 3000 στροφές ανά λεπτό (rpm). Η παροχή της τροφοδοσίας διέγερσης είναι: 220 ÷ 240 V, 50 Hz, 0,9 A μέσω ενός ανορθωτή τεσσάρων διόδων. Παριστάνει το μηχανικό φορτίο του κινητήρα. Η ισχύς του φορτίου εξόδου, P_{out}, σχετίζεται με τη ροπή στρέψης T_s και τη μηχανική περιστροφική ταχύτητα α ως εξής:

Εικόνα 5.4 : Ηλεκτροδυναμόμετρο

$$P_{out} = T_s \cdot \omega = T_s \cdot [N \cdot m] \cdot 2\pi \cdot \frac{\alpha[R.P.M.]}{60} \qquad (5.2)$$

- Έναν ψηφιακό καταμετρητή στροφών Hioki 3404 με κλίμακα μέτρησης από 30 ÷ 99999 rpm.

Εικόνα 5.5 : Ηλεκτροδυναμόμετρο

- Έξι ψηφιακοί ανιχνευτές διαφορικής τάσης HAMEG Instruments HZ-100 με λόγο μετασχηματισμού 1:200,

Εικόνα 5.6 : Ανιχνευτής

- Έξι ψηφιακοί ανιχνευτές ρεύματος Chauvin Arnoux E3N με λόγο μετασχηματισμού 1A: 500 mV,

Εικόνα 5.7 : Ανιχνευτής ρεύματος

- Δεκατρία ψηφιακά πολύμετρα Metrix MX24B εκ των οποίων : Έξι σε λειτουργία βολτομέτρου για μέτρηση φασικών τάσεων προ και μετά του ηλεκτρονικού ισχύος, έξι σε λειτουργία αμπερομέτρου για λήψη τιμών των ρευμάτων τροφοδοσίας και εξόδου του ηλεκτρονικού ισχύος καθώς και ένα σε λειτουργία αμπερομέτρου για λήψη τιμής του ρεύματος τροφοδοσίας του μονοφασικού ηλεκτροδυναμόμετρου,

Εικόνα 5.8 : Ψηφιακό πολύμετρο

- Έναν μετατροπέα MITSUBISHI FR-E540-0.4K-EK AC/DC/AC, με 0,4 kW ενεργό ισχύ, 400 V (380 V ÷ 480 V) στα 50/60 Hz τριφασική τάση εισόδου με επιτρεπτή διακύμανση τάσης AC 325 έως 528 V και συχνότητα ±5%, ονομαστική ισχύ εξόδου 1,2 kVA στα 440 V, τριφασική τάση εξόδου 400 V (380 V ÷ 480 V) στα 50/60 Hz ,

Εικόνα 5.9: Ηλεκτρονικό Ισχύος

- Δώδεκα τροφοδοτικά ισχύος 12 Vdc / 1A ηλεκτρονικά σταθεροποιημένα και προστατευόμενα από υπερένταση και υπερθέρμανση,

- Μία συσκευή λήψης δεδομένων National Instruments DAQPad 6015 για τη συλλογή και σωστή δειγματοληψία των σημάτων εισόδου, εφοδιασμένη με 16 πολυπλεκτικά κανάλια αναλογικής εισόδου με μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας 200 KS / s [10],

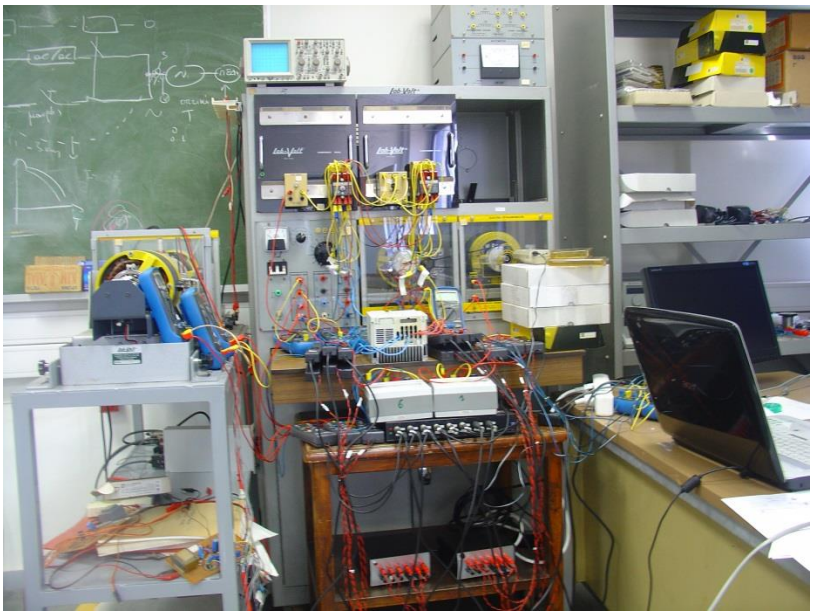
Εικόνα 5.10 : Συσκευή λήψης δεδομένων

- Ένα PC με λειτουργικό σύστημα Lab View για την εκτέλεση του αλγορίθμου απόκτησης δεδομένων,

- Δύο μετρητές ισχύος METRIX MX0095-2 DC/AC 40÷60 Hz οριζόντιας τοποθέτησης, κλάσης 1, τάξης 12÷480 V, μέγιστης τιμής 7200 W συνδεδεμένοι ο ένας στην τριφασική τροφοδοσία της διάταξης και ο άλλος στην τροφοδοσία του μονοφασικού ηλεκτροδυνα-μόμετρου με σκοπό τη μέτρηση της ισχύς εισόδου της διάταξης και της αποδιδόμενης απ' αυτήν ισχύος αντίστοιχα.

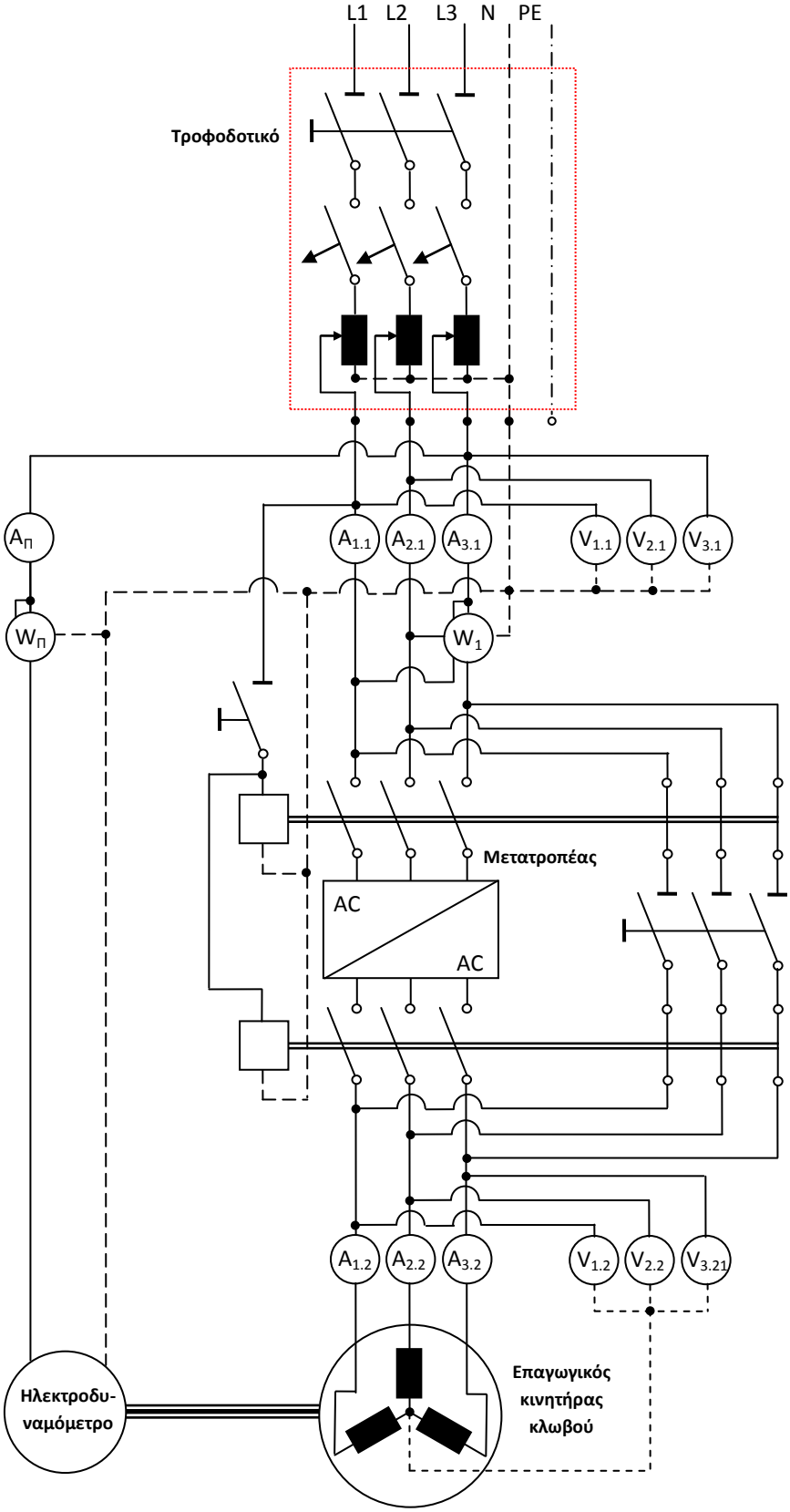
Εικόνα 5.11 : Βαττόμετρο

Η πειραματική διάταξη έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ηλεκτροτεχνίας της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων.



Εικόνα 5.12 Πειραματική διάταξη

Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται ο παραπάνω εξοπλισμός.



Σχήμα 5.3 Πειραματική διάταξη με ψηφιακά και αναλογικά όργανα χωρίς το ψηφιακό σύστημα συλλογής δεδομένων.

5.2.2 Διαδικασία Μετρήσεων

Με χρήση των ψηφιακών ανιχνευτών διαφορικής τάσης μετρώνται οι τρεις τάσεις $\tilde{V}_{1in\,inv}$, $\tilde{V}_{2in\,inv}$, $\tilde{V}_{3in\,inv}$ (σε σχέση με τον ουδέτερο) που εμφανίζονται μετά το διακόπτη της πηγής τροφοδοσίας (προ του ηλεκτρονικού ισχύος) και οι τρεις τάσεις που εφαρμόζονται στον κινητήρα $\tilde{V}_{1out\,inv}$, $\tilde{V}_{2out\,inv}$, $\tilde{V}_{3out\,inv}$ (μετά το ηλεκτρονικό ισχύος),

Με χρήση των ψηφιακών ανιχνευτών ρεύματος (σφιγκτήρες) μετρώνται τα ρεύματα που εμφανίζονται μετά το διακόπτη της πηγής τροφοδοσίας (προ του ηλεκτρονικού ισχύος) $\tilde{I}_{1in\,inv}$, $\tilde{I}_{2in\,inv}$, $\tilde{I}_{3in\,inv}$, καθώς και οι τρεις είσοδοι ρεύματος στον κινητήρα $\tilde{I}_{1out\,inv}$, $\tilde{I}_{2out\,inv}$, $\tilde{I}_{3out\,inv}$ (μετά το ηλεκτρονικό ισχύος).

Το ρεύμα που διαρρέει από τον ουδέτερο δεν μετριέται, επειδή η μέτρηση αυτή θεωρείται περιττή, καθότι μπορεί να υπολογιστεί από το άθροισμα των τριών ρευμάτων γραμμής.

Τα παραπάνω δώδεκα σήματα συνδέονται με δώδεκα κανάλια της συσκευής DAQ και γίνεται δειγματοληψία σε ποσοστό 13 kHz. Κάθε κανάλι είναι πολυπλεκτικό, που σημαίνει ότι οι μετρήσεις λαμβάνονται κατ' ακολουθία. Ωστόσο, ο χρόνος που απαιτείται για τη δειγματοληψία των δώδεκα καναλιών είναι ουσιαστικά αμελητέος, επειδή είναι πολύ μικρότερος από την περίοδο των τάσεων των 50 Hz και των ρευμάτων που μετρώνται. Έτσι, γι' αυτό το πείραμα η δειγματοληψία μπορεί να θεωρηθεί ταυτόχρονη. Η δειγματοληψία γίνεται σε δέσμες των 500 δωδεκάδων. Ολόκληρη η δέσμη εμφανίζεται γρήγορα στις γραφικές παραστάσεις και γράφεται σε ένα αρχείο.

Αρχικά εκτελείται λήψη δεδομένων με σκοπό τη ρύθμιση των ψηφιακών ανιχνευτών δεδομένων σε μηδενικά επίπεδα –καλιμπράρισμα- καθώς στην περίπτωση εμφάνισης μη μηδενικών τιμών, καταγράφονται αυτές προκειμένου να αφαιρεθούν οι μέσες τους τιμές από τις τιμές που θα λαμβάνονται κατά τη διάρκεια των δοκιμών με φορτίο. Αυτή η διαδικασία εκτελέστηκε ως ακολούθως : Χωρίς τροφοδοσία της διάταξης πραγματοποιείται για ικανό χρονικό διάστημα 6÷7 sec μέτρηση τάσεων και ρευμάτων μέσω των αντίστοιχων probes τάσεως και αμπεροτσιμπήδων των οποίων οι τιμές θα έπρεπε να είναι μηδέν. Από τη μέση τιμή των στιγμιαίων καταγραφέντων τιμών τάσεων / ρευμάτων προσδιορίζεται η πόλωση κάθε καναλιού, η οποία αφαιρείται στα επόμενα βήματα θεωρώντας την σταθερή κατά τη διάρκεια 1÷2 ωρών.

Ακολούθως ελέγχεται η ορθότητα των πολλαπλασιαστικών συντελεστών των probes. Συγκεκριμένα χωρίς τα ηλεκτρονικά ισχύος πραγματοποιείται μία δοκιμαστική λειτουργία σε μηδενικό μηχανικό φορτίο.

1. *Για τάσεις :*

Α. Εύρεση ενεργούς τιμής τάσης.

Μέτρηση σε ψηφιακό βολτόμετρο της τάσης που εφαρμόζεται σε κάθε διαφορετικό probe τάσης.

$$\tilde{V}_U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V^2\,(t)dt} \xrightarrow[\tau=\frac{T}{M}]{} = \sqrt{\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{N_T} V^2\,(i\cdot\tau)\cdot\tau} = \sqrt{\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{N_T} V^2\,(i\cdot\tau)\cdot\frac{T}{N_T}}$$

$$\Rightarrow \tilde{V}_U = \sqrt{\frac{1}{N_T}\sum_{i=1}^{N_T} V^2\,(i\cdot\tau)} \qquad (5.3)$$

Λόγω χρήσης υποβιβαστή τάσης με συντελεστή $A_V = 200$ το υπολογιζόμενο $\tilde{V}$ από τις στιγμιαίες τιμές V(iτ) διορθώνεται ως εξής:

$$\tilde{V}_U = A_V\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} V^2\,(i\cdot\tau)} \qquad (5.4)$$

Όπου $N = \kappa\cdot N_T$ με $\kappa \in N^*$.

Β. Εύρεση συντελεστή διόρθωσης.

Από τη μέτρηση βολτόμετρου έχει ληφθεί τάση $\tilde{V}_0$ που θεωρείται αρχικά πιο ακριβής. Οπότε βρίσκεται ο συντελεστής διόρθωσης

$$f_V = \frac{\tilde{V}_U}{\tilde{V}_0} \qquad (5.5)$$

Η διόρθωση πραγματοποιείται ως εξής :

$$V_U \rightarrow \frac{V_U\cdot A_V}{f_V} \qquad (5.6)$$

2. *Για ρεύματα :*

Α. Εύρεση ενεργούς τιμής έντασης ρευμάτων.

Μέτρηση με αμπερόμετρο της έντασης του ρεύματος.

$$\tilde{I}_U = \sqrt{\frac{1}{N_T}\sum_{i=1}^{N_T} i^2\,(i\cdot\tau)} \qquad (5.7)$$

Λόγω χρήσης μετατροπέα έντασης σε τάση $A_{IV} = 10\,\frac{A}{V}$ και λόγω ύπαρξης 4 σπειρών από probe έντασης turn = 4 η αντίστοιχη τιμή είναι :

$$\tilde{I}_U = \frac{A_{IV}}{turn}\cdot\sqrt{\frac{1}{N_T}\sum_{i=1}^{N_T} {V_{IV}}^2\,(i\cdot\tau)} \qquad (5.8)$$

Από τη μέτρηση αμπερομέτρου έχει ληφθεί $\tilde{I}_0$ (πιο ακριβής) :

$$f_I = \frac{\tilde{I}_U}{\tilde{I}_0} \qquad (5.9)$$

Β. Εύρεση συντελεστή διόρθωσης.

$$V_{IV} \rightarrow \frac{\frac{V_{IV}\cdot A_{IV}}{turn}}{f_I} \qquad (5.10)$$

Τα καταγραφέντα δεδομένα υφίστανται επεξεργασία και ανάλυση για να αποδώσουν τις μέσες τιμές τετραγωνικής ρίζας (ενεργές τιμές) των φασικών τάσεων $\tilde{V}_i$ *(φάσεις: i: 1, 2, 3)* και των ρευμάτων γραμμής $\tilde{I}_i$. Η φαινόμενη ισχύς S_{in} και η ενεργός ισχύς P_{in} υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\tilde{V}_i = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1}\cdot\int_{t_1}^{t_2} V_i^2(t)\cdot dt} \quad i=1, 2, 3 \qquad (5.11)$$

$$\tilde{I}_i = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1}\cdot\int_{t_1}^{t_2} I_i^2(t)\cdot dt} \quad i=1, 2, 3 \qquad (5.12)$$

$$S_{in} = \sum_{i=1,2,3} \tilde{V}_i\cdot\tilde{I}_i \qquad (5.13)$$

$$P_{in} = \sum_{i=1,2,3} \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} V_i(t) \cdot I_i(t) \cdot dt \quad (5.14)$$

Όπου, $t_2 - t_1 = n \cdot T$, n είναι ένας ακέραιος αριθμός και T είναι η περίοδος της τάσης τροφοδοσίας των τριών φάσεων $V_1(t) - V_2(t) - V_3(t)$.

5.2.3 Μελέτη Αρμονικών Μέσω Fourier

Λόγω ύπαρξης αρμονικών τόσο στην τάση, όσο και στην ένταση του ρεύματος ορισμένες παράμετροι όπως ο συντελεστής ισχύος, μεταβάλλονται. Προκειμένου να συμπεριληφθούν τα ανωτέρω φαινόμενα απαιτείται η μελέτη των σημάτων μέσω ανάλυσης κατά Fourier. Συγκεκριμένα, έστω το περιοδικό σήμα τάσης *v(t)* περιόδου T_0 μη ημιτονοειδούς μορφής (με βασική περίοδο γνωστή – στην παρούσα περίπτωση η περίοδος είναι 20 ms λόγω της συχνότητας λειτουργίας 50 Hz του δικτύου, εκτός των περιπτώσεων της εξόδου από το μετατροπέα ισχύος όπου η περίοδος προσδιορίζεται από την αντίστοιχη συχνότητα τάσης εξόδου του μετατροπέα). Το σήμα της τάσης μπορεί να αναλυθεί με τη βοήθεια Fourier στις αντίστοιχες αρμονικές συνιστώσες του ως εξής:

$$a_{V-0} = \frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} v(t) \cdot dt = \frac{1}{T_0} \cdot \sum_{i=1}^{N_T} v(i \cdot \tau) \cdot \tau \overset{\tau = \frac{T_0}{N_T}}{=} \frac{1}{N_T} \cdot \sum_{i=1}^{N_T} v(i \cdot \tau) \quad (5.15)$$

$$a_{V-n} = \frac{2}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} v(t) \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot t) \cdot dt = \frac{2}{T_0} \cdot \sum_{i=1}^{N_T} v(i \cdot \tau) \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot i \cdot \tau) \cdot \tau \overset{\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}, \tau = \frac{T_0}{N_T}}{\Rightarrow}$$

$$a_{V-n} \overset{\tau = \frac{T_0}{N_T}}{=} \frac{2}{N_T} \cdot \sum_{i=1}^{N_T} v(i \cdot \tau) \cdot \cos\left(n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N_T} \cdot i\right) \quad (5.16)$$

$$b_{V-n} = \frac{2}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} v(t) \cdot \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t) \cdot dt = \ldots = \frac{2}{N_T} \cdot \sum_{i=1}^{N_T} v(i \cdot \tau) \cdot \sin\left(n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N_T} \cdot i\right) \quad (5.17)$$

Οπότε το σήμα *v(t)* είναι ισοδύναμο με:

$$v(t) = a_{V-0} + \sum_{n=1}^{+\infty} a_{V-n} \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot t) + \sum_{n=1}^{+\infty} b_{V-n} \cdot \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t) \quad (5.18)$$

Εναλλακτικά μπορεί να γραφεί με τη μορφή πλάτους και διαφοράς φάσης ως εξής:

$$v(t) = a_{V-0} + \sum_{n=1}^{+\infty} c_{V-n} \cdot \cos\left(n \cdot \omega_0 \cdot t + \theta_{V-n}\right) \qquad (5.19)$$

Όπου

$$c_{V-n} = \sqrt{a_{V-n}^2 + b_{V-n}^2}$$

$$\theta_{V-n} = \tan^{-1}\left(-\frac{b_{V-n}}{a_{V-n}}\right)$$

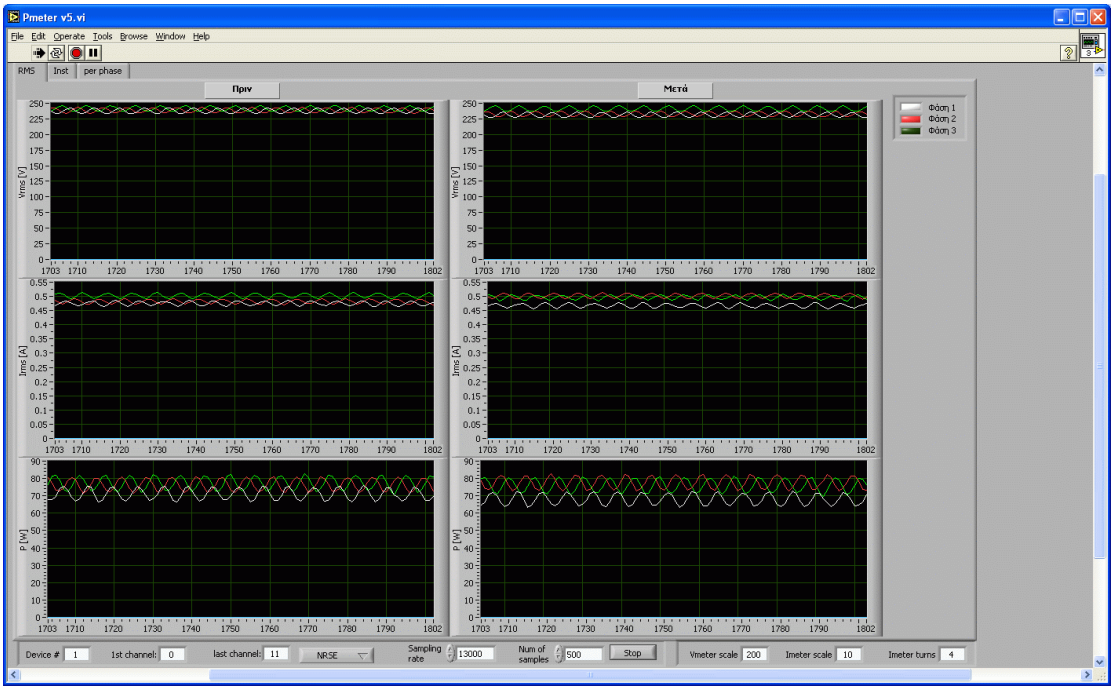
Ομοίως μπορεί να προσδιοριστούν και οι αρμονικές της έντασης του ρεύματος. Σ' αυτήν την περίπτωση η πραγματική ισχύς δίνεται από τις πρώτες αρμονικές της τάσης και του ρεύματος, δηλαδή ισχύει ότι:

$$P_{1^{st}\,order} = \frac{c_{V-1}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{c_{I-1}}{\sqrt{2}} \cdot \cos\left(\theta_{V-1} - \theta_{I-1}\right) = \frac{1}{2} \cdot c_{V-1} \cdot c_{I-1} \cdot \cos\left(\theta_{V-1} - \theta_{I-1}\right) \qquad (5.20)$$

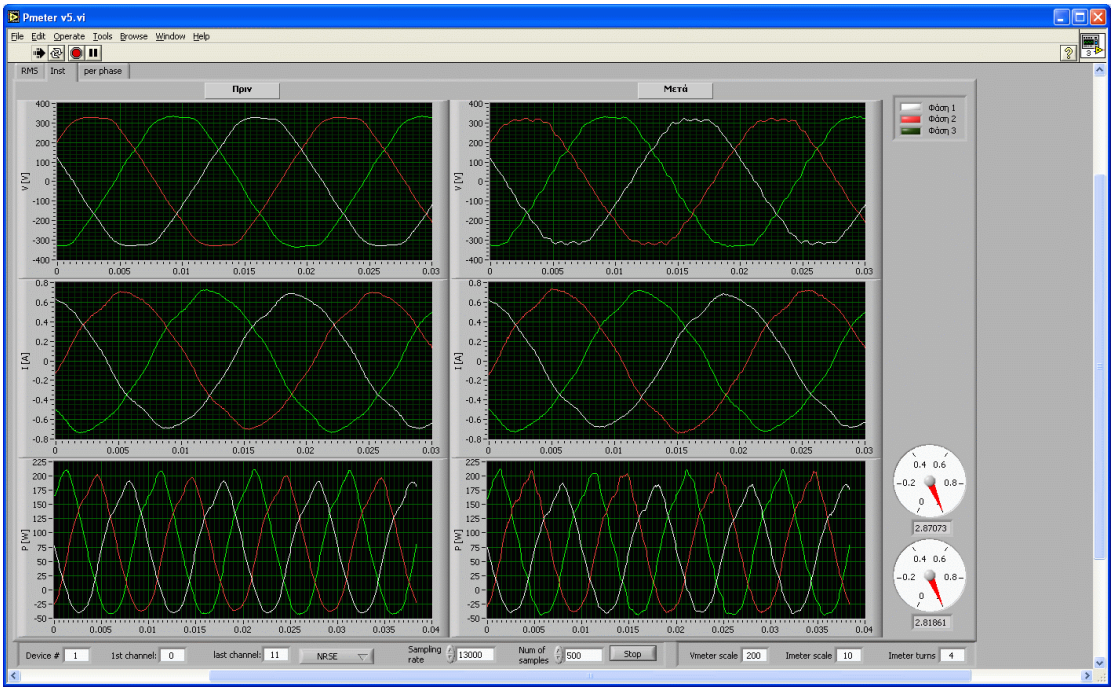
5.2.4 Ενδεικτικά Αποτελέσματα του Ψηφιακού Οργάνου Συλλογής Δεδομένων

Αρχικά πραγματοποιείται μία φόρτιση της μηχανής για ενδιάμεσο φορτίο για τα τρία σενάρια και δείχνονται και δείχνονται οι αντίστοιχες καταγραφές.

Στην περίπτωση του σεναρίου (1) οι στήλες του «πριν» (ΑΡ στήλες) και του «μετά» (ΔΕ στήλες) όπως εμφανίζονται στην οθόνη, εικόνες 5.13 και 5.14, ταυτίζονται λόγω ανυπαρξίας ηλεκτρονικού ισχύος. Παρατηρείται μια μικρή διακύμανση της τάσης τροφοδοσίας και κατ' επέκταση των αντίστοιχων ρευμάτων και της προσφερόμενης ενεργούς ισχύος

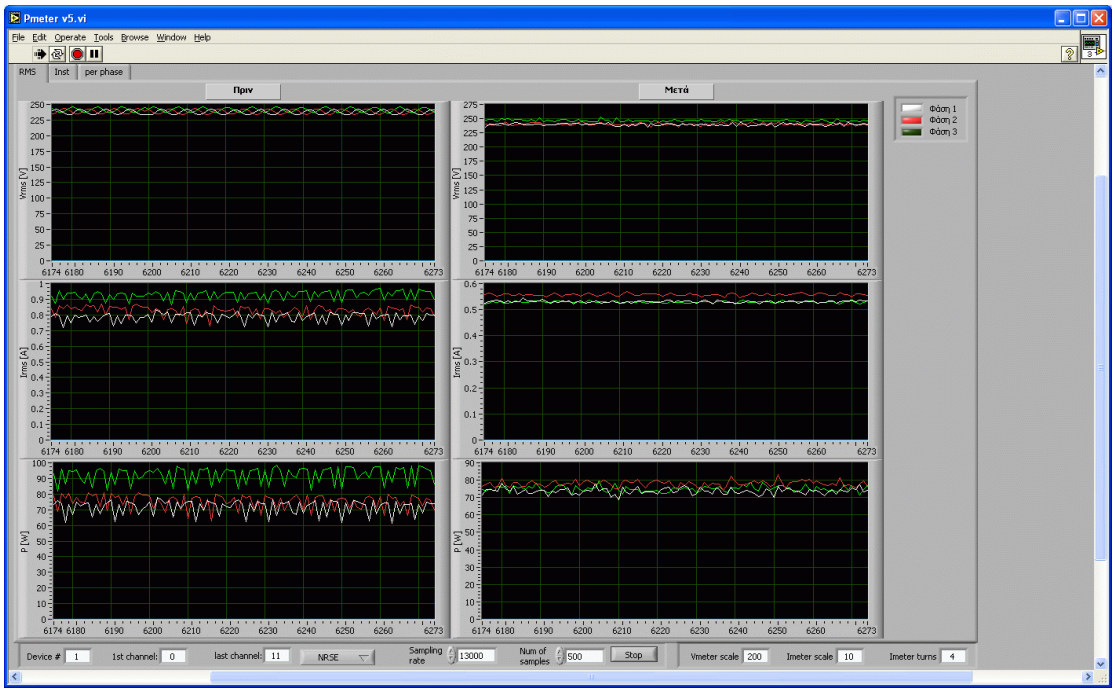


Εικόνα 5.13 Ενεργές τιμές τάσεων, εντάσεων και ισχύος προ (ΑΡ στήλη) και μετά (ΔΕ στήλη) του ηλεκτρονικού ισχύος, όπως εμφανίζονται στο ψηφιακό σύστημα συλλογής δεδομένων κατά το σενάριο(1).

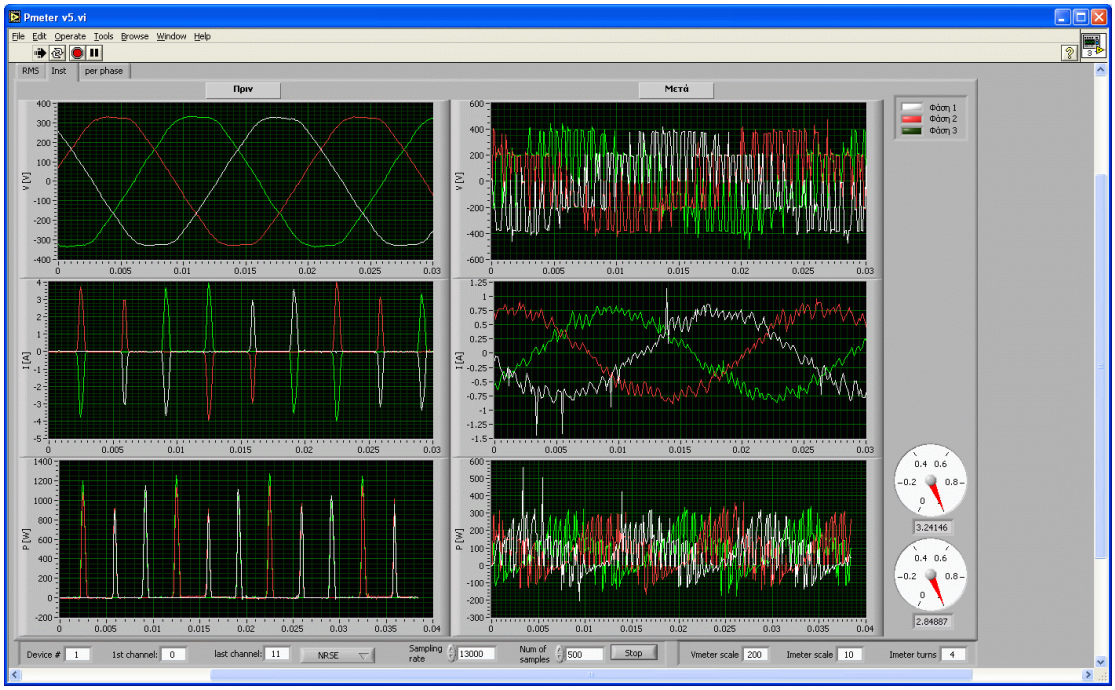


Εικόνα 5.14 Στιγμιαίες τιμές τάσεων, εντάσεων και ισχύος προ (ΑΡ στήλη) και μετά (ΔΕ στήλη) του ηλεκτρονικού ισχύος, όπως εμφανίζονται στο ψηφιακό σύστημα συλλογής δεδομένων κατά το σενάριο(1).

Στην περίπτωση του σεναρίου (2) βλέπουμε μέσω των στιγμιαίων τάσεων και ρευμάτων (ΑΡ στήλη) του «πριν» της εικόνας 5.16, ότι τα ρεύματα που τροφοδοτούν το ηλεκτρονικό ισχύος δεν παρουσιάζουν ημιτονοειδή μορφή, αλλά μοιάζουν περισσότερο με απότομους τριγωνικούς παλμούς με μεγάλα ενδιάμεσα κενά. Στην (ΔΕ στήλη) του «μετά» της εικόνας 5.16, παρατηρείται η διαμόρφωση της τάσης κατά pwm ανά φάση (τετραγωνικοί παλμοί διαφορετικού χρονικού εύρους). Η περιβάλλουσα της κάθε ‘έντασης ρεύματος ανά φάση σχηματίζει μια ημιτονοειδή καμπύλη προσεγγιστικά.

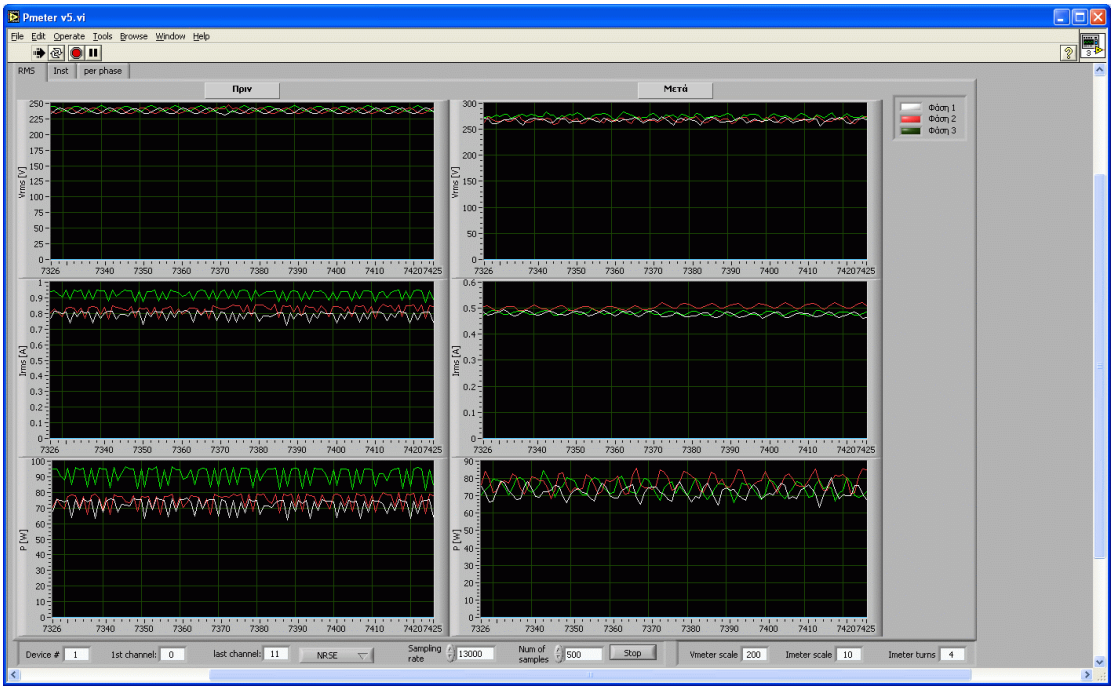


Εικόνα 5.15 Ενεργές τιμές τάσεων, εντάσεων και ισχύος προ (ΑΡ στήλη) και μετά (ΔΕ στήλη) του ηλεκτρονικού ισχύος, όπως, εμφανίζονται στο ψηφιακό σύστημα συλλογής δεδομένων κατά το σενάριο(2).

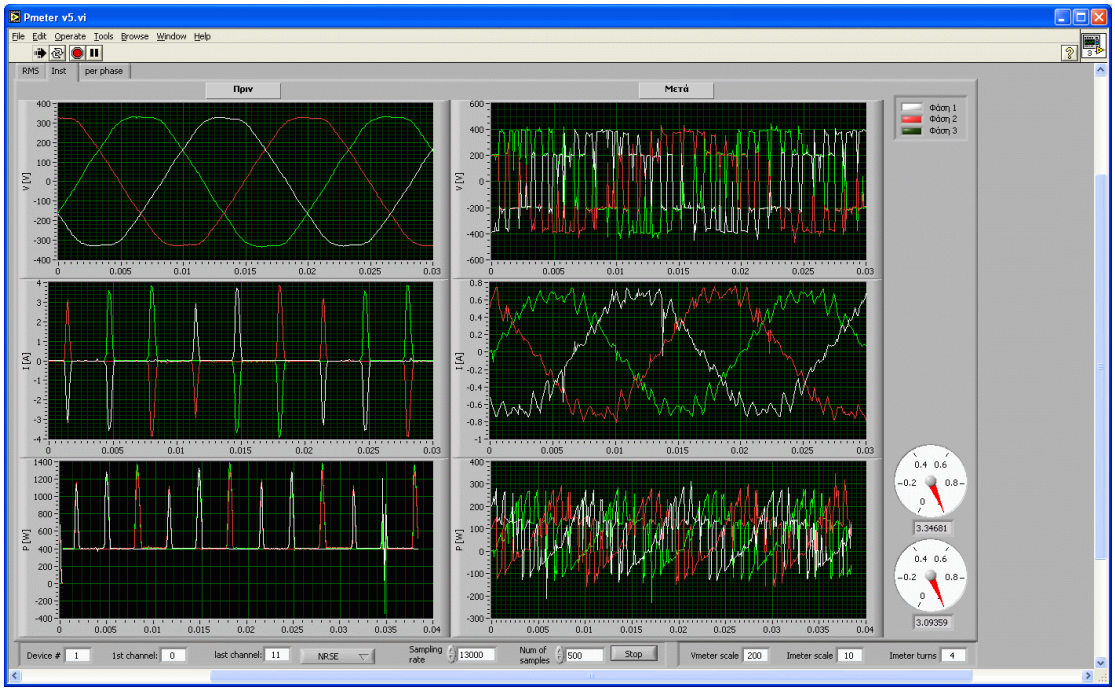


Εικόνα 5.16 Στιγμιαίες τιμές τάσεων, εντάσεων και ισχύος προ (ΑΡ στήλη) και μετά (ΔΕ στήλη) του ηλεκτρονικού ισχύος, όπως εμφανίζονται στο ψηφιακό σύστημα συλλογής δεδομένων κατά το σενάριο(2).

Στην περίπτωση του σεναρίου (3) παρατηρούνται ανάλογα με την περίπτωση του σεναρίου (2) σχήματα διαφορετικών πλατών, λόγω της ρύθμισης του ηλεκτρονικού ισχύος κατά τάση και συχνότητα.



Εικόνα 5.17 Ενεργές τιμές τάσεων, εντάσεων και ισχύος προ (ΑΡ στήλη) και μετά (ΔΕ στήλη) του ηλεκτρονικού ισχύος, όπως εμφανίζονται στο ψηφιακό σύστημα συλλογής δεδομένων κατά το σενάριο(3).

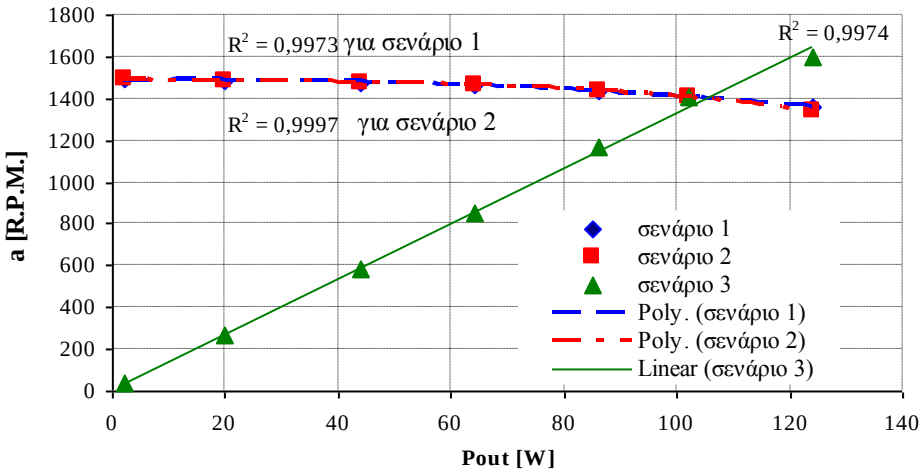


Εικόνα 5.18 Στιγμιαίες τιμές τάσεων, εντάσεων και ισχύος προ (ΑΡ στήλη) και μετά (ΔΕ στήλη) του ηλεκτρονικού ισχύος, όπως εμφανίζονται στο ψηφιακό σύστημα συλλογής δεδομένων κατά το σενάριο(3).

5.3 Επεξεργασία και Ανάλυση Αποτελεσμάτων Μετρήσεων

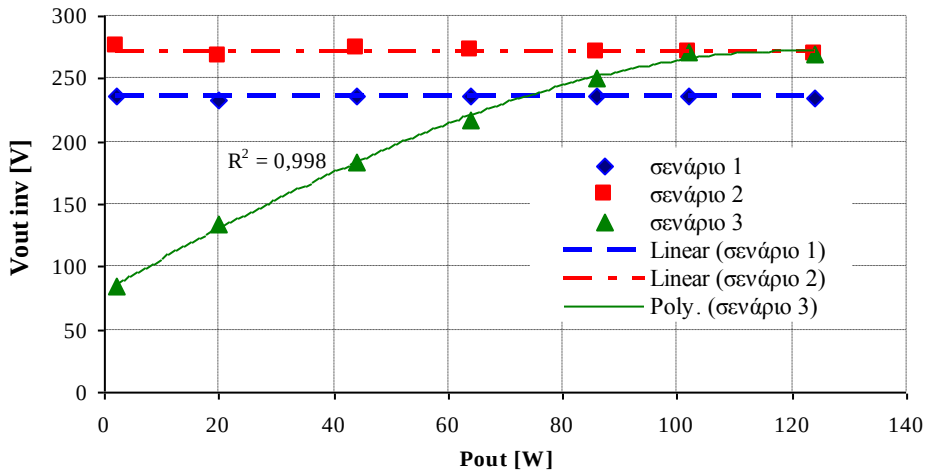
Μετά την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων που κατεγράφησαν κατά την εκτέλεση των τριών σεναρίων του πειράματος και για τα διάφορα επίπεδα ισχύος για καθένα απ' αυτά, εκτελέστηκαν τα κάτωθι:

- Εξέταση της ταχύτητας περιστροφής σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου της διάταξης, σχήμα 5.4. Διαπιστώνεται ότι για τα δύο πρώτα σενάρια τα πειραματικά σημεία προσεγγίζονται ικανοποιητικά από δευτεροβάθμιες εξισώσεις, ενώ το τρίο ουσιαστικά είναι μία ευθεία γραμμή. Μεταξύ των δύο πρώτων σεναρίων δεν υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση με την ταχύτητα να περιορίζεται σε μικρά όρια διακύμανσης από 1490 Σ.Α.Λ. (στο 0% του ονομαστικού φορτίου) ως 1340 Σ.Α.Λ. (στο 120% του ονομαστικού φορτίου). Αντίθετα στο τρίτο σενάριο η ταχύτητα αυξάνεται γραμμικά με το φορτίο από 38 Σ.Α.Λ. (θεωρητικά μηδενικό φορτίο – πρακτικά ίσα για να περιστραφεί ο κινητήρας υπερνικώντας τις τριβές της) ως 1602 Σ.Α.Λ. (στο 120% του ονομαστικού φορτίου).



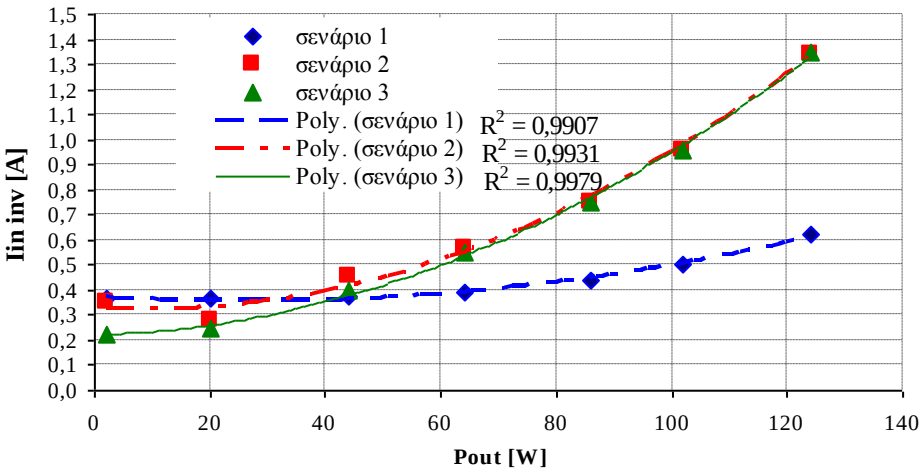
Σχήμα 5.4 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – ταχύτητας στροφών για τα σενάρια: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

- Εξέταση της ενεργού τάσης τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου, σχήμα 5.5, για τα τρία σενάρια και παρατηρείται ότι για το σενάριο (1), δηλαδή για την περίπτωση απευθείας τροφοδοσίας επαγωγικού κινητήρα, η ενεργός τιμή της τάσης ταυτίζεται με τη φασική τάση τροφοδοσίας της διάταξης που ουσιαστικά είναι περίπου 235,6 V. Για το σενάριο (2), δηλαδή στην περίπτωση τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας, όπου η συχνότητα της τάσης εξόδου είναι εξαρχής 50 Hz, προκύπτει ότι η αντίστοιχη φασική ενεργός τάση είναι σταθερή και περίπου 272 V. Για το σενάριο (3), δηλαδή στην περίπτωση τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο του μηχανικού φορτίου, προκύπτει ότι η τάση ουσιαστικά αυξάνεται γραμμικά (ανάλογα της συχνότητας λειτουργίας εξόδου) ως το ονομαστικό μηχανικό φορτίο και έπειτα παραμένει σταθερή για να μην ξεπεραστεί η ονομαστική τάση λειτουργίας του κινητήρα προς προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων.



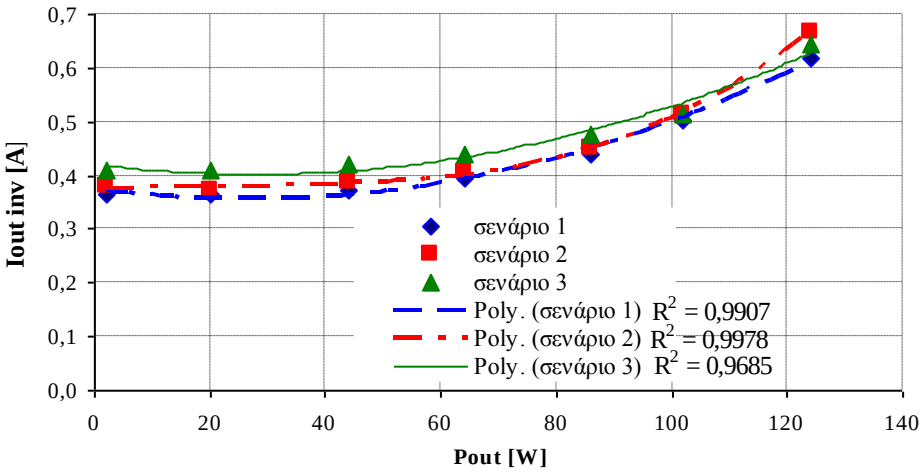
Σχήμα 5.5 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – ενεργού τάσης τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα – ουσιαστικά η τάση τροφοδοσίας της διάταξης, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

- Εξέταση της ενεργούς έντασης τροφοδοσίας της διάταξης σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου για τα τρία σενάρια, σχήμα 5.6. Παρατηρείται ότι σε πολύ χαμηλά φορτία (ως περίπου 40% του ονομαστικού μηχανικού φορτίου) η ενεργός ένταση του ρεύματος για το σενάριο (3), δηλαδή στην περίπτωση τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο του μηχανικού φορτίου, είναι μικρότερη έναντι του ρεύματος της απευθείας τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα. Αντίθετα για υψηλότερες φορτίσεις η ενεργός ένταση του ρεύματος λαμβάνει τις μικρότερες τιμές για την περίπτωση της απευθείας τροφοδότησης. Σημειώνεται ότι η αντίστοιχη προσέγγιση των γραφικών παραστάσεων γίνεται ικανοποιητικά με δευτεροβάθμιες εξισώσεις.



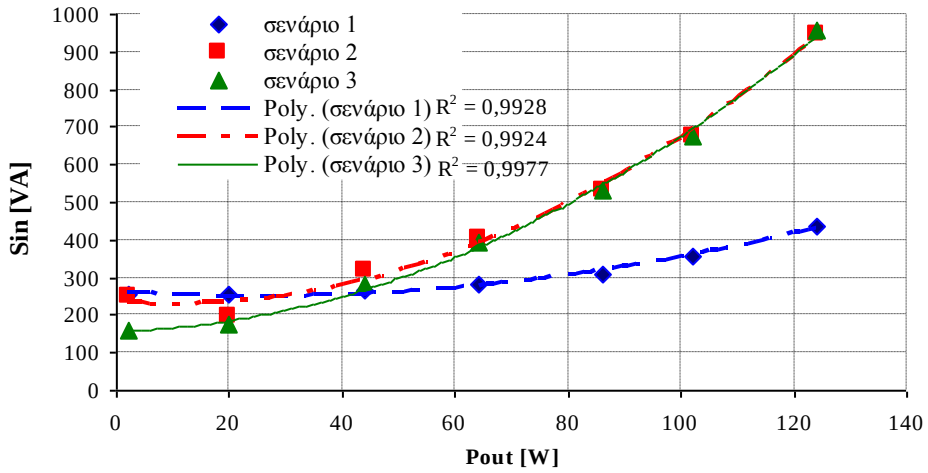
Σχήμα 5.6 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – ενεργού έντασης τροφοδοσίας της διάταξης: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

- Εξέταση της ενεργούς έντασης τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου για τα τρία σενάρια, σχήμα 5.7. Παρατηρείται ότι η ένταση του ρεύματος με απευθείας τροφοδότηση του επαγωγικού κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση είναι πάντα η μικρότερη (σενάριο (1)), ενώ αντίστοιχα η μεγαλύτερη τιμή λαμβάνεται κατά την τροφοδοσία του επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου (σενάριο (3)) ως το επίπεδο του ονομαστικού μηχανικού φορτίου. Σημειώνεται ότι η αντίστοιχη προσέγγιση των γραφικών παραστάσεων γίνεται ικανοποιητικά με δευτεροβάθμια εξίσωση για το σενάριο (1) και με τριτοβάθμιες εξισώσεις για τα σενάρια (2) και (3).



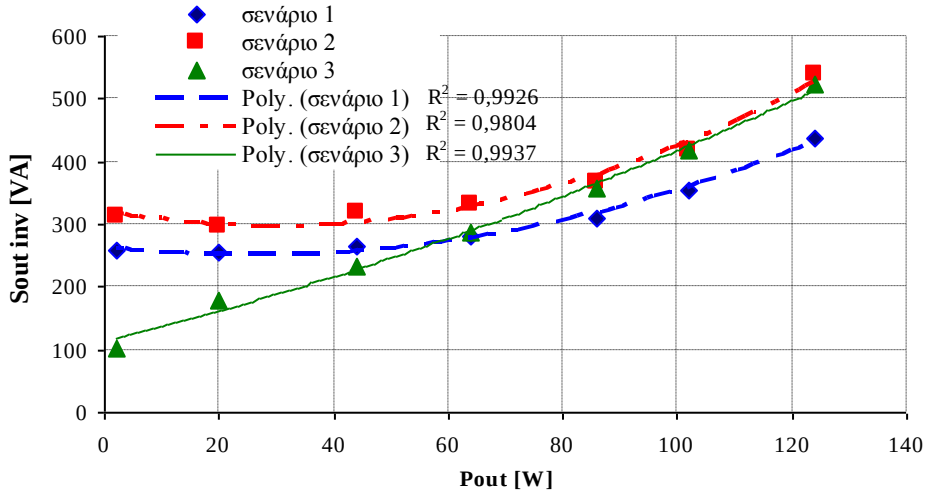
Σχήμα 5.7 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – ενεργού έντασης τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

- Εξέταση της φαινόμενης ισχύς τροφοδοσίας της διάταξης σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου για τα τρία σενάρια, σχήμα 5.8. Παρατηρείται ότι σε πολύ χαμηλά φορτία (ως περίπου 40% του ονομαστικού μηχανικού φορτίου) η φαινόμενη ισχύς του σεναρίου (3), δηλαδή της περίπτωσης τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο του μηχανικού φορτίου, είναι μικρότερη έναντι όλων. Αντίθετα για υψηλότερες φορτίσεις η φαινόμενη ισχύς λαμβάνει μικρότερες τιμές για την περίπτωση της απευθείας τροφοδότησης, όπως συμβαίνει άλλωστε και με την αντίστοιχη τιμή της έντασης του ρεύματος τροφοδοσίας της διάταξης. Σημειώνεται ότι η αντίστοιχη προσέγγιση των γραφικών παραστάσεων γίνεται ικανοποιητικά με δευτεροβάθμιες εξισώσεις.



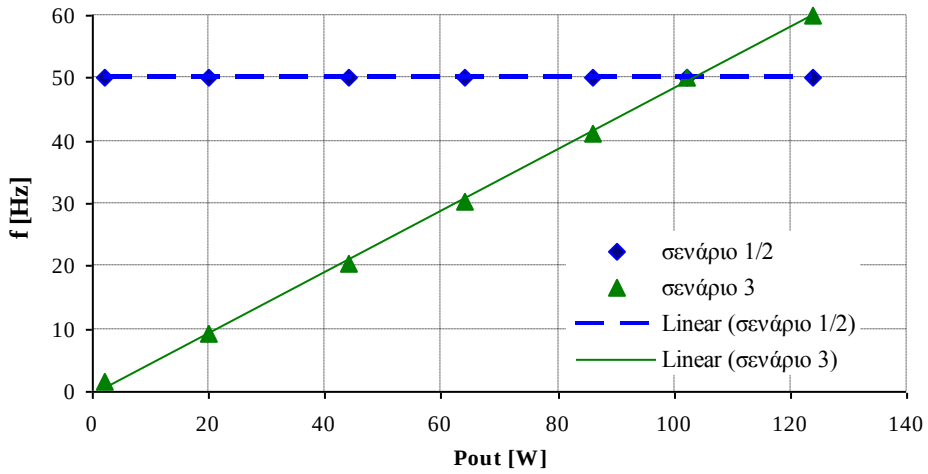
Σχήμα 5.8 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – φαινόμενης ισχύος τροφοδοσίας της διάταξης: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

- Εξέταση της φαινόμενης ισχύς τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου για τα τρία σενάρια, σχήμα 5.9. Παρατηρείται ότι σε πολύ χαμηλά φορτία (ως περίπου το 60% του ονομαστικού μηχανικού φορτίου) η φαινόμενη ισχύς του σεναρίου (3), δηλαδή της περίπτωσης τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο του μηχανικού φορτίου, είναι μικρότερη έναντι όλων. Αντίθετα για υψηλότερες φορτίσεις η φαινόμενη ισχύς λαμβάνει μικρότερες τιμές για την περίπτωση της απευθείας τροφοδότησης. Σημειώνεται ότι η αντίστοιχη προσέγγιση των γραφικών παραστάσεων γίνεται ικανοποιητικά με δευτεροβάθμιες εξισώσεις, αν και για το τρίτο σενάριο για χαμηλές φορτίσεις τείνει στην ευθεία γραμμή.



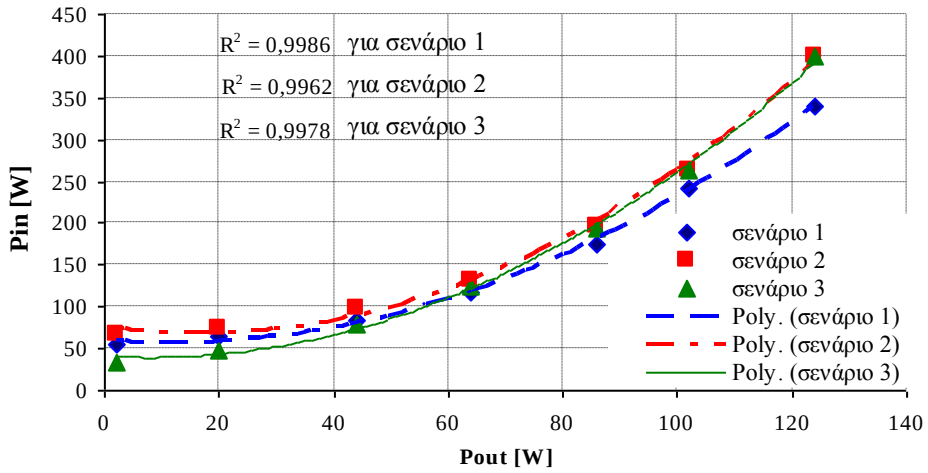
Σχήμα 5.9 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – φαινόμενης ισχύος τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα για τα σενάρια: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

- Εξέταση της συχνότητας τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου για τα τρία σενάρια, σχήμα 5.10. Ουσιαστικά στα δύο πρώτα σενάρια η συχνότητα τροφοδοσίας είναι 50 Hz, ενώ στο σενάριο (3), δηλαδή στην περίπτωση τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο του μηχανικού φορτίου η αντίστοιχη μεταβολή είναι γραμμική.



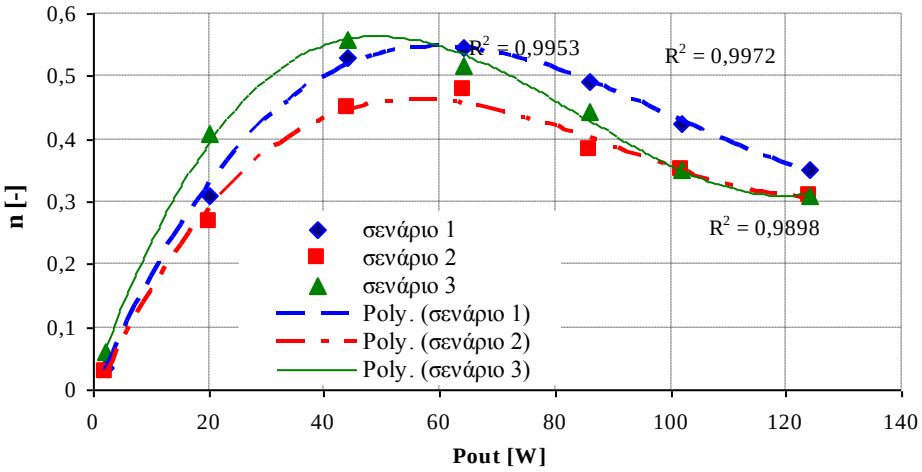
Σχήμα 5.10 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου –συχνότητα τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα για τις εξής περιπτώσεις: (1/2) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα ή τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

- Εξέταση της ισχύος εισόδου τροφοδοσίας της διάταξης μετατροπέα ισχύος / επαγωγικού κινητήρα σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου της διάταξης, σχήμα 5.11 . Διαπιστώνεται ότι σε όλα τα σενάρια τα πειραματικά σημεία προσεγγίζονται ικανοποιητικά από δευτεροβάθμιες εξισώσεις. Αυτό συμβαίνει, διότι κυριαρχούν ουσιαστικά οι ωμικές απώλειες επί των τυλιγμάτων του κινητήρα που ακολουθούν τη σχέση $I^2 \cdot R$. Είναι φανερό ότι η ζήτηση ισχύος κατά το σενάριο (2) είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του σεναρίου (1) σε όλα τα επίπεδα φόρτισης, ενώ η ζήτηση ισχύος κατά το σενάριο (3) είναι μικρότερη μέχρι το 55% περίπου του ονομαστικού μηχανικού φορτίου έναντι του σεναρίου (1). Ουσιαστικά προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα με εκείνα από το σχήμα της απόδοσης.



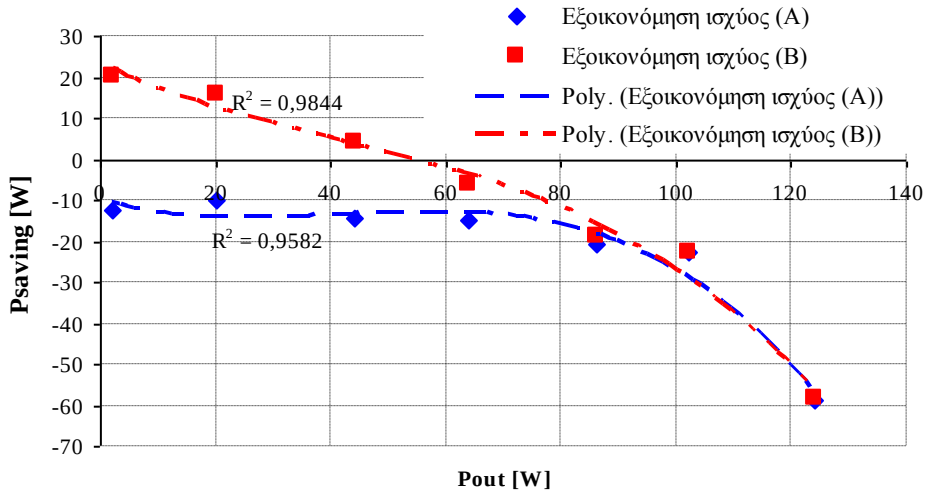
Σχήμα 5.11 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου –ισχύος εισόδου τροφοδοσίας για τα σενάρια: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

- Εξέταση της απόδοσης της διάταξης μετατροπέα ισχύος / επαγωγικού κινητήρα / ηλεκτροδυναμόμετρου σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου της διάταξης, σχήμα 5.12. Διαπιστώνεται ότι σε όλα τα σενάρια τα πειραματικά σημεία προσεγγίζονται ικανοποιητικά από τριτοβάθμιες εξισώσεις. Είναι φανερό ότι η απόδοση κατά το σενάριο (2) είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη του σεναρίου (1) σε όλα τα επίπεδα φόρτισης. Αυτό δικαιολογεί, γιατί σε όσες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ως εκκινητές επαγωγικών κινητήρων τα ηλεκτρονικά ισχύος χρειάζεται να απενεργοποιηθεί ο εκκινητής μέσω ηλεκτρικής παράκαμψής του (π.χ. με μεταγωγικό διακόπτη ελεγχόμενο από ηλεκτρονόμο, όπως στην παρούσα πειραματική διάταξη). Η απόδοση κατά το σενάριο (3) είναι μεγαλύτερη μέχρι το 55% περίπου του ονομαστικού μηχανικού φορτίου έναντι του σεναρίου (1). Για υψηλότερες φορτίσεις για την υπάρχουσα ηλεκτρονική διάταξη είναι ευνοϊκότερη η χρήση απευθείας μόνο του επαγωγικού κινητήρα. Υπενθυμίζεται ότι στην παρούσα περίπτωση η απόδοση ορίζεται ως το πηλίκο της ισχύος εξόδου προς την ενεργό ισχύ τροφοδοσίας της διάταξης, όπου η ισχύς εξόδου είναι ουσιαστικά η αποδιδόμενη ισχύς πάνω στο ηλεκτροδυναμόμετρο ή ισοδύναμα η μηχανική ισχύς που έχει δοθεί πλέον στο ρευστό της αντλίας.



Σχήμα 5.12 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – απόδοσης για τα σενάρια: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

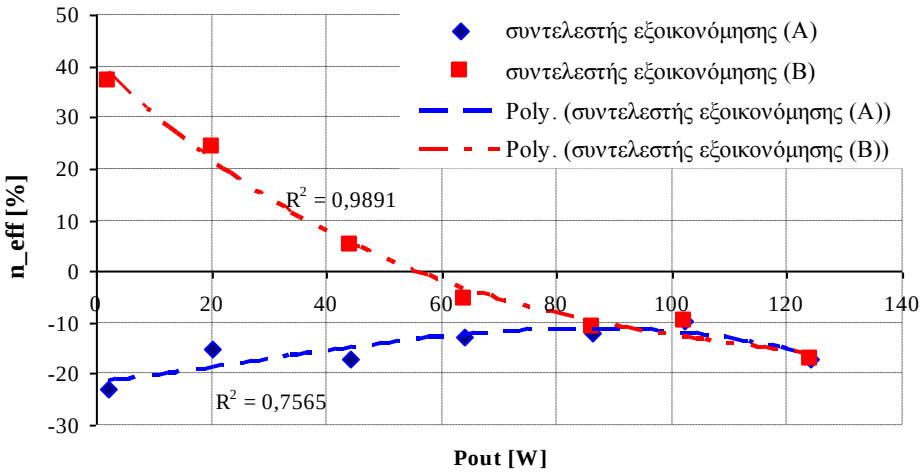
- Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και κατά τον έλεγχο της εξοικονομούμενης ισχύος με τη χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος. Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η αντίστοιχη γραφική παράσταση της εξοικονομούμενης ισχύος σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου της διάταξης για τις δύο περιπτώσεις χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz) και με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου. Διαπιστώνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις τα πειραματικά σημεία προσεγγίζονται ικανοποιητικά από τριτοβάθμιες εξισώσεις. Η εξοικονόμηση ισχύος είναι σημαντικότερη όσο τα φορτία μικραίνουν κατά τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου φθάνοντας οριακά στα 20 W.



Σχήμα 5.13 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – εξοικονομούμενης ισχύος για δύο περιπτώσεις: (A) εξοικονόμηση ηλεκτρικής ισχύος κατά τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz) έναντι της απευθείας τροφοδότησης ως προς την καταναλισκόμενη ισχύ απευθείας τροφοδότησης επαγωγικού κινητήρα, (B) εξοικονόμηση ηλεκτρικής ισχύος κατά τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου έναντι της απευθείας τροφοδότησης ως προς την καταναλισκόμενη ισχύ απευθείας τροφοδότησης επαγωγικού κινητήρα.

Για την ευκολότερη κατανόηση της εξοικονόμησης ηλεκτρικής ισχύος με τη χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος χρησιμοποιείται ο συντελεστής εξοικονόμησης, ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο της κατανάλωσης πραγματικής ισχύος του εκάστοτε προτεινόμενου σεναρίου (σενάριο (2) - τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση (50 Hz) ή (3) - τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου) προς την κατανάλωση πραγματικής ισχύος του βασικού σεναρίου (σενάριο (1) – απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα χωρίς ηλεκτρονικά ισχύος).

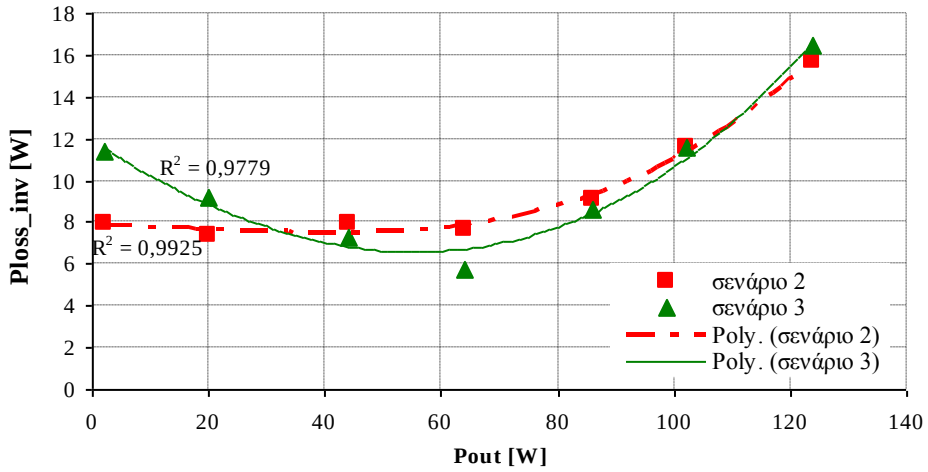
- Εξέταση του συντελεστή εξοικονόμησης ισχύος σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου της διάταξης σχήμα 5.14, Διαπιστώνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις τα πειραματικά σημεία προσεγγίζονται ικανοποιητικά από τριτοβάθμιες εξισώσεις. Η εξοικονόμηση ισχύος είναι σημαντικότερη όσο τα φορτία μικραίνουν κατά τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου φθάνοντας οριακά στο 37%.



Σχήμα 5.14 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – συντελεστή εξοικονόμησης για δύο περιπτώσεις: (A) εξοικονόμηση ηλεκτρικής ισχύος κατά τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz) έναντι της απευθείας τροφοδότησης ως προς την καταναλισκόμενη ισχύ απευθείας τροφοδότησης επαγωγικού κινητήρα, (B) εξοικονόμηση ηλεκτρικής ισχύος κατά τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου έναντι της απευθείας τροφοδότησης ως προς την καταναλισκόμενη ισχύ απευθείας τροφοδότησης επαγωγικού κινητήρα.

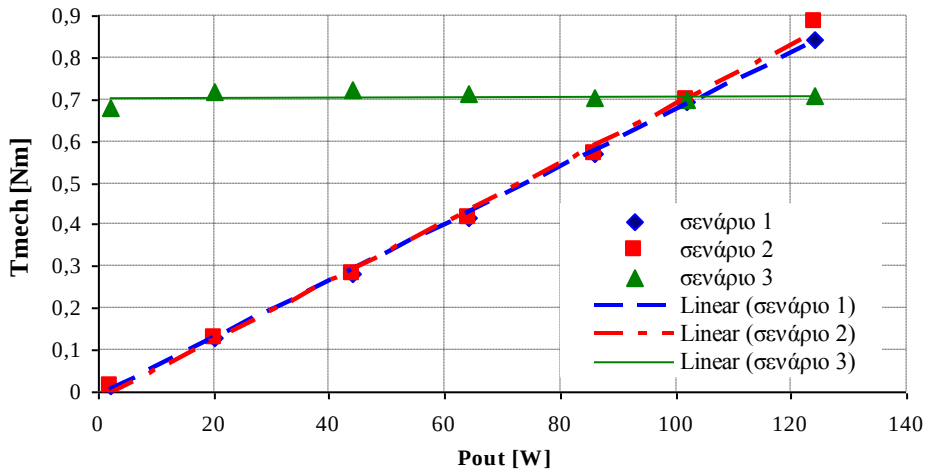
Ωστόσο δημιουργείται το ερώτημα ποιες είναι οι απώλειες του μετατροπέα, οι οποίες οδηγούν σε μεγάλες φορτίσεις μηχανικού φορτίου στη μη εξοικονόμηση ισχύος με τη χρήση του ηλεκτρονικού ισχύος.

- Εξέταση των απωλειών ισχύος πάνω στο μετατροπέα ισχύος σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου της διάταξης για τις δύο περιπτώσεις χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz) και με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου σχήμα 5.15. Διαπιστώνεται ότι και στα δύο σενάρια τα πειραματικά σημεία προσεγγίζονται ικανοποιητικά από τριτοβάθμιες εξισώσεις. Για την περίπτωση χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (σενάριο (2)) παρατηρείται ότι αρχικά οι απώλειες είναι σταθερές της τάξης των 7,5 W ως περίπου το 70% του μηχανικού φορτίου οφειλόμενα κυρίως στα διακοπτικά στοιχεία, ενώ για υψηλότερες φορτίσεις αρχίζουν να ανεβαίνουν κυρίως λόγω των αυξημένων ωμικών απωλειών. Για την περίπτωση χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου (σενάριο (3)) οι απώλειες διακυμαίνονται περισσότερο, καθώς μεταβάλλεται το επίπεδο λειτουργίας της τάσης εξόδου του μετατροπέα (βλ. σχήμα 5.5 ενεργός τάση τροφοδοσίας επαγωγικού κινητήρα σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου), της έντασης του ρεύματος εξόδου (βλ. σχήμα 5.6 ενεργός ένταση ρεύματος τροφοδοσίας επαγωγικού κινητήρα σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου), καθώς και της διακοπτικής συχνότητας λειτουργίας του αντιστροφέα, παραγόντων που επηρεάζουν συνολικά τις απώλειες του μετατροπέα ισχύος.



Σχήμα 5.15 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – απωλειών ισχύος μετατροπέα ισχύος για τα σενάρια: (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

- Εξέταση της ισοδύναμης τελικής μηχανικής ροπής εξόδου του ηλεκτροδυναμομέτρου σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου για τα τρία σενάρια σχήμα 5.16. Αυτή υπολογίζεται ως η καθαρή ισχύς εξόδου επί του ηλεκτροδυναμομέτρου προς την αντίστοιχη μηχανική γωνιακή ταχύτητα. Διαπιστώνεται ότι και στα τρία σενάρια τα πειραματικά σημεία προσεγγίζονται ικανοποιητικά από ευθείες. Ειδικά στην περίπτωση του σεναρίου (3), δηλαδή της περίπτωσης τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο του μηχανικού φορτίου η αντίστοιχη ροπή είναι σταθερή και ίση με 0,698 N·m.



Σχήμα 5.16 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – ισοδύναμη τελική μηχανική ροπή εξόδου του ηλεκτροδυναμομέτρου για τα σενάρια: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

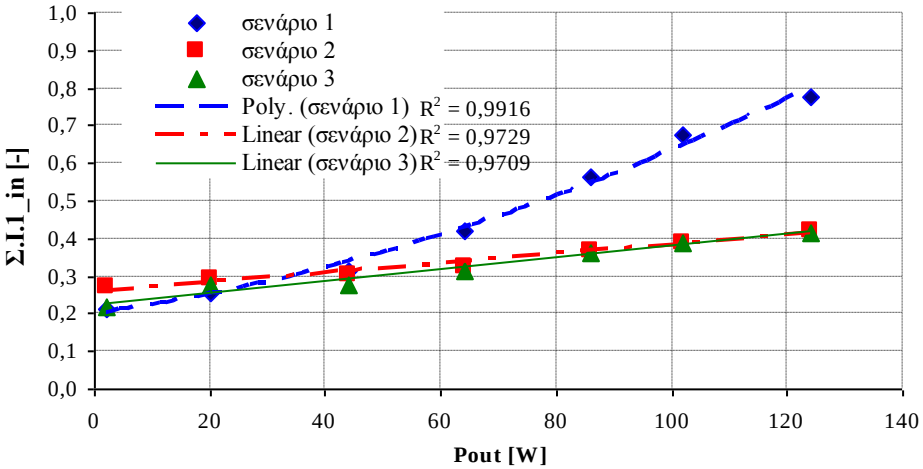
Ο υπολογισμός του συντελεστή ισχύος μπορεί να γίνει ως το πηλίκο της ενεργού ισχύος προς την αντίστοιχη φαινόμενη ισχύ στην έξοδο της τροφοδοσίας της διάταξης (στην είσοδο του μετατροπέα ισχύος) και στην είσοδο του επαγωγικού κινητήρα (στην έξοδο του μετατροπέα ισχύος) αγνοώντας τα αντίστοιχα αρμονικά φαινόμενα. Δηλαδή ισχύει ότι:

$$\Sigma \cdot \mathrm{I} \cdot_{1_in} = \frac{P_{in}}{S_{in}}$$ για την έξοδο τροφοδοσίας της διάταξης

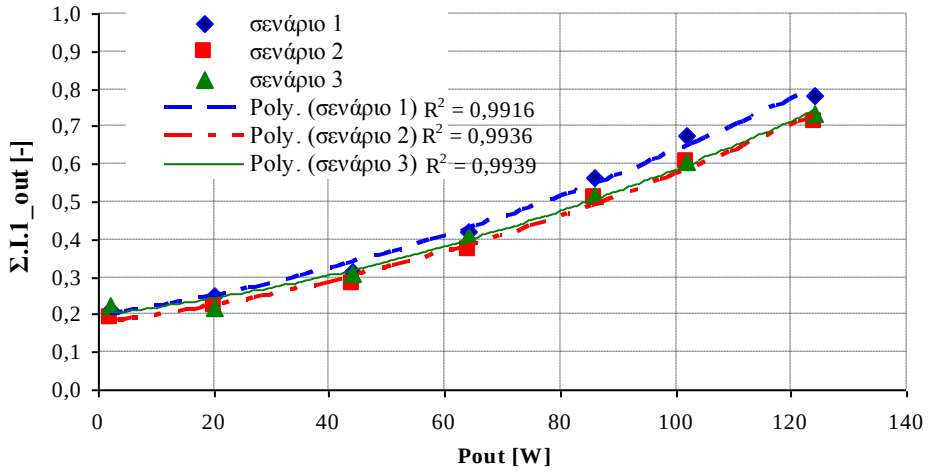
$$\Sigma \cdot \mathrm{I} \cdot_{1_out} = \frac{P_{out_inv}}{S_{out_inv}}$$ για την τροφοδοσία του επαγωγικού κινητήρα

Αυτή η διαδικασία έχει προταθεί από την εταιρεία του ηλεκτρονικού ισχύος MITSUBISHI εντός του εγχειριδίου της.

- Εξέταση του συντελεστή ισχύος τροφοδοσίας της διάταξης και του επαγωγικού κινητήρα σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου για τα τρία σενάρια σχήματα 5.17 και 5.18 αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση (συντελεστής ισχύος τροφοδοσίας της διάταξης) διαπιστώνεται ότι τα πειραματικά σημεία προσεγγίζονται ικανοποιητικά από δευτεροβάθμια εξίσωση για το σενάριο (1) και γραμμική εξίσωση για τα σενάρια (2) και (3). Ο συντελεστής ισχύος για χαμηλές φορτίσεις (ως το 30%) φαίνεται να είναι υψηλότερος με το σενάριο (2), ενώ για υψηλότερες φορτίσεις φαίνεται ότι πλεονεκτεί καθαρά η απευθείας τροφοδότηση του επαγωγικού κινητήρα. Στη δεύτερη περίπτωση (συντελεστής ισχύος τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα) διαπιστώνεται ότι τα πειραματικά σημεία προσεγγίζονται ικανοποιητικά από δευτεροβάθμια εξίσωση για όλα τα σενάρια. Επίσης ο συντελεστής ισχύος είναι υψηλότερος (έστω και οριακά) για όλες τις φορτίσεις στην περίπτωση απευθείας τροφοδότησης του επαγωγικού κινητήρα.



Σχήμα 5.17 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – συντελεστή ισχύος τροφοδοσίας διάταξης (χωρίς την επίδραση των αρμονικών) για τα σενάρια: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.



Σχήμα 5.18 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – συντελεστή ισχύος τροφοδοσίας επαγωγικού κινητήρα (χωρίς την επίδραση των αρμονικών)για τα σενάρια: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

Λόγω όμως ύπαρξης αρμονικών τόσο στην τάση, όσο και στην ένταση του ρεύματος χρειάζεται επαναπροσδιορισμός του συντελεστή ισχύος προκειμένου να συμπεριληφθούν τα ανωτέρω φαινόμενα. Έτσι ο συντελεστής ισχύος ορίζεται πλέον ως το πηλίκο της ενεργού ισχύος της πρώτης αρμονικής τάσης και της πρώτης αρμονικής ρεύματος προς την αντίστοιχη φαινόμενη ισχύ στην έξοδο της τροφοδοσίας της διάταξης (στην είσοδο του μετατροπέα ισχύος) και στην είσοδο του επαγωγικού κινητήρα (στην έξοδο του μετατροπέα ισχύος). Δηλαδή ισχύει ότι:

$$\Sigma \cdot \mathrm{I} \cdot_{2_in} = \frac{P_{1^{st}_in}}{S_{in}}$$ για την έξοδο τροφοδοσίας της διάταξης

$$\Sigma \cdot \mathrm{I} \cdot_{2_out} = \frac{P_{1^{st}_out_inv}}{S_{out_inv}}$$ για την τροφοδοσία του επαγωγικού κινητήρα

Επειδή οι αρμονικές τάσεως και ρεύματος προκαλούν επιπλέον απώλειες στις ηλεκτρικές συσκευές (π.χ. επιπλέον απώλειες δινορρεύματων και υστέρησης λόγω υψηλότερων συχνοτήτων σε κινητήρες, επιπλέον πτώση τάση στις γραμμές μεταφοράς) ή διαταραχές στην ομαλή λειτουργία τους (π.χ. τρεμούλιασμα / flickering στους λαμπτήρες φθορισμού) πρέπει να είναι περιορισμένες σε ανεκτά επίπεδα που καθορίζονται από τους εκάστοτε κανονισμούς. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σύμφωνα με το πρότυπο STANAG 1008 ($9^{η}$ έκδοση) πρέπει ο οποιοσδήποτε λόγος αρμονικής παραμόρφωσης IHD_n να είναι μικρότερος του 3%, ενώ ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης *THD* να είναι μικρότερος του 5%, όπου ορίζονται ως εξής:

$$IHD_n(\%) = \frac{C_{V-n}}{C_{V-1}} \cdot 100\% \qquad (5.21)$$

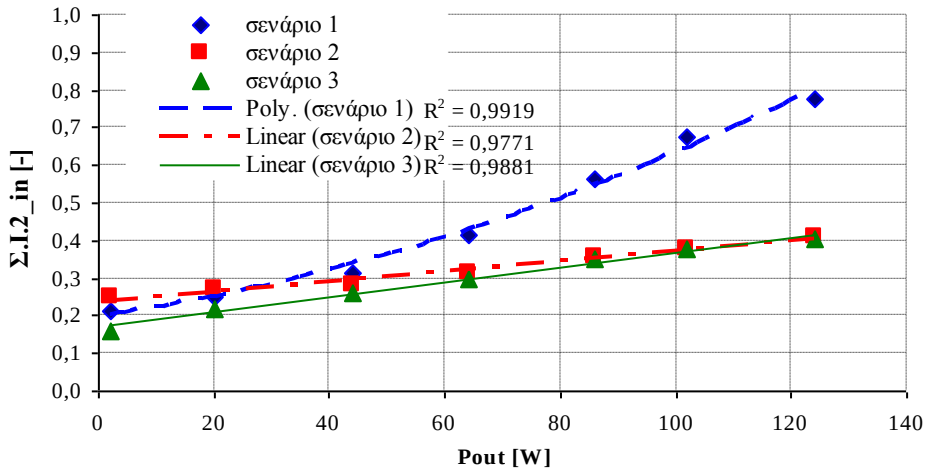
$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{+\infty} C_{V-n}^2}}{C_{V-1}} \cdot 100\% \qquad (5.22)$$

Το προαναφερθέν πρότυπο είναι ένα πρότυπο του ΝΑΤΟ που πρέπει να ικανοποιούν τα συστήματα ηλεκτρικής ισχύος των πολεμικών πλοίων του ΝΑΤΟ για λόγους συμβατότητας και ομαλής λειτουργίας των διαφόρων υποσυστημάτων που διαθέτουν (τηλεπικοινωνίες κτλ.).

Οπότε λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των αρμονικών προκύπτουν τα σχήματα αντίστοιχα 5.19 και 5.20 του συντελεστή ισχύος τροφοδοσίας της διάταξης και του συντελεστή ισχύος του επαγωγικού κινητήρα σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου για τα τρία σενάρια.

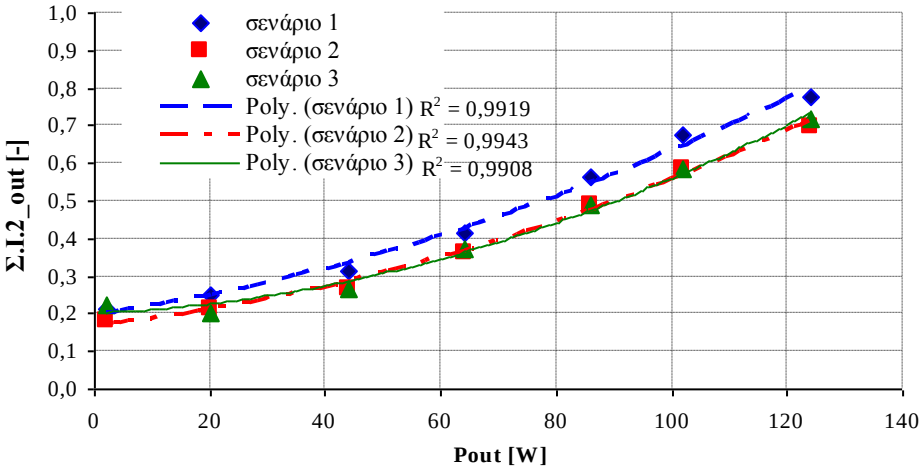
- Στην πρώτη περίπτωση (συντελεστής ισχύος τροφοδοσίας της διάταξης) διαπιστώνεται ότι τα πειραματικά σημεία προσεγγίζονται ικανοποιητικά από δευτεροβάθμια εξίσωση για το σενάριο (1) και γραμμική εξίσωση για τα σενάρια (2) και (3). Ο συντελεστής ισχύος για χαμηλές φορτίσεις (ως το 20%) φαίνεται να είναι υψηλότερος με το σενάριο (2), ενώ για υψηλότερες φορτίσεις φαίνεται ότι πλεονεκτεί καθαρά η απευθείας τροφοδότηση του επαγωγικού κινητήρα. Ο υπολογιζόμενος συντελεστής ισχύος με λήψη των επιπτώσεων των αρμονικών είναι σε όλα τα σενάρια μικρότερος από το συντελεστή ισχύος που υπολογίζεται χωρίς τη λήψη των αρμονικών με μέσα ποσοστά 0,26% για το σενάριο (1) με περιοχή τιμών από 0,03% ως 0,63%, 5,4% για το σενάριο (2) με περιοχή τιμών από 3,35% ως 8,57%, 12,65% για το σενάριο (1) με περιοχή τιμών από 3,35% ως 37,68%. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στις χαμηλές φορτίσεις, που όπως θα φανεί και στη συνέχεια παρουσιάζουν την ύπαρξη ισχυρότερων αρμονικών συνιστωσών. Διευκρινίζεται ότι οι υπολογιζόμενες αποκλίσεις προσδιορίζονται από την ακόλουθη σχέση θεωρώντας ως αληθινή τιμή το συντελεστή ισχύος που λαμβάνει υπόψη την επίδραση των αρμονικών:

$$\text{σφάλμα} = \frac{\Sigma \cdot I \cdot_{1_in} - \Sigma \cdot I \cdot_{2_in}}{\Sigma \cdot I \cdot_{2_in}} \cdot 100\%$$



Σχήμα 5.19 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – συντελεστή ισχύος τροφοδοσίας διάταξης (με την επίδραση των αρμονικών) για τα σενάρια: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

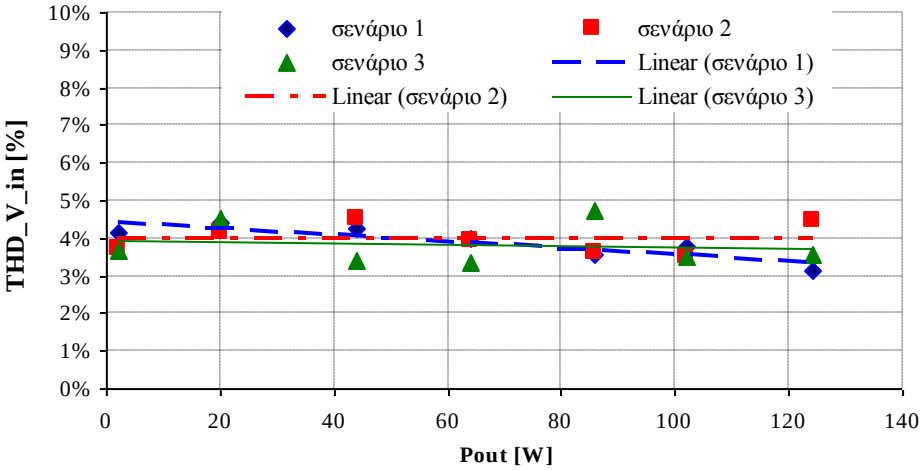
- Στη δεύτερη περίπτωση (συντελεστής ισχύος τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα) διαπιστώνεται ότι τα πειραματικά σημεία προσεγγίζονται πάλι ικανοποιητικά από δευτεροβάθμια εξίσωση για όλα τα σενάρια. Επίσης ο συντελεστής ισχύος είναι υψηλότερος για όλες τις φορτίσεις στην περίπτωση απευθείας τροφοδότησης του επαγωγικού κινητήρα. Ειδικά στις υψηλές φορτίσεις η διαφορά γίνεται πιο έντονη. Ο υπολογιζόμενος συντελεστής ισχύος με λήψη των επιπτώσεων των αρμονικών είναι σε όλα τα σενάρια μικρότερος από το συντελεστή ισχύος που υπολογίζεται χωρίς τη λήψη των αρμονικών με μέσα ποσοστά 0,23 % για το σενάριο (1) με περιοχή τιμών από 0,06% ως 0,42 %, 4,4% για το σενάριο (2) με περιοχή τιμών από 2,28% ως 6,40%, 6,2% για το σενάριο (1) με περιοχή τιμών από 0,60% ως 14,3%. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στις χαμηλές φορτίσεις, που όπως θα φανεί και στη συνέχεια παρουσιάζουν την ύπαρξη ισχυρότερων αρμονικών συνιστωσών.



Σχήμα 5.20 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – συντελεστή ισχύος τροφοδοσίας επαγωγικού κινητήρα (με την επίδραση των αρμονικών) για τα σενάρια: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

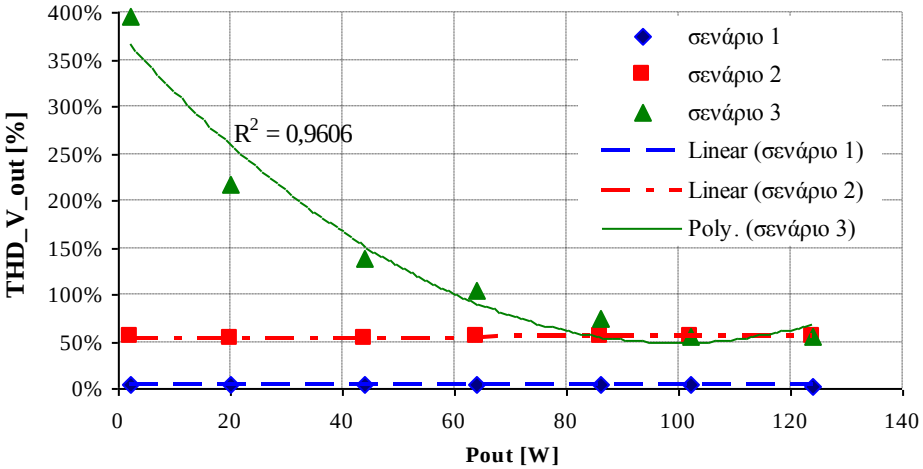
Ως προς τις αρμονικές προσδιορίστηκαν ενδεικτικά ο συνολικός συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης THD της τάσης και της έντασης του ρεύματος για την έξοδο της τροφοδοσίας της διάταξης και για την είσοδο του επαγωγικού κινητήρα για τα τρία σενάρια.

- Στην περίπτωση του συνολικού συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης THD_{V_in} της τάσης τροφοδοσίας της διάταξης διαπιστώνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις κυμαίνεται γύρω στο 4% με πτωτική πορεία όσο αυξάνεται η ένταση του ρεύματος. Αυτό οφείλεται στη μεσολάβηση του αυτομετασχηματιστή του τροφοδοτικού του εργαστηρίου, ο οποίος αυτομετασχηματιστής φαίνεται να οδηγείται σε κορεσμό, με συνέπεια η θεωρητική ημιτονοειδής τάση τροφοδοσίας να μεταπίπτει σε πιο πεπλατυσμένη κορυφή.



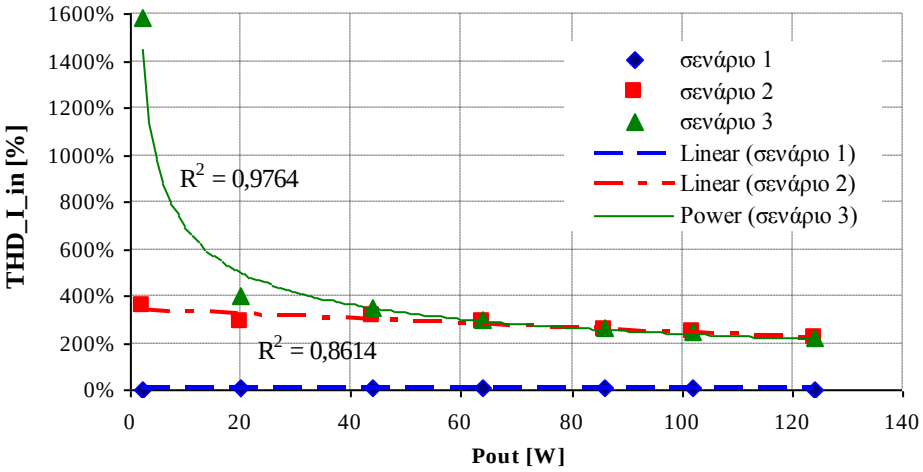
Σχήμα 5.21 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – συνολικού συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης τάσης τροφοδοσίας διάταξης για τα σενάρια: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

- Στην περίπτωση του συνολικού συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης THD_{V_out} της τάσης τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα διαπιστώνεται ότι για το σενάριο (1), χωρίς την ύπαρξη ηλεκτρονικών ισχύος κυμαίνεται γύρω στο 4% με πτωτική πορεία όσο αυξάνεται η ένταση του ρεύματος. Για το σενάριο (2), δηλαδή κατά την ύπαρξη ηλεκτρονικών ισχύος χωρίς ιδιαίτερη ρύθμιση, το THD έχει μέση τιμή στο 54,4% με μικρή κύμανση από το 54% προς το 55% όσο αυξάνεται η φόρτιση. Για το σενάριο (3), δηλαδή κατά την ύπαρξη ηλεκτρονικών ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου, το THD έχει μέση τιμή στο 148,5% με μεγάλη κύμανση από το 396% προς το 55% όσο αυξάνεται η φόρτιση. Δηλαδή η απόκλιση από την ημιτονοειδή τάση είναι σημαντικά μεγάλη.



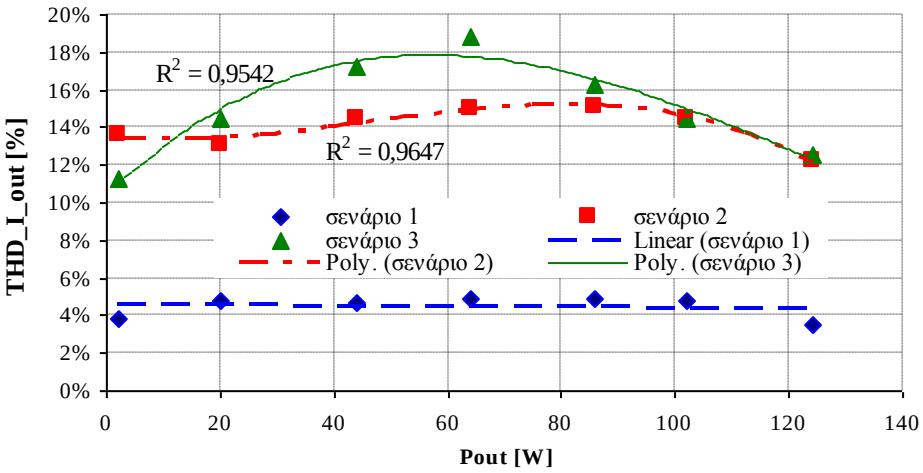
Σχήμα 5.22 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – συνολικού συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης τάσης τροφοδοσίας επαγωγικού κινητήρα για τα σενάρια: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

- Στην περίπτωση του συνολικού συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης THD_{I_in} της έντασης τροφοδοσίας της διάταξης διαπιστώνεται ότι για το σενάριο (1), χωρίς την ύπαρξη ηλεκτρονικών ισχύος, το THD κυμαίνεται γύρω στο 4% με πτωτική πορεία όσο αυξάνεται η ένταση του ρεύματος. Για το σενάριο (2), δηλαδή κατά την ύπαρξη ηλεκτρονικών ισχύος χωρίς ιδιαίτερη ρύθμιση, το THD έχει μέση τιμή στο 283% με κύμανση από το 359% προς το 222% όσο αυξάνεται η φόρτιση. Για το σενάριο (3), δηλαδή κατά την ύπαρξη ηλεκτρονικών ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου, το THD έχει μέση τιμή στο 480% με κύμανση από το 1580% προς το 225% όσο αυξάνεται η φόρτιση. Δηλαδή η απόκλιση από την ημιτονοειδή κυματομορφή είναι σημαντικά μεγάλη. Επίσης, ενώ για τα δύο πρώτα σενάρια τα πειραματικά σημεία προσεγγίζονται από ευθεία γραμμή στην τρίτη περίπτωση χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί συνάρτηση της μορφής x^a. Στην περίπτωση όμως που αγνοηθούν τα πειραματικά σημεία εξαιρετικά χαμηλής φόρτισης, τότε το THD έχει μέση τιμή στο 297% με κύμανση από το 400% προς το 225%, όσο αυξάνεται η φόρτιση, δηλαδή ελαφρώς μεγαλύτερη έναντι του σεναρίου (2). Πάντως ο αντίστοιχος συντελεστής παραμόρφωσης είναι εξαιρετικά μεγάλος και κανονικά χρειάζεται η προσθήκη φίλτρων, ώστε να περικοπούν οι ανώτερες αρμονικές.



Σχήμα 5.23 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – συνολικού συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης έντασης ρεύματος τροφοδοσίας διάταξης για τα σενάρια: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

- Στην περίπτωση του συνολικού συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης THD_{I_in} της έντασης τροφοδοσίας του επαγωγικού κινητήρα διαπιστώνεται ότι για το σενάριο (1) ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν για την προηγούμενη περίπτωση. Για το σενάριο (2), δηλαδή κατά την ύπαρξη ηλεκτρονικών ισχύος χωρίς ιδιαίτερη ρύθμιση, το THD έχει μέση τιμή στο 14% με κύμανση από το 12,2% προς το 15% με τις μέγιστες τιμές να παρατηρούνται για υψηλές φορτίσεις. Για τις ίδιες τιμές η σχηματιζόμενη καμπύλη τρίτου βαθμού έχει τα κοίλα προς τα κάτω. Για το σενάριο (3), δηλαδή κατά την ύπαρξη ηλεκτρονικών ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου, το THD έχει μέση τιμή στο 15% με κύμανση από το 11,2% ως το 18,9%. Εδώ η σχηματιζόμενη καμπύλη τρίτου βαθμού φαίνεται πιο έντονα να έχει τα κοίλα προς τα κάτω με τη περιοχή μέγιστων τιμών να είναι γύρω από το 60% του ονομαστικού μηχανικού φορτίου.



Σχήμα 5.24 Γραφική παράσταση ισχύος εξόδου – συνολικού συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης έντασης τροφοδοσίας επαγωγικού κινητήρα για τα σενάρια: (1) απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα, (2) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος χωρίς ρύθμιση συχνότητας (50 Hz), (3) τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα με ηλεκτρονικά ισχύος με ρύθμιση V-f με βάση το επίπεδο φορτίου.

5.4 Συμπεράσματα

Από την επεξεργασία των μετρήσεων τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα κάτωθι:

- Η απόδοση επαγωγικού κινητήρα κατά την τροφοδοσία του μέσω ηλεκτρονικών ισχύος χωρίς ρύθμιση τάσης - συχνότητας είναι μικρότερη από την αντίστοιχη απευθείας τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα σε όλα τα επίπεδα φόρτισης.
- Η απόδοση επαγωγικού κινητήρα κατά την τροφοδοσία του μέσω ηλεκτρονικών ισχύος με ρύθμιση τάσης - συχνότητας σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης (έως περίπου 60%) μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας έως και 35%.
- Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και σε υψηλά επίπεδα φόρτισης η τιμή της ενεργούς έντασης του ρεύματος τροφοδοσίας εμφανίζεται σχεδόν κατά 50% μικρότερη κατά τη λειτουργία με απ' ευθείας τροφοδότηση έναντι της λειτουργίας με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος.
- Κατά την τροφοδοσία επαγωγικού κινητήρα μέσω ηλεκτρονικών ισχύος με ή χωρίς ρύθμιση τάσης συχνότητας παρατηρείται μέσω του συνολικού συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης THD_{I_in} της έντασης τροφοδοσίας διαπιστώνεται σημαντικά μεγάλη απόκλιση από την ημιτονοειδή κυματομορφή. Η παραμόρφωση είναι εξαιρετικά μεγάλη και χρειάζεται η προσθήκη φίλτρων, ώστε να περικοπούν οι ανώτερες αρμονικές.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

6.1. Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της συνεχούς προσπάθειας μείωσης του λειτουργικού κόστους των πλοίων αλλά και της ανάγκης προστασίας του περιβάλλοντος, εξετάζονται διάφοροι μηχανισμοί και διερευνώνται διάφορες μέθοδοι με σκοπό τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος των πλοίων.

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) εργάζεται για τον έλεγχο και τον περιορισμό των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) θεσπίζοντας σχετικούς κανονισμούς. Οι εκπομπές CO_2 των πλοίων θεωρείται ότι προέρχονται από τις κύριες μηχανές και από τις βοηθητικές μηχανές, που χρησιμοποιούνται ως κινητήρια δύναμη για τις ηλεκτρικές γεννήτριες.

Οι ηλεκτρικές γεννήτριες εξασφαλίζουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια στις βοηθητικές εγκαταστάσεις και στα βοηθητικά μηχανήματα προκειμένου τα πλοία να πλέουν με ασφάλεια και να εκπληρώνουν τις επιχειρησιακές τους απαιτήσεις. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν κατά βάση το μέσο του οποίου παρέχεται στα βοηθητικά μηχανήματα (αντλίες, συμπιεστές κ.ά.) η απαιτούμενη για τη λειτουργία τους μηχανική ενέργεια. Τα σύγχρονα πλοία είναι εξοπλισμένα με πολλούς επαγωγικούς κινητήρες διαφόρων τιμών ονομαστικής ισχύος.

Τα τελευταία χρόνια, τα ηλεκτρονικά ισχύος γίνονται όλο και πιο διαδεδομένα στον έλεγχο κινητήρων επαγωγής, η χρήση των οποίων έχει μειώσει σημαντικά προβλήματα. Ωστόσο, τα ηλεκτρονικά ισχύος προκαλούν ποιοτικά προβλήματα.

Προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα μείωσης των ενεργειακών απαιτήσεων ενός επαγωγικού κινητήρα με περιέλιξη κλωβού στην κατάσταση μόνιμης λειτουργίας εξετάστηκε η σκοπιμότητα χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος. Εξαιτίας τούτου αναπτύχθηκε μία πειραματική διάταξη όπου, ένας μικρός, τριφασικός επαγωγικός κινητήρας ονομαστικής ισχύος 175 W, συνδέθηκε με ένα ηλεκτροδυναμόμετρο προσομοιώνοντας μια βοηθητική αντλία επάνω σε πλοίο. Αρχικά η τροφοδότηση του κινητήρα γίνεται απευθείας από την τριφασική πηγή τάσης, ενώ στο επόμενο στάδιο έγινε μέσω του ηλεκτρονικού ισχύος που

παρεμβλήθηκε μεταξύ της πηγής τάσεως και του κινητήρα. Οι λειτουργικές παράμετροι της διάταξης κατεγράφησαν και μετά την επεξεργασία τους μελετήθηκε η απόδοση του συστήματος μετατροπέα-ηλεκτροκινητήρα-ηλεκτροδυναμόμετρου.

Μετρήσεις λήφθησαν για τις παρακάτω καταστάσεις:

- Χωρίς λειτουργία του μετατροπέα ισχύος,
- Με λειτουργία του μετατροπέα ισχύος με ρύθμιση τάσεως-συχνότητας με βάση το επίπεδο ζήτησης μηχανικού φορτίου,
- Με λειτουργία του μετατροπέα ισχύος χωρίς ρύθμιση τάσεως-συχνότητας.

Οι μετρήσεις λήφθησαν για διάφορα επίπεδα ισχύος μηχανικού φορτίου από 0% έως και 120% του «ονομαστικού μηχανικού φορτίου», το οποίο ορίζεται ως το μηχανικό φορτίο που αποδίδεται στο ηλεκτροδυναμόμετρο υπό τις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας τάσης και ρεύματος του επαγωγικού κινητήρα.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψαν τα κάτωθι συμπεράσματα:

- Σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης (έως περίπου 60%) η χρήση μετατροπέα ισχύος με ρυθμιζόμενη τάση-συχνότητα με βάση το επίπεδο του μηχανικού φορτίου οδηγεί σε εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας ως και 35%.
- Η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος με ή χωρίς ρύθμιση τάσης συχνότητας προκαλεί στο ρεύμα τροφοδοσίας σημαντικά μεγάλη απόκλιση από την ημιτονοειδή κυματομορφή. Αυτό εκφράζεται μέσω του συνολικού συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος THD που λαμβάνει μεγάλες τιμές (άνω του 20%).
- Σε υψηλά επίπεδα φόρτισης και στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η μικρότερη τιμή της ενεργούς έντασης του ρεύματος τροφοδοσίας εμφανίζεται κατά τη λειτουργία με απ’ ευθείας τροφοδότηση.

6.2. Περιοχές για Περαιτέρω Έρευνα

Με βάση τα ανωτέρω προτείνονται τα ακόλουθα αντικείμενα προς μελλοντική διερεύνηση:

- Διερεύνηση της συμπεριφοράς επαγωγικού κινητήρα μέσω τροφοδότησης του με ηλεκτρονικά ισχύος κατά τη λειτουργία του κάτω από επανειλημμένες εκκινήσεις και κρατήσεις με μικρό χρονικό διάστημα λειτουργίας.
- Μελέτη μεταβατικών φαινομένων κατά τη λειτουργία επαγωγικού κινητήρα με και χωρίς ηλεκτρονικά ισχύος.
- Διερεύνηση του τρόπου ρύθμισης τάσης – συχνότητας του ηλεκτρονικού ισχύος με σύγχρονες τεχνικές (π.χ. διανυσματική ανάλυση) προς άμεσο αυτόματο έλεγχο του επαγωγικού κινητήρα, για συνεχή επίτευξη της μέγιστης απόδοσης.
- Για την λειτουργία επαγωγικών κινητήρων μέσω μετατροπέων ισχύος με ρύθμιση τάσεως-συχνότητας σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης, όπου εμφανίζεται αποδοτικότερη λειτουργία από τη λειτουργία τους με απ' ευθείας τροφοδότηση και μετά την εξασφάλιση ικανοποιητικού επιπέδου ποιότητας ισχύος, θα πρέπει να εξετασθεί η σκοπιμότητα χρήσης των ηλεκτρονικών ισχύος μέσα από το πρίσμα της τεχνοοικονομικά αποδεκτής πρότασης, όσο και από το πρίσμα της αποδεκτής μείωσης της αξιοπιστίας της εγκατάστασης που προκύπτει λόγω της τοποθέτησης τους.

Βιβλιογραφία

[1] "Φαινόμενο του Θερμοκηπίου" Wikipedia Οκτώβριος 2011 http://el.wikipedia.org/wiki/Φαινόμενο_του_Θερμοκηπίου.

[2] "Πρωτόκολλο του Κιότο" Wikipedia Οκτώβριος 2011. http://el. wikipedia. org/wiki/Πρωτόκολλο_του_Κιότο.

[3] International Maritime Organization (IMO): 2nd GHG IMO Study 2009.

[4] International Maritime Organization (IMO), συνεδριάσεις για το περιβάλλον (MEPC 57, MEPC 58, MEPC 59, MEPC 60, MEPC 61 ,MEPC 62).

[5] "Historic Background'', http://www.imo.org/OurWork/Environment/ PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Historic%20Background%20GHG .aspx.

[6] IMO Resolution A. 963(23): IMO policies and practices related to the reduction of greenhouse gas emissions from ships.

[7] Control system for fuel consumption minimization-gas emission limitation of full electric propulsion ship power systems. F.D. Kanellos – J. Prousalidis – G.J.Tsekouras. Proceedings of the Intitution of Mechanical Engineers. Προς εκτύπωση.

[8] Experimental Investigation Of Energy Saving Using Power Electronics To Operate Ship Induction Electric Motors. Panayiotis Michalopoulos - Christos Kalogrias - Fotis D. Kanellos - George J. Tsekouras. 1st MARINELIVE January 2012.

[9] Βοηθητικά μηχανήματα πλοίων. Δανιήλ – Μιμηκόπουλου. Ευγενίδειο Ίδρυμα

[10] Ενεργειακά συστήματα πλοίου. Φραγκόπουλος - Προυσαλίδης Ε.Μ.Π. 2005

[11] Συστήματα πλοίου. Κυρτάτος Ε.Μ.Π.

[12] Μετατροπείς Ενέργειας & ΣΑΕ Ηλ. Συστημάτων με Ηλεκτρονικά Ισχύος. Χατζηλάου – Πέρρος Σ.Ν.Δ.

[13] Ηλεκτρολογία πλοίων. Ηρακλή Χάρχαρου.

[14] Ηλεκτρικές Μηχανές. Γ. πολίτης – Γ. Τσεκούρας

[15] Σημερινή τεχνολογική κατάσταση των Ηλεκτρονικών Ισχύος. Αθανάσιος Σάφακας ΤΕΕ Απρ. 2006

[17] Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Κονταξής – Βουρνάς.εκδόσεις Συμμετρία.

[18] New Challenges Emerged from the Development of more efficient Electric Energy generation Units. F.D. Kanellos – J. Prousalidis – G.J.Tsekouras
[19] Energy Efficiency Design Index & Energy Efficiency Operational Indicator. Διπλωματική εργασία Δ. Ρασσιάς. Επιβλέπων: Τσελεντής Βασίλειος. Πα. Πειραιώς.
[20] Energy Efficiency Design Index . Διπλωματική εργασία Γ. Παπακώστα. Επιβλέπων Χ. Ψαραύτης . Ε.Μ.Π.
[21] Ανάλυση Λειτουργίας Ασύγχρονου Κινητήρα Τροφοδοτούμενο Από Μετατροπέα. Διπλωματική εργασία Δ. Ράπτη. Επιβλέπων Α. Κλαδάς. Ε.Μ.Π.
[22] Ηλεκτρικές Μηχανές Ι. Κ. Χατζηλάου Σ.Ν.Δ.