

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΡΑΔΗΜΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΙΩΑΝΝΗΣ Μ. ΠΡΟΥΣΑΛΙΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΙΟΣ 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διερεύνηση Θεμάτων Αρμονικής Παραμόρφωσης στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Κωνσταντίνου Γ. Καραδήμα

Επιβλέπων Καθηγητής:

Προυσαλίδης Ιωάννης, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Αντωνόπουλος Αντώνιος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Κλαδάς Αντώνιος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Προυσαλίδης Ιωάννης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2021

Πρόλογος

Η ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στο διεθνές εμπόριο, το οποίο πραγματοποιείται με την ουσιαστική συμβολή των διεθνών μεταφορών. Ο πιο συμφέρων, ασφαλής και αποτελεσματικός τρόπος παγκοσμίως με το μικρότερο ενεργειακό αποτύπωμα ανά μονάδα μεταφερόμενου φορτίου είναι οι θαλάσσιες μεταφορές. Παρόλο που οι θαλάσσιες μεταφορές αποτελούν τον πιο “πράσινο” τρόπο μεταφοράς αγαθών, διαπιστώνεται ότι συνεχώς αντιμετωπίζουν προκλήσεις για πιο οικονομική και αποδοτική λειτουργία σε συνδυασμό με απαιτήσεις από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (ΙΜΟ) για μειωμένες εκπομπές ρύπων και περιορισμό εξάπλωσης υδρόβιων οργανισμών.

Με σκοπό την επίτευξη των ανωτέρω, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός και το Διεθνές Ναυτιλιακό Επιμελητήριο υποχρέωσαν τα υπάρχοντα πλοία σε μετατροπές όπως εγκατάσταση συστήματος Scrubber, εγκατάσταση συστήματος διαχείρισης έρματος και τις νέες σχεδιάσεις πλοίων σε αποδοτικότερες. Η μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος αποτελεί βασικό μέτρο για πιο αποδοτικές μεταφορές. Αυτή η μείωση δεν είναι αρκετή να πραγματοποιηθεί μόνο στις κύριες προωστήριες μηχανές του πλοίου αλλά και στις ηλεκτρογεννήτριες αφού ο εξηλεκτρισμός των νέων πλοίων αυξάνεται συνεχώς αλλά προστίθενται και νέες ηλεκτρικές μονάδες ισχύος στα υπάρχοντα πλοία. Έτσι οι μηχανικοί καλούνται να επιλύσουν σύνθετα προβλήματα αφού οι νέες μονάδες εξοπλισμού δεν είχαν συμπεριληφθεί στον αρχικό ηλεκτρικό ισολογισμό του πλοίου με αποτέλεσμα λύσεις όπως επιλεκτική τροφοδοσία φορτίων (preferential trip settings) είτε εγκατάσταση νέας γεννήτριας στο κατάστρωμα να μην είναι σπάνια παρατηρούμενες.

Η ύπαρξη υψηλών φορτίων ηλεκτροκινητήρων για την κίνηση πχ. διαφόρων αντλιών ή του πλευρικού προωστήριου μηχανισμού, σε συνδυασμό με την αυξημένη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος σε όλο το δίκτυο του πλοίου δημιουργούν αρμονικές παραμορφώσεις και κυκλοφορία άεργου ισχύος που επιφορτίζουν όλο το δίκτυο δημιουργώντας προβλήματα, καταναλώνοντας ενέργεια χωρίς την παραγωγή ωφέλιμου έργου. Για τους παραπάνω λόγους υπάρχει ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση όχι μόνο της παρεχόμενης ποσότητας αλλά και της παρεχόμενης ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος.

Στο πλαίσιο μελέτης της παρεχόμενης ποιότητας ισχύος, η παρούσα διπλωματική εργασία καταπιάνεται με τη διερεύνηση ενός ιδιαίτερα σημαντικού προβλήματος ποιότητας ισχύος, αυτού των αρμονικών παραμορφώσεων των κυματομορφών τάσης και ρεύματος, αποσκοπώντας στην εξοικείωση του αναγνώστη με τις έννοιες της ισχύος, της ποιότητας ισχύος και των προβλημάτων που εγείρονται με την απόκλιση από τα ιδανικά χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος που επιζητεί ο εξοπλισμός στα σημερινά έντονα εξηλεκτρισμένα μηχανοστάσια πλοίων.

Έχοντας ολοκληρώσει την παρούσα διπλωματική εργασία, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιοδήποτε τρόπο στην πραγματοποίησή της. Τις θερμότερες ευχαριστίες μου οφείλω στον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Ιωάννη Προυσαλίδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, τον χρόνο που διέθεσε απλόχερα, την προθυμία του να με βοηθήσει σε οποιοδήποτε πρόβλημα αντιμετώπιζα και τις πολύτιμες συμβουλές. Ακόμη θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου η οποία υπήρξε ένα ανεκτίμητο στήριγμα για εμένα σε κάθε στάδιο της ζωής μου, όπως και στις σπουδές μου. Καταληκτικά θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και τις φίλες μου, οι οποίοι τόσο καιρό με βοηθάνε και με στηρίζουν ο καθένας με τον τρόπο του.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία, μελετά θέματα ποιότητας ισχύος στα ηλεκτρικά δίκτυα των πλοίων με έμφαση στο φαινόμενο των αρμονικών παραμορφώσεων. Ακόμη, παρουσιάζει μια μεθοδολογία υπολογισμού των επιπλέον απωλειών στα καλώδια τροφοδοσίας όλου του μηχανοστασίου λόγω της εκτεταμένης λειτουργίας μη γραμμικών φορτίων.

Η μελέτη αρχικά παρουσιάζει βασικές έννοιες για την ισχύ και τα είδη της ηλεκτρικής ισχύος όπως την στιγμιαία, την άεργο και την μιγαδική ισχύ καθώς και μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο για ένα κύκλωμα, τον συντελεστή ισχύος. Ακολουθεί η εισαγωγή στην ποιότητα της ισχύος και τονίζεται η αναγκαιότητα για την παρακολούθηση της, στα ηλεκτρικά δίκτυα πλοίων. Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών δικτύων των πλοίων σε σχέση με τα χερσαία δίκτυα είναι κυρίως υπεύθυνα για την χαμηλότερη ποιότητα ισχύος στα σημερινά πλοία. Ακόμη, γίνεται ανάλυση των φαινομένων ποιότητας ισχύος και πως αυτά επιδρούν στις θεμελιώδεις ποσότητες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, την τάση και το ρεύμα.

Η αύξηση χρήσης των ηλεκτρονικών ισχύος, οι μετατροπές όπως εγκατάσταση συστήματος διαχείρισης έρματος, και η εισαγωγή συστημάτων ηλεκτροπρόωσης έχουν επιφέρει αλλαγές ως προς την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος προκαλώντας αποκλίσεις των κυματομορφών τάσης και ρεύματος από την ημιτονοειδή μορφή. Με τη μελέτη των αρμονικών παραμορφώσεων είναι δυνατό να αυξηθεί η αξιοπιστία των συστημάτων και να αποφευχθούν υπερκαταναλώσεις. Όμως για να αυξηθεί η αξιοπιστία των συστημάτων είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της πηγής του προβλήματος. Έτσι, πραγματοποιείται μια εκτενή ανάλυση με σκοπό τον προσδιορισμό των μηχανημάτων αυτών που είναι υπεύθυνα για την γένεση και διάδοση διαταραχών στα ηλεκτρικά συστήματα πλοίων. Ακολουθώντας, διερευνάται ο αντίκτυπος της διάδοσης αρμονικών παραμορφώσεων στη λειτουργία και στον προσδόκιμο χρόνο ζωής ενός μηχανήματος και αναλύεται ο τρόπος των πληττόμενων συσκευών. Αναγνωρίζοντας τη σοβαρότητα του προβλήματος τόσο σε θέμα ασφάλειας και περιβάλλοντος όσο και από οικονομικής άποψης, οι αρμόδιοι φορείς και οι νηογνώμονες έχουν θεσπίσει συγκεκριμένα πρότυπα τα οποία σκοπεύουν στην κατάλληλη προμελέτη για αποφυγή του προβλήματος και δίνουν μικρό χρονικό διάστημα συμμόρφωσης.

Καταληκτικά, μέσα από τη χρήση χρονοσειρών μετρήσεων ποιότητας ενέργειας, αναπτύσσεται ένα μοντέλο υπολογισμού των απωλειών των καλωδίων τροφοδοσίας στο ηλεκτρικό σύστημα πλοίου. Στις μετρήσεις, έπειτα από ανάλυση ευαισθησίας, προκύπτουν 3 σενάρια, ακολουθώντας τρεις υποπεριοχές μετρήσεων. Έτσι πραγματοποιείται μια πιο στοχευμένη εκτίμηση των απωλειών καθώς οι χρονικές διακυμάνσεις στα επίπεδα των αρμονικών επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στις απώλειες. Σε περιόδους αιχμής φαίνεται οι γεννήτριες να επιβαρύνονται και έως 11% για αρκετές ώρες, ενώ κατά τη λειτουργία γραμμικών φορτίων οι απώλειες δεν είναι μείζονος σημασίας.

Λέξεις Κλειδιά: Ισχύς, Ποιότητα ισχύος, Αρμονική παραμόρφωση, Πηγές αρμονικών, Επιπτώσεις αρμονικών, Κανονισμοί, Διεθνή πρότυπα, Απώλεια ενέργειας

Abstract

In this thesis, power quality issues are investigated, emphasizing on harmonic distortion. We also provide a methodology for calculating the additional losses in the power cables of the onboard electrical equipment due to extensive operation of non-linear loads.

The study initially presents definitions of power and related quantities such as instantaneous, reactive and apparent power as well as an important parameter for circuits, the power factor. Further we discuss the issue of power quality in ship electrical installations and the necessity of power quality monitoring in relevant grids. The electrical network characteristics of the ships, are mainly responsible for the degradation of power quality onboard. Also, power quality phenomena are reviewed and their impact in basic electrical quantities such as voltage and current are discussed.

The increasing use of power electronics, extensive retrofitting such as water ballast treatment installation, implementations of electric propulsion systems, has changed significantly the onboard power quality causing voltage and current distortions. Monitoring and control of power quality not only increase the reliability of onboard systems per se, but also the fuel consumption will be reduced. However in order to increase the reliability of such systems, it is necessary to identify the harmonic distortion sources. Moreover, we present an extensive research to identify the responsible equipment for the generation and propagation of distortions in ship networks. Furthermore, the impact of harmonic propagation in operation and equipment's life expectancy is examined. Although, the affection mechanism of equipment that may be adversely affected due to harmonics is analyzed. Due to the severity of the problem, both in terms of safety and environment but also from the economic point of view, international technical organizations and classification societies have established specific standards which aim at appropriate power quality preliminary design, with a short period of compliance.

Finally, using power quality measurements over time, a model for calculating the power cable losses is developed. Sensitivity analysis is conducted on the data due to three measurement value sub-areas. This analysis is more accurate when the level of harmonics presents significant fluctuations. At peak times the generators appear to be charged up to extra 11% , while during the operation of linear loads the power cable losses are not a concern.

Key Words : Power, Power Quality, Harmonic distortion, Harmonic distortion sources, Harmonic effects, Regulations, Harmonic standards, Energy losses

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος	5
Περίληψη	7
Abstract	9
Κατάλογος Εικόνων	14
Κατάλογος Πινάκων	17
Εισαγωγή	18
1.1 Αντικείμενο μελέτης.....	18
1.2 Διάρθρωση εργασίας	18
2 Εισαγωγή στην ηλεκτρική ισχύ	21
2.1 Ενέργεια και Ισχύς.....	21
2.2 Είδη ηλεκτρικής ισχύος (power quantities) και μαθηματικές εκφράσεις.....	22
2.2.1 Στιγμιαία ισχύς.....	22
2.2.2 Μέση ισχύς.....	22
2.2.3 Άεργος ισχύς	24
2.2.4 Μιγαδική και φαινόμενη ισχύς.....	26
2.2.5 Συντελεστής ισχύος.....	27
3 Το θέμα της ποιότητας ισχύος	29
3.1 Εισαγωγή στην ποιότητα ισχύος.....	29
3.2 Φαινόμενα ποιότητας ισχύος.....	31
3.2.1 Φαινόμενα ποιότητας ισχύος παροδικής κατάστασης (μικρής διάρκειας)	31
3.2.2 Φαινόμενα ποιότητας ισχύος μόνιμης κατάστασης	33
3.2.3 Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα (transients)	34
3.2.4 Αστάθεια-Ασυμμετρία τάσης (voltage unbalance)	35
3.2.5 Διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας	36
3.2.6 Παραμόρφωση κυματομορφής και αρμονικές.....	37
4 Η έννοια της αρμονικής παραμόρφωσης	40
4.1 Εισαγωγή στην αρμονική παραμόρφωση.....	40
4.2 Γραμμικά και μη γραμμικά φορτία.....	42
4.3 Ανάλυση Fourier και αρμονική παραμόρφωση.....	43

4.4	Φάσμα αρμονικών παραμορφώσεων και δείκτης THD.....	46
4.4.1	Τρόποι περιορισμού του δείκτη THD στα πλοία	48
4.5	Ο δείκτης αρμονικής παραμόρφωσης Total Demand Distortion-(TDD)	49
4.6	Μεταβολή συντελεστή ισχύος (power factor) λόγω αρμονικών	49
5	Πηγές αρμονικής παραμόρφωσης	55
5.1	Μετασχηματιστές	56
5.2	Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος (Converters)	57
5.2.1	Variable Frequency Drives	58
5.3	Στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές.....	61
5.4	Μη συμβατικοί λαμπτήρες φωτισμού, electronic ballasts.....	62
5.5	Συσκευές αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS).....	63
6	Επιπτώσεις αρμονικών παραμορφώσεων στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό	65
6.1	Ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη – Γεννήτριες.....	65
6.2	Επαγωγικοί κινητήρες	67
6.3	Μετασχηματιστές	68
6.4	Ναυτικά καλώδια-αγωγοί (skin cable effect)	70
6.5	Συστήματα προστασίας έναντι ηλεκτρικών σφαλμάτων.....	72
6.6	Φωτισμός.....	75
6.7	Επιπλέον αρνητικές επιπτώσεις αρμονικών παραμορφώσεων.....	77
7	Κανονισμοί και διεθνή πρότυπα ποιότητας ισχύος	80
7.1	IEEE 1662-2008 - Σχεδιασμός και εφαρμογή συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος στα συστήματα πλοίου	81
7.2	IEEE 1826-2012 – Έλεγχος από ηλεκτρονικά ισχύος εγκατεστημένα σε συστήματα πλοίων που χρησιμοποιούν διανομή σε ζώνες με ονομαστική ισχύ άνω των 100kW	82
7.3	IEEE 1709-2010 - Συνήθης πρακτική για 1 kV έως 35kV μέσης τάσης (ΣΡ) συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων	83
7.4	IEC/ISO/IEEE 80005-1&2 – Υψηλής τάσης χερσαίες διασυνδέσεις (HVSC) – Γενικές απαιτήσεις, δεδομένα και έλεγχος.....	86
7.5	IEEE 45 – 2002 – Συνιστάμενες πρακτικές για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων	87
7.6	IEC 60092 – Πρότυπο για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις ποντοπόρων πλοίων και υπεράκτιων πλατφόρμων.....	88
7.7	STANAG 1008 – Χαρακτηριστικά συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος χαμηλής τάσης πλοίων του NATO	89

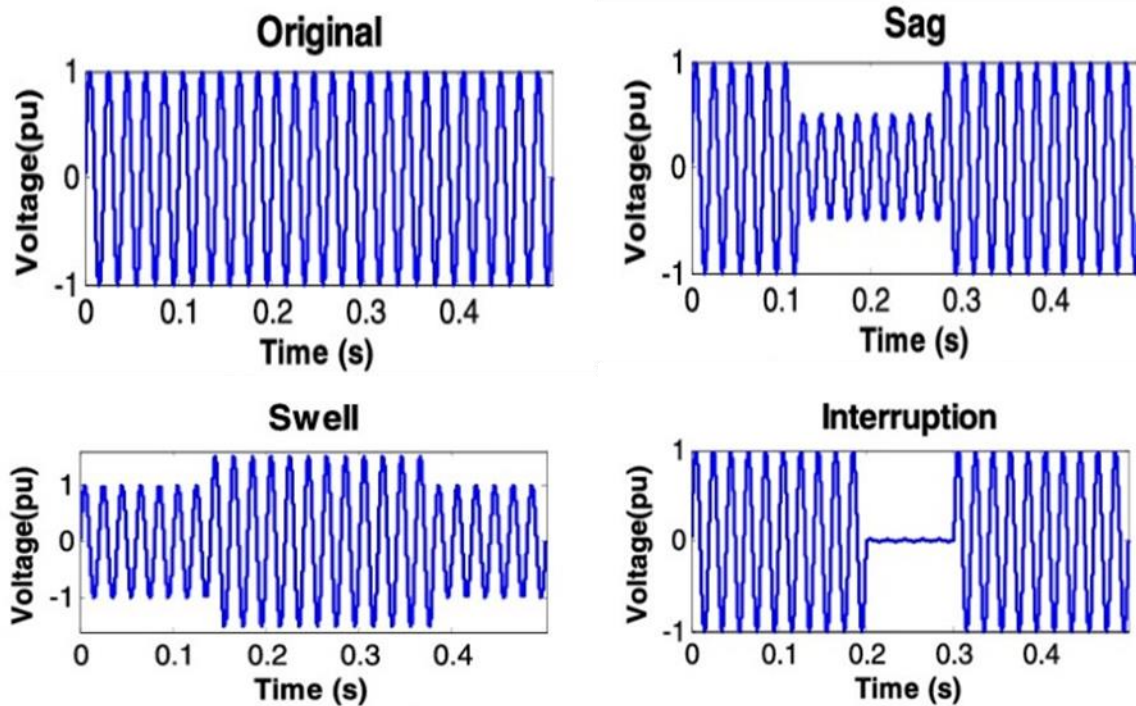
7.8	IEEE-519 – Συνηθισμένες πρακτικές και απαιτήσεις για τον έλεγχο των αρμονικών στα ηλεκτρικά συστήματα πλοίου	91
7.9	DNVGL – RU - SHIP – Όρια αρμονικών παραμορφώσεων στα πλοία και γενικές σημειώσεις σχετικά με την ποιότητα ισχύος	92
7.10	American Bureau of Shipping (ABS) – Έλεγχος αρμονικών στα ηλεκτρικά συστήματα πλοίου	93
7.11	Lloyds Register of Shipping (LRS) – Γενικές απαιτήσεις για σχεδιασμό και κατασκευή ηλεκτρικών συστημάτων πλοίου	93
7.12	Ποιοτική σύγκριση μεταξύ των προτύπων των αρμονικών παραμορφώσεων	94
8	Ανάπτυξη μοντέλου με σκοπό την διερεύνηση επίδρασης αρμονικών παραμορφώσεων στις απώλειες καλωδίων ηλεκτρικού συστήματος πλοίου	97
8.1	Αντικείμενο μελέτης.....	97
8.2	Παρουσίαση μοντέλου εκτίμησης απωλειών καλωδίων	98
8.2.1	Μετρήσεις ποιότητας ισχύος στο μηχανοστάσιο	98
8.2.2	Υπολογισμός απωλειών στα καλώδια τροφοδοσίας	101
8.2.3	Ανάλυση ευαισθησίας στις μετρήσεις.....	104
8.3	Αποτελέσματα	106
8.3.1	Απώλειες καλωδίων τροφοδοσίας στην κατάσταση κανονικής πορείας	107
8.3.2	Απώλειες καλωδίων τροφοδοσίας στην κατάσταση χειρισμών	119
8.3.3	Απώλειες καλωδίων τροφοδοσίας στην κατάσταση εν όρμω	131
9	Επίλογος	144
9.1	Συμπεράσματα.....	144
10	Βιβλιογραφία	146

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2- 1. Πτώση τάσης 100V και ροή ρεύματος 1 A ισούται με ισχύ 100 W.	21
Εικόνα 2- 2. Οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος σε τυχαία γωνία $\varphi=30^\circ$	23
Εικόνα 2- 3. Τα phasor του ρεύματος και της τάσης σε τυχαία γωνία $\varphi=30^\circ$	23
Εικόνα 2- 4. Το ρεύμα και η τάση σε φάση και η παραγόμενη στιγμιαία ισχύς με την πάροδο του χρόνου.	25
Εικόνα 2- 5. Το ρεύμα και η τάση με διαφορά φάσης και η παραγόμενη στιγμιαία ισχύς με την πάροδο του χρόνου.....	25
Εικόνα 2- 6. Τρίγωνο ισχύος.	26
Εικόνα 3- 1. Τυπικό διάγραμμα εγκατεστημένου ηλεκτρικού συστήματος ενέργειας πλοίου.	29
Εικόνα 3- 2. Αδιάστατες κυματομορφές τάσης σε συνάρτηση με το χρόνο όπου είναι διακριτά τα ανωτέρω φαινόμενα	33
Εικόνα 3- 3. Oscillatory transients λόγω διακοπτικού φαινομένου πυκνωτή.....	35
Εικόνα 3- 4. Διακυμάνσεις τάσεις και συχνότητας εξαιτίας μεταβολής φορτίου.	36
Εικόνα 3- 5. Κυματομορφή τάσης σε συνάρτηση με το χρόνο όπου είναι ορατή η διαταραχή εγκοπής (notching).....	38
Εικόνα 3- 6. Κυματομορφή τάσης σε συνάρτηση με το χρόνο όπου είναι ορατή η διαταραχή θορύβου (noise).....	38
Εικόνα 4- 1. Σύνθετη παραμορφωμένη κυματομορφή αποτελούμενη από 3η, 5η, 7η αρμονική συνιστώσα.	41
Εικόνα 4- 2. Χαρακτηριστική καμπύλη υστέρησης μετασχηματιστή ισχύος και δημιουργία αρμονικών παραμορφώσεων.	43
Εικόνα 4- 3. Παραμορφωμένη κυματομορφή ως υπέρθεση της θεμελιώδους και 3ης αρμονικής συνιστώσας.	45
Εικόνα 4- 4. Τυπικές κυματομορφές ρεύματος και φάσματα (πεδίο συχνότητας) χαρακτηριστικών αρμονικών για 6/12 παλμικούς ανορθωτές.....	46
Εικόνα 4- 5. Σχήμα με απεικόνιση του τετράεδρου ισχύος στην περίπτωση της αρμονικής παραμόρφωσης.	51
Εικόνα 4- 6. Διάγραμμα συντελεστή ισχύος ως συνάρτηση του service load factor.	52
Εικόνα 5- 1. (Α) Απεικόνιση γέφυρας ανορθωτή με διόδους (Β) Παραμορφωμένη κυματομορφή τάσης λόγω του μη γραμμικού φορτίου ανορθωτή.....	55
Εικόνα 5- 2. Κατασκευαστική δομή μονοφασικού μετασχηματιστή με πυρήνα σιδηρομαγνητικού υλικού.	56

Εικόνα 5- 3. Τεχνικές προδιαγραφές και σκαρίφημα κύριου μετασχηματιστή Tanker 105 000 DWT.	57
Εικόνα 5- 4. Τυπική διάταξη 12-παλμικού ανορθωτή με γωνία μετατόπισης φάσης 30ο.....	58
Εικόνα 5- 5. a) Τύποι SPWM χρησιμοποιούμενοι στους ηλεκτροκινητήρες πλοίων b) Ανασκόπηση VFD ανάλογα με την τάση και την ισχύ	59
Εικόνα 5- 6. Διάγραμμα παροχής-ισχύος σε αντλία με σταθερό αριθμό στροφών και σε αντλία που ο ηλεκτροκινητήρας της έχει μεταβλητότητα στροφών λόγω VFD.	60
Εικόνα 5- 7. Σχήμα με απεικόνιση των εσωτερικών εξαρτημάτων ενός Variable Frequency Drive της Schneider Electric.	60
Εικόνα 5- 8. Κίνηση της μαγνητοκινητικής δύναμης mmf ανά ένα κύκλο ρεύματος και προκύπτουσα δύναμη από 3φασικό ρεύμα σε επαγωγικό κινητήρα.	62
Εικόνα 5- 9. Κυματομορφή ρεύματος και φάσμα αρμονικών μετά από μετρήσεις για διάφορα φορτία λαμπών φθορισμού.....	63
Εικόνα 6- 1. Σχεδιάγραμμα ηλεκτρικού συστήματος πλοίου με ηλεκτρική πρόωση.	66
Εικόνα 6- 2. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες ηλεκτρικού επαγωγικού κινητήρα.	67
Εικόνα 6- 3. Επεξήγηση φαινομένου δημιουργίας δινορευμάτων και του αντίστοιχου μαγνητικού τους πεδίου.	69
Εικόνα 6- 4. Προσομοίωση πυκνότητας ρεύματος χάλκινου αγωγού με εκθετική μείωση της διαθέσιμης αγωγίμης διατομής προς το κέντρο του, λόγω του φαινομένου skin effect.	71
Εικόνα 6- 5. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες αυτόματων διακοπών (A) MCCB από την εταιρία ABB . (B) ACB από την Terasaki.....	74
Εικόνα 6- 6. Κυματομορφές ρεύματος και φάσμα αρμονικών που προήλθαν από μετρήσεις σε λαμπτήρες LED με διάφορες διατάξεις.	76
Εικόνα 7- 1. Δομικό διάγραμμα συστήματος διανομής σε ζώνες.....	82
Εικόνα 7- 2. Διάγραμμα ανοχής διακυμάνσεων τάσεων λειτουργίας εξοπλισμού.....	83
Εικόνα 7- 3. Άποψη συστήματος διανομής ενέργειας πλοίου MVDC .(Σημείωση:CB=circuit breaker , DCD= DC disconnect, HF= High frequency)	84
Εικόνα 7- 4. Απεικόνιση συστήματος χειρσαίας διασύνδεσης πλοίου (Cold ironing) με δίκτυο ξηράς.	87
Εικόνα 7- 5. Γραφική αναπαράσταση των εκάστοτε ορίων αρμονικών παραμορφώσεων τάσεως που θέτονται από τους κανονισμούς.	95
Εικόνα 7- 6. Γραφική αναπαράσταση των ορίων που θέτονται από το STANAG και το IEEE-519 για την παραμόρφωση κυματομορφής ρεύματος.	95

Εικόνα 8- 1. a) Συνοπτικό σχεδιάγραμμα εγκατάστασης και χρήσης μετρητικής συσκευής b) Το μετρητικό ELSPEC G4420 BLACKBOX c) Επιτυχημένη συνδεσμολογία ρεύματος του GK4.....	98
Εικόνα 8- 2. Διάγραμμα με τις αρμονικές παραμορφώσεις ρεύματος των μετρήσεων, ως % ποσοστό της θεμελιώδους τιμής ρεύματος σε σχέση με το χρόνο.	99
Εικόνα 8- 3. Οι αρμονικές παραμορφώσεις ρεύματος στο χρονικό διάστημα που παίρνουν τις υψηλότερες τιμές.	100
Εικόνα 8- 4. Οι τάσεις μεταξύ των τριών φάσεων της 11ης αρμονικής συνιστώσας στο ίδιο χρονικό διάστημα με ανωτέρω.	100
Εικόνα 8- 5. Οι αρμονικές παραμορφώσεις ρεύματος στο χρονικό διάστημα που παίρνουν τις χαμηλότερες τιμές.	101
Εικόνα 8- 6: Διάγραμμα συντελεστή ισχύος pf ως συνάρτηση του συντελεστή λειτουργίας f_s	102
Εικόνα 8- 7. Μέσες τιμές κάθε αρμονικής συνιστώσας σύμφωνα με το πρώτο σενάριο- (A).....	104
Εικόνα 8- 8. Μέσες τιμές κάθε αρμονικής συνιστώσας σύμφωνα με το δεύτερο σενάριο- (B).....	105
Εικόνα 8- 9. Μέσες τιμές κάθε αρμονικής συνιστώσας σύμφωνα με το τρίτο σενάριο-(C).	105
Εικόνα 8- 10: Πρόβλεψη απωλειών σε αυξημένες τιμές αρμονικών παραμορφώσεων.	107



Εικόνα 3- 2. Αδιάστατες κυματομορφές τάσης σε συνάρτηση με το χρόνο όπου είναι διακριτά τα ανωτέρω φαινόμενα (semanticssolar.com)

3.2.2 Φαινόμενα ποιότητας ισχύος μόνιμης κατάστασης

Οι διαταραχές τάσης, συχνότητας μεγάλης διάρκειας περιλαμβάνουν αποκλίσεις οι οποίες έχουν διάρκεια μεγαλύτερη του ενός λεπτού. Αυτές μπορεί να είναι υπερτάσεις (overvoltage) ή υποτάσεις (undervoltage) ανάλογα με την αιτία του φαινομένου. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα φαινόμενα ποιότητας ισχύος μόνιμης κατάστασης δεν είναι απότοκο βλάβης του συστήματος αλλά προκαλούνται από διακυμάνσεις φορτίων και χρήση μεγάλων διακοπών φορτίων. Τα παρακάτω φαινόμενα θα ήταν ιδιαίτερα επικίνδυνα και συχνά ωστόσο με την βοήθεια των ηλεκτρονόμων (undervoltage-overvoltage relays) το φαινόμενο ελέγχεται ενώ παράλληλα προσδίδεται προστασία σε βραχυκύκλωμα.

Οι **υπερτάσεις (overvoltage)** είναι αύξηση στην rms τιμή της τάσης για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του ενός λεπτού. Μπορεί να προκύψουν είτε λόγω εναλλαγών μεγάλων φορτίων, είτε από ενεργοποίηση μιας μεγάλης συστοιχίας πυκνωτών η οποία έχει αποθηκευμένη ενέργεια, είτε λόγω κακής ρύθμισης των μετασχηματιστών τάσης.

Οι **υποτάσεις (undervoltage)** είναι μείωση στην rms τιμή της τάσης για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του ενός λεπτού και προκύπτει από γεγονότα αντίθετα με αυτά που προκαλούν υπερτάσεις. Για παράδειγμα το άναμμα ενός μεγάλου φορτίου είτε το σβήσιμο μιας συστοιχίας πυκνωτών μπορεί να προκαλέσει παρατεταμένη μείωση τάσης έως ότου ο εξοπλισμός διόρθωσης τάσης την επιφέρει εντός ορίων ξανά.

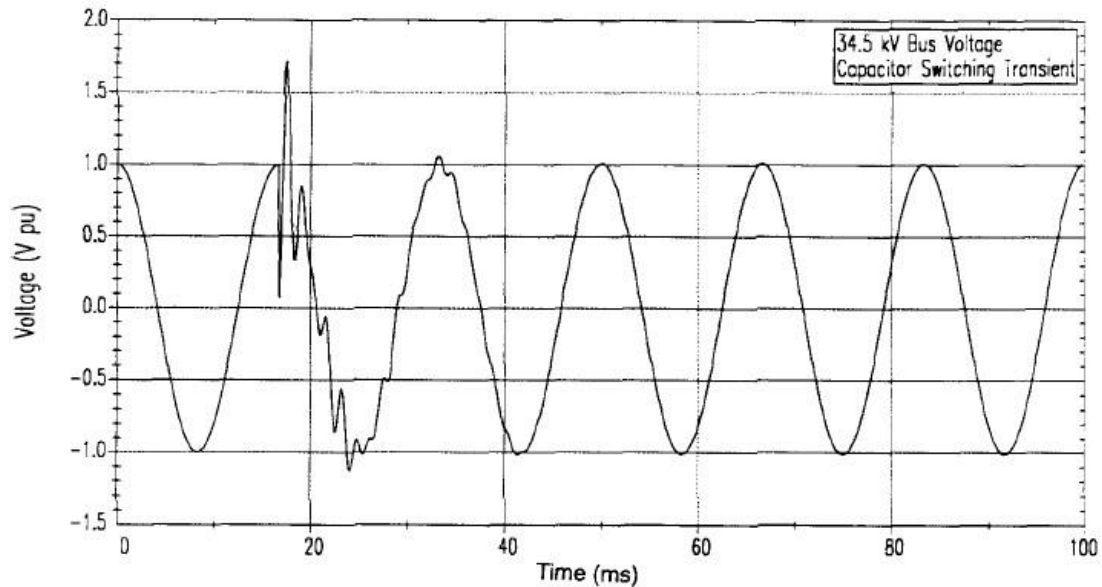
3.2.3 Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα (transients)

Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα (transient) συμβαίνουν όταν υπάρχει μια ξαφνική μεταβολή στην τάση ή στο ρεύμα ή και στα δύο σε συχνότητες έως 3MHz, και μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα επικίνδυνα για τον εξοπλισμό και για τα φορτία. Στο διάγραμμα των κυματομορφών η μεταβολή μπορεί να εντοπίζεται σε μια κατεύθυνση είτε να διαγράφει μια ταλάντωση και στις δύο πολικότητες. Όταν στο διάγραμμα δημιουργείται αιχμή (μεγάλη μεταβολή μεγέθους σε απειροστό χρόνο) τότε ονομάζεται spike. Στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιείται και ο όρος surge και σύμφωνα με τα IEEE standards είναι συνώνυμος του όρου transient. Προκαλούνται συνήθως στις διακοπτικές λειτουργίες (ζεύξη ή αποσύζευξη) και έχουν πλήρη εξάρτηση από τις αυτεπαγωγές και τις χωρητικότητες του ηλεκτρικού συστήματος. Τα μεταβατικά αυτά φαινόμενα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες οι οποίες ανακλούν την παραμόρφωση της κυματομορφής της τάσης ή του ρεύματος. Αναλυτικότερα αυτές οι κατηγορίες είναι:

- Φαινόμενα αιχμής (Impulsive transients) ονομάζονται τα μεταβατικά φαινόμενα στα οποία η κυματομορφή διαγράφει μια απότομη αλλαγή μιας κατεύθυνσης και εντός κάποιων msec επανέρχεται στην κανονική της τιμή.
- Φαινόμενα με χαρακτηριστικά ταλάντωσης (Oscillatory transients) όπου έχουμε γρήγορη μεταβολή της τάσης και προς τις δύο κατευθύνσεις (θετικά και αρνητικά) και επαναφορά στις κανονικές τιμές εντός κλασμάτων δευτερολέπτου.

Συχνή αιτία ανάπτυξης φαινομένων αιχμής είναι τα διακοπτικά φαινόμενα φωτισμού. Επειδή τα ταχεία μεταβατικά φαινόμενα είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα για τη λειτουργία των ηλεκτρονικών συσκευών του πλοίου (άρα και το χειρισμό όλων των μηχανημάτων) καθώς πολλές φορές έχουμε υπερτάσεις δύο και τρεις φορές των ονομαστικών τιμών, τα συστήματα προστασίας του πλοίου είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα και διακόπτουν τη λειτουργία των συσκευών. Αυτή η ευαισθησία στην ρύθμιση των συσκευών προστασίας προκύπτει από το γεγονός ότι το πλοίο είναι αυτόνομο σύστημα και η αξιοπιστία του πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο εξασφαλισμένη. Ακόμη ταχεία μεταβατικά φαινόμενα συμβαίνουν κατά την ζεύξη πυκνωτών με το δίκτυο και την επακόλουθη φόρτιση τους όπου έχουμε oscillatory transient αλλά και με τη ζεύξη φορτίων όπως κινητήρα με ενσωματωμένη ρύθμιση στροφών.

Στην **Εικ.3.3** είναι ορατή η παραμόρφωση της κυματομορφής σε χρόνο κλασμάτων του δευτερολέπτου λόγω ηλεκτρισμού πυκνωτή στο κύκλωμα. Ανάλογα με τη χωρητικότητα του πυκνωτή ή τη συνολική χωρητικότητα της συστοιχίας των πυκνωτών. Ενώ η τάση κανονικής λειτουργίας έχει τιμή της τάξεως των 1 pu λόγω της φόρτισης των πυκνωτών προκύπτει μια μέγιστη τιμή σχεδόν διπλάσια της κανονικής στο 1.8 pu περίπου. Όπως διαφαίνεται εδώ το φαινόμενο έχει διάρκεια 1.5 κύκλο περίπου, όμως ανάλογα με τα χαρακτηριστικά απόσβεσης του συστήματος παρόμοιο φαινόμενο μπορεί να διαρκέσει από 0.5 έως 3 κύκλους.



Εικόνα 3- 3. Oscillatory transients λόγω διακοπτικού φαινομένου πυκνωτή. (IEEE 1159).

3.2.4 Αστάθεια-Ασυμμετρία τάσης (voltage unbalance)

Στα τριφασικά συστήματα, η μέγιστη απόκλιση στην τιμή της τάσης μεταξύ των τριών φάσεων και της μέσης τάσης των τριών φάσεων διαιρεμένη με τη μέση τάση των τριών φάσεων ονομάζεται αστάθεια τάσης. Εκφράζεται από την παρακάτω σχέση, (IEEE 1159) :

$$\text{voltage unbalance} = 100 \times \frac{\text{max deviation from average voltage}}{\text{average voltage}} \quad (3.1)$$

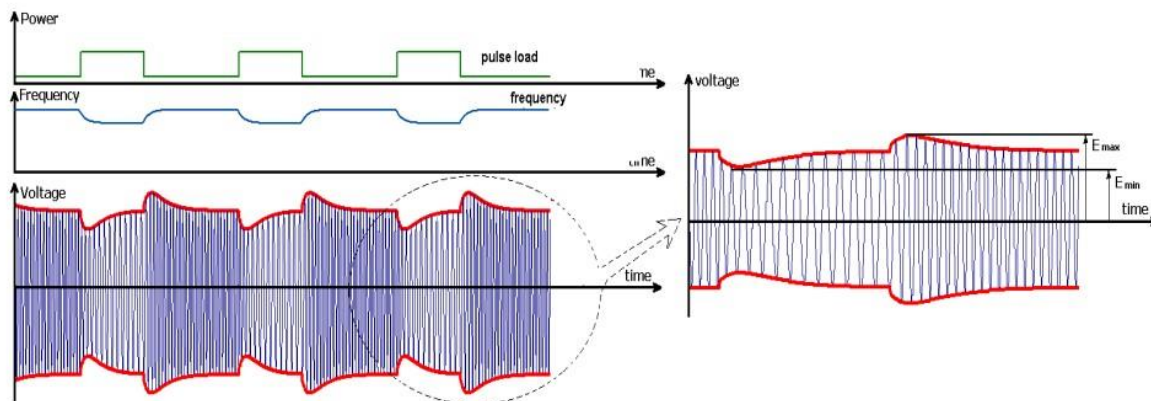
Σε ένα σύστημα που δεν επικρατεί το παραπάνω φαινόμενο, αυτός ο λόγος που αναλύθηκε πιο πάνω, πρέπει να δίνει τιμή ίση με το μηδέν καθώς τα μεγέθη της τάσης σε κάθε φάση είναι κανονικά ίδια, με τη διαφορά φάσης μεταξύ τους να είναι στις 120 μοίρες. Η αστάθεια τάσης μπορεί να είναι απότοκο αποθηκευμένης ενέργειας πυκνωτών είτε καμένης ασφάλειας (fuse). Ακόμη είναι πιθανόν να προκύψει από ασύμμετρη κατανομή μίας από τις 3 φάσεις είτε λόγω διφασικών φορτίων. Τέλος μπορεί να προκύψει από χαλαρές συνδέσεις καλωδίων.

Το φαινόμενο της αστάθειας τάσης μπορεί να δημιουργήσει ποικίλα προβλήματα στα ποντοπόρα πλοία και να επιταχύνει χρονικά επισκευές υψηλού κόστους. Οι επαγωγικοί κινητήρες λειτουργώντας σε αστάθεια τάσης αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες στο στάτη και στο δρομέα, χάνουν μέρος της μέγιστης ροπής τους, και καταπονούν ιδιαίτερα τα έδρανα κύλισης (ρουλεμάν). Αυτό συμβαίνει καθώς ο αρνητικός όρος που «γεννιέται» στην τάση λόγω της ανισορροπίας είναι αντίθετος με τον θετικό όρο συνεπώς του μειώνει την μέγιστη τιμή άρα και τη μέγιστη ροπή. Τηρουμένων των αναλογιών παρόμοια προβλήματα παρουσιάζονται και στις σύγχρονες γεννήτριες του πλοίου.

3.2.5 Διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας

Οι διακυμάνσεις τάσης είναι συστηματικές παραμορφώσεις της κυματομορφής της τάσης ή μια σειρά τυχαίων παραμορφώσεων αυτής, που όμως το εύρος των μεταβολών δεν είναι μεγαλύτερο από 0,95-1,05 pu. Κάθε φορτίο που έχει σημαντικές μεταβολές στο ρεύμα, κυρίως στον άεργο όρο, μπορεί να προκαλέσει διακυμάνσεις στην τάση. Οι διακυμάνσεις τάσης εμφανίζονται γενικά ως διαμόρφωση της θεμελιώδους συχνότητας 50/60Hz/. Μια διαμόρφωση έως και 0.5% του πλάτους της τάσης μπορεί να προκαλέσει αντιληπτές αλλαγές στην ένταση του φωτισμού αν η συχνότητα διαμόρφωσης είναι τα 6-8 Hz. Οι συστηματικές διακυμάνσεις μικρού πλάτους συχνά αναφέρονται λανθασμένα ως flicker. Ο όρος flicker προέρχεται από το αποτέλεσμα των διακυμάνσεων τάσης στο φωτισμό, ο οποίος είναι παρατηρούμενος με γυμνό μάτι. Είναι κατανοητό ότι γίνεται δηλαδή πολλές φορές σύγχυση του αιτίου και του αιτιατού.

Στα συστήματα των πλοίων μια πιθανή διακύμανση τάσης έχει αντίκτυπο και στη συχνότητα λειτουργίας. (Προυσαλίδης 2008). Η συχνότητα ενός ηλεκτρικού συστήματος πλοίου συνδέεται άρρηκτα με την ταχύτητα περιστροφής των γεννητριών του πλοίου και εξαρτάται άμεσα από το ισοζύγιο παραγωγής ενέργειας και φορτίου. Αυτή ακριβώς η σχέση με το φορτίο είναι αυτή που δημιουργεί και τα προβλήματα. Μεγάλες και απότομες αλλαγές φορτίου (πχ. ενεργοποίηση πλευρικού προωστήριου μηχανισμού), αν δεν έχουν μελετηθεί σχολαστικά (ρυθμιστής στροφών) προκαλούν μεταβολές στην συχνότητα. Οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές που έχει το πλοίο είναι ευαίσθητες στις συνθήκες που επικρατούν σε αυτό όπως υγρασία, ακραίες θερμοκρασίες, ταλαντώσεις. Για αυτό πρέπει να είναι ιδιαίτερα προστατευμένες με κελύφη και σωστά εδρασμένα.



Εικόνα 3- 4. Διακυμάνσεις τάσεις και συχνότητας εξαιτίας μεταβολής φορτίου.
(International Journal of Ocean Systems Management, 2008 Vol.1 No.1, pp.68 - 83)

Στην **Εικ.3.4** διαφαίνεται ότι γρήγορες μεταβολές του φορτίου επιδρούν στην ταχύτητα περιστροφής των γεννητριών του πλοίου και τελικά στη συχνότητα. Οι διακυμάνσεις τάσεις διαχέονται πλέον στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργώντας προβλήματα.

3.2.6 Παραμόρφωση κυματομορφής και αρμονικές

Η παραμόρφωση κυματομορφής ορίζεται ως μια απόκλιση από την ιδανική μορφή του γνωστού ημιτονοειδούς κύματος, χωρίς παροδικά χαρακτηριστικά. Υπάρχουν 5 κύριοι τύποι παραμόρφωσης κυματομορφής οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω. Οι αρμονικές παραμορφώσεις θα παρουσιαστούν εισαγωγικά και συνοπτικά καθώς παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα πλοία και για το λόγο αυτό θα αναλυθούν αποκλειστικά σε κεφάλαιο παρακάτω. Οι κύριοι τύποι παραμόρφωσης κυματομορφής είναι:

- Μετατόπιση (DC offset)
- Αρμονικές (Harmonics)
- Διαρμονικές (Interharmonics)
- Διαταραχή ακμής (Notching)
- Θόρυβος (Noise)

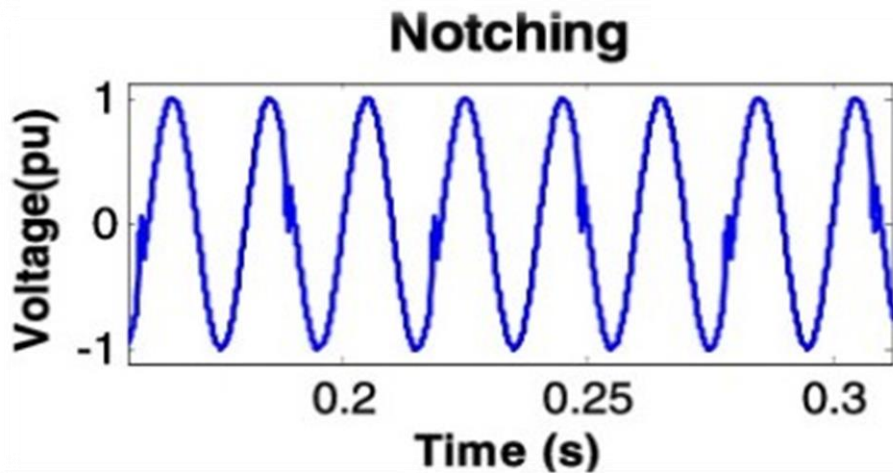
Μετατόπιση (DC offset) ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο σε ένα δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος υπάρχει τάση ή ρεύμα συνεχούς ρεύματος. Η ύπαρξη ηλεκτρονικών όπως οι διόδοι κάνουν αποκοπή της κυματομορφής του εναλλασσόμενου για μισό κύκλο με αποτέλεσμα η νέα κυματομορφή να προσεγγίζει την DC καμπύλη. Οι συσκευές VFD's ρυθμίζουν την ταχύτητα των ηλεκτρικών μοτέρ και περιέχουν διόδους για την επίτευξη αυτού του σκοπού. Η ύπαρξη αρκετών διόδων αυξάνει τις πιθανότητες διαρροής από τα φίλτρα προστασίας. Μια διαρροή συνεχούς ρεύματος σε ένα εναλλασσόμενο κύκλωμα αυξάνει τον κορεσμό στους μετασχηματιστές, καταπονεί τις μονώσεις κτλ.

Οι **αρμονικές παραμορφώσεις (Harmonics)** είναι άμεσα συνυφασμένες με τα μη γραμμικά φορτία τα οποία δημιουργούν παραμορφώσεις στις ημιτονοειδής κυματομορφές του ρεύματος παρόλο που τροφοδοτούνται από μια ημιτονοειδή πηγή. Το ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου έχει πληθώρα μη γραμμικών φορτίων και με τον αυξανόμενο εξηλεκτρισμό του πλοίου το πολύπλοκο αυτό φαινόμενο γίνεται εντονότερο. Φορτία με διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος όπως κινητήρες με μετατροπείς ισχύος (για κατάλληλη τάση και ένταση σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή- συχνά διαφορετική από του δικτύου), ηλεκτρονικές συσκευές (υπολογιστές, ραδιοβοηθήματα), λάμπες φθορισμού αποτελούν συνήθη μη γραμμικά φορτία. Οι αρμονικές είναι απλά ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας. Για παράδειγμα αν η θεμελιώδη συχνότητα είναι στα 60Hz (αναφερόμενη ως 1^η αρμονική) τότε η 2^η αρμονική θα είναι στα 120Hz.

Στον παραπάνω ορισμό των αρμονικών παραμορφώσεων ειπώθηκε ότι οι αρμονικές είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας. Όμως ανάμεσα στις αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας μπορούν να παρατηρηθούν συχνότητες οι οποίες δεν είναι ακέραια πολλαπλάσια της. Μπορούν αν εμφανιστούν ως διακριτές συχνότητες ενός μεγάλου εύρους και ονομάζονται **διαρμονικές (interharmonics)**. Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου οι VDFs (variable speed drives) και οι επαγωγικοί κινητήρες μπορεί να είναι πηγές διαρμονικών.

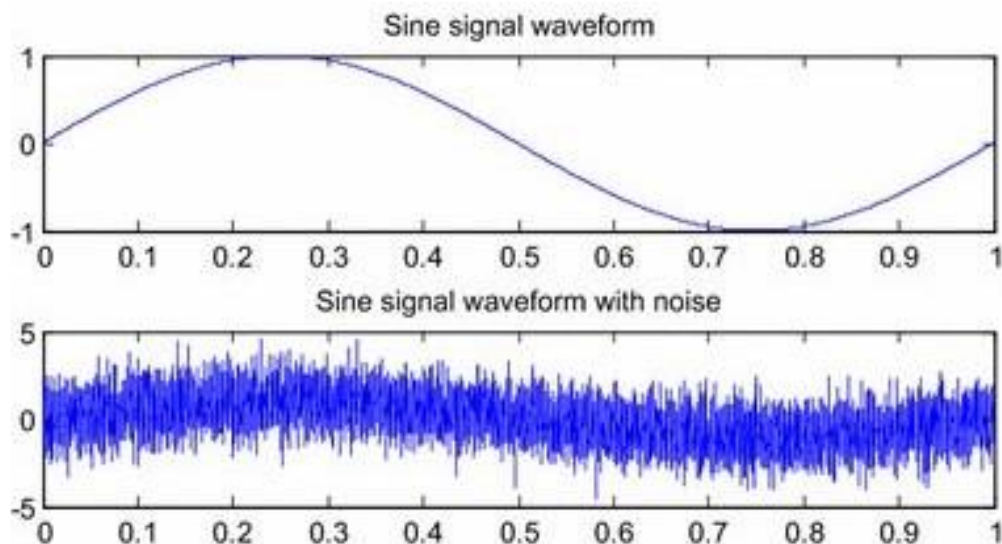
Η **εγκοπή (notching)** είναι μια περιοδική διαταραχή της τάσης η οποία δημιουργείται από τη φυσιολογική λειτουργία των ηλεκτρονικών ισχύος όταν το ρεύμα εναλλάσσεται από τη μία φάση στην άλλη. Κατά τη διάρκεια της εναλλαγής μεταξύ των δύο φάσεων δημιουργείται ένα στιγμιαίο βραχυκύκλωμα Αποτελεί ειδική περίπτωση με κοινά χαρακτηριστικά ανάμεσα στα

ταχεία μεταβατικά φαινόμενα και τις αρμονικές παραμορφώσεις. Οι τριφασικοί μετασχηματιστές στα πλοία είναι η κυριότερη πηγή εγκοπής της τάσης.



Εικόνα 3- 5. Κυματομορφή τάσης σε συνάρτηση με το χρόνο όπου είναι ορατή η διαταραχή εγκοπής (notching).
(semanticssolar.com)

Τέλος ο **θόρυβος (noise)** αποτελεί μια τυχαία ανεπιθύμητη διαταραχή στα ηλεκτρικά κυκλώματα με εύρος κάτω από τα 200 kHz. Στα ηλεκτρικά συστήματα ενέργειας μπορεί να δημιουργηθεί από ηλεκτρονικές συσκευές, κυκλώματα ελέγχου, ράδιο-βοηθήματα κ.ά. Στην πραγματικότητα οποιαδήποτε διαταραχή δεν μπορεί να ταξινομηθεί ως αρμονική παραμόρφωση είτε ως ταχεία μεταβατικό φαινόμενο, ονομάζεται θόρυβος. Η πολυπλοκότητα του φαινομένου καθώς και το μέγεθος της διαταραχής διαφαίνονται στην Εικ.3.6 που ακολουθεί.



Εικόνα 3- 6. Κυματομορφή τάσης σε συνάρτηση με το χρόνο όπου είναι ορατή η διαταραχή θορύβου (noise).
(researchgate.com)

4 Η έννοια της αρμονικής παραμόρφωσης

4.1 Εισαγωγή στην αρμονική παραμόρφωση

Τα προβλήματα αρμονικών παραμορφώσεων αποτελούν όλο και πιο ανησυχητικό ζήτημα στα ηλεκτρικά συστήματα πλοίων καθώς η αύξηση των ηλεκτρονικών ισχύος και η εισαγωγή συστημάτων πρόωσης έχουν επιφέρει αλλαγές ως προς την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα προβλήματα ποιότητας ισχύος το εν λόγω πρόβλημα δεν είναι στιγμιαίο αλλά σταθερό στο χρόνο, γεγονός που το καθιστά πιο επικίνδυνο καθώς δημιουργούνται συσσωρευτικές βλάβες [7]. Η ανάλυση των αρμονικών παραμορφώσεων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων είναι ικανή να αυξήσει την αξιοπιστία των συστημάτων του πλοίου, η οποία είναι ιδιαίτερα απαραίτητη από θέμα ασφάλειας καθώς όπως έχει αναφερθεί, το πλοίο είναι αυτόνομο σύστημα. Σε όλα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, στην ιδανική περίπτωση, οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος πρέπει να έχουν ημιτονοειδή μορφή [8]. Στο ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου η ποιότητα παροχής της ενέργειας περιορίζεται από κανονισμούς οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω. Οι αποκλίσεις των κυματομορφών τάσης και ρεύματος από την ημιτονοειδή μορφή χαρακτηρίζονται ως «παραμορφώσεις». Όπως αναλύεται παρακάτω, μια παραμορφωμένη κυματομορφή μπορεί να θεωρηθεί ως υπέρθεση πολλών ημιτονοειδών συχνοτήτων σύμφωνα με την μαθηματική ανάλυση Fourier.

Ο όρος «αρμονικές» δημιουργήθηκε στον τομέα της ακουστικής όπου σχετίστηκε με την δόνηση που προκαλεί η ταλάντωση μιας χορδής σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, η οποία είναι πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας. Από την άλλη πλευρά οι αρμονικές σε ένα δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος ορίζονται ως ένα ημιτονοειδές στοιχείο μιας περιοδικής κυματομορφής, το οποίο έχει συχνότητα ίση με ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας του συστήματος. Σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο, οι αρμονικές της κυματομορφής τάσης ή έντασης είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας:

$$f_h = (h) * (\text{fundamental frequency}) \quad (4.1)$$

Όπου h ακέραιος θετικός αριθμός. Για παράδειγμα η 6^η αρμονική σε ένα σύστημα με θεμελιώδη συχνότητα 50 Hz είναι $f_h = (6) * (50) = 300\text{Hz}$. Πλέον δηλαδή εισάγονται στο σύστημα συχνότητες της τάξης των 50-100-200-250-2500 Hz οι οποίες προστίθενται στην θεμελιώδη συχνότητα και επιφορτίζουν το δίκτυο με στιγμιαίες διαταραχές οι οποίες καταπονούν καλώδια και καταναλωτές.

Στις εξισώσεις του κεφαλαίου 2 (2.3) , (2.4) παρουσιάστηκαν σε συνθήκες ΗΜΚ οι στιγμιαίες εξισώσεις τάσης και ρεύματος μιας και μόνον συχνότητας ω . Για να ισχύουν οι ανωτέρω εξισώσεις και να εξασφαλίζονται ΗΜΚ όλα τα φορτία του δικτύου είναι γραμμικά. Μη γραμμικά φορτία όπως οι ρυθμιστές στροφών AC κινητήρων ή VFDs (Variable Frequency Drives) , παλμοτροφοδοτικά ή SMPS (Switched Mode Power Supplies) , ανορθωτές (Rectifiers) , μετατροπείς ισχύος AC/DC (DC/AC , DC/DC, AC/AC) χρησιμοποιούνται κατά

κόρον στο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου και παράγουν ανώτερες αρμονικές που παραμορφώνουν την θεμελιώδη συνιστώσα.

Μια παραμορφωμένη κυματομορφή μπορεί να γραφεί ως υπέρθεση πολλών διαφορετικών ημιτονοειδών συναρτήσεων σύμφωνα με τη μαθηματική ανάλυση Fourier. Συνεπώς η παραμορφωμένη κυματομορφή εκφράζεται με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sqrt{2} \cos(\omega_n t + \theta_{v,n}) \quad (4.2)$$

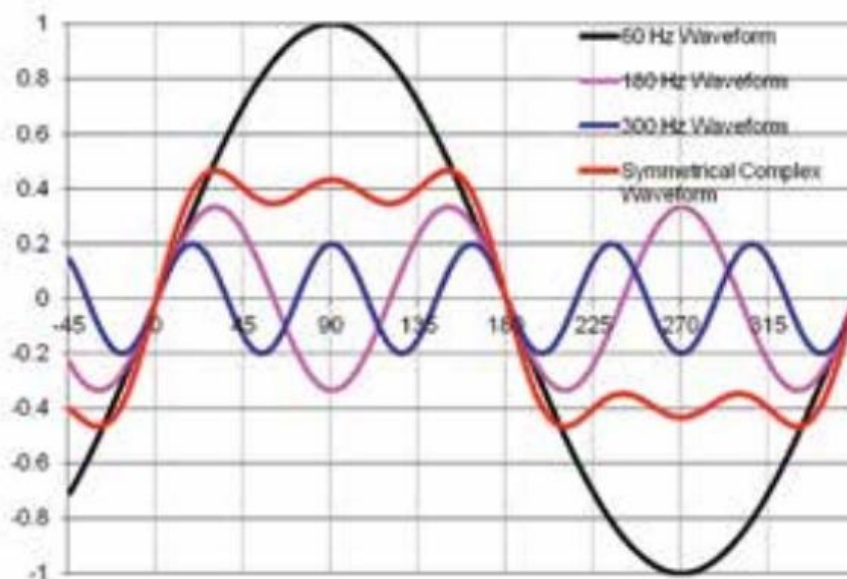
$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sqrt{2} \cos(\omega_n t + \theta_{i,n}) \quad (4.3)$$

Οι σχέσεις (4.2) και (4.3) για να γίνουν πιο κατανοητές, με ορατή τη θεμελιώδη συνιστώσα του συστήματος :

$$v(t) = V_1 \sqrt{2} \cos(\omega_1 t + \theta_{v,1}) + \sum_{h=2}^{\infty} V_h \sqrt{2} \cos(h\omega_1 t + \theta_{v,h}) \quad (4.3)$$

$$i(t) = I_1 \sqrt{2} \cos(\omega_1 t + \theta_{i,1}) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h \sqrt{2} \cos(h\omega_1 t + \theta_{i,h}) \quad (4.4)$$

Στην **Εικ.4.1** διαφαίνεται ένα παράδειγμα σύνθετης κυματομορφής αποτελούμενη από τη θεμελιώδη, την λεγόμενη 1^η αρμονική συνιστώσα, την 3^η αρμονική συνιστώσα και την 5^η αρμονική συνιστώσα. Με πορτοκαλί χρώμα είναι ορατή η σύνθεση των ανωτέρω αρμονικών η οποία είναι συμμετρική και προσεγγίζει την τετραγωνική μορφή. Συμμετρικές συνθέσεις προκύπτουν από περιττούς συνδυασμούς αρμονικών συνιστωσών.



Εικόνα 4- 1. Σύνθετη παραμορφωμένη κυματομορφή αποτελούμενη από 3η ,5η, 7η αρμονική συνιστώσα.
(Siemens Nikunj Shah)

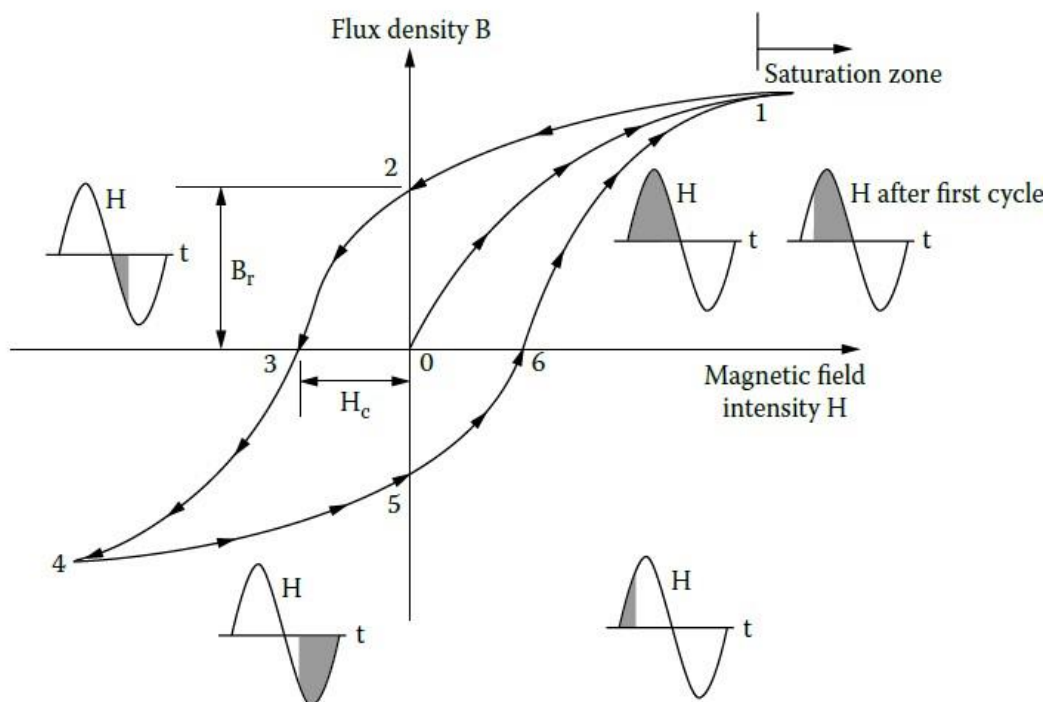
4.2 Γραμμικά και μη γραμμικά φορτία

Επειδή η διάκριση μεταξύ γραμμικών και μη γραμμικών φορτίων αποτελεί σημείο κλειδί για τη δημιουργία και διάδοση των αρμονικών παραμορφώσεων κρίνεται σκόπιμο να αποσαφηνιστούν αναλυτικά, σε αυτό το σημείο της παρούσας εργασίας.

Τα **γραμμικά φορτία** είναι εκείνα στα οποία τα σήματα τάσης και έντασης είναι ημιτονοειδή κυματομορφές που βρίσκονται σε φάση μεταξύ τους και το ρεύμα σύμφωνα με το νόμο του Ohm ($i(t)=v(t)/R$) κάθε στιγμή προπορεύεται της τάσης. Στα κυκλώματα με γραμμικά φορτία είναι ιδιαίτερα εύκολο να αποτυπωθούν οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος. Τα πιο συνήθη γραμμικά φορτία που αποτελούν το πιο απλό παράδειγμα είναι οι γραμμικές αντιστάσεις και οι λάμπες πυράκτωσης που έχουν σχεδόν καταργηθεί. Άλλα γραμμικά φορτία αποτελούν κάποιοι ηλεκτροκινητήρες, ανεμιστήρες, απλής χρήσης τα οποία δεν χρειάζονται για την λειτουργία τους σύνθετες συσκευές όπως VFDs ή κάθε είδους συσκευή μετατροπής ρεύματος η οποία θα έχει μαγνητικές απώλειες εξαρτώμενες από τα φυσικά χαρακτηριστικά του σιδήρου και του χαλκού. Συνοψίζοντας σε κυκλώματα με γραμμικά φορτία οι κυματομορφές βρίσκονται σε φάση και δεν παρατηρούνται παραμορφώσεις. Ωστόσο στην περίπτωση επαγωγικών ή χωρητικών στοιχείων στο κύκλωμα οι κυματομορφές δεν βρίσκονται σε φάση και στην πρώτη περίπτωση προπορεύεται η τάση του ρεύματος ενώ στην δεύτερη περίπτωση συμβαίνει το αντίθετο.

Τα **μη γραμμικά φορτία** είναι αυτά στα οποία η κυματομορφή ρεύματος δεν μοιάζει με την εφαρμοσμένη κυματομορφή τάσης για διάφορους λόγους. Επομένως μπορούμε να αντιληφθούμε τα μη γραμμικά φορτία ως αυτά που η σχέση του Ohm δεν μπορεί να περιγράψει τη σύνδεση της τάσης και του ρεύματος. Τα πιο κοινά μη γραμμικά φορτία είναι όλες οι συσκευές που περιέχουν ανορθωτές και διόδους όπως οι μετασχηματιστές, οι πηγές ισχύος, οι μονάδες αδιάκοπης παροχής (UPS), ο φωτισμός που δεν αποτελείται από λάμπες πυράκτωσης, οι ηλεκτρικοί φούρνοι κ.ά. Τα μη γραμμικά φορτία που στα κυκλώματα πλοίων αυξάνονται συνεχώς λόγω του εξηλεκτρισμού και της πληθώρας ηλεκτροκινητήρων με αυξημένα συστήματα ελέγχου και ρύθμισης στροφών δημιουργούν παραμορφώσεις στα ηλεκτρικά συστήματα του πλοίου που καταπονούν το δίκτυο και εγείρουν ζητήματα ασφαλείας.

Είναι αξιοσημείωτο ότι ακόμη και γραμμικά φορτία όπως οι μετασχηματιστές ισχύος μπορούν να έχουν μη γραμμική συμπεριφορά υπό συνθήκες κορεσμού. Πιο αναλυτικά σε ορισμένες περιπτώσεις η πυκνότητα μαγνητικής ροής B παύει να αυξάνεται ή αυξάνεται ελάχιστα όσο αυξάνεται η ένταση της μαγνητικής ροής (H). Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει πέρα από το χαρακτηριστικό «γόνατο» κορεσμού που εμφανίζεται στην καμπύλη του μετασχηματιστή. Όπως είναι λογικό αυτή η μη γραμμική κατάσταση θα διαρκέσει όσο υπερیشύει η κατάσταση κορεσμού. Για παράδειγμα μια υψηλή τάση μπορεί να τροφοδοτηθεί στο μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια περιόδου χαμηλής φόρτισης η οποία μπορεί να διαρκέσει και αρκετές ώρες. Αυτό αναφέρεται εκτεταμένα καθώς κατά την εκκίνηση μεγάλων ηλεκτροκινητήρων οι οποίοι υπάρχουν κατά κόρον στα πλοία παρατηρείται κορεσμός μετασχηματιστή ο οποίος μπορεί να διαρκέσει μερικά δευτερόλεπτα.



Εικόνα 4- 2. Χαρακτηριστική καμπύλη υστέρησης μετασχηματιστή ισχύος και δημιουργία αρμονικών παραμορφώσεων.
(Francisco C De La Rosa)

Όπως διαφαίνεται στην **Εικ.4.2** ακολουθώντας την καμπύλη $0 \rightarrow 1$ όσο αυξάνεται η ένταση της μαγνητικής ροής H αυξάνεται η πυκνότητα της μαγνητικής ροής B , ενώ όταν η τιμή του H προσεγγίσει τις μεγαλύτερες τιμές της, το B πλέον μεταβάλλεται ελάχιστα. Έτσι η κυματομορφή του ρεύματος αρχίζει και παραμορφώνεται, παρασύροντας φυσικά και αυτή της τάσης. Είναι ορατό ότι πλέον ο δρόμος επιστροφής $1 \rightarrow 2$ είναι διαφορετικός από αυτόν της φόρτισης παράγοντας νέες παραμορφώσεις στο ηλεκτρικό σύστημα. Καταληκτικά ένα γραμμικό φορτίο διαφαίνεται ότι παράγει αρμονικές και μάλιστα με ιδιαίτερα σύνθετο και περίπλοκο τρόπο.

4.3 Ανάλυση Fourier και αρμονική παραμόρφωση

Όπως έχει αναφερθεί, η εμφάνιση και ύπαρξη αρμονικών συνιστωσών ρεύματος και τάσης στα ηλεκτρικά δίκτυα ισχύος είναι πιθανό να προκαλέσει ποικίλα προβλήματα τόσο στο ίδιο το δίκτυο, όσο και στους συνδεδεμένους καταναλωτές σε αυτό. Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο με κατάλληλες διατάξεις, πρέπει προφανώς να υπάρχει ένας τρόπος προσδιορισμού του μεγέθους του. Ο περιορισμός της ποσότητας των αρμονικών συνιστωσών γίνεται συχνά με τη χρήση φίλτρων ενώ στα πλοία συχνά αυξάνεται και η πολυπλοκότητα των ηλεκτρικών μετατροπών ισχύος με ηλεκτρονικά. Ο προσδιορισμός όμως γίνεται με τη βοήθεια της ανάλυσης Fourier. Μια παραμορφωμένη κυματομορφή μπορεί να θεωρηθεί ως υπέρθεση πολλών ημιτονοειδών συναρτήσεων (J Prousalidis). Αυτό συμβαίνει καθώς κάθε περιοδική συνάρτηση χρόνου ($f(t)=f(t+T)$) μπορεί να εκφραστεί ως ένα άπειρο άθροισμα ημιτονοειδών κυματομορφών, με περιόδους ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας.

Σύμφωνα με την ανάλυση Fourier οι αρμονικές συνιστώσες διακρίνονται σε :

- Περιττές αρμονικές (odd harmonics) $\rightarrow 5^{\eta}, 7^{\eta}, 11^{\eta} \dots$ (πιο συνηθισμένες)
- Άρτιες αρμονικές (even harmonics) $\rightarrow 2^{\eta}, 4^{\eta}, 6^{\eta}, \dots$ (πιο σπάνιες, εμφάνιση με φαινόμενο κορεσμού μετασχηματιστή)
- Τριπλές αρμονικές (περιττές που είναι πολλαπλάσια του 3)

Η σειρά Fourier που χρησιμοποιείται γράφεται ως :

$$f(t) = \frac{\alpha_o}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n \cos(n\pi \frac{t}{L}) + b_n \sin(n\pi \frac{t}{L}) \quad (4.5)$$

Με συντελεστές

$$\alpha_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) \cos(n\pi \frac{t}{L}) dt \quad (4.6)$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) \sin(n\pi \frac{t}{L}) dt \quad (4.7)$$

Όπου **f(t)**: συνάρτηση του πεδίου χρόνου , **n**: δείκτης αρμονικών ,
L: χρονικό διάστημα ενός κύκλου σε δευτερόλεπτα.

Οι συντελεστές των σχέσεων (4.6), (4.7) με εισαγωγή της γωνιακής ταχύτητας ω γίνονται:

$$\alpha_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad n = 1, 2, \dots \infty \quad (4.8)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad n = 1, 2, \dots \infty \quad (4.9)$$

Για τις σχέσεις (4.8) και (4.9) η μέση τιμή για συχνότητα $\omega=2\pi f$ είναι:

$$F_o = \frac{1}{2} \alpha_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (4.10)$$

Περαιτέρω η RMS τιμή όλων των αρμονικών συνιστωσών συμπεριλαμβανομένης της θεμελιώδους συνιστώσας είναι:

$$F_n = \frac{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}}{\sqrt{2}} \quad (4.11)$$

Η συνολική RMS τιμή της συνάρτησης χρόνου f(t) μπορεί να εκφραστεί ως οι RMS τιμές των συνιστωσών της σειράς Fourier ως ακολούθως:

$$F = \sqrt{F_o^2 + \sum_{n=1}^{\infty} F_h^2} \quad (4.12)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι για συμμετρικές κυματομορφές η μέση τιμή είναι μηδέν ($F_o=0$) και οι συντελεστές μπορούν να απλοποιηθούν :

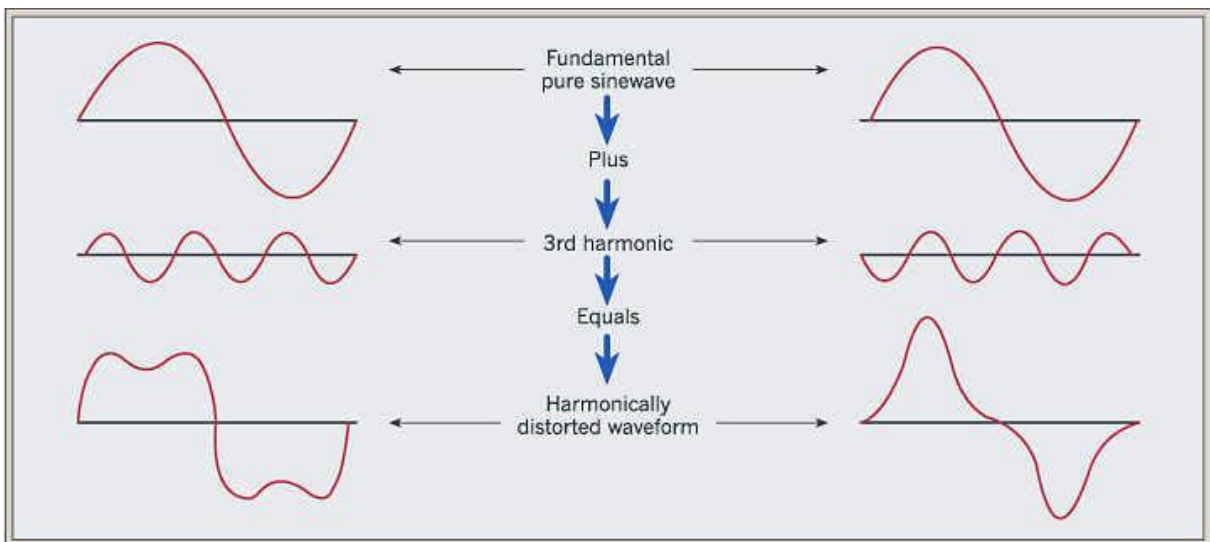
$$\alpha_n = 0 \text{ και } b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (4.13)$$

Χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία που αναφέρθηκε ανωτέρω , σε συνθήκες σταθερής κατάστασης το εναλλασσόμενο ρεύμα εισόδου και η τάση μπορούν να παρουσιαστούν ως απειροάθροισμα των αρμονικών (Fourier) συνιστωσών τους:

$$i_{ac}(t) = i_{ac1}(t) + \sum_{n=2}^{\infty} i_{acn}(t) \quad (4.14)$$

$$v_{ac}(t) = v_{ac1}(t) + \sum_{n=2}^{\infty} v_{acn}(t) \quad (4.15)$$

όπου i_{ac1} είναι το ρεύμα θεμελιώδους συχνότητας και το μέγεθος i_{acn} αντικατοπτρίζει το ρεύμα της ν-οστής αρμονικής συχνότητας, $f_n = h f_1$. Αντίστοιχα, η 4.15 παρουσιάζει την ίδια κατάσταση με την 4.14 σε όρους τάσης.



Εικόνα 4- 3. Παραμορφωμένη κυματομορφή ως υπέρθεση της θεμελιώδους και 3ης αρμονικής συνιστώσας.
(powerqualityworld.com)

Στην **Εικ.4.3** αν γίνει η υπόθεση ότι το σύστημα έχει συχνότητα 60Hz τότε η 3^η αρμονική συνιστώσα σύμφωνα με τον τύπο (4.1) είναι στα 180Hz. Το τελικό αποτέλεσμα της

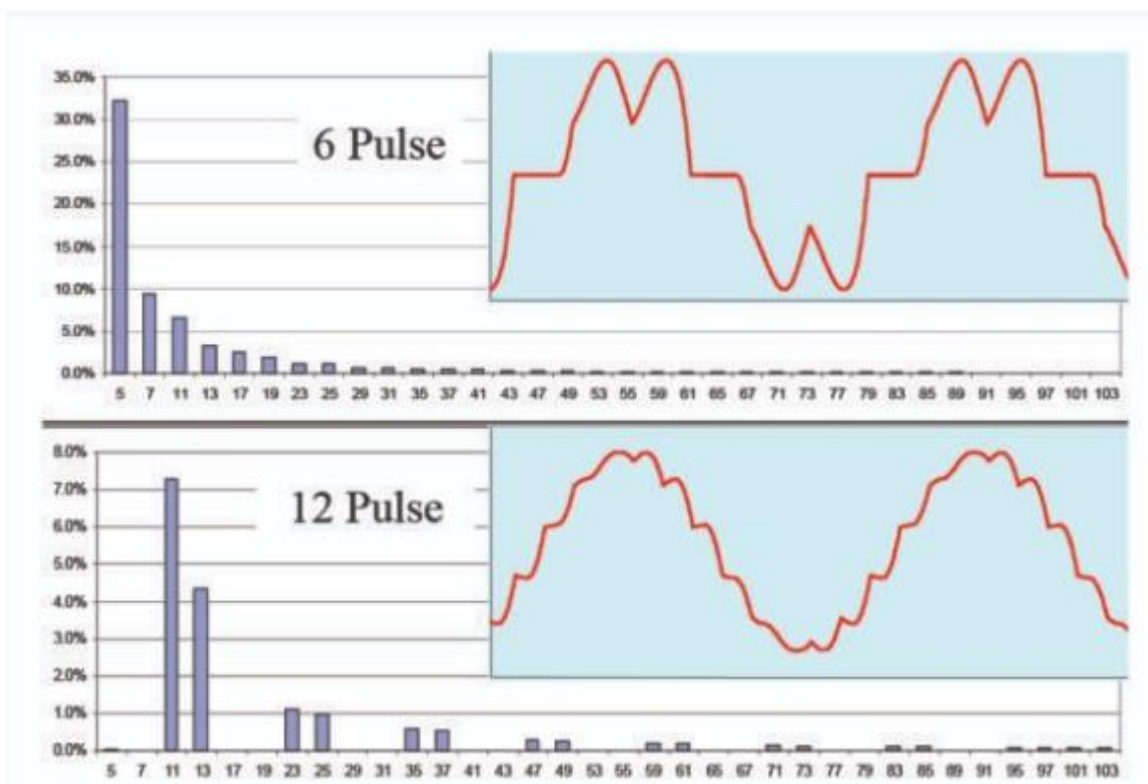
παραμορφωμένης κυματομορφής είναι απότοκο της πρόσθεσης, σύμφωνα με την ανάλυση Fourier, των αρμονικών συνιστωσών.

4.4 Φάσμα αρμονικών παραμορφώσεων και δείκτης THD

Στους ισχυρούς ηλεκτροκινητήρες που χρησιμοποιούνται στα βοηθητικά μηχανήματα των πλοίων είναι ανάγκη να υπάρχει έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής και της ροπής τους για την αποτελεσματική λειτουργία τους. Για παράδειγμα, σε ένα bulk carrier το γερανάκι (crane) φόρτωσης ανεβαίνει γρήγορα όταν είναι χωρίς φορτίο αλλά αργά και με ικανή ροπή όταν είναι υπό φόρτωση. Αυτό και ακόμα πιο σύνθετες λειτουργίες επιτυγχάνονται με τους Variable Speed Drives όπου μετατρέπουν τη σταθερή τάση και συχνότητα σε μεταβλητές, βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος κατακόρυφα. Οι Variable Speed Drives που χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στις ναυτιλιακές εφαρμογές περιέχουν γέφυρες ανορθωτών (diode-bridge rectifiers) που μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα AC σε συνεχές DC. Οι αρμονικές που παράγονται από τους ανωτέρω ημιαγωγούς καλούνται χαρακτηριστικές αρμονικές και ακολουθούν την παρακάτω σχέση [9]:

$$h = np \pm 1 \quad (4.16)$$

Όπου h είναι ο βαθμός της αρμονικής συνιστώσας, n είναι ακέραιος αριθμός και p είναι οι παλμοί του ανορθωτή.



Εικόνα 4- 4. Τυπικές κυματομορφές ρεύματος και φάσματα (πεδίο συχνότητας) χαρακτηριστικών αρμονικών για 6/12 παλμικούς ανορθωτές.

Για παράδειγμα σε ένα τριφασικό ανορθωτή, από τη στιγμή που ο αριθμός των παλμών θα είναι $p = 6$, οι χαρακτηριστικές αρμονικές θα δίνονται χρησιμοποιώντας τη σχέση 4.16 ως $h = n \cdot 6 \pm 1 = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 35, 37 \dots$ Σημειώνεται ότι με 6-παλμικό ανορθωτή η 5^η και 7^η συνιστώσα αρμονικών είναι ιδιαίτερα αυξημένες οπότε είτε χρησιμοποιείται φίλτρο είτε 12-18-24 παλμικοί ανορθωτές (υψηλότερο κόστος).

Οι παραπάνω χαρακτηριστικές αρμονικές δημιουργούνται σε μια ιδανική σταθερή κατάσταση και υποθέτοντας ότι η εναλλασσόμενη παροχή ισχύος είναι συμμετρική και η κυματομορφή της ακολουθεί την ημιτονοειδή μορφή. Κάθε διαφοροποίηση από τις παραπάνω υποθέσεις παράγει «μη χαρακτηριστικές» αρμονικές παραμορφώσεις. Οι μη χαρακτηριστικές αρμονικές παραμορφώσεις περιέχουν πιθανόν μια συνιστώσα προερχόμενη από συνεχές ρεύμα (DC). Στην πραγματικότητα, σε ένα πραγματικό δίκτυο οι ιδεατές συνθήκες που αναφέρθηκαν προηγουμένως δεν ικανοποιούνται συχνά με αποτέλεσμα η σχέση 4.16 να εφαρμόζεται μόνο για εκπαιδευτικούς λόγους [10].

Η δυσκολία πρόβλεψης αρμονικών παραμορφώσεων σε ένα πραγματικό δίκτυο οδήγησε στην αναζήτηση διαφορετικών τρόπων για την ποσοτικοποίηση και μέτρηση του ποιοτικού προβλήματος των αρμονικών παραμορφώσεων. Ο πιο διαδεδομένος και ευρύτερα χρησιμοποιούμενος (ακόμα και σε monitor παρακολούθησης στο μηχανοστάσιο του πλοίου) είναι ο **δείκτης συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion Factor-THD)**. Ορίζεται σύμφωνα με το IEEΕ 519-1992 ως ο λόγος της συνολικής ενεργού τιμής όλων των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών προς την ενεργό τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας.

Ο τύπος του δείκτη για την τάση δίνεται από τον τύπο:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (4.17)$$

Και για την ένταση αντίστοιχα έχουμε:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (4.18)$$

Όπως φαίνεται από τις σχέσεις (4.18) και (4.19) ο δείκτης συνολικής παραμόρφωσης υπολογίζεται χωριστά για την τάση και την ένταση του ρεύματος και περιλαμβάνει όλες τις RMS τιμές των συνιστωσών (συνήθως έως την 50^η αρμονική) των αρμονικών δίνοντας βάση φυσικά στη θεμελιώδη συχνότητα του συστήματος. Ο δείκτης THD είναι μια σημαντική παράμετρος εκτός από τα συστήματα ισχύος ηλεκτρικής ενέργειας και στην ακουστική, τηλεπικοινωνίες κ.ά., και πρέπει να είναι όσο μικρότερος γίνεται. Ο χαμηλός δείκτης THD εκτός από την περιορισμένη ύπαρξη αρμονικών παραμορφώσεων, συνδέεται και με υψηλό συντελεστή ισχύος (power factor). Ο δείκτης της σχέσεως (4.18) δεν υπόκειται σε περιορισμούς από κανονισμούς καθώς το ρεύμα εξαρτάται ιδιαίτερα από τους καταναλωτές τους συστήματος αλλά αντιθέτως ο δείκτης της τάσεως υπόκειται σε περιορισμούς που θα αναλυθούν παρακάτω στο **Κεφ.7**. Αυξημένος δείκτης THD εκτός από το ότι είναι μη αποδεκτός συνεπάγεται και μια σειρά προβλημάτων λόγω αρμονικών παραμορφώσεων.

Διατηρώντας τον THD_V εντός ορίων εξασφαλίζεται σε γενικές γραμμές η ομαλή λειτουργία του συστήματος του πλοίου [11]. Για το λόγο αυτό τα ηλεκτρικά συστήματα του πλοίου μελετώνται εκτενώς και συστηματικά με βάση τον δείκτη αυτό.

4.4.1 Τρόποι περιορισμού του δείκτη THD στα πλοία

Περισσότερα από το 80% των φορτίων ενός συστήματος πλοίου αποτελείται από μη γραμμικά φορτία (λόγω εκτεταμένης χρήσης των variable speed drives) τα οποία δημιουργούν σημαντικό πρόβλημα ισχύος στο ηλεκτρολογικό σύστημα του πλοίου. Αυτό το αυξημένο ποσοστό μη γραμμικών φορτίων θα είχε έναν δείκτη THD της τάξεως του 20% (μη αποδεκτό από κανονισμούς) και φυσικά με πληθώρα προβλημάτων λόγω αρμονικών παραμορφώσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικοί γενικοί τρόποι που έχουν εφαρμοστεί σε συστήματα πλοίων για τη μείωση του THD. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι περισσότεροι από τους τρόπους πρέπει να εφαρμοστούν σε στάδιο προμελέτης προληπτικά.

- Μείωση του αριθμού των ηλεκτροκινητήρων που συνδέονται με μετασχηματιστή
- Μείωση των φορτίων των ηλεκτροκινητήρων που συνδέονται με μετασχηματιστή
- Αύξηση της επαγωγικότητας του εσωτερικού πηνίου (DC link choke) στους variable speed drives
- Αύξηση του αριθμού των παλμών του ανορθωτή χρησιμοποιώντας διαφορετική τοπολογία στον είσοδο του μετασχηματιστή δηλαδή χρησιμοποιώντας 12/24/48 παλμικό ανορθωτή.
- Σε περίπτωση ύπαρξης δύο 12-παλμικών ανορθωτών είναι προτιμότερη η χρήση μετασχηματιστή του οποίου η διαφορά φάσης του πρωτεύοντος είναι στις 7.5 μοίρες για να διαμορφώσει έναν 24παλμικό (γενικά οι 18 και 24παλμικοί έχουν σημαντική διαφορά στο αποτύπωμα αρμονικών στο κύκλωμα).
- Χρήση VSDs τα οποία στην είσοδο έχουν active front end δηλαδή διατάξεις IGBTs (ηλεκτρονικό άνοιγμα και κλείσιμο διακοπών συνδυασμένα με σκοπό την εξαναγκασμένη έξοδο ημιτονοειδούς κυματομορφής) αντί των συμβατικών τα οποία στην είσοδό τους έχουν ανορθωτές (διατάξεις διόδων).
- Χρήση των ευρύτερα διαδεδομένων low pass filters τα οποία αποκόπτουν ανώτερες αρμονικές.
- Επιλογή σύγχρονων γεννητριών μεγαλύτερης ισχύος εντός φυσικά των ορίων των ελέγχων βραχυκυκλώματος και ισχύος.

4.5 Ο δείκτης αρμονικής παραμόρφωσης Total Demand Distortion- (TDD)

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω η βιομηχανία ποιότητας ισχύος βασίζεται σε τιμές συγκεκριμένων δεικτών οι οποίες κατοπτρίζουν την ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας σχετικά με την ύπαρξη αρμονικών παραμορφώσεων. Μια τιμή του δείκτη THD μπορεί να χαρακτηρίσει τα επίπεδα αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος I , όμως σε αρκετές περιπτώσεις μια τέτοια ένδειξη μπορεί να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα λόγω της σχετικότητας που έχει ο συγκεκριμένος δείκτης. Μια μικρή τιμή ρεύματος I μπορεί να έχει υψηλό δείκτη THD αλλά αυτό να μην αποτελεί ανησυχητική ένδειξη για την κατάσταση του ηλεκτρικού συστήματος. Για παράδειγμα, ένας Variable Frequency Drive (όπως αυτός της Εικ.4.5) μπορεί να εμφανίζει ιδιαίτερα ψηλές τιμές THD για το ρεύμα εισόδου ενώ αυτός λειτουργεί σε πολύ χαμηλά φορτία. Συνεπώς παρόλο που η σχετική παραμόρφωση που δίνει ο δείκτης είναι υψηλή, σε απόλυτες τιμές το μέγεθος του αρμονικού ρεύματος θα είναι χαμηλό και δεν πρέπει να προκαλεί ανησυχία. Για να καλυφθούν αποτελεσματικά περιπτώσεις όπως η ανωτέρω του παραδείγματος, ορισμένοι αναλυτές αναφέρθηκαν στην THD ως η θεμελιώδης του ρεύματος φόρτωσης αιχμής (peak current) ώστε να περιοριστεί η μη αντιπροσωπευτική απόδοση τιμών αρμονικής παραμόρφωσης σε περιπτώσεις χαμηλών φορτίων. Παρόλο που ο δείκτης THD είναι ιδιαίτερα πιο δημοφιλής από τον TDD, αυτός που χρησιμοποιείται κατά κόρον στους περιορισμούς του IEEE-519 “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems” είναι ο δείκτης TDD.

Ο IEEE-519 ορίζει τον **δείκτη TDD** ως ο λόγος της συνολικής ενεργού τιμής όλων των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών προς την μέγιστη απαίτηση ρεύματος λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος.

$$TDD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (4.19)$$

Οι δύο ορισμοί των δεικτών THD και TDD έχουν την ειδοποιό διαφορά στον παρονομαστή του κλάσματος. Ο υπολογισμός του δείκτη THD συγκρίνει τις στιγμιαία μετρημένες αρμονικές ρεύματος με το στιγμιαίο θεμελιώδες αρμονικό ρεύμα ενώ ο δείκτης TDD συγκρίνει (ως κλάσμα) τις στιγμιαία (steady-state) μετρημένες αρμονικές ρεύματος με την μέγιστη απαίτηση του συστήματος σε ρεύμα, η οποία σε καμία περίπτωση δεν είναι στιγμιαία τιμή. Κατά την μέτρηση των αρμονικών στόχος είναι ο εντοπισμός των μέγιστων τιμών των αρμονικών (βλέπε δείκτη TDD) κατά τη λογική της ανίχνευσης του χειρότερου σεναρίου και αυτός είναι ο λόγος που το πρότυπο IEEE-519 αναφέρεται σε όρια του δείκτη TDD και όχι σε όρια του δημοφιλέστερου THD_i.

4.6 Μεταβολή συντελεστή ισχύος (power factor) λόγω αρμονικών

Κατά το στάδιο προμελέτης ενός πλοίου πραγματοποιείται ο ηλεκτρικός ισολογισμός ο οποίος θα είναι αυτός που θα εκτιμήσει τις ενεργειακές ανάγκες του νέου πλοίου. Κατά συνέπεια θα καθορίσει την επιλογή των γεννητριών που θα καλύπτουν τις ενεργειακές απαιτήσεις των εγκατεστημένων φορτίων αλλά και θα προκύψει η διαστασιολόγηση του συστήματος διανομής και κατανάλωσης. Αυτή η ανάλυση συνήθως λάμβανε χώρα με χρήση τυπικών τιμών του συντελεστή ισχύος (power factor) όπως για παράδειγμα 0.8 επαγωγικό

για τις γεννήτριες και 0.85 για τους AC κινητήρες. Στην περίπτωση που έχουμε αρμονικές παραμορφώσεις οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος όπως έχει αναφερθεί μεταβάλλονται και σύμφωνα με την μαθηματική ανάλυση Fourier μπορούν να εκφραστούν με τις εξισώσεις **(4.3)** και **(4.4)** του κεφαλαίου 4. Η φαινόμενη ισχύς με την ύπαρξη των αρμονικών εκφράζεται ως γινόμενο των RMS τιμών τάσης και ρεύματος σύμφωνα με την εξίσωση:

$$S = V_{rms} I_{rms} = \sqrt{\sum_n V_n^2} \sqrt{\sum_n I_n^2} \quad n = 0,1,2 \dots \quad (4.20)$$

Τελικά οι όροι ισχύος διαμορφώνονται σε 3 γνωστές ομάδες και προκύπτουν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

Για την ενεργό ισχύ έχουμε :

$$P = \sum_n V_n I_n \cos(\theta_{v,n} - \theta_{i,n}) \quad n = 0,1,2 \dots \quad (4.21)$$

Η άεργος ισχύς με την ύπαρξη αρμονικής παραμόρφωσης εκφράζεται ως:

$$Q = \sum_n V_n I_n \sin(\theta_{v,n} - \theta_{i,n}) \quad n = 0,1,2 \dots \quad (4.22)$$

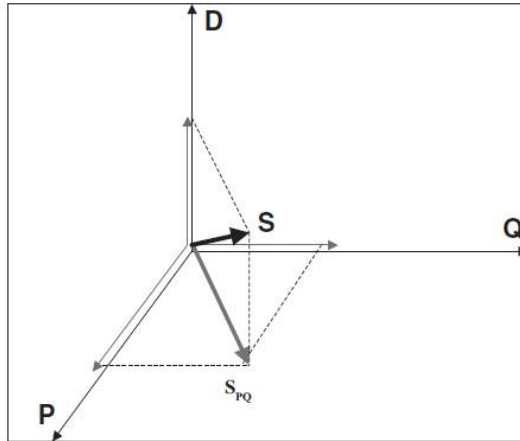
Η ισχύς παραμόρφωσης (distortion power) εκφράζεται ως:

$$D = \sqrt{\left\{ \left(\sqrt{\sum_n V_n^2} \sqrt{\sum_n I_n^2} \right)^2 - \left\{ \sum_n V_n I_n \cos(\theta_{v,n} - \theta_{i,n}) \right\}^2 - \left\{ \sum_n V_n I_n \sin(\theta_{v,n} - \theta_{i,n}) \right\}^2 \right\}} \quad (4.23)$$

Όταν παρατηρείται στο δίκτυο αρμονική παραμόρφωση τότε η φαινόμενη ισχύς υπολογίζεται ως εξής:

$$S_{PQ} = \sqrt{S^2 - D^2} \quad (4.24)$$

Ο παραπάνω τύπος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος δεν έχουν καθαρή ημιτονοειδή μορφή. Με την ύπαρξη αρμονικής παραμόρφωσης πλέον το γνωστό τρίγωνο ισχύος μετατρέπεται σε ένα τετράεδρο ισχύος που περιέχει και την ισχύ παραμόρφωσης D.



Εικόνα 4- 5. Σχήμα με απεικόνιση του τετράεδρου ισχύος στην περίπτωση της αρμονικής παραμόρφωσης.

(Journal of Marine Engineering, JM Prousalidis).

Συνεπώς ο συντελεστής ισχύος στην περίπτωση της αρμονικής παραμόρφωσης επεκτείνεται σε δύο όρους: τον συντελεστή ισχύος και τον συντελεστή ισχύος μετατόπισης.

Αναλυτικότερα έχουμε:

- I. Συντελεστής ισχύος (true power factor):

$$tpf = \frac{P}{S} \quad (4.25)$$

- II. Συντελεστής ισχύος μετατόπισης:

$$dpf = \cos\varphi = \cos(\theta_{v,1} - \theta_{i,1}) \quad (4.26)$$

Είναι κατανοητό ότι στην περίπτωση αρμονικών καμπυλών τάσης και ρεύματος τότε οι δύο παραπάνω όροι εκφράζουν τον ίδιο συντελεστή ισχύος.

Το ονομαστικό ρεύμα χρησιμοποιείται για την επιλογή αναρίθμητων συσκευών του συστήματος ισχύος και διανομής του ηλεκτρικού ρεύματος στο πλοίο όπως αυτόματους διακόπτες υπερφόρτισης ή βραχυκυκλώματος (circuit breakers), καλώδια, ζυγούς διανομής.

Από την εξίσωση που ακολουθεί διαφαίνεται πόσο σημαντικός είναι ο υπολογισμός της φαινόμενης ισχύος S και όχι μόνο του μέρους της ενεργούς ισχύος:

$$I_{rms} = \frac{S}{\beta V_{rms}} \quad (4.27)$$

Όπου β συντελεστής με $\beta=1$ (1-phase) ή $\beta=3^{1/2}$ (3-phase).

Στον ηλεκτρικό ισολογισμό ορίζεται η ανάλυση των απαιτήσεων σε ισχύ από τους καταναλωτές του πλοίου, σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η μελέτη συνήθως

περιορίζεται σε τρεις καταστάσεις πλεύσης του πλοίου. Αυτές είναι η κατάσταση κανονικής πορείας, κατάσταση χειρισμών, και η κατάσταση «εν όρμω». Ιδιαίτερα σημαντικός συντελεστής για την σωστή επίτευξη του ισολογισμού αυτού είναι ο συντελεστής λειτουργίας κάθε καταναλωτή ο οποίος ορίζεται ως :

$$f_s = \frac{\text{μέσο φορτίο 24ώρου}}{\text{ονομαστικό φορτίο}} \quad (4.28)$$

Αν δεν γινόταν χρήση του συντελεστή αυτού θα υπολογίζονταν συσκευές με μεγάλη ισχύ (όπως ο προωστήριος μηχανισμός πλήρης) ότι λειτουργούν αρκετές ώρες με αποτέλεσμα ιδιαίτερα αυξημένες ανάγκες για ενέργεια, γεγονός που θα παρέπεμπε σε εντελώς λανθασμένο αποτέλεσμα.

Ο παραπάνω συντελεστής αποτελεί γινόμενο δύο παραγόντων :

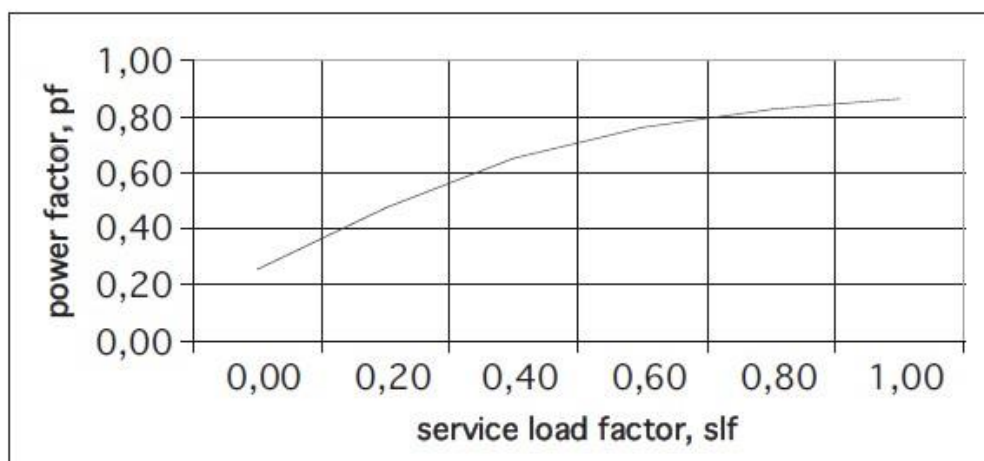
$$(slf) = (lf)(sf) \quad (4.29)$$

Αναλυτικότερα έχουμε:

- ❖ Συντελεστής φόρτισης (*lf*): ο οποίος για κάθε φορτίο αντικατοπτρίζει την κατάσταση φόρτισης του.
- ❖ Συντελεστής συνεχούς λειτουργίας (*sf*) : ο οποίος αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι σε κάθε κατάσταση πλεύσης δεν λειτουργούν όλα τα φορτία μαζί.

Η εκτίμηση με ακρίβεια του συντελεστή λειτουργίας είναι ιδιαίτερα δύσκολη και συνήθως χρησιμοποιούνται διαγράμματα και εμπειρικές τιμές από αντίστοιχου τύπου πλοία.

Όπως έχει αναφερθεί στον ηλεκτρικό ισολογισμό λαμβάνονται υπόψη μόνο οι απαιτήσεις σε ενεργό ισχύ. Στην σχετική βιβλιογραφία δεν γίνεται αναφορά για ισολογισμό ισχύος σε άεργο ισχύ και όταν απαιτείται κάποιος συντελεστής ισχύος πχ. φωτισμού , αυτός λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα σχεδόν αυθαίρετα.



Εικόνα 4- 6. Διάγραμμα συντελεστή ισχύος ως συνάρτηση του service load factor. (Journal of Marine Engineering, JM Prousalidis).

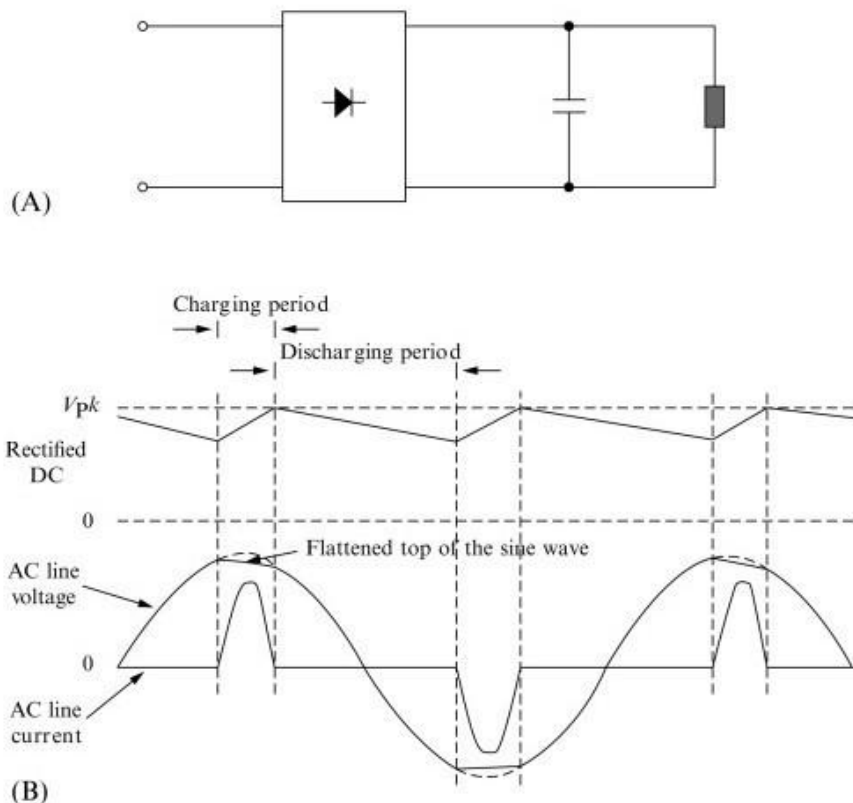
Στην βιβλιογραφία ισολογισμού ναυτικών ηλεκτροκινητήρων οι κατασκευαστές έχουν κατασκευάσει εμπειρικά διαγράμματα που βελτιώνουν την σωστή πρόβλεψη σε απαίτηση άεργου ισχύος στην ισολογισμό. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρακάτω εξίσωση του συντελεστή ισχύος ως συνάρτηση του συντελεστή λειτουργίας.

$$(pf) = pf(slf) \quad (4.30)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω και το γεγονός ότι στον ηλεκτρικό ισολογισμό εκτιμώνται μόνο οι απαιτήσεις σε ενεργό ισχύ, είναι πιθανό να πραγματοποιηθούν σημαντικά λάθη στη μελέτη, όσο αναφορά την άεργο και την φαινόμενη ισχύ αντίστοιχα. Μια ανεπαρκής εκτίμηση της άεργους ισχύος μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη εκτίμηση των ηλεκτρογεννητριών του πλοίου και αναπόφευκτα στην υπερφόρτιση τους γεγονός ιδιαίτερα ανησυχητικό και επικίνδυνο αν ληφθεί υπόψη ότι το σύστημα του πλοίου είναι αυτόνομο και οι γεννήτριες το μόνο μέσο παραγωγής ενέργειας σε αυτό.

5 Πηγές αρμονικής παραμόρφωσης

Το θέμα της αρμονικής παραμόρφωσης όπως γίνεται φανερό στο 3^ο κεφάλαιο είναι μόνο ένα από τα πολλά φαινόμενα ποιότητας ισχύος τα οποία διαταράσσουν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και κατά συνέπεια τις ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις του μηχανοστασίου του πλοίου. Είναι ένα μοναδικό όμως πρόβλημα καθώς εντείνεται συνεχώς ,τόσο με τη χρήση περισσότερων ηλεκτρικών συστημάτων (εξηλεκτρισμός του πλοίου- νέα συστήματα πχ. ballast water treatment, scrubber units) όσο και με την αύξηση των υπολογιστικών συστημάτων. Η αυξημένη χρήση διακοπών ισχύος (switches) και των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος (δίοδοι, ανορθωτές) στα παραπάνω συστήματα αποτελεί την κυρίως πηγή διαταραχής των κυματομορφών του συστήματος. Έχει αποδειχθεί ότι διαφορετικά μη γραμμικά φορτία παράγουν διαφορετικά αλλά αναγνωρίσιμα αρμονικά φάσματα και έτσι η αναζήτηση των πιθανών πηγών αρμονικών καθίσταται ευκολότερη, αν και το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα σύνθετο [12]. Το σχήμα των κυματομορφών τάσης και ρεύματος πολλές φορές προδίδουν συγκεκριμένες αρμονικές πηγές. Η συστηματική ενασχόληση με το θέμα βοηθά στην αναγνώριση και τελικά τον περιορισμό τέτοιου είδους διαταραχών. Η κύρια πηγή αρμονικών είναι μη γραμμικά φορτία τα οποία παράγουν αρμονικές τάσης και αρμονικές ρεύματος.

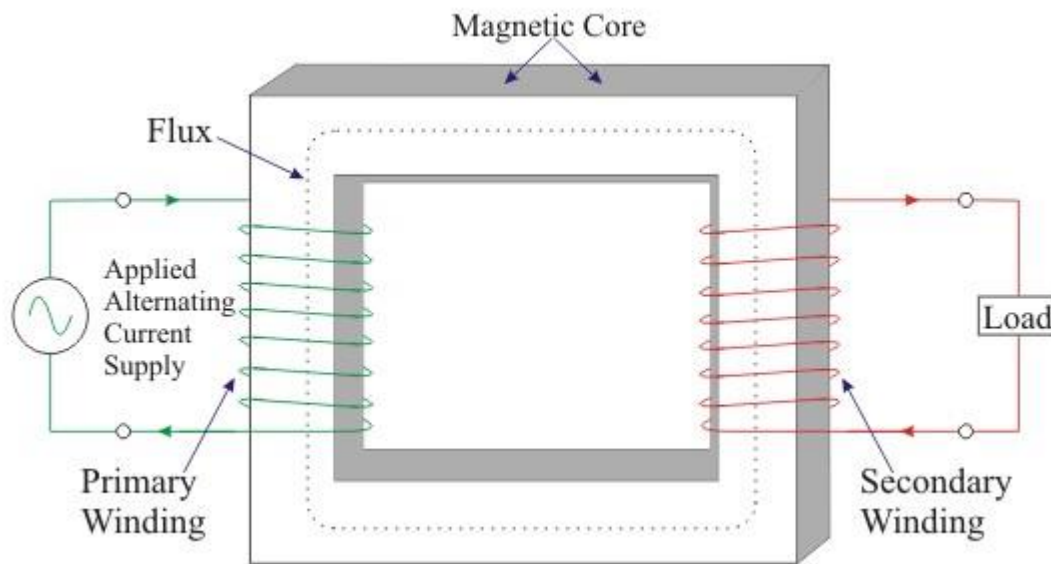


Εικόνα 5- 1. (A) Απεικόνιση γέφυρας ανορθωτή με διόδους (B) Παραμορφωμένη κυματομορφή τάσης λόγω του μη γραμμικού φορτίου ανορθωτή.
(Design of Transient Protection Systems, Nihal Kularatna)

Στην **Εικ. 5.1** διαφαίνεται ότι ένας απλός ανορθωτής που συναντάται συχνά μπορεί να διαταράξει την κυματομορφή τάσης και να προκαλέσει παραμορφώσεις. Αυτό συμβαίνει καθώς οι ανορθωτές μπορούν να αφήνουν τη ροή ρεύματος μόνο όταν η τάση στιγμιαίας γραμμής είναι υψηλότερη από την τάση του πυκνωτή εξομάλυνσης, η φόρτιση των πυκνωτών πραγματοποιείται μόνο κατά τη διάρκεια μιας μικρής χρονικής περιόδου, με αποτέλεσμα στενούς παλμούς ρεύματος εισόδου. Αν ένα ή περισσότερα από τα φορτία που είναι συνδεδεμένα στο ζυγό διανομής τραβήξουν ένα μη γραμμικό ρεύμα, η τάση εξόδου θα είναι ένα μη ημιτονοειδές σχήμα [13].

5.1 Μετασχηματιστές

Ο σκοπός ενός μετασχηματιστή στο πλοίο είναι να απομονώσει τα διαφορετικά τμήματα του ηλεκτρικού δικτύου διανομής της ισχύος σε διαφορετικά επίπεδα τάσης και κάποιες φορές την μετατόπιση φάσης (1φ/3φ).



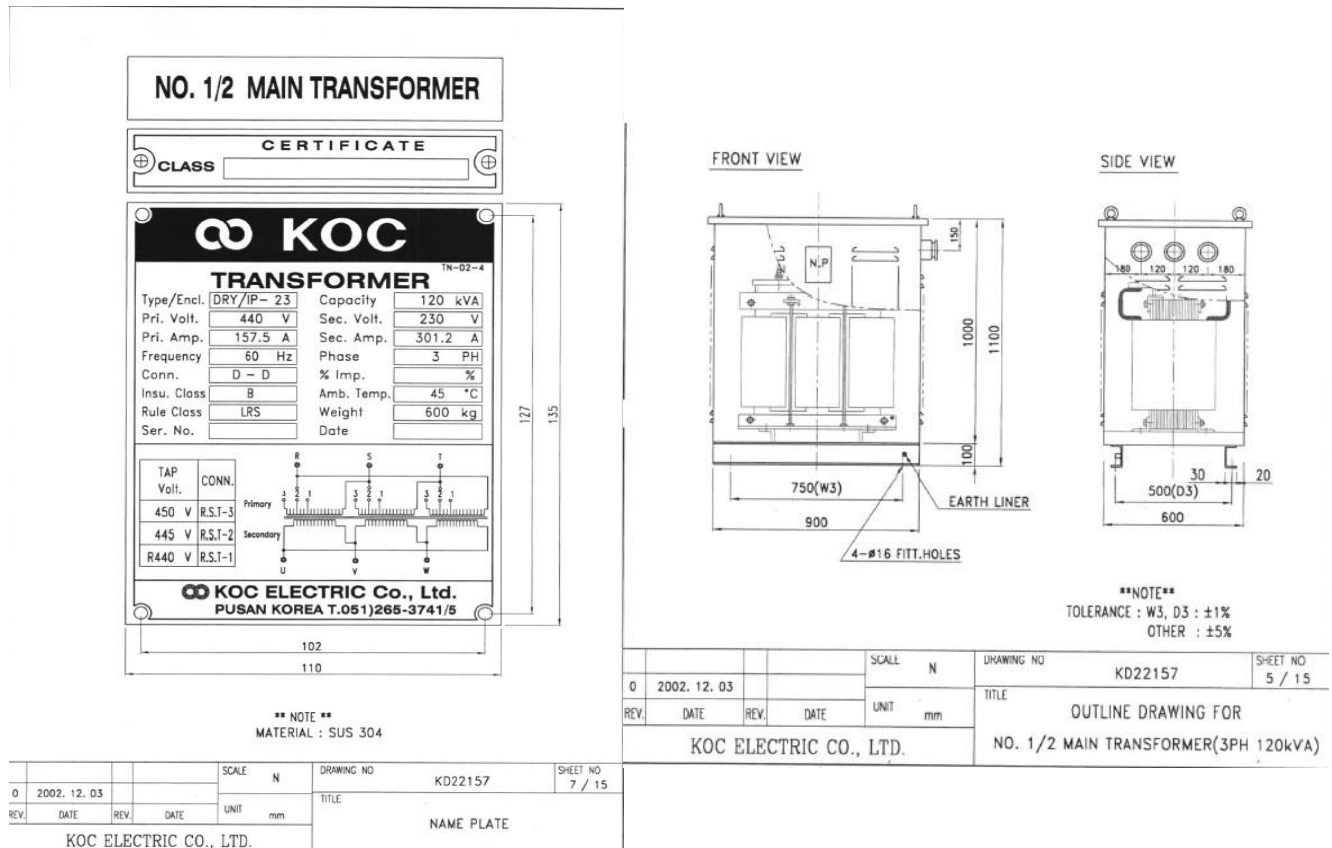
Εικόνα 5- 2. Κατασκευαστική δομή μονοφασικού μετασχηματιστή με πυρήνα σιδηρομαγνητικού υλικού.
(java point.com)

Ένας μετασχηματιστής μπορεί να βρεθεί σε συνθήκες κορεσμού πυρήνα σε μια από τις ακόλουθες περιπτώσεις (όπως έχει αναφερθεί και ως παράδειγμα στο τέλος του εδαφίου 4.2):

- ❖ Όταν αυτός λειτουργεί πάνω από την ονομαστική τάση . Αυτή η κατάσταση μπορεί να προκύψει σε συνθήκες χαμηλού φορτίου.
- ❖ Λειτουργώντας πάνω από την ονομαστική ισχύ , που είναι απότοκο συνθηκών υψηλού φορτίου.

Ο μετασχηματιστής σε συνθήκες κατάστασης κορεσμού θα εμφανίζει ένα μη γραμμικό μαγνητικό παραμορφωμένο ρεύμα στο οποίο η 3^η αρμονική θα είναι κυρίαρχη, ενώ το πρόβλημα εντείνεται με την αύξηση της φόρτισης του μετασχηματιστή. Το ημιτονοειδές μαγνητικό ρεύμα δεν είναι συμμετρικό ως προς τη μέγιστη τιμή του λόγω του φαινομένου της υστέρησης του μετασχηματιστή το οποίο αναλύεται στο τέλος του εδαφίου 4.2 και στην

αντίστοιχη **Εικ. 4.2**. Τέλος το φαινόμενο μπορεί να περιοριστεί χρησιμοποιώντας συνδέσεις μετασχηματιστή τριγώνου (Δ).



Εικόνα 5- 3. Τεχνικές προδιαγραφές και σκαρίφημα κύριου μετασχηματιστή Tanker 105 000 DWT. (Thenamaris shipping Co.)

Στην **Εικ. 5.3** παρουσιάζεται ένα σκαρίφημα του κύριου μετασχηματιστή 440/230 V ο οποίος έχει κατασκευαστεί για Tanker 105 000 DWT από την KOC ELECTRIC CO., LTD. Ο παραπάνω μετασχηματιστής έχει χωρητικότητα 120 kVA και είναι τριφασικός (3 PH).

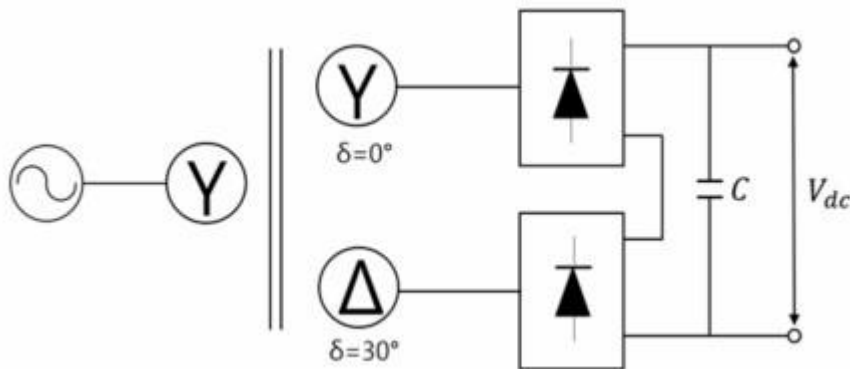
5.2 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος (Converters)

Οι αυξανόμενες απαιτήσεις σε διαφορετικές παραμέτρους όπως η διαφορετική συχνότητα και η μετατροπή από ΣΡ σε ΕΡ και το αντίστροφο έχουν καταστήσει τους μετατροπείς ισχύος αρκετά διαδεδομένη πηγή αρμονικών παραμορφώσεων. Οι μετατροπείς που μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές ονομάζονται ανορθωτές (AC/DC rectifiers) ενώ την μετατροπή του συνεχές ρεύματος σε εναλλασσόμενο την επιτελεί ένας αντιστροφέας (DC/AC inverter). Δομικά στοιχεία των παραπάνω αποτελούν ηλεκτρονικοί διακόπτες ισχύος όπως θυρίστορ (SCR) και δίοδοι (diode) σε διάφορες διατάξεις. Οι ηλεκτρονικοί αυτοί διακόπτες ισχύος έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την μέγιστη τάση, ρεύμα και ισχύ λειτουργίας καθώς και την διακοπτική συχνότητα λειτουργίας. Ο τύπος του ηλεκτρονικού διακόπτη που θα χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την διάταξη του κυκλώματος αποδίδει έναν μετατροπέα με πολύ συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα για την ανόρθωση τριφασικού ρεύματος είναι απαραίτητη η χρήση ανορθωτή 6 παλμών ο οποίος θα αποτελείται από 6 διακόπτες ισχύος, δύο σε κάθε φάση ρεύματος.

Όλοι οι ηλεκτρονικοί διακόπτες ισχύος που αναφέρθηκαν παραπάνω αποκόπτουν ή αντλούν ρεύμα μόνο στις τιμές αιχμής της τροφοδοσίας του εναλλασσόμενου ρεύματος και δεδομένου ότι η κυματομορφή του ρεύματος που προκύπτει από το διακοπτικό φαινόμενο δεν είναι ημιτονοειδής τότε το ρεύμα που προκύπτει περιέχει αρμονικές. Αυξημένη ύπαρξη αρμονικών παρατηρείται όταν υπάρχουν στο δίκτυο 6 παλμικοί ανορθωτές, οι οποίοι λόγω απλότητας είναι και πιο οικονομικοί [14]. Μια μέθοδος βελτίωσης των αρμονικών παραμορφώσεων της ισχύος εξόδου είναι η εγκατάσταση και χρήση ενός μετασχηματιστή μετατόπισης φάσης πριν τον ανορθωτή για την παραγωγή κυματομορφών συνεχούς ρεύματος με 12 παλμούς σε κάθε κύκλο (δηλαδή χρήση διπλού 6-παλμικού ανορθωτή με συγκεκριμένη διάταξη Υ-Υ και Υ-Δ) (βλ. **Εικ.5.4**). Η γωνία μετατόπισης φάσης για τη δημιουργία 12 παλμών ανά κύκλο είναι 30° μεταξύ κάθε φάσης όπως υποδεικνύεται από την εξίσωση:

$$\Delta = \angle e_{ab} - \angle e_{AB} = 30^\circ \quad (5.1)$$

Όπου Δ είναι η γωνία μετατόπισης φάσης, $\angle e_{ab}$ τάση γραμμής της κυρίως πλευράς του ανορθωτή, $\angle e_{AB}$ τάση γραμμής της δευτερεύον πλευράς του ανορθωτή.



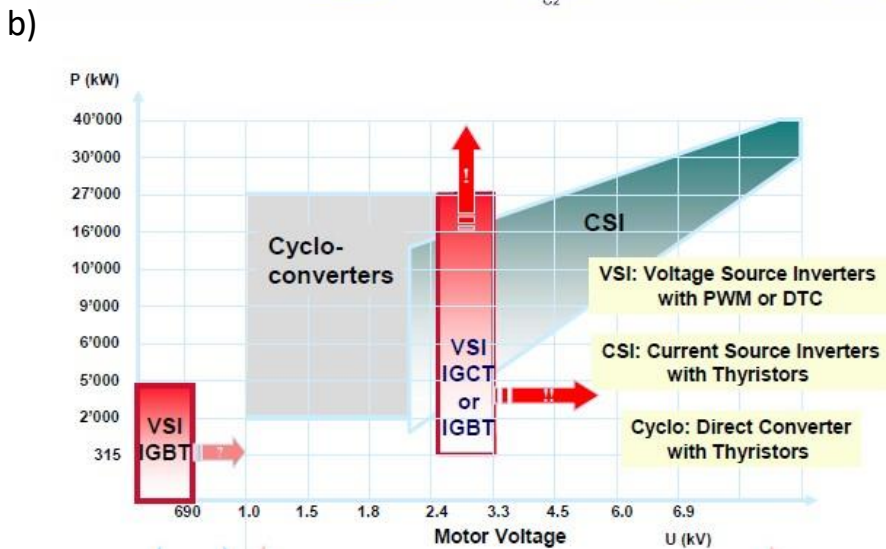
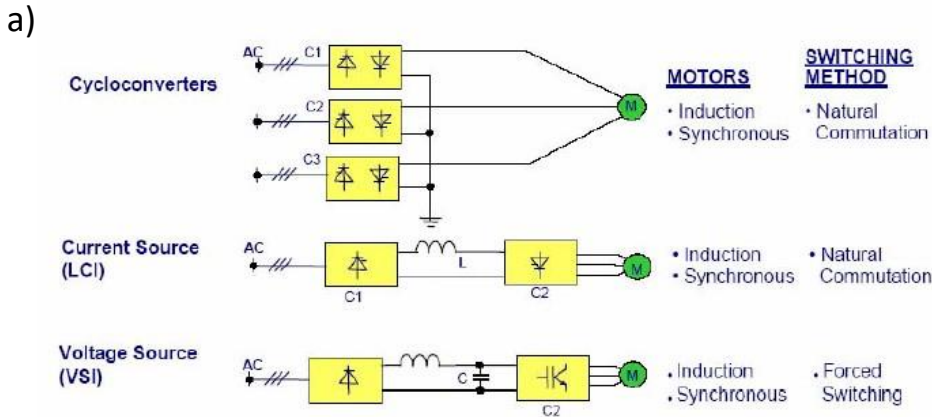
Εικόνα 5- 4. Τυπική διάταξη 12-παλμικού ανορθωτή με γωνία μετατόπισης φάσης 30° .
(Journal of Marine Science and Engineering, Hyeonmin Jeon et al)

Όσον αναφορά το δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης, στην κυματομορφή εξόδου του ανορθωτή 12 παλμών, η $5^{ου}$ και $7^{ου}$ βαθμού αρμονικές εξαλείφονται πλήρως και παραμένουν μόνο οι αρμονικές $11^{ου}$ και πάνω βαθμού. Έτσι ο ανορθωτής μειώνει αποτελεσματικά τα χαρακτηριστικά αρμονικής παραμόρφωσης του συγκριτικά με τον ανορθωτή 6 παλμών. Από μετρήσεις που έχουν γίνει ένας ανορθωτής 6 παλμών έχει δείκτη THD 25-27%, 12 παλμών THD 8-11%, 18παλμών THD 4-5% και 24 παλμών THD 2-3%, γεγονός που επαληθεύει την βελτίωση της κατάστασης των αρμονικών παραμορφώσεων με τη χρήση ανορθωτή περισσότερων παλμών. Η εκθετική αύξηση του κόστους βέβαια, επιτρέπει τη χρήση του μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις και συχνότερα χρησιμοποιείται ένας ανορθωτής ή αντιστροφέας λιγότερων παλμών με φίλτρο αρμονικών παραμορφώσεων.

5.2.1 Variable Frequency Drives

Μελέτες έχουν δείξει ότι περίπου το 55% της ενέργειας που παράγεται στο πλοίο από τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη καταναλώνεται στη λειτουργία ηλεκτροκινητήρων που συνήθως κινούν αντλίες (υδραυλικές ,μηχανικές) και ανεμιστήρες (Ecofys Energy Efficiency, Rob Winkel). Ο Variable Frequency Drive είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για να παρέχει

τη δυνατότητα μεταβλητών στροφών (και ροπής) σε ένα επαγωγικό τριφασικό ηλεκτροκινητήρα. Λειτουργεί αλλάζοντας τη συχνότητα τροφοδοσίας στον κινητήρα ενώ η ταχύτητα του κινητήρα είναι άμεσα ανάλογη με τη συχνότητα τροφοδοσίας. Λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας ενός τυπικού VFD θα δοθούν παρακάτω, ενώ υπάρχουν πολλοί τύποι μετατροπέα συχνότητας (VFD) που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία ανάλογα με το είδος του ηλεκτροκινητήρα που θα τροφοδοτήσουν, το φορτίο και την τάση εισόδου (βλ. **Εικ.5.4**).

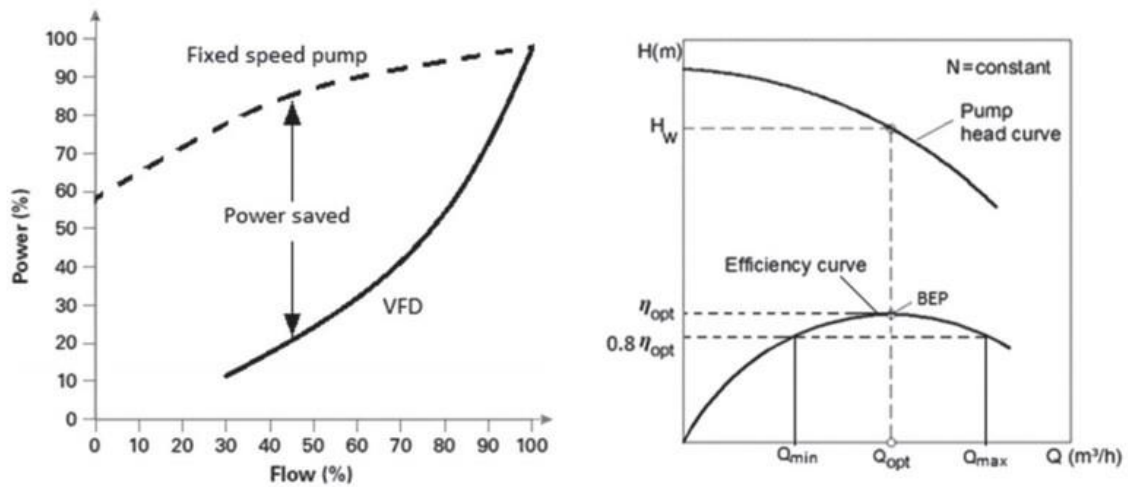


Εικόνα 5- a) Τύποι SPWM χρησιμοποιούμενοι στους ηλεκτροκινητήρες πλοίων b) Ανασκόπηση VFD ανάλογα με την τάση και την ισχύ (Damir Radan, Marine Power Electronics).

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να εξοικονομηθεί ενέργεια χρησιμοποιώντας VFD, εξαρτώμενοι από τον τύπο της εφαρμογής. Σε χρήση με ανεμιστήρες και αντλίες, απλά μειώνοντας την ταχύτητα θα υπάρξει μια σημαντική αλλαγή στην κατανάλωση ενέργειας. Είναι γνωστό ότι όσο η ταχύτητα περιστροφής ενός ηλεκτροκινητήρα αυξάνεται, τότε η ανάγκη για ροπή αυξάνεται εκθετικά. Δύο απλά παραδείγματα εξοικονόμησης σημαντικών ποσών ενέργειας είναι οι αντλίες θαλασσινού νερού (sea water pumps) για την ψύξη των κινητήρων και οι ανεμιστήρες του μηχανοστασίου (Engine Room fans).

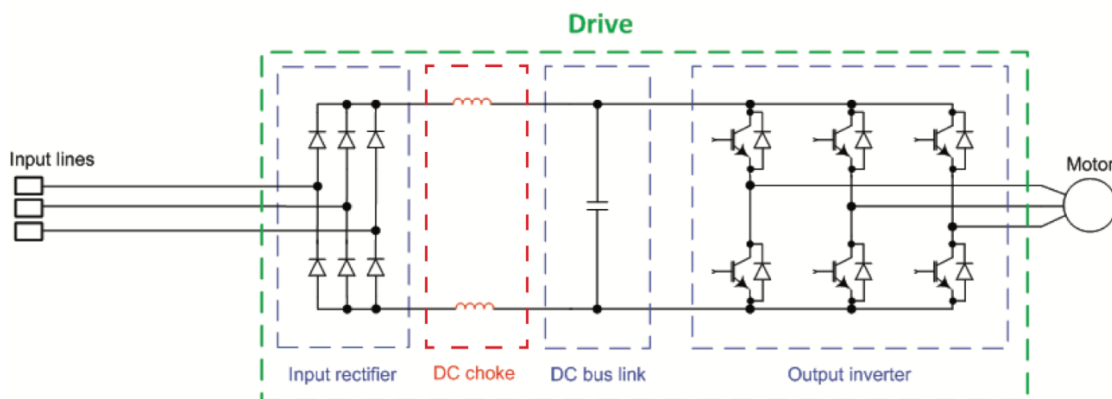
Στην **Εικ.5.6** φαίνεται ότι η χρήση VFD σε συγκεκριμένη παροχή μπορεί να σώσει έως και 60% ενέργεια λόγω της εκθετικής εξάρτησης στροφών και ισχύος. Ακόμη μια τέτοια μείωση στην ταχύτητα περιστροφής του πτερυγίου της αντλίας, εκμηδενίζει τις πιθανότητες διάβρωσης του. Για τους παραπάνω λόγους γίνεται εκτεταμένη χρήση των VFD στα πλοία

παρόλο που η λειτουργία τους συνδέεται άρρηκτα με τη γένεση αρμονικών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας [15].



Εικόνα 5- 6. Διάγραμμα παροχής-ισχύος σε αντλία με σταθερό αριθμό στροφών και σε αντλία που ο ηλεκτροκινητήρας της έχει μεταβλητότητα στροφών λόγω VFD. (Journal of Marine Engineering, Energy Efficiency Analysis using VFD , Gazi Kocak).

Σε αυτό το σημείο κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμο να παρουσιαστεί ένα σκαρίφημα ενός VFD του οποίου τα εξαρτήματα αναφέρονται εκτεταμένα στις προηγούμενες σελίδες.



Εικόνα 5- 7. Σχήμα με απεικόνιση των εσωτερικών εξαρτημάτων ενός Variable Frequency Drive της Schneider Electric. (Schneider)

Έτσι στην **Εικ.5.7** φαίνεται ότι στον ρυθμιστή συχνότητας-στροφών της Schneider όπως έρχεται το ρεύμα από το υπόλοιπο δίκτυο του πλοίου εισέρχεται στον ανορθωτή ο οποίος περιέχει συστοιχίες διόδων. Οι διόδοι αφήνουν τη ροή ρεύματος μόνο προς τη μία κατεύθυνση με αποτέλεσμα από εναλλασσόμενο ρεύμα να έχουμε ένα «σκληρό συνεχές» αποκόπτοντας ουσιαστικά τις αρνητικές τιμές του ημιτόνου. Το DC bus choke είναι βελτιωτικό στοιχείο του μετατροπέα το οποίο αποτελείται από δύο πηνία. Αυτά αποκόπτουν τις μέγιστες τιμές του συνεχούς ρεύματος που προέρχεται από τις διόδους προηγουμένως. Έπειτα το DC bus αποτελείται από πυκνωτές οι οποίοι απελευθερώνουν ηλεκτρόνια σε διαστήματα ημιπεριόδων ακριβώς στα σημεία που είχαν μηδενίσει τις αρνητικές τιμές ρεύματος οι διόδοι. Τέλος το inverter (μετατροπέας ρεύματος) αποτελείται από ηλεκτρονικά IGBTs τα οποία έχουν ελεγχόμενους διακόπτες που ρυθμίζουν κατεύθυνση και συχνότητα

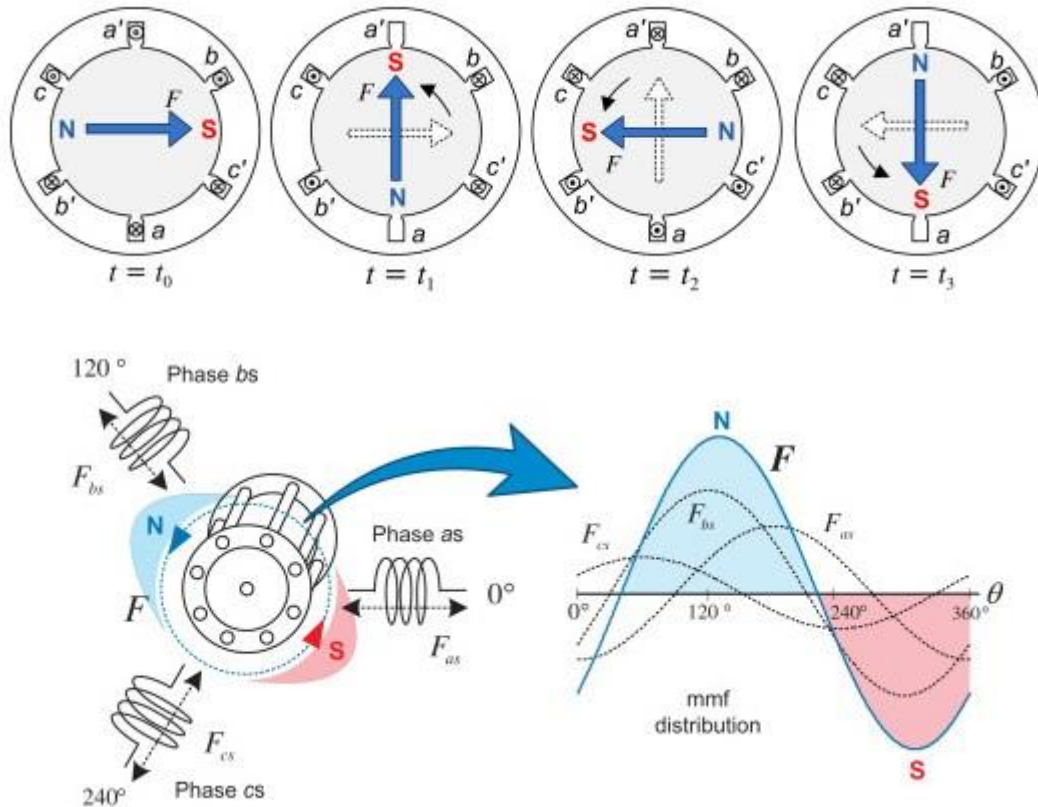
του σήματος εξόδου και τελικά το μετατρέπουν σε ομαλοποιημένο εναλλασσόμενο ρεύμα ξανά.

Από την προ ηγηθείσα ανάλυση γίνεται κατανοητό ότι ένας VFD έχει ηλεκτρονικά ισχύος, τα οποία είναι μη γραμμικά φορτία και παράγουν αρμονικές με έμφαση στην 5η και 7η. Το άθροισμα των αρμονικών ρευμάτων που παράγουν στο κύκλωμα οδηγεί σε μια μη ημιτονοειδή κυματομορφή. Τα αρμονικά ρεύματα ρέουν σε όλο το κύκλωμα με αποτέλεσμα την παραμόρφωση τάσης και των τροφοδοσιών των υπόλοιπων συσκευών με ρεύμα χαμηλότερης ποιότητας σε όρους ποιότητας ισχύος. Επίσης λόγω των αυξημένων παραμορφωμένων ρευμάτων μπορεί να πρέπει να έχει συνυπολογιστεί μια υπερδιαστασιολόγηση των υπόλοιπων συσκευών ώστε να μην υπερφορτωθούν από τα αυξημένα αρμονικά ρεύματα. Ο περιορισμός των αρμονικών στις συσκευές αυτές γίνεται με το DC choke που περιέχουν οι VFD σε διάφορες διατάξεις αποκόπτοντας τις μέγιστες τιμές. Παρόλο που υπάρχουν πολλές λύσεις μετριασμού του προβλήματος με υπέρ και κατά, το πρόβλημα των αρμονικών λόγω της εκτεταμένης χρήσης των VFD παραμένει στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων [16].

5.3 Στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές

Είναι γνωστό ότι στα πλοία υπάρχει εκτεταμένη χρήση των στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών τόσο κατά την έννοια των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών όσο και κατά την έννοια των σύγχρονων και ασύγχρονων κινητήρων επαγωγής. Τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη παράγουν όλη την διαθέσιμη ενέργεια του ηλεκτρικού συστήματος του πλοίου καθώς το σύστημα είναι αυτόνομο. Η αυξημένη ανάγκη για στρεφόμενες μηχανές κάνει σύνηθες τη λειτουργία ηλεκτροκινητήρων οι οποίοι κινούν ανυψωτικά μηχανήματα, υδραυλικές και μηχανικές αντλίες, ανεμιστήρες κ.α. αλλά και μεγάλης ισχύος ηλεκτροκινητήρες χρησιμοποιούνται σε πλευρικούς προωστήριους μηχανισμούς. Τα τελευταία χρόνια σύγχρονοι ηλεκτροκινητήρες μεγάλης ισχύος και απόδοσης χρησιμοποιούνται ως βασικό μέσο πρόωσης όμως προβλήματα αποθήκευσης ενέργειας περιορίζουν την εξάπλωση και καθιέρωση τους [17].

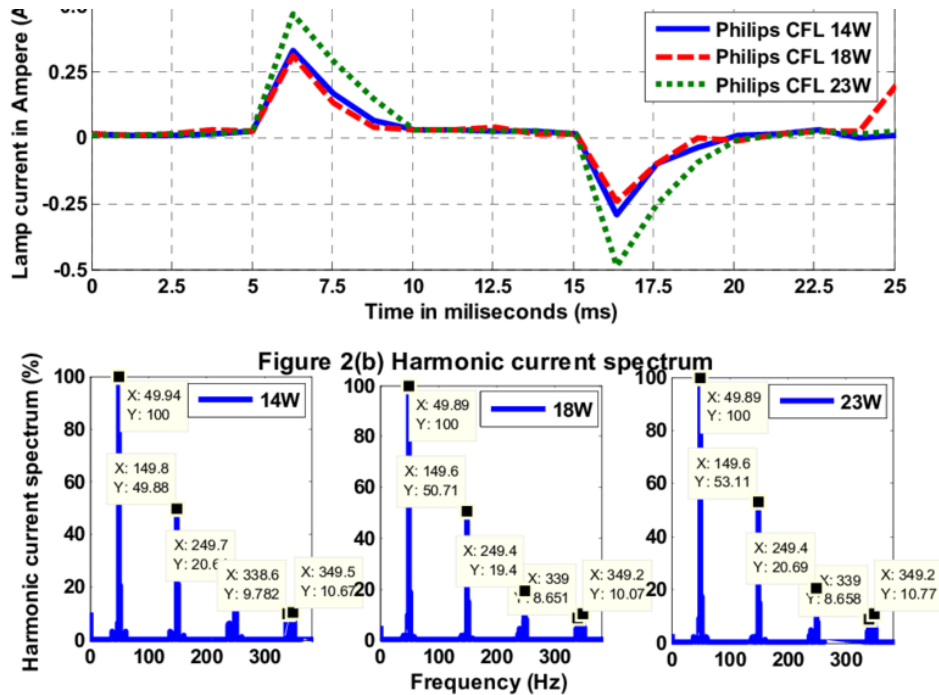
Ως αποτέλεσμα μικρών ασυμμετριών στο στάτορα του μηχανήματος ή στις σχισμές του δρομέα ή ελαφρώς ανωμαλίες στα σχήματα των τριφασικών τους περιελίξεων μπορούν να εμφανιστούν αρμονικά ρεύματα στο κύκλωμα. Αυτές οι αρμονικές προκαλούν μια ηλεκτροκινητική δύναμη (*emf*) στις περιελίξεις του στάτη ίση με την αναλογία ταχύτητας/μήκους κύματος. Η κατανομή που προκύπτει από τις μαγνητοκινητικές δυνάμεις (*mmfs*) παράγει αρμονικές που είναι συνάρτηση της ταχύτητας. Μαγνητικά ρεύματα μπορούν ακόμα να δημιουργηθούν με κορεσμό μαγνητικού πυρήνα. Παρόλο που η χρήση στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών στο πλοίο είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, τα αρμονικά ρεύματα που δημιουργούνται από κορεσμό πυρήνα είναι αρκετά μικρότερα από αυτά που δημιουργούνται όταν οι ηλεκτροκινητήρες συνδέονται με VFD's που εκτεταμένα αναφέρονται ανωτέρω. Στην **Εικ.5.8** διαφαίνεται ένας ηλεκτροκινητήρας και οι περιελίξεις ανά 120° μοίρες στο χώρο, τροφοδοτούμενες με συμμετρικό τριφασικό ημιτονοειδές εναλλασσόμενο ρεύμα. Το άθροισμα των τριών *mmfs* (3 φάσεις) γίνεται ένα μοναδικό στρεφόμενο διάνυσμα F στο κενό αέρος.



Εικόνα 5- 8. Κίνηση της μαγνητοκινητικής δύναμης mmf ανά ένα κύκλο ρεύματος και προκύπτουσα δύναμη από 3φασικό ρεύμα σε επαγωγικό κινητήρα. (Electric Motor Control, Sang-Hoon Kim et al).

5.4 Μη συμβατικοί λαμπτήρες φωτισμού, electronic ballasts

Στα πλοία χρησιμοποιούνται ευρύτερα λάμπες φθορισμού και λάμπες τεχνολογίας led έναντι των παλιών λαμπτήρων πυράκτωσης με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Οι λάμπες φθορισμού είναι ιδιαίτερα μη γραμμικά φορτία και δημιουργούν σημαντικό μέγεθος περίεργες αρμονικές παραμορφώσεις στο ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου. Τα lighting ballast είναι βασικό χαρακτηριστικό πολλών λαμπτήρων φθορισμού και led, αφού παρέχουν αρκετή τάση για την επίτευξη εκκίνησης του λαμπτήρα (με χρήση πυκνωτή) και έπειτα ρυθμίζουν τα χαρακτηριστικά του παρεχόμενου ρεύματος ανάλογα με τον τύπο του λαμπτήρα. Η ρύθμιση των χαρακτηριστικών του ρεύματος γίνεται με πηνία (core inductors or chokes). Τα electronic ballasts λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες ρεύματος, γεγονός που τους επιτρέπει τη χρήση μικρότερων πυκνωτών, και την δημιουργία περισσότερου φωτός (αύξηση lumen) για την ίδια ισχύ εισόδου. Σε τριφασικό φορτίο οι κυρίαρχες αρμονικές που διαδίδονται στο δίκτυο από τα ηλεκτρονικά ισχύος του electronic ballast είναι οι 3η, 5η και 7η αρμονικές παραμορφώσεις. Ακόμη τα κυκλώματα φωτισμού εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις γεγονός που εντείνει το πρόβλημα και δημιουργεί την ανάγκη της αύξησης διαμέτρου των ουδέτερων αγωγών των μετασχηματιστών που συνδέονται με τα κυκλώματα φωτισμού.



Εικόνα 5- 9. Κυματομορφή ρεύματος και φάσμα αρμονικών μετά από μετρήσεις για διάφορα φορτία λαμπών φθορισμού. (research gate.com)

5.5 Συσκευές αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS)

Η αυξανόμενη τάση για νέες τεχνολογίες πάνω στα πλοία και η ανάγκη για προστασία των ηλεκτρονικών συσκευών που ήδη υπάρχουν, κάνουν αδήριτη την ανάγκη για χρήση συσκευών αδιάλειπτης παροχής ισχύος. Ο σύγχρονος τεχνολογικός εξοπλισμός μπορεί να αποτύχει να κάνει τη δουλειά του ή να υποστεί ζημιές αν η ισχύς εισόδου διακόπτεται ή έχει διαταραχές. Ιδιαίτερα για τα συστήματα πλοήγησης και το φωτισμό έκτακτης ανάγκης σε ορισμένα σημεία του πλοίου οι νηογνώμονες απαιτούν την προστασία με UPS χωρίς την αναμονή για εκκίνηση την γεννήτριας έκτακτης ανάγκης. Ουσιαστικά οι συσκευές αδιάλειπτης παροχής είναι μετατροπείς ισχύος από ΣΡ σε ΕΡ δηλαδή inverter, με την διαφορά ότι παράλληλα στον πυκνωτή του μετατροπέα παρεμβάλλεται συστοιχία συσσωρευτών. Σε περίπτωση διακοπής της κύριας παροχής ΕΡ, έχουμε μετατροπή του ΣΡ σε ΕΡ και την τροφοδοσία των συνδεδεμένων συσκευών ανάλογα με την δυνατότητα της μπαταρίας. Ο συσσωρευτής διατηρείται φορτισμένος με τη βοήθεια μετασχηματιστή τάσης και 6 παλμικό συνήθως ανορθωτή που δημιουργούν τα κατάλληλα χαρακτηριστικά ρεύματος ώστε η μπαταρία να τροφοδοτηθεί σωστά και να είναι σε ετοιμότητα σε περίπτωση αστάθειας τάσης τροφοδοσίας είτε ολικής διακοπής. Είναι κατανοητό ότι σε οποιαδήποτε συσκευή μετέχουν ηλεκτρονικά ισχύος, μετατροπείς και μετασχηματιστές εγείρεται το ζήτημα της γένεσης των αρμονικών. Αναλογιζόμενοι ότι όλο και περισσότερο υπάρχει ανάγκη διαμόρφωσης χαρακτηριστικών ρεύματος, το πρόβλημα των αρμονικών αυξάνεται συνεχώς και η ορθή αντιμετώπιση του αποτελεί πρόκληση.

6 Επιπτώσεις αρμονικών παραμορφώσεων στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό

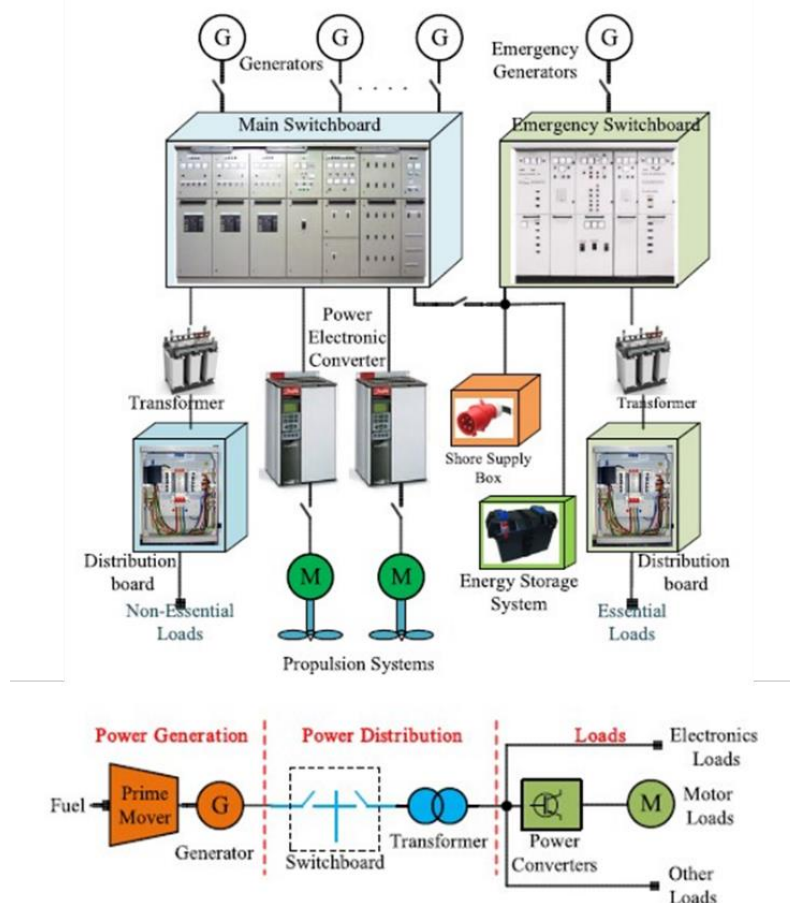
Οι αρμονικές παραμορφώσεις αποτελούν ένα πρόβλημα ποιότητας ισχύος, που αποτελεί όλο και μεγαλύτερο πρόβλημα στους κατασκευαστές ηλεκτρολογικού εξοπλισμού πλοίων, στα ναυπηγεία και τους νηογνώμονες λόγω της αύξησης των μη γραμμικών φορτίων στα πλοία αλλά και των προσπαθειών για πλήρη εξηλεκτρισμό του πλοίου. Οι αρμονικές παραμορφώσεις των κυματομορφών ρεύματος, δημιουργούνται από μη γραμμικά φορτία τα οποία αλληλοεπιδρούν με τη σύνθετη αντίσταση του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος του πλοίου και δημιουργούν παραμορφώσεις και στις κυματομορφές της τάσης. Στην περίπτωση που αυτές οι παραμορφώσεις ξεπεράσουν συγκεκριμένα όρια που έχουν καθοριστεί από τους νηογνώμονες, μπορούν να δημιουργήσουν υπερθέρμανση στους ασύγχρονους και σύγχρονους κινητήρες του πλοίου, στους μετασχηματιστές, στις καλωδιώσεις κτλ. Στα συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών μπορούν να προκαλέσουν απώλεια δεδομένων και μνήμης και να δημιουργήσουν πρόβλημα στις ηλεκτρονικά ελεγχόμενες διεργασίες. Οι υπερθερμάνσεις των συσκευών έχουν ως αποτέλεσμα τη διακοπή λειτουργίας λόγω κάποιου συστήματος προστασίας από υπερθέρμανση, και την μείωση του προσδόκιμου χρόνου λειτουργίας της συσκευής [18].

Η υπερβολική θερμότητα στον εξοπλισμό όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η γήρανση των εξαρτημάτων, η μείωση χωρητικότητας των πυκνωτών, η δυσλειτουργία συσκευών προστασίας και μετρήσεων, η μείωση του συντελεστή ισχύος και συνεπώς η μείωση της αποδοτικότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου εξαιτίας των αυξημένων απωλειών λόγω αρμονικών είναι μερικές από τις κύριες επιπτώσεις των αρμονικών παραμορφώσεων στα συστήματα δημιουργίας και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αρμονικές παραμορφώσεις επίσης αυξάνουν το οικονομικό κόστος των ηλεκτρικών συστημάτων, αυξάνοντας τις απώλειες ενέργειας και την πρόωρη γήρανση του εξοπλισμού. Η απώλεια ενέργειας λόγω αρμονικών παραμορφώσεων μπορεί να εκτιμηθεί με διάφορες μεθόδους αλλά ιδιαίτερα δύσκολα να μετρηθεί. Προφανώς η διαφορά μεταξύ της παραγόμενης ενέργειας, με την ενέργεια που καταναλώθηκε θεωρείται ως απώλεια ενέργειας.

6.1 Ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη – Γεννήτριες

Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στα πλοία ή στις ναυτιλιακές εφαρμογές (πλωτές εξέδρες) έχουν ιδιαίτερα έντονα φαινόμενα αρμονικών παραμορφώσεων στις κυματομορφές τάσης και ρεύματος λόγω ότι η σύνθετη αντίσταση τους έχει 3 ή 4 φορές μεγαλύτερη τιμή από εκείνη των μετασχηματιστών για παράδειγμα. Ο κύριος αντίκτυπος των κυματομορφών τάσης και ρεύματος είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του μηχανήματος λόγω των αυξημένων απωλειών σιδήρου και χαλκού. Αυτές οι απώλειες εξαρτώνται από την συχνότητα περιστροφής και αυξάνονται με τις αυξημένες αρμονικές στο σύστημα. Με σκοπό τη μείωση της αύξησης της θερμοκρασίας λόγω των αρμονικών, οι γεννήτριες που τροφοδοτούν μη γραμμικά φορτία είναι απαραίτητο να διαστασιολογηθούν σωστά. Η

φόρτιση των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών με μη γραμμικά φορτία αυξάνει τις τοπικές θερμοκρασίες των κινούμενων εξαρτημάτων λόγω στρεπτικών ταλαντώσεων και δονήσεων. Οι στρεπτικές ταλαντώσεις και οι δονήσεις που δημιουργούνται ιδιαίτερα συχνά φθείρουν τα ρουλεμάν των αξόνων και μπορούν να οδηγήσουν ακόμη και σε αστοχία της κατασκευής. Ακόμη η παραμόρφωση στην κυματομορφή τάσης στο κύκλωμα τροφοδοσίας του συστήματος διέγερσης μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στο ρυθμιστή τάσης. Οι υπερβολικές αρνητικές τιμές ρεύματος είναι ικανές να συμβάλλουν και στη δημιουργία ενός προβλήματος ποιότητας ισχύος που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, αυτό της αστάθειας-ανισορροπίας τάσης. Τα παραπάνω προβλήματα στις γεννήτριες αυξάνονται στις περιπτώσεις που γίνεται χρήση γεννήτριας άξονα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε στην περίπτωση του πλήρους ηλεκτρικού πλοίου. Στην περίπτωση της γεννήτριας άξονα, όταν αυτή λειτουργεί, χρησιμοποιεί ως μέσο κίνησης τον κύριο άξονα της προπέλας του πλοίου. Όμως ο κύριος άξονας δουλεύει σε ένα εύρος στροφών και η συχνότητα του ρεύματος εξόδου της γεννήτριας δεν είναι σταθερή. Αυτό λύνεται με τη χρήση του DC link δηλαδή μια ηλεκτρονική συσκευή ισχύος που περιλαμβάνει έναν ανορθωτή σε σειρά με έναν μετατροπέα (ΣΡ-ΕΡ) –(inverter) , και πετυχαίνει έξοδο ρεύματος μιας σταθερής συχνότητας. Όμως η μετατροπή ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στο DC link προκαλεί προβλήματα ποιότητας ισχύος στο ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου. [19]



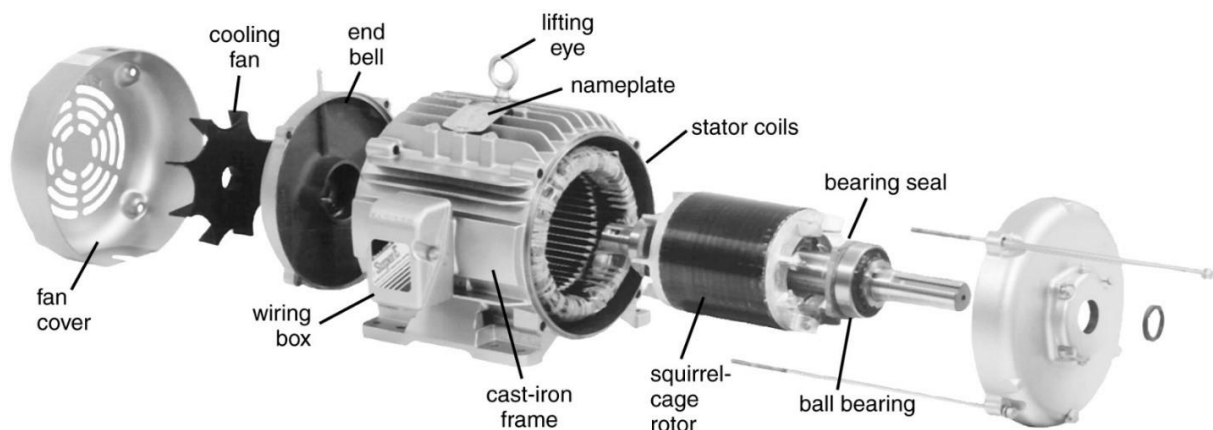
Εικόνα 6- 1. Σχεδιάγραμμα ηλεκτρικού συστήματος πλοίου με ηλεκτρική πρόωση.
(IEEE Access , Dinesh Kumar)

Την τελευταία δεκαετία έχουν γίνει σημαντικές εξελίξεις στην σχεδίαση και εφαρμογή συστημάτων πλήρους ηλεκτρικής πρόωσης πλοίων. Τέτοιες εφαρμογές συναντώνται σε κρουαζιερόπλοια, παγοθραυστικά , πλοία που διαθέτουν Dynamic Positioning (DP) και πλοία

μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG). Είναι λογικό ότι το φορτίο των γεννητριών των πλοίων αυτών αυξάνεται ιδιαίτερα καθώς εκτός από τα υπόλοιπα φορτία καλούνται να επιφορτιστούν και τα φορτία των ηλεκτροκινητήρων πρόωσης. Φυσικά έχει γίνει κατάλληλη διαστασιολόγηση των γεννητριών στο στάδιο της προμελέτης, όμως η μεγάλης ισχύος μετατροπείς (power electronic converters) που χρησιμοποιούνται για την κατάλληλη τροφοδοσία των κινητήρων πρόωσης (βλ. **Εικ.6.1**) επιφορτίζουν τις γεννήτριες και το δίκτυο με ιδιαίτερα μη γραμμικά φορτία.

6.2 Επαγωγικοί κινητήρες

Μη ημιτονοειδής κυματομορφές τάσης που τροφοδοτούν επαγωγικούς κινητήρες μπορούν να προκαλέσουν αυξημένες απώλειες ενέργειας, υπερθέρμανση, παλμικές ροπές, ανεπιθύμητες ταλαντώσεις και θόρυβο. Η υπερθέρμανση προκαλείται λόγω πρόσθετων απωλειών χαλκού και σιδήρου (απώλειες ρεύματος και υστέρησης) στο τύλιγμα του στάτη, στο κύκλωμα του δρομέα και στα τυλίγματα του δρομέα. Απώλειες σιδήρου μπορούν να υπάρξουν και σε επαγωγικό κινητήρα με στρεβλωμένο δρομέα (skewed rotor) λόγω των υψηλών συχνοτήτων των επαγόμενων ρευμάτων και των ταχέων μεταβολών μαγνητικής ροής (λόγω φαινομένου υστέρησης) στον στάτη και στον δρομέα. Ο στάτης, ο δρομέας και τα τυλίγματα καθώς και άλλες κατασκευαστικές λεπτομέρειες ενός ασύγχρονου 3φασικού κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος διαφάνονται στην **Εικ. 6.2**.



Εικόνα 6- 2. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες ηλεκτρικού επαγωγικού κινητήρα.
(electrical academia.com)

Οι αυξημένες θερμοκρασίες ακολούθως μπορούν να υποβαθμίσουν τα επίπεδα λίπανσης των εδράνων και να οδηγήσουν ακόμα και στην αστοχία τους. Ένας ηλεκτρικός κινητήρας με κατεστραμμένο έδρανο είναι ιδιαίτερα δύσκολο να ανταπεξέλθει στις ροπές που είναι κατασκευασμένος να αντιμετωπίσει. Σε περίπτωση που τα έδρανα δεν είναι μονωτικά (ειδικός τύπος), αρμονικά ρεύματα μπορούν να διαφύγουν σε οτιδήποτε έρχεται σε επαφή με αυτά (άξονας, καπάκι κτλ). Η υπερθέρμανση έχει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη διάρκεια ζωής ενός επαγωγικού κινητήρα. Για αύξηση 10°C θερμοκρασίας πάνω από την ονομαστική θερμοκρασία, η διάρκεια ζωής της μόνωσης του κινητήρα μπορεί να μειωθεί έως και 50%. Οι περιελίξεις του κινητήρα αν η μόνωση είναι κατηγορίας Β ή χαμηλότερη είναι ευαίσθητες στα υψηλά επίπεδα του dv/dt ρυθμού αύξησης τάσης.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές μελέτες που ασχολούνται με τη μείωση απωλειών ενός επαγωγικού κινητήρα καθώς η κατανάλωση τους είναι μεγάλο ποσοστό της κατανάλωσης ενέργειας τόσο στα πλοία όσο και στα χερσαία δίκτυα. Όπως είναι λογικό η μείωση απωλειών αυξάνει την απόδοση ενός επαγωγικού κινητήρα. Η απόδοση ενός επαγωγικού κινητήρα μπορεί να αυξηθεί με βελτίωση πληθώρας παραμέτρων του και πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος από το δίκτυο. Πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να προτείνουν μεθόδους εκτίμησης σημαντικών παραμέτρων για επαγωγικούς κινητήρες όπως το ρεύμα, τις απώλειες και το συντελεστή απόδοσης όμως δεν λαμβάνουν υπόψη τις αρμονικές παραμορφώσεις και την ποιότητα ισχύος που τροφοδοτεί τον εκάστοτε επαγωγικό κινητήρα [20], [21], [22]. Βέβαια παρόλο που τα σημαντικά αποτελέσματα χαμηλής ποιότητας ισχύος είναι γνωστά, αυτά πολλές φορές αγνοούνται. Ωστόσο ποικίλες έρευνες καλύπτουν τόσο την ανάλυση των προβλημάτων που προκύπτουν από την παραμόρφωση τάσης τροφοδοσίας ενώ άλλες αντιμετωπίζουν τα ανωτέρω προβλήματα που αναφέρθηκαν, δηλαδή την αύξηση θερμοκρασίας και την μείωση διάρκειας ζωής επαγωγικών κινητήρων που λειτουργούν σε δίκτυο «μολυσμένο» με αρμονικές παραμορφώσεις [23]. Συνήθως έρευνες βασισμένες σε πειραματικές διαδικασίες εισάγουν τις αρμονικές στο υπό μελέτη σύστημα με τη χρήση προγραμματιζόμενων τροφοδοτικών [24], [25].

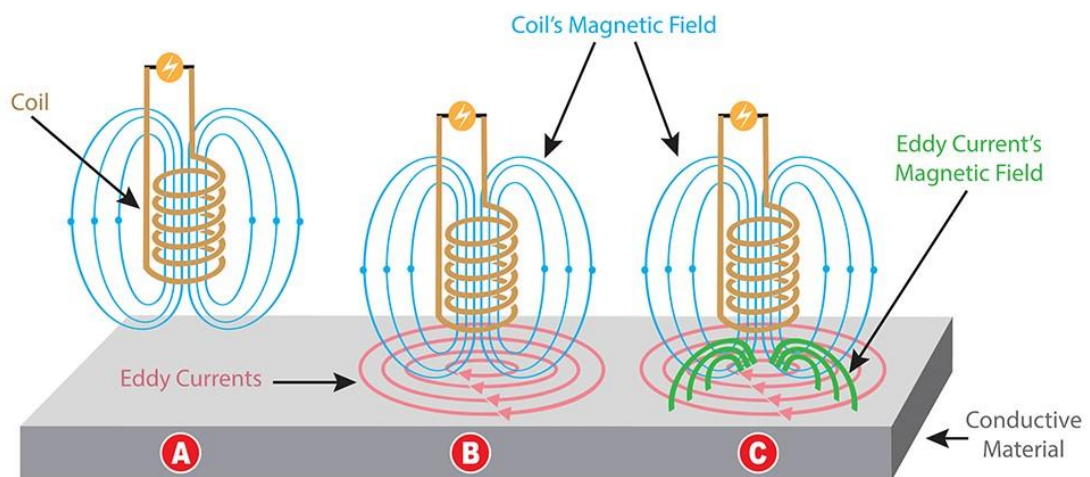
Άλλες μελέτες αναλύουν την απόδοση των ηλεκτρικών κινητήρων παρουσία αρμονικών παραμορφώσεων. Ωστόσο προτείνεται η χρήση ενός ισοδύναμου κυκλώματος αντί της εφαρμογής της αρχής της υπέρθεσης ισοδύναμου κυκλώματος για κάθε επίπεδο αρμονικής παραμόρφωσης χωριστά. Όταν υπάρχουν αρμονικές στο κύκλωμα, δεν ενδείκνυται να ληφθεί υπόψη μια μοναδική τιμή παραμέτρου, όπως στις περιπτώσεις επαγωγικής αντίδρασης του στάτη και του δρομέα και της αντίστασης τους. Οι παράμετροι αυτοί ποικίλουν σημαντικά με τη συχνότητα, και είναι απαραίτητη η ανάλυση τους για κάθε διαφορετικό αρμονικό κύκλωμα [26], [27]. Σε μελέτη του 2015 οι συγγραφείς παρουσιάζουν μια έρευνα σχετικά με τις επιδράσεις αρμονικών παραμορφώσεων στη λειτουργία ενός επαγωγικού κινητήρα όταν αυτός τροφοδοτείται σε δίκτυο με παρουσία αρμονικών παραμορφώσεων και περιέχουν επίσης την ανάλυση για τον ισολογισμό της ενέργειας και των δονήσεων [28]. Τέλος εξετάζεται βιβλιογραφικά ένα ακόμη σημείο ανησυχίας, ειδικά όταν αυτό συμβαίνει σε ένα μηχανοστάσιο πλοίου. Αυτό είναι οι δονήσεις και ο θόρυβος που προκαλούνται σε επαγωγικό κινητήρα από την ύπαρξη αρμονικών παραμορφώσεων [29].

6.3 Μετασηματιστές

Οι μετασηματιστές που χρησιμοποιούνται στα πλοία εκτός από πηγή αρμονικών παραμορφώσεων λόγω της μη γραμμικής φύσης του πυρήνα τους, αποτελούν εξοπλισμό που πλήττεται από αυτές. Πιο συγκεκριμένα οι παραμορφώσεις κυματομορφής σε ρεύματα και τάσεις οδηγούν σε αύξηση απωλειών ισχύος και αύξηση της θερμοκρασίας στις περιελίξεις του μετασηματιστή. Λόγω των παραπάνω, στους μετασηματιστές που τροφοδοτούν μη γραμμικά φορτία θα πρέπει να γίνεται υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος τους με βάση τις αρμονικές και την ονομαστική απώλεια ρεύματος των περιελίξεων και του ρεύματος του φορτίου [30]. Συχνή λύση αποτελεί η χρήση μετασηματιστών με συντελεστή K (K- Factor Transformers) όπου θα γίνει παρουσίαση παρακάτω.

Η επίδραση των αρμονικών ρευμάτων στις αρμονικές συχνότητες προκαλεί αύξηση στις απώλειες πυρήνα λόγω των αυξημένων απωλειών σιδήρου (δινορεύματα και φαινόμενο

υστέρησης) στους μετασχηματιστές. Οι απώλειες λόγω δινορευμάτων (Eddy current loss) ή ρευμάτων Φουκώ δημιουργούνται από βρόχους ηλεκτρικού ρεύματος που επάγονται εντός αγωγών από ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο στον αγωγό, λόγω του νόμου του Faraday της επαγωγής. Δινορεύματα ρέουν σε κλειστούς βρόχους εντός αγωγών σε επίπεδα κάθετα προς το μαγνητικό πεδίο. Στους μετασχηματιστές τα δινορεύματα είναι αυτά που κυκλοφορούν στις περιελίξεις του πυρήνα ως αποτέλεσμα των ηλεκτροκινητικών δυνάμεων (βλέπε **emf** Κεφ.5) που προκαλούνται από τις μεταβολές της μαγνητικής ροής. Οι απώλειες λόγω δινορευμάτων γίνονται ιδιαίτερα σημαντικές στην περίπτωση της ύπαρξης αρμονικών παραμορφώσεων. Πιο συγκεκριμένα αυξάνουν εκθετικά τις απώλειες λόγω δινορευμάτων, αναπτύσσοντας τοπικά υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας για τον μετασχηματιστή.



Εικόνα 6- 3. Επεξήγηση φαινομένου δημιουργίας δινορευμάτων και του αντίστοιχου μαγνητικού τους πεδίου.
(the seven group.com)

Ένας τρόπος καθορισμού της ικανότητας των μετασχηματιστών να τροφοδοτούν ρεύμα μη γραμμικά φορτία (συνεπώς και της αντοχής τους στις αρμονικές παραμορφώσεις) είναι η εισαγωγή του συντελεστή K (K -factor) στα τεχνικά τους χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα ένας συντελεστής K ίσος με τη μονάδα σημαίνει ότι δεν υπάρχουν αρμονικές ενώ η παρουσία τους υποδηλώνεται με συντελεστή K μεγαλύτερο της μονάδας. Ο συντελεστής προκύπτει ως το άθροισμα των γινομένων των τετραγώνων των αρμονικών ρευμάτων προς το τετράγωνο του αντίστοιχου αριθμού αρμονικής συχνότητας.

$$K = \sum_{n=1}^n \left[\frac{I_n}{I_{RMS}} \right]^2 n^2 \quad (6.1)$$

Όπου I_1 είναι το θεμελιώδες ρεύμα, I_2 το αρμονικό ρεύμα, I_n : το νιοστό αρμονικό ρεύμα και I_{RMS} ενεργός τιμή ρεύματος και δίνεται από τον τύπο:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i I_i^2} \quad (6.2)$$

Καταληκτικά η ύπαρξη αρμονικών τάσεων στους μετασχηματιστές οδηγούν στα παρακάτω :

- Αυξημένες διηλεκτρικές τάσεις στις μονώσεις των καλωδίων και ως απότοκο μείωση της διάρκειας ζωής της μόνωσης.
- Συντονισμό μεταξύ της αντίδρασης των τυλιγμάτων περιέλιξης και της χωρητικότητας του πυκνωτή τροφοδοσίας.
- Ηλεκτροστατική παρεμβολή στα κυκλώματα επικοινωνίας (παρεμβολές μαγνητικών πεδίων).
- Αυξημένες θερμοκρασίες λειτουργίας και μειωμένη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με την κατάσταση της τροφοδοσίας με καθαρό ημίτονο ρεύματος.
- Μείωση συντελεστή απόδοσης , μικρότερη ικανότητα μετασχηματισμού και μειωμένο συντελεστή λειτουργίας

6.4 Ναυτικά καλώδια-αγωγοί (skin cable effect)

Όπως είναι γνωστό τα καλώδια είναι μονωμένοι αγωγοί που χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου. Υπάρχουν πολλοί τύποι καθώς οι αγωγοί αυτοί καλύπτουν πληθώρα εφαρμογών. Ωστόσο η μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος γίνεται με κόστος, αυτό των απωλειών Joule. Η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που διαχέεται ως θερμότητα δίνεται από τον τύπο :

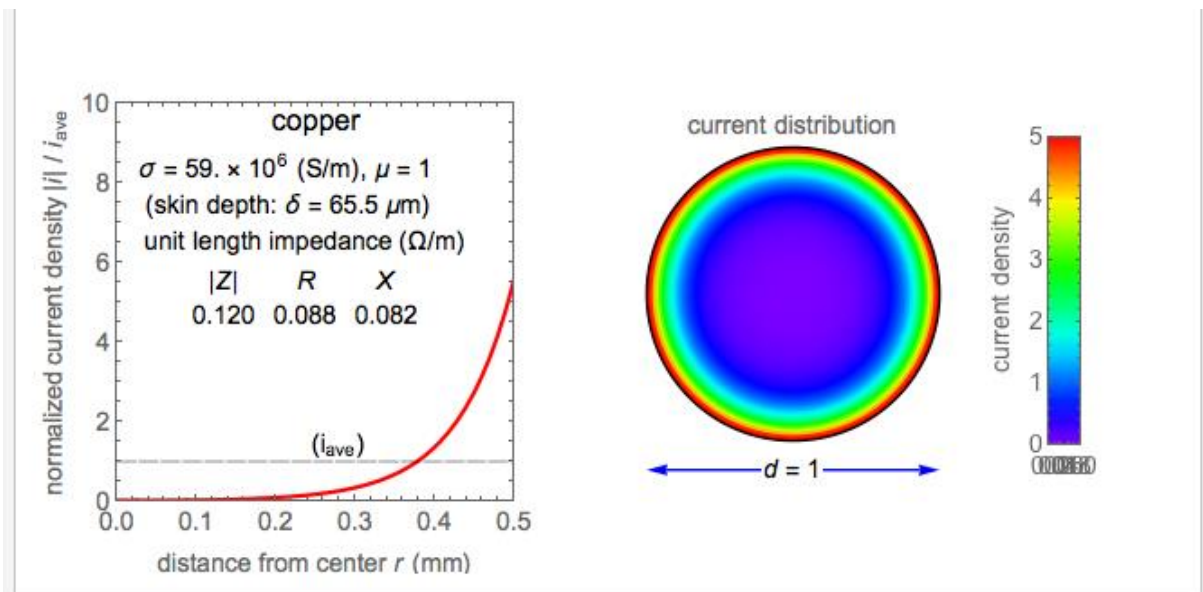
$$Q = I^2 * R * t \quad (6.3)$$

Όπου I^2 η ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος, R η ωμική αντίσταση του αγωγού και t ο χρόνος διέλευσης των ηλεκτρονίων μέσα από τον αγωγό.

Οι απώλειες των καλωδίων αυξάνονται σημαντικά όταν οι αγωγοί αυτοί μεταφέρουν αρμονικά ρεύματα λόγω των αυξημένων απωλειών $I^2 * R$, της αυξημένης αντίστασης του καλωδίου λόγω αρμονικών, του φαινομένου της επιδερμίδας (skin cable effect) και του φαινομένου της γειτνίασης (proximity effect). Η αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από τη συχνότητα του ρεύματος που μεταφέρεται. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές εργασίες που υπολογίζεται η ικανότητα μεταφοράς ρεύματος που περιέχει αρμονικές ρεύματος για συγκεκριμένους τύπους καλωδίων. Ο υπολογισμός της ικανότητας μεταφοράς γίνεται μέσω του υπολογισμού ενός συντελεστή απομείωσης (derating factor), ο οποίος εκφράζει τη μείωση της ικανότητας μεταφοράς ρεύματος λόγω της ύπαρξης αρμονικών και εξαρτάται από τη συνολική αρμονική παραμόρφωση ρεύματος. Το φαινόμενο της γειτνίασης (proximity effect) οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν γύρω τους οι αγωγοί και το οποίο παραμορφώνει την κατανομή των ηλεκτρονίων μέσα στον αγωγό, ωστόσο σε κυκλικούς αγωγούς το φαινόμενο αυτό είναι πολύ περιορισμένο συγκριτικά με το φαινόμενο της επιδερμίδας.

Το φαινόμενο της επιδερμίδας (skin effect) είναι η τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος (EP) να κατανέμεται εντός ενός αγωγού έτσι ώστε η πυκνότητα ρεύματος να είναι μεγαλύτερη κοντά στην επιφάνεια του αγωγού και να μειώνεται εκθετικά προς το κέντρο του αγωγού. Αυτό το φαινόμενο περιορίζει την αγωγή επιφάνεια μιας διατομής, αυξάνοντας την αντίσταση του αγωγού συγκριτικά με την περίπτωση που ο αγωγός διαρρέονταν από συνεχές ρεύμα που θα εκμεταλλευόταν όλη τη διαθέσιμη αγωγή διατομή. Όπως αναφέρεται εκτενώς στο **Κεφ.4** στην ενότητα **4.1** , οι αρμονικές είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας. Συνεπώς αφού τα αρμονικά ρεύματα διαρρέουν τους αγωγούς

με μεγαλύτερες συχνότητες από τη θεμελιώδη τότε η αντίσταση του αγωγού αυξάνεται και σύμφωνα με το φαινόμενο της επιδερμίδας έχουμε εικονική μείωση της διαθέσιμης αγωγίμης διατομής.



Εικόνα 6- 4. Προσομοίωση πυκνότητας ρεύματος χάλκινου αγωγού με εκθετική μείωση της διαθέσιμης αγωγίμης διατομής προς το κέντρο του, λόγω του φαινομένου skin effect.

Με σκοπό τη διατήρηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του καλωδίου στα επιθυμητά επίπεδα πρέπει κατά την επιλογή της κατάλληλης διατομής να ληφθούν επιπλέον παράγοντες υπόψη. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι στη βιομηχανία που καθορίζουν την ελάχιστη διατομή αγωγού για προστασία έναντι σε ρεύματα υπερφόρτισης του αγωγού, λαμβάνοντας υπόψη το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος φόρτισης του αγωγού και τον συντελεστή C_f (harmonic rating factor) που εμφανίστηκε το 2008 για αγωγούς που περιέχουν σημαντικό αρμονικό περιεχόμενο ρευμάτων. Κιόλας από το 1957 οι Neher και McGrath παρέδωσαν ένα σύνολο εξισώσεων που χρησιμοποιεί πληθώρα παραγόντων με σκοπό να προβλέψει την προκύπτουσα αγωγή ικανότητα αγωγού σε συνθήκες αρμονικής παραμόρφωσης. Οι Melioroulos και Martin πρότειναν την αναπροσαρμογή των εξισώσεων των Neher-McGrath για τον υπολογισμό των επιπλέον απωλειών που προκαλούνται στα καλώδια από τις αρμονικές ρεύματος. Όμως λόγω του στόχου τους για μια πιο απλοποιημένη εξίσωση, το μοντέλο που πρότειναν μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στην ειδική περίπτωση του συμμετρικού τριφασικού συστήματος και σε άλλες περιπτώσεις πρέπει να γίνει χρήση των κλασικών εξισώσεων των Neher-McGrath. Όλος ο αρμονικός αντίκτυπος που περιγράφεται ανωτέρω είναι δυνατό να μοντελοποιηθεί σε όρους αντίστασης αγωγού με τις παρακάτω εξισώσεις.

Όταν σε ένα δίκτυο υπάρχουν αρμονικές παραμορφώσεις τότε η αντίσταση των αγωγών δίνεται από τους τύπο:

$$Z(h) = R + j * h * X_L \quad (6.4)$$

Όπου :

$Z(h)$: είναι η σύνθετη αντίσταση του αγωγού (συνδυασμός όρων αντίστασης)

R : είναι η ωμική αντίσταση του αγωγού (αντίσταση της ροής των ηλεκτρονίων στο κύκλωμα)

X_L : είναι η επαγωγική αντίδραση του αγωγού (αδράνεια έναντι της ροής ρεύματος)
για πηνίο έχουμε : $Z = 0 + j\omega L$ (L: συντελεστής αυτεπαγωγής πηνίου)
για πυκνωτή έχουμε: $Z = 0 + \frac{1}{j\omega C}$ (C: χωρητικότητα του πυκνωτή)

j : φανταστική μονάδα

h: ακέραιος θετικός αριθμός αρμονικής (harmonic order)

Παρατηρώντας την εξίσωση (6.3) είναι φανερό ότι ο αντίκτυπος της αρμονικής παραμόρφωσης στις κυματομορφές των πραγματικών και φανταστικών στοιχείων της μιγαδικής ισχύος S που δίνεται από την εξίσωση (2.10) έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στην άεργο ισχύ. Αυτό συμβαίνει καθώς ο επαγωγικός όρος της σύνθετης αντίστασης αυξάνεται με την αύξηση του βαθμού της αρμονικής h αφού ο επαγωγικός όρος εξαρτάται από την συχνότητα όπως περιγράφεται από την κάτωθι εξίσωση:

$$X_L = 2\pi f_h L \quad (6.5)$$

Ως εκ τούτου, με την παρουσία αρμονικών παραμορφώσεων στο δίκτυο και λαμβάνοντας υπόψιν το φαινόμενο της επιδερμίδας (skin effect) οι σύνθετες αντιστάσεις των ηλεκτροπαραγωγών στοιχείων, των μετασχηματιστών και των καλωδίων εκφράζονται προσεγγιστικά από τις εξισώσεις (6.6),(6.7),(6.8):

$$\text{Σύγχρονη γεννήτρια} \quad Z(h) = \sqrt{h} * R + j * h * X_L \quad (6.6)$$

$$\text{Μετασχηματιστής} \quad Z(h) = h * (R + j * X_L) \quad (6.7)$$

$$\text{Αγωγός} \quad Z(h) = \sqrt{h} * (R + j * X_L) \quad (6.8)$$

6.5 Συστήματα προστασίας έναντι ηλεκτρικών σφαλμάτων

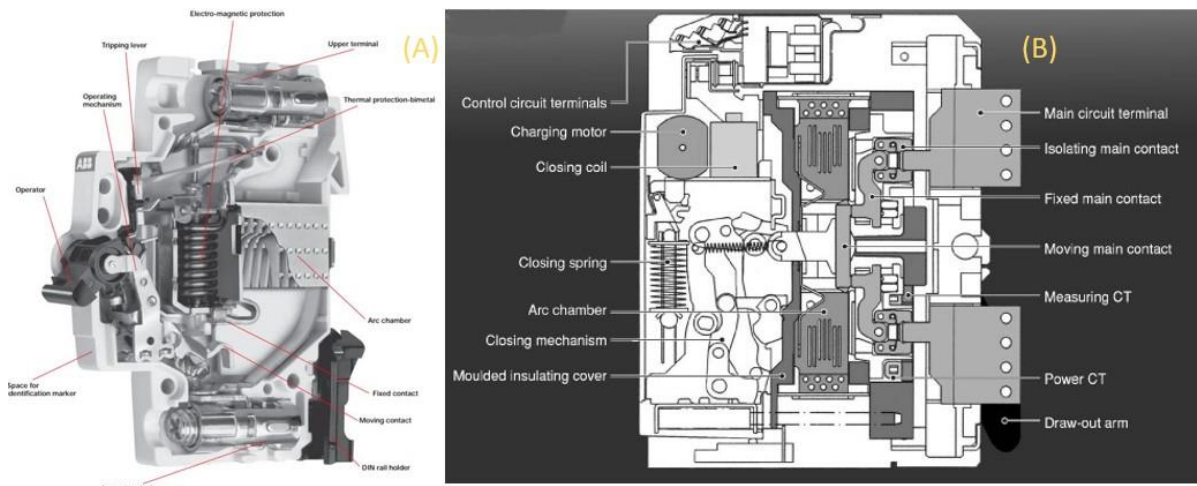
Οι αρμονικές παραμορφώσεις συχνά επιδρούν στον τρόπο λειτουργίας των συσκευών ασφαλείας του πλοίου. Ένα ηλεκτρικό σφάλμα μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου αν αυτό δεν αντιμετωπιστεί από κάποιο προμελετημένο σύστημα προστασίας. Αν το σύστημα προστασίας δεν λειτουργήσει μπορεί να υπάρξει διακοπή ρεύματος (μόνιμη ή προσωρινή) , πυρκαγιά , ηλεκτροπληξία σε ανθρώπους κτλ. Για να αποφευχθούν τέτοιου είδους συνέπειες και δυσάρεστες καταστάσεις, το ηλεκτρολογικό σύστημα του πλοίου είναι εξοπλισμένο με συστήματα προστασίας τα οποία έχουν χαρακτηριστικά όπως ευαισθησία στο επικείμενα σφάλματα, επιλεκτικότητα στην απομόνωση του συγκεκριμένου εσφαλμένου τμήματος, υπηρεσιακή ταχύτητα ώστε να υπάρχει γρήγορη ανταπόκριση και αξιοπιστία ώστε να διασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος. Στην **Εικ.6.1** διαφαίνεται ότι ο κεντρικός πίνακας διανομής (Main Switchboard) είναι η ενδιάμεση εγκατάσταση του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας από τις γεννήτριες του πλοίου στους καταναλωτές.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό κάθε τύπος σφάλματος να απομονώνεται από το υπόλοιπο ηλεκτρικό σύστημα και να μην μπορεί να διαδοθεί μέσω του κεντρικού πίνακα διανομής στους καταναλωτές. Σε περίπτωση που δεν μπορεί να επιτευχθεί η απομόνωση των συστημάτων, τότε ακόμη και ένα μικρό βραχυκύκλωμα θα ήταν ικανό να προκαλέσει διακοπή ρεύματος σε όλο το πλοίο. Για τους παραπάνω λόγους πληθώρα συσκευών

ασφαλείας εγκαθίστανται στον κεντρικό πίνακα διανομής και στους υπόλοιπους ηλεκτρικούς υπό-πίνακες διανομής. Αυτές οι συσκευές ασφαλείας εξασφαλίζουν ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία των μηχανημάτων και προστασία του πληρώματος του πλοίου από ηλεκτρικές βλάβες. Οι πιο κύριες συσκευές ασφαλείας έναντι αυξημένων ρευμάτων είναι:

- **Αυτόματες ασφάλειες (MCCB, ACB):** Είναι διακόπτες κυκλώματος οι οποίοι ενεργοποιούνται αυτόματα και διακόπτουν την ωμική συνέχεια στο κύκλωμα με σκοπό τον περιορισμό διάδοσης μιας ηλεκτρικής ανωμαλίας. Στα ηλεκτρικά συστήματα πλοίου συχνά χρησιμοποιούνται Moulded Case Circuit Breakers (MCCB) και Air Circuit Breakers (ACB), τα οποία είναι ιδιαίτερα κοινά προϊόντα και σε γενικές γραμμές επιτελούν τις ίδιες εργασίες. Οι MCCBs έχουν μικρότερο όγκο και κόστος και διατίθενται έως ικανότητα διακοπής 4000 A αλλά γίνονται λιγότερο οικονομικά αποδοτικοί για τιμές 2000 A και άνω. Οι ACBs είναι ακριβότεροι, έχουν ταχύτατη αντίδραση σε σφάλματα του δικτύου αλλά είναι αρκετά ογκώδης.
- **Τηκόμενες ασφάλειες:** Αποτελούνται από εύτηκτο μέταλλο σε ένα μονωτικό περίβλημα και είναι ο απλούστερος τύπος ασφαλειών που χρησιμοποιείται ευρέως για προστασία από βραχυκύκλωμα. Το ρεύμα που διαρρέει το εύτηκτο μέταλλο είναι προϋπολογισμένο έτσι ώστε να αντέχει μέχρι μια ορισμένη τιμή ρεύματος. Προφανώς άμα η ασφάλεια επιτελέσει το έργο της χρειάζεται αντικατάσταση με νέα.
- **Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης (overcurrent relays):** Με τον όρο υπερένταση εννοούμε μια μικρή αύξηση ρεύματος πάνω από το μέγιστο φορτίο λειτουργίας. Οι υπερεντάσεις ανιχνεύονται από τους ηλεκτρονόμους (ρελέ) με μια προκαθορισμένη καθυστέρηση χρόνου ώστε να ταιριάζει με το κύκλωμα που έχουν εγκατασταθεί. Τα ρεύματα βραχυκυκλώματος ανιχνεύονται και καθαρίζονται από τα παραπάνω στοιχεία που αναλύσαμε. Παρόλο που υπάρχουν αρκετοί τύποι τέτοιων ηλεκτρονόμων, η βασική αρχή λειτουργίας είναι η ίδια. Υπάρχει ένα πηνίο που όταν διαρρέεται από το προκαθορισμένο ρεύμα το μαγνητικό πεδίο και η σχετική δύναμη που δημιουργείται από το πηνίο δεν είναι αρκετά να κουνήσουν την επαφή. Όταν όμως το ρεύμα αυξηθεί, αυξάνεται και η μαγνητική δύναμη και τελικά ανοίγει το κύκλωμα.

Στην **Εικ.6.5** που ακολουθεί διαφαίνονται κατασκευαστικές λεπτομέρειες από του πιο συχνά χρησιμοποιούμενους διακόπτες στον ηλεκτρικό σύστημα ενός πλοίου.



Εικόνα 6- 5. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες αυτόματων διακοπών (A) MCCB από την εταιρία ABB . (B) ACB από την Terasaki. (ABB,Terasaki electric).

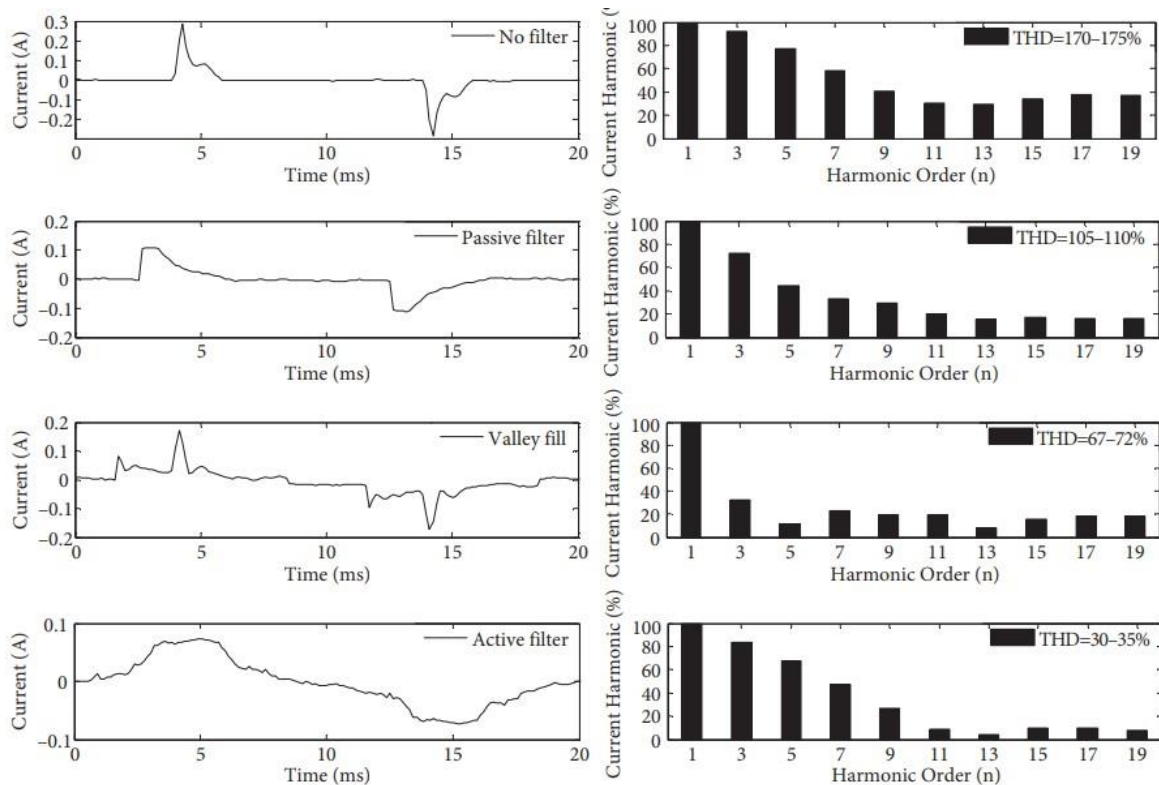
Η λειτουργία των ανωτέρω συσκευών προστασίας επηρεάζεται από την ύπαρξη αρμονικών παραμορφώσεων στο ρεύμα καθώς σύμφωνα με την Εξ.4.4 του κεφαλαίου 4 έχουμε την προσθήκη των αρμονικών όρων $\sum_{h=2}^{\infty} I_h \sqrt{2} \cos(h\omega_1 t + \theta_{i,h})$. Η πλειοψηφία των διακοπών χρησιμοποιεί είτε διμεταλλικούς μηχανισμούς που ανταποκρίνονται θερμικά στην αύξηση του ρεύματος είτε μηχανισμούς με πηνία που η αύξηση ρεύματος επιφέρει αύξηση μαγνητικής δύναμης. Υπό την παρουσία μη γραμμικών φορτίων, η τιμή rms ρεύματος θα είναι υψηλότερη από την περίπτωση των γραμμικών φορτίων. Σε περίπτωση που δεν έχει γίνει σχετική προ ρύθμιση ο διακόπτης πιθανόν να ενεργοποιηθεί πρόωρα ενώ μεταφέρει μη γραμμικό ρεύμα. Ωστόσο στην περίπτωση σοβαρού βραχυκυκλώματος το ρεύμα των αρμονικών θα είναι πολύ μικρό σε σχέση με το ρεύμα του σφάλματος. Η πτώση της ασφάλειας και συνάμα το άνοιγμα του κυκλώματος σε συνθήκες υπερέντασης ή βραχυκυκλώματος βασίζεται στο φαινόμενο Joule και διέπτεται από την **Εξ.6.3** . Όπως αναφέρθηκε, σε μη γραμμικά φορτία το ρεύμα rms θα είναι υψηλότερο από ότι σε γραμμικά φορτία επομένως, ίσως χρειαστεί μια ρύθμιση της ασφάλειας για να μην λειτουργήσει πρόωρα. Καταληκτικά οι τα δομικά στοιχεία των ασφαλειών που λειτουργούν σε κυκλώματα με αρμονικές παραμορφώσεις υποφέρουν από το φαινόμενο της επιδερμίδας (skin effect) και κυρίως από το φαινόμενο της γειννιάσης (proximity effect) που έχει ως αποτέλεσμα τη μη ομοιόμορφη κατανομή ρεύματος σε όλο το σώμα της ασφάλειας και την θερμική καταπόνηση των στοιχείων της.

Η παραμόρφωση κυματομορφής επηρεάζει την λειτουργία και των ηλεκτρονόμων προστασίας. Είναι ιδιαίτερα πιθανό να προκληθεί καθυστέρηση λειτουργίας ή ακόμα και μη κανονική λειτουργία του ρελέ λόγω μη γραμμικών φορτίων. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως υπάρχει μικρή επίδραση στην λειτουργία του ηλεκτρονόμου όταν υπάρχει σφάλμα ρεύματος (πχ. βραχυκύκλωμα). Ωστόσο για μικρές βλάβες όπως η υπερένταση (λίγο πάνω από το φορτίο λειτουργίας) , το ρεύμα παραμόρφωσης μπορεί να είναι σημαντικός παράγοντας για την εσφαλμένη λειτουργία. Κάθε ρελέ αποδίδει διαφορετικά υπό την παρουσία αρμονικών παραμορφώσεων και διαφορετικά μοντέλα κατασκευαστή του ίδιου όμως τύπου ηλεκτρονόμου αποδίδουν πάλι διαφορετικά. Μεταβάλλοντας την φασική γωνία μεταξύ της θεμελιώδους και των αρμονικών συνιστωσών της κυματομορφής μπορεί να αλλάξει σημαντικά η ανταπόκριση του ηλεκτρονόμου.

6.6 Φωτισμός

Ιδιαίτερα εύκολο να παρατηρηθούν είναι οι επιδράσεις των αρμονικών παραμορφώσεων στο φωτισμό του πλοίου τόσο στη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων όσο και στην απόδοση. Οι λάμπες φθορισμού έχουν μείωση της διάρκειας ζωής τους όταν λειτουργούν σε δίκτυο με παραμόρφωση τάσης καθώς απαιτούν αυστηρά την τάση λειτουργίας τους. Σε περίπτωση που η rms τάση είναι κάτω από την προκαθορισμένη τάση λειτουργίας εξαιτίας της αρμονικής παραμόρφωσης, η αυξημένη θερμοκρασία λειτουργίας του λαμπτήρα θα μειώσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής της. Είναι συχνό φαινόμενο η προσθήκη πυκνωτών για διόρθωση του συντελεστή ισχύος στο φωτισμό. Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος σε συγκρότημα λαμπτήρων φωτισμού υλοποιείται συνδέοντας τους μισούς λαμπτήρες με χωρητικά ballast (ballast που ο πυκνωτής αντιστάθμισης παρουσιάζει διπλάσια αντίσταση από το πηνίο) και τους υπόλοιπους με επαγωγικά ballast χωρίς πυκνωτή αντιστάθμισης. Η ύπαρξη πυκνωτών και ηλεκτρονικών ballast μπορεί να προκαλέσουν πρόβλημα συντονισμού. Σε μελέτη του J.E.Kaufman παρουσιάζεται και επαληθεύεται πειραματικά ότι η λειτουργία λαμπτήρων στο 105% της προκαθορισμένης τάσης λειτουργίας, η διάρκεια ζωής του λαμπτήρα μειώνεται έως και 47%.

Η αυξημένη χρήση λαμπτήρων LED πλέον έχει επιφέρει από τη μια αύξηση των αρμονικών καθώς όπως προαναφέρθηκε οι λαμπτήρες LED αποτελούν πηγή ανώτερων αρμονικών και από την άλλη είναι συστήματα ιδιαίτερα ευαίσθητα στις διακυμάνσεις τάσεις που επιφέρουν οι παραμορφώσεις. Αυτός ο τύπος φωτισμού είναι φορτίο χωρητικού χαρακτήρα και η κυματομορφή ρεύματος του απέχει αρκετά από την ημιτονοειδή μορφή. Η χρήση μετατροπέων EP-ΣΡ για την διαμόρφωση των κατάλληλων χαρακτηριστικών που χρειάζονται οι λαμπτήρες επηρεάζουν ιδιαίτερα τη φύση του φορτίου τους. Ως αποτέλεσμα, ο συντελεστής ισχύος μειώνεται, καταναλώνεται αρκετή άεργος ισχύς, και αναπαράγονται και διανέμονται στο δίκτυο αρμονικές. Αυτά είναι απότοκο του γεγονότος ότι τα LEDs, δομικά στοιχεία των λαμπτήρων LED είναι ιδιαίτερα μη γραμμικά φορτία. Υπενθυμίζεται ότι κάθε μη γραμμικό στοιχείο που λειτουργεί σε ένα κύκλωμα προκαλεί παραμόρφωση της τρέχουσας κυματομορφής στο κύκλωμα. Σε αναλύσεις παραμορφωμένων σημάτων, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Fourier, αυτό μεταφράζεται στην ανάλυση ενός φάσματος στο οποίο, εκτός από τη θεμελιώδη συχνότητα (συμβατή με την παραμορφωμένη συχνότητα του συστήματος) εμφανίζονται συχνά εξαρτήματα του συστήματος με συχνότητες που είναι πολλαπλάσιες της θεμελιώδους συχνότητας. Στο κύκλωμα τροφοδοσίας των λαμπτήρων LED περιέχονται διατάξεις διόρθωσης του συντελεστή ισχύος, τα οποία λειτουργούν επίσης για την μείωση των παραμορφώσεων, δηλαδή για την μείωση των αρμονικών στο σύστημα. Ο βαθμός μείωσης των αρμονικών εξαρτάται από την ποιότητα και τεχνική εξέλιξη αυτών των κυκλωμάτων, όμως όπως είναι λογικό τα παραπάνω έχουν άρρηκτη σχέση και με το κόστος αυτών. Συχνά γίνεται η επιλογή φθηνότερων στοιχείων με όχι τόσο καλές παραμέτρους που στην αρχή δεν αποτελούν ανησυχητικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους επιφέρουν αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και αρνητικές επιπτώσεις για τις υπόλοιπες συσκευές του συστήματος, οι οποίες είναι παρόμοιες με αυτές που αναφέρουμε ανωτέρω. Ένα άλλο φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί είναι η άναρχη αντικατάσταση των παλαιών συμβατικών λαμπτήρων, με νέα συμπαγή φωτιστικά σώματα LED στις ίδιες φυσικά υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Η ελλιπής μελέτη και η δύσκολη εφαρμογή κυκλωμάτων διόρθωσης του συντελεστή ισχύος επιφέρει συχνά αρνητικά αποτελέσματα από την λογική αλλά αυξημένη κατανάλωση των προηγούμενων λαμπτήρων.



Εικόνα 6- 6. Κυματομορφές ρεύματος και φάσμα αρμονικών που προήλθαν από μετρήσεις σε λαμπτήρες LED με διάφορες διατάξεις.
(Journal of Electrical Engineering)

Στην **Εικ.6.6** διαφαίνεται μέσω πειραματικών μετρήσεων, η σημαντική αρμονική παραμόρφωση που επιφέρουν οι λαμπτήρες LED. Για να είναι αντιπροσωπευτικό το αποτέλεσμα χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί τύποι λαμπτήρων LED ώστε να αποκλειστεί η πιθανότητα το πρόβλημα να οφείλεται σε συγκεκριμένο τύπο λαμπτήρα. Είναι ορατό ότι οι κυματομορφές ρεύματος δεν είναι ημιτονοειδής μορφής γεγονός που επαληθεύει την εισαγωγή αρμονικών στο κύκλωμα διανομής του ρεύματος.

Τα κυκλώματα των λαμπτήρων LED έχουν χαρακτηριστικά όπως τα ballast των λαμπτήρων φθορισμού με σκοπό την μείωση των αρμονικών. Έτσι διακρίνονται τέσσερα διαγράμματα και τέσσερις τύποι λαμπτήρων που περιέχουν σχετικά κυκλώματα για μείωση των αρμονικών. Οι τέσσερις τύποι κυκλωμάτων φιλτραρίσματος αρμονικών φαίνονται στις εκάστοτε εικόνες και πιο συγκεκριμένα: χωρίς φίλτρο αρμονικών ($THD_i=170\%-175\%$), παθητικό φίλτρο ($THD_i=105\%-110\%$), φίλτρο Valley ($THD_i=67-72\%$), ενεργό φίλτρο ($THD_i=30-35\%$). Οι περισσότερες λάμπες ξεπερνούν το IEC harmonic standard limit για αυτό πρέπει η επιλογή συστήματος λαμπτήρων να γίνεται μετά από σχετική μελέτη.

Πίνακας 6- 1:Τεχνικά χαρακτηριστικά λαμπτήρων LED και δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης ανάλογα με τον τύπο φίλτρου του καθενός.

(Journal of Electrical Engineering).

Lamp ID	Nominal power P (W)	Equivalent to incandescent P (W)	Power factor	Luminous flux (lm)	Life span (years)	Type of filter	THD _I (%)
LED - 1	5	40	0.48	230	6	No filter	171.9
LED - 2	7	40	0.7	350	25	Valley fill	71.23
LED - 3	10	50	0.89	950	25	Active filter	34.8
LED - 4	5.5	30	0.59	290	20	Passive filter	106.3
LED - 5	7	40	0.51	350	20	No filter	168.2
LED - 6	6	30	0.52	365	25	No filter	174.3
LED - 7	5	40	0.67	350	25	Valley fill	69.83
LED - 8	3	15	0.5	150	18	No filter	164.4
LED - 9	8	40	0.82	450	25	Active filter	30.94
LED - 10	4	25	0.66	250	25	Valley fill	67.05

6.7 Επιπλέον αρνητικές επιπτώσεις αρμονικών παραμορφώσεων

- Τα καλώδια ισχύος που φέρουν αρμονικά φορτία εισάγουν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές EMI (electromagnetic interference) σε παρακείμενα καλώδια σήματος ή ελέγχου είτε μέσω αγωγών είτε μέσω ακτινοβολίας. Αυτή η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή EMI (θόρυβος) έχει ιδιαίτερα αρνητική επίδραση στα τηλέφωνα, στις τηλεοράσεις, στα μόνιτορ-οθόνες, ραδιόφωνα, υπολογιστές, ηλεκτρονικούς εγκεφάλους ελέγχου, και άλλα είδη ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Για την μείωση αυτών των παρεμβολών είναι υψίστη σημασίας η επιλογή του καλωδίου, ο τύπος περιβλήματος του και η διάταξη των καλωδίων σχετικά με ηλεκτρονικές συσκευές.
- Οποιαδήποτε συσκευή τηλεμετρίας ή άλλος εξοπλισμός που βασίζεται σε συμβατικές τεχνικές μετρήσεων ή στο φαινόμενο θέρμανσης των καλωδίων από το οποίο εξάγονται δεδομένα, είναι κατανοητό ότι δεν θα λειτουργήσει σωστά με την παρουσία μη γραμμικών φορτίων. Εκτός από τον κίνδυνο πυρκαγιάς, οι ζυγοί (busbars) και τα καλώδια γερνούν πρόωρα και οι ασφάλειες και οι διακόπτες δεν προσδίδουν το επιθυμητό και αναμενόμενο αποτέλεσμα προστασίας. Επομένως είναι ιδιαίτερο σημαντικό μόνο σύγχρονα μέσα που βασίζονται σε τεχνικές μέτρησης με RMS μετρήσεις να χρησιμοποιούνται σε τέτοια συστήματα με μη γραμμικά φορτία.
- Σε εγκαταστάσεις που αγωγοί ισχύος μεταφέρουν μη γραμμικά φορτία και λειτουργεί παράλληλα καλώδιο τηλεφωνικού σήματος, είναι πιθανό να προκύψουν τάσεις στα καλώδια τηλεφώνου. Το ιδιαίτερα επικίνδυνο εύρος συχνοτήτων είναι από 9^η αρμονική και πάνω δηλαδή περίπου πάνω από 540Hz. Υπάρχουν διάφορες διατάξεις και τρόποι περιορισμού του φαινομένου ειδικά στα χερσαία δίκτυα που είναι συχνό φαινόμενο η γειννίαση τέτοιου είδους καλωδίων. Οι Arrillaga et al. και η

IEEE προσφέρουν μηχανισμούς και τρόπους περιορισμού με περισσότερες λεπτομέρειες.

- Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, οι διατάξεις διόρθωσης του συντελεστή ισχύος που χρησιμοποιούνται στα φωτιστικά σώματα αλλά και σε άλλες συσκευές αλληλοεπιδρούν με πιθανά αρμονικά ρεύματα στο κύκλωμα. Έτσι αυξάνονται οι πιθανότητες ενός ηλεκτρικού συντονισμού καθώς το κύκλωμα εκτός από χωρητικά έχει προφανώς και επαγωγικά στοιχεία. Υπενθυμίζεται ότι ένα κύκλωμα βρίσκεται σε κατάσταση συντονισμού όταν η σύνθετη αντίσταση Z του κυκλώματος ισούται με την ωμική αντίσταση R . Έτσι η μεταβολή συχνότητας λόγω αρμονικών παραμορφώσεων μπορεί να επιφέρει μια συχνότητα που ταιριάζει με αυτή του συντονισμού και να προκληθεί το φαινόμενο. Στην περίπτωση αυτή επέρχεται υπερθέρμανση συσκευών και αγωγών και πιθανή βλάβη στα ηλεκτρικά εξαρτήματα των εγκαταστάσεων.
- Υπάρχει επίσης μια πιθανότητα παρεμβολής που προέρχεται αμφίδρομα από αγωγό και από ακτινοβολία και η συχνότητα ξεπερνά τις κανονικές συχνότητες αρμονικών παραμορφώσεων. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να συμβεί στην περίπτωση χρήσης μη γραμμικών φορτίων όπως οι Variable Speed Drives, και αυτές οι υψηλές συχνότητες έχουν άμεσο αντίκτυπο στα τηλεφωνικά συστήματα και τα συστήματα πλοήγησης του πλοίου. Η χρήση φίλτρων EMI στους δίσκους κρίνεται απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου.

7 Κανονισμοί και διεθνή πρότυπα ποιότητας ισχύος

Με σκοπό την αντιμετώπιση των προβλημάτων ποιότητας ισχύος που παρουσιάζονται στο **Κεφ.3** οι ναυτιλιακοί και οι υπόλοιποι αρμόδιοι φορείς έχουν εισάγει συγκεκριμένα πρότυπα που καθορίζουν το αποδεκτό επίπεδο διαφορετικών παραμέτρων. Ωστόσο οι πρόσφατες εξελίξεις, με τους εξηλεκτρισμούς των νέων πλοίων αυξάνουν τη διείσδυση των ηλεκτρονικών ισχύος που οφείλονται κατά κόρον για τα προβλήματα ποιότητας ισχύος όπως έχει αναφερθεί ανωτέρω. Οι προσπάθειες των τελευταίων χρόνων για πλήρη ηλεκτρικά πλοία (AES-All Electrified Ship) και η χρήση για την επίτευξη αυτού, ειδικών τοπολογιών μετατροπών ισχύος για την απαιτητική τροφοδοσία των μεγάλων ηλεκτροκινητήρων επιφέρει την ανάγκη αυστηροποίησης τέτοιων κανονισμών ή θέσπισης νέων προτύπων καθώς τα προβλήματα ποιότητας ισχύος αυξάνονται. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια γενική σύντομη αναφορά στα πρότυπα που διέπουν τα προβλήματα ποιότητας ισχύος στα ενεργειακά συστήματα πλοίου και η μελέτη των προτύπων θα επικεντρωθεί στα προβλήματα αρμονικών παραμορφώσεων που τα τελευταία 15 χρόνια είναι ένα από τα κυρίαρχα προβλήματα ποιότητας ισχύος [31].

Λόγω των ομοιοτήτων των ηλεκτρικών δικτύων των πλοίων με τα χερσαία δίκτυα, μπορεί να διατυπωθεί ότι θα ήταν λογική η εφαρμογή παρόμοιων κανονισμών και προτύπων για την ποιότητα ισχύος. Όμως η εκτεταμένη εφαρμογή σε πληθώρα πλοίων και η ανάγκη για εξειδίκευση έχει επιφέρει τη θέσπιση προτύπων λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες τους. Τέτοια πρότυπα είναι το **IEEE 1662-2008** που είναι οδηγός για σχεδίαση και εφαρμογή ηλεκτρονικών ισχύος στα ηλεκτρικά συστήματα εμπορικών και στρατιωτικών πλοίων, το **IEEE 1826-2012** για τα ηλεκτρονικά ισχύος εγκατεστημένα σε συστήματα περιορισμένα σε ζώνες πάνω από 100kW, το **IEEE 1709-2010** που αποτελεί συνήθης πρακτική για ηλεκτρικά συστήματα ισχύος πλοίων τάσης από 1 έως 35 kV, το **IEC/ISO/IEEE 80005-1&2** που αναφέρεται στις υψηλής τάσης χερσαίες συνδέσεις (Cold Ironing), τα **IEEE 45-2002 & IEC 60092** που είναι συνιστάμενες πρακτικές για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων και τέλος το **IEEE-519-1992-2014** που είναι πρότυπο για έλεγχο αρμονικών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων. Ειδικά πρότυπα νηογνωμόνων για την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος όπως του ABS (American Bureau of Shipping), του DNV (Det Norske Veritas) και του LRS (Lloyd's Register). Ακόμη υπάρχουν κανονισμοί εξειδικευμένοι για τις ανάγκες των πολεμικών πλοίων όπως το **STANAG-1008** (Characteristics of Shipboard Electrical Power Systems in Warships of the North Atlantic Treaty Navies).

Στο σημείο αυτό θα γίνει μια συνοπτική αναφορά στα τέσσερα πρότυπα που αναφέρονται ανωτέρω για την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος και έπειτα μια συγκριτική ανάλυση των προτύπων IEEE-519 κτλ. που αναφέρονται εκτεταμένα στα όρια και τους περιορισμούς που έχουν θεσπιστεί για τις αρμονικές παραμορφώσεις. Το IEC-60002 και τα πρότυπα των νηογνωμόνων DNV και LRS αναφέρονται μόνο σε συγκεκριμένους περιορισμούς για την τάση και δεν αναφέρονται καθόλου στο ρεύμα, παρόλο που αυτό ευθύνεται για πολλές δυσλειτουργίες και φαινόμενα συντονισμού και δονήσεων. Οι κανονισμοί του IEEE-519 φαίνεται να είναι οι πλέον ευκολότερα εφαρμόσιμοι όσο αναφορά τους κανονισμούς για τις

αρμονικές παραμορφώσεις καθώς αναφέρονται στα πραγματικά και όχι στα ονομαστικά σημεία λειτουργίας.

7.1 IEEE 1662-2008 - Σχεδιασμός και εφαρμογή συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος στα συστήματα πλοίου

Αυτός ο κανονισμός σχετίζεται με τις απαιτήσεις για την ποιότητα ισχύος και δοκιμές όσο αναφορά τις παραμέτρους για προδιαγραφές, τα χαρακτηριστικά απόδοσης και αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού για σχεδιασμό και εγκατάσταση ηλεκτρονικών ισχύος σε εμπορικά και στρατιωτικά πλοία. Ο κανονισμός καλύπτει ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρονικών ισχύος με ισχύ που ξεπερνά τα 100kW όπως ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος (converters), συσκευές διαχείρισης του συντελεστή ισχύος και της άεργου ισχύος και VFD's.

Η τάση λειτουργίας για τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος συστήνεται στο 1kV είτε περισσότερο, για συστήματα και εξοπλισμό ισχύος έως 5 MW ή περισσότερο. Οι διακυμάνσεις τάσεις και συχνότητας μπορεί να κυμαίνονται μεταξύ 6% έως 20% και 5% έως 10% αντίστοιχα. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορεί να οφείλονται είτε σε μόνιμα είτε σε μεταβατικά φαινόμενα. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι γείωσης στα ηλεκτρικά συστήματα πλοίων οι οποίες πολλές φορές συνδέονται σε ένα συγκεκριμένο σημείο από τον μελετητή του ηλεκτρικού συστήματος και είναι οι εξής:

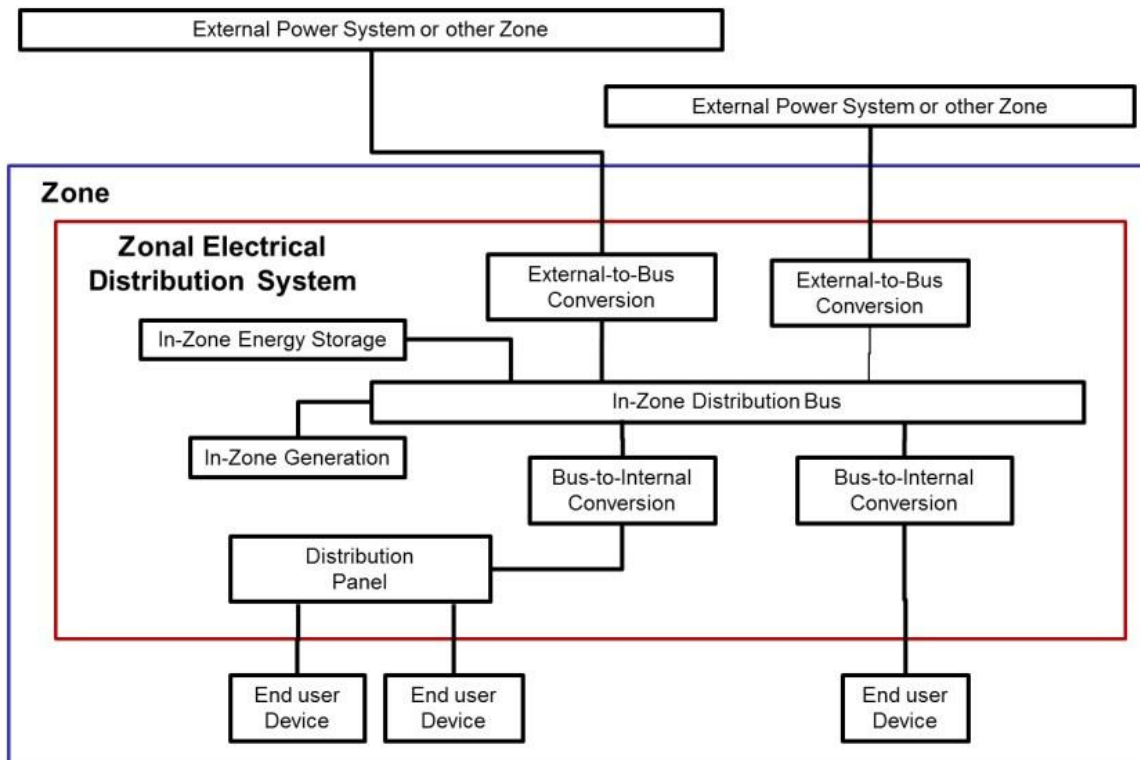
- Γειώσεις ασφαλείας
- Γειώσεις ηλεκτρικών συστημάτων
- Γειώσεις σημάτων

Σύμφωνα με το IEEE 1662-2008 ως αναπόσπαστο μέρος του σχεδιασμού ενός ολόκληρου πλοίου, οι μελετητές των ηλεκτρικών συστημάτων του πλοίου είναι απαραίτητο να αναπτύξουν μια περιγραφή του συστήματος μέσω μελετών, οι οποίες θα προσδώσουν τις απαραίτητες πληροφορίες στο ναυπηγείο κατασκευής του. Έτσι επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου και μελετώνται αναλυτικά οι αλληλεπιδράσεις του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού με το υπόλοιπο πλοίο. Πιο συγκεκριμένα οι τεχνικές πληροφορίες και οι προσομοιώσεις που πρέπει να παρέχονται είναι:

- Ηλεκτρικός ισολογισμός ισχύος με σενάρια λειτουργίας (πχ. εν πλω, εν όρμω κτλ.)
- Μελέτη ρευμάτων γάστρας
- Ακουστική μελέτη ηλεκτρολογικού εξοπλισμού σε συνεργασία με τον υπόλοιπο εξοπλισμό του πλοίου
- Ανάλυση αρμονικών παραμορφώσεων και βραχυκυκλώματος
- Μελέτη πιθανής δυνατότητας επέκτασης του ηλεκτρικού συστήματος (πχ. όπως συνέβη με την εγκατάσταση συστήματος διαχείρισης έρματος-ballast water treatment system)
- Περιγραφή συστημάτων προστασίας
- Μελέτη διάταξης ηλεκτρολογικού εξοπλισμού στους χώρους του πλοίου και αναφορά βάρους εξοπλισμού.

7.2 IEEE 1826-2012 – Έλεγχος από ηλεκτρονικά ισχύος εγκατεστημένα σε συστήματα πλοίων που χρησιμοποιούν διανομή σε ζώνες με ονομαστική ισχύ άνω των 100kW

Ένα ηλεκτρικό σύστημα διανομής σε ζώνες (ZEDS) είναι μέρος του μεγαλύτερου συστήματος ηλεκτρικής ισχύος του πλοίου και αποτελείται από μια ομάδα φορτίων που συμβάλει στη διατήρηση πιθανών σφαλμάτων εντός της ζώνης για την αποφυγή βλάβης του υπόλοιπου εξοπλισμού.



Εικόνα 7- 1. Δομικό διάγραμμα συστήματος διανομής σε ζώνες. (IEEE 2012)

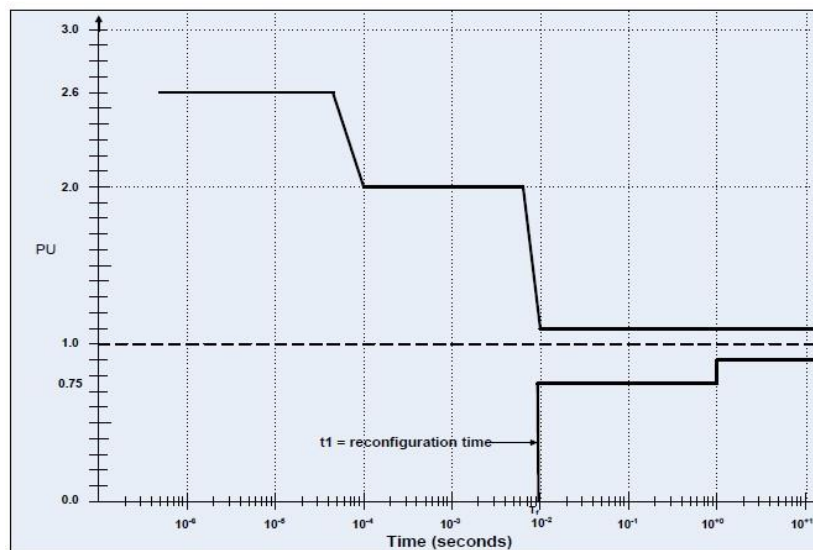
Ο έλεγχος ενός τέτοιου συστήματος με αρχιτεκτονική σε ζώνες επιτυγχάνεται με την οργάνωση στοιχειωδών συναρτήσεων ελέγχου με σκοπό την παραγωγή ενός επιθυμητού ελέγχου. Αυτός ο έλεγχος εφαρμόζεται διαμέσου ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος στο τοπικό σύστημα αλλά και στο ευρύτερο σύστημα ζώνης είτε όλων των ζωνών. Το εξειδικευμένο λογισμικό ελέγχου ζωνών πρέπει να έχει τουλάχιστον τρεις καταστάσεις λειτουργίας:

1. Επικεντρωμένο (Centralized): Το κεντρικό σύστημα ελέγχου παρέχει εντολές σε ολόκληρο το σύστημα σε μια πραγματική διαμόρφωση (master slave-program=master, other devices=slave) μεταξύ του κεντρικού συστήματος και των κατανεμημένων συσκευών.
2. Κατανεμημένο (Distributed): Ο έλεγχος στο σύστημα αυτό επιτυγχάνεται με ανεξάρτητα χειριστήρια που επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας έξυπνες

συσκευές που βρίσκονται σε στρατηγικά επιλεγμένες θέσεις για να ανιχνεύσουν τις απαραίτητες συνθήκες και να ξεκινήσουν διορθωτικές ενέργειες.

3. **Αυτόνομο:** Ο έλεγχος επιτυγχάνεται με ανεξάρτητα χειριστήρια χωρίς την επικοινωνία με άλλες συσκευές.

Η τάση λειτουργίας σε οποιαδήποτε μονάδα ελέγχου του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ισχύος σε ζώνες θα πρέπει να παραμείνει εντός των επιθυμητών επιπέδων που διαφαίνονται στην παρακάτω **Εικ.7.2** Όπως ορίζεται από το IEEE 1709-2010 που θα αναφερθεί συνοπτικά στην επόμενη υποενότητα. Αυτό συμβαίνει καθώς ο εξοπλισμός του συστήματος διανομής εντός ζώνης λειτουργεί ικανοποιητικά με τάσεις εντός των καθορισμένων τιμών.



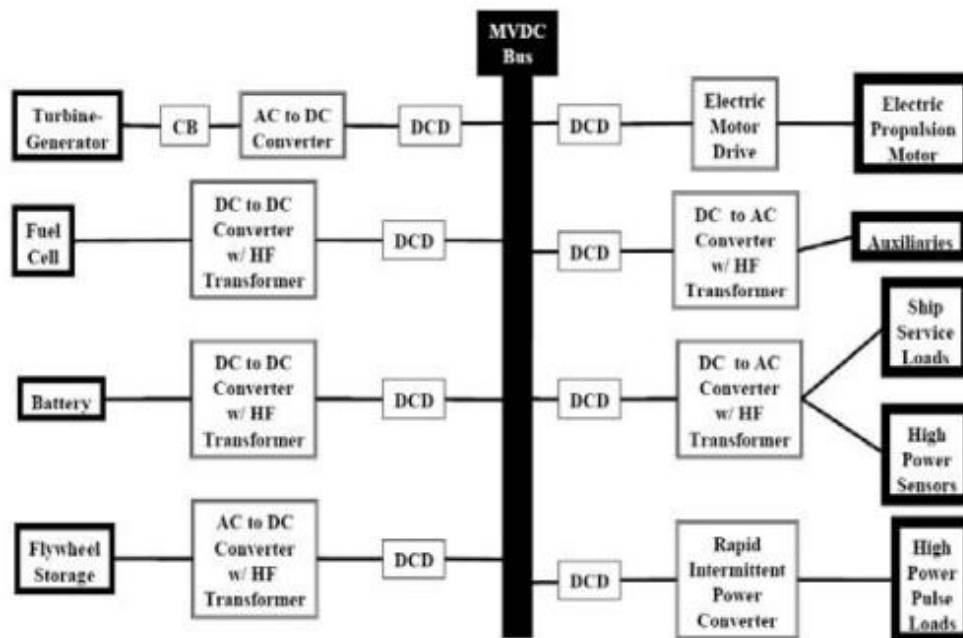
Εικόνα 7- 2. Διάγραμμα ανοχής διακυμάνσεων τάσεων λειτουργίας εξοπλισμού. (IEEE 2010)

7.3 IEEE 1709-2010 - Συνήθης πρακτική για 1 kV έως 35kV μέσης τάσης (ΣΡ) συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων

Η πρόσφατη επιτυχία στην εξέλιξη της γρήγορης διακοπτικής ικανότητας ημιαγωγών μέσης τάσης κατέστησαν εφικτή την ανακάλυψη πλεονεκτημάτων της χρήσης συστημάτων διανομής ενέργειας συνεχούς ρεύματος και μέσης τάσης (MVDC) έναντι των συστημάτων διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος. Ιδιαίτερες δυνατότητες φαίνεται να έχει η εφαρμογή των παραπάνω στα πλήρως εξηλεκτρισμένα πλοία (AES) καθώς το συνεχές ρεύμα έχει πολλά οφέλη (και θετικό αντίκτυπο στην κατανάλωση καυσίμου) στη λειτουργία των VFDs των μεγάλων ηλεκτροκινητήρων των AES. Τα κύρια πλεονεκτήματα χρήσης DC ρεύματος έναντι AC είναι:

- Απλοποίηση διαδικασίας ζεύξης και αποσύζευξης διαφορετικών τύπων και μεγεθών γεννητριών παραγωγής ενέργειας και συσκευών αποθήκευσης ενέργειας
- Μείωση μεγέθους πινάκων διανομής (MSB)
- Μείωση χρήσης μεγάλων χαμηλής συχνότητας μετατροπών (50-60Hz)
- Περιορισμός και διαχείριση πιθανών βραχυκυκλωμάτων και πτώσεων τάσεων

- Μείωση βάρους ηλεκτρικού συστήματος με χρήση γεννητριών υψηλών στροφών
- Για δεδομένη διατομή καλωδίου , ικανότητα για μεταφορά υψηλότερης ισχύος
- Βελτίωση βαθμού απόδοσης στις περιπτώσεις αποθήκευσης ενέργειας και της μετατροπής ισχύος
- Μείωση ανάγκης για συγχρονισμό γωνίας φάσης πολλαπλών φορτίων και πηγών



Εικόνα 7- 3. Άποψη συστήματος διανομής ενέργειας πλοίου MVDC .(Σημείωση:CB=circuit breaker , DCD= DC disconnect, HF= High frequency)
(IEEE 2010)

Στην **Εικ.7.3** διαφάνεται ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου στο οποίο κάθε πιθανή πηγή ηλεκτρικής ισχύος και κάθε ηλεκτρικό φορτίο συνδέεται με τον ζυγό MVDC με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος. Τα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ισχύος MVDC με τάση λειτουργίας άνω των 3 kV δεν υπακούν σε συγκεκριμένα πρότυπα. Η διεθνής ένωση νηογνομόνων (IACS-UR E11) καλύπτει περισσότερο τα θέματα εναλλασσόμενου ρεύματος και ιδιαίτερα λίγο του συνεχούς. Οι προτεινόμενες τάσεις λειτουργίας και αντοχής καλύπτονται με συντομία από τους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 7- 1: Προτεινόμενες ονομαστικές τάσεις λειτουργίας από την διεθνή ένωση νηογνωμόνων. (IACS).

	<i>MVDC Class kV</i>	<i>Nominal MVDC Class Rated Voltage (kV)</i>	<i>Maximum MVDC Class Rated Voltage (kV)</i>
<i>Already established Classes</i>	1.5	1.5 or ± 0.75	2 or ± 1
	3	3 or ± 1.5	5 or ± 2.5
	6	6 or ± 3	10 or ± 5
	12	12 or ± 6	16 or ± 8
<i>Future Design Classes</i>	18	18 or ± 9	22 or ± 11
	24	24 or ± 12	28 or ± 14
	30	30 or ± 15	34 or ± 17

Πίνακας 7- 2: Προτεινόμενες τάσεις αντοχής από την διεθνή ένωση νηογνωμόνων. (IACS).

<i>MVDC Case</i>	<i>Rated short-duration withstand voltage to ground U_d kV for 1 min</i>	<i>Rated lightning impulse withstand voltage to ground U_p kV (peak value)</i>
1	10	45
3	20	60
6	27	75
12	35	95
18	50	110
24	70	150
30	95	200

Υπάρχουν πολλές πηγές συνεχούς ρεύματος αλλά αν το συνεχές ρεύμα προέρχεται από μια πηγή εναλλασσόμενου με μετατροπέα AC-DC (βλέπε **Εικ.5.1**) , η ποιότητα του συνεχούς ρεύματος επηρεάζεται ιδιαίτερα από την κυμάτωση τάσης (ripple voltage). Ο βαθμός της κυμάτωσης τάσης έχει άρρηκτη σχέση με το είδος του ανορθωτή και το φίλτρο του. Σε άλλες εφαρμογές χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας αμφίδρομης ροής ισχύος (Active Front End) ο οποίος βασίζεται στη διαμόρφωση πλάτους παλμού PWM (Pulse Width Modulation). Στην περίπτωση αυτή, η τάση του συνεχούς ρεύματος επηρεάζεται από την υψηλής συχνότητας κυματομορφή που είναι αποτέλεσμα των διακοπτικών του PWM και του ελέγχου του μπροστινού φίλτρου. Θόρυβος μπορεί ακόμη να παρατηρηθεί από φορτία που είναι συνδεδεμένα με τον ζυγό συνεχούς ρεύματος. Η αποδεκτή τιμή RMS της κυμάτωσης τάσης και του θορύβου δεν πρέπει να ξεπερνά το 5% per unit.

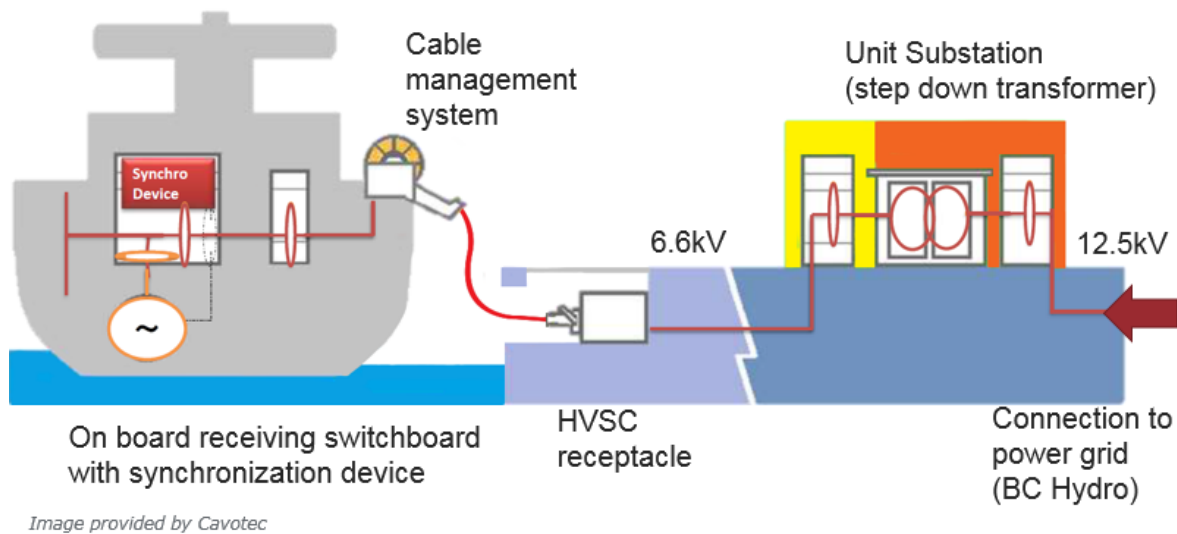
7.4 IEC/ISO/IEEE 80005-1&2 – Υψηλής τάσης χερσαίες διασυνδέσεις (HVSC) – Γενικές απαιτήσεις, δεδομένα και έλεγχος

Η παροχή ηλεκτρικής ισχύος από το χερσαίο δίκτυο (Cold ironing) είναι η διαδικασία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλοίου όσο είναι στο λιμάνι, από μια χερσαία πηγή ενέργειας. Τα πλοία με αυτή τη διαδικασία σβήνουν τους κινητήρες των ηλεκτρογεννητριών και καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες, χωρίς να ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα του λιμένα και φυσικά με πολύ μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, ειδικότερα αν το χερσαίο ρεύμα προέρχεται από ΑΠΕ (ανανεώσιμες πηγές ενέργειας). Εκτός από τα περιβαλλοντικά οφέλη, πολλοί λιμένες χρησιμοποιούν τις φόρμες Environmental Ship Index (ESI) και Clean Shipping Index (CSI) για τον υπολογισμό έκπτωσης στα τέλη λιμένος σε πλοία που έχουν τη δυνατότητα για τέτοιου είδους σύνδεση. Τον Οκτώβριο του 2020 ψηφίστηκε από το Ευρωπαϊκό κοινοβούλιο ότι κανένα πλοίο δεν θα εκπέμπει ρύπους στους λιμένες έως το 2030, εκτός και αν καταναλώνει ως καύσιμο αμμωνία NH_3 , H_2 ή άλλα καύσιμα μηδενικών ρύπων.

Οι υψηλής τάσης (HV-High Voltage) χερσαίες διασυνδέσεις πλοίων υπακούν σε συγκεκριμένους κανονισμούς με σκοπό να είναι εφικτή η διασύνδεση των πλοίων σε διαφορετικούς λιμένες. Έτσι οι υψηλής τάσης χερσαίες διασυνδέσεις πρέπει να είναι ονομαστικής τάσης 6.6 ή 11 kV. Ακόμη υπάρχουν κι άλλοι περιορισμοί και κανόνες για τον ηλεκτρικό εξοπλισμό πλοίου για την τάση, τη συχνότητα λειτουργίας αλλά και τα χαρακτηριστικά αρμονικής παραμόρφωσης. Παρακάτω σημειώνονται μερικά σημεία κλειδιά των κανονισμών:

- Σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας, α) η ανοχή στη συχνότητα λειτουργίας πρέπει να είναι εντός των συνεχών ορίων $\pm 5\%$, β) η τάση στο σημείο σύνδεσης δεν πρέπει να ξεπερνά το 6% της ονομαστικής τάσης σε κατάσταση μηδενικού φορτίου και η πτώση τάσης το 3.5% της ονομαστικής σε κατάσταση πλήρους φορτίου.
- Σε κατάσταση ταχέων μεταβατικών φαινομένων, α) η μέγιστη μεταβολή φορτίου και η επίδραση της στην τάση και τη συχνότητα της χερσαίας σύνδεσης πρέπει να καθορίζεται και να καταγράφεται, β) τα όρια τάσης στα ταχεία μεταβατικά φαινόμενα πρέπει να κυμαίνονται από -15% έως +20% και τα όρια στη συχνότητα πρέπει να είναι από -10% έως +20%.
- Τα όρια των αρμονικών παραμορφώσεων τάσης σε κατάσταση μηδενικού φορτίου πρέπει να είναι έως 3% της εκάστοτε αρμονικής παραμόρφωσης και 5% της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης.

Σε εφαρμογές που απαιτείται χαμηλή παροχή τάσης, είναι απαραίτητη η χρήση μιας περιέλιξης προστασίας μεταξύ αυτής της υψηλής και της χαμηλής τάσης στους μετασχηματιστές.



Εικόνα 7- 4. Απεικόνιση συστήματος χερσαίας διασύνδεσης πλοίου (Cold ironing) με δίκτυο ξηράς.
(Cavotec)

7.5 IEEE 45 – 2002 – Συνιστάμενες πρακτικές για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων

Ο κύριος σκοπός αυτού του προτύπου είναι να παρέχει οδηγίες σχετικά με τις συνιστάμενες πρακτικές για την σχεδίαση , επιλογή και εγκατάσταση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού στα ηλεκτρικά συστήματα πλοίων. Πιο συγκεκριμένα παρέχονται οδηγίες για επιλογή και εγκατάσταση ηλεκτρικών συσκευών για φωτισμό , σηματοδότηση , επικοινωνία, ισχύ και πρόωση. Τα επίπεδα τάσης που δίνονται στον παρακάτω πίνακα για συχνότητες λειτουργίας 50Hz ή 60 Hz , με βάση τα ακόλουθα συστήματα διανομής, αναγνωρίζονται ως πρότυπα από το IEEE 45:

- Δύο καλωδίων (κλώνων) με μονοφασικό ΕΡ ή ΣΡ (AC or DC)
- Τριών καλωδίων (κλώνων) με μονοφασικό ΕΡ ή ΣΡ (AC or DC)
- Τριφασικό (3-phase) , 3 καλωδίων (κλώνων) ΕΡ (AC)
- Τριφασικό (3-phase) , 4 καλωδίων (κλώνων) ΕΡ (AC)

Τα μικρά πλοία με εγκατεστημένη ισχύ έως 15 kW μπορούν να έχουν τριφασικές ή μονοφασικές γεννήτριες στα 120 V με 115 V για ισχύ και φωτισμό. Το επόμενο επίπεδο ισχύος σύμφωνα με το πρότυπο είναι η κατηγοριοποίηση πλοίων με εγκατεστημένη ισχύ έως 100kW. Τα συστήματα αυτά με εγκατεστημένη ισχύ έως 100 kW έχουν γεννήτριες με τάση 230 V. Σε μεγαλύτερα ηλεκτρικά συστήματα πλοίων πιθανότερη είναι η χρήση δύο επιπέδων τάσης , με δύο μετασχηματιστές τάσης να λειτουργούν για το μετασχηματισμό τάσης στο επιθυμητό επίπεδο. Στα πλοία που τα ηλεκτρολογικά συστήματα λειτουργούν με διαφορετικά επίπεδα τάσης, τα επίπεδα τάσης των γεννητριών μπορούν να επιλεγθούν να είναι 450 V, 480 V, 600 V, 690V.

Πίνακας 7- 3: Πρότυπα επίπεδα τάσης λειτουργίας πλοίων όπως καθορίζονται από το πρότυπο IEEE-45-2002. (IEEE 45).

<i>Standard</i>	<i>AC (V)</i>	<i>DC (V)</i>
<i>Power utilization</i>	115,200,220,	115 and 130
	230,350,440,	
	460,575,660,	
	2300,3150,4000,	
	6000,10600,13200	
<i>Power generation</i>	120,208,230,	120 and 240
	240,380,450,	
	480,600,690,	
	2400,3300,4160,	
	6600,11000,13800	

Τα επίπεδα τάσης 3300 V , 4160 V, 6600 V, 11000 V, 13800 V χρησιμοποιούνται κυρίως σε πολύ μεγάλα πλοία με υψηλές ενεργειακές ανάγκες όπως κρουαζιερόπλοια με υψηλές απαιτήσεις σε ξενοδοχειακά φορτία, είτε σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που ψύχονται. Σε περίπτωση που είναι απαραίτητη η παραγωγή συνεχούς ρεύματος από γεννήτριες τότε αυτές λειτουργούν σε τάση 120V είτε 240 V ανάλογα με τα επίπεδα ισχύος του συστήματος. Η ανοχή σε μεταβολή συχνότητας στα συστήματα αυτά πρέπει να είναι της τάξης του +/-3% ενώ η μεταβολή συχνότητας σε ταχέα μεταβατικά φαινόμενα (πολύ σύντομο χρονικό διάστημα) πρέπει να είναι της τάξης του +/- 4%. Ακόμη η ανοχή σε μεταβολή τάσης υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των τριών φάσεων και πρέπει να είναι εντός του +/-5%.

Η μέγιστη συνολική αρμονική παραμόρφωση πρέπει να είναι έως 5% σύμφωνα με το IEEE-45. Η ανοχή στη μεταβολή σε περίπτωση ασυμμετρίας τάσης, όπως αυτή περιγράφεται στο **Κεφ.3.2** πρέπει να είναι εντός του 7%. Καταληκτικά συστήνεται η γείωση για τα συστήματα παροχής ισχύος χαμηλής τάσης (600 V ή λιγότερο) με σκοπό α) τη μείωση της τάσης σε περίπτωση παροδικών υπερτάσεων (overvoltage transients) β) για τη συνέχιση της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα σε πιθανό σφάλμα μονής γραμμής προς το έδαφος γ) την ελαχιστοποίηση του μεγέθους των ρευμάτων σε περίπτωση ρευμάτων σφάλματος γείωσης που οφείλονται στη δομή της γάστρας του πλοίου.

7.6 IEC 60092 – Πρότυπο για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις ποντοπόρων πλοίων και υπεράκτιων πλατφόρμων

Η διεθνής ηλεκτροτεχνική επιτροπή (International Electrotechnical Commission-IEC) που εδρεύει στη Γενεύη της Ελβετίας, είναι ο οργανισμός που προετοιμάζει και δημοσιεύει διεθνή πρότυπα για ηλεκτρικές, ηλεκτρονικές και συναφείς τεχνολογίες. Αυτά τα πρότυπα προκύπτουν μέσα από τη συνεργασία και τη συναίνεση ειδικών επιστημόνων από διάφορες χώρες. Το πρότυπο IEC-60092 αναφέρεται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις ποντοπόρων

πλοίων και συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 101 αναφέρεται στην ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος από τα ηλεκτρικά συστήματα παροχής ισχύος στα πλοία, θέτοντας συγκεκριμένους περιορισμούς. Στον παρακάτω πίνακα διαφαίνονται κάποιες από τις προτεινόμενες τιμές-παράμετροι που έχουν επιλεγεί από την επιτροπή για τα διάφορα προβλήματα ποιότητας ισχύος.

Πίνακας 7- 4: Επιλεγμένες παράμετροι ποιότητας ισχύος πλοίων όπως καθορίζονται από το πρότυπο IEC 60092. (IEC-60092).

<i>Parameter</i>	<i>Value</i>
<i>Steady voltage deviations</i>	+6% - 10%
<i>Steady frequency deviations</i>	±5%
<i>Voltage asymmetry</i>	3%
<i>Transient amplitude</i>	5.5 U_n
<i>Increase/decrease time of transient</i>	1.2 μ s /50 μ s
<i>Total harmonic distortion THD</i>	≤ 5%
<i>A single distortion (any harmonic greater than)</i>	≤ 3%

Μεταξύ των περιορισμών που θέτονται από το πρότυπο, η συνολική αρμονική παραμόρφωση της κυματομορφής τάσης THD_v δεν πρέπει να ξεπερνά το 5% ενώ κάθε άλλη υψηλότερου βαθμού αρμονική δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3% της θεμελιώδους τιμής. Αναφερόμενοι στην παραμόρφωση της κυματομορφής ρεύματος, το πρότυπο αυτό δεν δίνει ποσοτικούς περιορισμούς και συνεπώς δεν αναφέρει συγκεκριμένες τιμές ορίων. Ωστόσο υπογραμμίζεται ότι η παραμόρφωση κυματομορφής ρεύματος λόγω συγκεκριμένων φορτίων μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση στην κυματομορφή τάσης μέσω της πτώσης τάσης στις σύνθετες αντιστάσεις του συστήματος. Ιδιαίτερως τονίζεται ότι οι παραμορφώσεις τάσης και ρεύματος προκαλούν πληθώρα προβλημάτων στις συσκευές του συστήματος λόγω τροφοδοσίας με μη κατάλληλα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος ενώ παράλληλα η υπερθέρμανση μπορεί να προκαλέσει ακόμη και απώλεια λειτουργίας πολύτιμων συσκευών.

7.7 STANAG 1008 – Χαρακτηριστικά συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος χαμηλής τάσης πλοίων του NATO

Το STANAG 1008 αποτελεί πρότυπο για τις ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις των πολεμικών πλοίων του NATO. Δεν θα γίνει αναλυτική αναφορά στο συγκεκριμένο πρότυπο καθώς το πεδίο εφαρμογής του είναι περιορισμένο αλλά είναι ιδιαίτερη ενδιαφέρων η αναφορά του για λόγους σύγκρισης με τα υπόλοιπα πρότυπα. Σύμφωνα με το STANAG 1008- Edition 8 η συνολική αρμονική παραμόρφωση τάσης THD_v ενός δικτύου των 60Hz και 400Hz δεν πρέπει να ξεπερνά το 5% ενώ παράλληλα καμιά αρμονική (ατομικά) δεν πρέπει να ξεπερνά το 3%. Για την επίτευξη των ανωτέρω περιορισμών το STANAG παρέχει περιορισμούς σχεδίασης για αρμονικές ρεύματος που παράγονται από κάθε ξεχωριστό φορτίο του ηλεκτρικού δικτύου

του πολεμικού πλοίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περιορισμοί αναφέρονται στο ποσοστό % του ονομαστικού πλήρους φορτίου (θεμελιώδες ρεύμα) I_{1fl} κάθε φορτίου [32]. Οι περιορισμοί αρμονικών για κάθε ξεχωριστό φορτίο διαφαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7- 5: Επιλεγμένες παράμετροι ποιότητας ισχύος πλοίων όπως καθορίζονται από το πρότυπο STANAG 1008- Edition 8.

<i>Harmonic order n</i>	<i>Acceptable level of harmonic value in % of the "rated full load (nominal) fundamental current , I_{1fl}</i>
Loads < (1KvA/60Hz or 0.2KvA/400Hz and 2A/115V/400Hz)	
n>1	100/n %
Loads < (1KvA/60Hz or 0.2KvA/400Hz and 2A/115V/400Hz)	
2 ≤ n < 33	3%
n ≥ 34	100/n%

Οι παραπάνω περιορισμοί όντας ιδιαίτερα αυστηροί όπως αποδείχθηκε έπειτα από θεωρητικούς υπολογισμούς και μετρήσεις στα ηλεκτρικά συστήματα πολεμικών πλοίων αναθεωρήθηκαν με την έκδοση του STANAG 9. Ένας ακόμη λόγος που έκανε αδήριτη την ανάγκη της νέας έκδοσης ήταν ο όρος I_{1fl} «θεμελιώδες ρεύμα πλήρους φορτίου» ο οποίος δημιουργούσε παρερμηνείες από το πλήρωμα όταν ήθελαν να αξιολογήσουν την ποιότητα ισχύος σύμφωνα με το πρότυπο.

Σε μια προσπάθεια επίλυσης των ανωτέρω προβλημάτων, έγινε η 9^η έκδοση του STANAG η οποία ισχύει μέχρι σήμερα. Στην έκδοση αυτή παραμένουν οι περιορισμοί για τις αρμονικές παραμορφώσεις τάσης ενώ έχουν αφαιρεθεί ολοκληρωτικά οι περιορισμοί για τις παραμορφώσεις ρεύματος και ο όρος I_{1fl} που οδηγούσε σε προβλήματα. Παραμένει μόνο μια συγκεκριμένη φράση για τις παραμορφώσεις ρεύματος ως αναφορά στην παλαιότερη έκδοση αλλά κανένας περιορισμός.

Πίνακας 7- 6: Επιλεγμένες παράμετροι ποιότητας ισχύος πλοίων όπως καθορίζονται από το πρότυπο STANAG 1008- Edition 9.

<i>Condition</i>	<i>Action required</i>
$\sum_k P_{dist,k} = 1\% S_{sc}$ with $max_k(P_{dist,k}) = 0.5\% S_{sc}$	No action
$\sum_k P_{dist,k} = 2\% S_{sc}$ with $max_k(P_{dist,k}) = 0.1\% S_{sc}$	No action
<i>Otherwise</i>	Analysis

$P_{dist,k}$: power of devices distorting current waveforms

S_{sc} : short circuit power level of the supply system

Αντιθέτως η παραμόρφωση τάσης πρέπει να διερευνηθεί εκτελώντας αναλύσεις ποιότητας ισχύος (προσομοιώσεις με μαθηματικά μοντέλα ολόκληρου του ηλεκτρικού συστήματος και μετρήσεις πεδίου), και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλες οι πιθανές επιλογές όταν είναι πιθανή η αντικατάσταση ή η προσθήκη ενός νέου κομματιού εξοπλισμού.

7.8 IEEE-519 – Συνηθισμένες πρακτικές και απαιτήσεις για τον έλεγχο των αρμονικών στα ηλεκτρικά συστήματα πλοίου

Το IEEE-519 παρουσιάστηκε αρχικά το 1981 ως ένας οδηγός για τον έλεγχο των αρμονικών παραμορφώσεων και της άεργου ισχύος των στατικών μετατροπέων ισχύος. Αρχικά καθορίστηκαν τα αποδεκτά επίπεδα τάσης του ηλεκτρικού συστήματος διανομής για συγκεκριμένα μη γραμμικά φορτία. Η ανάγκη για αναθεώρηση του προτύπου ήρθε σύντομα καθώς η αύξηση χρήσης των ηλεκτροκινητήρων και η επιθυμία για ρύθμιση στροφών αύξησε ιδιαίτερα τη χρήση των VFD's , με αποτέλεσμα τη ραγδαία αύξηση των μη γραμμικών φορτίων. Η αναθεωρημένη έκδοση ήρθε το 1992 και καθιέρωσε προτεινόμενες οδηγίες για αρμονικές τάσεις καθώς και αρμονικά ρεύματα στα ηλεκτρικά συστήματα διανομής. Σύμφωνα με το πρότυπο το εκάστοτε σύστημα είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των αρμονικών ρευμάτων που δημιουργούνται και για το λόγο αυτό πρέπει οι μετρήσεις να είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν από αυτό.

Σύμφωνα με το IEEE-519 τα αποδεκτά επίπεδα παραμόρφωσης τάσης και ρεύματος καθορίζονται στο σημείο PCC (Point of Common Coupling- σημείο που ενώνονται ηλεκτρικά το φορτίο, το πιθανό σημείο σφάλματος και η παροχή ισχύος του δικτύου) [33].

Πίνακας 7- 7: Όρια παραμόρφωσης ρεύματος για γενικά συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (69 V έως 69000 V). (IEEE 519).

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L Individual harmonic order (odd harmonics)

I_{sc}/I_L	< 11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonics above. Current distortions that result in a dc offset , e.g., half-wave converters , are not allowed. All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L . Where I_{sc} = maximum short circuit current at PCC. I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.*

Στα ηλεκτρικά δίκτυα των πλοίων το σημείο PCC συνήθως είναι στο σημείο τροφοδοσίας κάθε ξεχωριστού φορτίου. Από τη στιγμή που τα αρμονικά ρεύματα που κυκλοφορούν στο σύστημα διανομής μέσω των αντιστάσεων του συστήματος δίνουν αρμονικές τάσεις , το πρότυπο προτείνει κατευθυντήριες γραμμές σύμφωνα με τις οποίες πρέπει να εναρμονίζονται τέτοια συστήματα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλεκτρικά συστήματα πλοίου εμπίπτουν στην κατηγορία μεταξύ 120 V και 69 kV και το ρεύμα βραχυκυκλώματος (όπως ορίζεται από το IEEE-519 στο PCC) προς το μέγιστο ρεύμα φορτίου είναι συνήθως κάτω από 20 καθώς τα συστήματα γείωσης πλοίων είναι σχεδιασμένα με σκοπό τα ρεύματα βραχυκύκλωσης να είναι μόνο μερικές φορές μεγαλύτερα από τα ρεύματα μέγιστου φορτίου. Με την παραπάνω παρατήρηση εφαρμόσιμη σε συστήματα πλοίου είναι μόνο η 1^η γραμμή του παραπάνω Πίν7.7.

Πίνακας 7- 8: Όρια παραμόρφωσης τάσης για γενικά συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (69 V έως 69000 V).
(IEEE 519)

<i>Bus voltage at PCC</i>	<i>Individual voltage distortion (%)</i>	<i>Total voltage distortion THD (%)</i>
69kV and below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

Note: High voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped by the user.

Όπως διαφαίνεται από την πρώτη γραμμή του **Πίν.7.8** η συνολική αρμονική παραμόρφωση περιορίζεται από το πρότυπο με αποδεκτές τιμές μικρότερες του 5% ενώ κάθε ξεχωριστή παραμόρφωση δεν πρέπει να ξεπερνά το 3%. Είναι σκόπιμο να αναφερθεί ξανά ότι στα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ισχύος πλοίων αφού η τάση είναι κάτω των 69 kV, εδώ είναι εφαρμόσιμη μόνο η πρώτη γραμμή του πίνακα.

7.9 DNVGL – RU - SHIP – Όρια αρμονικών παραμορφώσεων στα πλοία και γενικές σημειώσεις σχετικά με την ποιότητα ισχύος

Σύμφωνα με τον νηογνώμονα DNV-GL η συνολική αρμονική παραμόρφωση δεν πρέπει να ξεπερνά το 8% ενώ καμιά αρμονική δεν πρέπει να ξεπερνά το 5%. Για αρμονικές βαθμού μεγαλύτερου από 15 το όριο ακολουθεί φθίνουσα λογαριθμική συνάρτηση της οποίας το διάγραμμα θα δοθεί παρακάτω. Ακόμη εξοπλισμός που παράγει παροδικές αιχμές τάσης, συχνότητας και μεταβολές στο ρεύμα δεν πρέπει να δημιουργεί παρεμβολές στα υπόλοιπα συστήματα εξοπλισμού όχι μόνο μέσω του δικτύου διανομής αλλά και επαγωγικά ή με ακτινοβολία. Η συνολική αρμονική παραμόρφωση ενδέχεται να ξεπερνά τα όρια που θέτει ο νηογνώμονας στην περίπτωση που ο εξοπλισμός είναι κατάλληλα σχεδιασμένος από το κατασκευαστή να λειτουργεί ομαλά σε μεγαλύτερα επίπεδα αρμονικών παραμορφώσεων. Όμως τα κατάλληλα έγγραφα πρέπει να δικαιολογούν αυτή την υπέρβαση των ορίων και παράλληλα ο σχεδιαστής να έχει υπόψη τα παρακάτω:

- Πρόσθετες απώλειες θερμότητας σε μηχανήματα , μετασχηματιστές και εσωτερικά πηνία σε χειριστήρια και διακόπτες
- Επιπτώσεις πιθανού συντονισμού στο δίκτυο
- Λανθασμένες ενδείξεις σε όργανα και συστήματα ελέγχου που λειτουργούν υπό αρμονική παραμόρφωση και του προστατευτικού εξοπλισμού (ρελέ)
- Πρόσθετες απώλειες θερμότητας σε όλους τους χρησιμοποιούμενους πυκνωτές και συνεπώς ιδιαίτερα σε όλο το δίκτυο φωτισμού
- Παρεμβολές σε όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα όπως επικοινωνίας , ελέγχου, θέρσεως, σύστημα ραντάρ και πλοήγησης

Παρόλο τις πολλαπλές συστάσεις, στην περίπτωση υπέρβασης του θεσπισμένου ορίου δεν δίνεται νέα μέγιστη αποδεκτή τιμή από τον κανονισμό.

7.10 American Bureau of Shipping (ABS) – Έλεγχος αρμονικών στα ηλεκτρικά συστήματα πλοίου

Σύμφωνα με τα όρια που θέτει ο ABS η συνολική αρμονική παραμόρφωση τάσης V_{thd} δεν πρέπει να ξεπερνά το 5% μετρημένη στο σημείο PCC που αναφέρθηκε ανωτέρω ενώ καμιά αρμονική δεν πρέπει να ξεπερνά το 3%. Όσο αναφορά το εύρος των αρμονικών παραμορφώσεων, αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν μόνο αν δεν έχουν μεγαλύτερο βαθμό από 50 δηλαδή 50 φορές την θεμελιώδη συχνότητα λειτουργίας. Σε περίπτωση που εξοπλισμός που τροφοδοτείται από ξεχωριστό πίνακα τροφοδοσίας έχει ανοχή στις αρμονικές παραμορφώσεις, τότε επιτρέπεται κάποια αύξηση του ορίου σύμφωνα πάντα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην περίπτωση που σε πίνακα τροφοδοσίας να μην υπάρχει για παράδειγμα ένας μετασχηματιστής των 480 V που είναι βαθμονομημένος για THDv= 8 % ενώ ο εξοπλισμός που τροφοδοτεί έχει μέγιστη ανοχή σύμφωνα με τον κατασκευαστή του για 5%. Τότε είναι προφανές ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί το ανωτέρω σενάριο για αυξημένο όριο στις αρμονικές παραμορφώσεις καθώς θα επηρεαστεί ο εξοπλισμός που τροφοδοτείται από τον μετασχηματιστή.

Στην μελέτη πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν όλες οι καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου με τις οποίες πραγματοποιείται και ο ηλεκτρικός ισολογισμός κατά το στάδιο προμελέτης του πλοίου. Οι περιορισμοί στο όριο αρμονικών παραμορφώσεων πρέπει να είναι εφαρμόσιμοι κατά τη διάρκεια όλων καταστάσεων λειτουργίας ωστόσο αν τα όρια υπερβαίνονται σε κατάσταση λειτουργίας που διαρκεί για πολύ μικρό χρονικό διάστημα πιθανόν δεν είναι απαραίτητη η απόδειξη ότι έχουν ληφθεί περαιτέρω μέτρα για τον περιορισμό των αρμονικών (πχ. αρμονικά φίλτρα).

7.11 Lloyds Register of Shipping (LRS) – Γενικές απαιτήσεις για σχεδιασμό και κατασκευή ηλεκτρικών συστημάτων πλοίου

Ο Αγγλικός νηογνώμονας θέτει απαιτήσεις κοντινές με τους υπόλοιπους κανονισμούς σε μικρότερου βαθμού αρμονικές ενώ ιδιαίτερα αυστηρές σε μεγαλύτερου βαθμού. Η συνολική αρμονική παραμόρφωση σε οποιοδήποτε πίνακα διανομής (switchboard or section board) δεν πρέπει να ξεπερνά το 8% της θεμελιώδους τιμής για όλες τις συχνότητες μέχρι 50 φορές τη θεμελιώδη ενώ καμιά τάση σε συχνότητα τροφοδοσίας 25πλάσια της θεμελιώδους δεν πρέπει να περνά το 1.5% της θεμελιώδους τάσης τροφοδοσίας. Ακόμη όλο το δίκτυο διανομής και τα φορτία πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να είναι ικανά να λειτουργούν αποτελεσματικά κάτω από φυσιολογικές διακυμάνσεις συχνότητας και τάσεις λειτουργίας.

Παρακάτω ορίζονται οι φυσιολογικές διακυμάνσεις από την ονομαστική τιμή του εκάστοτε εξοπλισμού όπως ορίζονται από τον νηογνώμονα, μετρούμενες στην είσοδο του καταναλωτή.

Πίνακας 7- 9: Αποδεκτές αποκλίσεις διακυμάνσεων τάσης και συχνότητας από τις ονομαστικές τιμές.
(Lloyds Register,2021)

	<i>Voltage</i>	<i>Frequency</i>
<i>Permanent variations</i>	+6% , -10%	±5%
<i>Transient variations due to step changes in load</i>	±20%	±10%
<i>Recovery time</i>	1.5 sec	5 sec

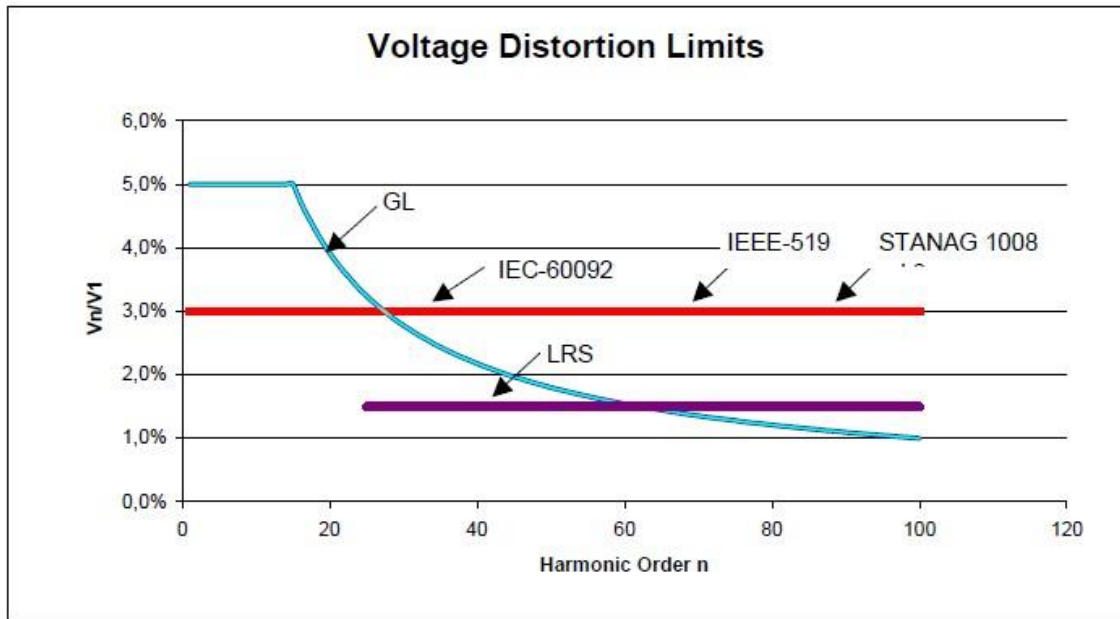
7.12 Ποιοτική σύγκριση μεταξύ των προτύπων των αρμονικών παραμορφώσεων

Στον πίνακα που ακολουθεί γίνεται σύνοψη και σύγκριση των προτύπων που διέπουν τους περιορισμούς για τις αρμονικές παραμορφώσεις. Είναι ιδιαίτερο εύκολο να παρατηρηθεί ότι όλα τα όρια είναι ιδιαίτερα κοντά με όλα να αποδέχονται τις τιμές κάτω του 5% για παραμόρφωση κυματομορφής ενώ κάποια δίνουν ένα εύρος χάριτος 3% προς τα πάνω της αναφερθείσας τιμής. Κάποια πρότυπα αναφέρουν ότι μπορεί να γίνει υπέρβαση των ορίων αρκεί αυτή από τη μία να μην επηρεάζει τον υπόλοιπο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό και από την άλλη να το εγκρίνει ο εκάστοτε κατασκευαστής. Τα πρότυπα ωστόσο δεν αναφέρουν περιορισμούς για τις διαρμονικές (τα μη ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας- **Βλ. Κεφ.3.2.6**). Όσο αφορά τα όρια της παραμόρφωσης κυματομορφής ρεύματος όπως διαφαίνεται στον **Πίν.7.10** , θέτονται μόνο από την IEEE-519 και την 8η έκδοση του STANAG 1008. [6]

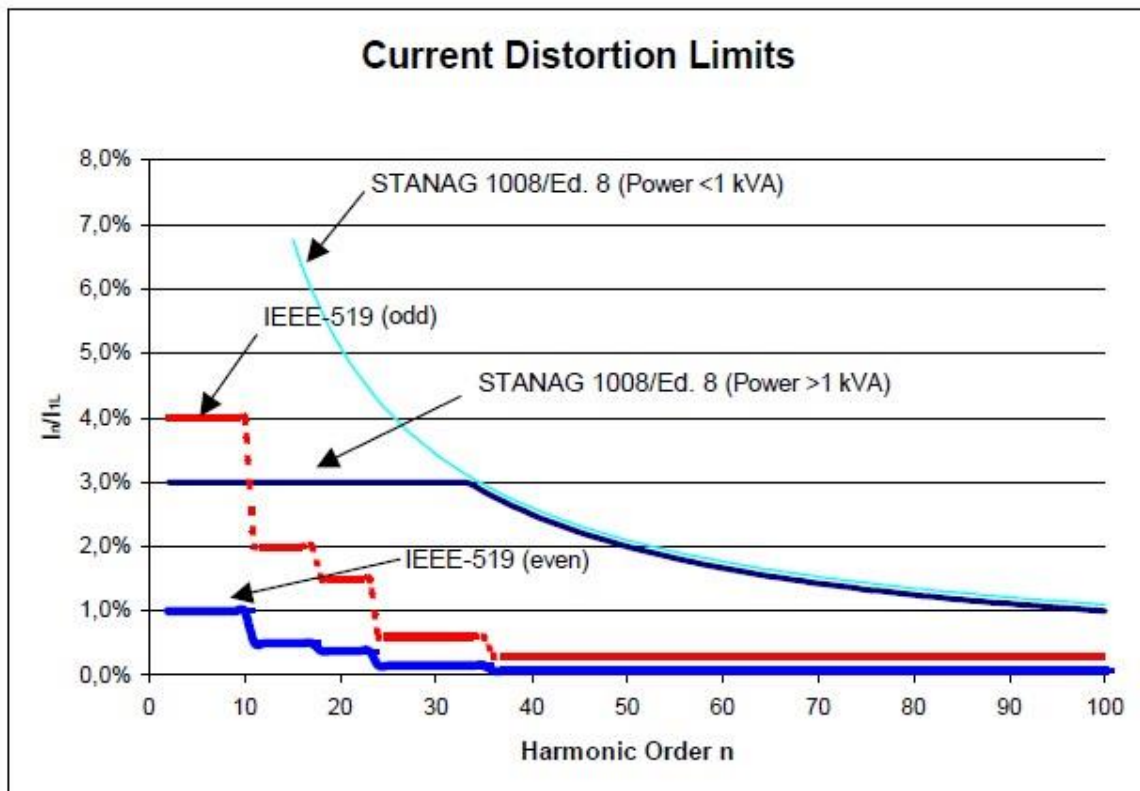
Πίνακας 7- 10: Συγκριτικός πίνακας μεταξύ προτύπων για τις αρμονικές παραμορφώσεις.

	<i>IEC-60092</i>	<i>IEEE-519</i>	<i>STANAG 1008</i>		<i>DNV GL</i>	<i>ABS</i>	<i>LRS</i>
			EDITION 8	EDITION 9			
<i>THD_v</i>	5%	5%	5%	5%	8%	5%	8%
<i>V_n</i>	3%	3%	3%	3%	Ναι (βλ. 7.9)	3%	1.5% ***
<i>THD_i</i>	*	5% **	-	*	-	-	-
<i>I_n</i>	*	Ναι (βλ.Πίν.7.7)	Ναι (βλ.Πιν7.8)	*	-	-	-
(σημειώσεις)	*όχι αριθμητικός περιορισμός **TDD _i ***ισχύει για n≥25						

Στις γραφικές αναπαραστάσεις που ακολουθούν πραγματοποιείται σύγκριση των ορίων αρμονικών παραμορφώσεων όπως αυτά θέτονται από τους κανονισμούς. Ουσιαστικά τα παρακάτω γραφήματα αποτελούν απεικονίσεις του **Πιν.7-10**. [6]



Εικόνα 7- 5. Γραφική αναπαράσταση των εκάστοτε ορίων αρμονικών παραμορφώσεων τάσεως που θέτονται από τους κανονισμούς.



Εικόνα 7- 6. Γραφική αναπαράσταση των ορίων που θέτονται από το STANAG και το IEEE-519 για την παραμόρφωση κυματομορφής ρεύματος.

8 Ανάπτυξη μοντέλου με σκοπό την διερεύνηση επίδρασης αρμονικών παραμορφώσεων στις απώλειες καλωδίων ηλεκτρικού συστήματος πλοίου

8.1 Αντικείμενο μελέτης

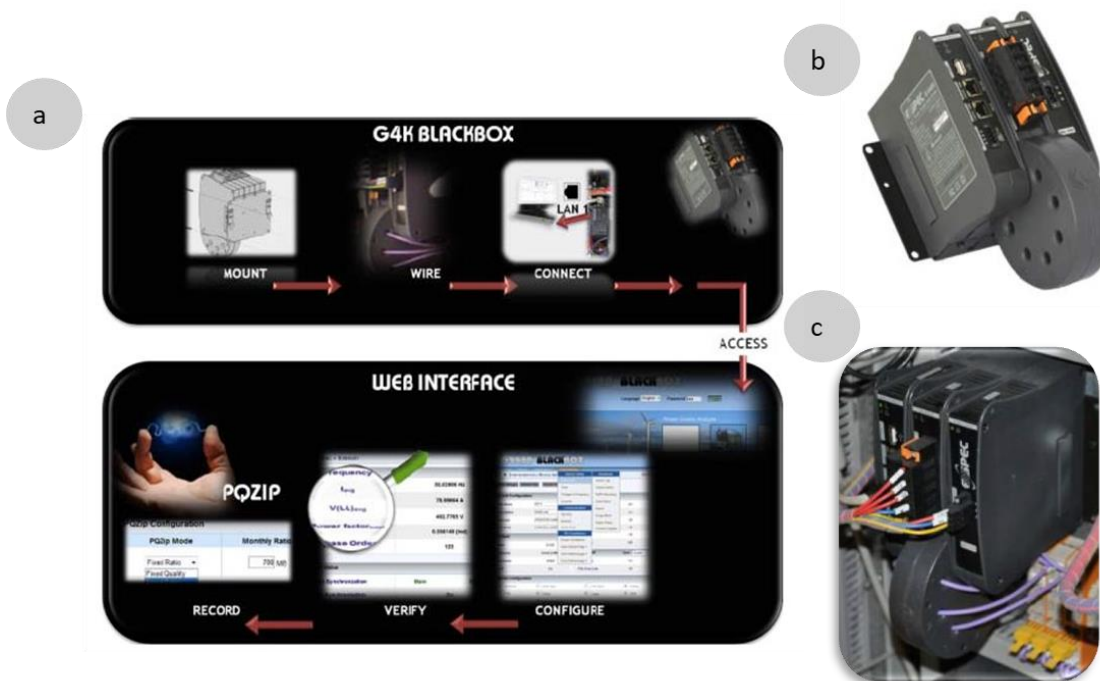
Τα τελευταία χρόνια ο έντονος εξηλεκτρισμός των μηχανοστασίων των πλοίων σε συνδυασμό με την αυξημένη αναγκαστική χρήση μη γραμμικών φορτίων με σκοπό την επιτέλεση διάφορων λειτουργιών έχει αυξήσει σημαντικά τα αρμονικά ρεύματα στα συστήματα διανομής. Όπως αναφέρεται στην αρχή της παρούσας εργασίας, όταν ένας συνδυασμός γραμμικών και μη γραμμικών φορτίων τροφοδοτείται από ημιτονοειδή παροχή, τότε το συνολικό ρεύμα τροφοδοσίας θα περιέχει αρμονικές. Τα αρμονικά ρεύματα που πλέον θα κυκλοφορούν στο δίκτυο διανομής έχουν ως απότοκο προβλήματα ποιότητας ισχύος, επηρεάζοντας παράλληλα αρνητικά την απόδοση των ηλεκτρικών μηχανημάτων του μηχανοστασίου. Αυτό το γεγονός έρχεται σε αντίθεση με την γενική προσπάθεια που πραγματοποιείται από διάφορους παγκόσμιους οργανισμούς και φορείς ώστε η απόδοση των πλοίων να αυξηθεί και να μειωθεί ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των θαλάσσιων μεταφορών. Επιπτώσεις όπως υπερβολική θερμότητα στον εξοπλισμό, μείωση συντελεστή ισχύος, γήρανση εξαρτημάτων και μείωση απόδοσης του συστήματος ισχύος, δυσχεραίνουν την προσπάθεια των μηχανικών για βελτιστοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος του πλοίου.

Το κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζει μια μεθοδολογία για την εύρεση των επιπρόσθετων ωμικών απωλειών των καλωδίων πλοίων λόγω αρμονικών παραμορφώσεων ρεύματος. Η προσέγγιση των απωλειών θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα που προκύπτουν από μετρήσεις που γίνονται σε διάφορα σημεία του δικτύου διανομής ισχύος του πλοίου. Αυτή η ανάπτυξη της παρούσας μεθοδολογίας έχει στόχο πρώτον την επαλήθευση του γεγονότος ότι η γένεση και η διανομή των αρμονικών παραμορφώσεων σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου αυξάνει τις ωμικές απώλειες και δεύτερον τον προσδιορισμό των απωλειών των καλωδίων τροφοδοσίας με τη χρήση δεδομένων μετρήσεων. Ακόμη η παρουσία αρμονικών παραμορφώσεων στους αγωγούς τροφοδοσίας στα ηλεκτρικά δίκτυα πλοίων αυξάνει την θερμοκρασία λειτουργίας (ως απότοκο των αυξημένων $[I^2 * R]$ ωμικών απωλειών) και μειώνει την ικανότητα του αγωγού στην μεταφορά φορτίου. Για το λόγο αυτό, δίκτυα με αυξημένες αρμονικές παραμορφώσεις πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να προβλέπεται αυτή τη μεταφορά των αυξημένων ρευμάτων από το μελετητή. Η προσέγγιση των ωμικών απωλειών είναι ιδιαίτερα περίπλοκη καθώς όπως έχει αναφερθεί ήδη στο **Κεφ.6.4** η αντίσταση των αγωγών εξαρτάται από τη συχνότητα του μεταφερόμενου ρεύματος. Από τη στιγμή που στον αγωγό υπάρχει κυκλοφορία ρευμάτων με ποικίλες συχνότητες η αντίσταση είναι μεταβλητή και δύσκολα προσεγγίσιμη. Πιο συγκεκριμένα η αντίσταση του αγωγού αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας λόγω των φαινομένων της επιδερμίδας και της γειτνίασης (skin and proximity effect).

8.2 Παρουσίαση μοντέλου εκτίμησης απωλειών καλωδίων

8.2.1 Μετρήσεις ποιότητας ισχύος στο μηχανοστάσιο

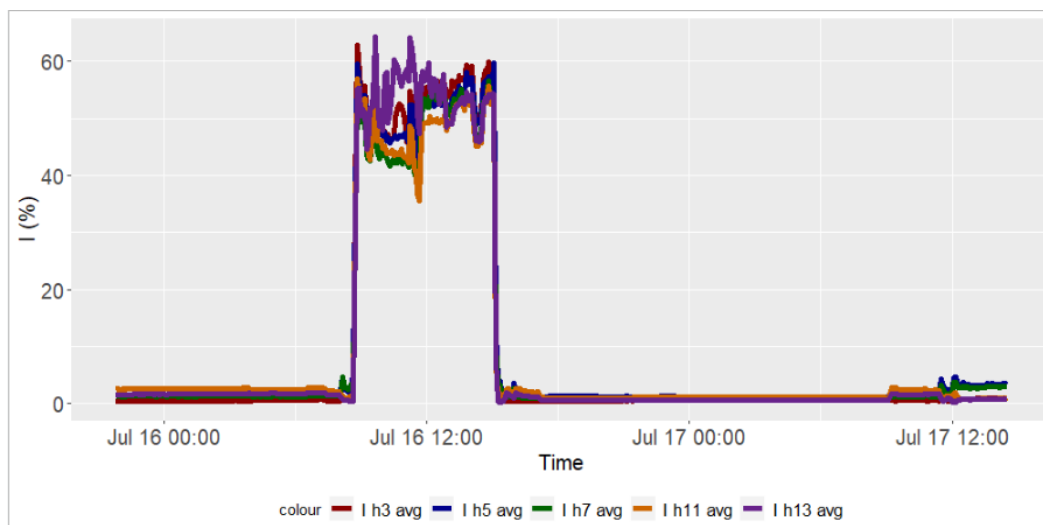
Με σκοπό την πραγματοποίηση μετρήσεων πάνω στο πλοίο είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ενός συστήματος παρακολούθησης και καταγραφής της ποιότητας ισχύος. Με τον τρόπο αυτό θα προκύψουν δεδομένα χρονοσειρών τα οποία με κατάλληλη επεξεργασία θα μπορούν να εκτιμήσουν τα μεγέθη των αρμονικών παραμορφώσεων στο σύστημα διανομής του πλοίου. Οι γενικές απαιτήσεις γύρω από ένα σύστημα καταγραφής της ποιότητας ισχύος είναι η αξιοπιστία, τα καλά επίπεδα ασύρματης επικοινωνίας για την αποφυγή επιπλέον καλωδίων στον περίπλοκο χώρο του μηχανοστασίου και η δυνατότητα επέκτασης για μετρήσεις σε επιπλέον σημεία αφού οι απαιτήσεις ενέργειας στο πλοίο μεταβάλλονται συνεχώς. Ένα τέτοιο σύστημα καταγραφής της ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος μπορεί να είναι μια συσκευή σαν τη ELSPEC G4 K BLACKBOX (G4400), η οποία μπορεί να μετρά και να καταγράφει σε πραγματικό χρόνο τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος. Η ανάκτηση δεδομένων γίνεται μέσω ασύρματης επικοινωνίας και ο κεντρικός σέρβερ του συστήματος παρακολούθησης ποιότητας ισχύος, που καταγράφει τις χρονοσειρές δεδομένων εδραιώνεται μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή συνδεδεμένου στο ίδιο ασύρματο δίκτυο με τις μετρητικές συσκευές που είναι εγκατεστημένες στα σημεία ενδιαφέροντος. Η περιορισμένη απαίτηση σε χώρο και οι ασύρματες συνδέσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές καθώς καθιστούν εφικτή την εγκατάσταση τέτοιου συστήματος σε υπάρχον πλοίο σε επίπεδο retrofit και δεν είναι απαραίτητη η προμελέτη για την εγκατάσταση του συστήματος κατά την κατασκευή του ηλεκτρικού συστήματος διανομής του πλοίου.



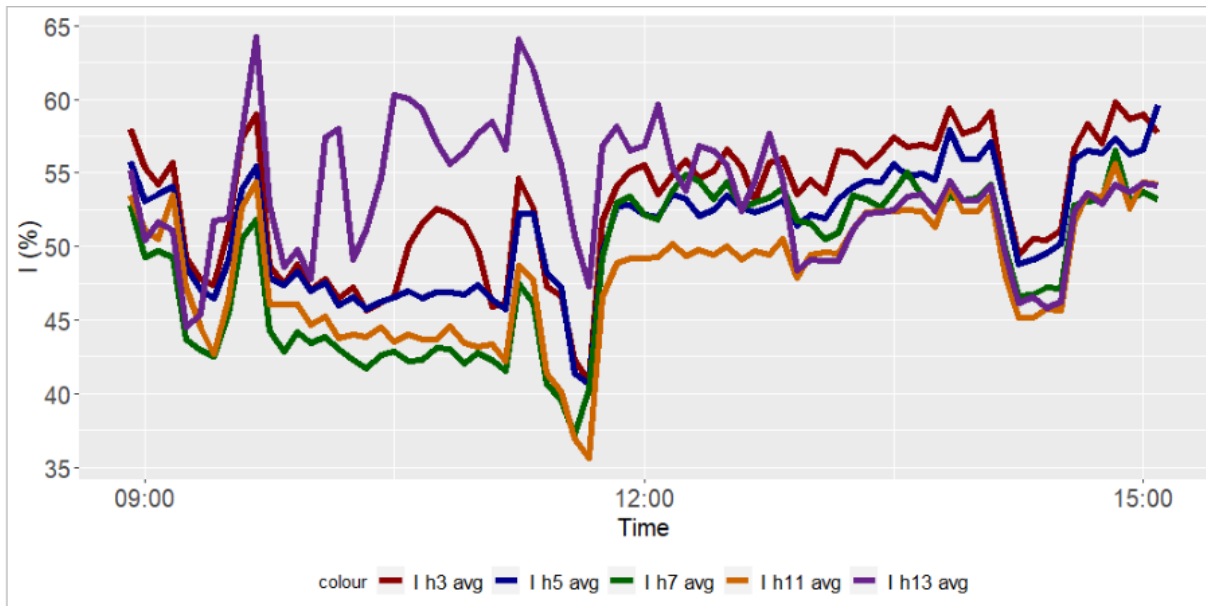
Εικόνα 8- 1. a) Συνοπτικό σχεδιάγραμμα εγκατάστασης και χρήσης μετρητικής συσκευής **b)** Το μετρητικό ELSPEC G4420 BLACKBOX **c)** Επιτυχημένη συνδεσμολογία ρεύματος του GK4 (ELSPEC manual)

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της παρούσας μεθοδολογίας παρήχθησαν από τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής κ. Προυσαλίδη στο πλαίσιο μέτρησης παραμορφώσεων στα ηλεκτρικά συστήματα πλοίου. Οι χρησιμοποιούμενες μετρήσεις διαρκούν περίπου 1,5 μέρα με συχνότητα μέτρησης τα 5 λεπτά σε έναν από τους κύριους ζυγούς διανομής. Πιθανές δοκιμές στο σημείο των μετρήσεων, στο συνολικό χρόνο μετρήσεων και στη συχνότητα μετρήσεων μπορεί να μεταβάλουν το αποτέλεσμα. Η βελτιστοποίηση των ανωτέρω παραμέτρων μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο εξέλιξης της παρούσας διπλωματικής. Ωστόσο το 24ωρο που πραγματοποιήθηκαν οι χρησιμοποιούμενες μετρήσεις αποτελεί ένα χαρακτηριστικό 24ωρο εν πλω, συνεπώς τα αποτελέσματα θα δώσουν μια βασική εκτίμηση του μεγέθους του προβλήματος.

Οι μετρήσεις περιέχουν τις RMS τιμές για την 3^η, 5^η, 7^η, 11^η, 13^η αρμονική παραμόρφωση τάσης και ρεύματος ως ποσοστό των θεμελιώδων ρευμάτων και τάσεων. Παρατηρείται ότι μεταξύ των τριών φάσεων υπάρχουν μικρές διαφορές σε μεγέθη τιμών και γενικά ακολουθείται κοινή συμπεριφορά. Όσο αναφορά την μεταβολή των μετρήσεων με το χρόνο είναι εφικτή η ανάλυση ευαισθησίας της μεταβολής των θερμικών απωλειών των καλωδίων σε 3 διαφορετικά σενάρια καθώς υπάρχουν δύο διαφορετικές περιοχές με μεγέθη τιμών. Από τις 8:55 (timestamp μετρήσεων) έως τις 15:05 το μεσημέρι υπάρχει μια ραγδαία αύξηση των αρμονικών παραμορφώσεων, η οποία οφείλεται σε αυξημένα μη γραμμικά φορτία και προφανώς μεταβάλλει σημαντικά τις απώλειες καλωδίων. Όπως θα αναφερθεί παρακάτω τα αρμονικά ρεύματα θα προκύψουν πολλαπλασιάζοντας τα θεμελιώδη με το ποσοστό των μέσων τιμών από τις μετρήσεις. Το ποσοστό που θα επιλεγεί και θα αποδώσει τα τελικά αρμονικά ρεύματα θα προκύψει στατιστικά από τις μετρήσεις σύμφωνα με τα επιλεχθέντα σενάρια. Στο πρώτο σενάριο θα ληφθούν υπόψη όλες οι μετρήσεις, στο δεύτερο σενάριο θα ληφθεί υπόψη το χρονικό διάστημα που έχουμε σημαντική αύξηση του μεγέθους των αρμονικών μεταξύ 8:55-15:05 και στο τρίτο σενάριο θα ληφθούν υπόψη μόνο οι μικρές αρμονικές παραμορφώσεις. Περισσότερες λεπτομέρειες θα δωθούν στο πεδίο της ανάλυσης ευαισθησίας του προβλήματος. Στις παρακάτω εικόνες διαφαίνονται κάποια δεδομένα από τις χρονοσειρές των μετρήσεων των οποίων η απεικόνιση έγινε σε προγραμματιστικό περιβάλλον R.

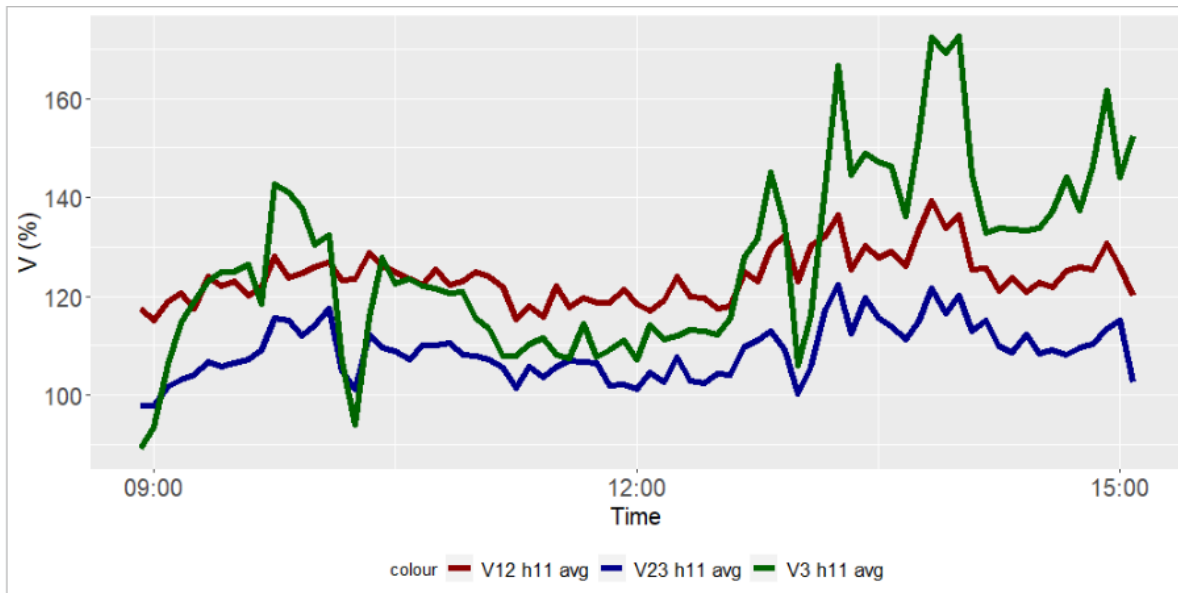


Εικόνα 8- 2. Διάγραμμα με τις αρμονικές παραμορφώσεις ρεύματος των μετρήσεων, ως % ποσοστό της θεμελιώδους τιμής ρεύματος σε σχέση με το χρόνο.

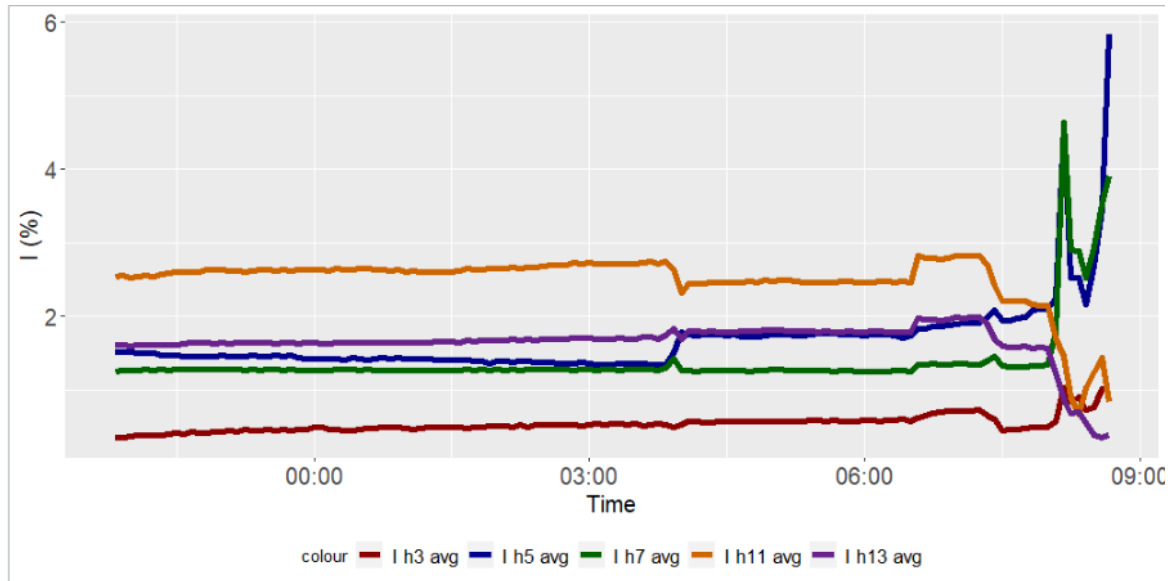


Εικόνα 8- 3. Οι αρμονικές παραμορφώσεις ρεύματος στο χρονικό διάστημα που παίρνουν τις υψηλότερες τιμές.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι τα διαγράμματα είναι λογικό που δεν ακολουθούν ομαλή μορφή πχ. ημιτονοειδή καμπύλη παρόλο που είναι ρεύμα και τάση καθώς οι η λήψη των μετρήσεων είναι ανά 5 λεπτά και οι αναφερόμενες τιμές είναι ποσοστά.



Εικόνα 8- 4. Οι τάσεις μεταξύ των τριών φάσεων της 11ης αρμονικής συνιστώσας στο ίδιο χρονικό διάστημα με ανωτέρω.



Εικόνα 8- 5. Οι αρμονικές παραμορφώσεις ρεύματος στο χρονικό διάστημα που παίρνουν τις χαμηλότερες τιμές.

Όπως διαφαίνεται στην **Εικ.8.5** οι αρμονικές παραμορφώσεις ρεύματος στο χρονικό διάστημα κανονικής ροής παίρνουν τιμές μικρότερες από 4% της θεμελιώδους τιμής ρεύματος ενώ στο διάστημα αιχμής χρήσης μη γραμμικών φορτίων φτάνουν σε μέγεθος ακόμη και το 65% του μεγέθους της θεμελιώδους τιμής ρεύματος.

8.2.2 Υπολογισμός απωλειών στα καλώδια τροφοδοσίας

Όταν το ρεύμα διαρρέει έναν αγωγό, δημιουργούνται απώλειες με τη μορφή θερμότητας. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε από τον Joule τον 19^ο αιώνα. Η εξίσωση για τις απώλειες θερμότητας ενός αγωγού που διαρρέεται από ρεύμα σε 3φασικό κύκλωμα δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta P = 3 * R * I^2 \quad (8.1)$$

Όπου:

R : η αντίσταση του αγωγού σε $[\Omega]$, I : η τιμή του ρεύματος εισόδου στο φορτίο σε $[A]$

Η αντίσταση R του αγωγού θα υπολογιστεί για κάθε φορτίο του πλοίου χρησιμοποιώντας την εκάστοτε διατομή του καλωδίου του φορτίου που έχει επιλεγεί από τον ηλεκτρικό ισολογισμό (electric load analysis) και την απόσταση του καλωδίου έως το φορτίο πάνω στο πλοίο. Για τον τελικό υπολογισμό της αντίστασης θα γίνει χρήση πινάκων σύμφωνα με το **IEC-228** οι οποίοι δίνουν τις τιμές αντίστασης σε $m\Omega/m$ για αγωγό 3 κλώνων που διαρρέεται από ρεύμα συχνότητας 60 Hz.

Η τιμή του ρεύματος γραμμής του φορτίου σε 3φασικό κύκλωμα θα προκύψει χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

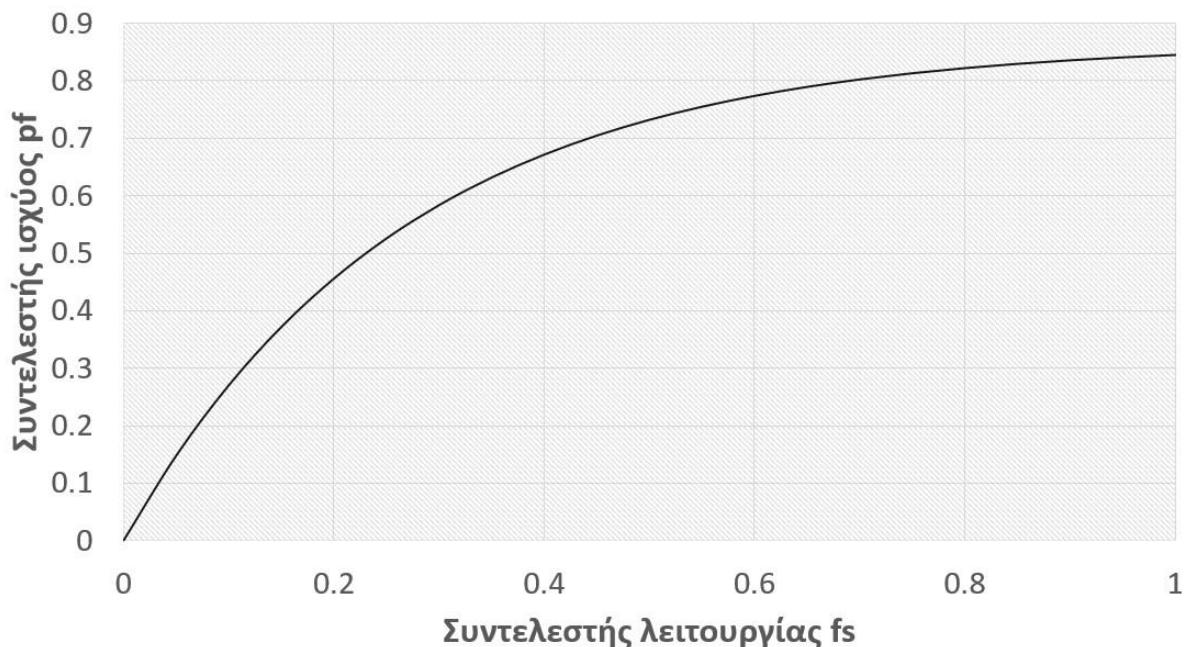
$$I = \frac{P_{IN}}{\sqrt{3} * V_P * pf} \quad (8.2)$$

Όπου:

P_{IN} : είναι η απορροφημένη ισχύς, δηλαδή η ονομαστική προς το βαθμό απόδοσης, V_p : είναι η πολική τάση (μεταξύ των φάσεων), και ο pf είναι ο λόγος της πραγματικής προς τη φαινόμενη ισχύ και αναλύεται στο **Κεφ.2.2.5**.

Ο συντελεστής ισχύος pf υπολογίζεται ως συνάρτηση του fs (συντελεστή λειτουργίας). Αυτό γίνεται για να εκτιμηθεί η συνολική απαίτηση σε φόρτιση των γεννητριών του πλοίου έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη και οι απαιτήσεις των ηλεκτροκινητήρων σε άεργο ισχύ. Οι επαγωγικοί κινητήρες έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε άεργο ισχύ όταν δεν λειτουργούν στο ονομαστικό φορτίο και λειτουργούν σε μερική φόρτιση. Από στατιστική ανάλυση δεδομένων και εγχειρίδια κατασκευαστών παρουσιάζεται γραφικά η σχέση του συντελεστή ισχύος συναρτήσεις του συντελεστή λειτουργίας (δηλαδή του ποσοστού φόρτισης). Η μαθηματική σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη δίνεται παρακάτω:

$$pf = 0.865 * (1 - e^{-3.74fs}) \quad (8.3)$$



Εικόνα 8- 6: Διάγραμμα συντελεστή ισχύος pf ως συνάρτηση του συντελεστή λειτουργίας fs .

Τελικά, αντικαθιστώντας την **(8.2)** στην **(8.1)** προκύπτει η παρακάτω σχέση μέσω της οποίας υπολογίζονται οι απώλειες καλωδίων τροφοδοσίας όταν λειτουργούν στο κύκλωμα κυρίως γραμμικά φορτία.

$$P_{cable} = \left(\frac{fs * Pin}{V\pi * pf}\right)^2 * R \quad (8.4)$$

Για να πραγματοποιηθεί σωστά ο υπολογισμός των ενεργειακών απωλειών των καλωδίων είναι απαραίτητη η γνώση της διατομής και του μήκους του καλωδίου, συνεπώς πρέπει να υπάρχει ή να διεξαχθεί ενεργειακός ισολογισμός. Η εύρεση των απωλειών πραγματοποιείται για τρεις καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου όπου στην καθεμία το πλοίο έχει ιδιαίτερα διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες, συνεπώς και διαφορετικές ενεργειακές απώλειες. Οι καταστάσεις λειτουργίας στον ηλεκτρικό ισολογισμό του πλοίου καθορίζονται

χρησιμοποιώντας τους συντελεστές λειτουργίας fs . Έτσι για παράδειγμα οι αντλίες κυκλοφορίας του νερού ψύξης της κύριας μηχανής του πλοίου λαμβάνουν την τιμή 0 στην περίπτωση που το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι δηλαδή στην κατάσταση λειτουργίας «εν όρμω». Οι τιμές του συντελεστή λειτουργίας fs για τις τρεις καταστάσεις λειτουργίας (πορείας, χειρισμών, εν όρμω) έχουν ληφθεί από χαρακτηριστικές τιμές εμπειρικών πινάκων για κάθε μηχανήμα του πλοίου χωριστά.

Στην περίπτωση των μη γραμμικών φορτίων, που είναι και η περίπτωση που θέλουμε να εξετάσουμε, ο υπολογισμός της χαμένης ενέργειας είναι ιδιαίτερα περίπλοκος διότι πρέπει να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς η επίδραση του φαινομένου της επιδερμίδας και η επίδραση του φαινομένου της γειννίαςσης. Οι αρμονικές παραμορφώσεις λόγω των μη γραμμικών φορτίων αυξάνουν ιδιαίτερα τη συχνότητα των μη ημιτονικών ρευμάτων (ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας) και έτσι έχουμε αύξηση των προαναφερθέντων φαινομένων. Το φαινόμενο της γειννίαςσης (proximity effect) μπορεί να μειωθεί τοποθετώντας σε κατάλληλες αυξημένες αποστάσεις τους αγωγούς μεταξύ τους ή σε κατάλληλες διατάξεις τα πολύκλινα καλώδια. Όμως για το παραμορφωμένο ρεύμα, οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος ισοδυναμούν με το άθροισμα όλων των απωλειών του κάθε ρεύματος παραμόρφωσης που κυκλοφορεί στους εκάστοτε αγωγούς και μπορεί να εκφραστεί ως :

$$\Delta P = \sum_{n=1}^{\infty} R_n (I_{\%n} * I_{1h})^2 \quad (8.5)$$

Όπου: I_{1h} : είναι το θεμελιώδες ρεύμα (με βάση το οποίο υπολογίστηκαν οι απώλειες μη γραμμικών φορτίων), $I_{\%n}$: είναι η επί τις εκατό τιμή της νιοστής αρμονικής ρεύματος ως προς τη θεμελιώδη τιμή και η R_n είναι η αντίσταση του εκάστοτε καλωδίου.

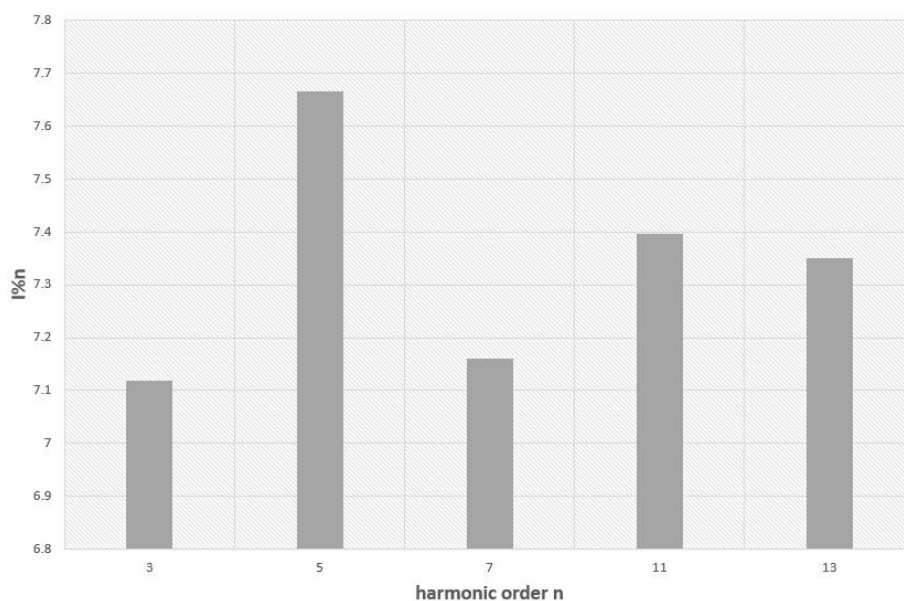
Η αντίσταση του εκάστοτε καλωδίου R_1 (θεμελιώδη αντίσταση) υπολογίστηκε όπως αναφέρθηκε ανωτέρω μέσω τυπικών τιμών πινάκων σύμφωνα με το IEC- 228. Όσο η συχνότητα του ρεύματος αυξάνεται, το ρεύμα στον αγωγό συγκεντρώνεται όλο και περισσότερο προς την εξωτερική επιφάνεια του αγωγού, οπότε η αντίσταση αυξάνει και έτσι οι R_n ($n>1$) θα έχουν μεγαλύτερη τιμή από την αντίσταση του καλωδίου στην περίπτωση που το διαρρέει ημιτονοειδές ρεύμα. Η μοντελοποίηση των αντιστάσεων για τα αρμονικά ρεύματα γίνεται σύμφωνα με την προσεγγιστική σχέση του (G.J.Wakileh, Springer 2001) που αναφέρεται στο κεφάλαιο 6 με τις εξισώσεις (6.5) και (6.8). Οι τιμές για τον επαγωγικό όρο X_L της σύνθετης αντίστασης προκύπτουν επίσης από πίνακες κατά IEC-228.

Για τον υπολογισμό $I_{\%n}$, δηλαδή των νιοστών αρμονικών μετρήσεων, με σκοπό την προσέγγιση τους έγινε χρήση των μετρήσεων που αναφέρονται στο **Κεφ.8.2.1** και η επιλεχθείσα τιμή πολλαπλασιάστηκε με την τιμή του θεμελιώδους ρεύματος και τελικά προέκυψε η τιμή των αρμονικών ρευμάτων του κάθε φορτίου όπως ορίζεται από την εξίσωση (8.5). Επειδή η επιλεχθείσα τιμή του ποσοστού αυτού, σε συνδυασμό φυσικά με την τιμή της αντίστασης θα κρίνουν τις ενεργειακές απώλειες, γίνεται παρακάτω μια ανάλυση ευαισθησίας με σκοπό την επίτευξη πιο αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων. Αυτό συμβαίνει καθώς όπως παρατηρείται από τα ανωτέρω διαγράμματα υπάρχει μεγάλη μεταβολή των αρμονικών ρευμάτων στη διάρκεια της μέρας. Οι διαφορετικές τιμές ποσοστών ρεύματος που θα προκύψουν από τις μετρήσεις θα εφαρμοστούν και στις 3 καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου.

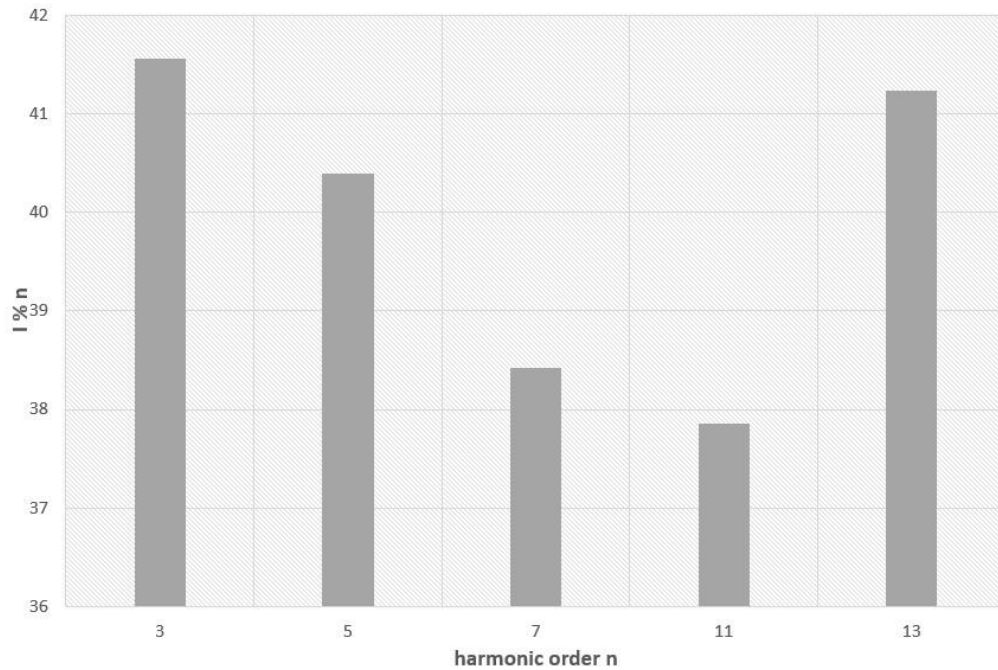
8.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας στις μετρήσεις

Με σκοπό την καλύτερη προσέγγιση των απωλειών ενέργειας των καλωδίων πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας ώστε οι μετρήσεις να χρησιμοποιηθούν πιο αποδοτικά λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα των αρμονικών ρευμάτων ανάλογα φυσικά με τα ενεργά μη γραμμικά φορτία. Οι χρησιμοποιούμενες μετρήσεις έχουν διάρκεια 36 περίπου ωρών και συχνότητα μέτρησης τα 5 λεπτά. Λόγω του γεγονότος ότι παρατηρείται μια περίοδος αιχμής που διαρκεί αρκετές ώρες χωρίζοντας στην ουσία τις μετρήσεις σε 2 περιοχές τιμών, η τιμή του $I_{\%n}$ που είναι και η ζητούμενη θα προκύψει λαμβάνοντας υπόψη 3 σενάρια. Σε κάθε σενάριο η τιμή του $I_{\%n}$ που τελικά θα πολλαπλασιαστεί με τη θεμελιώδη τιμή ρεύματος του κάθε φορτίου, θα προκύψει ως μέση τιμή του επιλεχθέντος χρονικού διαστήματος ανάλογα με το σενάριο. Για παράδειγμα η $I_{\%3}$ θα υπολογιστεί ως μέση τιμή της 3^{ης} μετρούμενης αρμονικής συνιστώσας στο επιλεχθέν χρονικό διάστημα και μεταξύ των τριών φάσεων. Μεταξύ των τριών φάσεων της κάθε αρμονικής συνιστώσας δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές οπότε κρίνεται σκόπιμο στην παρούσα διπλωματική να μην πραγματοποιηθεί διαφορετική ανάλυση για κάθε μια φάση αλλά η μέση τιμή να προκύψει λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα και τις 3 φάσεις.

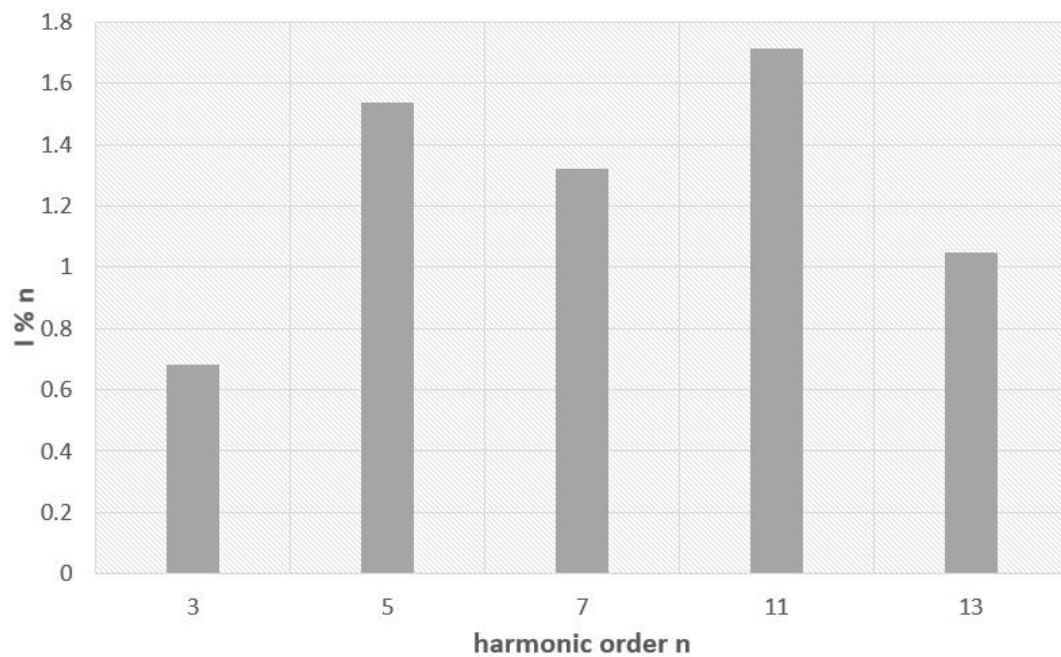
Το πρώτο σενάριο που ως απότοκο θα έχει τις $I_{\%n}$ ($n=3,5,7,11,13$) θα περιέχει τις μετρήσεις όλου του χρονικού διαστήματος που απεικονίζονται στην **Εικ.8.2**. Το δεύτερο σενάριο θα επικεντρωθεί στο χρονικό διάστημα μεταξύ 8:55-15:05 (timestamp μετρήσεων) όπου αναμένονται αυξημένες απώλειες λόγω υψηλών αρμονικών παραμορφώσεων. Το τρίτο σενάριο θα προσεγγίσει τις απώλειες όταν λειτουργούν πολύ λίγα μη γραμμικά φορτία με αποτέλεσμα οι αρμονικές απώλειες να είναι μειωμένες. Το χρονικό διάστημα του τελευταίου σεναρίου θα περιλαμβάνει τις μετρήσεις αρμονικών παραμορφώσεων από τις 21:50 έως τις 8:50 της επόμενης ημέρας (λίγο πριν την περίοδο αιχμής) και από τις 15:10 έως το τέλος των μετρήσεων στις 14:30 της επόμενης μέρας. Παρακάτω παρουσιάζονται σε διαγράμματα οι μέσες τιμές της κάθε αρμονικής ρεύματος που προέκυψαν από τις μετρήσεις για το κάθε σενάριο.



Εικόνα 8- 7. Μέσες τιμές κάθε αρμονικής συνιστώσας σύμφωνα με το πρώτο σενάριο-(Α).



Εικόνα 8- 8. Μέσες τιμές κάθε αρμονικής συνιστώσας σύμφωνα με το δεύτερο σενάριο-(B).



Εικόνα 8- 9. Μέσες τιμές κάθε αρμονικής συνιστώσας σύμφωνα με το τρίτο σενάριο-(C).

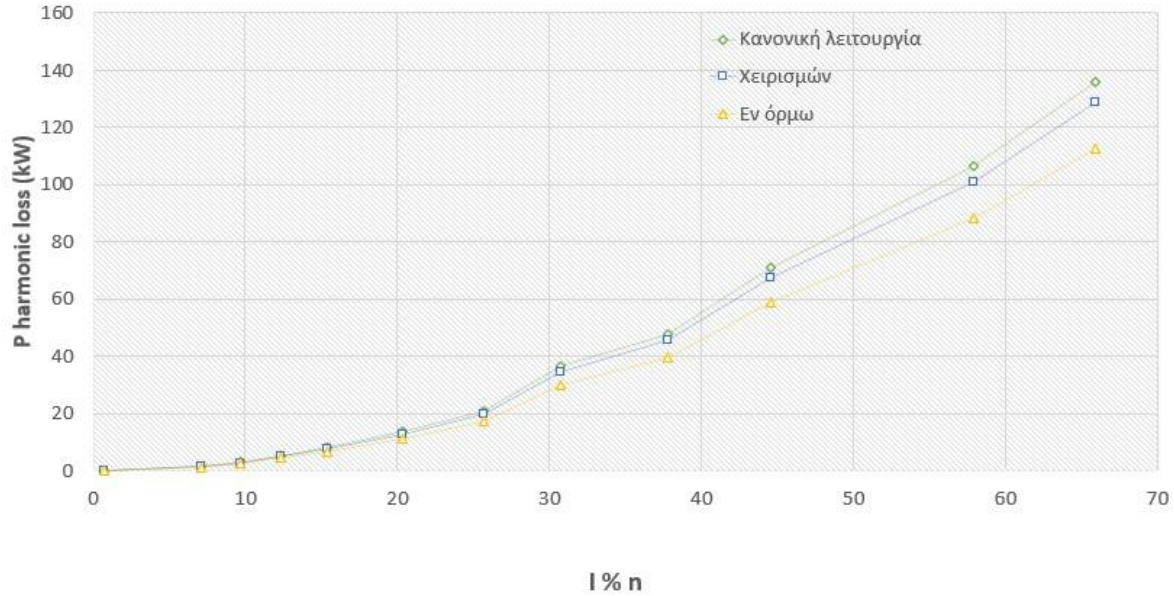
8.3 Αποτελέσματα

Χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία που παρουσιάζεται ανωτέρω στο **Κεφ.8.2.2** και τη χρονοσειρά μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε η προσέγγιση απωλειών λόγω αρμονικών παραμορφώσεων στα καλώδια του πλοίου. Πιο συγκεκριμένα έγινε εφαρμογή 3 σεναρίων των μετρήσεων (βλέπε **8.2.3**) στις 3 βασικές καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου. Από τα 3 σεναρία τα πιο αντιπροσωπευτικά είναι το 2^ο και το 3^ο καθώς αντικατοπτρίζουν πραγματικές καταστάσεις, το 2^ο κατά τη διάρκεια μετρήσεων με υψηλά μη γραμμικά φορτία άρα και υψηλές αρμονικές παραμορφώσεις και το 3^ο κατά τη διάρκεια μικρών αρμονικών παραμορφώσεων αντίστοιχα. Στη 1,5 ημέρα μετρήσεων το σενάριο 2 όπως αναμενόταν παρουσιάζει τις μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας οι οποίες επιβαρύνουν την γεννήτρια κατά 7-12% (του φορτίου της) για συνεχόμενες 6 σε μόλις 36 ώρες. Με απλοϊκούς υπολογισμούς μια μέση γεννήτρια ισχύος 600kw καταναλώνει 160lt/hr πετρέλαιο με τα 16 lt/hr από αυτά να αντιστοιχούν να καλύψουν τις εν λόγω απώλειες. Εκτός όμως από τις απώλειες λόγω αρμονικών παραμορφώσεων, η κυκλοφορία αυξημένων ρευμάτων επιφέρει ποικίλες αρνητικές επιπτώσεις τόσο σε αύξηση θερμοκρασιών στα καλώδια και τον εξοπλισμό όσο και σε δυσλειτουργίες (βλέπε Κεφ.6). Η μέθοδος με σκοπό την προσέγγιση των επιπλέον ωμικών απωλειών μπορεί να εφαρμοστεί και σε μεγαλύτερο εύρος μετρήσεων με είσοδο διαφορετικές τιμές αρμονικών παραμορφώσεων. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται μια πρόβλεψη των απωλειών αρμονικών παραμορφώσεων στις τρεις καταστάσεις λειτουργίας του συγκεκριμένου πλοίου. Μεγάλες τιμές αρμονικών παραμορφώσεων αυξάνουν ιδιαίτερα μη γραμμικά τις απώλειες και φυσικά είναι εκτός των περισσότερων προδιαγραφών των κανονισμών.

Πίνακας 8- 1: Παρουσίαση δεδομένων απωλειών λόγω αρμονικών παραμορφώσεων στις 3 καταστάσεις λειτουργίας.

			Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Κατάσταση λειτουργίας	P loss (kW)	Ισχύς γεννητριών (kW)	P harmonic loss (kW)	P harmonic loss (kW)	P harmonic loss (kW)
Κανονική πορεία	70.2	673.3	1.69	49.54	0.051
Χειρισμών	65.3	944.49	1.61	45.59	0.053
«Εν όρμω»	57.4	346.22	1.39	41.03	0.046

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των υπολογισμών στα 3 σεναρία και στις 3 καταστάσεις λειτουργίας με υπολογισμό ηλεκτρικών μεγεθών για κάθε συσκευή του πλοίου χωριστά.



Εικόνα 8- 10: Πρόβλεψη απωλειών σε αυξημένες τιμές αρμονικών παραμορφώσεων.

8.3.1 Απώλειες καλωδίων τροφοδοσίας στην κατάσταση κανονικής πορείας

❖ Χρήση δεδομένων αρμονικών παραμορφώσεων πρώτου σεναρίου

Πίνακας 8- 2: Παρουσίαση υπολογισμών στην κατάσταση κανονικής πορείας με το σενάριο 1.

Κατάσταση λειτουργίας 1: Κανονική πορεία- Σενάριο 1												
Εξοπλισμός	P nominal	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmonic loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	W
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΩΩΣΗΣ												
Κύριοι Αεροσυμπιεστές	25.76	0.10	0.27	0.14	12.5	1.00	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	1.57
Αντλίες λαδιού λίπανσης ΚΜ	33.12	0.85	0.83	0.08	44.6	0.47	3.2	3.4	3.2	3.3	3.3	11.46
Διαχωριστήρες πετρελαίου	14.72	0.70	0.80	0.42	33.7	1.42	2.4	2.6	2.4	2.5	2.5	34.64
Αντλία μεταγίγχισης πετρελαίου Diesel	3.68	0.00	0.00	1.36	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Αεροσυμπιεστές εκκινήσεως	29.44	0.10	0.27	0.07	14.3	0.04	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.06
Αεροσυμπιεστής αυτοματισμού	25.76	0.20	0.46	0.12	14.8	0.08	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.95
Αντλία συμπυκνώματος	8.83	0.40	0.67	0.59	6.9	0.08	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	2.06

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ

Κινητήρες Μηχανισμού πηδαλίου	25.76	0.10	0.27	0.12	12.5	0.06	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	1.42
Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	7.36	0.00	0.00	0.99	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα λέβητα	2.94	0.50	0.73	1.43	2.6	0.03	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.73
Αντλίες κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων ΚΜ	25.76	0.85	0.83	0.12	34.7	0.44	2.5	2.7	2.5	2.6	2.5	10.66
Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	7.36	0.80	0.82	0.92	9.4	0.24	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	5.94
Θερμαντήρες καυσίμου	15	0.00	0.00	1.21	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Αντλίες μεταγύγισης βαρέος πετρελαίου	14.72	0.10	0.27	0.58	7.2	0.09	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	2.17
Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλασσινού νερού	82.43	0.85	0.83	0.03	221.8	3.89	15.8	17.0	15.9	16.4	16.3	94.76
Αντλίες ψύξης βαλβίδων ΚΜ	18.4	0.85	0.83	0.29	24.8	0.54	1.8	1.9	1.8	1.8	1.8	13.18
Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	5.88	0.85	0.83	1.75	7.9	0.33	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	8.01
Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	29.44	0.85	0.83	0.13	79.2	2.48	5.6	6.1	5.7	5.9	5.8	60.34
Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	10.30	0.35	0.63	0.76	7.5	0.13	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	3.14
ΣΥΝΟΛΟ			0.54			11.3						253.12
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ												
Γερανογέφυρα	11.0	0.5	0.73	0.75	9.90	0.22	0.70	0.76	0.71	0.73	0.73	5.38
Τόρνος	3.7	0.1	0.27	1.75	1.79	0.02	0.13	0.14	0.13	0.13	0.13	0.41
Δράπανο	1.5	0.1	0.27	1.68	0.72	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
Συσκευή συγκολλήσεων	20.0	0.1	0.27	0.59	9.72	0.17	0.69	0.75	0.70	0.72	0.71	4.10
Μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων	18.0	0.4	0.67	0.83	14.08	0.49	1.00	1.08	1.01	1.04	1.03	12.06
ΣΥΝΟΛΟ			0.44			0.90						22.01
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ												

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΟΙΟΥ

ΣΚΑΦΟΥΣ												
Αντλία κύτους	14.72	0.2	0.46	1.31	8.48	0.28	0.60	0.65	0.61	0.63	0.62	6.86
Αντλία πυρκαϊάς	33.12	0	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες γενικής χρήσης	36.8	0	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Εργάτης αγκύρας	29.44	0	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Εργάτες πρυμνησίων	47.84	0	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία ποσίμου νερού	11.04	0.5	0.73	1.29	9.90	0.38	0.70	0.76	0.71	0.73	0.73	9.26
Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	3.68	0.7	0.80	3.14	4.22	0.17	0.30	0.32	0.30	0.31	0.31	4.07
Αντλία πλυσίματος καταστρώματος	11.04	0	0.00	2.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης	14.72	0	0.00	1.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες υγιεινής	7.36	0.4	0.67	1.78	5.76	0.18	0.41	0.44	0.41	0.43	0.42	4.32
Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας	18.4	0.1	0.27	0.32	17.89	0.31	1.27	1.37	1.28	1.32	1.32	7.49
Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	14.72	0	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία στεγανών θυρών	3.68	0.00	0.00	3.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πλευρικός προωστήριος μηχανισμός	625.6	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣΥΝΟΛΟ			0.21			1.31						32.01
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ												
Συμπιεστές κλιματισμού	33.1	0.75	0.81	0.09	40.11	0.43	2.85	3.07	2.87	2.97	2.95	10.57
Συμπιεστές ψυκτικής	7.4	0.4	0.67	1.16	11.51	0.46	0.82	0.88	0.82	0.85	0.85	11.22
Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	14.7	0.75	0.81	0.34	35.65	1.31	2.54	2.73	2.55	2.64	2.62	32.03
Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	11.0	0.75	0.81	0.58	26.74	1.25	1.90	2.05	1.91	1.98	1.97	30.36
Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	1.5	0.4	0.67	1.29	2.30	0.02	0.16	0.18	0.16	0.17	0.17	0.50
Αντλίες πόσιμου νερού	2.9	0.5	0.73	1.68	5.28	0.14	0.38	0.40	0.38	0.39	0.39	3.43
Αντλίες αποχέτευσης	7.4	0.7	0.80	0.79	16.86	0.67	1.20	1.29	1.21	1.25	1.24	16.45

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ

Αντλίες θερμού νερού	2.2	0.7	0.80	2.11	8.73	0.48	0.62	0.67	0.63	0.65	0.64	11.77
Συμπιεστής παγωτομηχανής	1.1	0.3	0.58	1.35	1.29	0.01	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.16
Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	0.7	0.8	0.82	1.56	19.47	1.78	1.39	1.49	1.39	1.44	1.43	43.37
Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	3.7	0.85	0.83	1.29	102.52	40.58	7.30	7.86	7.34	7.58	7.54	989.00
Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	7.4	0.4	0.67	0.02	40.29	0.11	2.87	3.09	2.88	2.98	2.96	2.64
Ανελκυστήρας	11.0	0.3	0.58	0.41	7.45	0.07	0.53	0.57	0.53	0.55	0.55	1.66
ΣΥΝΟΛΟ			0.74			47.3						1153.15

Κατάσταση λειτουργίας 1: Κανονική πορεία – Σενάριο 1

Εξοπλισμός	P nominal	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmonic loss	
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	W	
ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ													
Κουζίνα	30.0	0.3	0.58	0.56	40.49	2.76	2.9	3.1	2.9	3.0	3.0	67.32	
Εστίες	20.0	0.3	0.58	1.53	26.99	3.33	1.9	2.1	1.9	2.0	2.0	81.26	
Ανεμιστήρας	4.4	0.3	0.58	4.36	2.98	0.12	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	2.83	
Εξαεριστήρας	11.0	0.3	0.58	1.51	7.45	0.25	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	6.11	
Πλυντήριο πιάτων	1.5	0.2	0.46	2.08	1.46	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.33	
Διάφορες συσκευές	2.0	0.3	0.58	1.66	9.32	0.43	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	10.52	
ΣΥΝΟΛΟ			0.56			6.91						168.37	
ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ													
Μηχανοστάσιο	22	1	0.84	0.09	59.0	0.90	4.2	4.5	4.2	4.4	4.3	21.91	
Γέφυρα	15	0.5	0.73	0.22	23.2	0.36	1.7	1.8	1.7	1.7	1.7	8.74	
Χώροι ενδιαίτησης	12	0.4	0.67	0.23	32.4	0.72	2.3	2.5	2.3	2.4	2.4	17.43	
Καταστρώματος	9	0.1	0.27	0.36	15.1	0.25	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	6.07	
ΣΥΝΟΛΟ			0.63			2.22	4.2	4.5	4.2	4.4	4.3	54.15	
ΟΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			0.52			70.2						1690	
ΦΟΡΤΙΟ ΓΕΝΗΤΡΙΩΝ	673.3	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ					10.4%						0.25%

❖ Χρήση δεδομένων αρμονικών παραμορφώσεων δεύτερου σεναρίου

Πίνακας 8- 3: Παρουσίαση υπολογισμών στην κατάσταση κανονικής πορείας με το σενάριο 2.

Κατάσταση λειτουργίας 1: Κανονική πορεία- Σενάριο 2												
Εξοπλισμός	P nomin al	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmonic loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	kW
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΟΩΣΗΣ												
Κύριοι Αεροσυμπιεστές	25.76	0.10	0.27	0.14	12.5	1.00	5.2	5.1	4.8	4.7	5.2	0.05
Αντλίες λαδιού λίπανσης ΚΜ	33.12	0.85	0.83	0.08	44.6	0.47	18.5	18.0	17.1	16.9	18.4	0.34
Διαχωριστήρες πετρελαίου	14.72	0.70	0.80	0.42	33.7	1.42	14.0	13.6	13.0	12.8	13.9	1.02
Αντλία μετάγγισης πετρελαίου Diesel	3.68	0.00	0.00	1.36	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Αεροσυμπιεστές εκκινήσεως	29.44	0.10	0.27	0.07	14.3	0.04	5.9	5.8	5.5	5.4	5.9	0.03
Αεροσυμπιεστής αυτοματισμού	25.76	0.20	0.46	0.12	14.8	0.08	6.2	6.0	5.7	5.6	6.1	0.06
Αντλία συμπυκνώματος	8.83	0.40	0.67	0.59	6.9	0.08	2.9	2.8	2.7	2.6	2.8	0.06
Κινητήρες Μηχανισμού πηδαλίου	25.76	0.10	0.27	0.12	12.5	0.06	5.2	5.1	4.8	4.7	5.2	0.04
Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	7.36	0.00	0.00	0.99	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα λέβητα	2.94	0.50	0.73	1.43	2.6	0.03	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	0.02
Αντλίες κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων ΚΜ	25.76	0.85	0.83	0.12	34.7	0.44	14.4	14.0	13.3	13.1	14.3	0.31
Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	7.36	0.80	0.82	0.92	9.4	0.24	3.9	3.8	3.6	3.6	3.9	0.17
Θερμαντήρες καυσίμου	15	0.00	0.00	1.21	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Αντλίες μετάγγισης βαρέος πετρελαίου	14.72	0.10	0.27	0.58	7.2	0.09	3.0	2.9	2.7	2.7	3.0	0.06

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ

Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλασσινού νερού	82.43	0.85	0.83	0.03	221.8	3.89	92.2	89.6	85.2	84.0	91.5	2.78
Αντλίες ψύξης βαλβίδων ΚΜ	18.4	0.85	0.83	0.29	24.8	0.54	10.3	10.0	9.5	9.4	10.2	0.39
Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	5.88	0.85	0.83	1.75	7.9	0.33	3.3	3.2	3.0	3.0	3.3	0.23
Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	29.44	0.85	0.83	0.13	79.2	2.48	32.9	32.0	30.4	30.0	32.7	1.77
Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	10.30	0.35	0.63	0.76	7.5	0.13	3.1	3.0	2.9	2.8	3.1	0.09
ΣΥΝΟΛΟ			0.54			11.3						7.42
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ												
Γερανογέφυρα	11.0	0.5	0.73	0.75	9.90	0.22	4.11	4.00	3.80	3.75	4.08	0.16
Τόρνος	3.7	0.1	0.27	1.75	1.79	0.02	0.74	0.72	0.69	0.68	0.74	0.01
Δράπανο	1.5	0.1	0.27	1.68	0.72	0.00	0.30	0.29	0.27	0.27	0.30	0.00
Συσκευή συγκολλήσεων	20.0	0.1	0.27	0.59	9.72	0.17	4.04	3.93	3.74	3.68	4.01	0.12
Μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων	18.0	0.4	0.67	0.83	14.08	0.49	5.85	5.69	5.41	5.33	5.80	0.35
ΣΥΝΟΛΟ			0.44			0.90						0.65
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ												
Αντλία κύτους	14.72	0.2	0.46	1.31	8.48	0.28	3.52	3.43	3.26	3.21	3.50	0.2
Αντλία πυρκαϊάς	33.12	0	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
Αντλίες γενικής χρήσης	36.8	0	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
Εργάτης ακύρας	29.44	0	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
Εργάτες πρυμνησίων	47.84	0	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
Αντλία ποσίμου νερού	11.04	0.5	0.73	1.29	9.90	0.38	4.11	4.00	3.80	3.75	4.08	0.3
Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	3.68	0.7	0.80	3.14	4.22	0.17	1.75	1.70	1.62	1.60	1.74	0.1
Αντλία πλυσίματος καταστρώματος	11.04	0	0.00	2.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης	14.72	0	0.00	1.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
Αντλίες υγιεινής	7.36	0.4	0.67	1.78	5.76	0.18	2.39	2.32	2.21	2.18	2.37	0.1

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΟΙΟΥ

Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας	18.4	0.1	0.27	0.32	17.89	0.31	7.44	7.23	6.87	6.77	7.38	0.2
Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	14.72	0	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
Αντλία στεγανών θυρών	3.68	0.00	0.00	3.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
Πλευρικός προωστήριος μηχανισμός	625.6	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
ΣΥΝΟΛΟ			0.21			1.31						0.9
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ												
Συμπιεστές κλιματισμού	33.1	0.75	0.81	0.09	40.11	0.43	16.6 7	16.2 0	15.4 1	15.1 9	16.54	0.31
Συμπιεστές ψυκτικής	7.4	0.4	0.67	1.16	11.51	0.46	4.78	4.65	4.42	4.36	4.75	0.33
Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	14.7	0.75	0.81	0.34	35.65	1.31	14.8 2	14.4 0	13.7 0	13.5 0	14.70	0.94
Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	11.0	0.75	0.81	0.58	26.74	1.25	11.1 1	10.8 0	10.2 7	10.1 2	11.03	0.89
Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	1.5	0.4	0.67	1.29	2.30	0.02	0.96	0.93	0.88	0.87	0.95	0.01
Αντλίες πόσιμου νερού	2.9	0.5	0.73	1.68	5.28	0.14	2.19	2.13	2.03	2.00	2.18	0.10
Αντλίες αποχέτευσης	7.4	0.7	0.80	0.79	16.86	0.67	7.01	6.81	6.48	6.38	6.95	0.48
Αντλίες θερμού νερού	2.2	0.7	0.80	2.11	8.73	0.48	3.63	3.53	3.35	3.30	3.60	0.34
Συμπιεστής παγωτομηχανής	1.1	0.3	0.58	1.35	1.29	0.01	0.53	0.52	0.49	0.49	0.53	0.00
Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	0.7	0.8	0.82	1.56	19.47	1.78	8.09	7.87	7.48	7.37	8.03	1.27
Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	3.7	0.85	0.83	1.29	102.52	40.5 8	42.6 1	41.4 1	39.3 9	38.8 2	42.27	28.99
Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	7.4	0.4	0.67	0.02	40.29	0.11	16.7 4	16.2 7	15.4 8	15.2 5	16.61	0.08
Ανελκυστήρας	11.0	0.3	0.58	0.41	7.45	0.07	3.10	3.01	2.86	2.82	3.07	0.05
ΣΥΝΟΛΟ			0.74			47.3						33.80

Κατάσταση λειτουργίας 1: Κανονική πορεία – Σενάριο 2												
Εξοπλισμός	P nomin al	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmonic loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	kW
ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ												
Κουζίνα	30.0	0.3	0.58	0.56	40.49	2.76	16.8	16.4	15.6	15.3	16.7	1.97
Εστίες	20.0	0.3	0.58	1.53	26.99	3.33	11.2	10.9	10.4	10.2	11.1	2.38
Ανεμιστήρας	4.4	0.3	0.58	4.36	2.98	0.12	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	0.08
Εξαεριστήρας	11.0	0.3	0.58	1.51	7.45	0.25	3.1	3.0	2.9	2.8	3.1	0.18
Πλυντήριο πιάτων	1.5	0.2	0.46	2.08	1.46	0.01	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.01
Διάφορες συσκευές	2.0	0.3	0.58	1.66	9.32	0.43	3.9	3.8	3.6	3.5	3.8	0.31
ΣΥΝΟΛΟ			0.56			6.91						4.94
ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ												
Μηχανοστάσιο	22	1	0.84	0.09	59.0	0.90	24.5	23.8	22.7	22.3	24.3	0.64
Γέφυρα	15	0.5	0.73	0.22	23.2	0.36	9.6	9.4	8.9	8.8	9.6	0.26
Χώροι ενδιαιτήσης	12	0.4	0.67	0.23	32.4	0.72	13.5	13.1	12.4	12.3	13.4	0.51
Καταστρώματος	9	0.1	0.27	0.36	15.1	0.25	6.3	6.1	5.8	5.7	6.2	0.18
ΣΥΝΟΛΟ			0.63			2.22						1.59
ΟΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			0.52			70.2						49.54
ΦΟΡΤΙΟ ΓΕΝΗΤΡΙΩΝ	673.3	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ					10.4%					7.35%

❖ Χρήση δεδομένων αρμονικών παραμορφώσεων τρίτου σεναρίου

Πίνακας 8- 4: Παρουσίαση υπολογισμών στην κατάσταση κανονικής πορείας με το σενάριο 3.

Κατάσταση λειτουργίας 1: Κανονική πορεία - Σενάριο 3												
Εξοπλισμός	P nomin al	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmonic loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	W
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΩΩΣΗΣ												
Κύριοι Αεροσυμπιεστές	25.76	0.1	0.27	0.14	12.5	1	0.09	0.19	0.17	0.21	0.13	0.05
Αντλίες λαδιού λίπανσης ΚΜ	33.12	0.85	0.83	0.08	44.6	0.47	0.30	0.68	0.59	0.76	0.47	0.38
Διαχωριστήρες πετρελαίου	14.72	0.7	0.80	0.42	33.7	1.42	0.23	0.52	0.45	0.58	0.35	1.15
Αντλία μετάγγισης πετρελαίου Diesel	3.68	0	0.00	1.36	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αεροσυμπιεστές εκκινήσεως	29.44	0.1	0.27	0.07	14.3	0.04	0.10	0.22	0.19	0.24	0.15	0.04
Αεροσυμπιεστής αυτοματισμού	25.76	0.2	0.46	0.12	14.8	0.08	0.10	0.23	0.20	0.25	0.16	0.07
Αντλία συμπυκνώματος	8.83	0.4	0.67	0.59	6.9	0.08	0.05	0.11	0.09	0.12	0.07	0.07
Κινητήρες Μηχανισμού πηδαλίου	25.76	0.1	0.27	0.12	12.5	0.06	0.09	0.19	0.17	0.21	0.13	0.05
Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	7.36	0	0.00	0.99	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα λέβητα	2.94	0.5	0.73	1.43	2.6	0.03	0.02	0.04	0.03	0.05	0.03	0.02
Αντλίες κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων ΚΜ	25.76	0.85	0.83	0.12	34.7	0.44	0.24	0.53	0.46	0.59	0.36	0.36
Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	7.36	0.8	0.82	0.92	9.4	0.24	0.06	0.14	0.12	0.16	0.10	0.20
Θερμαντήρες καυσίμου	15	0	0.00	1.21	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες μετάγγισης βαρέος πετρελαίου	14.72	0.1	0.27	0.58	7.2	0.09	0.05	0.11	0.09	0.12	0.07	0.07

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ

Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλασσινού νερού	82.43	0.85	0.83	0.03	221.8	3.89	1.51	3.40	2.93	3.80	2.32	3.16
Αντλίες ψύξης βαλβίδων ΚΜ	18.4	0.85	0.83	0.29	24.8	0.54	0.17	0.38	0.33	0.42	0.26	0.44
Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	5.88	0.85	0.83	1.75	7.9	0.33	0.05	0.12	0.10	0.14	0.08	0.27
Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	29.44	0.85	0.83	0.13	79.2	2.48	0.54	1.22	1.05	1.36	0.83	2.01
Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	10.30	0.35	0.63	0.76	7.5	0.13	0.05	0.12	0.10	0.13	0.08	0.10
ΣΥΝΟΛΟ			0.54			11.3						8.43
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ												
Γερανογέφυρα	11.0	0.5	0.73	0.75	9.90	0.22	0.07	0.15	0.13	0.17	0.10	0.18
Τόρνος	3.7	0.1	0.27	1.75	1.79	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01
Δράπανο	1.5	0.1	0.27	1.68	0.72	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Συσκευή συγκολλήσεων	20.0	0.1	0.27	0.59	9.72	0.17	0.07	0.15	0.13	0.17	0.10	0.14
Μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων	18.0	0.4	0.67	0.83	14.08	0.49	0.10	0.22	0.19	0.24	0.15	0.40
ΣΥΝΟΛΟ			0.44			0.90						0.73
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ												
Αντλία κύτους	14.72	0.2	0.46	1.31	8.48	0.28	0.06	0.13	0.11	0.15	0.09	0.00
Αντλία πυρκαϊάς	33.12	0	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες γενικής χρήσης	36.8	0	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Εργάτης ακύρας	29.44	0	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Εργάτες πρυμνησίων	47.84	0	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία ποσίμου νερού	11.04	0.5	0.73	1.29	9.90	0.38	0.07	0.15	0.13	0.17	0.10	0.00
Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	3.68	0.7	0.80	3.14	4.22	0.17	0.03	0.06	0.06	0.07	0.04	0.00
Αντλία πλυσίματος καταστρώματος	11.04	0	0.00	2.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης	14.72	0	0.00	1.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες υγιεινής	7.36	0.4	0.67	1.78	5.76	0.18	0.04	0.09	0.08	0.10	0.06	0.00

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΟΙΟΥ

Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας	18.4	0.1	0.27	0.32	17.89	0.31	0.12	0.27	0.24	0.31	0.19	0.00
Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	14.72	0	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία στεγανών θυρών	3.68	0	0.00	3.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πλευρικός προωστήριος μηχανισμός	625.6	0	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣΥΝΟΛΟ			0.21			1.31						0.00
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ												
Συμπιεστές κλιματισμού	33.1	0.75	0.81	0.09	40.11	0.43	0.27	0.62	0.53	0.69	0.42	0.35
Συμπιεστές ψυκτικής	7.4	0.4	0.67	1.16	11.51	0.46	0.08	0.18	0.15	0.20	0.12	0.37
Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	14.7	0.75	0.81	0.34	35.65	1.31	0.24	0.55	0.47	0.61	0.37	1.07
Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	11.0	0.75	0.81	0.58	26.74	1.25	0.18	0.41	0.35	0.46	0.28	1.01
Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	1.5	0.4	0.67	1.29	2.30	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02
Αντλίες πόσιμου νερού	2.9	0.5	0.73	1.68	5.28	0.14	0.04	0.08	0.07	0.09	0.06	0.11
Αντλίες αποχέτευσης	7.4	0.7	0.80	0.79	16.86	0.67	0.12	0.26	0.22	0.29	0.18	0.55
Αντλίες θερμού νερού	2.2	0.7	0.80	2.11	8.73	0.48	0.06	0.13	0.12	0.15	0.09	0.39
Συμπιεστής παγωτομηχανής	1.1	0.3	0.58	1.35	1.29	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	0.7	0.8	0.82	1.56	19.47	1.78	0.13	0.30	0.26	0.33	0.20	1.44
Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	3.7	0.85	0.83	1.29	102.52	40.5	0.70	1.57	1.36	1.75	1.07	32.95
Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	7.4	0.4	0.67	0.02	40.29	0.11	0.28	0.62	0.53	0.69	0.42	0.09
Ανελκυστήρας	11.0	0.3	0.58	0.41	7.45	0.07	0.05	0.11	0.10	0.13	0.08	0.06
ΣΥΝΟΛΟ			0.74			47.3						38.42

Κατάσταση λειτουργίας 1: Κανονική πορεία - Σενάριο 3													
Εξοπλισμός	P nomin al	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmonic loss	
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	W	
ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ													
Κουζίνα	30.0	0.3	0.58	0.56	40.49	2.76	0.28	0.62	0.54	0.69	0.42	2.24	
Εστίες	20.0	0.3	0.58	1.53	26.99	3.33	0.18	0.41	0.36	0.46	0.28	2.71	
Ανεμιστήρας	4.4	0.3	0.58	4.36	2.98	0.12	0.02	0.05	0.04	0.05	0.03	0.09	
Εξαεριστήρας	11.0	0.3	0.58	1.51	7.45	0.25	0.05	0.11	0.10	0.13	0.08	0.20	
Πλυντήριο πιάτων	1.5	0.2	0.46	2.08	1.46	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	
Διάφορες συσκευές	2.0	0.3	0.58	1.66	9.32	0.43	0.06	0.14	0.12	0.16	0.10	0.35	
ΣΥΝΟΛΟ			0.56			6.91						5.61	
ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ													
Μηχανοστάσιο	22	1	0.84	0.09	59.0	0.90	0.40	0.91	0.78	1.01	0.62	0.730	
Γέφυρα	15	0.5	0.73	0.22	23.2	0.36	0.16	0.36	0.31	0.40	0.24	0.291	
Χώροι ενδιαιτήσης	12	0.4	0.67	0.23	32.4	0.72	0.22	0.50	0.43	0.55	0.34	0.581	
Καταστρώματος	9	0.1	0.27	0.36	15.1	0.25	0.10	0.23	0.20	0.26	0.16	0.202	
ΣΥΝΟΛΟ			0.56			2.22						1.8	
ΟΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			0.51			70.2						56.33	
ΦΟΡΤΙΟ ΓΕΝΗΤΡΙΩΝ	673.3	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ					10.4						-
						%							

8.3.2 Απώλειες καλωδίων τροφοδοσίας στην κατάσταση χειρισμών

Χρήση δεδομένων πρώτου σεναρίου

Πίνακας 8- 5: Παρουσίαση υπολογισμών στην κατάσταση χειρισμών με το σενάριο 1.

Κατάσταση λειτουργίας 2: Χειρισμών - Σενάριο 1												
Εξοπλισμός	P nomin al	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmoni c loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	W
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΟΩΣΗΣ												
Κύριοι Αεροσυμπιεστές	25.76	0.85	0.83	0.14	34.66	0.49	2.47	2.66	2.48	2.56	2.55	12.06
Αντλίες λαδιού λίπανσης ΚΜ	33.12	0.85	0.83	0.08	44.56	0.47	3.17	3.42	3.19	3.30	3.28	11.46
Διαχωριστήρες πετρελαίου	14.72	0.10	0.27	0.42	7.16	0.06	0.51	0.55	0.51	0.53	0.53	1.56
Αντλία μετάγγισης πετρελαίου Diesel	3.68	0.10	0.27	1.36	1.79	0.01	0.13	0.14	0.13	0.13	0.13	0.32
Αεροσυμπιεστές εκκινήσεως	29.44	0.85	0.83	0.07	39.61	0.33	2.82	3.04	2.84	2.93	2.91	8.16
Αεροσυμπιεστής αυτοματισμού	25.76	0.20	0.46	0.12	14.84	0.08	1.06	1.14	1.06	1.10	1.09	1.95
Αντλία συμπυκνώματος	8.83	0.40	0.67	0.59	6.91	0.08	0.49	0.53	0.49	0.51	0.51	2.06
Κινητήρες Μηχανισμού πηδαλίου	25.76	0.20	0.46	0.12	14.84	0.08	1.06	1.14	1.06	1.10	1.09	1.99
Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	7.36	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα λέβητα	2.94	0.50	0.73	1.43	2.64	0.03	0.19	0.20	0.19	0.20	0.19	0.73
Αντλίες κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων ΚΜ	25.76	0.85	0.83	0.12	34.66	0.44	2.47	2.66	2.48	2.56	2.55	10.66
Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	7.36	0.80	0.82	0.92	9.40	0.24	0.67	0.72	0.67	0.70	0.69	5.94
Θερμαντήρες καυσίμου	15	0.00	0.00	1.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες μετάγγισης βαρέος πετρελαίου	14.72	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00	2.47	2.66	2.48	2.56	2.55	12.06

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ

Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλασσινού νερού	82.43	0.85	0.83	0.03	221.81	3.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες ψύξης βαλβίδων ΚΜ	18.4	0.85	0.83	0.29	24.76	0.54	15.79	17.00	15.88	16.41	16.30	94.76
Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	5.88	0.85	0.83	1.75	7.92	0.33	1.76	1.90	1.77	1.83	1.82	13.18
Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	29.44	0.85	0.83	0.13	79.22	2.48	0.56	0.61	0.57	0.59	0.58	8.01
Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	10.30	0.35	0.63	0.76	7.50	0.13	5.64	6.07	5.67	5.86	5.82	60.34
ΣΥΝΟΛΟ			0.58			9.70						236.33
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ												
Γερανογέφυρα	11.0	0.0	0.0	0.75	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Τόρνος	3.7	0.0	0.0	1.75	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Δράπανο	1.5	0.0	0.0	1.68	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Συσκευή συγκολλήσεων	20.0	0.0	0.0	0.59	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων	18.0	0.4	0.7	0.83	14.1	0.49	1.00	1.08	1.01	1.04	1.03	12.06
ΣΥΝΟΛΟ			0.1			0.49						12.06
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ												
Αντλία κύτους	14.72	0	0.00	1.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία πυρκαϊάς	33.12	0	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες γενικής χρήσης	36.8	0	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Εργάτης ακύρας	29.44	0	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Εργάτες πρυμνησίων	47.84	0	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία ποσίμου νερού	11.04	0.5	0.73	1.29	9.90	0.38	0.70	0.76	0.71	0.73	0.73	9.26
Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	3.68	0.7	0.80	3.14	4.22	0.17	0.30	0.32	0.30	0.31	0.31	4.07
Αντλία πλυσίματος καταστρώματος	11.04	0	0.00	2.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης	14.72	0	0.00	1.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες υγιεινής	7.36	0.4	0.67	1.78	5.76	0.18	0.41	0.44	0.41	0.43	0.42	4.32

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΟΙΟΥ

Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας	18.4	0	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	14.72	0	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία στεγανών θυρών	3.68	0	0.00	3.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πλευρικός προωστήριος μηχανισμός	625.6	0.4	0.67	0.32	65.23	4.08	4.64	5.00	4.67	4.83	4.79	99.47
ΣΥΝΟΛΟ			0.21			4.81						117.12
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ												
Συμπιεστές κλιματισμού	33.1	0.8	0.81	0.09	40.1	0.43	2.85	3.07	2.87	2.97	2.95	10.57
Συμπιεστές ψυκτικής	7.4	0.4	0.67	1.16	11.5	0.46	0.82	0.88	0.82	0.85	0.85	11.22
Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	14.7	0.8	0.81	0.34	35.7	1.31	2.54	2.73	2.55	2.64	2.62	32.03
Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	11.0	0.8	0.81	0.58	26.7	1.25	1.90	2.05	1.91	1.98	1.97	30.36
Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	1.5	0.4	0.67	1.29	2.3	0.02	0.16	0.18	0.16	0.17	0.17	0.50
Αντλίες πόσιμου νερού	2.9	0.5	0.73	1.68	5.3	0.14	0.38	0.40	0.38	0.39	0.39	3.43
Αντλίες αποχέτευσης	7.4	0.7	0.80	0.79	16.9	0.67	1.20	1.29	1.21	1.25	1.24	16.45
Αντλίες θερμού νερού	2.2	0.7	0.80	2.11	8.7	0.48	0.62	0.67	0.63	0.65	0.64	11.77
Συμπιεστής παγωτομηχανής	1.1	0.0	0.00	1.35	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	0.7	0.8	0.82	1.56	19.5	1.78	1.39	1.49	1.39	1.44	1.43	43.37
Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	3.7	0.9	0.83	1.29	102.5	40.58	7.30	7.86	7.34	7.58	7.54	989.00
Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	7.4	0.4	0.67	0.02	40.3	0.11	2.87	3.09	2.88	2.98	2.96	2.64
Ανελκυστήρας	11.0	0.0	0.00	0.41	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣΥΝΟΛΟ			0.65			47.24						1151.32

Κατάσταση λειτουργίας 2: Χειρισμών- Σενάριο 1												
Εξοπλισμός	P nomin al	f _s	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmonic loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	W
ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ												
Κουζίνα	30.0	0.1	0.27	0.56	14.58	0.36	1.04	1.12	1.04	1.08	1.07	8.73
Εστίες	20.0	0.1	0.27	1.53	9.72	0.43	0.69	0.75	0.70	0.72	0.71	10.54
Ανεμιστήρας	4.4	0.1	0.27	4.36	2.15	0.06	0.15	0.16	0.15	0.16	0.16	1.47
Εξαεριστήρας	11.0	0.1	0.27	1.51	5.37	0.13	0.38	0.41	0.38	0.40	0.39	3.17
Πλυντήριο πιάτων	1.5	0	0.00	2.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Διάφορες συσκευές	2.0	0.2	0.46	1.66	3.98	0.08	0.28	0.30	0.28	0.29	0.29	1.92
ΣΥΝΟΛΟ			0.26			1.06						25.84
ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ												
Μηχανοστάσιο	22	1	0.84	0.09	58.99	0.90	4.20	4.52	4.22	4.36	4.34	21.91
Γέφυρα	15	0.5	0.73	0.22	23.21	0.36	1.65	1.78	1.66	1.72	1.71	8.74
Χώροι ενδιάιτησης	12	0.4	0.67	0.23	32.38	0.72	2.31	2.48	2.32	2.40	2.38	17.43
Καταστρώματος	9	0.1	0.27	0.36	15.10	0.25	1.07	1.16	1.08	1.12	1.11	6.07
ΣΥΝΟΛΟ			0.63			2.22						54.15
ΟΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			0.53			65.3						1604.15
ΦΟΡΤΙΟ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	944. 49	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ					6.9					0.16%

❖ Χρήση δεδομένων αρμονικών παραμορφώσεων δεύτερου σεναρίου

Πίνακας 8- 6: Παρουσίαση υπολογισμών στην κατάσταση χειρισμών με το σενάριο 2.

Κατάσταση λειτουργίας 2: Χειρισμών - Σενάριο 2												
Εξοπλισμός	P nomin al	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmoni c loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	kW
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΩΣΗΣ												
Κύριοι Αεροσυμπιεστές	25.76	0.85	0.83	0.14	34.66	0.49	14.4 0	14.0 0	13.3 2	13.1 2	14.29	0.35
Αντλίες λαδιού λίπανσης KM	33.12	0.85	0.83	0.08	44.56	0.47	18.5 2	18.0 0	17.1 2	16.8 7	18.37	0.34
Διαχωριστήρες πετρελαίου	14.72	0.10	0.27	0.42	7.16	0.06	2.97	2.89	2.75	2.71	2.95	0.05
Αντλία μετάγγισης πετρελαίου Diesel	3.68	0.10	0.27	1.36	1.79	0.01	0.74	0.72	0.69	0.68	0.74	0.01
Αεροσυμπιεστές εκκινήσεως	29.44	0.85	0.83	0.07	39.61	0.33	16.4 6	16.0 0	15.2 2	15.0 0	16.33	0.24
Αεροσυμπιεστής αυτοματισμού	25.76	0.20	0.46	0.12	14.84	0.08	6.17	5.99	5.70	5.62	6.12	0.06
Αντλία συμπυκνώματος	8.83	0.40	0.67	0.59	6.91	0.08	2.87	2.79	2.65	2.61	2.85	0.06
Κινητήρες Μηχανισμού πηδαλίου	25.76	0.20	0.46	0.12	14.84	0.08	6.17	5.99	5.70	5.62	6.12	0.06
Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	7.36	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα λέβητα	2.94	0.50	0.73	1.43	2.64	0.03	1.10	1.07	1.01	1.00	1.09	0.02
Αντλίες κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων KM	25.76	0.85	0.83	0.12	34.66	0.44	14.4 0	14.0 0	13.3 2	13.1 2	14.29	0.31
Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	7.36	0.80	0.82	0.92	9.40	0.24	3.91	3.80	3.61	3.56	3.88	0.17
Θερμαντήρες καυσίμου	15	0.00	0.00	1.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες μετάγγισης βαρέος πετρελαίου	14.72	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ

Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλασσινού νερού	82.43	0.85	0.83	0.03	221.81	3.89	92.19	89.60	85.22	83.98	91.47	2.78
Αντλίες ψύξης βαλβίδων ΚΜ	18.4	0.85	0.83	0.29	24.76	0.54	10.29	10.00	9.51	9.37	10.21	0.39
Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	5.88	0.85	0.83	1.75	7.92	0.33	3.29	3.20	3.04	3.00	3.27	0.23
Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	29.44	0.85	0.83	0.13	79.22	2.48	32.92	32.00	30.44	29.99	32.67	1.77
Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	10.30	0.35	0.63	0.76	7.50	0.13	3.12	3.03	2.88	2.84	3.09	0.09
ΣΥΝΟΛΟ			0.58			9.70						6.93
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ												
Γερανογέφυρα	11.0	0.0	0.0	0.75	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Τόρνος	3.7	0.0	0.0	1.75	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Δράπανο	1.5	0.0	0.0	1.68	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Συσκευή συγκολλήσεων	20.0	0.0	0.0	0.59	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων	18.0	0.4	0.7	0.83	14.1	0.49	5.85	5.69	5.41	5.33	5.80	0.35
ΣΥΝΟΛΟ			0.1			0.49						0.35
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ												
Αντλία κύτους	14.72	0	0.00	1.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία πυρκαϊάς	33.12	0	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες γενικής χρήσης	36.8	0	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Εργάτης ακύρας	29.44	0	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Εργάτες πρυμνησίων	47.84	0	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία ποσίμου νερού	11.04	0.5	0.73	1.29	9.90	0.38	4.11	4.00	3.80	3.75	4.08	0.27
Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	3.68	0.7	0.80	3.14	4.22	0.17	1.75	1.70	1.62	1.60	1.74	0.12
Αντλία πλυσίματος καταστρώματος	11.04	0	0.00	2.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης	14.72	0	0.00	1.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες υγιεινής	7.36	0.4	0.67	1.78	5.76	0.18	2.39	2.32	2.21	2.18	2.37	0.13

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΟΙΟΥ

Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας	18.4	0	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	14.72	0	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία στεγανών θυρών	3.68	0	0.00	3.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πλευρικός προωστήριος μηχανισμός	625.6	0.4	0.67	0.32	65.23	4.08	27.1 1	26.3 5	25.0 6	24.7 0	26.90	2.92
ΣΥΝΟΛΟ			0.21			4.81						3.43
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ												
Συμπιεστές κλιματισμού	33.1	0.8	0.81	0.09	40.1	0.43	16.6 7	16.2 0	15.4 1	15.1 9	16.54	0.31
Συμπιεστές ψυκτικής	7.4	0.4	0.67	1.16	11.5	0.46	4.78	4.65	4.42	4.36	4.75	0.33
Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	14.7	0.8	0.81	0.34	35.7	1.31	14.8 2	14.4 0	13.7 0	13.5 0	14.70	0.94
Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	11.0	0.8	0.81	0.58	26.7	1.25	11.1 1	10.8 0	10.2 7	10.1 2	11.03	0.89
Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	1.5	0.4	0.67	1.29	2.3	0.02	0.96	0.93	0.88	0.87	0.95	0.01
Αντλίες πόσιμου νερού	2.9	0.5	0.73	1.68	5.3	0.14	2.19	2.13	2.03	2.00	2.18	0.10
Αντλίες αποχέτευσης	7.4	0.7	0.80	0.79	16.9	0.67	7.01	6.81	6.48	6.38	6.95	0.48
Αντλίες θερμού νερού	2.2	0.7	0.80	2.11	8.7	0.48	3.63	3.53	3.35	3.30	3.60	0.34
Συμπιεστής παγωτομηχανής	1.1	0.0	0.00	1.35	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	0.7	0.8	0.82	1.56	19.5	1.78	8.09	7.87	7.48	7.37	8.03	1.27
Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	3.7	0.9	0.83	1.29	102.5	40.58	42.6 1	41.4 1	39.3 9	38.8 2	42.27	28.99
Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	7.4	0.4	0.67	0.02	40.3	0.11	16.7 4	16.2 7	15.4 8	15.2 5	16.61	0.08
Ανελκυστήρας	11.0	0.0	0.00	0.41	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣΥΝΟΛΟ			0.65			47.24						33.75

Κατάσταση λειτουργίας 2: Χειρισμών- Σενάριο 2												
Εξοπλισμός	P nomin al	f _s	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmonic loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	kW
ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ												
Κουζίνα	30.0	0.1	0.27	0.56	14.58	0.36	6.06	5.89	5.60	5.52	6.01	0.26
Εστίες	20.0	0.1	0.27	1.53	9.72	0.43	4.04	3.93	3.74	3.68	4.01	0.31
Ανεμιστήρας	4.4	0.1	0.27	4.36	2.15	0.06	0.89	0.87	0.82	0.81	0.89	0.04
Εξαεριστήρας	11.0	0.1	0.27	1.51	5.37	0.13	2.23	2.17	2.06	2.03	2.21	0.09
Πλυντήριο πιάτων	1.5	0	0.00	2.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Διάφορες συσκευές	2.0	0.2	0.46	1.66	3.98	0.08	1.65	1.61	1.53	1.51	1.64	0.06
ΣΥΝΟΛΟ			0.26			1.06						0.76
ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ												
Μηχανοστάσιο	22	1	0.84	0.09	58.99	0.90	24.5	23.8	22.7	22.3	24.3	0.64
Γέφυρα	15	0.5	0.73	0.22	23.21	0.36	9.6	9.4	8.9	8.8	9.6	0.26
Χώροι ενδιάιτησης	12	0.4	0.67	0.23	32.38	0.72	13.5	13.1	12.4	12.3	13.4	0.51
Καταστρώματος	9	0.1	0.27	0.36	15.10	0.25	6.3	6.1	5.8	5.7	6.2	0.18
ΣΥΝΟΛΟ			0.63			2.22						1.59
ΟΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			0.53			65.3						47.59
ΦΟΡΤΙΟ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	944. 49	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ					6.9					4.97%

Χρήση δεδομένων τρίτου σεναρίου

Πίνακας 8- 7: Παρουσίαση υπολογισμών στην κατάσταση χειρισμών με το σενάριο 3.

Κατάσταση λειτουργίας 2: Χειρισμών - Σενάριο 3												
Εξοπλισμός	P nomin al	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmoni c loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	W
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΟΩΣΗΣ												
Κύριοι Αεροσυμπιεστές	25.76	0.85	0.83	0.14	34.66	0.49	0.24	0.53	0.46	0.59	0.36	0.40
Αντλίες λαδιού λίπανσης KM	33.12	0.85	0.83	0.08	44.56	0.47	0.30	0.68	0.59	0.76	0.47	0.38
Διαχωριστήρες πετρελαίου	14.72	0.10	0.27	0.42	7.16	0.06	0.05	0.11	0.09	0.12	0.07	0.05
Αντλία μετάγγισης πετρελαίου Diesel	3.68	0.10	0.27	1.36	1.79	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01
Αεροσυμπιεστές εκκινήσεως	29.44	0.85	0.83	0.07	39.61	0.33	0.27	0.61	0.52	0.68	0.41	0.27
Αεροσυμπιεστής αυτοματισμού	25.76	0.20	0.46	0.12	14.84	0.08	0.10	0.23	0.20	0.25	0.16	0.07
Αντλία συμπυκνώματος	8.83	0.40	0.67	0.59	6.91	0.08	0.05	0.11	0.09	0.12	0.07	0.07
Κινητήρες Μηχανισμού πηδαλίου	25.76	0.20	0.46	0.12	14.84	0.08	0.10	0.23	0.20	0.25	0.16	0.07
Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	7.36	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα λέβητα	2.94	0.50	0.73	1.43	2.64	0.03	0.02	0.04	0.03	0.05	0.03	0.02
Αντλίες κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων KM	25.76	0.85	0.83	0.12	34.66	0.44	0.24	0.53	0.46	0.59	0.36	0.36
Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	7.36	0.80	0.82	0.92	9.40	0.24	0.06	0.14	0.12	0.16	0.10	0.20
Θερμαντήρες καυσίμου	15	0.00	0.00	1.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες μετάγγισης βαρέος πετρελαίου	14.72	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ

Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλασσινού νερού	82.43	0.85	0.83	0.03	221.81	3.89	1.51	3.40	2.93	3.80	2.32	3.16
Αντλίες ψύξης βαλβίδων ΚΜ	18.4	0.85	0.83	0.29	24.76	0.54	0.17	0.38	0.33	0.42	0.26	0.44
Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	5.88	0.85	0.83	1.75	7.92	0.33	0.05	0.12	0.10	0.14	0.08	0.27
Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	29.44	0.85	0.83	0.13	79.22	2.48	0.54	1.22	1.05	1.36	0.83	2.01
Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	10.30	0.35	0.63	0.76	7.50	0.13	0.05	0.12	0.10	0.13	0.08	0.10
ΣΥΝΟΛΟ			0.58			9.70						7.87
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ												
Γερανογέφυρα	11.0	0.0	0.0	0.75	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Τόρνος	3.7	0.0	0.0	1.75	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Δράπανο	1.5	0.0	0.0	1.68	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Συσκευή συγκολλήσεων	20.0	0.0	0.0	0.59	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων	18.0	0.4	0.7	0.83	14.1	0.49	0.10	0.22	0.19	0.24	0.15	0.40
ΣΥΝΟΛΟ			0.1			0.49						0.40
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ												
Αντλία κύτους	14.72	0	0.00	1.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία πυρκαϊάς	33.12	0	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες γενικής χρήσης	36.8	0	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Εργάτης ακύρας	29.44	0	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Εργάτες πρυμνησίων	47.84	0	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία ποσίμου νερού	11.04	0.5	0.73	1.29	9.90	0.38	0.07	0.15	0.13	0.17	0.10	0.31
Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	3.68	0.7	0.80	3.14	4.22	0.17	0.03	0.06	0.06	0.07	0.04	0.14
Αντλία πλυσίματος καταστρώματος	11.04	0	0.00	2.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης	14.72	0	0.00	1.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες υγιεινής	7.36	0.4	0.67	1.78	5.76	0.18	0.04	0.09	0.08	0.10	0.06	0.14

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΟΙΟΥ

Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας	18.4	0	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	14.72	0	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία στεγανών θυρών	3.68	0	0.00	3.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πλευρικός προωστήριος μηχανισμός	625.6	0.4	0.67	0.32	65.23	4.08	0.45	1.00	0.86	1.12	0.68	3.31
ΣΥΝΟΛΟ			0.21			4.81						3.90
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ												
Συμπιεστές κλιματισμού	33.1	0.8	0.81	0.09	40.1	0.43	0.27	0.62	0.53	0.69	0.42	0.35
Συμπιεστές ψυκτικής	7.4	0.4	0.67	1.16	11.5	0.46	0.08	0.18	0.15	0.20	0.12	0.37
Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	14.7	0.8	0.81	0.34	35.7	1.31	0.24	0.55	0.47	0.61	0.37	1.07
Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	11.0	0.8	0.81	0.58	26.7	1.25	0.18	0.41	0.35	0.46	0.28	1.01
Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	1.5	0.4	0.67	1.29	2.3	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02
Αντλίες πόσιμου νερού	2.9	0.5	0.73	1.68	5.3	0.14	0.04	0.08	0.07	0.09	0.06	0.11
Αντλίες αποχέτευσης	7.4	0.7	0.80	0.79	16.9	0.67	0.12	0.26	0.22	0.29	0.18	0.55
Αντλίες θερμού νερού	2.2	0.7	0.80	2.11	8.7	0.48	0.06	0.13	0.12	0.15	0.09	0.39
Συμπιεστής παγωτομηχανής	1.1	0.0	0.00	1.35	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	0.7	0.8	0.82	1.56	19.5	1.78	0.13	0.30	0.26	0.33	0.20	1.44
Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	3.7	0.9	0.83	1.29	102.5	40.58	0.70	1.57	1.36	1.75	1.07	32.95
Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	7.4	0.4	0.67	0.02	40.3	0.11	0.28	0.62	0.53	0.69	0.42	0.09
Ανελκυστήρας	11.0	0.0	0.00	0.41	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣΥΝΟΛΟ			0.65			47.24						38.36

Κατάσταση λειτουργίας 2: Χειρισμών – Σενάριο 3												
Εξοπλισμός	P nomin al	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmonic loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	W
ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ												
Κουζίνα	30.0	0.1	0.27	0.56	14.58	0.36	0.10	0.22	0.19	0.25	0.15	0.29
Εστίες	20.0	0.1	0.27	1.53	9.72	0.43	0.07	0.15	0.13	0.17	0.10	0.35
Ανεμιστήρας	4.4	0.1	0.27	4.36	2.15	0.06	0.01	0.03	0.03	0.04	0.02	0.05
Εξαεριστήρας	11.0	0.1	0.27	1.51	5.37	0.13	0.04	0.08	0.07	0.09	0.06	0.11
Πλυντήριο πιάτων	1.5	0	0.00	2.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Διάφορες συσκευές	2.0	0.2	0.46	1.66	3.98	0.08	0.03	0.06	0.05	0.07	0.04	0.06
ΣΥΝΟΛΟ			0.26			1.06						0.86
ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ												
Μηχανοστάσιο	22	1	0.84	0.09	58.99	0.90	0.40	0.91	0.78	1.01	0.62	0.73
Γέφυρα	15	0.5	0.73	0.22	23.21	0.36	0.16	0.36	0.31	0.40	0.24	0.29
Χώροι ενδιάιτησης	12	0.4	0.67	0.23	32.38	0.72	0.22	0.50	0.43	0.55	0.34	0.58
Καταστρώματος	9	0.1	0.27	0.36	15.10	0.25	0.10	0.23	0.20	0.26	0.16	0.20
ΣΥΝΟΛΟ			0.63			2.22						1.80
ΟΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			0.44			65.8						53.4
ΦΟΡΤΙΟ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	944.4 9	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ					6.9 %					-

8.3.3 Απώλειες καλωδίων τροφοδοσίας στην κατάσταση εν όρμω

Χρήση δεδομένων πρώτου σεναρίου

Πίνακας 8- 8: Παρουσίαση υπολογισμών στην κατάσταση «εν όρμω» με το σενάριο 1.

Κατάσταση λειτουργίας 3: Εν Όρμω- Σενάριο 1												
Εξοπλισμός	P nomi nal	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmon ic loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	W
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΟΩΣΗΣ												
Κύριοι Αεροσυμπιεστές	25.76	0.1	0.27	0.14	12.52	0.06	0.89	0.96	0.90	0.93	0.92	1.57
Αντλίες λαδιού λίπανσης ΚΜ	33.12	0	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Διαχωριστήρες πετρελαίου	14.72	0	0.00	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία μετάγγισης πετρελαίου Diesel	3.68	0.1	0.27	1.36	1.79	0.01	0.13	0.14	0.13	0.13	0.13	0.32
Αεροσυμπιεστές εκκινήσεως	29.44	0.1	0.27	0.07	14.31	0.04	1.02	1.10	1.02	1.06	1.05	1.06
Αεροσυμπιεστής αυτοματισμού	25.76	0.2	0.46	0.12	14.84	0.08	1.06	1.14	1.06	1.10	1.09	1.95
Αντλία συμπυκνώματος	8.83	0	0.00	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Κινητήρες Μηχανισμού πηδαλίου	25.76	0	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	7.36	0.8	0.82	0.99	9.40	0.26	0.67	0.72	0.67	0.70	0.69	6.41
Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα λέβητα	2.94	0.2	0.46	1.43	1.70	0.01	0.12	0.13	0.12	0.13	0.12	0.30
Αντλίες κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων ΚΜ	25.76	0	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	7.36	0	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Θερμαντήρες καυσίμου	15	0.1	0.27	1.21	7.29	0.19	0.52	0.56	0.52	0.54	0.54	4.72

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ

Αντλίες μετάγγισης βαρέος πετρελαίου	14.72	0	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλασσινού νερού	82.43	0	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες ψύξης βαλβίδων ΚΜ	18.4	0	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	5.88	0	0.00	1.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	29.44	0.2	0.46	0.13	33.92	0.45	2.41	2.60	2.43	2.51	2.49	11.06
Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	10.30	0	0.00	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣΥΝΟΛΟ			0.17			1.12						27.40
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ												
Γερανογέφυρα	11.0	0.5	0.73	0.75	9.90	0.22	0.70	0.76	0.71	0.73	0.73	5.38
Τόρνος	3.7	0.1	0.27	1.75	1.79	0.02	0.13	0.14	0.13	0.13	0.13	0.41
Δράπανο	1.5	0.1	0.27	1.68	0.72	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
Συσκευή συγκολλήσεων	20.0	0.1	0.27	0.59	9.72	0.17	0.69	0.75	0.70	0.72	0.71	4.10
Μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων	18.0	0.4	0.67	0.83	14.08	0.49	1.00	1.08	1.01	1.04	1.03	12.06
ΣΥΝΟΛΟ			0.44			0.90						22.01
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ												
Αντλία κύτους	14.72	0.2	0.46	1.31	8.48	0.28	0.60	0.65	0.61	0.63	0.62	6.86
Αντλία πυρκαϊάς	33.12	0.0	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες γενικής χρήσης	36.8	0.0	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Εργάτης αγκύρας	29.44	0.1	0.27	0.22	14.31	0.14	1.02	1.10	1.02	1.06	1.05	3.34
Εργάτες πρυμνησίων	47.84	0.1	0.27	0.15	23.26	0.24	1.66	1.78	1.67	1.72	1.71	5.90
Αντλία ποσίμου νερού	11.04	0.5	0.73	1.29	9.90	0.38	0.70	0.76	0.71	0.73	0.73	9.26
Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	3.68	0.7	0.80	3.14	4.22	0.17	0.30	0.32	0.30	0.31	0.31	4.07
Αντλία πλυσίματος καταστρώματος	11.04	0.1	0.27	2.01	5.37	0.17	0.38	0.41	0.38	0.40	0.39	4.23
Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης	14.72	0.1	0.27	1.44	7.16	0.22	0.51	0.55	0.51	0.53	0.53	5.38
Αντλίες υγιεινής	7.36	0.4	0.67	1.78	5.76	0.18	0.41	0.44	0.41	0.43	0.42	4.32

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΟΙΟΥ

Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας	18.4	0.0	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	14.72	0.0	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία στεγανών θυρών	3.68	0.0	0.00	3.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πλευρικός προωστήριος μηχανισμός	625.6	0.0	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣΥΝΟΛΟ			0.27			1.78						43.38
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ												
Συμπιεστές κλιματισμού	33.1	0.75	0.81	0.09	40.11	0.43	2.85	3.07	2.87	2.97	2.95	10.57
Συμπιεστές ψυκτικής	7.4	0.4	0.67	1.16	11.51	0.46	0.82	0.88	0.82	0.85	0.85	11.22
Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	14.7	0.75	0.81	0.34	35.65	1.31	2.54	2.73	2.55	2.64	2.62	32.03
Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	11.0	0.75	0.81	0.58	26.74	1.25	1.90	2.05	1.91	1.98	1.97	30.36
Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	1.5	0.4	0.67	1.29	2.30	0.02	0.16	0.18	0.16	0.17	0.17	0.50
Αντλίες πόσιμου νερού	2.9	0.5	0.73	1.68	5.28	0.14	0.38	0.40	0.38	0.39	0.39	3.43
Αντλίες αποχέτευσης	7.4	0.7	0.80	0.79	16.86	0.67	1.20	1.29	1.21	1.25	1.24	16.45
Αντλίες θερμού νερού	2.2	0.7	0.80	2.11	8.73	0.48	0.62	0.67	0.63	0.65	0.64	11.77
Συμπιεστής παγωτομηχανής	1.1	0.2	0.46	1.35	1.10	0.00	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.12
Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	0.7	0.8	0.82	1.56	19.47	1.78	1.39	1.49	1.39	1.44	1.43	43.37
Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	3.7	0.85	0.83	1.29	102.52	40.58	7.30	7.86	7.34	7.58	7.54	989.00
Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	7.4	0.4	0.67	0.02	40.29	0.11	2.87	3.09	2.88	2.98	2.96	2.64
Ανελκυστήρας	11.0	0.5	0.73	0.41	9.90	0.12	0.70	0.76	0.71	0.73	0.73	2.93
ΣΥΝΟΛΟ						47.37						1154.38

Κατάσταση λειτουργίας 3: Εν Όρμω- Σενάριο 1													
Εξοπλισμός	P nomin al	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmonic loss	
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	W	
ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ													
Κουζίνα	30.0	0.3	0.58	0.56	20.24	0.69	1.44	1.55	1.45	1.50	1.49	16.83	
Εστίες	20.0	0.3	0.58	1.53	13.50	0.83	0.96	1.03	0.97	1.00	0.99	20.32	
Ανεμιστήρας	4.4	0.3	0.58	4.36	2.98	0.12	0.21	0.23	0.21	0.22	0.22	2.83	
Εξαεριστήρας	11.0	0.3	0.58	1.51	7.45	0.25	0.53	0.57	0.53	0.55	0.55	6.11	
Πλυντήριο πιάτων	1.5	0.2	0.46	2.08	1.46	0.01	0.10	0.11	0.10	0.11	0.11	0.33	
Διάφορες συσκευές	2.0	0.3	0.58	1.66	4.66	0.11	0.33	0.36	0.33	0.34	0.34	2.63	
ΣΥΝΟΛΟ			0.56			2.01						49.04	
ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ													
Μηχανοστάσιο	22	1	0.84	0.09	58.99	0.90	4.20	4.52	4.22	4.36	4.34	21.91	
Γέφυρα	15	0.5	0.73	0.22	23.21	0.36	1.65	1.78	1.66	1.72	1.71	8.74	
Χώροι ενδιαίτησης	12	0.4	0.67	0.23	32.38	0.72	2.31	2.48	2.32	2.40	2.38	17.43	
Καταστρώματος	9	0.9	0.84	0.36	43.92	2.11	3.13	3.37	3.15	3.25	3.23	51.33	
ΣΥΝΟΛΟ			0.77			4.08						99.41	
ΟΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			0.41			57.4						1399.78	
ΦΟΡΤΙΟ ΓΕΝΗΤΡΙΩΝ	349.2 2	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ					16.4 %						0.40%

❖ Χρήση δεδομένων αρμονικών παραμορφώσεων δεύτερου σεναρίου

Πίνακας 8- 9: Παρουσίαση υπολογισμών στην κατάσταση «εν όρμω» με το σενάριο 2.

Κατάσταση λειτουργίας 3: Εν Όρμω- Σενάριο 2												
Εξοπλισμός	P nomi nal	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmon ic loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	kW
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΩΣΗΣ												
Κύριοι Αεροσυμπιεστές	25.76	0.1	0.27	0.14	12.52	0.06	5.21	5.06	4.81	4.74	5.16	0.05
Αντλίες λαδιού λίπανσης ΚΜ	33.12	0	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Διαχωριστήρες πετρελαίου	14.72	0	0.00	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία μετάγχισης πετρελαίου Diesel	3.68	0.1	0.27	1.36	1.79	0.01	0.74	0.72	0.69	0.68	0.74	0.01
Αεροσυμπιεστές εκκινήσεως	29.44	0.1	0.27	0.07	14.31	0.04	5.95	5.78	5.50	5.42	5.90	0.03
Αεροσυμπιεστής αυτοματισμού	25.76	0.2	0.46	0.12	14.84	0.08	6.17	5.99	5.70	5.62	6.12	0.06
Αντλία συμπυκνώματος	8.83	0	0.00	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Κινητήρες Μηχανισμού πηδαλίου	25.76	0	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	7.36	0.8	0.82	0.99	9.40	0.26	3.91	3.80	3.61	3.56	3.88	0.19
Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα λέβητα	2.94	0.2	0.46	1.43	1.70	0.01	0.70	0.69	0.65	0.64	0.70	0.01
Αντλίες κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων ΚΜ	25.76	0	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	7.36	0	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Θερμαντήρες καυσίμου	15	0.1	0.27	1.21	7.29	0.19	3.03	2.95	2.80	2.76	3.01	0.14
Αντλίες μετάγχισης βαρέος πετρελαίου	14.72	0	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ

Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλασσινού νερού	82.43	0	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες ψύξης βαλβίδων ΚΜ	18.4	0	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	5.88	0	0.00	1.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	29.44	0.2	0.46	0.13	33.92	0.45	14.10	13.70	13.03	12.84	13.99	0.32
Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	10.30	0	0.00	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣΥΝΟΛΟ			0.17			1.12						0.80
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ												
Γερανογέφυρα	11.0	0.5	0.73	0.75	9.90	0.22	4.11	4.00	3.80	3.75	4.08	0.16
Τόρνος	3.7	0.1	0.27	1.75	1.79	0.02	0.74	0.72	0.69	0.68	0.74	0.01
Δράπανο	1.5	0.1	0.27	1.68	0.72	0.00	0.30	0.29	0.27	0.27	0.30	0.00
Συσκευή συγκολλήσεων	20.0	0.1	0.27	0.59	9.72	0.17	4.04	3.93	3.74	3.68	4.01	0.12
Μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων	18.0	0.4	0.67	0.83	14.08	0.49	5.85	5.69	5.41	5.33	5.80	0.35
ΣΥΝΟΛΟ			0.44			0.90						
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ												
Αντλία κύτους	14.72	0.2	0.46	1.31	8.48	0.28	3.52	3.43	3.26	3.21	3.50	0.20
Αντλία πυρκαϊάς	33.12	0.0	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες γενικής χρήσης	36.8	0.0	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Εργάτης ακύρας	29.44	0.1	0.27	0.22	14.31	0.14	5.95	5.78	5.50	5.42	5.90	0.10
Εργάτες πρυμνησίων	47.84	0.1	0.27	0.15	23.26	0.24	9.67	9.40	8.94	8.81	9.59	0.17
Αντλία ποσίμου νερού	11.04	0.5	0.73	1.29	9.90	0.38	4.11	4.00	3.80	3.75	4.08	0.27
Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	3.68	0.7	0.80	3.14	4.22	0.17	1.75	1.70	1.62	1.60	1.74	0.12
Αντλία πλυσίματος καταστρώματος	11.04	0.1	0.27	2.01	5.37	0.17	2.23	2.17	2.06	2.03	2.21	0.12
Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης	14.72	0.1	0.27	1.44	7.16	0.22	2.97	2.89	2.75	2.71	2.95	0.16
Αντλίες υγιεινής	7.36	0.4	0.67	1.78	5.76	0.18	2.39	2.32	2.21	2.18	2.37	0.13

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΟΙΟΥ

Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας	18.4	0.0	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	14.72	0.0	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία στεγανών θυρών	3.68	0.0	0.00	3.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πλευρικός προωστήριος μηχανισμός	625.6	0.0	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣΥΝΟΛΟ			0.27			1.78						1.27
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ												
Συμπιεστές κλιματισμού	33.1	0.75	0.81	0.09	40.11	0.43	16.6 7	16.2 0	15.4 1	15.1 9	16.54	0.31
Συμπιεστές ψυκτικής	7.4	0.4	0.67	1.16	11.51	0.46	4.78	4.65	4.42	4.36	4.75	0.33
Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	14.7	0.75	0.81	0.34	35.65	1.31	14.8 2	14.4 0	13.7 0	13.5 0	14.70	0.94
Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	11.0	0.75	0.81	0.58	26.74	1.25	11.1 1	10.8 0	10.2 7	10.1 2	11.03	0.89
Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	1.5	0.4	0.67	1.29	2.30	0.02	0.96	0.93	0.88	0.87	0.95	0.01
Αντλίες πόσιμου νερού	2.9	0.5	0.73	1.68	5.28	0.14	2.19	2.13	2.03	2.00	2.18	0.10
Αντλίες αποχέτευσης	7.4	0.7	0.80	0.79	16.86	0.67	7.01	6.81	6.48	6.38	6.95	0.48
Αντλίες θερμού νερού	2.2	0.7	0.80	2.11	8.73	0.48	3.63	3.53	3.35	3.30	3.60	0.34
Συμπιεστής παγωτομηχανής	1.1	0.2	0.46	1.35	1.10	0.00	0.46	0.44	0.42	0.42	0.45	0.00
Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	0.7	0.8	0.82	1.56	19.47	1.78	8.09	7.87	7.48	7.37	8.03	1.27
Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	3.7	0.85	0.83	1.29	102.52	40.58	42.6 1	41.4 1	39.3 9	38.8 2	42.27	28.99
Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	7.4	0.4	0.67	0.02	40.29	0.11	16.7 4	16.2 7	15.4 8	15.2 5	16.61	0.08
Ανελκυστήρας	11.0	0.5	0.73	0.41	9.90	0.12	4.11	4.00	3.80	3.75	4.08	0.09
ΣΥΝΟΛΟ						47.37						33.84

Κατάσταση λειτουργίας 3: Εν Όρμω- Σενάριο 2												
Εξοπλισμός	P nomin al	f _s	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmonic loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	kW
ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ												
Κουζίνα	30.0	0.3	0.58	0.56	20.24	0.69	8.41	8.18	7.78	7.67	8.35	0.49
Εστίες	20.0	0.3	0.58	1.53	13.50	0.83	5.61	5.45	5.19	5.11	5.57	0.60
Ανεμιστήρας	4.4	0.3	0.58	4.36	2.98	0.12	1.24	1.20	1.14	1.13	1.23	0.08
Εξαεριστήρας	11.0	0.3	0.58	1.51	7.45	0.25	3.10	3.01	2.86	2.82	3.07	0.18
Πλυντήριο πιάτων	1.5	0.2	0.46	2.08	1.46	0.01	0.61	0.59	0.56	0.55	0.60	0.01
Διάφορες συσσκευές	2.0	0.3	0.58	1.66	4.66	0.11	1.94	1.88	1.79	1.76	1.92	0.08
ΣΥΝΟΛΟ			0.56			2.01						1.44
ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ												
Μηχανοστάσιο	22	1	0.84	0.09	58.99	0.90	24.5	23.8	22.7	22.3	24.3	0.64
Γέφυρα	15	0.5	0.73	0.22	23.21	0.36	9.6	9.4	8.9	8.8	9.6	0.26
Χώροι ενδιαίτησης	12	0.4	0.67	0.23	32.38	0.72	13.5	13.1	12.4	12.3	13.4	0.51
Καταστρώματος	9	0.9	0.84	0.36	43.92	2.11	18.3	17.7	16.9	16.6	18.1	1.50
ΣΥΝΟΛΟ			0.77			4.08						2.91
ΟΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			0.41			57.4						41.03
ΦΟΡΤΙΟ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	349.2 2	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ				16.4 %						11.74%

❖ Χρήση δεδομένων αρμονικών παραμορφώσεων τρίτου σεναρίου

Πίνακας 8- 10: Παρουσίαση υπολογισμών στην κατάσταση «εν όρμω» με το σενάριο 3.

Κατάσταση λειτουργίας 3: Εν Όρμω – Σενάριο 3												
Εξοπλισμός	P nomin al	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmoni c loss
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	W
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΩΣΗΣ												
Κύριοι Αεροσυμπιεστές	25.76	0.1	0.27	0.14	12.52	0.06	0.09	0.19	0.17	0.21	0.13	0.05
Αντλίες λαδιού λίπανσης ΚΜ	33.12	0	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Διαχωριστήρες πετρελαίου	14.72	0	0.00	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία μετάγγισης πετρελαίου Diesel	3.68	0.1	0.27	1.36	1.79	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01
Αεροσυμπιεστές εκκινήσεως	29.44	0.1	0.27	0.07	14.31	0.04	0.10	0.22	0.19	0.24	0.15	0.04
Αεροσυμπιεστής αυτοματισμού	25.76	0.2	0.46	0.12	14.84	0.08	0.10	0.23	0.20	0.25	0.16	0.07
Αντλία συμπυκνώματος	8.83	0	0.00	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Κινητήρες Μηχανισμού πηδαλίου	25.76	0	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	7.36	0.8	0.82	0.99	9.40	0.26	0.06	0.14	0.12	0.16	0.10	0.21
Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα λέβητα	2.94	0.2	0.46	1.43	1.70	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01
Αντλίες κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων ΚΜ	25.76	0	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	7.36	0	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Θερμαντήρες καυσίμου	15	0.1	0.27	1.21	7.29	0.19	0.05	0.11	0.10	0.12	0.08	0.16

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ

Αντλίες μετάγγισης βαρέος πετρελαίου	14.72	0	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλασσινού νερού	82.43	0	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες ψύξης βαλβίδων ΚΜ	18.4	0	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	5.88	0	0.00	1.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	29.44	0.2	0.46	0.13	33.92	0.45	0.23	0.52	0.45	0.58	0.35	0.37
Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	10.30	0	0.00	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣΥΝΟΛΟ			0.17			1.12						0.91
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ												
Γερανογέφυρα	11.0	0.5	0.73	0.75	9.90	0.22	0.07	0.15	0.13	0.17	0.10	0.18
Τόρνος	3.7	0.1	0.27	1.75	1.79	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01
Δράπανο	1.5	0.1	0.27	1.68	0.72	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Συσκευή συγκολλήσεων	20.0	0.1	0.27	0.59	9.72	0.17	0.07	0.15	0.13	0.17	0.10	0.14
Μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων	18.0	0.4	0.67	0.83	14.08	0.49	0.10	0.22	0.19	0.24	0.15	0.40
ΣΥΝΟΛΟ			0.44			0.90						0.73
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ												
Αντλία κύτους	14.72	0.2	0.46	1.31	8.48	0.28	0.06	0.13	0.11	0.15	0.09	0.23
Αντλία πυρκαϊάς	33.12	0.0	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλίες γενικής χρήσης	36.8	0.0	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Εργάτης αγκύρας	29.44	0.1	0.27	0.22	14.31	0.14	0.10	0.22	0.19	0.24	0.15	0.11
Εργάτες πρυμνησίων	47.84	0.1	0.27	0.15	23.26	0.24	0.16	0.36	0.31	0.40	0.24	0.20
Αντλία ποσίμου νερού	11.04	0.5	0.73	1.29	9.90	0.38	0.07	0.15	0.13	0.17	0.10	0.31
Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	3.68	0.7	0.80	3.14	4.22	0.17	0.03	0.06	0.06	0.07	0.04	0.14
Αντλία πλυσίματος καταστρώματος	11.04	0.1	0.27	2.01	5.37	0.17	0.04	0.08	0.07	0.09	0.06	0.14
Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης	14.72	0.1	0.27	1.44	7.16	0.22	0.05	0.11	0.09	0.12	0.07	0.18
Αντλίες υγιεινής	7.36	0.4	0.67	1.78	5.76	0.18	0.04	0.09	0.08	0.10	0.06	0.14

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΟΙΟΥ

Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας	18.4	0.0	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	14.72	0.0	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Αντλία στεγανών θυρών	3.68	0.0	0.00	3.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πλευρικός προωστήριος μηχανισμός	625.6	0.0	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣΥΝΟΛΟ			0.27									1.45
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ												
Συμπιεστές κλιματισμού	33.1	0.75	0.81	0.09	40.11	0.43	0.27	0.62	0.53	0.69	0.42	0.35
Συμπιεστές ψυκτικής	7.4	0.4	0.67	1.16	11.51	0.46	0.08	0.18	0.15	0.20	0.12	0.37
Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	14.7	0.75	0.81	0.34	35.65	1.31	0.24	0.55	0.47	0.61	0.37	1.07
Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	11.0	0.75	0.81	0.58	26.74	1.25	0.18	0.41	0.35	0.46	0.28	1.01
Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	1.5	0.4	0.67	1.29	2.30	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02
Αντλίες πόσιμου νερού	2.9	0.5	0.73	1.68	5.28	0.14	0.04	0.08	0.07	0.09	0.06	0.11
Αντλίες αποχέτευσης	7.4	0.7	0.80	0.79	16.86	0.67	0.12	0.26	0.22	0.29	0.18	0.55
Αντλίες θερμού νερού	2.2	0.7	0.80	2.11	8.73	0.48	0.06	0.13	0.12	0.15	0.09	0.39
Συμπιεστής παγωτομηχανής	1.1	0.2	0.46	1.35	1.10	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00
Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	0.7	0.8	0.82	1.56	19.47	1.78	0.13	0.30	0.26	0.33	0.20	1.44
Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	3.7	0.85	0.83	1.29	102.52	40.58	0.70	1.57	1.36	1.75	1.07	32.95
Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	7.4	0.4	0.67	0.02	40.29	0.11	0.28	0.62	0.53	0.69	0.42	0.09
Ανελκυστήρας	11.0	0.5	0.73	0.41	9.90	0.12	0.07	0.15	0.13	0.17	0.10	0.10
ΣΥΝΟΛΟ			0.74			3.64						38.46

Κατάσταση λειτουργίας 3: Εν Όρμω- Σενάριο 3													
Εξοπλισμός	P nomin al	fs	pf	R tot	I ₁	P loss	I ₃	I ₅	I ₇	I ₁₁	I ₁₃	P harmonic loss	
	kW			Ω	A	kW	A	A	A	A	A	W	
ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ													
Κουζίνα	30.0	0.3	0.58	0.56	20.24	0.69	0.14	0.31	0.27	0.35	0.21	0.56	
Εστίες	20.0	0.3	0.58	1.53	13.50	0.83	0.09	0.21	0.18	0.23	0.14	0.68	
Ανεμιστήρας	4.4	0.3	0.58	4.36	2.98	0.12	0.02	0.05	0.04	0.05	0.03	0.09	
Εξαεριστήρας	11.0	0.3	0.58	1.51	7.45	0.25	0.05	0.11	0.10	0.13	0.08	0.20	
Πλυνήριο πιάτων	1.5	0.2	0.46	2.08	1.46	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	
Διάφορες συσκευές	2.0	0.3	0.58	1.66	4.66	0.11	0.03	0.07	0.06	0.08	0.05	0.09	
ΣΥΝΟΛΟ			0.56			2.01							
ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ													
Μηχανοστάσιο	22	1	0.84	0.09	58.99	0.90	0.40	0.91	0.78	1.01	0.62	0.73	
Γέφυρα	15	0.5	0.73	0.22	23.21	0.36	0.16	0.36	0.31	0.40	0.24	0.29	
Χώροι ενδιαίτησης	12	0.4	0.67	0.23	32.38	0.72	0.22	0.50	0.43	0.55	0.34	0.58	
Καταστρώματος	9	0.9	0.84	0.36	43.92	2.11	0.30	0.67	0.58	0.75	0.46	1.71	
ΣΥΝΟΛΟ			0.77			1.02							
ΟΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			0.41			57.4						46.63	
ΦΟΡΤΙΟ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	673.3	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ					16.4 %						-

9 Επίλογος

9.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της έρευνας αυτής αποτέλεσε η μελέτη των θεμάτων ποιότητας ισχύος στα ηλεκτρικά δίκτυα πλοίων με ιδιαίτερη έμφαση στο θέμα των αρμονικών παραμορφώσεων. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα προβλήματα ποιότητας ισχύος, η αρμονική παραμόρφωση δεν είναι στιγμιαία αλλά σταθερή στο χρόνο με απότοκη τη δημιουργία συσσωρευτικών βλαβών. Το πρόβλημα των αρμονικών παραμορφώσεων θα αποτελέσει σημαντικό ζήτημα στο μέλλον των ηλεκτρικών δικτύων του πλοίου λόγω του έντονου εξηλεκτρισμού τους, την πιλοτική εφαρμογή προσπαθειών αμιγώς ηλεκτροπρόωσης και της χρήσης μη γραμμικών φορτίων για διαμόρφωση των χαρακτηριστικών τάσης και ρεύματος.

Μέσα από την μελέτη και το σχεδιασμό συστημάτων με έμφαση στα θέματα ποιότητας ισχύος στα πλοία είναι εφικτή η ελαχιστοποίηση κινδύνων και βλαβών σε ένα σύστημα που είναι στην θάλασσα ως επί το πλείστον αυτόνομο, ο περιορισμός των υπερκαταναλώσεων τόσο από οικονομικής άποψης όσο και από οικολογικής. Μέσα από τη μελέτη των αρμονικών παραμορφώσεων και της ποιότητας της ισχύος, επειδή διαφορετικά μη γραμμικά φορτία παράγουν διαφορετικά αλλά αναγνωρίσιμα αρμονικά φάσματα, γίνεται εντοπισμός της πηγής του προβλήματος, δηλαδή του εξοπλισμού αυτού που είναι υπεύθυνος για την διάδοση των αρμονικών φασμάτων πάνω στο δίκτυο του πλοίου. Καθώς, πραγματοποιείται η διάδοση των μη γραμμικών ρευμάτων εξετάζεται ο εξοπλισμός που πλήττεται πάνω στο πλοίο με κυρίαρχη την υπερφόρτιση των γεννητριών, τη γήρανση των ηλεκτροκινητήρων και τις αυξήσεις θερμοκρασίας σε όλο το δίκτυο διανομής. Τα συστηματικά προβλήματα έχουν προκαλέσει την ανησυχία των διεθνών αρμόδιων οργανισμών για το θέμα και τις πιθανές επιπτώσεις σε περίπτωση βλάβης κρίσιμου εξοπλισμού με αποτέλεσμα την θέσπιση ορίων στο επιτρεπόμενο φάσμα αρμονικών παραμορφώσεων τάσης και ρεύματος και την επιβολή αυστηρού χρονικού ορίου για συμμόρφωση.

Έπειτα, αναπτύσσεται ένα μοντέλο υπολογισμού των επιπρόσθετων απωλειών των καλωδίων τροφοδοσίας λόγω αρμονικών παραμορφώσεων σε ένα δίκτυο πλοίου με χρήση μετρήσεων ποιότητας ισχύος. Όπως έχει γίνει κατανοητό, οι επιπρόσθετες απώλειες στα καλώδια τροφοδοσίας λόγω αυξημένων μη θεμελιωδών ρευμάτων είναι μόνο μία από τις επιπτώσεις των αρμονικών. Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον από ενεργειακής άποψης η εφαρμογή του μοντέλου αυτού. Βρέθηκε ότι σε καταστάσεις αιχμής, δηλαδή χρονικές στιγμές με αυξημένα μη γραμμικά φορτία η φόρτιση των γεννητριών μπορεί να αυξηθεί μέχρι και έως 12% για όσο χρονικό διάστημα είναι εν λειτουργία αυτός ο συνδυασμός φορτίων. Ωστόσο κατά τις περιόδους χαμηλών παραμορφώσεων της τάξης 1% του θεμελιώδους ρεύματος, οι απώλειες μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

Αποτελεί δύσκολη πρόβλεψη ο καθορισμός των επιδράσεων των αρμονικών παραμορφώσεων στα μελλοντικά δίκτυα πλοίων λόγω έλλειψης αναλυτικών πληροφοριών σχετικά με τα τωρινά επίπεδα αρμονικών παραμορφώσεων στα πλοία. Λαμβάνοντας υπόψη, την επίδραση των αρμονικών στην διάρκεια ζωής εξοπλισμού και τις απώλειες εσόδων λόγω εξοπλισμού και αυξημένης ενεργειακής κατανάλωσης, είναι ιδιαίτερα δύσκολη η παράβλεψη του θέματος σε μια νέα σχεδίαση. Προτείνεται η εκτίμηση των αναμενόμενων επιπέδων αρμονικών μέσω ήδη υπάρχοντων πολύ όμοιων δικτύων και η χρήση αυτών των

επιπέδων για την σωστή νέα μελέτη. Έτσι, τα νέα δίκτυα θα έχουν χαμηλότερες ενεργειακές απώλειες, αυξημένη ασφάλεια και θα προσεγγίζουν ικανοποιητικά το προσδόκιμο ζωής.

10 Βιβλιογραφία

- [1] H. L. Curtis and F. B. Silsbee, “Definitions of power and related quantities,” *Electr. Eng.*, vol. 54, no. 4, pp. 394–404, Apr. 1935, doi: 10.1109/EE.1935.6539147.
- [2] M. E. Balci and M. H. Hocaoglu, “Comparison of power definitions for reactive power compensation in nonsinusoidal conditions,” in *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (IEEE Cat. No.04EX951)*, pp. 519–524, doi: 10.1109/ICHQP.2004.1409408.
- [3] S. Castellan, G. Buja, and R. Menis, “Effective reactive power compensation in single-phase systems under distorted utility voltage,” in *2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Aug. 2017, pp. 401–407, doi: 10.1109/DEMPED.2017.8062386.
- [4] I. Kobougias, E. Tatakis, and J. Prousalidis, “PV Systems Installed in Marine Vessels: Technologies and Specifications,” *Adv. Power Electron.*, vol. 2013, pp. 1–8, Mar. 2013, doi: 10.1155/2013/831560.
- [5] J. Mindykowski, “Power quality on ships: Today and tomorrow’s challenges,” in *2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, Oct. 2014, pp. 001–018, doi: 10.1109/ICEPE.2014.6969860.
- [6] J. Prousalidis, E. Styvaktakis, F. Kanellos, S. Perros, and E. Sofras, “Electric Power Supply Quality in ship systems: an overview,” *Int. J. Ocean Syst. Manag.*, vol. 1, no. 1, p. 68, 2008, doi: 10.1504/IJOSM.2008.017782.
- [7] J. Prousalidis, D. Spathis, V. Papaspilitopoulos, V. Georgiou, T. Kourmpelis, and F. Kanellos, “Facing safety challenges towards smart ships and ports,” Jul. 2019, doi: 10.24868/issn.2515-8198.2019.005.
- [8] J. K. Phipps, J. P. Nelson, and P. K. Sen, “Power quality and harmonic distortion on distribution systems,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 2, pp. 476–484, 1994, doi: 10.1109/28.287506.
- [9] T. Hoevenaars, I. Evans, and A. Lawson, “New marine harmonic standards,” *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 16, no. 1, pp. 16–25, Jan. 2010, doi: 10.1109/MIAS.2009.934965.

-
- [10] E. Skjong, M. Ochoa-Gimenez, M. Molinas, and T. A. Johansen, “Management of harmonic propagation in a marine vessel by use of optimization,” in *2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Jun. 2015, pp. 1–8, doi: 10.1109/ITEC.2015.7165797.
- [11] M. Vrazic, D. Vuljaj, Z. Hanic, and M. Kovacic, “Approach to ship power network optimization regarding total harmonic distortion,” in *2016 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, May 2016, pp. 207–211, doi: 10.1109/DAAS.2016.7492574.
- [12] J. Barros and R. I. Diego, “A review of measurement and analysis of electric power quality on shipboard power system networks,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 665–672, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.043.
- [13] V. Kus, T. Josefova, and P. Bilik, “Harmonic currents generated by the voltage-source active rectifier,” in *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, May 2013, pp. 373–378, doi: 10.1109/PowerEng.2013.6635635.
- [14] H. Jeon, J. Kim, and K. Yoon, “Large-Scale Electric Propulsion Systems in Ships Using an Active Front-End Rectifier,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 6, p. 168, Jun. 2019, doi: 10.3390/jmse7060168.
- [15] G. Kocak and Y. Durmusoglu, “Energy efficiency analysis of a ship’s central cooling system using variable speed pump,” *J. Mar. Eng. Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 43–51, Jan. 2018, doi: 10.1080/20464177.2017.1283192.
- [16] S. V. Giannoutsos and S. N. Manias, “A Systematic Power-Quality Assessment and Harmonic Filter Design Methodology for Variable-Frequency Drive Application in Marine Vessels,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 2, pp. 1909–1919, Mar. 2015, doi: 10.1109/TIA.2014.2347453.
- [17] G. J. Wakileh, “Harmonics in rotating machines,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 66, no. 1, pp. 31–37, Jul. 2003, doi: 10.1016/S0378-7796(03)00069-5.
- [18] V. E. Wagner *et al.*, “Effects of harmonics on equipment,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 2, pp. 672–680, Apr. 1993, doi: 10.1109/61.216874.
- [19] J. Prousalidis, I. K. Hatzilau, P. Michalopoulos, I. Pavlou, and D. Muthumuni, “Studying ship electric energy systems with shaft generator,” in *IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2005.*, 2005, pp. 156–162, doi: 10.1109/ESTS.2005.1524669.
- [20] Bednarz and Dybkowski, “Estimation of the Induction Motor Stator and Rotor Resistance Using Active and Reactive Power Based Model Reference Adaptive System

- Estimator,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 23, p. 5145, Nov. 2019, doi: 10.3390/app9235145.
- [21] C. Salomon, W. Sant’Ana, G. Lambert-Torres, L. Borges da Silva, E. Bonaldi, and L. de Oliveira, “Comparison among Methods for Induction Motor Low-Intrusive Efficiency Evaluation Including a New AGT Approach with a Modified Stator Resistance,” *Energies*, vol. 11, no. 4, p. 691, Mar. 2018, doi: 10.3390/en11040691.
- [22] K. Wang, R. Huai, Z. Yu, X. Zhang, F. Li, and L. Zhang, “Comparison Study of Induction Motor Models Considering Iron Loss for Electric Drives,” *Energies*, vol. 12, no. 3, p. 503, Feb. 2019, doi: 10.3390/en12030503.
- [23] D. Zhang, R. An, and T. Wu, “Effect of voltage unbalance and distortion on the loss characteristics of three-phase cage induction motor,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 12, no. 2, pp. 264–270, Feb. 2018, doi: 10.1049/iet-epa.2017.0464.
- [24] V. Sousa, P. R. Viego, J. R. Gomez, E. C. Quispe, and M. Balbis, “Estimating induction motor efficiency under no-controlled conditions in the presences of unbalanced and harmonics voltages,” in *2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, Oct. 2015, pp. 567–572, doi: 10.1109/Chilecon.2015.7400434.
- [25] D. Kumar, “Performance Analysis of Three-Phase Induction Motor with AC Direct and VFD,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 331, p. 012025, Mar. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/331/1/012025.
- [26] V. S. Santos, P. R. V. Felipe, J. R. G. Sarduy, N. A. Lemozy, A. Jurado, and E. C. Quispe, “Procedure for Determining Induction Motor Efficiency Working Under Distorted Grid Voltages,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 1, pp. 331–339, Mar. 2015, doi: 10.1109/TEC.2014.2335994.
- [27] M. Chirindo, M. A. Khan, and P. S. Barendse, “Considerations for Nonintrusive Efficiency Estimation of Inverter-Fed Induction Motors,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 2, pp. 741–749, Feb. 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2477801.
- [28] S. Djurovic, D. S. Vilchis-Rodriguez, and A. C. Smith, “Supply Induced Interharmonic Effects in Wound Rotor and Doubly-Fed Induction Generators,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 4, pp. 1397–1408, Dec. 2015, doi: 10.1109/TEC.2015.2427295.
- [29] R. Yacamini and S. C. Chang, “Noise and vibration from induction machines fed from harmonic sources,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 10, no. 2, pp. 286–292, Jun. 1995, doi: 10.1109/60.391894.
- [30] T. Dao, B. T. Phung, and T. Blackburn, “Effects of voltage harmonics on distribution

-
- transformer losses,” in *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Nov. 2015, pp. 1–5, doi: 10.1109/APPEEC.2015.7380953.
- [31] D. Kumar and F. Zare, “A Comprehensive Review of Maritime Microgrids: System Architectures, Energy Efficiency, Power Quality, and Regulations,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 67249–67277, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917082.
- [32] F. Sculler, B. Keruel, and M. Richard, “Voltage deviation factor analysis and meaning for warship electric power system,” in *2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, Apr. 2011, pp. 434–438, doi: 10.1109/ESTS.2011.5770911.
- [33] S. M. Halpin, “Comparison of IEEE and IEC Harmonic Standards,” in *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, pp. 2732–2734, doi: 10.1109/PES.2005.1489688.