



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

**«Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίων,
Κανονισμοί, Μελέτες & Σχεδίαση»**

Διπλωματική Εργασία

Σπυρίδων Ν. Παναγιωτόπουλος

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

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

**«Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίων,
Κανονισμοί, Μελέτες & Σχεδίαση»**

Διπλωματική Εργασία

Σπυρίδων Ν. Παναγιωτόπουλος

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Ι. Προυσαλίδης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γ. Κορρές

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Χ. Παπαδόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014

.....

Σπυρίδων Ν. Παναγιωτόπουλος
Διπλωματούχος Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός
Ε.Μ.Π.

Copyright © Σπυρίδων Ν. Παναγιωτόπουλος, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Ο βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατά το δυνατόν ολοκληρωμένη μελέτη του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος ενός τυπικού, εμπορικού, φορτηγού πλοίου. Αρχικά, δόθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο των δομικών στοιχείων που το αποτελούν, οι κανονισμοί που διέπουν τη λειτουργία του, καθώς και οι σχετικές ηλεκτρολογικές έννοιες. Έπειτα, παρουσιάστηκαν οι ηλεκτρολογικές μελέτες που είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν κατά τη φάση της σχεδίασης του συστήματος, δίνοντας έμφαση στην προστασία του εξοπλισμού από βραχυκυκλώματα. Τέλος, οι μελέτες αυτές εφαρμόστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού προσομοίωσης ηλεκτρικών δικτύων SKM Powertools, σε ένα δεξαμενόπλοιο VLCC.

Λέξεις κλειδιά

Ηλεκτρικό Σύστημα Πλοίου, IEEE Std.45, Σύγχρονη Γεννήτρια, Επαγωγικός Κινητήρας, Εκκινήτες, Κύριος Πίνακας, Καλώδια Ισχύος, Μ/Σ, Προστασία, Διακόπτες, Ποιότητα Ισχύος, Κανονισμοί Νηογνωμόνων, Σχεδίαση, Ηλεκτρικός Ισολογισμός, Διαστασιολόγηση Καλωδίων και Ζυγών, Επιλογή Διακοπών, Επιλογική Συνεργασία, Μελέτη φορτίου, Μελέτη Βραχυκυκλωμάτων, IEC 61363, SKM Powertools, Προσομοίωση Ηλεκτρικού Δικτύου Δεξαμενοπλοίου VLCC

Abstract

The aim of this diploma thesis is the complete study of the electrical power system of a typical, merchant, cargo vessel. Initially, the theoretical background of the ship's electrical network main components was given, along with the applicable regulations that govern its operation and the relevant electrical concepts. Afterwards, the necessary electrical studies for the planning of the system were presented; emphasis was given to the overcurrent protection of the equipment. Finally, these studies were implemented utilizing the electrical network simulation software, SKM Powertools, to a VLCC tanker.

Keywords

Ship Electric System, IEEE Std 45, Synchronous Generator, Induction Motor, Starters, Main Switchboard, Cables, Transformer, Protection Equipment, Circuit Breakers, Power Quality, Class Regulations, Design, Electric Load Analysis, Cables & Busbars Ampacity Study, Breakers Selection, Selectivity, Discrimination, Short-circuit study, IEC 61363, SKM Powertools, VLCC Tanker Electric Network Simulation

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου (Νίκο & Άννα) και την αδερφή μου (Ζέτα) για την πολύτιμη τους συμπαράσταση, την ηθική και υλική τους στήριξη όλα αυτά τα χρόνια. Η κατανόηση και η υπομονή που έδειξαν στο πρόσωπο μου, ιδιαίτερα στο τελευταίο έτος των σπουδών μου, υπήρξε καταλυτική για την περαίωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Δε μπορώ παρά να τους την αφιερώσω με όλη μου την καρδιά.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Ιωάννη Προυσαλίδη, Αναπληρωτή Καθηγητή του τομέα Ναυτικής Μηχανολογίας, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, για την συνεργασία μας, τις συμβουλές του και την πάντα θετική του διάθεση. Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω να δώσω στους καλούς μου φίλους και συναδέλφους Αναστάσιο Κοτσαμπόπουλο, Ιωάννη Μαρινάτο και Χρήστο Σταθάκη, για την υποστήριξη, τις εποικοδομητικές συζητήσεις και την ωραία παρέα που διατηρούμε. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του Τεχνικού Τμήματος της Maran Tankers για το πλήθος των τεχνικών δεδομένων που μου εμπιστεύτηκε, τον επαγγελματισμό τους και την άψογη συνεργασία μας.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Κεφάλαιο : ΣΗΕ πλοίων, εισαγωγικές έννοιες /πρότυπα.....	1
1.1	Εισαγωγή.....	1
1.2	Πρότυπα, φορείς τυποποίησης.....	2
1.3	Στοιχεία ηλεκτρικής εγκατάστασης, εισαγωγή.....	3
1.3.1	Διαφορές σε σχέση με τα ηπειρωτικά συστήματα.....	4
1.3.2	Κύρια χαρακτηριστικά δικτύου διανομής.....	4
1.3.3	Τοπολογία δικτύου/συστήματα διανομής.....	5
1.4	Πρότυπο IEEE Standard-45 ^{[3],[5]}	7
1.4.1	<i>Πρότυπες Τάσεις (Standard Voltages)</i>	7
1.4.2	<i>Πρότυπες συχνότητες (Standard frequencies)</i>	8
1.4.3	<i>Αποκλίσεις Τάσης (Voltage Deviations)</i>	8
1.4.4	<i>Αρμονική Παραμόρφωση (Harmonic Distortion)</i>	8
1.4.5	<i>Ρεύμα σφάλματος (Fault current)</i>	8
1.4.6	<i>Προστασία κυκλώματος (Circuit protection)</i>	9
1.4.7	<i>Ηλεκτρονόμος αναστροφής ισχύος (Reversed power relay)</i>	9
1.4.8	<i>Λήψη ρεύματος από τη ξηρά (Shore connection/Cold Ironing)</i>	9
1.4.9	<i>Ζυγοί (Bus Bars)</i>	9
1.4.10	<i>Θερμοκρασίες λειτουργίας και περιβάλλοντος (Operating and ambient temperatures)</i>	9
1.4.11	<i>Κλάσεις μόνωσης (insulation class)</i>	10
1.4.12	<i>Μετασχηματιστές ελαίου και διακόπτες (Oil-filled transformer and circuit breaker):</i>	10
1.4.13	<i>Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Electromagnetic Interference)</i>	11
1.4.14	<i>Έλεγχος αντοχής μόνωσης σε υψηλή τάση (High-voltage insulation withstand test):</i> 11	
1.4.15	<i>Κυκλώματα γύρω από την μαγνητική πυξίδα (Circuits around magnetic compass)</i> 11	
1.5	Επικίνδυνες περιοχές (Hazardous locations).....	12
1.6	Προστασία του περιβλήματος (Ingress Protection, IP).....	12
1.7	Διαχωρισμός ηλεκτρικού εξοπλισμού σε κατηγορίες ανάλογα την κρισιμότητα. 13	
1.8	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου.....	14
2	Κεφάλαιο : Δομικά στοιχεία συστήματος ισχύος.....	15
2.1	Σύγχρονη γεννήτρια (Synchronous Generator).....	17

2.1.1	Κατασκευαστικά Στοιχεία	17
2.1.2	Αρχή Λειτουργίας	19
2.1.3	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μεγέθη Σ.Γ.	20
2.1.4	Έλεγχος συχνότητας μέσω ρυθμιστή στροφών (Governor)	23
2.1.5	Έλεγχος τάσης μέσω αυτόματου ρυθμιστή τάσης (Voltage control, AVR) ...	25
2.1.6	Παραλληλισμός γεννητριών	26
2.2	Πίνακες και διανομή ηλεκτρικής ισχύος	27
2.2.1	Κύριος πίνακας	27
2.2.2	Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά	28
2.2.3	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	29
2.2.4	Σύστημα διαχείρισης ισχύος (Power Monitoring System, PMS)	30
2.2.5	Απόρριψη Φορτίου (Load shedding/Preferential trip).....	30
2.3	Προστατευτικός εξοπλισμός	31
2.3.1	Εισαγωγή	31
2.3.2	Γενικές αρχές προστασίας	31
2.3.3	Ασφάλειες (Fuses)	32
2.3.4	Ηλεκτρονόμοι (H/N) Υπερεντάσεως (Overcurrent Relays, OCR).....	34
2.3.5	Διακόπτες Ισχύος (Circuit Breakers,CB).....	37
2.3.6	Επιλογική Συνεργασία /Συντονισμένη Προστασία (Selectivity/Protection Coordination).....	39
2.4	Μετασχηματιστές Ισχύος	41
2.4.1	Αρχή λειτουργίας	41
2.4.2	Ισοδύναμο κύκλωμα/απώλειες	41
2.4.3	Βασικά ονομαστικά ηλεκτρικά μεγέθη:	42
2.4.4	Μετασχηματιστής ξηρού τύπου.....	43
2.4.5	Κανονισμοί και καλή πρακτική για Μ/Σ ισχύος.....	43
2.4.6	Διαστασιολόγηση.....	43
2.5	Καλώδια	44
2.5.1	Απαιτήσεις καλωδίωσης για θαλάσσιες εγκαταστάσεις:.....	44
2.5.2	Μέρη καλωδίου ισχύος	44
2.5.3	Εγκατάσταση καλωδίων	46
2.5.4	Ικανότητα φόρτισης/επιλογή καλωδίου.....	47
2.5.5	Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα	47

2.6	Επαγωγικοί Κινητήρες	49
2.6.1	Κατασκευαστικά στοιχεία	49
2.6.2	Αρχή Λειτουργίας.....	50
2.6.3	Ισοδύναμο Κύκλωμα-Ροπή.....	51
2.6.4	Ροή Ισχύος-Απώλειες.....	52
2.6.5	Στοιχεία πινακίδας κινητήρα (Nameplate)	53
2.6.6	Βιομηχανικός έλεγχος.....	54
2.6.7	Ρύθμιση ταχύτητας	59
2.6.8	Παρατηρήσεις	61
2.7	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου.....	62
3	Κεφάλαιο : Ποιότητα Ισχύος.....	63
3.1	Εισαγωγή/ορισμός.....	63
3.2	Διακύμανση συχνότητας (Frequency deviation).....	63
3.3	Υπερτάσεις (Overvoltages)	64
3.4	Υπερτάσεις μικρής διάρκειας (Voltage Swells).....	64
3.5	Βυθίσεις τάσης (Voltage Sags/Dips).....	65
3.6	Διακυμάνσεις τάσης (Voltage Flicker)	65
3.7	Ασυμμετρία τάσης ή ρεύματος (Voltage/current unbalance)	65
3.8	Αρμονική Παραμόρφωση (Harmonic Distortion).....	66
3.8.1	Επιπτώσεις αρμονικών.....	67
3.8.2	Τεχνικές μείωσης της αρμονικής παραμόρφωσης.....	68
3.9	Συντελεστής ισχύος (Power factor).....	70
3.9.1	Η σημασία της διόρθωσης του συντελεστή ισχύος	72
3.9.2	Μέθοδοι διόρθωσης συντελεστή ισχύος.....	72
3.10	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου.....	73
4	Κεφάλαιο : Ηλεκτρολογικές Μελέτες	75
4.1	Εισαγωγή.....	75
4.2	Μεθοδολογία	77
4.2.1	Παρατηρήσεις	79
4.3	Μελέτη Ηλεκτρικού Ισολογισμού.....	80
4.3.1	Επεκταμένος ενεργειακός ισολογισμός	83
4.4	Μελέτη διαστασιολόγησης αγωγών (Conductor sizing study)	86
4.4.1	Επιλογή καλωδίων	86

4.4.2	Επιλογή ζυγών	91
4.5	Υπολογισμοί ροής φορτίου (Load Flow Calculations)	92
4.5.1	Το μαθηματικό μοντέλο	93
4.5.2	Μέθοδος Newton Raphson	95
4.5.3	Εφαρμογή της μεθόδου στο πρόβλημα ροής φορτίου	98
4.5.4	Βήματα Υπολογισμού	100
4.6	Μελέτη βραχυκυκλωμάτων (Short-circuit study)	101
4.6.1	Το ηλεκτρικό δίκτυο κατά το βραχυκύκλωμα	101
4.6.2	Πρότυπο IEC 61363	103
4.6.3	Ορισμοί [61363-1 IEC:1998]	104
4.6.4	Σύμβολα (IEC 61363)	106
4.6.5	Εξισώσεις (IEC 61363)	108
4.6.6	Μεθοδολογία	113
4.6.7	Παραδοχές	113
4.7	Προστασία του συστήματος διανομής	114
	Επιλογή-ρύθμιση διακοπών / επιλογική συνεργασία	114
4.7.1	Μελέτη με τη βοήθεια υπολογιστή	114
4.8	Άλλες μελέτες	119
4.8.1	Υπολογισμοί σφάλματος γείωσης	119
4.8.2	Μελέτη εκκίνησης / υπολογισμοί πτώσης τάσης (motor starting / voltage drop calculations)	119
4.8.3	Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας	119
4.8.4	Ανάλυση αξιοπιστίας και ανάλυση επίδρασης αστοχίας (Reliability analysis and Failure Mode Effect Analysis, FMEA)	120
4.9	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου	121
5	Κεφάλαιο : Εφαρμογή μελετών (VLCC Case study)	123
5.1	Εισαγωγή	123
5.1.1	VLCC Ηλεκτρικός Ισολογισμός (1)	125
5.1.2	VLCC Ηλεκτρικός Ισολογισμός (2)	129
5.1.3	Επεκταμένος Ηλεκτρικός Ισολογισμός VLCC (1)	135
5.1.4	Άλλα πλοία	144
5.2	Διαστασιολόγηση καλωδίων VLCC	145
5.2.1	Προσδιορισμός μήκους καλωδίωσης	145

5.2.2	Επιλογή καλωδίων	148
5.3	Προσομοίωση δικτύου	151
5.3.1	Εισαγωγή δεδομένων	151
5.4	Μελέτη ροής φορτίου & Μελέτη Βραχυκυκλωμάτων.....	153
5.4.1	Απλοποιημένο δίκτυο	153
5.5	Πλήρες δίκτυο	156
5.6	Επιλογή διακοπών	162
5.6.1	Παρατηρήσεις	164
6	Κεφάλαιο: Συμπεράσματα / Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	165
7	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	167
7.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο	167
7.1.1	Σύγχρονη Γεννήτρια	167
i)	Ισοδύναμο κύκλωμα και προσδιορισμός παραμέτρων:	167
ii)	Διανυσματικό Διάγραμμα (Phasor Diagram).....	169
iii)	Ισχύς, Ροπή και Απώλειες	170
iv)	Διάγραμμα Λειτουργίας Σ.Γ. (Capability Diagram)	175
7.1.2	Κινητήρας επαγωγής.....	178
i)	Ισοδύναμο Κύκλωμα-Ροπή	178
7.2	Πίνακες	181
7.3	Λογισμικό ανάλυσης ηλεκτρικών δικτύων SKM Powertools	186
7.3.1	Γενικά στοιχεία	186
7.3.2	Χρήση του λογισμικού.....	187
7.3.3	Ρυθμίσεις.....	188
7.3.4	Εισαγωγή δεδομένων	189
7.4	Αποτελέσματα	196
	IEC61363 SKM Report	196

Κατάλογος σχημάτων και εικόνων

Σχ. 1.1 Γειώσεις προστασίας στο σύστημα ισχύος δεξαμενοπλοίου.....	7
Σχ. 2.1 Σύστημα ηλεκτρικής ισχύος δεξαμενοπλοίου	16
Σχ. 2.2 Τα βασικά δομικά στοιχεία του εναλλακτήρα.....	18
Σχ. 2.3 μονοφασικό ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα Σ.Γ.....	20
Σχ. 2.4 Διάγραμμα λειτουργίας Σ.Γ.....	22
Σχ. 2.5 Χαρ/κή ροπής-στροφών.....	23
Σχ. 2.6 Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή στροφών	23
Σχ. 2.7 Χαρ/κή φορτίου-συχνότητας (στατισμός)	24
Σχ. 2.8 Ρύθμιση ισχύος	24
Σχ. 2.9 Μπλοκ διάγραμμα αυτόματου ρυθμιστή τάσης.....	25
Σχ. 2.10 Χαρ/κή V-Q	25
Σχ. 2.11 Παραλληλισμός γεννητριών	26
Σχ. 2.12 Διαίρεση κύριου πίνακα.....	27
Σχ. 2.13 Τυπική διάταξη πεδίων του κυρίου πίνακα	28
Σχ. 2.14 Τυπική διάταξη ζυγών εντός πίνακα.....	29
Σχ. 2.15 Χαρ/κή ρεύματος-χρόνου (ζώνες)	32
Σχ. 2.16 Διμεταλλικό έλασμα κανονικά κλειστού διακόπτη.....	33
Σχ. 2.17 Επίδραση θερμοκρασίας περιβάλλοντος στα ονομαστικά χαρακτηριστικά των ασφαλειών.....	34
Σχ. 2.18 Τύποι ασφαλειών τήξης.....	34
Σχ. 2.19 Κατασκευαστικά στοιχεία ηλεκτρομηχανικού H/N	35
Σχ. 2.20 Χαρ/κή H/N σταθερού χρόνου	36
Σχ. 2.21 Χαρ/κή H/N στιγμιαίου χρόνου.....	36
Σχ. 2.22 Οικογένεια χαρ/κων H/N αντιστρόφου χρόνου.....	36
Σχ. 2.23 Χαρ/κή διακόπτη (θερμικό και μαγνητικό μέρος).....	38
Σχ. 2.24 Τυπικό διάγραμμα χαρακτηριστικών ρεύματος-χρόνου διακοπών για συντονισμένη προστασία.....	39
Σχ. 2.25 Τομή μονοφασικού και τριφασικού μετασχηματιστή	41
Σχ. 2.26 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή ανηγμένο στο 1 ^ο ν (απώλειες).....	42
Σχ. 2.27 Τριπολικό καλώδιο ισχύος χαμηλής τάσης 0,6/1kV με θωράκιση.....	44
Σχ. 2.28 Ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση.....	47
Σχ. 2.29 Διατομή τριπολικού καλωδίου	48

Σχ. 2.30 Κύρια κατασκευαστικά στοιχεία ηλεκτρικού κινητήρα κλωβού και σύνδεση με το δίκτυο(ακροκιβώτιο).....	49
Σχ. 2.31 Χαρ/κή ροπής-ολίσθησης επαγωγικού κινητήρα	51
Σχ. 2.32 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα (χωρίς απώλειες πυρήνα).....	51
Σχ. 2.33 Ροή ισχύος επαγωγικού κινητήρα (απώλειες)	52
Σχ. 2.34 Στοιχεία που πρέπει να καταγράφονται στην ονομαστική πινακίδα	53
Σχ. 2.35 Ονομαστική πινακίδα	53
Σχ. 2.36 Χαρακτηριστικές ροπής ταχύτητας (κλάσεις NEMA)	54
Σχ. 2.37 Διαθέσιμη ροπή για την επιτάχυνση των στρεφόμενων αδρανειών.....	55
Σχ. 2.38 Χαρ/κή ρεύματος-στροφών	56
Σχ. 2.39 Κύκλωμα DOL starter (σε IT σύστημα ο αγωγός PE δεν υπάρχει)	56
Σχ. 2.40 Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας, ρεύματος-ταχύτητας, για απευθείας σύνδεση και σύνδεση κατά Y-Δ.....	57
Σχ. 2.41 Κύκλωμα συνδεσμολογίας Y-Δ.....	57
Σχ. 2.42 Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή.....	58
Σχ. 2.43 Χαρ/κή ροπής-ταχύτητας: αύξηση συχνότητας.....	59
Σχ. 2.44 Χαρ/κή ροπής-ταχύτητας: μείωση συχνότητας (ιδανική συμπεριφορά).....	60
Σχ. 2.45 Μπλοκ διάγραμμα αντιστροφέα	60
Σχ. 2.46 Έλεγχος ταχύτητας με μεταβολή της τάσης του στάτη.....	61
Σχ. 3.1 Κυματομορφή σε voltage spike	64
Σχ. 3.2 Κυματομορφή σε voltage swell	64
Σχ. 3.3 Κυματομορφή σε voltage sag	65
Σχ. 3.4 Κυματομορφή σε voltage flicker	65
Σχ. 3.5 Κυματομορφή με αρμονική παραμόρφωση.....	66
Σχ. 3.6 Συντελεστής ισχύος	70
Σχ. 3.7 Τρίγωνο ισχύος.....	71
Σχ. 4.1 Διάγραμμα ροής για τη σχεδίαση της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης.....	77
Σχ. 4.2 Διαστάσεις τριφασικού ζυγού.....	91
Σχ. 4.3 Χαρακτηριστικά ηλεκτρικά μεγέθη ζυγού	93
Σχ. 4.4 Ενεργητικά στοιχεία (μηχανές) και παθητικά στοιχεία (καλώδια).....	102
Σχ. 4.5 Αποσβεννύμενη μη περιοδική συνστώσα Σ.Ρ. στη κυματομορφή του ρεύματος βραχυκύκλωσης	102
Σχ. 4.6 r.m.s. τιμή του ρεύματος στις διαφορετικές χρονικές περιόδους και χρονικές συνιστώσες T'd, T'd.....	103

Σχ. 4.7 Τυπική κυματομορφή ρεύματος βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής	104
Σχ. 4.8 Επιλογή και ρύθμιση διακόπτη για την προστασία του καλωδίου από υπερφορτίσεις-υπερεντάσεις	115
Σχ. 4.9 Ρύθμιση διακόπτη για την εκκίνηση του κινητήρα	116
Σχ. 4.10 Διαθέσιμες ρυθμίσεις ηλεκτρονικής μονάδας διακόπτη ισχύος	117
Σχ. 4.11 α) TCC διάγραμμα διακοπών χωρίς επιλογική συνεργασία, β) TCC διάγραμμα διακοπών με επιλογική συνεργασία	118
Σχ. 5.1 Κυματομορφή ρεύματος βραχυκύκλωσης στον κύριο ζυγό [Πιν. 7.2]	157
Σχ. 7.1 Συνδεσμολογία αστέρα	167
Σχ. 7.2 Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικής γεννήτριας	167
Σχ. 7.3 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα	168
Σχ. 7.4 Επαγόμενη τάση συναρτήσει ρεύματος διέγερσης	168
Σχ. 7.5 Χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης	169
Σχ. 7.6 Διανυσματικό διάγραμμα Σ.Γ. με $\cos\phi=1$	169
Σχ. 7.7 Διανυσματικά διαγράμματα Σ.Γ. με συντελεστές ισχύος,επαγωγικό και χωρητικό	169
Σχ. 7.8 Διανυσματικό διάγραμμα Σ.Γ. με επαγωγικό συντελεστή ισχύος όπου αγνοείται η αντίσταση του σπλισμού	170
Σχ. 7.9 Ταλάντωση γωνίας φόρτισης δρομέα κατά την αύξηση φορτίου	171
Σχ. 7.10 Ισχύς συναρτήσει γωνίας φορτίου	171
Σχ. 7.11 Άξονες δρομέα έκτυπων πόλων	172
Σχ. 7.12 Ισχύς συναρτήσει γωνίας φορτίου (κυλινδρικός / έκτυπους πόλους δρομέας) ...	173
Σχ. 7.13 Ροή ισχύος Σ.Γ.	173
Σχ. 7.14 Καθορισμός συντελεστή ισχύος από ρεύμα διέγερσης	175
Σχ. 7.15 Μετασχηματισμός διανυσματικού διαγράμματος σε μεγέθη ισχύος	176
Σχ. 7.16 κατασκευή διαγράμματος λειτουργίας Σ.Γ.	177
Σχ. 7.17 Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα μετασχηματιστή	178
Σχ. 7.18 Τελικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα κλωβού	178
Σχ. 7.19 .(α)αρχικό κύκλωμα, χωρίς απώλειες πυρήνα (β) με χρήση θεωρήματος Thevenin	179
Σχ. 7.20 Εισαγωγή στοιχείων μέσω του One Line Diagram και δεδομένων μέσω του Component Editor	Error! Bookmark not defined.
Σχ. 7.21 Γενικές ρυθμίσεις δικτύου και πεδίο τιμών επαγωγικών κινητήρων	188
Σχ. 7.22 Ορισμός καλωδίων ισχύος	188
Σχ. 7.23 Επαγωγικοί κινητήρες X/R - Horsepower	192

Κατάλογος Πινάκων

Πιν. 1.1 Ενδεικτικά μέρη προτύπου IEC 60092	3
Πιν. 1.2 Σύγκριση χαρακτηριστικών των διαφορετικών μεθόδων γείωσης λειτουργίας που χρησιμοποιούνται στα πλοία.....	6
Πιν. 1.3 Κλάσεις μόνωσης στρεφόμενων μηχανών.....	10
Πιν. 1.4 Απαιτήσεις λειτουργίας ηλεκτρικού εξοπλισμού για διατοιχισμό και προνευτασμό	10
Πιν. 1.5 Όρια ελέγχου αντοχής ηλεκτρικού εξοπλισμού σε υψηλή τάση	11
Πιν. 1.6 Ελάχιστες αποστάσεις της καλωδίωσης από τη μαγνητική πυξίδα	12
Πιν. 2.1 Τυπικά ηλεκτρικά χαρ/κά μεγέθη	29
Πιν. 2.2 Τύποι ασφαλειών τήξης	33
Πιν. 2.3 Επιτήρηση και έλεγχος προστατευτικού εξοπλισμού	40
Πιν. 2.4 Ναυτικού τύπου καλώδιο ισχύος, κωδικοποίηση	46
Πιν. 2.5 Ναυτικού τύπου καλώδιο ισχύος, πρότυπα.....	46
Πιν. 2.6 Κλάσεις NEMA, σύνοψη χαρακτηριστικών	54
Πιν. 3.1 Επιτρεπτή διακύμανση συχνότητας κατά τα πρότυπα IEC60092-101, STANAG1008	64
Πιν. 3.2 Σύγκριση προδιαγραφών νηογνομένων και προτύπων, για αρμονική παραμόρφωση	67
Πιν. 3.3 Συγκεντρωτικός πίνακας κυριότερων φαινομένων ποιότητας ισχύος	69
Πιν. 3.4 Συγκεντρωτικός πίνακας αποδεκτών διακυμάνσεων τάσης κατά τα αντίστοιχα πρότυπα.....	69
Πιν. 4.1 Σχεδίαση συστήματος, απαιτήσεις εγγράφων πιστοποίησης (DNV Rules Pt4/Ch.8/Sec.1/B201)	76
Πιν. 4.2 Κατηγοριοποίηση φορτίων	78
Πιν. 4.3 Παράδειγμα συγκεντρωτικού πίνακα με την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ στις κύριες καταστάσεις λειτουργίας	81
Πιν. 4.4 Παράδειγμα καταγραφής των ηλεκτρικών καταναλωτών και της απαιτούμενης ισχύος.....	82
Πιν. 4.5 Παράδειγμα πίνακα ηλεκτρικού ισολογισμού	Error! Bookmark not defined.
Πιν. 4.6 Διορθωτικός συντελεστής f1 για ικανότητα φόρτισης αγωγού (θερμοκρασία περιβάλλοντος)	87
Πιν. 4.7 Ικανότητα φόρτισης καλωδίου (3 ή 4 πυρήνες, ονομαστική θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας 90°C)	88

Πιν. 4.8 Επιλογή και ρύθμιση διακοπών (ενδεικτικές τιμές).....	90
Πιν. 4.9 Ικανότητα φόρτισης ζυγών	91
Πιν. 7.1 Συντελεστές ισχύος και απόδοσης συναρτήσει του συντελεστή φορτίου	191
Πιν. 7.2 Κυματομορφή ρεύματος βραχυκύκλωσης	Error! Bookmark not defined.

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία καταπιάνεται με το ευρύ φάσμα των ηλεκτρολογικών γνώσεων που απαιτούνται από έναν ναυπηγό μηχανολόγο μηχανικό για την κατανόηση, εποπτεία ή σχεδίαση μέρους του ηλεκτρικού συστήματος ισχύος ενός πλοίου.

Στο **κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά του δικτύου παραγωγής και διανομής ενός πλοίου, οι ιδιαιτερότητες και διαφορές του σε σχέση με ένα ηπειρωτικό ΣΗΕ. Με τη βοήθεια του προτύπου της IEEE, Std 45 καταγράφονται οι κύριες απαιτήσεις που πρέπει να πληροί το σύστημα ισχύος.

Στο **κεφάλαιο 2** δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο σε ότι αφορά την κατασκευή και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των επιμέρους δομικών στοιχείων του συστήματος ισχύος (γεννήτριες, πίνακες, μετασχηματιστές, διακόπτες, καλώδια, κινητήρες), επιλεγμένων κατάλληλα για ναυτική χρήση.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαταραχές που μπορούν να προκύψουν σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, έννοιες που αφορούν την “ποιότητα ισχύος”. Περιγράφονται τα προβλήματα που προκαλούνται καθώς και τρόποι αντιμετώπισης τους. Επίσης, αναλύεται το ηλεκτρικό μέγεθος του συντελεστή ισχύος, η σημασία του και οι τρόποι βελτίωσης του.

Στο **κεφάλαιο 4** αναλύονται οι ηλεκτρολογικές μελέτες που πραγματοποιούνται κατά τη φάση του σχεδιασμού μιας ηλεκτρολογικής εγκατάστασης. Αυτές περιλαμβάνουν τη διακριτοποίηση των φορτίων, τη μελέτη ενεργειακού ισολογισμού, τη μελέτη ικανότητας φόρτισης των αγωγών, τη μελέτη φορτίου, τη μελέτη βραχυκυκλωμάτων κλπ. Η ορθή εκτέλεση τους μας βοηθά να επιτύχουμε τη βέλτιστη διαστασιολόγηση/επιλογή των δομικών στοιχείων της εγκατάστασης.

Στο **κεφάλαιο 5**, όλες οι μελέτες που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, εφαρμόζονται για τη σχεδίαση του κύριου συστήματος ηλεκτρικής ισχύος ενός δεξαμενοπλοίου VLCC. Για τη σχεδίαση του δικτύου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανάλυσης και προσομοίωσης ηλεκτρικών δικτύων SKM Powertools. Έμφαση δόθηκε στη μελέτη βραχυκυκλώματος και την επιλογή και ρύθμιση του προστατευτικού εξοπλισμού από υπερφορτίσεις-υπερεντάσεις. Ιδιαίτερη προσπάθεια καταβλήθηκε ώστε οι μελέτες να ανταποκρίνονται στις πραγματικές μελέτες που υλοποιούνται από το ηλεκτρολογικό τμήμα ενός ναυπηγείου, για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε το πλήρες μονογραμμικό σχέδιο του ηλεκτρικού δικτύου και χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα κατασκευαστών όπου αυτό ήταν δυνατόν.

Στο **κεφάλαιο 6** σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την εφαρμογή των παραπάνω μελετών, γίνεται μια αποτίμηση της δ.ε. και προτείνονται τομείς που χρήζουν περαιτέρω μελέτης σε επόμενες δ.ε.

Τέλος, στο **παράρτημα** (κεφάλαιο 7), δίνεται το επιπλέον θεωρητικό υπόβαθρο των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της γεννήτριας και των κινητήρων που αναπτύχθηκαν εν συντομία στο κυρίως κείμενο και όλοι οι τεχνικοί πίνακες που αναφέρθηκαν. Επίσης, παρουσιάζεται το λογισμικό προσομοίωσης δικτύων SKM Powertools, η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη σχεδίαση του δικτύου και την εφαρμογή της μελέτης φορτίου και της μελέτης βραχυκυκλώματος, μαζί με όλα τα δεδομένα εισαγωγής και τις αναφορές του προγράμματος.

1 Κεφάλαιο : ΣΗΕ πλοίων, εισαγωγικές έννοιες /πρότυπα

1.1 Εισαγωγή

Το πρώτο πλοίο στο οποίο εγκαταστάθηκε σύστημα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, ήταν το ατμοκίνητο φορτηγό/επιβατηγό SS Columbia, το 1880. Συγκεκριμένα, το πλοίο αυτό αποτέλεσε την πρώτη εμπορική εφαρμογή του πρωτοποριακού για την εποχή δικτύου φωτισμού με λαμπτήρες πυρακτώσεως, αντί για λάμπες πετρελαίου. Η υλοποίηση αυτή του Έντισον, με γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (δυναμό), αντιμετώπιστηκε με σκεπτικισμό αρχικά, όμως, ήταν τόσο επιτυχημένη που σύντομα οδήγησε στην ολοκληρωτική υιοθέτηση τέτοιων συστημάτων στα ήδη υπάρχοντα και μεταγενέστερα πλοία. Ενώ το δίκτυο φωτισμού, ισχύος μερικών kW, αποτέλεσε την αφετηρία της εγκατάστασης των πρώτων συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος στα πλοία, η γιγάντωση τους προήλθε από την χρησιμοποίηση των πρώτων ηλεκτρικών κινητήρων για την εξυπηρέτηση των διάφορων φορτίων, όπως ο εξαερισμός και τα μηχανήματα καταστρώματος. Αρχικά προτιμήθηκε το δίκτυο συνεχούς ρεύματος, το οποίο προσέφερε υψηλότερη ασφάλεια στο προσωπικό και ευκολία στον χειρισμό των κινητήρων. Όμως ο αυξανόμενος εξηλεκτρισμός των φορτίων που οδήγησε σε μονάδες παραγωγής μεγάλου βάρους, οι μεγάλες απώλειες κατά τη διανομή και η ευκολία που θα παρείχε η υιοθέτηση κοινού δικτύου διανομής με τις ηπειρωτικές βιομηχανικές μονάδες, οδήγησε στην αντικατάσταση του δικτύου συνεχούς ρεύματος με δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος. Το 1932 το πολεμικό ναυτικό των Η.Π.Α. επέλεξε ως πρότυπο σύστημα παραγωγής και διανομής το εναλλασσόμενο, τριφασικό, στα 440Volt - 60Hz. Η εφαρμογή του στα εμπορικά πλοία έγινε αρκετά χρόνια αργότερα αλλά ακόμη και σήμερα παραμένει το πλέον συχνά συναντώμενο σύστημα.

Εδώ και πολλά χρόνια, θα μπορούσε κάποιος να πει, πως, τα πλοία πως είναι πλωτές χημικές βιομηχανίες και όχι απλά μεταφορικές μονάδες. Η ηλεκτρική εγκατάσταση του πλοίου αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Συντίθεται από τα επιμέρους συστήματα, ισχύος, αυτοματισμού, φωτισμού και επικοινωνιών – ναυσιπλοΐας. Είναι η πιο μεγάλη βοηθητική εγκατάσταση, από την οποία εξαρτώνται το μεγαλύτερο μέρος των βοηθητικών λειτουργιών του πλοίου που σχετίζονται με την ασφάλεια, την πρόωση, τους χειρισμούς και το φορτίο. Λόγω των ιδιαίτερων περιβαλλοντικών και άλλων επιβαρυντικών συνθηκών που επικρατούν κατά την πλεύση και εξαιτίας του γεγονότος ότι η διάρκεια ζωής του εξοπλισμού αναμένεται να είναι ίση με τη διάρκεια εκμετάλευσης του πλοίου, η εγκατάσταση πρέπει να χαρακτηρίζεται από αυτάρκεια και αξιοπιστία, υψηλότερη από αυτή ενός ηπειρωτικού ΣΗΕ.

1.2 Πρότυπα, φορείς τυποποίησης

Η σχεδίαση της ηλεκτρικής εγκατάστασης και η επιλογή του ηλεκτρικού εξοπλισμού περιγράφεται και προσδιορίζεται τεχνικά, από πρότυπα τα οποία είναι κείμενα κοινής αποδοχής, εγκεκριμένα από διάφορους φορείς τυποποίησης. Μερικοί από τους πιο σημαντικούς διεθνείς φορείς είναι οι εξής:

ISO (*International Organization for Standardization*): Οργανισμός τυποποίησης για όλους τους τομείς σε παγκόσμιο επίπεδο. Ασχολείται με την τυποποίηση στο τεχνικό και βιομηχανικό κομμάτι.

IEC (*International Electrotechnical Commission*): Οργανισμός που έχει ως στόχο την ενοποίηση όλων των εθνικών κανονισμών στον ηλεκτρονικό και ηλεκτρικό τομέα. Συμμετέχει το σύνολο των εκβιομηχανισμένων κρατών και απαρτίζεται από τεχνικές επιτροπές για κάθε τομέα εφαρμογής. Σε έξι από αυτές συμμετέχει η αμερικανική **NEMA** (National Electrical Manufacturers Association).

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*): Τα πρότυπα IEEE αναπτύσσονται εντός της κοινότητάς του και εντός των αντίστοιχων επιτροπών. Η χρήση του κάθε προτύπου της IEEE είναι εξ ολοκλήρου προαιρετική και η ύπαρξη του δεν υπαινίσσεται ότι δεν υπάρχουν άλλοι τρόποι επίτευξης των σκοπών του.

Η εφαρμογή των προτύπων και των κανόνων των παραπάνω οργανισμών, εναρμονισμένες για θαλάσσιες κατασκευές και συμμορφούμενες με συγκεκριμένα σύνολα κανονισμών του **IMO** (*International Maritime Organization*), αξιολογείται από τους νηογνώμονες. Αυτοί είναι μη κυβερνητικοί, εθνικοί, οργανισμοί όπου εκτός από την αξιολόγηση για την ταξινόμηση (classification) των πλοίων, θεσπίζουν κανονισμούς, εκδίδουν τεχνικά έγγραφα, δίνουν πιστοποιητικά εξ ονόματος του Κράτους Σημαίας (Flag State) που φέρει το σκάφος και πραγματοποιούν επιθεωρήσεις στο πλοίο στο στάδιο της κατασκευής και κατά τη διάρκεια της ζωής του. Από το 1968 έχει δημιουργηθεί η Διεθνής Ένωση Νηογνώμωνων (**IACS**), όπου μέλη της είναι οι διεθνώς πιο αναγνωρισμένοι οργανισμοί, μεταξύ αυτών: ο αγγλικός *Lloyd's Register (LR)*, ο αμερικανικός *American Bureau of Shipping (ABS)*, ο νορβηγικός *Det Norske Veritas (DNV)*, ο γερμανικός *Germanischer Lloyd (GL)*, ο ιαπωνικός *Nippon Kaiji Kyokai (NK)*. Λόγω των κινδύνων που εγκυμονούν οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις σε ότι αφορά την ασφάλεια των ανθρώπων, πέρα των προτύπων, εθνικοί φορείς εκδίδουν κανονισμούς οι οποίοι θεσμοθετούνται, δηλαδή είναι νόμοι ή υπουργικές αποφάσεις και η εφαρμογή τους είναι υποχρεωτική. Κατ' έλαχιστον πρέπει να συμμορφώνονται με τη διεθνή σύμβαση **SOLAS** η οποία είναι η σημαντικότερη από όλες τις διεθνείς συνθήκες σε ότι αφορά την ασφάλεια στα εμπορικά πλοία και θέτει τις ελάχιστες απαιτούμενες προδιαγραφές ασφαλείας για την κατασκευή, τον εξοπλισμό και τη λειτουργία του πλοίου.

Η σειρά προτύπων **IEC 60092** (τεχνική επιτροπή IEC-TC18), περιγράφει τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των πλοίων, από τον αρχικό σχεδιασμό του δικτύου, ως την επιλογή του εξοπλισμού. Το αντίστοιχο πρότυπο για τα εμπορικά πλοία στις Η.Π.Α. είναι το IEEE Std.45. Ο ABS υιοθετεί και τα δύο πρότυπα τα οποία αποτελούν μέρη των κανονισμών του (ABS RULES Pt4/Ch.8). Ένα μικρό μέρος του προτύπου Std.45-2002 που αφορά βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος ισχύος θα παρουσιαστεί σε επόμενη παράγραφο.

60092	101	Electrical design and definitions
	201	System design-General
	202	System design-Protection
	301	Eqp. Generators& Motors
	302	LV Switchgear & controlgear assemblies
	303	Transformers for power & lighting
	305	Accumulator (storage) batteries
	350	LV shipboard Power cables-General
	351-359	...cables insulation, installation, etc...
	401	Installation & test of completed installation
	502	Tankers-special features

Πιν. 1.1 Ενδεικτικά μέρη προτύπου IEC 60092

1.3 Στοιχεία ηλεκτρικής εγκατάστασης, εισαγωγή

Ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου, αποτελείται από τις συσκευές και τον εξοπλισμό παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και από τους διάφορους καταναλωτές. Τα κύρια στοιχεία που το απαρτίζουν είναι τα ακόλουθα:

- πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Συχνά αποτελούνται από τρεις ηλεκτρογεννήτριες (diesel generators) από τις οποίες συνήθως η μια είναι σε εφεδρεία.
- κύριος πίνακας (main switchboard) μαζί με τις διατάξεις προστασίας, τους διακόπτες, τα όργανα ελέγχου και τους κύριους ζυγούς διανομής.
- πίνακας ανάγκης (emergency switchboard) που καλύπτει μόνο κρίσιμα φορτία.
- καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- ηλεκτρικοί καταναλωτές που ενδέχεται να είναι και μεγάλοι κινητήρες, συγκρίσιμης ονομαστικής ισχύος προς αυτή των γεννητριών όπως π.χ κινητήρες ελιγμών, αντλιών έρματος κ.τ.λ

Στις επόμενες ενότητες θα αναπτυχθούν λεπτομερέστερα τα χαρακτηριστικά των κύριων στοιχείων του συστήματος και κατά το δυνατόν η φιλοσοφία της αρχιτεκτονικής του.

1.3.1 Διαφορές σε σχέση με τα ηπειρωτικά συστήματα ^[9]

Το ηλεκτρικό σύστημα ενός πλοίου είναι ένα απομονωμένο, αυτόνομο, μικρής κλίμακας βιομηχανικού τύπου σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Σε αναλογία με τα ηπειρωτικά ΣΗΕ, θα μπορούσε να ειπωθεί πως είναι ένα μη διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο που λειτουργεί ως αυτορρυθμιζόμενη νησίδα (unmeshed, islanded microgrid). Παρ' όλα αυτά υπάρχουν αρκετές διαφορές, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

- πρόκειται για συγκεντρωμένα δίκτυα με διακεκριμένα συστήματα παραγωγής και κατανάλωσης, συγκεντρωμένα σε πολύ μικρό χώρο ανά μονάδα ισχύος .
- το όλο σύστημα είναι εξαιρετικά αυτόνομο και η μόνη εφεδρική πηγή ενέργειας είναι το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ανάγκης το οποίο όμως είναι ικανό να τροφοδοτήσει ορισμένα μόνο φορτία ανάγκης. Γι' αυτό το λόγο, όλο το σύστημα πρέπει να είναι εξαιρετικά αξιόπιστο.
- το δίκτυο γείωσης του είναι συνήθως αγείωτο (IT).
- η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω συστήματος διανομής (καλωδιώσεις, μετασχηματιστές, διακόπτες) πολύ περιορισμένου μήκους (έως το πολύ 1000 μέτρων).
- σε αντίθεση με τα συστήματα ξηράς, αποτελούνται από υποσυστήματα συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) και εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ), στο οποίο μάλιστα μπορεί κανείς ενίοτε να διακρίνει περισσότερες από μία συχνότητες λειτουργίες (50 ή 60 Hz, αλλά και αυτή των 400 Hz για εξειδικευμένου τύπου καταναλωτές, όπως όργανα ναυσιπλοΐας, ραντάρ κλπ).

1.3.2 Κύρια χαρακτηριστικά δικτύου διανομής

Η συντριπτική πλειοψηφία των πλοίων έχουν δίκτυο διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος (Ε.Ρ.) που προτιμάται σε σχέση με το δίκτυο συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.) για τον λόγο ότι είναι φθηνότερο κατά την εγκατάσταση και κατά τη λειτουργία του σε σχέση με αυτό του Σ.Ρ. . Συγκεκριμένα, προσφέρει μεγαλύτερο λόγο ισχύος/βάρους για την παραγωγή, διανομή και χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον η συντήρησή του είναι ευκολότερη. Μειονέκτημα αποτελεί ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας καθώς το δίκτυο Ε.Ρ. γίνεται επικίνδυνο για τάσεις μεγαλύτερες από 60V ενώ το δίκτυο Σ.Ρ. μπορεί και σε τάση των 220V να μην προκαλεί θανατηφόρο ηλεκτροπληξία. Για βιομηχανικές εγκαταστάσεις (όπως είναι αυτή του πλοίου), όπου τα περισσότερα φορτία είναι επαγωγικοί κινητήρες, το κύριο σύστημα Ε.Ρ. είναι σχεδόν πάντα τριφασικό καθώς μας δίνει τα εξής πλεονεκτήματα έναντι του μονοφασικού:

- δυνατότητα χρήσης δύο τάσεων, πολικής και φασικής
- δημιουργία περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και δυνατότητα χρήσης των τριφασικών επαγωγικών κινητήρων οι οποίοι είναι πιο απλοί στην κατασκευή, πιο μικροί, πιο φθηνοί και με υψηλότερο βαθμό απόδοσης από τους μονοφασικούς.
- η ισχύς που μεταφέρεται στο φορτίο είναι πιο ομαλή (συμμετρική).

1.3.3 Τοπολογία δικτύου/συστήματα διανομής

Συνήθως το δίκτυο διανομής είναι **ακτινικό** (radial distribution). Η κεντρική τροφοδοσία (κύριος πίνακας), από την οποία διέρχεται το σύνολο της ισχύος, διοχετεύει στους υπόλοιπους κλάδους (branches) του συστήματος την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ. Η κατεύθυνση του ρεύματος είναι μονόπλευρη και πραγματοποιείται μόνο από τον κύριο ζυγό στους κλάδους οι οποίοι δε σχηματίζουν βρόχους αλλά διαδίδονται ακτινικά προς τα υπόλοιπα σημεία του δικτύου. Κάθε φορτίο εξυπηρετείται απευθείας ή μέσω υποπινάκων διανομής από τον κύριο πίνακα. Ως σχεδίαση υπερτερεί οικονομικά σε σχέση με άλλες πολλαπλών διαδρομών (loop) και ο τρόπος υλοποίησης της στα πλοία (δύο κύριοι πίνακες, διπλά φορτία, δυνατότητα τροφοδότησης φορτίων από οποιοδήποτε πίνακα, γεννήτρια έκτακτης ανάγκης με ξεχωριστό πίνακα), προσφέρει πολύ ικανοποιητικό βαθμό εφεδρείας.

Για δίκτυα E.P. τα παρακάτω συστήματα διανομής επιτρέπονται από τους νηογνώμονες ^[6].

- τριφασικό, τριών αγωγών με υψηλής αντίστασης γείωση ουδέτερου
- τριφασικό, τριών αγωγών με χαμηλής αντίστασης γείωση ουδέτερου
- τριφασικό, τριών αγωγών με τον ουδέτερο μονωμένο (αγείωτο)
- τριφασικό, τριών αγωγών με απευθείας γείωση του ουδέτερου στη γάστρα του πλοίου

Επίσης για τάσεις μέχρι και 500V:

- τριφασικό, τεσσάρων αγωγών με τον ουδέτερο γειωμένο αλλά χωρίς επιστροφή μέσω της γάστρας
- μονοφασικό, δύο αγωγών με τον ουδέτερο μονωμένο
- μονοφασικό, δύο αγωγών με τον ουδέτερο γειωμένο στην πηγή αλλά χωρίς επιστροφή.

1.3.3.1 Γείωση λειτουργίας ^{[8],[12]}

Η πλειονότητα των συμβατικών εμπορικών, φορτηγών πλοίων έχουν **τριφασικό, 3 αγωγών, αγείωτο** σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι η γάστρα του πλοίου που αντιπροσωπεύει τη “γη”, δε συνδέεται με το ουδέτερο σημείο της συνδεσμολογίας αστέρα των τυλιγμάτων των γεννητριών (άπειρη τιμή σύνθετης αντίστασης). Ο λόγος που γενικά προτιμάται το IT σύστημα έχει να κάνει με την ασφάλεια του πληρώματος αλλά και του εξοπλισμού διότι σε περίπτωση ενός μονοφασικού σφάλματος (η πιο συχνά συναντώμενη περίπτωση), η παροχή ηλεκτρικής ισχύος στον εξοπλισμό (αν και μεταβάλλεται), δεν διακόπτεται, άρα μειώνεται η πιθανότητα να χαθούν κρίσιμα για τη λειτουργία του σκάφους φορτία (πχ. μηχανισμός πηδαλίου) εξαιτίας σφάλματος γείωσης. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν υπάρχει δρόμος επιστροφής για το ρεύμα βραχυκύκλωσης στην πηγή επομένως δεν θα ρέει ρεύμα βραχυκύκλωσης στο δίκτυο (στην πράξη εξαιτίας της χωρητικότητας του συστήματος, ένα ρεύμα διαφυγής, εντάσεως μερικών Ampere, θα εξακολουθήσει να ρέει στο σύστημα).

Ειδικά για τα δεξαμενόπλοια, απαιτείται να λειτουργούν με IT σύστημα ώστε να μειωθούν τα ρεύματα διαφυγής στο ελάχιστο καθώς σε περίπτωση γειωμένου συστήματος, θα μπορούσαν να περνούν, μέσω της γάστρας, σε περιοχές υψηλού κινδύνου και να προκληθούν πυρκαγιές λόγω του εύφλεκτου φορτίου τους. Το σύστημα ισχύος συνεχίζει τη λειτουργία του μέχρι να καταστεί δυνατό να αποσυνδεθούν και να επισκευαστούν τα σημεία που εμφάνισαν το σφάλμα. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου γείωσης είναι ότι χρειάζονται υψηλά επίπεδα μόνωσης (και συνεχής παρακολούθηση της), υπάρχει το ενδεχόμενο υψηλών υπερτάσεων (high overvoltages) εξαιτίας του συντονισμού (resonance) στο κύκλωμα βραχυκύκλωσης κι ότι υπάρχει δυσκολία να εντοπιστεί ο κλάδος στον οποίο συνέβη το σφάλμα. Είναι σημαντικό να εντοπιστεί και εκκαθαριστεί το σφάλμα σε εύλογο χρονικό διάστημα διότι σε περίπτωση και δεύτερου σφάλματος, η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης μπορεί να υπερβεί την τιμή συμμετρικού τριφασικού σφάλματος για την οποία είναι σχεδιασμένος ο εξοπλισμός.

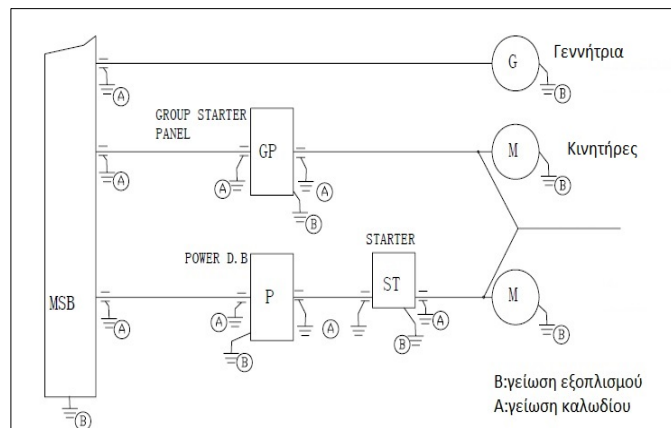
Το σύστημα γείωσης με γειωμένο τον ουδέτερο, με υψηλής αντίστασης αγωγό, είναι αυτό που συναντούμε συχνότερα σε συστήματα μέσης/υψηλής τάσης (άνω των 1000Volt), όπως για παράδειγμα στα ηλεκτροκίνητα δεξαμενόπλοια μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG). Η τιμή του ρεύματος διαφυγής είναι μικρότερη των 20 Ampere. Η λειτουργία του συστήματος ισχύος μπορεί να συνεχιστεί για μικρό χρονικό διάστημα σε περίπτωση ενός σφάλματος, γεγονός που αποτελεί το κυριότερο μειονέκτημα αυτού του συστήματος γείωσης. Πλεονεκτήματα αποτελούν η ευχερής δυνατότητα εντοπισμού και αποσύνδεσης του κλάδου που φέρει το σφάλμα και κυρίως η υψηλότερη ασφάλεια που προσφέρεται στο προσωπικό (σε σχέση με το αγείωτο σύστημα) σε ότι αφορά την προφύλαξη του από επικίνδυνες τάσεις επαφής.

Χαρακτηριστικό	Απευθείας (Συμπαγής)	Χαμηλή αντίσταση	Υψηλή αντίσταση	Αγείωτο
Υψηλό ρεύμα σφάλματος γείωσης	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι
Πιθανότητα διάδοσης σε πολυφασικό σφάλμα	Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή	Χαμηλή
Επίπεδο κινδύνου σχηματισμού τόξου	Υψηλό	Μεσαίο	Πολύ χαμηλό	Πολύ χαμηλό
Σχετικό επίπεδο ασφάλειας	Χαμηλό	Μεσαίο	Πολύ υψηλό	Υψηλό
Μέγεθος πιθανής ζημιάς εξοπλισμού	Υψηλό	Χαμηλό	Πολύ χαμηλό	Πολύ χαμηλό
Ευκολία εντοπισμού τοποθεσίας σφάλματος	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι
Συνέχιση λειτουργίας με πρόβλημα γείωσης	Όχι	Όχι	Για λίγο	Ναι
Επίπεδο μεταβατικής υπέρτασης	2.5 α.μ.	2.5 α.μ.	2.7 α.μ.	6 α.μ.
Δυνατότητα επιλεκτικής διακοπής ρεύματος	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι
Ειδοποίηση χωρίς διακοπή ρεύματος	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι
Επιθυμητό επίπεδο μόνωσης καλωδίων	100%	100%	173%	173%

Πιν. 1.2 Σύγκριση χαρακτηριστικών των διαφορετικών μεθόδων γείωσης λειτουργίας που χρησιμοποιούνται στα πλοία^[12]

1.3.3.2 Γείωση προστασίας

Η πλειοψηφία των σφαλμάτων γίνονται μέσα στον ηλεκτρικό εξοπλισμό, λόγω σφάλματος στη μόνωση, έχοντας σαν αποτέλεσμα την επαφή ενός ρευματοφόρου αγωγού με το μεταλλικό του περίβλημα. Για την προστασία από ηλεκτροπληξία και πυρκαγιά που μπορούν να προκύψουν από σφάλματα γης, τα μεταλλικά περιβλήματα και γενικά όλα τα αγωγά μέρη του ηλεκτρικού εξοπλισμού του πλοίου που δεν διαρρέονται κανονικά από ηλεκτρικό ρεύμα, αλλά μπορούν σε περίπτωση σφάλματος να παρουσιάσουν κάποια τάση επικίνδυνη για τον άνθρωπο, θα πρέπει να γειώνονται στη γάστρα του πλοίου (Σχ. 1.1).



Σχ. 1.1 Γειώσεις προστασίας στο σύστημα ισχύος δεξαμενοπλοίου

Η τελευταία αναθεώρηση αυτού του προτύπου δημοσιεύθηκε το 2002. Χρησιμοποιείται ευρέως για την επιλογή ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, καθώς και για την εγκατάστασή του. Παρακάτω παρατίθενται μερικές επιλεγμένες βασικές απαιτήσεις και οδηγίες του:

1.4 Πρότυπο IEEE Standard-45^{[3],[5]}

Η τελευταία αναθεώρηση αυτού του προτύπου δημοσιεύθηκε το 2002. Χρησιμοποιείται ευρέως για την επιλογή ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, καθώς και για την εγκατάστασή του. Παρακάτω παρατίθενται μερικές επιλεγμένες βασικές απαιτήσεις και οδηγίες του:

1.4.1 Πρότυπες Τάσεις (Standard Voltages): μία ή περισσότερες πρότυπες τάσεις χρησιμοποιούνται στο πλοίο, ανάλογα το μέγεθος της ηλεκτρικής εγκατάστασης. Ο πρώτος αριθμός αντιπροσωπεύει την τάση παραγωγής (generation voltage) ενώ ο δεύτερος, στην παρένθεση, την τάση εκμετάλλευσης (utilization voltage). Η διαφορά αυτών των δύο έγκειται στην αναπόφευκτη πτώση τάσης στο δίκτυο διανομής, κυρίως στους μετασχηματιστές και τα καλώδια ανάμεσα στις γεννήτριες και τα φορτία.

Αυτές οι τάσεις είναι: 120 (115), 208 (200), 230 (220), 240 (230), 380 (350), 450 (440), 480 (460), 600 (575), 690 (600), 2400 (2300), 3300 (3150), 4160 (4000), 6600 (6000), 11000 (10600), 13800 (13460).

//Τα συμβατικά εμπορικά φορτηγά πλοία λειτουργούν συνήθως σε τάση 440V ενώ πλοία με μεγάλα ηλεκτρικά φορτία έχουν γεννήτριες που λειτουργούν σε τάσεις των 3.3 kV, 6.6 kV ακόμη και 11 kV. Τέτοιες τάσεις είναι οικονομικά αναγκαίες σε συστήματα υψηλής ισχύος για τη μείωση της έντασης του ρεύματος, και επομένως τη μείωση των απωλειών στη διανομή καθώς και τη μείωση του μεγέθους του απαιτούμενου εξοπλισμού. Ο φωτισμός και οι μονοφασικοί καταναλωτές μικρής ισχύος λειτουργούν στη τάση των 220 V ή 110 V. Οι τάσεις αυτές λαμβάνονται από απλούς μετασχηματιστές υποβιβασμού τάσεως που συνδέονται στο πρωτεύον σύστημα.//

1.4.2 Πρότυπες συχνότητες (Standard frequencies): 60Hz για τις Η.Π.Α., 50Hz για την Ευρώπη και είτε 50 ή 60Hz στις υπόλοιπες χώρες, εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων.

1.4.3 Αποκλίσεις Τάσης (Voltage Deviations): οι αποκλίσεις σε μόνιμη κατάσταση (steady state) πρέπει να είναι μικρότερες του +5% και -6% με -10% για τάση εκμετάλλευσης 460V και ±3% για τάση 120V. Για μεταβατική τάση, η απόκλιση αυτή (transient voltage deviation), πρέπει να είναι μικρότερη από -15% και +20%. Γίνεται φανερό λοιπόν ότι οι απαιτούμενες αποκλίσεις τάσης που θα πρέπει να ικανοποιούνται, εξαρτώνται από το κατά πόσο έχουν παρέλθει τα διάφορα μεταβατικά φαινόμενα καθώς και από την ονομαστική τάση του δικτύου.

1.4.4 Αρμονική Παραμόρφωση (Harmonic Distortion): δεν καθορίζεται συγκεκριμένο όριο στην ολική αρμονική παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion, THD), ένα γενικά αποδεκτό όριο είναι η τιμή της να είναι μικρότερη του 5% για την τάση και μικρότερη του 15% για το ρεύμα. Το όριο του THD είναι πιο αυστηρό στη περίπτωση της τάσης γιατί η τάση αποτελεί 'συστημικό χαρακτηριστικό' -την ίδια τάση 'βλέπουν' οι συνδεδεμένοι καταναλωτές, για παράδειγμα, στον 440V κύριο ζυγό- ενώ το ρεύμα αποτελεί ειδικό χαρακτηριστικό του κάθε φορτίου.

//Οι δύο παραπάνω έννοιες αναλύονται στο κεφάλαιο της ποιότητας ισχύος.//

1.4.5 Ρεύμα σφάλματος (Fault current): το πιθανό μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης πρέπει να προσδιορίζεται από τη συνολική συνεισφορά των γεννητριών οι οποίες λειτουργούν παράλληλα και τον μέγιστο αριθμό των κινητήρων που βρίσκονται σε λειτουργία (με λίγα λόγια, υπολογίζεται για την πιο ενεργοβόρα κατάσταση λειτουργίας, max kW operating profile). Βασίζεται στην συνολική σύνθετη αντίσταση (impedance) του κυκλώματος, συμπεριλαμβανομένου και της υπομεταβατικής αντίδρασης διαμήκους άξονα της γεννήτριας (direct-axis subtransient reactance). Το πρότυπο 45 ορίζει έναν πρακτικό τρόπο υπολογισμού της μέσης και της μέγιστης τιμής rms του ασύμμετρου ρεύματος σφάλματος για την ημιπερίοδο ακριβώς μετά την έναρξη του βραχυκυκλώματος (T/2). Το μέσο ασύμμετρο rms σφάλμα (average asymmetrical rms fault), ισούται με 8.5 φορές το ονομαστικό ρεύμα των γεννητριών συν 3.5 φορές το ονομαστικό ρεύμα των κινητήρων που βρίσκονται σε λειτουργία. Η τιμή που προκύπτει, χρησιμεύει ώστε να κάνουμε την διαστασιολόγηση του προστατευτικού εξοπλισμού (circuit breakers) και για τη θερμική σχεδίαση τόσο των διακοπών όσο και των ζυγών. Το μέγιστο ασύμμετρο rms σφάλμα (max/peak asymmetrical rms fault), την ίδια χρονική στιγμή (T/2), ισούται με 10 φορές το ονομαστικό ρεύμα των γεννητριών συν 4 φορές το ονομαστικό ρεύμα των κινητήρων που βρίσκονται σε λειτουργία. Η τιμή που προκύπτει χρησιμοποιείται ώστε να προσδιοριστεί η μέγιστη δύναμη που ασκείται στα κατασκευαστικά στοιχεία (structural parts) τα οποία καλούνται να μην αστοχήσουν κάτω από τις καμπτικές τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται ανάμεσα στις στηρίξεις. Συνοπτικά:

$$I_{Peak\,asym.} = 10FLA_{GENS} + 4FLA_{MOTORS}, \quad I_{mean\,asym.} = 8.5FLA_{GENS} + 3.5FLA_{MOTORS} \quad (1.1)$$

όπου FLA είναι το ρεύμα σε πλήρες φορτίο (Full Load Amps). Αυτή η μέθοδος υπολογισμού είναι χρήσιμη για την προμελέτη του συστήματος των ασφαλιστικών διατάξεων αφού είναι εξαιρετικά απλή και γρήγορη, επειδή όμως οδηγεί σε υπερδιαστασιολόγηση διακοπών και δε λαμβάνει υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά των υποσυστημάτων του δικτύου συνίσταται

να αντικαθίσταται με μια πιο ολοκληρωμένη μέθοδο σε επόμενα στάδια της μελέτης, όπως για παράδειγμα τη μέθοδο που προτείνει το πρότυπο IEC 61363 (θα αναλυθεί στη συνέχεια).

1.4.6 Προστασία κυκλώματος (Circuit protection): οι ασφάλειες (fuses) συνήθως χρησιμοποιούνται σε συστήματα τάσης έως 690V, για υψηλότερης τάσης συστήματα χρησιμοποιούνται στα αντίστοιχα σημεία του κυκλώματος διακόπτες. Χωρίς βέβαια αυτό να αποτελεί τον κανόνα καθώς πολλές φορές ,επειδή-λόγω της φύσης τους- οι ασφάλειες καταστρέφονται και χρειάζονται αντικατάσταση, για λόγους ευκολίας συντήρησης προτιμώνται οι διακόπτες.

1.4.7 Ηλεκτρονόμος αναστροφής ισχύος (Reversed power relay): σε κάθε παράλληλα συνδεδεμένη γεννήτρια πρέπει να υπάρχει διακόπτης αναστροφής ισχύος ώστε να αποκλειστεί η πιθανότητα να ‘τραβήξει’ ρεύμα, λειτουργώντας ως κινητήρας (motoring) και υπερφορτώνοντας με αυτό τον τρόπο τις άλλες γεννήτριες.

1.4.8 Λήψη ρεύματος από τη ξηρά (Shore connection/Cold Ironing): η θύρα για την λήψη ρεύματος από την ξηρά πρέπει να προστατεύεται από ξεχωριστό διακόπτη.

1.4.9 Ζυγοί (Bus Bars): οι ζυγοί πρέπει να διαστασιολογούνται κατάλληλα ώστε να μπορούν να φέρουν το μέγιστο ρεύμα που απαιτείται, με αύξηση θερμοκρασίας μικρότερη των 50°C, και χρειάζεται να είναι μηχανικά ενισχυμένοι ώστε να αντέχουν τη κρουστική δύναμη που επιβάλλεται από το ρεύμα κορυφής (peak current) της δυσμενέστερης περίπτωσης σφάλματος.

1.4.10 Θερμοκρασίες λειτουργίας και περιβάλλοντος (Operating and ambient temperatures): ο ηλεκτρικός εξοπλισμός γενικά σχεδιάζεται για με βιομηχανικές προδιαγραφές για λειτουργία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C. Στο πλοίο, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου, διαφέρει από διαμέρισμα σε διαμέρισμα, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Περιοχή (διαμέρισμα) *σχετική υγρασία μέχρι 95%	Θερμοκρασία Περιβάλλοντος °C
Χώροι Ενδιαίτησης	40
Μηχανοστάσιο (γενικά)	45
Χώροι με σημαντικές πηγές θερμότητας	50
Εξαγωγή των παραπάνω χώρων	65

Πίνακας 1.1 Θερμοκρασία περιβάλλοντος χώρου ανά περιοχή

Όπου χρειαστεί, πρέπει να μειωθεί η ονομαστική ισχύς του εξοπλισμού, κατάλληλα (διαδικασία de-rating). Για παράδειγμα, ένα μοτέρ που είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί με αύξηση θερμοκρασίας στα τυλίγματά του κατά 80°C, από την θερμοκρασία περιβάλλοντος (έστω 40°C), θα έχει τελική θερμοκρασία σχεδίασης στα τυλίγματά του 80°C +40°C =120°C, άρα η μόνωσή του θα πρέπει να είναι της τάξεως των 130°C (κλάση B). Αν τώρα ο ίδιος κινητήρας πρέπει να λειτουργήσει σε χώρο με μεγαλύτερη θερμοκρασία περιβάλλοντος, έστω στο λεβητοστάσιο (με θερμοκρασία περιβάλλοντος 65°C), η αύξηση της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων του πρέπει να περιοριστεί στους 55°C, ώστε η

θερμοκρασία λειτουργίας να μην ξεπεράσει την θερμοκρασία σχεδίασης. Αυτό μπορεί να γίνει με de-rating του κινητήρα.

1.4.11 Κλάσεις μόνωσης (insulation class):

τα τυλίγματα των στρεφόμενων μηχανών (κινητήρες, γεννήτριες), των μετασχηματιστών και των λοιπών κυκλωμάτων κατασκευάζονται με μονώσεις που μπορούν να αντέξουν μόνο μέχρι μια οριακή θερμοκρασία. Τα συστήματα μόνωσης είναι ταξινομημένα σε κλάσεις όπως δείχνει ο πίνακας. Κάθε κλάση έχει τα χαρακτηριστικά της μέγιστης συνεχώς επιτρεπόμενης θερμοκρασίας. Συνεχής υπέρβαση αυτής κατά 10°C μπορεί να επιφέρει μείωση της διάρκειας ζωής ακόμα και κατά 50%.

Insulation class (κλάση μόνωσης)	Maximum temperature °C
A	105
B	130
E	75
F	155
H	180
220	220

Πιν. 1.3 Κλάσεις μόνωσης στρεφόμενων μηχανών

1.4.12 Μετασχηματιστές ελαίου και διακόπτες (Oil-filled transformer and circuit breaker):

ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στο πλοίο πρέπει να αντέχει σε γωνίες διατοιχισμού (rolling) και προνευτασμού (pitching) υπό στατικές ή δυναμικές συνθήκες μέχρι 5° και 15° αντίστοιχα για τον εξοπλισμό που δε τροφοδοτείται από το ζυγό έκτακτης ανάγκης, μέχρι 10° και 25° αντίστοιχα για τον εξοπλισμό που τροφοδοτείται από τον ζυγό έκτακτης ανάγκης και έως 45° για τον κύριο πίνακα. Επίσης απαιτείται να αντέχει επιταχύνσεις 0.6 g για διάρκεια έως και 10 δευτερολέπτων. Εξοπλισμός όπως μετασχηματιστές ελαίου, διακόπτες ελαίου, δε μπορούν να ικανοποιήσουν τις παραπάνω απαιτήσεις και συνήθως δε χρησιμοποιούνται στα πλοία (υπάρχει αυξημένος κίνδυνος πυρκαγιάς εφόσον επέλθει ρήξη του περιβλήματος του ελαίου).

	διατοιχισμός (Roll)		προνευτασμός (Pitch)	
	στατικός (°)	δυναμικός (°)	στατικός (°)	δυναμικός (°)
Ηλεκτρικός εξοπλισμός πλοίου	15	22.5	5	7.5
Εξοπλισμός ανάγκης (Emergency eqp.)	22.5	22.5	10	10
Switchgear	45	45	45	45

Πιν. 1.4 Απαιτήσεις λειτουργίας ηλεκτρικού εξοπλισμού για διατοιχισμό και προνευτασμό

1.4.13 Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Electromagnetic Interference): για να αποφευχθούν οι ακτινοβολούσες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς, ο κύριος πίνακας και ο ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης (σε περίπτωση ηλεκτροπρόωσης) εγκαθίστανται σε διαφορετικά διαμερίσματα από τον πίνακα για τις βοηθητικές υπηρεσίες του πλοίου και την κονσόλα ελέγχου (control console). Ειδική προσοχή χρειάζεται η καλωδίωση των κινητήρων ηλεκτρικής πρόωσης εξαιτίας των αρμονικών παραμορφώσεων και των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που προκαλούνται από το φαινόμενο corona κατά τη διανομή σε συστήματα υψηλής τάσης. Τα καλώδια αυτά δρομολογούνται ξεχωριστά από τα καλώδια του υπόλοιπου συστήματος με τουλάχιστον 60 cm απόσταση μεταξύ των δύο γκρουπ.

1.4.14 Έλεγχος αντοχής μόνωσης σε υψηλή τάση (High-voltage insulation withstand test): η μόνωση του τυλίγματος όταν είναι καινούργια ή ανακατασκευασμένη πρέπει να είναι σχεδιασμένη ώστε να αντέχει τάση περίπου 4 φορές υψηλότερη της ονομαστικής (με ελάχιστη τα 1500V), στα 60Hz, για ένα λεπτό όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Για τον έλεγχο της μόνωσης του τυλίγματος σε σχέση με τη γείωση, τα δύο άκρα του τυλίγματος βραχυκυκλώνονται και συνδέονται με την υπό έλεγχο γεννήτρια ώστε η τάση όλου του τυλίγματος να αυξηθεί σε σχέση με τη γείωση, για χρονική διάρκεια ενός λεπτού. Το ρεύμα που θα απορροφηθεί από τη γεννήτρια πρέπει να είναι μικρής τιμής.

Ονομαστική τάση εξοπλισμού Vrms	Εφαρμοζόμενη τάση στα 60Hz για 1 λεπτό
Μέχρι 120V	1500V
121-600V	2200V
601-1200V	5000V
1201-2400V	15000V
2401-4760V	19000V

Πιν. 1.5 Όρια ελέγχου αντοχής ηλεκτρικού εξοπλισμού σε υψηλή τάση

1.4.15 Κυκλώματα γύρω από την μαγνητική πυξίδα (Circuits around magnetic compass): προκειμένου να μην επηρεαστεί η απόδοση της μαγνητικής πυξίδας από παρεμβολές, λόγω διαρροής της μαγνητικής ροής της από εξοπλισμό με μαγνητικά υλικά ή μονών αγωγών (καλωδίων), υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές σε ότι αφορά την απόσταση που μπορεί να τοποθετηθεί τέτοιος εξοπλισμός σε σχέση με την μαγνητική πυξίδα. Αυτή η απαίτηση δεν εφαρμόζεται σε καλωδιώσεις πολλαπλών αγωγών που φέρουν εναλλασσόμενο ρεύμα, καθώς σε αυτούς δεν υπάρχει σημαντική διαρροή μαγνητικής ροής εκτός της καλωδίωσης, τέτοια που να μπορεί να επηρεάσει την βελόνα της πυξίδας, ως συνέπεια του φαινομένου ακύρωσης (cancelling effect) των μονοφασικών ή τριφασικών ρευμάτων, όπου το άθροισμα των phasor τους είναι κάθε στιγμή μηδενικό. Επιπροσθέτως, ένα συνεχές χαλύβδινο κατάστρωμα ή μια φρακτή ανάμεσα στην πυξίδα και σε εξοπλισμό υψηλής ισχύος, δρα ως “ασπίδα προστασίας” (magnetic shield) για τις όποιες παρεμβολές, επομένως οι απαιτήσεις ελάχιστης απόστασης, επίσης δεν χρειάζεται να εφαρμοστούν.

Είδος καλωδίωσης ή εξοπλισμός	Ελάχιστη απόσταση από την μαγνητική πυξίδα (m) (σε παρένθεση η ένταση του ρεύματος)
Μονός αγωγός ac ή dc	Δε πρέπει να χρησιμοποιείται
Παράλληλος διπλός αγωγός	0.6m (<1A), 1.5m (<10A), 2.5m (>10A)
Κινητήρες	3.7-4.3m
Ηχεία, τηλέφωνα ,φακοί, μαγνητικά ρελέ κα	1.5-3.7m

Πιν. 1.6 Ελάχιστες αποστάσεις της καλωδίωσης από τη μαγνητική πυξίδα

1.5 **Επικίνδυνες περιοχές (Hazardous locations)**: [6],[11]

Ως περιοχές κινδύνου ορίζονται οι περιοχές στις οποίες μπορεί να προκύψει μια εκρηκτική ατμόσφαιρα σε επικίνδυνη ποσότητα λόγω τοπικών συνθηκών λειτουργίας. Ταξινομούνται σε τρεις ζώνες βάσει της συχνότητας της εμφάνισης και της διάρκειας της ως εξής. Ως ζώνη 0 ορίζεται ο χώρος στον οποίο υπάρχει μόνιμα ή για μεγάλα χρονικά διαστήματα εκρηκτική ατμόσφαιρα αποτελούμενη από μίγμα αερίων εύφλεκτων ουσιών. Ως ζώνη 1 ορίζεται ο χώρος στον οποίο είναι δυνατόν να δημιουργηθεί περιστασιακά εκρηκτική ατμόσφαιρα ενώ ως ζώνη 2 ορίζεται ο χώρος στον οποίο δε θεωρείται δυνατόν να δημιουργηθεί τέτοια ατμόσφαιρα. Σε περιοχές κινδύνου, θα πρέπει να τοποθετούνται καλώδια μόνο για συσκευές των οποίων η χρήση επιτρέπεται σε αυτές τις περιοχές. Όλα τα καλώδια που είναι εκτεθειμένα σε φορτίο, ατμούς πετρελαίου ή αέρια θα πρέπει να είναι θωρακισμένα ή με προστατευτικό στρώμα, και να έχουν ένα γενικά υδατοστεγές και ανθεκτικό στο πετρέλαιο εξωτερικό μανδύα. Γενικά, ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός μη εγκεκριμένου τύπου ασφαλείας θα πρέπει να τοποθετείται έξω από τις περιοχές κινδύνου. Τέτοιος εξοπλισμός μπορεί να τοποθετηθεί σε κλειστούς ή ημίκλειστους χώρους μόνο αν είναι καλά αεριζόμενοι και χωρισμένοι μέσω φρεατίων ή ισοδύναμων διαστημάτων από τις δεξαμενές φορτίου, και μέσω διαφραγμάτων, που παρέχουν στεγανότητα ως προς το πετρέλαιο και τα αέρια, από τα φρεάτια και το αντλιοστάσιο. Ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός μη εγκεκριμένου τύπου ασφαλείας μπορεί να εγκατασταθεί μέσα σε περιοχή κινδύνου, εάν ανήκει σε εγγενώς ασφαλές κύκλωμα. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στο πρότυπο IEC 60079.

1.6 **Προστασία του περιβλήματος (Ingress Protection, IP)**

Ο ηλεκτρικός εξοπλισμός πρέπει να έχει το κατάλληλο περίβλημα ανάλογα το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί για την αναγκαία προστασία του. Για παράδειγμα, οι κινητήρες, κατά το πρότυπο **IEC 60034-5** κατατάσσονται σε κατηγορίες **IPXYZW**. Το **X** (0-6) περιγράφει την προστασία από σωματίδια, κινούμενα μέρη, έμβια όντα. Το **Y** (0-8) περιγράφει την προστασία ως προς το νερό. Τα **Z** (A-D) και **W** (H,M,S,W) είναι προαιρετικά και περιγράφουν επιπλέον προσβάσεις σε επικίνδυνα μέρη της μηχανής και επιπλέον καταστάσεις περιβάλλοντος αντίστοιχα. Πια αναλυτικά ο βαθμός προστασίας περιγράφεται στο παράρτημα. Τα εκρηκτικά περιβάλλοντα κατατάσσονται ανάλογα με τη θερμοκρασία ανάφλεξης (T1-T6). Οι κινητήρες κατατάσσονται σε τρεις ομάδες ανάλογα με τη δυνατότητα πρόκλησης σπινθηρισμών. Για το περίβλημα υπάρχει επίσης κατά το πρότυπο IEC 50102, ο κωδικός **IKX**, με **X**(00-10), που περιγράφει την προστασία που προσφέρει αυτό σε εξωτερική μηχανική κρούση. Η παραπάνω κατάταξη σε IP class, Ex-class, IK class

διαδραματίζει πρωτεύοντα ρόλο στην επιλογή των κατάλληλων μονάδων στους διάφορους χώρους του πλοίου, όπως διαχωρίζονται ανάλογα της επικινδυνότητας τους.

1.7 Διαχωρισμός ηλεκτρικού εξοπλισμού σε κατηγορίες ανάλογα την κρισιμότητα [6]

Ο ηλεκτρικός εξοπλισμός του πλοίου διαχωρίζεται σε **ουσιώδη (vital/essential)** εξοπλισμό και **μη ουσιώδη (non vital/ non essential)** εξοπλισμό (βλέπε *παράρτημα 7.2*). Ο ουσιώδης εξοπλισμός είναι αυτός που αφορά τα μηχανήματα κύριας πρόωσης του πλοίου, την κατεύθυνση και πλοήγηση του πλοίου, την διατήρηση της ασφάλειας του πλοίου και τη διατήρηση της ασφάλειας των ανθρώπινων ζωών στη θάλασσα. Ο ουσιώδης εξοπλισμός χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες, σε πρωτεύοντα ουσιώδη και **δευτερεύοντα ουσιώδη (important)**. Ο πρωτεύοντας ουσιώδης αφορά εξοπλισμό που πρέπει να βρίσκεται σε συνεχή και αδιάκοπη λειτουργία (continuous load) (π.χ. μηχανισμός πηδαλίου, αντλίες λίπανσης, αντλίες τροφοδοσίας πετρελαίου κλπ.). Ο δευτερεύοντας ουσιώδης περιλαμβάνει εξοπλισμό που για σύντομο χρονικό διάστημα **δεν** χρειάζεται να είναι σε αδιάκοπη λειτουργία (intermittent load) (π.χ. φυγοκεντρικοί διαχωριστές πετρελαίου, εγκαταστάσεις εκκίνησης των βοηθητικών και κύριων μηχανών, αντλίες θαλασσίου έρματος, αντλίες πυρκαγιάς, βαρούλκα κλπ.). Τέλος, ο μη ουσιώδης εξοπλισμός περιλαμβάνει τα φορτία που δεν περιλαμβάνονται σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες. Ο πρωτεύοντας και ο δευτερεύοντας ουσιώδης εξοπλισμός του πλοίου θα πρέπει να τροφοδοτούνται κατευθείαν από τον κύριο ή έκτακτης ανάγκης πίνακα.

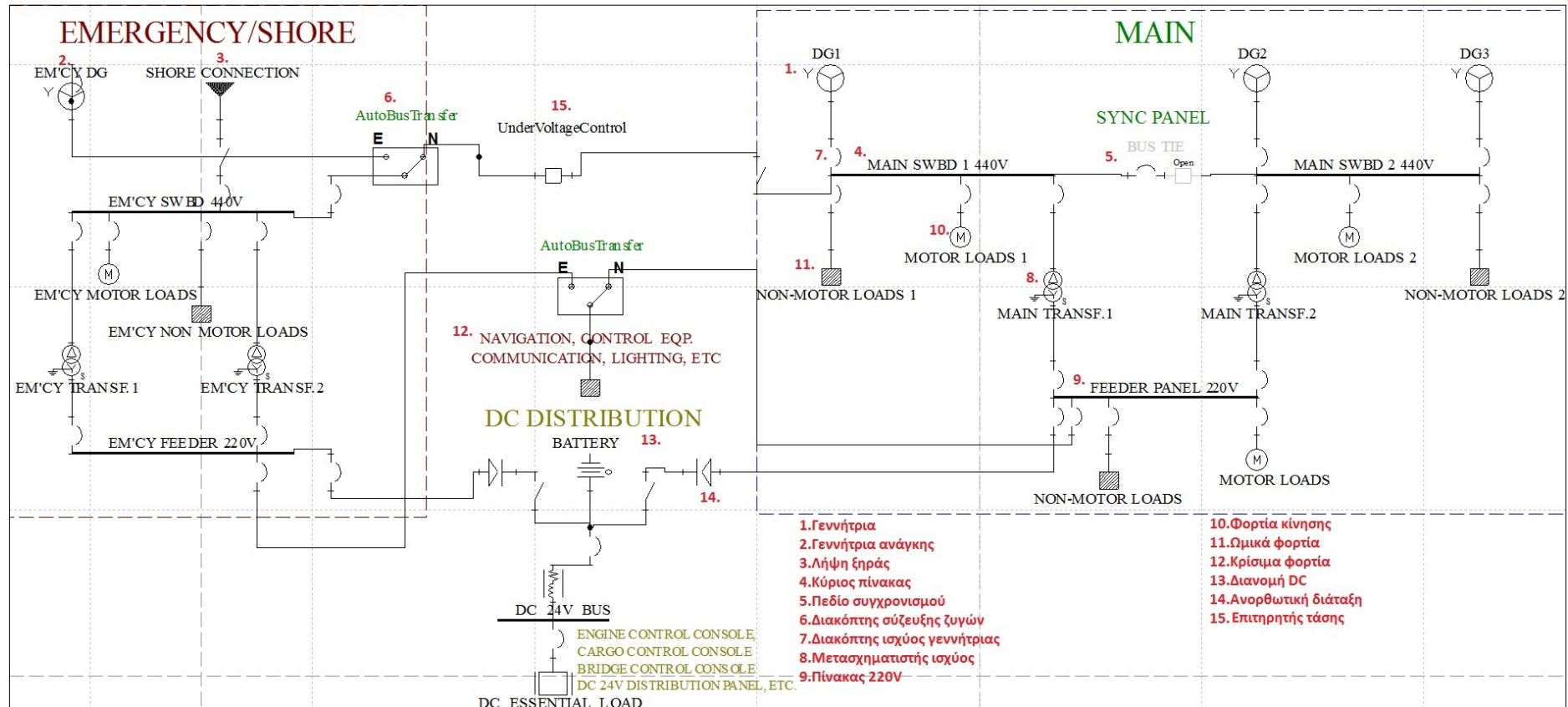
Ο πρωτεύοντας και δευτερεύοντας ουσιώδης εξοπλισμός που προορίζονται για την ίδια λειτουργία θα πρέπει να τροφοδοτούνται από δύο ξεχωριστά καλώδια παροχής από τον κύριο πίνακα ή από δύο ξεχωριστούς υποπίνακες.

1.8 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

1. *Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου (Τόμος Α)*, I. Προυσαλίδης, Χ. Φραγκόπουλος, Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ
2. *Marine control systems*, Asgeir J. Sørensen, Σημειώσεις μαθήματος, NTNU
3. *Shipboard Electrical Power Systems*, Mukund R. Patel, Βιβλίο
4. *Practical marine electrical knowledge*, Dennis Hall, Βιβλίο
5. *IEEE Standard 45-2002*, IEEE, Πρότυπο
6. *Rules of Classification of Ships PART 4 CHAPTER 8*, Det Norske Veritas, Κανονισμοί
7. *Electric power distribution systems ch.320*, navsea, Τεχνικό έγγραφο
8. *Investigating the influence of zero sequence impedance in ship ungrounded electric networks*, J. Prousalidis, Επιστημονικό άρθρο
9. *Ηλεκτροπρωση πλοίων και πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο: προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος*, I. M. Προυσαλίδης, I. K. Χατζηγάου, N. Χατζηαργυρίου, Χ. Φραγκόπουλος, Επιστημονικό άρθρο
10. *A Study of Electric Power Distribution Architectures in*, A. Mohamed, Επιστημονικό άρθρο
11. *Πλήρης ηλεκτρολογική μελέτη ενός πλοίου μεταφοράς φορτίου χύδην, ενός δεξαμενόπλοιου και ενός γενικευμένου τύπου πλοίου*, Θίμο Γ. Αντζέλα, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ
12. *Μέθοδοι γείωσης και αντικεραυνικής προστασίας σε πλοία*, I. Κριμιτζάς, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ

2 Κεφάλαιο : Δομικά στοιχεία συστήματος ισχύος

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα βασικά δομικά στοιχεία του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος των πλοίων που λειτουργούν σε δίκτυο χαμηλής τάσης, όπως άλλωστε ισχύει στα περισσότερα εμπορικά φορτηγά πλοία. Ξεκινώντας από το σύστημα παραγωγής (σύγχρονη γεννήτρια), συνεχίζουμε στο σύστημα διανομής περιγράφοντας όλα τα στοιχεία που το αποτελούν (κύριος πίνακας, Μ/Σ, καλώδια, διακόπτες), για να καταλήξουμε στα φορτία που κατα κύριο λόγο εξυπηρετούνται από επαγωγικούς κινητήρες. Τονίζεται ότι θα μας απασχολήσει **μόνο** το δίκτυο παραγωγής / διανομής **εναλασσομένου ρεύματος** για το **κύριο σύστημα ισχύος**. Το δίκτυο συνεχούς ρεύματος, οι συσσωρευτές, τα δίκτυα αυτοματισμού, φωτισμού κλπ δεν αποτελούν μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχ. 2.1 Σύστημα ηλεκτρικής ισχύος δεξαμενοπλοίου σχεδιασμένο στο SKM Powertools. Διακρίνονται τα κύρια δομικά στοιχεία και η εφεδρεία του συστήματος παραγωγής (3 κύριες ντιζελογεννήτριες με την μία σε κατάσταση stand by, 1 γεννήτρια ανάγκης) του συστήματος διανομής και του συστήματος κατανάλωσης (2 κύριοι πίνακες, automatic bus transfer switches, καταναλωτέςx2). Τα κρίσιμα φορτία (ναυσιπλοΐας, επικοινωνίας κλπ) τροφοδοτούνται με αυτόματο διακόπτη μεταφοράς της ισχύος από το κύριο σύστημα παραγωγής στο emergency.

2.1 Σύγχρονη γεννήτρια (Synchronous Generator) ^{[1],[2],[5],[6],[11]}

Η κύρια πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας στα συμβατικά εμπορικά πλοία είναι το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (**H/Z**). Όπως φανερώνει και ο ίδιος ο όρος, το H/Z αποτελείται από **δύο μέρη**. α) Την κινητήρια μηχανή (**prime mover**) η οποία δίνει μηχανική ισχύ μέσω της περιστροφικής κίνησης του άξονα της και συνήθως είναι μια ντίζελ μεσόστροφη ΜΕΚ. β) Την γεννήτρια η οποία συνήθως είναι τριφασική σύγχρονη γεννήτρια (Σ.Γ.) -ονομάζεται και εναλλακτήρας (**alternator**)- μέσω του φαινομένου της επαγωγής, μετατρέπει την περιστροφική κίνηση, που λαμβάνει μέσω μηχανικής ζεύξης από την κινητήρια μηχανή, σε εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερής τάσης και συχνότητας. Η απαίτηση **σταθερής τάσης** εξασφαλίζεται από μια συσκευή που ονομάζεται αυτόματος ρυθμιστής τάσης (Automatic Voltage Regulator, **AVR**) και επενεργεί στην πλευρά του εναλλακτήρα. Η απαίτηση **σταθερής συχνότητας** εξασφαλίζεται από τον ρυθμιστή στροφών (**governor**) της κινητήριας μηχανής. Η ηλεκτρική ισχύς και το πλήθος των γεννητριών καθορίζεται από τη μελέτη του ηλεκτρικού ισολογισμού, γενική αρχή αποτελεί το να καλύπτεται σε κάθε περίπτωση η δυσμενέστερη απαίτηση σε ηλεκτρική ισχύ και ταυτόχρονα να υπάρχει τέτοια εφεδρεία ώστε με μία γεννήτρια εκτός λειτουργίας να είναι δυνατή η απρόσκοπτη λειτουργία του πλοίου. Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιάσουμε τα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία των Σ.Γ., συγκεκριμένα μια υποκατηγορία αυτών, τις Σ.Γ. άνευ δακτυλίων ολίσθησης (slip rings) και ψηκτρών (brushes) στο σύστημα διέγερσης, με δρομέα έκτυπων πόλων (salient pole). Αυτή η κατηγορία γεννητριών αποτελεί και την πιο διαδεδομένη υλοποίηση τα τελευταία χρόνια στα πλοία.

2.1.1 Κατασκευαστικά Στοιχεία

Η Σ.Γ. αποτελείται, όπως και οι ηλεκτρικοί κινητήρες, από κυρίως **δύο μέρη**. Ένα ακίνητο που λέγεται **στάτης (stator)** και ένα κινητό που λέγεται **δρομέας (rotor)** και βρίσκεται στο εσωτερικό της μηχανής.

2.1.1.1 Στάτης

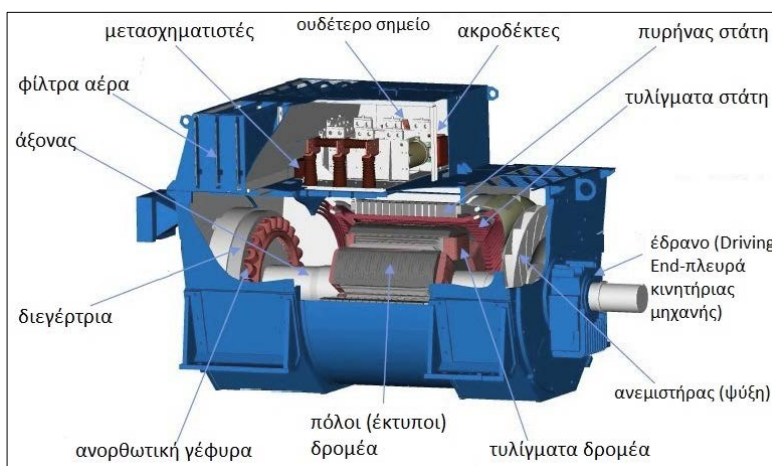
Ο στάτης κατασκευάζεται από ένα κυλινδρικό πυρήνα αποτελούμενο από μονωμένα ελάσματα χάλυβα. Το πάχος των ελασμάτων και ο τύπος του χάλυβα επιλέγονται ώστε να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες δινορρευμάτων και υστέρησης, λαμβάνοντας υπόψιν βεβαίως και το κόστος. Τα ελάσματα αυτά φέρουν αυλάκια στα οποία τοποθετούνται τριφασικά **τυλίγματα** βροχοειδούς τύπου (lap winding), με απόσταση **120°** μεταξύ τους, και αποτελούν το **τύμπανο / οπλισμό (armature)**. Ονομάζεται επίσης *τύλιγμα του επαγωγίμου πεδίου* διότι σε αυτό αναπτύσσεται η τάση εξ'επαγωγής. Οι τρεις φάσεις είναι πάντοτε **συνδεδεμένες** κατά αστέρα (**Y**, wye, star) με τον ουδέτερο γειωμένο γιατί όπως γνωρίζουμε η σύνδεση κατ' αστέρα αντιστοιχεί σε μικρότερη τάση στα τυλίγματα ($1/\sqrt{3}$) από τη σύνδεση τριγώνου, για την ίδια τάση γραμμής (δηλαδή την τάση μεταξύ δύο ακροδεκτών). Αυτό επιτρέπει τη χρήση λιγότερης μόνωσης για την ίδια γεωμετρία αυλακιού, άρα τη δυνατότητα χρησιμοποίησης αγωγών μεγαλύτερης διατομής, άρα ικανότητας μεταφοράς μεγαλύτερης έντασης ρευμάτων επομένως αυξημένη ισχύ για τις ίδιες διαστάσεις στάτη. Ενώ ο στάτης της Σ.Γ. μοιάζει κατασκευαστικά αρκετά με τον στάτη του ηλεκτρικού επαγωγικού κινητήρα, ο δρομέας παρουσιάζει διαφορές.

2.1.1.2 Δρομέας

Ο δρομέας, είναι ένας κυλινδρικός άξονας που περιστρέφεται από την κινητήρια μηχανή. Περιέχει **τύλιγμα** (ονομάζεται και *τύλιγμα πεδίου*) με ειδική διαμόρφωση ώστε να αποτελέσει έναν ηλεκτρομαγνήτη και να αλληλοεπιδράσει κατάλληλα με το τύλιγμα του στάτη. Πιο αναλυτικά, ο δρομέας της Σ.Γ. μπορεί να είναι **κυλινδρικός ή έκτυπων πόλων**. Ο πρώτος χρησιμοποιείται κυρίως για μεγάλη ισχύ αρκετών MVA στα ηπειρωτικά ΣΗΕ και στρέφεται συνήθως από ατμοστρόβιλο. Ο δεύτερος συναντάται πιο συχνά σε Η/Ζ μικρότερης ισχύος όπως του πλοίου. Κάθε πόλος αποτελείται από τον **πυρήνα (core)** και την προέκτασή του που ονομάζεται **πέλμα (shoe)**. Για τον περιορισμό των δινορρευμάτων στα πέλματα, οι πόλοι αποτελούνται από χαλύβδινα ελάσματα μονωμένα στη μία όψη συνδεδεμένα μεταξύ τους με κατάλληλους κοχλίες. Στο πέλμα των πόλων προστίθενται αγωγοί σε σύνδεση κλωβού, όπως στους επαγωγικούς κινητήρες. Οι αγωγοί αυτοί λέγονται **τυλίγματα απόσβεσης (damping/amortisseur windings)** και δε διαρρέονται από ρεύμα στην μόνιμη κατάσταση. Όταν η ταχύτητα του δρομέα μεταβληθεί, διαρρέονται από ρεύμα και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μειώνουν τις ταλαντώσεις του δρομέα. Γύρω από τον πυρήνα, τυλίγονται τα τυλίγματα διέγερσης / τυλίγματα πεδίου (*exciter / field winding*). Αυτά διαρρέονται από συνεχές ρεύμα που παράγεται από τη διεγέρτρια (*exciter*) και συνδέονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζονται διαδοχικά βόρειοι και νότιοι πόλοι. Ο αριθμός των πόλων προφανώς πάντα είναι άρτιος αριθμός και συνήθως είναι μεταξύ 4-10 για γεννήτριες χαμηλής τάσης.

2.1.1.3 Διεγέρτρια

Η διεγέρτρια είναι μια **μικρότερη γεννήτρια** που αποστολή της είναι να παράγει το **συνεχές ρεύμα** που θα διαρρεύσει στο τύλιγμα πεδίου του δρομέα, ώστε να προκύψει ο στρεφόμενος ηλεκτρομαγνήτης. Στις ναυτικές εφαρμογές της Σ.Γ., η διεγέρτρια συνήθως είναι μια τριφασική γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, χωρίς ψήκτρες (*brushless*) και δακτυλίους ολίσθησης. Είναι **προσαρμοσμένη στην ίδια άτρακτο της Σ.Γ.**, εδώ ο δρομέας αποτελεί τον οπλισμό όπου επάγεται το εναλλασσόμενο ρεύμα. Η τριφασική έξοδος της διεγέρτριας ανορθώνεται από έναν τριφασικό ανορθωτή (*rectifier*) που βρίσκεται πάνω στον άξονα της μηχανής και το συνεχές ρεύμα εξόδου του ανορθωτή οδηγείται στο τύλιγμα διέγερσης της κύριας γεννήτριας. Με την παραπάνω διαδικασία μπορεί να ρυθμιστεί το ρεύμα διέγερσης της Σ.Γ. μεταβάλλοντας απλώς το συνεχές ρεύμα διέγερσης της διεγέρτριας, που βρίσκεται πάνω στο στάτη και έχει πολύ μικρότερη τιμή.



Σχ. 2.2 Τα βασικά δομικά στοιχεία του εναλλακτήρα

2.1.2 Αρχή Λειτουργίας ^[1]

Ο δρομέας της Σ.Γ. όταν διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, όπως είπαμε, είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης, επομένως σχηματίζει γύρω του ένα στατικό μαγνητικό πεδίο που η ένταση του εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος διέγερσης. Όταν ο δρομέας αρχίσει να περιστρέφεται με μια γωνιακή ταχύτητα ω , το μαγνητικό πεδίο στρέφεται με την ίδια ταχύτητα, τέμνοντας τα τυλίγματα του οπλισμού και αναπτύσσοντας $HE\Delta E_A$ σε αυτά. Η εξεπαγωγής τάση E_A προφανώς και θα είναι μια συνάρτηση της μαγνητικής ροής Φ που δημιουργεί ο δρομέας που περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω . Άρα είναι μια συνάρτηση της μορφής:

$$E_A = K \cdot \Phi \cdot \omega \quad (2.1)$$

, όπου K μια σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής. Όταν ένας βόρειος πόλος περάσει μπροστά από έναν αγωγό του στάτη, σε αυτόν επάγεται ρεύμα ορισμένης πολικότητας. Όταν μπροστά από τον ίδιο αγωγό περάσει ο νότιος πόλος που ακολουθεί, τότε το ρεύμα αλλάζει πολικότητα. Επομένως όταν ένα ζεύγος πόλων περάσει μπροστά από έναν αγωγό, η τάση του ρεύματος που επάγεται συμπληρώνει έναν πλήρη κύκλο, που αντιστοιχεί σε 360° ηλεκτρικές μοίρες. Αν έχουμε μηχανή με P πόλους, τότε σε μια πλήρη περιστροφή του δρομέα θα έχουμε $P/2$ πλήρεις κύκλους σε κάθε αγωγό (φάση) του στάτη. Επομένως η **ηλεκτρική συχνότητα** του στάτη (που είναι και η ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου) θα είναι:

$$f = \frac{n \cdot P/2}{60} [Hz] \quad (2.2)$$

, όπου n η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε rpm και P ο αριθμός των πόλων. Επειδή η **συχνότητα** που θέλουμε να έχουμε στο δίκτυο για την εύρυθμη λειτουργία του, είναι σταθερή, είτε $50Hz$, είτε (συνηθέστερα) $60Hz$, από την παραπάνω εξίσωση βλέπουμε πως αυτή είναι **συνάρτηση** των ζευγών **πόλων** και της **ταχύτητας** του δρομέα. Ο δρομέας της Σ.Γ. περιστρέφεται με άμεση ζεύξη από τον άξονα μιας ΜΕΚ, επομένως έχει την ίδια ταχύτητα, την ονομαζόμενη **σύγχρονη ταχύτητα** n_s . Επειδή η ΜΕΚ εργάζεται αποδοτικά σε ένα στενό εύρος στροφών, οι πόλοι της γεννήτριας επιλέγονται έτσι ώστε οι στροφές που προκύπτουν να είναι μέσα στο εύρος των στροφών της κινητήριας μηχανής. Η σχέση μεταξύ της μηχανικής ταχύτητας περιστροφής και της κυκλικής συχνότητας του ρεύματος, γράφεται:

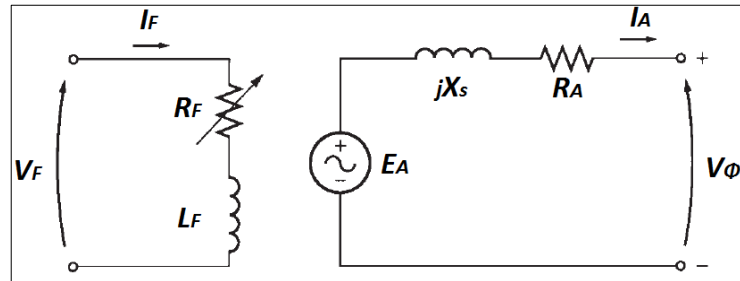
$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \omega_{μηχ} = \frac{2}{P} \omega_{ηλεκ} = \frac{2}{P} 2\pi f \quad (2.3)$$

2.1.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μεγέθη Σ.Γ. [6]

Στην ενότητα αυτή δίνονται με πολύ συνοπτικό τρόπο τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μεγέθη της Σ.Γ. Λεπτομερέστερη περιγραφή μπορεί να βρεθεί στο παράρτημα.

2.1.3.1 Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα

Το μονοφασικό ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα της Σ.Γ. είναι το παρακάτω:



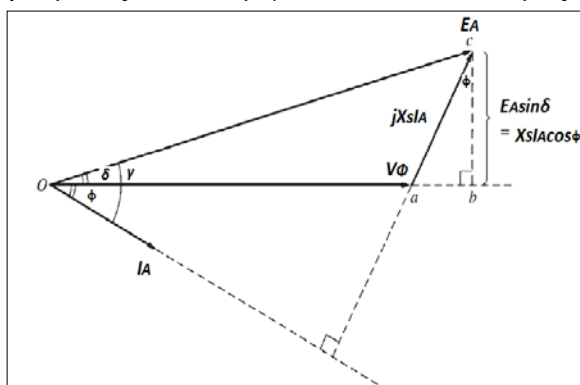
Σχ. 2.3 μονοφασικό ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα Σ.Γ.

Ισχύει:

$$V_{\phi 1} = E_{A1} - I_{A1} \cdot R_A - j \cdot I_{A1} \cdot X_S \quad (2.4)$$

- με:
- $V_{\phi 1}$ τη φασική τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας,
 - E_{A1} την ΗΕΔ (επαγόμενη τάση στο στάτη (οπλισμός)
 - X_S την σύγχρονη αντίδραση οπλισμού
 - R_A την ωμική αντίσταση του στάτη (συνήθως αγνοείται καθώς $R_A \ll X_S$)
 - I_{A1} το ρεύμα οπλισμού
 - V_F η τάση του τυλίγματος διέγερσης (DC)
 - I_F το ρεύμα διέγερσης (ή μαγνήτισης/δρομέα/πεδίου) του τυλίγματος (DC)
 - R_F την ωμική αντίσταση του τυλίγματος διέγερσης σε σειρά με ρυθμιστική αντίσταση που μεταβάλλει το ρεύμα διέγερσης
 - L_F την αυτεπαγωγή του τυλίγματος διέγερσης

Το διάγραμμα που εκφράζει σχέσεις μεταξύ των τάσεων (E_A , V_{ϕ} , $jX_S I_A$, $R_A I_A$) και του ρεύματος I_A , στο μιγαδικό επίπεδο, ονομάζεται διανυσματικό διάγραμμα (phasor diagram).

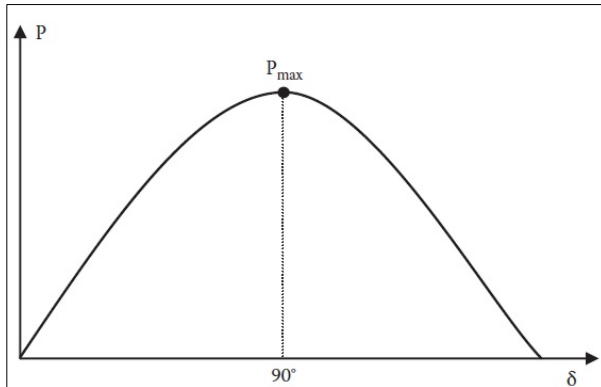


- φ : Η γωνία μεταξύ V_{ϕ} , I_A
- $\cos\varphi$: Ο συντελεστής ισχύος (power factor, PF)
- δ : Η γωνία μεταξύ E_A , V_{ϕ}
(γωνία φόρτισης/ροπής)
- γ : Η γωνία μεταξύ E_A , I_A

2.1.3.2 Ευστάθεια γεννήτριας

Η γωνία δ ονομάζεται γωνία φόρτισης ή γωνία ροπής και προσδιορίζει τη μέγιστη ισχύ που είναι ικανή να προσφέρει η γεννήτρια. Για $\delta=90^\circ$ προκύπτει η μέγιστη ισχύς:

$$P_{MAX} = \frac{3V_\phi E_A}{X_S} \quad (2.5)$$



Αυτή η ισχύς ονομάζεται στατικό όριο ευστάθειας της γεννήτριας. Ευστάθεια έχουμε από $0-90^\circ$. Πέρα από αυτό το όριο τα πεδία του δρομέα και του στάτη δεν ακολουθούν το ένα το άλλο με σταθερό ρυθμό (συγχρονισμένα), η γεννήτρια παύει να λειτουργεί σε σύγχρονη λειτουργία και δε μπορεί να αποδώσει σταθερή ισχύ. Συνήθως στην κανονική λειτουργία το δ παίρνει τιμές μεταξύ 25° και 35° .

2.1.3.3 Ισχύς / Απώλειες ^{[1],[6]}

Ο δρομέας της Σ.Γ. λαμβάνει μηχανική ισχύ από μια ΜΕΚ ίση με:

$$P_{IN} = T_{app} \omega_m \quad (2.6)$$

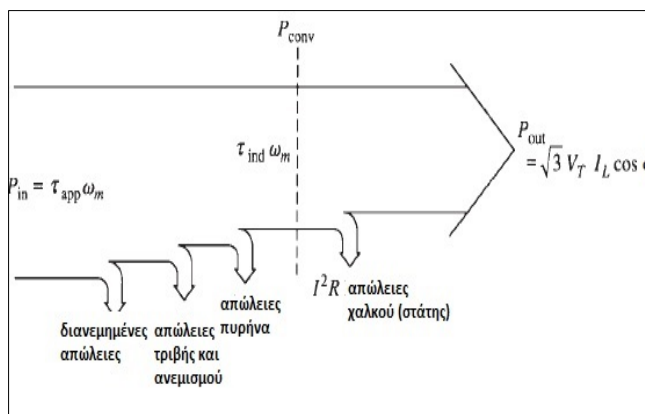
όπου T_{app} η ροπή στον άξονα της ΜΕΚ και ω_m η γωνιακή ταχύτητά του [rad/s].

Η ισχύς που μετατρέπεται σε ηλεκτρική στο εσωτερικό της μηχανής είναι (για τις τρεις φάσεις) ίση με:

$$P_{conv} = T_{ind} \omega_m = 3 E_A I_A \cos \gamma \quad (2.7)$$

όπου T_{ind} η ροπή που αναπτύσσεται λόγω της περιστροφής του μαγνητικού πεδίου.

Η διαφορά, μεταξύ της εισερχόμενης ισχύος στη γεννήτρια και της ισχύος που μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρική, οφείλεται στις απώλειες πυρήνα (ή σιδήρου), τις μηχανικές απώλειες και τις διανεμημένες απώλειες (ή επιπρόσθετες απώλειες φορτίου) της γεννήτριας.



μηχανικές απώλειες:	απώλειες λόγω τριβής στα έδρανα της ατράκτου και απώλειες ανεμισμού, σταθερού μεγέθους απώλειες.
απώλειες πυρήνα:	απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων (μαγνητικές απώλειες)
απώλειες χαλκού:	ωμικές απώλειες τύπου $I^2 R$ (ηλεκτρικές απώλειες)
διανεμημένες απώλειες:	απώλειες δινορρευμάτων στο τύμπανο και στα τυλίγματα απόσβεσης του δρομέα (μαγνητικές απώλειες)

- Ορίζεται ο βαθμός απόδοσης της Σ.Γ. ως:

$$n_{\gamma} = \frac{P_{out}}{P_{in} + P_{exc}} = \frac{\sqrt{3}V_T I_L \cos\varphi}{\tau_{app} \omega_m + I_f^2 R_f} \quad (2.8)$$

όπου: P_{exc} η ισχύς που καταναλώνεται για τη διέγερση (δρομέας)

- Η ενεργός (πραγματική) εξερχόμενη ισχύς ισούται με:

$$P_{OUT} = \sqrt{3}V_T I_L \cos\varphi \quad \text{ή} \quad P_{OUT} = 3V_{\phi} I_A \cos\varphi \quad [Watt] \quad (2.9)$$

,στην πρώτη περίπτωση είναι εκφρασμένη σε πολικά (γραμμής) μεγέθη και στη δεύτερη περίπτωση είναι εκφρασμένη σε φασικά μεγέθη.

- Οι αντίστοιχες σχέσεις για την άεργο ισχύ είναι οι ακόλουθες:

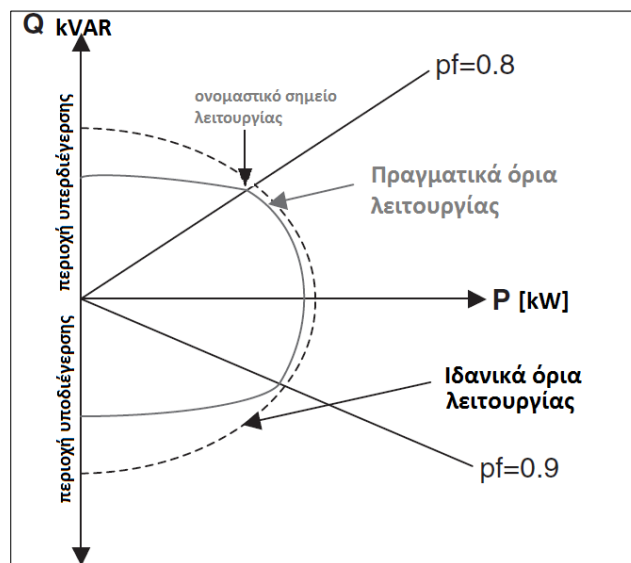
$$Q_{OUT} = \sqrt{3}V_T I_L \sin\varphi \quad \text{ή} \quad Q_{OUT} = 3V_{\phi} I_A \sin\varphi \quad [Var] \quad (2.10)$$

- Η φαινόμενη (συνολική) ισχύς ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των συνιστωσών πραγματικής και άεργης ισχύος και το μέτρο της είναι ίσο με:

$$S_{OUT} = \sqrt{P_{OUT}^2 + Q_{OUT}^2} = 3V_{\phi} I_A \quad [VA] \quad (2.11)$$

2.1.3.4 Διάγραμμα λειτουργίας^[14]

Η ικανότητα παραγωγής πραγματικής και άεργης ισχύος κάθε γεννήτριας, μπορεί να αποδοθεί σε ένα διάγραμμα όπου θα λαμβάνονται υπόψιν τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας όπως οι μέγιστες θερμικές αντοχές των τυλιγμάτων της και η μέγιστη δυνατή αποδιδόμενη ισχύς της ΜΕΚ. Επίσης για λόγους ευστάθειας, συνιστάται ο συντελεστής ισχύος (PF) να περιορίζεται μεταξύ του 0.9 χωρητικού και 0.8 επαγωγικού. Το διάγραμμα που προκύπτει, ονομάζεται διάγραμμα λειτουργίας (capability diagram), έχει τη μορφή του παρακάτω σχήματος και ουσιαστικά μας δίνει τα όρια καλής και ασφαλούς λειτουργίας της γεννήτριας.



Σχ. 2.4 Διάγραμμα λειτουργίας Σ.Γ.

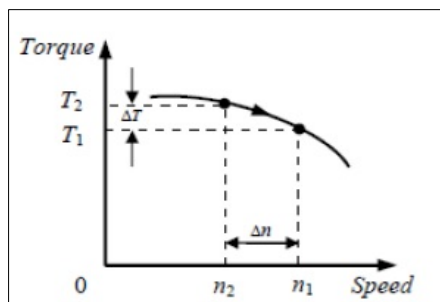
2.1.4 Έλεγχος συχνότητας μέσω ρυθμιστή στροφών (Governor)

Η ΜΕΚ παρέχει, όπως έχουμε πει, την μηχανική ισχύ ($P_{mech} = T_{app} \cdot \omega_{mech}$) στον εναλλακτήρα, προκειμένου να την μετατρέψει σε ηλεκτρική ισχύ. Επειδή μας ενδιαφέρει η συχνότητα του δικτύου να είναι σταθερή (εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα περιστροφής της ΜΕΚ, (2.2)), στην κινητήρια μηχανή παρεμβάλλεται ειδική διάταξη ελέγχου κλειστού βρόχου, που ονομάζεται ρυθμιστής στροφών (speed governor). Ο ρυθμιστής στροφών είναι μια μηχανικό-υδραυλική διάταξη (στις μέρες μας ελέγχεται και από μικροεπεξεργαστή) που επεμβαίνει στο ρυθμό έγχυσης καυσίμου στη ΜΕΚ, αλλάζοντας την ενεργό διαδρομή του εμβόλου της αντλίας πετρελαίου μέσω του κανόνα εγχύσεως καυσίμου (fuel rack). Με χαμηλό ρυθμό έγχυσης καυσίμου η προσδιδόμενη μηχανική ενέργεια από την ΜΕΚ προς τη γεννήτρια είναι χαμηλή και συνεπώς χαμηλή είναι και η ταχύτητα περιστροφής, η συχνότητα και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς. Το αντίθετο συμβαίνει σε υψηλό ρυθμό έγχυσης καυσίμου. Αυτό άλλωστε μπορούμε να το διαπιστώσουμε και από την εξίσωση (2.12):

$$P_{mech} = T_{app} \cdot \omega_{mech} = a \cdot \dot{m}_f \cdot H_u \quad (2.12)$$

, όπου a ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα, H_u η θερμογόνο δύναμη του καυσίμου και \dot{m}_f η παροχή καυσίμου η οποία είναι ανάλογη της θέσεως του κανόνα και των στροφών του κινητήρα.

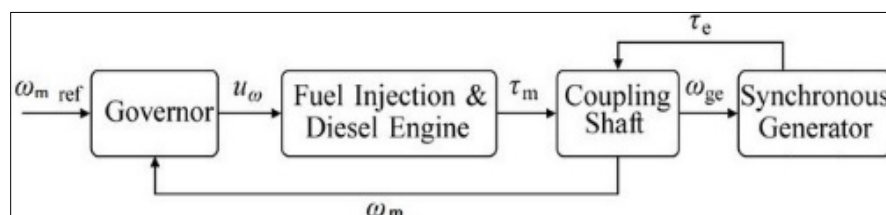
Μια αλλαγή, έστω αύξηση, στο φορτίο (δηλαδή στη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος, $P = 3V_\phi I_A \cos\phi$) προϋποθέτει αύξηση στο επαγόμενο ρεύμα του τυμπάνου I_A , αφού η τάση V_ϕ θέλουμε να είναι σταθερή. Αυτή η αύξηση στο I_A



Σχ. 2.5 Χαρ/κή ροπής-στροφών

μεταβάλλει τη μαγνητική ροή και προκαλεί αύξηση της ανθιστάμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής κατά δT . Όμως από την χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας της μηχανής, που βλέπουμε και στο Σχ. 2.5, αυτό θα προκαλούσε και μείωση της ταχύτητας περιστροφής (άρα και της συχνότητας) της κατά δn . Αυτή η μείωση της ταχύτητας περιστροφής γίνεται αντιληπτή από τον ελεγκτή του governor ο οποίος συγκρίνει την ταχύτητα περιστροφής του άξονα σε σχέση με μια

προκαθορισμένη τιμή. Από τη στιγμή που είναι μικρότερη, μέσω ενός πολύπλοκου μηχανικό-υδραυλικού συστήματος, επενεργεί στην αντλία πετρελαίου και αυξάνει την παροχή καυσίμου έτσι ώστε να αυξηθούν οι στροφές και η ισχύς. Ένα απλουστευτικό διάγραμμα της ροής ελέγχου φαίνεται στο Σχ. 2.6.

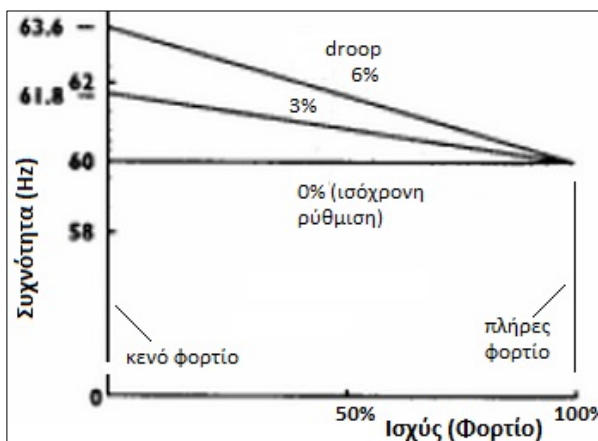


Σχ. 2.6 Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή στροφών

2.1.4.1 Τρόποι ρύθμισης

Δύο είναι τα συνήθη μοντέλα ρυθμιστών στροφών (ή καλύτερα, οι τρόποι ρύθμισης, καθώς συναντώνται ρυθμιστές στροφών που μπορούν λειτουργούν και με τους δύο τρόπους), οι ισόχρονοι (isochronous) ρυθμιστές και οι ρυθμιστές με στατισμό (droop). Ισόχρονοι είναι οι ρυθμιστές εκείνοι που διατηρούν συνεχώς την συχνότητα της Σ.Γ. στην ονομαστική τιμή της. Έχουν το μειονέκτημα ότι δε μπορούν να λειτουργήσουν σε συνεργασία με άλλες μονάδες παραγωγής (παραλληλισμός). Αυτό συμβαίνει διότι κάθε μηχανή με ισόχρονο ρυθμιστή προσπαθεί να σταθεροποιήσει τη δική της συχνότητα, οδηγώντας το δίκτυο σε ταλαντώσεις αποσυγχρονισμού. Οι ρυθμιστές στροφών με στατισμό ελαχιστοποιούν αλλά δεν μηδενίζουν την μεταβολή της συχνότητας για κάθε μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου και είναι κατάλληλοι για παραλληλισμό γεννητριών. Ο στατισμός R ορίζεται ως η κλίση της χαρακτηριστικής φορτίου-συχνότητας:

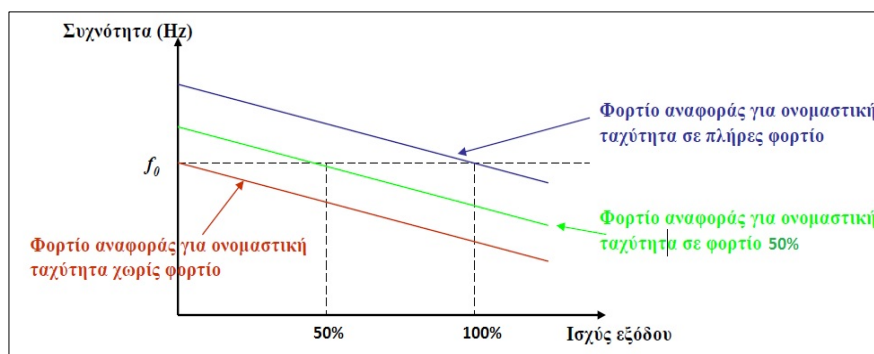
$$R = -\frac{\Delta f}{\Delta P} \text{ ή σε \% ως: } droop\% = \frac{f_{\text{κενού φορτίου}} - f_{\text{πλήρους φορτίου}}}{f_{\text{πλήρους φορτίου}}} \cdot 100 \quad (2.13)$$



Σχ. 2.7 Χαρ/κή φορτίου-συχνότητας (στατισμός)

και εκφράζει το πόσο ευαίσθητη είναι η γεννήτρια σε μεταβολές του φορτίου. Είναι ένα χαρακτηριστικό που καθορίζεται μόνο από τον κατασκευαστή της κινητήριας μηχανής και του ρυθμιστή στροφών. Δεδομένου ότι η κλίση της χαρακτηριστικής είναι σταθερή, μετακίνηση της ευθείας f-P αυτής παράλληλα προς τα πάνω, ισοδυναμεί με αύξηση της έγχυσης καυσίμου στην κινητήρια μηχανή κάτι που οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος και αύξηση της συχνότητας. Αντιθέτως,

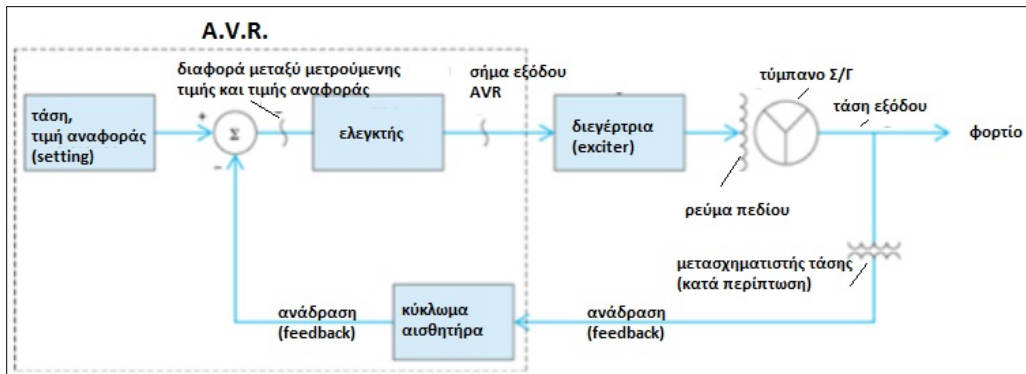
μετακίνηση της ευθείας f-P αυτής παράλληλα προς τα κάτω ισοδυναμεί με μείωση της έγχυσης καυσίμου στην κινητήρια μηχανή κάτι που οδηγεί σε μείωση της παραγόμενης ενεργού ισχύος και μείωση της συχνότητας (Σχ. 2.8). Ελέγχοντας την ηλεκτρική συχνότητα f (ή ισοδύναμα τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής), αποδεικνύεται ότι ρυθμίζεται η παραγόμενη ενεργός ισχύς P της σύγχρονης γεννήτριας, γι' αυτό ο μηχανισμός αυτός καλείται και f-P μηχανισμός.



Σχ. 2.8 Ρύθμιση ισχύος

2.1.5 Έλεγχος τάσης μέσω αυτόματου ρυθμιστή τάσης (Voltage control, AVR)

Το ρεύμα διέγερσης είναι υπεύθυνο για το μέτρο της τάσης των ακροδεκτών, (βλεπε παράρτημα 7.1.1.i). Επειδή ενδιαφέρει η τάση να είναι κατά το δυνατόν σταθερή, στην τροφοδότηση προς το τύλιγμα διέγερσης παρεμβάλλεται μια ειδική διάταξη αυτομάτου ελέγχου, ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης (Automatic Voltage Regulator, AVR). Ελέγχοντας το μέτρο της τάσης, αποδεικνύεται ότι ρυθμίζεται η παραγόμενη άεργος ισχύς της Σ/Γ, για αυτό και ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται και V-Q μηχανισμός. Ο τρόπος λειτουργίας του AVR μπορεί να απεικονιστεί στο παρακάτω απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα (τυπικό παράδειγμα διάταξης αυτόματου ελέγχου κλειστού βρόχου).



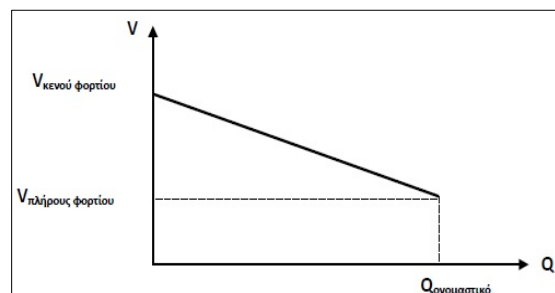
Σχ. 2.9 Μπλοκ διάγραμμα αυτόματου ρυθμιστή τάσης

2.1.5.1 Αρχή λειτουργίας AVR

Ο ρυθμιστής τάσης αντιλαμβάνεται την τάση εξόδου της μηχανής και τη συγκρίνει με μία τάση αναφοράς. Η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής τιμής είναι το σφάλμα του σήματος της τάσης. Στη συνέχεια, ο ελεγκτής, ανάλογα το σφάλμα, δρα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προσεγγίσει/διατηρήσει την επιθυμητή τιμή της τάσης, **επεμβαίνοντας στο σύστημα διέγερσης**.

Αν η μετρούμενη τάση είναι για παράδειγμα χαμηλότερη της ονομαστικής, αυξάνει το ρεύμα διέγερσης και το αντίστροφο. Αύξηση σε ζήτηση άεργης ισχύος μειώνει την τάση ακροδεκτών όπου για μια στενή περιοχή τιμών μπορεί να δοθεί προσεγγιστικά η συσχέτιση των μεγεθών από ένα γραμμικό διάγραμμα της μορφής: Η έννοια του **στατισμού** μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αυτή την περίπτωση, όπως και στον f-P μηχανισμό. Ο χρόνος αντίδρασης του ρυθμιστή τάσης (μηχανισμός V-Q) είναι πολύ πιο γρήγορος από το χρόνο αντίδρασης του ρυθμιστή στροφών (μηχανισμός f-P) γιατί εμπλέκεται μόνο το σύστημα από την πλευρά του εναλλακτήρα σε αντίθεση με τον μηχανισμό f-P που εμπλέκει το ζεύγος κινητήρια μηχανή-εναλλακτήρα (πιο αργή απόκριση λόγω αδρανειακών μαζών).

Το ρεύμα διέγερσης ρυθμίζεται συνήθως να είναι αρκετά μεγάλο έτσι, ώστε η ΗΕΔ E_A να είναι αισθητά μεγαλύτερου μέτρου από την τάση ακροδεκτών V_T . Η κατάσταση αυτή καλείται υπερδιέγερση της σύγχρονης γεννήτριας. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ροή άεργου ισχύος από την γεννήτρια προς το δίκτυο, καλύπτοντας τις ανάγκες όλου του δικτύου σε άεργο ισχύ.

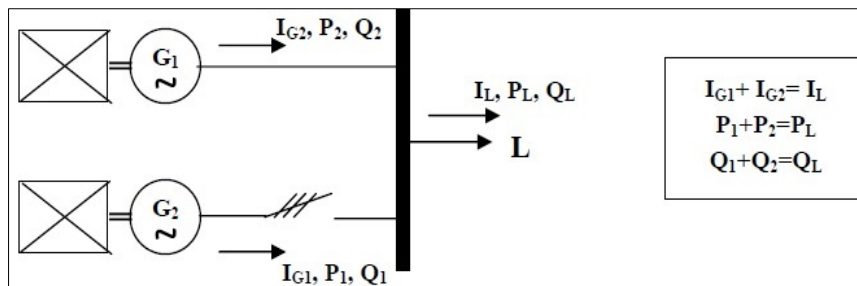


Σχ. 2.10 Χαρ/κή V-Q

2.1.6 Παραλληλισμός γεννητριών ^[3]

Σε καταστάσεις όπου έχουμε αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος είναι δυνατόν δύο ή παραπάνω γεννήτριες να λειτουργήσουν παράλληλα. Αυτό επιβάλλεται για λόγους οικονομίας λειτουργίας και ευελιξίας στον προγραμματισμό συντήρησης ρουτίνας (planned maintenance schedule). Καθώς οι αυξήσεις στα εφαρμοζόμενα φορτία πλησιάζουν το ονομαστικό φορτίο των μηχανών που έχουν ήδη συνδεθεί στο ζυγό και άλλες μηχανές μπορούν να παραλληλιστούν για επιμερισμό του φορτίου. Αντίστοιχα, όταν το φορτίο μειωθεί, οι επιπλέον γεννήτριες βγαίνουν εκτός ζυγού ώστε να επιτρέψουν στις υπόλοιπες συνδεδεμένες γεννήτριες να λειτουργήσουν υπό το βέλτιστο βαθμό απόδοσης. Ένας ακόμα προφανές πλεονέκτημα βεβαίως είναι και η αυξημένη αξιοπιστία της ηλεκτρικής εγκατάστασης λόγω εφεδρείας.

Έστω ένα στοιχειώδες σύστημα, αποτελούμενο από δύο γεννήτριες G1 και G2 με τις κινητήριες μηχανές τους PM1 και PM2, καθώς και ένα φορτίο L, συνδεδεμένα όπως στο Σχ. 2.11.



Σχ. 2.11 Παραλληλισμός γεννητριών

Για να καταστεί δυνατή η παράλληλη σύνδεση της G2 στο ΣΗΕ (G1), με το κλείσιμο του διακόπτη πρέπει να ισχύουν οι κάτωθι προϋποθέσεις:

2.1.6.1 Προϋποθέσεις παραλληλισμού γεννητριών

- Τα μέτρα των τάσεων ΣΗΕ και G2 είναι τα ίδια και για τις τρεις φάσεις.
- Η διαφορά φάσεως των αντίστοιχων τάσεων είναι 0.
- Η συχνότητα είναι η ίδια.
- Η ακολουθία φάσεων είναι η ίδια.

Τη στιγμή που ο διακόπτης σύνδεσης κλείνει, οι τάσεις στους τρεις ζυγούς του ΣΗΕ και της G2 είναι σε φάση και η διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες του διακόπτη είναι μηδενική. Έτσι το ρεύμα που ρέει από την G2 στο ΣΗΕ είναι μηδέν, οπότε και η παρεχόμενη ισχύς στο δίκτυο είναι πάλι μηδενική. Στην πράξη επειδή κάτι τέτοιο δεν έχει νόημα αφού ο σκοπός του παραλληλισμού είναι να επιμεριστεί το φορτίο, λαμβάνεται πρόνοια, ώστε η τάση και η συχνότητα της υπό σύνδεση γεννήτριας να είναι κατά ένα κλάσμα υψηλότερες από εκείνες του δικτύου, (με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται και η περίπτωση η γεννήτρια G2 να απορροφήσει ισχύ από το δίκτυο, να λειτουργήσει δηλαδή ως κινητήρας, motoring). Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα η κυματομορφή της τάσης της εισερχόμενης Σ.Γ. να ολισθαίνει πίσω από την κυματομορφή της τάσης του ΣΗΕ. Η εισερχόμενη μηχανή παραλληλίζεται τη χρονική στιγμή κατά την οποία οι κυματομορφές συμπίπτουν από αυτόματο συγχρονιστή του κυρίου πίνακα (υπάρχει και η δυνατότητα χειροκίνητου συγχρονισμού μέσω συγχρονοσκοπίου και λαμπτήρων συγχρονισμού).

2.2 Πίνακες και διανομή ηλεκτρικής ισχύος (Switchboard & distribution) ^[10]

Οι πίνακες χρησιμοποιούνται για τη διανομή της ενέργειας στους διάφορους καταναλωτές και αποτελούν τους συνδέσμους μεταξύ του εξοπλισμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (γεννήτριες), μεταφοράς (καλωδίωση), μετατροπής (μετασχηματιστές) και των καταναλωτών. Περιέχουν τα μέσα προστασίας (αυτόματους διακόπτες, ασφάλειες), τα μέσα ελέγχου (PLC), όργανα μέτρησης και επιτήρησης (αμπερόμετρα, βολτόμετρα), σημάνσεις (λυχνίες), όργανα αναγκαία για τον παραλληλισμό των γεννητριών και γενικότερα ότι είναι αναγκαίο για την προστασία, τη λειτουργία, τον έλεγχο και την εποπτεία των κυκλωμάτων που είναι συνδεδεμένα σε αυτούς.

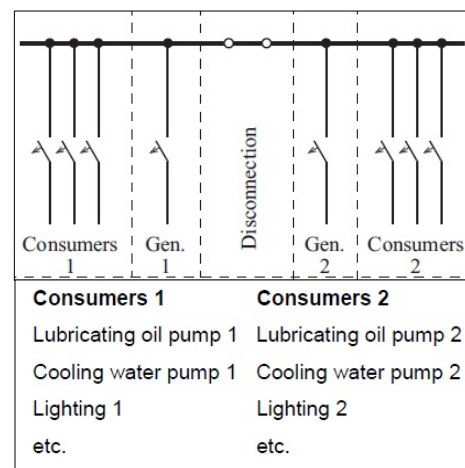
2.2.1 Κύριος πίνακας

Ο κύριος πίνακας (main switchboard, MSB), που βρίσκεται στο engine control room (ECR), τροφοδοτείται απευθείας από τις γεννήτριες από το κύριο καλώδιο ισχύος (main power cable). Το κύριο καλώδιο ισχύος (παραλληλισμένοι αγωγοί μεγάλης ονομαστικής διαμέτρου), που είναι ξεχωριστό για κάθε γεννήτρια, συνδέεται με τον αυτόματο διακόπτη της γεννήτριας (συνήθως, air circuit breaker). Οι ακροδέκτες του διακόπτη συνδέονται με τους ζυγούς (bus bars) από τους οποίους γίνεται η τροφοδότηση στους υποπίνακες διανομής (κέντρα ελέγχου κινητήρων/motor control centers MCCS, υποπίνακες διανομής χαμηλής ισχύος/low power distribution panels), τους μετασχηματιστές ισχύος κλπ.

2.2.1.1 Εφεδρεία συστήματος ^[11, 13, 16]

Για λόγους εφεδρείας και αξιοπιστίας ο MSB ουσιαστικά διαιρείται σε δύο ξεχωριστούς πίνακες (isolation), τους οποίους τροφοδοτούν διαφορετικές πηγές (πχ για τρεις γεννήτριες, δύο γεννήτριες στο αριστερό (port) τμήμα του πίνακα και μία στο δεξί (starboard)). Εν πλώ χρησιμοποιείται συνήθως μόνο η μία γεννήτρια, σε καταστάσεις που έχουμε αυξημένη ζήτηση ισχύος χρησιμοποιούνται δύο γεννήτριες παραλληλισμένες μέσω του διακόπτη σύζευξης των ζυγών (bus tie breaker) ενώ η τρίτη γεννήτρια είναι σε κατάσταση stand-by. Τα τροφοδοτούμενα φορτία διαμοιράζονται με αντίστοιχο τρόπο (Σχ. 2.29, και ενότητα 1.5). Υπάρχει η δυνατότητα μεταγωγής των φορτίων των δύο τμημάτων στις διαφορετικές πηγές τροφοδοσίας μέσω αυτόματων ή χειροκίνητων διακοπών μεταγωγής (automatic/manual bus transfer, ABT/MBT), επομένως σε περίπτωση βλάβης ενός τμήματος του κυρίου πίνακα δεν επηρεάζεται το άλλο. Εννοείται πως τα φορτία που χαρακτηρίζονται ως κρίσιμα για την ασφάλεια του πλοίου και του πληρώματος τροφοδοτούνται και από τον (εντελώς ξεχωριστό και τοποθετημένο σε διαφορετικό σημείο του πλοίου) πίνακα έκτακτης ανάγκης (emergency switchboard, ESB) με διακόπτες ABT. Ο ESB (μαζί με τη γεννήτρια ανάγκης) βρίσκεται σε ασφαλές

έναντι κατάκλισης σημείο (στο ύψος του κυρίου καταστρώματος). Είναι συνεχώς ενεργός και συνδεδεμένος με τον MSB μέσω tie breaker (με interlock για αποφυγή παραλληλισμού). Ένας H/N υπότασης (undervoltage relay) παρακολουθεί την τάση του MSB και σε περίπτωση που ανιχνεύσει μη κανονική λειτουργία, ο tie breaker ανοίγει και εκκινεί την κινητήρια μηχανή της γεννήτριας ανάγκης (EG). Εντός ορισμένου χρονικού διαστήματος ο



Σχ. 2.12 Διάρθρωση κύριου πίνακα ^[13]

πίνακας ανάγκης τίθεται εκ νέου υπό τάση από την EG (σε 45 sec). Αυτή η χρονική καθυστέρηση είναι σκόπιμη, προκειμένου να δοθεί η δυνατότητα της stand-by γεννήτριας του κυρίου συστήματος να συνδεθεί πρώτη.

2.2.2 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Η επιλογή και η κατασκευή του κυρίου πίνακα πρέπει να πιστοποιείται (συμμόρφωση με τα πρότυπα της IEC, 61439-1,2 για βιομηχανικούς πίνακες χαμηλής τάσης, IEC 60068 για περιβάλλον λειτουργίας και IEC 60529 για βαθμούς προστασίας του εξοπλισμού).

2.2.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά ^[16]

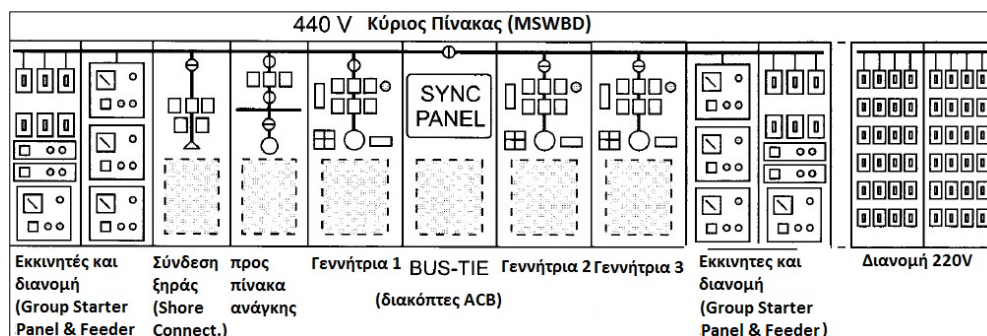
Ας δούμε κάποια γενικά χαρακτηριστικά του κύριου πίνακα διανομής που αφορούν την κατασκευή του και τα κριτήρια επιλογής του. Κατασκευάζονται ως πίνακες πεδίων (multi-cubicle) για την εύκολη μεταφορά αλλά και επεκτασιμότητά τους. Το περίβλημά τους είναι από χαλύβδινη λαμαρίνα πάχους 2-3mm και κατασκευάζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι εξωτερικές επιφάνειες να παρέχουν βαθμό προστασίας τουλάχιστον IP23, ενώ μονώνονται με κατάλληλες επιστρώσεις ώστε να παρέχουν προστασία έναντι διάβρωσης και ηλεκτροπληξίας (dead-front type). Όλα τα στοιχεία που πρέπει να χειρίζονται (διακόπτες, ασφάλειες, όργανα) είναι στο εμπρόσθιο μέρος και προτιμώνται συστήματα σύνδεσης όπου οι ασφάλειες, αυτόματοι κλπ κουμπώνουν κατευθείαν στους ζυγούς τροφοδοσίας.

2.2.2.2 Ζυγοί

Οι κύριοι ζυγοί (Σχ. 2.31), που είναι ορθογωνικής διατομής μπάρες από ηλεκτρολυτικό χαλκό, υψηλής αγωγιμότητας, αντοχής F30, έχουν διαστάσεις που καθορίζονται από τη μελέτη διαστασιολόγησης των ζυγών για επαρκή ικανότητα φόρτισης (σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61439-1) στην προβλεπόμενη θερμοκρασία υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας αλλά και μηχανικής αντοχής στις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται υπό συνθήκες συμμετρικού τριφασικού βραχυκυκλώματος (σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61363).

2.2.2.3 Πεδία

Το κάθε πεδίο του πίνακα σχεδιάζεται και εφοδιάζεται με τα κατάλληλα όργανα, ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετεί (generator control panel, feeder panel κλπ, Σχ. 2.30) ενώ μονωτικά υλικά παρεμβάλλονται μεταξύ τους ώστε να μην είναι δυνατή η μετάδοση του σφάλματος από το ένα πεδίο στο άλλο. Τα καλώδια στο εσωτερικό του πίνακα είναι απαραίτητα αυτοσβενήμενα, εγκεκριμένα από τον νηογνώμονα, τοποθετούνται σε επαρκή απόσταση μεταξύ τους για τον κατάλληλο αερισμό τους.



Σχ. 2.13 Τυπική διάταξη πεδίων του κυρίου πίνακα ^[11]

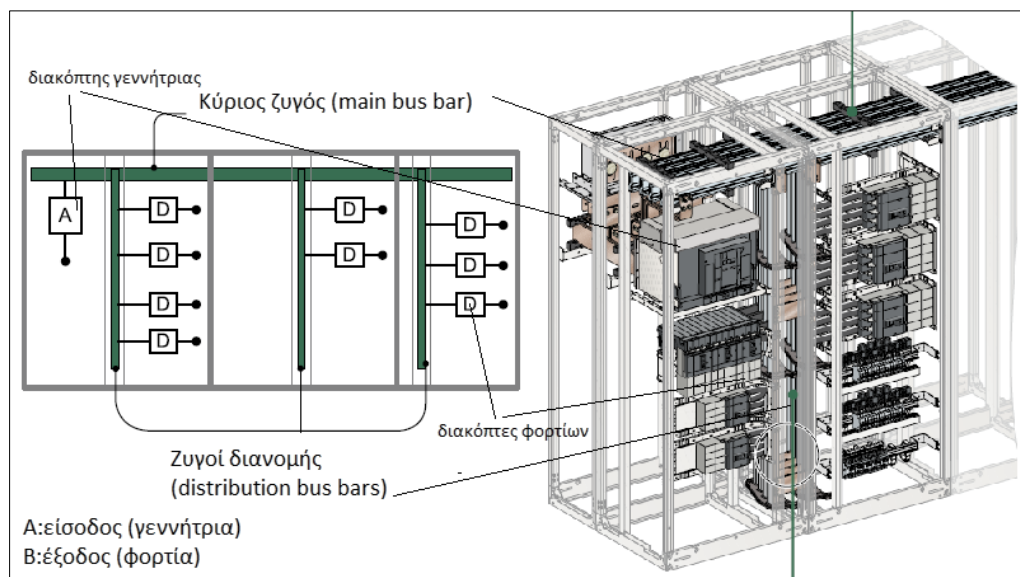
2.2.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μεγέθη που προσδιορίζουν έναν πίνακα είναι τα εξής:

- ονομαστική συχνότητα.
- ονομαστική (πολική) τάση (rated operating voltage, U_e) και ρεύμα λειτουργίας ζυγών (rated current busbar, I_n), οριζοντίων και καθέτων.
- ονομαστική τάση μόνωσης (rated impulse voltage U_i): η τιμή της τάση που χρησιμοποιείται για την διεξαγωγή των δοκιμών διηλεκτρικής αντοχής και μήκους ερπυσμού.
- ονομαστική αντοχή σε κρουστική τάση (rated impulse voltage, U_{imp}): είναι η μέγιστη τιμή της κρουστική τάσης, τυποποιημένης μορφής και πολικότητας, που μπορεί να υποβληθεί σε έναν ηλεκτρολογικό πίνακα χωρίς να δημιουργηθούν σφάλματα υπό διευκρινισμένες συνθήκες και τηρώντας απαραίτητα τις αποστάσεις (διάκενα) ασφαλείας μεταξύ αγώγιμων στοιχείων (clearances).
- ονομαστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης (rated short time/1 sec withstand current, I_{cw}): εκφράζει την ενεργό τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης που μπορεί να διαρρέει το κύκλωμα για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα χωρίς να δημιουργήσει σφάλματα στη λειτουργία του υπό καθορισμένες συνθήκες. Αυτό το χρονικό διάστημα θεωρείται κατά κανόνα ίσο με 1 sec.
- ονομαστικό μέγιστο ρεύμα αντοχής (rated peak withstand current, I_{pk}): η μέγιστη τιμή ρεύματος που το κύκλωμα μπορεί να αντέξει σε ικανοποιητικό βαθμό υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Rated insulation voltage (U_i):	1000 V
Rated impulse voltage (U_{imp}):	12 kV
Rated operating voltage (U_e):	690 V
Rated current main busbar (I_n):	6300 A
Rated current vertical busbar (I_n):	1600 A
Rated frequency:	50-60 Hz
Short circuit current main busbar	
Rated short time withstand current (I_{cw}):	150kA/ 1 sec.
Rated peak with stand (I_{pk}):	330 kA.
Short circuit current vertical busbar	
Rated short time withstand current (I_{cw}):	100kA/ 1 sec.
Rated peak with stand (I_{pk}):	220 kA.
Rated ingress protection:	IP23

Πιν. 2.1 τυπικά ηλεκτρικά χαρ/κά μεγέθη (πίνακας k-power της Kongsberg)



Σχ. 2.14 Τυπική διάταξη ζυγών εντός πίνακα [18]

2.2.4 Σύστημα διαχείρισης ισχύος (Power Monitoring System, PMS) ^[16]

Το PMS είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου και διαχείρισης του ηλεκτρικού σταθμού παραγωγής και μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα ή ως ενσωματωμένο στο ευρύτερο σύστημα αυτοματισμού του πλοίου. Η λειτουργία του συνήθως είναι πλήρως ή μερικώς αυτοματοποιημένη αλλά διαθέτει επιλογές και χειροκίνητης λειτουργίας αν κριθεί σκόπιμο. Αρκετά προηγμένα συστήματα υποστηρίζουν ακόμη και την εξ' αποστάσεως λειτουργία.

Τα κύρια καθήκοντα του PMS έχουν να κάνουν με την ασφάλεια και την αποδοτική λειτουργία του συστήματος παραγωγής, επομένως πρέπει να διασφαλίζει την απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος, να αυξάνει την ενεργειακή απόδοση των μονάδων, δηλαδή να κατανέμει το φορτίο με τέτοιο τρόπο ώστε οι γεννήτριες να λειτουργούν στον υψηλότερο δυνατό βαθμό απόδοσης και να ελαχιστοποιεί την απαιτούμενη συντήρηση. Αυτό για παράδειγμα το επιτυγχάνει συνδέοντας και αποσυνδέοντας τις γεννήτριες βασιζόμενο στις ώρες λειτουργίας. Καθώς οι απαιτήσεις για βελτιστοποίηση κάθε μορφής γίνονται όλο και πιο επιτακτικές, τα ηλεκτρικά συστήματα γίνονται όλο και πιο πολύπλοκα, σκοπός του PMS είναι να αποφορτίσει το προσωπικό του πλοίου από εργασίες, χρονοβόρες και απαιτητικές.

Τυπικές δυνατότητες του PMS

- Παρακολούθηση και έλεγχος λειτουργίας γεννητριών
- Ασφαλής εκκίνηση και τερματισμός λειτουργίας
- Παραλληλισμός γεννητριών και σύνδεση διακόπτη ζεύξης
- Έλεγχος τάσης και συχνότητας κυρίου ζυγού και γεννητριών
- Συμμετρικός ή ασύμμετρος διαμερισμός φορτίου (load sharing)
- Έλεγχος και απόρριψη φορτίου (load shedding)
- Ξεχωριστό σύστημα συναγερμού, ελέγχου και ασφάλειας
- Λογική ακολουθία εκκίνησης ενεργοβόρων καταναλωτών (step loading)
- Αυτόματη εκκίνηση και σύνδεση μετά από blackout

2.2.5 Απόρριψη Φορτίου (Load shedding/Preferential trip) ^[11]

Μια σημαντική ικανότητα που πρέπει να έχει το PMS σχετίζεται με την προστασία των γεννητριών από υπερφόρτιση. Υπερφόρτιση μπορεί να συμβεί για παράδειγμα σε ένα παραλληλισμένο ζεύγος γεννητριών όταν αστοχήσει η μία, είτε όταν για κάποιο λόγο ενεργοποιήσουμε ταυτόχρονα έναν μεγάλο αριθμό ενεργοβόρων καταναλωτών που δεν είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν μαζί, σε καμία κατάσταση λειτουργίας. Το PMS πρέπει να διασφαλίσει την αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας προς τους ουσιώδεις καταναλωτές, το επιτυγχάνει διακόπτοντας την ηλεκτρική παροχή κατά προτίμηση έτσι ώστε να μειώσει το φορτίο των γεννητριών, στα ονομαστικά επίπεδα. Οι καταναλωτές κατηγοριοποιούνται σε διάφορες ομάδες σημαντικότητας και σε κάθε ομάδα ρυθμίζεται το χρονικό διάστημα μετά το οποίο θα διακοπεί η τροφοδοσία της από τη γεννήτρια σε περίπτωση υπερφόρτισης. Αισθητήρες που μετρούν την πραγματική ισχύ τοποθετούνται στο πίνακα κάθε γεννήτριας. Όταν το φορτίο της γεννήτριας ξεπεράσει μια προκαθορισμένη (preset) τιμή για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, ξεκινά το πρώτο στάδιο απόρριψης φορτίου, ηλεκτρονόμοι στο πίνακα της γεννήτριας στέλνουν σήμα να ανοίξουν οι διακόπτες στις γραμμές τροφοδοσίας των λιγότερο σημαντικών καταναλωτών. Αν το φορτίο δε μειωθεί όσο χρειάζεται, ξεκινά το δεύτερο στάδιο και ούτω καθεξής.

2.3 Προστατευτικός εξοπλισμός (System Protection)

2.3.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός του συστήματος ισχύος περιλαμβάνει τρόπους προστασίας από κάθε ανεπιθύμητη κατάσταση που μπορεί να προκύψει. Στην ενότητα αυτή θα μας απασχολήσει κυρίως η προστασία του συστήματος διανομής, από **υπερφορτίσεις (overload)** και **υπερεντάσεις (overcurrent)**. Για ένα στοιχείο του συστήματος ισχύος που το διαρρέει, υπό κανονικές συνθήκες, ρεύμα εντάσεως I_n , υπερφόρτιση σημαίνει πως διαρρέεται με ρεύμα $I_n < I_{overload} < 2I_n$, ενώ με τον όρο υπερένταση εννοούμε ρεύμα $I_{overcurrent} > 2I_n$. Μικρές υπερφορτίσεις (της τάξεως του 10-20%) αρκετές φορές είναι ανεκτές, για μικρό όμως χρονικό διάστημα, ενώ οι υπερεντάσεις (για τιμές άνω του $I_{overcurrent} > 10I_n$ ουσιαστικά έχουμε να κάνουμε με βραχυκυκλώματα) πρέπει πάντα να αποφεύγονται. Οι καταστροφικές συνέπειες που μπορεί να προκαλέσει το βραχυκύκλωμα αναλύονται στην ενότητα 4.6.1. Εδώ, θα αναφερθούμε στα στοιχεία του προστατευτικού εξοπλισμού που διακόπτουν το κύκλωμα ώστε να αποφευχθούν οι επιβλαβείς επιπτώσεις και να διασφαλιστεί η προστασία του προσωπικού και του εξοπλισμού.

2.3.2 Γενικές αρχές προστασίας

Μια καλή προστασία του ηλεκτρικού συστήματος ξεκινά από τη δυνατότητα γρήγορου εντοπισμού του σφάλματος. Μετρητές τάσης, ρεύματος και θερμοκρασίας είναι τοποθετημένοι σε επιλεγμένα σημεία του δικτύου. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η διακοπή της λειτουργίας του συστήματος, οι ακόλουθες εργασίες είναι μέρος του σχεδιασμού προστασίας.

- μελέτη βραχυκυκλώματος ώστε να καθοριστούν οι τιμές των συμμετρικών και ασύμμετρων κρουστικών ρευμάτων σε διάφορες τοποθεσίες του δικτύου
- επιλογή κατάλληλων διακοπών και ασφαλειών
- τοποθέτηση αισθητήρων σφάλματος σε στρατηγικά επιλεγμένες θέσεις
- συντονισμένη προστασία (protection coordination) κατά τη ροή της ηλεκτρικής ισχύος ώστε να επιτυγχάνεται επιλογική απόζευξη (selective tripping) των διακοπών ή ασφαλειών μέσω κατάλληλων ρυθμίσεων (χρονοκαθυστέρηση)
- ανάλυση σφαλμάτων ηλεκτρικού τόξου (arc flash analysis) και εκτίμηση κινδύνου που εγκυμονούν.

Οι ασφάλειες και οι διακόπτες είναι οι κύριες συσκευές που προστατεύουν το σύστημα από σφάλματα. Η γενική πρακτική που ακολουθείται στη σχεδίαση του δικτύου είναι η ακόλουθη:

- όλα τα φορτία προστατεύονται ατομικά, ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα καταστροφής της καλωδίωσης ή της πηγής ισχύος που είναι κοινή για περισσότερους από έναν καταναλωτές.
- μια προστατευτική συσκευή τοποθετείται κοντά στην πηγή για να παρέχει προστασία σε περίπτωση σφάλματος στη καλωδίωση
- όταν προκύπτουν σφάλματα με τιμές έντασης ρεύματος πολύ υψηλές, πρέπει να διακόπτονται προτού η γεννήτρια χάσει την μεταβατική της ευστάθεια (transient stability). Για μικρότερες τιμές, το κύκλωμα πρέπει να διακόπτεται προτού η

θερμοκρασία στους αγωγούς ξεπεράσει την μέγιστη επιτρεπτή μεταβατική θερμοκρασία (transient temperature) όπου για τον χαλκό το όριο είναι στους 325°C.

2.3.3 Ασφάλειες (Fuses)

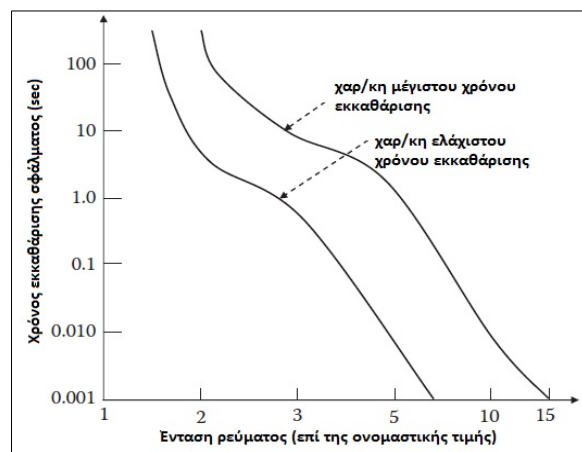
Οι ασφάλειες παρέχουν **προστασία από υπερένταση** (overcurrent), τήκοντας τον λεπτό μεταλλικό σύνδεσμο τους σε περίπτωση σφάλματος, λειτουργούν δηλαδή ως **θυσιαζόμενοι αντιστάτες** μικρής ωμικής αντίστασης. Τοποθετούνται σε σειρά με το προς προστασία κύκλωμα ώστε να παραλάβουν όλο το ρεύμα. Ο σύνδεσμος αυτός αποτελείται συνήθως από χαλκό ή νικέλιο ή άργυρο και περιβάλλεται συνήθως από αμμώδες υλικό (πυρίτιο) που έχει ως στόχο την γρήγορη απόσβεση του σπινθήρα που δημιουργείται όταν η ασφάλεια καταστραφεί. Ιδανικά, καταστρέφονται μόνο σε περίπτωση στιγμιαίας υπερέντασης ή μετά από κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα υπερφόρτισης (overload). Η κόπωση όμως του ελάσματος από τους συνεχείς θερμοελαστικούς κύκλους φόρτισης μπορούν να ελαττώσουν τη διάρκεια ζωής τους.

2.3.3.1 Κύρια χαρακτηριστικά, για την επιλογή της κατάλληλης ασφάλειας είναι:

- η μέγιστη συνεχής ένταση ρεύματος που είναι ικανή να φέρει η ασφάλεια
- η ονομαστική τάση λειτουργίας
- η μέγιστη ένταση του ρεύματος που μπορεί να διακόψει ασφαλώς (breaking capacity), η οποία πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης που είναι πιθανόν να προκύψει.
- η χαρακτηριστική ρεύματος-χρόνου (Σχ. 2.31), όπου μας δείχνει για μια τιμή έντασης ρεύματος, τον χρόνο στον οποίο θα τηχθεί η ασφάλεια. Λόγω των πολλών διαφοροποιήσεων που μπορούν να προκύψουν κατά την κατασκευή της ασφάλειας, στην αβεβαιότητα της συμπεριφοράς του υλικού (σύνδεσμος) η χαρακτηριστική αυτή δίνεται ως ζώνες (bands) με συγκεκριμένο εύρος ελάχιστης και μέγιστης χρονικής τιμής για μια συγκεκριμένη ένταση ρεύματος.

Καλή πρακτική για την επιλογή της αποτελούν τα παρακάτω κριτήρια:

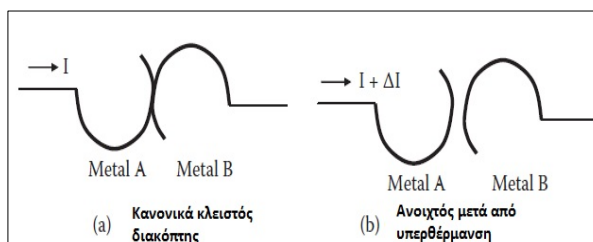
- να μπορεί να φέρει το 110% του ονομαστικού ρεύματος τουλάχιστον για 4 ώρες προτού τηχθεί
- για ρεύμα έντασης 135% του ονομαστικού, εκκαθάριση του σφάλματος σε χρονικό διάστημα μίας ώρας
- για ρεύμα έντασης 200% του ονομαστικού, εκκαθάριση του σφάλματος σε χρονικό διάστημα δύο λεπτών
- για ρεύμα έντασης x10 του ονομαστικού, εκκαθάριση του σφάλματος σε 1ms
- πτώση τάσης μικρότερη των 200mV κατά μήκος των ακροδεκτών της στο ονομαστικό ρεύμα.



Σχ. 2.15 Χαρ/κή ρεύματος-χρόνου (ζώνες)

2.3.3.2 Κατηγορίες ασφαλειών

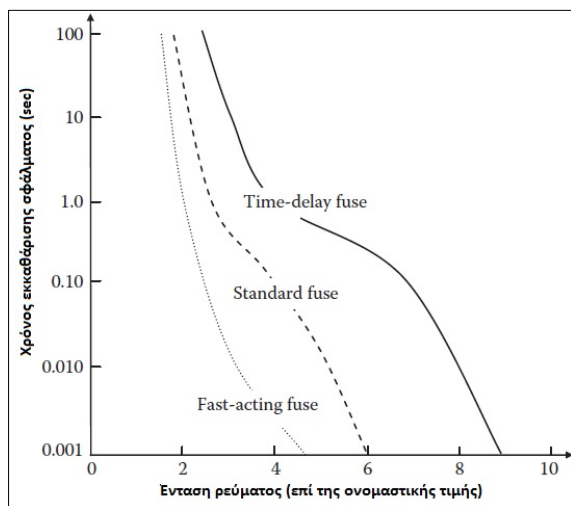
Ανάλογα με τον χρόνο δράσης τους, οι ασφάλειες κατατάσσονται στις **ταχείας τήξης** και **βραδείας τήξης**. Άλλη κατηγορία ασφαλειών θεωρούνται οι **αυτόματες ασφάλειες** (ή μικροαυτόματοι διακόπτες, miniature circuit breakers, MCB). Στην ουσία, εδώ έχουμε να κάνουμε με διακόπτες καθώς μετά την διακοπή, δεν χρειάζεται να τις αντικαταστήσουμε, αλλά απλώς να σηκώσουμε το χειριστήριο και να αποκατασταθεί η τροφοδοσία. Αποτελούνται από ένα ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο (relay) και από ένα διμεταλλικό στοιχείο (θερμικό). Το ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο κάνει διακοπή σε περίπτωση βραχυκυκλώματος πολύ γρήγορα (εκατοστά ή και χιλιοστά του δευτερολέπτου), ενώ το διμεταλλικό διακόπτει σε περίπτωση υπερεντάσεως με καθυστέρηση μερικών δευτερολέπτων ή και λεπτών, ανάλογα με την υπερένταση. Έχουμε και εδώ χαρακτηριστικές καμπύλες που εκφράζουν το χρόνο ενεργοποίησης του μηχανισμού διακοπής της ασφάλειας από τη στιγμή που θα εμφανιστεί το βραχυκύκλωμα, συναρτήσει αυτού του ρεύματος. Έτσι για κάθε ικανότητα διακοπής έχουμε τρεις χαρακτηριστικούς τύπους ασφαλειών που προσδιορίζονται με τα γράμματα "B", "C", "D" και αναφέρονται σε μια περιοχή ρευμάτων βραχυκύκλωσης που είναι πολλαπλάσια του ονομαστικού ρεύματος της ασφάλειας. Ο χαρακτηριστικός τύπος "D" ασφαλειών έχει μεγαλύτερο χρόνο ενεργοποίησης από τον τύπο "C" και ο τύπος "C" από τον "B" για το ίδιο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Έτσι για παράδειγμα για το δίκτυο φωτισμού θα επιλέξουμε καμπύλη λειτουργίας "C" ενώ για γραμμές που τροφοδοτούν κινητήρες (αυξημένο ρεύμα εκκίνησης, θα προτιμούσαμε καμπύλη λειτουργίας "D". Παρακάτω δίνεται πίνακας με τις εφαρμογές των διαφόρων τύπων ασφαλειών.



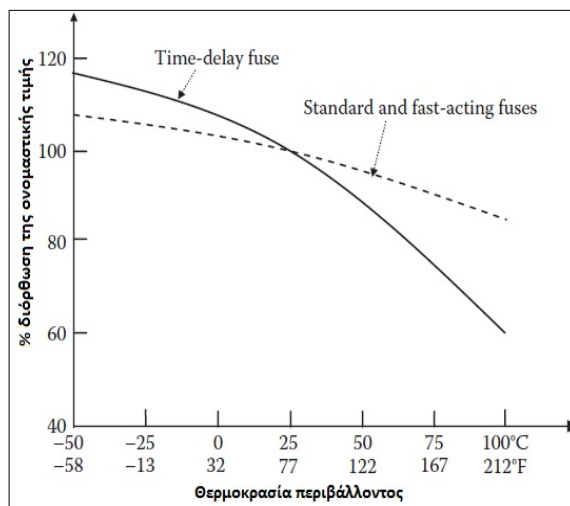
Σχ. 2.16 διμεταλλικό έλασμα κανονικά κλειστού διακόπτη

Τύπος ασφάλειας τήξης	Χρόνος τήξης ασφάλειας σε ρεύμα έντασης $X2$ του ονομαστικού	Τυπικές εφαρμογές
Ταχείας τήξης	<1 sec	Ηλεκτρονικά ισχύος, προστασία μετρητικών οργάνων
Γενικού τύπου (θερμικό στοιχείο)	<10 sec	Δίκτυο φωτισμού
Βραδείας τήξης και αυτόματες ασφάλειες (ρελέ + θερμικό στοιχείο)	>10 sec	Καταναλωτές με υψηλό ρεύμα εκκίνησης (κινητήρες, μετασχηματιστές κα.)

Πιν. 2.2 Τύποι ασφαλειών τήξης



Σχ. 2.18 Τύποι ασφαλειών τήξης



Σχ. 2.17 επίδραση θερμοκρασίας περιβάλλοντος στα ονομαστικά χαρακτηριστικά των ασφαλειών

Τυποποιημένα μεγέθη:

Τυποποιημένα μεγέθη ασφαλειών είναι τα εξής (τιμές ονομαστικού ρεύματος): 6, 10, 16, 20, 25, 35, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 224, 250, 315 A.

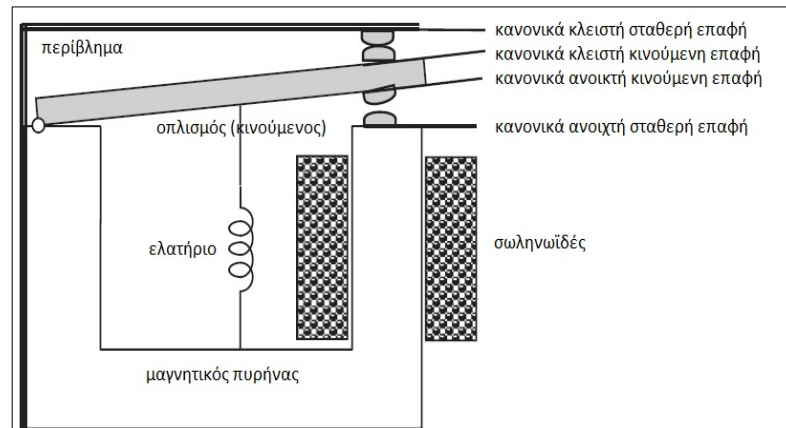
2.3.4 Ηλεκτρονόμοι (H/N) Υπερεντάσεως (Overcurrent Relays, OCR)

Αν και συνήθως δεν χρησιμοποιούνται ως προστατευτικές συσκευές από μόνοι τους, οι H/N αποτελούν μέρος του μηχανισμού ελέγχου των διακοπών, άρα και του προστατευτικού σχεδίου ή του σχεδίου ελέγχου του ηλεκτρικού συστήματος ισχύος. Ο H/N υπερεντάσεως μέσω της εισόδου του, μετρά την ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει και συγκρίνει την τιμή αυτή με μια τιμή ρεύματος αναφοράς. Έπειτα από υπολογισμούς που εκτελεί, αν το ρεύμα που τον διαρρέει είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα αναφοράς, επενεργεί, μέσω της εξόδου του, στο διακόπτη ισχύος με τον οποίο επικοινωνεί. Οι H/N είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να δέχονται ως εισόδους, τιμές ρευμάτων, υποβιβασμένες πάντα από μετασχηματιστές (M/Σ) έντασης (current transformers, CT). Στα **ακτινικά δίκτυα** διανομής ισχύος (που χρησιμοποιούνται κατά πλειοψηφία στα πλοία) η προστασία έναντι υπερέντασης παρέχεται από ασφάλειες, διακόπτες ισχύος και διακόπτες αυτόματης επαναφοράς, όπου εκτός των ασφαλειών τήξης, όλα τα υπόλοιπα μέσα ελέγχονται από H/N υπερέντασης, **χωρίς στοιχείο κατεύθυνσης** (non- directional overcurrent relays). Να θυμίσουμε εδώ ότι με την έννοια υπερένταση εννοούμε οποιαδήποτε τιμή ρεύματος μεγαλύτερης της διπλάσιας της ονομαστικής, ενώ με τον όρο υπερφόρτιση (overload) εννοούμε εντάσεις μεταξύ της ονομαστικής τιμής και της διπλάσιας της.

2.3.4.1 Κατασκευή

Σε ότι αφορά την κατασκευή τους, υπάρχουν διάφορα είδη ηλεκτρονόμων, τα οποία είναι οι ηλεκτρομηχανικοί (electromechanical), οι στατικοί (static, solid state) και οι ψηφιακοί (digital). Επιγραμματικά, ο τρόπος λειτουργίας των ηλεκτρομηχανικών H/N (χρησιμοποιούνται κυρίως στα κυκλώματα υψηλής ισχύος) είναι ο εξής: Είναι κατασκευασμένοι από πυρήνα σιδήρου και μέσω των τυλιγμάτων (solenoid), που φέρουν ρεύματα, επάγονται ροές στο μαγνητικό κύκλωμα με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δυνάμεων ή ροπών που ενεργούν στο κινητό μαγνητιζόμενο μέρος, τον οπλισμό (armature), ο οποίος ανοίγει τις επαφές του διακόπτη. Όταν πάψει να υπάρχει το ρυθμισμένο ονομαστικό του

ρεύμα ,συνήθως ένα ελατήριο επαναφέρει το κινητό μέρος στην αρχική θέση (αν ο Η/Ν είναι κανονικά ανοικτός).



Σχ. 2.19 Κατασκευαστικά στοιχεία στο εσωτερικό μέρος ηλεκτρομηχανικού Η/Ν

2.3.4.2 Κύρια χαρακτηριστικά ρύθμισης^[15]

- Ρεύμα διέγερσης (pick-up current): Τυπικά, ίσο με το 120-150% του μέγιστου ρεύματος φόρτισης της γραμμής. Γενικά, τέτοιο ώστε να αποφεύγεται η λειτουργία του Η/Ν για καταστάσεις υπερφόρτισης ή μεταβατικές.
- Χρόνος καθυστέρησης (time delay): ορίζεται ως $time\ delay = breaker\ time + overtravel\ time + security\ margin$, όπου time delay ο χρόνος λειτουργίας του Η/Ν, breaker time ο χρόνος λειτουργίας του διακόπτη ισχύος, overtravel time ο χρόνος μετάδοσης του σήματος από τον Η/Ν στο διακόπτη ισχύος και security margin συντελεστής ασφαλείας που εξαρτάται από την ακρίβεια του Η/Ν και τη διακύμανση των χρόνων λειτουργίας των διακοπών ισχύος CB. Τυπικές τιμές του είναι 0,1-0,3.

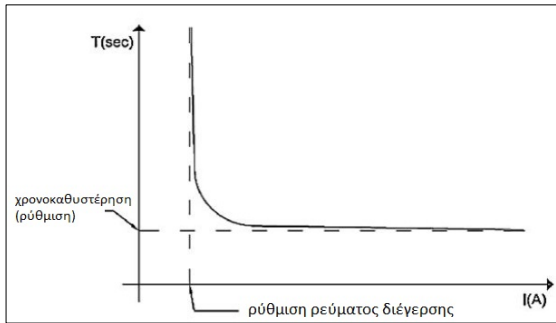
Καθώς ο Η/Ν υπερεντάσεως μετρά τις τιμές ρεύματος από τον συνδεδεμένο στην είσοδο του Μ/Σ εντάσεως, για την ορθή επιλογή του, πρέπει το αναγραφόμενο ρεύμα λειτουργίας του να ταιριάζει με το ρεύμα στο δευτερεύον του Μ/Σ εντάσεως.

2.3.4.3 Κατηγορίες Η/Ν υπερέντασης

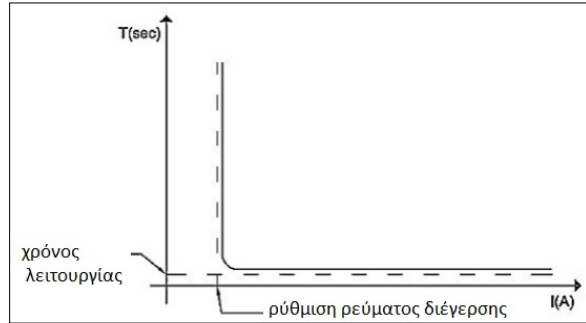
Ανάλογα με τον χρόνο δράσης τους οι Η/Ν υπερέντασης διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Στιγμιαίοι (instantaneous): ρυθμίζοντας το ρεύμα διέγερσης (pick up current), μόλις το εισερχόμενο ρεύμα ξεπεράσει την τιμή αυτή, ο Η/Ν λειτουργεί ακαριαία.
- Σταθερού χρόνου (definite time): σε αυτό το είδος Η/Ν ρυθμίζουμε το ρεύμα διέγερσης και τη χρονική καθυστέρηση (time delay) με την οποία θέλουμε να λειτουργήσει ο Η/Ν, η οποία είναι σταθερή. Όταν ξεπεραστεί η ρυθμισμένη τιμή του ρεύματος, ανεξαρτήτως τάξης, ο Η/Ν θα στείλει σήμα στο διακόπτη ισχύος που ελέγχει έπειτα από τη χρονική καθυστέρηση που έχει οριστεί.
- Αντίστροφου χρόνου (inverse time): ρυθμίζουμε το ρεύμα διέγερσης και μια χρονική παράμετρο (time dial setting). Εδώ, όσο η τιμή του ρεύματος αυξάνεται τόσο μειώνεται ο χρόνος δράσης του Η/Ν. Ειδικότερα, ανάλογα με τον ρυθμό μείωσης

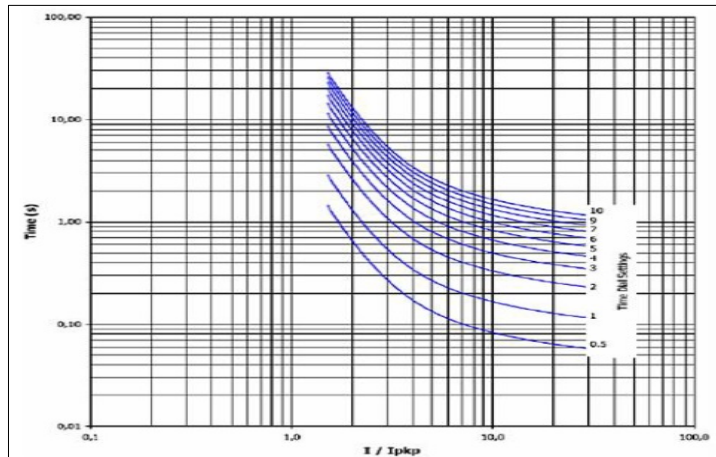
του χρόνου, διακρίνονται **τρεις κατηγορίες**: οι απλώς αντιστρόφου χρόνου, οι πολύ αντιστρόφου χρόνου και οι εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου. Οι H/N αντιστρόφου χρόνου, εφοδιασμένοι και με στοιχείο στιγμιαίας λειτουργίας, έχουν επικρατήσει στο μεγαλύτερο πλήθος εφαρμογών για την προστασία έναντι υπερέντασης. Παρακάτω δίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες των διαφόρων τύπων H/N.



Σχ. 2.20 Χαρ/κή H/N σταθερού χρόνου



Σχ. 2.21 Χαρ/κή H/N στιγμιαίου χρόνου



Σχ. 2.22 Οικογένεια χαρ/κων H/N αντιστρόφου χρόνου

2.3.5 Διακόπτες Ισχύος (Circuit Breakers,CB)

Οι διακόπτες ισχύος χρησιμοποιούνται για την προστασία σε υπερεντάσεις και σε βραχυκυκλώματα εφόσον παρουσιάζουν την απαιτούμενη ικανότητα ζεύξης (making) και απόζευξης (breaking).

2.3.5.1 Κατασκευή/Λειτουργία

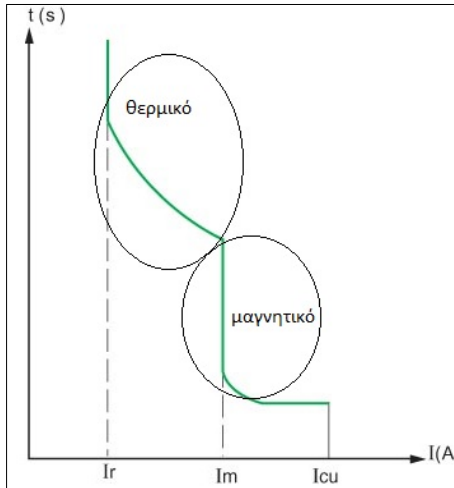
Περιλαμβάνουν ένα ζεύγος επαφών, μια σταθερή και μια κινητή. Ένας μηχανισμός κινεί την κινητή επαφή για να κλείσει ή να διακόψει το κύκλωμα. Ο μηχανισμός μπορεί να είναι ένα απλό σωληνοειδές, ένας μηχανισμός φορτισμένου ελατηρίου, υδραυλικός μηχανισμός, πνευματικός μηχανισμός ή υδραυλοπνευματικός. Όταν απαιτείται διακοπή του κυκλώματος ο μηχανισμός κινεί και απομακρύνει τις επαφές, μεταξύ των οποίων σχηματίζεται ένα ηλεκτρικό τόξο. Κύριο καθήκον λοιπόν του διακόπτη είναι να σβήσει το τόξο για να διακοπεί το ηλεκτρικό κύκλωμα. Η σβέση του τόξου επιτυγχάνεται με την εκτόξευση πάνω του ενός μέσου, δηλαδή μονωτικού ελαίου, πεπιεσμένου αέρα, ή άλλου αερίου μονωτικού μέσου, εν τέλει ο θάλαμος σβέσης είναι ένας τρόπος κατηγοριοποίησης των διακοπών. Στα πλοία όπως έχουμε ήδη αναφέρει, αποφεύγεται να χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές συσκευές (πχ διακόπτες, μετασχηματιστές) που έχουν ως μονωτικό μέσο το λάδι και στην περίπτωση των διακοπών έχει επικρατήσει να χρησιμοποιούνται, **διακόπτες αέρα** (air circuit breakers, **ACB**) για τα δίκτυα χαμηλής τάσης και διακόπτες κενού (vacuum circuit breakers, **VCB**) ή εξαφθοριούχου θείου (**SF6 Breakers**) για δίκτυα υψηλής τάσης (περίπτωση πλοίων με ηλεκτροπρόωση). Φέρουν σε κάθε φάση **θερμικό** στοιχείο για προστασία έναντι υπερφόρτισης, **ηλεκτρομαγνητικό** στοιχείο για προστασία έναντι ρευμάτων βραχυκύκλωσης καθώς και στοιχείο υπότασης (προαιρετικά). Το θερμικό είναι ουσιαστικά τρεις θερμικές επαφές (μία επαφή για κάθε φάση), η λειτουργία των οποίων βασίζεται στην αύξηση του μήκους ενός ελάσματος, ή την κάμψη ενός διμεταλλικού ελάσματος (Σχ. 2.32) ή το λιώσιμο ενός σημείου συγκόλλησης. Το θερμικό επενεργεί μετά από κάποιο μικρό χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να μην διακόπτεται η λειτουργία των κινητήρων κατά την εκκίνηση (ρεύμα εκκίνησης πολύ μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα) αλλά να προστατεύει τους κινητήρες και κατά συνέπεια την εγκατάσταση από παρατεταμένη υπερφόρτιση. Το ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο είναι ένας ηλεκτρονόμος, συνήθεστερα ηλεκτρομηχανικός, η τάση όμως τα τελευταία χρόνια ,τουλάχιστον για τους διακόπτες των γεννητριών, είναι η χρησιμοποίηση ψηφιακών ηλεκτρονόμων που επιτρέπουν επακριβή ρύθμιση της χαρακτηριστικής ρεύματος-χρόνου τόσο των θερμικών όσο και των ηλεκτρομαγνητικών στοιχείων.

2.3.5.2 Χαρακτηριστικά διακοπών ισχύος

Θεμελιώδη χαρακτηριστικά των διακοπών ισχύος είναι:

- η ονομαστική τάση U_0 στην οποία είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν.
- το ονομαστικό ρεύμα I_n , είναι το μέγιστης έντασης ρεύμα, το οποίο ένας διακόπτης με H/N υπερέντασης μπορεί να φέρει για απεριόριστο χρόνο, σε μια καθορισμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος, χωρίς να ξεπεραστεί η επιτρεπτή θερμοκρασία των μερών (αγωγών) που φέρουν το ρεύμα.
- το μέγεθος πλαισίου (frame-size rating). Αν ένας διακόπτης είναι εφοδιασμένος με μονάδες διακοπής υπερέντασης για διαφορετικές ρυθμίσεις ρεύματος διέγερσης, τότε το μέγεθος πλαισίου το καθορίζει η μέγιστη τιμή.

- το ρεύμα ρύθμισης στον H/N υπερφόρτισης (ρεύμα θερμικού) I_r ή I_{th} . Αντιπροσωπεύει το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να φέρει ο διακόπτης χωρίς διακοπή (tripping). Για διακόπτες χωρίς ρυθμιζόμενα μέρη $I_n = I_r$, διαφορετικά το I_r ρυθμίζεται σε μια τιμή ανάμεσα στο $0.7-1.0 \times I_n$.
- το ονομαστικό ρεύμα απόζευξης σε βραχυκύκλωμα (rated breaking capacity), I_{cu}
- το ονομαστικό ρεύμα ζεύξης σε βραχυκύκλωμα (rated making capacity), I_{cm}
- το ρεύμα ρύθμισης έναντι βραχυκυκλώματος (ρύθμιση H/N υπερέντασης), I_m



Επίσης, ο χρόνος τον οποίο μπορούν να αντέξουν οι διακόπτες σε ρεύμα βραχυκύκλωσης για λόγους επιλογικής συνεργασίας, είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό. Την έννοια αυτή και τη σημασία μιας τέτοιας μελέτης, θα την αναπτύξουμε αργότερα. Επιγραμματικά, όταν συμβεί βραχυκύκλωμα, μας ενδιαφέρει να λειτουργήσει ο κοντινότερος προς το σφάλμα προστατευτικός μηχανισμός, και να προστατευτεί η αδιάλειπτη λειτουργία του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους. Για να γίνει αυτό πρέπει να υπάρχει μια σκόπιμη χρονική καθυστέρηση στον διακόπτη των γεννητριών.

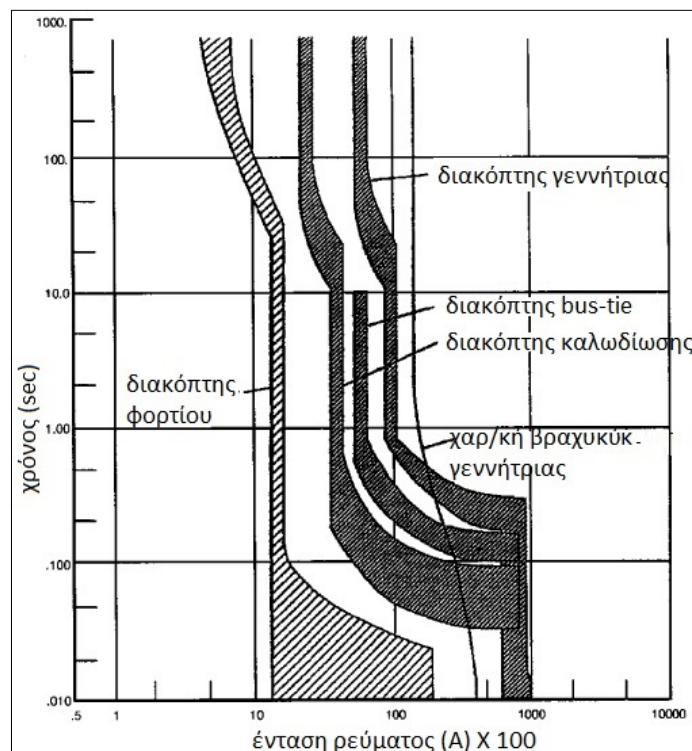
Σχ. 2.23 Χαρ/κή διακόπτη (θερμικό και μαγνητικό μέρος)

2.3.5.3 Κατηγορίες διακοπών ισχύος:

Βάσει λοιπόν της ικανότητας αντοχής του διακόπτη για ορισμένο χρονικό διάστημα (της τάξης του 1sec) σε βραχυκύκλωμα (χωρίς να ανοίξει δηλαδή το κύκλωμα) χωρίζονται, κατά IEC, οι διακόπτες σε δύο **κατηγορίες**, την **A** και την **B**. Στην A κατηγορία ανήκουν οι μικροαυτόματοι (Miniature Circuit Breakers, MCB) και οι διακόπτες κλειστού τύπου (Molded Case Circuit Breakers, MCCB), διακόπτες που δεν έχουν τη δυνατότητα, κατασκευαστικά, να μη δράσουν αμέσως σε περίπτωση βραχυκυκλώματος γιατί θα καταστραφούν (τυπικά δρουν μετά 1-2 κύκλους από την εμφάνιση του σφάλματος). Χρησιμοποιούνται ως διακόπτες από την πλευρά του φορτίου. Στη B κατηγορία ανήκουν οι κατασκευαστικά πιο στιβαροί διακόπτες, οι αυτόματοι διακόπτες αέρα (ACB), κενού (VCB) ή εξαφθοριούχου θείου (SF6) που περιγράψαμε πιο πάνω. Τους χαρακτηρίζει η τιμή I_{CW} (Rated short time withstand current), η τιμή δηλαδή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος που μπορούν να αντέξουν για χρονικό διάστημα μεταξύ 0.5-3 sec. Χρησιμοποιούνται ως διακόπτες γεννητριών. Γενικά ισχύει $I_{NMCB} \ll I_{NMCCB} < I_{NACB}$, δηλαδή το ονομαστικό ρεύμα που φέρουν οι MCB είναι μικρότερο από το ρεύμα που μπορούν να φέρουν οι MCCB που με τη σειρά τους μπορούν να φέρουν μικρότερης έντασης ονομαστικό ρεύμα από τους ACB. Συνηθιζόταν όπου υπήρχαν καταναλωτές με απαιτήσεις μεγάλης έντασης ρεύματος, να χρησιμοποιούνται ACB σε συνδυασμό με ασφάλειες πολύ αντιστρόφου χρόνου. Τα τελευταία χρόνια όμως οι MCCB έχουν ανεβάσει κατακόρυφα τα ονομαστικά τους χαρακτηριστικά και καθώς είναι φθηνότεροι και μικρότεροι από τους ACB έχουν επικρατήσει ως τα κύρια προστατευτικά μέσα των καταναλωτών.

2.3.6 Επιλογική Συνεργασία /Συντονισμένη Προστασία (Selectivity/Protection Coordination)

Με τον όρο επιλογική συνεργασία εννοούμε τον σχεδιασμό του συστήματος προστασίας κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ενεργοποιείται μόνο ο προστατευτικός μηχανισμός, στη γειτονική προς το σφάλμα περιοχή, για την εκκαθάρισή του (selective trip). Για να διακόψει ένα μέσο γρηγορότερα από ένα άλλο, εφόσον διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, πρέπει ο χρόνος αντίδρασης του πρώτου να είναι μικρότερος από το χρόνο του δεύτερου. Επομένως με τη μελέτη επιλογικής συνεργασίας (χρησιμοποιείται και ο όρος της διακριτικότητας-discrimination) βρίσκεται ο βέλτιστος τρόπος κατανομής και ρύθμισης των χαρακτηριστικών ρευμάτων-χρόνου των ασφαλιστικών διατάξεων προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο εξοπλισμός που θα τεθεί εκτός λειτουργίας σε περίπτωση σφάλματος και να εξασφαλιστεί η αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Πρώτα καθορίζονται οι παράμετροι (χαρακτηριστικά χρόνου-ρεύματος διέγερσης)) του πιο απομακρυσμένου από την γεννήτρια, μέσου προστασίας, και στη συνέχεια κατευθυνόμαστε προς τη γεννήτρια. Ο μελετητής καλείται να προβάλλει σε ένα κοινό διάγραμμα ρεύματος-χρόνου, τις χαρακτηριστικές όλων των μέσων προστασίας της κάθε γραμμής που εξυπηρετεί κάποιον καταναλωτή. Ένα τυπικό διάγραμμα όπου φαίνεται η σωστή συντονισμένη προστασία των ασφαλιστικών διατάξεων κατά μήκος μιας γραμμής φαίνεται παρακάτω. Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα δράσης των μέσων προστασίας σε υπερένταση ή υπερφόρτωση αυξάνει όσο προχωρούμε από τη γεννήτρια προς το φορτίο.



Σχ. 2.24 Τυπικό διάγραμμα χαρακτηριστικών ρεύματος-χρόνου διακοπών για συντονισμένη προστασία.^[18]

Διακρίνονται δύο τύποι επιλογικής συνεργασίας, η **πλήρης** (total) και η **μερική** (partial). Επειδή για ένα πλοίο θα ήταν πολύ ακριβή η εγκατάσταση ενός προστατευτικού συστήματος με πλήρη συνεργασία όπου για κάθε τιμή ρεύματος σφάλματος θα απομονωνόταν μόνο ένας

καταναλωτής, ο πιο κοντινός στο σφάλμα, χρησιμοποιείται η μερική επιλογική συνεργασία. Η εφεδρεία της εγκατάστασης μπορεί να διατηρηθεί με την τροφοδότηση των ουσιωδών καταναλωτών (που είναι διπλοί) από περισσότερους τους ενός, πίνακες διανομής.

2.3.6.1 Ζώνες προστασίας

Για την επίτευξη της επιλογικής συνεργασίας των διακοπτικών μέσων ορίζονται οι ζώνες προστασίας. Αυτές είναι τα τμήματα στα οποία υποδιαιρείται ένα δίκτυο και τα οποία καλύπτονται από ξεχωριστά συστήματα προστασίας. Η σχεδίαση τους γίνεται έτσι ώστε η μία να επικαλύπτει την άλλη ώστε κανένα στοιχείο του συστήματος να μην παραμείνει απροστάτευτο. Διακρίνονται στην κύρια ή πρωτεύουσα προστασία (primary protection) και στην δευτερεύουσα προστασία (back-up protection). Σε περίπτωση σφάλματος σε ένα σημείο του δικτύου, τα διακοπτικά μέσα που είναι πιο κοντά στο σφάλμα, παρέχουν πρωτεύουσα προστασία και θα πρέπει να ενεργοποιηθούν πρώτα ώστε να διακόψουν το ελάχιστο μέρος του δικτύου. Σε περίπτωση που αποτύχουν, τα διακοπτικά μέσα της δευτερεύουσας ζώνης θα πρέπει να ενεργοποιηθούν (διακόπτοντας μεγαλύτερο μέρος του δικτύου). Επομένως τα δεύτερα, θα πρέπει να είναι ρυθμισμένα ώστε να αντιδρούν με μια σκόπιμη χρονική καθυστέρηση (time delay setting), ώστε να δοθεί η δυνατότητα για τα μέσα της πρωτεύουσας προστασίας, να λειτουργήσουν πρώτα.

ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	Επιτήρηση	Έλεγχος	Προστασία	
	Παράμετροι		Μέσο προστασίας	Θέση μέσου προστασίας
Γεννήτρια	current, voltage, phase angle, power, frequency, CB status	local and remote	circuit breaker	generator switchboard
Διακόπτης Bus Tie	voltage, current, power, CB status	local and remote	circuit breaker	generator switchboard
Κέντρα διανομής (MCCs, Load Centers)	current, voltage	local and remote	circuit breaker	generator switchboard
Power Distribution Panels	current, voltage	local	circuit breaker, fuse	an enclosure centrally located to loads that it supplies
Κρίσιμα φορτία (Vital Loads)	current	local	circuit breaker, fuse	power distribution panel, generator switchboard, load center switchboard,
Μη κρίσιμα φορτία (Non-vital Loads)	current	local	circuit breaker, fuse	generator switchboard, load center switchboard, power distribution panel
Μη κρίσιμα φορτία που ανήκουν στην διαχείριση απόρριψης φορτίου	current	local, automatic	circuit breaker, fuse	power distribution panel, generator switchboard, load center switchboard

Πιν. 2.3 Επιτήρηση και έλεγχος προστατευτικού εξοπλισμού ^[19]

2.4 Μετασχηματιστές Ισχύος (Power Transformers)

Ο μετασχηματιστής ισχύος (Μ/Σ) μετατρέπει εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός επιπέδου τάσης σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια, της ίδιας συχνότητας, αλλά διαφορετικού επιπέδου τάσης (στις εγκαταστάσεις των πλοίων αναφερόμαστε κυρίως σε υποβιβασμό τάσης).

2.4.1 Αρχή λειτουργίας: δύο τυλίγματα που αποτελούνται από δύο κυλινδρικά, ομοαξονικά πηνία, τυλίγονται γύρω από έναν σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα τυλίγματα αυτά δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η μόνη σύζευξη που υπάρχει ανάμεσά τους είναι η μαγνητική ροή πεδίου Φ που κυκλοφορεί στο εσωτερικό του πυρήνα. Το ένα από τα τυλίγματα συνδέεται με μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης V_1 (πρωτεύον, 1^{ov}), και στο άλλο τυλίγμα (δευτερεύον, 2^{ov}) επάγεται τάση V_2 ανάλογη με τον λόγο (α) των σπειρών του πρωτεύοντος N_1 και δευτερεύοντος N_2 τυλίγματος, δηλαδή:

$$V_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}, V_2 = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (2.14)$$

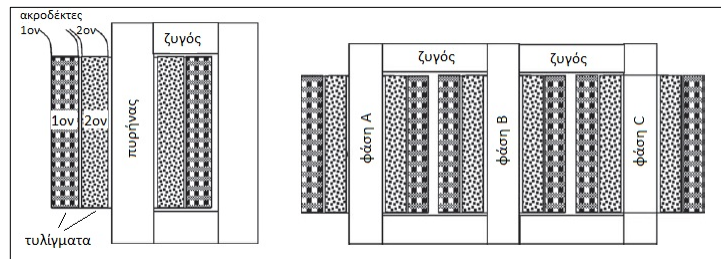
Αν στα άκρα του δευτερεύοντος πηνίου συνδεθεί κάποιο φορτίο τότε περνάει ρεύμα από τον μετασχηματιστή προς το φορτίο. Για τον ιδανικό Μ/Σ, λόγω διατήρησης της ενέργειας, το ρεύμα θα ήταν ίσο με:

$$I_2 = \alpha \cdot I_1, \text{ αφού θα ίσχυε } P_1 = V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 = P_2.$$

Στην πράξη, το ρεύμα του δευτερεύοντος είναι μικρότερο από αυτό που ορίζει ο λόγος μετασχηματισμού λόγω απωλειών στα τυλίγματα και στον πυρήνα. Οι πιο βασικές από αυτές τις απώλειες είναι:

2.4.2 Ισοδύναμο κύκλωμα/απώλειες

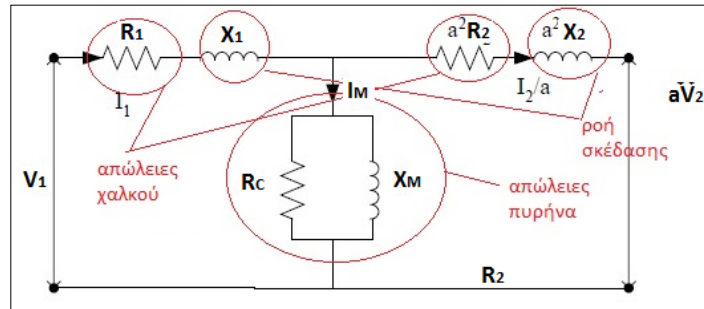
- **Απώλειες χαλκού (Joule).** Πρόκειται για θερμικές απώλειες (I^2R) στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του Μ/Σ και είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ρεύματος στα τυλίγματά του.
- **Απώλειες δινορρευμάτων.** Είναι θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του Μ/Σ.
- **Απώλειες υστέρησης.** Αυτές έχουν να κάνουν με την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων στο εσωτερικό του πυρήνα η οποία συμβαίνει σε κάθε ημιπερίοδο της τάσης εισόδου. Η μεταβολή τους με το χρόνο είναι μια πολύπλοκη μη γραμμική συνάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται στο Μ/Σ.
- **Ροή σκέδασης.** Πρόκειται για τις μαγνητικές ροές που ξεφεύγουν από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει και εμφανίζονται μόνο στο ένα από τα δύο τυλίγματα. Αυτές οι ροές παράγουν τις αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων του πυρήνα που πρέπει να ληφθούν υπόψιν στο ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ.



Σχ. 2.25 Τομή μονοφασικού και τριφασικού μετασχηματιστή

Για το (Σχ. 2.43) που αναπαριστά το ηλεκτρικό ισοδύναμο του πραγματικού Μ/Σ έχουμε τα ξής μεγέθη:

- R_1 : αντίσταση τυλίγματος στο 1^ο, R_2 : αντίσταση τυλίγματος στο 2^ο
- X_1 : αντίδραση σκέδασης στο 1^ο (leakage reactance), αντιστοιχεί στην αυτεπαγωγή του ίδιου του τυλίγματος, X_2 : αντίδραση σκέδασης στο 2^ο



Σχ. 2.26 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή ανηγμένο στο 1^ο (απώλειες)

Ο εγκάρσιος κλάδος, μοντελοποιεί τις απώλειες ισχύος πυρήνα και τη μείωση της ροής στο 2^ο

- I_m : ρεύμα μαγνήτισης $I_2 = I_1 - I_m$
- X_m : αντίδραση μαγνήτισης (magnetizing reactance),
- R_c : αντίσταση που αντιπροσωπεύει τις απώλειες ισχύος πυρήνα.

Ορίζεται ο **βαθμός απόδοσης**:

$$n = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{απωλειών}}} \quad (2.15)$$

Γενικά ο βαθμός απόδοσης είναι πολύ υψηλός (της τάξης του 98%), ανεξάρτητα του επιπέδου φόρτισης.

2.4.3 Βασικά ονομαστικά ηλεκτρικά μεγέθη:

Τα βασικά μεγέθη που αναγράφονται στην ονομαστική πινακίδα του είναι τα εξής:

- ονομαστική φαινόμενη ισχύς ή ισχύς διέλευσης (για συγκεκριμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος).
- αριθμός φάσεων και ζεύξη πρωτεύοντος δευτερεύοντος (πχ Δ-Δ, Δ-Y)
- ονομαστική τάση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. (στην λειτουργία χωρίς φορτίο).
- λήψεις (taps), (η δυνατότητα αλλαγής της τάσης του πρωτεύοντος, με τροποποίηση του χρησιμοποιούμενου ποσοστού των τυλιγμάτων του, πχ για 440/220 V Μ/Σ, δυνατότητα λήψης σε 450, 440, 430 V)
- ονομαστικά ρεύματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος
- ονομαστική συχνότητα.
- απώλειες (Watt) στη λειτουργία χωρίς φορτίο και σε πλήρες φορτίο
- τάση βραχυκύκλωσης % ή α.μ. (είναι η τάση του πρωτεύοντος ενός Μ/Σ για την οποία έχουμε, με βραχυκυκλωμένο δευτερεύον, ονομαστικό ρεύμα στην

θερμοκρασία που προδιαγράφεται. Αυτή ανάγεται στην ονομαστική τάση του πρωτεύοντος οπότε έχουμε την ονομαστική τάση βραχυκύκλωσης σε % ή ανα μονάδα)

- ωμική και επαγωγική συνιστώσα τάσης βραχυκύκλωσης %

Επίσης αναγράφεται ο τύπος του πυρήνα του Μ/Σ, ο τρόπος ψύξης, η κλάση της μόνωσης των τυλιγμάτων του καθώς και ο βαθμός προστασίας (IP) του περιβλήματος

2.4.4 Μετασχηματιστής ξηρού τύπου

Στις εγκαταστάσεις των πλοίων, όπου ελλοχεύει ο κίνδυνος πυρκαγιάς, χρησιμοποιούνται Μ/Σ ξηρού τύπου (dry-type transformers), δηλαδή Μ/Σ που δεν έχουν ως ψυκτικό μέσο δοχείο λαδιού αλλά η ψύξη τους γίνεται με τη φυσική κυκλοφορία του αέρα. Για την μόνωση του Μ/Σ χρησιμοποιείται χυτή ρητίνη όπου μονώνονται τα τυλίγματα του δευτερεύοντος και του πρωτεύοντος με ειδική επεξεργασία ώστε να προκύψει κλάση μόνωσης F (άκαυστη). Η μόνωση χυτο-ρυτίνης έχει καλύτερες μονωτικές ιδιότητες από τις μονωτικές ιδιότητες του ελαίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι αποστάσεις των τυλιγμάτων του 1^{ov} και του 2^{ov}, καθώς και των ακροδεκτών, να είναι μικρότερες και γενικά το μέγεθος του Μ/Σ ξηρού τύπου να είναι μικρότερο. Όλα τα παραπάνω αυξάνουν το κόστος αυτού του τύπου Μ/Σ.

2.4.5 Κανονισμοί και καλή πρακτική για Μ/Σ ισχύος

Οι Μ/Σ ισχύος πρέπει να εγκαθίστανται σε σημεία με εύκολη πρόσβαση και ο χώρος να είναι επαρκώς αεριζόμενος. Όλοι οι Μ/Σ πρέπει να έχουν ξεχωριστά τυλίγματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Υπό ωμικό φορτίο, η απόκλιση της τάσης μεταξύ κενού φορτίου και πλήρους φορτίου δεν πρέπει να ξεπερνά το 5%. Τα μέρη των καλυμμάτων τους με θερμοκρασία πάνω από 80°C, θα πρέπει να προστατεύονται για τυχόν ακούσια επαφή. Σε περίπτωση παράλληλης λειτουργίας Μ/Σ, θα πρέπει η φόρτιση του καθενός να μην ξεπερνά το 10% του ονομαστικού ρεύματος αναλογικής κατανομής. Επίσης οι Μ/Σ θα πρέπει να προστατεύονται από βραχυκυκλώματα και υπερφορτίσεις. Ο διακόπτης προστασίας θα πρέπει να υπάρχει στην πλευρά του πρωτεύοντος τυλιγματος, ενώ σε περίπτωση ανάδρασης θα πρέπει να υπάρχει διακόπτης και στο δευτερεύον. Όσον αφορά τη μόνωση του Μ/Σ, αυτή θα πρέπει να είναι τουλάχιστον: 5 ΜΩ μεταξύ πρωτευόντων και δευτερευόντων τυλιγμάτων και 2 ΜΩ για την υπόλοιπη μόνωση.

2.4.6 Διαστασιολόγηση

Η διαστασιολόγηση του Μ/Σ ισχύος (σε ονομαστικά KVA) καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις σε μόνιμη και διακοπτόμενη λειτουργία των φορτίων που θα τροφοδοτήσουν όπως αυτά προκύπτουν από τη μελέτη του ηλεκτρικού ισολογισμού. Επειδή συνήθως τροφοδοτούν φορτία με ηλεκτρονικά ισχύος, όπως ο εξοπλισμός ναυσιπλοΐας και επικοινωνιών, επιπλέον διορθωτικοί συντελεστές για την προστασία τους από υπερθέρμανση που προκαλεί το πλούσιο αρμονικό περιεχόμενο των καταναλωτών, πρέπει να συνυπολογίζονται. Επίσης καλή πρακτική αποτελεί να υπάρχει ένα περιθώριο ισχύος της τάξης του 30% για μελλοντική επέκταση του δικτύου. Τα πρότυπα που πρέπει να ακολουθούνται σε ότι αφορά τα ονομαστικά τους χαρακτηριστικά (ισχύς, τάσεις, συχνότητα), την κατασκευή τους και τη θερμική επάρκεια μόνωσης υπό συνθήκες βραχυκυκλώματος καθορίζονται στα πρότυπα IEC 60092-303 και IEC 60076. Η συμμόρφωση των παραπάνω προτύπων για θαλάσσιες εγκαταστάσεις γίνεται σύμφωνα με τους αντίστοιχους κανονισμούς των νηογυμνώνων.

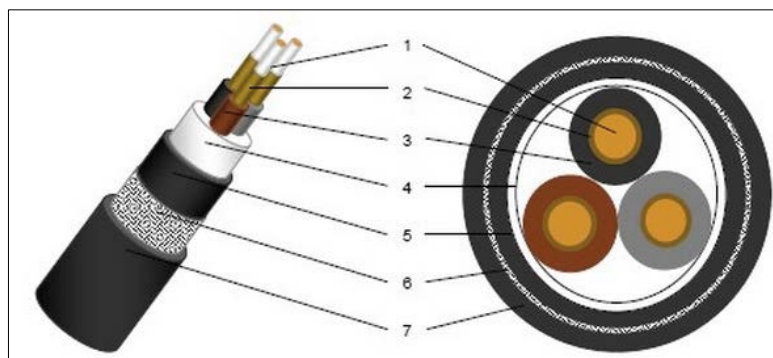
2.5 Καλώδια (Cables)

Η επιλογή της κατάλληλης καλωδίωσης κάνει εφικτή την μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος από το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος στα φορτία, με ασφάλεια (από υπερθερμάνσεις) και με τη μικρότερη δυνατή απώλεια ισχύος. Υπάρχουν διάφοροι τύποι καλωδίων που χρησιμοποιούνται που χρησιμοποιούνται για θαλάσσιες εφαρμογές. Οι τύποι καθώς και ο τρόπος εγκατάστασης τους περιγράφονται αναλυτικά σε πρότυπα της IEC και η επιλογή τους γίνεται ανάλογα με τη σχεδίαση του ηλεκτρικού συστήματος διανομής, τον τύπο του καταναλωτή που εξυπηρετούν και την διαδρομή τους σε χαρακτηρισμένες ως “επικίνδυνες περιοχές”. Κατά κανόνα, όλοι οι τύποι, πληρούν σε κάποιο βαθμό, απαιτήσεις που έχουν να κάνουν με τις συνθήκες που επικρατούν σε ένα βιομηχανικό δίκτυο, όπως του πλοίου.

2.5.1 Απαιτήσεις καλωδίωσης για θαλάσσιες εγκαταστάσεις:

- απαιτήσεις χαμηλής τοξικότητας (low toxicity, halogen free),
- απαιτήσεις χαμηλών εκπομπών καπνού (low smoke),
- απαιτήσεις αντοχής σε πυρκαγιά (fire resistant) και ικανότητα αυτόσβεσης (flame retardant).

Επίσης τα καλώδια πρέπει να είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να αντέχουν σε μηχανικές καταπονήσεις (vibrations) αλλά και στις μέγιστες θερμοκρασίες για μόνιμη (continuous rating) ή διακοπτόμενη (intermittent rating) λειτουργία ή για μια μεταβατική κατάσταση (πχ βραχυκύκλωμα, εκκίνηση κινητήρα).



Σχ. 2.27 Τριπολικό καλώδιο ισχύος χαμηλής τάσης 0,6/1kV με θωράκιση

2.5.2 Μέρη καλωδίου ισχύος

Τα καλώδια (ισχύος) αποτελούνται κυρίως από τα εξής μέρη Σχ. 2.44 Τριπολικό καλώδιο ισχύος χαμηλής τάσης 0,6/1kV με θωράκιση(Σχ. 2.44) :

- **Αγωγός (conductor)**, (1), ο οποίος κατασκευάζεται από χαλκό ή αλουμίνιο (σπάνια). Ο χαλκός έχει υψηλή αγωγιμότητα και καλή μηχανική αντοχή με κατάλληλη κατεργασία. Βασικό τεχνικό μειονέκτημά του είναι το βάρος του. Το αλουμίνιο είναι κατώτερο του χαλκού σε αγωγιμότητα και αντοχή, αλλά είναι φθηνότερο και πολύ ελαφρύτερο. Προτιμώνται οι **πολύκλωνοι** αγωγοί, συνεστραμμένοι (stranded) γιατί για την ίδια διατομή είναι πιο εύκαμπτοι. Επίσης για λόγους οικονομίας και ευκολίας κατά την εγκατάσταση, για ένα τριφασικό ΙΤ δίκτυο, με μικρά μήκη αγωγών, όπως αυτό του πλοίου, προτιμώνται τα **τριπολικά** (three-core) καλώδια (τρεις αγωγοί, φάσεις) από τα μονοπολικά (one core) όπου θα

χρειάζονταν τρία καλώδια, ένα για κάθε φάση. Βέβαια τα τελευταία πλεονεκτούν στο θέμα της συντήρησης και στη μεταφερόμενη ενέργεια ανά μονάδα βάρους.

- **Μόνωση (insulation)**, (2). Το είδος του μονωτικού και το πάχος του προσδιορίζει την ηλεκτρική αντοχή του καλωδίου σε τάση, αλλά και την επιτρεπόμενη ένταση του ρεύματος φόρτισης του αγωγού, γιατί αυτή είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας στην οποία αντέχει το μονωτικό. Το είδος της μόνωσης καθορίζει τόσο τη μέγιστη συνεχή όσο και την παροδικά επιτρεπόμενη θερμοκρασία. Η εκλογή της μόνωσης γίνεται ανάλογα με την εφαρμογή, λαμβάνοντας υπόψη τις ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες. Συνηθέστεροι τύποι μόνωσης για τα ναυτικού τύπου καλώδια είναι το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), το ελαστικό σιλικόνης (silicon rubber), το ελαστικό αιθυλενίου-προπυλενίου (ERP) και το δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (XLPE). Το τελευταίο συνδυάζει χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες, καλή μηχανική και θερμική αντοχή για το κόστος του, και είναι αυτό που συναντούμε συχνότερα τόσο για καλωδιώσεις βαρέως τύπου σε χαμηλές τάσεις (0.6-1kV) όσο και σε υψηλές τάσεις (6-10kV).
- **Θωράκιση (shield/sheath)**, (4/6), περίβλημα από μόλυβδο ή αλουμίνιο ή από χάλκινες ταινίες. Κανονικά η θωράκιση έχει την έννοια της προστασίας από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMC) για τα καλώδια που μεταφέρουν πληροφορία. Στα καλώδια ισχύος, υψηλής τάσης, χρησιμοποιείται αγωγίμη θωράκιση (conductive shield) που περιβάλλει κάθε μονωτικό περίβλημα κάθε αγωγού ώστε να εξισορροπηθεί η καταπόνηση της μόνωσης (equalizing electrical stress) και τα άκρα της γειώνονται ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος να τεθούν υπό τάση τα περί το καλώδιο τμήματα της εγκατάστασης. Επίσης αποτελεί ένα επιπλέον προστατευτικό επίστρωμα κατά της εισβολής υγρασίας ή άλλων χημικών επιδράσεων προς τη μόνωση.
- **Οπλισμός (armor)**, (5), χρησιμοποιείται για τη μηχανική ενίσχυση του καλωδίου και συνήθως αποτελείται από χαλύβδινες ταινίες ή χαλύβδινα σύρματα.
- **Εξωτερικός μανδύας**, (7), αποτελείται από κάποιο πολυμερές και πέρα από τη προστασία έναντι διάβρωσης και άλλων χημικών επιδράσεων εξασφαλίζει τις ιδιότητες του καλωδίου σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Για την κατηγοριοποίησή του, ένα καλώδιο για ναυτική χρήση κωδικοποιείται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα¹:

Σειρές καλωδίων (0.6/1kV) : CJV82/NSA, CJV92/NSA, CJPF86/NSC, CJPF96/NSC, CJPJ95/NSC CJPJ85/NSC:

¹Στοιχεία από κατασκευαστή καλωδίων Jiangsu Jiangyang Marine CableCo.Ltd

Construction	Code Letter	Material or requirements
Shipboard power cable	C	-
Conductor (1)	-	Stranded copper wire
Insulation (2)	J	Cross-linked polyethylene (XLPE)
Filler and tape (3)	-	Non-hygroscopic material
Inner sheath (4)	PJ or PF or V	Thermoset polyolefin (XLPO) or Thermoplastic polyolefin (PO) or Polyvinyl chloride (PVC)
Screen or Armor (5)	8 or 9	Tinned copper wire braided or Galvanized steel wire braided
Outer sheath (6)	5 or 6	Thermoset polyolefin (XLPO) or Thermoplastic polyolefin (PO)
Fire resistant	N	Fire resistant
Flame retardant	S	Bunched flame retardant
Low smoke and halogen free	C	Low smoke, halogen free and low toxicity
Low smoke and halogen free	A	Smoke, halogen and toxicity

Πιν. 2.4 Ναυτικού τύπου καλώδιο ισχύος, κωδικοποίηση

Πρότυπα που εφαρμόζονται:

Construction	IEC60092-353	Smoke Density	IEC61034
Conductor	IEC60228 Class 2, Class 5	Halogen Index	IEC60754
Insulation	IEC60092-351	Fire resistant	IEC60331-1/2/21
Sheathed	IEC60092-359	Flame Retardant	IEC60332-3-22

Πιν. 2.5 Ναυτικού τύπου καλώδιο ισχύος, πρότυπα

2.5.3 Εγκατάσταση καλωδίων

Η εγκατάσταση των καλωδίων πρέπει να γίνεται πάντα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ασφαλείας σε σχέση με το διαμέρισμα που διατρέχουν. Για να αποφευχθεί η βλάβη τους πρέπει κατά την εγκατάσταση να υπάρχει η **ελάχιστη μηχανική καταπόνηση** λόγω κάμψης τους. Η ακτίνα κάμψης των καλωδίων χαμηλής τάσης (0.6-1kV) δε πρέπει να είναι μικρότερη ,εμπειρικά, του εξαπλάσιου της εξωτερικής διαμέτρου τους (παράρτημα 7.2).

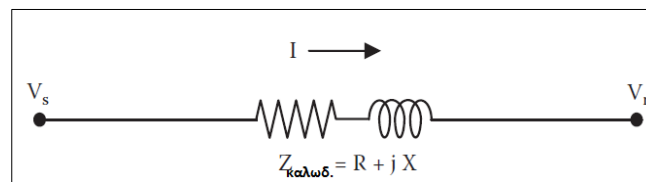
Σε ότι αφορά την τοποθέτηση τους στο μηχανοστάσιο, μονά καλώδια ή μικρή ποσότητα καλωδίων, τοποθετούνται στα τοιχώματα με απλές συγκολλημένες στηρίξεις (welded steel strips), για μεγαλύτερες ομάδες καλωδίων χρησιμοποιούνται σχάρες (ladder type trays) γαλβανισμένου ή ανοξείδωτου χάλυβα. Γενικά η ομαδοποίησή τους πρέπει να είναι με τρόπο ώστε να ευνοείται η απαγωγή θερμότητας και πάντα πρέπει να διαχωρίζονται τα χαμηλής με τα υψηλής τάσης καλώδια. Τα καλώδια που διατρέχουν χώρους δεξαμενών ή στο κύριο κατάστρωμα, πρέπει να τοποθετούνται μέσα σε ειδικές σωληνώσεις για το σκοπό αυτό (pipe, cable tunnels). Αν αποτελούν μέρος ενός ασφαλούς κυκλώματος (intrinsically safe, IS), δηλαδή αν η ενέργεια που μεταφέρουν δεν είναι ικανή σε περίπτωση βλάβης να προκαλέσει σπινθηρισμό, ο εξωτερικός τους μανδύας είναι χρώματος μπλε και η ομαδοποίησή τους ξεχωριστή από τα άλλα καλώδια. Σε ανοίγματα φρακτών και καταστρωμάτων που περνούν τα καλώδια, πρέπει να εξασφαλίζεται η παθητική πυροπροστασία των διαμερισμάτων, (κλάση A-60), ή (αν απαιτείται) και η στεγανή

ακεραιότητα. Συνήθως χρησιμοποιούνται πυροφραγμοί MCT (multiple cable transit), ή στυπειοθλίπτες, αν τα καλώδια βρίσκονται μέσα σε σωληνώσεις.

2.5.4 Ικανότητα φόρτισης/επιλογή καλωδίου

Η ικανότητα φόρτισης του καλωδίου [Ampere], είναι συνάρτηση της διατομής των αγωγών, του τύπου της μόνωσης, των περιβαλλοντικών συνθηκών, των συνθηκών εγκατάστασης κα. Στο μετρικό σύστημα επιλέγεται βάσει της διατομής του σε mm^2 (ανά φάση) ενώ στις Η.Π.Α. χρησιμοποιείται το λογαριθμικό μέγεθος $AWG = 20 \log \left(\frac{0.325}{d_{inch}} \right)$, όπου d η διάμετρος σε ίντσες. Υπάρχουν τυποποιημένοι πίνακες για την επιλογή της κατάλληλης διατομής αγωγού, η διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα (4.4).

2.5.5 Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα



Συ. 2.28 Ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση

Το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του καλωδίου αναπαρίσταται με μία αντίσταση R και μια επαγωγή X συνδεδεμένες σε σειρά, όπου:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \text{ [Ohm]} \quad (2.16)$$

ρ : η ειδική αντίσταση του υλικού σε [Ohm/m] \rightarrow για το χαλκό $\rho \cong 1.7 \cdot 10^{-8}$ [Ohm/m] στους 20°C

l : το μήκος του αγωγού [m]

A : το εμβαδό της κάθετης διατομής [m^2]

Η τιμή αυτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία όπως φαίνεται από την (2.32):

$$R = R_0 [1 + a(T - T_0)] \quad (2.17)$$

όπου a ο θερμοκρασιακός συντελεστής ανά $^\circ\text{C}$ \rightarrow για χαλκό $a=0.0039$, και οι δείκτες 0 υποδηλώνουν την αρχική αντίσταση και θερμοκρασία.

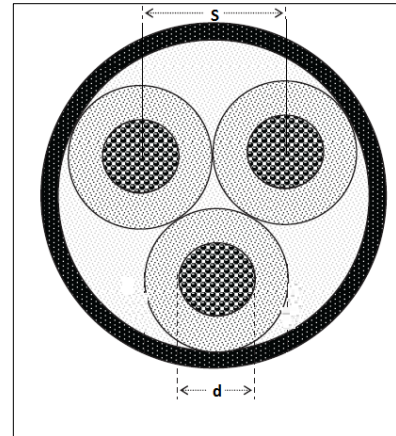
$$X = 2\pi fL, \quad \text{[Ohm/km]} \quad (2.18)$$

όπου:

$$L = \left(k + 0.2 \log \frac{2S}{d} \right), \text{ [mH/km]}$$

Με k σταθερά που εξαρτάται από τους κλώνους του αγωγού ($\sim 0.05 - 0.07$), f τη συχνότητα του δικτύου, S την απόσταση των κέντρων των αγωγών και d τη διάμετρο του αγωγού σε mm .

Ο κατασκευαστής ανάλογα τον τύπο του καλωδίου και τις διατομές δίνει τυποποιημένους πίνακες για R και X σε μια θερμοκρασία αναφοράς.



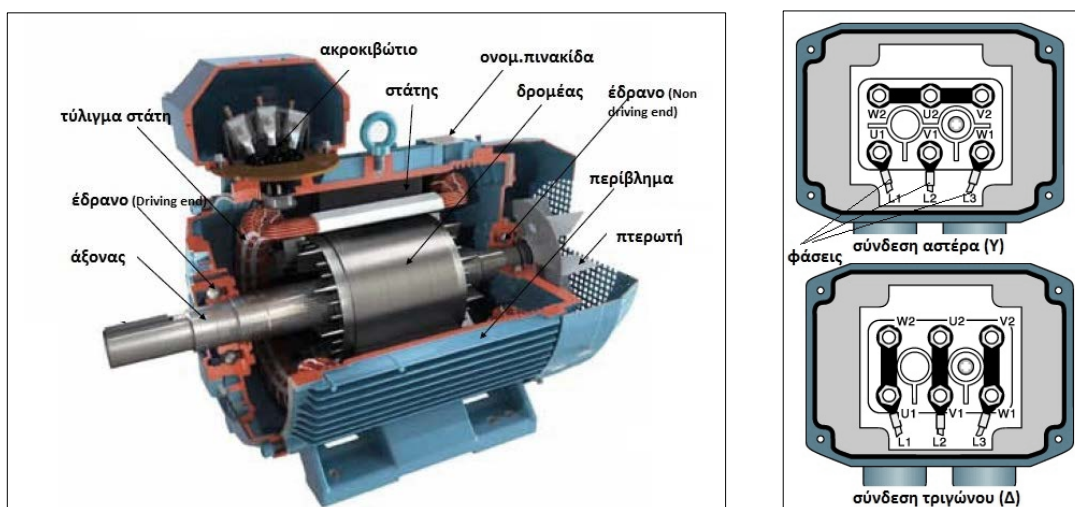
Σχ. 2.29 Διατομή τριπολικού καλωδίου

2.6 Επαγωγικοί Κινητήρες (Induction Motors)

Η μηχανική ισχύς για τις αντλίες, τους συμπιεστές, τους ανεμιστήρες και γενικότερα για τα περισσότερα βοηθητικά μηχανήματα του πλοίου παρέχεται από τους ηλεκτρικούς κινητήρες, στη μεγάλη τους πλειοψηφία αυτοί είναι τριφασικοί ασύγχρονοι (επαγωγικοί) κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα (ονομάζονται και κινητήρες κλωβού- squirrel-cage rotors). Οι κινητήρες κλωβού λόγω της απλής κατασκευής τους είναι οικονομικοί, πρακτικά χρειάζονται ελάχιστη συντήρηση, επομένως είναι λογικό να έχουν επικρατήσει στη ναυτική βιομηχανία, ειδικά για εφαρμογές που απαιτείται σταθερή ταχύτητα περιστροφής και μεταβλητή ροπή στρέψης.

2.6.1 Κατασκευαστικά στοιχεία

Μία ασύγχρονη μηχανή αποτελείται από δύο μέρη, ένα ακίνητο που λέγεται στάτης (stator) και ένα κινητό που λέγεται δρομέας (rotor) και βρίσκεται στο εσωτερικό της μηχανής. Ο στάτης φέρει στο εσωτερικό του μέρος αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετείται διαδοχικά ανά 120 μοίρες το τριφασικό τύλιγμα, τα έξι άκρα των τριών φάσεων του οποίου καταλήγουν σε έξι ακροδέκτες στο ακροκιβώτιο (terminal box) όπου συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο. Ο δρομέας δε συνδέεται ηλεκτρικά με άλλο μέρος του κινητήρα. Το ρεύμα που κυκλοφορεί σε αυτόν είναι από επαγωγή λόγω του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη. Αποτελείται από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους, τα οποία προσαρμόζονται πάνω στον άξονα. Τα ελάσματα φέρουν οδοντώσεις, οι οποίες σχηματίζουν αυλάκια κατά τη διεύθυνση της γενέτειρας ή με κάποια λοξότητα. Η γεωμετρική αυτή μορφή των αυλακώσεων καθορίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά του κινητήρα, δηλαδή τη χαρακτηριστική ταχύτητας- ροπής. Στα αυλάκια αυτά τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο, τα άκρα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με δακτύλιους βραχυκύκλωσης (shorting rings). Στους επαγωγικούς κινητήρες μικρής ισχύος, στο τύλιγμα του δρομέα χρησιμοποιείται αλουμίνιο αντί χαλκού. Στην περίπτωση αυτή, οι δακτύλιοι βραχυκύκλωσης και τα πτερύγια εξαερισμού χυτεύονται μαζί με τους αγωγούς του κλωβού. Για τη βελτίωση των συνθηκών εκκίνησης (χαμηλότερης έντασης ρεύματος εκκίνησης, υψηλότερης αρχικής ροπής) κατασκευάζεται τύλιγμα διπλού κλωβού ή με βαθιές αυλακώσεις. Στην παρακάτω φωτογραφία διακρίνονται τα κύρια κατασκευαστικά στοιχεία του κινητήρα κλωβού.



Σχ. 2.30 Κύρια κατασκευαστικά στοιχεία ηλεκτρικού κινητήρα κλωβού και σύνδεση με το δίκτυο(ακροκιβώτιο)

2.6.1.1 Περιβλήμα

Η κατασκευή του περιβλήματος των κινητήρων υλοποιείται ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν. Διακρίνονται οι εξής τύποι:

- αδιάβροχοι κινητήρες (**drip-proof**). Αυτοί οι κινητήρες προστατεύονται από υγρά και σωματίδια που μπορεί να πέσουν κατακόρυφα και σε γωνία $\pm 30\%$. Οι κινητήρες αυτοί είναι οι συνήθως χρησιμοποιούμενοι.
- τελείως αδιάβροχοι κινητήρες (**splash-proof**). Αυτοί οι κινητήρες προστατεύονται από υγρά και σωματίδια που μπορεί να πέσουν κατακόρυφα και σε γωνία $\pm 100\%$.
- ερμητικά κλειστοί κινητήρες, χωρίς ανεμισμό (**totally enclosed, non-ventilated, TE**). Αυτοί οι κινητήρες δεν επιτρέπουν κίνηση αέρα προς και από το περιβάλλον και χρησιμοποιούνται σε ιδιαίτερα υγρό ή σκονισμένο περιβάλλον.
- ερμητικά κλειστοί κινητήρες με ανεμισμό (**totally enclosed, fan-cooled, TEFC**). Αυτοί οι κινητήρες επίσης δεν επιτρέπουν κίνηση αέρα προς και από το περιβάλλον και χρησιμοποιούνται σε ιδιαίτερα υγρό ή σκονισμένο περιβάλλον. Είναι γενικά μέσης ή υψηλής ισχύος κινητήρες και ψύχονται εξωτερικά.²
- κινητήρες αντεκρηκτικού-αντιφλογικού τύπου (**explosion-proof motors, EX**). Αυτοί οι κινητήρες χρησιμοποιούνται σε εκρηκτικά ή ιδιαίτερα εύφλεκτα περιβάλλοντα, όπου η έκρηξη ή η πυρκαγιά μπορεί να προκληθεί από βραχυκύκλωμα ή σπινθηρισμό στα τυλίγματα τους. Είναι ερμητικά κλεισμένοι και μπορούν να αντέξουν μεγάλες (εκρηκτικές) πιέσεις στα τοιχώματά τους.

2.6.2 Αρχή Λειτουργίας

Στο στάτη της μηχανής, μέσω των ακροδεκτών του, διαρρέεται τριφασικό σύστημα ρευμάτων το οποίο παράγει το μαγνητικό πεδίο του στάτη (B_s). Αυτό περιστρέφεται με την ονομαζόμενη σύγχρονη ταχύτητα (n_s) η οποία είναι:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p/2} [rpm] \quad (2.19)$$

, όπου f η ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου [Hz] και p ο αριθμός των πόλων. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη, τέμνει το τυλίγμα του δρομέα και επάγει ΗΕΔ σε αυτό. Καθώς το τυλίγμα του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένο στα άκρα, κυκλοφορεί σε αυτό ρεύμα επαγωγής. Με τη σειρά του, το ρεύμα που διαρρέει το δρομέα προκαλεί μαγνητικό πεδίο (B_r), με συνέπεια να επάγεται ροπή ίση με $T_{ind} = k(B_r \times B_s)$, με φορά ίδια με τη φορά περιστροφής του B_s . Επομένως αν ο δρομέας είναι αρχικά ακίνητος, λόγω της ροπής θα επιταχύνει στη ταχύτητα n_r . Από τη στιγμή που η τάση στους αγωγούς του δρομέα οφείλεται στη σχετική κίνησή τους ως προς το πεδίο του στάτη υπάρχει ένα άνω όριο στην ταχύτητα με την οποία μπορεί να περιστρέφεται, αυτό το όριο είναι η σύγχρονη ταχύτητα n_s . Αν ο δρομέας περιστρεφόταν με ταχύτητα ίση με τη n_s η επαγόμενη τάση θα ήταν μηδενική με συνέπεια να μη διαρρέονται από ρεύμα οι αγωγοί του και να μην αναπτύσσεται ροπή. Για αυτό το λόγο ένας επαγωγικός κινητήρας περιστρέφεται με

² Οι ερμητικά κλειστοί κινητήρες πρέπει να προστατεύονται όταν δε λειτουργούν, από θερμαντικά στοιχεία (space heaters), για αποφυγή φαινομένων διάβρωσης λόγω υγραποίησης των υδρατμών του "φυλακισμένου" αέρα.

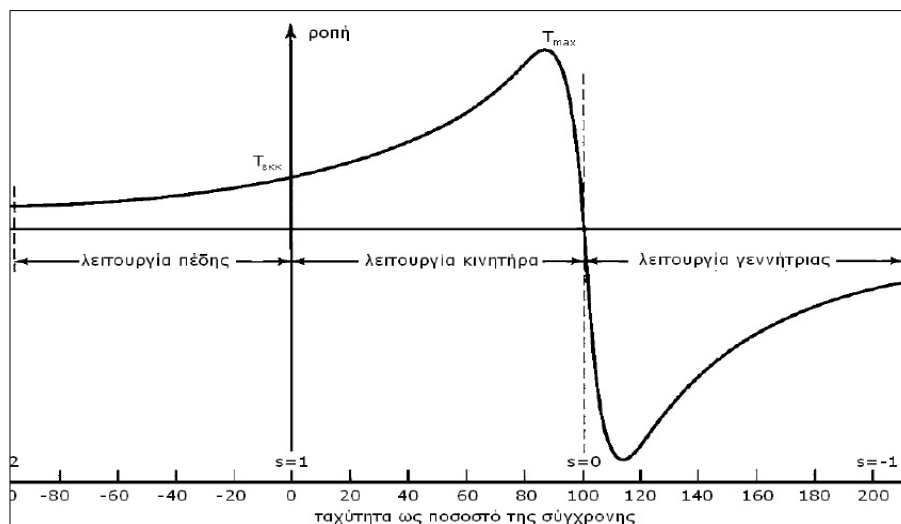
ταχύτητα κοντά αλλά ποτέ ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα. Η διαφορά αυτή των ταχυτήτων λέγεται ολίσθηση (slip) και ορίζεται ως ένα αδιάστατο μέγεθος ίσο με

$$s = \frac{n_{slip}}{n_s} = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.20)$$

Μέσω της ολίσθησης η ταχύτητα περιστροφής [rad/sec] και η συχνότητα περιστροφής του δρομέα μπορεί να εκφραστεί ως ποσοστό της των αντίστοιχων μεγεθών του στάτη,

$$\omega_r = (1 - s)\omega_s = (1 - s) \frac{4\pi f_s}{p} \quad \text{ή} \quad f_r = (1 - s)f_s \quad (2.21)$$

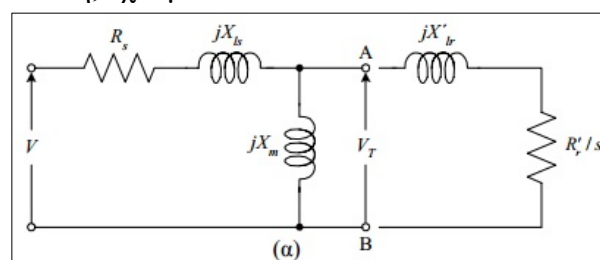
Αντίστοιχα, μπορούμε να ορίσουμε και την συχνότητα ολίσθησης ως $f_{slip} = sf_s$. Σε κανονική λειτουργία συνήθως η ολίσθηση είναι της τάξης του 1-5% της σύγχρονης ταχύτητας. Αν ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος τότε η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα. Για $n_r = n_s$, η ολίσθηση είναι μηδενική ενώ αν ο δρομέας στραφεί πιο γρήγορα από το στρεφόμενο πεδίο, τότε η ολίσθηση γίνεται αρνητική και ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια. Αν γίνει αντιστροφή δύο φάσεων στους ακροδέκτες κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μηχανής, το μαγνητικό πεδίο του στάτη αλλάζει φορά ο κινητήρας λειτουργεί στην περιοχή της πέδης.



Σχ. 2.31 Χαρ/κή ροπής-ολίσθησης επαγωγικού κινητήρα

2.6.3 Ισοδύναμο Κύκλωμα-Ροπή

Η πλήρης ανάλυση του ηλεκτρικού ισοδύναμου κυκλώματος του επαγωγικού κινητήρα περιγράφεται στο παράρτημα. Συνοπτικά, για το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα με τα χαρακτηριστικά μεγέθη του δρομέα ανηγμένα (') στη συχνότητα τροφοδοσίας του στάτη, έχουμε:



Σχ. 2.32 μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα (χωρίς απώλειες πυρήνα)

R_s : αντίσταση τυλίγματος στάτη (1-φάση)

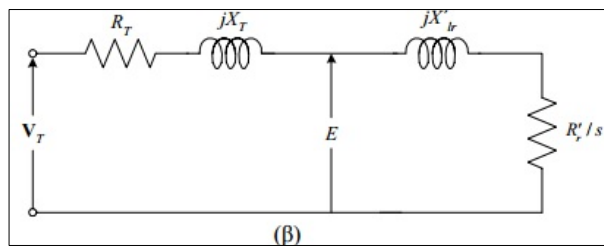
X_s : αντίδραση σκέδασης στάτη (leakage reactance), αντιστοιχεί στην αυτεπαγωγή του ίδιου του τυλίγματος του στάτη.

I_m : ρεύμα μαγνήτισης (έως και 40% του ρεύματος του στάτη I_1), $I_2 = I_1 - I_m$

X_m : αντίδραση μαγνήτισης (magnetizing reactance), τουλάχιστον 15 φορές μεγαλύτερη της αντίδρασης σκέδασης στάτη.

Τα υπόλοιπα μεγέθη με δείκτη "r", είναι τα αντίστοιχα μεγέθη του δρομέα.

Από το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα, αν λάβουμε υπόψιν ότι $X_s + X_m \gg R_s$ και $X_m \gg X_s$, η χρήση του θεωρήματος Thevenin, δίνει:



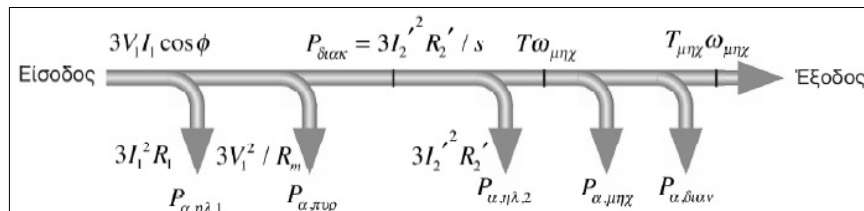
$$|V_T| = \frac{X_m}{X_1 + X_m} V \quad (2.22)$$

Η σχέση που μας δίνει τη συνάρτηση της ροπής είναι η εξής:

$$T = \frac{3V_T^2 R'_2}{\omega_s} \cdot \frac{1}{s \left(\left(R_T + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right)} \quad (2.23)$$

Όπου για slip=1 έχουμε την ροπή εκκίνησης.

2.6.4 Ροή Ισχύος-Απώλειες



Σχ. 2.33 Ροή ισχύος επαγωγικού κινητήρα (απώλειες)

- $P_{a,\eta\lambda 1}$: απώλειες χαλκού (θερμικές απώλειες) στο στάτη.
- $P_{a,\piυρ}$: απώλειες πυρήνα (ή απώλειες σιδήρου) που οφείλονται στα φαινόμενα υστέρησης και δινορρευμάτων που αναπτύσσονται στα σιδηρομαγνητικά υλικά των κινητήρων.
- $P_{a,\eta\lambda 2}$: απώλειες χαλκού στο δρομέα.
- $P_{a,\mu\eta\chi}$: μηχανικές απώλειες του κινητήρα που συνίστανται στις απώλειες λόγω τριβών στα έδρανα και στις απώλειες εξερισμού.
- $P_{a,\deltaιαν}$: διανεμημένες απώλειες, περιλαμβάνουν όλες τις απώλειες που δε μπορούν να υπολογιστούν σε καμία από τις προηγούμενες κατηγορίες όπως πχ απώλειες δινορρευμάτων λόγω επιδερμικού φαινομένου. Κατά σύμβαση θεωρούνται ίσες με το 1% επί της ισχύος εξόδου του κινητήρα σε πλήρες φορτίο.

Για να προσδιοριστούν οι απώλειες του επαγωγικού κινητήρα (και οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος) πραγματοποιούνται τρία πειράματα: το πείραμα συνεχούς ρεύματος (dc test), το πείραμα κενού φορτίου (no-load test) και το πείραμα ακίνητου δρομέα (blocked rotor test).

Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα ισούται με: $n = \frac{P_{out}}{P_{in}}$, δηλαδή το λόγο της ωφέλιμης μηχανικής ισχύος εξόδου προς την ηλεκτρική ισχύ εισόδου. Ανάλογα του βαθμού απόδοσης στο ονομαστικό φορτίο, οι κινητήρες επαγωγής κατατάσσονται σε ενεργειακές κλάσεις (International Efficiency: IE1, IE2, IE3) σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60034-30.

2.6.5 Στοιχεία πινακίδας κινητήρα (Nameplate)

Τα στοιχεία της ονομαστικής πινακίδας προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για τα όρια, την περιοχή λειτουργίας και τα γενικά χαρακτηριστικά μιας ηλεκτρικής συσκευής. Τα στοιχεία που απαρτίζουν (κατά IEC) την ονομαστική πινακίδα ενός επαγωγικού κινητήρα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

Nameplate data:		
Motor type		Mass [kg]
Voltage [Vac]	Output [kW] :	Mounting
Frequency [Hz]	Duty	Insulation class ..
Nominal current [A] ...	Speed [min-1]:	Protection class ..
Power factor cos phi ...	Efficiency ...:	Cooling
Marine classification -	Amb.temp [°C] ..
Data from type test results, on an identical motor: (tested at: 440 Volt; 60Hz)		
Load %	125 100 75 50 25 0	Starting torque dol [%] :
Current [A]		Minimum torque [%] ...
Cos phi		Maximum torque [%] ...
Efficiency [%]		Starting current dol [%] :
Temp. rise surface [K]	Temp. rise winding [K]	
Winding resistance phase [Ohm] at 20 °C		
Moment of inertia J[kgm ²]		
Bearings DE/NDE		

Σχ. 2.34 Στοιχεία που πρέπει να καταγράφονται στην ονομαστική πινακίδα

Βλέπουμε πως μια πινακίδα μας δίνει πληροφορίες για γενικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά (πλαίσιο, σχεδίαση, βαθμός προστασίας περιβλήματος, ψύξη, τρόπος έδρασης και έδρανα), για τη μηχανική έξοδο (ονομαστική ισχύς-ροπή, ονομαστικές στροφές), για την ηλεκτρική είσοδο (φάσεις, τάση, συχνότητα, ονομαστικό ρεύμα, ρεύμα εκκίνησης, συντελεστή λειτουργίας), την απόδοση και την αξιοπιστία (βαθμός απόδοσης, κύκλος λειτουργίας, κλάση μόνωσης). Η ονομαστική πινακίδα παραθέτει τις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα όπως αυτές εγγυώνται από τον κατασκευαστή.

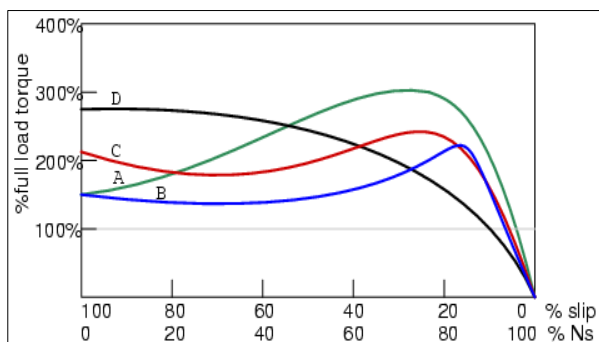
ENERGY EFFICIENT		FRAME	TYPE	DESIGN
XE		445T	P	B
DUTY MASTER A-C MOTOR				
IDENT. NO. P44G520A-G1-XJ		HP 150	VOLTS 460	
RPM 1785		AMPS 163		
AMB 40 °C		DUTY	CONT	
NEMA NOM. EFFICIENCY	96.2 %	HZ 60	ALTERNATE RATING	
GUARANTEED EFFICIENCY	95.8 %	S.F. 1.15	AMB °C	S.F.
POWER FACTOR	89.7	ENCL. TEFC	50	1.00
MAX. CORR. RVAR	17.5	PHASE 3	CODE G	INS. CLASS F
DRIVE END BEARING		90BC03X30X26		
OPP. D.E. BEARING		90BC03X30X26		

Σχ. 2.35 Ονομαστική πινακίδα

2.6.5.1 Κλάσεις NEMA

Ένας ηλεκτροκινητήρας που εξυπηρετεί μια φυγοκεντρική αντλία έχει διαφορετικές απαιτήσεις σε ροπή από έναν ηλεκτροκινητήρα που εξυπηρετεί ένα ανυψωτικό μηχάνημα ή μια διατρητική πρέσα. Η ανθιστάμενη ροπή που πρέπει να υπερνικήσει στη δεύτερη περίπτωση κατά την εκκίνηση είναι πολύ μεγαλύτερη, για αυτό κατασκευάζονται κινητήρες με διαφορετικές χαρακτηριστικές ροπής-στροφών. Στους κινητήρες κλωβού, οι

διαφορετικές χαρακτηριστικές επιτυγχάνονται με κατάλληλη σχεδίαση των αυλακώσεων του δρομέα και χρήση του επιδερμικού φαινομένου. Κατά NEMA, διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες (κλάσεις σχεδίασης), οι τυπικές χαρακτηριστικές τους φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Το διάγραμμα αυτό αποτελεί μέρος του διαγράμματος Σχ. 2.30 για τιμές ολίσθησης $0 < s < 1$.

Ως 100% ορίζεται η ροπή που ζητά το φορτίο στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (δηλαδή στην ονομαστική ολίσθηση). Ακολουθεί πίνακας με συνοπτικά χαρακτηριστικά κάθε κλάσης.

Σχ. 2.36 Χαρακτηριστικές ροπές ταχύτητας (κλάσεις NEMA)

	Κλάση A	Κλάση B	Κλάση C	Κλάση D
Τύπος	Γενικής χρήσης	Γενικής χρήσης	Υψηλής ροπής εκκίνησης	Πολύ υψηλής ροπής εκκίνησης
Ροπή Εκκίνησης	150% της ονομαστικής	150% της ονομαστικής	Περίπου 250% της ονομαστικής	<300% της ονομαστικής
Ρεύμα Εκκίνησης	800% του ονομαστικού	500%-600% του ονομαστικού		
Μέγιστη Ροπή	200%-300% της ονομαστικής	$\geq 200\%$ της ονομαστικής	Λίγο χαμηλότερη από την κλάση A	
Μέγιστη Ολίσθηση	<0.2	<0.2		Υψηλή, μπορεί να φτάσει το 1
Ονομαστική Ολίσθηση	<0.05 μικρότερη από ίδιου μεγέθους μηχανές κλάσεως B	Πρέπει να είναι <0.05 Συνήθως <0.03	<0.05, ψηλότερη από την κλάση B	Υψηλή, τυπικά 0.07 ως 0.11, μπορεί να φτάσει το 0.17
Εφαρμογές	Ανεμιστήρες, φυσητήρες, αντλίες, (φορτία μικρής αδράνειας)	Ανεμιστήρες, φυσητήρες, αντλίες, εργαλειομηχανές, μεγάλης ισχύος	Συμπιεστές, αντλίες, μάντες μεταφοράς	Εφαρμογές με πολύ υψηλή ροπή αδράνειας (πχ μηχανήματα καταστροφώματος)

Πιν. 2.6 Κλάσεις NEMA, σύνοψη χαρακτηριστικών

Όπως είδαμε και στην εξίσωση της ροπής (2.45), η μορφή της χαρακτηριστικής εξαρτάται από την αντίσταση του δρομέα και την ολική αντίδραση σκέδασης. Ένας κινητήρας με μεγάλη αντίσταση στο δρομέα, εμφανίζει τη μέγιστη ροπή σε μικρή ταχύτητα, έχει υψηλή ροπή εκκίνησης αλλά και υψηλές απώλειες λόγω μεγάλης ολίσθησης. Αντίθετα, με μικρή αντίσταση στο δρομέα παρουσιάζει μικρή ροπή εκκίνησης, μεγάλο ρεύμα εκκίνησης, αλλά και υψηλό βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία.

2.6.6 Βιομηχανικός έλεγχος

Το απλούστερο σύστημα ελέγχου ενός κινητήρα είναι ένας τριπολικός διακόπτης, μας επιτρέπει την χειροκίνητη εκκίνηση ή διακοπή λειτουργίας του κινητήρα. Προφανώς ένας τέτοιου είδους έλεγχος δεν είναι αρκετός. Με τον όρο βιομηχανικό έλεγχο εννοούμε όλες εκείνες τις διατάξεις αυτοματισμού που μας προσφέρουν επιπλέον έλεγχο του κινητήρα, δηλαδή την εκκίνησή του, τη ρύθμιση της ταχύτητάς του (αν επιθυμούμε να λειτουργεί και

σε ταχύτητες εκτός της ονομαστικής), την πέδηση ή την αναστροφή του, τη διακοπή λειτουργίας καθώς και τα κυκλώματα προστασίας. Όλα τα στοιχεία ελέγχου μαζί, αποτελούν τη μονάδα ελεγκτή (combination motor control unit). Συνήθως τοποθετούνται πολλές μονάδες μαζί που συγκροτούν το motor control center.

2.6.6.1 Εκκίνηση

Κατά την εκκίνηση του επαγωγικού κινητήρα έχουμε δύο μεταβατικά φαινόμενα. Ένα ηλεκτρικό μεταβατικό, το οποίο δημιουργείται από τη σύνδεση του τυλίγματος του στάτη στην τάση του δικτύου και ένα μηχανικό μεταβατικό φαινόμενο. Το πρώτο, διαρκεί λίγο, προκαλεί μεταβολές στη τάση λόγω του ότι εκ κατασκευής ο επαγωγικός κινητήρας απορροφά ρεύμα εκκίνησης πολλαπλάσιο του ονομαστικού του ενώ και ο συντελεστής ισχύος του είναι αρχικά χαμηλός με αποτέλεσμα να απορροφά μεγάλη ποσότητα άεργης ισχύος. Το δεύτερο διαρκεί τόσο διάστημα, όσο απαιτείται για την επιτάχυνση των στρεφομένων μαζών μέχρι το μόνιμο αριθμό στροφών. Ο τρόπος εκκίνησης του κινητήρα θα πρέπει να διασφαλίζει ότι δε θα προκαλείται ανεπίτρεπτη πτώση τάσης στο δίκτυο και ότι η ροπή εκκίνησης του κινητήρα $T_{M_{εκκ}}(\omega)$, θα είναι μεγαλύτερη από την ανθιστάμενη ροπή του φορτίου $T_L(\omega)$. Επίσης, ο χρόνος που θα διαρκέσει η εκκίνηση δε μας είναι αδιάφορος καθώς κατά τη διάρκεια της έχουμε υψηλές θερμικές απώλειες.

Ως γνωστό, από 2^ο Νόμο του Newton για περιστροφική κίνηση, η μεταβολή της στροφομής L του συστήματος των περιστρεφόμενων μαζών ισούται με τη ροπή που προκαλεί αυτή τη μεταβολή.

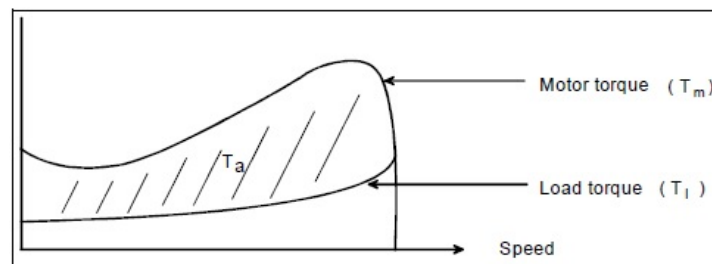
$$\frac{dL}{dt} = T \quad (2.24)$$

, με $L = J \cdot \omega$ όπου J η ροπή αδράνειας των μαζών.

Αν θεωρήσουμε ότι η ροπή αδράνειας των στρεφόμενων μαζών παραμένει σταθερή, τότε έχουμε για τον κινητήρα και το φορτίο:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_M(\omega) - T_L(\omega) \quad (2.25)$$

, όπου προφανώς στη μόνιμη κατάσταση ισχύει: $J \cdot \frac{d\omega}{dt} = 0 \Rightarrow T_M(\omega) = T_L(\omega)$ Κατά τη διάρκεια της του μεταβατικού φαινομένου της εκκίνησης ο κινητήρας επιταχύνει. Αν πάρουμε τη διαφορά των ροπών $T_a(\omega) = T_M(\omega) - T_L(\omega)$ μια οποιαδήποτε χρονική στιγμή, έχουμε τη διαθέσιμη, καθαρή ροπή για την επιτάχυνση των στρεφόμενων αδρανειών (Σχ. 2.37).

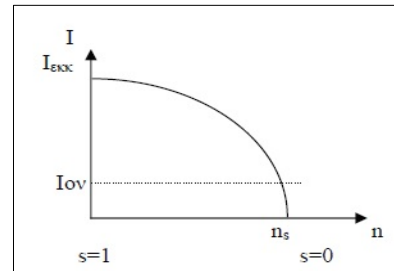


Σχ. 2.37 Διαθέσιμη ροπή για την επιτάχυνση των στρεφόμενων αδρανειών

Ο χρόνος εκκίνησης βρίσκεται με ολοκλήρωση της ((2.50)).

$$t_{εκκ} = \int_0^{\omega_r} \frac{J}{T_M(\omega) - T_L(\omega)} d\omega = \int_0^{n_r} \frac{2 \cdot \pi \cdot J}{60 \cdot (T_M(n) - T_L(n))} dn \quad (2.26)$$

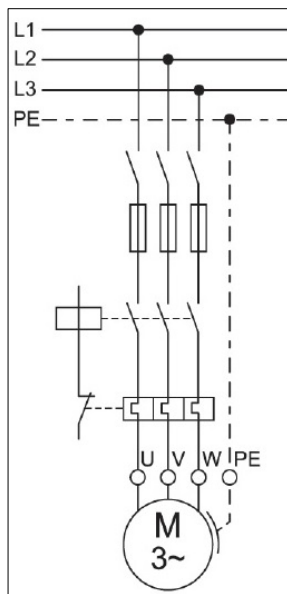
Το ρεύμα εκκίνησης (ονομάζεται και ρεύμα κλειδωμένου δρομέα, Locked Rotor Current, LRC) στον επαγωγικό κινητήρα είναι αναγκαστικά υψηλό λόγω του ότι εκ κατασκευής το ρεύμα στο στάτη είναι ανάλογο της διαφοράς της μαγνητικής ροής του στάτη από το δρομέα. Τη χρονική στιγμή της έναρξης (slip=1), η διαφορά αυτή είναι μέγιστη αφού στον δρομέα δεν έχουμε ρεύμα επαγωγής άρα δεν έχει αναπτυχθεί αντίθετης φοράς μαγνητικό πεδίο. Αποτελείται από μια συνιστώσα μόνιμης κατάστασης ($i_{LRC,SS}$) που ονομάζεται κανονικό στιγμιαίο ρεύμα εκκίνησης, και μια μεταβατική συνιστώσα ($i_{LRC,TR}$). Αν δεν προσδιορίζεται διαφορετικά, ο όρος ρεύμα κλειδωμένου δρομέα αναφέρεται στη συνιστώσα μόνιμης κατάστασης.



Σχ. 2.38 Χαρ/κή ρεύματος-στροφών

Οι μέθοδοι εκκίνησης που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

2.6.6.1.1 Εκκίνηση απευθείας (Direct On Line Starters)



Σχ. 2.39 Κύκλωμα DOL starter (σε IT σύστημα ο αγωγός PE δεν υπάρχει)

Ο πιο απλός τρόπος εκκίνησης ενός ηλεκτρικού κινητήρα είναι ο προφανής, απευθείας σύνδεση στις τρεις φάσεις του ηλεκτρικού δικτύου. Το κύκλωμα είναι πάρα πολύ απλό και επιπλέον προσθήκες μπορούν να γίνουν σε αυτό ώστε να υπάρχει δυνατότητα τηλεχειρισμού και αναστροφής κίνησης (reversing-με απλή εναλλαγή δύο φάσεων). Με αυτό τον τρόπο εκκίνησης επιτυγχάνουμε τον ελάχιστο χρόνο εκκίνησης και τη μέγιστη αρχική ροπή. Η απλότητα του κυκλώματος και η γι' αυτό το λόγο οικονομική προσιτότητα του, κάνουν τη χρησιμοποίηση αυτού του τύπου εκκινητή, την ιδανική λύση για κινητήρες μικρής ισχύος. Λόγω όμως της φύσης των ηλεκτρικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα, η τιμή του ρεύματος εκκίνησης είναι 5-8 φορές υψηλότερη της ονομαστικής στο μέγιστο φορτίο (Full Load Current). Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα για τους κινητήρες μικρής ισχύος καθώς η αναπόφευκτη βύθιση τάσης (Voltage dip) στο δίκτυο κατά την εκκίνηση ενός τέτοιου κινητήρα θα είναι εντός των ορίων που προδιαγράφουν οι κανονισμοί (10%). Για μεγαλύτερους κινητήρες όμως αυτή η κρουστική μεταβολή (surge) μπορεί να

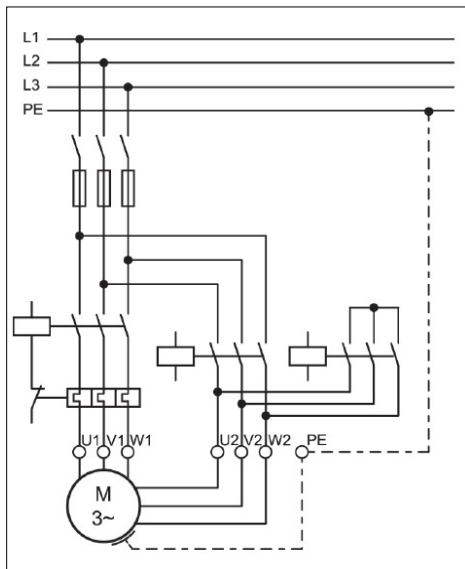
προκαλέσει βύθιση τάσης πολύ μεγαλύτερη του 10% στους ζυγούς τροφοδοσίας (supply bus bars) και να επηρεάσει τη λειτουργία των υπόλοιπων συνδεδεμένων καταναλωτών καθώς η στιγμιαία μείωση της τάσης θα προκαλέσει αύξηση στη ζήτηση ρεύματος ώστε οι καταναλωτές να διατηρήσουν την ισχύ τους. Η ξαφνική κατάσταση υπερέντασης που θα προκύψει ενδέχεται να ενεργοποιήσει τον προστατευτικό μηχανισμό της γεννήτριας (trip) και τελικά να δημιουργηθεί black out. Οπότε γίνεται φανερό ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες μεγάλης ισχύος (για παράδειγμα, σε ballast pumps, cargo pumps, bowthrusters κλπ) πρέπει να ξεκινούν με διαφορετικό τρόπο. Αυτός ο τρόπος δεν είναι ένας, είναι πολλές οι μέθοδοι εκκίνησης ηλεκτρικών κινητήρων και θα αναφερθούν παρακάτω, η φιλοσοφία τους όμως

είναι μία: αυτή της εκκίνησης με μειωμένη τάση (reduced voltage starting). Επιτυγχάνεται η μείωση του ρεύματος εκκίνησης ταυτόχρονα όμως μειώνεται και η αρχική ροπή.

Η σημασία λοιπόν μιας ολοκληρωμένης μελέτης των μεταβατικών φαινομένων κατά την εκκίνηση ηλεκτρικών κινητήρων (transient motor starting analysis,) γίνεται φανερή. Εκτός του ότι πρέπει να αποδεικνύει ότι δεν προκαλείται βύθιση τάσης κατά την εκκίνηση διάφορων ηλεκτρικών κινητήρων πέρα από τα επιτρεπτά όρια για τον προδιαγραφόμενο χρόνο, πρέπει να εξασφαλίζει ότι οι κινητήρες θα έχουν την απαιτούμενη ροπή εκκίνησης ώστε να ξεκινήσουν με φορτίο.

2.6.6.1.2 Εκκινητές αστέρα-τριγώνου (Star-Delta Starters)

Αν τα τυλίγματα του στάτη ενός κινητήρα, που είναι σχεδιασμένοι να λειτουργεί με σύνδεση τριγώνου, συνδεθούν με σύνδεση αστέρα, τότε το ρεύμα εκκίνησης που θα απορροφήσει θα είναι το 1/3 σε σχέση με το ρεύμα εκκίνησης που θα απορροφούσε αν τα τυλίγματά του ήταν συνδεδεμένα σε συνδεσμολογία τριγώνου.



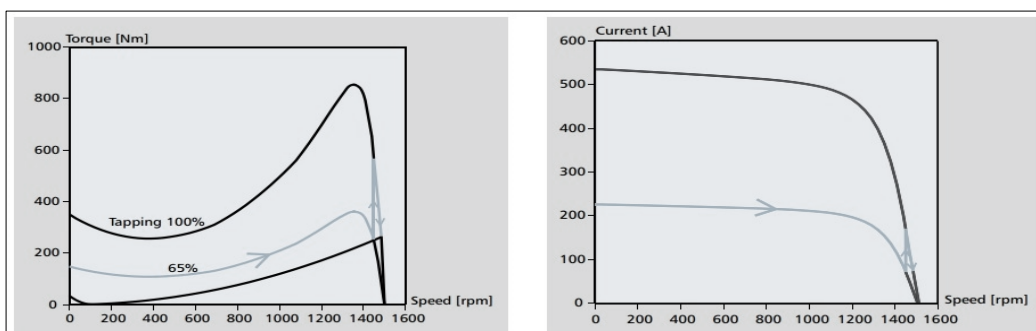
Σχ. 2.41 Κύκλωμα συνδεσμολογίας Y-Δ

Κατά τη την εκκίνηση, στιγμιαία, πριν ο κινητήρας αρχίσει να περιστρέφεται και να παράγει μηχανική ισχύ, οι μοναδικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ρεύμα που λαμβάνει ο κινητήρας είναι η τάση τροφοδοσίας [V] και η σύνθετη αντίσταση των φασικών τυλιγμάτων του κινητήρα [Zph]. Ισχύει λοιπόν η σχέση:

$$\frac{I_{L(Y)}}{I_{L(\Delta)}} = \frac{V_L / \sqrt{3}Z}{\sqrt{3}V_L / Z} = \frac{1}{3} \quad (2.27)$$

Η ροπή εκκίνησης στον άξονα του κινητήρα μειώνεται επίσης κατά το 1/3 επομένως η επιτάχυνσή του μειώνεται και ο χρόνος μέχρι να φτάσει ο κινητήρας στην ονομαστική του ταχύτητα (run-up period) αυξάνεται. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψιν

προκειμένου να αποφασιστεί αν αυτός ο τύπος εκκινητή είναι κατάλληλος για την εκάστοτε εφαρμογή. Όταν η ταχύτητα φτάσει περίπου στο 80% της ονομαστικής, η σύνδεση αλλάζει αυτόματα από αστέρα σε τρίγωνο μέσω κατάλληλων διακοπών (contactors) με ρυθμισμένη χρονοκαυστήρηση. Αυτή η “βίαιη” αλλαγή προκαλεί αιχμές ρεύματος και ροπής (current & torque peaks), όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα επομένως και υψηλές μηχανικές τάσεις στον άξονα του κινητήρα και στο ηλεκτρικό κύκλωμά του.

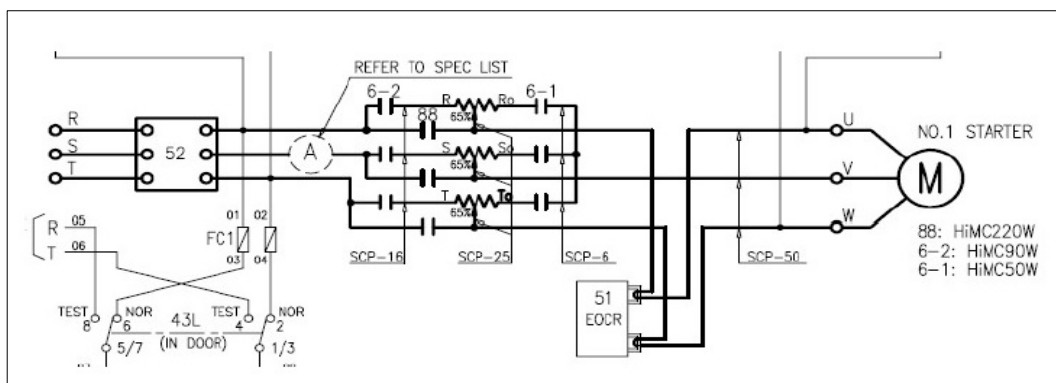


Σχ. 2.40 χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας, ρεύματος-ταχύτητας, για απευθείας σύνδεση και σύνδεση κατά Y-Δ

Εδώ θα είχε ενδιαφέρον να αναφέρουμε τι θα γινόταν στη περίπτωση που για κάποιο λόγο (βλάβη) η μετάβαση από τη συνδεσμολογία αστέρα στην συνδεσμολογία τριγώνου δεν ήταν εφικτή ή καθυστερούσε περισσότερο από τον προβλεπόμενο χρόνο. Όπως ξέρουμε, ένας επαγωγικός κινητήρας που λειτουργεί υπό φορτίο, μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνει σε μηχανική. Το ρεύμα που απορροφά λοιπόν καθορίζεται τώρα από το φορτίο στον άξονα του κινητήρα. Η ταχύτητα περιστροφής του θα είναι η ίδια είτε είναι συνδεδεμένος κατά αστέρα είτε κατά τρίγωνο, καθώς η ταχύτητα περιστροφής του πεδίου της μαγνητικής ροής (flux speed) –που καθορίζει και την ταχύτητα περιστροφής του άξονα αφού οι πόλοι δεν αλλάζουν- εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα, και αυτή παραμένει σταθερή. Αυτό σημαίνει πως και η παραγόμενη ισχύς θα είναι η ίδια άρα και το ρεύμα γραμμής (line current) που απορροφάται θα πρέπει να είναι το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις. Αν ένας κινητήρας που είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί κατά τρίγωνο, λειτουργεί κατ' αστέρα σε πλήρες φορτίο, τότε σε κάθε φασικό τύλιγμα του στάτη θα υπάρχει υπερένταση (overcurrent) ίση με $\sqrt{3} \cdot \text{ονομαστικό φασικό ρεύμα}$. Αυτό γιατί στη συνδεσμολογία τριγώνου το φασικό ρεύμα είναι ίσο με το ρεύμα γραμμής. Θα προκληθεί υπερθέρμανση και τελικά καταστροφή της μόνωσης και των τυλιγμάτων αν τα ρελέ υπερέντασης (overcurrent relay) δε διακόψουν το κύκλωμα καθώς οι θερμικές απώλειες των χαλκού που υπολογίζονται από τον παράγοντα $P = I^2 \cdot R$ θα προκαλέσουν θέρμανση $\sqrt{3}^2 = 3$ φορές υψηλότερη της ονομαστικής.

2.6.6.1.3 Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή (Autotransformer Starter)

Ένας προφανής τρόπος μείωσης της τάσης τροφοδοσίας στον κινητήρα είναι με τη χρήση ενός μετασχηματιστή. Δεν χρησιμοποιείται ο τυπικός μετασχηματιστής με τα δύο ξεχωριστά (πρωτεύον-δευτερεύον) πηνία, αλλά ο ονομαζόμενος αυτομετασχηματιστής με ένα τύλιγμα τόσο για την είσοδο όσο και έξοδο της τάσης, για λόγους οικονομίας, μικρότερου μεγέθους και χαμηλότερου βάρους σε σχέση με τον κλασικό μετασχηματιστή και παραμένει σε λειτουργία μόνο κατά τη διάρκεια της εκκίνησης. Έχει συνήθως τρεις θέσεις υποβιβασμού της τάσης ανάμεσα στο 40-80% της τάσης γραμμής, από τις οποίες η μία επιλέγεται ως τάση εκκίνησης. Όταν η ταχύτητα του κινητήρα φτάσει το 80% της ονομαστικής το κύκλωμα συνδέεται στην ονομαστική του τάση. Επειδή ο αυτομετασχηματιστής είναι αρκετά ακριβότερος από τους προαναφερθέντες εκκινητές χρησιμοποιείται μόνο για την εκκίνηση μεγάλης ισχύος κινητήρων που δεν έχουν απαίτηση υψηλής αρχικής ροπής όπως για παράδειγμα οι ηλεκτροκίνητες αντλίες φορτίου ή το bowthrust. Αυτό συμβαίνει γιατί ενώ το ρεύμα εκκίνησης μειώνεται ανάλογα με τη μείωση της τάσης, η ροπή μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της τάσης τροφοδοσίας.



Σχ. 2.42 Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή

Εκτός από τους παραπάνω τρόπους, μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για ακόμα πιο ομαλή εκκίνηση είναι με οδηγούς προοδευτικά αυξανόμενης τάσης (soft starters). Η λειτουργία τους περιγράφεται στην ενότητα της “ρύθμισης ταχύτητας”.

2.6.7 Ρύθμιση ταχύτητας

Η ρύθμιση των στροφών των επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνεται με τη χρήση ηλεκτρονικών οδηγήσεων (drives). Αυτές μεταβάλλουν τη χαρακτηριστική ροπής-στροφών, άρα ρυθμίζουν τις στροφές. Σε κινητήρες κλωβού η ρύθμιση των στροφών γίνεται με τους παρακάτω τρόπους.

2.6.7.1 1.Μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας.

Αποτελεί τη βέλτιστη μέθοδο για τον έλεγχο της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων κάθε είδους. Με τη μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας του στάτη, μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων και μαζί τους η ταχύτητα του κινητήρα. Η σύγχρονη ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ονομαστική συχνότητα f_b ονομάζεται βασική (base). Αν εξετάσουμε τα επιμέρους μεγέθη σε μια αύξηση f' της συχνότητας παρατηρούμε ότι έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

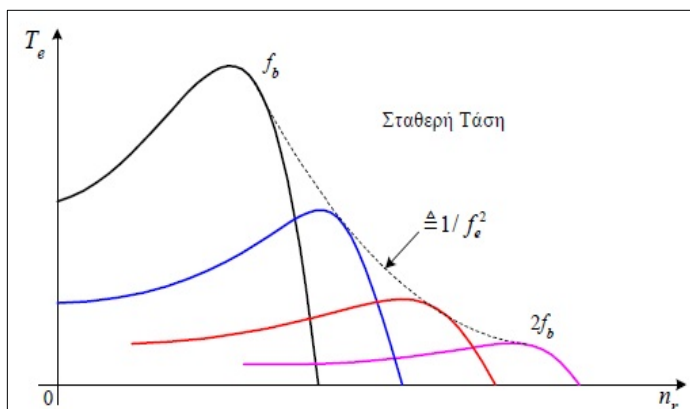
α).αύξηση της σύγχρονης ταχύτητας $\rightarrow n'_s = \frac{60 \cdot f'}{p/2}, \omega'_s = 2\pi f'$

β).αύξηση όλων των αντιδράσεων $\rightarrow X = 2\pi f' L$

γ).μείωση της ροπής εκκίνησης $\rightarrow T'_{εκκ} = \frac{3V_T^2 R_2}{\omega'_s} \cdot \frac{1}{(R_T + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}$

δ).μείωση της ροπής ανατροπής $\rightarrow T'_{max} = \frac{3V_T^2 R_2}{2\omega'_s} \cdot \frac{1}{R_T + \sqrt{R_T^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$

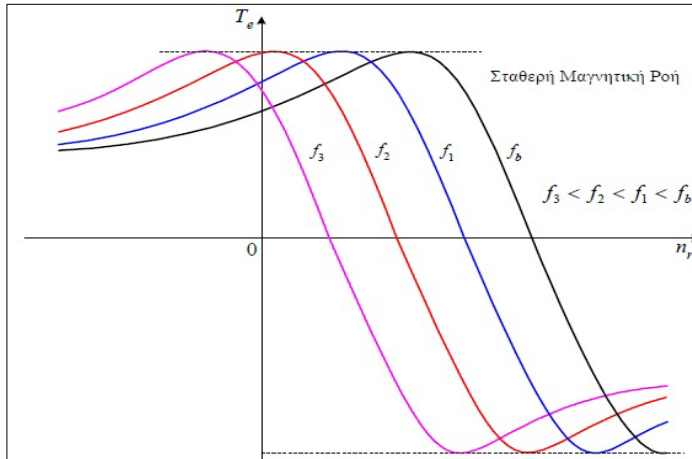
ε).μείωση των ρευμάτων.



Σχ. 2.43 Χαρ/κή ροπής-ταχύτητας: αύξηση συχνότητας

Αυτό οδηγεί σε μεγάλες απώλειες και υπερθερμάνσεις οι οποίες εντείνονται στους αερόψυκτους κινητήρες από το γεγονός ότι στρέφονται πιο αργά.

Ειδικά η ροπή ανατροπής και η ροπή εκκίνησης μειώνονται περίπου ανάλογα με το τετράγωνο της συχνότητας, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα. Οι αντίθετες μεταβολές συμβαίνουν για μείωση της συχνότητας τροφοδοσίας. Στην περίπτωση αυτή όμως τα ρεύματα στο στάτη και στο δρομέα αυξάνουν, όπως επίσης αυξάνει και η μαγνητική ροή που διατρέχει το μαγνητικό κύκλωμα $\rightarrow \Phi_m = \frac{V}{2\pi f N}$.



Σχ. 2.44 Χαρ/κή ροπής-ταχύτητας: μείωση συχνότητας (ιδανική συμπεριφορά)

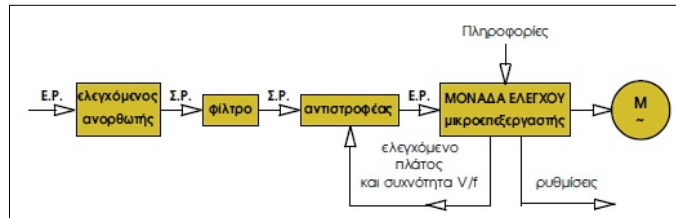
Για αυτό το λόγο, όταν θέλουμε να μειώσουμε τη ταχύτητα, χρησιμοποιούμε οδηγίες που κρατούν το λόγο τάσης προς συχνότητα σταθερό. Με αυτό τον τρόπο η ροή διακένου παραμένει περίπου σταθερή. Σε αυτή τη περίπτωση ολόκληρη η χαρακτηριστική ροπής-στροφών μετακινείται προς τα αριστερά (ιδανικά χωρίς να μειωθεί η διαθέσιμη ροπή-(Σχ. 2.44), στην πράξη μειώνεται ελαφρώς).

2.6.7.2 Οδηγήσεις μεταβλητής συχνότητας (Variable Frequency Drives, VFD)

Δύο είναι κυρίως οι τρόποι που χρησιμοποιούνται:

2.6.7.2.1 α) Με Αντιστροφέα (Inverter)

Ο αντιστροφέας παράγει ισχύ μεταβλητής συχνότητας και φάσης από συνεχές ρεύμα με τη βοήθεια κυκλώματος από θυρίστορ. Προκειμένου να τροφοδοτηθεί με συνεχές ρεύμα είναι συνδεδεμένος με ανορθωτική διάταξη που περιλαμβάνει τον ανορθωτή (rectifier) και το φίλτρο (για τον περιορισμό των αρμονικών της συνεχούς τάσης που παράγεται από τον ανορθωτή). Η διάταξη ανορθωτή και αντιστροφέα λέγεται μετατροπέας (converter). Το δομικό διάγραμμά του φαίνεται παρακάτω: Το κυριότερο μειονέκτημα τους είναι ότι γενικά δε μπορούν να αποδώσουν την ονομαστική ροπή σε πολύ χαμηλές στροφές.

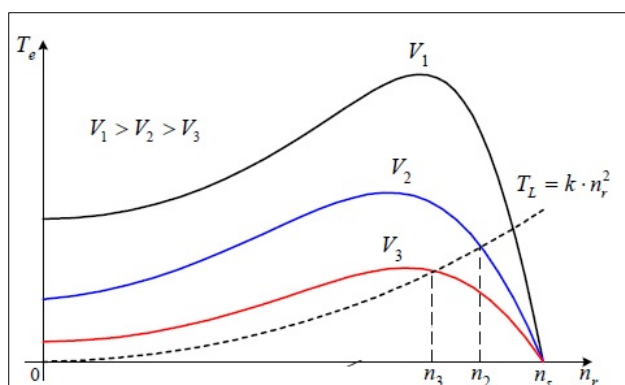


Σχ. 2.45 Μπλοκ διάγραμμα αντιστροφέα

2.6.7.2.2 β) Με Κυκλομετατροπέα (Cycloconverter)

Ο κυκλομετατροπέας μετατρέπει απ' ευθείας την εναλλασσόμενη ισχύ της αρχικής συχνότητας σε εναλλασσόμενη επιθυμητής συχνότητας χωρίς να απαιτείται η ενδιάμεση μετατροπή της σε συνεχή. Συγκρίνοντας τους κυκλομετατροπέις με τους αντίστοιχους μετατροπέις συχνότητας με ανορθωτή-αντιστροφέα προκύπτει ότι οι κυκλομετατροπέις πολύ περισσότερους ηλεκτρονικούς διακόπτες (συνήθως θυρίστορ) κι έχουν πολυπλοκότερο σύστημα ελέγχου. Λόγω του υψηλού τους κόστους, συνήθως προτιμώνται για τον έλεγχο ηλεκτροκινητήριων συστημάτων μεγάλης ισχύος, όπου μας ενδιαφέρει η υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες.

2.6.7.3 2.Μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας στο στάτη



Σχ. 2.46 Έλεγχος ταχύτητας με μεταβολή της τάσης του στάτη

Στους επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, η ρύθμιση της ολίσθησης (ταχύτητας) επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη. Η συχνότητα των τάσεων είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Καθώς η ροπή που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης του στάτη, οι χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας μεταβάλλονται όπως στο Σχ. 2.46, για διάφορες τιμές της τάσης. Η

ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας. Από το σχήμα, είναι φανερό ότι, η ταχύτητα του κινητήρα δεν μπορεί να ελεγχθεί σε τιμές πολύ μικρότερες από τη σύγχρονη. το ρεύμα του κινητήρα είναι ανάλογο της τάσης. Έτσι, ο λόγος ροπής προς ρεύμα, η μέγιστη ροπή, ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης, μειώνονται με τη μείωση της ταχύτητας. Επομένως, ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη δεν είναι αποτελεσματικός. Ο έλεγχος της τάσης στα τυλίγματα του στάτη επιτυγχάνεται με κατάλληλους μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (ac voltage controllers).

Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται συνήθως στον έλεγχο της ταχύτητας επαγωγικών κινητήρων κλάσης D, σε εφαρμογές αντλιών και ανεμιστήρων, όπου δεν απαιτείται έλεγχος της ταχύτητας σε μικρές τιμές. Όμως, η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στην εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων όλων των κατηγοριών, οπότε ονομάζονται soft starters. Οι ηλεκτρονικοί εκκινητές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους εκκίνησης, με αυτομετασχηματιστή ή διακόπτη αστέρα–τριγώνου. Κάποια από τα πλεονεκτήματα είναι: η ομαλή επιτάχυνση και επιβράδυνση, ο έλεγχος του ρεύματος, η μειωμένη συντήρηση, η προστασία από έλλειψη ή ασυμμετρία των φάσεων. Επιπλέον, ένας εκκινητής με ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του επαγωγικού κινητήρα, λειτουργώντας τον κινητήρα με μειωμένη τάση σε μικρά φορτία.

2.6.8 Παρατηρήσεις

-οι κινητήρες κλωβού λόγω χαμηλού κόστους, μειωμένων αναγκών συντήρησης (brushless), μεγάλου συντελεστή ισχύος ανά μονάδα βάρους, μικρού όγκου, προτιμώνται για τις περισσότερες εφαρμογές στα πλοία, αν και δεν έχουν το βέλτιστο βαθμό απόδοσης. Επίσης, κατά πλειοψηφία λειτουργούν ως μηχανές σταθερής ταχύτητας. Υλοποιήσεις VFD συναντούμε κυρίως για κινητήρες μεγάλης ισχύος (bowthruster, ηλεκτροκίνητες αντλίες).

-κινητήρες που εξυπηρετούν ουσιαστικά φορτία πρέπει να εφοδιάζονται με undervoltage release, UVR H/N (δηλαδή οι επαφές να παραμένουν κλειστές ώστε να έχουν τη δυνατότητα αυτόματης επανεκκίνησης μετά από black out και να μην απαιτείται η χειροκίνητη εκκίνηση όπως στα φορτία με undervoltage protection, UVP). Για να αποφευχθούν οι μεγάλες απαιτήσεις ρεύματος και άεργης ισχύος κατά την ταυτόχρονη εκκίνηση πολλών φορτίων, χρησιμοποιείται λογική ακολουθία εκκίνησης (sequential starting).

2.7 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

1. Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας, Ε. Παπαδόπουλος, Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ
2. Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου (Τόμος Α), Ι. Προυσαλίδης, Χ. Φραγκόπουλος, Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ
3. "Συγχρονισμός Ηλεκτροπαραγωγού Ζεύγους με το Δίκτυο, εργαστηριακή άσκηση", Ι. Προυσαλίδης, Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ
4. Energy conversion, Sharif Univ. of Technology, Σημειώσεις μαθήματος, SUT
5. Shipboard Electrical Power Systems, Mukund, R. Patel, Βιβλίο
6. Power Generation Handbook, Philip Kiamah, Βιβλίο
7. Principles of Electrical Machines, V.K. Mehta, Βιβλίο
8. Electric Machines, Charles Hubert, Βιβλίο
9. Electrical Machines, Slobodan N. Vukosavic, Βιβλίο
10. Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών, Π. Ντοκόπουλος, Βιβλίο
11. Practical marine electrical knowledge, Dennis Hall, Βιβλίο
12. Ships' Electrical Systems, Dokmar, Βιβλίο
13. GL Rules I/Part 1/Chapter 3 : Electrical Installations, Germanischer Lloyd, Κανονισμοί
14. The necessity of reactive power balance in ship electric energy systems, J. Prousalidis, Επιστημονικό άρθρο
15. Θεωρία προστασίας υπερέντασης, Γ. Κορρές, Σημειώσεις ΕΜΠ
16. K-power marine switchboards, Kongsberg, Τεχνικό εγχειρίδιο
17. Panelboards & Switchboards, Eaton, Τεχνικό εγχειρίδιο
18. Schneider electric technical guide (switchboards), Τεχνικό εγχειρίδιο
19. Electric Power Distribution Systems S9086-KY-STM-010/CH-320R2, NavSea, Τεχνικό εγχειρίδιο
20. Flexible ship electric power system design, K. Butler, M. Ehsani, Τεχνικό έγγραφο
21. Υλοποίηση πειραματικών διατάξεων με σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος μικρής κλίμακας, Ν. Βρονταμίτης, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ

3 Κεφάλαιο : Ποιότητα Ισχύος

3.1 Εισαγωγή/ορισμός

Η ποιότητα ισχύος (power quality) είναι μια γενική έννοια και αναφέρεται σε ένα μεγάλο αριθμό διαταραχών (disturbances) που εμφανίζονται στα μοντέρνα ηλεκτρικά δίκτυα των πλοίων (και στα ηπειρωτικά συστήματα). Αφορά κυρίως την απόκλιση των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος από την ιδανική ημιτονοειδή κυματομορφή συγκεκριμένου (ονομαστικού) πλάτους και συχνότητας στην μόνιμη κατάσταση. Καθώς η τάση αποτελεί συστημικό χαρακτηριστικό, οι αποκλίσεις της από την ονομαστική τιμή, είναι μεγαλύτερης σημασίας από αυτές του ρεύματος. Η αύξηση των ευαίσθητων σε διαταραχές φορτίων αλλά και των φορτίων που δημιουργούν τις διαταραχές, όπως μη γραμμικά φορτία, κινητήρες, μετατροπείς ισχύος και οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις για αξιοπιστία, καθιστούν την ποιότητα ισχύος σημαντική παράμετρο της λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος. Καταναλωτές που αλλοιώνουν την ημιτονοειδή φύση του εναλλασσόμενου ρεύματος (γενικά οι συσκευές που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος), εισάγοντας στο δίκτυο ανώτερες αρμονικές, προκαλούν υποβάθμιση της ποιότητας ισχύος, σε περίπτωση δε ,που οι αποκλίσεις είναι εκτός των ορίων που προδιαγράφουν οι εκάστοτε κανονισμοί, μπορούν να οδηγήσουν σε βλάβες, διακοπή λειτουργίας ή ακόμη και καταστροφή των πιο ευαίσθητων σε αυτές, καταναλωτών. Το πρόβλημα της ποιότητας ισχύος, που είναι σαφώς πιο έντονο στα πλοία με ηλεκτροπρώση, αφορά την παραγωγή, την διανομή και την κατανάλωση ενέργειας ταυτόχρονα. Ο σχεδιαστής του ηλεκτρικού δικτύου πρέπει να λάβει υπόψιν την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων συσκευών του δικτύου ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του.

Οι παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα ισχύος αναφέρονται στην βιβλιογραφία και σε διεθνείς κανονισμούς, περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά του ρεύματος και της τάσης που μπορούν να υποστούν αλλοίωση κατά την λειτουργία ενός συστήματος. Οι βασικές αυτές παράμετροι και οι επιπτώσεις που έχουν στα διάφορα φορτία και στο δίκτυο, αναλύονται, εν συντομία, στις παρακάτω παραγράφους.

3.2 Διακύμανση συχνότητας (Frequency deviation)

Η συχνότητα του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής των γεννητριών και η ονομαστική της τιμή είναι είτε 50 είτε 60 Hz. Η συχνότητα είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, γι' αυτό είναι αναγκαίο να διατηρείται σταθερή και να ελαχιστοποιούνται όσο το δυνατό περισσότερο οι διακυμάνσεις της. Αυτό επιτυγχάνεται ,όπως είδαμε και στην ενότητα της σύγχρονης γεννήτριας, με τους αυτόματους ρυθμιστές στροφών.

Οι επιπτώσεις των διακυμάνσεων της συχνότητας διαφέρουν ανάλογα το φορτίο. Για παράδειγμα οι απευθείας συνδεδεμένοι στο δίκτυο ασύγχρονοι κινητήρες (χωρίς frequency drives, η συνηθέστερη περίπτωση στα συμβατικά πλοία) μεταβάλλουν τον αριθμό των στροφών τους ανάλογα με τη συχνότητα του δικτύου. Τις επιπτώσεις μεταβολής της συχνότητας στους ασύγχρονους κινητήρες τις έχουμε μελετήσει στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Οι συστοιχίες πυκνωτών που χρησιμοποιούνται για την αντιστάθμιση άεργου ισχύος επηρεάζονται από μεταβολές στην συχνότητα αφού η άεργος ισχύς που παρέχουν είναι ανάλογη αυτής. Το ίδιο ισχύει για τα φίλτρα αποκοπής αρμονικών των οποίων η σύνθετη αντίσταση μεταβάλλεται με την όποια μεταβολή της συχνότητας του δικτύου. Η επιτρεπτή

διακύμανση της συχνότητας στη μόνιμη κατάσταση αλλά και για μεταβατικά φαινόμενα προσδιορίζεται από τα πρότυπα IEC60092-101 και STANAG1008 (με το δεύτερο, πιο αυστηρό πρότυπο, να χρησιμοποιείται στα πολεμικά πλοία του NATO και στα πλοία με ηλεκτροπρώση).

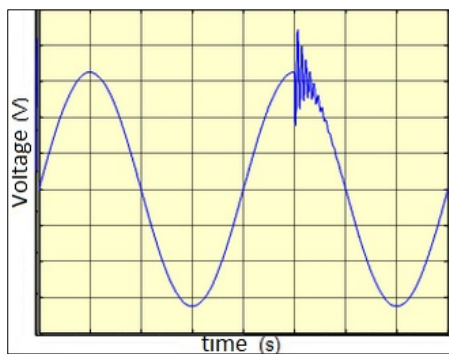
Parameter	60092-101	STANAG 1008
Steady-state frequency deviations	±5%	±3%
Frequency momentary deviations	±10%	±4% (±5,5%)
Frequency transients recovery time	5 s	2 s

Πιν. 3.1 Επιτρεπτή διακύμανση συχνότητας κατά τα πρότυπα IEC60092-101, STANAG1008 [2]

3.3 Υπερτάσεις (Overvoltages)

Ως υπέρταση ορίζουμε οποιαδήποτε τάση μεταξύ φάσης και ουδέτερου (σπάνια υπάρχει ουδέτερος στα δίκτυα διανομής των πλοίων) ή μεταξύ δυο φάσεων της οποίας η μέγιστη τιμή είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη τάση λειτουργίας του εξοπλισμού.

Κρουστικές υπερτάσεις (voltage spikes): Οι μεταβατικές/κρουστικές υπερτάσεις είναι υπερτάσεις βραχείας διάρκειας μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου, οι οποίες μπορούν να είναι αποσβενύμενες ή όχι. Οι μεταβατικές υπερτάσεις προκαλούνται από διακοπτικούς χειρισμούς κατά την διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

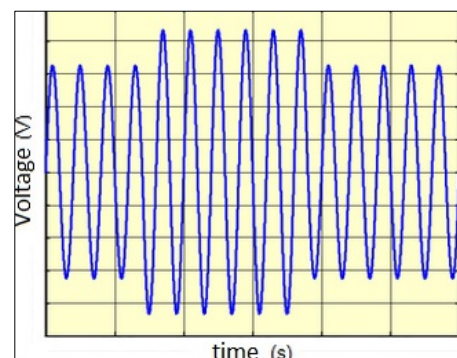


Σχ. 3.1 Κυματομορφή σε voltage spike

Δυναμική παροδική υπέρταση : Οι παροδικές υπερτάσεις οφείλονται στην λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Μπορούν να προκληθούν από την αποσύνδεση επαγωγικού ή την σύνδεση χωρητικού φορτίου, από την απόρριψη φορτίου, δηλαδή την ξαφνική επιτάχυνση των γεννητριών λόγο αποσύνδεσης κάποιου φορτίου καθώς και από κάποιο βραχυκύκλωμα μιας φάσης προς τη γείωση. Οι υπερτάσεις αυτές έχουν διάρκεια από 0.03s μέχρι 3600s και συχνότητα από 10Hz έως 500Hz.

3.4 Υπερτάσεις μικρής διάρκειας (Voltage swells)

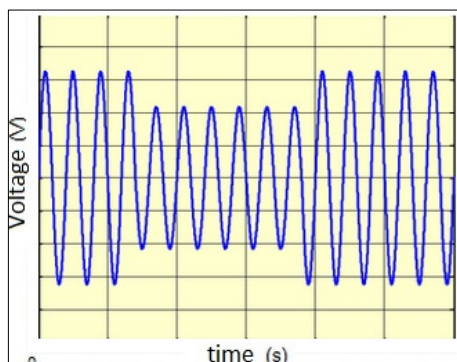
Οι υπερτάσεις μικρής διάρκειας ορίζονται ως μια αύξηση της ενεργού τιμής της τάσης της τάξης του 1.1 – 1.8 ανά μονάδα με διάρκεια από 0.5 κύκλου μέχρι ένα λεπτό. Οι υπερτάσεις παρατηρούνται κατά την απενεργοποίηση ενός μεγάλου φορτίου, την σύνδεση μιας μεγάλης συστοιχίας πυκνωτών ή κατά το βραχυκύκλωμα μιας φάσης προς τη γείωση, στις υγιείς φάσεις. Χαρακτηρίζονται από το ποσοστό αύξησης της τάσης καθώς και από την χρονική τους διάρκεια. Οι υπερτάσεις αυτές αντιμετωπίζονται όπως και οι βυθίσεις τάσεις με συστήματα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας ή με επιτηρητές τάσης.



Σχ. 3.2 Κυματομορφή σε voltage swell

3.5 Βυθίσεις τάσης (Voltage Sags/Dips)

Η βύθιση τάσης ορίζεται ως η διαφορά της ονομαστικής τάσης από την ελάχιστη τάση κατά την διάρκεια του σφάλματος και είναι μια ξαφνική μείωση του πλάτους της τάσης σε κάποιο

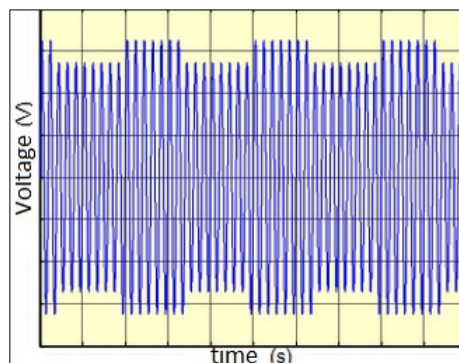


Σχ. 3.3 Κυματομορφή σε voltage sag

συγκεκριμένο σημείο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο τάσης με διάρκεια μεγαλύτερη από 10ms, που όμως ακολουθείται από επαναφορά στο κανονικό επίπεδο τάσης μετά την πάροδο της. Η κύρια αιτία της βύθισης τάσης είναι τα βραχυκυκλώματα. Κατά την διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος τα μεγάλα ρεύματα που αναπτύσσονται προκαλούν μεγάλες πτώσεις τάσης στα διάφορα σημεία του συστήματος. Μια άλλη αιτία είναι η σύνδεση μεγάλων φορτίων. Κατά την διάρκεια αυτού του φαινομένου παρέχεται μόνο ένα μέρος της απαιτούμενης ισχύος στο φορτίο, με αποτέλεσμα την υπολειτουργία του, την διακοπή της λειτουργίας του ή ακόμα και την καταστροφή του, αφού η τάση είναι διαφορετική από αυτή που έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί στην ονομαστική του κατάσταση. Γι' αυτό τον λόγο ευαίσθητα φορτία προστατεύονται με επιτηρητές τάσης οι οποίοι τα αποσυνδέουν σε περίπτωση που η τάση ξεπεράσει κάποια συγκεκριμένα όρια. Τέλος, οι ίδιες οι συσκευές σχεδιάζονται ώστε να αντιμετωπίζουν τέτοιου είδους φαινόμενα με συγκεκριμένες προδιαγραφές και κανονισμούς, όπως ορίζονται από τα διεθνή πρότυπα.

3.6 Διακυμάνσεις τάσης (Voltage Flicker)

Οι διακυμάνσεις τάσης ορίζεται ως περιοδικές διακυμάνσεις του πλάτους της τάσης όχι περισσότερο από 10% του ονομαστικού. Επειδή το ποσό αυτό είναι σχετικά μικρό, σπάνια παρατηρούνται βλάβες από τέτοιου είδους φαινόμενα. Οι διακυμάνσεις αυτές συχνά προκαλούνται από συσκευές των οποίων το ρεύμα παρουσιάζει συνεχείς γρήγορες διακυμάνσεις. Τέτοιες συσκευές είναι οι στατικοί μετατροπείς συχνότητας, οι κυκλομετατροπείς, οι συσκευές συγκόλλησης, οι μεγάλοι κινητήρες και άλλα. Ο όρος “flicker” χρησιμοποιείται συχνά στην βιβλιογραφία



Σχ. 3.4 Κυματομορφή σε voltage flicker

για να περιγράψει τέτοια φαινόμενα και είναι η αλλαγή της φωτεινότητας ενός λαμπτήρα, η οποία γίνεται αισθητή και προκαλείται από διακυμάνσεις τάσης.

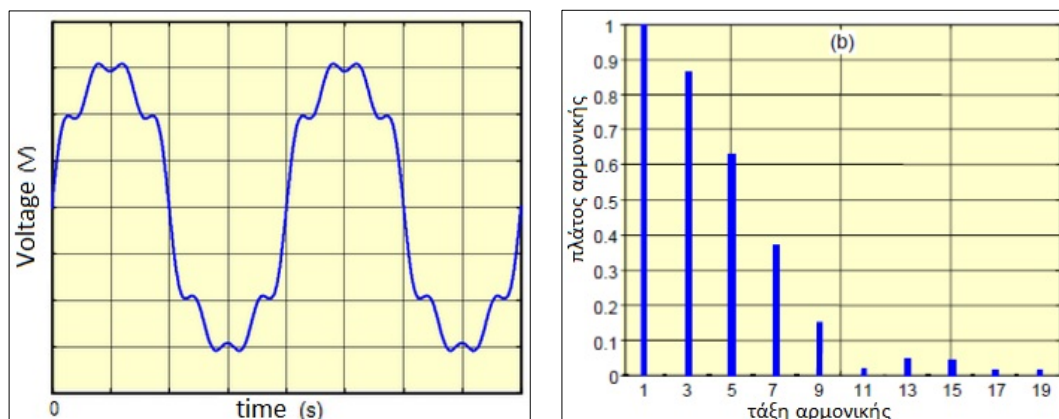
3.7 Ασυμμετρία τάσης ή ρεύματος (Voltage/current unbalance)

Οι τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ισχύ, παρέχουν στο δίκτυο τριφασική συμμετρική τάση. Στην πραγματικότητα είναι δύσκολο να επιτευχθεί απόλυτη συμμετρία σε όλους τους ζυγούς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι παρατηρούνται συχνά ασυμμετρίες, είτε εξαιτίας του διαφορετικού μέτρου της τάσης δυο φάσεων, είτε αν η γωνία μεταξύ δυο φάσεων αποκλίνει από τις 120 μοίρες. Αυτές οι ασυμμετρίες προκαλούνται κατά κύριο λόγο από ασύμμετρα φορτία τα οποία δημιουργούν ασύμμετρες πτώσεις τάσης στους ζυγούς ή κατά την διάρκεια κάποιου βραχυκυκλώματος, κατά το οποίο το μέτρο των τάσεων των τριών φάσεων διαφέρει. Η ασυμμετρία τάσης έχει

πολλές επιπτώσεις οι οποίες είναι διαφορετικές για τα διάφορα είδη φορτίων. Για παράδειγμα, στους ασύγχρονους κινητήρες προκαλεί υπερθέρμανση των τυλιγμάτων του στάτη, ασυμμετρία στην ηλεκτρική ροπή σε σχέση με την συμμετρική για την οποία έχει σχεδιαστεί με αποτέλεσμα μηχανικές ταλαντώσεις στον άξονα.

3.8 Αρμονική Παραμόρφωση (Harmonic distortion)

Οι αρμονικές τάσης ή ρεύματος συγκαταλέγονται στις διαταραχές που αφορούν την παραμόρφωση μιας ιδανικής ημιτονοειδούς κυματομορφής και συνδέονται άμεσα με τον συντελεστή ισχύος. Αντίθετα από τα φαινόμενα που περιγράφονται παραπάνω (τα οποία είναι μικρής διάρκειας και μεταβατικής φύσεως), οι αρμονικές παρουσιάζονται κατά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Οι αρμονικές είναι ημιτονοειδείς τάσεις ή ρεύματα με συχνότητα που είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας (50 ή 60Hz). Ως τάξη αρμονικής ορίζεται ο λόγος της συχνότητας της ανώτερης αρμονικής προς την συχνότητα της θεμελιώδους. Η ανάλυση του αρμονικού περιεχομένου μιας περιοδικής κυματομορφής γίνεται χρησιμοποιώντας **ανάλυση Fourier**. Με αυτό τον τρόπο εξάγουμε το πλάτος και την συχνότητα των ανώτερων αρμονικών και μπορούμε να τις διαχειριστούμε κάθε μία ξεχωριστά. Μια περιοδική κυματομορφή μπορεί να εκφραστεί ως άπειρο άθροισμα ημιτονοειδών όρων με πλάτη που δίνονται από τους συντελεστές Fourier.



Σχ. 3.5 Κυματομορφή με αρμονική παραμόρφωση και ανάλυση σε αρμονικές μέσω μετασχηματισμού Fourier

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \theta_{v,n}), \quad i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \theta_{i,n}) \quad (3.1)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, το $v(t)$ είναι η στιγμιαία τιμή της τάσης, $i(t)$ η στιγμιαία τιμή της έντασης, V_n το πλάτος αρμονικής τάσεως n , I_n το πλάτος αρμονικής έντασης τάσεως n , $\theta_{v,n}$ η γωνία αρμονικής τάσεως τάξεως n , $\theta_{i,n}$ η γωνία αρμονικής έντασης τάξεως n , n η τάξη αρμονικής, $\omega=2\pi f$ (όπου f είναι η θεμελιώδης συχνότητα του ηλεκτρικού συστήματος 50 ή 60 Hz) και t ο χρόνος.

Για την εκτίμηση της σοβαρότητας των αρμονικών στις κυματομορφές της τάσης και της έντασης, εκτός από τα πλάτη τους, χρησιμοποιούνται τα μεγέθη: συνολική παραμόρφωση λόγω αρμονικών (Total Harmonic Distortion) τάσης και έντασης τα οποία είναι αντίστοιχα:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}, \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.2)$$

Οι αρμονικές τάσης και ρεύματος πηγάζουν από μη γραμμικά φορτία όπως φορτία με διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, δηλαδή φορτία που χρησιμοποιούν ανορθωτές όπως οι κινητήρες με μετατροπείς ισχύος για τη ρύθμιση στροφών, ηλεκτρονικές συσκευές (ηλεκτρονικοί υπολογιστές) καθώς και φορτία που χρησιμοποιούν ηλεκτρικό τόξο.

Γενικά, από κανονισμούς των νηογνομόνων, δε χρειάζεται να γίνει μελέτη αρμονικής παραμόρφωσης κατά τη σχεδίαση του ηλεκτρικού δικτύου, παρά μόνο σε περίπτωση που το 20% του συνδεδεμένου φορτίου (σε σχέση με την ισχύ των συνδεδεμένων γεννητριών), οδηγείται από διατάξεις ημιαγωγών. Ανάλογα το πρότυπο που χρησιμοποιείται, οι προδιαγραφές για τα όρια αποδοχής της αρμονικής παραμόρφωσης διαφέρουν. Δίνεται συγκριτικός πίνακας ορίων THD για τον αγγλικό(LRS), γερμανικό (GL) νηογνώμονα και τα αντίστοιχα πρότυπα κατά IEC,IEEE και STANAG:

	STANAG 1008		GL	LRS	IEEE 519	IEC-60092
	Έκδοση 8	Έκδοση 9				
THD_V	Ναι (5%)	Ναι (5%)	Ναι (8%)	Ναι (8%)	Ναι (5%)	Ναι (5%)
V_n	Ναι (3%)	Ναι (3%)	Ναι	Ναι (1.5%)*	Ναι (3%)	Ναι (3%)
THD_I	Όχι	***	Όχι	Όχι	Ναι (5%)**	***
I_n	Ναι	***	Όχι	Όχι	Ναι	***

* ο περιορισμός ισχύει $n \geq 25$ STANAG 1008: οι προδιαγραφές του NATO για πολεμικά πλοία
 ** TDD_I
 *** δεν δίνεται αριθμητικό όριο

Πιν. 3.2 Σύγκριση προδιαγραφών νηογνομόνων και προτύπων, για αρμονική παραμόρφωση ^[1]

3.8.1 Επιπτώσεις αρμονικών:

Η παρουσία ανώτερων αρμονικών προκαλεί ένα πλήθος προβλημάτων που μακροχρόνια μπορούν να γίνουν καταστροφικά για τις διάφορες συσκευές. Παρακάτω δίνονται εν συντομία επιπτώσεις των ανώτερων αρμονικών.

Υπερθέρμανση αγωγού φάσης και ουδέτερου : Η παρουσία ανώτερων αρμονικών ρεύματος οδηγεί συχνά στην υπερφόρτιση των αγωγών οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί να αντέχουν συγκεκριμένο φορτίο. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο σημαντικό σε συστήματα χαμηλής τάσης όπου οι τριπλές αρμονικές αθροίζονται στον ουδέτερο αντί να μηδενίζονται όπως συμβαίνει σε συμμετρικά (balanced) συστήματα. Σε τριφασικά συστήματα συνδεδεμένα σε αστέρα, τα τρία ρεύματα αθροίζονται στο ουδέτερο σημείο όταν οι φάσεις φορτίζονται συμμετρικά. Σε αντίθετη περίπτωση παρατηρείται ρεύμα στον ουδέτερο διάφορο του μηδενός το οποίο μπορεί να είναι έως και 170% του ρεύματος φάσης για μεγάλο αρμονικό περιεχόμενο.

Επιδερμικό φαινόμενο σε αγωγούς (skin effect) : Το επιδερμικό φαινόμενο μπορεί να οριστεί ως η τάση του ρεύματος να ρέει στην εξωτερική επιφάνεια ενός αγωγού. Συνήθως θεωρείται αμελητέο στην συχνότητα των 50-60Hz, όπως για συχνότητες πάνω από 350-420Hz (7η αρμονική) αρχίζει να γίνεται αντιληπτό προκαλώντας επιπλέον θερμικές απώλειες.

Κινητήρες και γεννήτριες : Η κύρια επίπτωση των ανώτερων αρμονικών σε σύγχρονες ή ασύγχρονες μηχανές, είναι η αύξηση της θερμοκρασίας τους με αποτέλεσμα τις αυξημένες απώλειες. Οι απώλειες αυτές παρατηρούνται κυρίως στα τυλίγματα και τον πυρήνα της

μηχανής. Στους κινητήρες, αύξηση των απωλειών σε συνδυασμό με αρμονικές τάσης, προκαλεί την αύξηση της μαγνητικής ροής στο διάκενο με αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος στα τυλίγματα του δρομέα. Αυτή η επιπλέον καταπόνηση της μηχανής έχει αντίκτυπο στην διάρκεια ζωής της και την αξιοπιστία της. Στις σύγχρονες μηχανές οι επιπλέον απώλειες λόγω των ανώτερων αρμονικών παρατηρούνται κυρίως στα τυλίγματα του στάτη και στα τυλίγματα απόσβεσης. Η αλληλεπίδραση μεταξύ της μαγνητικής ροής της μηχανής και αυτής που προκαλείται από ανώτερες αρμονικές ρεύματος, προκαλεί ανώτερες αρμονικές ροπής. Η επίδραση αυτής της ροπής είναι σχεδόν αμελητέα αφού η ροπή που προκαλείται από αρμονικές θετικής ακολουθίας αλληλοαναιρείται από αυτήν που παράγεται από αρμονικές αρνητικής ακολουθίας. Παρόλα αυτά, οι αρμονικές μπορούν να προκαλέσουν ταλαντώσεις στην ροπή της μηχανής, επομένως και στον μηχανικό άξονα όταν η συχνότητα τους βρεθεί κοντά στην φυσική συχνότητα του μηχανικού συστήματος. Τέλος, η παρουσία ανώτερων αρμονικών προκαλεί επιπλέον θόρυβο κατά την λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής.

Μετασηματιστές : Η παρουσία ανώτερων αρμονικών ρεύματος σε μετασηματιστές συνεπάγεται την αύξηση των απωλειών εξαιτίας δινορρευμάτων, αφού εξαρτώνται από το τετράγωνο της συχνότητας τους, προκαλώντας αύξηση στην θερμοκρασία λειτουργίας με αποτέλεσμα την μικρότερη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία.

Ηλεκτρονικοί μετατροπείς – συσκευές : Παρόλο που οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς θεωρούνται πηγές αρμονικών, οι ίδιες αυτές συσκευές είναι ευαίσθητες σε διάφορες διαταραχές αλλά και στην παρουσία αρμονικών. Στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς συχνά παρατηρούνται προβλήματα λόγω παραμορφωμένων κυματομορφών τάσης. Η μέγιστη τιμή της τάσης, μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί ανάλογα με την φάση των αρμονικών, προκαλώντας δυσλειτουργία των συσκευών, ακόμα και καταστροφή, όταν η τάση αυτή ξεπεράσει τα όρια για τα οποία είναι σχεδιασμένη μια συσκευή

Τέλος, ηλεκτρονικές συσκευές όπως υπολογιστικά συστήματα, PLC, δηλαδή ευαίσθητα σε ηλεκτρονικές διαταραχές συστήματα, θα πρέπει πάντα να προστατεύονται με ειδικές συσκευές επιτήρησης ισχύος, ώστε να αποφευχθεί η δυσλειτουργία τους.

3.8.2 Τεχνικές μείωσης της αρμονικής παραμόρφωσης

Τα πολλαπλά προβλήματα που δημιουργούν οι ανώτερες αρμονικές καθώς και η επίπτωση τους στον συντελεστή ισχύος συνέβαλε στην ανάπτυξη διάφορων μεθόδων και τεχνικών για τον περιορισμό τους. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις μεγάλες βασικές κατηγορίες

- **Παθητικές μέθοδοι,** συστήματα δηλαδή που περιλαμβάνουν παθητικά στοιχεία όπως πηνία και πυκνωτές. Τέτοια συστήματα είναι οι αντιδράσεις σειράς (series reactor), τα αρμονικά φίλτρα (harmonic filters), οι μετατροπείς πολλαπλών παλμών.
- **Ενεργές μέθοδοι,** δηλαδή τεχνικές που έχουν ως στόχο την εξάλειψη των ανώτερων αρμονικών παράγοντας τις ίδιες αλλά αντίθετης φάσης αρμονικές ώστε το συνολικό τους διανυσματικό άθροισμα να είναι μηδέν. Τέτοια συστήματα είναι τα παράλληλα ή σε σειρά ενεργά φίλτρα.

- **Υβριδικά συστήματα**, δηλαδή συσκευές που περιέχουν παθητικά και ενεργά στοιχεία με αποτέλεσμα την καλύτερη εξάλειψη των ανώτερων αρμονικών και την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η κάθε μέθοδος ξεχωριστά.

Κατηγορία	Χαρακτηριστικά	Αιτίες	Συνέπειες
Βυθίσεις τάσης	- Διάρκεια - rms τάση - Σχέση των 3 φάσεων	- Σφάλματα - Εκκίνηση κινητήρα - Ηλεκτρισή μετασχηματιστή	Δυσλειτουργίες ή διακοπή λειτουργίας Η/Υ, κινητήρων, ρυθμιστές στροφών κινητήρων, συστημάτων ελέγχου (PLC)
Ανύψωση τάσης	-Διάρκεια - rms τάση	- Σφάλματα σε αγειώτα συστήματα	Καταπόνηση και καταστροφή μονώσεων
Ταχέα μεταβατικά φαινόμενα	- Μέγιστη τιμή τάσης - Συχνότητα - Χρόνος ανύψωσης - Διάρκεια - Τυπος κυματομορφής	- Διακοπτικά φαινόμενα - Ηλεκτρισή πυκνωτών	Καταστροφή μονώσεων, δυσλειτουργίες Η/υ και ρυθμιστών στροφών κινητήρων
Αρμονικές	- Χαρακτηρισμός μέσω με-τασχηματισμού Fourier - THD για τάση και ένταση	Μη γραμμικά φορτία: - ανορθωτές - φορτία τόξου	Υπερφορτίσεις – καταστροφή στοιχείων, λειτουργία προστασίας, λανθασμένη λειτουργία μετρητικών οργάνων, μηχανική καταπόνηση.
Ασυμμετρία τάσης	Ο λόγος της αρνητικής προς τη θετική συμμετρική συνιστώσα της τάσης	- Ασύμμετρη φόρτιση φάσεων - Ανοιχτοκυκλώματα - Μονοφασική παραγωγή	Θερμική καταπόνηση κινητήρων και μετασχηματιστών, δυσλειτουργία και διακοπή λειτουργίας κινητήρων
Διαμόρφωση τάσης	P_{st} (short term severity factor) και P_{lt} (long term severity factor - 2 ωρών)	- Φούρνοι τόξου - Συχνές εκκινήσεις κινητήρων	Τρεμοσβήσιμο φωτισμού

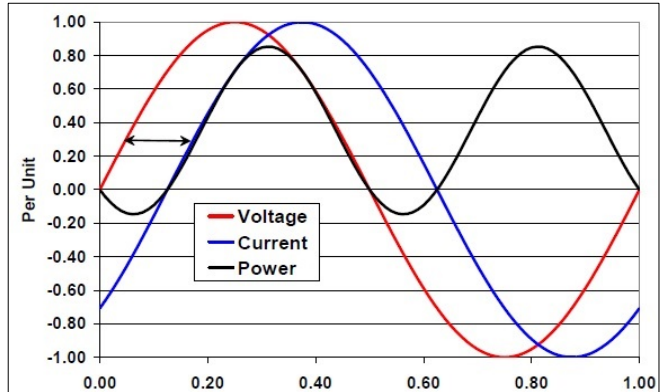
Πιν. 3.3 Συγκεντρωτικός πίνακας κυριότερων φαινομένων ποιότητας ισχύος ^[1]

Parameter	60092-101	STANAG 1008
	ships	
Steady-state voltage deviations	+6, -10%	±5% (±6%)
Phase to phase voltage unbalance (continuous)	3%	2%
Voltage momentary deviation	±20%	±16% (±20%)
Voltage transients recovery time	1,5 s	2 s
Total harmonic distortion THD	5%	5%
A single distortion (any harmonic greater than)	3%	3%

Πιν. 3.4 Συγκεντρωτικός πίνακας αποδεκτών διακυμάνσεων τάσης κατά τα αντίστοιχα πρότυπα ^[2]

3.9 Συντελεστής ισχύος (Power factor)

Ο συντελεστής ισχύος εκφράζει την ποσότητα της πραγματικής ισχύος που τελικά καταναλώνεται και αφορά τα δίκτυα με εναλλασσόμενο ρεύμα. Σε δίκτυα όπως των πλοίων, κυκλοφορεί και άεργη ισχύς (reactive power), η οποία δεν παράγει πραγματικό έργο, είναι όμως απαραίτητη για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στους επαγωγικούς κινητήρες (στο διάκενο αέρος μεταξύ του στάτη και του δρομέα της μηχανής) και του ηλεκτρικού πεδίου στους πυκνωτές. Τα φορτία μας δεν είναι καθαρά ωμικά, υπάρχουν πηνία και πυκνωτές που μεταβάλλουν τη διαφορά φάσης της κυματομορφής της τάσης σε σχέση με την κυματομορφή του ρεύματος στο πεδίο του χρόνου (Σχ.3.6).



Σχ. 3.6 Μετατόπιση κυματομορφής ρεύματος σε σχέση με την τάση (επαγωγικό φορτίο, η κυματομορφή του ρεύματος έπεται)

Για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος υπολογισμού της άεργης ισχύος θα χρειαστεί να θυμηθούμε ορισμένες έννοιες που εισήχθησαν στο μάθημα των ηλεκτροτεχνικών εφαρμογών, με σημαντικότερη, την έννοια του συντελεστή ισχύος.

Από βασικές γνώσεις ηλεκτροτεχνίας γνωρίζουμε ότι η μιγαδική ισχύς στο πεδίο της συχνότητας είναι το διάνυσμα :

$$\bar{S} = VI < (\varphi_V - \varphi_I) \quad (3.3)$$

με V , I την ενεργό τιμή της τάσης και του ρεύματος και φ_V , φ_I την αρχική φάση της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα.

Η παραπάνω σχέση σε ορθογωνική μορφή γράφεται:

$$\bar{S} = VI \cos(\varphi_V - \varphi_I) + jVI \sin(\varphi_V - \varphi_I) \quad (3.4)$$

Το πραγματικό μέρος της μιγαδικής ισχύος είναι η ενεργός ισχύς (μονάδα μέτρησης τα *Watt*) και συμβολίζεται με P . Το φανταστικό μέρος, είναι η άεργη ισχύς (μονάδα μέτρησης τα *Volt Ampere Reactive, VAR*) και συμβολίζεται με Q .

Επομένως μπορούμε να γράψουμε το διάνυσμα της μιγαδικής ισχύος ως:

$$\bar{S} = P + jQ. \quad (3.5)$$

Το μέτρο της, ίσο με:

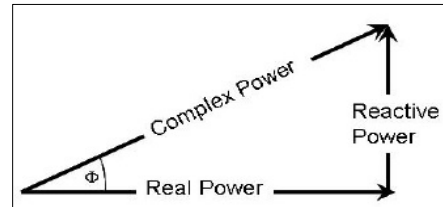
$$|\bar{S}| = VI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.6)$$

το ονομάζουμε φαινόμενη ισχύ (apparent/complex power) και έχει ως μονάδα μέτρησης τα *Volt Ampere, VA*.

Το ορθογώνιο τρίγωνο με κάθετες πλευρές την πραγματική και άεργο ισχύ και υποτείνουσα τη φαινόμενη ισχύ, ονομάζεται τρίγωνο ισχύος (Σχ. 3.7) και μπορούμε να ορίσουμε τον συντελεστή ισχύος (power factor) ίσο με:

$$PF = \frac{P}{|S|} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (3.7)$$

όπου για ημιτονοειδείς κυματομορφές χωρίς παραμορφώσεις ισούται με το συνημίτονο της διαφοράς φάσης μεταξύ της κυματομορφής της τάσης και του ρεύματος, $\cos(\varphi_V - \varphi_I)$.



Σχ. 3.7 Τρίγωνο ισχύος

Ένας (ιδανικός) ωμικός καταναλωτής που απορροφά μόνο πραγματική ισχύ έχει συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα, καθώς δε προκαλείται διαφορά φάσης μεταξύ των δύο κυματομορφών. Ένας επαγωγικός, που απορροφά μόνο άεργη ισχύ (ιδανικό πηνίο χωρίς ωμική αντίσταση), έχει συντελεστή ισχύος (επαγωγικό) ίσο με το μηδέν γιατί η διαφορά φάσης είναι 90° και η κυματομορφή του ρεύματος έπεται (lagging) της κυματομορφής της τάσης. Ένας ιδανικός πυκνωτής, παράγει άεργη ισχύ, έχει και αυτός συντελεστή ισχύος (χωρητικό) ίσο με το μηδέν γιατί η διαφορά φάσης είναι -90° , εδώ η κυματομορφή του ρεύματος προηγείται (leading) της τάσης. Στα κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος, θεωρείται η σύμβαση ότι οι επαγωγές (πηνία) καταναλώνουν άεργη ισχύ (θετικό πρόσημο) ενώ οι χωρητικότητες (πυκνωτές) θεωρείται ότι αποτελούν πηγή άεργης ισχύος (αρνητικό πρόσημο).

Γιατί όμως είναι σημαντική η τιμή του συντελεστή ισχύος;

Για έναν καταναλωτή, η ωφέλιμη ισχύς σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις είναι $P = PF \cdot S$. Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής ισχύος, τόσο μικρότερη είναι η απορροφώμενη πραγματική ισχύς. Δεδομένου ότι η τάση παραμένει σταθερή, απαιτείται μεγαλύτερη τιμή ρεύματος για να μεταφέρουμε την ισχύ που επιθυμούμε, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερες απώλειες κατά τη μεταφορά (σύμφωνα με τον παράγοντα joule, I^2R). Μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων σημαίνουν, αύξηση στις διατομές των αγωγών, στην ονομαστική ισχύ των πηγών/μετασχηματιστών, άρα αύξηση και του κόστους εγκατάστασης.

Επίσης, η σύγχρονη γεννήτρια του πλοίου έχει περιορισμένη δυνατότητα παραγωγής άεργης ισχύος, συνήθως προδιαγράφεται από τους κατασκευαστές να λειτουργεί με συντελεστή ισχύος $PF=0.8$, επαγωγικό. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι είναι δυνατόν μια γεννήτρια σε μια συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας να μπορεί να τροφοδοτήσει τα απαιτούμενα kW στο δίκτυο αλλά όχι και την απαραίτητη άεργη ισχύ σε kVAR και επομένως λειτουργώντας άνω των ονομαστικών τιμών της να υπάρξει κίνδυνος διακοπής της λειτουργίας της ή βλάβης.

Στην περίπτωση που τροφοδοτούμε ένα μη γραμμικό φορτίο, παρόλο που η τάση τροφοδοσίας είναι συμμετρική ημιτονοειδής, το ρεύμα είναι παραμορφωμένο. Στην περίπτωση αυτή, για τον υπολογισμό του συντελεστή ισχύος πρέπει να λάβουμε υπόψιν το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος.

3.9.1 Η σημασία της διόρθωσης του συντελεστή ισχύος

Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Μερικά από αυτά είναι:

- Καλύτερη εκμετάλλευση των ηλεκτρικών μηχανών και μετασχηματιστών. Οι συσκευές αυτές επιλέγονται με βάση την ονομαστική φαινόμενη ισχύ. Αυξάνοντας τον συντελεστή ισχύος κρατάμε την ενεργό ισχύ σταθερή και μειώνουμε την άεργο με αποτέλεσμα η ονομαστική φαινόμενη ισχύς να είναι μικρότερη, που συνεπάγεται μικρότερο κόστος και μέγεθος.
- Καλύτερη εκμετάλλευση των αγωγών (καλωδίων): Μειώνοντας την άεργο ισχύ που περνά από έναν αγωγό, μειώνουμε και το ρεύμα που διέρχεται από αυτόν, υπό συγκεκριμένη φόρτιση. Έτσι, οι αγωγοί που απαιτούνται είναι μικρότερης διατομής με αποτέλεσμα το μειωμένο κόστος.
- Μείωση απωλειών Joule: Μικρότερο ρεύμα σε έναν αγωγό συνεπάγεται και μικρότερες ωμικές απώλειες όπως αναλύσαμε προτύτερα.

3.9.2 Μέθοδοι διόρθωσης συντελεστή ισχύος

Οι μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να αυξηθεί ο συντελεστής ισχύος σε ένα συγκεκριμένο σημείο του δικτύου μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες.

- Με αντιστάθμιση της αέργου ισχύος με συσκευές όπως οι σύγχρονοι αντισταθμιστές, οι στατοί αντισταθμιστές (static-var compensators, STATCOM) και αντισταθμιστές άεργης ισχύος με αντιστροφείς (inverter var compensators). Επίσης, η αντιστάθμιση της άεργης ισχύος μπορεί να πραγματοποιηθεί με απλές συστοιχίες πυκνωτών τοποθετημένες σε συγκεκριμένα σημεία για την παροχή της άεργης ισχύος που απαιτείται.
- Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν βελτιωμένοι ηλεκτρονικοί μετατροπείς που επιτυγχάνουν υψηλό συντελεστή ισχύος. Ο έλεγχος αυτών των μετατροπέων στοχεύει στην ελάχιστη παραμόρφωση και φασική μετατόπισης του ρεύματος εισόδου, περιορίζοντας τις ανώτερες αρμονικές και μειώνοντας την άεργο ισχύ στην είσοδο του. Η βασική λογική της διόρθωσης του συντελεστή ισχύος σε ανορθωτικές διατάξεις έγκειται στον έλεγχο του μετατροπέα κατά τέτοιο τρόπο ώστε η διαφορά φάσης της τάσης εισόδου από το ρεύμα να είναι μηδενική και παράλληλα, το ρεύμα να έχει χαμηλό αρμονικό περιεχόμενο.

3.10 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- 1. Ηλεκτροπρόωση πλοίων και πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο: Προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος, I. Μ. Προυσαλίδης, I. Κ. Χατζηλάου, Ν. Χατζηαργυρίου, Χ. Φραγκόπουλος, Επιστημονικό άρθρο*
- 2. Electric Power Quality in Isolated Systems, Czarkowski, Mindykowski, Επιστημονικό άρθρο*
- 3. Voltage and frequency deviations in exemplary ship's network, Mindykowski, Szweda, Tarasiuk, Επιστημονικό άρθρο*
- 4. Μελέτη και κατασκευή τριφασικού ανορθωτή με διόρθωση του συντελεστή ισχύος, Ανδρέας Τριανταφύλλου Φέτσης, Διπλωματική εργασία*

4 Κεφάλαιο : Ηλεκτρολογικές Μελέτες

4.1 Εισαγωγή

Στην σχεδίαση της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης του πλοίου, πραγματοποιούνται όλες οι μελέτες που προδιαγράφονται για τη σχεδίαση ηπειρωτικών βιομηχανικών ΣΗΕ (λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδιαιτερότητες του δικτύου που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 1). Αφορούν κυρίως την αξιολόγηση της αρχικής και της μελλοντικής απόδοσης του συστήματος, την αξιοπιστία, την ασφάλειά καθώς και την πιθανότητα επέκτασης του στο μέλλον. Συνήθως είναι οι εξής:

- ανάλυση φορτίου (load analysis)
- μελέτη ικανότητας φόρτισης αγωγών (ampacity study)
- μελέτη ροής φορτίου (load flow study),
- μελέτη βραχυκυκλωμάτων (short-circuit study)
- μελέτη επιλογικής συνεργασίας (coordination study)
- μελέτη εκκίνησης κινητήρων (motor starting study).
- μελέτη ευστάθειας συστήματος (stability study)

Επιπλέον μελέτες για την γείωση, τις αρμονικές, τα μεταβατικά φαινόμενα και την αξιοπιστία της εγκατάστασης είναι πιθανόν να απαιτούνται, ανάλογα την περίπτωση. Ο νηογνώμονας προδιαγράφει ακριβώς ποιες μελέτες χρειάζεται για την πιστοποίηση της εγκατάστασης κατά το στάδιο του σχεδιασμού (plan approval) και ένα απόσπασμα ενός τέτοιου πίνακα απαιτήσεων, ενδεικτικά, παρατίθεται στην επόμενη σελίδα

Ο σχεδιασμός της εγκατάστασης πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Αυτά είναι το στάδιο της προμελέτης (concept design) και το στάδιο της λεπτομερούς σχεδίασης (detailed design). Σε αυτή τη διπλωματική εργασία θα μας απασχολήσει μέρος του δεύτερου. Στο στάδιο της λεπτομερούς σχεδίασης, κάποιες μελέτες υλοποιούνται με τον “παραδοσιακό τρόπο”, δηλαδή με υπολογισμούς μέσω λογιστικών φύλλων και ακολουθώντας τη μεθοδολογία και τα βήματα που προδιαγράφουν κανονισμοί και τεχνικά εγχειρίδια ενώ κάποιες άλλες μέσω προσομοίωσης σε εξειδικευμένα λογισμικά ανάλυσης και σχεδίασης ηλεκτρικών εγκαταστάσεων (ETAP, SKM Powertools, NEPLAN κλπ).

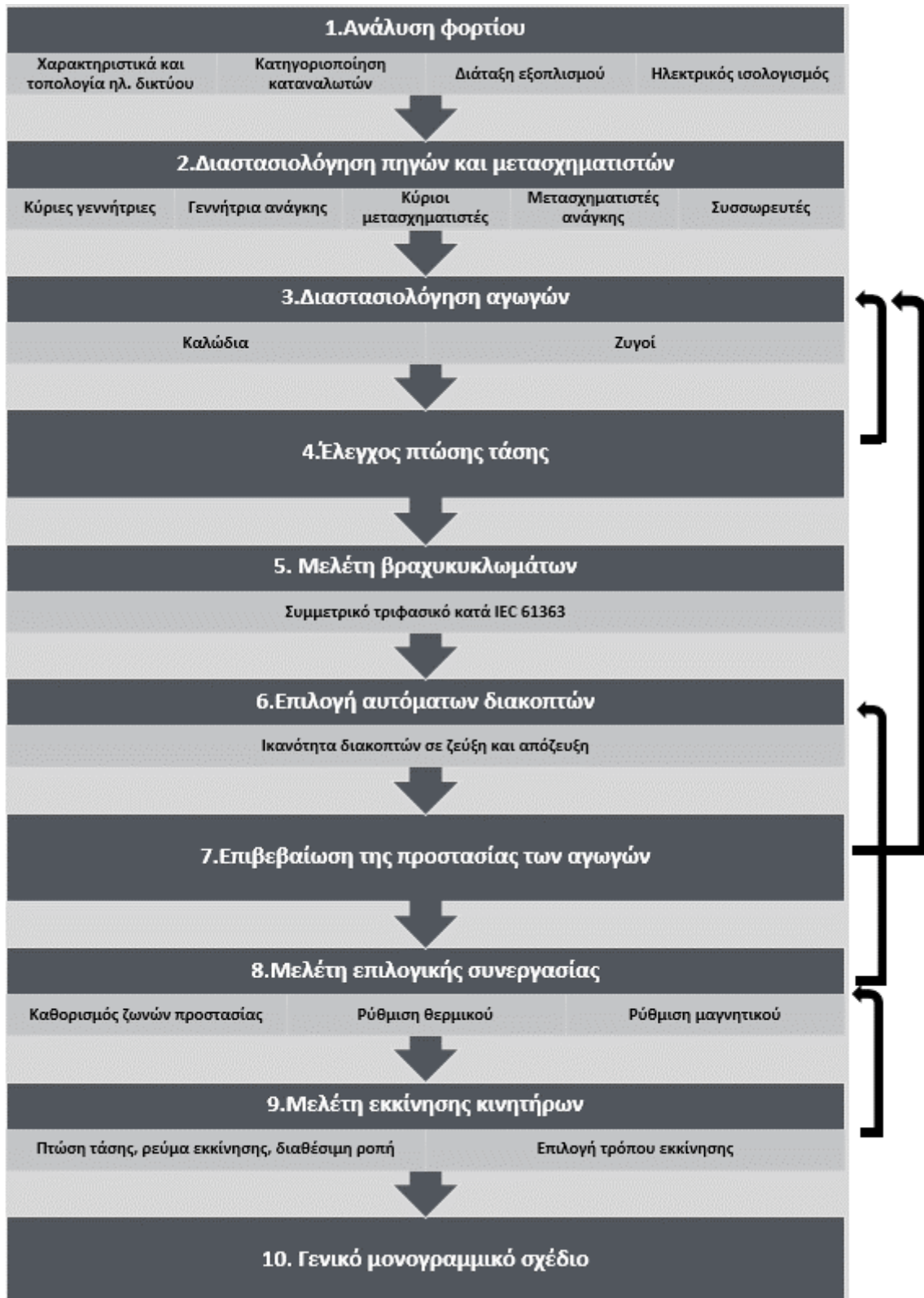
Γενικά, ο σχεδιασμός μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης, είναι μια επίπονη και περίπλοκη διαδικασία. Παρόλα αυτά, για ένα τυπικό εμπορικό πλοίο, όπως το δεξαμενόπλοιο, ο σχεδιασμός απλοποιείται σε μεγάλο βαθμό λόγω της δυνατότητας χρήσης δεδομένων από όμοια πλοία και πρακτικών που εφαρμόζονται εδώ και δεκαετίες.

Αντικείμενο	Έγγραφο/σχέδιο τεκμηρίωσης	Πρόσθετη περιγραφή	Προς έγκριση (AP) ή προς πληροφόρηση (FI) κατόπιν αιτήσεως (R)
Σύστημα Ηλεκτρικής Ισχύος	Γενικό μονογραμμικό σχέδιο (One line diagram)		AP
	Ηλεκτρικός Ισολογισμός (Electric load analysis)	Για: Ε.Ρ. συστήματα ισχύος / Σ.Ρ. συστήματα συσσωρευτών / Αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS) συστήματα	AP
	Υπολογισμοί βραχυκυκλωμάτων (Short circuit calculations)	Υπολογισμοί για μονοφασικό σφάλμα γείωσης θα συμπεριλαμβάνεται σε συστήματα με γειωμένο τον ουδέτερο	FI
	Υπολογισμοί αρμονικής παραμόρφωσης (Harmonic distortion calculations)	Απαιτείται σε περίπτωση που το 20% και άνω της ισχύος των εγκατεστημένων καταναλωτών, σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ, οδηγείται από διατάξεις ημιαγωγών	FI
	Υπολογισμοί πτώσεως τάσης (Voltage drop calculations)	Κατόπιν αιτήσεως σε περίπτωση που καταναλωτής με ισχύ το 30% και άνω της τροφοδοσίας του (γεννήτρια, μετασχηματιστής) , εκκινείται απευθείας (DOL)	FI, R
	Ανάλυση /έλεγχος διακριτικότητας (Discrimination analysis)	Το έγγραφο θα καλύπτει: — προστασία γεννήτριας — κυκλώματα εντός του κύριου πίνακα (Sec.13 A801) — κυκλώματα εντός του πίνακα ανάγκης (Sec.13 A802) — συσσωρευτές και συστήματα αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS)	AP
	Σχέδιο διάταξης εξοπλισμού (Arrangement plan)	Περιλαμβάνοντας τις θέσεις των πηγών ενέργειας, πίνακες, υποπίνακες διανομής για το κύριο και για το σύστημα ανάγκης, UPS, συσσωρευτές. Για τα ανωτέρω θα καταγράφονται σχέδιο εισόδων, περιοχές υψηλού κινδύνου για πυρκαγιά	FI
	Ανάλυση αξιοπιστίας και ανάλυση επίδρασης κατάστασης αστοχίας (F.M.E.A.)	Απαιτείται σε περίπτωση που δεν υπάρχει ξεχωριστή πηγή ανάγκης (Sec.2 C104.) Διαφορετικά, κατόπιν αιτήσεως	AP
Εκκινητές (starters)	Σχηματικά διαγράμματα ηλεκτρικού εξοπλισμού	Εκκινητές για τις κρίσιμες υπηρεσίες	AP
Καλώδια	Φιλοσοφία επιλογής της καλωδίωσης	Για όλα τα πλοία που εμπύτουν στους κανονισμούς (Pt4.Ch.8)	AP

Πιν. 4.1 Σχεδίαση συστήματος, απαιτήσεις εγγράφων πιστοποίησης (DNV Rules Pt4/Ch.8/Sec.1/B201, μέρος πίνακα B1)

4.2 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία για τη μελέτη σχεδιασμού του ηλεκτρικού συστήματος ισχύος συντίθεται στα παρακάτω βήματα (Σχ. 4.1)



Σχ. 4.1 Διάγραμμα ροής για τη σχεδίαση της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης

Αφετηρία μας είναι η προετοιμασία μιας λίστας φορτίων (Load List) με τις κατηγορίες των ηλεκτρικών καταναλωτών (ομαδοποίηση ανάλογα του συστήματος ή του δικτύου που εξυπηρετούν και της κρισιμότητας τους), τον καθορισμό των επιπέδων τάσης που θα λειτουργήσουν, και μια χονδρική εκτίμηση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος βασιζόμενοι σε στοιχεία της βιβλιογραφίας ή όμοιων πλοίων.

LOAD LIST		POWER ESTIMATION
MAIN SYSTEM		
(P)-PROPULSION PLANT & MANEUVERING (440V)		
(S)-SHIP AUXILIARY MACHINERY (440V)		
(C)-CARGO EQP. (440V)		
(M)-MISC/OTHER MACHINERY (440V)		
HVAC	(A)-AIR CONDITION PLANT (440V)	
	(V)-VENTILATION (440V)	
(D)-DECK MACHINERIES (440V)		
(G)-GALLEY & LAUNDRY EQUIPMENT (440V)		
(N)-NAVIGATION, COMMUNICATION & ACCOMODATION (220V)		
(L)-LIGHTS (220V)		
EMERGENCY SYSTEM		
EMERGENCY LOAD (440V)		
EMERGENCY LOAD (220V)		

Πιν. 4.2 Κατηγοριοποίηση φορτίων

Στη συνέχεια μπορούμε να σχεδιάσουμε παραπάνω από ένα προκαταρκτικά μονογραμμικά σχέδια όπου θα παρουσιάζεται η λογική των συστημάτων ισχύος προς μελέτη (πχ. δυνατότητα εγκατάστασης αξονικής γεννήτριας, πλήθος γεννητριών, εφεδρεία συστήματος κλπ.).

Ο ηλεκτρικός (ενεργειακός) ισολογισμός είναι η πρώτη λεπτομερής μελέτη που ετοιμάζουμε και αποτελεί τη βάση για όλες τις υπόλοιπες μελέτες. Μπορούμε να πούμε ότι αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ των φάσεων της προμελέτης και της λεπτομερούς σχεδίασης. Επιλέγουμε ηλεκτρικό εξοπλισμό που πληροί τις προδιαγραφές της εγκατάστασης. Αφού καταγράψουμε όλους τους ηλεκτρικούς καταναλωτές (με τον τρόπο που δίνεται στην ενότητα 4.3), είμαστε σε θέση να διαστασιολογήσουμε με ακρίβεια τις γεννήτριες και τους μετασχηματιστές. Καταγράφουμε τις σχετικές αποστάσεις του ηλεκτρικού εξοπλισμού από τα κέντρα διανομής ώστε να υπολογίσουμε τα μήκη των καλωδίων και επιλέγουμε τις διατομές των αγωγών (σύμφωνα με τον τρόπο που παρουσιάζεται στην ενότητα 4.4).

Σε αυτό το σημείο μπορεί να ακολουθήσει η μελέτη ροής φορτίου, προκειμένου να υπολογίσουμε με ακρίβεια τον συντελεστή ισχύος του συστήματος, την άεργη ισχύ που κυκλοφορεί, την πραγματική φόρτιση των αγωγών, τις πτώσεις τάσεις και γενικότερα να αξιολογήσουμε την απόδοση του συστήματος.

Για τη διαστασιολόγηση των μέσων προστασίας (αυτόματοι διακόπτες) και για τη ρύθμισή τους για επιλεκτική συνεργασία και επιθυμητή λειτουργία κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων (πχ εκκίνηση κινητήρα μεγάλης ισχύος) πραγματοποιούμε μελέτη βραχυκυκλωμάτων και μελέτες μεταβατικών φαινομένων. Τέλος, σχεδιάζουμε το λεπτομερές μονογραμμικό σχέδιο με τα βασικά χαρακτηριστικά όλων των δομικών στοιχείων της ηλεκτρικής εγκατάστασης.

4.2.1 Παρατηρήσεις

Διαστασιολόγηση γεννητριών και μετασχηματιστών

-λαμβάνοντας υπόψιν τουλάχιστον 15% περιθώριο ισχύος

Διαστασιολόγηση αγωγών

-επιλογή κατάλληλου τύπου μόνωσης του αγωγού. Περίβλημα ανάλογα του φορτίου που εξυπηρετεί, της θέσης, και ανάλογα του αν διατρέχει σε επικίνδυνη ζώνη.

-καταγραφή των σχετικών θέσεων των καταναλωτών ως προς τον κεντρικό πίνακα και τους αντίστοιχους υποπίνακες διανομής. Καθορισμός της διαδρομής της καλωδίωσης, της ομαδοποίησης και του μήκους της. Για λόγους ασφαλείας, η καλωδίωση τουλάχιστον μίας γεννήτριας πρέπει να έχει εντελώς ξεχωριστή διαδρομή.

-υπολογισμός της διατομής και της ικανότητας φόρτισης των αγωγών για συγκεκριμένη θερμοκρασία και ομαδοποίηση τους.

-υπολογισμός πτώσης τάσης των γραμμών σε κανονική λειτουργία και κατά την εκκίνηση κινητήρων.

Επιλογή αυτόματων διακοπών/ασφαλειών

-χαρακτηριστικές έντασης-χρόνου, συμβατές με τον τύπο του προστατευόμενου φορτίου

Επιβεβαίωση της προστασίας των αγωγών

-επαλήθευση της προστασίας έναντι υπερφόρτισης. Η ρυθμισμένη τιμή της έντασης του ρεύματος του αυτόματου διακόπτη πρέπει να είναι υψηλότερη του ρεύματος του φορτίου αλλά χαμηλότερη της ικανότητας φόρτισης του αγωγού.

-επαλήθευση προστασίας έναντι βραχυκυκλώματος.

4.3 Μελέτη Ηλεκτρικού Ισολογισμού^{[1],[14]}

Η μελέτη ηλεκτρικού ισολογισμού είναι η λεπτομερής καταγραφή και ο υπολογισμός όλων των ηλεκτρικών φορτίων που καταναλώνει το πλοίο, σε διάφορες χαρακτηριστικές καταστάσεις λειτουργίας (operation profiles) ώστε να βρούμε την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ που πρέπει να διαθέσει το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος σε κάθε μία από αυτές. Αφού πραγματοποιηθεί η μελέτη, είμαστε σε θέση να διαστασιολογήσουμε τις γεννήτριες καθώς και άλλα συστήματα του ηλεκτρικού δικτύου (πχ μετασχηματιστές).

Πιο αναλυτικά, η διαδικασία υπολογισμού είναι η εξής:

1.Καθορίζουμε τις καταστάσεις λειτουργίας που θα μελετήσουμε.

Ανεξαρτήτως τύπου πλοίου, οι περισσότερες καταστάσεις που απαιτείται ο υπολογισμός της ηλεκτρικής ισχύος είναι κοινές. Αυτές είναι:

- **Κανονική κατάσταση εν-πλώ (normal sea going condition)**, όπου το πλοίο επιχειρεί σε έμφορτη κατάσταση, στην υπηρεσιακή του ταχύτητα. Σε αυτή την κατάσταση θεωρείται ότι οι περισσότεροι ηλεκτρικοί καταναλωτές του πλοίου βρίσκονται κοντά στο πλήρες φορτίο. Η απαίτηση ηλεκτρικής ισχύος πρέπει να καλύπτεται από μία γεννήτρια (για συμβατική μηχανική πρόωση) και καλή πρακτική θεωρείται να υπάρχει διαθέσιμο περιθώριο ισχύος της τάξεως του 15-20%.
- **Ελιγμών (maneuvering)**, εννοώντας την κατάσταση λειτουργίας όπου το πλοίο προσεγγίζει ή αναχωρεί από τον λιμένα. Σε ένα πετρελαιοφόρο με συμβατική πρόωση, η διαφορά στην ηλεκτρική κατανάλωση έγκειται στο γεγονός ότι αρκετοί ηλεκτρικοί καταναλωτές λειτουργούν υπό μερικό φορτίο και έχουν τεθεί σε λειτουργία επιπρόσθετοι ενεργοβόροι καταναλωτές όπως το bowthruster (αν διατίθεται) για τους ελιγμούς, τα blowers της κύριας μηχανής (λόγω χαμηλών στροφών κ.μ. έχουμε χαμηλότερη ισχύ καυσαερίων που τροφοδοτούν τον υπερπληρωτή), τα μηχανήματα του καταστρώματος (deck machineries) για την πρόσδεση/αγκυροβόληση (mooring). Επίσης έχουμε και αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος από τον μηχανισμό του πηδαλίου. Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας, οι αυξημένες ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται από δύο παραλληλισμένες γεννήτριες (έχοντας για λόγους εφεδρείας την τρίτη γεννήτρια σε κατάσταση stand-by).
- **Χειρισμών φορτίου (cargo operations)**, όπου ανάλογα τον τύπο του πλοίου τίθενται σε λειτουργία τα μηχανήματα που διαθέτει για την φόρτωση/εκφόρτωση του φορτίου. Για ένα δεξαμενόπλοιο πετρελαίου με συμβατική πρόωση και ατμοκίνητες αντλίες φορτίου, οι επιπρόσθετοι ηλεκτρικοί καταναλωτές είναι συνήθως οι αντλίες συμπυκνώματος, οι ανεμιστήρες/αντλίες του συστήματος αδρανούς αερίου (inert gas system), οι ανεμιστήρες εξαερισμού του αντλιοστασίου, καθώς βέβαια και οι αντλίες θαλασσίου έρματος (ballast pumps). Για ένα δεξαμενόπλοιο με ηλεκτροκίνητες αντλίες φορτίου (όπως φυσικά τα LNG carriers με ηλεκτρική πρόωση), πρέπει να συμπεριλάβουμε εκτός από τις αντλίες όλα εκείνα τα συστήματα (συμπιεστές, εναλλάκτες θερμότητας κα) που η λειτουργία τους, κατά την φορτο-εκφόρτωση, είναι απαραίτητη. Συνήθως είναι η κατάσταση στην οποία έχουμε τη μεγαλύτερη απαίτηση ηλεκτρικής ισχύος, για πλοία με μηχανική πρόωση

(λόγω κυρίως των αντλιών έρματος). Η απαίτηση ισχύος καλύπτεται και εδώ από δύο παραλληλισμένες γεννήτριες.

- **Επείγουσα κατάσταση (emergency condition)**, είναι η κατάσταση λειτουργίας στην οποία για κάποιο λόγο (black-out, πυρκαγιά) έχουμε χάσει τη δυνατότητα τροφοδότησης από το κύριο ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, και καλείται μια εφεδρική παροχή ενέργειας να τροφοδοτήσει τους απαραίτητους ηλεκτρικούς καταναλωτές για την ασφάλεια του πλοίου και του πληρώματος (πηδάλιο, όργανα ναυσιπλοΐας, πυροσβεστικές αντλίες κα). Η απαίτηση ισχύος πρέπει να καλύπτεται από μία ξεχωριστή ηλεκτρογεννήτρια (emergency generator).
- **Άλλες καταστάσεις** που ανάλογα τον τύπο του πλοίου, είναι δυνατόν ή υποχρεωτικό να μελετηθούν, είναι οι καταστάσεις: εν-όρμω, καθαρισμού κυτών, εναλλαγής θαλάσσιου έρματος κτλ.

CLASSIFICATION	REQUIRED POWER (KW)					
	NORMAL SEA GOING		AT MANEU-VERING	AT CARGO OPERAT' G	AT EM' CY CONDITION	
	SEA GOING	CLEANING			BLACK OUT	FIRE
TOTAL OF CONTINUOUS LOAD						
TOTAL OF INTERMITTENT LOAD						
GROUP DIVERSITY FACTOR	0.40	0.40	0.40	0.40		
ACTUAL OF INTERMITTENT LOAD						
TOTAL OF DECK MACHINERY LOAD	-	-				
TOTAL POWER						
NO. OF RUNNING D/G						
LOAD PERCENT (%) OF RUNNING D/G						
LOAD PERCENT (%) OF RUNNING D/G (WITH TWO SETS BALLAST PUMP)						

Πιν. 4.3 Παράδειγμα συγκεντρωτικού πίνακα με την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ στις κύριες καταστάσεις λειτουργίας

2.Καταγράφουμε όλους τους ηλεκτρικούς καταναλωτές

Καταγράφουμε όλους τους ηλεκτρικούς καταναλωτές σε πίνακα ως εξής:

- στην πρώτη στήλη τοποθετούμε τους ηλεκτρικούς καταναλωτές χωρισμένους σε δύο ομάδες. Η μία ομάδα αποτελείται από τον πρωτεύοντα ουσιώδη εξοπλισμό, δηλαδή, εξοπλισμό που έχει συνεχή λειτουργία (continuous load). Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει τον δευτερεύοντα ουσιώδη και μη ουσιώδη εξοπλισμό, δηλαδή, εξοπλισμό που η λειτουργία του γίνεται κατά διακοπτόμενα χρονικά διαστήματα (intermittent load). Παραδείγματα της δεύτερης κατηγορίας αποτελούν οι αντλίες μεταφοράς (transfer pumps) καυσίμου/λιπαντικού λαδιού, ο αποτεφρωτήρας (incinerator), οι συμπιεστές του συστήματος εκκίνησης πεπιεσμένου αέρα (starting air, topping air compressors), το σύστημα επεξεργασίας λυμάτων (sewage treatment plant), μηχανήματα του μηχανουργείου κλπ. Επίσης μπορούμε να ομαδοποιήσουμε τους καταναλωτές ανάλογα με την ευρύτερη εγκατάσταση της οποίας αποτελούν μέρος (βοηθητικά πρόωσης, μηχανοστασίου, σύστημα κλιματισμού, εξαερισμού, μηχανήματα καταστρώματος, μηχανήματα ατμολέβητα κλπ).

- σε επόμενες στήλες ορίζουμε τον αριθμό των όμοιων μηχανημάτων που είναι εγκατεστημένα, τις αντίστοιχες αποδιδόμενες ονομαστικές ισχύεις (output), τους βαθμούς απόδοσης των μηχανημάτων και ακολούθως διαιρώντας τις τελευταίες δύο στήλες, υπολογίζουμε την ισχύ που απορροφά (input) το κάθε μηχάνημα.
- για να έχουμε μια πιο ρεαλιστική τιμή της απαιτούμενης ισχύος, κάνουμε την παραδοχή ότι ένα μηχάνημα σπάνια θα χρειαστεί να δουλέψει στο 100% της ονομαστικής του ισχύος, για όλο το χρονικό διάστημα της κάθε κατάστασης λειτουργίας, με εξαίρεση μερικών δικτύων φωτισμού και κάποιων οργάνων ναυσιπλοΐας. Γι' αυτό το λόγο εισάγουμε σε επόμενες στήλες συντελεστές φόρτισης (**Load Factors,LF**) και ετεροχρονισμού (**diversity factors,DF**). Στο μάθημα των ενεργειακών συστημάτων της σχολής χρησιμοποιούμε την έννοια του συντελεστή λειτουργίας (Service Load Factor,SLF) όπου πρακτικά μπορούμε να πούμε πως είναι το γινόμενο των δύο προαναφερθέντων συντελεστών και ισούται με το μέσο φορτίο δια το ονομαστικό φορτίο για κάποιο χρονικό διάστημα. Οι συντελεστές φόρτισης που χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρικούς ισολογισμούς μπορεί να διαφέρουν από ναυπηγείο σε ναυπηγείο (σπάνια περισσότερο του $\pm 10\%$). Δεν είναι αυθαίρετα ορισμένοι, συνδυάζουν προτεινόμενους συντελεστές φόρτισης από στατιστικές μελέτες σε ηπειρωτικές βιομηχανικές μονάδες, οδηγίες από πρότυπα καθώς και καταχωρήσεις από τις ώρες λειτουργίας των μηχανημάτων. Οι συντελεστές ετεροχρονισμού για τα διακοπόμενα φορτία συνήθως λαμβάνονται ίσοι με 0.4.
- ορίζουμε το πλήθος των όμοιων μηχανημάτων που βρίσκονται σε λειτουργία για κάθε υπηρεσιακό προφίλ.

PARTICULAR	NO. OF SET	OUTPUT (KW)	EFF' Y (%)	INPUT (KW)	LOAD FAC.	DIV. FAC.	AT SEA				AT PORT IN & OUT		AT CARGO OPERAT.	
							WS	SEA GOING	WS	CLEANING	WS		WS	
BALLAST PUMP	2	460.00	95.0	484.2	0.73	1.00	0	0.0	0	0.0	0	0.0	2	706.9
COMPOSITE BOILER F. O. PUMP	2	2.64	80.0	3.3	0.75	1.00	1	2.5	1	2.5	1	2.5	1	2.5
AIR CONDITION PLANT COMPRESSOR	2	86.00	92.6	92.9	0.60	1.00	2	111.5	2	111.5	2	111.5	2	111.5
AIR CONDITION PLANT FAN	2	17.30	91.5	18.9	0.55	1.00	2	20.8	2	20.8	2	20.8	2	20.8

Πιν. 4.4 παράδειγμα καταγραφής των ηλεκτρικών καταναλωτών και της απαιτούμενης ισχύος

3.Υπολογίζουμε την απαιτούμενη ενεργό ισχύ. Πολλαπλασιάζουμε για κάθε μηχάνημα, την απορροφώμενη ισχύ με τον συντελεστή λειτουργίας (ή αντίστοιχα το συντελεστή φόρτισης και το συντελεστή ετεροχρονισμού) και το πλήθος για να βρούμε τη μέση απορροφώμενη ισχύ του καταναλωτή για κάθε κατάσταση. Προσθέτουμε τα συνεχή και τα διακοπόμενα φορτία (όπου τα τελευταία θυμόμαστε να τα πολλαπλασιάσουμε με το συντελεστή ετεροχρονισμού, DF=0.4) και βρίσκουμε την απαιτούμενη ενεργό ισχύ που πρέπει να παρέχουν οι γεννήτριες στα υπηρεσιακά προφίλ που μελετούμε.

4.Διαστασιολογούμε τις γεννήτριες (και τους μετασχηματιστές). Το πλήθος και η ονομαστική ισχύς των γεννητριών που θα επιλέξουμε θα πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους κανόνες οι οποίοι έχουν προκύψει είτε από απαιτήσεις νηογνομόνων είτε από εμπειρία χρόνων, καλής πρακτικής.

- με μία γεννήτρια εκτός λειτουργίας, πρέπει να είναι δυνατή η τροφοδότηση όλων των μηχανημάτων που είναι απαραίτητα για την ασφάλεια και πρόωση του πλοίου και τη διατήρηση του φορτίου σε καλή κατάσταση.

- όμοια ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη διευκολύνουν από άποψη ανταλλακτικών, συντήρησης και παράλληλης λειτουργίας.
- η ειδική κατανάλωση καυσίμου γίνεται ελάχιστη στο 75-100% του ονομαστικού φορτίου. Επομένως αποτελεί καλή πρακτική η απαιτούμενη ισχύς κανονικής πορείας, να καλύπτεται από μία γεννήτρια που λειτουργεί στο 80-85% παρά από δύο που λειτουργούν σε χαμηλό φορτίο.
- πρέπει να προβλέπεται η επάρκεια διαθέσιμης ισχύος για εγκατάσταση μελλοντικών συστημάτων.

Με την επιλογή των γεννητριών, τελειώνει η μελέτη του ηλεκτρικού ισολογισμού και οι αναλυτικοί και συνοπτικοί πίνακες υπολογισμού, κατατίθενται στο νηογνώμονα προς έγκριση.

4.3.1 Επεκταμένος ενεργειακός ισολογισμός^{[9],[14]}

Μια παράμετρος που αφορά τα δίκτυα με εναλλασσόμενο ρεύμα και δε λάβαμε υπόψιν μας μέχρι στιγμής είναι το γεγονός ότι στο δίκτυο κυκλοφορεί και άεργη ισχύς, η οποία δεν παράγει πραγματικό έργο, είναι όμως απαραίτητη για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στους επαγωγικούς κινητήρες και του ηλεκτρικού πεδίου στους πυκνωτές. Τα φορτία, δεν είναι αμιγώς ωμικά, υπάρχουν πηνία και πυκνωτές που μεταβάλλουν τη διαφορά φάσης της κυματομορφής της τάσης σε σχέση με την κυματομορφή του ρεύματος στο πεδίο του χρόνου (ενότητα 3.9).

Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής ισχύος, τόσο μικρότερη είναι η απορροφώμενη πραγματική ισχύς. Δεδομένου ότι η τάση παραμένει σταθερή, απαιτείται μεγαλύτερη τιμή ρεύματος για να μεταφέρουμε την ισχύ που επιθυμούμε, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερες απώλειες κατά τη μεταφορά (σύμφωνα με τον παράγοντα joule , I^2R). Μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων σημαίνουν, αύξηση στις διατομές των αγωγών, στην ονομαστική ισχύ των μετασχηματιστών, άρα αύξηση και του κόστους εγκατάστασης. Ισοδύναμα, μικρότερος συντελεστής ισχύος για την ίδια διατομή συνεπάγεται μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση άρα και πιθανότητα αστοχίας της μόνωσης των αγωγών.

Επίσης, η σύγχρονη γεννήτρια του πλοίου έχει περιορισμένη δυνατότητα παραγωγής άεργης ισχύος, συνήθως προδιαγράφεται από τους κατασκευαστές να λειτουργεί με συντελεστή ισχύος $PF=0.8$, επαγωγικό. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι είναι δυνατόν μια γεννήτρια σε μια συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας να μπορεί να τροφοδοτήσει τα απαιτούμενα kW στο δίκτυο αλλά όχι και την απαραίτητη άεργη ισχύ σε $kVAR$ και επομένως λειτουργώντας άνω των ονομαστικών τιμών της να υπάρξει κίνδυνος διακοπής της λειτουργίας της ή βλάβης (παράρτημα 7.1.A.4).

Επομένως γίνεται φανερή η ανάγκη να συμπεριλάβουμε στην μελέτη του ηλεκτρικού ισολογισμού, τον συντελεστή ισχύος και την ζητούμενη άεργο ισχύ σε κάθε χαρακτηριστική κατάσταση. Αυτή τη μελέτη, θα την ονομάσουμε **επεκταμένο ενεργειακό ισολογισμό** (*extended load analysis*). Ουσιαστικά πρόκειται για μία γρήγορη μέθοδο εύρεσης του συντελεστή ισχύος του συστήματος και της ζητούμενης άεργης ισχύος, χρησιμοποιώντας τον άνω πίνακα του ηλεκτρικού ισολογισμού, σε περίπτωση που η ενδεδειγμένη μελέτη της ροής φορτίου δε κριθεί σκόπιμο να πραγματοποιηθεί.

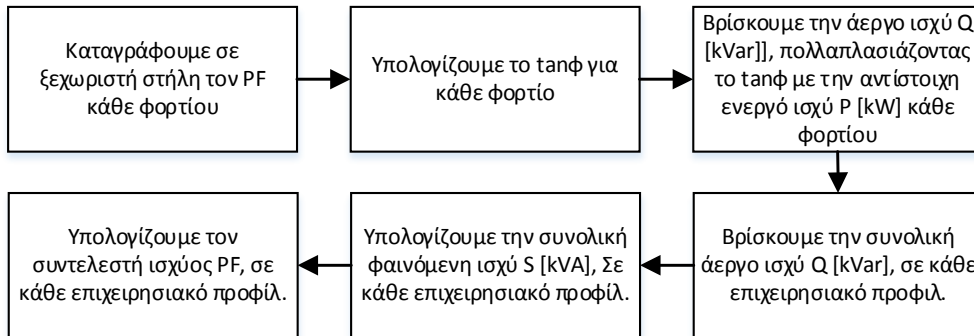
Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- **Ο συντελεστής ισχύος των φορτίων, στην ονομαστική ισχύ, είναι γνωστός.**

Θεωρώντας συνημιτονικό συντελεστή ισχύος $PF = \cos\varphi$, έχουμε $\tan\varphi = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = \frac{\sqrt{1-\cos^2\varphi}}{\cos\varphi}$

Επίσης, (ενότητα 3.9), ισχύει η σχέση: $PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}}$

Τα βήματα για να βρούμε τον συντελεστή ισχύος του συστήματος σε κάθε επιχειρησιακό προφίλ είναι τα ακόλουθα:



- **Ο συντελεστής ισχύος των φορτίων στην ονομαστική ισχύ είναι άγνωστος.**

Θεωρούμε συντελεστή ισχύος των ωμικών φορτίων (φωτισμός, επικοινωνίες κλπ) ίσο με τη μονάδα. Τον συντελεστή ισχύος του κάθε ηλεκτρικού κινητήρα μπορούμε να τον υπολογίσουμε ως συνάρτηση του συντελεστή λειτουργίας (SLF): $PF = f(SLF)$, βασιζόμενοι σε στατιστικά στοιχεία κατασκευαστών. Ένας αντιπροσωπευτικός πίνακας, είναι ο ακόλουθος^[3]:

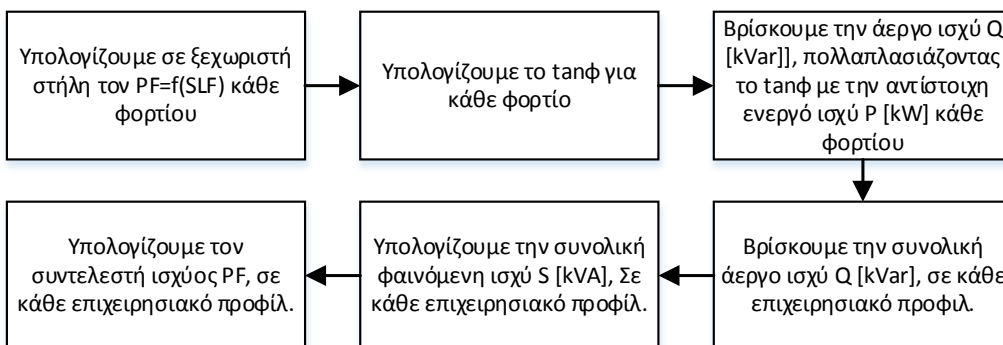
(SLF)	(PF)
0	0,26
0,2	0,48
0,4	0,65
0,6	0,76
0,8	0,82
1	0,86

Η αντίστοιχη πολυωνυμική συνάρτηση 4^{ου} βαθμού είναι:

$$y = 0,5208x^4 - 0,8333x^3 - 0,2708x^2 + 1,1833x + 0,26 \quad (4.1)$$

, με $y=PF$, $x=SLF$.

Τα βήματα για να βρούμε τον συντελεστή ισχύος του συστήματος σε κάθε επιχειρησιακό προφίλ είναι αντίστοιχα με τα παραπάνω:



Με αυτό τον τρόπο σχηματίζουμε έναν πίνακα όπως ο παρακάτω:

ITEM	No OF SET	OUTPUT [kW]	EFFICIENCY [%]	INPUT [kW]	LOAD FACTOR	DIV. FACTOR	NORMAL SEAGOING					
							WS	P:Active Power [kW]	pf=cosφ	sinφ	Q:Reactive [Var]	S:Apparent [kVA]
CONTINUOUS LOAD TOTAL (MODE=C)								573,10	0,82	0,58	406,46	702,60
INTERMITTENT LOAD TOTAL (MODE=I)								230,85	0,78	0,62	183,93	295,16
DIVERSITY FACTOR FOR INTERMITTENT LOAD								0,40			0,40	
ACTUAL INTERMITTENT LOAD								92,34	0,78	0,62	73,57	118,06
DECK MACHINERY TOTAL (MODE=D)								0,00			0,00	
TOTAL								665,43	0,81	0,59	480,03	820,51
...												
CONTINUOUS LOAD												
MAIN COOL SW PUMP	2	44	0,909	48,4	0,9	1	2	87,12	0,84	0,54	56,31	103,73
MAIN/VAC. COND. CSW PUMP	1	80	0,920	87	0,55	1		0,00	0,74	0,67	0,00	0,00
...												

Όπως γίνεται αντιληπτό, ο επεκταμένος ενεργειακός ισολογισμός προσφέρει έναν γρήγορο και σχετικά ακριβή τρόπο να υπολογίσουμε τον συντελεστή ισχύος και την άεργη ισχύ που κυκλοφορεί στο σύστημα. Στο επόμενο κεφάλαιο θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα αυτού του τρόπου υπολογισμού, σε σχέση με τη μελέτη ροής φορτίου σε εξειδικευμένο λογισμικό, που αποτελεί τον παραδοσιακό τρόπο υπολογισμού αυτών των μεγεθών. Μάλιστα, στον δεύτερο τρόπο υπολογισμού θα λάβουμε υπόψιν ότι η μεταβολή του συντελεστή φορτίου (*LF*) επηρεάζει ταυτόχρονα τον συντελεστή ισχύος (PF) και το βαθμό απόδοσης (*n*) του κινητήρα).

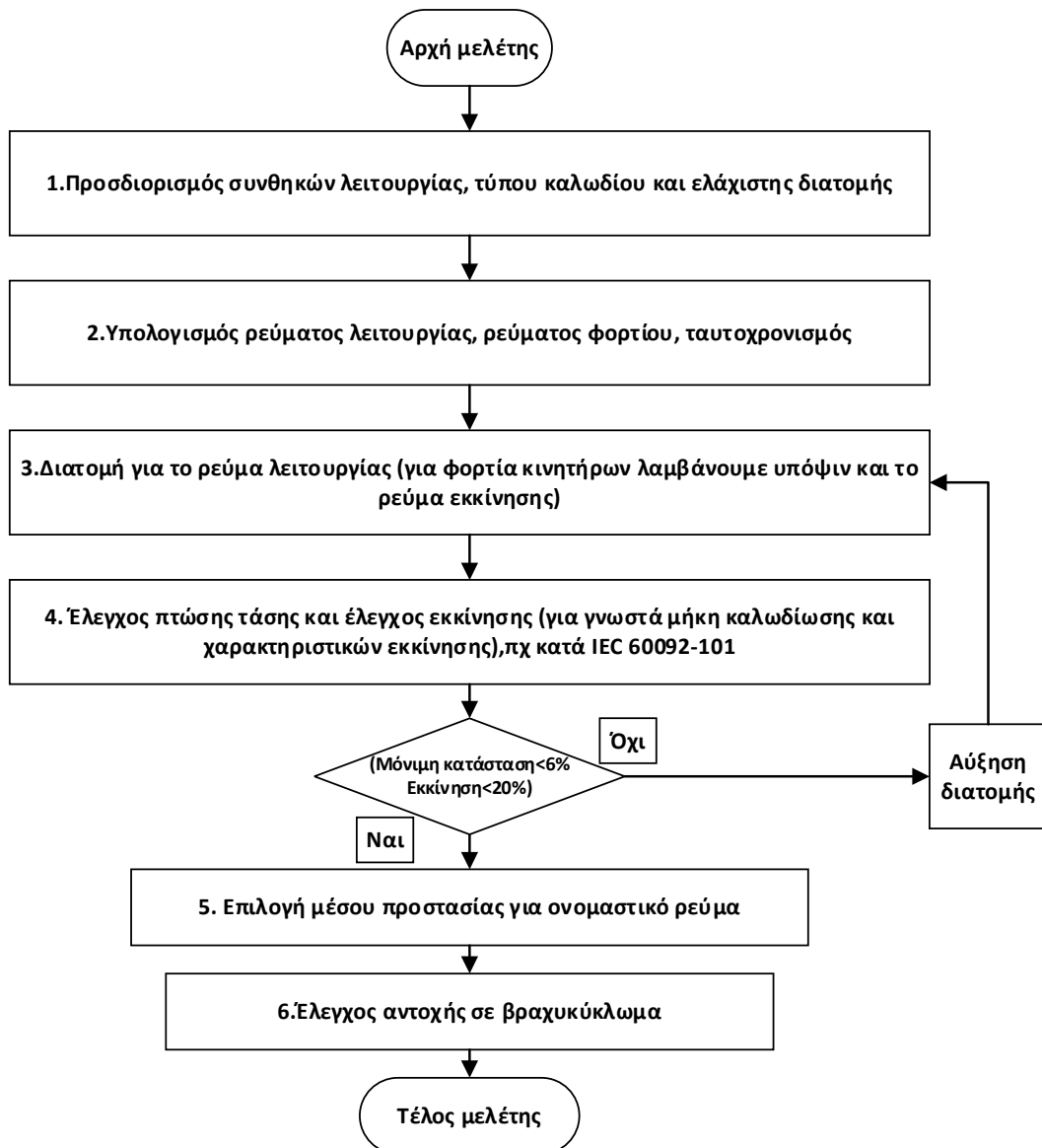
4.4 Μελέτη διαστασιολόγησης αγωγών (Conductor sizing study)

Η μελέτη διαστασιολόγησης αγωγών, δηλαδή η κατάλληλη επιλογή τύπου και διατομής καλωδίων και ζυγών, διασφαλίζει ότι το σύστημα διανομής είναι ικανό να φέρει το μέγιστης έντασης ρεύμα (να έχει την απαιτούμενη ικανότητα φόρτισης-capacity) που θα ζητήσει ο καταναλωτής σε συνεχή λειτουργία καθώς και σε περιπτώσεις ρευμάτων αιχμής (transient peaks), όπως για παράδειγμα κατά τη διάρκεια της εκκίνησης ενός επαγωγικού κινητήρα, ή κατά τη διάρκεια σφαλμάτων.

4.4.1 Επιλογή καλωδίων^{[3],[1]}

Σε ότι αφορά τα καλώδια, η επιλογή τους (μόνωση, περίβλημα) πρέπει να είναι κατάλληλη ανάλογα τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος που θα λειτουργούν (συνθήκες υγρασίας, υψηλής θερμοκρασίας). Η διατομή τους επιλέγεται έτσι ώστε η θερμική καταπόνησή τους κατά τη κανονική λειτουργία και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων να μην είναι τέτοια που θα προκαλέσει υπερθέρμανση της μόνωσης.

Τα βήματα που ακολουθούμε για τη διαστασιολόγηση φαίνονται στο κάτωθι διάγραμμα ροής^[3]:



1. **Τύποι καλωδίων:** οι τύποι των καλωδίων προσδιορίζονται από τις συνθήκες λειτουργίας όπου για ναυτικές εγκαταστάσεις θα ικανοποιούν τα πρότυπα IEC61034, IEC60092-353, IEC60754, IEC60332-3 CATEGORY A, IEC60331 και τους κανονισμούς του εκάστοτε νηογνώμονα (πχ. ABS RULE 2014 STEEL VESSEL RULES 1-1-4/7,7,4-8-3/9). Κατά το πρότυπο IEC61034 τα καλώδια θα είναι πολύκλινα κατά προτίμηση με τρεις πυρήνες και τάση λειτουργίας 0.6-1kV, μέγιστης συνεχούς θερμοκρασίας αγωγού 90°C (μόνωση XLPE).

2. **Ρεύμα φόρτισης I_γ :** το ρεύμα φόρτισης των γραμμών προκύπτει από τη μελέτη ροής φορτίου ή μπορεί να βρεθεί από τον πλήρη πίνακα του ηλεκτρικού ισολογισμού υπολογίζοντας το ρεύμα γραμμής κάθε καταναλωτή το οποίο ισούται:

- για μονοφασική παροχή:
$$I_\gamma = \frac{P_{input}}{V \cdot \cos\phi} [A] \quad (4.2)$$

- για τριφασική παροχή:
$$I_\gamma = \frac{P_{input}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos\phi} [A] \quad (4.3)$$

- P_{input} η ονομαστική απορροφώμενη ισχύς σε Watt,

- V η ονομαστική τάση σε Volt και

- $\cos\phi$ ο συντελεστής ισχύος (συναρτήσεσι του συντελεστή λειτουργίας).

Σε περίπτωση που η γραμμή εξυπηρετεί ωμικό φορτίο δε γίνεται καμία προσαύξηση, ενώ αν εξυπηρετεί κινητήρα για τον οποίο δε γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά της εκκίνησης του (χρονική διάρκεια και ρεύμα εισροής κλειδωμένου δρομέα) πρέπει να γίνει προσαύξηση 25% για να λάβουμε υπόψιν το ρεύμα εκκίνησης. Για γραμμή με περισσότερους από έναν ηλεκτροκινητήρες ισχύει η σχέση: $I_\gamma = 1.25 \cdot I_{\gamma 1} + \sum_{i \neq 1} I_{\gamma i}$, όπου $I_{\gamma 1}$ η ονομαστική ένταση της γραμμής του μεγαλύτερου κινητήρα.

Permissible operating temperature		Ambient temperature [°C]										
		35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
[°C]	Table	Correction factor										
60	12.6	1.29	1.15	1.0	0.82	-	-	-	-	-	-	-
75	12.6	1.15	1.08	1.0	0.91	0.82	0.71	0.58	-	-	-	-
80	12.7	1.13	1.07	1.0	0.93	0.85	0.76	0.65	0.53	-	-	-
85	12.7, 12.8	1.12	1.06	1.0	0.94	0.87	0.79	0.71	0.61	0.50	-	-
90	12.9	1.10	1.05	1.0	0.94	0.88	0.82	0.74	0.67	0.58	0.47	-
95	12.9	1.10	1.05	1.0	0.95	0.89	0.84	0.77	0.71	0.63	0.55	0.45

Πιν. 4.5 Διορθωτικός συντελεστής f_I για ικανότητα φόρτισης αγωγού (θερμοκρασία περιβάλλοντος)

3. **Επιλογή διατομής [S]:** Σε αυτό το βήμα θα επιλέξουμε την κατάλληλη διατομή του καλωδίου βάσει του ρεύματος αναφοράς I_0 . Αρχικά, διορθώνουμε το ρεύμα γραμμής I_γ (αν χρειάζεται), λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Θυμίζουμε ότι η θερμοκρασία αναφοράς για τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις στα πλοία είναι οι 45°C, εκτός αν προδιαγράφεται διαφορετικά. Ο διορθωτικός συντελεστής f_1 προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα.

Nominal cross-section		Current-carrying based on a maximum conductor operating temperature 90 °C		
		S 1 cont. operation	S 2- 30 min	S 2- 60 min
mm ²	AWG/MCM	A max.	A max.	A max.
3- or 4-core cables				
1.0	17			
1.5	15	16	17	17
2.5	13	21	23	22
4	11	28	30	30
6	9	36	39	38
10	7	50	56	53
16	5	67	77	72
25	3	89	107	97
35	2	110	136	121
50	0	137	178	153
70	2/0	169	232	195
95	4/0	205	295	244
120	250	237	356	289

Πιν. 4.6 Ικανότητα φόρτισης καλωδίου (3 ή 4 πυρήνες, ονομαστική θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας 90°C)

Επίσης, ανάλογα την ομαδοποίηση της διάταξης των καλωδίων κατά την εγκατάστασή τους, σε περίπτωση που διατρέχουν πάνω από έξι παράλληλες γραμμές με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει περιορισμένος αερισμός των γραμμών, πρέπει να μειωθεί περαιτέρω η ικανότητα φόρτισης των γραμμών με ένα διορθωτικό συντελεστή $f_2=0.85$.

Προκύπτει το ρεύμα αναφοράς ίσο με:

$$I_0 = \frac{I_Y}{f_1 \cdot f_2} \quad (4.4)$$

Επιλέγοντας, μέσω του **Πιν. 4.7** το αμέσως επόμενο θερμικά επιτρεπόμενο ρεύμα συνεχούς λειτουργίας από το ρεύμα I_0 που υπολογίσαμε (θα το ονομάσουμε I_Z), καθορίζουμε την αντίστοιχη διατομή S .

Αν η γραμμή εξυπηρετεί ωμικό φορτίο προχωράμε στο επόμενο βήμα, διαφορετικά, αν εξυπηρετεί κινητήρα, πρέπει να πραγματοποιήσουμε έλεγχο για θερμική καταπόνηση του καλωδίου κατά την εκκίνηση του κινητήρα (με την προϋπόθεση ότι γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά εκκίνησης).

Προκειμένου να πραγματοποιήσουμε τον έλεγχο για θερμική καταπόνηση κατά την εκκίνηση κινητήρα βρίσκουμε τη χρονική σταθερά T του καλωδίου (βλέπε παράρτημα 7.2) για την επιλεγμένη διατομή.

$$T = 0.245 \cdot d^{1.35} \quad (4.5)$$

(T σε min, d : διάμετρος του αγωγού σε mm),
από τη σχέση:

$$n = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_b/T}}} \quad (4.6)$$

υπολογίζουμε το **συντελεστή υπερφόρτισης n**, όπου t_b το χρονικό διάστημα της εκκίνησης. Για το χρονικό διάστημα της εκκίνησης t_b το καλώδιο της επιλεγμένης διατομής μπορεί να αντέξει ρεύμα αιχμής:

$$I_{εκκ} = n \cdot I_Z \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (4.7)$$

Επομένως, ανάλογα τον τύπο του εκκινήτη του κινητήρα και του ρεύματος κλειδωμένου δρομέα, μπορούμε να βρούμε αν η γραμμή αντέχει την θερμική καταπόνηση.

4. **Έλεγχος πτώσης τάσης** (προϋποθέτει τη γνώση του μήκους της καλωδίωσης): Υπολογίζουμε την πτώση τάσης (%) στη γραμμή, η οποία για δίκτυο χαμηλής τάσης (αγνοείται η X) ισούται:

- για μονοφασική παροχή:

$$\frac{\Delta V}{V} \% = \frac{2 \cdot I_\gamma \cdot L \cdot \frac{\rho}{S} \cdot \cos\varphi}{V} \cdot 100 \quad (4.8)$$

- για τριφασική παροχή:

$$\frac{\Delta V}{V} \% = \frac{\sqrt{3} \cdot I_\gamma \cdot L \cdot \frac{\rho}{S} \cdot \cos\varphi}{V} \cdot 100 \quad (4.9)$$

$-\frac{\Delta V}{V}$: η % πτώση τάσης

$-\rho$: η ειδική αγωγιμότητα του αγωγού, διορθωμένη για την θερμοκρασία λειτουργίας,
 $\Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$

$-L$: το μήκος του αγωγού σε m

$-S$: η διατομή του αγωγού σε mm^2

$-\cos\varphi$: ο συντελεστής ισχύος

$-I_\gamma$: το ονομαστικό ρεύμα γραμμής

Σε περίπτωση όπου η πτώση τάσης είναι μεγαλύτερη από αυτή που προδιαγράφεται στη μόνιμη κατάσταση (5%), επιλέγουμε την αμέσως μεγαλύτερη τυποποιημένη διάμετρο και επαναλαμβάνουμε τον υπολογισμό.

5. **Επιλογή μέσου προστασίας**: τα καλώδια πρέπει να προστατεύονται από βραχυκυκλώματα και παρατεταμένες υπερφορτίσεις καθώς τέτοια φαινόμενα οδηγούν σε απαράδεκτα υψηλές θερμοκρασίες που υποβαθμίζουν ή καταστρέφουν τη μόνωση τους και μπορούν να οδηγήσουν σε πυρκαγιές. Η προστασία των γραμμών γίνεται με ασφάλειες τήξης για εντάσεις μέχρι τα 300A ενώ για υψηλότερες εντάσεις πρέπει να χρησιμοποιούνται αυτόματοι διακόπτες ισχύος με θερμική διέγερση για υπερφόρτιση και ηλεκτρομαγνητική διέγερση για βραχυκυκλώματα.

Η ονομαστική ένταση του μέσου προστασίας I_n πρέπει να είναι μεγαλύτερη του ρεύματος γραμμής I_γ αλλά μικρότερη του μέγιστου θερμικά επιτρεπόμενου ρεύματος γραμμής I_Z . Προτείνεται να προστατεύονται οι γραμμές από υπερφόρτιση με την αμέσως μικρότερη τυποποιημένη τιμή του I_Z . Για τα βραχυκυκλώματα οι χαρακτηριστικές ρεύματος-χρόνου (αναλύθηκαν στην ενότητα των μέσων προστασίας) προκύπτουν από στοιχεία των κατασκευαστών.

Στοιχεία διακοπών ισχύος από κατασκευαστές				Στοιχεία διακοπών ισχύος από κατασκευαστές			
Ονομαστικό ρεύμα (σε Α)	Ρύθμιση θερμικού (σε Α)	Ρύθμιση μαγνητικού (σε Α)	Ικανότητα διακοπής (σε kA)	Ονομαστικό ρεύμα (σε Α)	Ρύθμιση θερμικού (σε Α)	Ρύθμιση μαγνητικού (σε Α)	Ικανότητα διακοπής (σε kA)
Τριπολική και τετραπολική από 16 - 125 Α με ρυθμιζόμενα θερμικά				Τριπολική και τετραπολική από 16 - 1250 Α με ρυθμιζόμενα θερμικά			
16	12,8 - 16	190	16	100	80 - 100	800	25
25	20 - 25	300	16	80	64 - 80	1000	36
40	32 - 40	500	16	100	80 - 100	1250	36
63	50,4 - 63	500	16	125	100 - 125	1250	36
80	64 - 80	1000	16	160	128 - 160	1250	36
100	80 - 100	1250	16	160	64 - 160	128 - 1600	36
125	100 - 125	1250	16	200	160 - 200	1000 - 2000	36
Τριπολική και τετραπολική από 16 - 1250 Α με ρυθμιζόμενα θερμικά				250	200 - 250	1250 - 2500	36
16	12,8 - 16	200	25	250	100 - 250	200 - 2500	36
25	20 - 25	300	25	400	160 - 400	320 - 4000	45
32	25,6 - 32	400	25	630	252 - 630	504 - 6300	45
40	32 - 40	500	25	800	320 - 800	480 - 8000	50
50	40 - 50	500	25	1000	400 - 1000	600 - 10000	50
63	50,4 - 63	500	25	1250	500 - 1250	750 - 12500	50
80	64 - 80	640	25				

Πιν. 4.7 Επιλογή και ρύθμιση διακοπών (ενδεικτικές τιμές)

6. **Έλεγχος αντοχής σε βραχυκύκλωμα:** σε σπάνιες υπερφορτίσεις βραχείας διάρκειας ($t < 5$ sec), οι μονωμένοι αγωγοί επιτρέπεται να υπερθερμανθούν σε θερμοκρασίες που προσδιορίζονται από το υλικό της μόνωσης τους (για XLPE 250°C). Η χαρακτηριστική αντοχής σε βραχυκύκλωμα δίνεται από τον παρακάτω τύπο (βλέπε παράρτημα 7.2):

$$I_{th} = \frac{k \cdot S}{\sqrt{t}} \quad (4.10)$$

- I_{th} : το θερμικά επιτρεπόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης [A]

-S: η πραγματική διατομή [mm^2]

-t: η διάρκεια βραχυκύκλωσης [sec]

-k: η επιτρεπόμενη πυκνότητα ρεύματος του υλικού [$A \cdot \sqrt{sec} \cdot mm^2$], όπου είναι συνάρτηση του υλικού, της αρχικής και τελικής θερμοκρασίας. Για XLPE αγωγό, αρχικής θερμοκρασίας 90°C, $k=143 [A \cdot \sqrt{sec} \cdot mm^2]$.

4.4.2 Επιλογή ζυγών^[1]

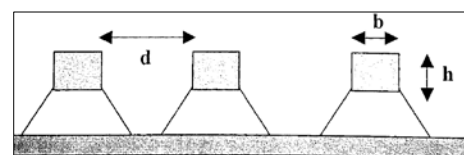
Οι διαστάσεις των (ορθογωνικής διατομής) ζυγών τροφοδοσίας των πινάκων καθορίζονται από το μέγιστο ρεύμα κανονικής λειτουργίας (μόνιμης κατάστασης) που κυκλοφορεί στο εσωτερικό τους. Στους περισσότερους πίνακες χρησιμοποιούνται γυμνοί (bare) αγωγοί εκτός αν προδιαγράφεται διαφορετικά. Ένας αντιπροσωπευτικός πίνακας δίνεται παρακάτω (DNV Pt4/Ch8/Section4/B105):

Table B1 Rating of copper busbars								
Width x thickness (mm)	Maximum permissible loading [A] with 50/60 Hz							
	Painted (matt-black)				Bare			
	Numbers of bars				Numbers of bars			
	1	2	3	4	1	2	3	4
15 x 3	230	390	470	-	200	350	445	-
20 x 3	290	485	560	-	250	430	535	-
20 x 5	395	690	900	-	340	620	855	-
20 x 10	615	1145	1635	-	530	1020	1460	-
25 x 3	355	580	650	-	300	510	615	-
25 x 5	475	820	1040	-	405	725	985	-
30 x 3	415	670	735	-	350	590	700	-
30 x 5	555	940	1170	-	470	830	1110	-
30 x 10	835	1485	2070	-	710	1310	1835	-
40 x 5	710	1180	1410	-	595	1035	1350	-
40 x 10	1050	1820	2480	3195	885	1600	2195	2825
50 x 5	860	1410	1645	2490	720	1230	1560	2380
50 x 10	1260	2130	2875	3655	1055	1870	2530	3220
60 x 5	1020	1645	1870	2860	850	1425	1785	2740
60 x 10	1460	2430	3235	4075	1220	2130	2850	3595
80 x 5	1320	2080	2265	3505	1095	1795	2170	3370
80 x 10	1860	2985	3930	4870	1535	2615	3460	4275
100 x 10	2240	3530	4610	5615	1845	3075	4040	4935
120 x 10	2615	4060	5290	6360	2155	3545	4635	5580

Note: The current rating is based on 45°C ambient air temperature. Sufficient ventilation must be ensured, or the loading values shall be reduced.

Πιν. 4.8 Ικανότητα φόρτισης ζυγών

Παράλληλοι ζυγοί της ίδιας φάσης πρέπει να εγκαθίστανται σε απόσταση μικρότερη από το πάχος μιας μπάρας ενώ οι διατομές πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να μην υπερθερμαίνονται σε πλήρη φόρτιση και σε βραχυκύκλωμα. Ωστόσο, επειδή κατά το βραχυκύκλωμα διαρρέονται από πολύ μεγαλύτερα ρεύματα, ενδέχεται κίνδυνος ταλάντωσης, στρέβλωσης ή ακόμα και θραύσης τους λόγω των αναπτυσσόμενων δυνάμεων. Οπότε είναι αναγκαίος ο έλεγχος αντοχής τους και σε βραχυκύκλωμα. Η δύναμη μεταξύ γειτονικών ζυγών υπολογίζεται ως εξής:



Σχ. 4.2 Διαστάσεις τριφασικού ζυγού

$$F = 0,00204 \frac{l \cdot I_p}{d} \text{ [kp]} \quad (4.11)$$

Με l , d το μήκος και η απόσταση μεταξύ των ζυγών αντίστοιχα, σε cm, ενώ I_p το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης σε Ka, όπως προκύπτει από τη μελέτη βραχυκύκλωσης. Η ροπή αντίστασης της ορθογωνικής διατομής του ζυγού δίνεται από τη σχέση:

$$W = \frac{h \cdot b^2}{6} \text{ [cm}^3\text{]} \quad (4.12)$$

Όπου h, b , το πλάτος και ύψος της διατομής του κάθε ζυγού (σε cm).

Η ροπή στρέψης που ασκείται στους ζυγούς είναι:

$$M = \frac{F \cdot l}{16} [kp \cdot cm] \quad (4.13)$$

Η ικανοποιητική μηχανική των ζυγών ελέγχεται από τη σύγκριση του λόγου M/W με τη μέγιστη επιτρεπόμενη κάμψη του χάλκινου ζυγού:

$$\frac{M}{W} \leq 1200 \left[\frac{kp}{cm^2} \right] \quad (4.14)$$

Επιπλέον, η συχνότητα μηχανικών ταλαντώσεων του ζυγού υπολογίζεται ως εξής:

$$f_m = \frac{112}{l^2} \sqrt{\frac{J \cdot 1.1 \cdot 10^6}{B}} [Hz] \quad (4.15)$$

Όπου B το βάρος του ζυγού σε kilopond και J η ροπή αδράνειας:

$$J = \frac{h \cdot b^3}{12} [cm^4] \quad (4.16)$$

Για να αποφευχθούν προβλήματα μηχανικού συντονισμού πρέπει η συχνότητα f_m να μην βρίσκεται στην περιοχή των 5-10Hz, αλλιώς πρέπει να επιλεγούν άλλα χαρακτηριστικά.

4.5 -Υπολογισμοί ροής φορτίου (Load Flow Calculations) ^{[4],[10]}

Ο σκοπός αυτών των υπολογισμών είναι να διαπιστωθεί ότι οι θερμικές και μηχανικές τάσεις (stresses) στον εξοπλισμό -δηλαδή στις γεννήτριες, τον κύριο πίνακα, στους μετασχηματιστές στα καλώδια κλπ- είναι χαμηλότερες από τις μέγιστες τιμές σχεδίασης τους υπό κανονικές ή επείγουσας ανάγκης, συνθήκες. Επίσης βεβαιώνεται ότι τα επίπεδα της τάσης στους διάφορους ζυγούς διανομής (distribution buses) και στους ακροδέκτες των καταναλωτών βρίσκονται στα επιτρεπτά όρια που περιγράφουν οι κανονισμοί. Πραγματοποιώντας τους υπολογισμούς, βρίσκονται οι στατικές τιμές των φορτίων (εννοώντας στην μόνιμη κατάσταση), στο δίκτυο παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά κανόνα η μελέτη ροής γίνεται πριν τη μελέτη βραχυκυκλώματος, ώστε να οριστούν οι αρχικές τιμές των διάφορων μεγεθών.

4.5.1 Το μαθηματικό μοντέλο

Γενικά για ένα δίκτυο με n ανεξάρτητους ζυγούς (εδώ, με την έννοια των κόμβων, δηλαδή τη σύνδεση αγωγιμοτήτων), μπορούμε να γράψουμε n εξισώσεις:

$$\left. \begin{aligned} Y_{11}\dot{V}_1 + Y_{12}\dot{V}_2 + \dots + Y_{1n}\dot{V}_n &= \dot{I}_1 \\ Y_{21}\dot{V}_1 + Y_{22}\dot{V}_2 + \dots + Y_{2n}\dot{V}_n &= \dot{I}_2 \\ &\dots\dots\dots \\ Y_{n1}\dot{V}_1 + Y_{n2}\dot{V}_2 + \dots + Y_{nn}\dot{V}_n &= \dot{I}_n \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

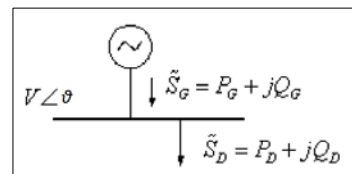
ή σε μορφή μητρώων:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

ή πιο απλά:

$$[Y][V] = I \quad (4.19)$$

Όπου το I είναι το διάνυσμα του ρεύματος που εγχύεται στο ζυγό, V το διάνυσμα της τάσης του ζυγού και Y το μητρώο αγωγιμότητας (admittance) ($Y=1/Z$). Το διαγώνιο στοιχείο Y_{ii} είναι η αυτοαγωγιμότητα του ζυγού i . Το εκτός διαγωνίου στοιχείο Y_{ij} είναι η αμοιβαία (mutual) αγωγιμότητα (το αρνητικό των αγωγιμοτήτων του κλάδου μεταξύ των ζυγών i και j .) Αν δεν ενώνονται οι δύο αυτοί ζυγοί, αυτός ο όρος είναι μηδενικός.



Σχ. 4.3 Χαρακτηριστικά ηλεκτρικά μεγέθη ζυγού

Το ρεύμα του ζυγού i , μπορεί να εκφραστεί μέσω της τάσης και της ισχύος (φαινόμενης):

$$\dot{I}_i = \frac{\hat{S}_i}{\hat{V}_i} = \frac{\hat{S}_{Gi} - \hat{S}_{Di}}{\hat{V}_i} = \frac{(P_{Gi} - P_{Di}) - j(Q_{Gi} - Q_{Di})}{\hat{V}_i} \quad (4.20)$$

όπου:

\hat{S}_i : το διάνυσμα εγχυόμενης μιγαδικής ισχύος

P_{Gi} : η πραγματική ισχύς της γεννήτριας που συνδέεται στο ζυγό i

Q_{Gi} : η άεργη ισχύς της γεννήτριας που συνδέεται στο ζυγό i

P_{Di} : η πραγματική ισχύς που απορροφά το φορτίο που συνδέεται στο ζυγό i

Q_{Di} : η άεργη ισχύς που απορροφά το φορτίο που συνδέεται στο ζυγό i

Αντικαθιστώντας την (4.14) στην (4.11) έχουμε:

$$\frac{(P_{Gi} - P_{Di}) - j(Q_{Gi} - Q_{Di})}{\hat{V}_i} = Y_{i1}\dot{V}_1 + Y_{i2}\dot{V}_2 + \dots + Y_{in}\dot{V}_n, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.21)$$

Στο πρόβλημα της ροής φορτίου οι μεταβλητές της ζήτησης του φορτίου είναι γνωστές. Ορίζουμε την εγχυόμενη ισχύ ως εξής:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad (4.22)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (4.23)$$

Αντικαθιστώντας τις (4.16),(4.17) στην (4.15) λαμβάνουμε την γενική μορφή της εξίσωσης ροής φορτίου:

$$\frac{P_i - jQ_i}{\hat{V}_i} = \sum_{j=1}^n Y_{ij}\dot{V}_j, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.24)$$

ή

$$P_i - jQ_i = \dot{V}_i \sum_{j=1}^n \hat{Y}_{ij}\hat{V}_j, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.25)$$

Αν φέρουμε την εξίσωση (4.19) σε ορθογωνική μορφή και τη χωρίσουμε σε πραγματικά και φανταστικά μέρη, έχουμε δύο εξισώσεις (4.21),(4.22) για κάθε ζυγό με τέσσερις μεταβλητές, την πραγματική ισχύ στο ζυγό P , την άεργη ισχύ Q , την τάση V και τη γωνία θ :

$$\dot{V}_i = V_i(\cos\theta_i + jsin\theta_i) \quad (4.26)$$

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}jsin\theta_{ij}) \quad (4.27)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij}sin\theta_{ij} - B_{ij}j\cos\theta_{ij}) \quad (4.28)$$

με $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$

Επομένως χρειαζόμαστε δύο γνωστές μεταβλητές για να λύσουμε τις εξισώσεις.

Έχουμε τρεις τύπους ζυγών:

Ζυγός φορτίου ή PQ bus: γνωστές η ενεργός και άεργος ισχύς φορτίου P και Q , άγνωστη η τάση κατά μέτρο V και γωνία θ . Συνήθως ο ζυγός που συνδέεται ένα φορτίο είναι PQ bus.

Ζυγός παραγωγής ή PV bus: όπου είναι γνωστά η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης και προσδιορίζονται η άεργος ισχύς και η γωνία της τάσης. Συνήθως ο ζυγός που συνδέεται μια γεννήτρια είναι PV bus.

Ζυγός ταλάντωσης ή αναφοράς ή swing/slack bus: όπου θεωρείται σταθερή η τάση κατά μέτρο και γωνία και προσδιορίζεται η ισχύς P και Q παραγωγής. Είναι ζυγός παραγωγής, χρησιμοποιούμενος για να αντισταθμίσει τις απώλειες του δικτύου, που δεν είναι γνωστές εξ' αρχής, και γενικά για άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Καθώς οι απώλειες ισχύος στο δίκτυο είναι άγνωστες κατά τον υπολογισμό, τουλάχιστον ένας ζυγός παραγωγής πρέπει να οριστεί ως ζυγός αναφοράς.

Τύπος ζυγού	P	Q	V	θ
PQ	γνωστή	γνωστή	άγνωστη	άγνωστη
PV	γνωστή	άγνωστη	γνωστή	άγνωστη
Swing/slack	άγνωστη	άγνωστη	γνωστή	γνωστή

Με την τάση του ζυγού αναφοράς δοσμένη, μόνο $n-1$ τάσεις ζυγών χρειάζεται να υπολογιστούν. Επομένως ο αριθμός των εξισώσεων ροής φορτίου είναι $2(n-1)$.

4.5.2 Μέθοδος Newton Raphson

Μια μη γραμμική εξίσωση μίας μεταβλητής μπορεί να εκφραστεί ως:

$$f(x) = 0 \quad (4.29)$$

Για τη λύση της εξίσωσης επιλέγουμε μια αρχική τιμή x^0 . Η διαφορά μεταξύ της αρχικής τιμής και της λύσης x θα είναι Δx^0 . Δηλαδή, η λύση της (4.23) θα είναι η ακόλουθη:

$$x = x^0 + \Delta x^0 \quad (4.30)$$

ή

$$f(x^0 + \Delta x^0) = 0 \quad (4.31)$$

Αναπτύσσοντας την (4.25) σε σειρά Taylor έχουμε:

$$f(x^0 + \Delta x^0) = f(x^0) + f'(x^0)\Delta x^0 + f''(x^0)\frac{(\Delta x^0)^2}{2!} + \dots + f^n(x^0)\frac{(\Delta x^0)^n}{n!} = 0 \quad (4.32)$$

,όπου $f'(x^0), f''(x^0), \dots, f^n(x^0)$ οι παράγωγοι της συνάρτησης $f(x)$. Αν η διαφορά Δx^0 είναι μικρή (εννοώντας ότι η αρχική τιμή x^0 είναι κοντά στην λύση x της συνάρτησης) οι δευτεροτάξιοι και πλέον όροι μπορούν αμεληθούν. Επομένως η εξίσωση (4.26) γίνεται μια γραμμική εξίσωση:

$$f(x^0 + \Delta x^0) = f(x^0) + f'(x^0)\Delta x^0 = 0 \quad (4.33)$$

άρα

$$\Delta x^0 = -\frac{f(x^0)}{f'(x^0)} \quad (4.34)$$

Η λύση θα είναι:

$$x^1 = x^0 + \Delta x^0 \quad (4.35)$$

Από τη στιγμή που η (4.27) είναι μια προσέγγιση της εξίσωσης, ο όρος Δx^0 θα είναι επίσης προσεγγιστικός. Επομένως η x δεν αποτελεί την πραγματική λύση της εξίσωσης. Για την καλύτερη προσέγγιση της θα χρειαστούν επιπλέον επαναλήψεις, η επαναληπτική εξίσωση της μεθόδου για k επαναλήψεις είναι η εξής:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k = x^k - \frac{f(x^k)}{f'(x^k)} \quad (4.36)$$

Οι επαναλήψεις μπορούν να σταματήσουν όταν ικανοποιηθεί ένα από τα παρακάτω κριτήρια:

$$\begin{aligned} |\Delta x^k| &< \varepsilon_1 \\ |f(x^k)| &< \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (4.37)$$

Όπου $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ τα επιτρεπτά όρια ακρίβειας σύγκλισης και είναι μικροί θετικοί αριθμοί.

Η μέθοδος μπορεί να επεκταθεί και για **μη γραμμικές εξισώσεις n μεταβλητών**

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ &\dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.38)$$

Για γνωστές (τυχαίες) αρχικές τιμές $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$, έχουμε τις διαφορές $\Delta x_1^0, \Delta x_2^0, \dots, \Delta x_n^0$, η εξίσωση (4.32) γίνεται:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1^0 + \Delta x_1^0, x_2^0 + \Delta x_2^0, \dots, x_n^0 + \Delta x_n^0) &= 0 \\ f_2(x_1^0 + \Delta x_1^0, x_2^0 + \Delta x_2^0, \dots, x_n^0 + \Delta x_n^0) &= 0 \\ &\dots \\ f_n(x_1^0 + \Delta x_1^0, x_2^0 + \Delta x_2^0, \dots, x_n^0 + \Delta x_n^0) &= 0 \end{aligned} \right\} = \quad (4.39)$$

Αναπτύσσοντας κατά Taylor όπως προηγουμένως και αμελώντας δευτεροτάξιους και πλέον όρους:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1^0} \Delta x_1^0 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_{x_2^0} \Delta x_2^0 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_{x_n^0} \Delta x_n^0 &= 0 \\ f_2(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_{x_1^0} \Delta x_1^0 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_{x_2^0} \Delta x_2^0 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_{x_n^0} \Delta x_n^0 &= 0 \\ &\dots \\ f_n(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_{x_1^0} \Delta x_1^0 + \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_{x_2^0} \Delta x_2^0 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_{x_n^0} \Delta x_n^0 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.40)$$

όπου μπορούμε να την γράψουμε σε μορφή μητρώων:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ f_2(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ \dots \\ f_n(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{x_1^0} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{x_2^0} & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_{x_n^0} \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_{x_1^0} & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{x_2^0} & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_{x_n^0} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_{x_1^0} & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_{x_2^0} & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_{x_n^0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^0 \\ \Delta x_2^0 \\ \vdots \\ \Delta x_n^0 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Από την εξίσωση (4.35) λαμβάνουμε τις διαφορές $\Delta x_1^0, \Delta x_2^0, \dots, \Delta x_n^0$, οπότε έχουμε την πρώτη εκτίμηση της λύσης $(x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)$. Η επαναληπτική εξίσωση γράφεται:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k) \\ f_2(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k) \\ \dots \\ f_n(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{x_1^k} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{x_2^k} & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_{x_n^k} \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_{x_1^k} & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{x_2^k} & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_{x_n^k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_{x_1^k} & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_{x_2^k} & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_{x_n^k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^k \\ \Delta x_2^k \\ \vdots \\ \Delta x_n^k \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \Delta x_i^k, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.43)$$

Οι εξισώσεις (4.36),(4.37) μπορούν να εκφραστούν ως:

$$F(X^k) = -J^k \Delta X^k \quad (4.44)$$

$$X^{k+1} = X^k + \Delta X^k \quad (4.45)$$

Όπου ο J είναι ένας πίνακας $n \times n$, ο *Ιακωβιανός* πίνακας.

4.5.3 Εφαρμογή της μεθόδου στο πρόβλημα ροής φορτίου

Θεωρούμε ότι οι ζυγοί 1 έως m είναι PQ ζυγοί, οι ζυγοί m+1 έως n-1 είναι PV ζυγοί και ο νιοστός ζυγός, είναι ζυγός αναφοράς.

Επομένως, τα V_n, θ_n είναι γνωστά, καθώς και το μέτρο της τάσης των PV ζυγών, δηλαδή τα V_{m+1}, \dots, V_{n-1} .

Άρα, n-1 γωνίες τάσης θ και m μέτρα τάσης V είναι άγνωστα.

πλήθος ζυγών	1	2	..	m	m+1	m+2	...	n-1	n
τύπος ζυγών	PQ (ζυγοί φορτίων)				PV (ζυγοί παραγωγής)				ζυγός αναφοράς
V					γνωστά				γνωστό
θ									γνωστό

Από (4.21), για κάθε PV και PQ ζυγό θα έχουμε την ακόλουθη εξίσωση διαφορών (mismatch equation) για την ενεργό ισχύ P:

$$\Delta P_{iS} = P_{iS} - P_i = P_{iS} - V_i \sum_j V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (4.46)$$

Επίσης, από (4.22), για τους PQ ζυγούς θα έχουμε επιπλέον την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta Q_{iS} = Q_{iS} - Q_i = Q_{iS} - V_i \sum_j V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (4.47)$$

Όπου P_{iS}, Q_{iS} η υπολογισθείσα ενεργός και άεργος ισχύς, αντίστοιχα

Σύμφωνα με την μέθοδο Newton-Raphson, οι εξισώσεις (4.40),(4.41) μπορούν να αναπτυχθούν σε σειρές Taylor, αν λάβουμε τους πρωτοτάξιους όρους (approximation)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = -J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

διαμερίζοντας το μητρώο J σε υπομητρώα, έχουμε:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ Q & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ V_D^{-1} \Delta V \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

όπου:

$$\Delta P = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

$$\Delta Q = \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

$$\Delta \theta = \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_{n-1} \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

$$\Delta V = \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_m \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

V_D : το διαγώνιο μητρώο:

$$V_D = \begin{bmatrix} V_1 & & & \\ & V_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & V_m \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

H : ένα $(n-1) \times (n-1)$ μητρώο με στοιχείο:

$$H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j} \quad (4.55)$$

N : ένα $(n-1) \times m$ μητρώο με στοιχείο:

$$N_{ij} = V_j \frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_j} \quad (4.56)$$

K : ένα $m \times (n-1)$ μητρώο με στοιχείο:

$$K_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j} \quad (4.57)$$

L : ένα $m \times m$ μητρώο με στοιχείο:

$$L_{ij} = V_j \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_j} \quad (4.58)$$

Για $i \neq j$

$$H_{ij} = -V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} j \cos \theta_{ij}) \quad (4.59)$$

$$N_{ij} = -V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} j \sin \theta_{ij}) \quad (4.60)$$

$$K_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} j \sin \theta_{ij}) \quad (4.61)$$

$$L_{ij} = -V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} j \cos \theta_{ij}) \quad (4.62)$$

Για $i = j$

$$H_{ii} = V_i^2 B_{ii} + Q_i \quad (4.63)$$

$$N_{ii} = -V_i^2 G_{ii} - P_i \quad (4.64)$$

$$K_{ii} = V_i^2 G_{ii} - P_i \quad (4.65)$$

$$L_{ii} = V_i^2 B_{ii} - Q_i \quad (4.66)$$

4.5.4 Βήματα Υπολογισμού

Τα βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος σε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα είναι τα εξής:

- 1.ο χρήστης εισάγει τα δεδομένα
- 2.το πρόγραμμα κατασκευάζει το μητρώο αγωγιμοτήτων
- 3.υποθέτει/ορίζει αρχικές τιμές για την τάση των ζυγών
- 4.υπολογίζει τις εξισώσεις (4.40),(4.41) και εξετάζει αν τα κριτήρια σύγκλισης ικανοποιούνται:

$$\max|\Delta P_i^k| < \varepsilon_1 \quad (4.67)$$

$$\max|\Delta Q_i^k| < \varepsilon_2 \quad (4.68)$$

Αν ικανοποιούνται, τερματίζει τις επαναλήψεις και υπολογίζει τη ροή των γραμμών, την ενεργό και άεργο ισχύ του ζυγού αναφοράς. Αν δεν ικανοποιούνται, μεταφέρεται στο επόμενο βήμα:

- 5.υπολογίζει τα στοιχεία του Ιακωβιανού πίνακα (4.53) έως (4.60).
- 6.υπολογίζει τις διορθωμένες τιμές των τάσεων των ζυγών χρησιμοποιώντας την (4.43)

Ακολούθως υπολογίζει τις τάσεις ζυγών:

$$V_i^{k+1} = V_i^k + \Delta V_i^k \quad (4.69)$$

$$\theta_i^{k+1} = \theta_i^k + \Delta \theta_i^k \quad (4.70)$$

7. επιστρέφει στο βήμα 4 με τις νέες τιμές τάσης

4.6 Μελέτη βραχυκυκλωμάτων (Short-circuit study) ^[1]

Κατά τη φάση της σχεδίασης και μελέτης ενός ηλεκτρικού συστήματος απαιτείται να γίνεται μελέτη βραχυκυκλωμάτων, δηλαδή υπολογισμός των ρευμάτων που θα διαρρεύσουν τις καλωδιώσεις και τους ζυγούς των πινάκων σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.

Θυμίζουμε ότι με τον όρο βραχυκύκλωμα (σφάλμα) εννοούμε την αγώγιμη σύνδεση μεταξύ δύο σημείων διαφορετικού δυναμικού μέσω πολύ μικρής ωμικής αντίστασης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την κυκλοφορία πολύ μεγάλου ρεύματος, καθώς από τον νόμο του Ohm ισχύει:

$$I = V/R \rightarrow \infty, \text{για } R \rightarrow 0$$

Όσο μεγαλύτερη είναι η ονομαστική τάση λειτουργίας τόσο μεγαλύτερο είναι και το ρεύμα βραχυκυκλώματος I , συνεπώς τα βραχυκυκλώματα γίνονται πιο σημαντικά όσο αυξάνει η τάση λειτουργίας. Οι συνέπειες τους περιλαμβάνουν:

- υπερθέρμανση του εξοπλισμού (λόγω φαινομένου Joule),
- τήξη αγώγιμων μερών
- τήξη μονωτικών υλικών
- μερική ή ολική απώλεια (καταστροφή) μονώσεων
- πυρκαγιές και ολική καταστροφή εξοπλισμού
- ανάπτυξη μεγάλων (ελκτικών ή/και απωστικών ανάλογα με τη φορά των ρευμάτων στους ρευματοφόρους αγωγούς) δυνάμεων Laplace
- στρεβλώσεις και κάμψεις αγώγιμων μερών
- μηχανικές ταλαντώσεις.

Επίσης εμφανίζονται διακυμάνσεις στο μέτρο των τάσεων λειτουργίας, εν γένει, σε όλα τα σημεία του κυκλώματος. Οι διακυμάνσεις είναι τόσο σημαντικές όσο πιο κοντά είναι η θέση του βραχυκυκλώματος. Συνήθως οι διακυμάνσεις είναι βυθίσεις τάσεων (μη ομαλή λειτουργία φορτίων) ενίοτε όμως και υπερτάσεις (καταπόνηση της μονώσεων).

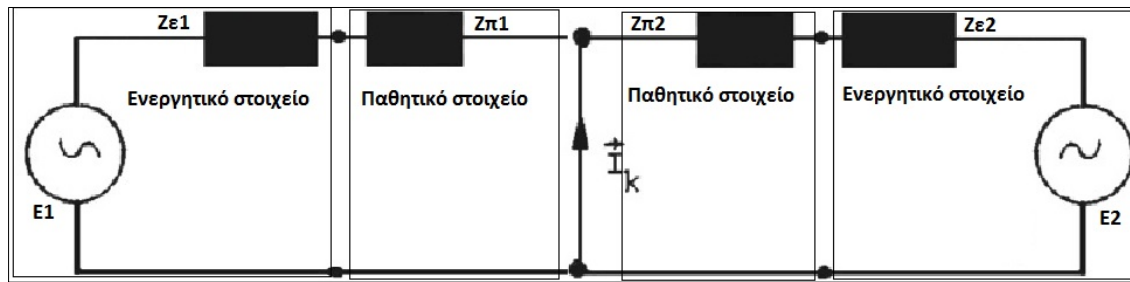
Επομένως η σημασία αυτής της μελέτης γίνεται φανερή. Από τα αποτελέσματά της διαστασιολογούνται και επιλέγονται οι διακόπτες ισχύος των πινάκων τροφοδοσίας ενώ γίνονται και υπολογισμοί αντοχής των ζυγών.

Στις ηπειρωτικές εγκαταστάσεις η μελέτη γίνεται για τάσεις λειτουργίας άνω των 1000V (IEC 61909), ενώ στις πλωτές εγκαταστάσεις επιβάλλεται για κάθε τάση λειτουργίας. Συγκεκριμένα, ο κανονισμός που ακολουθείται στα πλοία είναι ο IEC 61363 που ορίζει ότι στα πλοία οφείλει να γίνεται μελέτη για τριφασικό βραχυκύκλωμα (και οι τρεις φάσεις γεφυρώνονται μεταξύ τους) η οποία αποτελεί την δυσμενέστερη περίπτωση (αλλά και περισσότερο απίθανη στατιστικά να συμβεί).

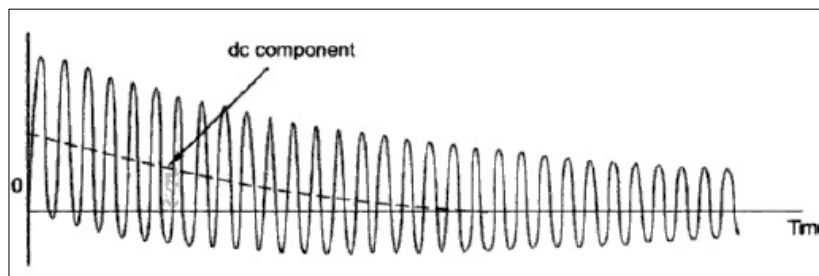
4.6.1 Το ηλεκτρικό δίκτυο κατά το βραχυκύκλωμα

Τα ηλεκτρικά στοιχεία ενός δικτύου όσον αφορά το βραχυκύκλωμα διακρίνονται σε ενεργητικά και παθητικά, ανάλογα με το αν συμμετέχουν στην τροφοδότηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης ή απλώς συμμετέχουν ως σύνθετες αντιστάσεις. Τα ενεργητικά στοιχεία, που είναι εν γένει όλες οι στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές, ανεξαρτήτως αν λειτουργούν ως γεννήτριες ή ως κινητήρες, αποτελούνται από ωμικές αντιστάσεις (R-στοιχεία) και πηνία (L-στοιχεία) μαζί με πηγές τάσης (E, ισοδύναμο Thevenin-Norton). Οι σύγχρονες γεννήτριες του συστήματος αποτελούν τις κύριες πηγές τροφοδοτήσεως των ρευμάτων βραχυκύκλωσης ενώ οι ασύγχρονοι κινητήρες συνεισφέρουν κυρίως κατά την έναρξη. Μικρή αλλά όχι αμελητέα επίδραση στη συμπεριφορά όλων των μηχανών έχει και η κατάσταση φόρτισής τους πριν το βραχυκύκλωμα. Αντιθέτως, τα παθητικά στοιχεία στα

οποία συγκαταλέγονται τα καλώδια, οι μετασχηματιστές, τα επαγωγικά πηνία και οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος, αποτελούνται μόνο από ωμικές αντιστάσεις (R-στοιχεία) και πηνία (L-στοιχεία).



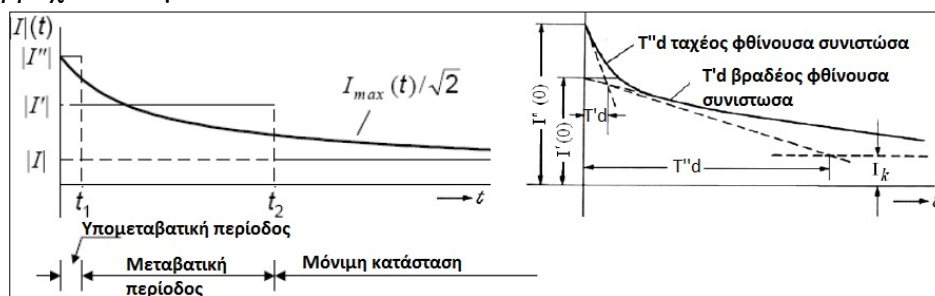
Σχ. 4.4 Τροφοδότηση βραχυκυκλώματος από ενεργητικά στοιχεία (μηχανές) με την παρεμβολή και παθητικών στοιχείων (καλώδια). Ποιοτικά, μπορούμε να πούμε ότι μόλις μια στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή αντιληφθεί το βραχυκύκλωμα (υψηλές απαιτήσεις σε ρεύμα με μειωμένη τάση) αντιδρά προσπαθώντας να το τροφοδοτήσει, εμφανιζόμενη στο δίκτυο ως πηγή τάσης με χαμηλές επαγωγικές αντιδράσεις. Οι ωμικές αντιστάσεις αποσβένουν το ρεύμα βραχυκύκλωσης και δρουν μόνο συνεισφέροντας στη διαμόρφωση των σταθερών χρόνου απόσβεσης των φαινομένων (σταθερές L/R). Επιπλέον για την ικανοποίηση και των αρχικών συνθηκών του προβλήματος, δηλαδή το τι συνέβαινε πριν σε σχέση με το τι συμβαίνει μετά το βραχυκύκλωμα, οι ημιτονοειδείς κυματομορφές ρεύματος εμφανίζονται με ασυμμετρία, δεν έχουν δηλαδή μέση τιμή 0, περιλαμβάνοντας αποσβεννύμενες συνιστώσες ΣΡ που αποτυπώνουν τις αρχικές συνθήκες.



Σχ. 4.5 Αποσβεννύμενη μη περιοδική συνιστώσα Σ.Ρ. στη κυματομορφή του ρεύματος βραχυκύκλωσης

Πιο αναλυτικά, μια σύγχρονη γεννήτρια αντιλαμβάνεται το βραχυκύκλωμα ως εξής: η απότομη αύξηση του ρεύματος στο τύμπανο, κατά το βραχυκύκλωμα, επάγει στο τύλιγμα του δρομέα μεταβατικά ρεύματα. Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της πεπλεγμένης ροής (προκύπτει από το νό. μο του Faraday και τον κανόνα του Lenz) το τύλιγμα αντιδρά εμφανίζοντας μειωμένη επαγωγή L, αντιστρόφως ανάλογη προς το αυξημένο ρεύμα. Αυτό ισοδυναμεί με τη μείωση της επαγωγικής αντίδρασης της μηχανής με αποτέλεσμα τη μεταβατική επαγωγική αντίδραση ($X_d' < X_d$). Επειδή ο δρομέας έχει κατά κανόνα και τυλίγματα αποσβέσεως, επάγονται και σε αυτά μεταβατικά ρεύματα κατά τις πρώτες στιγμές του βραχυκυκλώματος τα οποία είναι μικρότερης έντασης και μικρότερης διάρκειας, (2-3 περιόδων). Αποτέλεσμα αυτής της αντιδράσεως των τυλιγμάτων είναι η υπομεταβατική επαγωγική αντίδραση X_d'' της σύγχρονης μηχανής με την οποία αυτή εμφανίζεται κατά τις πρώτες στιγμές της επιβολής του βραχυκυκλώματος. Ισχύει ότι $X_d'' < X_d' < X_d$. Τόσο η μεταβατική όσο και η υπομεταβατική αντίδραση της μηχανής αυξάνουν με την πάροδο του χρόνου, όσο αποκαθίσταται η ηλεκτρομαγνητική ισορροπία μεταξύ τυλιγμάτων στάτη, δρομέα και αποσβέσεως, μέχρι να φτάσουν την τιμή της μόνιμης επαγωγικής αντίδρασης X_d .

Σχετικά με τις επαγωγικές αντιδράσεις εγκάρσιου άξονα q (δρομέας έκτυπων πόλων), η μεταβατική αντίδραση είναι ίση με τη μόνιμη, αν δεν υπάρχει τύλιγμα διεγέρσεως στον εγκάρσιο άξονα ($Xq' = Xq$). Αν υπάρχουν τυλίγματα αποσβέσεως κατά τον εγκάρσιο άξονα δημιουργείται μια υπομεταβατική αντίδραση $Xq'' < Xq$. Η Xq'' είναι ελαφρά μεγαλύτερη από τη Xd'' . Άρα στην υπομεταβατική κατάσταση η σύγχρονη μηχανή εμφανίζει τις ελάχιστες επαγωγικές αντιδράσεις (Xd'', Xq). Η διάρκεια της κυμαίνεται από 2-5 κύκλους (40-100 ms για 50 Hz) και καθορίζεται από τις χρονικές σταθερές Td'' και Tq'' . Στη μεταβατική κατάσταση η σύγχρονη μηχανή εμφανίζει τις μεγαλύτερες επαγωγικές αντιδράσεις (Xd', Xq'). Η διάρκεια της κυμαίνεται από 10-15 κύκλους (200-300 ms για 50 Hz) και καθορίζεται από τις χρονικές σταθερές Td' και Tq' . Στην μόνιμη κατάσταση βραχυκύκλωσης η σύγχρονη μηχανή εμφανίζει τις σύγχρονες επαγωγικές αντιδράσεις (Xd, Xq). Η χρονική διάρκεια καθορίζεται από τις χρονικές σταθερές Td και Tq και διαρκεί όσο και το βραχυκύκλωμα.



Σχ. 4.6 r.m.s. τιμή του ρεύματος στις διαφορετικές χρονικές περιόδους και χρονικές συνιστώσες $T''d$, $T'd$

Ένας ασύγχρονος κινητήρας, εξαιτίας του ότι δεν έχει τύλιγμα διέγερσης, αντιδρά στο βραχυκύκλωμα με μικρότερη δυναμικότητα από τη σύγχρονη μηχανή, κυρίως κατά την υπομεταβατική περίοδο, ενώ δεν υφίσταται και μόνιμη κατάσταση καθώς το ρεύμα βραχυκύκλωσης μηδενίζεται.

4.6.2 Πρότυπο IEC 61363

Το πρότυπο IEC 61363 ορίζει τις διαδικασίες για τον υπολογισμό ρευμάτων βραχυκύκλωσης που μπορεί να υπάρξουν σε μια ναυτική ή υπεράκτια E.P. ηλεκτρολογική εγκατάσταση. Οι μέθοδοι υπολογισμού εφαρμόζονται σε μη διασυνδεδεμένα (unmeshed) τριφασικά εναλλασσομένου ρεύματος δίκτυα τα οποία λειτουργούν στα 50 ή 60Hz και :

- έχουν οποιοδήποτε σύστημα τάσεως που καθορίζεται στο πρότυπο IEC 60092-201 πίνακας 2
- έχουν ένα ή περισσότερα διαφορετικά επίπεδα τάσεων
- συμπεριλαμβάνουν γεννήτριες, κινητήρες, μετασχηματιστές, καλώδια και μετατροπείς
- έχουν τον ουδέτερο κόμβο συνδεδεμένο με τη γάστρα του πλοίου μέσω μιας σύνθετης αντίστασης (σχεδιασμένη ώστε να περιορίζει το ρεύμα βραχυκύκλωσης που ρέει στη γάστρα του πλοίου) ή έχουν τον ουδέτερο κόμβο μονωμένο (isolated) από τη γάστρα του πλοίου.

Οι μέθοδοι υπολογισμού αφορούν μια κατάσταση τριφασικού συμμετρικού βραχυκυκλώματος (χειρίστη κατάσταση), για τα πρώτα 100ms του σφάλματος (οπότε ουσιαστικά δεν έχει πραγματοποιηθεί καθόλου απόσβεση). Από αυτή την άποψη, ο κανονισμός IEC 61363 είναι πιο αυστηρός από τον IEC 61909.

4.6.3 Ορισμοί [61363-1 IEC:1998] [6],[15]

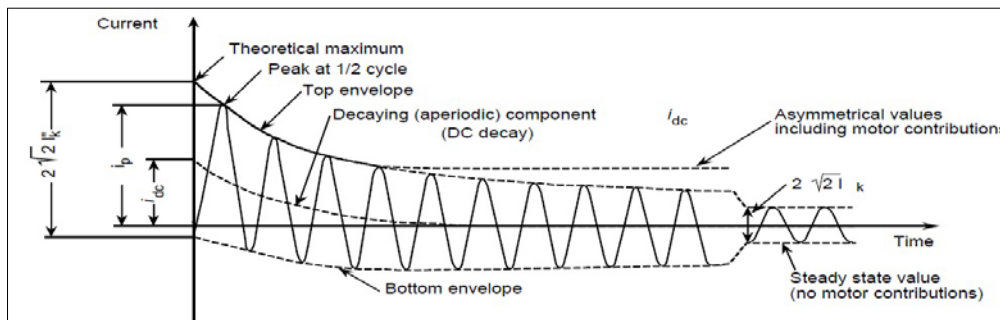
Βραχυκύκλωμα (Short circuit): τυχαία ή σκόπιμη σύνδεση, μέσω μιας σχετικά πολύ μικρής αντίστασης ή σύνθετης αντίστασης, δύο ή παραπάνω σημείων ενός κυκλώματος, τα οποία είναι σε διαφορετικές τάσεις.

Ρεύμα βραχυκύκλωσης (Short circuit current): υπερένταση που προκύπτει από ένα βραχυκύκλωμα λόγω ενός σφάλματος ή μιας λάθους σύνδεσης σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα.

Αναμενόμενο ρεύμα (Prospective current): το ρεύμα βραχυκύκλωσης που θα ρέει σε ένα κύκλωμα εάν κάθε πόλος της συσκευής αντικαθίστατο με έναν αγωγό αμελητέας σύνθετης αντίστασης.

Συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης (Symmetrical short-circuit current): r.m.s. τιμή της Ε.Ρ. συμμετρικής συνιστώσας ενός αναμενόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης, η αperiodική συνιστώσα του ρεύματος, αν υπάρχει, αμελείται.

Αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης (Initial symmetrical short-circuit current) I_k'' : r.m.s. τιμή της Ε.Ρ. συμμετρικής συνιστώσας ενός αναμενόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης που παράγεται τη στιγμή επιβολής του βραχυκυκλώματος εάν η σύνθετη αντίσταση παραμένει στην τιμή μηδενικής στιγμής.



Σχ. 4.7 Τυπική κυματομορφή ρεύματος βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής

Υπομεταβατικό ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_k'' d$ ευθέος άξονα (Subtransient short-circuit current $I_k'' d$ in the direct axis): r.m.s. τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης που διαρρέει ένα κύκλωμα με στρεφόμενες μηχανές οι οποίες έχουν σύνθετη αντίσταση ίση με την υπομεταβατική σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος.

Μεταβατικό ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_k' d$ ευθέος άξονα (Transient short-circuit current $I_k' d$ in the direct axis): r.m.s. τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης που διαρρέει ένα κύκλωμα με στρεφόμενες μηχανές οι οποίες έχουν σύνθετη αντίσταση ίση με τη μεταβατική σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος.

Ρεύμα βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης $I_k d$ ευθέος άξονα (Steady-state short-circuit current $I_k d$ in the direct axis): r.m.s. τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης, που διαρρέει ένα κύκλωμα με στρεφόμενες μηχανές, και που απομένει μετά την απόσβεση των μεταβατικών φαινομένων.

Αperiodική (Σ.Ρ.) συνιστώσα ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{dc} (Aperiodic (d.c.) component of the short-circuit current I_{dc}): η συνιστώσα του ρεύματος σε ένα κύκλωμα αμέσως αφότου έχει ξαφνικά βραχυκυκλωθεί, με όλες τις συνιστώσες της θεμελιώδους και υψηλότερης συχνότητας να αποκλείονται.

Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_p (Peak short-circuit current I_p): μέγιστη πιθανή στιγμιαία τιμή του αναμενόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης

Υπομεταβατική χρονική σταθερά βραχυκύκλωσης ευθέος άξονα $T'' d$ (Direct-axis subtransient short-circuit time constant $T'' d$): ο χρόνος που απαιτείται ώστε η ταχύς μεταβαλλόμενη συνιστώσα, που εμφανίζεται στους πρώτους λίγους κύκλους στο ρεύμα βραχυκύκλωσης ευθέος άξονα μετά από μια απότομη μεταβολή στις συνθήκες λειτουργίας, να μειωθεί στο $1/e$, δηλαδή 0,368 της αρχικής της τιμής, με τη μηχανή (ή ισοδύναμη μηχανή) στην ονομαστική της ταχύτητα.

Υπομεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος ευθέος άξονα $T' do$ (Direct-axis subtransient open-circuit time constant $T' do$): ο χρόνος που απαιτείται ώστε η ταχύς μεταβαλλόμενη συνιστώσα, που εμφανίζεται στους πρώτους λίγους κύκλους, της τάσης ανοιχτού κυκλώματος που οφείλεται στη ροή του ευθέος άξονα, μετά από μια απότομη μεταβολή στις συνθήκες λειτουργίας, να μειωθεί στο $1/e$, δηλαδή 0,368 της αρχικής της τιμής, με τη μηχανή στην ονομαστική της ταχύτητα.

Μεταβατική χρονική σταθερά βραχυκύκλωσης ευθέος άξονα T_d' (Direct-axis transient short-circuit time constant $T'd$): ο χρόνος που απαιτείται ώστε η βραδέος μεταβαλλόμενη συνιστώσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης ευθέος άξονα μετά από μια απότομη μεταβολή στις συνθήκες λειτουργίας, να μειωθεί στο $1/e$, δηλαδή 0,368 της αρχικής της τιμής, με τη μηχανή στην ονομαστική της ταχύτητα.

Μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος ευθέος άξονα T_{do}' (Direct-axis transient open—circuit time constant $T'do$): ο χρόνος που απαιτείται ώστε η βραδέος μεταβαλλόμενη συνιστώσα της τάσης ανοιχτού κυκλώματος, που οφείλεται στη ροή του ευθέος άξονα, μετά από μια απότομη μεταβολή στις συνθήκες λειτουργίας, να μειωθεί στο $1/e$, δηλαδή 0,368 της αρχικής της τιμής, με τη μηχανή στην ονομαστική της ταχύτητα.

Χρονική σταθερά Σ.Ρ. T_{dc} (DC time constant T_{dc}): ο χρόνος που απαιτείται ώστε η συνιστώσα Σ.Ρ. που εμφανίζεται στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, μετά από μια απότομη μεταβολή στις συνθήκες λειτουργίας, να μειωθεί στο $1/e$, δηλαδή 0,368 της αρχικής του τιμής, με τη μηχανή στην ονομαστική της ταχύτητα.

Υπομεταβατική αντίδραση ευθέος άξονα X_d'' (κορεσμένη τιμή) (Direct-axis subtransient reactance $X''d$ (saturated)): το πηλίκο της αρχικής τιμής της βασικής Ε.Ρ. συνιστώσας της τάσης του στάτη ακριβώς πριν την έναρξη μιας ξαφνικής αλλαγής, η οποία συνιστώσα οφείλεται στη συνολική ροή ευθέος άξονα του στάτη, προς την τιμή της Ε.Ρ. συνιστώσας του ρεύματος ευθέος άξονα του στάτη τη στιγμή της ξαφνικής αλλαγής, με τη μηχανή στην ονομαστική της ταχύτητα.

Μεταβατική αντίδραση ευθέος άξονα X_d' (κορεσμένη τιμή) (Direct-axis transient reactance $X'd$ (saturated)): το πηλίκο της αρχικής τιμής της βασικής Ε.Ρ. συνιστώσας της τάσης του στάτη ακριβώς πριν την έναρξη μιας ξαφνικής αλλαγής, η οποία συνιστώσα οφείλεται στη συνολική ροή ευθέος άξονα του στάτη, προς την τιμή της Ε.Ρ. συνιστώσας του ρεύματος ευθέος άξονα του στάτη τη στιγμή της ξαφνικής αλλαγής, με τη μηχανή στην ονομαστική της ταχύτητα και τις συνιστώσες ταχείας απόσβεσης κατά τους πρώτους κύκλους να αποκλείονται.

Αντίδραση ευθέος άξονα X_d (Direct-axis synchronous reactance X_d): το πηλίκο της τιμής μόνιμης κατάστασης της βασικής Ε.Ρ. συνιστώσας της τάσης του στάτη, η οποία συνιστώσα οφείλεται στη συνολική ροή ευθέος άξονα του στάτη, προς την τιμή του ρεύματος ευθέος άξονα του στάτη μετά την απόσβεση των μεταβατικών φαινομένων.

Αντίσταση στάτη γεννήτριας R_a (Stator resistance of a generator R_a): αντίσταση στάτη μιας σύγχρονης μηχανής, μετρημένη σε Σ.Ρ. ρεύμα.

Σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης Z (Short-circuit impedance Z): το πηλίκο της ημιτονοειδούς τάσης ανά φάση σε ένα συμμετρικό Ε.Ρ. δίκτυο προς την ίδια συχνότητας συνιστώσα ρεύματος βραχυκύκλωσης του δικτύου.

Πηγή τάσης (Voltage source): ενεργητικό στοιχείο που μπορεί να αναπαρασταθεί από μια ιδανική πηγή τάσης ανεξάρτητη από όλα τα ρεύματα και τις τάσεις του κυκλώματος, σε σειρά με ένα παθητικό στοιχείο κυκλώματος.

Ονομαστική τάση δικτύου U_n (Nominal system voltage U_n): τάση (πολική) από την οποία χαρακτηρίζεται ένα δίκτυο και στην οποία αναφέρονται συγκεκριμένα χαρακτηριστικά λειτουργίας.

Υπομεταβατική τάση στρεφόμενης μηχανής (Subtransient voltage of a rotating machine E''): r.m.s. τιμή της συμμετρικής τάσης μιας μηχανής, η οποία είναι ενεργή πίσω από την υπομεταβατική σύνθετη αντίσταση Z'' τη στιγμή του βραχυκυκλώματος.

Μεταβατική τάση στρεφόμενης μηχανής (Transient voltage of a rotating machine E'): r.m.s. τιμή της συμμετρικής εσωτερικής τάσης μιας μηχανής, η οποία είναι ενεργή πίσω από τη μεταβατική σύνθετη αντίσταση Z' τη στιγμή του βραχυκυκλώματος.

Ονομαστική τιμή (n) (Nominal value (n)): κατάλληλη προσεγγιστική τιμή κάποιας ποσότητας, η οποία χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό ή τον προσδιορισμό ενός στοιχείου, συσκευής ή εξοπλισμού.

Τιμή λειτουργίας (r) (Rated value (r)): τιμή κάποιας ποσότητας, η οποία προσδιορίζεται γενικά από τον κατασκευαστή, για μια συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας ενός στοιχείου, συσκευής ή εξοπλισμού.

Ισοδύναμη γεννήτρια (Equivalent generator) / Ισοδύναμος κινητήρας (Equivalent motor): γεννήτρια/ κινητήρας που έχει τα χαρακτηριστικά που θα δώσουν το ίδιο ρεύμα βραχυκύκλωσης σε οποιοδήποτε σημείο σε μια ηλ. εγκατάσταση, με αυτό που θα έδινε ο συνδυασμός των γεννητριών/ κινητήρων με διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας, τα οποία είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο.

4.6.4 Σύμβολα (IEC 61363)

ϕ	Γωνία φάσης	f phase Angle
E_q''	Υπομεταβατική τάση εγκάρσιου q-άξονα γεννήτριας (r.m.s.)	E''_q subtransient q-axis voltage of a generator (r.m.s.)
E_q'	Μεταβατική τάση εγκάρσιου q-άξονα γεννήτριας (r.m.s.)	E'_q transient q-axis voltage of a generator (r.m.s.)
E_M''	Υπομεταβατική τάση κινητήρα (r.m.s.)	E''_M subtransient voltage of a motor (r.m.s.)
F	Συχνότητα	f frequency
fr	Συχνότητα λειτουργίας του δικτύου	fr rated frequency of a network
I''^*	Υπομεταβατικό ρεύμα βραχυκύκλωση ισοδύναμης γεννήτριας (r.m.s.)	I''^* subtransient short-circuit current of the equivalent generator (r.m.s.)
I'^*	Μεταβατικό ρεύμα βραχυκύκλωση ισοδύναμης γεννήτριας (r.m.s.)	I'^* transient short-circuit current of the equivalent generator (r.m.s.)
I^*	ρεύμα ισοδύναμης γεννήτριας (r.m.s.)	I^* current of the equivalent generator (r.m.s.)
I_M''	Υπομεταβατικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ασύγχρονου κινητήρα (r.m.s.)	I''_M subtransient short-circuit current of the equivalent motor (r.m.s.)
I_{kd}''	Υπομεταβατικό αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής (r.m.s.)	I''_{kd} subtransient initial short-circuit current of a synchronous machine (r.m.s.)
I_{kd}'	Μεταβατικό αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής (r.m.s.)	I'_{kd} transient initial short-circuit current of a synchronous machine (r.m.s.)
I	Ρεύμα (r.m.s.)	I current (r.m.s.)
I_{ac}	Ε.Ρ. συνιστώσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής (r.m.s.)	I _{ac} a.c. component of the short-circuit current of a synchronous machine (r.m.s.)
I_{acM}	Συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ασύγχρονου κινητήρα (r.m.s.)	I _{acM} symmetrical short-circuit current of an asynchronous motor (r.m.s.)
ILR	Ρεύμα κλειδωμένου δρομέα επαγωγικού κινητήρα	ILR asynchronous motor locked rotor current
id_c	Σ.Ρ. συνιστώσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής	id _c d.c. component of the short-circuit current of a synchronous machine (instantaneous).
id_{cM}	Σ.Ρ. συνιστώσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης ασύγχρονου κινητήρα	id _{cM} d.c. component of the short-circuit current of an asynchronous motor and an equivalent motor (instantaneous).
ik	Άνω περιβάλλουσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης	ik upper envelope of the short-circuit current.
I^*	Ρεύμα βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης ισοδύναμης γεννήτριας (I^* steady-state short-circuit current of an equivalent generator (r.m.s.)
I_{kd}	Ρεύμα βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης σύγχρονης μηχανής (r.m.s.)	I_{kd} steady-state short-circuit current of a synchronous machine (r.m.s.)
i_M	Άνω περιβάλλουσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης ασύγχρονου κινητήρα	i _M upper envelope of the short-circuit current of an asynchronous motor.
ip	Κρουστική τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής	ip peak value of the short-circuit current of a synchronous machine.
ip_M	Κρουστική τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης ασύγχρονου κινητήρα	ip _M peak value of the short-circuit current of an asynchronous motor.
I_r	Ρεύμα λειτουργίας (r.m.s.)	I _r rated current (r.m.s.)
I_{rM}	Ρεύμα λειτουργίας (r.m.s.) ασύγχρονου κινητήρα	I _{rM} rated current of an asynchronous motor
R	Αντίσταση	R resistance
R*	Αντίσταση ισοδύναμης γεννήτριας	R* resistance of an equivalent generator
R_a	Αντίσταση στάτη σύγχρονης μηχανής	R _a stator resistance of a synchronous machine
RC	Αντίσταση καλωδίου	RC cable resistance
R_{dc}	Αντίσταση Σ.Ρ.	R _{dc} d.c. resistance
RM	Αντίσταση ασύγχρονου κινητήρα	RM motor resistance
RR	Αντίσταση δρομέα (ρότορα) ασύγχρονου κινητήρα	RR rotor resistance of an asynchronous motor
RR*	Αντίσταση δρομέα (ρότορα) ισοδύναμου ασύγχρονου κινητήρα	RR* rotor resistance of an equivalent asynchronous motor
RS	Αντίσταση στάτη ασύγχρονου κινητήρα	RS stator resistance of an asynchronous motor

RS*	Αντίσταση στάτη ισοδύναμου ασύγχρονου κινητήρα	RS* stator resistance of an equivalent asynchronous motor
RT	Αντίσταση μετασχηματιστή	RT resistance of a transformer
t	Χρονική διάρκεια από την έναρξη του βραχυκυκλώματος	t time duration from the beginning of a short circuit
Td''	Υπομεταβατική χρονική σταθερά σύγχρονης μηχανής	T''d subtransient time constant of a synchronous machine
Td'	Μεταβατική χρονική σταθερά σύγχρονης μηχανής	T'd transient time constant of a synchronous machine
T''d*	Υπομεταβατική χρονική σταθερά ισοδύναμης γεννήτριας	T''d* subtransient time constant of an equivalent generator
T'd*	Μεταβατική χρονική σταθερά ισοδύναμης γεννήτριας	T'd* transient time constant of an equivalent generator
Te''	Υπομεταβατική χρονική σταθερά σύγχρονης μηχανής συμπεριλαμβάνοντας τα παθητικά στοιχεία	T''e subtransient time constant of a synchronous machine including the non-active components
Te'	Μεταβατική χρονική σταθερά σύγχρονης μηχανής συμπεριλαμβάνοντας τα παθητικά στοιχεία	T'e transient time constant of a synchronous machine including the non-active components
TM''	Υπομεταβατική και μεταβατική χρονική σταθερά ασύγχρονου κινητήρα	T''M subtransient time constant of a an asynchronous motor
TMe''	Υπομεταβατική χρονική σταθερά ισοδύναμου κινητήρα συμπεριλαμβάνοντας τα καλώδια σύνδεσης	T''Me subtransient time constant of a an equivalent asynchronous motor including connecting cables.
Tdc	Σ.Ρ. χρονική σταθερά σύγχρονης μηχανής	Tdc d.c. time constant of a synchronous machine
Tdc*	Σ.Ρ. χρονική σταθερά ισοδύναμης γεννήτριας	Tdc* d.c. time constant of an equivalent generator
Tdce	Σ.Ρ. χρονική σταθερά σύγχρονης μηχανής συμπεριλαμβάνοντας τα παθητικά στοιχεία	Tdce d.c. time constant of a synchronous machine including the non-active components.
TdcM	Σ.Ρ. χρονική σταθερά ασύγχρονου κινητήρα	TdcM d.c. time constant of an asynchronous motor
TdcM*	Σ.Ρ. χρονική σταθερά ισοδύναμου επαγωγικού κινητήρα	TdcM* d.c. time constant of an equivalent asynchronous motor
TdcMe	Σ.Ρ. χρονική σταθερά ασύγχρονου κινητήρα συμπεριλαμβάνοντας τα καλώδια σύνδεσης	TdcMe d.c. time constant of an asynchronous motor including the connecting cables.
Uo	Τάση πριν το σφάλμα (πολική)	U0 prefault voltage (line-to-line)
Un	Ονομαστική τάση (πολική)	Un nominal voltage (line-to-line)
Ur	Τάση λειτουργίας (πολική)	Ur rated voltage (line-to-line)
UrM	Τάση λειτουργίας κινητήρα	UrM rated voltage of a motor (line-to-line)
X''*	Υπομεταβατική αντίδραση ισοδύναμης γεννήτριας	X''* subtransient reactance of an equivalent generator
X	Επαγωγική αντίδραση	X reactance
Xd''	Υπομεταβατική αντίδραση ευθέος άξονα σύγχρονης μηχανής	X''d subtransient reactance of a synchronous machine in the d-axis
Xd'	Μεταβατική αντίδραση ευθέος άξονα σύγχρονης μηχανής	X'd transient reactance of a synchronous machine in the d-axis
XM''	Υπομεταβατική αντίδραση ασύγχρονου κινητήρα	X''M subtransient reactance of an asynchronous motor
Z	Σύνθετη αντίσταση	Z impedance
Z*	δύναμη σύνθετη αντίσταση	Z* equivalent impedance

4.6.5 Εξισώσεις (IEC 61363) [6],[12]

4.6.5.1 -Γεννήτριες

Υπολογισμός τριφασικού ρεύματος βραχυκύκλωσης: η άνω περιβάλλουσα των μέγιστων τιμών του τριφασικού ρεύματος βραχυκύκλωσης της γεννήτριας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$i_k(t) = \sqrt{2}I_{ac}(t) + i_{dc}(t)$$

Για την Ε.Ρ. συνιστώσα (A.C. Component)

$$I_{ac}(t) = (I_{kd}'' - I_{kd}')e^{-t/T_d'} + (I_{kd}' - I_{kd}'')e^{-t/T_d''} + I_{kd}$$

$$I_{kd}'' = \frac{E_{q0}''}{Z_d''} = \frac{E_{q0}''}{\sqrt{R_a^2 + X_d''^2}}$$

$$I_{kd}' = \frac{E_{q0}'}{Z_d'} = \frac{E_{q0}'}{\sqrt{R_a^2 + X_d'^2}}$$

$$E_{q0}'' = \sqrt{\left[\frac{U_0}{\sqrt{3}} \cos \phi_0 + R_a I_0 \right]^2 + \left[\frac{U_0}{\sqrt{3}} \sin \phi_0 + X_d'' I_0 \right]^2}$$

$$E_{q0}' = \sqrt{\left[\frac{U_0}{\sqrt{3}} \cos \phi_0 + R_a I_0 \right]^2 + \left[\frac{U_0}{\sqrt{3}} \sin \phi_0 + X_d' I_0 \right]^2}$$

Για την Σ.Ρ. συνιστώσα (D.C. Component):

$$i_{dc}(t) = \sqrt{2}(I_{kd}'' - I_0 \sin \phi_0)e^{-t/T_{dc}}$$

Η κρουστική τιμή (Peak Value):

$$i_p = i_k\left(\frac{T}{2}\right) = \sqrt{2}I_{ac}\left(\frac{T}{2}\right) + i_{dc}\left(\frac{T}{2}\right)$$

Για συχνότητα 60Hz:

$$\frac{T}{2} = \frac{1000}{60 * 2} = 8.33 \text{ ms}$$

Επίδραση των παθητικών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά με τις γεννήτριες:

Αλλαγές στην σύνθετη αντίσταση:

$$Z_e'' = [(R_a + R)^2 + (X_d'' + X)^2]^{1/2}$$

$$Z_e' = [(R_a + R)^2 + (X_d' + X)^2]^{1/2}$$

Αλλαγές στις χρονικές σταθερές:

$$T_e'' = \frac{[(R_a + R)^2 + (X_d'' + X)^2]X_d'T_d''}{[(R_a + R)^2 + (X_d'' + X)(X_d' + X)]X_d''}$$

$$T_e' = \frac{[(R_a + R)^2 + (X_d' + X)^2]X_d'T_d'}{[(R_a + R)^2 + (X_d' + X)(X_d + X)]X_d'}$$

$$T_{dce} = \frac{T_{dc} + X/2\pi f R_a}{1 + R/R_a}$$

4.6.5.2 -Κινητήρες

Γενικά χαρακτηριστικά κινητήρα:

$$R_M = R_R(\text{rotor}) + R_S(\text{stator})$$

$$X_M'' = X_R(\text{rotor}) + X_S(\text{stator})$$

$$T_M'' = \frac{X_R + X_S}{\omega_r R_R}$$

$$T_{dcM} = \frac{X_R + X_S}{\omega_r R_S}$$

Δεδομένα για μεγάλους κινητήρες (>100kW):

$$Z_M'' = 0.16 \text{ p.u.}$$

$$X_M'' = 0.15 \text{ p.u.}$$

$$R_S = 0.034 \text{ p.u.}$$

$$R_R = 0.021 \text{ p.u.}$$

$$60 \text{ Hz, } T_M'' = 18.67 \text{ ms} \quad T_{dcM} = 11.73 \text{ ms}$$

$$50 \text{ Hz, } T_M'' = 22.4 \text{ ms} \quad T_{dcM} = 14.08 \text{ ms}$$

Δεδομένα για μικρούς κινητήρες:

$$Z_M'' = 0.2 \text{ p.u.}$$

$$X_M'' = 0.188 \text{ p.u.}$$

$$R_S = 0.043 \text{ p.u.}$$

$$R_R = 0.027 \text{ p.u.}$$

$$60 \text{ Hz, } T_M'' = 18.67 \text{ ms} \quad T_{dcM} = 11.73 \text{ ms}$$

$$50 \text{ Hz, } T_M'' = 22.4 \text{ ms} \quad T_{dcM} = 14.08 \text{ ms}$$

Υπολογισμός τριφασικού ρεύματος βραχυκύκλωσης: η άνω περιβάλλουσα των μέγιστων τιμών του τριφασικού ρεύματος βραχυκύκλωσης του ασύγχρονου κινητήρα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$i_{pM}(t) = \sqrt{2}I_{acM}(t) + i_{dcM}(t)$$

Για την Ε.Ρ. συνιστώσα (A.C. Component):

$$I_{acM}(t) = I_M'' e^{-t/T_M''}$$

$$I_M'' = \frac{E_M''}{Z_M''} = \frac{E_M''}{\sqrt{R_M^2 + X_M^2}}$$

$$E_M'' = \sqrt{\left[\frac{U_{rM}}{\sqrt{3}} \cos \phi_M + R_M I_{rM} \right]^2 + \left[\frac{U_{rM}}{\sqrt{3}} \sin \phi_M + X_M' I_{rM} \right]^2}$$

Για την Σ.Ρ. συνιστώσα (D.C. Component):

$$i_{dcM}(t) = \sqrt{2}(I_M'' - I_{rM} \sin \phi_M) e^{-t/T_{dcM}}$$

Η κρουστική τιμή (Peak Value):

$$i_p = i_k \left(\frac{T}{2} \right) = \sqrt{2}I_{acM} \left(\frac{T}{2} \right) + i_{dcM} \left(\frac{T}{2} \right)$$

Για συχνότητα 60Hz:

$$\frac{T}{2} = \frac{1000}{60 * 2} = 8.33 \text{ ms}$$

Επίδραση των παθητικών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά με τους κινητήρες:

Αλλαγές στην σύνθετη αντίσταση:

$$R_{Me} = R_R + R_S + R$$

$$X_{Me}'' = X_R + X_S + X$$

4.6.5.3 -Ισοδύναμη γεννήτρια

Συνιστώσες:

$$I_{ac}(t)_* = (I_*'' - I_*')e^{-t/T_{d*}''} + (I_*' - I_*'*)e^{-t/T_{d*}'}) + I_{k*}$$

$$I_{ac}(t)_* = M_*e^{-t/T_{d*}''} + N_*e^{-t/T_{d*}'}) + I_{k*}$$

$$I_{dcM}(t)_* = \sqrt{2}I_*''e^{-t/T_{d*}''}$$

Χρονική σταθερά ισοδύναμης γεννήτριας:

Για γεννήτρια:

$$K''(t) = (I_{kd}'' - I_{kd}')e^{-t/T_d''} + I_{kd}'$$

Επομένως:

$$K''(t)_* = \sum_i^n K_i''(t) + \sum_i^n I_{jM}''e^{-t/T_M''}$$

$$T_{d*}''(t_x) = \frac{-t_x}{\ln \left[\frac{K''(t_x)_* - I_*''}{M_*} \right]}$$

$$T_{d*}'(t_x) = \frac{-t_x}{\ln \left[\frac{I_{ac}(t_x)_* - (M_*e^{-t_x/T_{d*}''} + I_{k*}')}{N_*} \right]}$$

$$T_{dc*}(t_x) = \frac{-t_x}{\ln \left[\frac{i_{dc}(t_x)_*}{\sqrt{2}I_*''} \right]}$$

Αλλαγές στις χρονικές σταθερές:

$$T_{Me}'' = \frac{X_{Me}''}{\omega_r R_R}$$

$$T_{dcMe} = \frac{X_{Me}''}{\omega_r (R_S + R)}$$

όπου ορίζουμε τις εξής μεταβλητές:

$$I_*'' = \sum_i^n I_{kdi}'' + \sum_i^n I_{Mji}''$$

$$I_*' = \sum_i^n I_{kdi}'$$

$$I_{k*} = \sum_i^n I_{kdi}$$

$$M_* = (I_*'' - I_*')$$

$$N_* = (I_*' - I_{k*})$$

για κινητήρα:

$$K''(t) = I_M''e^{-t/T_M''}$$

Σύνθετη αντίσταση ισοδύναμης γεννήτριας:

$$Z_*'' = \frac{U_0}{\sqrt{3I_*''}}, \quad Z_*' = \frac{U_0}{\sqrt{3I_*'}}, \quad Z_* = \frac{U_0}{\sqrt{3I_*}}$$

$$R_*(t) = c_3(t)X_*''(t), \quad c_3(t) = \frac{1}{2\pi f T_{dc*}(t)}$$

$$X_*''(t) = \frac{Z_*''}{\sqrt{1+c_3^2}}$$

$$X_*'(t) = \sqrt{Z_*'^2 - R_*^2}$$

$$X_*(t) = \sqrt{Z_*^2 - R_*^2}$$

Επίδραση των παθητικών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά με τις ισοδύναμες γεννήτριες:

Αλλαγές στην σύνθετη αντίσταση:

$$Z_e'' = [(R_a + R)^2 + (X_d'' + X)^2]^{1/2}$$

$$Z_e' = [(R_a + R)^2 + (X_d' + X)^2]^{1/2}$$

$$Z_e = [(R_a + R)^2 + (X_d + X)^2]^{1/2}$$

Αλλαγές στις χρονικές σταθερές:

$$T_e'' = \frac{[(R_a + R)^2 + (X_d'' + X)^2]X_d'T_d''}{[(R_a + R)^2 + (X_d'' + X)(X_d' + X)]X_d''}$$

$$T_e' = \frac{[(R_a + R)^2 + (X_d' + X)^2]X_d'T_d'}{[(R_a + R)^2 + (X_d' + X)(X_d + X)]X_d'}$$

$$T_{dce} = \frac{T_{dc} + X/2\pi f R_a}{1 + R/R_a}$$

Υπολογισμός τριφασικού ρεύματος βραχυκύκλωσης: η άνω περιβάλλουσα των μέγιστων τιμών του τριφασικού ρεύματος βραχυκύκλωσης της ισοδύναμης γεννήτριας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$i_k(t) = \sqrt{2}I_{ac}(t) + i_{dc}(t)$$

Για την Ε.Ρ. συνιστώσα (A.C. Component):

$$I_{kd}'' = \frac{U_0}{Z_e''}, I_{kd}' = \frac{U_0}{Z_e'}, I_{kd} = \frac{U_0}{Z_e}$$

$$I_{ac}(t) = (I_{kd}'' - I_{kd}')e^{-t/T_d'} + (I_{kd}' - I_{kd})e^{-t/T_d} + I_{kd}$$

Για την Σ.Ρ. συνιστώσα (D.C. Component):

$$i_{dc}(t) = \sqrt{2}(I_{kd}'')e^{-t/T_{dc}}$$

4.6.5.4 -Ισοδύναμος Κινητήρας

Συνιστώσες:

$$I_{acM}(t)_* = I_{M^*}'' e^{-t/T_{M^*}''}$$

$$I_{dcM}(t)_* = \sqrt{2} I_{M^*}'' e^{-t/T_{dcM^*}''}$$

Χρονική σταθερά ισοδύναμου κινητήρα:

$$K_M''(t) = \sum I_M'' e^{-t/T_M''}$$

$$K_{dcM}(t) = \sqrt{2} \sum I_M'' e^{-t/T_{dcM}''}$$

$$T_{M^*}''(t_x) = \frac{-t_x}{\ln \left[\frac{K_M''(t_x)}{I_{M^*}''} \right]}$$

$$T_{dc^*}''(t_x) = \frac{-t_x}{\ln \left[\frac{K_{dcM}''(t_x)}{\sqrt{2} I_{M^*}''} \right]}$$

όπου ορίζουμε τις εξής μεταβλητές:

$$I_{M^*}'' = \sum_j^n I_{Mj}''$$

Σύνθετη αντίσταση ισοδύναμου κινητήρα:

$$R_{R^*}(t) = c_1 X_{M^*}''(t), \quad R_{S^*}(t) = c_2(t) X_{M^*}''(t)$$

$$c_1(t) = \frac{1}{2\pi f T_{M^*}''(t)}, \quad c_2(t) = \frac{1}{2\pi f T_{dcM^*}''(t)}$$

$$Z_{M^*}'' = \frac{U_0}{\sqrt{3} I_{M^*}''} \text{ or } Z_{M^*}'' = \sqrt{(R_{R^*} + R_{S^*})^2 + X_{M^*}''^2}$$

$$X_{M^*}''(t) = \frac{Z_{M^*}''}{\sqrt{1 + (c_1(t) + c_2(t))^2}}$$

Επίδραση των παθητικών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά με τους ισοδύναμους κινητήρες:

Αλλαγές στην σύνθετη αντίσταση:

$$R_{Me} = R_R + R_S + R$$

$$X_{Me} = X_R + X_S + X$$

Αλλαγές στις χρονικές σταθερές:

$$T_{Me}'' = \frac{X_{Me}''}{\omega_r R_R}$$

$$T_{dcMe}'' = \frac{X_{Me}''}{\omega_r (R_S + R)}$$

Υπολογισμός τριφασικού ρεύματος βραχυκύκλωσης: η άνω περιβάλλουσα των μέγιστων τιμών του τριφασικού ρεύματος βραχυκύκλωσης του ισοδύναμου ασύγχρονου κινητήρα από τη σχέση:

$$i_M(t) = \sqrt{2} I_{acM}(t) + i_{dcM}(t)$$

Για την Ε.Ρ. συνιστώσα (A.C. Component):

$$I_{kd}'' = \frac{U_0}{Z_e''}$$

$$I_{ac}(t) = I_{kd}'' e^{-t/T_d''}$$

Για την Σ.Ρ. συνιστώσα (D.C. Component):

$$i_{dc}(t) = \sqrt{2} (I_{kd}'' e^{-t/T_{dc}''})$$

4.6.6 Μεθοδολογία

Μια συμβατική μελέτη βραχυκυκλώματος περιλαμβάνει διαδικασίες απλοποίησης του κυκλώματος και εύρεση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο του σφάλματος από την υπέρθεση των επιμέρους ρευμάτων των στοιχείων σύμφωνα με τα θεωρήματα Thevenin-Norton. Καθορίζοντας στο σημείο σφάλματος την αναλογία R/X (που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μεθόδους της μιγαδικής διανυσματικής ανάλυσης) και την τάση οδήγησης (driving voltage), μπορούμε να υπολογίσουμε το αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης και δεδομένων των αναλογιών R/X στο σημείο του σφάλματος, το ασύμμετρο ρεύμα βραχυκύκλωσης σε διάφορες χρονικές στιγμές. Στο πρότυπο IEC 61363, η χρονικά εξαρτώμενη (time dependent) μελέτη, διαχωρίζει τα στοιχεία του κυκλώματος σε ενεργητικά και παθητικά με ξεχωριστούς υπολογισμούς για τις συνιστώσες E.P και Σ.P.. Ανόμοια ενεργητικά στοιχεία συνδυάζονται για να σχηματίσουν ισοδύναμους κινητήρες και γεννήτριες. Αυτά τα ισοδύναμα στοιχεία συνδυάζονται με τα παθητικά στοιχεία ώστε να μεταβάλλουν τις τιμές των σύνθετων αντιστάσεων και τις χρονικές σταθερές των ισοδύναμων στοιχείων. Παράλληλα συνδεδεμένα στοιχεία όπως κινητήρες και γεννήτριες, με όμοια χαρακτηριστικά λειτουργίας, μπορούν να θεωρηθούν ως μια ενιαία μηχανή. Κάθε στοιχείο αναπαρίσταται με ένα μαθηματικό μοντέλο διαμορφωμένο από τις χαρακτηριστικές παραμέτρους του. Για να ολοκληρωθεί ένας χρονικά εξαρτημένος υπολογισμός για ένα δίκτυο που περιλαμβάνει ανόμοια ενεργητικά στοιχεία, η μέθοδος της ισοδύναμης γεννήτριας θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Για κινητήρες, είναι αναγκαίο να γίνει διαχωρισμός μεταξύ μικρών και μεγάλων (>100kW) κινητήρων. Μια ομάδα από μικρούς κινητήρες συνδεδεμένους σε ένα κοινό σημείο διανομής μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας ισοδύναμος κινητήρας στο σημείο διανομής. Οι μεγάλοι κινητήρες θα πρέπει να θεωρούνται σαν ξεχωριστές πηγές ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Γενικά, η ακολουθία της μελέτης βραχυκυκλώματος κατά IEC 61363 περιλαμβάνει:

- την προετοιμασία μονογραμμικού διαγράμματος (single line diagram)
- τον καθορισμό των χαρακτηριστικών των στοιχείων
- τον υπολογισμό των χρονικά εξαρτώμενων ρευμάτων βραχυκύκλωσης στα κύρια σημεία του συστήματος (ζυγοί, υποζυγοί) χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία και τις άνω εξισώσεις του προτύπου
- την προετοιμασία σύνοψης και συμπερασμάτων της μελέτης

4.6.7 Παραδοχές

- όλες οι χωρητικότητες του δικτύου αμελούνται
- η σύνθετη αντίσταση του τόξου κατά το βραχυκύκλωμα αμελείται
- το βραχυκύκλωμα συμβαίνει ταυτόχρονα και στις τρεις φάσεις
- η μελέτη πραγματοποιείται για συστήματα μη διασυνδεδεμένα (unmeshed)

Κατά τον υπολογισμό ρευμάτων βραχυκύκλωσης, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τη διαφορά μεταξύ ενός ρεύματος βραχυκύκλωσης που παράγεται από ένα μεμονωμένο κομμάτι ενός εξοπλισμού, και ενός ρεύματος βραχυκύκλωσης που προκύπτει όταν αρκετά κομμάτια ενός εξοπλισμού είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο. Όταν πρόκειται για μια μεμονωμένη μηχανή, μόνο οι ηλεκτρικοί παράμετροι της μηχανής επηρεάζουν το αναπτυσσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Σε ένα δίκτυο όμως, αυτό το ρεύμα περιορίζεται από την σύνθετη αντίσταση των μη-ενεργητικών στοιχείων, για παράδειγμα, καλώδια, μετασχηματιστές, κλπ, που διαμορφώνουν το δίκτυο, αλλάζοντας ταυτόχρονα τις μεταβατικές και μονίμου καταστάσεως τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης που προκύπτει.

4.7 Προστασία του συστήματος διανομής

Επιλογή-ρύθμιση διακοπών / επιλογική συνεργασία ^[2]

Κάθε γραμμή τροφοδοσίας προς και από τον κύριο πίνακα, είναι εφοδιασμένη με αυτόματους διακόπτες για τον εντοπισμό και την αποσύνδεση του επιμέρους κυκλώματος σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, σε καταστάσεις υπερφόρτισης ή σφαλμάτων γείωσης. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει οι προστατευτικές διατάξεις ρυθμίζονται ως προς την ένταση του ρεύματος σφάλματος και το χρόνο αποσύνδεσης του κυκλώματος. Για παράδειγμα ένας διακόπτης με ηλεκτρονική μονάδα σε περίπτωση υπερφόρτισης, ξεκινά ένα χρονομετρητή (time counter) και αποσυνδέεται μετά από μια προκαθορισμένη χρονική καθυστέρηση. Αν η τιμή της έντασης του ρεύματος είναι ακόμα υψηλότερη H/N ξεκινά έναν άλλο χρονομετρητή και αποσυνδέει τον κλάδο σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Το πόσο πιο γρήγορα εξαρτάται από τη μελέτη επιλεκτικότητας. Με τη μελέτη αυτή καθορίζονται οι προαναφερθείσες ρυθμίσεις των αυτόματων διακοπών (ή επιλέγονται οι ασφάλειες), σύμφωνα με τους κανονισμούς, κατά τέτοιο τρόπο ώστε αποσυνδέεται το ελάχιστο μέρος του συστήματος διανομής, ακριβώς αυτό που επηρεάζεται άμεσα από το σφάλμα, κατά κανόνα από τα ‘χαμηλότερα’ τμήματα του εξοπλισμού (εννοώντας τα τμήματα αυτά που έχουν τη μικρότερη επίδραση στο σύστημα διανομής) στα υψηλότερα.

4.7.1 Μελέτη με τη βοήθεια υπολογιστή ^[13]

Η μελέτη πλέον γίνεται με τη βοήθεια υπολογιστή, όπου οι χαρακτηριστικές των διακοπών προβάλλονται σε ένα κοινό διάγραμμα ρευμάτων-χρόνου (Time Current Characteristic Chart, TCC). Αυτές δίνονται από τον κατασκευαστή και συνήθως ένα λογισμικό προορισμένο για τέτοια μελέτη, όπως το SKM PTW, έχει ενσωματωμένη βιβλιοθήκη με πληθώρα διακοπών, όπου τα χαρακτηριστικά τους είναι πιστοποιημένα από τον κατασκευαστή. Για να γίνει κατανοητή η μελέτη, ας πάρουμε για παράδειγμα τη μελέτη για την γραμμή ενός κινητήρα που τροφοδοτείται απευθείας από τον κύριο πίνακα. Κατά κανόνα, ξεκινούμε από τον μεγαλύτερης ισχύος κινητήρα του ζυγού.

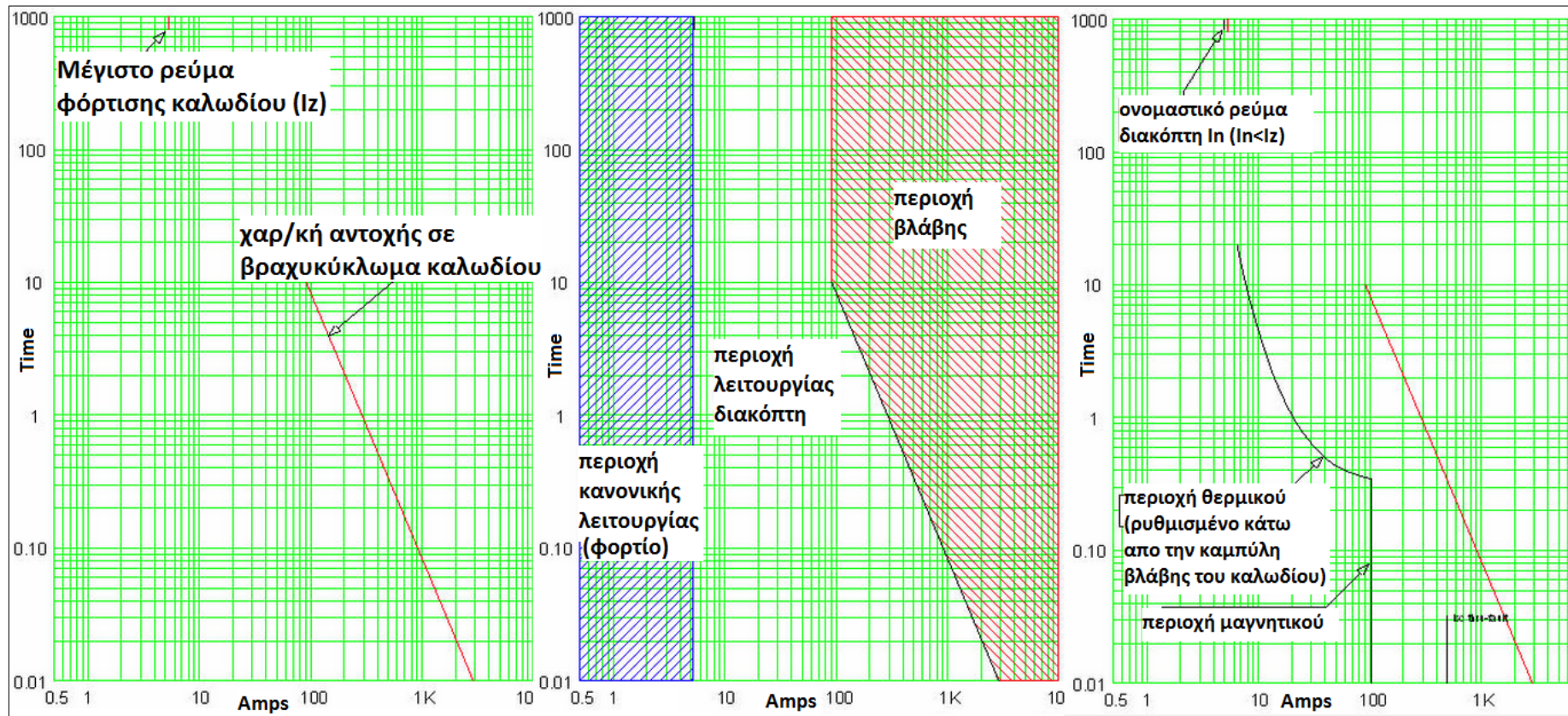
Οι στόχοι μας είναι οι εξής:

- Η προστασία του καλωδίου από υπερφορτίσεις και υπερεντάσεις
- Η απρόσκοπτη λειτουργία του κινητήρα σε κανονικές συνθήκες και κατά την εκκίνηση ($I_{EKK} = 5 - 8 I_{ONOM}$. για DOL starter).
- Η απρόσκοπτη παροχή ισχύος στο κύριο πίνακα από τη γεννήτρια, σε περίπτωση υπερφόρτισης-βραχυκυκλώματος στη γραμμή του κινητήρα.

Οι πρώτοι δύο στόχοι θα ικανοποιηθούν με την κατάλληλη επιλογή (και ρύθμιση) του διακόπτη του φορτίου. Αυτός θα είναι τύπου A, δηλαδή MCCB με θερμικό και μαγνητικό στοιχείο (ενότητα 2.3.5.3). Κατ’ αρχήν η ικανότητα ζεύξης (making) και απόζευξης (breaking) θα είναι μεγαλύτερη από τα ρεύματα βραχυκύκλωσης I_{peak} και I_{RMS} που έχουν προκύψει από τη μελέτη βραχυκυκλώματος. Η επιλογή (ή ρύθμιση του θερμικού) του θα γίνει σύμφωνα με την ενότητα 4.4.1.5

“Η ονομαστική ένταση του μέσου προστασίας I_n πρέπει να είναι μεγαλύτερη του ρεύματος γραμμής I_l , αλλά μικρότερη του μέγιστου θερμικά επιτρεπόμενου ρεύματος γραμμής I_Z .”

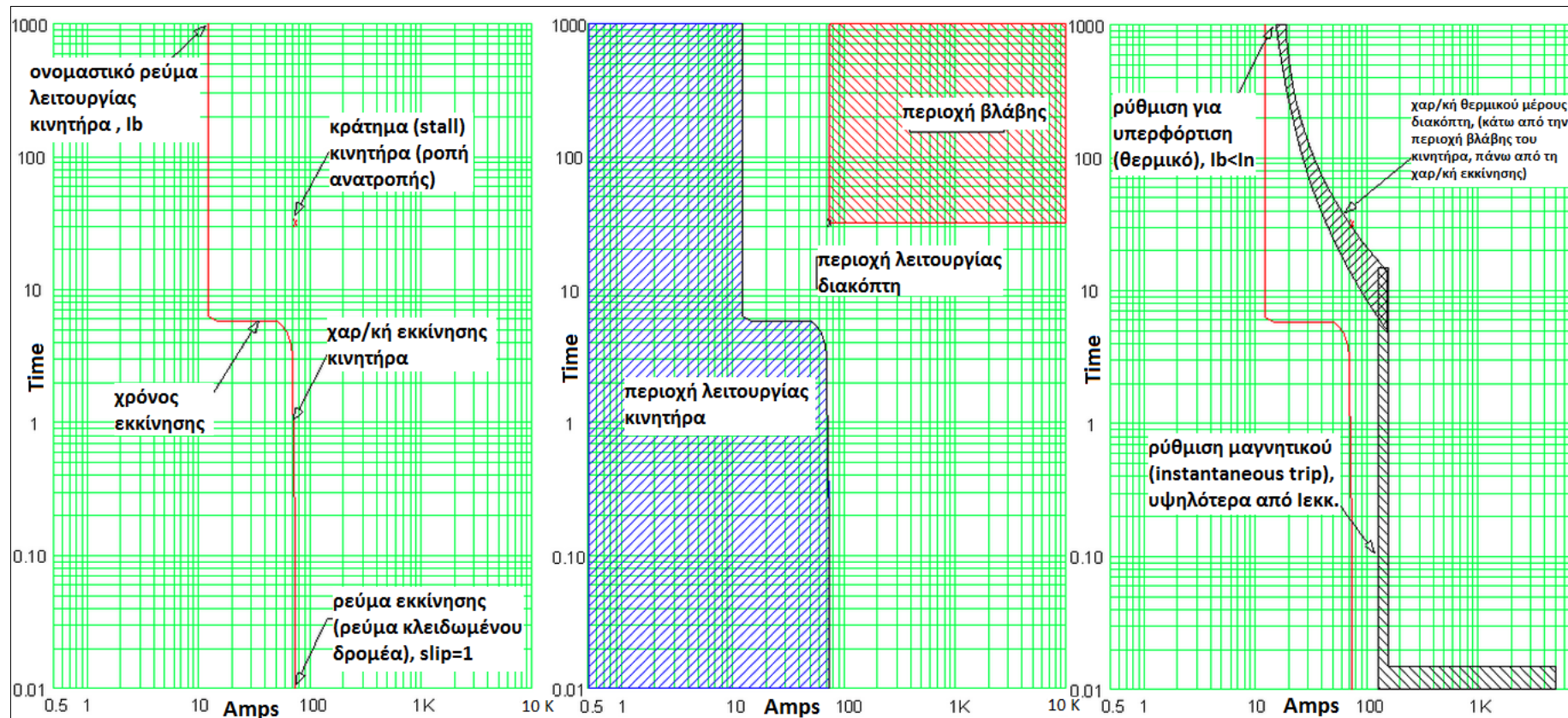
Για τον έλεγχο της προστασίας του καλωδίου από βραχυκυκλώματα, χαράσσεται η χαρακτηριστική του καλωδίου (damage curve), σύμφωνα με την (4.10). Με αυτό τον τρόπο προκύπτει ένα διάγραμμα όπως το παρακάτω:



Σχ. 4.8 Επιλογή και ρύθμιση διακόπτη για την προστασία του καλωδίου από υπερφορτίσεις-υπερεντάσεις

Αφού εξασφαλίσουμε την προστασία της γραμμής πρέπει να βεβαιωθούμε ότι ο διακόπτης δεν θα ανοίξει (trip) κατά την εκκίνηση του κινητήρα όπου το ρεύμα εκκίνησης, ανάλογα τον τύπο του starter, είναι πολλαπλάσιο του ονομαστικού.

Για απευθείας εκκίνηση (και γνωστά locked rotor current, starting time) παίρνουμε μια καμπύλη όπως η παρακάτω:



Σχ. 4.9 Ρύθμιση διακόπτη για την εκκίνηση του κινητήρα

Για την επίτευξη του τρίτου στόχου μας, δηλαδή την επιλογική συνεργασία μεταξύ του διακόπτη του κινητήρα (downstream device) και της γεννήτριας (upstream device), επιλέγουμε διακόπτη τύπου B, ACB, για τη γεννήτρια, δηλαδή διακόπτη που μπορεί να αντέξει αρκετούς κύκλους κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος προτού ανοίξει.

Ένας τέτοιος διακόπτης με ηλεκτρονική μονάδα (static trip) προσφέρει περισσότερες επιλογές ρύθμισης σε σχέση με έναν thermal-magnetic MCCB. (βλέπε και ενότητες 2.3.4, 2.3.5). Τυπικά αυτές είναι:

Long Time Pick Up, LTPU: ρεύμα ρύθμισης ή κατωφλίου για προστασία από υπερφορτίσεις. Ρυθμίζεται ως υποπολλαπλάσιο (πχ 0.5-1) του ρεύματος του I_n

Long Time Delay, LTD: ρύθμιση που προσομοιώνει την επιθυμητή χαρ/κή αντιστρόφου χρόνου ενός διμεταλλικού στοιχείου (θερμικό).

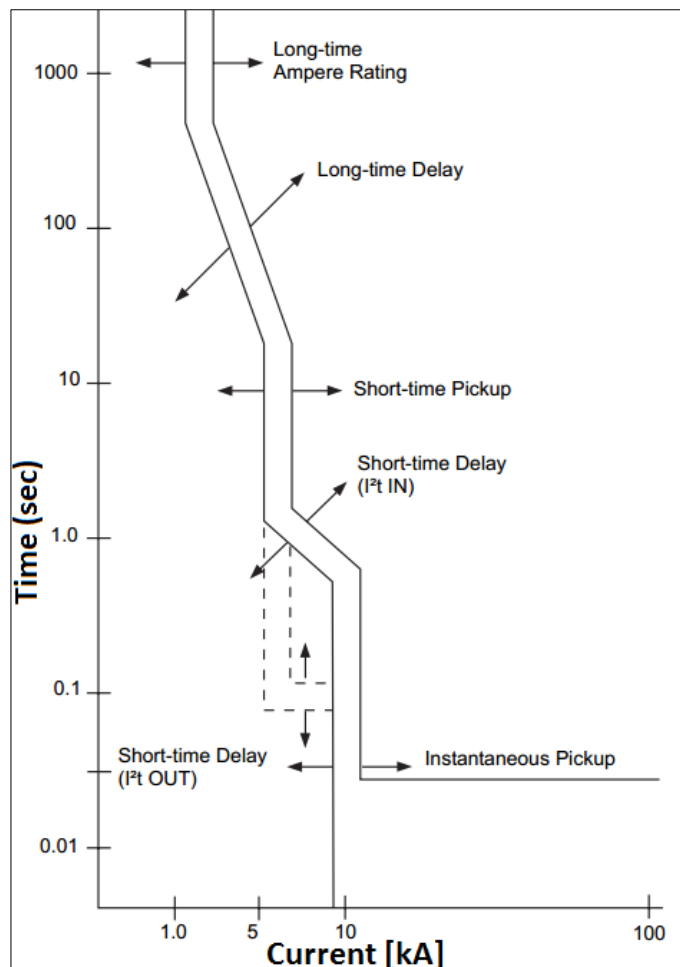
Short Time Pick Up, STPU: ρεύμα ρύθμισης ή κατωφλίου για προστασία από υπερεντάσεις/βραχυκυκλώματα. Ρυθμίζεται ως πολλαπλάσιο του ονομαστικού I_n (πχ 2-10).

Short Time Delay, STD: επιλογή προσομοίωσης χαρ/κής αντιστρόφου χρόνου όπως μιας ασφάλειας (IN) ή χρονικής καθυστέρησης σταθερού χρόνου (OUT).

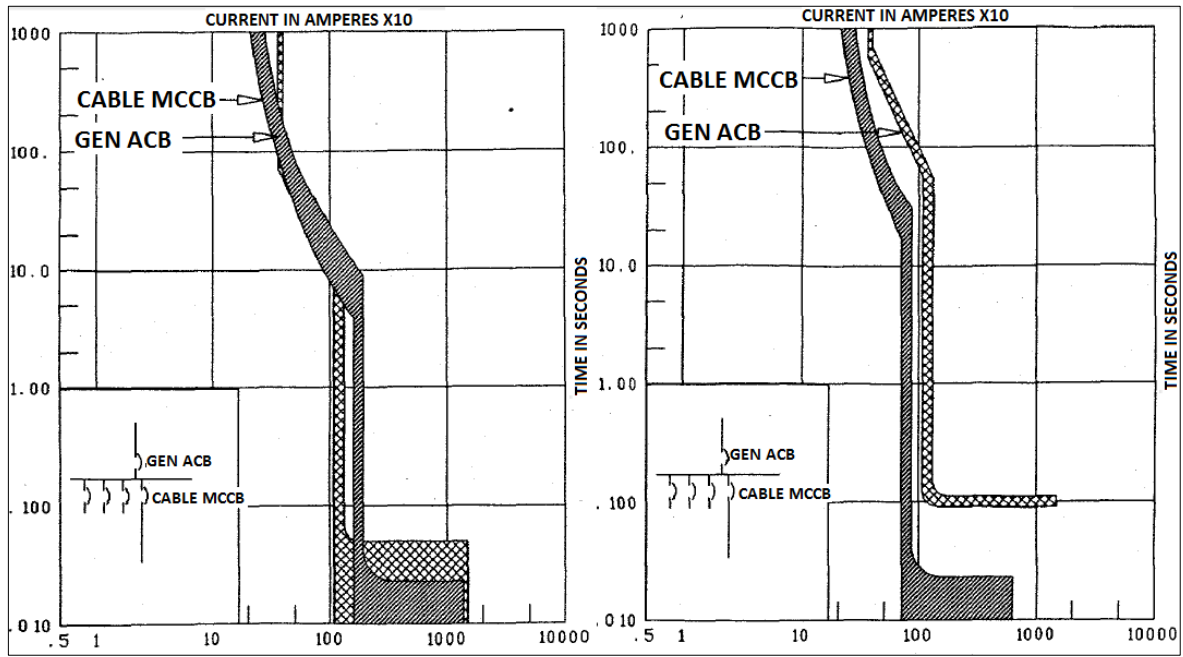
Instantaneous Pick Up, INST: δυνατότητα ενεργοποίησης/απενεργοποίησης επιλογής άμεσης διακοπής του κυκλώματος για πολύ

υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης, παρακάμπτοντας έτσι την STPU ρύθμιση. Σε περίπτωση απενεργοποίησης το χρονικό διάστημα που θα ανοίξει ο διακόπτης το καθορίζει το “Rated short time withstand current” (ενότητα 2.3.5.3).

Για να επιτύχουμε την πλήρη επιλογική συνεργασία μεταξύ των δύο διακοπών, ρυθμίζουμε τον διακόπτη της γεννήτριας κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι χαρακτηριστικές να μην αλληλεπικαλύπτονται σε κανένα σημείο. Παρατηρώντας το σχήμα Σχ. 4.11 α βλέπουμε πως για ένα σφάλμα μεταξύ 500-12000Amps κατάντη του διακόπτη του καλωδίου, ο διακόπτης της γεννήτριας θα ανοίξει πρώτος ή πιθανώς να ανοίξουν και οι δύο, διακόπτοντας έτσι την παροχή ισχύος σε όλο τον πίνακα. Οι ίδιοι διακόπτες, με κατάλληλη ρύθμιση της ηλεκτρονικής μονάδας του ACB μπορούν να επιτύχουν πλήρη επιλογική συνεργασία όπως βλέπουμε στο σχήμα Σχ. 4.11 β .



Σχ. 4.10 Διαθέσιμες ρυθμίσεις ηλεκτρονικής μονάδας διακόπτη ισχύος



Σχ. 4.11 α) TCC διάγραμμα διακοπών χωρίς επιλογική συνεργασία, β) TCC διάγραμμα διακοπών με επιλογική συνεργασία^[8]

4.8 Άλλες μελέτες ^[2]

4.8.1 Υπολογισμοί σφάλματος γείωσης

Αν η μία φάση του ρευματοφόρου αγωγού βραχυκυκλωθεί με τη γείωση, θα διαρρεύσει ρεύμα όπου το μέγεθος της έντασης του θα εξαρτηθεί από το σύστημα γείωσης. Οι υπολογισμοί σφάλματος γείωσης πραγματοποιούνται ώστε να διασφαλιστεί ότι η ένταση του ρεύματος διαφυγής (ground fault) είναι αρκετά χαμηλή προκειμένου να μην καταστραφεί ο εξοπλισμός και ώστε να καθοριστούν οι ρυθμίσεις των προστατευτικών ρελέ ανίχνευσης σφάλματος (fault detection relay).

4.8.2 Μελέτη εκκίνησης / υπολογισμοί πτώσης τάσης

Κατά την εκκίνηση μεγάλων κινητήρων ή κατά την ενεργοποίηση μεγάλων μετασχηματιστών, το μεταβατικό ρεύμα εκκίνησης είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό, σε πλήρες φορτίο. Για έναν κινητήρα η τιμή του ρεύματος εκκίνησης, όπως είδαμε στην ενότητα 2.6.7.1, μπορεί να είναι 5-8 φορές υψηλότερη της ονομαστικής, ενώ για ένα μετασχηματιστή η αντίστοιχη τιμή μπορεί να είναι 10-12 φορές υψηλότερη. Για κινητήρα συνδεδεμένο απευθείας (DOL), η κυματομορφή του ρεύματος εκκίνησης παρουσιάζει ομοιότητες με την κυματομορφή του ρεύματος σε κατάσταση βραχυκύκλωσης. Υπάρχει και εδώ η συνιστώσα συνεχούς ρεύματος καθώς και μεταβατικές και στατικές συνιστώσες κατά την περίοδο επιτάχυνσης του κινητήρα. Ο χρόνος της επιτάχυνσης από μηδενική σε πλήρη ταχύτητα καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά και την καμπύλη φόρτισης (load curve) του κινητήρα. Στην αντίστοιχη μεταβολή της τάσης, έχουμε μια ακαριαία μέγιστη πτώση της, ακριβώς τη στιγμή που συνδέεται ο κινητήρας. Ακολουθώντας ο ρυθμιστής τάσης (AVR), αρχίζει να αυξάνει τη μαγνήτιση ώστε να ανταπεξέλθει στα αυξημένα ζητούμενα ρεύματα των γεννητριών.

Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιούνται ώστε να διαπιστωθεί αν οι επιτρεπτές διακυμάνσεις της τάσης που ορίζουν οι κανονισμοί για την καλή λειτουργία του συστήματος ισχύος, ξεπερνώνται. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρειάζεται να ρυθμιστούν τα χαρακτηριστικά των γεννητριών ή των μεγάλων καταναλωτών, ή να εισαχθούν μέσα μείωσης των μεταβατικών ρευμάτων εκκίνησης. Για τους κινητήρες τέτοια μέσα θα μπορούσαν να είναι soft-starters, εκκινητές σύνδεσης αστέρα-τριγώνου, αυτομετασχηματιστές. Για τους μετασχηματιστές η χρήση προ-μαγνήτισης θα μπορούσε να αξιολογηθεί. Οι γεννήτριες με χαμηλή μεταβατική αντίδραση, ($X'd$) επίσης δίνουν χαμηλότερη μεταβατική πτώση τάσης.

4.8.3 Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας

Μερικές φορές υπάρχει η ανάγκη ακόμη πιο εκτεταμένης ανάλυσης της μεταβατικής συμπεριφοράς του δικτύου κατά τη διάρκεια σφάλματος και κατά το αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα εκκαθάρισής του. Αυτή η ανάλυση περιλαμβάνει υπολογισμούς ευστάθειας τάσης και συχνότητας (voltage and frequency stability), καθώς και την εκ νέου επιτάχυνση του φορτίου των κινητήρων. Ουσιαστικά δηλαδή μέσω αυτής της ανάλυσης απαντώνται τα εξής ερωτήματα: θα αποκατασταθεί η τάση και η συχνότητα στις γεννήτριες αφού εκκαθαριστεί το λάθος; Αντίστοιχα, θα καταστεί δυνατό οι κινητήρες των ουσιαστικών καταναλωτών να επιταχυνθούν χωρίς διακοπή; Μια τέτοιου τύπου ανάλυση χρειάζεται ακριβή και εκτενή μοντελοποίηση του ηλεκτρικού δικτύου και των ρυθμιστών της τάσης και της συχνότητας για να είναι αξιόπιστη. Πραγματοποιείται μόνο σε περιπτώσεις που κρίνεται απαραίτητη, συνήθως σε συστήματα με ηλεκτρικούς κινητήρες αντίστοιχης, προς τη γεννήτρια, ισχύος.

4.8.4 Ανάλυση αξιοπιστίας και ανάλυση επίδρασης αστοχίας (Reliability analysis and Failure Mode Effect Analysis, FMEA)

Στα πλοία όπου η συνεχώς διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς είναι απαραίτητη, όπως και η δυνατότητα εφεδρείας που επιτάσσουν οι κανονισμοί, συνήθως ζητείται μελέτη αξιοπιστίας του ηλεκτρικού δικτύου καθώς και ανάλυση της επίδρασης που θα έχουν στο ηλεκτρικό σύστημα πιθανές αστοχίες των επιμέρους στοιχείων που το αποτελούν. Μέσω αυτής της ανάλυσης προσδιορίζονται οι συνέπειες των διαφόρων τύπου σφαλμάτων στα στοιχεία του ηλεκτρικού συστήματος, μελετάται η κρισιμότητά τους και αξιολογείται η πιθανότητα τέτοιων γεγονότων. Η ανάλυση αξιοπιστίας είναι μια ποσοτική προσέγγιση για την εύρεση της πιθανότητας δυσμενών καταστάσεων όπως, απώλεια μερών του συστήματος πρόωσης, blackout, απώλεια δυνατότητας δυναμικής τοποθέτησης (dynamic positioning) κα. Πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μεθόδους από τη θεωρία στατιστικής, όπως η διαγραμματική ανάλυση/δέντρο αιτιών. (Failure Tree Analysis). Αντίστοιχα και για την ανάλυση επίδρασης κατάστασης αστοχίας, καθώς και για τη κρισιμότητα μιας τέτοιας κατάστασης, αναγνωρίζονται οι συνέπειες συγκεκριμένων σεναρίων βλάβης και περιγράφεται λεπτομερώς πως εντοπίζονται, πως αποφεύγονται ή με ποιο τρόπο αντισταθμίζονται. Τα στοιχεία που αποτελούν το σενάριο βλάβης είναι συνήθως τα ακόλουθα: περιγραφή αρχικών συνθηκών, περιγραφή τρόπου αστοχίας των εξαρτημάτων, περιγραφή της επίδρασης της αστοχίας των επιμέρους εξαρτημάτων στο σύστημα, περιγραφή των δυσμενών συνεπειών (καμία, χαμηλή, υψηλή, εκτεταμένη, καταστροφική βλάβη), συχνότητα τέτοιων περιστατικών, περιγραφή του τρόπου εντοπισμού του σφάλματος και ακολουθούμενες διορθωτικές ενέργειες, περιγραφή κρισιμότητας (αποδεκτή, μη αποδεκτή).

4.9 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

1. *Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου (Τόμος Α)*, Ι. Προυσαλίδης, Χ. Φραγκόπουλος, Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ
2. *Marine control systems*, Asgeir J. Sørensen, Σημειώσεις μαθήματος, NTNU
3. *Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών*, Π. Ντοκόπουλος, Βιβλίο
4. *Optimization of power system operation*, Jizhong Zhu, βιβλίο
5. *IEEE Standard 45-2002*, IEEE, Πρότυπο
6. *IEC 61363 [1998-02]*, IEC, Πρότυπο
7. *Rules of Classification of Ships PART 4 CHAPTER 8*, Det Norske Veritas, Κανονισμοί
8. *Computer Aided Coordination and Overcurrent Protection for distribution system*, Leon M. Tolbert, επιστημονικό άρθρο-
9. *The necessity of reactive power balance in ship electric energy systems*, Ι.Μ. Προυσαλίδης, Επιστημονικό άρθρο
10. *Παράσταση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και μελέτη ροής φορτίου*, Γ. Κορρές, Σημειώσεις ΗΜΜΥ, ΕΜΠ
11. *ABB Electrical installation hand book, second edition*, Τεχνικό εγχειρίδιο
12. *SKM PTW, Reference manual, IEC 61363*, Τεχνικό εγχειρίδιο
13. *SKM PTW, Reference manual, Captor*, Τεχνικό εγχειρίδιο
14. *Contribution to the development of a design methodology of a power system of a ship with electric propulsion, with emphasis on the investigation of related power supply quality problems*, Η. Σοφράς, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ
15. *Πλήρης ηλεκτρολογική μελέτη ενός πλοίου μεταφοράς φορτίου χύδην, ενός δεξαμενόπλοιου και ενός γενικευμένου τύπου πλοίου*, Θίμο Γ. Αντζέλα, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ

5 Κεφάλαιο : Εφαρμογή μελετών (VLCC Case study)

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εφαρμόσουμε τις μελέτες που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4, σε ένα πραγματικό (κατασκευασμένο το 2013) δεξαμενόπλοιο VLCC (>300.000 DWT). Τα φορτία και οι καταστάσεις λειτουργίας είναι καταγεγραμμένες στον πίνακα του ηλεκτρικού ισολογισμού, ο οποίος παρατίθεται. Επίσης, παρατίθεται ένας δεύτερος πίνακας ηλεκτρικού ισολογισμού, για όμοιο πλοίο, ο οποίος ακολουθεί ελαφρώς διαφορετική προσέγγιση στην παρουσίαση της μελέτης. Συγκεκριμένα, τα φορτία κατηγοριοποιούνται ανά εγκατάσταση, πέρα του κύκλου λειτουργίας τους. Ακολούθως, παρατίθεται πίνακας όπου εφαρμόζεται η μελέτη του επεκταμένου ηλεκτρικού ισολογισμού (όπως περιεγράφηκε στην ενότητα **4.3.1**) προκειμένου να εκτιμηθεί η άεργη ισχύς και ο συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης. Η μελέτη αυτή εφαρμόστηκε και σε άλλα πλοία, διαφορετικής μεταφορικής ικανότητας και τύπου, για λόγους πληρότητας δίνεται συγκεντρωτικός πίνακας με την εγκατεστημένη ισχύ, και τη φόρτιση του συστήματος ισχύος σε διάφορες αντιπροσωπευτικές καταστάσεις λειτουργίας.

Στη συνέχεια, επιλέγονται τα κατάλληλης διατομής καλώδια, σύμφωνα με τις αρχές που περιεγράφηκαν στην ενότητα **4.4**. Προκειμένου να υπολογιστεί η πτώση τάσης, γίνεται μια εκτίμηση του μήκους τους.

Οι δύο επόμενες μελέτες (μελέτη ροής φορτίου 4.5, μελέτη βραχυκυκλωμάτων 4.6) πραγματοποιούνται με τη βοήθεια του λογισμικού SKM PTW. Η μελέτη ροής φορτίου για το δίκτυο του πλοίου θα πραγματοποιηθεί για την κατάσταση με την μεγαλύτερη απαίτηση σε ισχύ (χειρισμοί φορτίου) και τα αποτελέσματά της θα αποτελέσουν τα δεδομένα εισόδου για τη μελέτη βραχυκυκλωμάτων. Οι μελέτες αυτές θα γίνουν με **δύο τρόπους**, για ένα απλοποιημένο δίκτυο και για το πλήρες δίκτυο του πλοίου.

- Αρχικά θα σχεδιαστεί στο SKM το **απλοποιημένο δίκτυο** του πλοίου με τα ισοδύναμα φορτία (από τον επεκταμένο ηλεκτρικό ισολογισμό), όπως αυτά καθορίζονται στην ενότητα **4.6.5**. Στην κατάσταση χειρισμών φορτίου λειτουργούν δύο παραλληλισμένες γεννήτριες, εδώ θα θεωρηθεί μία ισοδύναμη γεννήτρια διπλάσιας ονομαστικής ισχύος, με ίδια, ανά μονάδα χαρακτηριστικά. Καλώδια και ωμικά φορτία δε θα ληφθούν υπόψιν.
- Θα σχεδιαστεί το **πλήρες δίκτυο** του πλοίου με όλα τα στοιχεία και τα φορτία όπως προκύπτουν από τον ηλεκτρικό ισολογισμό και το μονογραμμικό σχέδιο. Θα χρησιμοποιηθούν τιμές για τον συντελεστή ισχύος και το βαθμό απόδοσης (για τον εκάστοτε LF) από shop tests των κατασκευαστών, όπου είναι διαθέσιμες, εναλλακτικά θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές του **Πιν. 7.1**. Για τη μελέτη βραχυκυκλώματος, οι τιμές X/R των επαγωγικών κινητήρων θα ληφθούν από το **Σχ. 7.23**

Θα υπολογιστεί ο συντελεστής ισχύος του συστήματος ώστε να μπορέσουμε να τον συγκρίνουμε με τα αποτελέσματα του επεκταμένου ενεργειακού ισολογισμού καθώς και οι απώλειες του συστήματος διανομής.

Η μελέτη βραχυκυκλωμάτων θα καθορίσει τις προδιαγραφές του προστατευτικού εξοπλισμού (αυτόματοι διακόπτες), οι ρυθμίσεις θα γίνουν σύμφωνα με τις αρχές που περιεγράφηκαν στις ενότητες **2.3** , **4.4.1.5-6** , **4.7**.

5.1.1 VLCC Ηλεκτρικός Ισολογισμός (1)

ITEM	No OF SET	OUTPUT [kW]	EFFICIENCY [%]	INPUT [kW]	LOAD FACTOR	DIV. FACTOR	AT SEA				AT PORT IN& OUT		AT CARGO OPERATIONS	
							WS	SEAGOING	WS	CLEANING	WS		WS	
CONTINUOUS LOAD TOTAL (MODE=C)							930,24		1098,99		1354,86		1983,76	
INTERMITTENT LOAD TOTAL							350,52		487,1		457,29		281,46	
DIVERSITY FACTOR FOR INTERMITTENT							0,4		0,4		0,4		0,4	
ACTUAL INTERMITTENT LOAD							140,21		194,8		182,92		112,58	
DECK MACHINERY TOTAL							0,00		0,00		368,48		37,0	
TOTAL							1070,4		1293,86		1906,26		2133,40	
CONTINUOUS LOAD														
MAIN/VACUUM COND. CSW PUMP	4	65	0,937	69,4	0,79	1	2	109,6	2	109,6	2	109,6	3	164,4
LT COOLING FW PUMP	3	75	0,951	78,9	0,76	1	2	119,9	2	119,9	2	119,9	1	59,9
ME JACKET COOL. FW PUMP	2	33	0,922	35,8	0,75	1	1	26,85	1	26,85	1	26,8		0,00
MAIN LO PUMP	2	132	0,952	138,7	0,66	1	1	91,54	1	91,54	1	91,5		0,00
ME FO SUPPLY PUMP	2	4,6	0,821	5,6	0,41	1	1	2,30	1	2,30	1	2,30		0,00
ME FO CIRCULATING PUMP	2	6,4	0,877	7,3	0,49	1	1	3,58	1	3,58	1	3,58		0,00
GE FO SUPPLY PUMP	2	1,3	0,813	1,6	0,36	1	1	0,58	1	0,58	1	0,58	1	0,58
GE LO PRIMING PUMP	3	1,5	0,750	2	0,8	1	2	3,20	1	1,60	1	1,60	1	1,60
ME AUX BLOWER	2	125	0,950	131,6	0,75	1		0,00		0,00	2	197,4		0,00
ME START UP PUMP	2	26	0,929	28	0,8	1		0,00		0,00	2	44,8		0,00
STERN TUBE LO PUMP	2	0,75	0,750	1	0,7	1	1	0,70	1	0,70	1	0,70		0,00
GE FO CIRC. PUMP	2	1,3	0,813	1,6	0,46	1	1	0,74	1	0,74	1	0,74	1	0,74
COMPOSITE BOILER BURNER PUMP &	1	21	0,933	22,5	0,54	1		0,00		0,00		0,00		0,00
STEERING GEAR - STAGE 1	2	160	0,943	169,7	0,5	1		0,00		0,00	1	84,8		0,00
STEERING GEAR - STAGE 2	2	160	0,943	169,7	0,25	1	1	42,43	1	42,43		0,00		0,00
HFO PURIFIER	2	21	0,921	22,8	0,75	1	2	34,20	2	34,20	2	34,2	1	17,1
HFO PURIFIER FEED PUMP	2	2,7	0,844	3,2	0,7	1	2	4,48	2	4,48	2	4,48	1	2,24
LO PURIFIER	2	8,6	0,887	9,7	0,65	1	1	6,31	1	6,31	1	6,31	1	6,31
LO PURIFIER FEED PUMP	2	1,9	0,826	2,3	0,6	1	1	1,38	1	1,38	1	1,38	1	1,38
AE LO PURIFIER	1	2,5	0,862	2,9	0,7	1		0,00		0,00		0,00		0,00
AE LO PURIFIER FEED PUMP	1	0,55	0,786	0,7	0,65	1		0,00		0,00		0,00		0,00
AUX BOILER FO PUMP WITH OTHER BOILER	2	24	0,913	26,3	0,75	1		0,00	1	19,73	1	19,7	1	19,7
AUX BOILER FEED WATER PUMP	3	51,7	0,930	55,6	0,75	1		0,00	1	41,70	1	41,7	2	83,4
COMPRESSED AIR DRYER	2	0,89	0,742	1,2	0,75	1	2	1,80	1	0,90	2	1,80	2	1,80
BOILER COMBUSTION AIR FAN	2	98	0,935	104,8	0,75	1		0,00	1	78,60	1	78,6	2	157,2
COMPOSITE BOILER FEED WATER PUMP	2	5,5	0,846	6,5	0,75	1	1	4,88		0,00		0,00		0,00
IGS BLOWER	3	155	0,950	163,2	0,5	1		0,00		0,00		0,00	2	163,2
IGS SCRUBBER CSW PUMP	1	75	0,951	78,9	0,75	1		0,00		0,00		0,00	1	59,1
IGS DECK WATER SEAL PUMP	2	3,7	0,771	4,8	0,6	1	1	2,88	1	2,88	1	2,88	1	2,88
FW GENERATOR	1	22,2	0,921	24,1	0,69	1	1	16,63	1	16,63	1	16,6		0,00
ATMOS. CONDENSER CSW PUMP	2	11	0,887	12,4	0,75	1	1	9,30	1	9,30	1	9,30	1	9,30
VAC. PUMP FOR COP	2	22	0,921	23,9	0,75	1		0,00	1	17,93		0,00	1	17,9
BALLAST PUMP	2	460	0,950	484,2	0,73	1		0,00		0,00		0,00	2	706,9
COMPOSITE BOILER FO PUMP	2	2,64	0,800	3,3	0,75	1	1	2,48	1	2,48	1	2,48	1	2,48
AIR CONDITION PLANT COMPRESSOR	2	86	0,926	92,9	0,6	1	2	111,4	2	111,4	2	111,4	2	111,4
AIR CONDITION PLANT FAN	2	17,3	0,915	18,9	0,55	1	2	20,79	2	20,79	2	20,7	2	20,7
AIR DUCT HEATER FOR W/H WINDOWS	2	6		6	0,7	1		0,00		0,00		0,0		0,00
FAN FOR W/H WINDOWS DEFROSTING	2	0,31	0,775	0,4	0,7	1		0,00		0,00		0,00		0,00
GALLEY PACKAGE AIR CONDITIONER	1	12	0,923	13	0,7	1	1	9,10	1	9,10	1	9,10	1	9,10
ECR PACKAGE AIR CONDITIONER	1	13,35	0,878	15,2	0,7	1	1	10,64	1	10,64	1	10,6	1	10,6

ITEM	No OF SET	OUTPUT [kW]	EFFICIENCY [%]	INPUT [kW]	LOAD FACTOR	DIV. FACTOR	AT SEA				AT PORT IN& OUT		AT CARGO OPERATIONS	
							WS	SEAGOING	WS	CLEANING	WS		WS	
ER WORKSHOP PACKAGE AIR CONDITIONER	1	13,35	0,878	15,2	0,7	0,4	1	4,26	1	4,26	1	4,26	1	4,26
W/H AIR COND. INDOOR & OUTDOOR UNIT	1	8,1	0,880	9,2	0,7	0,4	1	2,58	1	2,58	1	2,58	1	2,58
COPT VAC COND. W. PUMP	2	18,5	0,916	20,2	0,9	1		0,00	1	18,18		0,00	1	18,1
COP LO PRIMING PUMP	3	1	0,769	1,3	0,7	1		0,00		0,00		0,00		0,00
ENGINE ROOM VENTILATING FAN	4	55	0,927	59,3	0,65	1	4	154,1	4	154,1	4	154,1	4	154,1
PURIFIER ROOM EXH. FAN	1	11	0,859	12,8	0,7	1	1	8,96	1	8,96	1	8,96	1	8,96
WELDING SPACE EXHAUST FAN	1	0,75	0,750	1	0,75	1	1	0,75	1	0,75	1	0,75	1	0,75
STEERING GEAR ROOM FAN	1	7,5	0,872	8,6	0,8	1	1	6,88	1	6,88	1	6,88	1	6,88
PUMP ROOM FAN	2	37	0,909	40,7	0,75	1	1	30,53	1	30,53	1	30,5	2	61,0
EM'CY GENERATOR ROOM FAN	1	0,75	0,750	1	0,65	1		0,00		0,00		0,00		0,00
GALLEY SUPPLY FAN	1	0,75	0,750	1	0,75	1	1	0,75	1	0,75	1	0,75	1	0,75
GALLEY EXHAUST FAN	1	1,5	0,750	2	0,75	1	1	1,50	1	1,50	1	1,50	1	1,50
AIR COND. ROOM EXHAUST FAN	1	0,75	0,750	1	0,75	1	1	0,75	1	0,75	1	0,75	1	0,75
LAUNDRY & STORE ROOM EXH. FAN	1	0,75	0,833	0,9	0,75	1	1	0,68	1	0,68	1	0,68	1	0,68
DRY PROV. STORE FAN	1	0,25	0,833	0,3	0,75	1	1	0,23	1	0,23	1	0,23	1	0,23
PRIVATE TOILET EXH. FAN	1	2,2	0,786	2,8	0,75	1	1	2,10	1	2,10	1	2,10	1	2,10
ELEVATOR MACHINERY ROOM FAN	1	1,1	0,733	1,5	0,75	1	1	1,13	1	1,13	1	1,13	1	1,13
BOSUN STORE FAN	1	7,5	0,872	8,6	0,75	1		0,00		0,00	1	6,45	1	6,45
MEAT,FISH,VEGETABLE ROOM FREEZING FAN	1	0,41	0,683	0,6	0,75	1	1	0,45	1	0,45	1	0,45	1	0,45
BWT RM EXH. FAN	1	0,75	0,750	1	0,75	1	1	0,75	1	0,75	1	0,75	1	0,75
SUNDRY SPACE EXH. FAN	1	2,2	0,786	2,8	0,75	1	1	2,10	1	2,10	1	2,10	1	2,10
VOID TANK EXH. FAN	1	0,75	0,750	1	0,75	1	1	0,75	1	0,75	1	0,75	1	0,75
BWTS FW COOLING PUMP	1	7,5	0,893	8,4	0,75	1		0,00		0,00		0,00	1	6,30
FWD & AFT ICCP SYSTEM	1	27,6		27,6	0,2	1	1	5,52	1	5,52	1	5,52		0,00
MGPS	1	0,24		0,2	1	1	1	0,20	1	0,20	1	0,20	1	0,20
MACHINERY SPACE LIGHTING RECEPTACLE	1	26		26	0,9	1	1	23,40	1	23,40	1	23,4	1	23,4
ACCOMMODATION LIGHTING RECEPTACLE	1	24		24	0,6	1	1	14,40	1	14,40	1	14,4	1	14,4
DECK LIGHTING	1	26		26	0,8	1		0,00		0,00		0,00	1	20,8
CONTROL & NAVIGATION EQUIPMENT	1	15		15	0,8	1	1	12,00	1	12,00	1	12,0		0,00
OTHER AC220V CONSUMERS	1	3		3	1	0,8	1	2,40	1	2,40	1	2,40	1	2,40
EM'CY & NAVI. LIGHTING	1	19		19	1	1	0,	15,20	0,	15,20	0,	15,2	0,	11,4
INTERMITTENT LOAD														
MAIN AIR COMPRESSOR	2	88	0,946	93	0,8	1		0,00		0,00		0,00		0,00
TOPPING AIR COMPRESSOR	1	43	0,923	46,6	0,8	1	1	37,28	1	37,28	1	37,2	1	37,2
EM'CY AIR COMPRESSOR	1	8,7	0,879	9,9	0,85	1		0,00		0,00		0,00		0,00
HFO TRANSFER PUMP	2	18,5	0,911	20,3	0,68	1	1	13,80	1	13,80	1	13,8	1	13,8
MDO TRANSFER PUMP	1	5,5	0,821	6,7	0,55	1	1	3,69	1	3,69	1	3,69	1	3,69
LO TRANSFER PUMP	1	3,7	0,841	4,4	0,55	1	1	2,42	1	2,42	1	2,42	1	2,42
SLUDGE PUMP	1	2,2	0,815	2,7	0,55	1	1	1,49	1	1,49	1	1,49	1	1,49
ODME SAMPLING PUMP	1	2,2	0,815	2,7	0,8	1	1	2,16	1	2,16		0,00		0,00
CONTROL AIR COMPRESSOR	1	33,5	0,901	37,2	0,55	1	1	20,46	1	20,46	1	20,4	1	20,4
BILGE, FIRE, & G/S PUMP	2	175	0,959	182,5	0,8	1		0,00	1	146,0	1	146,0		0,00
BILGE WATER SEPERATOR	1	9	0,928	9,7	0,8	1	1	7,76	1	7,76		0,00		0,00
SERVICE AIR COMPRESSOR	1	44	0,900	48,9	0,5	1	1	24,45	1	24,45	1	24,4		0,00
HOT WATER CALORIFIER	1	30,4	0,990	30,7	0,8	1		0,00		0,00		0,00		0,00

ITEM	No OF SET	OUTPUT [kW]	EFFICIENCY [%]	INPUT [kW]	LOAD FACTOR	DIV. FACTOR	AT SEA				AT PORT IN& OUT		AT CARGO OPERATIONS		
							WS	SEAGOING	WS	CLEANING	WS		WS		
DECK FOAM LIQUID PUMP	1	11	0,917	12	0,8	1		0,00			0,00		0,00		0,00
EMERGENCY FIRE PUMP	1	150	0,952	157,6	0,94	1		0,00			0,00		0,00		0,00
PAINT STORE FAN	1	0,75	0,750	1	0,8	1	1	0,80	1		0,80	1	0,80	1	0,80
FW HYD. PUMP	2	3,7	0,771	4,8	0,7	1	1	3,36	1		3,36	1	3,36	1	3,36
VACUUM COLLECTION SYSTEM	1	7,2	0,889	8,1	0,8	1	1	6,48	1		6,48	1	6,48	1	6,48
SEWAGE TREATMENT PLANT	1	4,3	0,896	4,8	0,7	1	1	3,36	1		3,36	1	3,36	1	3,36
INCINERATOR	1	35		35	0,75	1	1	26,25	1		26,25		0,00		0,00
MGO TRANSFER PUMP	1	5,5	0,821	6,7	0,55	1	1	3,69	1		3,69	1	3,69	1	3,69
GALLEY & LAUNDRY EQUIPMENT	1	235		235	0,7	1	1	164,5	1		164,5	1	164,5	1	164,5
REF PROVISION COMPRESSOR	2	6,33	0,904	7	0,7	1	1	4,90	1		4,90	1	4,90	1	4,90
EXH DUCT FAN FOR PANTRY ROOM GARBAGE LOCKER	3	0,13	0,650	0,2	0,8	1	3	0,48	3		0,48	3	0,48	3	0,48
HOSPITAL/BATH ROOM EXH DUCT FAN	1	0,15	0,750	0,2	0,8	1	1	0,16	1		0,16	1	0,16	1	0,16
ME J.W. PREHEATING PUMP	1	5,5	0,833	6,6	0,7	1		0,00			0,00		0,00		0,00
ELEVATOR	1	5,5	0,873	6,3	0,8	1	1	5,04	1		5,04	1	5,04	1	5,04
WHISTLE	1	5,5	0,873	6,3	1	1		0,00			0,00	1	6,30		0,00
ER BILGE W. TRANS. PUMP	1	3,7	0,841	4,4	0,9	1		0,00			0,00		0,00	1	3,96
ME TURNING GEAR	1	11	0,846	13	0,8	1		0,00			0,00		0,00		0,00
ELECTRIC WELDER	1	7		7	0,8	1	1	5,60	1		5,60	1	5,60	1	5,60
LATHE	1	7,6	0,809	9,4	0,8	1	1	7,52			0,00		0,00		0,00
DRILL MACHINE	1	1,1	0,786	1,4	0,8	1	1	1,12			0,00		0,00		0,00
GRINDER MACHINE	1	0,75	0,833	0,9	0,8	1	1	0,72			0,00		0,00		
ER CRANE	1	21,9	0,839	26,1	0,75	1		0,00			0,00		0,00		
ME EXH. GAS V/V GRIND MACH.	1	1,15	0,821	1,4	0,8	1		0,00			0,00		0,00		
GREY WATER DISCH. PUMP	1	1,5	0,789	1,9	0,8	1	1	1,52	1		1,52	1	1,52		
CLEAN WATER DISCH. PUMP	1	1,5	0,789	1,9	0,8	1	1	1,52	1		1,52	1	1,52		
ME A/C CHEMICAL CLEAN PUMP	1	1,5	0,789	1,9	0,8	1		0,00			0,00		0,00		
AE JW PREHEATING PUMP WITH HEATERS	1	46	0,970	47,4	0,8	1		0,00			0,00		0,00		
DECK MACHINERY LOAD															
DECK MACHINERY HYD. POWER PACK FOR FWD	2	125	0,950	131,6	0,8	0,5						2	105,2		
DECK MACHINERY HYD. POWER PACK FOR FWD	2	125	0,950	131,6	0,8	0,5						2	105,2		
DECK MACHINERY HYD. POWER PACK FOR AFT	3	125	0,950	131,6	0,8	0,5						3	157,9		
HOSE HANDLING CRANE	2	63	0,931	67,7	0,8	0,4								1	21,6
PROVISION CRANE (STBD 3TON)	1	22	0,921	23,9	0,8	0,4									
PROVISION CRANE (PORT-10TON)	1	45	0,936	48,1	0,8	0,4								1	15,3
LIFEBOAT DAVIT WINCH	1	8,5	0,885	9,6	0,8	0,4									
RESCUE/LIFE BOAT DAVIT WINCH	1	25	0,909	27,5	0,8	0,4									
DECK MACHINE SERVO PUMP	1	6,8	0,895	7,6	0,8	0,4									
FILLING PUMP OF FWD WINCHES	1	1,4	0,778	1,8	0,8	0,4									
FILLING PUMP OF AFT WINCHES	1	1,4	0,778	1,8	0,8	0,4									
TOTAL													368,4		37,0

Ηλεκτρικός Ισολογισμός VLCC / Γεννήτρια Ανάγκης

ITEM	No OF SET	OUTPUT [kW]	EFFICIENCY [%]	INPUT	LOAD FACTOR	DIV. FACTOR	EMERGENCY			
							WS	AT BLACK OUT	WS	AT FIRE
CONTINUOUS LOAD TOTAL							150,7		258,31	
INTERMITTENT LOAD TOTAL (MODE=I)										
DIVERSITY FACTOR FOR INTERMITTENT										
ACTUAL INTERMITTENT LOAD										
DECK MACHINERY TOTAL (MODE=D)										
TOTAL							150,7		258,31	
EMERGENCY LOAD										
STEERING GEAR	2	160	0,943	169,7	0,25	1	1	42,43	1	42,4
EM'CY DO PUMP	1	1,75	0,795	2,2	0,9	1	1	1,98		0,00
GE LO PRIMING PUMP	3	1,5	0,750	2	0,8	1	3	4,80		0,00
ENGINE ROOM FAN	1	55	0,927	59,3	0,75	1	1	44,48		0,00
EMERGENCY FIRE PUMP	1	150	0,952	157,6	0,94	1		0,00	1	148,1
EM'CY AIR COMPRESSOR	1	8,7	0,879	9,9	0,85	1	1	8,42		0,00
EM'CY GENERATOR ROOM FAN	1	0,75	0,750	1	0,65	1	1	0,65	1	0,65
S/G ROOM FAN	1	7,5	0,872	8,6	0,8	1		0,00	1	6,88
FW HYD. PUMP	2	3,7	0,771	4,8	0,7	1	1	3,36	1	3,36
E/R HIGH FOAM PUMP	1	5,5	0,887	6,2	0,8	1		0,00	1	4,96
LIFEBOAT DAVIT WINCH	1	8,5	0,885	9,6	0,8	0,4		0,00		0,00
EM'CY & NAVAΙ LIGHTING	1	19		19	1	1	1	19,00	1	19,0
CONTROL & NAVIGATION EQUIPMENT	1	15		15	1	1	1	15,00	1	15,0
ELEVATOR	1	5,5	0,873	6,3	0,8	1	1	5,04		0,00
BREATHING APPARATUS AIR COMPRESSOR	1	2,2	0,846	2,6	0,8	1		0,00	1	2,08
LOCAL FIRE FIGHTING WATER PUMP	1	12,6	0,851	14,8	0,69	1		0,00	1	10,2
ELECTRIC WELDER	1	7		7	0,8	1	1	5,60	1	5,6
TOTAL								150,7		258,3

5.1.2 VLCC Ηλεκτρικός Ισολογισμός (2)

ITEM	MODE	No OF SET	OUTPUT [kW]	EFFIC. [%]	INPUT [kW]	LF	DF	SEA GOING	TANK CLEANING	PORT IN& OUT	CARGO LOAD	CARGO UNLOAD	EMERGENCY		
								WS	WS	WS	WS	WS	WS	BLACK OUT	FIRE
CONTINUOUS LOAD TOTAL (MODE=C)								996,34	1263,63	1423,75	1369,66	1926,04	114,14	69,08	
INTERMITTENT LOAD TOTAL (MODE=I)								263,75	216,20	251,31	359,47	359,47	44,30	144,51	
DIVERSITY FACTOR FOR INTERMITTENT LOAD								0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	1	1	
ACTUAL INTERMITTENT LOAD								105,50	86,48	100,53	143,79	143,79	44,30	144,51	
DECK MACHINERY TOTAL (MODE=D)								0,00	0,00	422,15	0,00	0,00	0,00	0,00	
TOTAL								1101,84	1350,11	1946,43	1513,45	2069,83	158,44	213,58	
PROPULSION PLANT															
ME Aux Blower	c	2	125	0,930	134,4	0,79	1	0,00	0,00	2	212,35	0,00	0,00	0,00	0,00
ME Jacket cool. FW pump	c	2	30	0,923	32,5	0,88	1	1	28,60	1	28,60	1	28,60	0,00	0,00
ME air cooler clean W. pump	i	1	2,2	0,846	2,6	0,73	1	0,00	0,00	0,00	1	1,90	1	1,90	0,00
ME FO supply pump	c	2	4,6	0,885	5,2	0,61	1	1	3,17	1	3,17	1	3,17	0,00	0,00
ME FO circ. Pump	c	2	8,6	0,896	9,6	0,37	1	1	3,55	1	3,55	1	3,55	1	3,55
Main LO pump	c	2	160	0,940	170,2	0,78	1	1	132,76	1	132,76	1	132,76	0,00	0,00
-Ditto-	i	2	160	0,940	170,2	0,78	0,2	1	26,55	0,00	0,00	1	26,55	1	26,55
ME stuff. Box LO filter feed pump	i	1	0,4	0,667	0,6	0,25	1	1	0,15	1	0,15	1	0,15	0,00	0,00
ME turning gear motor	i	1	11	0,880	12,5	0,89	1	0,00	0,00	0,00	1	11,13	1	11,13	0,00
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)								168,08	168,08	380,43	3,55	3,55	0,00	0,00	
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)								26,70	0,15	0,15	39,57	39,57	0,00	0,00	
GENERATING PLANT															
GE JW preheater	i	2			21	1	1	2	42,00	1	21,00	1	21,00	1	21,00
GE JW preheating pump	c	1	0,8	0,727	1,1	0,8	1	1	0,88	1	0,88	1	0,88	1	0,88
GE FO supply pump	c	2	0,8	0,800	1	0,51	1	1	0,51	1	0,51	1	0,51	1	0,51
GE FO circ. Pump	c	2	2,2	0,815	2,7	0,41	1	1	1,11	1	1,11	1	1,11	1	1,11
GE MDO supply pump	c	1	4,6	0,836	5,5	0,31	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1	1,71
GE LO priming pump	c	3	3,6	0,857	4,2	0,8	1	2	6,72	1	3,36	1	3,36	1	3,36
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)								9,22	5,86	5,86	5,86	5,86	5,07	0,00	
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)								42,00	21,00	21,00	21,00	21,00	0,00	0,00	
WATER HANDLING EQUIPMENT															
No1 Main cool. SW pump	c	1	90	0,947	95	0,79	1	1	75,05	1	75,05	1	75,05	0,00	0,00
No2 Main cool. SW pump (2speed 90/3	c	1	90	0,930	96,8	0,79	1	0,00	0,00	0,00	1	76,47	1	76,47	0,00
No3 Main cool. SW pump (2speed 90/1	c	1	90	0,930	96,8	0,79	1	1	76,47	1	76,47	1	76,47	0,00	0,00
Atm. Condenser cool. SW pump	c	1	22	0,928	23,7	0,73	1	0,00	1	17,30	1	17,30	0,00	1	17,30
Vac. Condenser cool. SW pump	c	1	55	0,921	59,7	0,83	1	0,00	1	49,55	0,00	0,00	1	49,55	0,00
Low temp cool. FW pump	c	3	65	0,943	68,9	0,77	1	2	106,11	2	106,11	2	106,11	1	53,05

ITEM	MODE	No OF SET	OUTPUT [kW]	EFFIC. [%]	INPUT [kW]	LF	DF	SEA GOING	TANK CLEANING	PORT IN& OUT	CARGO LOAD	CARGO UNLOAD	EMERGENCY					
								WS	WS	WS	WS	WS	WS	BLACK OUT	WS	FIRE		
COPT condensate pump	c	2	15	0,926	16,2	0,73	1	0,00	1	11,83	0,00	0,00	1	11,83	0,00	0,00		
FW generator distillate pump	c	1	1,5	0,833	1,8	0,8	1	1,44	1	1,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
FW generator ejector pump	c	1	22	0,902	24,4	0,8	1	19,52	1	19,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)								278,59	357,27	274,93	129,53	208,20	0,00	0,00				
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)																		
OIL HANDLING EQUIPMENT																		
HFO purifier	c	2	26	0,932	27,9	0,73	1	20,37	1	20,37	1	20,37	1	20,37	0,00	0,00		
HFO purifier feed pump	c	2	4,6	0,885	5,2	0,57	1	2,96	1	2,96	1	2,96	1	2,96	0,00	0,00		
HFO transfer pump	i	1	17,3	0,920	18,8	0,62	1	11,66	1	11,66	1	11,66	1	11,66	0,00	0,00		
DO transfer pump	i	1	8,6	0,896	9,6	0,21	1	2,02	1	2,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
LO purifier	c	2	17,5	0,916	19,1	0,74	1	14,13	1	14,13	1	14,13	1	14,13	0,00	0,00		
GE LO purifier	c	1	4,6	0,852	5,4	0,81	1	4,37	1	4,37	1	4,37	1	4,37	0,00	0,00		
ME LO purifier feed pump	c	2	2,5	0,833	3	0,39	1	1,17	1	1,17	1	1,17	1	1,17	0,00	0,00		
GE LO purifier feed pump	c	1	0,6	0,750	0,8	0,48	1	0,38	1	0,38	1	0,38	1	0,38	0,00	0,00		
Stern tube LO transfer pump	c	2	1,8	0,818	2,2	0,51	1	1,12	1	1,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
LO transfer pump	i	1	8,6	0,905	9,5	0,5	1	4,75	1	4,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Cyl. Oil transfer pump	i	1	0,7	0,875	0,8	0,52	1	0,42	1	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)								44,52	44,52	44,52	43,39	43,39	0,00	0,00				
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)								18,84	18,84	18,84	11,66	11,66	0,00	0,00				
BOILER PLANT																		
Aux boiler FD fan	c	2	98	0,930	105,4	0,87	1	0,00	1	91,70	1	91,70	1	91,70	2	183,40	0,00	0,00
Aux boiler FO pump	c	2	26	0,922	28,2	0,57	1	0,00	1	16,07	1	16,07	1	16,07	1	16,07	0,00	0,00
Aux boiler feed W pump	c	3	75	0,932	80,5	0,88	1	0,00	1	70,84	1	70,84	1	70,84	2	141,68	0,00	0,00
Boiler water circ. Pump	c	2	11	0,894	12,3	0,68	1	8,36	1	8,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Donkey boiler FD fan	c	1	4,6	0,868	5,3	0,8	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Donkey boiler feed w. pump	c	2	11	0,894	12,3	0,61	1	7,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)								15,87	186,98	186,98	178,61	341,15	0,00	0,00				
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)																		
OTHER EQUIPMENT IN MACHINERY SPACE																		
Main air compressor (I)	i	2	85	0,945	89,9	0,84	1	0,00	0,00	1	75,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Main air compressor (II)	i	1	22	0,905	24,3	0,96	1	23,33	1	23,33	1	23,33	1	23,33	0,00	0,00		
Service air compressor	i	1	55	0,911	60,4	0,83	1	0,00	0,00	0,00	1	50,13	1	50,13	0,00	0,00		
Emergency air compressor	i	1	3,5	0,833	4,2	0,89	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1	3,74	1	3,74		
Control air dryer	c	1	1	0,769	1,3	0,8	1	1,04	1	1,04	1	1,04	1	1,04	0,00	0,00		

ITEM	MODE	No OF SET	OUTPUT [kW]	EFFIC. [%]	INPUT [kW]	LF	DF	SEA GOING		TANK CLEANING		PORT IN& OUT		CARGO LOAD		CARGO UNLOAD		EMERGENCY		
								WS	WS	WS	WS	WS	WS	WS	WS	BLACK OUT	WS	FIRE		
Engine room fan	c	4	45	0,900	50	0,8	1	4	160,00	4	160,00	4	160,00	2	80,00	2	80,00	1	40,00	0,00
Purifier room exhaust fan	c	1	15	0,888	16,9	0,74	1	1	12,51	1	12,51	1	12,51	1	12,51	1	12,51		0,00	0,00
Welding area exhaust fan	i	1	1,5	0,833	1,8	0,59	1	1	1,06	1	1,06	1	1,06	1	1,06	1	1,06		0,00	0,00
Sludge pump	i	1	6,3	0,887	7,1	0,8	1	1	5,68	1	5,68	1	5,68	1	5,68	1	5,68		0,00	0,00
Bilge Water separate feed pump	i	1	3,4	0,850	4	0,8	1	1	3,20	1	3,20	1	3,20	1	3,20	1	3,20		0,00	0,00
ER bilge pump	i	1	2,5	0,862	2,9	0,8	1	1	2,32	1	2,32	1	2,32	1	2,32	1	2,32		0,00	0,00
Incinerator	i	1	33,5	0,901	37,2	0,8	1	1	29,76	1	29,76		0,00		0,00		0,00		0,00	0,00
Incinerator burner,etc	i	1	10	0,752	13,3	0,8	1	1	10,64	1	10,64		0,00		0,00		0,00		0,00	0,00
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									173,55		173,55		173,55		93,55		93,55		40,00	0,00
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									75,99		75,99		111,11		85,72		85,72		3,74	3,74
CARGO HANDLING EQUIPMENT																				
Auto strip sys vacuum pump	c	2	30	0,901	33,3	0,8	1		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	0,00
Inert Gas Blower	c	3	155	0,940	164,9	0,77	1		0,00		0,00		0,00		0,00	2	253,95		0,00	0,00
Scrubber cool. SW pump	c	1	75	0,943	79,5	0,77	1		0,00		0,00		0,00		0,00	1	61,22		0,00	0,00
Deck water seal pump	c	2	3,7	0,822	4,5	0,68	1	1	3,06	1	3,06	1	3,06	1	3,06	1	3,06		0,00	0,00
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									3,06		3,06		3,06		3,06		318,22		0,00	0,00
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)																				
SHIP SYSTEM																				
Ballast pump	c	2	400	0,950	421,1	0,85	1		0,00		0,00		0,00	2	715,87	2	715,87		0,00	0,00
Bilge fire & GS pump	i	2	110	0,944	116,5	0,84	1		0,00		0,00		0,00	1	97,86	1	97,86		0,00	0,00
Valve control hydro p/pack pump	i	2	3,7	0,860	4,3	0,8	1		0,00		0,00		0,00	1	3,44	1	3,44	1	3,44	0,00
Fire & G/S pump	i	1	220	0,942	233,5	0,89	1		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	0,00
Em'cy fire pump	i	1	150	0,940	159,6	0,83	1		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	1 132,47
Water for release pump	i	1	3	0,857	3,5	0,8	1		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	1 2,80
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									0,00		0,00		0,00		715,87		715,87		0,00	0,00
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									0,00		0,00		0,00		101,30		101,30		3,44	135,27
MANOEUVRING EQUIPMENT																				
Steering gear motor	c	2	160	0,920	173,9	0,5	1		0,00		0,00	1	86,95		0,00		0,00		0,00	0,00
-Ditto-	c	2	160	0,920	173,9	0,25	1	1	43,48	1	43,48		0,00		0,00		0,00	1	43,48	1 43,48
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									43,48		43,48		86,95		0,00		0,00		43,48	43,48
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)																				
DECK MACHINERY																				
Deck machinery hyd. p/pack, fore	d	4	132	0,930	141,9	0,85	0,5					4	241,23							
Deck machinery hyd. p/pack, aft	d	3	132	0,930	141,9	0,85	0,5					3	180,92							

ITEM	MODE	No OF SET	OUTPUT [kW]	EFFIC. [%]	INPUT [kW]	LF	DF	SEA GOING	TANK CLEANING	PORT IN& OUT	CARGO LOAD	CARGO UNLOAD	EMERGENCY							
													WS	BLACK OUT	WS	FIRE				
WS													WS	WS	WS	WS	WS	BLACK OUT	WS	FIRE
DECK MACHINERY SUBTOTAL (MODE=D)										422,15										
AIR COND. & VENTILATION EQUIPMENT																				
Steering gear room fan	c	1	1,5	0,789	1,9	0,71	1	1	1,35	1	1,35	1	1,35	1	1,35	1	1,35	0,00	0,00	
Cargo pump room fan	c	2	15	0,920	16,3	0,64	1		0,00	2	20,86		0,00	2	20,86	2	20,86	0,00	0,00	
Bosun store fan	c	1	5,5	0,917	6	0,67	1	1	4,02	1	4,02	1	4,02	1	4,02	1	4,02	0,00	0,00	
Fire cont/foam room fan	c	1	1,8	0,818	2,2	0,8	1	1	1,76	1	1,76	1	1,76		0,00		0,00	0,00	0,00	
Accomm A/Cond. Compressor	c	2	86	0,928	92,7	0,69	1	2	127,93	2	127,93	2	127,93	1	63,96	1	63,96	0,00	0,00	
Accomm A/Cond. Fan	c	1	34,5	0,913	37,8	0,6	1	1	22,68	1	22,68	1	22,68	1	22,68	1	22,68	0,00	0,00	
ECR pack A/Cond. Fan	c	1	1,5	0,789	1,9	0,8	1	1	1,52	1	1,52	1	1,52	1	1,52	1	1,52	0,00	0,00	
ECR pack A/Cond compressor	c	1	7,5	0,872	8,6	0,8	1	1	6,88	1	6,88	1	6,88	1	6,88	1	6,88	0,00	0,00	
W/H pack A/Cond. Fan	c	1	0,6	0,750	0,8	0,8	1	1	0,64	1	0,64	1	0,64	1	0,64	1	0,64	0,00	0,00	
W/H pack A/Cond. Compressor	c	1	2,3	0,852	2,7	0,8	1	1	2,16	1	2,16	1	2,16	1	2,16	1	2,16	0,00	0,00	
Galley pack A/Cond fan	i	1	0,8	0,727	1,1	0,8	1	1	0,88	1	0,88	1	0,88	1	0,88	1	0,88	0,00	0,00	
Galley pack A/Cond compressor	i	1	5,6	0,875	6,4	0,8	1	1	5,12	1	5,12	1	5,12	1	5,12	1	5,12	0,00	0,00	
Booster CW pump for gally pack	i	1	0,8	0,800	1	0,57	1	1	0,57	1	0,57	1	0,57	1	0,57	1	0,57	0,00	0,00	
Workshop pack A/Cond. Fan	i	1	0,4	0,667	0,6	0,8	1	1	0,48	1	0,48	1	0,48	1	0,48	1	0,48	0,00	0,00	
Workshop pack A/Cond compressor	i	1	5,6	0,875	6,4	0,8	1	1	5,12	1	5,12	1	5,12	1	5,12	1	5,12	0,00	0,00	
Galley fan	c	1	1,8	0,818	2,2	0,8	1	1	1,76	1	1,76	1	1,76		0,00		0,00	0,00	0,00	
Sanitary space fan	c	1	1,8	0,818	2,2	0,8	1	1	1,76	1	1,76	1	1,76		0,00		0,00	0,00	0,00	
Sundry space exhaust fan	c	1	1,8	0,818	2,2	0,8	1	1	1,76	1	1,76	1	1,76		0,00		0,00	0,00	0,00	
Elevator machinery room fan	c	1	0,4	0,667	0,6	0,8	1	1	0,48	1	0,48	1	0,48		0,00		0,00	0,00	0,00	
Hospital fan	c	1	0,3	0,750	0,4	0,8	1	1	0,32	1	0,32	1	0,32		0,00		0,00	0,00	0,00	
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									175,02	195,88	175,02	124,08	124,08	0,00	0,00	0,00	0,00			
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									12,17	12,17	12,17	12,17	12,17	0,00	0,00	0,00	0,00			
MISCELLANEOUS EQUIPMENT																				
Galley & Laundry equipment	i	1			80	0,6	1	1	48,00	1	48,00	1	48,00	1	48,00	1	48,00	0,00	0,00	
Prov. Ref. plant compressor	i	2	8,6	0,878	9,8	0,51	1	1	5,00	1	5,00	1	5,00	1	5,00	1	5,00	1	5,00	
Elevator	i	1	8	0,879	9,1	0,8	1	1	7,28	1	7,28	1	7,28	1	7,28	1	7,28	1	7,28	
Food lift	i	1	1,8	0,818	2,2	0,8	1	1	1,76	1	1,76	1	1,76	1	1,76	1	1,76	0,00	0,00	
Hot water circ. Pump	c	1	0,4	0,667	0,6	0,58	1	1	0,35	1	0,35	1	0,35	1	0,35	1	0,35	0,00	0,00	
Electric welding machine	i	1	12	0,851	14,1	0,8	1	1	11,28	1	11,28	1	11,28	1	11,28	1	11,28	1	11,28	
FW hydrophore pump	i	2	5,5	0,859	6,4	0,64	1	1	4,10	1	4,10	1	4,10	1	4,10	1	4,10	1	4,10	
DW hydrophore pump	i	2	5,5	0,887	6,2	0,64	1	1	3,97	1	3,97	1	3,97	1	3,97	1	3,97	1	3,97	
Sewage treatment plant	i	1	2,8	0,848	3,3	0,8	1	1	2,64	1	2,64	1	2,64	1	2,64	1	2,64	0,00	0,00	

ITEM	MODE	No OF SET	OUTPUT [kW]	EFFIC. [%]	INPUT [kW]	LF	DF	SEA GOING		TANK CLEANING		PORT IN& OUT		CARGO LOAD		CARGO UNLOAD		EMERGENCY			
								WS		WS		WS		WS		WS		WS	BLACK OUT	WS	FIRE
Vacuum toilet system pump	i	1	4,6	0,868	5,3	0,76	1	1	4,03	1	4,03	1	4,03	1	4,03	1	4,03		0,00	0,00	
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									0,35		0,35		0,35		0,35		0,35		0,00	0,00	
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									88,05		88,05		88,05		88,05		88,05		31,62	0,00	
LIGHTING, NAV & CONTROL EQUIPMENT																					
ICCP system	c	1			34,5	0,25	1	1	8,63	1	8,63	1	8,63	1	8,63	1	8,63		0,00	0,00	
Space heater & others	c	1			5	0,8	1	1	4,00	1	4,00	1	4,00	1	4,00	1	4,00		0,00	0,00	
Control & navigation equipment	c	1			15	0,8	1	1	12,00	1	12,00	1	12,00		0,00		0,00		0,00	0,00	
-Ditto-	c	1			15	0,8	0,8		0,00		0,00		0,00	1	9,60	1	9,60	1	9,60	1	9,60
Electric whistle	i	1			5,5	1	1		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	1	5,50	1	5,50
Emergency & nav. Lighting	c	1			20	0,8	1		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	1	16,00	1	16,00
Machinery space lighting	c	1			30	1	1	1	30,00	1	30,00	1	30,00		0,00		0,00		0,00	0,00	
-Ditto-	c	1			25	1	0,6		0,00		0,00		0,00	1	15,00	1	15,00		0,00	0,00	
Accommodation lighting	c	1			30	1	1	1	30,00	1	30,00	1	30,00		0,00		0,00		0,00	0,00	
-Ditto-	c	1			20	0,8	0,6		0,00		0,00		0,00	1	9,60	1	9,60		0,00	0,00	
Deck lighting	c	1			25	1	1		0,00		0,00		0,00	1	25,00	1	25,00		0,00	0,00	
-Ditto-	c	1			15	1	0,5		0,00		0,00	1	7,50		0,00		0,00		0,00	0,00	
CONTINUOUS LOAD SUBTOTAL (MODE=C)									84,63		84,63		92,13		71,83		71,83		25,60	25,60	
INTERMITTENT LOAD SUB TOTAL (MODE=I)									0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		5,50	5,50	

Από την ανάλυση φορτίου προκύπτει ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας για τα δύο πλοία:

Vessel 1 (3 x 1300kW DG)	code	Installed Power [kW]			Max consumption profile (at cargo operations), 2 x DG running			
		Output	%	Input	Cont. Load [kW]	Int. Load x 0.4 DF [kW]	Total Load [kW]	% DG Capacity
Systems								
Propulsion Plant	(P)	990,50	14,6%	1053,00	0,00	0,00	0,00	0,0%
Generating Plant	(G)	55,70	0,8%	59,80	2,91	0,00	2,91	0,1%
Ship System	(S)	1427,40	21,1%	1500,60	706,93	1,34	708,28	27,2%
Misc (other Aux machinery)	(M)	755,31	11,2%	795,20	8,75	101,23	109,98	4,2%
Oil Handling Eqp	(O)	124,65	1,8%	140,00	27,03	9,44	36,46	1,4%
Water Handling Eqp.	(W)	573,20	8,5%	611,00	251,67	0,00	251,67	9,7%
Cargo Handling Eqp.	(C)	589,60	8,7%	625,10	243,44	0,00	243,44	9,4%
Boiler Plant	(B)	436,38	6,4%	471,10	262,80	0,00	262,80	10,1%
Deck machinery	(D)	1111,10	16,4%	1176,90	37,06	0,00	37,06	1,4%
Air Condition Plant	(A)	253,40	3,7%	276,20	158,84	0,00	158,84	6,1%
Ventilation	(V)	333,79	4,9%	366,70	249,00	0,58	249,57	9,6%
Nav. Com. & Lights	(N)	118,50	1,8%	119,30	72,40	0,00	72,40	2,8%
Total Load		6769,53		7194,90	2020,81	112,58	2133,40	82,1%
Vessel 2 (3 x 1350kW DG)								
Systems								
Propulsion Plant ³	(P)	990,00	15,6%	1067,30	3,55	15,83	19,38	0,7%
Generating Plant	(G)	64,20	1,0%	68,60	5,86	8,40	14,26	0,5%
Ship System	(S)	1400,40	22,1%	1480,40	715,87	40,52	756,39	28,0%
Misc (other Aux machinery)	(M)	652,50	10,3%	712,60	93,89	69,51	163,40	6,1%
Oil Handling Eqp	(O)	145,20	2,3%	159,70	43,39	4,66	48,06	1,8%
Water Handling Eqp.	(W)	595,50	9,4%	637,30	208,20	0,00	208,20	7,7%
Cargo Handling Eqp.	(C)	607,40	9,6%	649,80	318,22	0,00	318,22	11,8%
Boiler Plant	(B)	521,60	8,2%	563,20	341,15	0,00	341,15	12,6%
Deck machinery	(D)	924,00	14,6%	993,30	0,00	0,00	0,00	0,0%
HVAC ⁴	(A)	276,50	4,4%	303,00	124,08	4,87	128,94	4,8%
Nav. Com. & Lights	(N)	165,00	2,6%	165,00	71,83	0,00	71,83	2,7%
Total Load		6342,30		6800,20	1926,04	143,79	2069,83	76,7%

Πιν. 5.1 Ανάλυση φορτίου δεξαμενοπλοίων VLCC (χειρισμοί φορτίου)

³Propulsion plant & steering gear

5.1.3 Επεκταμένος Ηλεκτρικός Ισολογισμός VLCC (1)

ITEM	No OF SET	INPUT [kW]	LF	DF	AT SEA												
					System	WS	SEAGOING					WS	CLEANING				
						P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]		P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]	
CONTINUOUS LOAD TOTAL (MODE=C)						930,24	0,793	0,609	714,80	1173,15		1098,99	0,796	0,606	836,24	1380,97	
INTERMITTENT LOAD TOTAL (MODE=I)						350,52	0,790	0,613	272,00	443,68		487,16	0,798	0,602	367,38	610,16	
DIVERSITY FACTOR FOR INTERMITTENT LOAD						0,4			0,4			0,4			0,4		
ACTUAL INTERMITTENT						140,21			108,80			194,86			146,95		
DECK MACHINERY TOTAL (MODE=D)						0,00						0,00					
TOTAL						1070,45	0,793	0,610	823,60	1350,62		1293,86	0,796	0,605	983,20	1625,03	
CONTINUOUS LOAD																	
MAIN/VACUUM COND. CSW PUMP	W	4	69,4	0,79	1	2	109,6	0,81	0,57	77,16	134,08	2	109,6	0,81	0,57	77,1	134,0
LT COOLING FW PUMP	W	3	78,9	0,76	1	2	119,9	0,81	0,58	86,56	147,90	2	119,9	0,81	0,58	86,5	147,9
ME JACKET COOL. FW PUMP	P	2	35,8	0,75	1	1	26,8	0,80	0,58	19,55	33,21	1	26,8	0,80	0,58	19,5	33,2
MAIN LO PUMP	P	2	138,7	0,66	1	1	91,5	0,78	0,62	72,90	117,02	1	91,5	0,78	0,62	72,9	117,0
ME FO SUPPLY PUMP	P	2	5,6	0,41	1	1	2,30	0,65	0,75	2,64	3,50	1	2,30	0,65	0,75	2,64	3,50
ME FO CIRCULATING PUMP	P	2	7,3	0,49	1	1	3,58	0,70	0,70	3,58	5,06	1	3,58	0,70	0,70	3,58	5,06
GE FO SUPPLY PUMP	G	2	1,6	0,36	1	1	0,58	0,62	0,78	0,73	0,93	1	0,58	0,62	0,78	0,73	0,93
GE LO PRIMING PUMP	G	3	2	0,8	1	2	3,20	0,82	0,57	2,23	3,90	1	1,60	0,82	0,57	1,12	1,95
ME AUX BLOWER	P	2	131,6	0,75	1		0,00	0,80	0,58	0,00	0,00		0,00	0,80	0,58	0,00	0,00
ME START UP PUMP	P	2	28	0,8	1		0,00	0,82	0,57	0,00	0,00		0,00	0,82	0,57	0,00	0,00
STERN TUBE LO PUMP	O	2	1	0,7	1	1	0,70	0,79	0,60	0,53	0,88	1	0,70	0,79	0,60	0,53	0,88
GE FO CIRC. PUMP	G	2	1,6	0,46	1	1	0,74	0,68	0,72	0,77	1,07	1	0,74	0,68	0,72	0,77	1,07
COMPOSITE BOILER BURNER PUMP & PREHEATER	B	1	22,5	0,54	1		0,00	0,73	0,68	0,00	0,00		0,00	0,73	0,68	0,00	0,00
STEERING GEAR - STAGE 1	P	2	169,7	0,5	1		0,00	0,71	0,70	0,00	0,00		0,00	0,71	0,70	0,00	0,00
STEERING GEAR - STAGE 2	P	2	169,7	0,25	1	1	42,4	0,52	0,84	68,25	80,36	1	42,4	0,52	0,84	68,2	80,3
HFO PURIFIER	O	2	22,8	0,75	1	2	34,2	0,80	0,58	24,90	42,31	2	34,2	0,80	0,58	24,9	42,3
HFO PURIFIER FEED PUMP	O	2	3,2	0,7	1	2	4,48	0,79	0,60	3,42	5,64	2	4,48	0,79	0,60	3,42	5,64
LO PURIFIER	O	2	9,7	0,65	1	1	6,31	0,77	0,62	5,08	8,10	1	6,31	0,77	0,62	5,08	8,10
LO PURIFIER FEED PUMP	O	2	2,3	0,6	1	1	1,38	0,76	0,65	1,18	1,82	1	1,38	0,76	0,65	1,18	1,82
AE LO PURIFIER	O	1	2,9	0,7	1		0,00	0,79	0,60	0,00	0,00		0,00	0,79	0,60	0,00	0,00
AE LO PURIFIER FEED PUMP	O	1	0,7	0,65	1		0,00	0,77	0,62	0,00	0,00		0,00	0,77	0,62	0,00	0,00
AUX BOILER FO PUMP WITH OTHER BOILER	B	2	26,3	0,75	1		0,00	0,80	0,58	0,00	0,00	1	19,7	0,80	0,58	14,3	24,4
AUX BOILER FEED WATER PUMP	B	3	55,6	0,75	1		0,00	0,80	0,58	0,00	0,00	1	41,7	0,80	0,58	30,3	51,5
COMPRESSED AIR DRYER	M	2	1,2	0,75	1	2	1,80	0,80	0,58	1,31	2,23	1	0,90	0,80	0,58	0,66	1,11
BOILER COMBUSTION AIR FAN	B	2	104,8	0,75	1		0,00	0,80	0,58	0,00	0,00	1	78,6	0,80	0,58	57,2	97,2
COMPOSITE BOILER FEED WATER PUMP	B	2	6,5	0,75	1	1	4,88	0,80	0,58	3,55	6,03		0,00	0,80	0,58	0,00	0,00
IGS BLOWER	C	3	163,2	0,5	1		0,00	0,71	0,70	0,00	0,00		0,00	0,71	0,70	0,00	0,00
IGS SCRUBBER CSW PUMP	C	1	78,9	0,75	1		0,00	0,80	0,58	0,00	0,00		0,00	0,80	0,58	0,00	0,00
IGS DECK WATER SEAL PUMP	C	2	4,8	0,6	1	1	2,88	0,76	0,65	2,46	3,79	1	2,88	0,76	0,65	2,46	3,79
FW GENERATOR	W	1	24,1	0,69	1	1	16,6	0,79	0,61	12,83	21,00	1	16,6	0,79	0,61	12,8	21,0
ATMOS. CONDENSER CSW PUMP	W	2	12,4	0,75	1	1	9,30	0,80	0,58	6,77	11,50	1	9,30	0,80	0,58	6,77	11,5

ITEM	System	No OF SET	INPUT [kW]	LF	DF	AT SEA											
						SEAGOING					CLEANING						
						P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]	P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]		
VAC. PUMP FOR COP	W	2	23,9	0,75	1		0,00	0,808	0,58	0,00	0,00	1	17,93	0,808	0,589	13,05	22,17
BALLAST PUMP	S	2	484,2	0,73	1		0,00	0,803	0,59	0,00	0,00		0,00	0,803	0,59	0,00	0,00
COMPOSITE BOILER FO PUMP	B	2	3,3	0,75	1	1	2,48	0,808	0,58	1,80	3,06	1	2,48	0,808	0,58	1,80	3,06
AIR CONDITION PLANT COMPRESSOR	A	2	92,9	0,6	1	2	111,4	0,760	0,65	95,33	146,6	2	111,4	0,760	0,650	95,33	146,6
AIR CONDITION PLANT FAN	A	2	18,9	0,55	1	2	20,79	0,738	0,67	19,01	28,17	2	20,79	0,738	0,67	19,01	28,17
AIR DUCT HEATER FOR W/H WINDOWS DEFROSTING	M	2	6	0,7	1		0,00	0,795	0,60	0,00	0,00		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00
FAN FOR W/H WINDOWS DEFROSTING	M	2	0,4	0,7	1		0,00	0,795	0,60	0,00	0,00		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00
GALLEY PACKAGE AIR CONDITIONER	A	1	13	0,7	1	1	9,10	0,795	0,60	6,95	11,45	1	9,10	0,795	0,607	6,95	11,45
ECR PACKAGE AIR CONDITIONER	A	1	15,2	0,7	1	1	10,64	0,795	0,60	8,12	13,39	1	10,64	0,795	0,607	8,12	13,39
ER WORKSHOP PACKAGE AIR CONDITIONER	A	1	15,2	0,7	0,4	1	4,26	0,555	0,83	6,38	7,67	1	4,26	0,555	0,832	6,38	7,67
W/H AIR COND. INDOOR & OUTDOOR UNIT	A	1	9,2	0,7	0,4	1	2,58	0,555	0,83	3,86	4,64	1	2,58	0,555	0,832	3,86	4,64
COPT VAC COND. W. PUMP	C	2	20,2	0,9	1		0,00	0,840	0,54	0,00	0,00	1	18,18	0,840	0,543	11,75	21,65
COP LO PRIMING PUMP	C	3	1,3	0,7	1		0,00	0,795	0,60	0,00	0,00		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00
ENGINE ROOM VENTILATING FAN	V	4	59,3	0,65	1	4	154,1	0,779	0,62	124,1	197,9	4	154,1	0,779	0,62	124,1	197,9
PURIFIER ROOM EXH. FAN	V	1	12,8	0,7	1	1	8,96	0,795	0,60	6,84	11,27	1	8,96	0,795	0,607	6,84	11,27
WELDING SPACE EXHAUST FAN	V	1	1	0,75	1	1	0,75	0,808	0,58	0,55	0,93	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93
STEERING GEAR ROOM FAN	V	1	8,6	0,8	1	1	6,88	0,820	0,57	4,80	8,39	1	6,88	0,820	0,572	4,80	8,39
PUMP ROOM FAN	V	2	40,7	0,75	1	1	30,53	0,808	0,58	22,23	37,76	1	30,53	0,808	0,58	22,23	37,76
EM'CY GENERATOR ROOM FAN	V	1	1	0,65	1		0,00	0,779	0,62	0,00	0,00		0,00	0,779	0,627	0,00	0,00
GALLEY SUPPLY FAN	V	1	1	0,75	1	1	0,75	0,808	0,58	0,55	0,93	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93
GALLEY EXHAUST FAN	V	1	2	0,75	1	1	1,50	0,808	0,58	1,09	1,86	1	1,50	0,808	0,589	1,09	1,86
AIR COND. ROOM EXHAUST FAN	V	1	1	0,75	1	1	0,75	0,808	0,58	0,55	0,93	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93
LAUNDRY & STORE ROOM EXH. FAN	V	1	0,9	0,75	1	1	0,68	0,808	0,58	0,49	0,83	1	0,68	0,808	0,589	0,49	0,83
DRY PROV. STORE FAN	V	1	0,3	0,75	1	1	0,23	0,808	0,58	0,16	0,28	1	0,23	0,808	0,589	0,16	0,28
PRIVATE TOILET EXH. FAN	V	1	2,8	0,75	1	1	2,10	0,808	0,58	1,53	2,60	1	2,10	0,808	0,589	1,53	2,60
ELEVATOR MACHINERY ROOM FAN	V	1	1,5	0,75	1	1	1,13	0,808	0,58	0,82	1,39	1	1,13	0,808	0,589	0,82	1,39
BOSUN STORE FAN	V	1	8,6	0,75	1		0,00	0,808	0,58	0,00	0,00		0,00	0,808	0,589	0,00	0,00
MEAT,FISH,VEGETABLE ROOM FREEZING FAN	M	1	0,6	0,75	1	1	0,45	0,808	0,58	0,33	0,56	1	0,45	0,808	0,589	0,33	0,56
BWT RM EXH. FAN	V	1	1	0,75	1	1	0,75	0,808	0,58	0,55	0,93	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93
SUNDRY SPACE EXH. FAN	V	1	2,8	0,75	1	1	2,10	0,808	0,58	1,53	2,60	1	2,10	0,808	0,58	1,53	2,60
VOID TANK EXH. FAN	V	1	1	0,75	1	1	0,75	0,808	0,58	0,55	0,93	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93
BWTS FW COOLING PUMP	M	1	8,4	0,75	1		0,00	0,808	0,58	0,00	0,00		0,00	0,808	0,58	0,00	0,00
FWD & AFT ICCP SYSTEM	M	1	27,6	0,2	1	1	5,52	1,000	0,00	0,00	5,52	1	5,52	1,000	0,00	0,00	5,52
MGPS	M	1	0,2	1	1	1	0,20	1,000	0,00	0,00	0,20	1	0,20	1,000	0,000	0,00	0,20
MACHINERY SPACE LIGHTING RECEPTACLE	N	1	26	0,9	1	1	23,40	1,000	0,00	0,00	23,40	1	23,40	1,000	0,000	0,00	23,40
ACCOMMODATION LIGHTING RECEPTACLE	N	1	24	0,6	1	1	14,40	1,000	0,00	0,00	14,40	1	14,40	1,000	0,000	0,00	14,40
DECK LIGHTING	N	1	26	0,8	1		0,00	1,000	0,00	0,00	0,00		0,00	1,000	0,000	0,00	0,00
CONTROL & NAVIGATION EQUIPMENT	N	1	15	0,8	1	1	12,00	1,000	0,00	0,00	12,00	1	12,00	1,000	0,000	0,00	12,00

ITEM	System	No OF SET	INPUT [kW]	LF	DF	AT SEA											
						WS	SEAGOING					WS	CLEANING				
							P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]		P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]
OTHER AC220V CONSUMERS	N	1	3	1	0,8	1	2,40	1,00	0,00	0,00	2,40	1	2,40	1,00	0,00	0,00	2,40
EM'CY & NAVI. LIGHTING	N	1	19	1	1	0,8	15,2	1,000	0,00	0,00	15,2	0,8	15,2	1,00	0,00	0,00	15,2
INTERMITTENT LOAD																	
MAIN AIR COMPRESSOR	M	2	93	0,8	1		0,00	0,82	0,57	0,00	0,00		0,00	0,82	0,57	0,00	0,00
TOPPING AIR COMPRESSOR	M	1	46,6	0,8	1	1	37,2	0,82	0,57	26,02	45,4	1	37,2	0,82	0,57	26,0	45,4
EM'CY AIR COMPRESSOR	M	1	9,9	0,85	1		0,00	0,83	0,55	0,00	0,00		0,00	0,83	0,55	0,00	0,00
HFO TRANSFER PUMP	O	2	20,3	0,68	1	1	13,8	0,78	0,61	10,76	17,5	1	13,8	0,78	0,61	10,7	17,5
MDO TRANSFER PUMP	O	1	6,7	0,55	1	1	3,69	0,73	0,67	3,37	4,99	1	3,69	0,73	0,67	3,37	4,99
LO TRANSFER PUMP	O	1	4,4	0,55	1	1	2,42	0,73	0,67	2,21	3,28	1	2,42	0,73	0,67	2,21	3,28
SLUDGE PUMP	M	1	2,7	0,55	1	1	1,49	0,73	0,67	1,36	2,01	1	1,49	0,73	0,67	1,36	2,01
ODME SAMPLING PUMP	C	1	2,7	0,8	1	1	2,16	0,82	0,57	1,51	2,63	1	2,16	0,82	0,57	1,51	2,63
CONTROL AIR COMPRESSOR	M	1	37,2	0,55	1	1	20,4	0,73	0,67	18,71	27,7	1	20,4	0,73	0,67	18,7	27,7
BILGE, FIRE, & G/S PUMP	S	2	182,	0,8	1		0,00	0,82	0,57	0,00	0,00	1	146,0	0,82	0,57	101,9	178,0
BILGE WATER SEPERATOR	M	1	9,7	0,8	1	1	7,76	0,82	0,57	5,42	9,46	1	7,76	0,82	0,57	5,42	9,46
SERVICE AIR COMPRESSOR	M	1	48,9	0,5	1	1	24,4	0,71	0,70	24,09	34,3	1	24,4	0,71	0,70	24,0	34,3
HOT WATER CALORIFIER	M	1	30,7	0,8	1		0,00	0,82	0,57	0,00	0,00		0,00	0,82	0,57	0,00	0,00
DECK FOAM LIQUID PUMP	D	1	12	0,8	1		0,00	0,82	0,57	0,00	0,00		0,00	0,82	0,57	0,00	0,00
EMERGENCY FIRE PUMP	S	1	157,	0,94	1		0,00	0,84	0,53	0,00	0,00		0,00	0,84	0,53	0,00	0,00
PAINT STORE FAN	V	1	1	0,8	1	1	0,80	0,82	0,57	0,56	0,98	1	0,80	0,82	0,57	0,56	0,98
FW HYD. PUMP	S	2	4,8	0,7	1	1	3,36	0,79	0,60	2,57	4,23	1	3,36	0,79	0,60	2,57	4,23
VACUUM COLLECTION SYSTEM	M	1	8,1	0,8	1	1	6,48	0,82	0,57	4,52	7,90	1	6,48	0,82	0,57	4,52	7,90
SEWAGE TREATMENT PLANT	M	1	4,8	0,7	1	1	3,36	0,79	0,60	2,57	4,23	1	3,36	0,79	0,60	2,57	4,23
INCINERATOR	M	1	35	0,75	1	1	26,2	0,80	0,58	19,11	32,4	1	26,2	0,80	0,58	19,1	32,4
MGO TRANSFER PUMP	O	1	6,7	0,55	1	1	3,69	0,73	0,67	3,37	4,99	1	3,69	0,73	0,67	3,37	4,99
GALLEY & LAUNDRY EQUIPMENT	M	1	235	0,7	1	1	164,5	0,79	0,60	125,5	206,9	1	164,5	0,79	0,60	125,5	206,9
REF PROVISION COMPRESSOR	M	2	7	0,7	1	1	4,90	0,79	0,60	3,74	6,16	1	4,90	0,79	0,60	3,74	6,16
EXH DUCT FAN FOR PANTRY ROOM GARBAGE LOCKER	V	3	0,2	0,8	1	3	0,48	0,82	0,57	0,34	0,59	3	0,48	0,82	0,57	0,34	0,59
HOSPITAL/BATH ROOM EXH DUCT FAN	V	1	0,2	0,8	1	1	0,16	0,82	0,57	0,11	0,20	1	0,16	0,82	0,57	0,11	0,20
ME J.W. PREHEATING PUMP	P	1	6,6	0,7	1		0,00	0,79	0,60	0,00	0,00		0,00	0,79	0,60	0,00	0,00
ELEVATOR	M	1	6,3	0,8	1	1	5,04	0,82	0,57	3,52	6,15	1	5,04	0,82	0,57	3,52	6,15
WHISTLE	N	1	6,3	1	1		0,00	1,00	0,00	0,00	0,00		0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
ER BILGE W. TRANS. PUMP	M	1	4,4	0,9	1		0,00	0,84	0,54	0,00	0,00		0,00	0,84	0,54	0,00	0,00
ME TURNING GEAR	P	1	13	0,8	1		0,00	0,82	0,57	0,00	0,00		0,00	0,82	0,57	0,00	0,00
ELECTRIC WELDER	M	1	7	0,8	1	1	5,60	0,82	0,57	3,91	6,83	1	5,60	0,82	0,57	3,91	6,83
LATHE	M	1	9,4	0,8	1	1	7,52	0,82	0,57	5,25	9,17		0,00	0,82	0,57	0,00	0,00
DRILL MACHINE	M	1	1,4	0,8	1	1	1,12	0,82	0,57	0,78	1,37		0,00	0,82	0,57	0,00	0,00

ITEM	No OF SET	INPUT [kW]	LF	DF	AT SEA													
					System	WS	SEAGOING					WS	CLEANING					
							P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]		P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]	
GRINDER MACHINE	M	1	0,9	0,8	1	1	0,72	0,820	0,57	0,50	0,88		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00	
ER CRANE	M	1	26,1	0,75	1		0,00	0,808	0,58	0,00	0,00		0,00	0,808	0,589	0,00	0,00	
ME EXH. GAS V/V GRIND MACH.	M	1	1,4	0,8	1		0,00	0,820	0,57	0,00	0,00		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00	
GREY WATER DISCH. PUMP	M	1	1,9	0,8	1	1	1,52	0,820	0,57	1,06	1,85	1	1,52	0,820	0,572	1,06	1,85	
CLEAN WATER DISCH. PUMP	M	1	1,9	0,8	1	1	1,52	0,820	0,57	1,06	1,85	1	1,52	0,820	0,572	1,06	1,85	
ME A/C CHEMICAL CLEAN PUMP	M	1	1,9	0,8	1		0,00	0,820	0,57	0,00	0,00		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00	
AE JW PREHEATING PUMP WITH HEATERS	G	1	47,4	0,8	1		0,00	0,820	0,57	0,00	0,00		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00	
DECK MACHINERY LOAD																		
DECK MACHINERY HYD. POWER PACK FOR FWD AREA-1	D	2	131,6	0,8	0,5			0,650	0,76	0,00	0,00			0,650	0,760	0,00	0,00	
DECK MACHINERY HYD. POWER PACK FOR FWD AREA-2	D	2	131,6	0,8	0,5			0,650	0,76	0,00	0,00			0,650	0,760	0,00	0,00	
DECK MACHINERY HYD. POWER PACK FOR AFT AREA	D	3	131,6	0,8	0,5			0,650	0,76	0,00	0,00			0,650	0,760	0,00	0,00	
HOSE HANDLING CRANE	D	2	67,7	0,8	0,4			0,589	0,80	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00	
PROVISION CRANE (STBD 3TON)	D	1	23,9	0,8	0,4			0,589	0,80	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00	
PROVISION CRANE (PORT-10TON)	D	1	48,1	0,8	0,4			0,589	0,80	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00	
LIFEBOAT DAVIT WINCH	D	1	9,6	0,8	0,4			0,589	0,80	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00	
RESCUE/LIFE BOAT DAVIT WINCH	D	1	27,5	0,8	0,4			0,589	0,80	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00	
DECK MACHINE SERVO PUMP	D	1	7,6	0,8	0,4			0,589	0,80	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00	
FILLING PUMP OF FWD WINCHES	D	1	1,8	0,8	0,4			0,589	0,80	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00	
FILLING PUMP OF AFT WINCHES	D	1	1,8	0,8	0,4			0,589	0,80	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00	

ITEM	System	No OF SET	INPUT [kW]	LF	DF	AT PORT IN& OUT					AT CARGO OPERATIONS						
						WS	P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]	WS	P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]
CONTINUOUS LOAD TOTAL (MODE=C)							1354,86	0,803	0,597	1007,15	1688,20		1983,76	0,802	0,597	1474,92	2471,98
INTERMITTENT LOAD TOTAL (MODE=I)							457,29	0,798	0,602	345,08	572,88		281,46	0,794	0,608	215,78	354,65
DIVERSITY FACTOR FOR INTERMITTENT LOAD							0,4			0,4			0,4			0,4	
ACTUAL INTERMITTENT LOAD							182,92			138,03			112,58			86,31	
DECK MACHINERY TOTAL (MODE=D)							368,48						37,06				
TOTAL							1906,26	0,857	0,515	1145,18	2223,80		2133,40	0,807	0,591	1561,24	2643,64
CONTINUOUS LOAD																	
MAIN/VACUUM COND. CSW PUMP	W	4	69,4	0,79	1	2	109,65	0,818	0,575	77,16	134,08	3	164,48	0,818	0,575	115,75	201,1
LT COOLING FW PUMP	W	3	78,9	0,76	1	2	119,93	0,811	0,585	86,56	147,90	1	59,96	0,811	0,585	43,28	73,95
ME JACKET COOL. FW PUMP	P	2	35,8	0,75	1	1	26,85	0,808	0,589	19,55	33,21		0,00	0,808	0,589	0,00	0,00
MAIN LO PUMP	P	2	138,7	0,66	1	1	91,54	0,782	0,623	72,90	117,02		0,00	0,782	0,623	0,00	0,00
ME FO SUPPLY PUMP	P	2	5,6	0,41	1	1	2,30	0,657	0,754	2,64	3,50		0,00	0,657	0,754	0,00	0,00
ME FO CIRCULATING PUMP	P	2	7,3	0,49	1	1	3,58	0,707	0,707	3,58	5,06		0,00	0,707	0,707	0,00	0,00
GE FO SUPPLY PUMP	G	2	1,6	0,36	1	1	0,58	0,621	0,784	0,73	0,93	1	0,58	0,621	0,784	0,73	0,93
GE LO PRIMING PUMP	G	3	2	0,8	1	1	1,60	0,820	0,572	1,12	1,95	1	1,60	0,820	0,572	1,12	1,95
ME AUX BLOWER	P	2	131,6	0,75	1	2	197,40	0,808	0,589	143,74	244,19		0,00	0,808	0,589	0,00	0,00
ME START UP PUMP	P	2	28	0,8	1	2	44,80	0,820	0,572	31,27	54,63		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00
STERN TUBE LO PUMP	O	2	1	0,7	1	1	0,70	0,795	0,607	0,53	0,88		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00
GE FO CIRC. PUMP	G	2	1,6	0,46	1	1	0,74	0,689	0,725	0,77	1,07	1	0,74	0,689	0,725	0,77	1,07
COMPOSITE BOILER BURNER PUMP & PREHEATER	B	1	22,5	0,54	1		0,00	0,733	0,680	0,00	0,00		0,00	0,733	0,680	0,00	0,00
STEERING GEAR - STAGE 1	P	2	169,7	0,5	1	1	84,85	0,712	0,702	83,60	119,11		0,00	0,712	0,702	0,00	0,00
STEERING GEAR - STAGE 2	P	2	169,7	0,25	1		0,00	0,528	0,849	0,00	0,00		0,00	0,528	0,849	0,00	0,00
HFO PURIFIER	O	2	22,8	0,75	1	2	34,20	0,808	0,589	24,90	42,31	1	17,10	0,808	0,589	12,45	21,15
HFO PURIFIER FEED PUMP	O	2	3,2	0,7	1	2	4,48	0,795	0,607	3,42	5,64	1	2,24	0,795	0,607	1,71	2,82
LO PURIFIER	O	2	9,7	0,65	1	1	6,31	0,779	0,627	5,08	8,10	1	6,31	0,779	0,627	5,08	8,10
LO PURIFIER FEED PUMP	O	2	2,3	0,6	1	1	1,38	0,760	0,650	1,18	1,82	1	1,38	0,760	0,650	1,18	1,82
AE LO PURIFIER	O	1	2,9	0,7	1		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00
AE LO PURIFIER FEED PUMP	O	1	0,7	0,65	1		0,00	0,779	0,627	0,00	0,00		0,00	0,779	0,627	0,00	0,00
AUX BOILER FO PUMP WITH OTHER BOILER CONSUMERS	B	2	26,3	0,75	1	1	19,73	0,808	0,589	14,36	24,40	1	19,73	0,808	0,589	14,36	24,40
AUX BOILER FEED WATER PUMP	B	3	55,6	0,75	1	1	41,70	0,808	0,589	30,37	51,58	2	83,40	0,808	0,589	60,73	103,1
COMPRESSED AIR DRYER	M	2	1,2	0,75	1	2	1,80	0,808	0,589	1,31	2,23	2	1,80	0,808	0,589	1,31	2,23
BOILER COMBUSTION AIR FAN	B	2	104,8	0,75	1	1	78,60	0,808	0,589	57,24	97,23	2	157,20	0,808	0,589	114,47	194,4
COMPOSITE BOILER FEED WATER PUMP	B	2	6,5	0,75	1		0,00	0,808	0,589	0,00	0,00		0,00	0,808	0,589	0,00	0,00
IGS BLOWER	C	3	163,2	0,5	1		0,00	0,712	0,702	0,00	0,00	2	163,20	0,712	0,702	160,79	229,1
IGS SCRUBBER CSW PUMP	C	1	78,9	0,75	1		0,00	0,808	0,589	0,00	0,00	1	59,18	0,808	0,589	43,09	73,20
IGS DECK WATER SEAL PUMP	C	2	4,8	0,6	1	1	2,88	0,760	0,650	2,46	3,79	1	2,88	0,760	0,650	2,46	3,79
FW GENERATOR	W	1	24,1	0,69	1	1	16,63	0,792	0,611	12,83	21,00		0,00	0,792	0,611	0,00	0,00
ATMOS. CONDENSER CSW PUMP	W	2	12,4	0,75	1	1	9,30	0,808	0,589	6,77	11,50	1	9,30	0,808	0,589	6,77	11,50

ITEM	System	No OF SET	INPUT [kW]	LF	DF	AT PORT IN& OUT					AT CARGO OPERATIONS						
						WS	P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]	WS	P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]
VAC. PUMP FOR COP	W	2	23,9	0,75	1		0,00	0,808	0,589	0,00	0,00	1	17,93	0,808	0,589	13,05	22,17
BALLAST PUMP	S	2	484,2	0,73	1		0,00	0,803	0,596	0,00	0,00	2	706,93	0,803	0,596	524,26	880,11
COMPOSITE BOILER FO PUMP	B	2	3,3	0,75	1	1	2,48	0,808	0,589	1,80	3,06	1	2,48	0,808	0,589	1,80	3,06
AIR CONDITION PLANT COMPRESSOR	A	2	92,9	0,6	1	2	111,48	0,760	0,650	95,33	146,69	2	111,48	0,760	0,650	95,33	146,69
AIR CONDITION PLANT FAN	A	2	18,9	0,55	1	2	20,79	0,738	0,675	19,01	28,17	2	20,79	0,738	0,675	19,01	28,17
AIR DUCT HEATER FOR W/H WINDOWS DEFROSTING	M	2	6	0,7	1		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00
FAN FOR W/H WINDOWS DEFROSTING	M	2	0,4	0,7	1		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00
GALLEY PACKAGE AIR CONDITIONER	A	1	13	0,7	1	1	9,10	0,795	0,607	6,95	11,45	1	9,10	0,795	0,607	6,95	11,45
ECR PACKAGE AIR CONDITIONER	A	1	15,2	0,7	1	1	10,64	0,795	0,607	8,12	13,39	1	10,64	0,795	0,607	8,12	13,39
ER WORKSHOP PACKAGE AIR CONDITIONER	A	1	15,2	0,7	0,4	1	4,26	0,555	0,832	6,38	7,67	1	4,26	0,555	0,832	6,38	7,67
W/H AIR COND. INDOOR & OUTDOOR UNIT	A	1	9,2	0,7	0,4	1	2,58	0,555	0,832	3,86	4,64	1	2,58	0,555	0,832	3,86	4,64
COPT VAC COND. W. PUMP	C	2	20,2	0,9	1		0,00	0,840	0,543	0,00	0,00	1	18,18	0,840	0,543	11,75	21,65
COP LO PRIMING PUMP	C	3	1,3	0,7	1		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00
ENGINE ROOM VENTILATING FAN	V	4	59,3	0,65	1	4	154,18	0,779	0,627	124,16	197,96	4	154,18	0,779	0,627	124,16	197,96
PURIFIER ROOM EXH. FAN	V	1	12,8	0,7	1	1	8,96	0,795	0,607	6,84	11,27	1	8,96	0,795	0,607	6,84	11,27
WELDING SPACE EXHAUST FAN	V	1	1	0,75	1	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93
STEERING GEAR ROOM FAN	V	1	8,6	0,8	1	1	6,88	0,820	0,572	4,80	8,39	1	6,88	0,820	0,572	4,80	8,39
PUMP ROOM FAN	V	2	40,7	0,75	1	1	30,53	0,808	0,589	22,23	37,76	2	61,05	0,808	0,589	44,46	75,52
EM'CY GENERATOR ROOM FAN	V	1	1	0,65	1		0,00	0,779	0,627	0,00	0,00		0,00	0,779	0,627	0,00	0,00
GALLEY SUPPLY FAN	V	1	1	0,75	1	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93
GALLEY EXHAUST FAN	V	1	2	0,75	1	1	1,50	0,808	0,589	1,09	1,86	1	1,50	0,808	0,589	1,09	1,86
AIR COND. ROOM EXHAUST FAN	V	1	1	0,75	1	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93
LAUNDRY & STORE ROOM EXH. FAN	V	1	0,9	0,75	1	1	0,68	0,808	0,589	0,49	0,83	1	0,68	0,808	0,589	0,49	0,83
DRY PROV. STORE FAN	V	1	0,3	0,75	1	1	0,23	0,808	0,589	0,16	0,28	1	0,23	0,808	0,589	0,16	0,28
PRIVATE TOILET EXH. FAN	V	1	2,8	0,75	1	1	2,10	0,808	0,589	1,53	2,60	1	2,10	0,808	0,589	1,53	2,60
ELEVATOR MACHINERY ROOM FAN	V	1	1,5	0,75	1	1	1,13	0,808	0,589	0,82	1,39	1	1,13	0,808	0,589	0,82	1,39
BOSUN STORE FAN	V	1	8,6	0,75	1	1	6,45	0,808	0,589	4,70	7,98	1	6,45	0,808	0,589	4,70	7,98
MEAT,FISH,VEGETABLE ROOM FREEZING FAN	M	1	0,6	0,75	1	1	0,45	0,808	0,589	0,33	0,56	1	0,45	0,808	0,589	0,33	0,56
BWT RM EXH. FAN	V	1	1	0,75	1	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93
SUNDRY SPACE EXH. FAN	V	1	2,8	0,75	1	1	2,10	0,808	0,589	1,53	2,60	1	2,10	0,808	0,589	1,53	2,60
VOID TANK EXH. FAN	V	1	1	0,75	1	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93	1	0,75	0,808	0,589	0,55	0,93
BWTS FW COOLING PUMP	M	1	8,4	0,75	1		0,00	0,808	0,589	0,00	0,00	1	6,30	0,808	0,589	4,59	7,79
FWD & AFT ICCP SYSTEM	M	1	27,6	0,2	1	1	5,52	1,000	0,000	0,00	5,52		0,00	0,480	0,877	0,00	0,00
MGPS	M	1	0,2	1	1	1	0,20	1,000	0,000	0,00	0,20	1	0,20	0,860	0,510	0,12	0,23
MACHINERY SPACE LIGHTING RECEPTACLE	N	1	26	0,9	1	1	23,40	1,000	0,000	0,00	23,40	1	23,40	1,000	0,000	0,00	23,40
ACCOMMODATION LIGHTING RECEPTACLE	N	1	24	0,6	1	1	14,40	1,000	0,000	0,00	14,40	1	14,40	1,000	0,000	0,00	14,40
DECK LIGHTING	N	1	26	0,8	1		0,00	1,000	0,000	0,00	0,00	1	20,80	1,000	0,000	0,00	20,80
CONTROL & NAVIGATION EQUIPMENT	N	1	15	0,8	1	1	12,00	1,000	0,000	0,00	12,00		0,00	1,000	0,000	0,00	0,00

ITEM	System	No OF SET	INPUT [kW]	LF	DF	AT PORT IN& OUT					AT CARGO OPERATIONS						
						WS	P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]	WS	P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]
OTHER AC220V CONSUMERS	N	1	3	1	0,8	1	2,40	1,000	0,000	0,00	2,40	1	2,40	1,000	0,000	0,00	2,40
EM'CY & NAVI. LIGHTING	N	1	19	1	1	0,8	15,20	1,000	0,000	0,00	15,20	0,6	11,40	1,000	0,000	0,00	11,40
INTERMITTENT LOAD																	
MAIN AIR COMPRESSOR	M	2	93	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00
TOPPING AIR COMPRESSOR	M	1	46,6	0,8	1	1	37,28	0,820	0,572	26,02	45,46	1	37,28	0,820	0,572	26,02	45,46
EM'CY AIR COMPRESSOR	M	1	9,9	0,85	1		0,00	0,830	0,557	0,00	0,00		0,00	0,830	0,557	0,00	0,00
HFO TRANSFER PUMP	O	2	20,3	0,68	1	1	13,80	0,789	0,615	10,76	17,50	1	13,80	0,789	0,615	10,76	17,50
MDO TRANSFER PUMP	O	1	6,7	0,55	1	1	3,69	0,738	0,675	3,37	4,99	1	3,69	0,738	0,675	3,37	4,99
LO TRANSFER PUMP	O	1	4,4	0,55	1	1	2,42	0,738	0,675	2,21	3,28	1	2,42	0,738	0,675	2,21	3,28
SLUDGE PUMP	M	1	2,7	0,55	1	1	1,49	0,738	0,675	1,36	2,01	1	1,49	0,738	0,675	1,36	2,01
ODME SAMPLING PUMP	C	1	2,7	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00
CONTROL AIR COMPRESSOR	M	1	37,2	0,55	1	1	20,46	0,738	0,675	18,71	27,73	1	20,46	0,738	0,675	18,71	27,73
BILGE, FIRE, & G/S PUMP	S	2	182,5	0,8	1	1	146,00	0,820	0,572	101,91	178,05		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00
BILGE WATER SEPERATOR	M	1	9,7	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00
SERVICE AIR COMPRESSOR	M	1	48,9	0,5	1	1	24,45	0,712	0,702	24,09	34,32		0,00	0,712	0,702	0,00	0,00
HOT WATER CALORIFIER	M	1	30,7	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00
DECK FOAM LIQUID PUMP	D	1	12	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00
EMERGENCY FIRE PUMP	S	1	157,6	0,94	1		0,00	0,848	0,531	0,00	0,00		0,00	0,848	0,531	0,00	0,00
PAINT STORE FAN	V	1	1	0,8	1	1	0,80	0,820	0,572	0,56	0,98	1	0,80	0,820	0,572	0,56	0,98
FW HYD. PUMP	S	2	4,8	0,7	1	1	3,36	0,795	0,607	2,57	4,23	1	3,36	0,795	0,607	2,57	4,23
VACUUM COLLECTION SYSTEM	M	1	8,1	0,8	1	1	6,48	0,820	0,572	4,52	7,90	1	6,48	0,820	0,572	4,52	7,90
SEWAGE TREATMENT PLANT	M	1	4,8	0,7	1	1	3,36	0,795	0,607	2,57	4,23	1	3,36	0,795	0,607	2,57	4,23
INCINERATOR	M	1	35	0,75	1		0,00	1,000	0,000	0,00	0,00		0,00	1,000	0,000	0,00	0,00
MGO TRANSFER PUMP	O	1	6,7	0,55	1	1	3,69	0,738	0,675	3,37	4,99	1	3,69	0,738	0,675	3,37	4,99
GALLEY & LAUNDRY EQUIPMENT	M	1	235	0,7	1	1	164,50	0,795	0,607	125,59	206,96	1	164,50	0,795	0,607	125,59	206,96
REF PROVISION COMPRESSOR	M	2	7	0,7	1	1	4,90	0,795	0,607	3,74	6,16	1	4,90	0,795	0,607	3,74	6,16
EXH DUCT FAN FOR PANTRY ROOM GARBAGE LOCKER	V	3	0,2	0,8	1	3	0,48	0,820	0,572	0,34	0,59	3	0,48	0,820	0,572	0,34	0,59
HOSPITAL/BATH ROOM EXH DUCT FAN	V	1	0,2	0,8	1	1	0,16	0,820	0,572	0,11	0,20	1	0,16	0,820	0,572	0,11	0,20
ME J.W. PREHEATING PUMP	P	1	6,6	0,7	1		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00		0,00	0,795	0,607	0,00	0,00
ELEVATOR	M	1	6,3	0,8	1	1	5,04	0,820	0,572	3,52	6,15	1	5,04	0,820	0,572	3,52	6,15
WHISTLE	N	1	6,3	1	1	1	6,30	0,860	0,510	3,74	7,33		0,00	0,860	0,510	0,00	0,00
ER BILGE W. TRANS. PUMP	M	1	4,4	0,9	1		0,00	0,840	0,543	0,00	0,00	1	3,96	0,840	0,543	2,56	4,72
ME TURNING GEAR	P	1	13	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00
ELECTRIC WELDER	M	1	7	0,8	1	1	5,60	0,820	0,572	3,91	6,83	1	5,60	0,820	0,572	3,91	6,83
LATHE	M	1	9,4	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00
DRILL MACHINE	M	1	1,4	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00

ITEM	No OF SET	INPUT [kW]	LF	DF	AT PORT IN& OUT						AT CARGO OPERATIONS						
					System						WS						
							P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]		P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]
GRINDER MACHINE	M	1	0,9	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00			0,820	0,572	0,00	0,00
ER CRANE	M	1	26,1	0,75	1		0,00	0,808	0,589	0,00	0,00			0,808	0,589	0,00	0,00
ME EXH. GAS V/V GRIND MACH.	M	1	1,4	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00			0,820	0,572	0,00	0,00
GREY WATER DISCH. PUMP	M	1	1,9	0,8	1	1	1,52	0,820	0,572	1,06	1,85			0,820	0,572	0,00	0,00
CLEAN WATER DISCH. PUMP	M	1	1,9	0,8	1	1	1,52	0,820	0,572	1,06	1,85			0,820	0,572	0,00	0,00
ME A/C CHEMICAL CLEAN PUMP	M	1	1,9	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00			0,820	0,572	0,00	0,00
AE JW PREHEATING PUMP WITH HEATERS	G	1	47,4	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00			0,820	0,572	0,00	0,00
DECK MACHINERY LOAD																	
DECK MACHINERY HYD. POWER PACK FOR FWD AREA-1	D	2	131,6	0,8	0,5	2	105,28	0,650	0,760	123,09	161,97			0,650	0,760	0,00	0,00
DECK MACHINERY HYD. POWER PACK FOR FWD AREA-2	D	2	131,6	0,8	0,5	2	105,28	0,650	0,760	123,09	161,97			0,650	0,760	0,00	0,00
DECK MACHINERY HYD. POWER PACK FOR AFT AREA	D	3	131,6	0,8	0,5	3	157,92	0,650	0,760	184,63	242,96			0,650	0,760	0,00	0,00
HOSE HANDLING CRANE	D	2	67,7	0,8	0,4			0,589	0,808	0,00	0,00	1	21,66	0,589	0,808	29,72	36,78
PROVISION CRANE (STBD 3TON)	D	1	23,9	0,8	0,4			0,589	0,808	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00
PROVISION CRANE (PORT-10TON)	D	1	48,1	0,8	0,4			0,589	0,808	0,00	0,00	1	15,39	0,589	0,808	21,11	26,13
LIFEBOAT DAVIT WINCH	D	1	9,6	0,8	0,4			0,589	0,808	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00
RESCUE/LIFE BOAT DAVIT WINCH	D	1	27,5	0,8	0,4			0,589	0,808	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00
DECK MACHINE SERVO PUMP	D	1	7,6	0,8	0,4			0,589	0,808	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00
FILLING PUMP OF FWD WINCHES	D	1	1,8	0,8	0,4			0,589	0,808	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00
FILLING PUMP OF AFT WINCHES	D	1	1,8	0,8	0,4			0,589	0,808	0,00	0,00			0,589	0,808	0,00	0,00

Επεκταμένος Ηλεκτρικός Ισολογισμός VLCC / Γεννήτρια Ανάγκης

ITEM	No OF SET	INPUT [kW]	LF	DF	EMERGENCY												
					WS AT BLACK OUT					WS AT FIRE							
System					P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]	P:Active Power [kW]	PF=cosφ	sinφ	Q:Reactive Power [Var]	S:Apparent Power [kVA]			
CONTINUOUS LOAD TOTAL (MODE=C)					150,75	0,779	0,627	121,43	193,57	258,31	0,812	0,584	185,62	318,09			
INTERMITTENT LOAD TOTAL (MODE=I)																	
DIVERSITY FACTOR FOR INTERMITTENT LOAD																	
ACTUAL INTERMITTENT LOAD																	
DECK MACHINERY TOTAL (MODE=D)																	
TOTAL					150,75	0,779	0,627	121,433	193,572	258,31	0,812	0,584	185,621	318,088			
EMERGENCY LOAD																	
STEERING GEAR	P	2	169,7	0,25	1	1	42,43	0,528	0,849	68,25	80,36	1	42,43	0,528	0,849	68,25	80,36
EM'CY DO PUMP	O	1	2,2	0,9	1	1	1,98	0,840	0,543	1,28	2,36		0,00	0,840	0,543	0,00	0,00
GE LO PRIMING PUMP	O	3	2	0,8	1	3	4,80	0,820	0,572	3,35	5,85		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00
ENGINE ROOM FAN	V	1	59,3	0,75	1	1	44,48	0,808	0,589	32,39	55,02		0,00	0,808	0,589	0,00	0,00
EMERGENCY FIRE PUMP	M	1	157,6	0,94	1		0,00	0,848	0,531	0,00	0,00	1	148,14	0,848	0,531	92,78	174,80
EM'CY AIR COMPRESSOR	M	1	9,9	0,85	1	1	8,42	0,830	0,557	5,65	10,14		0,00	0,830	0,557	0,00	0,00
EM'CY GENERATOR ROOM FAN	V	1	1	0,65	1	1	0,65	0,779	0,627	0,52	0,83	1	0,65	0,779	0,627	0,52	0,83
S/G ROOM FAN	V	1	8,6	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00	1	6,88	0,820	0,572	4,80	8,39
FW HYD. PUMP	V	2	4,8	0,7	1	1	3,36	0,795	0,607	2,57	4,23	1	3,36	0,795	0,607	2,57	4,23
E/R HIGH FOAM PUMP	M	1	6,2	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00	1	4,96	0,820	0,572	3,46	6,05
LIFEBOAT DAVIT WINCH	D	1	9,6	0,8	0,4		0,00	0,589	0,808	0,00	0,00		0,00	0,589	0,808	0,00	0,00
EM'CY & NAVI LIGHTING	N	1	19	1	1	1	19,00	1,000	0,000	0,00	19,00	1	19,00	1,000	0,000	0,00	19,00
CONTROL & NAVIGATION EQUIPMENT	N	1	15	1	1	1	15,00	1,000	0,000	0,00	15,00	1	15,00	1,000	0,000	0,00	15,00
ELEVATOR	M	1	6,3	0,8	1	1	5,04	0,820	0,572	3,52	6,15		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00
BREATHING APPARATUS AIR COMPRESSOR	A	1	2,6	0,8	1		0,00	0,820	0,572	0,00	0,00	1	2,08	0,820	0,572	1,45	2,54
LOCAL FIRE FIGHTING WATER PUMP	S	1	14,8	0,69	1		0,00	0,792	0,611	0,00	0,00	1	10,21	0,792	0,611	7,88	12,90
ELECTRIC WELDER	M	1	7	0,8	1	1	5,60	0,820	0,572	3,91	6,83	1	5,60	0,820	0,572	3,91	6,83
TOTAL							150,7						258,31				

5.1.4 Άλλα πλοία

YEAR BUILT		2002	1995	2010	2008	2013	2006	2003	2013	2014	1991	2010	2012	2010		
TYPE		OIL TANKER	OIL TANKER	OIL TANKER	OIL TANKER	OIL TANKER	LPG	LNG	LNG	LNG	BULK CAR.	BULK CAR.	BULK CAR.	CONTAINERSHIP		
SIZE		HANDY-MAX	AFRA-MAX	SUEZ-MAX	VLCC	VLCC	83800 cbm	145700 cbm	159800 cbm	162000 cbm	39000 dwt	37000 dwt	30000 dwt	1700 TEU		
PROPULSION		2-X LOW SPEED	2-X LOW SPEED	2-X LOW SPEED	2-X LOW SPEED	2-X LOW SPEED	2-X LOW SPEED	STEAM TURBINE	DFDE	DFDE	2-X LOW SPEED	2-X LOW SPEED	2-X LOW SPEED	2-X LOW SPEED		
DIESEL GENERATOR PARTICULARS	[kW]	600	750	900	1350	1300	1200	3450	8450	11290	7530	450	540	500	1195	
	No	3	3	3	3	3	3	3	4	2	2	3	3	3	3	
	[V]	450	450	450	450	450	450	6600	6600	6600	6600	450	450	450	450	
	[Hz]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
OPERATION PROFILES	SEAGOING	[kW]	632,47	665,43	727,48	1101,84	1070,45	732,54	2208,26	28939,69	28669,79	400,22	475,95	444,11	1981,68	
		PF	0,752	0,811	0,792	0,791	0,776	0,799	0,819	0,858	0,834	0,880	0,808	0,778	0,867	
		DG	2	1	1	1	1	1	1	4	2	2	1	1	1	2
		% LOAD	52,7%	88,7%	80,8%	81,6%	82,3%	61,0%	64,0%	85,6%	76,2%	88,9%	88,1%	88,8%	82,9%	
	SEAGOING 2	[kW]	785,77	839,11	1098,19	1350,11	1293,86	2016,58		29648,06	33156,65		599,47			
		PF	0,787	0,816	0,803	0,800	0,782	0,809		0,856	0,856		0,811			
		DG	2	2	2	2	2	2		4	2	2	2			
		% LOAD	65,5%	55,9%	61,0%	50,0%	49,8%	84,0%		87,7%	88,1%		55,5%			
	PORT IN & OUT	REMARKS	TANK CLEAN.	TANK CLEAN.	TANK CLEAN.	TANK CLEAN.	TANK CLEAN.	TANK COOL DOWN			GAS MODE		GAS MODE		BALLAST EXCH.	
		[kW]	820,03	982,13	1386,15	1946,43	1906,26	1702,73	4604,03	10174,85	9154,98	601,09	640,06	518,72	3027,04	
		PF	0,732	0,782	0,775	0,774	0,848	0,787	0,791	0,604	0,599	0,878	0,785	0,788	0,861	
		DG	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	2	2	3	
	CARGO OPERATION	% LOAD	68,3%	65,5%	77,0%	72,1%	73,3%	70,9%	66,7%	60,2%	81,1%	66,8%	59,3%	51,9%	84,4%	
		[kW]	834,61	1253,31	1577,71	2069,83	2133,40	2122,56	5951,31	6329,69	8614,71	760,09	932,59	915,48	2063,34	
		PF	0,768	0,826	0,812	0,816	0,798	0,809	0,824	0,828	0,819	0,870	0,818	0,808	0,867	
		DG	2	2	2	2	2	2	2	1	1	0	2	2	2	
	EM'CY GENERATOR PARTICULARS	% LOAD	69,6%	83,6%	87,7%	76,7%	82,1%	88,4%	86,3%	74,9%	76,3%	84,5%	86,4%	91,5%	86,3%	
		[kW]	120	120	150	350	360	300	500	850	850	80	100	120	170	
		No	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		[V]	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	
OPERATION PROFILES	EM'CY AT FIRE	[Hz]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60		
		[kW]	87,39	84,24	91,74	213,58	258,31	199,39	262,89	205,90	569,79	44,98	81,80	92,40	139,39	
		PF	0,831	0,788	0,828	0,753	0,782	0,791	0,819	0,783	0,808	0,918	0,809	0,796	0,910	
		DG	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	EM'CY AT BLACK OUT	% LOAD	72,8%	70,2%	61,2%	61,0%	71,8%	66,5%	52,6%	24,2%	67,0%	56,2%	81,8%	77,0%	82,0%	
		[kW]	67,91		48,75	158,44	150,75	122,16	121,53	96,68	610,07	21,08	70,12			
		PF	0,815		0,827	0,717	0,729	0,774	0,893	0,738	0,831	0,977	0,807			
		DG	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1			
		% LOAD	56,6%		32,5%	45,3%	41,9%	40,7%	24,3%	11,4%	71,8%	26,4%	70,1%			

Πιν. 5.2 Φόρτιση γεννητριών και Σ.Ι. σε διάφορες επιχειρησιακές καταστάσεις για διαφορετικού τύπου πλοία

5.2 Διαστασιολόγηση καλωδίων VLCC

5.2.1 Προσδιορισμός μήκους καλωδίωσης

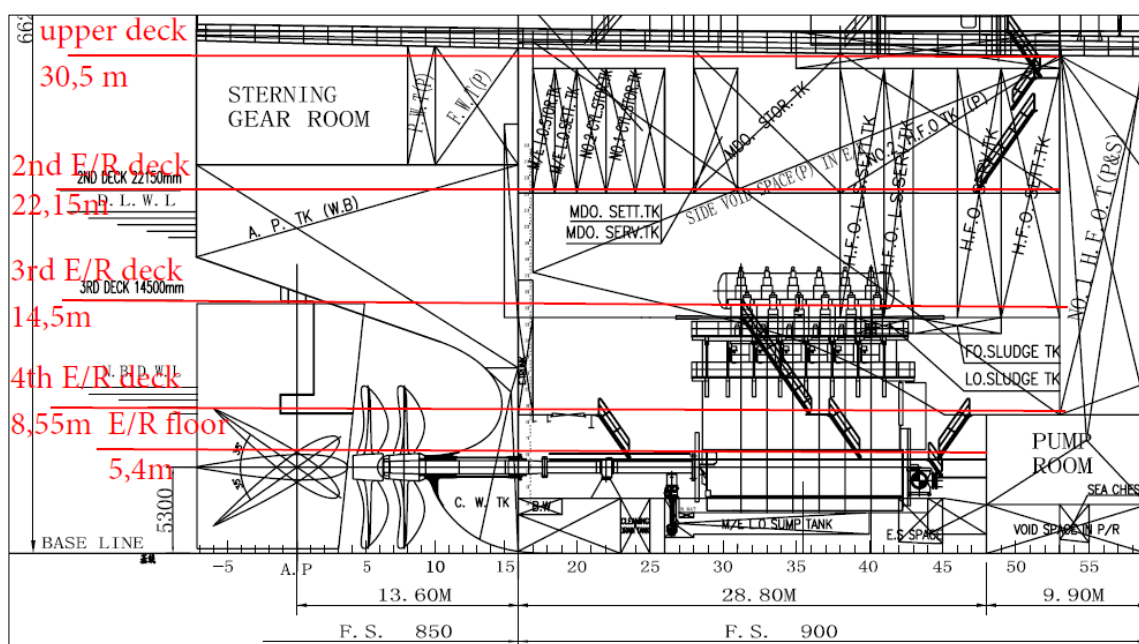
Ο ακριβής υπολογισμός του μήκους της καλωδίωσης απαιτεί σχέδια γενικής διάταξης του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού καθώς και σχέδια της διαδρομής της καλωδίωσης. Αν και τέτοια σχέδια παρέχονται από το ναυπηγείο προς τον νηογνώμονα και προς τον ιδιοκτήτη, εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι τα μήκη των καλωδίων δεν καταγράφονται σε κάποιο έγγραφο.

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής, κρίθηκε σκόπιμο να **μην** πραγματοποιηθεί μια ενδελεχής μελέτη παρά μόνο μια εκτίμηση, καθώς:

- Η ακρίβεια των υπολογισμών θα είχε νόημα σε μια άλλου τύπου μελέτη, για παράδειγμα σε μια μελέτη εγκατάστασης ή σε μια μελέτη κόστους.
- Για τον υπολογισμό της αποσβεστικής συμπεριφοράς τους (βλέπε ενότητα **4.6.1**), σε συνθήκες βραχυκυκλώματος, δεν απαιτείται υψηλή ακρίβεια, για το έτσι κι αλλιώς μικρό μήκος της καλωδίωσης του πλοίου, σε σχέση με τις γραμμές μεταφοράς ενός ηπειρωτικού ΣΗΕ.
- Η περίπτωση βραχυκυκλώματος που μελετάται (τριφασικό συμμετρικό) και βάσει της οποίας επιλέγουμε τον προστατευτικό εξοπλισμό, δίνει τις μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων βραχυκύκλωσης, οπότε ούτως ή άλλως είμαστε από την ασφαλή πλευρά σε περίπτωση υποεκτίμησης της.
- Για τον υπολογισμό της πτώσεως τάσης κατά μήκος της γραμμής και για την επαλήθευση ότι είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων, συνήθως μελετάται μόνο η περίπτωση πολύ απομακρυσμένων καταναλωτών, όπως τα βαρούλκα των αγκυρών ή καταναλωτών στο bosun store, καθώς οι καταναλωτές εντός του μηχανοστασίου είναι σε κοντινή απόσταση από τον κύριο πίνακα.

5.2.1.1 Εκτίμηση μήκους καλωδίων

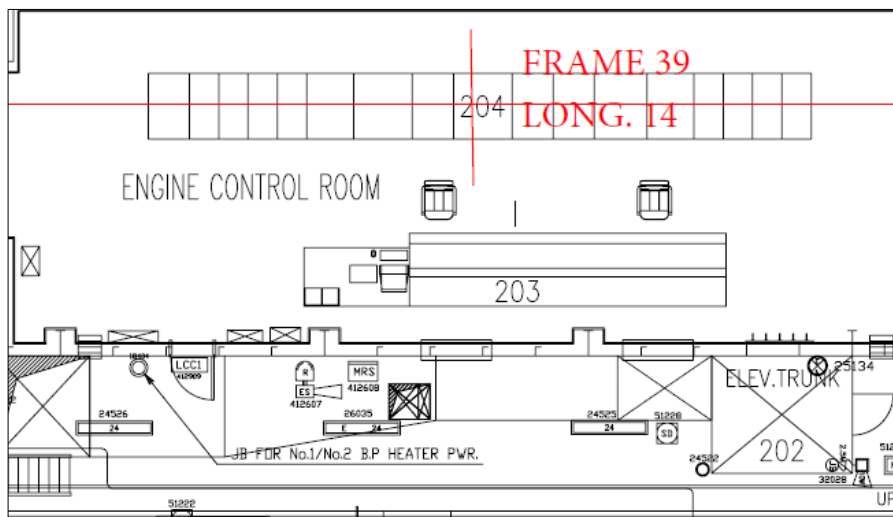
Από τα κατασκευαστικά σχέδια γενικής διάταξης του μηχανοστασίου έχουμε:



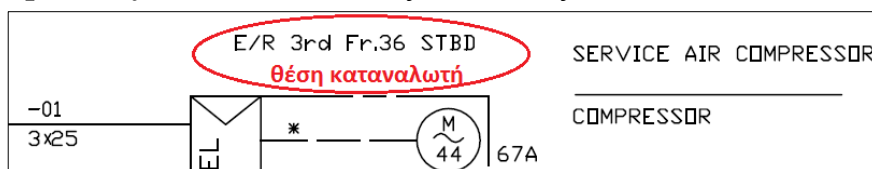
Deck	meters (from baseline)
Floor	5.4
4 th E/R deck	8.55
3 rd E/R deck	14.5
2 nd E/R deck	22.15
Upper deck	30.5

Compartment frame spacing (f.s.)	meters
E/R f.s. (F16 to F59)	0.9
S/G RM f.s. (-F5 to F16)	0.85
E/R longitudinal spacing (-L15 to +L15)	0.86
Bosun 261meters ahead of F59	

Ο κύριος πίνακας βρίσκεται στο ECR στο 2nd E/R deck, θα τον θεωρήσουμε ως σημείο με συντεταγμένες (x,y,z) σε m από AP, CL και BL. Προκύπτει το σημείο: (34.3,12.04,22.15).

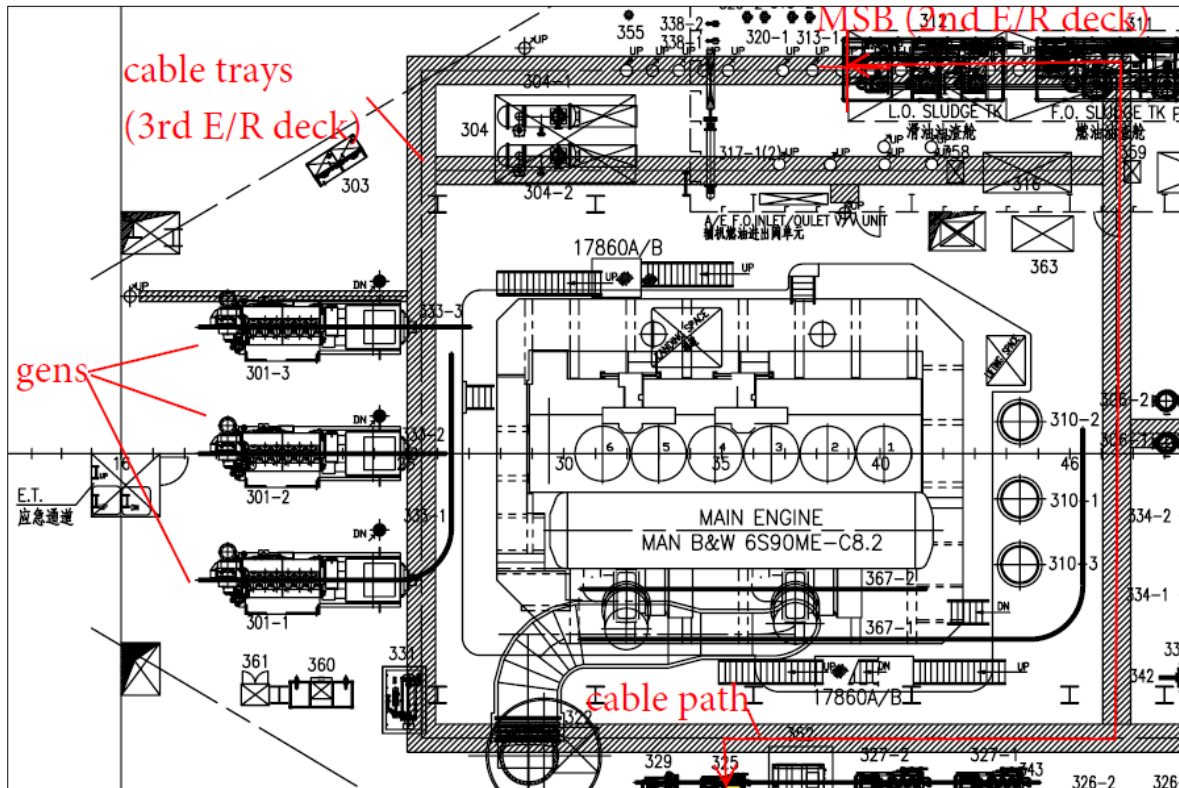


Η θέση των διάφορων ηλεκτρικών καταναλωτών μπορεί να βρεθεί από το έγγραφο “**Wiring diagram of power system**” και δίνεται ως ακολούθως:



Το μήκος των καλωδίων θα το υπολογίσουμε λαμβάνοντας υπόψιν τη διαδρομή των καλωδίων πάνω στις σχάρες, κάνοντας τις εξής απλοποιητικές παραδοχές:

- τα τέσσερα καταστρώματα του μηχανοστασίου έχουν σχέδιο διάταξης των σχαρών όπως το 3^ο κατάστρωμα (βλέπε επόμενη σελίδα).
- όλοι οι καταναλωτές με σήμανση “STBD”, “PORT”, “CENTRE” είναι τοποθετημένοι κατά μήκος των διαμηκών ενισχυτικών -L14,+L14 και CL αντίστοιχα.
- ακολουθείται η μικρότερη σε μήκος διαδρομή (ωρολογιακή ή αντιωρολογιακή φορά).
- δε λαμβάνονται υπόψιν ακτίνες καμπυλότητας και τα μήκη που υπολογίζονται στρογγυλοποιούνται.



Παράδειγμα υπολογισμού μήκους καλωδίωσης για τον service air compressor (325):

-σύμφωνα με το wiring diagram βρίσκεται στη θέση (FRAME 36, STBD, 3rd E/R DECK)

-η πιο σύντομη διαδρομή είναι αυτή που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, το εκ δεξιών ακραίο ίχνος της σχάρας βρίσκεται στο FRAME 48

-ο κύριος πίνακας βρίσκεται στο σημείο (FRAME 39, L14, 2nd E/R DECK)

$$L = X + Y + Z$$

$$X = (FR. 48 - FR. 36) \cdot F.S. + (FR. 48 - FR. 39) \cdot F.S. = 12 \cdot 0.9 + 9 \cdot 0.9 = 18.9 \text{ m}$$

$$Y = (L. 14 + L. 14) \cdot L.S. = 28 \cdot 0.86 = 24.08 \text{ m}$$

$$Z = 2^{\text{ND}} \text{ E/R DECK} - 3^{\text{RD}} \text{ E/R DECK} = 22.15 - 15.5 = 7.65 \text{ m}$$

$$L = X + Y + Z = 18.9 + 24.08 + 7.65 = 50.63 \approx 50 \text{ m}$$

Το υπολογισθέν μήκος στη περίπτωση αυτή, είναι πολύ κοντά σε σχέση με αυτό που προκύπτει από λεπτομερέστερη μέτρηση βάσει σχεδίων (47.60m). Για την πλειοψηφία των καταναλωτών θα προτιμηθεί αυτός ο τρόπος μέτρησης, ο οποίος είναι εύκολο να εφαρμοστεί μέσω λογικών συναρτήσεων σε ένα λογιστικό φύλλο. Για τους απομακρυσμένους καταναλωτές θα προτιμηθεί η μέτρηση των αποστάσεων βάσει σχεδίων.

Οι διατομές των καλωδίων που έχουν επιλεγεί, τα μήκη τους, η φόρτισή τους και η πτώση τάσεως κατά μήκος τους δίνονται στον πίνακα της επόμενης σελίδας.

5.2.2 Επιλογή καλωδίων

CABLE AMPACITY STUDY (1/3)		All cables:copper,XLPE, TECK90, ambient temp.:45, derating factor:0,85									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Connected load											
Consumer		Rated Amps	Quantity	Num Phase	Cable Size (mm2)	Ampacity per cable (A)	Total Ampacity (A)	Total Ampacity Derated (A)	Cable Rated Load (%)	Cable Length (m)	VD (%)
GENERATOR1		2085	10	3	120	224	2240	1904	8= (1/7)*100%	40	0,57
GENERATOR2		2085	10	3	120	224	2240	1904	109,5%	35	0,57
GENERATOR3		2085	10	3	120	224	2240	1904	109,5%	30	0,56
AIR.COND.PLANT.2		172,6	1	3	95	192	192	163,2	105,8%	75	1,15
2.AIR COND. COMPRESSOR		143,4									
2.AIR COND. PLANT FAN		29,2									
AIR.COND.PLANT.1		172,6	1	3	95	192	192	163,2	105,8%	45	0,68
1.AIR COND. COMPRESSOR		143,4									
1.AIR COND. PLANT FAN		29,2									
ECR PACK. AIR COND.		22,9	1	3	10	47	47	39,95	57,3%	2	0,03
(MEAT.FISH.VEG.RM.FRZNGFN		0,7	1	3	2,5	20	20	17	4,1%	10	0,02
REF.PROV. COMPRESSOR		12,9	1	3	16	63	63	53,55	24,1%	5	0,02
(BCC)1-NAV.&RADIO		12,7	1	3	10	47	47	39,95	31,8%	40	0,74
(BCC)2-BRIDGE CONTROL CONSOLE		7,9	1	3	10	47	47	39,95	19,8%	40	0,46
BOILER PLANT 1		288,2	3	3	70	157	471	400,35	72,0%	25	0,27
1.AUX.BOILER FEED W.PUMP		85,8									
1.AUX.BOILER.FDWP.HTR.BR		40,6									
1.BOILER COMBUST.AIR FAN		161,8									
BOILER PLANT 2		288,2	2	3	95	192	384	326,4	88,3%	20	0,25
2.AUX.BOILER FEED W. PUMP		85,8									
2.AUX.BOILER.FDWP.HTR.BRN		40,6									
2.BOILER COMBUST.AIR FAN		161,8									
(CCC)1-CARGO CONTROL CONSOLE		13,1	1	3	10	47	47	39,95	32,8%	35	0,67
COMP.BOILER 1		49,8	1	3	25	84	84	71,4	69,7%	30	0,4
1.COMP.BOIL.BRN.PMP&PRHT		34,7									
1.COMP.BOILER.FEED W.PMP		10									
1.COMP.BOILER FO PUMP		5,1									
COMP.BOILER 2		15,1	1	3	4	27	27	22,95	65,8%	40	0,88
2.COMP.BOILER.FEED W.PUMP		10									
2.COMP.BOILER FO PUMP		5,1									
1&2.DECK MACH.FWD.HYD.FWD		203,2	3	3	70	157	471	400,35	50,8%	285	3,13
1.DECK MACH.HYD.PACK.AFT		203,2	3	3	70	157	471	400,35	50,8%	30	0,23
2.DECK MACH.HYD.PACK.AFT		203,2	2	3	70	157	314	266,9	76,1%	30	0,35
3&4.DECK MACH.FWD.HYD.FWD		203,2	3	3	70	157	471	400,35	50,8%	285	2,26
3.DECK MACH.HYD.PACK.AFT		203,2	2	3	70	157	314	266,9	76,1%	30	0,35
DECK MACH. SERVO PUMP		11,5	1	3	2,5	20	20	17	67,6%	75	2,26
ELEVATOR		9,5	1	3	10	47	47	39,95	23,8%	10	0,06
(ECC)1-ENGINE CONTROL CONSOLE		19,7	1	3	10	47	47	39,95	49,3%	2	0,06
GE FO SUPPLY 1		5	1	3	2,5	20	20	17	29,4%	15	0,17
GE FO CIRC. PUMP		2,4									
GE FO SUPPLY PUMP		2,6									
GE FO SUPPLY 2		5	1	3	2,5	20	20	17	29,4%	15	0,17
2.GE FO SUPPLY PUMP		2,6									
2.GE FO CIRC. PUMP		2,4									
ME FO SUPPLY 1		19,9	1	3	4	27	27	22,95	86,7%	10	0,3
1.ME FO CIRCULATING PUMP		11,3									
1.ME FO SUPPLY PUMP		8,6									
ME FO SUPPLY 2		19,9	1	3	4	27	27	22,95	86,7%	10	0,3
2.ME FO CIRCULATING PUMP		11,3									
2.ME FO SUPPLY PUMP		8,6									
(L)1-ACCOM.OUTSIDE LIGHT		7,9	1	3	2,5	20	20	17	46,5%	20	0,93
(L)2-ELEVATOR LIGHT		0,2	1	3	1,5	14	14	11,9	1,7%	10	0,02
(L)3-E/R LIGHT		62,7	1	3	25	84	84	71,4	87,8%	15	0,54
(L)4-ACCOMM.LIGHT		31,5	1	3	10	47	47	39,95	78,8%	20	0,74

CABLE AMPACITY STUDY (2/3)		All cables:copper,XLPE, TECK90, ambient temp.:45, derating factor:0.85									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Connected load									8= (1/7)*100%		
Consumer	Rated Amps	Quantity	Num Phase	Cable Size (mm2)	Ampacity per cable (A)	Total Ampacity (A)	Total Ampacity Derated (A)	Cable Rated Load (%)	Cable Length (m)	VD (%)	
(L)5-NAVIGATION LIGHT	1,7	1	3	2,5	20	20	17	10,0%	40	0,14	
(L)6-ON DECK FLOOD LIGHT	73,2	1	3	25	84	84	71,4	102,5%	25	0,85	
(L)7-PUMP ROOM LIGHT	5,3	1	3	2,5	20	20	17	31,2%	20	0,63	
(L)8-SIGNAL LIGHT	1,7	1	3	2,5	20	20	17	10,0%	300	3,02	
LGSP1 (ACCOM.FANS&AIR.COND.)	80,1	1	3	50	126	126	107,1	74,8%	30	0,37	
LGSP2 (NO1 EXH PUMP RM)	56,45	1	3	25	84	84	71,4	79,1%	30	0,46	
LGSP2 (NO2 EXH PUMP RM)	56,45	1	3	25	84	84	71,4	79,1%	55	0,84	
LGSP3 (WRKSP AC_VENT)	23,8	1	3	16	63	63	53,55	44,4%	30	0,3	
LGSP4(D.W.SEAL&COPT W.PUMP)	33,87	1	3	16	63	63	53,55	63,2%	45	0,64	
2.LGSP4(D.W.SEAL&COPT W.PUMP)	33,87	1	3	16	63	63	53,55	63,2%	45	0,64	
LPD-1 PANEL(GALLEY AC 220V)	85,68	1	3	50	126	126	107,1	80,0%	55	1,47	
LPD-2 PANEL(E/R AC 220V)	10,5	1	3	10	47	47	39,95	26,3%	40	0,61	
1.MAIN VAC.COND.CSW PUMP	104,7	2	3	25	84	168	142,8	73,3%	50	0,74	
2.IGS BLOWER	251,9	2	3	70	157	314	266,9	94,4%	55	0,83	
2.MAIN VAC.COND.CSW PUMP	104,7	2	3	25	84	168	142,8	73,3%	50	0,74	
2.STERN TUBE LO PUMP	1,5	1	3	1,5	14	14	11,9	12,6%	55	0,29	
3.MAIN VAC.COND.CSW PUMP	107,1	2	3	25	84	168	142,8	75,0%	50	0,74	
4.MAIN VAC.COND.CSW PUMP	107,1	2	3	25	84	168	142,8	75,0%	50	0,74	
1.ATMOS.COND.CSW PUMP	19,8	1	3	4	27	27	22,95	86,3%	35	1,04	
1.BALLAST PUMP	734,5	4	3	120	224	896	761,6	96,4%	25	0,33	
2.ATMOS.COND.CSW PUMP	19,1	1	3	4	27	27	22,95	83,2%	35	1,04	
FW GENERATOR PUMP	37,2	1	3	16	63	63	53,55	69,5%	25	0,31	
1.IGS BLOWER	247,6	2	3	70	157	314	266,9	92,8%	45	0,68	
IGS SCRUBBER CSW PUMP	121,8	2	3	25	84	168	142,8	85,3%	20	0,33	
MGPS	0,3	1	3	2,5	20	20	17	1,8%	10	0,01	
STERN TUBE LO PUMP	1,5	1	3	1,5	14	14	11,9	12,6%	55	0,29	
2.BILGE FIRE&G/S PUMP	278,5	2	3	95	192	384	326,4	85,3%	25	0,36	
DECK FOAM LIQUID PUMP	18,5	1	3	6	34	34	28,9	64,0%	50	0,62	
MGO TRANSFER PUMP	10,3	1	3	2,5	20	20	17	60,6%	40	0,22	
SERVICE AIR COMPRESSOR	74,2	1	3	25	84	84	71,4	103,9%	50	0,22	
TOPPING AIR COMPRESSOR	71,9	1	3	35	101	101	85,85	83,8%	50	0,25	
BILGE FIRE & G/S PUMP	278,4	2	3	95	192	384	326,4	85,3%	25	0,11	
FW HYDRO PUMP	7,2	1	3	2,5	20	20	17	42,4%	10	0,05	
MDO TRANSFER PUMP	10,3	1	3	2,5	20	20	17	60,6%	25	0,14	
SLUDGE PUMP	4,2	1	3	1,5	14	14	11,9	35,3%	40	0,14	
2.BALLAST PUMP	734,5	4	3	120	224	896	761,6	96,4%	25	0,33	
VACUUM COLLECTION SYSTEM	12,5	1	3	2,5	20	20	17	73,5%	10	0,1	
FIRE DETECTING SYSTEM	1	1	3	10	47	47	39,95	2,5%	30	0,02	
1.LT COOLING FW PUMP	121,8	2	3	25	84	168	142,8	85,3%	45	0,58	
2.STEERING GEAR	262	2	3	95	192	384	326,4	80,3%	45	0,15	
3.LT COOLING FW PUMP	121,8	2	3	25	84	168	142,8	85,3%	40	0,51	
1.MAIN LO PUMP	214,1	2	3	70	157	314	266,9	80,2%	55	0,45	
1.ME AUX BLOWER	203,2	2	3	70	157	314	266,9	76,1%	50	0,44	
ME JACKET COOL.FW PUMP	55,3	1	3	25	84	84	71,4	77,5%	30	0,33	
1.ME START UP PUMP	43,2	1	3	16	63	63	53,55	80,7%	20	0,29	
2.CONTROL AIR COMPRESSOR	57,4	1	3	35	101	101	85,85	66,9%	20	0,05	
2.HFO TRANSFER PUMP	35	1	3	10	47	47	39,95	87,6%	15	0,09	
1.STEERING GEAR	262	2	3	95	192	384	326,4	80,3%	10	0,04	
2.MAIN AIR COMPRESSOR	143,6	2	3	35	101	202	171,7	83,6%	50	0,25	
1.HFO TRANSFER PUMP	35,1	1	3	10	47	47	39,95	87,9%	25	0,14	
LOCAL FIRE FIGHT.W.PUMP	22,9	1	3	4	27	27	22,95	99,8%	10	0,11	
1.MAIN AIR COMPRESSOR	141,1	2	3	35	101	202	171,7	82,2%	45	0,23	
ME JACKET W. PRHT.PUMP	10,2	1	3	1,5	14	14	11,9	85,7%	15	0,17	
2.LT COOLING FW PUMP	121,8	2	3	25	84	168	142,8	85,3%	45	0,58	

CABLE AMPACITY STUDY (3/3)		All cables:copper,XLPE, TECK90, ambient temp.:45, derating factor:0,85									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Connected load								8= (1/7)*100%			
Consumer	Rated Amps	Quantity	Num Phase	Cable Size (mm2)	Ampacity per cable (A)	Total Ampacity (A)	Total Ampacity Derated (A)	Cable Rated Load (%)	Cable Length (m)	VD (%)	
2.MAIN LO PUMP	214,1	2	3	70	157	314	266,9	80,2%	55	0,45	
2.ME AUX BLOWER	203,2	2	3	70	157	314	266,9	76,1%	50	0,44	
2.ME JACKET COOL.FW PUMP	55,9	1	3	25	84	84	71,4	78,3%	15	0,17	
2.ME START UP PUMP	43,2	1	3	16	63	63	53,55	80,7%	15	0,22	
PD1 (GALLEY&LAUNDRY)	289,9	2	3	95	192	384	326,4	88,8%	20	0,24	
PD2 (SEW.T.P.&AE_JW.PRE.PMP)	175,46	2	3	35	101	202	171,7	102,2%	10	0,17	
PD-3(PURIFIERS)	56,83	1	3	50	126	126	107,1	53,1%	10	0,09	
2_PD-3(PURIFIERS)	56,83	1	3	50	126	126	107,1	53,1%	10	0,09	
PD4 (COP VACUUM& LO PUMPS)	75,07	1	3	50	126	126	107,1	70,1%	35	0,4	
PD5 (BOSUN)	46,5	1	3	35	101	101	85,85	54,2%	270	0,73	
PD6 (AE LO PR.PUMPS)	6,87	1	3	2,5	20	20	17	40,4%	10	0,18	
PD7 (HOSES& PROV.CRANES LBOAT)	294,47	2	3	95	192	384	326,4	90,2%	35	0,44	
PD8 (BILGE SEP.PUMP&BWTS.FWCP)	45,8	1	3	50	126	126	107,1	42,8%	20	0,12	
ACCOM.RECEPTACLE	28,7	1	3	10	47	47	39,95	71,8%	35	0,73	
E/R RECEPTACLE	5,7	1	3	10	47	47	39,95	14,3%	20	0,09	
2.ER VENT.FAN	91,5	2	3	16	63	126	107,1	85,4%	45	0,56	
3.ER VENT.FAN	91,5	2	3	16	63	126	107,1	85,4%	40	0,49	
4.ER VENT.FAN	91,5	2	3	16	63	126	107,1	85,4%	60	0,75	
1.ER VENT.FAN	91,5	2	3	16	63	126	107,1	85,4%	50	0,62	
PURIFIER ROOM EXH. FAN	19,8	1	3	4	27	27	22,95	86,3%	40	0,83	
GRINDERMACHINE	1,4	1	3	2,5	20	20	17	8,2%	10	0,01	
ELECTRIC ARC WELDER	9,2	1	3	10	47	47	39,95	23,0%	10	0,05	
EMERGENCY FIRE PUMP	243,2	2	3	95	192	384	326,4	74,5%	310		
EMCY AIR COMPRESSOR	15,3	1	3	2,5	20	20	17	90%	30		
E/R HIGH FOAM PUMP	9,5	1	3	2,5	20	20	17	55,9%	50		
2.FW HYDRO PUMP	7,24	1	3	4	27	27	22,95	31,5%			
LIFEBOAT DAVIT WINCH	14,7	1	3	4	27	27	22,95	64,1%	20		
EMCY GEN. ROOM FAN	1,54	1	3	1,5	14	14	11,9	12,9%			
S/G & EMCY ROOM FAN	13,3	1	3	2,5	20	20	17	78,2%			
LOCAL FIRE FIGHT.W.PUMP	22,8	1	3	4	27	27	22,95	99,3%			
CBL-TRANSF1-EMCY_primary	52,5	1	3	16	63	63	53,55	98,1%			
CBL-TRANSF2-EMCY_primary	52,5	1	3	16	63	63	53,55	98,1%			
CBL-MSWBD-EMCY	708	5	3	95	192	960	816	86,8%	10	-0	
CBL-TRANSF1_primary	177,1	1	3	120	224	224	190,4	93,0%	5	0,03	
CBL-TRANSF2_primary	177,1	1	3	120	224	224	190,4	93,0%	5	0,03	
CBL-TRANSF1_sec	346,4	2	3	120	224	448	380,8	91,0%	5	-0,1	
CBL-TRANSF2_sec	346,4	2	3	120	224	448	380,8	91,0%	5	-0,1	

5.2.2.1 Παρατηρήσεις:

- Για την ικανότητα φόρτισης των καλωδίων, έχει ληφθεί υπόψιν συντελεστής 0,85, για όλα τα καλώδια. Δε μπορούμε να γνωρίζουμε την ομαδοποίηση καθώς και άλλους παράγοντες που επιδρούν αρνητικά στη μόνωση τους σε αυτό το στάδιο της μελέτης.
- Για τις επιλεγείσες διατομές και με βάση τις απλοποιητικές παραδοχές που έχουμε υποθέσει για το μήκος τη καλωδίωσης, βλέπουμε πως η πτώση τάσης κατά μήκος των καλωδίων είναι εντός ορίων.
- Επιπλέον για τα καλώδια ισχύος των γεννητριών, πρέπει η πτώση τάσης να είναι μικρότερη του 1%.
- Οι διατομές των ουσιαστών καταναλωτών (πχ μηχανισμός πηδαλίου, αντλία λίπανσης κ.μ.) πιθανώς να χρειαστούν επανεκτίμηση.

5.3 Προσομοίωση δικτύου

5.3.1 Εισαγωγή δεδομένων

Γεννήτριες:

GENERATOR PARTICULARS			
BRUSHLESS AC GENERATOR			
3 SETS			
GENERATOR		EXCITER	
OUTPUT [kVA]	1625,00		17,10
VOLTAGE [V]	450,00		125,00
CURRENT [A]	2085,00		78,60
3Φ			
FREQ. [Hz]	60,00		90,00
Poles	8		12
SPEED [RPM]	900		
P.F.	0,80		0,95
REACTANCE [%] & TIME CONSTANTS [SEC]			
Xd	124,00	T'do	1,869
X'd	22,80	T'd	0,344
X''d	11,90	T''d	0,036
Ra	1,12	Ta	0,028
		Tdc	0,028

Μετασχηματιστές:

MAIN TRANSFORMERS, 2 SETS	
TYPE	Dry
Nominal kVA	135.0
Pri Conn.	Delta
Sec Conn.	Delta
Pri Voltage (V)	440
Sec Voltage (V)	225
Pri FLA (A)	177.1
Sec FLA (A)	346.4
% Rpos (Trasnf. Base)	1,67
% Xpos (Trasnf. Base)	3,05
No-Load Loss (%)	0.480 + j 0.000

Φορτία:

Τα δεδομένα εισαγωγής για τα φορτία λόγω του πλήθους τους δίνονται στο παράρτημα. Το πλήθος, η ισχύς και οι συντελεστές λειτουργίας και ετεροχρονισμού έχουν δοθεί ήδη στον πίνακα ηλεκτρικού ισολογισμού. Κάποια από αυτά έχουν ομαδοποιηθεί σε υποπίνακες διανομής για να συνθέσουν ισοδύναμα φορτία όπως διακρίνεται στο μονογραμμικό σχέδιο.

5.3.1.1 Καλώδια

Cable (3-core) Impedance at 60HZ		
Size	R Positive Sequence (Ohms/km)	X Positive Sequence (Ohms/km)
1.5	12,1000	0,1292
2.5	7,4100	0,1238
4	4,6100	0,1191
6	3,0800	0,1122
10	1,8300	0,1048
16	1,1500	0,0959
25	0,7270	0,0952
35	0,5240	0,0915
50	0,3870	0,0912
70	0,2680	0,0884
95	0,1930	0,0882
120	0,1530	0,0864

5.4 Μελέτη ροής φορτίου & Μελέτη Βραχυκυκλωμάτων

5.4.1 Απλοποιημένο δίκτυο

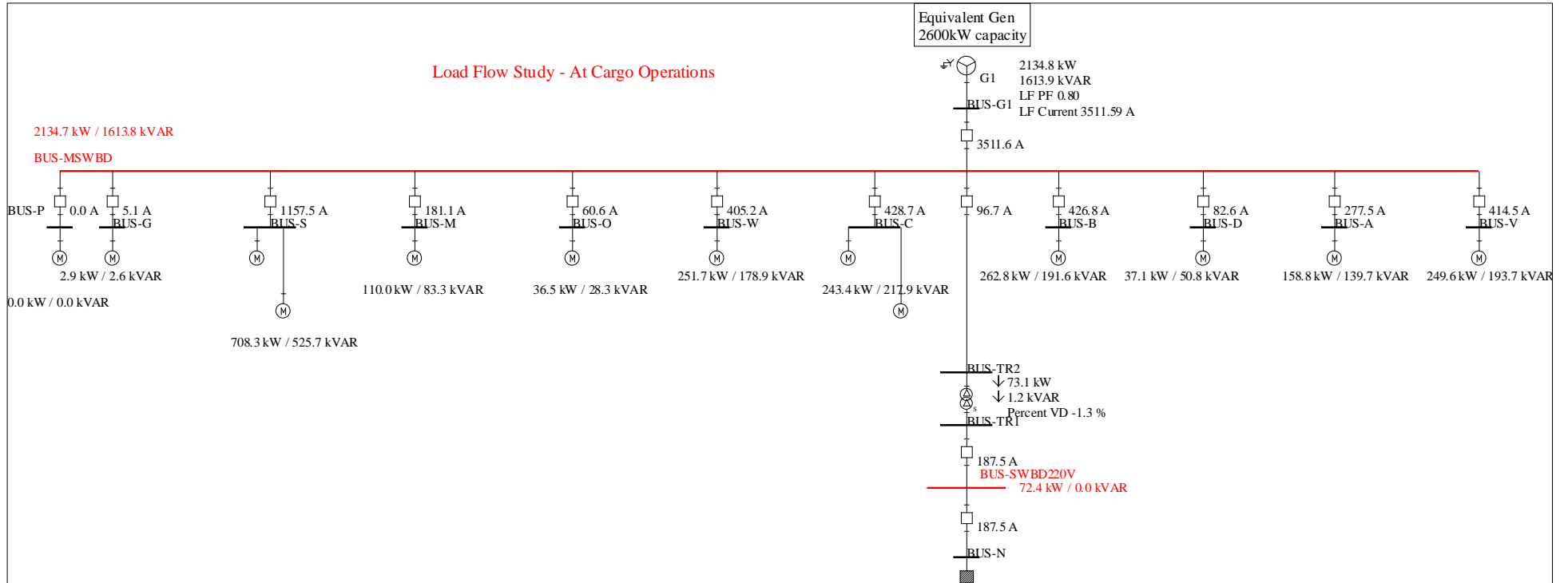
Για την κατάσταση χειρισμών έχουμε τα εξής ισοδύναμα φορτία:

Vessel 1	code	P [kW]	S [kVA]	PF	XS[%]	XR[%]	rS[%]	rR[%]	R/X	Rs/Rr
Systems					IEC 61363 data				skm model	
Propulsion Plant	(P)	0,00	0,00	0,000						
Generating Plant	(G)	2,91	3,92	0,744	9,4	9,4	4,3	2,7	0,3723	1,5926
Ship System	(S)	708,28	881,80	0,803	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Misc (other Aux machinery)	(M)	109,98	137,92	0,797	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Oil Handling Eqp	(O)	36,46	46,16	0,790	9,4	9,4	4,3	2,7	0,3723	1,5926
Water Handling Eqp.	(W)	251,67	308,75	0,815	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Cargo Handling Eqp.	(C)	243,44	326,84	0,745	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Boiler Plant	(B)	262,80	325,09	0,808	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Deck machinery	(D)	37,06	62,90	0,589	9,4	9,4	4,3	2,7	0,3723	1,5926
Air Condition Plant	(A)	158,84	211,51	0,751	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Ventilation	(V)	249,57	315,93	0,790	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Nav. Com. & Lights	(N)	72,40	72,40	1,000						
Total Load		2133,40								

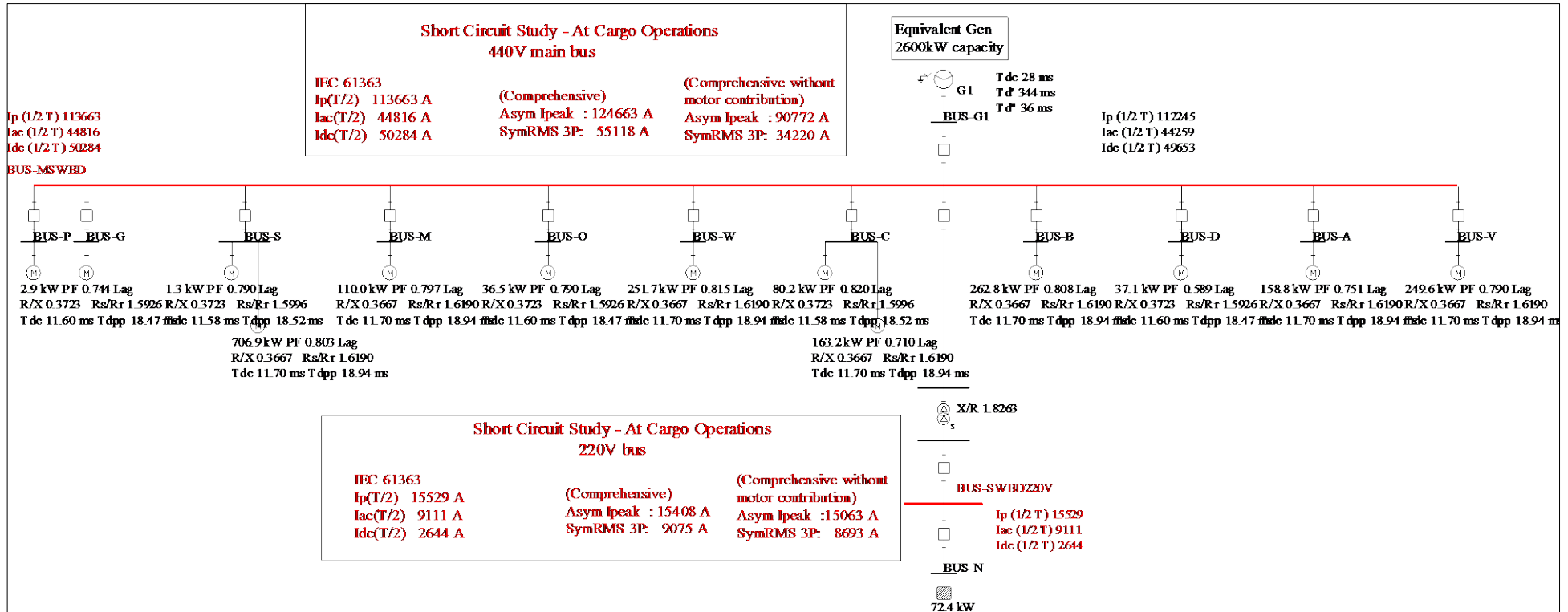
Αν θεωρήσουμε πως τα παραπάνω υποσυστήματα συνδέονται σε ξεχωριστούς υποζυγούς και σύμφωνα με την ενότητα 4.6.5.2 διαχωρίσουμε τους κινητήρες άνω των 100kW που συνδέονται στον ίδιο υποζυγό, έχουμε τον παρακάτω πίνακα που θα αποτελέσει τα δεδομένα εισόδου για το απλοποιημένο δίκτυο:

Vessel 1	code	P [kW]	S [kVA]	PF	XS[%]	XR[%]	rS[%]	rR[%]	R/X	Rs/Rr
Systems					IEC 61363 data				skm model	
Propulsion Plant	(P)	0,00	0,00	0,000						
Generating Plant	(G)	2,91	3,92	0,744	9,4	9,4	4,3	2,7	0,3723	1,5926
Ship System	(S)	1,34	1,03	0,795	9,4	9,4	4,3	2,7	0,3723	1,5926
Ballast pumps	(S)1	706,93	880,11	0,803	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Misc (other Aux machinery)	(M)	109,98	137,92	0,797	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Oil Handling Eqp	(O)	36,46	46,16	0,790	9,4	9,4	4,3	2,7	0,3723	1,5926
Water Handling Eqp.	(W)	251,67	308,75	0,815	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Cargo Handling Eqp.	(C)	80,24	97,74	0,821	9,4	9,4	4,3	2,7	0,3723	1,5926
IGS Blowers	(C)1	163,20	229,10	0,712	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Boiler Plant	(B)	262,80	325,09	0,808	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Deck machinery	(D)	37,06	62,90	0,589	9,4	9,4	4,3	2,7	0,3723	1,5926
Air Condition Plant	(A)	158,84	211,51	0,751	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Ventilation	(V)	249,57	315,93	0,790	7,5	7,5	3,4	2,1	0,3667	1,6190
Nav. Com. & Lights	(N)	72,40	72,40	1,000						
Total Load		2133,40								

Μελέτη ροής φορτίου

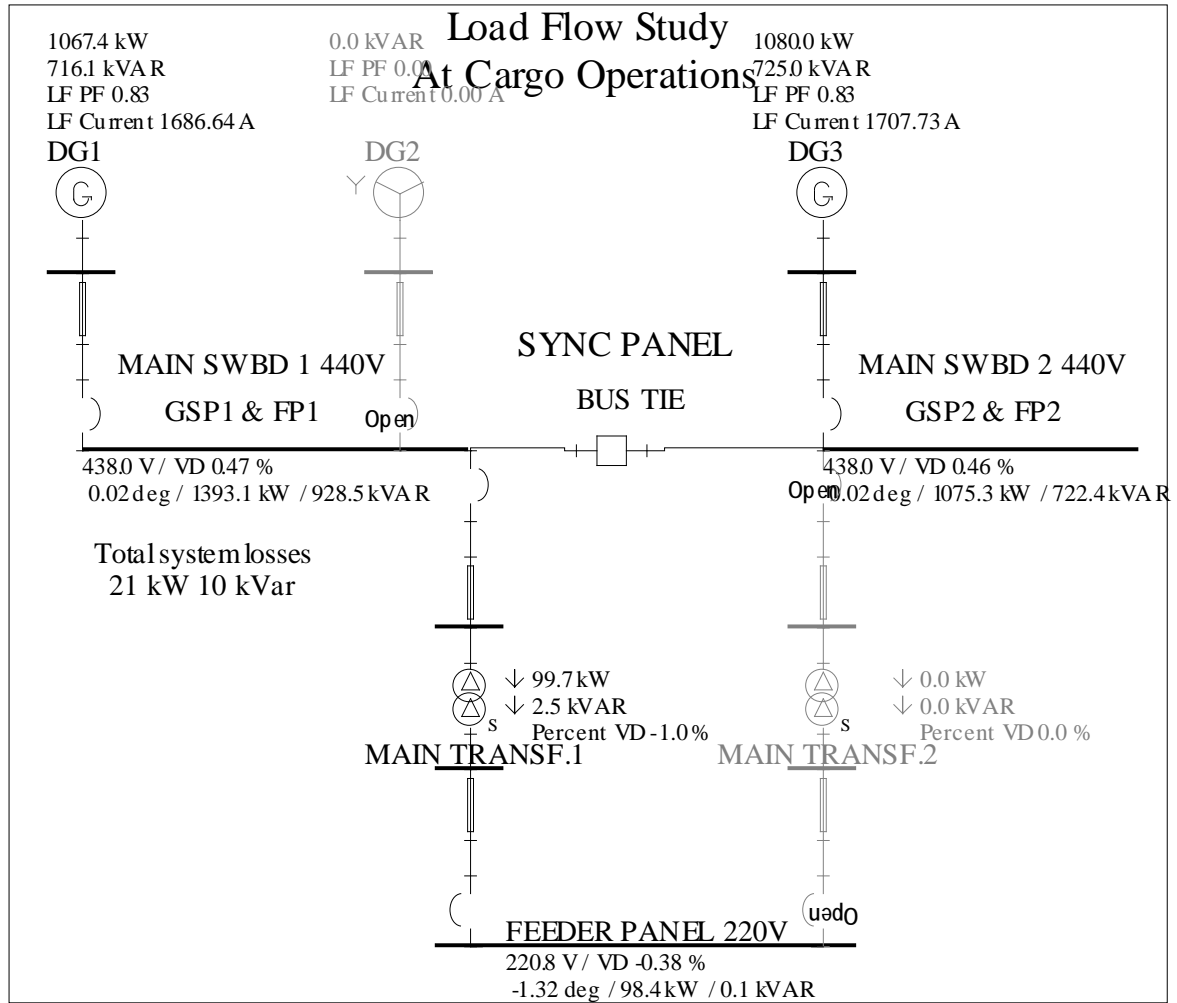


Μελέτη βραχυκυκλωμάτων

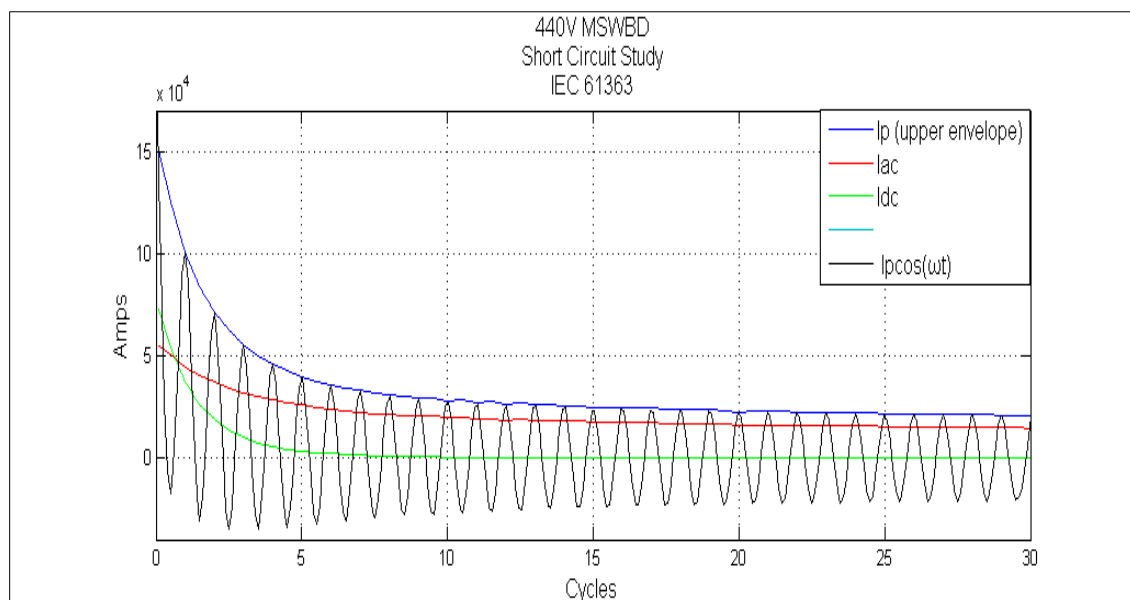
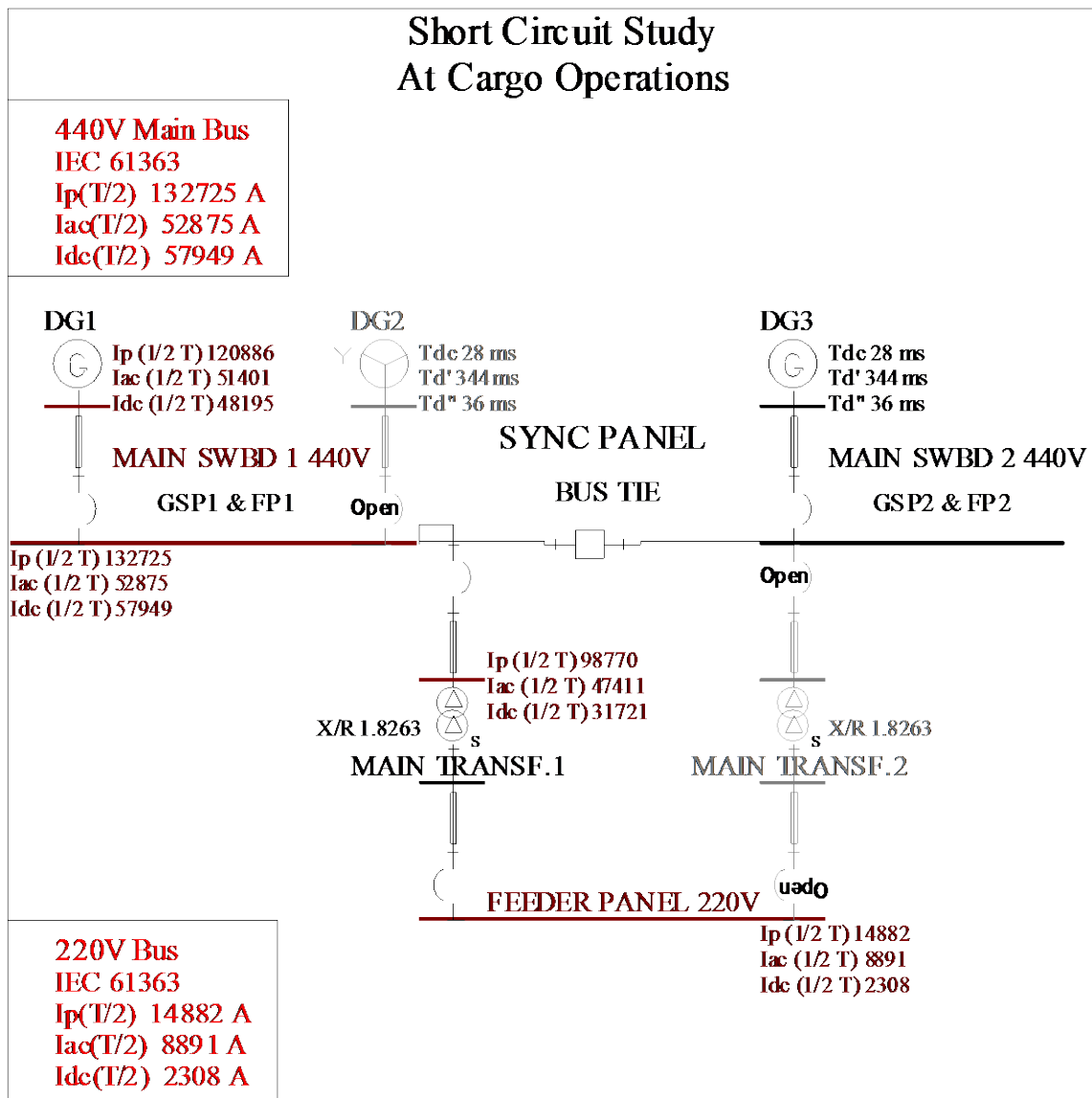


5.5 Πλήρες δίκτυο

Μελέτη ροής φορτίου



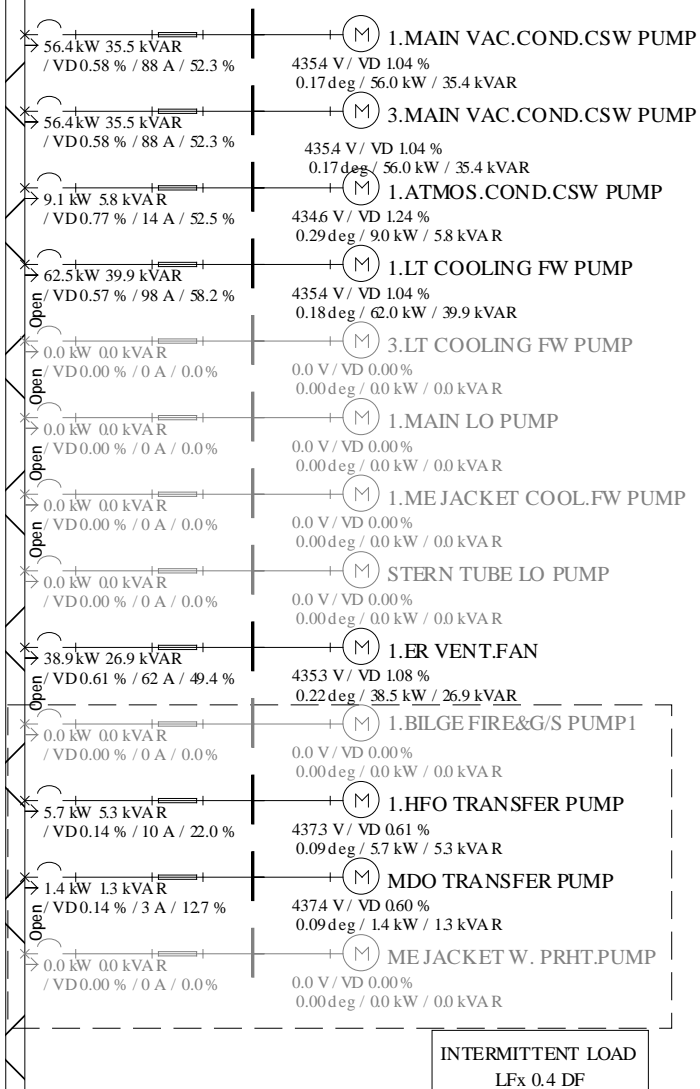
Μελέτη βραχυκυκλωμάτων



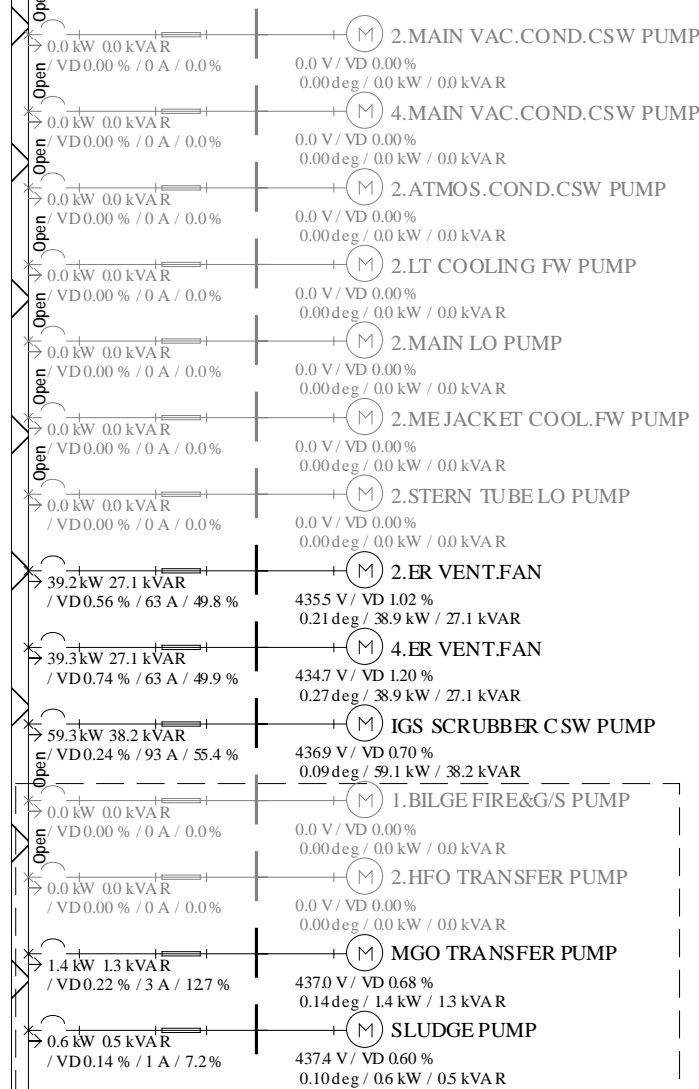
Σχ. 5.1 Κομματομορφή ρεύματος βραχυκύκλωσης στον κύριο ζυγό

Μελέτη ροής φορτίου (1/2)

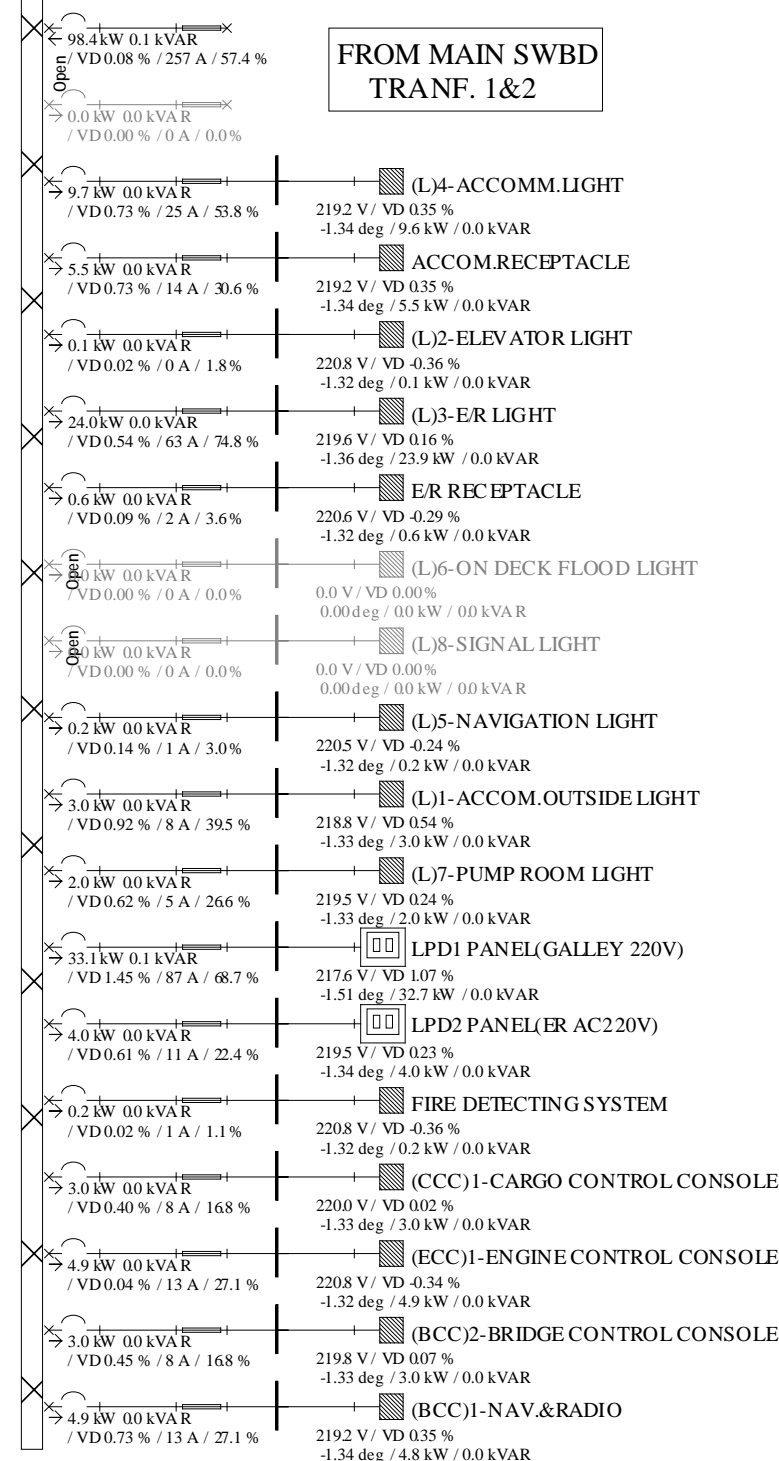
MAIN SWITCHBOARD 1
440 V
GROUP STARTER PANEL 1



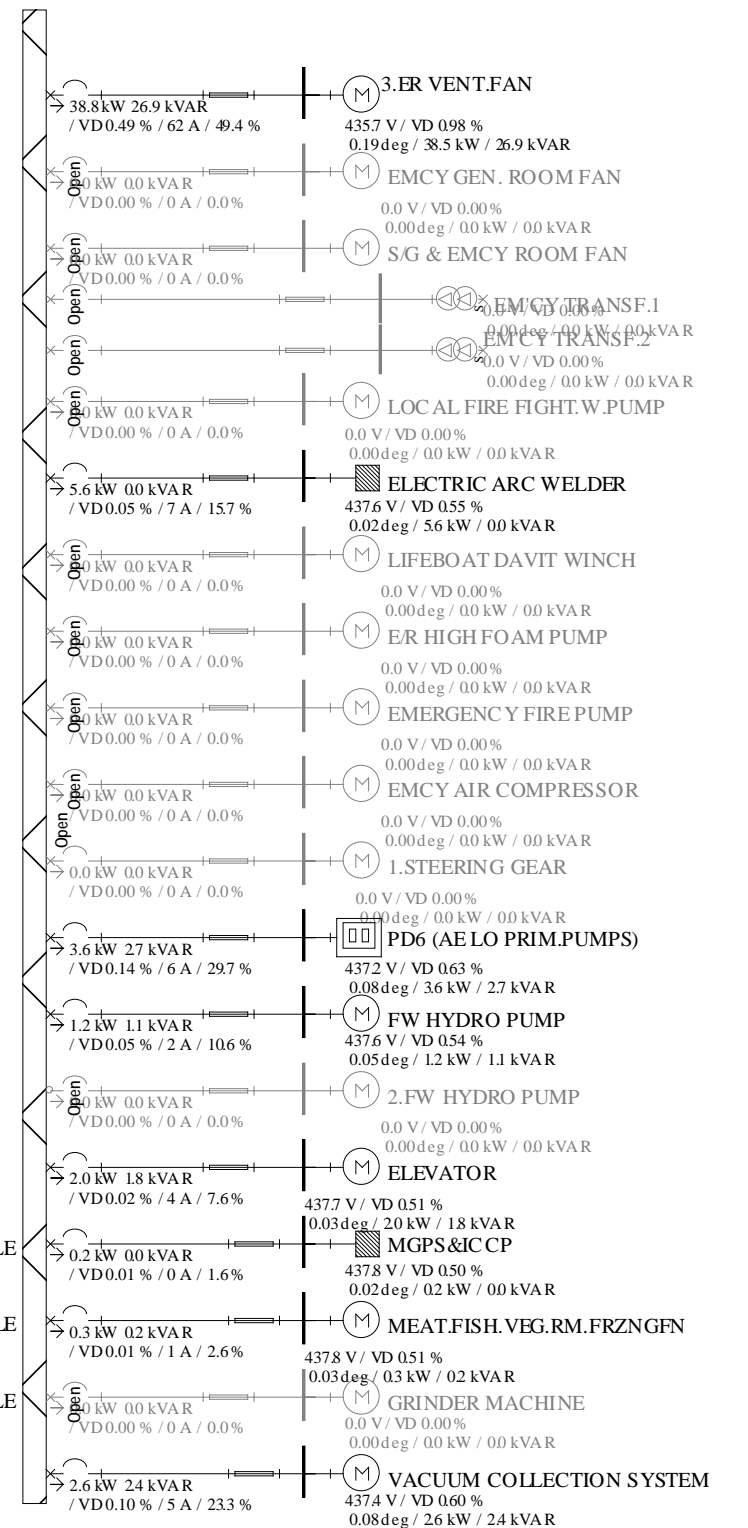
MAIN SWITCHBOARD 2
440 V
GROUP STARTER PANEL 2



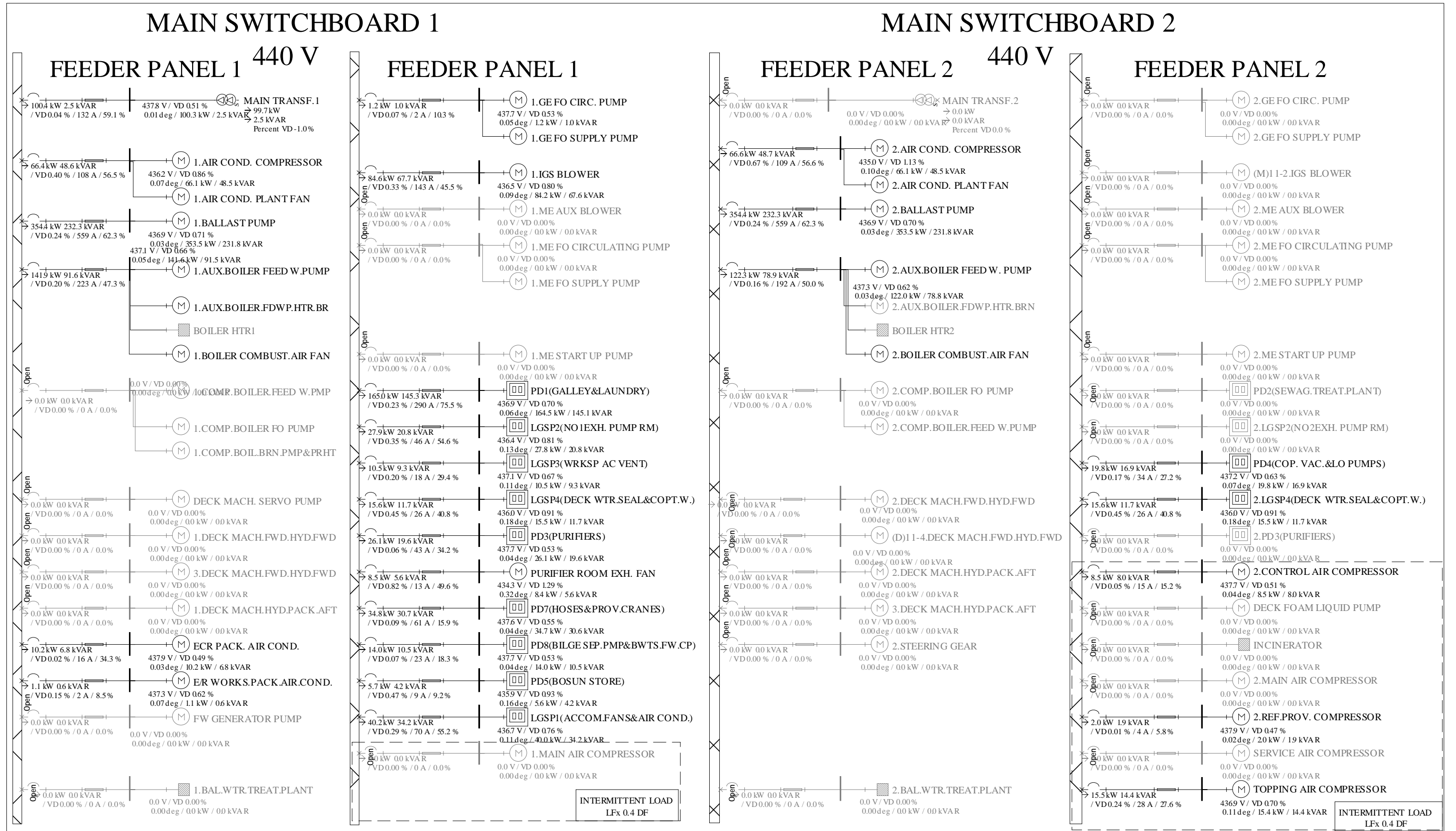
FEEDER 220V



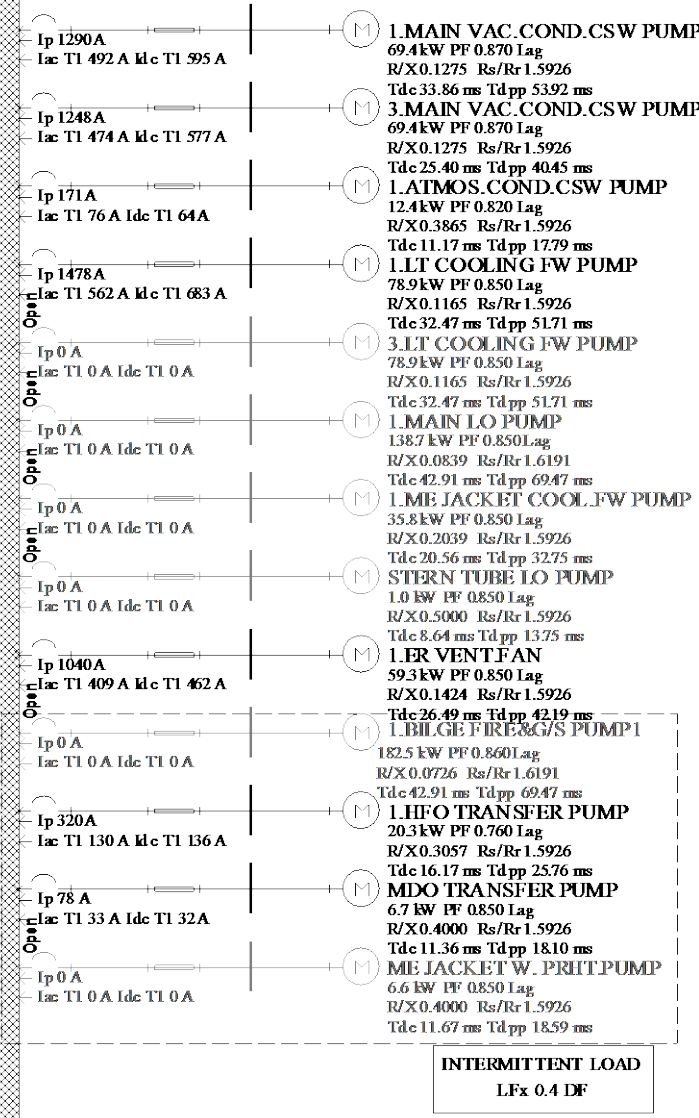
EMCY SWBD 440 V



Μελέτη ροής φορτίου (2/2)

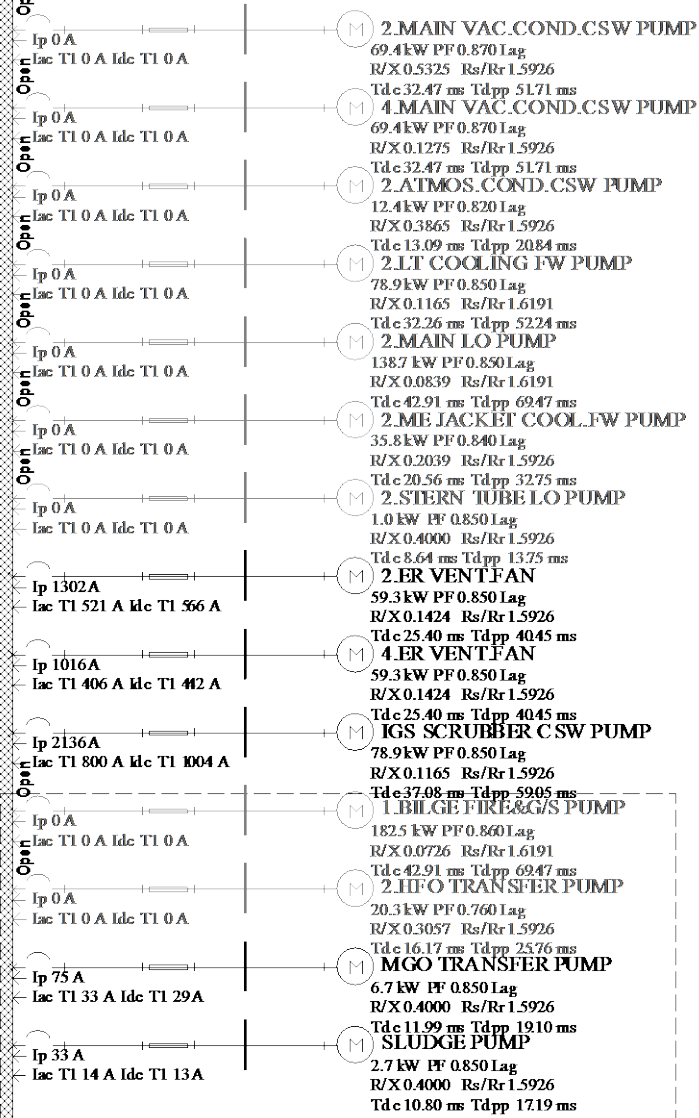


MAIN SWITCHBOARD 1
440 V
GROUP STARTER PANEL 1



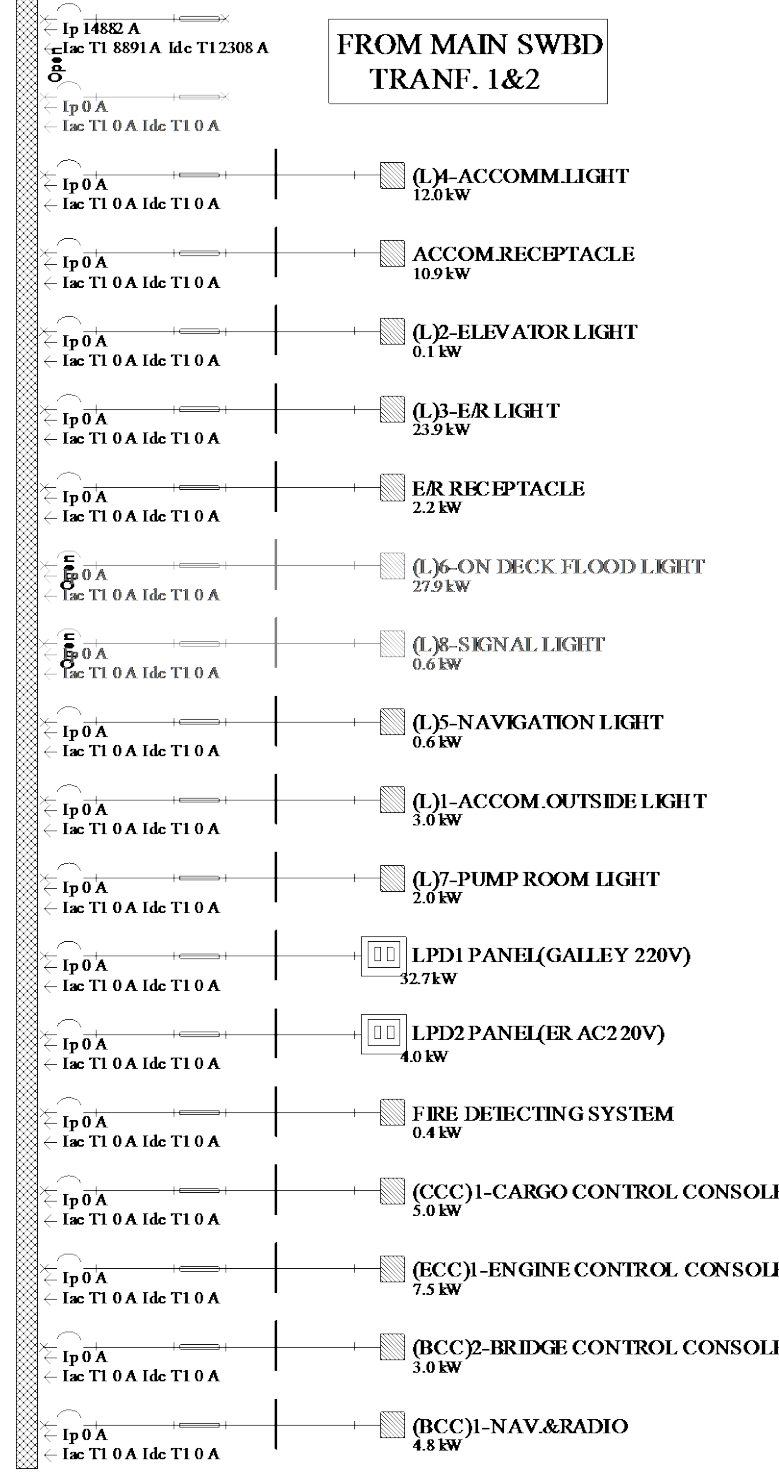
INTERMITTENT LOAD
LFx 0.4 DF

MAIN SWITCHBOARD 2
440 V
GROUP STARTER PANEL 2

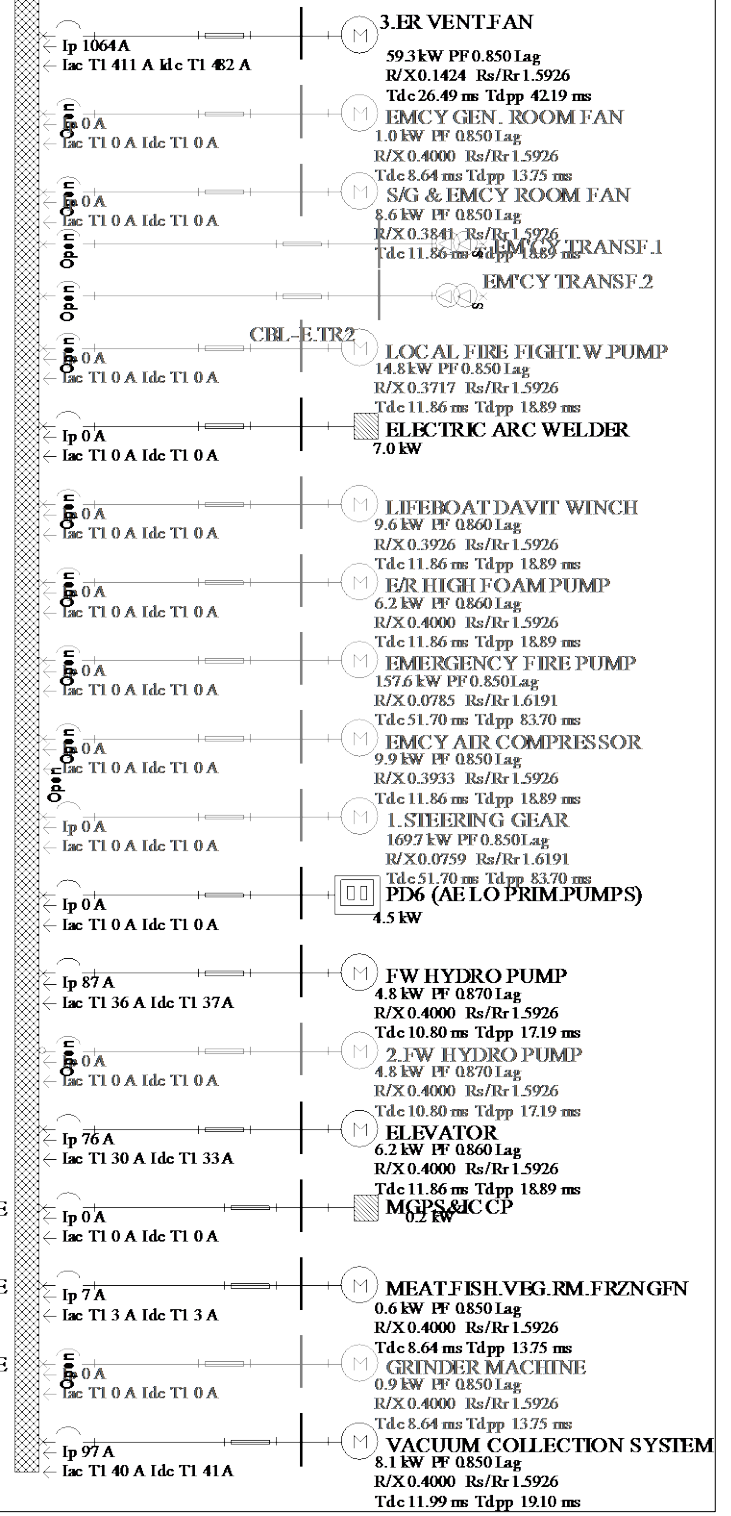


INTERMITTENT LOAD
LFx 0.4 DF

FEEDER 220V

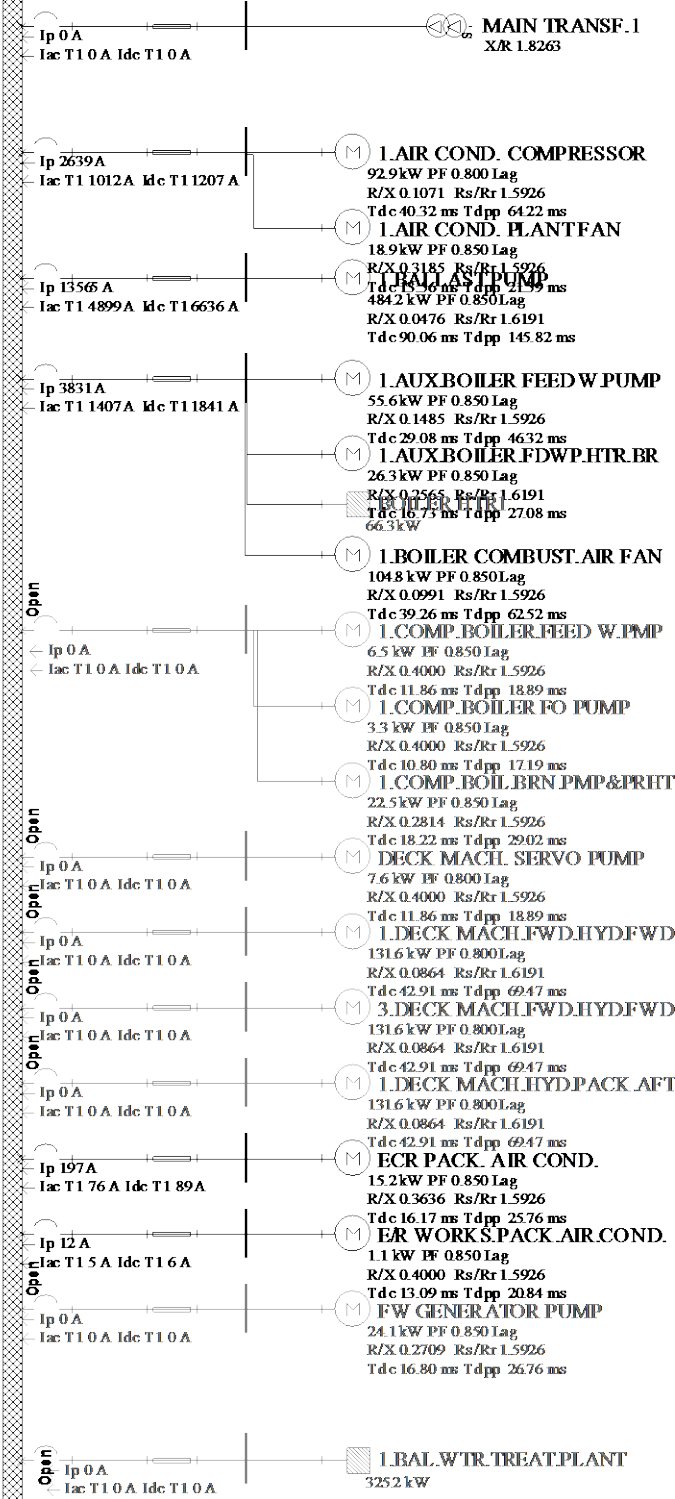


EMCY SWBD 440 V

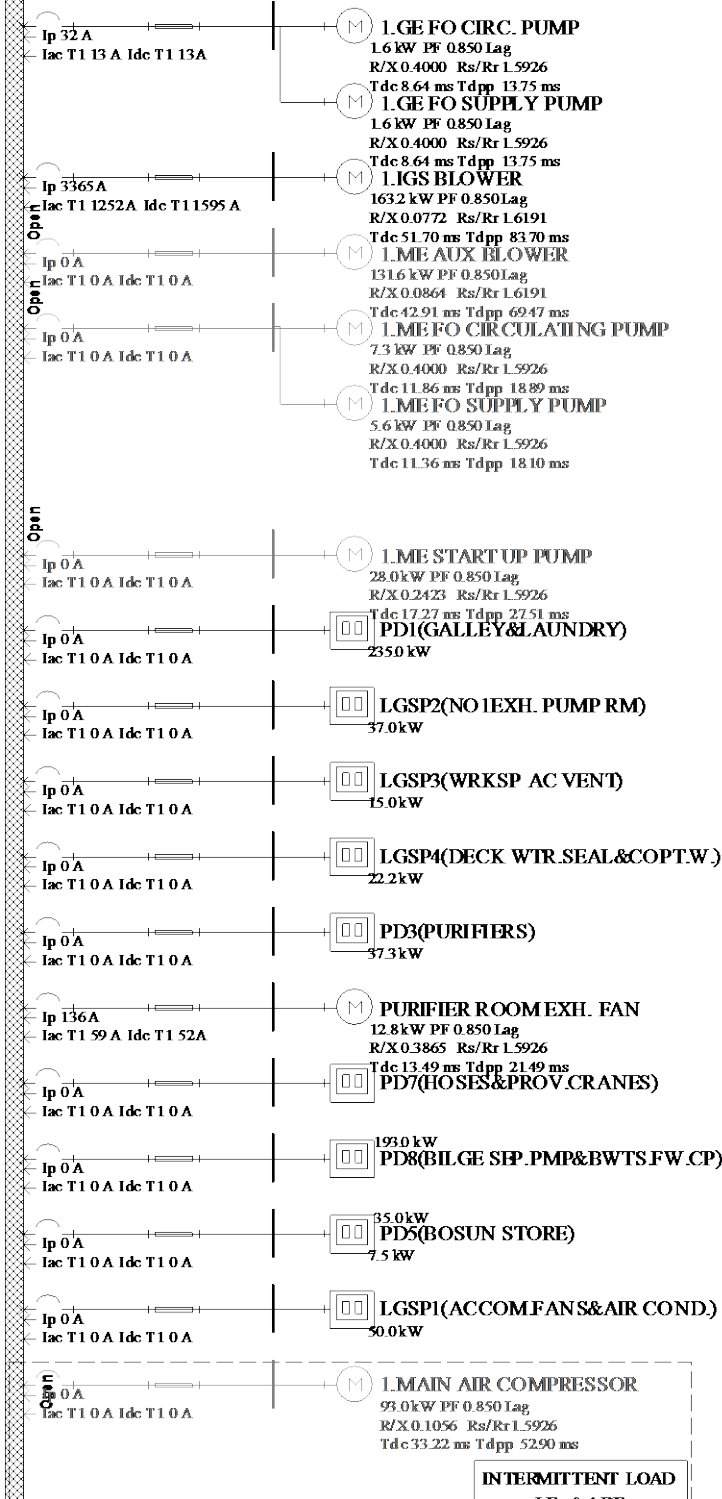


MAIN SWITCHBOARD 1

FEEDER PANEL 1 440 V

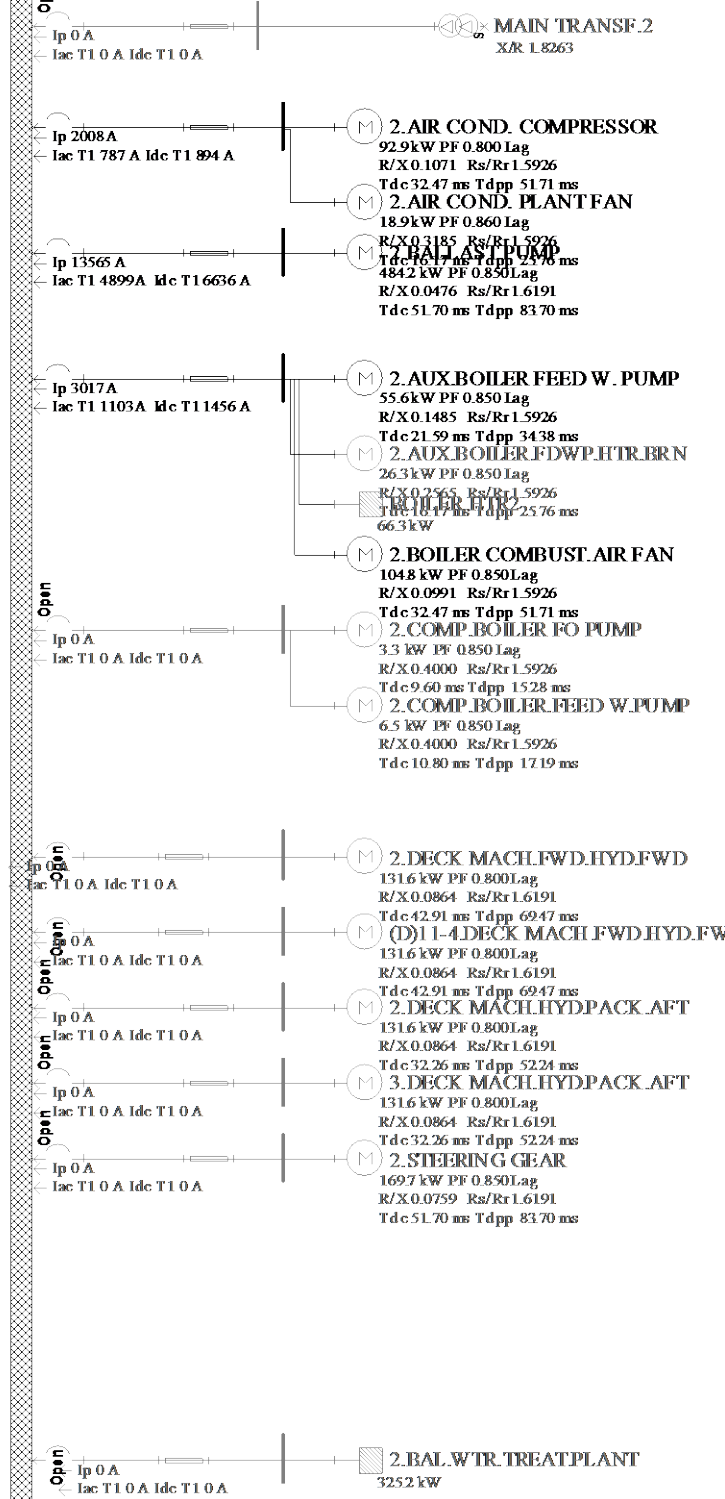


FEEDER PANEL 1

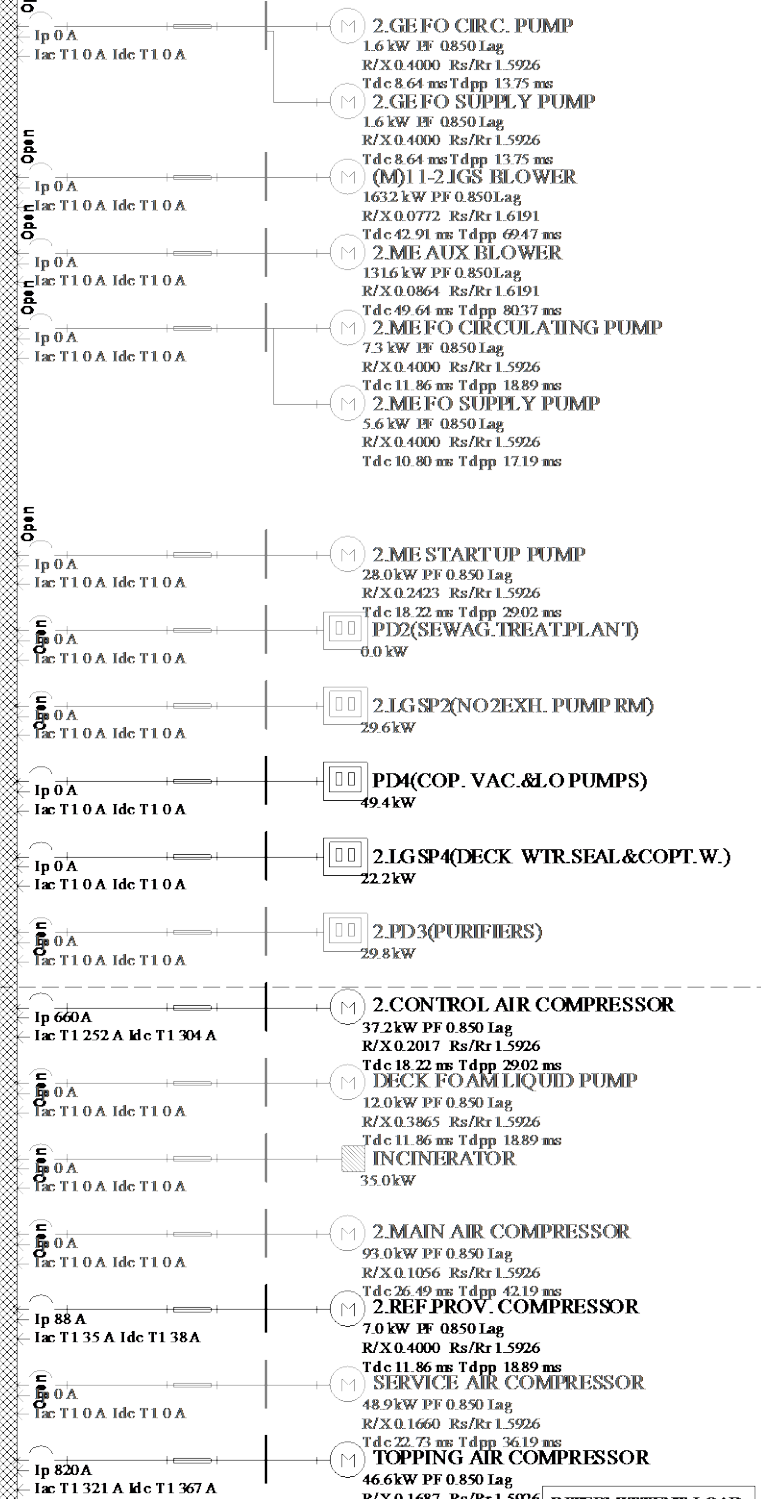


MAIN SWITCHBOARD 2

FEEDER PANEL 2 440 V



FEEDER PANEL 2



5.6 Επιλογή διακοπών

LOAD (Ib)	CIRCUIT BREAKER (In)								CABLE (Iz)
	Component name	Rated Amps	Frame (A)	Sensor / Trip (A)	Plug (A)	Inter. Rating (kA)	Mfr.	Type	
Generator1	2085	2500	2500	2250	65	ABB	EMAX, PR111	E3 - S-A	2240
Generator2	2085	2500	2500	2250	65	ABB	EMAX, PR111	E3 - S-A	2240
Generator3	2085	2500	2500	2250	65	ABB	EMAX, PR111	E3 - S-A	2240
AIR.COND.PLANT.2 2.AIR COND. COMPRESSOR 2.AIR COND. PLANT FAN	172,6 143,4 29,2	250	250	175	65	ABB	T4, TMA	T4H	192
AIR.COND.PLANT.1 1.AIR COND. COMPRESSOR 1.AIR COND. PLANT FAN	172,6 143,4 29,2	250	250	175	65	ABB	T4, TMA	T4H	192
ECR PACK. AIR COND.	22,9	100	35	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	47
MEAT.FISH.VEG.RM.FRZNGFN	0,7	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
2.REF.PROV.COMPRESSOR	12,9	100	40	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	63
NAV.&RADIO	12,7	40	40	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	47
BRIDGE CONTROL CONSOLE	7,9	40	40	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	47
BOILER PLANT 1 1.AUX.BOILER FEED W.PUMP 1.AUX.BOILER.FDWP.HTR.BR 1.BOILER COMBUST.AIR FAN	288,2 85,8 40,6 161,8	600	400	400	65	ABB	T5, TMA	T5H	471
BOILER PLANT 2 2.AUX.BOILER FEED W. PUMP 2.AUX.BOILER.FDWP.HTR.BRN 2.BOILER COMBUST.AIR FAN	288,2 85,8 40,6 161,8	600	400	340	65	ABB	T5, TMA	T5H	384
CARGO CONTROL CONSOLE	13,1	40	40	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	47
COMP.BOILER 1 1.COMP.BOIL.BRN.PMP&PRHT 1.COMP.BOILER.FEED W.PMP 1.COMP.BOILER FO PUMP	49,8 34,7 10 5,1	100	70	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	84
COMP.BOILER 2 2.COMP.BOILER.FEED W.PUMP 2.COMP.BOILER FO PUMP	15,1 10 5,1	100	25	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	27
1.DECK MACH.FWD.HYD.FWD	203,2	600	300	300	65	ABB	T5, TMA	T5H	471
2.DECK MACH.FWD.HYD.FWD	203,2	600	300	300	65	ABB	T5, TMA	T5H	471
1.DECK MACH.HYD.PACK.AFT	203,2	600	400	340	65	ABB	T5, TMA	T5H	471
2.DECK MACH.HYD.PACK.AFT	203,2	600	300	300	65	ABB	T5, TMA	T5H	314
3.DECK MACH.FWD.HYD.FWD	203,2	600	400	340	65	ABB	T5, TMA	T5H	471
4.DECK MACH.FWD.HYD.FWD	203,2	600	400	340	65	ABB	T5, TMA	T5H	471
3.DECK MACH.HYD.PACK.AFT	203,2	600	300	300	65	ABB	T5, TMA	T5H	314
DECK MACH. SERVO PUMP	11,5	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
ELEVATOR	9,5	100	30	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	47
ENGINE CONTROL CONSOLE	19,7	40	40	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	47
GE FO SUPPLY 1 GE FO CIRC. PUMP GE FO SUPPLY PUMP	5 2,4 2,6	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
GE FO SUPPLY 2 2.GE FO SUPPLY PUMP 2.GE FO CIRC. PUMP	5 2,6 2,4	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
ME FO SUPPLY 1 1.ME FO CIRCULATING PUMP 1.ME FO SUPPLY PUMP	19,9 11,3 8,6	100	25	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	27
ME FO SUPPLY 2 2.ME FO CIRCULATING PUMP 2.ME FO SUPPLY PUMP	19,9 11,3 8,6	100	25	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	27
(L)1-ACCOM.OUTSIDE LIGHT	7,9	40	15	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	20
(L)2-ELEVATOR LIGHT	0,2	40	15	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	14
(L)3-E/R LIGHT	62,7	70	70	0	42	SIEMENS	QJ2H	QJ2H	84
(L)4-ACCOMM.LIGHT	31,5	40	40	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	47
(L)5-NAVIGATION LIGHT	1,7	40	15	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	20
(L)6-ON DECK FLOOD LIGHT	73,2	90	80	0	42	SIEMENS	QJ2H	QJ2H	84
(L)7-PUMP ROOM LIGHT	5,3	40	15	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	20
(L)8-SIGNAL LIGHT	1,7	40	15	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	20
LGSP1 (ACCOM.FANS&AIR.COND.)	80,1	100	100	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	126
LGSP2 (NO1 EXH PUMP RM)	56,45	100	70	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	84
LGSP2 (NO2 EXH PUMP RM)	56,45	100	70	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	84
LGSP3 (WRKSP AC_VENT)	23,8	100	50	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	63
LGSP4 (D.W.SEAL&COPT W.PUMP)	33,87	100	50	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	63
2.LGSP4 (D.W.SEAL&COPT W.PUMP)	33,87	100	50	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	63
LPD1 PANEL(GALLEY AC 220V)	85,68	125	110	0	22	SIEMENS	QPH, 2 & 3-Pole	QPH, 2-	126
LPD2 PANEL(E/R AC 220V)	10,5	40	40	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	47
1.MAIN VAC.COND.CSW PUMP	104,7	250	150	150	65	ABB	T4, TMA	T4H	168

LOAD (Ib)		CIRCUIT BREAKER (In)							CABLE (Iz)
Component name	Rated Amps	Frame (A)	Sensor / Trip (A)	Plug (A)	Inter. Rating (kA)	Mfr.	Type	Model	Cable Amps
2.IGS BLOWER	251.9	600	300	300	65	ABB	T5, TMA	T5H	314
2.MAIN VAC.COND.CSW PUMP	104.7	250	150	150	65	ABB	T4, TMA	T4H	168
2.STERN TUBE LO PUMP	1.5	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	14
3.MAIN VAC.COND.CSW PUMP	107.1	250	150	150	65	ABB	T4, TMA	T4H	168
4.MAIN VAC.COND.CSW PUMP	107.1	250	150	150	65	ABB	T4, TMA	T4H	168
1.ATMOS.COND.CSW PUMP	19.8	100	25	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	27
1.BALLAST PUMP	734.5	800	800	800	65	ABB	S6, TMA	S6H	896
2.ATMOS.COND.CSW PUMP	19.1	100	25	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	27
FW GENERATOR PUMP	37.2	100	50	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	63
1.IGS BLOWER	247.6	600	300	300	65	ABB	T5, TMA	T5H	314
IGS SCRUBBER CSW PUMP	121.8	250	150	150	65	ABB	T4, TMA	T4H	168
MGPS1	0.3	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
STERN TUBE LO PUMP	1.5	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	14
2.BILGE FIRE&G/S PUMP	278.5	400	350	0	65	SIEMENS	HJD6-A Sentron	HJD6-A	384
2.DECK FOAM LIQUID PUMP	18.5	100	25	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	34
2.MGO TRANSFER PUMP	10.3	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
2.SERVICE AIR COMPRESSOR	74.2	100	80	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	84
2.TOPPING AIR COMPRESSOR	71.9	250	100	85	65	ABB	T4, TMA	T4H	101
BILGE FIRE & G/S PUMP	278.4	400	350	0	65	SIEMENS	HJD6-A Sentron	HJD6-A	384
FW HYDRO PUMP	7.2	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
MDO TRANSFER PUMP	10.3	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
SLUDGE PUMP	4.2	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	14
2.BALLAST PUMP	734.5	800	800	800	65	ABB	S6, TMA	S6H	896
VACUUM COLLECTION SYSTEM	12.5	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
FIRE DETECTING SYSTEM	1	40	40	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	47
1.LT COOLING FW PUMP	121.8	250	150	150	65	ABB	T4, TMA	T4H	168
2.STEERING GEAR	262	600	400	340	65	ABB	T5, TMA	T5H	384
3.LT COOLING FW PUMP	121.8	250	150	150	65	ABB	T4, TMA	T4H	168
1.MAIN LO PUMP	214.1	250	250	250	65	ABB	T4, TMA	T4H	314
1.ME AUX BLOWER	203.2	600	300	255	65	ABB	T5, TMA	T5H	314
1.ME JACKET COOL.FW PUMP	55.3	100	80	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	84
1.ME START UP PUMP	43.2	100	50	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	63
2.CONTROL AIR COMPRESSOR	57.4	250	80	80	65	ABB	T4, TMA	T4H	101
2.HFO TRANSFER PUMP	35	100	40	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	47
1.STEERING GEAR	262	600	400	340	65	ABB	T5, TMA	T5H	384
2.MAIN AIR COMPRESSOR	143.6	250	200	170	65	ABB	T4, TMA	T4H	202
1.HFO TRANSFER PUMP	35.1	100	40	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	47
LOCAL FIRE FIGHT.W.PUMP	22.9	100	25	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	27
1.MAIN AIR COMPRESSOR	141.1	250	200	170	65	ABB	T4, TMA	T4H	202
ME JACKET W. PRHT.PUMP	10.2	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	14
2.LT COOLING FW PUMP	121.8	250	150	150	65	ABB	T4, TMA	T4H	168
2.MAIN LO PUMP	214.1	250	250	250	65	ABB	T4, TMA	0	314
2.ME AUX BLOWER	203.2	600	300	255	65	ABB	T5, TMA	T5H	314
2.ME JACKET COOL.FW PUMP	55.9	100	80	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	84
2.ME START UP PUMP	43.2	100	50	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	63
PD1 (GALLEY&LAUNDRY)	289.9	600	400	340	65	ABB	T5, TMA	T5H	384
PD2(SEW.T.P.&AE.JW.PRE.PMP)	175.46	250	200	200	65	ABB	T4, TMA	T4H	202
PD3(PURIFIERS)	56.83	100	80	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	126
2.PD3(PURIFIERS)	56.83	100	80	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	126
PD4 (COP VACUUM& LO PUMPS)	75.07	100	100	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	126
PD5 (BOSUN)	46.5	100	70	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	101
PD6 (AE LO PR.PUMPS)	6.87	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
PD7 (HOSES& PROV.CRANES LBOAT)	294.47	600	400	340	65	ABB	T5, TMA	T5H	384
PD8 (BILGE SEP.PUMP&BWTS.FWCP)	45.8	100	70	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	126
ACCOM.RECEPTACLE	28.7	40	40	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	47
E/R RECEPTACLE	5.7	40	40	0	22	SIEMENS	BLH, 2 & 3-Pole	BLH	47
2.ER VENT.FAN	91.5	250	125	106	65	ABB	T4, TMA	T4H	126
3.ER VENT.FAN	91.5	250	125	106	65	ABB	T4, TMA	T4H	126
4.ER VENT.FAN	91.5	250	125	106	65	ABB	T4, TMA	T4H	126
1.ER VENT.FAN	91.5	250	125	106	65	ABB	T4, TMA	T4H	126
PURIFIER ROOM EXH. FAN	19.8	100	25	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	27
GRINDER MACHINE	1.4	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
ELECTRIC ARC WELDER	9.2	100	40	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	47
EMERGENCY FIRE PUMP	243.2	600	400	340	65	ABB	T5, TMA	T5H	384
EMCY AIR COMPRESSOR	15.3	100	20	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
E/R HIGH FOAM PUMP	9.5	100	20	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
2.FW HYDRO PUMP	7.2	100	25	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	27
LIFEBOAT DAVIT WINCH	14.8	100	25	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	27
EMCY GEN. ROOM FAN	1.5	100	15	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	14

LOAD (I _b)		CIRCUIT BREAKER (I _n)							CABLE (I _z)
Component name	Rated Amps	Frame (A)	Sensor / Trip (A)	Plug (A)	Inter. Rating (kA)	Mfr.	Type	Model	Cable Amps
S/G & EMCY ROOM FAN	13,3	100	20	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	20
LOCAL FIRE FIGHT.W.PUMP	22,8	100	25	0	65	ABB	T2, TMF	T2H	27
CBL-TRANSF1-EMCY_primary	52,5	250	125	106	65	ABB	T4, TMA	T4H	63
CBL-TRANSF2-EMCY_primary	52,5	250	125	106	65	ABB	T4, TMA	T4H	63
CBL-TRANSF1_primary	177,1	250	200	200	65	ABB	T4, TMA	T4H	224
CBL-TRANSF2_primary	177,1	250	200	200	65	ABB	T4, TMA	T4H	224
CBL-TRANSF1_sec	346,4	0	0	0	0	0	0	0	448
CBL-TRANSF2_sec	346,4	0	0	0	0	0	0	0	448

5.6.1 Παρατηρήσεις

- Επιλέχθηκαν διακόπτες από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος, κυρίως ενός κατασκευαστή (ABB), ώστε να είναι πιο εύκολη η ρύθμισή τους για επιλογική συνεργασία.
- Όλοι οι διακόπτες έχουν breaking capacity υψηλότερο από τις τιμές τριφασικού ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{ac}, I_{rms_sym} που υπολογίστηκαν για τους ζυγούς στους οποίους συνδέονται.
- Οι MCCB διακόπτες των φορτίων είναι είτε με ρυθμιζόμενο το μαγνητικό τους στοιχείο (TMA, adjustable) είτε σταθερό (TME, fixed)
- Η ρύθμιση του μαγνητικού στοιχείου για φορτία κίνησης πρέπει να λαμβάνει υπόψιν τα υψηλά ρεύματα εκκίνησης των επαγωγικών κινητήρων. Επομένως πρέπει να έχει καθοριστεί ο τύπος του εκκινητή.
- Η αναγραφόμενη ρύθμιση του θερμικού είναι μια προκαταρκτική ρύθμιση. Πρέπει ασφαλώς να ισχύει $I_b < I_n < I_z$ όμως πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα εξής:
 1. Δυνατότητας υπερφόρτισης, για παράδειγμα της γεννήτριας στο 115%
 2. Σύμφωνα με τους κανονισμούς των νηογνομώνων, η γραμμή του μηχανισμού του πηδαλίου δεν πρέπει να έχει στοιχείο προστασίας από υπερφόρτιση. Εναλλακτικά ρυθμίζεται το θερμικό για διπλάσια ένταση του ονομαστικού ρεύματος του φορτίου. Σε αυτή τη περίπτωση πρέπει να επαναξιολογηθεί η διατομή της καλωδίωσης
 3. Ομοίως για καταναλωτές που κρίνονται ως ουσιώδεις και αφορούν την πρόωση του πλοίου (πχ ME Lube oil pump).

6 Κεφάλαιο: Συμπεράσματα / Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

6.1 Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία συγκεντρώνεται το ευρύ φάσμα των βασικών ηλεκτρολογικών γνώσεων και πληροφοριών που θα χρειαστεί ο ναυπηγός μηχανικός για την εποπτεία ή μελέτη του ΣΗΕ ενός πλοίου, στην απλούστερη αλλά και πιο συχνά συναντώμενη μορφή του. Έγινε προσπάθεια ώστε το κείμενο να μην ακολουθεί την αυστηρή μορφή ενός τεχνικού εγγράφου, με συνεχείς οδηγίες και προτροπές, χωρίς ουσιαστικά να εξηγείται 'το γιατί' πριν από κάθε απόφαση, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στις τεχνικές οδηγίες των νηογνώμωνων.

Αφού δόθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές που πρέπει να πληροί το ΣΗΕ ενός πλοίου (με τη βοήθεια του προτύπου IEEE Std.45), παρουσιάστηκαν τα κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των βασικών στοιχείων που το δομούν. Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται συνοπτικά τα προβλήματα ποιότητας ισχύος που μπορούν να προκύψουν στο δίκτυο κατά τη λειτουργία του, έμφαση δίνεται στο ηλεκτρικό μέγεθος του συντελεστή ισχύος, τη σημασία του και τους τρόπους βελτίωσής του.

Στο **κεφάλαιο 4** αναλύονται οι βασικές ηλεκτρολογικές μελέτες που απαιτούνται από τους νηογνώμονες να υλοποιηθούν, κατά τη φάση του σχεδιασμού του ΣΗΕ. Δίνεται η διαδικασία κατάστροφησης του πίνακα του ενεργειακού ισολογισμού, η οποία αποτελεί την πιο σημαντική μελέτη που θα κληθεί ο ναυπηγός μηχανικός να πραγματοποιήσει για το ηλεκτρικό κομμάτι της σχεδίασης ενός νεόκτιστου πλοίου, ώστε να διασφαλίσει την επάρκεια και την αποδοτική λειτουργία του συστήματος σε κάθε επιχειρησιακή κατάσταση του πλοίου. Λόγω της σημασίας του συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάζεται και η μελέτη του επεκταμένου ενεργειακού ισολογισμού, για τον γρήγορο καθορισμό της άεργης ισχύος στο δίκτυο. Ακολούθως δίνεται η διαδικασία ορθής επιλογής των διατομών της καλωδίωσης. Έμφαση δίνεται στις μελέτες που αφορούν τη προστασία του δικτύου διανομής από υπερεντάσεις, γι' αυτό το λόγο παρουσιάζεται λεπτομερώς η διαδικασία υπολογισμού των ρευμάτων βραχυκύκλωσης κατά το πρότυπο IEC 61363 καθώς και η γραφική διαδικασία ρύθμισης των διακοπών μέσω των χαρακτηριστικών ρεύματος-χρόνου.

Στο **κεφάλαιο 5** εφαρμόστηκαν οι παραπάνω μελέτες σε ένα δεξαμενόπλοιο VLCC με τη βοήθεια λογισμικού ανάλυσης δικτύου (SKM Powertools). Παρόλο που σπάνια μοντελοποιείται το ΣΗΕ ενός εμπορικού πλοίου με συμβατική πρόωση σε ένα πρόγραμμα ανάλυσης δικτύου καθώς κάτι τέτοιο δεν προδιαγράφεται στους κανονισμούς των νηογνώμωνων, εντούτοις κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί η κατασκευή του δικτύου στο πρόγραμμα και να υπολογιστούν μέσω της μελέτης ροής φορτίου τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του στη μόνιμη κατάσταση, για ένα επιχειρησιακό προφίλ (χειρισμοί φορτίου) και στην υπομεταβατική/μεταβατική κατάσταση κατά τη διάρκεια συμμετρικού τριφασικού βραχυκυκλώματος στον κύριο ζυγό του, στο ίδιο επιχειρησιακό προφίλ. Οι αρχικές συνθήκες για τη μελέτη βραχυκυκλώματος λήφθηκαν από τη μελέτη ροής φορτίου. Γι' αυτό το λόγο δόθηκε με προσοχή το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης (αφορά περισσότερο τον ηλεκτρολόγο μηχανικό), σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο λόγος που επιλέχθηκε το τριφασικό βραχυκύκλωμα, στον κύριο ζυγό για τη συγκεκριμένη επιχειρησιακή κατάσταση είναι γιατί αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση, βάσει της οποίας θα γίνει η επιλογή του προστατευτικού εξοπλισμού.

6.2 Συμπεράσματα μελετών

- Δημιουργήθηκε μια μικρή βάση δεδομένων από ενεργειακούς ισολογισμούς (στην κανονική τους και στην επεκταμένη τους μορφή) για διαφορετικού τύπου πλοία (Πιν. 5.2).
- Προκειμένου να έχει νόημα ο υπολογισμός της πτώσης τάσης κατά τη διαστασιολόγηση των αγωγών, έγινε μια πρόχειρη εκτίμηση του μήκους της καλωδίωσης.
- Πραγματοποιήθηκαν οι μελέτες ροής φορτίου και βραχυκυκλώματος κατά IEC61363, για ένα απλοποιημένο δίκτυο (όπως γίνεται συνήθως) και για το πλήρες δίκτυο του πλοίου. Τα μοναδικά δεδομένα που είχαμε προς σύγκριση από το υπό μελέτη πλοίο ήταν τα ρεύματα βραχυκύκλωσης στον κύριο πίνακα του πλοίου (για τους ζυγούς 440V και 220V):

AC440V BUS 57.94kA SYM RMS	135.62kA ASYM PEAK
AC220V BUS 6.91kA SYM RMS	10.72kA ASYM PEAK

Προκύπτει ότι οι τιμές που έχουν υπολογιστεί κατά IEC61363 για το πλήρες δίκτυο στον κύριο ζυγό 440V είναι σχεδόν ίδιες. Άρα μας δίνεται η βεβαιότητα ότι οι θεωρήσεις που έχουμε υποθέσει (για X/R, Rs/Rr) για τους επαγωγικούς κινητήρες, δεν είναι εκτός πραγματικότητας. Εξάλλου το breaking capacity των διακοπών που των φορτίων που τροφοδοτούνται από τον κύριο ζυγό και χρησιμοποιούνται στο πλοίο είναι επίσης 65kA όπως προκύπτει από τα ηλεκτρολογικά του σχέδια. Οι μικρότερες τιμές που προέκυψαν για το απλό δίκτυο (αν και δε λήφθηκαν υπόψιν παθητικά στοιχεία), έχει να κάνει με τη μικρότερη συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης των επαγωγικών κινητήρων. Για το ζυγό 220V οι τιμές παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση.

- Η μελέτη του επεκταμένου ενεργειακού ισολογισμού είναι μια πολύ χρήσιμη και απλή μελέτη για την εκτίμηση της ισχύος σε kVA που καταναλώνει μια εγκατάσταση. Στο υπό μελέτη πλοίο διαπιστώθηκε μια μικρή υπερεκτίμησή της σε σχέση με τα αποτελέσματα της ροής φορτίου στο πλήρες δίκτυο από το λογισμικό SKM.

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

Έχοντας δημιουργήσει ένα πλήρες μοντέλο του πλοίου σε πρόγραμμα προσομοίωσης, προτείνονται οι εξής επιπλέον μελέτες:

- Μελέτη εκκίνησης κινητήρων. Θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μια προκαταρκτική μελέτη μέσω της μελέτης φορτίου για τη πτώση τάσης κατά την εκκίνηση κινητήρων, θέτοντας τα φορτία απλά ως constant impedance (στατική ανάλυση). Επίσης με γνωστές ροπές αδρανείας των κινητήρων και της χαρ/κής του φορτίου, θα μπορούσε να γίνει μια δυναμική ανάλυση εκκίνησης.
- Επιλογή κατάλληλων εκκινητών, σε περίπτωση χρησιμοποίησης VFD για τα μεγάλα φορτία θα μπορούσε να γίνει μελέτη αρμονικής παραμόρφωσης.
- Μελέτη επιλογικής συνεργασίας διακοπών.
- Μελέτη αξιοπιστίας εγκατάστασης.

7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

7.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

7.1.1 Σύγχρονη Γεννήτρια

ι) Ισοδύναμο κύκλωμα και προσδιορισμός παραμέτρων:

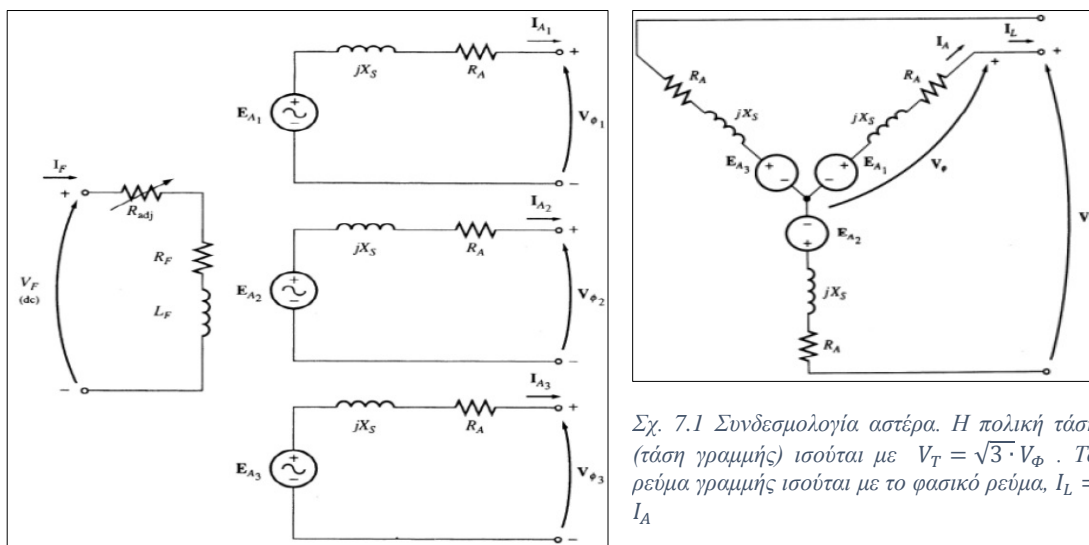
Έστω E_{A1} η, επαγόμενη από το δρομέα, τάση στα άκρα της μίας φάσης του στάτη, όταν στη γεννήτρια δεν έχουμε συνδέσει φορτίο. Το κύκλωμα του στάτη είναι ανοικτό και δεν κυκλοφορεί ρεύμα. Αν συνδεθεί φορτίο στη γεννήτρια, το κύκλωμα κλείνει και στον στάτη θα κυκλοφορήσει ρεύμα το οποίο στους ακροδέκτες της γεννήτριας θα δώσει διαφορετική τάση $V_{\phi 1}$ (φασική), μικρότερη της E_{A1} . Αυτό συμβαίνει κυρίως για τους εξής λόγους:

- το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το προκαλεί μόνο ο δρομέας στο διάκενο, όταν δε κυκλοφορεί ρεύμα στον στάτη. Αυτό, θα παραμορφωθεί τη στιγμή που θα κυκλοφορήσει ρεύμα στα τυλίγματα του στάτη, αφού θα προκληθεί νέο μαγνητικό πεδίο, από τον στάτη. Η παραμόρφωση αυτή ονομάζεται αντίδραση τυμπάνου (armature reaction).
- δεν υπάρχουν ιδανικά πηνία, οπότε στα τυλίγματα του στάτη θα έχουμε σύνθετη αντίσταση Z_S

Το πλήρες ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας για τις τρεις φάσεις φαίνεται στο Σχ. 7.2 Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικής γεννήτριας. Το δεξί μέρος αντιπροσωπεύει τον δρομέα και το αριστερό τις τρεις φάσεις του στάτη.

Επομένως η τάση $V_{\phi 1}$ ισούται με :

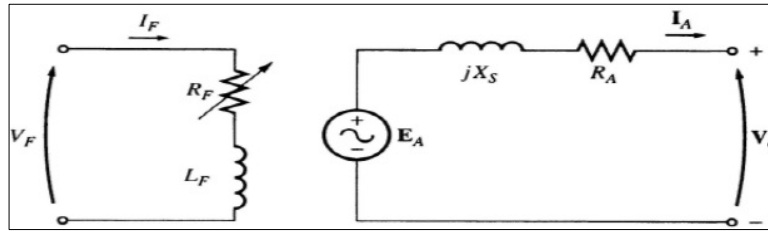
$$V_{\phi 1} = E_{A1} - I_{A1} \cdot Z_S = E_{A1} - I_{A1} \cdot R_A - j \cdot I_{A1} \cdot X_S \quad (7.1)$$



Σχ. 7.1 Συνδεσμολογία αστέρα. Η πολική τάση (τάση γραμμής) ισούται με $V_T = \sqrt{3} \cdot V_{\phi}$. Το ρεύμα γραμμής ισούται με το φασικό ρεύμα, $I_L = I_A$

Σχ. 7.2 Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικής γεννήτριας

Το τύλιγμα διέγερσης (δρομέας) αντιπροσωπεύεται από μια αυτεπαγωγή L_F και μια ωμική αντίσταση R_F . Σε σειρά με την R_F έχει συνδεθεί ρυθμιστική αντίσταση R_{adj} που μπορεί να μεταβάλει το ρεύμα διέγερσης I_F . Στο τύμπανο (στάτης) οι τάσεις και τα ρεύματα των τριών φάσεων, έχουν το ίδιο μέτρο και διαφέρουν μόνο κατά 120° στη φασική γωνία (υποτίθεται συμμετρικό φορτίο). Πάντα συνδέονται κατ'αστέρα για τους λόγους που αναφέραμε στην παράγραφο των κατασκευαστικών στοιχείων. Λόγω συμμετρίας συνηθίζουμε να χρησιμοποιούμε το παρακάτω μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα:

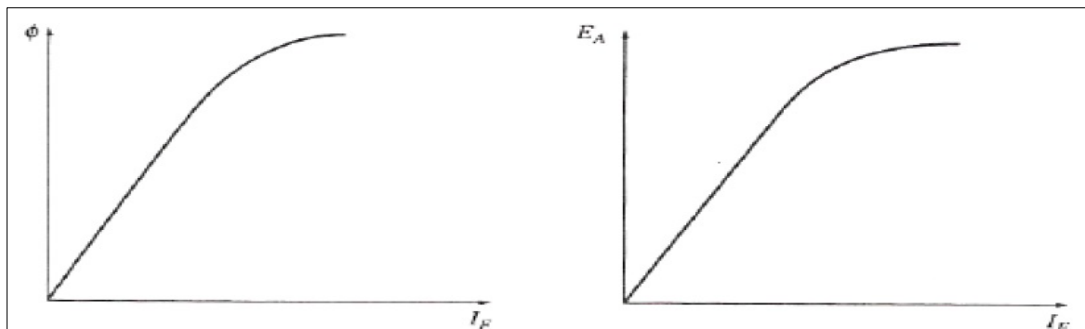


Σχ. 7.3 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα

Η εξ-επαγωγής τάση E_A προφανώς και θα είναι μια συνάρτηση της μαγνητικής ροής Φ που δημιουργεί ο δρομέας που περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω_s . Άρα είναι μια συνάρτηση της μορφής:

$$E_A = K \cdot \Phi \cdot \omega_s \quad (7.2)$$

,όπου K μια σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής. Όμως η μαγνητική ροή Φ , εξαρτάται από το ρεύμα διέγερσης I_F . Η χαρακτηριστική της εξάρτησης αυτής αποτυπώνεται στα παρακάτω διαγράμματα:



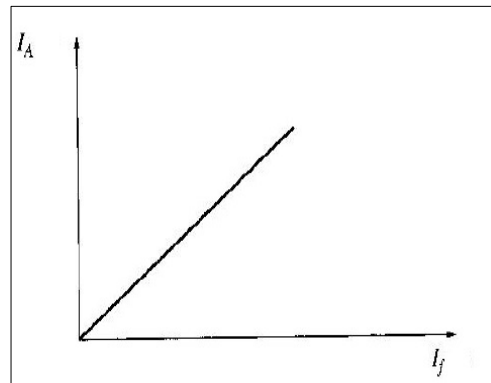
Σχ. 7.4 Μαγνητική ροή σε συνάρτηση με το ρεύμα διέγερσης, επαγόμενη τάση συναρτήσει ρεύματος διέγερσης

Η καμπύλη στα δεξιά ονομάζεται και καμπύλη μαγνήτισης και μπορεί να προκύψει πειραματικά με τη λειτουργία της γεννήτριας χωρίς συνδεδεμένο φορτίο (άρα με $I_A = 0, E_A = V_\phi$), όπου με σταθερή γωνιακή ταχύτητα αυξάνουμε σταδιακά το ρεύμα διέγερσης I_F και μετρούμε την τάση στους ακροδέκτες του τυμπάνου. Η καμπύλη αυτή όπως παρατηρούμε είναι μια ευθεία μέχρι να αρχίσουν να εμφανίζονται φαινόμενα κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού, όπου όσο και να αυξήσουμε το I_F η επαγόμενη τάση παραμένει αμετάβλητη.

Η σχέση μεταξύ του ρεύματος μαγνήτισης I_F και του ρεύματος του οπλισμού I_A βρίσκεται με το πείραμα βραχυκύκλωσης όπου απλά βραχυκυκλώνουμε τα άκρα των φάσεων. Προφανώς τότε $V_\phi = 0$ και λύνοντας την (7.1) ως προς I_A προκύπτει :

$$\bar{I}_A = \frac{\bar{E}_A}{R_A + jX_S} \quad (7.3)$$

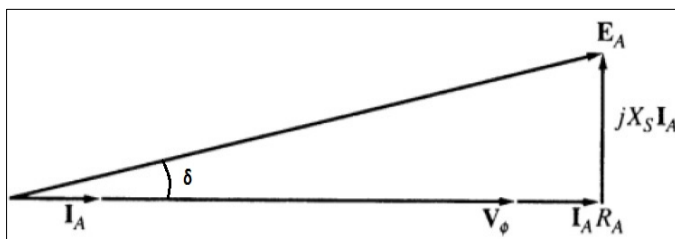
Μεταβάλλοντας το ρεύμα διέγερσης προκύπτει η χαρακτηριστική $I_A - I_F$ που ονομάζεται και χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης. Αφού βρεθεί το I_A , βρίσκουμε και την σύγχρονη αντίδραση X_S του τυμπάνου είτε προσεγγιστικά (αφού $R_A \ll X_S$) ίση με $X_S \cong \frac{E_A}{I_A}$, ή αν υπάρχει η δυνατότητα όταν η γεννήτρια δε λειτουργεί, εφαρμόζουμε συνεχή τάση στα τυλίγματα και υπολογίζουμε την ωμική αντίσταση του στάτη R_A .



Σχ. 7.5 Χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης

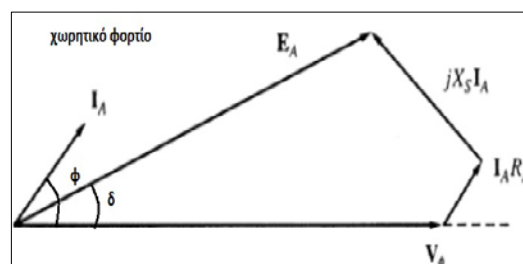
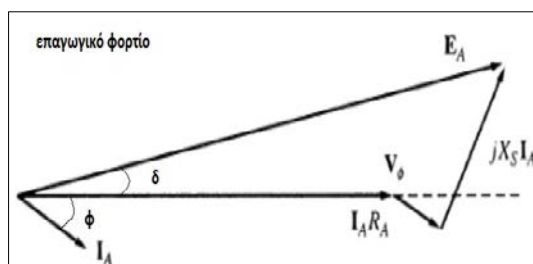
ii) Διανυσματικό Διάγραμμα (Phasor Diagram)

Ο πλέον κατάλληλος τρόπος ανάλυσης των ηλεκτρικών μεγεθών μιας σύγχρονης γεννήτριας είναι μέσω μιγαδικών στρεφόμενων διανυσμάτων (phasors). Το διάγραμμα που εκφράζει σχέσεις μεταξύ των τάσεων (E_A , V_ϕ , $jX_S I_A$, $R_A I_A$) και του ρεύματος I_A ονομάζεται διανυσματικό διάγραμμα (phasor diagram). Σε αυτό τοποθετούμε την τάση του φορτίου (δηλαδή την φασική τάση), στον πραγματικό άξονα (στον οριζόντιο άξονα x). Αν η σύνθετη αντίσταση του φορτίου Z_L είναι επαγωγική (πχ ηλεκτρικός κινητήρας) τότε το ρεύμα I_A (παρέχεται από τους ακροδέκτες του στάτη) που διαρρέει το φορτίο ($I_A = I_L$), θα υπολείπεται της τάσης κατά γωνία ϕ , θα είναι στραμμένο δηλαδή ωρολογιακά κατά ϕ όσο και η γωνία της σύνθετης αντίστασης του φορτίου. Το συνημίτονο της γωνίας αυτής, μεταξύ του διανύσματος της τάσης και του ρεύματος, ονομάζεται συντελεστής ισχύος. Για καθαρά ωμικό φορτίο, το διάνυσμα του ρεύματος βρίσκεται πάνω στον πραγματικό άξονα, η γωνία μεταξύ τάσης και ρεύματος είναι 0° , επομένως $\cos\phi = 1$. Σε αυτή την περίπτωση το διανυσματικό διάγραμμα είναι όπως στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 7.6 Διανυσματικό διάγραμμα Σ.Γ. με $\cos\phi=1$

Όπως αναφέρθηκε, η τιμή της κάθε φάσης E_A διαφέρει από την τάση εξόδου V_ϕ κατά την πτώση τάσης σε αντιστάσεις (R_A) και αυτεπαγωγές (X_S) των τυλιγμάτων του στάτη. Η X_S ονομάζεται και σύγχρονη αντίδραση.



Σχ. 7.7 Διανυσματικά διαγράμματα Σ.Γ. με συντελεστής ισχύος, επαγωγικό και χωρητικό, αντίστοιχα

Μια σημαντική παρατήρηση που προκύπτει από το (Σχ. 7.7) είναι η εξής. Με δεδομένη τη φασική τάση V_ϕ και το ρεύμα του στάτη I_A , πρέπει να παραχθεί μεγαλύτερη τάση E_A , για επαγωγικό φορτίο απ' ότι για χωρητικό. Λόγω της (7.2), επειδή θέλουμε τη γωνιακή ταχύτητα σταθερή, αυτό μπορεί να προκύψει μόνο με αύξηση της μαγνητικής ροής Φ , δηλαδή μέσω του ρεύματος διέγερσης I_F .

Η γωνία δ που φαίνεται στα παραπάνω σχήματα (μεταξύ της ΗΕΔ E_A και της τάσης εξόδου V_ϕ) λέγεται γωνία ισχύος ή γωνία ροπής (power angle, torque angle) και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη αντιτιθέμενης στην περιστροφή ροπής και στην μετατροπή ισχύος. Η σύγχρονη αντίδραση X_S είναι πολύ μεγαλύτερη σε μέτρο από την αντίσταση του τυλίγματος του στάτη R_A . Έτσι, η R_A αγνοείται στην περίπτωση ποιοτικής μελέτης των μεταβολών της τάσης. Όταν απαιτούνται ακριβείς ποσοτικοί υπολογισμοί, λαμβάνεται υπόψιν.

iii) Ισχύς, Ροπή και Απώλειες (Power, Torque & Losses)

Ο δρομέας της Σ.Γ. λαμβάνει μηχανική ισχύ από μια ΜΕΚ ίση με:

$$P_{IN_Mech} = T_m \omega_m, \text{ όπου } T_m \text{ η ροπή στον άξονα της ΜΕΚ και } \omega_m \text{ η γωνιακή ταχύτητά του [rad/s].}$$

Η ισχύς που μετατρέπεται σε ηλεκτρική στο εσωτερικό της μηχανής είναι (για τις τρεις φάσεις) ίση με:

$$P_{conv} = T_{ind} \omega_m = 3 E_A I_A \cos \gamma \quad (7.4)$$

Όπου T_{ind} η ροπή που αναπτύσσεται λόγω της περιστροφής του μαγνητικού πεδίου και γ η γωνία μεταξύ της ΗΕΔ και του επαγόμενου ρεύματος.

Η διαφορά, μεταξύ της εισερχόμενης ισχύος στη γεννήτρια και της ισχύος που μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρική, οφείλεται στις απώλειες πυρήνα (ή σιδήρου), τις μηχανικές απώλειες και τις κατανεμημένες απώλειες (ή επιπρόσθετες απώλειες φορτίου) της γεννήτριας.

Η ενεργός (πραγματική) εξερχόμενη ισχύς ισούται με:

$$P_{OUT} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \varphi \text{ ή } P_{OUT} = 3 V_\phi I_A \cos \varphi \text{ [Watt]} \quad (7.5)$$

όπου στην πρώτη περίπτωση είναι εκφρασμένη σε πολικά (γραμμής) μεγέθη και στη δεύτερη περίπτωση είναι εκφρασμένη σε φασικά μεγέθη.

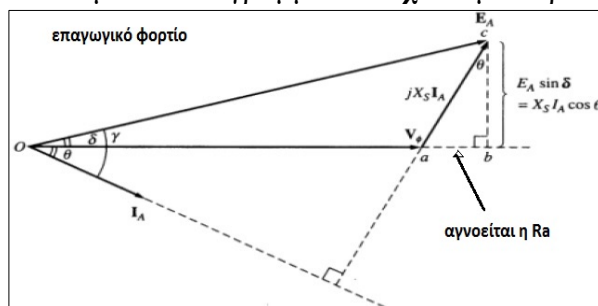
Οι αντίστοιχες σχέσεις για την άεργο ισχύ είναι οι ακόλουθες:

$$Q_{OUT} = \sqrt{3} V_T I_L \sin \varphi \text{ ή } Q_{OUT} = 3 V_\phi I_A \sin \varphi \text{ [Var]} \quad (7.6)$$

Η φαινόμενη (συνολική) ισχύς ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των συνιστωσών πραγματικής και άεργης ισχύος και το μέτρο της είναι ίσο με:

$$S_{OUT} = \sqrt{P_{OUT}^2 + Q_{OUT}^2} = 3 V_\phi I_A \text{ [VA]} \quad (7.7)$$

Μια χρήσιμη προσεγγιστική σχέση για τον υπολογισμό της εξερχόμενης ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να εξαχθεί αν αγνοήσουμε την ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη R_A που όπως είπαμε είναι πολύ μικρότερη της σύγχρονης αντίδρασης X_S ($R_A \ll X_S$). Τότε το διανυσματικό διάγραμμα του **σχ 7.7** μετατρέπεται όπως αυτό στο **σχ. 7.8**



Απαλείφουμε το I_A ως εξής: από το σχήμα έχουμε

$$bc: X_S I_A \cos \theta = E_A \sin \delta \quad (7.8)$$

Άρα

$$I_A \cos \theta = \frac{E_A \sin \delta}{X_S} \quad (7.9)$$

Σχ. 7.8 Διανυσματικό διάγραμμα Σ.Γ. με επαγωγικό συντελεστή ισχύος όπου αγνοείται η αντίσταση του οπλισμού

Επομένως η σχέση 7.5 γίνεται (όπου $\varphi \rightarrow \theta$)

$$P_{OUT} = \frac{3V_{\phi}E_A \sin\delta}{X_S} = P_{conv} \quad (7.10)$$

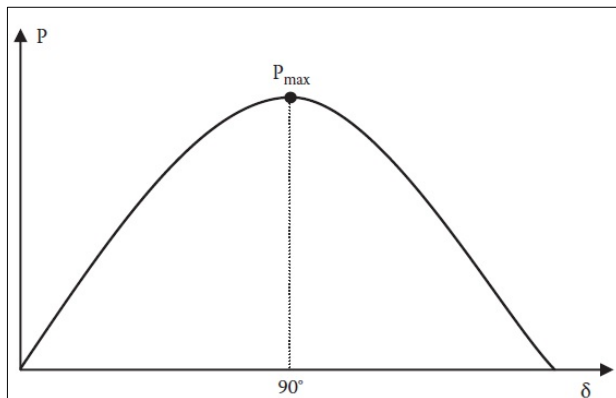
Επειδή οι ωμικές αντιστάσεις στο στάτη αγνοούνται, η εξ. 7.10 εκφράζει τόσο την ισχύ που μετατρέπεται από μηχανική σε ηλεκτρική P_{conv} , όσο και την εξερχόμενη ισχύ P_{OUT} . Επομένως μπορούμε να εξάγουμε την ακόλουθη εξίσωση για την επαγόμενη ροπή της Σ.Γ.

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{P_{OUT}}{\omega_m} = \frac{3V_{\phi}E_A \sin\delta}{\omega_m X_S} \quad (7.11)$$

Η γωνία δ (γωνία φορτίου ή γωνία ροπής), προσδιορίζει τη μέγιστη ισχύ που είναι ικανή να προσφέρει η γεννήτρια. Για $\delta=90^\circ \rightarrow \sin\delta=1$ και η (7.10) γίνεται:

$$P_{MAX} = \frac{3V_{\phi}E_A}{X_S} \quad (7.12)$$

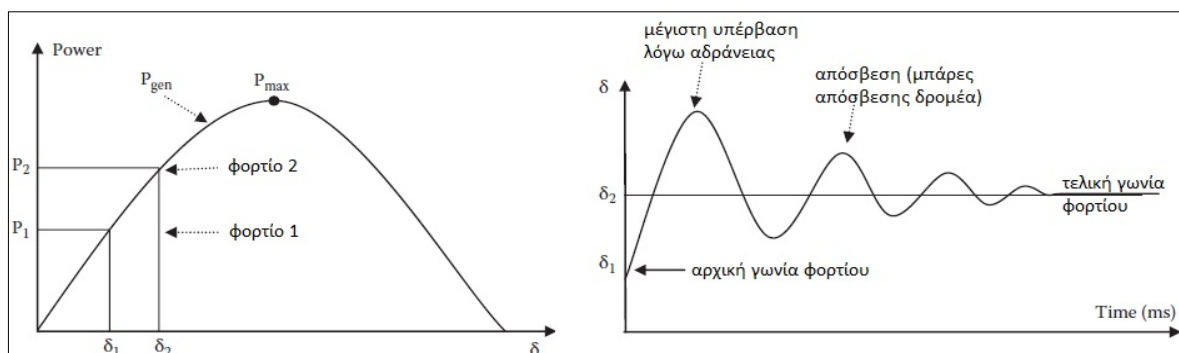
Αυτή η ισχύς ονομάζεται στατικό όριο ευστάθειας της γεννήτριας. Ευστάθεια έχουμε από $0-90^\circ$. Πέρα από αυτό το όριο τα πεδία του δρομέα και του στάτη δεν ακολουθούν το ένα το άλλο με σταθερό ρυθμό (συγχρονισμένα), η γεννήτρια παύει να λειτουργεί σε σύγχρονη λειτουργία και δε μπορεί να αποδώσει σταθερή ισχύ. Συνήθως στην κανονική λειτουργία το δ παίρνει τιμές μεταξύ 25° και 35° .



Σχ. 7.10 Ισχύς συναρτήσει γωνίας φορτίου

Αυτό συμβαίνει γιατί θέλουμε να μην ξεπεράσει το δ τις 90° ακόμη και σε μια μεταβατική κατάσταση. Αν για παράδειγμα, αυξήσουμε ξαφνικά το φορτίο από μια κατάσταση P_1 σε μια κατάσταση P_2 , η γωνία φορτίου θα αυξηθεί από δ_1 σε δ_2 . Λόγω της μηχανικής αδράνειας του δρομέα και της ανθιστάμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής, το σύστημα θα τεθεί σε αρμονική ταλάντωση με απόσβεση, όπως φαίνεται και στο Σχ. 7.10. Σε καμία περίπτωση (σχεδιασμένη, τυχαία, λόγω σφάλματος)

δε θέλουμε η μέγιστη τιμή του δ να ξεπεράσει τις 90° . Για αυτό το λόγο θέτουμε ένα όριο το οποίο το ονομάζουμε μεταβατικό ή δυναμικό όριο ευστάθειας και είναι η ισχύς για την οποία το δ παίρνει τιμές μεταξύ 25° και 35° . Η απόσβεση επιτυγχάνεται με τις μπάρες απόσβεσης στους πόλους που λειτουργούν όπως ο δρομέας στους κινητήρες κλωβού (βλέπε αντίστοιχο κεφάλαιο). Συνοπτικά, κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης οι μπάρες βλέπουν μια σχετική ολίσθηση, στη μαγνητική ροή του στάτη, λόγω αυτής επάγεται ΗΕΔ και επειδή



Σχ. 7.9 Ταλάντωση γωνίας φόρτισης δρομέα κατά την αύξηση φορτίου

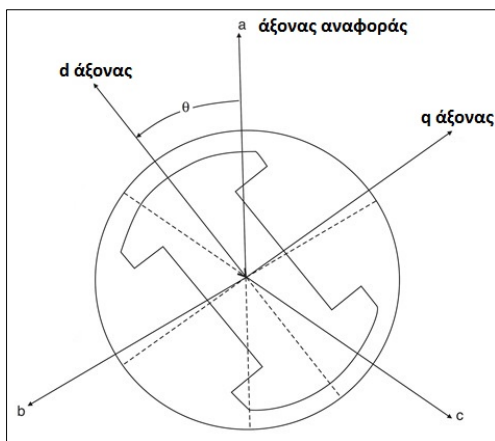
είναι βραχυκυκλωμένες κυκλοφορεί ρεύμα, το οποίο λόγω των ωμικών απωλειών απορροφά ενέργεια και αποσβένει την ταλάντωση μέχρι να την μηδενίσει.

Από την εξ. 7.10 προκύπτει ότι μπορούμε να αυξήσουμε την P_{MAX} (για δεδομένη τάση V_{ϕ}), αν έχουμε χαμηλή σύγχρονη αντίδραση X_S . Οπότε για συστήματα εκκίνησης επαγωγικών κινητήρων με απευθείας σύνδεση (DOL, βλέπε αντίστοιχη ενότητα στους επαγωγικούς κινητήρες), μπορούμε να έχουμε μειωμένες βυθίσεις τάσης επιλέγοντας γεννήτρια με χαμηλή X_S (κάτι το οποίο πιθανώς θα αυξήσει τα ρεύματα βραχυκύκλωσης). Γενικά η μετάβαση της γεννήτριας από κατάσταση χωρίς φορτίο σε πλήρες φορτίο πρέπει να γίνεται σε βήματα (**step loading**). Για να διατηρείται η δυναμική ευστάθεια, κάθε αλλαγή στο φορτίο δε θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 25-30% της ονομαστικής ισχύος (το ακριβές ποσοστό καθορίζεται από το κριτήριο ίσων εμβαδών στη χαρακτηριστική ισχύος-γωνίας το οποίο ξεφεύγει από τους στόχους της διπλωματικής).

Η απαίτηση στατικής και δυναμικής ευστάθειας οριοθετεί κατά ένα μέρος το διάγραμμα λειτουργίας (capability diagram) της Σ.Γ. το οποίο είναι πολύ σημαντικό γιατί θέτει τα όρια καλής και ασφαλούς λειτουργίας της. Προτού προχωρήσουμε στο διάγραμμα λειτουργίας όμως ας εξετάσουμε κάποιες παραμέτρους που ισχύουν ειδικά στις Σ.Γ. με δρομέα έκτυπων πόλων. Μέχρι στιγμής για λόγους ευκολίας αναπτύξαμε το τι συμβαίνει σε Σ.Γ με κυλινδρικό δρομέα λόγω του ότι το αναπτυσσόμενο μαγνητικό πεδίο είναι ομοιόμορφο και εύκολο να αναλυθεί διότι το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα είναι παντού το ίδιο. Στον δρομέα έκτυπων πόλων αυτό δε συμβαίνει.

(1) Δρομέας έκτυπων πόλων (Salient pole rotor)

Επειδή το διάκενο του στάτη και του δρομέα δεν είναι παντού το ίδιο, διακρίνουμε δύο μαγνητικούς άξονες τον εγκάρσιο άξονα q (quadrature axis) και τον ευθύ άξονα d (direct axis). Ο d άξονας συμπίπτει με τον άξονα ενός πόλου του δρομέα και ο q είναι κάθετος ως προς τον άξονα d. (Σχ. 7.11)



Σχ. 7.11 Άξονες δρομέα έκτυπων πόλων

Η μαγνητική αντίσταση στον q άξονα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τον d άξονα κάτι που προκύπτει από την αναλογία των διακένων. Επομένως η μαγνητική ροή είναι πιο εύκολο να αναπτυχθεί κατά μήκος τους d άξονα, άρα υπάρχει μια 'φυσική τάση' να ευθυγραμμιστεί ο d άξονας του δρομέα με το πεδίο του στάτη. Αυτή η φυσική τάση (φερρομαγνητική έλξη) είναι η επαγόμενη ροπή που τείνει να ευθυγραμμίσει τα πεδία του δρομέα και του στάτη τα οποία έχουν μια διαφορά φάσης. Το μέτρο της ροπής αυτής που θα πρέπει να δώσει η κινητήρια μηχανή για να την υπερνικήσει είναι ανάλογο με το ημίτονο της διπλάσιας γωνίας μεταξύ των πεδίων ($\sin 2\delta$). Ο τρόπος με τον

οποίο αναλύονται τα πεδία και τα διανυσματικά διαγράμματα στους δύο άξονες d και q είναι μέσω του μετασχηματισμού του Park που μπορεί να βρεθεί στη σχετική βιβλιογραφία. Εδώ θα παρουσιαστούν μόνο τα αποτελέσματά του.

Για τη Σ.Γ. με έκτυπους πόλους η ισχύς εξόδου (7.10) γίνεται:

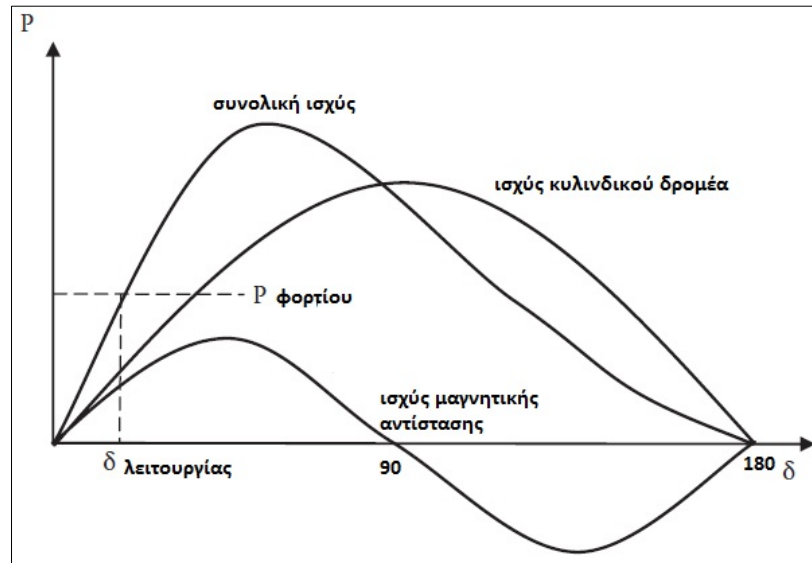
$$P_{OUT} = \frac{3V_{\phi}E_A}{X_d} \sin\delta + \frac{3V_{\phi}^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\delta = P_{conv} \quad (7.13)$$

Και η αντίστοιχη ροπή (7.11):

$$T_{ind} = \frac{3V_{\phi}E_A}{\omega_m X_d} \sin\delta + \frac{3V_{\phi}^2 X_d - X_q}{2\omega_m X_d X_q} \sin 2\delta \quad (7.14)$$

με X_d, X_q τη σύγχρονη αντίδραση κατά τους d, q άξονες. Στις μηχανές με κυλινδρικούς δρομείς $X_d = X_q = X_s$ και μηδενίζεται ο δεύτερος όρος. Στις μηχανές με έκτυπους πόλους ισχύει πάντα $X_d > X_q$.

Το διάγραμμα ισχύος συναρτήσει γωνίας ροπής δ (Σχ. 7.9) στην περίπτωση μηχανής με έκτυπους πόλους γίνεται:

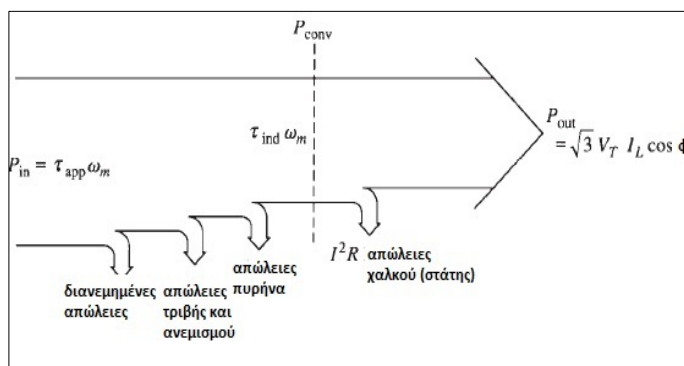


Σχ. 7.12 Ισχύς συναρτήσει γωνίας φορτίου (κυλινδρικός και με έκτυπους πόλους δρομέας)

Όπως διαπιστώνουμε από το διάγραμμα, η μηχανή με έκτυπους πόλους παράγει αυξημένη ισχύ σε μικρές γωνίες ροπής δ και έχει υψηλότερη P_{MAX} η οποία διατίθεται σε μικρότερη γωνία δ . Οπότε σε σχέση με μια μηχανή με κυλινδρικό δρομέα, για το ίδιο φορτίο, λειτουργεί σε μικρότερη γωνία ροπής και έχοντας υψηλότερο P_{MAX} μπορεί να δεχθεί μεγαλύτερες μεταβολές φορτίου προτού προκύψουν προβλήματα δυναμικής ευστάθειας.

(2) Απώλειες Ισχύος Σ.Γ. (Power Losses)

Οι απώλειες ισχύος της Σ.Γ. κατά την μηχανικοηλεκτρική μετατροπή ισχύος συνοψίζονται στο παρακάτω διάγραμμα ροής ισχύος:



Σχ. 7.13 Ροή ισχύος Σ.Γ.

Η ΜΕΚ δίνει ισχύ P_{in} ίση με την εφαρμοζόμενη ροπή τ_{app} επί τη γωνιακή ταχύτητα ω_m η οποία είναι σταθερή αφού έχουμε την απαίτηση σταθερής ηλεκτρικής συχνότητας. Σε αντίθεση με τους επαγωγικούς κινητήρες, εδώ ισχύει $\omega_m = \omega_s$, δηλαδή η γωνιακή ταχύτητα της μηχανής και η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου είναι ίσες.

Η ισχύς που μετατρέπεται στο εσωτερικό της μηχανής σε ηλεκτρική είναι:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m = 3E_A I_A \cos\gamma \quad (7.15)$$

Η επαγόμενη ροπή (7.11), το μέτρο της οποίας μπορεί να εκφραστεί και από τη σχέση:

$$\tau_{ind} = k B_R B_{net} \sin \delta \quad (7.16)$$

,με B_R το μαγνητικό πεδίο του δρομέα, B_{net} το άθροισμα του μαγνητικού πεδίου του δρομέα και του στάτη (δημιουργεί ανθιστάμενη ροπή), το k κατασκευαστική σταθερά της μηχανής και δ η γωνία μεταξύ ΗΕΔ και τάσης ακροδεκτών,

είναι μειωμένη σε σχέση με την εφαρμοζόμενη ροπή τ_{app} , λόγω μηχανικών, μαγνητικών και ηλεκτρικών απωλειών.

Οι μηχανικές απώλειες προκαλούνται λόγω τριβής (διαφόρων τύπων) και είναι σταθερού μεγέθους απώλειες. Συγκεκριμένα είναι απώλειες λόγω τριβής στα έδρανα της ατράκτου και απώλειες ανεμισμού. Προσεγγιστικά μπορούν να βρεθούν από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{losses_mech} = K \left(\frac{\omega_m D}{100} \right)^{2.5} \cdot D \sqrt{L} \quad [W] \quad (7.17)$$

Όπου K σταθερά της μηχανής με τιμή 20-28, για γεννήτριες χαμηλών στροφών με έκτυπου πόλους, L το μήκος και D η διάμετρος του δρομέα σε m.

Οι μαγνητικές απώλειες P_{magn} περιλαμβάνουν κυρίως απώλειες του πυρήνα (δινορρευμάτα και υστέρηση) και λέγονται και απώλειες σιδήρου. Οι απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων που οφείλονται στο στρεφόμενο πεδίο του δρομέα είναι σταθερού μεγέθους απώλειες. Οι μαγνητικές απώλειες στο τύμπανο ονομάζονται και απώλειες φορτίου και αποτελούνται από απώλειες δινορρευμάτων στους αγωγούς του στάτη, απώλειες στον πυρήνα και το σώμα της μηχανής και απώλειες στους αγωγούς απόσβεσης. Αυτές οφείλονται στο ρεύμα που κυκλοφορεί στους αγωγούς του στάτη και την μαγνητική ροή που παράγει (με την προϋπόθεση ότι έχει συνδεθεί φορτίο στους ακροδέκτες της γεννήτριας). Στο διάγραμμα ροής ισχύος (Σχ. 7.13), η P_{magn} συντίθενται από τις κατανεμημένες απώλειες και τις απώλειες πυρήνα.

Οι ηλεκτρικές απώλειες ή απώλειες χαλκού, είναι ωμικές απώλειες τύπου $I^2 R$. Στους αγωγούς του τυμπάνου είναι ίσες με $P_{loss_el_arm} = 3 I_A^2 R_A$, ενώ στα τυλίγματα του πεδίου (δρομέας) είναι ίσες με $P_{loss_el_field} = I_f^2 R_f = P_{exc}$, όπου P_{exc} η ισχύς διέγερσης του πεδίου που τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα.

Ο συντελεστής απόδοσης n_γ της Σ.Γ. υπολογίζεται διαιρώντας την ωφέλιμη ηλεκτρική ισχύ P_{out} που λαμβάνουμε στους ακροδέκτες της γεννήτριας (πολικά ή φασικά μεγέθη), με τη μηχανική ισχύ που δίνει η κινητήρια μηχανή P_{in} , συν την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνουμε για τη διέγερση του πεδίου, P_{exc} (ωμικές απώλειες του δρομέα). Η τιμή του εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας της μηχανής.

$$n_\gamma = \frac{P_{out}}{P_{in} + P_{exc}} = \frac{\sqrt{3} V_T I_L \cos \varphi}{\tau_{app} \omega_m + I_f^2 R_f} \quad (7.18)$$

ή ακόμα πιο αναλυτικά:

$$n_\gamma = \frac{P_{out}}{P_{in} + P_{exc}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{exc} + P_{losses_el_armature} + P_{losses_mech} + P_{magn}} \quad (7.19)$$

iv) Διάγραμμα Λειτουργίας Σ.Γ. (Capability Diagram)

Στην ενότητα αυτή θα μας απασχολήσει το διάγραμμα λειτουργίας της Σ.Γ. Τα ερωτήματα που θα απαντηθούν είναι πως κατασκευάζεται, τι αντιπροσωπεύει και γιατί είναι τόσο σημαντικό κατά την φάση της μελέτης του ηλεκτρικού ισολογισμού.

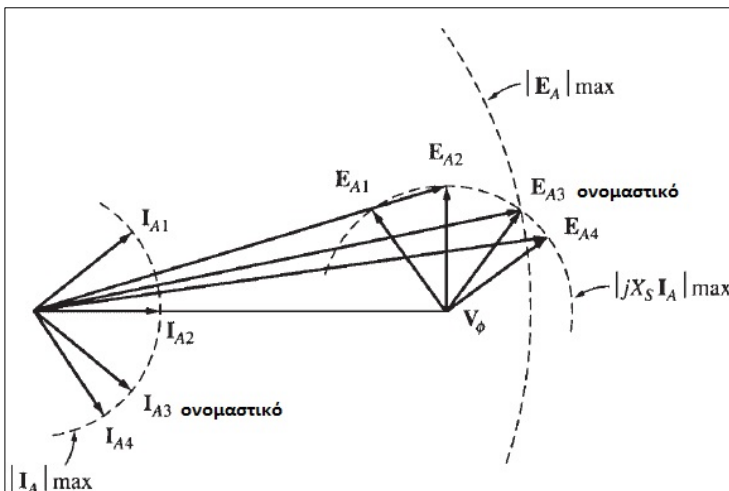
Οι παράγοντες που καθορίζουν το όριο ισχύος, άρα και την ονομαστική ισχύ, της Σ.Γ. , είναι η μέγιστη ροπή που μπορεί να παραλάβει στον άξονα από την ΜΕΚ και το ανώτατο όριο θέρμανσης των τυλιγμάτων της. Γενικά, η μηχανική ισχύς που μπορεί να παραλάβει η Σ.Γ. στον άξονά της είναι μεγαλύτερη από αυτήν που προδιαγράφεται στα ονομαστικά της χαρακτηριστικά. Οπότε τα όρια ισχύος στην μόνιμη κατάσταση (steady state), καθορίζονται τελικά από τα ανώτατα όρια θερμοκρασίας των τυλιγμάτων του τυμπάνου και του πεδίου, για συνεχή λειτουργία. Αυτά προκύπτουν από την κλάση της μόνωσής τους και είναι συνάρτηση των ωμικών απωλειών (τύπου I^2R).

Το μέγιστης έντασης ρεύμα στο τύμπανο (στάτης) I_A καθορίζει τη μέγιστη φαινόμενη ισχύ S της γεννήτριας, αφού η τάση στους ακροδέκτες V_ϕ είναι γνωστή και θέλουμε να είναι σταθερή. Η φαινόμενη ισχύς είναι ίση με:

$$S = 3V_\phi I_A \quad [VA] \tag{7.20}$$

Αυτή είναι η ονομαστική ισχύς που αναγράφεται στην πινακίδα της γεννήτριας και την μετρούμε σε Volt Ampere, VA και όχι σε kW (με τα οποία μετρούμε την πραγματική ισχύ). Ο λόγος είναι ότι η ισχύς που μετατρέπεται σε θερμότητα στο τύμπανο ($P_{loss_el_arm} = 3I_A^2 R_A$) δεν εξαρτάται από τον συντελεστή ισχύος. Επίσης, η ισχύς που μετατρέπεται σε θερμότητα στα τυλίγματα του δρομέα (ισχύς διέγερσης, $P_{exc} = I_f^2 R_f$), περιορίζει το μέγιστο ρεύμα διέγερσης I_f άρα και την μέγιστη τιμή της ΗΕΔ E_{A_max} .

Εφόσον λοιπόν έχουμε θερμοικούς περιορισμούς στο μέτρο της E_{A_max} , στο μέτρο του I_A και η V_ϕ είναι δεδομένη και αμετάβλητη, το διανυσματικό διάγραμμα της Σ.Γ θα είναι όπως στο σχήμα:



Σχ. 7.14 Καθορισμός συντελεστή ισχύος από ρεύμα διέγερσης

Η E_{A_max} , που περιορίζεται από το I_f , παριστάνεται από έναν κύκλο ακτίνας ίσης με $|E_{A_max}|$. Αντίστοιχα το ρεύμα του τυμπάνου I_A , και η πτώση τάσης σε αυτό $jX_S I_A$ (αγνοούμε όπως είπαμε την R_A αφού $R_A \ll X_S$), παριστάνονται από κύκλους ακτίνας ίσης $|I_A|$ και $|jX_S I_A|$ αντίστοιχα. Όπως βλέπουμε η γωνία ϕ του ρεύματος σε σχέση με την δεδομένη φασική τάση V_ϕ , μπορεί να μεταβάλλεται, αλλά μόνο για μία τιμή της I_{A3} , η ΗΕΔ E_{A3} έχει μέτρο ίσο με

$|E_{A_max}|$. Άρα ο συντελεστής ισχύος $\cos\phi$ καθορίζεται από τη γωνία αυτή, και αντιπροσωπεύει τον ονομαστικό συντελεστή ισχύος. Η γεννήτρια μπορεί να λειτουργεί και σε άλλους συντελεστές ισχύος αλλά αν, όπως βλέπουμε στο σχήμα, το $\cos\phi$ μειωθεί κάτω από ένα όριο (περίπτωση $I_{A4}, jX_S I_{A4}$), η τιμή της ΗΕΔ E_{A4} ξεπερνά αυτή της μέγιστης $|E_{A_max}|$. Τότε το τυλίγμα διέγερσης θα υπερθερμανθεί και θα καεί. Αν θέλουμε να μειώσουμε κάτω από τα επιτρεπτά όρια της ονομαστικής λειτουργίας τον συντελεστή

ισχύος, θα πρέπει (με δεδομένο το V_ϕ) να μειώσουμε αναγκαστικά και το μέτρο του $|I_A|$, δηλαδή τελικά την ονομαστική ισχύ S της γεννήτριας.

Το παραπάνω διανυσματικό διάγραμμα είναι αρκετά διαφωτιστικό στην κατανόηση του πως το ρεύμα διέγερσης επηρεάζει πέρα από την ΗΕΔ και τον συντελεστή ισχύος. Ο συντελεστής ισχύος είναι το μέγεθος που έμμεσα μας μαρτυρεί πόση είναι η διαθέσιμη πραγματική ισχύς P από την συνολική (φαινόμενη) ισχύ S της γεννήτριας ή αντίστροφα, πόσο είναι το μέτρο της άεργης ισχύος Q . Θα ήταν όμως πιο πρακτικό ένα διάγραμμα που θα λάμβανε υπόψιν τα όρια λειτουργίας που αναφέραμε πιο πάνω αλλά θα είχε άξονες με μονάδες ισχύος (P, Q). Αυτό μπορεί να προκύψει από το διανυσματικό διάγραμμα, πολλαπλασιάζοντας τα μεγέθη της τάσης με τον παράγοντα $\frac{3V_\phi}{X_S}$ (θυμίζουμε $P_{MAX} = \frac{3V_\phi E_A}{X_S}$) ώστε να αλλάξουμε την κλίμακα των αξόνων από V σε VA .

Σύμφωνα με το **Σχ. 7.15** και λόγω των (7.4-7.7), (7.10)

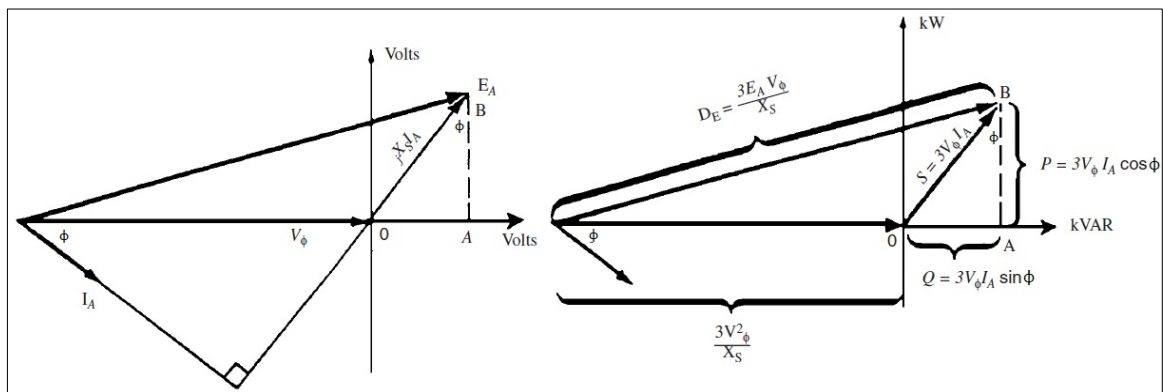
Η πραγματική ισχύς (AB) είναι:
$$P = 3V_\phi I_A \cos\phi = \frac{3V_\phi}{X_S} (X_S I_A \cos\phi) \quad (7.21)$$

Η άεργη ισχύς (OA) είναι:
$$Q = 3V_\phi I_A \sin\phi = \frac{3V_\phi}{X_S} (X_S I_A \sin\phi) \quad (7.22)$$

Η ΗΕΔ E_A μετασχηματίζεται σε:
$$\frac{3V_\phi E_A}{X_S} = P_{MAX} \quad (7.23)$$

Η πτώση τάσης στη σύγχρονη αντίδραση (OB) μετασχηματίζεται σε:
$$3V_\phi I_A = S \quad (7.24)$$

Η αρχή των αξόνων στο σχ. 2.18 βρίσκεται στο $-V_\phi$, άρα στο σχ. 2.19 θα βρίσκεται στο $-\frac{3V_\phi^2}{X_S}$

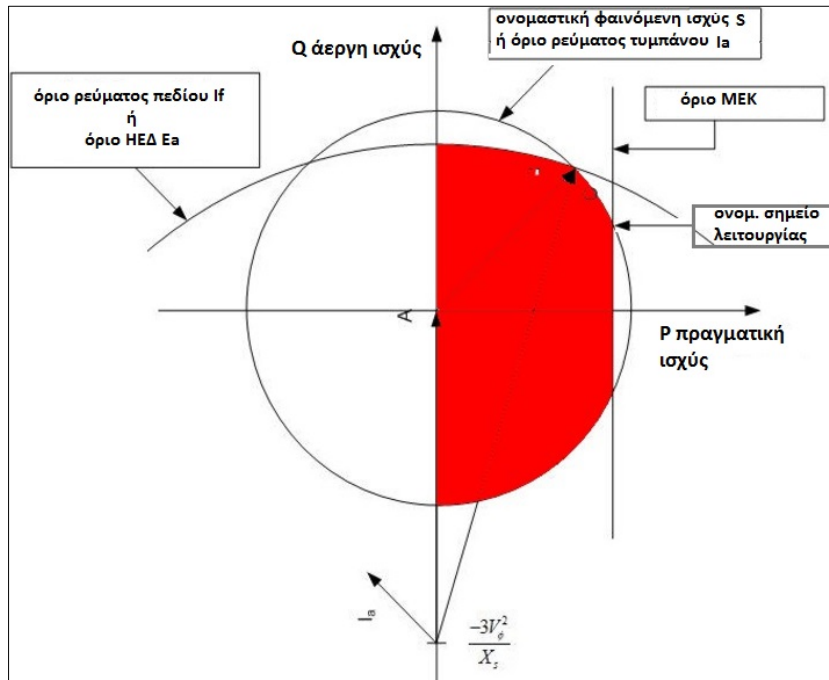


Σχ. 7.15 Μετασχηματισμός διανυσματικού διαγράμματος από μεγέθη τάσης σε μεγέθη ισχύος

Αν στο διανυσματικό διάγραμμα ισχύος δουλέψουμε όπως στο **σχ.7.14**, ορίσουμε τον οριζόντιο άξονα ως τον άξονα της πραγματικής ισχύος P , τον κάθετο άξονα ως τον άξονα της άεργης ισχύος Q και με δεδομένη την φασική τάση V_ϕ , θα λάβουμε μια γραφική παράσταση (**Σχ. 7.16**) όπου:

-ο γεωμετρικός τόπος μέγιστης έντασης στο ρεύμα του τυμπάνου I_A (θεωρώντας $I_A \sim I_A X_S$), παρουσιάζεται ως γεωμετρικός τόπος μέγιστης (ονομαστικής) φαινόμενης ισχύος $S = P + jQ$.

-ο γεωμετρικός τόπος μέγιστης έντασης στο ρεύμα του πεδίου I_f , άρα και η E_{A_max} , παρουσιάζεται ως κύκλος ακτίνας ίσης με $\frac{3V_\phi E_A}{X_S}$ με κέντρο το σημείο $(0, -\frac{3V_\phi^2}{X_S})$.



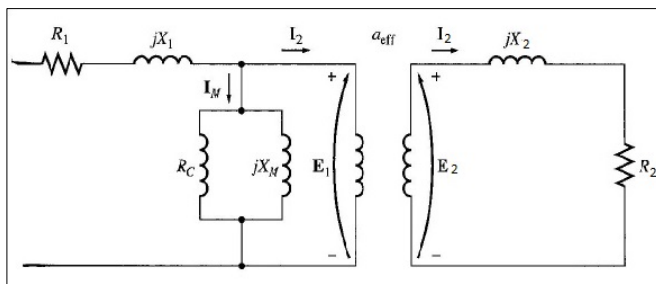
Σχ. 7.16 κατασκευή διαγράμματος λειτουργίας Σ.Γ.

Τα σημεία ασφαλούς λειτουργίας βρίσκονται μέσα στην επιφάνεια με το κόκκινο χρώμα. Το μέρος αριστερά από τον άξονα Q, δε μας ενδιαφέρει (σημεία λειτουργίας ως σύγχρονος κινητήρας). Η επιφάνεια κάτω από τον άξονα P, αντιστοιχεί σε χωρητικό συντελεστή ισχύος, ενώ η πάνω επιφάνεια αντιστοιχεί σε επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Το όριο λειτουργίας της MEK θα μπορούσε να είναι και εκτός του κύκλου σε περίπτωση υπερδιαστασιολόγησής της.

7.1.2 Κινητήρας επαγωγής

ι) Ισοδύναμο Κύκλωμα-Ροπή

Η χαρ/κή ροπήσολίσθησης (Σχ. 2.31) παρουσιάζει ενδιαφέρον τόσο από ηλεκτρολογική όσο και από μηχανολογική σκοπιά, για αυτό το λόγο θα επιμείνουμε λίγο περισσότερο στην ανάλυσή της. Καταρχήν, ας θεωρήσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα. Αυτό μοιάζει με το ισοδύναμο κύκλωμα των μετασχηματιστών καθώς τα ρεύματα που διαρρέουν στο στάτη (πρωτεύον) δημιουργούν με επαγωγή τάσεις στο δρομέα (δευτερεύον). Σε αντίθεση όμως με τους μετασχηματιστές, στους επαγωγικούς κινητήρες η μαγνητική ροή δε διαρρέει σε συνεχές σιδηρομαγνητικό υλικό αλλά στο διάκενο αέρα μεταξύ του στάτη και του δρομέα. Το ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή στο οποίο βασίζεται το μονοφασικό ισοδύναμο του επαγωγικού κινητήρα φαίνεται παρακάτω:



Σχ. 7.17 Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα μετασχηματιστή

ματιστές, μοντελοποιεί τις απώλειες ισχύος πυρήνα και τη μείωση της ροής στο δρομέα διότι η ύπαρξη του διάκενου αυξάνει τη μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος και μειώνει τη ροή που εμπλέκεται στο δευτερεύον.

I_m : ρεύμα μαγνήτισης (έως και 40% του ρεύματος του στάτη I_1), $I_2 = I_1 - I_m$

X_m : αντίδραση μαγνήτισης (magnetizing reactance), τουλάχιστον 15 φορές μεγαλύτερη της αντίδρασης σκέδασης στάτη.

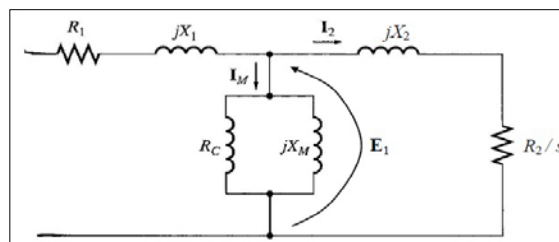
R_c : αντίσταση που αντιπροσωπεύει τις απώλειες ισχύος πυρήνα.

Τα υπόλοιπα μεγέθη με δείκτη R (rotor), είναι τα αντίστοιχα μεγέθη του δρομέα. Για τον ιδανικό μετασχηματιστή ξέρουμε ότι ο λόγος μετασχηματισμού a ισούται με $a = \frac{N_1}{N_2}$, με N_1 τον αριθμό των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος και N_2 τον αριθμό των τυλιγμάτων του δευτερεύοντος. Αντίστοιχα για τους κινητήρες κλωβού ο λόγος αυτός γίνεται (ανά φάση)

$a = \sqrt{\frac{m_1 k_{w1} N_1}{m_2 k_{w2} N_2}}$, με m_1 τον αριθμό φάσεων του στάτη (εδώ 3), m_2 τον αριθμό ανά ζεύγος

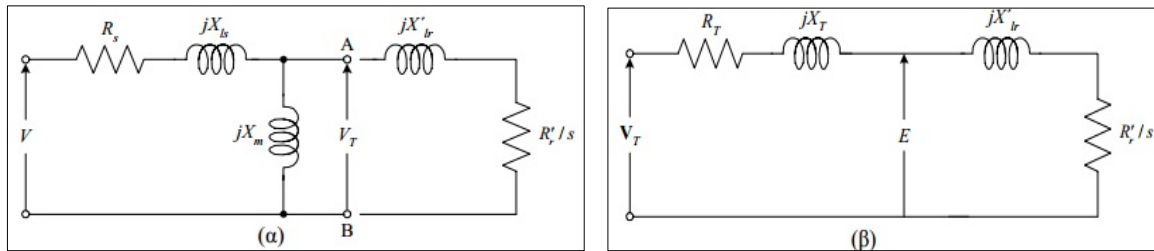
πόλων και k_{w1}, k_{w2} τους συντελεστές τυλιγμάτων στάτη και δρομέα αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας το λόγο a βρίσκουμε τις ισοδύναμες αντιστάσεις και αντιδράσεις του δρομέα ανηγμένες στην πλευρά του στάτη: $X'_2 = a^2 X_2$, $R'_2 = a^2 R_2$.

Συμπεριλαμβάνοντας την ολίσθηση στο παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα έχουμε το τελικό ανά φάση κυκλωματικό ισοδύναμο του επαγωγικού κινητήρα στην επόμενη σελίδα, όπου τάσεις και ρεύματα έχουν αναχθεί στη συχνότητα του στάτη (τροφοδοσίας).



Σχ. 7.18 Τελικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα κλωβού

Για την ανάλυση σε μόνιμη κατάσταση, χρησιμοποιούμε ακόμη πιο απλουστευμένα ισοδύναμα κυκλώματα, συνήθως με χρήση του θεωρήματος Thevenin (ισοδύναμο κύκλωμα με μηδενισμό της αντίστασης του εγκάρσιου κλάδου). Εδώ αφαιρούμε την αντίσταση μαγνήτισης του εγκάρσιου κλάδου. Τις απώλειες πυρήνα τις λαμβάνουμε υπόψιν μετά την ηλεκτρομηχανική μετατροπή ισχύος, προσθέτοντάς τες στις μηχανικές απώλειες.



Σχ. 7.19 (α) αρχικό κύκλωμα, χωρίς απώλειες πυρήνα

(β) με χρήση θεωρήματος Thevenin

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση κατά Thevenin, αριστερά των A,B, ισούται με το άθροισμα της εν σειρά αντίστασης R_1 και αντίδρασης X_1 και της παράλληλα συνδεδεμένης σε αυτές μαγνητικής αντίδρασης X_m .

$$\overline{Z}_T = R_T + jX_T = \frac{(R_1 + jX_1)jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (7.25)$$

Η ισοδύναμη τάση αντίστοιχα είναι:

$$\overline{V}_T = \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} V \quad (7.26)$$

, και το μέτρο της είναι:

$$|\overline{V}_T| = \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} V \quad (7.27)$$

Αν λάβουμε υπόψιν ότι $X_1 + X_m \gg R_1$ και $X_m \gg X_1$, οι παραπάνω σχέσεις απλοποιούνται ακόμη περισσότερο και τελικά έχουμε:

$$|\overline{V}_T| = \frac{X_m}{X_1 + X_m} V, \quad \overline{Z}_T = R_T + jX_T = R_1 \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2 + jX_1 \quad (7.28)$$

Το ρεύμα που διαρρέει τον δρομέα είναι ίσο με:

$$\overline{I}'_2 = \frac{\overline{V}_T}{\overline{Z}_T + \overline{Z}'_2} = \frac{\overline{V}_T}{\left(R_T + \frac{R'_2}{s} \right) + j(X_1 + X'_2)} \quad (7.29)$$

και το μέτρο του είναι ίσο με:

$$|\overline{I}'_2| = \frac{|\overline{V}_T|}{\sqrt{\left(R_T + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (7.30)$$

Η ισχύς που προσδίδεται από το στάτη στο δρομέα (για τις τρεις φάσεις), ονομάζεται ισχύς διακένου (air gap power). Η ισχύς στο δρομέα είναι ίση κατά τα γνωστά από νόμους Ohm, Joule:

$$P_{ag} = 3 \cdot I'_2{}^2 \cdot \frac{R'_2}{s} \quad (7.31)$$

Η ροπή που παρέχεται από τον στάτη, ονομάζεται εσωτερική μαγνητική ροπή του κινητήρα (δεν είναι η ροπή που διατίθεται στον άξονα), είναι ίση με:

$$T = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (7.32)$$

Αντικαθιστώντας τελικά έχουμε για τη ροπή:

$$T = \frac{3V_T^2 R'_2}{\omega_s} \cdot \frac{1}{s \left(\left(R_T + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right)} \quad (7.33)$$

και αυτή είναι η σχέση από την οποία παράγεται η χαρ/κή στο **Σχ. 2.31**.

Κατά την εκκίνηση όπου η ταχύτητα του δρομέα $n_r = 0 \rightarrow s = 1$, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$T_{εκκ} = \frac{3V_T^2 R'_2}{\omega_s} \cdot \frac{1}{(R_T + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad (7.34)$$

Αν ο δρομέας περιστρέφεται με ορισμένη ολίσθηση και αυξηθεί το φορτίο, τότε θα αυξηθεί η ολίσθηση ενώ θα μειωθεί ο αριθμός στροφών. Το ρεύμα στο δρομέα και η ροπή θα αυξηθούν. Η αύξηση αυτή γίνεται μέχρι ένα ορισμένο σημείο, το οποίο ονομάζεται σημείο ανατροπής και η αντιστοιχούσα ροπή λέγεται ροπή ανατροπής, T_{max} . Η ροπή γίνεται μέγιστη όταν η προσδιδόμενη ισχύς στην αντίσταση $\frac{R'_2}{s}$ γίνει μέγιστη, δηλαδή όταν $\frac{R'_2}{s} = \sqrt{R_T + (X_1 + X'_2)}$. Τότε η ολίσθηση στη μέγιστη ροπή είναι: $s_{Tmax} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_T + (X_1 + X'_2)}}$

Επομένως η μέγιστη ροπή είναι:

$$T_{max} = \frac{3V_T^2 R'_2}{2\omega_s} \cdot \frac{1}{R_T + \sqrt{R_T^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (7.35)$$

Πέρα από αυτό το σημείο η ροπή μειώνεται. Η περιοχή από το συγχρονισμό μέχρι το σημείο ανατροπής είναι η περιοχή ευστάθειας.

7.2 Πίνακες

	Equipment	Essential	Non essential	Important
1	Emergency Generator start -up	GL		
2	Emergency Lighting	GL		
3	Navigation Light	GL		
4	Radio Communications	GL		
5	Fire Detection & fire alarm	GL		
6	Emergency Fire pump	GL		
	Fire Pump			DNV
7	Steering gear	GL,		
8	Auxiliary boiler	GL		
9	Bilge & ballast pump	GL		DNV
10	Boiler firing system	GL		
11	Control & regulating system for essential equipment	GL		
12	W.T. door control	GL		
13	Engine room vent fan	GL	GL	DNV
14	Foam pump	GL		
15	F.O. Transfer & Booster Pump	GL,		DNV
16	Thruster	GL,		DNV
17	Lighting	GL		
18	L.O. Pump	GL,		
19	Main Engine auxiliary blower	GL,		
20	Startup & control air system	GL	GL	DNV
21	Windlass	GL	GL	
22	Controllable pitch propeller (CPP)	GL, DNV		

Πιν. 7.1 Κατάταξη φορτίων ανάλογα την κρισιμότητά τους*

Essential consumers per GL

Essential consumers are consumers, which are required for The maneuverability and safety of the ship

The safety of passengers and crew

The drive specific to the type of vessel on ships with a special class notation (dredger)

The preservation of unobjectionable condition of cargo (e.g. on refrigerated cargo vessels with class KAZ)

Essential consumers for which supply from an emergency source of power is specified

Essential consumers per DNV

Essential equipment, which needs to be in continuous operation for maintaining the vessel's maneuverability with regard to propulsion and steering.

Nonessential consumers per GL

Nonessential consumers are those which, in order to maintain the source of electric power, may briefly be taken out of service, and whose temporary disconnection does not impair the maneuverability of the ship or the safety of the passengers, crew, vessel or machinery.

Important services per DNV

Equipment which need not be in continuous operation for maintaining the vessel's maneuverability, but which is necessary to maintain the vessel's main functions as defined in Ptl. Ch.I Sec.2 or which according to these Rules is subject to approval when installed.

Non important per DNV

Equipment, which is not essential or important according to the above, is classified as nonimportant.

*Handbook to IEEE Standard 45 Mohammed M. Islam

Cable Construction		Overall Diameter, D	Minimum Internal Bending Radius
Insulation	Outer Covering		
Thermoplastic or thermosetting with circular copper conductor	Unarmored or unbraided	$D \leq 25 \text{ mm (1 in.)}$	4 D
		$D > 25 \text{ mm}$	6 D
	Metal braid screened or armored	Any	6 D
	Metal wire or metal-tape armored or metal-sheathed	Any	6 D
	Composite polyester/metal laminate tape screened units or collective tape screening	Any	8 D
Thermoplastic or thermosetting with shaped copper conductor	Any	Any	8 D
Mineral	Hard metal-sheathed	Any	6 D

Πιν. 7.2 Επιτρεπτή ακτίνα καμπυλότητας καλωδίων ισχύος κατά ABS-Part4-Ch.8-Sec.4-21.11

SHORT CIRCUIT CURRENT

Maximum permissible short circuit current.
0,6/1 kV +90°C shipboard cables.

Based on formula:

$$I_k = 226 \times \frac{S}{\sqrt{t}} \times \sqrt{\ln \frac{234 + T_k}{234 + T_b}}$$

Formula 1:

$$I_k = 146 \times \frac{S}{\sqrt{t}}$$

I_k = Maximum permissible short circuit current.
S = Cross-section of the conductor in mm².
t = Duration of the short circuit in s.
T_k = Maximum rated conductor temperature, short circuit, °C
T_b = Maximum rated conductor temperature, normal, °C

Formula 1: For 0,6/1kV cable with XLPE or HF90 with maximum operating temperature of +90°C (T_b) and short circuit temperature of +250°C (T_k).

έλεγχος για αντοχή σε βραχυκύκλωμα

Cross-section of the conductor in mm ²	Duration of the short circuit in s.					
	0,2	0,5	1	2	3	10
1,5	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
2,5	0,8	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
4	1,3	0,8	0,6	0,4	0,3	0,2
6	2,0	1,2	0,9	0,6	0,5	0,3
10	3,3	2,1	1,5	1,0	0,8	0,5
16	5,2	3,3	2,3	1,7	1,3	0,7
25	8,2	5,2	3,7	2,6	2,1	1,2
35	11,4	7,2	5,1	3,6	3,0	1,6
50	16,3	10,3	7,3	5,2	4,2	2,3
70	22,9	14,5	10,2	7,2	5,9	3,2
95	31,0	19,6	13,9	9,8	8,0	4,4
120	39,2	24,8	17,5	12,4	10,1	5,5
150	49,0	31,0	21,9	15,5	12,6	6,9
185	60,4	38,2	27,0	19,1	15,6	8,5
240	78,4	49,6	35,0	24,8	20,2	11,1
300	97,9	61,9	43,8	31,0	25,3	13,9
Short circuit current in kA						

SHORT TIME DUTY

Short time duty according to the standard IEC 60092-352 0,6/1 kV +90°C shipboard cables.

If a cable is intended to supply motor or equipment operating for periods of half an hour or one hour, its current rating given in table "current rating", may be increased using the relevant correction factors given by formula:

$$\text{correction factor} = \sqrt{\frac{1,12}{1 - \exp(-t_s/T)}}$$

(**t_s** = service time, min. **T** = Time constant, min.)

T = 0,245 x d^{1,35}
(d = Overall diameter of the cable, mm.)

συντελεστής υπερφόρτισης η (έλεγχος καλωδίου για εκκίνηση κινητήρων)

Overall diameter of the cable, mm.	Service time, min.		Time constant, min.	Critical duration, min.
	30	60		
1	1,058	1,058	0,245	0,735
2	1,058	1,058	0,625	1,87
3	1,058	1,058	1,08	3,24
4	1,058	1,058	1,59	4,78
5	1,058	1,058	2,15	6,46
6	1,058	1,058	2,75	8,26
7	1,058	1,058	3,39	10,2
8	1,059	1,058	4,06	12,2
9	1,059	1,058	4,76	14,3
10	1,061	1,058	5,48	16,5
20	1,126	1,066	14,0	41,9
30	1,255	1,105	24,2	72,5
40	1,403	1,173	35,6	107
50	1,554	1,254	48,2	145
60	1,705	1,341	61,6	185

Πιν. 7.3 Συντελεστής υπερφόρτισης και θερμικά επιτρεπόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης

X	Degree of Protection of persons against contact with live or moving parts inside the enclosure and protection of equipment against ingress of solid bodies	Y	Degree of Protection against ingress of liquids
0	No protection of persons against contact with live or moving parts inside the enclosure. No protection of equipment against ingress of solid foreign bodies.	0	No protection
1	Protection against accidental or inadvertent contact with live or moving parts inside the enclosure by a large surface of the human body, for example, a hand but not protection against deliberate access to such parts. Protection against ingress of large solid foreign bodies.	1	Protection against drops of condensed water: Drops of condensed water falling on the enclosure shall have no harmful effect.
2	Protection against contact with live or moving parts inside the enclosure by fingers. Protection against ingress of medium size solid foreign bodies.	2	Protection against drops of liquid: Drops of falling liquid shall have no harmful effect when the enclosure is tilted at any angle up to 15° from the vertical.
3	Protection against contact with live or moving parts inside the enclosure by tools, wires or such objects of thickness greater than 2.5 mm. Protection against ingress of small solid foreign bodies.	3	Protection against rain: Water falling in rain at an angle up to 60° with respect to the vertical shall have no harmful effect.
4	Protection against contact with live or moving parts inside the enclosure by tools, wires or such objects of thickness greater than 1 mm. Protection against Ingress of small solid foreign bodies.	4	Protection against splashing: Liquid splashed from any direction shall have no harmful effect.
5	Complete protection against contact with live or moving parts inside the enclosure. Protection against harmful deposits of dust. The ingress of dust is not totally prevented, but dust cannot enter in an amount sufficient to interfere with satisfactory operation of the equipment enclosed.	5	Protection against water-jets: Water projected by a nozzle from any direction under stated conditions shall have no harmful effect.
6	Complete protection against contact with live or moving parts inside the enclosure. Protection against ingress of dust.	6	Protection against conditions on ships' decks (deck watertight equipment): Water from heavy seas shall not enter the enclosure under prescribed conditions.
<p>Note that the higher the numeral of the 1st and 2nd characteristic, the greater degree of protection the enclosure offers:</p> <p>e.g. Jet-proof IP55 meets all the less onerous degrees such as IP22, IP23, IP34 and IP54.</p>		7	Protection against immersion in water: It must not be possible for water to enter the enclosure under stated conditions of pressure and time.
		8	Protection against indefinite immersion in water under specified pressure. It must not be possible for water to enter the enclosure.

Πιν. 7.4 Προστασία περιβλήματος (κινητήρες)/ Ingress Protection ,IP X Y

*Practical marine electrical knowledge, Dennis Hall

DNV Rules Pt4/Ch.8/Sec.1/B201/B1 Table

Πίνακας Β1 Σχεδίαση συστήματος, απαιτήσεις εγγράφων πιστοποίησης			
Αντικείμενο	Έγγραφο/σχέδιο τεκμηρίωσης	Πρόσθετη περιγραφή	Προς έγκριση (AP) ή προς πληροφόρηση (FI) κατόπιν αιτήσεως (R)
Σύστημα Ηλεκτρικής Ισχύος	Γενικό μονογραμμικό σχέδιο (one line diagram)		AP
	Μονογραμμικά σχέδια για καταναλωτές/Κύριος πίνακας	Για: —Ε.Ρ. συστήματα ισχύος —Σ.Ρ. συστήματα συσσωρευτών —Αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS) συστήματα	AP
	Ηλεκτρικός Ισολογισμός (Electric load analysis)	Για: —Ε.Ρ. συστήματα ισχύος —Σ.Ρ. συστήματα συσσωρευτών —Αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS) συστήματα	AP
	Φιλοσοφία σχεδίασης ηλεκτρικού συστήματος	—για συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης. — γενικά για συστήματα ισχύος με περιγραφή όλων των επιχειρησιακών τρόπων λειτουργίας εκτός αν είναι κατανοητοί από το γενικό μονογραμμικό σχέδιο	FI
	Υπολογισμοί βραχυκυκλωμάτων (short circuit calculations)	Υπολογισμοί για μονοφασικό σφάλμα γείωσης θα συμπεριλαμβάνεται σε συστήματα με γειωμένο τον ουδέτερο	FI
	Υπολογισμοί αρμονικής παραμόρφωσης (harmonic distortion calculations)	Απαιτείται σε περίπτωση που το 20% και άνω της ισχύος των εγκατεστημένων καταναλωτών, σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ, οδηγείται από διατάξεις ημιαγωγών	FI
	Υπολογισμοί πτώσεως τάσης (Voltage drop calculations)	Κατόπιν αιτήσεως σε περίπτωση που καταναλωτής με ισχύ το 30% και άνω της τροφοδοσίας του (γεννήτρια, μετασχηματιστής) , εκκινείται απευθείας (DOL)	FI, R

	Ανάλυση /έλεγχος διακριτικότητας (discrimination analysis)	Το έγγραφο θα καλύπτει: —προστασία γεννήτριας —κυκλώματα εντός του κύριου πίνακα (Sec.13 A801) —κυκλώματα εντός του πίνακα ανάγκης (Sec.13 A802) —συσσωρευτές και συστήματα αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS)	AP
	Σχέδιο διάταξης εξοπλισμού	Περιλαμβάνοντας τις θέσεις των πηγών ενέργειας, πίνακες, υποπίνακες διανομής για το κύριο και για το σύστημα ανάγκης, UPS, συσσωρευτές. Για τα ανωτέρω θα καταγράφονται σχέδιο εισόδων, περιοχές υψηλού κινδύνου για πυρκαγιά	FI
	Ανάλυση αξιοπιστίας και ανάλυση επίδρασης κατάστασης αστοχίας	Απαιτείται σε περίπτωση που δεν υπάρχει ξεχωριστή πηγή ανάγκης (Sec.2 C104.) Διαφορετικά, κατόπιν αιτήσεως	AP
Εκκινητές (starters)	Σχηματικά διαγράμματα ηλεκτρικού εξοπλισμού	Εκκινητές για τις κρίσιμες υπηρεσίες	AP
Καλώδια (cables)	Φιλοσοφία επιλογής καλωδίωσης	Για όλα τα πλοία που εμπίπτουν στους κανονισμούς (Pt4.Ch.8)	AP
Επείγουσα διακοπή (emergency stop)	Σχηματικά διαγράμματα ηλεκτρικού εξοπλισμού	Επείγουσα διακοπή ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης, αντλιών, ανεμιστήρων που μπορεί να λειτουργούν με μη ασφαλή τρόπο	AP
Εγκαταστάσεις σε επικίνδυνες περιοχές (hazardous locations)	Πίνακας εγκαταστάσεων αντιεκρηκτικού τύπου (Ex- installations)	Βασισμένος στο εγκεκριμένο σχέδιο κατάταξης περιοχών	AP
Εγκαταστάσεις σε επικίνδυνες περιοχές (hazardous locations)	Σχέδιο επικίνδυνων περιοχών	Ένα εγκεκριμένο σχέδιο κατάταξης περιοχών όπου προστίθεται ο ηλεκτρικός εξοπλισμός σε επικίνδυνες περιοχές	FI

Πιν. 7.5 Έγγραφα πιστοποίησης για τη σχεδίαση της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης

7.3 Λογισμικό ανάλυσης ηλεκτρικών δικτύων SKM Powertools

7.3.1 Γενικά στοιχεία

Το SKM Powertools είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά πακέτα για την προσομοίωση ηλεκτρικών δικτύων με τη βοήθεια υπολογιστή και χρησιμοποιείται από εταιρείες όπως η General Electric, Cutler-Hammer, Square-D ενώ απαριθμεί πάνω από 35000 χρήστες παγκοσμίως.

Περιλαμβάνει πολλά modules ανάλυσης και προσομοίωσης ηλεκτρικών δικτύων, το πρώτο από αυτά δημιουργήθηκε στο UCLA Computer Center της California το 1978 και ονομάζεται DAPPER (Distribution Analysis for Power Planning Evaluation and Reporting). Αργότερα αναπτύχθηκαν περισσότερα modules, όπως το CAPTOR (Computer Aided Plotting for Time Overcurrent Reporting), το A.Fault (ANSI) IEC.FAULT (IEC-909), το module προσομοίωσης I*SIM και αρμονικής ανάλυσης HI_WAVE όπου με την έλευση των Windows 95 σχεδιάστηκαν εκ νέου και ενοποιήθηκαν στο λογισμικό πακέτο PTW (Powertools for Windows).

Η πλήρης σουίτα του λογισμικού περιλαμβάνει τα εξής modules:

CAPTOR	Protection co-ordination
DAPPER	Load-flow and voltage drop analysis
IECFault 60909	Short-circuit analysis to IEC60909 (formally IEC909)
IECFault 61363	Short-circuit analysis to IEC61363 (formally IEC363)
A_FAULT	Short-circuit analysis to ANSI C37 standards
TMS	Motor starting studies
Equipment Evaluation	Evaluates short-circuit and load ratings of all components
DC Study Modules	DC Study Modules
I*SIM	Dynamic simulation
HI_WAVE	Harmonic analysis
Unbalanced	Unbalanced load-flow and short-circuit
Distribution Reliability	A module to study the financial effects of power system failure
Arc Flash Evaluation	Arc energy calculation and protective clothing recommendation
Ground Mat	Substation earth grid design analysis
Cable-3D	Cable pulling tension calculations
Arc Calc	Calculate arcing fault current, and fault clearing time.

Η έκδοση 7.0 που χρησιμοποιήθηκε συμμορφώνεται με τις παρακάτω συνιστώμενες πρακτικές:

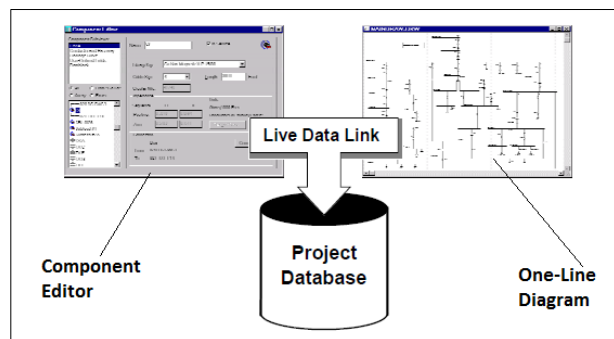
- IEEE 399-1997: Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis
- IEEE 141-1993: Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants
- IEEE 242-2001: Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems
- IEEE 519 Standard: Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- IEEE 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding
- IEEE 1584 – 2002/2004a: Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations
- NFPA 70E – 2012: Standard for Electrical Safety in the Workplace
- CSA-Z462 – Canadian Standards Association (Calculation methods identical to NFPA 70E 2012)
- NESC 2012 – National Electrical Safety Code
- IEC 60909 – Short-circuit currents in three-phase AC systems
- IEC 61363 – Electrical installations of ships and mobile and fixed offshore units

7.3.2 Χρήση του λογισμικού

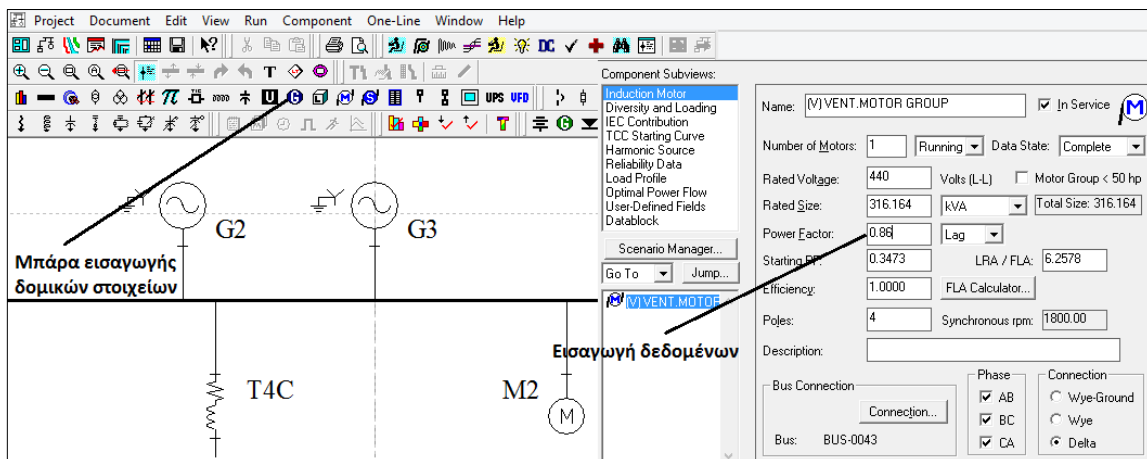
Το λογισμικό χρησιμοποιεί την έννοια του project, όπου εργασία εκτελούμε εντός του προγράμματος (δημιουργία ζυγών, γεννητριών, καλωδίων κινητήρων κλπ) αποθηκεύεται εντός του project στο οποίο μπορούμε να ορίσουμε διαφορετικά scenarios με διαφορετικές τοπολογίες, διαφορετικά δομικά στοιχεία και διαφορετικές μελέτες και να τα συγκρίνουμε σε κάθε στιγμή.

Ο συμβατικός τρόπος εισαγωγής των δεδομένων είναι μέσω του One-Line Diagram, OLD και του Component Editor, CE αλλά υπάρχει και ο γρήγορος τρόπος εισαγωγής μεγάλου πλήθους δεδομένων μέσω απλών αρχείων κειμένου (comma separated values, .csv). Αντίστοιχος είναι και ο τρόπος εξαγωγής των δεδομένων ώστε να τα χρησιμοποιήσουμε σε κάποιο λογιστικό φύλλο ή να τα εισάγουμε σε κάποιο άλλο πρόγραμμα όπως το ETAP και το PSAT για το MATLAB. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής όλων των σχεδίων και γραφημάτων σε .dwg μορφή για επεξεργασία σε προγράμματα όπως το Autocad.

Μέσω του OLD, εισάγουμε τα δομικά στοιχεία και διαμορφώνουμε την βασική τοπολογία του δικτύου. Υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας πολλών διαφορετικών μονογραμμικών όπου σε κάθε ένα από αυτά μπορούμε να εμφανίζουμε μόνο το μέρος του δικτύου που μας ενδιαφέρει. Για κάθε στοιχείο που εισάγουμε μπορούμε να ορίσουμε

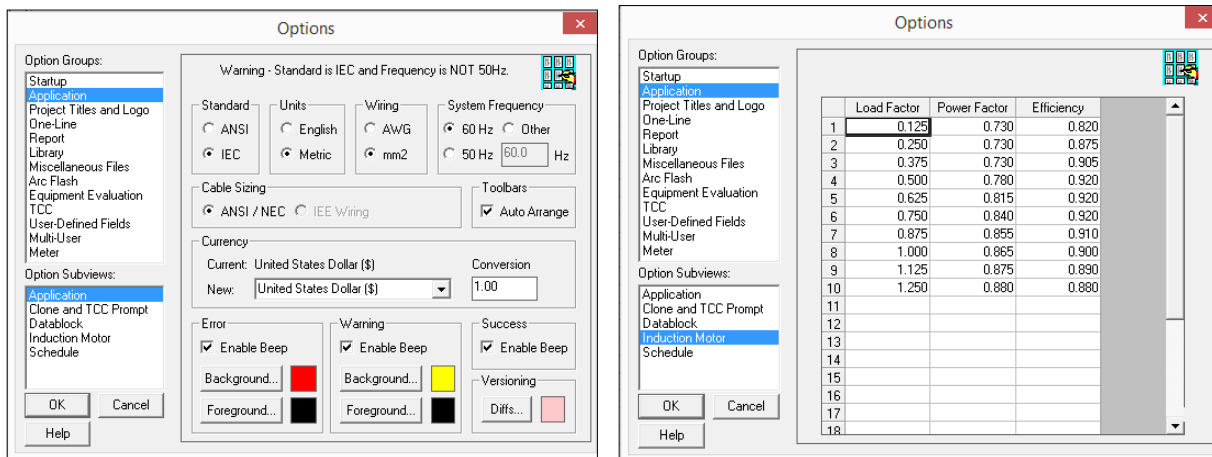


τα δεδομένα του στο CE. Η επιπλέον δυνατότητα που προσφέρει ένα πρόγραμμα εμπορικής χρήσης όπως το SKM σε σχέση με κάποιο πρόγραμμα ακαδημαϊκής χρήσης, εκτός άλλων, είναι το πλήθος των δεδομένων από πραγματικά βιομηχανικά εξαρτήματα (cables, breakers, fuses, relays, MCCS, switchgears, motors, transformers, exciters, governors, FACTS κλπ) μέσω της βιβλιοθήκης του η οποία είναι και τροποποιήσιμη.



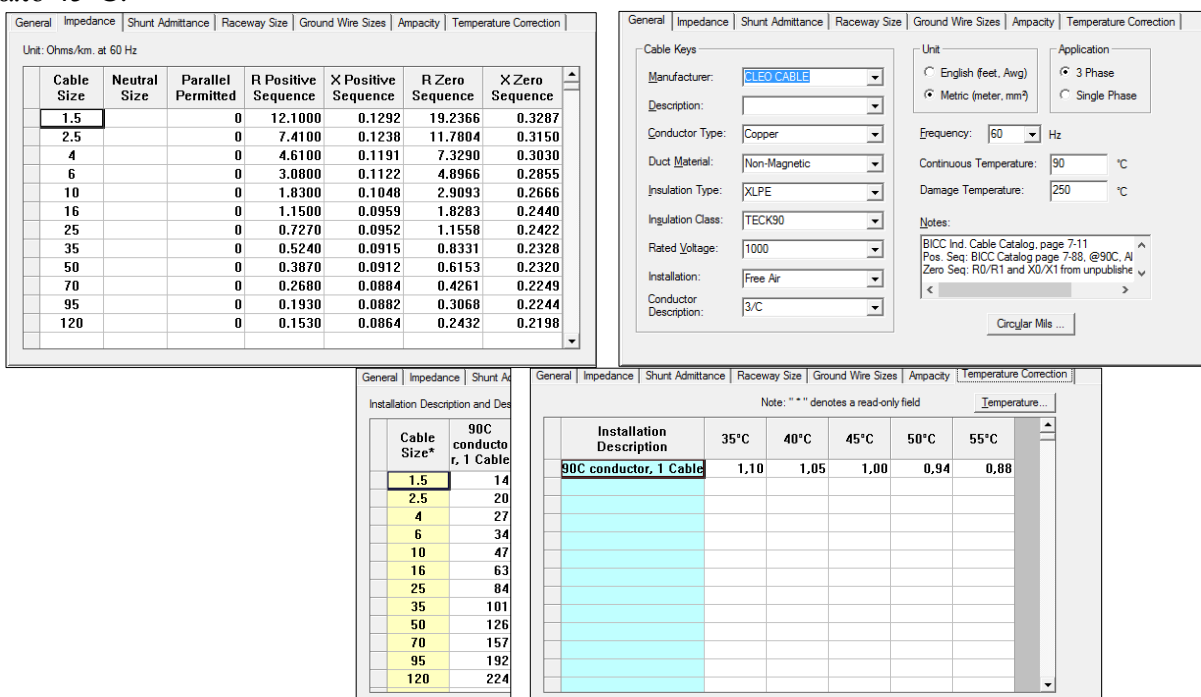
7.3.3 Ρυθμίσεις

Το πρώτο μας μέλημα είναι να πάμε στις ρυθμίσεις (options) του project και να ορίσουμε τις διαστάσεις μας και τη συχνότητα του δικτύου. Θα χρησιμοποιήσουμε τα πρότυπα της IEC και όχι της ANSI, μετρικό σύστημα αλλά τη συχνότητα του δικτύου θα την θέσουμε 60Hz. Επίσης σημαντικό είναι, από τη στιγμή που τα φορτία μας είναι ως επί το πλείστο επαγωγικοί κινητήρες, να ορίσουμε τις τιμές των Load Factor, Power factor, Efficiency στον σχετικό πίνακα, διαφορετικά, θα χρησιμοποιηθούν οι προρυθμισμένες τιμές.



Σχ. 7.20 Γενικές ρυθμίσεις δικτύου και πεδίο τιμών επαγωγικών κινητήρων

Στη συνέχεια ορίζουμε τα στοιχεία της καλωδίωσης που θα χρησιμοποιήσουμε. Πάμε στη βιβλιοθήκη του προγράμματος και προσθέτουμε νέο καλώδιο, ναυτικού τύπου με τα εξής χαρακτηριστικά: πολύκλωνο, τριφασικό, τριπολικό, αγωγό από χαλκό, μόνωση XLPE, κλάση μόνωσης TECK90 (συνεχής θερμοκρασία αγωγού 90°C, θερμοκρασία βλάβης 250°C). Ακολούθως δημιουργούμε τον πίνακα της σύνθετης αντίστασης ανα διατομή από στοιχεία του κατασκευαστή στη θερμοκρασία αναφοράς. Τέλος, στις καρτέλες Ampacity και Temperature correction ορίζουμε την ικανότητα μεταφοράς ανά διατομή και τη διόρθωση θερμοκρασίας για θερμοκρασία περιβάλλοντος διαφορετική από 45°C.



Σχ. 7.21 Ορισμός καλωδίων ισχύος

7.3.4 Εισαγωγή δεδομένων

7.3.4.1 Γεννήτριες:

Component Subviews:

- Synchronous Generator
- IEC Contribution
- Decrement Curve
- Harmonic Source
- Reliability Data
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...

Go To Jump...

DG1

Name: DG1 In Service

Rated Voltage: 450 Volts (L-L) Data State: Complete

Rated Size: 1300.0 kW

Power Factor: 0.800 Lag FLA: 2084.9

Poles: 8 Synchronous rpm: 900.00

Initial Operating Conditions:

Schedule: Volts & Angle (SB)

Angle: 0.00 Deg.

Voltage: 1.000 pu

Bus Connection: GEN1 TERMINAL

Phase: A B C

Connection: Wye-Ground Wye Delta

Synchronous generator	
Όνομαστικά μεγέθη γεννήτριας (τάση, ισχύς κλπ)	
Size	επιλογές kW / kVA
Power factor	επιλογές Lag /Lead
Poles	
Schedule	επιλογές PV / PQ / slack bus όπως ορίστηκαν στη μελέτη φορτίου
Connection	Y->IT σύστημα
IEC Contribution	
Ανά μονάδα σύνθετες αντιστάσεις ευθέως και εγκάρσιου άξονα, τιμές για τη σταθερή, μεταβατική και υπομεταβατική κατάσταση	
Αντίστοιχα για τις χρονικές σταθερές	
Όριο διέγερσης και κορεσμός	
Πτώση τάσης στα τυλίγματα του στάτη	
Ορισμός βάσης για τους ανά μονάδα υπολογισμούς	

Component Subviews:

- Synchronous Generator
- IEC Contribution
- Decrement Curve
- Harmonic Source
- Reliability Data
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...

Go To Jump...

DG1

Synchronous Generator Contribution Data (IEC Format)

Per Unit Impedance

xd': 0.1190 Rgf: 0.0050 kVA Base: 1625.0

xq': 0.1750 Rg: 0.0050 Voltage Base: 450

xo: 0.1750 ro: 0.0050 Link with Rated

Neutral Impedance: R (Ohms) 0.0000 X (Ohms) 0.0000 Calc...

Steady State AC Decay Specification (Ik)

Included in Steady State Excitation Limits: 1.3

Xdsat: 1.60

Transient and Steady State Fault Study Parameters

xd': 0.2280 xd: 1.2400 Ra: 0.0112

Td': 36.00 ms Td: 344.00 ms Tdc: 28.00 ms

7.3.4.2 Μετασηματιστές:

Component Subviews:

- 2-Winding Transformer
- Transformer Impedance
- Automatic LTC
- Damage Curve
- Reliability Data
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...

Go To Jump...

MAIN TRANSF.1

Name: MAIN TRANSF.1 In Service Incomplete

Manufacturer: SQUARE D Type: DRY

Library... Link to Lib

Nominal kVA: 135.0 Full Load kVA: 135.0 Do Not Size

Connection: Primary Delta Secondary Delta

Rated Voltage: 440 V (L-L) 225 V (L-L)

Bus Voltage: 440 V (L-L) 220 V (L-L)

Full Load Amps: 177.1 346.4

Tap %: 0.00 0.00

Phase Shift Angle: 0.0 deg Link INST Protection

Bus Connection: Connections...

Type: Three Phase Standard Shell Single Phase Mid Tap Single Phase

From: BUS-0131 To: BUS_TRANSF1_SEC

Expand Shrink

2 winding transformer	
Επιλέγουμε από βιβλιοθήκη Μ/Σ ξηρού τύπου της SQUARE-D	
Nominal/ Full Load KVA	
Connection	Σύνδεση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος (Δ-Δ)
Όνομαστικές τάσεις	
Τύπος Μ/Σ	Τριφασικός, επιλογές standard shell/ core κλπ
Transformer Impedance	
ωμική και επαγωγική συνιστώσα τάσης βραχυκύκλωσης	
απώλειες κενού φορτίου	

Component Subviews:

- 2-Winding Transformer
- Transformer Impedance**
- Automatic LTC
- Damage Curve
- Reliability Data
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...

Go To Jump...

MAIN TRANSF 1

Sequence Impedance in Percent on Transformer Base

Calculate from:
%Z and %R...
Per Unit...
%Z and R%...
%Z and KWLoss...

Positive: %R 1.6700 %X 3.0500
Zero: 9999 9999

Neutral Impedance

R (Ohms) X (Ohms)
Primary: 0.00000 0.00000 Calc...
Secondary: 0.00000 0.00000 Calc...

Sizing Info

Do Not Size

Sizing Criteria: Demand
Size To/LF Rating: Full Load kVA

No Load Loss in Percent on Transformer Base

P + iQ
0.4800 0.0000

Transformer Base: Nominal KVA

7.3.4.3 Κινητήρες:

Component Subviews:

- Induction Motor**
- Diversity and Loading
- IEC Contribution
- TCC Starting Curve
- Harmonic Source
- Reliability Data
- Load Profile
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...

Query Jump...

1_MAIN/VACUUM COND. CSW PUMP In Service **M**

Number of Motors: 1 Running Data State: Complete

Rated Voltage: 440 Volts (L-L) Motor Group < 50 hp
Rated Size: 65.000 kW Total Size: 65
Power Factor: 0.870000 Lag
Starting PF: 0.4700 LRA / FLA: 6.1500
Efficiency: 0.9366 FLA Calculator...

Poles: 4 Synchronous rpm: 1800.00

Description:

Bus Connection: Connection...
Phase: AB BC CA
 Wye-Ground Delta

Bus: BUS-V.C.SW.Pump1

Component Subviews:

- Induction Motor**
- Diversity and Loading**
- IEC Contribution
- TCC Starting Curve
- Harmonic Source
- Reliability Data
- Load Profile
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...

Query Jump...

Motor Diversity

Load Factor: 0.7900 Calculate...
Load Type: Constant kVA
Constant Impedance model is automatically used for motors defined as "Starting"

Motor Loading Table

	Load Factor	Power Factor	Efficiency
1	0.125	0.730	0.820
2	0.250	0.730	0.875
3	0.375	0.730	0.905
4	0.500	0.780	0.920

Fixed As Rated Global (Options) Individual

Load Association

Group: N01 GSP Priority:

Component Subviews:

- Induction Motor
- Diversity and Loading
- IEC Contribution**
- TCC Starting Curve
- Harmonic Source
- Reliability Data
- Load Profile
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...

Query Jump...

Induction Motor Contribution Data (IEC Format)

Per Unit Impedance

FLA / LRA: 0.1626 Link with LRA/FLA
R/X: 0.1700 Link with Starting PF

kVA Base: 79.8 Link with Rated
Voltage Base: 440

Neutral Impedance: R (Ohms) 0.0000 X (Ohms) 0.0000

IEC 61363 Data

Stator Resistance/Rotor Resistance: 1.6190
I_d: 40.866 ms T_{dc}: 25.241 ms

Induction motor	
Αριθμός κινητήρων, ορισμός motor group	
Ονομαστική τάση	
Ισχύς	επιλογές hp/ kW /kW input / kVA
Συντελεστής ισχύος *	Power factor (lag)
Συντελεστής ισχύος κατά την εκκίνηση	
Βαθμός απόδοσης *	Efficiency
Πόλοι	
Τρόπος σύνδεσης	επιλογές Y / Δ / Y με γείωση
Diversity & Loading	
Συντ. λειτουργίας *	Load factor
Τύπος φορτίου	επιλογές constant Kva/ constant impedance / constant current
Motor loading table *	οι επιλογές που μας δίνονται, θα εξηγηθούν παρακάτω

IEC Contribution	
FLA/LRA	Full Load Amps / Locked Rotor Amps (ανάλογα με τη σχεδίαση του δρομέα, τιμές από NEMA)
R/X **	Ανά μονάδα Resistance (stator+rotor) / Impedance
Ορισμοί βάσης για ανά μονάδα υπολογισμούς	
Stator Resistance / Rotor Resistance (όπως ορίζονται στο πρότυπο IEC 61363 για κινητήρες < ή > 100kW)	
Χρονικές σταθερές	
TCC Starting Curve	
Σε αυτή την καρτέλα μπορούμε να επιλέξουμε τη μέθοδο εκκίνησης και να δημιουργήσουμε την καμπύλη βλάβης του κινητήρα	

7.3.4.3.1 Παρατηρήσεις

* Ο βαθμός απόδοσης (n), ο συντελεστής φορτίου (PF) και ο συντελεστής ισχύος (LF) είναι αλληλεξαρτώμενα μεγέθη. Η ζήτηση σε kVA είναι ίση με:

$$S = LF \cdot \frac{P_{in}}{PF} = LF \frac{P_{out}}{n \cdot PF}, [kVA] \quad (7.36)$$

- Αν το πεδίο Motor loading table το ορίσουμε ως “Fixed as rated”, κατά τους υπολογισμούς του demand load analysis και load flow analysis, οι τιμές PF , n , θα ληφθούν ίσες με τις τιμές που έχουμε ορίσει στην καρτέλα “Induction Motor”, θα διατηρηθούν δηλαδή στην τιμή που τις έχουμε ορίσει, ανεξάρτητα του LF .
- Αν ορίσουμε το πεδίο ως “Global”, θα ληφθούν υπόψιν οι τιμές που έχουμε ορίσει στα options (default setting) και είναι οι ακόλουθες:

Load Factor	Power Factor	Efficiency
0.125	0.730	0.820
0.250	0.730	0.875
0.375	0.730	0.905
0.500	0.780	0.920
0.625	0.815	0.920
0.750	0.840	0.920
0.875	0.855	0.910
1.000	0.865	0.900
1.125	0.875	0.890
1.250	0.880	0.880

Πιν. 7.6 Ίσυντελεστές ισχύος και απόδοσης συναρτήσει του συντελεστή φορτίου

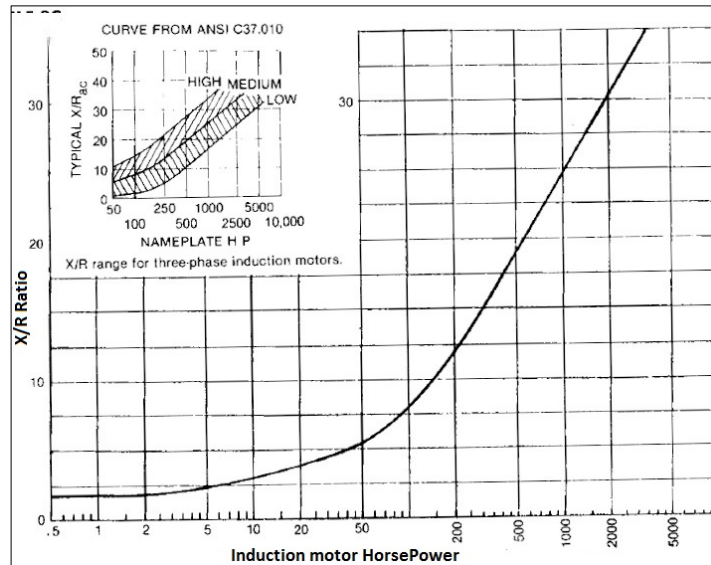
Αυτές οι τιμές προέρχονται από τη NEMA και είναι μια καλή προσέγγιση της σχέσης μεταξύ των αλληλεξαρτώμενων μεγεθών. Όμως παρουσιάζονται τα εξής προβλήματα:

1. Οι τιμές αυτές ισχύουν για σχετικά μικρούς κινητήρες
2. Ο βαθμός απόδοσης στην ονομαστική ισχύ δείχνει πως πρόκειται για κινητήρες χαμηλής ενεργειακής κλάσης (όπως ορίστηκε στην ενότητα 2.6.4). Στα πλοία, ειδικά σε μεγάλες ισχύεις, χρησιμοποιούνται κινητήρες με βαθμό απόδοσης ακόμη και 96%.

Παρόλα αυτά, για κινητήρες που δεν έχουμε επαρκή στοιχεία, είναι μια καλή προσέγγιση. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο ότι οι ονομαστικές τιμές (δηλαδή για $LF=1$) που ορίστηκαν στην καρτέλα “Induction Motor” δε λαμβάνονται υπόψιν.

- Αν ορίσουμε το πεδίο ως “Individual”, μπορούμε να ορίσουμε τη σχέση εξάρτησης $n(LF)$ και $PF(n)$ από shop tests κατασκευαστών όπου συνήθως έχουμε τιμές n , PF , για LF στο 25% , 50%, 75% και 100%.

****** Οι τιμές R/X των τριφασικών επαγωγικών κινητήρων έχουν ληφθεί λαμβάνοντας υπόψιν το πρότυπο ANSI Standard C37.010



Σχ. 7.22 Επαγωγικοί κινητήρες X/R - Horsepower

7.3.4.4 Καλώδια:

Component Subviews:

- Cable
- Impedance
- Conductor and Raceway
- Damage Curve
- Reliability Data
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...
Go To Jump...

CBL-0010

Expand Shrink

Name: CBL-0010 In Service

Library... Link to Lib Data State: Incomplete

Manufacturer: CLEO CABLE Description:

Conductor Type Duct Material Insul Type Insul Class Volts (L-L)
Copper Non-Magnetic XLPE TECK90 1000

Conductor Descr: 3/C Installation: Free Air

Cable Size: 25 mm² Circular Mills: 0

Conductors in Parallel/Phase: 1 Length: 10.0 Meters Do Not Size

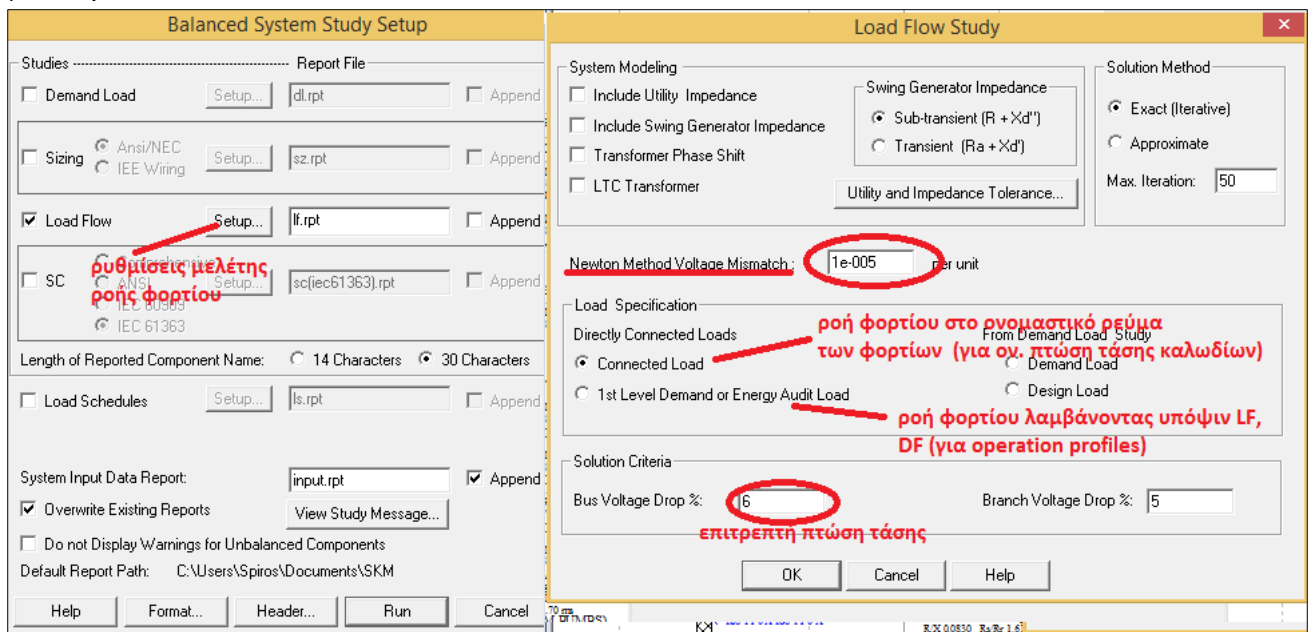
Bus Connection
Conn...
From: MAIN SWBD 1 440V
To: BUS-ME.JC.Fw.Pump1

Phase: Matrix
 A Update Matrix from Sequence
 B Z Matrix...
 C

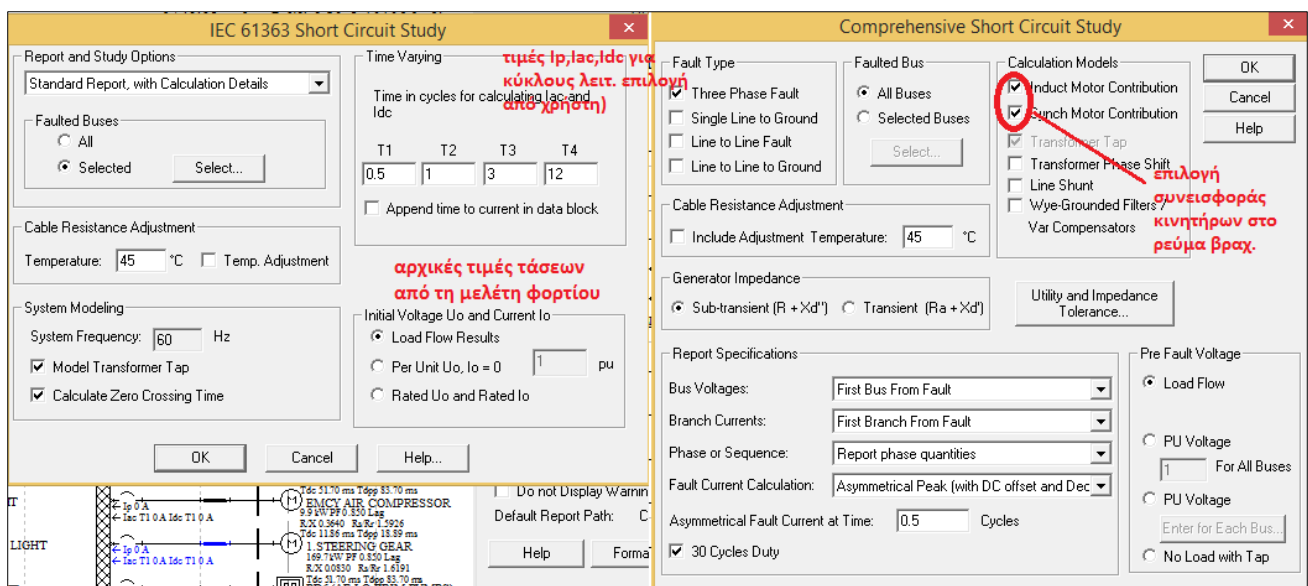
Cable
Από τη βιβλιοθήκη επιλέγουμε το ναυτικού τύπου καλώδιο που έχουμε δημιουργήσει.
Επιλέγουμε τυποποιημένο μέγεθος διατομής,
πλήθος παράλληλων αγωγών,
μήκος καλωδίου.
Impedance
Αυτή η καρτέλα δεν είναι τροποποιήσιμη εφόσον έχουμε επιλέξει το πεδίο link to lib.

7.3.4.5 Μελέτες

Από το menu → balanced system studies επιλέγουμε τη μελέτη ροής φορτίου. Έχοντας ορίσει από τον CE των γεννητριών, τουλάχιστον μία ως ‘slack bus’ (Voltage 1.00 per unit, Angle 0.0 deg.), μπορούμε να τρέξουμε τη μελέτη ροής φορτίου. Αρχικά, για να υπολογίσουμε την μέγιστη πτώση τάσης κατά μήκος των αγωγών στο ονομαστικό φορτίο (μη λαμβάνοντας υπόψιν, συντελεστές φορτίου και ετεροχρονισμού) τικάρουμε την επιλογή ‘connected load’. Επίσης, όλα τα φορτία που έχουμε δημιουργήσει είναι συνδεδεμένα. Ακολούθως, για να λάβουμε τις αρχικές συνθήκες για τη μελέτη βραχυκυκλώματος, απενεργοποιούμε τα φορτία που δε λειτουργούν στην κατάσταση λειτουργίας που θα μελετήσουμε (cargo operation profile), και επιλέγουμε το ‘1st level demand or energy audit load’. Τρέχουμε τη μελέτη με μία γεννήτρια σε λειτουργία (slack bus), και ακολούθως μοιράζουμε την ενεργό και άεργο ισχύ στη δεύτερη γεννήτρια την οποία ορίζουμε ως PV bus, και ξανατρέχουμε την μελέτη.



Για το βραχυκύκλωμα, έχοντας ως αρχικές συνθήκες τα αποτελέσματα της μελέτης ροής φορτίου, τρέχουμε τη μελέτη για τους επιλεγμένους ζυγούς. Έχουμε την επιλογή της εύρεσης των ρευμάτων βραχυκύκλωσης σύμφωνα με τα πρότυπα IEC61363, IEC60909, ANSI, ή χρησιμοποιώντας μητρώα αγωγιμοτήτων (Comprehensive study).



// --- Induction Motor ---														
//<ComponentName>	<In Service>	<Rated Size kw>	<Efficiency>	<Load Factor>	<Priority>	<PF>	<X"d>	<X/R>	<R/X> pu	<Base kVA>	<Base Voltage >	<Rs/Rr>	<Tdpp>	<Tdc>
1.AIR COND. COMPRESSOR	In	86.000	0.9257	0.6000	CONT.	0.800	0.1330	93.383	0.1071	116.1	440	15.926	64.22	40.32
1.AIR COND. PLANT FAN	In	17.300	0.9153	0.5500	CONT.	0.850	0.1670	31.400	0.3185	22.2	440	15.926	21.59	13.56
1.ATMOS.COND.CSW PUMP	In	11.000	0.8871	0.7500	CONT.	0.820	0.1330	25.872	0.3865	15.1	440	15.926	17.79	11.17
1.AUX.BOILER.FDWP.HTR.BR	In	24.000	0.9125	0.7500	CONT.	0.850	0.1670	38.982	0.2565	30.9	440	16.191	27.08	16.73
1.AUX.BOILER FEED W.PUMP	In	51.700	0.9299	0.7500	CONT.	0.850	0.1330	67.349	0.1485	65.4	440	15.926	46.32	29.08
1.BALLAST PUMP	In	460.000	0.9500	0.7300	CONT.	0.850	0.1330	209.897	0.0476	569.7	440	16.191	145.82	90.06
1.BILGE FIRE&G/S PUMP	Out	175.000	0.9589	0.3200	INT.	0.860	0.1670	137.766	0.0726	212.2	440	16.191	69.47	42.91
1.BOILER COMBUST.AIR FAN	In	98.000	0.9351	0.7500	CONT.	0.850	0.1670	100.886	0.0991	123.3	440	15.926	62.52	39.26
1.COMP.BOIL.BRN.PMP&PRHT	Out	21.000	0.9333	0.5400	CONT.	0.850	0.1670	35.541	0.2814	26.5	440	15.926	29.02	18.22
1.COMP.BOILER.FEED W.PMP	Out	5.500	0.8462	0.7500	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	7.6	440	15.926	18.89	11.86
1.COMP.BOILER FO PUMP	Out	2.640	0.8000	0.7500	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	3.9	440	15.926	17.19	10.80
1.DECK MACH.FWD.HYD.FWD	Out	125.000	0.9498	0.8000	CONT.	0.800	0.1670	115.681	0.0864	164.5	440	16.191	69.47	42.91
1.DECK MACH.HYD.PACK.AFT	Out	125.000	0.9498	0.8000	CONT.	0.800	0.1670	115.681	0.0864	164.5	440	16.191	69.47	42.91
1.ER VENT.FAN	In	55.000	0.9275	0.6500	CONT.	0.850	0.1670	70.228	0.1424	69.8	440	15.926	42.19	26.49
1.GE FO CIRC. PUMP	In	1.300	0.8125	0.4600	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	1.9	440	15.926	13.75	8.64
1.GE FO SUPPLY PUMP	In	1.300	0.8125	0.3600	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	1.9	440	15.926	13.75	8.64
1.HFO TRANSFER PUMP	In	18.500	0.9110	0.2720	INT.	0.760	0.1670	32.716	0.3057	26.7	440	15.926	25.76	16.17
1.IGS BLOWER	In	155.000	0.9500	0.5000	CONT.	0.850	0.1670	129.594	0.0772	192.0	440	16.191	83.70	51.70
1.LT COOLING FW PUMP	In	75.000	0.9506	0.7600	CONT.	0.850	0.1670	85.869	0.1165	92.8	440	15.926	51.71	32.47
1.MAIN AIR COMPRESSOR	In	88.000	0.9460	0.3200	INT.	0.850	0.1670	94.681	0.1056	109.4	440	15.926	52.90	33.22
1.MAIN LO PUMP	Out	132.000	0.9517	0.6600	CONT.	0.850	0.1213	119.134	0.0839	163.2	440	16.191	69.47	42.91
1.MAIN VAC.COND.CSW PUMP	In	65.000	0.9366	0.7900	CONT.	0.870	0.1613	78.407	0.1275	79.8	440	15.926	53.92	33.86
1.ME AUX BLOWER	Out	125.000	0.9498	0.7500	CONT.	0.850	0.1670	115.681	0.0864	154.8	440	16.191	69.47	42.91
1.ME FO CIRCULATING PUMP	Out	6.400	0.8767	0.4900	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	8.6	440	15.926	18.89	11.86
1.ME FO SUPPLY PUMP	Out	4.600	0.8214	0.4100	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	6.6	440	15.926	18.10	11.36
1.ME JACKET COOL.FW PUMP	Out	33.000	0.9218	0.7500	CONT.	0.850	0.1670	49.037	0.2039	42.1	440	15.926	32.75	20.56
1.ME START UP PUMP	Out	26.000	0.9286	0.8000	CONT.	0.850	0.1670	41.268	0.2423	32.9	440	15.926	27.51	17.27
1.STEERING GEAR	Out	160.000	0.9428	0.2500	CONT.	0.850	0.1670	131.710	0.0759	199.7	440	16.191	83.70	51.70
2.AIR COND. COMPRESSOR	In	86.000	0.9257	0.6000	CONT.	0.800	0.1670	93.383	0.1071	116.1	440	15.926	51.71	32.47
2.AIR COND. PLANT FAN	In	17.300	0.9153	0.5500	CONT.	0.860	0.1670	31.400	0.3185	22.0	440	15.926	25.76	16.17
2.ATMOS.COND.CSW PUMP	Out	11.000	0.8871	0.7500	CONT.	0.820	0.1428	25.872	0.3865	15.1	440	15.926	20.84	13.09
2.AUX.BOILER.FDWP.HTR.BRN	Out	24.000	0.9125	0.7500	CONT.	0.850	0.1670	38.982	0.2565	30.9	440	15.926	25.76	16.17
2.AUX.BOILER FEED W. PUMP	In	51.700	0.9299	0.7500	CONT.	0.850	0.1670	67.349	0.1485	65.4	440	15.926	34.38	21.59
2.BALLAST PUMP	In	460.000	0.9500	0.7300	CONT.	0.850	0.1330	209.897	0.0476	569.7	440	16.191	83.70	51.70
2.BILGE FIRE&G/S PUMP	Out	175.000	0.9589	0.3200	INT.	0.860	0.1330	137.766	0.0726	212.2	440	16.191	69.47	42.91
2.BOILER COMBUST.AIR FAN	In	98.000	0.9351	0.7500	CONT.	0.850	0.1670	100.886	0.0991	123.3	440	15.926	51.71	32.47
2.COMP.BOILER.FEED W.PUMP	Out	5.500	0.8462	0.7500	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	7.6	440	15.926	17.19	10.80
2.COMP.BOILER FO PUMP	Out	2.640	0.8000	0.7500	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	3.9	440	15.926	15.28	9.60
2.CONTROL AIR COMPRESSOR	In	33.500	0.9005	0.2200	INT.	0.850	0.1670	49.574	0.2017	43.8	440	15.926	29.02	18.22
2.DECK MACH.FWD.HYD.FWD	Out	125.000	0.9498	0.8000	CONT.	0.800	0.1330	115.681	0.0864	164.5	440	16.191	69.47	42.91
2.DECK MACH.HYD.PACK.AFT	Out	125.000	0.9498	0.8000	CONT.	0.800	0.1330	115.681	0.0864	164.5	440	16.191	52.24	32.26
2.ER VENT.FAN	In	55.000	0.9275	0.6500	CONT.	0.850	0.1330	70.228	0.1424	69.8	440	15.926	40.45	25.40
2.FW HYDRO PUMP	In	3.700	0.7710	0.2800	INT.	0.870	0.1105	25.000	0.4000	5.5	440	15.926	17.19	10.80
2.GE FO CIRC. PUMP	Out	1.300	0.8125	0.4600	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	1.9	440	15.926	13.75	8.64
2.GE FO SUPPLY PUMP	Out	1.300	0.8125	0.3600	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	1.9	440	15.926	13.75	8.64
2.HFO TRANSFER PUMP	Out	18.500	0.9113	0.2720	INT.	0.760	0.1670	32.716	0.3057	26.7	440	15.926	25.76	16.17
2.LT COOLING FW PUMP	Out	75.000	0.9506	0.7600	CONT.	0.850	0.1330	85.869	0.1165	92.8	440	16.191	52.24	32.26
2.MAIN AIR COMPRESSOR	Out	88.000	0.9462	0.3200	INT.	0.850	0.1670	94.681	0.1056	109.4	440	15.926	42.19	26.49
2.MAIN LO PUMP	Out	132.000	0.9517	0.6600	CONT.	0.850	0.1213	119.134	0.0839	163.2	440	16.191	69.47	42.91
2.MAIN VAC.COND.CSW PUMP	Out	65.000	0.9366	0.7900	CONT.	0.870	0.1612	78.800	0.5325	79.8	440	15.926	51.71	32.47
2.ME AUX BLOWER	Out	125.000	0.9498	0.7500	CONT.	0.850	0.1330	115.681	0.0864	154.8	440	16.191	80.37	49.64
2.ME FO CIRCULATING PUMP	Out	6.400	0.8767	0.4900	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	8.6	440	15.926	18.89	11.86
2.ME FO SUPPLY PUMP	Out	4.600	0.8214	0.4100	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	6.6	440	15.926	17.19	10.80
2.ME JACKET COOL.FW PUMP	Out	33.000	0.9218	0.7500	CONT.	0.840	0.1604	49.037	0.2039	42.6	440	15.926	32.75	20.56
2.ME START UP PUMP	Out	26.000	0.9286	0.8000	CONT.	0.850	0.1670	41.268	0.2423	32.9	440	15.926	29.02	18.22
2.REF.PROV. COMPRESSOR	In	6.330	0.9043	0.2800	INT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	8.2	440	15.926	18.89	11.86
2.STEERING GEAR	Out	160.000	0.9428	0.2500	CONT.	0.850	0.1330	131.710	0.0759	199.7	440	16.191	83.70	51.70
2.STERN TUBE LO PUMP	Out	0.750	0.7500	0.7000	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	1.2	440	15.926	13.75	8.64
3.DECK MACH.FWD.HYD.FWD	Out	125.000	0.9498	0.8000	CONT.	0.800	0.1330	115.681	0.0864	164.5	440	16.191	69.47	42.91
3.DECK MACH.HYD.PACK.AFT	Out	125.000	0.9498	0.8000	CONT.	0.800	0.1330	115.681	0.0864	164.5	440	16.191	52.24	32.26
3.ER VENT.FAN	In	55.000	0.9275	0.6500	CONT.	0.850	0.1670	70.228	0.1424	69.8	440	15.926	42.19	26.49
3.LT COOLING FW PUMP	Out	75.000	0.9506	0.7600	CONT.	0.850	0.1215	85.869	0.1165	92.8	440	15.926	51.71	32.47
3.MAIN VAC.COND.CSW PUMP	In	65.000	0.9366	0.7900	CONT.	0.870	0.1670	78.407	0.1275	79.8	440	15.926	40.45	25.40
4.ER VENT.FAN	In	55.000	0.9275	0.6500	CONT.	0.850	0.1670	70.228	0.1424	69.8	440	15.926	40.45	25.40
4.MAIN VAC.COND.CSW PUMP	Out	65.000	0.9366	0.7900	CONT.	0.870	0.1330	78.407	0.1275	79.8	440	15.926	51.71	32.47
(D)11-4.DECK MACH.FWD.HYD.F	Out	125.000	0.9498	0.8000	CONT.	0.800	0.1670	115.681	0.0864	164.5	440	16.191	69.47	42.91
DECK FOAM LIQUID PUMP	Out	11.000	0.9167	0.3200	INT.	0.850	0.1670	25.872	0.3865	14.1	440	15.926	18.89	11.86
DECK MACH. SERVO PUMP	Out	6.800	0.8947	0.8000	CONT.	0.800	0.1670	25.000	0.4000	9.5	440	15.926	18.89	11.86
ECR PACK. AIR COND.	In	13.350	0.8783	0.7000	CONT.	0.850	0.1670	27.504	0.3636	17.9	440	15.926	25.76	16.17
ELEVATOR	In	5.500	0.8870	0.3200	INT.	0.860	0.1670	25.000	0.4000	7.2	440	15.926	18.89	11.86
EMCY AIR COMPRESSOR	Out	8.700	0.8790	0.8500	INT.	0.850	0.1670	25.424	0.3933	11.6	440	15.926	18.89	11.86
EMCY GEN. ROOM FAN	Out	0.750	0.7500	0.6500	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	1.2	440	15.926	13.75	8.64
EMERGENCY FIRE PUMP	Out	150.000	0.9520	0.9400	INT.	0.850	0.1330	127.425	0.0785	185.4	440	16.191	83.70	51.70

E/R HIGH FOAM PUMP	Out	5.500	0.8870	0.3200	INT.	0.860	0.1670	25.000	0.4000	7.2	440	15.926	18.89	11.86
E/R WORKS.PACK.AIR.COND.	In	1.000	0.9300	10.000	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	1.3	440	15.926	20.84	13.09

// --- Induction Motor ---														
//<ComponentName>	<In Service> cargo op.	<Rated Size kw>	<Efficiency>	<Load Factor>	<Priority>	<PF>	<X"d>	<X/R>	<R/X> pu	<Base kVA>	<Base Voltage >	<Rs/Rr>	<Tdpp>	<Tdc>
FW GENERATOR PUMP	Out	22.200	0.9212	0.6900	CONT.	0.850	0.1670	36.916	0.2709	28.4	440	15.926	26.76	16.80
FW HYDRO PUMP	In	3.700	0.7710	0.2800	INT.	0.870	0.1105	25.000	0.4000	5.5	440	15.926	17.19	10.80
GRINDER MACHINE	Out	0.750	0.8330	0.3200	INT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	1.1	440	15.926	13.75	8.64
IGS SCRUBBER CSW PUMP	In	75.000	0.9506	0.7500	CONT.	0.850	0.1217	85.869	0.1165	92.8	440	15.926	59.05	37.08
LIFEBOAT DAVIT WINCH	Out	8.500	0.8850	0.3200	INT.	0.860	0.1670	25.474	0.3926	11.2	440	15.926	18.89	11.86
LOCAL FIRE FIGHT.W.PUMP	Out	12.600	0.8510	0.3200	INT.	0.850	0.1670	26.900	0.3717	17.4	440	15.926	18.89	11.86
(M)11-2.IGS BLOWER	Out	155.000	0.9498	0.5000	CONT.	0.850	0.1670	129.594	0.0772	192.0	440	16.191	69.47	42.91
MDO TRANSFER PUMP	In	5.500	0.8210	0.2200	INT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	7.9	440	15.926	18.10	11.36
MEAT.FISH.VEG.RM.FRZNGFN	In	0.410	0.6833	0.7500	CONT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	0.7	440	15.926	13.75	8.64
ME JACKET W. PRHT.PUMP	Out	5.500	0.8330	0.2800	INT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	7.8	440	15.926	18.59	11.67
MGO TRANSFER PUMP	In	5.500	0.8209	0.2200	INT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	7.9	440	15.926	19.10	11.99
PURIFIER ROOM EXH. FAN	In	11.000	0.8594	0.7000	CONT.	0.850	0.1670	25.872	0.3865	15.1	440	15.926	21.49	13.49
SERVICE AIR COMPRESSOR	Out	44.000	0.8998	0.2000	INT.	0.850	0.1670	60.240	0.1660	57.5	440	15.926	36.19	22.73
S/G & EMCY ROOM FAN	Out	7.500	0.8721	0.8000	CONT.	0.850	0.1670	26.037	0.3841	10.1	440	15.926	18.89	11.86
SLUDGE PUMP	In	2.200	0.8148	0.2200	INT.	0.850	0.1578	25.000	0.4000	3.2	440	15.926	17.19	10.80
STERN TUBE LO PUMP	Out	0.750	0.7500	0.7000	CONT.	0.850	0.1521	20.000	0.5000	1.2	440	15.926	13.75	8.64
TOPPING AIR COMPRESSOR	In	43.000	0.9227	0.3200	INT.	0.850	0.1670	59.274	0.1687	54.8	440	15.926	34.38	21.59
VACUUM COLLECTION SYSTEM	In	7.200	0.8890	0.3200	INT.	0.850	0.1670	25.000	0.4000	9.5	440	15.926	19.10	11.99

7.4 Αποτελέσματα

IEC61363 SKM Report

ALL INFORMATION PRESENTED IS FOR REVIEW, APPROVAL
INTERPRETATION AND APPLICATION BY A REGISTERED ENGINEER ONLY.
SKM DISCLAIMS ANY RESPONSIBILITY AND LIABILITY RESULTING
FROM THE USE AND INTERPRETATION OF THIS SOFTWARE.

SKM POWER*TOOLS FOR WINDOWS
IEC 61363 FAULT ANALYSIS REPORT
COPYRIGHT(C) SKM SYSTEMS ANALYSIS, INC. 1995-2008

*FAULT BUS: MAIN SWBD 1 440V						
Voltage: 0.440 kV		Ipeak: 132724.91 A		x(peak factor): 1.628		
TIME (Cycles)	0.1	0.5	1.0	3.0	12.0	
=====						
Iac(A)	57643.96	52874.89	47936.55	35202.25	19867.18	
Idc(A)	76920.00	57948.52	41232.58	12293.97	368.64	
- MAIN SWBD 2 440V (Eq. Gen.)	Ipeak: 63625.42 A		O-Crossing: 4.7Cyc /78.0ms			
Iac(A)	27628.60	25384.12	23051.70	17017.44	9853.36	
Idc(A)	36719.56	27726.85	19756.72	5890.21	180.42	
- EM'CY SWBD 440V (Eq. Motor)	Ipeak: 1302.13 A.		O-Crossing: 5.6Cyc /93.0ms			
Iac(A)	625.17	509.62	405.00	180.54	7.80	
Idc(A)	889.78	581.42	352.82	55.21	0.02	
- DGl (Eq. Gen.)	Ipeak: 38394.38 A		O-Crossing: 4.0Cyc /67.0ms			
Iac(A)	17391.58	16080.79	14730.02	11446.72	8363.41	
Idc(A)	21873.68	15652.72	10302.07	1933.14	1.04	
- PURIFIER ROOM EXH. FAN (Eq. Motor)	Ipeak: 135.63 A.		O-Crossing: 2.9Cyc /49.0ms			
Iac(A)	85.77	59.02	36.98	5.70	0.00	
Idc(A)	117.36	52.17	18.94	0.33	0.00	
- 1.IGS BLOWER (Eq. Motor)	Ipeak: 3365.31 A.		O-Crossing: 6.4Cyc /107.0ms			
Iac(A)	1347.16	1252.05	1142.55	792.29	152.56	
Idc(A)	1962.32	1594.65	1230.37	436.04	4.09	
- BUS-GE FO SUPPLY 1 (Eq. Motor)	Ipeak: 32.34 A.		O-Crossing: 4.2Cyc /70.0ms			
Iac(A)	21.85	13.39	7.30	0.65	0.00	
Idc(A)	30.07	13.41	4.91	0.09	0.00	
- E/R WORKS.PACK.AIR.COND. (Eq. Motor)	Ipeak: 12.37 A.		O-Crossing: 7.7Cyc /128.0ms			
Iac(A)	7.14	4.84	2.98	0.43	0.00	
Idc(A)	10.49	5.52	2.47	0.10	0.00	
- ECR PACK. AIR COND. (Eq. Motor)	Ipeak: 196.93 A.		O-Crossing: 4.8Cyc /80.0ms			
Iac(A)	108.64	76.37	49.16	8.44	0.00	
Idc(A)	156.67	88.92	43.81	2.58	0.00	
- BUS-BOILER1 (Eq. Motor)	Ipeak: 3831.26 A.		O-Crossing: 8.6Cyc /143.0ms			
Iac(A)	1624.36	1407.37	1190.05	625.95	44.30	
Idc(A)	2354.71	1840.94	1349.88	413.20	3.01	
- 1.BALLAST PUMP (Eq. Motor)	Ipeak: 13564.83 A		O-Crossing: 8.3Cyc /139.0ms			
Iac(A)	5125.67	4899.46	4630.67	3695.13	1338.33	
Idc(A)	7524.19	6635.96	5671.64	3026.41	179.23	
- BUS-A3&A4 (Eq. Motor)	Ipeak: 2638.60 A.		O-Crossing: 6.4Cyc /107.0ms			
Iac(A)	1154.36	1012.12	871.11	497.96	48.95	
Idc(A)	1641.50	1207.24	839.48	210.81	0.52	
- MDO TRANSFER PUMP (Eq. Motor)	Ipeak: 78.50 A.		O-Crossing: 3.5Cyc /58.0ms			
Iac(A)	48.90	33.19	20.45	2.95	0.00	
Idc(A)	65.51	31.55	12.66	0.33	0.00	
- 1.HFO TRANSFER PUMP (Eq. Motor)	Ipeak: 319.57 A.		O-Crossing: 4.1Cyc /68.0ms			
Iac(A)	174.52	129.84	89.72	20.45	0.03	
Idc(A)	239.36	135.94	67.02	3.96	0.00	
- 1.ER VENT.FAN (Eq. Motor)	Ipeak: 1040.04 A.		O-Crossing: 4.5Cyc /75.0ms			
Iac(A)	469.06	408.87	344.37	173.31	7.89	
Idc(A)	671.15	461.82	289.42	44.65	0.01	
- 1.LT COOLING FW PUMP (Eq. Motor)	Ipeak: 1478.34 A.		O-Crossing: 5.3Cyc /88.0ms			
Iac(A)	628.90	562.12	488.54	278.71	22.30	
Idc(A)	918.84	683.38	471.99	107.41	0.14	
- 1.ATMOS.COND.CSW PUMP (Eq. Motor)	Ipeak: 171.02 A.		O-Crossing: 2.9Cyc /48.0ms			
Iac(A)	109.88	75.61	47.39	7.31	0.00	
Idc(A)	147.38	64.09	22.63	0.35	0.00	
- 3.MAIN VAC.COND.CSW PUMP (Eq. Motor)	Ipeak: 1247.77 A.		O-Crossing: 5.2Cyc /87.0ms			
Iac(A)	536.04	474.06	406.56	219.94	13.85	
Idc(A)	785.39	577.35	392.98	84.36	0.08	
- 1.MAIN VAC.COND.CSW PUMP (Eq. Motor)	Ipeak: 1290.47 A.		O-Crossing: 5.2Cyc /86.0ms			
Iac(A)	556.37	492.05	422.00	228.32	14.39	
Idc(A)	812.04	594.61	402.77	84.79	0.08	

DETAIL CALCULATION:

- MAIN SWBD 2 440V (Eq. Gen.)						
Rated kV: 0.440 kV						
TIME (Cycles)	0.1	0.5	1.0	3.0	12.0	
=====						
Td" (ms)	50.579	51.178	52.110	56.305	79.373	
Td' (ms)	348.554	288.501	324.139	360.946	351.675	
Tdc(ms)	19.863	22.862	23.696	26.132	37.047	
R(κ)	0.0012	0.0010	0.0010	0.0009	0.0006	
X"(κ)	0.0089	0.0089	0.0089	0.0089	0.0090	
X'(κ)	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254	
X(κ)	0.0404	0.0404	0.0404	0.0404	0.0404	
- EM'CY SWBD 440V (Eq. Motor)						
Rated kV: 0.440 kV						
TIME (Cycles)	0.1	0.5	1.0	3.0	12.0	
=====						
Td" (ms)	32.988	33.950	35.104	38.939	45.170	

Tdc(ms)	37.750	18.107	17.374	17.760	18.724
R(k)	0.0568	0.0835	0.0848	0.0810	0.0749
R(rotor)(k)	0.0303	0.0290	0.0281	0.0254	0.0219
R(stator)(k)	0.0257	0.0537	0.0559	0.0548	0.0521
X"(k)	0.3767	0.3717	0.3714	0.3723	0.3735
- DGL (Eq. Gen.)					
Rated MVA:	1.625 MVA	Rated kv:	0.440 kV	p.f.:	0.83
R:	0.0020 k	Xd":	0.0152 k	Xd':	0.0288 k
Td":	36.694 ms	Td':	348.784 ms	Tdc:	19.922 ms
- PURIFIER ROOM EXH. FAN (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.015 MVA	Rated kv:	0.434 kV	p.f.:	0.83
R:	1.0142 k	Rr:	0.3201 k	Rs:	0.5098 k
Xd":	2.1518 k	Td":	17.833 ms	Tdc:	8.223 ms
- 1.IGS BLOWER (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.192 MVA	Rated kv:	0.436 kV	p.f.:	0.78
R:	0.0190 k	Rr:	0.0050 k	Rs:	0.0080 k
Xd":	0.1704 k	Td":	91.055 ms	Tdc:	32.133 ms
- BUS-GE FO SUPPLY 1 (Eq. Motor)					
Rated kv:	0.440 kV				
TIME (Cycles)	0.1	0.5	1.0	3.0	12.0
=====					
Td"(ms)	13.753	13.753	13.753	13.753	13.753
Tdc(ms)	11.237	8.760	8.525	8.376	8.321
R(k)	3.9249	4.4243	4.4841	4.5236	4.5384
R(rotor)(k)	1.7649	1.7216	1.7160	1.7122	1.7108
R(stator)(k)	2.0488	2.5915	2.6570	2.7003	2.7164
X"(k)	9.1505	8.9259	8.8968	8.8772	8.8699
- E/R WORKS.PACK.AIR.COND. (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.001 MVA	Rated kv:	0.437 kV	p.f.:	0.87
R:	10.4825 k	Rr:	3.9432 k	Rs:	6.2799 k
Xd":	25.5621 k	Td":	17.196 ms	Tdc:	10.369 ms
- ECR PACK. AIR COND. (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.018 MVA	Rated kv:	0.438 kV	p.f.:	0.83
R:	0.6611 k	Rr:	0.2536 k	Rs:	0.4038 k
Xd":	1.8082 k	Td":	18.916 ms	Tdc:	11.771 ms
- BUS-BOILER1 (Eq. Motor)					
Rated kv:	0.440 kV				
TIME (Cycles)	0.1	0.5	1.0	3.0	12.0
=====					
Td"(ms)	48.902	49.249	49.665	51.139	55.142
Tdc(ms)	178.169	33.707	29.969	28.742	30.011
R(k)	0.0104	0.0198	0.0211	0.0215	0.0203
R(rotor)(k)	0.0081	0.0080	0.0080	0.0077	0.0072
R(stator)(k)	0.0000	0.0095	0.0109	0.0115	0.0109
X"(k)	0.1500	0.1491	0.1489	0.1488	0.1490
- 1.BALLAST PUMP (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.570 MVA	Rated kv:	0.437 kV	p.f.:	0.84
R:	0.0031 k	Rr:	0.0008 k	Rs:	0.0013 k
Xd":	0.0457 k	Td":	147.697 ms	Tdc:	53.070 ms
- BUS-A3&A4 (Eq. Motor)					
Rated kv:	0.440 kV				
TIME (Cycles)	0.1	0.5	1.0	3.0	12.0
=====					
Td"(ms)	52.828	53.714	54.727	57.865	62.804
Tdc(ms)	63.960	25.608	24.221	24.152	24.745
R(k)	0.0192	0.0319	0.0330	0.0325	0.0312
R(rotor)(k)	0.0105	0.0103	0.0101	0.0096	0.0088
R(stator)(k)	0.0000	0.0129	0.0142	0.0142	0.0137
X"(k)	0.2099	0.2088	0.2087	0.2088	0.2089
- MDO TRANSFER PUMP (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.008 MVA	Rated kv:	0.437 kV	p.f.:	0.73
R:	1.8261 k	Rr:	0.6329 k	Rs:	1.0080 k
Xd":	4.1053 k	Td":	17.206 ms	Tdc:	9.126 ms
- 1.HFO TRANSFER PUMP (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.027 MVA	Rated kv:	0.437 kV	p.f.:	0.73
R:	0.4156 k	Rr:	0.1427 k	Rs:	0.2272 k
Xd":	1.2126 k	Td":	22.545 ms	Tdc:	11.783 ms
- 1.ER VENT.FAN (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.070 MVA	Rated kv:	0.435 kV	p.f.:	0.82
R:	0.0947 k	Rr:	0.0255 k	Rs:	0.0405 k
Xd":	0.4658 k	Td":	48.544 ms	Tdc:	17.834 ms
- 1.LT COOLING FW PUMP (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.093 MVA	Rated kv:	0.435 kV	p.f.:	0.84
R:	0.0569 k	Rr:	0.0157 k	Rs:	0.0249 k
Xd":	0.3505 k	Td":	59.394 ms	Tdc:	22.517 ms
- 1.ATMOS.COND.CSW PUMP (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.015 MVA	Rated kv:	0.435 kV	p.f.:	0.84
R:	0.8195 k	Rr:	0.2538 k	Rs:	0.4043 k
Xd":	1.7069 k	Td":	17.837 ms	Tdc:	8.005 ms
- 3.MAIN VAC.COND.CSW PUMP (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.080 MVA	Rated kv:	0.435 kV	p.f.:	0.85
R:	0.0699 k	Rr:	0.0199 k	Rs:	0.0317 k
Xd":	0.4077 k	Td":	54.255 ms	Tdc:	21.663 ms
- 1.MAIN VAC.COND.CSW PUMP (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.080 MVA	Rated kv:	0.435 kV	p.f.:	0.85
R:	0.0681 k	Rr:	0.0193 k	Rs:	0.0307 k
Xd":	0.3938 k	Td":	54.266 ms	Tdc:	21.392 ms
TIME-DEPENDENT SHORT-CIRCUIT CURRENTS AT THE MAJOR POINTS:					
Bus Name:	BUS-BOILER2	Voltage:	0.440 kV		
TIME(Cycles)	0.1	0.5	1.0	3.0	12.0
=====					

- 2.AUX. BOILER FEED W. PUMP	Ipeak: 995.86 A.	O-Crossing: 6.8Cyc	/113.0ms
Iac(A)	442.17	364.23	285.83 108.40 1.38
Idc(A)	654.68	480.76	326.81 69.79 0.07
- 2. BOILER COMBUST. AIR FAN	Ipeak: 2108.80 A.	O-Crossing: 8.3Cyc	/138.0ms
Iac(A)	857.22	753.53	641.37 336.63 18.51
Idc(A)	1280.90	1043.15	807.02 289.10 2.85

DETAIL CALCULATION:

- 2.AUX. BOILER FEED W. PUMP	Rated MVA: 0.065 MVA	Rated kv: 0.437 kV	p.f.: 0.84
R:	0.0734 k	Rr: 0.0283 k	Rs: 0.0451 k
Xd":	0.4943 k	Td": 34.380 ms	Tdc: 21.590 ms
- 2. BOILER COMBUST. AIR FAN	Rated MVA: 0.123 MVA	Rated kv: 0.437 kV	p.f.: 0.84
R:	0.0260 k	Rr: 0.0100 k	Rs: 0.0160 k
Xd":	0.2622 k	Td": 51.710 ms	Tdc: 32.470 ms

Bus Name: BUS-AL&A2 Voltage: 0.440 kV
 TIME(Cycles) 0.1 0.5 1.0 3.0 12.0

- 2. AIR COND. COMPRESSOR	Ipeak: 1985.24 A.	O-Crossing: 8.3Cyc	/138.0ms
Iac(A)	811.74	713.56	607.35 318.77 17.53
Idc(A)	1198.59	976.12	755.16 270.52 2.67
- 2. AIR COND. PLANT FAN	Ipeak: 286.92 A.	O-Crossing: 5.6Cyc	/94.0ms
Iac(A)	139.53	107.71	77.94 21.37 0.06
Idc(A)	203.27	134.59	80.39 10.23 0.00

DETAIL CALCULATION:

- 2. AIR COND. COMPRESSOR	Rated MVA: 0.116 MVA	Rated kv: 0.435 kV	p.f.: 0.81
R:	0.0298 k	Rr: 0.0115 k	Rs: 0.0183 k
Xd":	0.2784 k	Td": 51.710 ms	Tdc: 32.470 ms
- 2. AIR COND. PLANT FAN	Rated MVA: 0.022 MVA	Rated kv: 0.435 kV	p.f.: 0.79
R:	0.4685 k	Rr: 0.1807 k	Rs: 0.2878 k
Xd":	1.4711 k	Td": 25.760 ms	Tdc: 16.170 ms

Bus Name: EM'CY SWBD 440V Voltage: 0.440 kV
 TIME(Cycles) 0.1 0.5 1.0 3.0 12.0

- VACUUM COLLECTION SYSTEM (Eq. Motor)	Ipeak: 97.23 A.	O-Crossing: 4.0Cyc	/66.0ms
Iac(A)	58.37	39.62	24.40 3.51 0.00
Idc(A)	80.70	41.20	17.78 0.62 0.00
- MEAT.FISH.VEG.RM.FRZNGFN (Eq. Motor)	Ipeak: 7.34 A.	O-Crossing: 7.7Cyc	/128.0ms
Iac(A)	4.27	2.90	1.78 0.26 0.00
Idc(A)	6.04	3.24	1.49 0.07 0.00
- ELEVATOR (Eq. Motor)	Ipeak: 75.93 A.	O-Crossing: 4.5Cyc	/75.0ms
Iac(A)	44.51	30.20	18.60 2.68 0.00
Idc(A)	62.22	33.22	15.16 0.66 0.00
- FW HYDRO PUMP (Eq. Motor)	Ipeak: 87.31 A.	O-Crossing: 4.1Cyc	/68.0ms
Iac(A)	52.75	35.80	22.05 3.17 0.00
Idc(A)	71.34	36.67	15.96 0.57 0.00
- 3. ER VENT. FAN (Eq. Motor)	Ipeak: 1063.97 A.	O-Crossing: 4.9Cyc	/81.0ms
Iac(A)	471.79	411.19	346.27 174.14 7.90
Idc(A)	679.97	482.46	314.17 56.50 0.03

DETAIL CALCULATION:

- VACUUM COLLECTION SYSTEM (Eq. Motor)	Rated MVA: 0.010 MVA	Rated kv: 0.437 kV	p.f.: 0.73
R:	1.4314 k	Rr: 0.5235 k	Rs: 0.8338 k
Xd":	3.3944 k	Td": 17.199 ms	Tdc: 9.918 ms
- MEAT.FISH.VEG.RM.FRZNGFN (Eq. Motor)	Rated MVA: 0.001 MVA	Rated kv: 0.438 kV	p.f.: 0.84
R:	18.3942 k	Rr: 7.0663 k	Rs: 11.2538 k
Xd":	45.8015 k	Td": 17.193 ms	Tdc: 10.725 ms
- ELEVATOR (Eq. Motor)	Rated MVA: 0.007 MVA	Rated kv: 0.438 kV	p.f.: 0.73
R:	1.8120 k	Rr: 0.6918 k	Rs: 1.1018 k
Xd":	4.4852 k	Td": 17.197 ms	Tdc: 10.621 ms
- FW HYDRO PUMP (Eq. Motor)	Rated MVA: 0.006 MVA	Rated kv: 0.438 kV	p.f.: 0.73
R:	1.6259 k	Rr: 0.5985 k	Rs: 0.9532 k
Xd":	3.8807 k	Td": 17.198 ms	Tdc: 10.020 ms
- 3. ER VENT. FAN (Eq. Motor)	Rated MVA: 0.070 MVA	Rated kv: 0.436 kV	p.f.: 0.82
R:	0.0890 k	Rr: 0.0255 k	Rs: 0.0405 k
Xd":	0.4654 k	Td": 48.494 ms	Tdc: 19.427 ms

Bus Name: MAIN SWBD 2 440V Voltage: 0.440 kV
 TIME(Cycles) 0.1 0.5 1.0 3.0 12.0

- DG3 (Eq. Gen.)	Ipeak: 38738.22 A	O-Crossing: 4.1Cyc	/69.0ms
Iac(A)	17447.45	16128.39	14769.58 11469.43 8374.04
Idc(A)	21998.57	15929.23	10640.09 2118.10 1.48
- TOPPING AIR COMPRESSOR (Eq. Motor)	Ipeak: 820.46 A.	O-Crossing: 4.9Cyc	/81.0ms
Iac(A)	377.10	320.61	261.75 116.28 3.02
Idc(A)	530.99	367.05	231.35 36.51 0.01
- 2. REF. PROV. COMPRESSOR (Eq. Motor)	Ipeak: 87.58 A.	O-Crossing: 4.6Cyc	/76.0ms
Iac(A)	51.28	34.80	21.43 3.08 0.00
Idc(A)	71.40	38.37	17.65 0.79 0.00
- 2. CONTROL AIR COMPRESSOR (Eq. Motor)	Ipeak: 660.04 A.	O-Crossing: 6.0Cyc	/100.0ms
Iac(A)	305.79	251.60	197.17 74.35 0.92
Idc(A)	430.07	304.22	197.35 34.95 0.01
- BUS-BOILER2 (Eq. Motor)	Ipeak: 3016.64 A.	O-Crossing: 8.8Cyc	/146.0ms
Iac(A)	1294.14	1103.32	914.52 440.15 19.98
Idc(A)	1888.11	1456.31	1048.49 292.66 1.35
- 2. BALLAST PUMP (Eq. Motor)	Ipeak: 13564.91 A	O-Crossing: 8.3Cyc	/139.0ms

Iac(A)	5125.70	4899.49	4630.70	3695.15	1338.33
Idc(A)	7524.23	6635.99	5671.67	3026.43	179.23
- BUS-Al&A2 (Eq. Motor)	Ipeak: 2007.81 A.		O-Crossing: 5.5Cyc /91.0ms		
Iac(A)	918.86	787.36	659.17	333.00	18.59
Idc(A)	1301.06	894.32	567.54	96.99	0.04
- SLUDGE PUMP (Eq. Motor)	Ipeak: 33.26 A.		O-Crossing: 3.4Cyc /57.0ms		
Iac(A)	20.87	14.17	8.73	1.26	0.00
Idc(A)	27.82	13.22	5.22	0.13	0.00
- MGO TRANSFER PUMP (Eq. Motor)	Ipeak: 75.03 A.		O-Crossing: 3.1Cyc /52.0ms		
Iac(A)	48.31	32.80	20.21	2.91	0.00
Idc(A)	63.65	28.65	10.56	0.20	0.00
- IGS SCRUBBER CSW PUMP (Eq. Motor)	Ipeak: 2135.90 A.		O-Crossing: 6.3Cyc /105.0ms		
Iac(A)	895.56	800.26	695.27	396.12	31.51
Idc(A)	1290.51	1004.16	733.85	209.32	0.74
- 4.ER VENT.FAN (Eq. Motor)	Ipeak: 1016.03 A.		O-Crossing: 4.1Cyc /68.0ms		
Iac(A)	465.73	406.02	342.04	172.25	7.86
Idc(A)	662.06	441.83	266.50	35.28	0.00
- 2.ER VENT.FAN (Eq. Motor)	Ipeak: 1302.29 A.		O-Crossing: 4.2Cyc /70.0ms		
Iac(A)	597.52	520.89	438.78	220.92	10.07
Idc(A)	838.56	565.64	345.77	48.28	0.01

DETAIL CALCULATION:

- DG3 (Eq. Gen.)					
Rated MVA:	1.625 MVA	Rated kv:	0.440 kV	p.f.:	0.83
R:	0.0019 k	Xd":	0.0151 k	Xd':	0.0287 k
Td":	36.625 ms	Td':	348.260 ms	Tdc:	20.651 ms
- TOPPING AIR COMPRESSOR (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.055 MVA	Rated kv:	0.437 kV	p.f.:	0.73
R:	0.1257 k	Rr:	0.0384 k	Rs:	0.0611 k
Xd":	0.5943 k	Td":	41.081 ms	Tdc:	18.055 ms
- 2.REF.PROV. COMPRESSOR (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.008 MVA	Rated kv:	0.438 kV	p.f.:	0.73
R:	1.5761 k	Rr:	0.6057 k	Rs:	0.9647 k
Xd":	3.9265 k	Td":	17.195 ms	Tdc:	10.733 ms
- 2.CONTROL AIR COMPRESSOR (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.044 MVA	Rated kv:	0.438 kV	p.f.:	0.73
R:	0.1595 k	Rr:	0.0575 k	Rs:	0.0915 k
Xd":	0.7405 k	Td":	34.180 ms	Tdc:	19.257 ms
- BUS-BOILER2 (Eq. Motor)					
Rated kv:	0.440 kV				
TIME (Cycles)	0.1	0.5	1.0	3.0	12.0
=====					
Td"(ms)	44.312	44.453	44.625	45.289	47.650
Tdc(ms)	258.152	32.495	28.571	26.900	27.644
R(k)	0.0132	0.0263	0.0283	0.0292	0.0282
R(rotor)(k)	0.0112	0.0111	0.0111	0.0109	0.0104
R(stator)(k)	0.0000	0.0133	0.0153	0.0164	0.0159
X"(k)	0.1878	0.1864	0.1861	0.1860	0.1861
- 2.BALLAST PUMP (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.570 MVA	Rated kv:	0.437 kV	p.f.:	0.84
R:	0.0031 k	Rr:	0.0008 k	Rs:	0.0013 k
Xd":	0.0457 k	Td":	147.697 ms	Tdc:	53.070 ms
- BUS-Al&A2 (Eq. Motor)					
Rated kv:	0.440 kV				
TIME (Cycles)	0.1	0.5	1.0	3.0	12.0
=====					
Td"(ms)	46.143	46.475	46.859	48.159	50.961
Tdc(ms)	47.771	20.911	19.563	19.096	19.382
R(k)	0.0295	0.0476	0.0497	0.0501	0.0489
R(rotor)(k)	0.0150	0.0148	0.0146	0.0142	0.0135
R(stator)(k)	0.0000	0.0184	0.0206	0.0214	0.0209
X"(k)	0.2607	0.2589	0.2586	0.2585	0.2587
- SLUDGE PUMP (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.003 MVA	Rated kv:	0.437 kV	p.f.:	0.73
R:	4.3310 k	Rr:	1.4838 k	Rs:	2.3631 k
Xd":	9.6226 k	Td":	17.202 ms	Tdc:	8.965 ms
- MGO TRANSFER PUMP (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.008 MVA	Rated kv:	0.437 kV	p.f.:	0.73
R:	1.9371 k	Rr:	0.6328 k	Rs:	1.0079 k
Xd":	4.1067 k	Td":	17.213 ms	Tdc:	8.352 ms
- IGS SCRUBBER CSW PUMP (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.093 MVA	Rated kv:	0.437 kV	p.f.:	0.84
R:	0.0368 k	Rr:	0.0114 k	Rs:	0.0182 k
Xd":	0.2548 k	Td":	59.252 ms	Tdc:	26.572 ms
- 4.ER VENT.FAN (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.070 MVA	Rated kv:	0.435 kV	p.f.:	0.82
R:	0.1005 k	Rr:	0.0255 k	Rs:	0.0405 k
Xd":	0.4663 k	Td":	48.594 ms	Tdc:	16.484 ms
- 2.ER VENT.FAN (Eq. Motor)					
Rated MVA:	0.070 MVA	Rated kv:	0.436 kV	p.f.:	0.82
R:	0.0784 k	Rr:	0.0203 k	Rs:	0.0323 k
Xd":	0.3712 k	Td":	48.576 ms	Tdc:	16.932 ms

19 Feb 2015 02:06:22

PAGE 36

Bus Name:BUS-GE FO SUPPLY 1					
Voltage: 0.440 kV					
TIME(Cycles)	0.1	0.5	1.0	3.0	12.0
=====					
- 1.GE FO SUPPLY PUMP	Ipeak: 17.14 A.		O-Crossing: 7.7Cyc /128.0ms		
Iac(A)	11.35	6.99	3.81	0.34	0.00
Idc(A)	15.69	7.25	2.77	0.06	0.00
- 1.GE FO CIRC. PUMP	Ipeak: 17.00 A.		O-Crossing: 7.7Cyc /128.0ms		
Iac(A)	11.23	6.92	3.77	0.33	0.00
Idc(A)	15.63	7.22	2.75	0.06	0.00

DETAIL CALCULATION:

- 1.GE FO SUPPLY PUMP

Rated MVA: 0.002 MVA Rated kV: 0.438 kV p.f.: 0.73
 R: 6.8704 κ Rr: 2.6500 κ Rs: 4.2204 κ
 Xd": 17.1760 κ Td": 13.750 ms Tdc: 8.640 ms

- 1.GE FO CIRC. PUMP

Rated MVA: 0.002 MVA Rated kV: 0.438 kV p.f.: 0.77
 R: 6.8704 κ Rr: 2.6500 κ Rs: 4.2204 κ
 Xd": 17.1760 κ Td": 13.750 ms Tdc: 8.640 ms

Bus Name:BUS-BOILER1

Voltage: 0.440 kV

TIME(Cycles)	0.1	0.5	1.0	3.0	12.0
=====					
- 1.AUX. BOILER.FDWP.HTR.BR	Ipeak: 417.64 A.		O-Crossing: 5.7Cyc /95.0ms		
Iac(A)	199.70	156.12	114.77	33.51	0.13
Idc(A)	293.23	196.86	119.63	16.31	0.00
- 1.AUX. BOILER FEED W.PUMP	Ipeak: 1367.10 A.		O-Crossing: 8.2Cyc /137.0ms		
Iac(A)	571.48	494.87	413.39	201.29	7.90
Idc(A)	839.16	667.24	500.99	159.23	0.92
- 1.BOILER COMBUST.AIR FAN	Ipeak: 2185.27 A.		O-Crossing: 8.5Cyc /141.0ms		
Iac(A)	861.59	774.45	677.81	397.70	36.11
Idc(A)	1291.78	1090.04	881.57	377.16	8.26

DETAIL CALCULATION:

- 1.AUX. BOILER.FDWP.HTR.BR

Rated MVA: 0.031 MVA Rated kV: 0.437 kV p.f.: 0.84
 R: 0.2680 κ Rr: 0.1023 κ Rs: 0.1657 κ
 Xd": 1.0449 κ Td": 27.080 ms Tdc: 16.730 ms

- 1.AUX. BOILER FEED W.PUMP

Rated MVA: 0.065 MVA Rated kV: 0.437 kV p.f.: 0.84
 R: 0.0585 κ Rr: 0.0225 κ Rs: 0.0359 κ
 Xd": 0.3937 κ Td": 46.320 ms Tdc: 29.080 ms

- 1.BOILER COMBUST.AIR FAN

Rated MVA: 0.123 MVA Rated kV: 0.437 kV p.f.: 0.84
 R: 0.0260 κ Rr: 0.0100 κ Rs: 0.0160 κ

Bus Name:BUS-A3&A4

Voltage: 0.440 kV

TIME(Cycles)	0.1	0.5	1.0	3.0	12.0
=====					
- 1.AIR COND. COMPRESSOR	Ipeak: 2622.05 A.		O-Crossing: 8.5Cyc /142.0ms		
Iac(A)	1042.83	940.00	825.61	491.31	47.53
Idc(A)	1525.12	1292.69	1051.32	459.93	11.14
- 1.AIR COND. PLANT FAN	Ipeak: 269.09 A.		O-Crossing: 5.0Cyc /84.0ms		
Iac(A)	140.01	102.81	69.89	14.92	0.01
Idc(A)	202.23	123.69	66.90	5.73	0.00

DETAIL CALCULATION:

- 1.AIR COND. COMPRESSOR

Rated MVA: 0.116 MVA Rated kV: 0.436 kV p.f.: 0.81
 R: 0.0237 κ Rr: 0.0092 κ Rs: 0.0146 κ
 Xd": 0.2217 κ Td": 64.220 ms Tdc: 40.320 ms

- 1.AIR COND. PLANT FAN

Rated MVA: 0.022 MVA Rated kV: 0.436 kV p.f.: 0.79
 R: 0.4631 κ Rr: 0.1786 κ Rs: 0.2845 κ
 Xd": 1.4540 κ Td": 21.590 ms Tdc: 13.560 ms