



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη βραχυκυκλωμάτων σε ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου

Τριανταφύλλου Κ. Κωνσταντίνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσα: Ελένη Π. Νικολοπούλου

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

196

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη βραχυκυκλωμάτων σε ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου

Τριανταφύλλου Κ. Κωνσταντίνος

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ...^η Οκτωβρίου 2015.

.....
Ι. Α. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Φ. Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ι. Φ. Γκόνος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

.....
Τριανταφύλλου Κ. Κωνσταντίνος
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
Ε.Μ.Π.

Copyright © Τριανταφύλλου Κ. Κωνσταντίνος, 2015
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.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω για την συμπαράσταση και την ανεκτίμητη βοήθειά τους, όλους όσους με στήριξαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερα :

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την βοήθεια που πρόθυμα μου παρείχε κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Την κα Ελένη Νικολοπούλου, υποψήφια διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση της και το άριστο κλίμα συνεργασίας που καλλιέργησε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που με στηρίζουν σε κάθε μου προσπάθεια όλα αυτά τα χρόνια και κυρίως την οικογένειά μου, για την αμέριστη αγάπη που μου δείχνει και την απεριόριστη στήριξη σε κάθε νέο βήμα στη ζωή μου.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Τριανταφύλλου Κ. Κωνσταντίνος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη βραχυκυκλωμάτων σε ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου βάσει διεθνών προτύπων και κανονισμών. Αρχικά, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά (τάση, συχνότητα, ποιότητα ισχύος) των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων, καθώς επίσης και οι ιδιαιτερότητές τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην περιγραφή και στη σύγκριση των διάφορων μεθοδολογιών γείωσης του ουδετέρου που εφαρμόζονται σε πλοία ανάλογα με τη λειτουργία τους.

Επιπλέον, αναλύονται οι κατηγορίες, οι συνέπειες και οι μέθοδοι προστασίας των βραχυκυκλωμάτων. Παράλληλα, εξετάζεται η συμπεριφορά των ηλεκτρικών στοιχείων κατά το βραχυκύκλωμα και η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών για τον υπολογισμό του.

Εν συνεχεία, ακολουθεί περιγραφή του προγράμματος **WinIGS** (**Windows Based Integrated Grounding System**) και της διαδικασίας εισαγωγής των δεδομένων σε αυτό. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν πλοίο στην κανονική κατάσταση πορείας του και στην κατάσταση εκτάκτου ανάγκης. Στην πρώτη περίπτωση, δεν υπήρχε εκούσια σύνδεση του ουδετέρου στη γη (αγείωτο σύστημα), ενώ στη δεύτερη ο ουδέτερος γειώνεται απευθείας στη γη (συμπαγώς γειωμένο).

Εν κατακλείδι, αξίζει να σημειωθεί πως η κάθε προσομοίωση συνοδεύεται από παρατηρήσεις και επεξηγήσεις. Τα συμπεράσματα, στο τέλος της εργασίας, αξιολογούν τα αποτελέσματα και τα πορίσματα που εξήχθησαν.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ηλεκτρικά Συστήματα Πλοίων, Συστήματα Γείωσης, Αγείωτο Σύστημα, Συμπαγώς Γειωμένο Σύστημα, Μονοφασικά, Διφασικά, Τριφασικά Βραχυκυκλώματα, Μέθοδος Συμμετρικών Συνιστωσών, WinIGS.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to study the short circuits in electrical board networks based on international standards and regulations. Initially, the main characteristics (voltage, frequency, power quality) of electric power systems that are applied on ships, as well as their specific characteristics, are presented. Particular emphasis is given to the description and the comparison among different methodologies of grounding the neutral point, which are applicable to ships depending on their function.

Furthermore, the categories of short circuits, the consequences and the methods of protection are analyzed. Moreover, the behavior of electrical components during short circuits is studied and the computational method of the symmetrical components is analyzed.

Subsequently, a description of **WinIGS (Windows Based Integrated Grounding System)** program's functions is provided. Ships' normal and in emergency operation are analyzed on the simulations. In the first case, there was no intentional connection between the systems' neutral point and earth (isolated from earth system), while in the second the neutral is grounded directly to ships' hull (solidly earthed).

In conclusion, it is worth noting that each simulation is accompanied by comments and explanations. The conclusions at the end of thesis, evaluate the results and conclusions reached.

KEYWORDS: Ships Power Systems, Grounding Systems, Isolated Neutral, Solidly Grounded Systems, Line to Neutral (L-N), Line to Line (L-L), Three phase Short circuits, Symmetric Components, WinIGS.

*Στον παππού \mathcal{L}
τη γιαγιά μου*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται δύο διαφορετικές μέθοδοι γείωσης, του συμπαγώς γειωμένου και του «αγείωτου» ουδετέρου. Εξετάζονται όλα τα είδη βραχυκυκλωμάτων στα δύο συστήματα και παρουσιάζονται αναλυτικοί πίνακες αναφορών. Η ύπαρξη ουδετέρου επιτρέπει την ανάλυση περισσότερων προσομοιώσεων στο πρόγραμμα **WinIGS**, που χρησιμοποιήθηκε. Συνεπώς, αναλύθηκαν επιπλέον οι παράσιτες χωρητικότητες, η συνεισφορά των κινητήρων και το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπό κενό φορτίο. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνουν τις σημαντικότερες παρατηρήσεις και διαπιστώσεις. Ειδικότερα, η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων. Περιγράφονται οι ιδιαιτερότητές τους, το δίκτυο διανομής, οι απαιτήσεις των κανονισμών καθώς επίσης και η σημασία της ηλεκτρολογικής μελέτης.

Κεφάλαιο 2: Στο κεφάλαιο αυτό επισημαίνεται η σημασία της γείωσης και η μέθοδος υλοποίησής της. Αναλύονται και συγκρίνονται οι επικρατέστεροι τύποι γείωσης όσον αφορά στην επίδρασή τους στο κύκλωμα.

Κεφάλαιο 3: Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκαν τα βραχυκυκλώματα, ως προς το είδος τους, τις συνέπειες και τη συμπεριφορά των ηλεκτρικών στοιχείων. Η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών για τον υπολογισμό τάσεων και ρευμάτων υπό βραχυκύκλωμα παρουσιάζεται αναλυτικά.

Κεφάλαιο 4: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εφαρμογές του προγράμματος **WinIGS (Windows Based Integrated Grounding System)**, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις.

Κεφάλαιο 5: Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται τα στοιχεία του ηλεκτρικού δικτύου πλοίου, δηλαδή τα φορτία, οι γεννήτριες, τα καλώδια και οι μετασχηματιστές τάσης. Παρουσιάζεται η λεπτομερής ανάλυση του υπολογισμού τους βάσει του ηλεκτρικού ισολογισμού.

Κεφάλαιο 6: Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η εφαρμογή του «αγείωτου» ουδετέρου στο σύστημα του πλοίου. Αναλύονται η κανονική κατάσταση πορείας και η κατάσταση εκτάκτου ανάγκης.

Κεφάλαιο 7: Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η εφαρμογή της συμπαγούς γείωσης στο σύστημα του πλοίου. Αναλύονται η κανονική κατάσταση πορείας, η κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπό κενό και πλήρες φορτίο, η επίδραση των παράσιτων χωρητικοτήτων καθώς επίσης και η συνεισφορά των κινητήρων στο ρεύμα βραχυκύκλωσης.

Κεφάλαιο 8: Στο κεφάλαιο αυτό ανακεφαλαιώνονται τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις και προτείνονται ζητήματα μελλοντικής διερεύνησης για την ακριβέστερη μελέτη βραχυκυκλωμάτων σε ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
ABSTRACT	vii
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
Ηλεκτρολογική μελέτη πλοίου	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Ιδιαιτερότητες της ηλεκτρικής εγκατάστασης πλοίου	2
1.3 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων	3
1.4 Δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου	5
1.5 Σημασία της ποιότητας ισχύος σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων	7
1.5.1 Εισαγωγή	7
1.5.2 Βυθίσεις τάσης.....	8
1.5.3 Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα.....	10
1.5.5 Διακύμανση τάσης –συχνότητας	11
1.6 Αξονικές γεννήτριες	12
1.7 Ηλεκτροπρόωση πλοίων	13
1.7.1 Εισαγωγή	13
1.7.2 Εφαρμογές της ηλεκτροπρόωσης	14
1.7.3 Πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης	16
1.7.4 Μειονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης.....	16
1.8 Απαιτήσεις και κανονισμοί ηλεκτρικών δικτύων	17
1.8.1 Γενικά	17
1.8.2 Συχνότητα και τάση του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου.....	18
1.8.3 Ηλεκτρικός εξοπλισμός	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
Συστήματα γείωσης	22
2.1 Εισαγωγή.....	22
2.2 Τύποι γειώσεων πλοίων	23
2.2.1 Εισαγωγή	23
2.2.2 Αγείοτο σύστημα.....	24
2.2.2 Συμπαγώς γειωμένο σύστημα.....	26
2.2.3 Γείωση μέσω υψηλής αντίστασης	26
2.2.4 Γείωση μέσω χαμηλής αντίστασης.....	27

2.2.5 Γείωση μέσω ρυθμιζόμενης επαγωγικής αντίδρασης	27
2.3 Σύγκριση τύπων γειώσεων	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
Βραχυκυκλώματα.....	31
3.1 Ορισμός βραχυκυκλώματος	31
3.2 Κατηγοριοποίηση βραχυκυκλωμάτων	31
3.3 Συνέπειες βραχυκυκλωμάτων	32
3.4 Κανονισμοί μελετών βραχυκυκλωμάτων.....	33
3.5 Μέθοδοι προστασίας έναντι βραχυκυκλωμάτων	35
3.6 Το Ηλεκτρικό δίκτυο κατά το βραχυκύκλωμα	38
3.7 Μετασηματισμός συμμετρικών συνιστωσών.....	40
3.7.1 Γενικά	40
3.7.2 Κυκλώματα ακολουθίας	42
3.7.3 Υπολογισμός ρεύματος βραχυκύκλωσης μέσω συμμετρικών συνιστωσών.....	43
3.7.4 Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα ως προς γη	44
3.7.5 Διφασικό βραχυκύκλωμα	45
3.7.6 Διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη	46
3.7.7 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη	47
3.7.7 Κυκλώματα ακολουθίας στους μετασηματιστές ισχύος.....	48
3.7.8 Ρεύμα ουδετέρου	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
Λογισμικό WinIGS	51
4.1 Περιγραφή προγράμματος	51
4.2 Λειτουργία Σύνταξης (Edit Mode).....	53
4.2.1 Εισαγωγή Στοιχείων (Network Editor).....	53
4.2.2 Καθορισμός Παραμέτρων Στοιχείων (Editing Device Parameters).....	56
4.2.3 Σύνδεση Στοιχείων (Connecting Devices)	56
4.2.4 Υποσταθμοί (Substation Elements).....	57
4.3 Λειτουργία Ανάλυσης (Analysis Mode)	58
4.3.1 Εισαγωγή	58
4.3.2 Μόνιμη Κατάσταση (Base Case)	59
4.3.3 Ανάλυση Σφάλματος (Fault Analysis)	59
4.3.4 Ανάλυση Ρεύματος Σφάλματος (Fault Current Analysis).....	60

4.3.5	Αύξηση δυναμικού γης και ρεύματος σφάλματος συναρτήσει της τοποθεσίας σφάλματος (GPR and Fault Current versus Fault Location).....	61
4.3.6	Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης (Voltage Probability Density)	61
4.3.7	Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του ρεύματος (Voltage Probability Density)	62
4.3.8	Μέγιστη Επαγόμενη Τάση (Maximum Induced Voltage).....	63
4.4	Λειτουργία Αναφορών (Reports Mode).....	64
4.4.1	Εισαγωγή	64
4.4.2	Αναφορά μέσω πινάκων (Tabular reports).....	65
4.4.3	Αναφορά μέσω γραφημάτων (Graphical reports)	66
4.4.4	Αναφορά Ισχύος (Power Flow Report)	66
4.4.5	Αναφορά Απώλειας Ισχύος (Power Loss Report).....	67
4.5	Λειτουργία Εργαλείων (Tools Mode)	67
4.5.1	Εισαγωγή	67
4.5.2	Βιβλιοθήκη αγωγών (Conductor Library)	68
4.5.3	Βιβλιοθήκη καλωδίων (Cable Library)	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		
	Περιγραφή του υπό μελέτη πλοίου	73
5.1	Πλοίο γενικευμένου τύπου.....	73
5.2	Ηλεκτρικός ισολογισμός	74
5.3	Ισχείς φορτίων.....	75
5.4	Γεννήτριες	77
5.4	Καλώδια	79
5.5	Μετασχηματιστές ισχύος	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		
	Προσομοιώσεις στο αγείωτο σύστημα	84
6.1	Κατάσταση κανονικής πορείας	84
6.2	Κατάσταση εκτάκτου ανάγκης.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7		
	Προσομοιώσεις στο συμπαγώς γειωμένο σύστημα	89
7.1	Κατάσταση κανονικής πορείας	89
7.2	Κατάσταση εκτάκτου ανάγκης.....	92
7.3	Ρεύμα βραχυκύκλωσης υπό πλήρες και κενό φορτίο	94
7.4	Επίδραση παράσιτων χωρητικοτήτων.....	96

7.5 Συνεισφορά κινητήρων στο ρεύμα βραχυκύκλωσης	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	
Συμπεράσματα	102
8.1 Συμπεράσματα	102
8.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	106
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	
Ηλεκτρικά στοιχεία δικτύου	107
A1. Ισχείς Φορτίων/Διατομή-Μήκος Καλωδίων	107
A2. Τεχνικά Χαρακτηριστικά Γεννητριών	111
A3. Τεχνικά χαρακτηριστικά καλωδίων	113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	
Ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου	114
B1. Αγείωτο σύστημα	114
A) Κατάσταση κανονικής πορείας πλοίου	114
B) Κατάσταση εκτάκτου ανάγκης	115
B2. Γειωμένο σύστημα.....	117
A) Κατάσταση κανονικής πορείας πλοίου	117
B) Κατάσταση εκτάκτου ανάγκης	119
Γ) Ισοδύναμο ηλεκτρικό δίκτυο με γεννήτριες	120

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ηλεκτρολογική μελέτη πλοίου

1.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι πλέον ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία του πλοίου και την ασφάλεια των επιβαινόντων. Η εγκατάσταση του πλοίου αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, που χαρακτηρίζεται από αυτάρκεια και αξιοπιστία. Αποτελείται από τρία κύρια υποσυστήματα: ισχύος, φωτισμού και επικοινωνιών - ναυσιπλοΐας. Η διαρκώς αυξανόμενη χρήση της ηλεκτροπρόωσης έχει δημιουργήσει νέα δεδομένα και μεγαλύτερες ηλεκτρικές απαιτήσεις από την πλευρά της παραγωγής, του ελέγχου, της διανομής και της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος. Από την άλλη όμως, τα τεχνολογικά επιτεύγματα στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος και η εφαρμογή τους στους κινητήρες πρόωσης προσφέρουν μεγάλα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα προηγούμενα δεδομένα.

Ακόμη, οι σύγχρονες τάσεις οδηγούν σε πλήρη «εξηλεκτρισμό» του πλοίου (AES- All Electric Ships) αυξάνοντας έτσι τη σημασία της πλήρους ηλεκτρολογικής μελέτης του πλοίου. Η εξάπλωση της ηλεκτροκίνησης και των ηλεκτρονικών συστημάτων αυτοματισμού, τηλεπικοινωνιών και ναυσιπλοΐας είχε ως αποτέλεσμα τη ραγδαία αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος από 5 W/dwt (dead weight tonnage) το 1890 σε 350 W /dwt το 1990 για φορτηγά πλοία, ενώ σε επιβατηγά πλοία φθάνει τα 750 W /dwt και σε πλοία με ηλεκτρική πρόωση φθάνει τα 1100 W /dwt.

Ενδεικτικές τιμές του κόστους μιας σύγχρονης ηλεκτρολογικής εγκατάστασης πλοίου (συμπεριλαμβανομένου και του αυτοματισμού) ως ποσοστού του ολικού κόστους του πλοίου είναι οι εξής [1]:

- Δεξαμενόπλοια : 7,0%
- Containerships : 9,1%
- Φορτηγά : 7,3%
- Ψυγεία : 12%

1.2 Ιδιαιτερότητες της ηλεκτρικής εγκατάστασης πλοίου

Το ηλεκτρικό δίκτυο ενός πλοίου μπορεί να θεωρηθεί ως ένα αυτόνομο, βιομηχανικού τύπου σύστημα ισχύος, μικρής κλίμακας. Ωστόσο, υπάρχουν οι εξής σημαντικές διαφορές μεταξύ αυτού και ενός συμβατικού ηπειρωτικού δικτύου [2]:

- Η φύση του ηλεκτρικού συστήματος ενός πλοίου είναι αρκετά υβριδική καθώς συνδυάζει υποσυστήματα συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος που λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης και συχνότητας.
- Αναφορικά με τις κύριες μηχανές, η σχετική περιστροφική τους αδράνεια αναφορικά με τη ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου είναι σχετικά μικρή. Ωστόσο, η συχνότητα λειτουργίας των 50 με 60 Hz ελέγχεται από ταχύτατους ρυθμιστές, καθώς και οι χρονικές σταθερές των κύριων μηχανών (συχνά 4χρονης μηχανές diesel) είναι μικρές.
- Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανά μονάδα όγκου είναι αρκετά μεγάλη ειδικά στις εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης. Η εγκατεστημένη ισχύς μπορεί να κυμαίνεται από 40 έως 80 MVA σε μια περιοχή μερικών δεκάδων τετραγωνικών μέτρων.
- Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας χρησιμοποιείται από ηλεκτρικούς κινητήρες, οι οποίοι είτε λειτουργούν για την πρόωση του πλοίου είτε σαν οδηγοί βοηθητικών μηχανημάτων. Επιπλέον, εκτός από τους ηλεκτρικούς κινητήρες που αποτελούν δυναμικά φορτία υπάρχει σημαντικός αριθμός μη γραμμικών φορτίων με μη συμβατική συμπεριφορά, για παράδειγμα τα συστήματα ναυσιπλοΐας.
- Το ηλεκτρικό δίκτυο αποτελείται από καλώδια σχετικά μικρού μήκους (συνήθως κυμαίνονται από 50m έως 1000m).
- Η υιοθέτηση μονωμένου ουδέτερου (δηλαδή αγείωτα συστήματα) αποτελεί συνήθη πρακτική. Γεννήτριες, κινητήρες και τα τυλίγματα μετασχηματιστών διανομής είναι είτε σε μορφή αγείωτου αστέρα είτε σε μορφή τριγώνου, σε αντίθεση με την πλειοψηφία των ηπειρωτικών δικτύων που είναι γειωμένα είτε απευθείας είτε μέσω αντιστάσεων.
- Το ηλεκτρικό σύστημα είναι πλήρως αυτόνομο και συνεπώς η αξιοπιστία του είναι υψηλής προτεραιότητας. Η μόνη διαθέσιμη εφεδρική ισχύς προέρχεται από τη γεννήτρια έκτακτης ανάγκης, η οποία τροφοδοτεί μόνο λίγα κρίσιμα, για την ασφάλεια του πλοίου φορτία.
- Αναφερόμενοι στους υπολογισμούς βραχυκυκλωμάτων όπως στο IEC-61363, οι γεννήτριες θεωρούνται κοντά στα σφάλματα, οδηγώντας σε σχετικά μεγάλα ρεύματα σφάλματος. Συνεπώς, οι πτώσεις τάσης λόγω βραχυκυκλωμάτων αναμένεται να είναι πιο σοβαρές.

Κατά τα άλλα, το δίκτυο διανομής ενός πλοίου ακολουθεί τις πρακτικές της ξηράς. Αυτό δίνει τη δυνατότητα ο τυπικός βιομηχανικός εξοπλισμός να μπορεί να

χρησιμοποιηθεί στο πλοίο αφού προηγουμένως προσαρμοστεί, όπου απαιτείται, να αντέχει στις δύσκολες συνθήκες της θάλασσας.

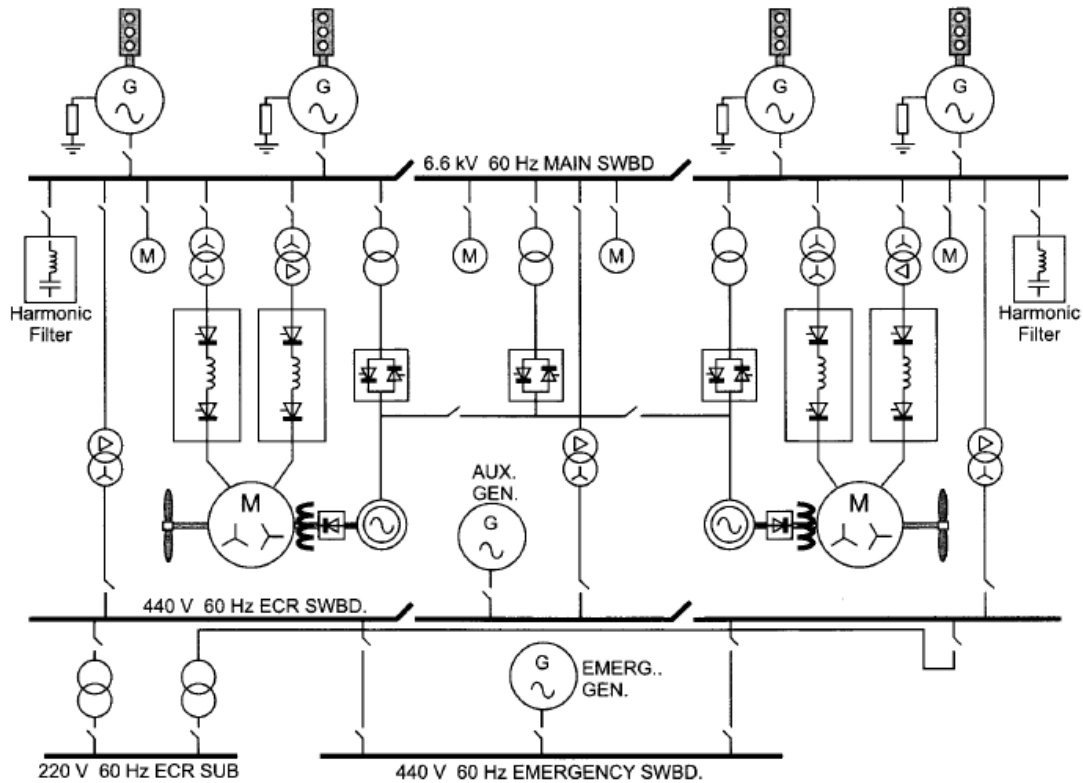
Ενδεικτικά, θα πρέπει να αντέχει :

- Τους κραδασμούς
- Την υγρασία
- Τις ακραίες θερμοκρασίες
- Το θαλασσινό νερό κλπ..

1.3 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων

Το τυπικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 1.1) πλοίου αποτελείται από τις συσκευές και τον εξοπλισμό παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και από τους διάφορους καταναλωτές. Ο ακόλουθος εξοπλισμός συναντάται σε όλα τα πλοία [3]:

- Πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελούνται από ηλεκτρογεννήτριες (diesel generators, DG) εκ των οποίων η μία είναι σε εφεδρεία. Σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται αξονικές γεννήτριες (shaft generators, SG) οι οποίες είναι ηλεκτρικές μηχανές οι οποίες παίρνουν κίνηση από τον ελικοφόρο άξονα του πλοίου καθώς και στροβιλογεννήτριες (turbo generators, TG).
- Κύριος πίνακας μαζί με τις διατάξεις προστασίας, τους διακόπτες, τα όργανα ελέγχου και τους κύριους ζυγούς διανομής.
- Ηλεκτρικός πίνακας ανάγκης (emergency) που καλύπτει μόνο κρίσιμα φορτία.
- Καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μετασχηματιστές, ηλεκτρονικά ισχύος και φίλτρα αρμονικών.
- Ηλεκτρικοί καταναλωτές που ενδέχεται να είναι και μεγάλοι κινητήρες, συγκρίσιμης ονομαστικής ισχύος με αυτήν των γεννητριών, όπως π.χ κινητήρες πρόωσης, αντλίες φορτίου κ.τ.λ.



Σχήμα 1.1 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου [4]

Οι γεννήτριες οδηγούνται από κινητήριες μηχανές. Τέτοιες είναι, οι ατμοστρόβιλοι, οι αεριοστρόβιλοι, οι πετρελαιομηχανές και οι κύριες μηχανές πρόωσης στις αξονικές γεννήτριες και μόνο. Ο τύπος της κινητήριας μηχανής καθορίζεται από τον σχεδιασμό του πλοίου και από οικονομικούς παράγοντες. Η συνολική ονομαστική ισχύς των γεννητριών καθορίζεται από την ολική ζήτηση των ηλεκτρικών φορτίων του πλοίου.

Από την άλλη πλευρά, τα βοηθητικά μηχανήματα στα πλοία ποικίλλουν ανάλογα με το είδος τους, από αντλίες μηχανοστασίου, συμπιεστές και ανεμιστήρες, βαρούλκα καταστρώματος και εργάτες άγκυρας έως κλιματισμό, γενικό φωτισμό και σύστημα τροφοδοσίας. Η ηλεκτρική ισχύς χρησιμοποιείται για να λειτουργήσει η πλειονοπία αυτών των βοηθητικών συστημάτων. Το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος στο πλοίο έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ασφαλή τροφοδότηση σε όλα τα φορτία με επαρκή προστασία για τον εξοπλισμό και τους χειριστές του. Το γενικό σχέδιο ενός συστήματος ηλεκτρικής ισχύος είναι κοινό σχεδόν σε όλα τα πλοία. Ενδεικτικά, οι κύριες γεννήτριες παράγουν την ηλεκτρική ισχύ. Αυτή, τροφοδοτείται στον κύριο πίνακα και έπειτα διανέμεται στα διάφορα βοηθητικά μηχανήματα συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών φορτίων. Μια γεννήτρια και ένας πίνακας έκτακτης ανάγκης συνδέονται με κρίσιμα φορτία, όπως ο φωτισμός έκτακτης ανάγκης, οι σειρήνες κινδύνου, οι επικοινωνίες, σε περίπτωση εκτεταμένης ηλεκτρικής βλάβης (black-out).

Οι κανονισμοί απαιτούν η πηγή ενέργειας εκτάκτου ανάγκης να είναι γεννήτρια, μπαταρίες ή και τα δύο. Η γεννήτρια εκτάκτου ανάγκης πρέπει να διαθέτει αυτονομία και να μην εξαρτάται από οποιοδήποτε μηχανοστάσιο. Υπάρχουν διάφορες διατάξεις για τη παροχή ρεύματος σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης, ωστόσο μια ασφαλής πρακτική είναι να υπάρχουν λίγες αλλά επαρκώς φορτισμένες μπαταρίες που τροφοδοτούν τα φορτία εκτάκτου ανάγκης αμέσως μετά τη βλάβη, μέχρι η γεννήτρια έκτακτης ανάγκης να ξεκινήσει να λειτουργεί με τη βοήθεια κάποιου αυτοματισμού.

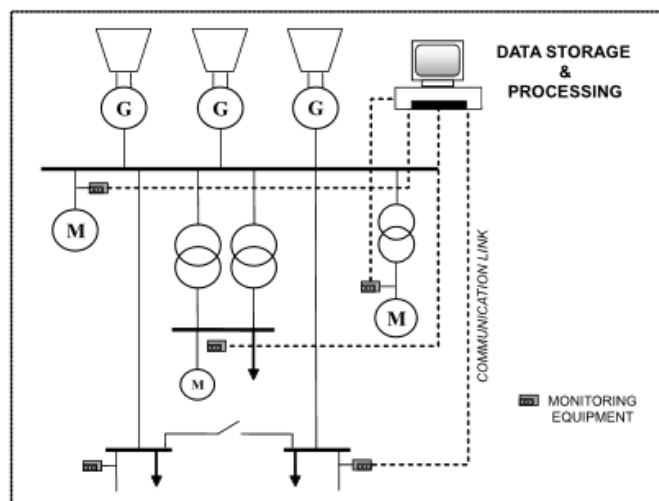
Αξίζει να σημειωθεί ότι σε περιπτώσεις υπερφόρτισης των γεννητριών ακολουθείται συχνά "επιλεκτική επιλογή διακοπής φορτίων". Δηλαδή όταν μια γεννήτρια υπερφορτίζεται ακολουθείται με τη βοήθεια αυτοματισμού κάποιο σενάριο διακοπής μη σημαντικών φορτίων ώστε η γεννήτρια να συνεχίζει να τροφοδοτεί τα υπόλοιπα σημαντικά φορτία.

1.4 Δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου

Η λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου διανομής ενός πλοίου είναι να μεταφέρει με ασφάλεια την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε κάθε καταναλωτή συνδεδεμένο με αυτό. Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία του συστήματος είναι το κύριο κέντρο διανομής, δηλαδή ο κύριος πίνακας του πλοίου. Ο κύριος πίνακας τροφοδοτεί με μεγάλες ποσότητες ισχύος τους ομαδοποιημένους πίνακες εκκίνησης κινητήρων, τους πίνακες καταστρωμάτων και τους πίνακες διανομής.

Συσκευές προστασίας όπως διακόπτες και ασφάλειες είναι στρατηγικά τοποθετημένα στο σύστημα και αποσυνδέουν αυτόματα ένα βραχυκυκλωμένο τμήμα του δικτύου. Οι μετασχηματιστές διασυνδέουν τα σημεία υψηλής με τα σημεία χαμηλής τάσης στο σύστημα.

Η λειτουργική κατάσταση του δικτύου διανομής σε επίπεδο ισχύος, τάσης και ρεύματος καταγράφεται από οθόνες, ενώ υπερεντάσεις και σφάλματα γης ελέγχονται από διακόπτες προστασίας. Η συνδεσμολογία καταγραφής και αποθήκευσης αυτών των δεδομένων φαίνεται στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2 Σύστημα παρακολούθησης ηλεκτρικού δικτύου πλοίου [8]

Η συντριπτική πλειοψηφία των πλοίων έχουν δίκτυο διανομής εναλλασσομένου ρεύματος (E.P.) που προτιμάται σε σχέση με το δίκτυο σταθερού ρεύματος (Σ.Ρ.). Το δίκτυο E.P. είναι φθηνότερο κατά την εγκατάσταση και κατά τη λειτουργία σε σχέση με το Σ.Ρ. . Συγκεκριμένα, προσφέρει μεγαλύτερο λόγο ισχύος/βάρους για την παραγωγή, διανομή και χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον η συντήρησή του είναι ευκολότερη. Το δίκτυο E.P. όμως είναι πιο επικίνδυνο από το δίκτυο Σ.Ρ. από πλευράς ηλεκτροπληξίας καθώς το δίκτυο E.P. γίνεται επικίνδυνο για τάσεις μεγαλύτερες από 60V ενώ το δίκτυο Σ.Ρ. μπορεί και σε τάση των 220V να μην προκαλεί θανατηφόρο ηλεκτροπληξία.

Η πλειονότητα των πλοίων έχουν τριφασικό, εναλλασσομένου ρεύματος, 3 αγωγών, 440 V σύστημα με μονωμένο τον ουδέτερο. Αυτό σημαίνει ότι ο ουδέτερος του συστήματος των γεννητριών σε συνδεσμολογία αστέρα δεν είναι γειωμένος στη γάστρα του πλοίου. Σε ευρωπαϊκά πλοία η τάση των 380 V είναι συνηθέστερη. Τα πλοία με μεγάλα ηλεκτρικά φορτία έχουν γεννήτριες που λειτουργούν σε υψηλές 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 της διατομής των αγωγών και του μεγέθους του απαιτούμενου εξοπλισμού. Η λειτουργία σε τόσο υψηλές τάσεις γίνεται όλο και συχνότερη όσο αυξάνεται το μέγεθος του πλοίου, π.χ. σε μεγάλα κρουαζιερόπλοια.

Οι υπεράκτιες κατασκευές παραγωγής πετρελαίου ή αερίου, στις οποίες η εξοικονόμηση σε βάρος από τον εξοπλισμό είναι σημαντική, λειτουργούν με τάση έως και 13.8 kV. Τα συστήματα διανομής σε αυτές τις υψηλές τάσεις μπορεί να έχουν τον ουδέτερο γειωμένο, μέσω μιας αντίστασης ή ενός μετασχηματιστή γείωσης υψηλής σύνθετης αντίστασης, στη γάστρα του πλοίου. Η ωμική τιμή της σύνθετης αντίστασης επιλέγεται έτσι ώστε να περιορίζει το ρεύμα σφάλματος. Οι διάφοροι τρόποι γείωσης των πλοίων θα αναλυθούν εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο.

Η συχνότητα ενός δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να είναι 50 Hz ή 60 Hz. Στην Ευρώπη και το περισσότερο κόσμο χρησιμοποιείται η συχνότητα των

50 Hz, ωστόσο στη Βόρεια Αμερική και ορισμένες άλλες χώρες είναι τα 60 Hz. Η πιο συνηθισμένη συχνότητα που χρησιμοποιείται σε πλοία και πλατφόρμες άντλησης υδρογονανθράκων είναι τα 60 Hz. Αυτή η υψηλότερη συχνότητα σημαίνει ότι κινητήρες και γεννήτριες λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες με συνέπεια μια μείωση του μεγέθους για μια δεδομένη ονομαστική ισχύ.

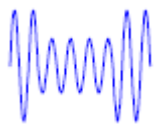
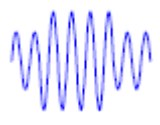
Ο φωτισμός και άλλες χαμηλής ισχύος μονοφασικές καταναλώσεις λειτουργούν συνήθως στα 220 V εναλλασσόμενη τάση (ή σπανιότερα 110 V εναλλασσόμενη τάση). Αυτές οι τάσεις προέρχονται από μετασχηματιστές υποβιβασμού της τάσης των 440 V.

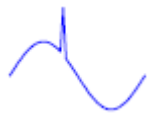
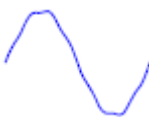
1.5 Σημασία της ποιότητας ισχύος σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων

1.5.1 Εισαγωγή

Τα προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος στο πλοίο είναι διαφορετικής σημασίας συγκρινόμενα με τα ίδια προβλήματα που συμβαίνουν στο ηπειρωτικό δίκτυο. Στην ξηρά, τα προβλήματα ηλεκτρικής ισχύος εκτός από το γεγονός ότι οδηγούν σε μια προβληματική παραγωγική διαδικασία, είναι δυνατόν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην τιμολογιακή σχέση μεταξύ του παρόχου και των πελατών, κάτι το οποίο δεν έχει νόημα εν πλω, όπου το πιο σημαντικό ζήτημα είναι η αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος. Μια πιθανή δυσλειτουργία σε ένα κρίσιμο φορτίο ίσως οδηγήσει σε μία ολική απώλεια του πλοίου, οδηγώντας σε πιθανές ανθρώπινες απώλειες αλλά και περιβαλλοντική ρύπανση.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) πρέπει να παρέχουν ηλεκτρική ισχύ σταθερής τάσης και συχνότητας. Οι αποκλίσεις από αυτό το στόχο αποκαλούνται ως προβλήματα ποιότητας στην παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύ και ενέργεια και έχουν άμεση ή έμμεση επίδραση στην εύρυθμη λειτουργία του όλου συστήματος. Τα σημαντικότερα φαινόμενα που αφορούν τα πλοία, δίνονται στον Πίνακα 1.1.

Κατηγορία	Τυπική κυματομορφή	Χαρακτηριστικά	Αιτίες	Συνέπειες
Βυθίσεις τάσης		- Διάρκεια - rms τάση -Σχέση των 3 φάσεων	- Σφάλματα - Εκκίνηση κινητήρα -Ηλέκτριση 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

Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα		<ul style="list-style-type: none"> - Μέγιστη τιμή τάσης - Συχνότητα - Χρόνος ανύψωσης - Διάρκεια - Τύπος κυματομορφής 	<ul style="list-style-type: none"> - Διακοπτικά φαινόμενα - Ηλέκτριση πυκνωτών 	Καταστροφή μονώσεων, δυσλειτουργίες Η/Υ και ρυθμιστών στροφών κινητήρων
Αρμονικές		<ul style="list-style-type: none"> - Χαρακτηρισμός μέσω Μ/Σ Fourier - THD για τάση και ένταση 	Μη γραμμικά φορτία: <ul style="list-style-type: none"> - ανορθωτές - φορτία τόξου 	Υπερφορτίσεις, καταστροφή στοιχείων, λειτουργία προστασίας, λανθασμένη λειτουργία μετρητικών οργάνων, μηχανική καταπόνηση.

Πίνακας 1.1 Αποτελέσματα κακής ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος [3]

1.5.2 Βυθίσεις τάσης

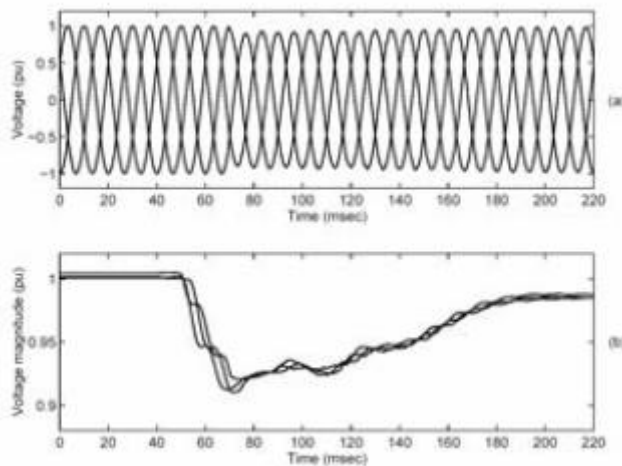
Βύθιση τάσης είναι η μικρής διάρκειας - προσωρινή μείωση της ενεργού τιμής της τάσης κυρίως λόγω σφαλμάτων στο ηλεκτρικό σύστημα, της εκκίνησης μεγάλων κινητήρων και μεταβατικών ρευμάτων ηλέκτρισης μετασχηματιστή. Προβλήματα προκαλούνται σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, κινητήρες με μετατροπείς ισχύος για τη ρύθμιση στροφών (adjustable speed drives), συστήματα ελέγχου (Programmable Logic Controllers - PLC) είναι μερικά μόνο φορτία που είναι ευαίσθητα σε βυθίσεις τάσης. Κάποιες συσκευές δεν μπορούν να αντέξουν τάση κάτω από 90% της ονομαστικής για 2 ή 3 κύκλους και διακόπτουν την λειτουργία τους μέσω των συστημάτων προστασίας που διαθέτουν. Πολλές ηλεκτρονικές συσκευές και κινητήρες με μετατροπείς ισχύος δεν λειτουργούν σωστά για βυθίσεις τάσης, όπου η τάση πέφτει κάτω από 70% της ονομαστικής για περισσότερο από 100 msec.

Αναλυτικότερα, κατά τη διάρκεια της πτώσης τάσης:

- Οι επαγωγικοί κινητήρες μειώνουν τον αριθμό των στροφών τους και τροφοδοτούνται με μεγαλύτερο ρεύμα. Εάν η βύθιση τάσης διαρκέσει αρκετά, τότε ενδέχεται να φτάσουν σε ένα σημείο, όπου σταματούν να λειτουργούν (stalling).
- Οι κινητήρες με μετατροπείς ισχύος για τη ρύθμιση των στροφών τους, μειώνουν σταδιακά την ταχύτητα τους. Το σύστημα προστασίας του κυκλώματος ελέγχου ταχύτητας λειτουργεί αποσυνδέοντας την συσκευή προκειμένου να προστατέψει τα ηλεκτρονικά ισχύος από τις μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας με αποτέλεσμα την αποσύνδεση από το δίκτυο.
- Σε συστήματα PLC ενδέχεται να λειτουργήσει το σύστημα προστασίας τους και να αποσυνδεθούν σταματώντας τη διαδικασία την οποία ελέγχουν. Πριν αποσυνδεθούν ενδέχεται να λειτουργήσουν εσφαλμένα και να δημιουργήσουν δυσλειτουργίες στις συσκευές τις οποίες ελέγχουν.

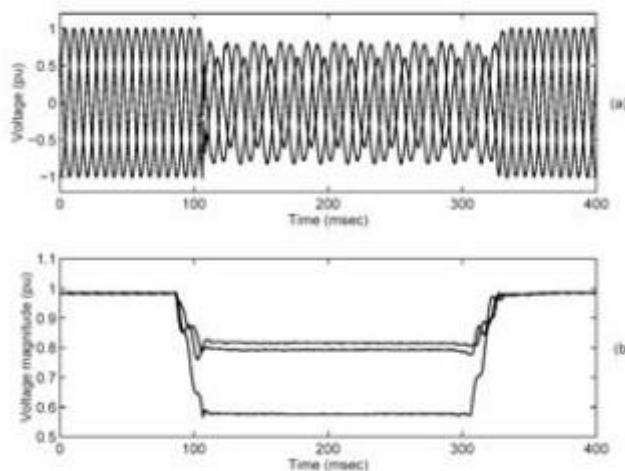
Οι κύριοι παράγοντες που προκαλούν τις βυθίσεις τάσης είναι οι εξής :

- Η σύνδεση μεγάλων κινητήρων, καθώς απαιτούν μεγάλα ρεύματα εκκινήσεως και έχουν χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από το μέγεθος, την ισχύ βραχυκύκλωσης στο σημείο ζεύξης καθώς και τα χαρακτηριστικά των ίδιων των κινητήρων (αδράνεια, τρόπος εκκίνησης κτλ).



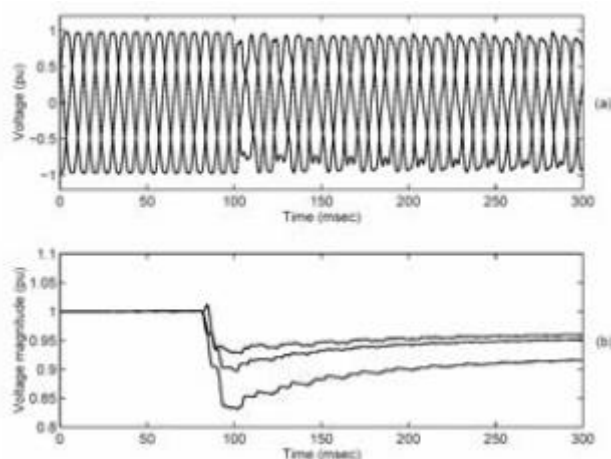
Σχήμα 1.3 Βύθιση τάσης λόγω εκκίνησης κινητήρα [3]

- Τα σφάλματα στο δίκτυο. Η τιμή της τάσης κατά την διάρκεια της βύθισης εξαρτάται: από την απόσταση του σφάλματος από το φορτίο (σύνθετη αντίσταση καλωδιώσεων), το πόσο ισχυρό ή ασθενές είναι το δίκτυο (ισχύς βραχυκύκλωσης) στο σημείο όπου ενώνεται ηλεκτρικά το φορτίο, το σφάλμα και την παροχή ισχύος του δικτύου (σημείο ζεύξης), την τοπολογία του δικτύου και τον τύπο του σφάλματος καθώς και τις συνδεσμολογίες των μετασχηματιστών μεταξύ του σφάλματος και του φορτίου.



Σχήμα 1.4 Βύθιση τάσης λόγω σφάλματος [3]

- Κορεσμό μετασχηματιστών ,κυρίως κατά την ηλεκτρισή τους από τα μεγάλα ασύμμετρα ρεύματα αποτέλεσμα της λειτουργίας του μαγνητικού πυρήνα στην περιοχή κορεσμού.



Σχήμα 1.5 Βύθιση τάσης λόγω ηλεκτρισής μετασχηματιστή [3]

Η διάρκεια της βύθισης τάσης εξαρτάται κυρίως από το πόσο γρήγορα θα λειτουργήσει το σύστημα προστασίας προκειμένου να απομονωθεί το τμήμα του δικτύου όπου εμφανίστηκε το σφάλμα. Οι χρόνοι που υπεισέρχονται εδώ είναι τόσο ο χρόνος εντοπισμού του σφάλματος (δηλαδή ο τύπος προστασίας που χρησιμοποιείται: ηλεκτρονόμοι αποστάσεως, διαφορική προστασία, ηλεκτρονόμοι υπερεντάσεως, ασφάλειες κτλ.) καθώς και ο χρόνος λειτουργίας των συσκευών διακοπής του ρεύματος (διακόπτες ισχύος, ασφάλειες κτλ.).

1.5.3 Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα

Τα ταχεία μεταβατικά φαινόμενα (υπερτάσεις ή υπερεντάσεις) που εμφανίζονται κατά την διάρκεια λειτουργίας ενός ηλεκτρικού συστήματος μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα επικίνδυνα για τον εξοπλισμό του αλλά και για τα φορτία. Προκαλούνται κυρίως από λειτουργίες διακοπών (ζεύξη ή απόζευξη) και σε μεγάλο βαθμό εξαρτώνται από τις αυτεπαγωγές και τις χωρητικότητες του ηλεκτρικού συστήματος. Στα ηπειρωτικά συστήματα σημαντική αιτία για τέτοια φαινόμενα είναι η κεραυνοί. Το ενδιαφέρον σχετικά με τα ταχεία μεταβατικά φαινόμενα εστιάζεται κυρίως στην τάση αλλά σημαντική είναι και η ένταση όπως έχουν δείξει διάφορες μελέτες . Σημαντικός παράμετρος για την κατηγοριοποίηση των ταχέων μεταβατικών φαινομένων είναι η μορφή της κυματομορφής της τάσης (ή της έντασης) κατά την διάρκεια του φαινομένου. Με αυτό τον τρόπο αναφερόμαστε σε:

- φαινόμενα αιχμής όπου η κυματομορφή παρουσιάζει μια απότομη αλλαγή προς μία κατεύθυνση και επανέρχεται σε φυσιολογικές τιμές εντός λίγων msec.

- φαινόμενα με χαρακτηριστικά ταλάντωσης με την τάση να μεταβάλλεται γρήγορα και προς τις δύο κατευθύνσεις και να επανέρχεται σε φυσιολογικές τιμές εντός μερικών msec ή και κάποιων κύκλων.

1.5.4 Αρμονικές

Η ύπαρξη αρμονικών στην τάση και την ένταση (υπέρθυση συχνοτήτων πολλαπλάσιων της θεμελιώδους – 50/60 Hz) οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη μη-γραμμικών φορτίων και σε συνάρτηση με την ισχύ βραχυκυκλώσεως του δικτύου, οι αρμονικές που παράγονται σε ένα σημείο του δικτύου μεταδίδονται και έτσι μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα σε άλλα φορτία. 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.

Τυπικά μη-γραμμικά φορτία είναι: φορτία με διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος: δηλαδή φορτία που χρησιμοποιούν ανορθωτές όπως οι κινητήρες με μετατροπείς ισχύος για τη ρύθμιση στροφών, ηλεκτρονικές συσκευές (ηλεκτρονικοί υπολογιστές, τηλεοράσεις) καθώς και φορτία που χρησιμοποιούν ηλεκτρικό τόξο: φούρνοι τήξης και λάμπες φθορισμού.

1.5.5 Διακύμανση τάσης –συχνότητας

Η διακύμανση της τάσης μπορεί να προσομοιωθεί σαν μια διαμόρφωση της θεμελιώδους συχνότητας (50/60 Hz) από ένα σήμα μικρότερης συχνότητας [6]. Επομένως ένας τρόπος χαρακτηρισμού του φαινομένου είναι μέσω του πλάτους του σήματος αυτού. Διαμόρφωση έως και 0.5% του πλάτους της τάσης στα 50/60 Hz μπορεί να προκαλέσει αντιληπτές αλλαγές στην ένταση φωτισμού εάν η συχνότητα διαμόρφωσης είναι 6-8 Hz. Συσκευές δυναμικής αντιστάθμισης της άεργου ισχύος (διατάξεις πυκνωτών, πηνίων και ηλεκτρονικών ισχύος) μπορούν να περιορίσουν σημαντικά τα προβλήματα βελτιώνοντας παράλληλα τον συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης.

Το παραπάνω φαινόμενο συνδέεται με την λειτουργία μεγάλων συνήθως φορτίων. Στα ηλεκτρικά συστήματα των πλοίων, τα οποία είναι απομονωμένα, τέτοια φορτία έχουν επίδραση και στη συχνότητα λειτουργίας τους. Η συχνότητα ενός ηλεκτρικού συστήματος συνδέεται άμεσα με την ταχύτητα περιστροφής των γεννητριών του συστήματος και σε κάθε χρονική στιγμή εξαρτάται από το ισοζύγιο μεταξύ παραγωγής και φορτίου. Αλλαγές στο ισοζύγιο αυτό (σφάλματα, μεγάλες αλλαγές στο φορτίο) προκαλούν μεταβολές στη συχνότητα.

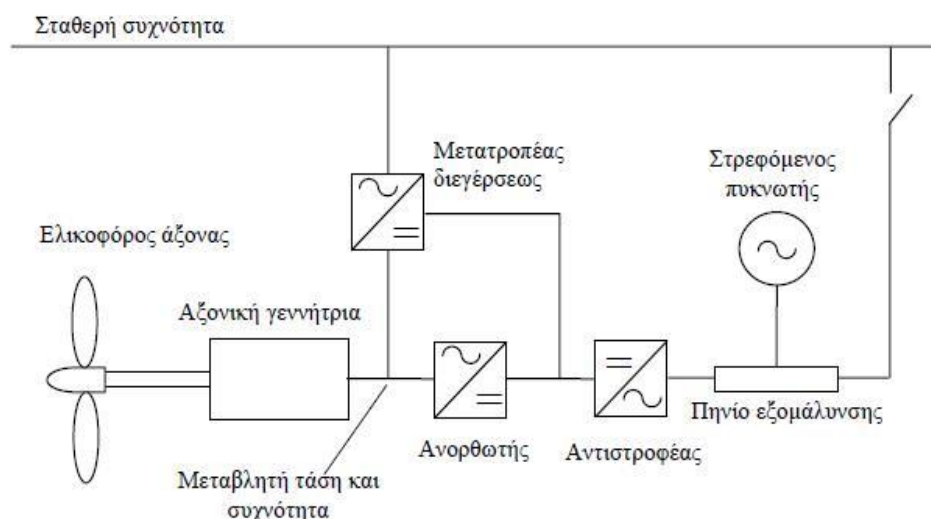
Γενικά καμιά συσκευή δεν λειτουργεί στα προδιαγεγραμμένα από τους κατασκευαστές σημεία λειτουργίας της, όπου εξασφαλίζονται υψηλές αποδόσεις και

χαμηλές απώλειες (βέλτιστη οικονομική λειτουργία). Έχοντας λοιπόν υπόψη ότι η βιωσιμότητα ενός πλοίου στηρίζεται στην καλή λειτουργία του ΣΗΕ, γίνεται αντιληπτή η σημασία της καταγραφής, της ανάλυσης και της ταξινόμησης κατά σειρά σπουδαιότητας των διάφορων προβλημάτων λειτουργίας. Συνεπώς, οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις του πλοίου πρέπει να είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε:

- Να εξασφαλίζονται οι κανονικές συνθήκες λειτουργίας του πλοίου και οι ελάχιστες συνθήκες διαβίωσης στο πλοίο χωρίς την καταφυγή στην πηγή ηλεκτρικής ισχύος έκτακτης ανάγκης.
- Να εξασφαλίζεται η λειτουργία του εξοπλισμού που είναι αναγκαίος για την ασφάλεια του πλοίου κάτω από συνθήκες έκτακτης ανάγκης.
- Να διασφαλίζεται η ασφάλεια των επιβατών, του πληρώματος και του πλοίου από ηλεκτρικούς κινδύνους.

1.6 Αξονικές γεννήτριες

Η αξονική γεννήτρια είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη ηλεκτρική μηχανή απ' ευθείας συνδεδεμένη με τον ελικοφόρο άξονα του πλοίου η οποία παίρνει κίνηση από αυτόν και χρησιμοποιείται σαν μια επιπρόσθετη πηγή ενέργειας όταν το πλοίο κινείται και έχει αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης. Ένα βασικό πρόβλημα στην χρήση αξονικών γεννητριών είναι η επίτευξη σταθερής τάσης και συχνότητας ειδικά όταν μεταβάλλονται οι στροφές της μηχανής και κατά συνέπεια του άξονα. Σήμερα για την επίτευξη σταθερής τάσης και συχνότητας χρησιμοποιούνται οι στατικοί μετατροπείς (static converters). Η σύγχρονη αξονική γεννήτρια παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα μεταβλητής συχνότητας και τάσης.



Σχήμα 1.6 Αξονική γεννήτρια συνδεδεμένη μέσω αντιστροφείας στο ηλεκτρικό δίκτυο

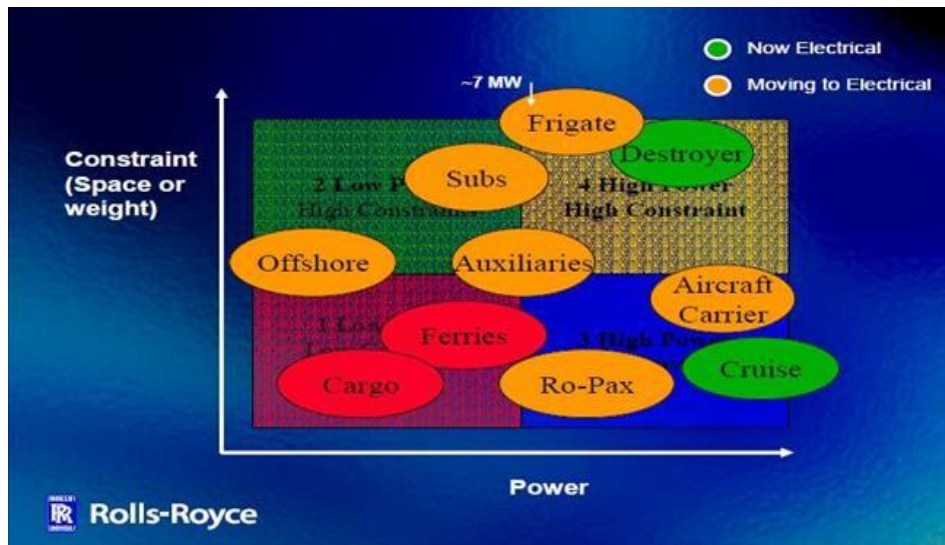
Μετά την ανόρθωση το ρεύμα δίνεται στο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου με σταθερή τιμή τάσης και συχνότητας μέσω ενός αντιστροφέα (inverter) όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 1.6 . Μια γεννήτρια αναλαμβάνει την παραγωγή έργου ισχύος (στρεφόμενος πυκνωτής – condenser). Ο βαθμός απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος φτάνει το 80%, αλλά παρ’ όλα τα εμφανή πλεονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος, υπάρχει ένα βασικό μειονέκτημα: η κυματομορφή της έντασης και της τάσης του ρεύματος είναι παραμορφωμένες στην έξοδο του μετατροπέα, περιέχουν δηλαδή αρμονικές οι οποίες επηρεάζουν την ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος.

1.7 Ηλεκτροπρόωση πλοίων

1.7.1 Εισαγωγή

Ως ηλεκτροπρόωση ορίζεται το είδος εκείνο της πρόωσης στο οποίο οι άξονες του πλοίου κινούνται απ’ ευθείας (ή και σπανιότερα μέσω μειωτήρων) από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές όπως diesel, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους. Φυσικά οι κινητήρες diesel, αεριοστρόβιλοι και ατμοστρόβιλοι εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης, αλλά αντί να κινούν απ’ ευθείας το αξονικό σύστημα με την έλικα κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως, οπότε και αναφέρονται στη βιβλιογραφία σαν “prime movers” (‘κινητήριες μηχανές’). Η προωστήρια εγκατάσταση συμπληρώνεται από κάποιο σύστημα ελέγχου για τον χειρισμό της, δηλαδή την κράτηση-εκκίνηση, την αυξομείωση στροφών και την αλλαγή φοράς περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων.

Η ηλεκτρική πρόωση έχει αρχίσει να εφαρμόζεται πριν από περίπου 55 χρόνια. Το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, τα συστήματα ήταν του τύπου Σ.Ρ./Σ.Ρ. (συχνά συστήματα Ward-Leonard) δηλ. παραγωγή συνεχούς ρεύματος και κίνηση με συνεχές ρεύμα. Το εναλλασσόμενο ρεύμα αρχίζει να χρησιμοποιείται το 1950, αλλά τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης εξακολουθούν να στηρίζονται σε κινητήρες Σ.Ρ.. Η ανάπτυξη διατάξεων και τεχνικών ελέγχου κινητήρων Ε.Ρ (ηλεκτρονικά ισχύος) τα τελευταία είκοσι χρόνια, που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της πρόωσης από πλευράς τόσο ευελιξίας όσο και οικονομίας καυσίμου, έδωσε τη δυνατότητα για ευρύτερη διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης σε εμπορικά πλοία.



Σχήμα 1.7 Συγκριτικές ανάγκες περιορισμού διαστάσεων (ή βάρους) συναρτήσει της ηλεκτρικής ισχύος για διάφορους τύπους πλοίων [6]

1.7.2 Εφαρμογές της ηλεκτροπρόωσης

Τα τελευταία χρόνια (από τη δεκαετία του '90) η ηλεκτροπρόωση παρουσιάζει έντονη διάδοση σε όλους τους τύπους πλοίων ακόμη και των πολεμικών. Στους παρακάτω τύπους πλοίων θεωρείται ως η καταλληλότερη λύση ως προωστήρια εγκατάσταση[5]:

- πλοία με υψηλές ελικτικές ικανότητες
- πλοία με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων
- πλοία με μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης
- πλοία με ταχύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές
- υποβρύχια και βαθυσκάφη

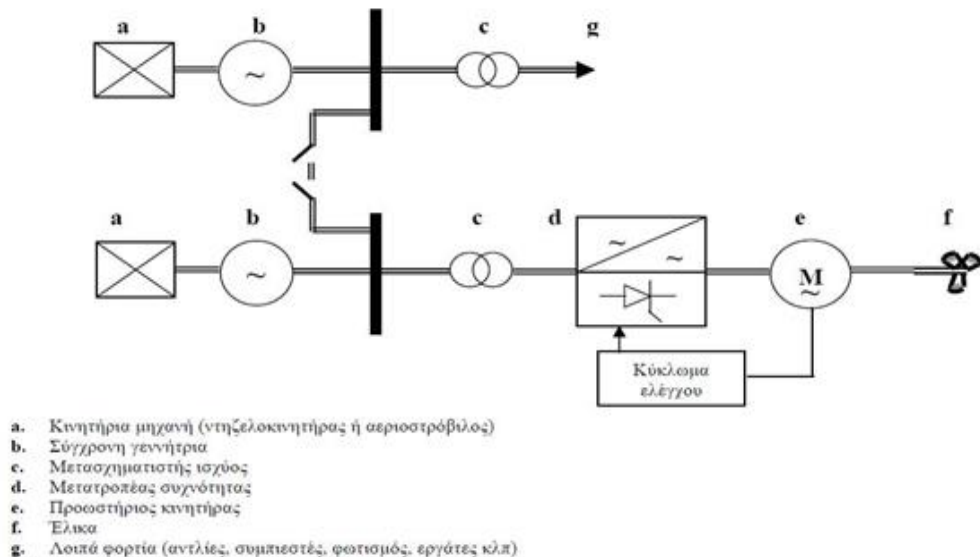
Η ηλεκτροπρόωση βρίσκει πλέον εφαρμογή και σε πολεμικά πλοία επιφάνειας, ωστόσο οι αυστηρότεροι κανονισμοί και οι προδιαγραφές του πολεμικού ναυτικών απαιτούν περισσότερη ανάπτυξη και τελειοποίηση των υποσυστημάτων που αποτελούν την ηλεκτροπροωστήρια εγκατάσταση.

Οι κύριες αιτίες που η ηλεκτροπρόωση βρίσκει περισσότερη εφαρμογή πλέον, φαίνονται παρακάτω:

- η αύξηση των ηλεκτρικών καταναλωτών στα πλοία και η τάση για «ηλεκτροποίηση» των πλοίων (AES), δηλαδή η τάση όλες οι λειτουργίες, κύριες και βοηθητικές, να γίνονται πλέον από ηλεκτρικά συστήματα και μηχανήματα, αντικαθιστώντας υδραυλικά, μηχανικά, ή συστήματα ατμού κλπ,
- η ανάγκη για περισσότερο «αθόρυβη» λειτουργία των πλοίων,
- η αναζήτηση προωστήριων συστημάτων με χαμηλότερο κόστος ζωής και μειωμένες απαιτήσεις επανδρώσεως,

- η ωρίμανση τεχνολογιών που απαιτούνται για να αξιοποιηθεί πλήρως το δυναμικό της ηλεκτροπρόωσης (τεχνολογίες των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος)

Ένα γενικευμένο ηλεκτρολογικό διάγραμμα ενός ηλεκτρικού δικτύου πλοίου με ηλεκτροπρόωση απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 1.8 Γενικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου [5]

Πρέπει να τονιστεί επίσης, ότι η επιλογή της ηλεκτροπρόωσης ως σύστημα πρόωσης ενός πλοίου, προσφέρει περισσότερη ελευθερία στη σχεδίαση και στην επιλογή των υποσυστημάτων και της διάταξης όλης της προωστήριας και ηλεκτρικής εγκατάστασης.

Στο σημείο αυτό και λόγω της μεγάλης ανάπτυξης των ηλεκτροπροωστήριων συστημάτων, αξίζει να αναφερθούν οι παρακάτω ορολογίες που συναντώνται συχνά στη βιβλιογραφία και στη βιομηχανία:

Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Full Electric Propulsion - F.E.P.) :

Η εγκατάσταση προώσεως κατά την οποία το πλοίο κινείται αποκλειστικώς από ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα ζεύγη κινητηρίων μηχανών-γεννητριών που τροφοδοτούν τους κινητήρες προώσεως, υπάρχουν αποκλειστικώς για το σκοπό αυτό (δεν τροφοδοτούν άλλα φορτία). Η ηλεκτρική ισχύς για όλους τους άλλους καταναλωτές του πλοίου παράγεται από άλλες γεννήτριες.

Ολοκληρωμένη Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Integrated Full Electric Propulsion - I.F.E.P.) :

Η εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης στην οποία τα ίδια ζεύγη κινητηρίων μηχανών - γεννητριών, τροφοδοτούν τόσο τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως, όσο και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου.

Πλήρως Εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship -A.E.S.) :

Το πλοίο που διαθέτει ολοκληρωμένη πλήρη ηλεκτροπρόωση και που επιπλέον

σε ευρεία έκταση επιτελεί τις λειτουργίες του μέσω ηλεκτρικών μηχανημάτων και συστημάτων.

Ηλεκτρικό δίκτυο προώσεως (Propulsion Network) :

Το τμήμα εκείνο (ανεξάρτητο ή 'ενσωματωμένο') του ηλεκτρικού δικτύου πλοίου που τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία που σχετίζονται με την πρόωση.

Ηλεκτρικό δίκτυο χρήσεως (Ship Service System) :

Το υπόλοιπο, πλην δικτύου προώσεως, ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου.

1.7.3 Πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης είναι τα ακόλουθα:

- Συνεχής μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της έλικας και της ταχύτητας του πλοίου σε όλο το πεδίο 0 - 100 %.
- Γρήγορη απόκριση κατά τη διάρκεια χειρισμών και δυναμικής τοποθέτησης του σκάφους.
- Χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.
- Οικονομία καυσίμου, καθώς είναι δυνατή η επιλογή των μηχανών που θα λειτουργούν έτσι, ώστε η καθεμία να λειτουργεί κοντά στο βέλτιστο σημείο.
- Ελευθερία στην τοποθέτηση των επιμέρους μηχανημάτων του ενεργειακού συστήματος, που προσφέρει ευελιξία στον σχεδιασμό του σκάφους και εξοικονόμηση ωφέλιμου χώρου.
- Πλήρης εκμετάλλευση της στρεπτικής ροπής σε όλο το πεδίο λειτουργίας.
- Ευκολία αυτοματισμού.
- Αυξημένη αξιοπιστία (πολλά συστήματα συνδεδεμένα παράλληλα) και, επομένως, αυξημένη ασφάλεια.
- Περιορισμός των εκπεμπόμενων ρύπων διότι η κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερη, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, και επειδή ιδιαίτερα οι εκπομπές NO_x είναι αισθητά χαμηλότερες όταν, π.χ., ένας μεσόστροφος κινητήρας Diesel λειτουργεί με σταθερές στροφές, όπως συμβαίνει στα νέα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης.
- Περιορισμός του κινδύνου ρύπανσης του περιβάλλοντος από ατυχήματα όπως αυτά των δεξαμενοπλοίων, χάρη στην ταχύτερη απόκριση του συστήματος κατά τους χειρισμούς και τη δυναμική τοποθέτηση του σκάφους.

1.7.4 Μειονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης

Τα μειονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης είναι τα ακόλουθα:

- Υψηλό κόστος επένδυσης.
- Μεγαλύτερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, σε σύγκριση με το μηχανικό σύστημα. Ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης μόνον όταν κάθε μηχανή λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής και επί μεγάλα χρονικά διαστήματα στη βέλτιστη περιοχή.

- Πρόβλημα ποιότητας ισχύος λόγω των αρμονικών συνιστωσών ρεύματος και τάσεως που δημιουργούνται από τα ηλεκτρονικά ισχύος. Οι αρμονικές αυτές αφενός προσαυξάνουν τη συνολική κυκλοφορούσα άεργο ισχύ στο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά επιπλέον δημιουργούν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Έτσι ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος που παράγεται επηρεάζει αρνητικά όλες τις ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις –πρωτίστως τα κυκλώματα ελέγχου των ίδιων των ηλεκτρονικών ισχύος – ενώ σε περιπτώσεις στρατιωτικών εφαρμογών αυξάνει τα επίπεδα της ηλεκτρομαγνητικής υπογραφής των πλοίων. Τέλος, είναι δυνατόν οι αρμονικές παραμορφώσεις των ηλεκτρικών μεγεθών να διεγείρουν ιδιόσυχνότητες ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, όπως είναι τα φαινόμενα σιδηροσυντονισμού στους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε πολλές εφαρμογές, η συνισταμένη πλεονεκτημάτων - μειονεκτημάτων είναι θετική, οπότε η ηλεκτρική πρόωση είναι η ενδεδειγμένη λύση, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος λειτουργίας (μειωμένο πλήρωμα, οικονομικότερη συντήρηση, γρηγορότερα ταξίδια, μη αναγκαιότητα ρυμούλκησης κοκ).

1.8 Απαιτήσεις και κανονισμοί ηλεκτρικών δικτύων

1.8.1 Γενικά

Η ηλεκτρολογική εγκατάσταση ενός πλοίου κατά την κατασκευή του, πρέπει να γίνεται με βάση τις προδιαγραφές κάποιου αναγνωρισμένου νηογνώμονα, των διεθνών κανονισμών και με βάση τις διεθνείς συμβάσεις της S.O.L.A.S αλλά και MARPOL (σχετικά με τη ρύπανση του περιβάλλοντος από τις μηχανές του πλοίου). Σύμφωνα με τους κανονισμούς, οι εγκαταστάσεις τροφοδοσίας ηλεκτρικής ισχύος περιλαμβάνουν όλες τις εγκαταστάσεις για την παραγωγή, τη μετατροπή, την αποθήκευση και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ηλεκτρικός εξοπλισμός του πλοίου διαχωρίζεται σε ουσιώδη εξοπλισμό και μη ουσιώδη εξοπλισμό.

Ο ουσιώδης εξοπλισμός είναι αυτός που αφορά στα μηχανήματα κύριας πρόωσης του πλοίου, στην κατεύθυνση και πλοήγηση του πλοίου, στην διατήρηση της ασφάλειας του πλοίου και τη διατήρηση της ασφάλειας των ανθρώπινων ζώων στη θάλασσα. Ο ουσιώδης εξοπλισμός χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες, σε πρωτεύοντα ουσιώδη και δευτερεύοντα ουσιώδη. Ο πρωτεύων ουσιώδης αφορά σε εξοπλισμό που πρέπει να βρίσκεται σε συνεχή και αδιάκοπη λειτουργία (π.χ. σύστημα πηδαλίου, αντλίες λίπανσης, αντλίες τροφοδοσίας πετρελαίου, κύρια συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης κλπ). Ο δευτερεύων ουσιώδης περιλαμβάνει εξοπλισμό που για σύντομο χρονικό διάστημα δεν χρειάζεται να είναι σε αδιάκοπη λειτουργία (π.χ. μονάδες επεξεργασίας πετρελαίου, εγκαταστάσεις εκκίνησης των βοηθητικών και κύριων μηχανών, αντλίες ερμητισμού, αντλίες πυρκαγιάς, εργάτης άγκυρας, κλπ.). Τέλος, ο μη ουσιώδης εξοπλισμός περιλαμβάνει τα φορτία που δεν περιλαμβάνονται σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες.

Ο πρωτεύων και ο δευτερεύων ουσιώδης εξοπλισμός του πλοίου θα πρέπει να τροφοδοτούνται κατευθείαν από τον κύριο ή έκτακτης ανάγκης πίνακα. Ο πρωτεύων και δευτερεύων 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.

1.8.2 Συχνότητα και τάση του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου

Τα μέγιστα επίπεδα τάσεων λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων με βάση τους κανονισμούς του GL, φαίνονται στον Πίνακα 1.2.

Είδος εγκατάστασης	Μέγιστη επιτρεπόμενη τάση		
	Συνεχές ρεύμα	Μονοφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα	Τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα
α. Εγκαταστάσεις ισχύος και θέρμανσης καθώς και πρίζες για γενική χρήση	250 V	250 V	500 V
β. Εγκαταστάσεις φωτισμού, επικοινωνίας, διαταγών και πληροφοριών καθώς και πρίζες για γενική χρήση	250 V	250 V	-
γ. Πρίζες για την τροφοδότηση φορητών συσκευών που χρησιμοποιούνται σε ακάλυπτα καταστρώματα ή σε στενούς ή υγρούς χώρους με μέταλλα τοιχώματα εκτός από λέβητες και δεξαμενές: 1. γενικά 2. όταν χρησιμοποιείται απομονωτικός μετασχηματιστής που τροφοδοτεί μία μόνο συσκευή 3. σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται συσκευές με προστατευτική μόνωση (διπλή μόνωση) 4 σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται διακόπτες ασφαλείας ισχύος ≤ 30 mA	50 V ⁽¹⁾ - 250 V -	50 V ⁽¹⁾ 250 V ⁽²⁾ 250 V 250 V	- - - 500 V
δ. Κινητές συσκευές κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως ηλεκτρικός εξοπλισμός εμπορευματοκιβωτίων, κινητήρες, ανεμιστήρες και κινητές αντλίες, οι οποίες κανονικά δεν μετακινούνται κατά τη λειτουργία και των οποίων τα αγωγία μέρη με τα οποία είναι δυνατή η φυσική επαφή είναι γειωμένα με αγωγό γείωσης που είναι ενσωματωμένος στο καλώδιο σύνδεσης και οι οποίες, επιπλέον του εν λόγω αγωγού γείωσης, είναι συνδεδεμένες με τη γάστρα λόγω της τοποθέτησής τους ή με πρόσθετο αγωγό	250 V	250 V	500V
ε. Πρίζες για την τροφοδότηση φορητών συσκευών που χρησιμοποιούνται στους λέβητες και τις δεξαμενές	50 V ⁽¹⁾	50 V ⁽¹⁾	-
Παρατηρήσεις: 1) Όταν η εν λόγω τάση προέρχεται από δίκτυα ανώτερης τάσης, πρέπει να χρησιμοποιείται γαλβανική μόνωση (μετασχηματιστής ασφαλείας). 2. Όλοι οι πόλοι του δευτερεύοντος κυκλώματος πρέπει να είναι μονωμένοι.			

Πίνακας 1.2 Μέγιστα επιτρεπτά επίπεδα τάσεων [9]

Κατά παρέκκλιση, εφόσον λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα προφύλαξης, επιτρέπεται η χρήση υψηλότερων τάσεων:

- στις εγκαταστάσεις ισχύος που το απαιτεί η ισχύς τους,
- για ειδικές εγκαταστάσεις του πλοίου, όπως εγκαταστάσεις ασυρμάτων και ανάφλεξης.

Ως **χαμηλής τάσης** συστήματα ορίζονται αυτά που λειτουργούν σε τάση από 50 V έως και 1000 V, με συχνότητα λειτουργίας 50 ή 60 Hz ή τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος με μέγιστη τάση λειτουργίας τα 1500 V.

Ως **μέσης τάσης** συστήματα ορίζονται αυτά που λειτουργούν σε τάση από 1 kV έως και 17,5 kV, με συχνότητα 50 ή 60 Hz ή τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος με τάση λειτουργίας μεγαλύτερη από 1500 V.

Σε **δίκτυα χαμηλής τάσης**, τα παρακάτω συστήματα είναι επιτρεπτά:

Για συστήματα Σ.Ρ. και μονοφασικού εναλλασσομένου ρεύματος:

- 2 αγωγοί, με τον έναν αγωγό γειωμένο (1/N/PE)
- 1 αγωγός με επιστροφή μέσω της γάστρας του πλοίου (1/PEN)
- 2 αγωγοί μονωμένοι από τη γάστρα του πλοίου (2/PE)

Για τριφασικά συστήματα εναλλασσομένου ρεύματος:

- 4 αγωγοί με τον ουδέτερο γειωμένο, χωρίς επιστροφή μέσω της γάστρας του πλοίου (3/N/PE)
- 3 αγωγοί με τον ουδέτερο γειωμένο μέσω της γάστρας του πλοίου (3/PEN)
- 3 αγωγοί μονωμένοι από τη γάστρα του πλοίου (3/PE)

Τα συστήματα μέσης τάσεως, γειώνονται συνήθως μέσω αντίστασης ή αντίδρασης. Για περισσότερες μπορεί να ανατρέξει κανείς στη βιβλιογραφία [7].

Η επιστροφή μέσω της γάστρας του πλοίου δεν επιτρέπεται σε πλοία μεγαλύτερα από 1600 GRT (Gross Register Tonnage). Η σύνδεση του καλωδίου επιστροφής στη γάστρα πρέπει να γίνει σε μέρος εύκολο να ελεγχθεί και όχι σε τμήματα με απομονωμένα διαφράγματα π.χ. χώροι ψυγείων. Σε ένα αγειώτο σύστημα, τα ουδέτερα σημεία των γεννητριών δεν πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους. Η αντίσταση μόνωσης ενός αγειώτου συστήματος θα πρέπει να παρακολουθείται συνεχώς. Τέλος στους παρακάτω πίνακες δίνονται οι επιτρεπτές διακυμάνσεις της τάσης και της συχνότητας των ηλεκτρικών δικτύων των πλοίων.

		Διακυμάνσεις	
		Συνεχείς	Σύντομης Διάρκειας
Γενικά	Συχνότητας	±5%	±10% 5 s
	Τάσης	±10%	±20% 1.5 s
Λειτουργία με Συσσωρευτή	Τάσης	+30% / -25%	

Πίνακας 1.3 Διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας σε E.P. συστήματα διανομής [9]

Παράμετροι	Μεταβολές
Ανοχή Τάσης (συνεχής)	±10%
Κυκλική Διακύμανση Απόκλισης Τάσης	5%
Κυμάτωση Τάσης	10%

Πίνακας 1.4 Διακυμάνσεις τάσης σε Σ.Ρ. συστήματα διανομής [9]

1.8.3 Ηλεκτρικός εξοπλισμός

Δύο από τις σημαντικότερες απαιτήσεις για την επιλογή και εγκατάσταση του ηλεκτρολογικού υλικού των πλοίων είναι οι εξής:

- Εξαιρετική αξιοπιστία, ιδιαίτερα για τα στοιχεία της εγκατάστασης που έχουν σχέση με ζωτικές λειτουργίες του σκάφους (πρόωση, πηδαλιουχία, φωτισμός ναυσιπλοΐας, τηλεπικοινωνία).
- Ασφάλεια από πλευράς πυρκαγιάς : υλικά άκαυστα ή τουλάχιστον βραδύκαυστα, αποφυγή σπινθηρισμών κλπ.

Οι ηλεκτρικές μηχανές και συσκευές πρέπει να είναι ικανές να λειτουργούν ακόμη και με κλίση 150° προς τα δεξιά ή αριστερά, με διατοιχισμό 22,5°, με διαμήκη κλίση 5° και προνευστασμό 7,5°. Πρέπει επίσης να μπορούν να λειτουργούν ικανοποιητικά σε τελική θερμοκρασία έως 85 °C όταν βρίσκονται εκτός μηχανοστασίου ή 90-95°C όταν βρίσκονται στο μηχανοστάσιο. Η τελική θερμοκρασία καθορίζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και τη θέρμανση του μηχανήματος κατά τη λειτουργία του. Ας σημειωθεί ότι η θερμοκρασία αυτή επηρεάζει τόσο την απόδοση του μηχανήματος όσο και τη διάρκεια ζωής του. Για παράδειγμα, μια επαφή ή ένας αυτόματος διακόπτης μπορεί να μη λειτουργήσει εάν υπερθερμανθεί. Όταν η θερμοκρασία αυξάνει, η τάση μιας γεννήτριας πέφτει, ενώ η ταχύτητα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος αυξάνει. Είναι απαραίτητος λοιπόν ο αερισμός των μηχανών, που όταν δεν είναι επαρκής για τη διατήρηση των θερμοκρασιών σε χαμηλά επίπεδα, συμπληρώνεται με κατάλληλο σύστημα ψύξης.[1]

Συνιστάται η τοποθέτηση των μηχανών με τον άξονα περιστροφής τους είτε κατακόρυφο είτε παράλληλο με την τρύπιδα του πλοίου. Εάν η τοποθέτηση κατά το εγκάρσιο επίπεδο είναι αναπόφευκτη, θα πρέπει να ληφθούν μέτρα (τοποθέτηση ωστικών εδράνων κλπ.) ώστε να αποφευχθούν κτυπήματα του άξονα ή προβλήματα λίπανσης των εδράνων κατά τους διατοιχισμούς του πλοίου.

Τέλος, στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των πλοίων πρέπει να υπάρχει προστασία από ηλεκτροπληξία είτε από άμεση είτε από έμμεση επαφή του ανθρώπου με ηλεκτροφόρους αγωγούς ή συσκευές. Οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να αποφεύγεται η πρόσβαση ή η επαφή σε ηλεκτροφόρο εξοπλισμό από τον άνθρωπο. Για να αποφευχθεί ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας, σε

περίπτωση σφάλματος στη μόνωση του εξοπλισμού, τα παρακάτω μέτρα μπορούν να ληφθούν:

- Γείωση προστασίας : όλα τα αγωγίμα μέρη του ηλεκτρικού εξοπλισμού του πλοίου που δεν διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα, αλλά μπορούν σε περίπτωση σφάλματος να παρουσιάσουν κάποια τάση επικίνδυνη για τον άνθρωπο, θα πρέπει να γειώνονται στη γάστρα του πλοίου.
- Μόνωση προστασίας (διπλή μόνωση)
- Υιοθέτηση τάσεων που δεν είναι επικίνδυνες για τον άνθρωπο σε περίπτωση σφάλματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Συστήματα γείωσης

2.1 Εισαγωγή

Ο όρος γείωση συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ηλεκτρική σύνδεση μίας εγκατάστασης με το χώμα, το έδαφος ή τη γη. Εξ ορισμού η λέξη γείωση φαντάζει αδόκιμη όταν αναφερόμαστε σε υδάτινο περιβάλλον, εφόσον παραπέμπει νοηματικά σε σύνδεση με τη γη. Ο μόνος τρόπος που μπορεί να συνδεθεί το πλοίο με πραγματική γείωση, είναι όταν τροφοδοτείται ηλεκτρικά από πηγή που βρίσκεται στην ξηρά και είναι γειωμένη στο έδαφος. Για τα πλοία ορίζεται ως κατ' ουσίαν γη το ίδιο το νερό πάνω στο οποίο πλέει το σκάφος.

Στα πλοία, η γείωση έχει την ίδια έννοια ηλεκτρολογικά, αλλά υλοποιείται με την σύνδεση του συστήματος στο κέλυφος του, εφόσον αυτό είναι μεταλλικό. Σε περίπτωση που είναι κατασκευασμένο από άλλο υλικό, απαιτείται η εγκατάσταση μίας μεταλλικής πλάκας κατά μήκος της καρίνας και κάτω από τη στάθμη της θάλασσας έτσι ώστε η πλάκα να βρίσκεται διαρκώς σε επαφή με το νερό.

Όλα τα δομικά μέρη ενός πλοίου, πάνω και κάτω από το κατάστρωμα, που είναι συνδεδεμένα με το μεταλλικό κέλυφος ή την πλάκα γείωσης, θεωρούνται ισοδυναμικά και έχουν ιδανικά μηδενικό δυναμικό. Η σύνδεση με το επίπεδο γείωσης πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η ροή ρεύματος στη γάστρα του πλοίου, με εξαίρεση κάποιων συγκεκριμένων εφαρμογών. Όλα τα μεταλλικά μέρη του πλοίου που δεν είναι συγκολλημένα με το κέλυφος, πρέπει να συνδεθούν με κατάλληλους μεταλλικούς ιμάντες και βιδωτές συνδέσεις.

Η ίδια μεταλλική πλάκα αποτελεί τη γη και για τον ηλεκτρικό εξοπλισμό. Όλα τα ηλεκτρικά συστήματα πρέπει να είναι συνδεδεμένα με αυτή κατά συγκεκριμένο τρόπο. Όλα τα εκτεθειμένα μη ρευματοφόρα μέρη του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού πρέπει να συνδέονται με την ισοδυναμική επιφάνεια που δημιουργείται. Τα συνδεδεμένα συστήματα ισχύος μπορεί να είναι γειωμένα συμπαγώς ή μέσω αντίστασης. Ακόμα και αγείωτα συστήματα συνδέονται με αυτή μέσω των εγκάρσιων χωρητικοτήτων ή μέσω κυκλωμάτων ανίχνευσης σφάλματος[10].

Η σημασία της γείωσης είναι αδιαμφισβήτητη, τόσο για τον εξοπλισμό όσο και για τους χειριστές αυτού. Αξίζει να σημειωθεί πως οι κεραίες αξιοποιούν τη γη, ως επίπεδο αναφοράς στα συστήματα ραδιοεπικοινωνίας. Η ακεραιότητα αυτής λοιπόν, πρέπει να διατηρηθεί και να προστατευτεί καθώς η μηχανική καταπόνηση που υφίσταται δεν είναι καθόλου αμελητέα. Εν κατακλείδι, η ασφάλεια των

συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την καλή λειτουργία της γείωσης.

2.2 Τύποι γειώσεων πλοίων

2.2.1 Εισαγωγή

Το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ενός πλοίου γειώνεται με έναν από τους ακόλουθους τρόπους [10]:

- Συμπαγώς γειωμένο
- Γειωμένο μέσω επαγωγικής αντίδρασης
- Γειωμένο μέσω αντίστασης (υψηλής ή χαμηλής)
- Αγείωτο

Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 45[11], η μέθοδος γείωσης του εκάστοτε πλοίου, σε εφαρμογές **χαμηλής τάσης** (600V ή λιγότερα), πρέπει να καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τα εξής:

- Τα συστήματα γείωσης οφείλουν να μειώνουν τις ενδεχόμενες μεταβατικές υπερτάσεις.
- Ο σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να επιτρέπει την αδιάλειπτη τροφοδότηση ισχύος, ειδικότερα των κρίσιμων φορτίων του πλοίου, υπό συνθήκες μονοφασικού σφάλματος προς γη, στο μέγιστο βαθμό που αυτός είναι δυνατός.
- Τα συστήματα πρέπει να είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης, που ρέει στο κέλυφος του πλοίου.

Προκειμένου να ικανοποιούνται αυτά τα κριτήρια, τα συστήματα οφείλουν να σχεδιάζονται με μία από τις ακόλουθες μεθοδολογίες γείωσης:

- Αγείωτο σύστημα, έχοντας όλους τους ρευματοφόρους αγωγούς απόλυτα μονωμένους από τη γη, σε όλο το σύστημα. Τα αγείωτα συστήματα πρέπει να διαθέτουν διατάξεις για συνεχή παρακολούθηση σφαλμάτων γείωσης.
- Γείωση μέσω υψηλής αντίστασης, τέτοιας ώστε η τιμή των μονοφασικών σφαλμάτων προς γη να περιορίζεται έως τα 5A. Τα συστήματα γείωσης υψηλής αντίστασης πρέπει να διαθέτουν διατάξεις για συνεχή παρακολούθηση σφαλμάτων γείωσης.
- Συμπαγώς γειωμένο. Τα συμπαγώς γειωμένα συστήματα περιορίζονται στην τροφοδότηση μη κρίσιμων φορτίων, όπως είναι ο γενικός φωτισμός, κυκλώματα μαγειρείων κλπ. Όταν χρησιμοποιείται ένα τέτοιο σύστημα διανομής, ο ουδέτερος αγωγός πρέπει να είναι πλήρους μεγέθους ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση λόγω αρμονικής παραμόρφωσης από μη γραμμικά φορτία.

Για τα συστήματα που είναι γειωμένα συμπαγώς ή μέσω υψηλής αντίστασης, πρέπει τα καλώδια και τα κανάλια διέλευσης αυτών να παρέχονται με αγωγούς γείωσης εξοπλισμού. Η διαστασιολόγηση γίνεται σύμφωνα με τυποποίηση NEC Table 250-122 για να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα να ρέουν ρεύματα βραχυκύκλωσης στο κέλυφος του πλοίου [11].

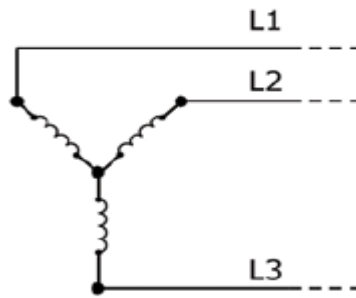
Τα συστήματα **μέσης τάσης** (600-15000V) στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων χρησιμοποιούν σύστημα τριών καλωδίων χωρίς ουδέτερο αγωγό επιστροφής. Ως προς τη γείωση, υπάρχουν πολλές ομοιότητες με τα συστήματα χαμηλής τάσης. Όσο τα ηλεκτρικά φορτία στο πλοίο γίνονται όλο και μεγαλύτερα, αυξάνεται το μέγεθος των ζυγών και των καλωδίων και συνεπώς το κόστος και οι απώλειες της εγκατάστασης. Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος μέσης τάσης είναι η χρήση μικρότερων αγωγών. Όταν αντιμετωπίζουμε δίκτυα μέσης τάσης πρέπει να λαμβάνουμε υπόψιν τα εξής[10]:

- Τα ρεύματα προς γη μπορούν να είναι αρκετά υψηλά ειδικά σε μεγάλες γεννήτριες και μετασχηματιστές.
- Τα συστήματα γείωσης που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι μέσω υψηλής ή χαμηλής αντίστασης, αντίδρασης ή συμπαγής γείωσης.
- Στο αγείωτο σύστημα μέσης τάσης εξακολουθεί να υπάρχει το πρόβλημα εμφάνισης τόξου σε περίπτωση σφάλματος γείωσης.
- Το ρεύμα φόρτισης, παρότι ελάχιστο στη χαμηλή τάση, είναι αρκετά υψηλό στη μέση τάση. Πράγματι το ρεύμα φόρτισης στα 15kV χρειάζεται μέριμνα ως προς τη διασπορά της θερμότητας, καθώς μπορεί να παρουσιαστεί στο σημείο του σφάλματος βλάβη στον αντιστάτη.

2.2.2 Αγείωτο σύστημα

Το αγείωτο σύστημα είναι αυτό κατά το οποίο δεν υπάρχει πουθενά εκούσια σύνδεση με τη γη. Ο χαρακτηρισμός «αγείωτο» είναι ουσιαστικά παραπλανητικός, καθώς κάθε σύστημα είναι γειωμένο μέσω της εγκάρσιας χωρητικής φόρτισης προς τη γη ή μέσω του συστήματος ανίχνευσης σφάλματος.

Ένα αγείωτο σύστημα διανομής (με μονωμένο ουδέτερο αγωγό) προτιμάται έναντι ενός γειωμένου συστήματος ούτως ώστε να μειωθεί η πιθανότητα απώλειας κρίσιμων φορτίων για τη λειτουργία του πλοίου, εξαιτίας ενδεχόμενου σφάλματος γείωσης. Στην περίπτωση μονοφασικού σφάλματος γείωσης ο εξοπλισμός θα συνεχίσει να λειτουργεί, καθώς δεν ενεργοποιείται το σύστημα προστασίας ενώ η λάμπα ανίχνευσης σφάλματος γείωσης, δείχνει την κατάσταση του προβλήματος [13].



Σχήμα 2.1 Αγείωτο σύστημα [12]

Οι ενέργειες που απαιτούνται για να ξεπεραστεί το πρόβλημα είναι:

- i) εύρεση του προβληματικού κυκλώματος
- ii) απενεργοποίηση της προβληματικής λειτουργίας
- iii) σύνδεση με εφεδρική παροχή για να εξασφαλιστεί η συνέχεια λειτουργίας
- iv) διόρθωση του σφάλματος

Το αγείωτο σύστημα είναι ασφαλές όσο δεν υπάρχει δίοδος μεταξύ της φάσης και της γης. Επιπλέον, το αγείωτο σύστημα μπορεί να είναι επικίνδυνο σε περίπτωση μονοφασικού σφάλματος καθώς οι άλλες φάσεις παραμένουν ενεργές, με ενδεχόμενη αύξηση της τάσης τους έως και 173%. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος είναι ότι στις περισσότερες περιπτώσεις το ρεύμα σφάλματος είναι τόσο μικρό που δεν προκαλεί σημαντικές φθορές, ούτε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα πυρκαγιάς. Δεδομένου ότι η μόνωση των φάσεων είναι ικανοποιητική, η τιμή του ρεύματος σφάλματος εξαρτάται ολοκληρωτικά από τη χωρητικότητα φάσης – γης των δύο υγιών φάσεων.

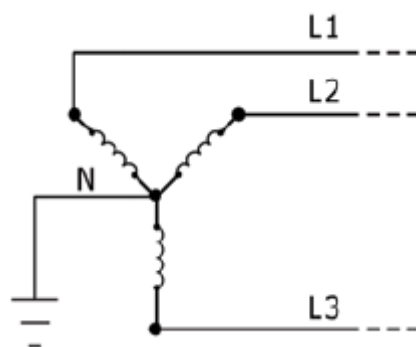
Ωστόσο, η χωρητικότητα φάσης – γης σε ένα ηλεκτρικό σύστημα πλοίου αυξάνεται αναπόφευκτα εξαιτίας της μικρής απόστασης των καλωδίων και των αγωγών από τη γάστρα του πλοίου, και των τυλιγμάτων των μηχανών. Επιπρόσθετη χωρητικότητα εμφανίζεται από ραδιοφωνικές παρεμβολές. Τα πλεονεκτήματα ενός μικρού ρεύματος σφάλματος σε συστήματα με μικρή χωρητικότητα είναι σημαντικά σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Παρόλα αυτά, αντισταθμίζεται από έμφυτα μειονεκτήματα όπως η χειροκίνητη εύρεση της τοποθεσία του σφάλματος. Αυτό μπορεί να είναι δύσκολο και κουραστικό ακόμα και εκεί που υπάρχει ειδικός εξοπλισμός. Επιπλέον, η γρήγορη εύρεση της θέσεως του σφάλματος είναι αναγκαία για να διατηρηθεί η ακεραιότητα του συστήματος. Τέλος, απαιτούνται μετασχηματιστές υποβιβασμού, διπολικοί διακόπτες και ασφάλειες για την τροφοδότηση χαμηλότερης τάσης υποσυστημάτων δύο καλωδίων [14].

2.2.2 Συμπαγώς γειωμένο σύστημα

Το συμπαγώς γειωμένο σύστημα χρησιμοποιείται σε ειδικές περιπτώσεις στο πλοίο για την ασφαλή χρήση φορητών συσκευών. Η υλοποίηση του πραγματοποιείται με χρήση γαλβανικής μόνωσης στον ουδέτερο αγωγό.

Συνήθως όταν χρησιμοποιείται αυτού του είδους η γείωση, εφαρμόζεται συνδεσμολογία αστέρα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2, όπου ο ουδέτερος αγωγός ξεκινά από το κοινό σημείο των τριών φάσεων. Το συμπαγώς γειωμένο σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί και σε συνδεσμολογία τριγώνου με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού.

Χαρακτηριστικό της συμπαγούς γείωσης είναι ότι μεγιστοποιεί το ρεύμα σφάλματος, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούνται οι υπερτάσεις στις υγιείς φάσεις και ο χρόνος αποσύνδεσης του εξοπλισμού. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η άμεση ενεργοποίηση του διακοπτικού εξοπλισμού και η εύκολη εύρεση της θέσης σφάλματος.

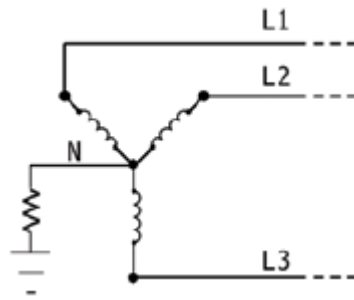


Σχήμα 2.2 Συμπαγώς γειωμένο σύστημα [12]

2.2.3 Γείωση μέσω υψηλής αντίστασης

Το σύστημα γείωσης υψηλής αντίστασης γενικά χρησιμοποιείται σε συστήματα υψηλής ισχύος και μέσης ή υψηλής τάσης. Η τιμή της αντίστασης του συστήματος καθορίζεται προκειμένου να ελαχιστοποιείται η κυκλοφορία ρευμάτων σφάλματος γείωσης. Στην εν λόγω μεθοδολογία, το ρεύμα σφάλματος γείωσης παρακολουθείται και καταγράφεται διαρκώς για λόγους προστασίας και αδιάλειπτης λειτουργίας των συσκευών.

Η χρήση υψηλής αντίστασης συνεπάγεται στη μείωση του ρεύματος σφάλματος σε ακόμα χαμηλότερες τιμές. Συνεπώς, δεν ενεργοποιείται άμεσα η προστασία αφήνοντας περιθώριο να ευρεθούν και να διορθωθούν τα σφάλματα, χωρίς να διακόπτεται η τροφοδοσία. Επιπλέον τα συστήματα γείωσης μέσω υψηλής αντίστασης οφείλουν να περιλαμβάνουν εξοπλισμό που εξυπηρετεί τη γρήγορη εύρεση του σφάλματος. Αποτέλεσμα αυτού είναι η επιτάχυνση της διόρθωσης της βλάβης και η βελτίωση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας [14].



Σχήμα 2.3 Γειωμένο σύστημα μέσω υψηλής ή χαμηλής αντίστασης [12]

2.2.4 Γείωση μέσω χαμηλής αντίστασης

Η μέθοδος γείωσης του ουδετέρου μέσω χαμηλής αντίστασης εφαρμόζεται συνήθως σε περιπτώσεις όπου δεν μπορεί να εφαρμοστεί γείωση υψηλής αντίστασης ή συμπαγής γείωση. Για παράδειγμα, είναι πιθανό να απαιτείται ένα ρεύμα σφάλματος για διακοπτικούς λόγους, κάτι το οποίο απαγορεύει τη χρήση υψηλής αντίστασης, ενώ η συμπαγής γείωση μπορεί να συντελέσει σε τεράστια ρεύματα σφάλματος, ειδικά όταν αναφερόμαστε σε γεννήτριες. Τα συστήματα γείωσης μέσω χαμηλής αντίστασης είναι παρόμοια με αυτά που γειώνονται μέσω υψηλής. Η τιμή της αντιστάτης γείωσης του ουδετέρου επιλέγεται ώστε το ρεύμα σφάλματος να περιοριστεί μεταξύ 200-1200A, όπως απαιτεί η προστασία. Ωστόσο, σε γεννήτριες μπορεί να επιλεγεί τέτοια αντίσταση ώστε να περιορίζεται το ρεύμα σφάλματος στην τιμή του τριφασικού συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης ή του ρεύματος πλήρους φόρτισης, απλούστατα για να αποφεύγεται η καταπόνηση του διακόπτη προστασίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος γείωσης χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα μέσης τάσης με φορτία τριών αγωγών και εφόσον είναι ανεκτό το σύστημα να βγει εκτός λειτουργίας λόγω σφάλματος γείωσης. Τέλος, ως προς το κόστος εγκατάστασης, το σύστημα χαμηλής αντίστασης είναι ακριβότερο από το σύστημα συμπαγούς γείωσης αλλά φθηνότερο από το σύστημα υψηλής αντίστασης [14].

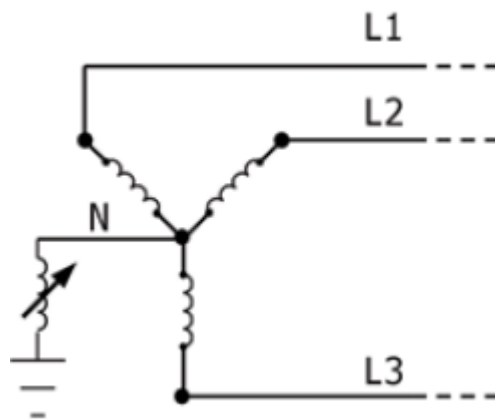
2.2.5 Γείωση μέσω ρυθμιζόμενης επαγωγικής αντίδρασης

Η γείωση μέσω επαγωγικής αντίδρασης υλοποιείται με την σύνδεση τουλάχιστον ενός ουδετέρου στη γη μέσω μιας εκ των ακόλουθων επαγωγικών αντιδράσεων όπως:

- i) πηνίο
- ii) το πηνίο του Πέτερσεν (Petersen coil)

iii) ή άλλων παρόμοιων διατάξεων.

Το πηνίο είναι σε σειρά με την εγκάρσια χωρητικότητα φάσης-γης σε κάθε αγωγό φάσης και ρυθμίζεται έτσι ώστε να παράγει μια σταθερή αντίσταση στο κύκλωμα. Η τιμή του πηνίου προσαρμόζεται ανάλογα με το είδος των φορτίων τα οποία είναι συνδεδεμένα εκείνη τη στιγμή, ενώ το κύριο μειονέκτημα του σχεδιασμού αυτού είναι ότι πρέπει να προσαρμόζεται διαρκώς, καθώς διαφορετικά φορτία ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται. Σε πολλές εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές, η γείωση μέσω αντίδρασης πραγματοποιείται στους ουδέτερους αγωγούς των γεννητριών ή των μετασχηματιστών. Στις περισσότερες γεννήτριες, η συμπαγής γείωση επιτρέπει την ανάπτυξη μεγαλύτερων ρευμάτων σφάλματος γείωσης από αυτήν που μπορούν να ανεχτούν τα τυλίγματα της γεννήτριας. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται αντίδραση για να μειωθεί το ρεύμα σφάλματος. Αυτή η αντίδραση ιδανικά, περιορίζει το ρεύμα σφάλματος σε μια μικρή σχετική τιμή συνήθως μεταξύ 200-800 A, αντισταθμίζοντας την χωρητική συνιστώσα του.



Σχήμα 2.3 Γειωμένο σύστημα μέσω ρυθμιζόμενης αντίδρασης [12]

2.3 Σύγκριση τύπων γειώσεων

Στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί αναφέρονται τα χαρακτηριστικά κάθε είδους γείωσης. Η ανάλυση αυτών φαίνεται παρακάτω [10] :

Εύρος σφάλματος γείωσης: Η ενεργοποίηση των διακοπών είναι απαραίτητη στη γείωση μέσω χαμηλής αντίστασης, αντίδρασης και στη συμπαγή γείωση. Η γείωση υψηλής αντίστασης και τα αγείωτα συστήματα έχουν ελάχιστα ρεύματα σφάλματος που υπό κανονικές συνθήκες ανέχονται χωρίς ενεργοποίηση προστασίας.

Μετάδοση σφάλματος: Τα σφάλματα γείωσης στη γείωση υψηλής αντίστασης και στα αγείωτα συστήματα συνήθως δεν μετατρέπονται σε πολυφασικές βλάβες. Αντιθέτως, στα συμπαγώς γειωμένα και τα γειωμένα μέσω αντίδρασης συστήματα τα μονοφασικά σφάλματα μπορούν γρήγορα να κλιμακωθούν σε πολυφασικά σφάλματα. Τα γειωμένα συστήματα μέσω χαμηλής αντίστασης περιορίζουν τα ρεύματα σφάλματος και είναι λιγότερο πιθανό να εξελιχθούν σε πολυφασικά, εφόσον ο χρόνος αποκοπής δεν είναι πολύ μεγάλος.

Σχηματισμός Τόξου: Ο κίνδυνος σχηματισμού τόξου από σφάλματα γείωσης είναι αμελητέος για τα αγείωτα καθώς και για τα υψηλής αντίστασης συστήματα. Ο κίνδυνος σχηματισμού τόξου είναι μέγιστος στο συμπαγώς γειωμένο σύστημα, ελαφρώς μειωμένος στο γειωμένο μέσω αντίδρασης σύστημα και μειώνεται σημαντικά με τη χαμηλή αντίσταση γείωσης συστήματος.

Βαθμός ασφαλείας: Το αγείωτο και το υψηλής αντίστασης γειωμένο σύστημα είναι τα δύο πιο ασφαλή συστήματα.

Βλάβη εξοπλισμού: Με την κατάλληλη επίβλεψη, στο αγείωτο και στο υψηλής αντίστασης γειωμένο σύστημα, η πιθανότητα ζημιάς στον εξοπλισμό είναι ελάχιστη.

Τοποθεσία σφάλματος: Οι βλάβες μπορούν να εντοπιστούν εύκολα σε όλα τα συστήματα με εξαίρεση το αγείωτο σύστημα. Αυτό είναι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της γείωσης μέσω υψηλής αντίστασης έναντι του αγείωτου συστήματος. Ο εντοπισμός σφάλματος στα αγείωτα συστήματα γίνεται μέσω της διαδικασίας της σταδιακής απενεργοποίησης των υποκυκλωμάτων μέχρι να εντοπιστεί το σφάλμα. Με το υψηλής αντίστασης γειωμένο σύστημα η βλάβη γείωσης μπορεί να εντοπιστεί, διατηρώντας τον εξοπλισμό σε λειτουργία.

Αδιάλειπτη παροχή: Η ηλεκτρική παροχή μπορεί να διατηρείται τόσο στο αγείωτο όσο και στο υψηλής αντίστασης γειωμένο σύστημα. Αυτό δεν ισχύει με τα άλλα συστήματα.

Επίπεδα μεταβατικής υπέρτασης: Η μεταβατική υπέρταση είναι περιορισμένη σε όλα τα συστήματα με εξαίρεση το αγείωτο σύστημα.

Επιλεκτική ενεργοποίηση ασφαλειών: Η επιλεκτική ενεργοποίηση ασφαλειών είναι δυνατή σε όλα τα συστήματα με εξαίρεση το αγείωτο σύστημα.

Ειδοποίηση χωρίς ενεργοποίηση ασφαλειών: Η λειτουργία ειδοποίησης σφάλματος χωρίς ενεργοποίηση ασφαλειών είναι δυνατή μόνο για το αγείωτο και για το υψηλής αντίστασης γειωμένο σύστημα. Όλα τα άλλα συστήματα απαιτούν ενεργοποίηση των προστασιών.

Επίπεδα μόνωσης: Τα επίπεδα μόνωσης είναι αυξημένα τόσο στο αγείωτο, όσο και στο υψηλής αντίστασης γειωμένο σύστημα, όπως επίσης και η αναγκαιότητα ύπαρξης συσκευών προστασίας υπερτάσεων.

Χαρακτηριστικό	Συμπαγώς γειωμένο	Μέσω αντίδρασης	Χαμηλής αντίστασης	Αγείωτο	Υψηλής αντίστασης
Υψηλό ρεύμα σφάλματος γείωσης	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι
Πιθανότητα διάδοσης σε πολυφασικό σφάλμα	Υψηλή	Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή	Χαμηλή
Επίπεδο κινδύνου σχηματισμού τόξου	Υψηλό	Υψηλό	Μεσαίο	Πολύ χαμηλό	Πολύ χαμηλό
Σχετικό επίπεδο ασφάλειας	Χαμηλό	Χαμηλό	Μεσαίο	Υψηλό	Πολύ υψηλό
Πιθανότητα βλάβης εξοπλισμού	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλό	Πολύ χαμηλό	Πολύ χαμηλό
Ευκολία εντοπισμού τοποθεσίας σφάλματος	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Ναι
Συνέχιση λειτουργίας με σφάλμα γείωσης	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι
Επίπεδο μεταβατικής υπέρτασης	2.5X	2.5X	2.5X	>6X	2.7X
Επιλεκτική ενεργοποίηση διακοπών	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Ναι
Ειδοποίηση χωρίς ενεργοποίηση διακοπών	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι
Απαιτούμενο επίπεδο μόνωσης καλωδίων	1.00	1.00	1.00	1.73	1.73
Επίπεδο προστασίας υπερτάσεων	1.00	1.00	1.73	1.73	1.73

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις μεθόδους γείωσης του συστήματος [10]

Γενικά, δεν υπάρχει τέλεια μεθοδολογία γείωσης του ουδετέρου σε ηλεκτρικά συστήματα πλοίων. Κάθε μελέτη απαιτεί προσεκτική εκτίμηση όλων των παραμέτρων ασφάλειας, λειτουργίας και εμπορικότητας του πλοίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Βραχυκυκλώματα

3.1 Ορισμός βραχυκυκλώματος

Ως βραχυκύκλωμα ορίζεται από τον κανονισμό IEC 60909-0 [15], η τυχαία ή σκόπιμη δημιουργία αγώγιμου δρόμου μεταξύ δύο ή περισσότερων αγώγιμων μερών, η οποία προκαλεί μηδενισμό ή ελαχιστοποίηση της διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού. Το άμεσο αποτέλεσμα είναι η κυκλοφορία πολύ μεγάλου ρεύματος, καθώς από το Νόμο του Ohm ισχύει :

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

Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ονομαστική τάση λειτουργίας, τόσο μεγαλύτερο είναι και το ρεύμα βραχυκύκλωσης, συνεπώς τα βραχυκυκλώματα είναι εντονότερα όσο αυξάνεται η τάση λειτουργίας. Τα περισσότερα βραχυκυκλώματα, αναπτύσσονται στα εκτεθειμένα μέρη του δικτύου, όπως στις εναέριες γραμμές, στους ακροδέκτες του εξοπλισμού κλπ, είναι δε και τα πιο ανώδυνα. Αντίθετα, τα σφάλματα στο εσωτερικό μιας συσκευής, π.χ. ενός μετασχηματιστή ή μιας γεννήτριας, είναι μεν σπανιότερα αλλά και καταστρεπτικότερα.

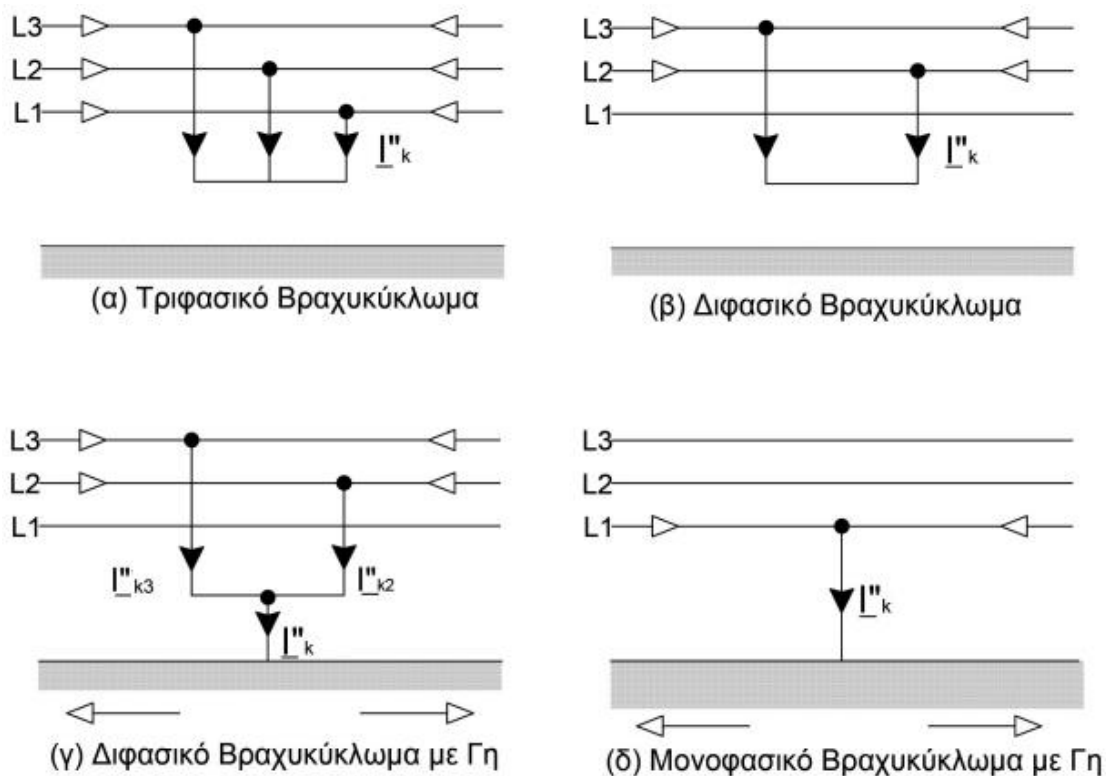
Τα βραχυκυκλώματα, σαν μεταβατικά φαινόμενα, είναι ηλεκτρικής φύσεως και δυναμικής μορφής. Σε σχέση με τις υπερτάσεις, οι οποίες είναι επίσης ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα αλλά διηλεκτρικής μορφής, τα βραχυκυκλώματα είναι βραδύτερα στην εξέλιξή τους διότι καθορίζονται βασικά από τη μαγνητική αντίδραση και αλληλεπίδραση των τυλιγμάτων των γεννητριών.

3.2 Κατηγοριοποίηση βραχυκυκλωμάτων

Τα βραχυκυκλώματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε συμμετρικά και ασύμμετρα, ως προς τις προβληματικές φάσεις. Με τον όρο συμμετρικά βραχυκυκλώματα χαρακτηρίζονται οι ανώμαλες μεταβατικές καταστάσεις, όταν λόγω βλάβης σε κάποιο σημείο του συστήματος έρθουν σε επαφή μεταξύ τους και οι τρεις φάσεις. Αντίστοιχα, στα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα, εμπλέκονται δύο φάσεις (διφασικά) ή μία φάση (μονοφασικά). Επιπρόσθετες διακρίσεις μεταξύ των βραχυκυκλωμάτων αφορούν στη διάρκεια, στην τοποθεσία καθώς και στην προέλευση της βλάβης. Ειδικότερα :

- Ως προς τη διάρκεια, διακρίνονται σε υπομεταβατικά, μεταβατικά, μόνιμης κατάστασης και αυτοαποσβεννύμενα.

- Ως προς την προέλευση της βλάβης, αυτές προέρχονται από μηχανολογικές αστοχίες (αποκοπή αγωγού, ακούσια ηλεκτρική επαφή μεταξύ δύο αγωγών μέσω ενός ξένου αγώγιμου σώματος κ.ά.), από εσωτερικές ή ατμοσφαιρικές υπερτάσεις, ή από καταστροφή της μόνωσης του εξοπλισμού λόγω θερμότητας, υγρασίας ή διαβρωτικού περιβάλλοντος.
- Ως προς την τοποθεσία, δηλαδή εσωτερικά ή εξωτερικά της ηλεκτρικής μηχανής, ή του ηλεκτρικού πίνακα.
- Ως προς τις εμπλεκόμενες φάσεις :
 1. Μονοφασικά (Φάση προς γη)
 2. Διφασικά
 - i. Φάση προς φάση
 - ii. Φάση προς φάση προς γη
 3. Τριφασικά (με ή χωρίς γη)



Σχήμα 3.1 Τύποι βραχυκυκλωμάτων ως προς τις εμπλεκόμενες φάσεις
(I''_k : Υπομεταβατικό ρεύμα βραχυκύκλωσης) [16]

3.3 Συνέπειες βραχυκυκλωμάτων

Τα βραχυκυκλώματα συνοδεύονται από στιγμιαίο μηδενισμό ή βύθιση της τάσης, σε διαφορετικό βέβαια βαθμό για κάθε ζυγό. Συνέπεια, της ξαφνικής μείωσης της τάσης είναι ότι η εξερχόμενη ηλεκτρική ισχύς των γεννητριών μειώνεται απότομα ενώ αντίθετα η μηχανική ισχύς των στροβίλων στιγμιαία παραμένει σταθερή. Η κατάσταση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε προσωρινό περίσσειμα κινητήριας ισχύος,

που δημιουργεί ένα ζεύγος επιταχύνσεως και μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια. Ενίοτε μπορεί να εμφανιστούν και υπερτάσεις, όπως συμβαίνει στα αγειώτα συστήματα των πλοίων, οι οποίες καταπονούν τις μονώσεις. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι υπερτάσεις αναπτύσσονται και κατά τη διακοπή και εκκαθάριση του σφάλματος ακόμα και αν εκκαθαρίζονται μόνο οι προβληματικές φάσεις.

Οι συνέπειες των βραχυκυκλωμάτων μεταβάλλονται ανάλογα με το τύπο και την διάρκεια του σφάλματος, το σημείο στην εγκατάσταση όπου παρουσιάστηκε το σφάλμα και την ισχύ του βραχυκυκλώματος [16].

- Στο σημείο του σφάλματος, η παρουσία ηλεκτρικών τόξων ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή της μόνωσης του εξοπλισμού, την τήξη των αγωγίμων μερών καθώς επίσης και πιθανή ανάπτυξη πυρκαγιάς.
- Στο εσφαλμένο κύκλωμα, η ανάπτυξη ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση των ζυγών και την αποσύνδεση των καλωδίων, ενώ η υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας, λόγω του φαινομένου Joule, εμπεριέχει τον κίνδυνο υπερθέρμανσης του εξοπλισμού.
- Σε άλλα κυκλώματα εντός δικτύου ή σε κοντινά δίκτυα, σημειώνονται πτώσεις τάσης κατά τη διάρκεια εκκαθάρισεως του σφάλματος, οι οποίες μπορούν να διαρκέσουν από ελάχιστα χιλιοστά του δευτερολέπτου έως μερικές εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου. Επίσης, μπορεί να σημειωθεί αποσύνδεση μέρους του δικτύου, το μέγεθος του οποίου εξαρτάται από το σχεδιασμό του και τα επίπεδα των προστατευτικών διατάξεων. Άλλες συνέπειες μπορούν να είναι η δυναμική αστάθεια είτε η απώλεια συγχρονισμού μεταξύ των ηλεκτρικών μηχανών, διαταραχές στα κυκλώματα παρακολουθήσεως/ελέγχου και άλλα.

3.4 Κανονισμοί μελετών βραχυκυκλωμάτων

Η Διεθνής Επιτροπή Ηλεκτροτεχνίας (International Electrotechnical Committee- IEC)

έχει εκδώσει τους παρακάτω κανονισμούς για βραχυκυκλώματα:

- IEC 61909 για βραχυκυκλώματα σε εγκαταστάσεις EP (AC) ξηράς
- IEC 61363 για βραχυκυκλώματα σε εγκαταστάσεις EP (AC) πλοίων
- IEC 61660-1 για βραχυκυκλώματα σε εγκαταστάσεις ΣΡ (DC) ξηράς

Στις εγκαταστάσεις ξηράς, μελέτη βραχυκυκλωμάτων γίνεται για τάσεις μεγαλύτερες του 1kV. Αντιθέτως, σε πλωτές κατασκευές οι κανονισμοί IEC 61363

ορίζουν να γίνεται μελέτη βραχυκυκλωμάτων για κάθε δίκτυο (ακόμη και για τάσεις <1000 V).

Σύνθετη αντίσταση κινητήρα

Σύμφωνα με το πρότυπο **IEC 61363-1**, η ωμική αντίσταση του κινητήρα (R_M) ισούται με το άθροισμα της ωμικής αντίστασης του στάτη (R_S) και του δρομέα (R_R), ενώ η επαγωγική αντίδραση του κινητήρα (X_M'') ισούται με το άθροισμα της επαγωγικής αντίδρασης (X_S) του στάτη και του δρομέα (X_R) του κινητήρα, ανηγμένες στην τάση του στάτη, δηλαδή ισχύει:

$$R_M = R_S + R_R, \quad X_M'' = X_S + X_R \quad \text{επιπλέον ισχύει ότι}$$

$$Z_M = \sqrt{R_M + X_M''} \quad \text{και}$$

$Z_M \approx Z_{(1)} \approx Z_{(2)} \approx 2 Z_{(0)}$, με $Z_{(1)}$, $Z_{(2)}$, $Z_{(0)}$ οι αντιστάσεις ακολουθίας (αναλυτικά στην παράγραφο 3.7)

Οι κινητήρες που είναι συνδεδεμένοι στον ίδιο ζυγό μπορούν να θεωρηθούν σαν ένας *ισοδύναμος κινητήρας*, με ρεύμα λειτουργίας ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων κάθε χωριστού κινητήρα, και συνδεδεμένος στο σύστημα στο κοινό τους ζυγό.

Όταν τα δεδομένα του κινητήρα είναι ανεπαρκή, χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές τιμές για τις χαρακτηριστικές παραμέτρους του κινητήρα. Διάκριση γίνεται μεταξύ κινητήρων μεγάλης και μικρής ισχύος.

Συγκεκριμένα, κάθε κινητήρας με ισχύ λειτουργίας πάνω από 100 kW ή 15% της ισχύος των συνδεδεμένων γεννητριών, θεωρείται μεγάλος, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θεωρείται μικρός. Για εγκαταστάσεις 50 Hz και 60 Hz, ισχύει:

Σύνθετη αντίσταση κινητήρα Z_M''	
Μεγάλοι κινητήρες	Μικροί κινητήρες
$Z_M'' = 0,16 \text{ a. μ.}$	$Z_M'' = 0,2 \text{ a. μ.}$
$X_M'' = 0,15 \text{ a. μ.}$	$X_M'' = 0,188 \text{ a. μ.}$
$r_S = 0,034 \text{ a. μ.}$	$r_S = 0,043 \text{ a. μ.}$
$r_R = 0,021 \text{ a. μ.}$	$r_R = 0,027 \text{ a. μ.}$
$r_M = r_S + r_R = 0,055 \text{ a. μ.}$	$r_M = r_S + r_R = 0,07 \text{ a. μ.}$

Πίνακας 3.1 Σύνθετη αντίσταση κινητήρα

3.5 Μέθοδοι προστασίας έναντι βραχυκυκλωμάτων

Οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις απαιτούν σχεδόν πάντα προστασία από βραχυκυκλώματα και ειδικότερα εκεί όπου υπάρχει ηλεκτρική ασυνέχεια. Αυτό τις περισσότερες φορές αντιστοιχεί σε σημεία όπου υπάρχει αλλαγή στη διατομή του αγωγού. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης πρέπει να υπολογίζεται σε κάθε επίπεδο στην εγκατάσταση, με σκοπό τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του εξοπλισμού που απαιτείται για την ανοχή ή τη διακοπή του ρεύματος σφάλματος.

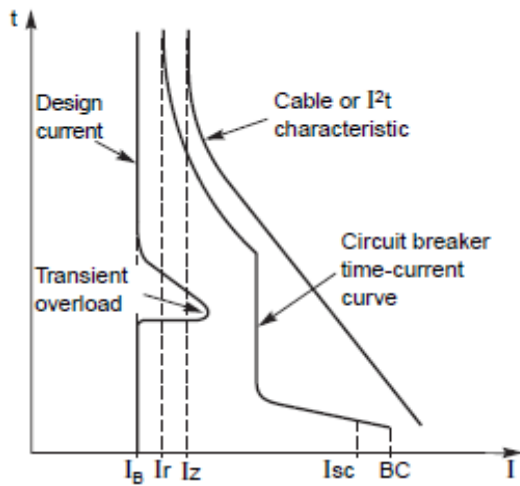
Τα στοιχεία που προστατεύουν το κύκλωμα από βραχυκύκλωμα και το διακόπτουν όταν ανιχνεύσουν υψηλές εντάσεις ρευμάτων είναι:

- Ασφάλειες
- Αυτόματοι διακόπτες ισχύος

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων των στοιχείων προστασίας απαιτεί τον προσδιορισμό δύο τιμών, του μέγιστου και του ελάχιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης.

- Το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης αντιστοιχεί σε σφάλμα πολύ κοντά στους ακροδέκτες του στοιχείου προστασίας. Πρέπει να υπολογίζεται με ακρίβεια και να χρησιμοποιείται με ένα περιθώριο ασφαλείας. Η τιμή αυτή αξιοποιείται ώστε να προσδιοριστούν :
 - i. Η ικανότητα διακοπής του ρεύματος βραχυκύκλωσης των διακοπών (short circuit breaking capacity).
 - ii. Η ικανότητα να κλείσουν οι επαφές του διακόπτη σε συνθήκες βραχυκυκλώματος (short circuit making capacity).
 - iii. Η ικανότητα ηλεκτροδυναμικής ανοχής των καλωδιώσεων και των διακοπών.
- Το ελάχιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης αντιστοιχεί σε σφάλμα στο τέλος της γραμμής, γενικά πρόκειται για μονοφασικό στη χαμηλή τάση, ενώ για διφασικό στην υψηλή. Η τιμή αυτή αξιοποιείται ώστε να προσδιοριστούν οι καμπύλες χρόνου-ρεύματος για διακόπτες και ασφάλειες σε περιπτώσεις όπου τα καλώδια είναι μεγάλου μήκους, η αντίσταση της πηγής είναι σχετικά μεγάλη και το σύστημα είναι αγείοτο ή γειωμένο μέσω του ουδετέρου.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι, για οποιοδήποτε ρεύμα βραχυκύκλωσης (μέγιστο ή ελάχιστο), η διάταξη προστασίας πρέπει να αντιδρά στο σφάλμα σε χρόνο μικρότερο από αυτόν που μπορεί να αντέξει το καλώδιο στις θερμικές καταπονήσεις. Οι γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν χρησιμοποιούνται για την κατάλληλη επιλογή διακοπών και ασφαλειών αντίστοιχα.



I_{sc} : Ρεύμα βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης

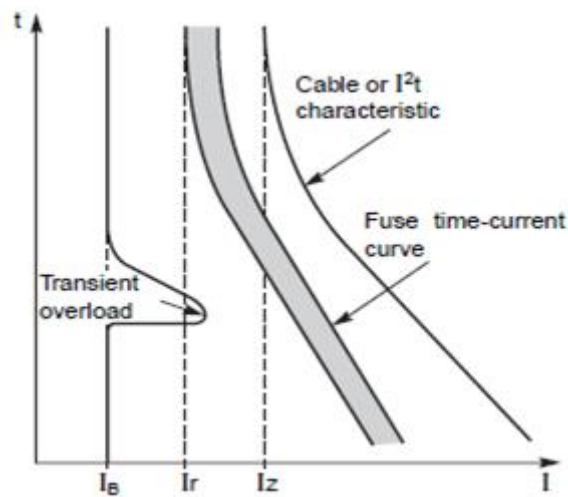
I_r : Ονομαστικό ρεύμα γεννήτριας

I_z : Μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα σε κανονική λειτουργία

I_B : Ρεύμα κανονικής λειτουργίας

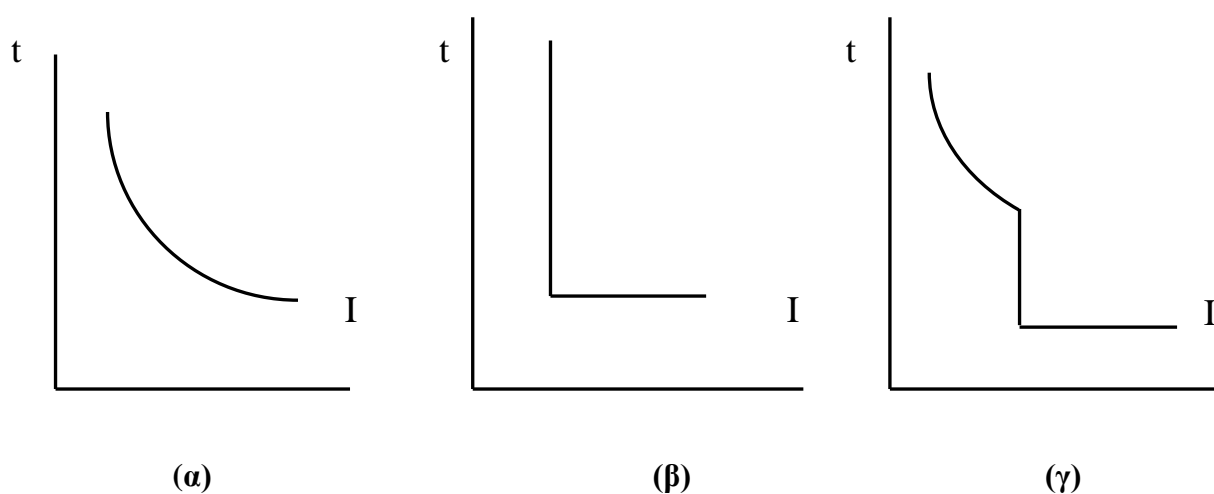
BC : Ικανότητα διακοπής
(Breaking Capacity)

Σχήμα 3.2 Προστασία κυκλώματος μέσω διακόπτη [16]



Σχήμα 3.3 Προστασία κυκλώματος μέσω ασφάλειας [16]

Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο η διαφορά μεταξύ υπερφόρτισης και υπερέντασης (βραχυκυκλώματος). Η υπερφόρτιση αναφέρεται σε υπέρβαση του ονομαστικού ρεύματος λειτουργίας μόνον περίπου κατά 20%, ενώ η υπερένταση εν γένει αναφέρεται σε πολλαπλάσια τιμή (τουλάχιστον 200%). Έτσι, η φιλοσοφία προστασίας από υπερφόρτιση ικανοποιείται από στοιχεία με χαρακτηριστική αντιστρόφου χρόνου, ενώ στην περίπτωση της υπερέντασης ο χρόνος αντίδρασης του στοιχείου προστασίας μπορεί να είναι ακαριαίος. [1] Η ονομαστική ένταση ρεύματος διακοπής των διακοπτικών στοιχείων πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το αναμενόμενο ρεύμα βραχυκυκλώματος, αλλιώς η διακοπή δεν θα επιτευχθεί και εκτός της εγκατάστασης θα καταστραφεί και το διακοπτικό στοιχείο.



Σχήμα 3.4 Χαρακτηριστικές αντιστρόφου χρόνου στοιχείων προστασίας [1]

(α) από υπερφόρτιση (ασφάλεια τήξεως ή θερμικό στοιχείο)

(β) από υπερένταση (ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο)

(γ) συνδυασμός των (α) και (β).

Ο χρόνος διακοπής πέραν κάποιας σκόπιμης καθυστέρησης που ρυθμίζεται από τους ηλεκτρονόμους (βοηθητικά ρελέ που δίνουν την εντολή διακοπής), περιλαμβάνει και χρόνους καθυστέρησης λόγω των φυσικών φαινομένων διακοπής. Κατά τη φάση διακοπής, στην εκκίνηση του φαινομένου απομάκρυνσης των αγώγιμων επαφών του διακόπτη αναπτύσσεται ηλεκτρικό τόξο στον ενδιάμεσο χώρο (που πληρώνεται από κάποιο διακοπτικό – μονωτικό μέσο όπως αέρας, SF6, κενό, μονωτικό έλαιο κ.λπ.). Ο φυσικός μηχανισμός για την αποκατάσταση της μόνωσης στο εσωτερικό διακόπτη (σβέση του τόξου με εξάλειψη όλων των αγώγιμων φορέων και αποκατάσταση της διηλεκτρικής αντοχής μεταξύ των επαφών του διακόπτη) απαιτεί κάποιο χρόνο.

3.6 Το Ηλεκτρικό δίκτυο κατά το βραχυκύκλωμα

Τα ισοδύναμα κυκλώματα των ηλεκτρικών στοιχείων των υπό μελέτη ηλεκτρικών δικτύων κατά το βραχυκύκλωμα, καθορίζονται βάσει των προδιαγραφών τους και σχετικών προτύπων ανάλογα με την περίπτωση. Αναλυτικότερα, τα ηλεκτρικά στοιχεία όσον αφορά στο βραχυκύκλωμα διακρίνονται σε ενεργητικά και παθητικά, ανάλογα με το εάν συμμετέχουν στην τροφοδότηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης ή απλώς συμμετέχουν ως σύνθετες αντιστάσεις.

Τα ενεργητικά, που είναι εν γένει όλες οι στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές ανεξαρτήτως εάν λειτουργούν ως **γεννήτριες** ή **κινητήρες**, αποτελούνται από ωμικές αντιστάσεις (R- στοιχεία) και πηνία (L-στοιχεία) μαζί με πηγές τάσης στα πρότυπα των ισοδυνάμων κυκλωμάτων Thevenin - Norton. Η μέγιστη συνεισφορά στην τροφοδότηση των σφαλμάτων καθόλη τη διάρκειά τους προέρχεται από τις σύγχρονες μηχανές, ενώ οι ασύγχρονες συνεισφέρουν περισσότερο κατά την έναρξη. Τέλος, μικρή αλλά όχι αμελητέα επίδραση στη συμπεριφορά όλων των μηχανών έχει και η **κατάσταση φόρτισης** τους πριν το βραχυκύκλωμα.

Αντιθέτως τα παθητικά στοιχεία στα οποία συγκαταλέγονται τα καλώδια, οι μετασχηματιστές, τα επαγωγικά πηνία αποτελούνται μόνον από ωμικές αντιστάσεις (R- στοιχεία) και πηνία (L-στοιχεία).

Ποιοτικά καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως όταν μία στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή αντιλαμβάνεται το βραχυκύκλωμα, δηλαδή υψηλές απαιτήσεις ρεύματος με μειωμένη τάση, αντιδρά προσπαθώντας να το τροφοδοτήσει, εμφανιζόμενη στο δίκτυο ως πηγή τάσης με χαμηλές μάλιστα επαγωγικές αντιδράσεις. Οι ωμικές αντιστάσεις δρουν αποσβεστικά και μόνον, συνεισφέροντας στη διαμόρφωση σταθερών χρόνου απόσβεσης των φαινομένων.

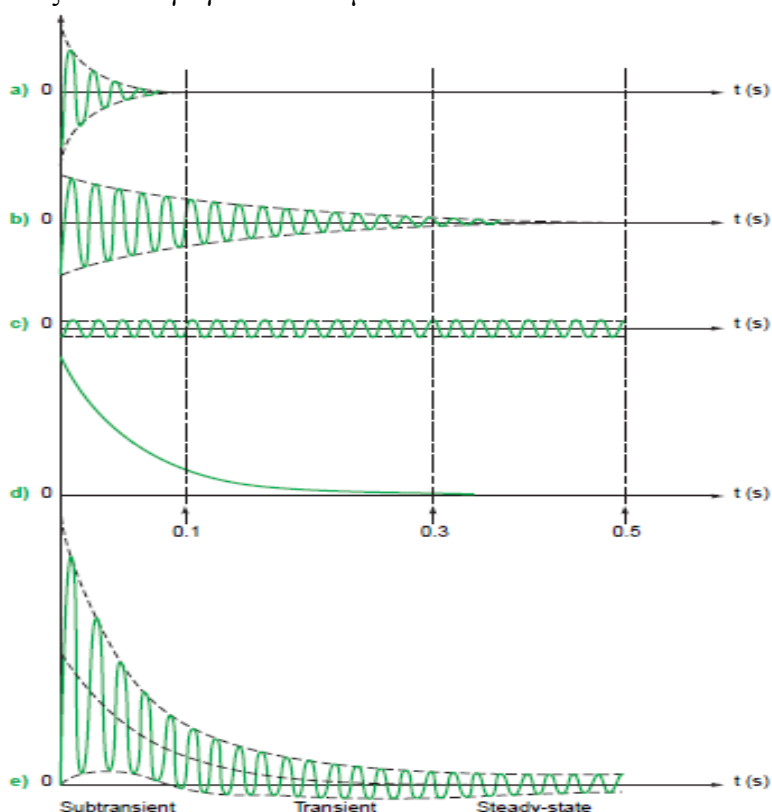
Μια σύγχρονη γεννήτρια αντιλαμβάνεται το βραχυκύκλωμα ως εξής: η απότομη αύξηση του ρεύματος του στάτη, κατά την επιβολή του βραχυκυκλώματος, επάγει στο τυλίγμα του δρομέα ρεύματα μεταβατικά με τα οποία το τυλίγμα του δρομέα αντιδρά στη μεταβολή της πεπλεγμένης ροής. Η αντίδραση αυτή γίνεται σύμφωνα με το θεώρημα της σταθερής πεπλεγμένης ροής το οποίο αναφέρει ότι η πεπλεγμένη ροή σε ένα κλειστό κύκλωμα δεν μπορεί να αλλάξει στιγμιαία. Άρα σύμφωνα με το νόμο του Faraday και τον κανόνα του Lenz, η πεπλεγμένη ροή ενός τυλίγματος $\lambda=L \cdot I$ διατηρείται σταθερή και το αρχικό αυτό αυξημένο ρεύμα ισοδυναμεί με τη μείωση της επαγωγικής αντίδρασης της μηχανής με αποτέλεσμα τη μεταβατική επαγωγική αντίδραση X_d' , όπου $X_d' < X_d$. Εάν η γεννήτρια έχει και τυλίγματα αποσβέσεως, πράγμα που αποτελεί κανόνα τότε επάγονται μεταβατικά ρεύματα και στα τυλίγματα αυτά κατά τις πρώτες στιγμές του βραχυκυκλώματος, επιπλέον των ρευμάτων του δρομέα. Τα ρεύματα αυτά είναι μικρότερα από αυτά του δρομέα και μικρότερης διάρκειας, δηλαδή 2-3 περιόδων. Αποτέλεσμα αυτής της αντίδρασης 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 .

Ένας ασύγχρονος κινητήρας αντιδρά στο βραχυκύκλωμα με μικρότερη δυναμικότητα σε σχέση με τις σύγχρονες μηχανές, καθώς οι ασύγχρονες μηχανές δεν έχουν τύλιγμα διέγερσης και συνεπώς η συνεισφορά τους στο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι κυρίως κατά την υπομεταβατική περίοδο, ενώ στη μόνιμη κατάσταση δεν υφίσταται καμία συνεισφορά καθώς το ρεύμα βραχυκύκλωσης μηδενίζεται.

Το **συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης** αποτελεί σύνθεση τεσσάρων συνιστωσών, οι οποίες απεικονίζονται στο σχήμα 3.5 και είναι οι εξής:

- των δύο εναλλασσόμενων αποσβεννόμενων συνιστωσών (υπομεταβατικής και μεταβατικής) καθώς και της συνιστώσας μόνιμης κατάστασης και
- της απериοδικής συνιστώσας Σ.Ρ. που προκύπτει από την ανάπτυξη του ρεύματος στο επαγωγικό κύκλωμα.



Σχήμα 3.5 Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών του: υπομεταβατική (a), μεταβατική (b), μόνιμου καταστάσεως (c), απериοδική (d) και συνολικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως (e)

3.7 Μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών

3.7.1 Γενικά

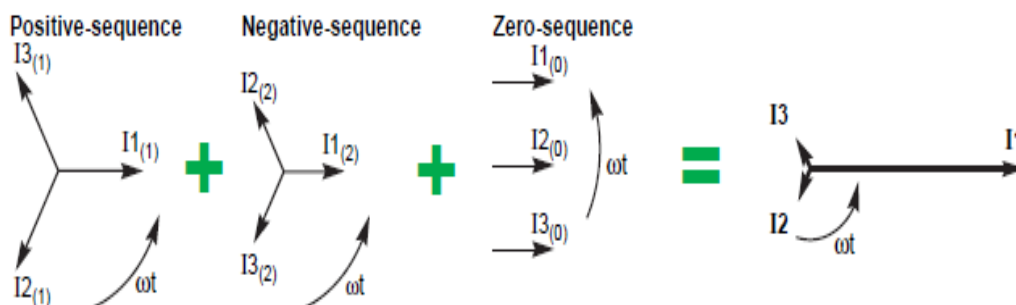
Σε τριφασικά συστήματα εναλλασσομένου ρεύματος ο υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκύκλωσης, που προκύπτουν από συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα, απλοποιείται με τη χρήση της μεθόδου των συμμετρικών συνιστωσών. Αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι ένα τριφασικό σύστημα φασικών διανυσμάτων μπορεί να αναλυθεί σε τρία τριφασικά συστήματα, δύο συμμετρικά (ευθύ και αντίστροφο) και ένα ομοπολικό. Όταν το δίκτυο είναι γραμμικό τα ρεύματα φάσεως μπορούν να προκύψουν με επαλληλία των συμμετρικών συνιστωσών τους. Το τριφασικό δίκτυο όμως πρέπει να είναι και συμμετρικό δηλαδή να παρουσιάζει τουλάχιστον διαγώνια συμμετρία για να είναι τα τρία μονοφασικά κυκλώματα ακολουθίας ανεξάρτητα και μη συζευγμένα. Τα τρία τριφασικά συστήματα είναι τα εξής:

- Το **ευθύ ή θετικής ακολουθίας (positive sequence)**, όπου οι τρεις φάσεις έχουν ίσα μέτρα και διαφορά φάσης 120° κατά την *θετική* (ανθωρολογιακή) φορά.
- Το **αντίστροφο ή αρνητικής ακολουθίας (negative sequence)**, όπου οι τρεις φάσεις έχουν ίσα μέτρα και διαφορά φάσης 120° κατά την *αρνητική* (ωρολογιακή) φορά.
- Το **ομοπολικό ή μηδενικής ακολουθίας**, όπου οι τρεις φάσεις έχουν ίσα μέτρα και διαφορά φάσης 0° .

Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να υπολογιστούν τα ρεύματα σφάλματος μόνιμης κατάστασης. Στη περιγραφή που ακολουθεί το σύστημα ορίζεται χρησιμοποιώντας ως αναφορά περιστροφής το ρεύμα \vec{I}_1 , όπου:

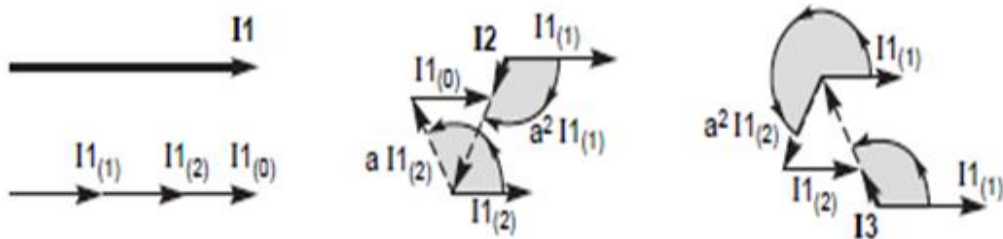
- $\vec{I}_{1(1)}$ είναι η συνιστώσα θετικής ακολουθίας
- $\vec{I}_{1(2)}$ είναι η συνιστώσα αρνητικής ακολουθίας
- $\vec{I}_{1(0)}$ είναι η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας

Και χρησιμοποιώντας το στροφέα **a**, που είναι ο γνωστός μεταθέτης φάσεως των 120° , ο οποίος ορίζεται: $\mathbf{a} = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$ μεταξύ των \vec{I}_1 , \vec{I}_2 και \vec{I}_3 .



Σχήμα 3.6 Ακολουθιακές Συνιστώσες [16]

Αυτή η μέθοδος, η οποία εφαρμόζεται σε σύστημα ρευμάτων στην προκειμένη περίπτωση, επιβεβαιώνεται στη γραφική απεικόνιση του σχήματος 3.7.



Σχήμα 3.7 Γεωμετρική κατασκευή των \vec{I}_1 , \vec{I}_2 και \vec{I}_3 [16]

Αυτές οι συμμετρικές συνιστώσες του ρεύματος συνδέονται με τις συμμετρικές συνιστώσες της τάσης μέσω των αντίστοιχων αντιστάσεων:

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \frac{v_{(1)}}{I_{(1)}}, \quad \mathbf{Z}_{(2)} = \frac{v_{(2)}}{I_{(2)}} \quad \text{και} \quad \mathbf{Z}_{(0)} = \frac{v_{(0)}}{I_{(0)}}$$

Αυτές οι αντιστάσεις για τα διάφορα στοιχεία του ηλεκτρικού δικτύου συνήθως καθορίζονται από τον κατασκευαστή. Γενικά, παρατηρούμε ότι για τα ηλεκτρικά στοιχεία εκτός από τις στρεφόμενες μηχανές ισχύει ότι $\mathbf{Z}_{(1)} \approx \mathbf{Z}_{(2)}$, ενώ η $\mathbf{Z}_{(0)}$ διαφέρει ανάλογα με το εκάστοτε στοιχείο. Τυπικές τιμές δίνονται στον πίνακα 3.1.

Στοιχεία		$\mathbf{Z}_{(0)}$
Μετασηματιστές Ισχύος (αναγωγή στο δευτερεύον τύλιγμα)		
Άνευ ουδετέρου		∞
Υγν ή Ζγν	Μη εξαναγκασμένης ροής	∞
	Εξαναγκασμένης ροής	$10 \sim 15 X_{(1)}$
Dγν ή ΥNγν		$X_{(1)}$
Dzn ή Yzn		$0.1 \sim 0.2 X_{(1)}$
Ηλεκτρικές Μηχανές		
Σύγχρονη		$\approx 0,5 Z_{(1)}$
Ασύγχρονη		≈ 0
Γραμμές Μεταφοράς		$\approx 3 Z_{(1)}$

Πίνακας 3.2 Τυπικές τιμές $\mathbf{Z}_{(0)}$

Αντίστοιχα για ένα τριφασικό σύστημα με φάσεις **a,b** και **c**, ακολουθία φάσεων **abc** και αναφορά το ρεύμα I_a και την τάση V_a αντίστοιχα, οι σχέσεις για τα ρεύματα και τις τάσεις σε μητρική μορφή δίνονται παρακάτω.

Σχέσεις φασικών και ακολουθιακών ρευμάτων

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a(1)} \\ I_{a(2)} \\ I_{a(0)} \end{bmatrix}$$

σχέση (3.1)

ή

$$\begin{bmatrix} I_{a(1)} \\ I_{a(2)} \\ I_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

σχέση (3.2)

Σχέσεις φασικών και ακολουθιακών τάσεων

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a(1)} \\ V_{a(2)} \\ V_{a(0)} \end{bmatrix}$$

σχέση (3.3)

ή

$$\begin{bmatrix} V_{a(1)} \\ V_{a(2)} \\ V_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

σχέση (3.4)

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο κανόνας ανάλυσης σε συμμετρικές συνιστώσες επεκτείνεται και σε οποιοδήποτε πολυφασικό σύστημα (ασύμμετρο N-φασικό σύστημα \rightarrow N συμμετρικές συνιστώσες).

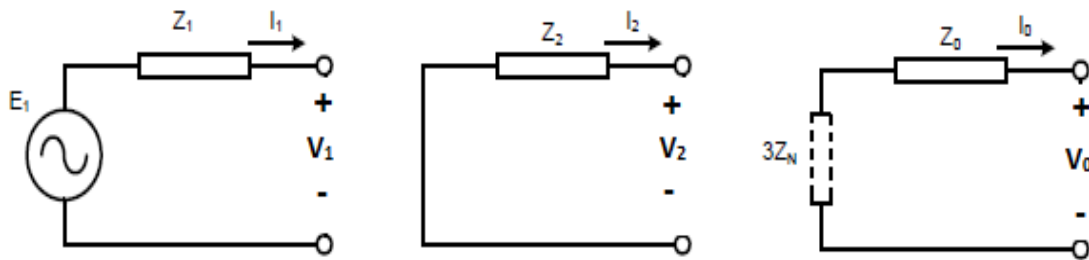
3.7.2 Κυκλώματα ακολουθίας

Η επιτυχία της εφαρμογής των συμμετρικών συνιστωσών στον υπολογισμό του **σφάλματος μόνιμης κατάστασης** έγκειται στο γεγονός ότι είναι δυνατόν για ορισμένες συνθήκες ασυμμετρίας να επιτευχθούν σχετικά απλές διασυνδέσεις μεταξύ των κυκλωμάτων ακολουθίας στο σημείο της ασυμμετρίας. Για τις συμμετρικές συνιστώσες ισχύουν οι νόμοι του Ohm και του Kirchhoff και αυτό αποτελεί τη βάση της χρησιμοποίησης των κυκλωμάτων ακολουθίας.

Κυκλώματα ακολουθίας είναι τα κυκλώματα στα οποία ρέουν αντίστοιχα ρεύματα ακολουθίας. Το κύκλωμα στο οποίο κυκλοφορούν ρεύματα θετικής ακολουθίας καλείται κύκλωμα θετικής ακολουθίας περιλαμβάνει μόνο αντίσταση θετικής ακολουθίας και εμφανίζει τάσεις θετικής ακολουθίας. Τα αντίστοιχα ισχύουν για τα κυκλώματα αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας. Δεν μπορεί σε ένα κύκλωμα ακολουθίας να ρέουν πάρα μόνο ρεύματα της ίδιας ακολουθίας. Η κυκλωματική τους αναπαράσταση φαίνεται στο σχήμα 3.7. Η αντίσταση του ουδετέρου, εφόσον υπάρχει στο δίκτυο, αναπαριστάται με Z_N .

Ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας έχει τα τρία κυκλώματα ακολουθίας του ανεξάρτητα. Εφόσον το σύστημα δεν παράγει παρά μόνο τάσεις θετικής ακολουθίας μόνο το ευθύ

κύκλωμα λειτουργεί και παριστάνει το τριφασικό κύκλωμα. Τα κυκλώματα αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας είναι νεκρά διότι δεν έχουν ΗΕΔ (ηλεκτρεγερτική δύναμη). Βασική εργασία αποτελεί ο προσδιορισμός των αντιστάσεων ακολουθίας δηλαδή των αντιστάσεων κάθε κυκλώματος ακολουθίας. Οποδήποτε το τριφασικό δίκτυο παρουσιάζει ασυμμετρία στη θέση αυτή υπάρχει σύνδεση ή ζεύξη των κυκλωμάτων μεταξύ τους. Συνεπώς, συνδέσεις μεταξύ κυκλωμάτων ακολουθίας θα προκύψουν και σε περίπτωση ασυμμετρίας των ηλεκτρικών μεγεθών του συστήματος μέσα στο δίκτυο όπως γίνεται με τα ασύμμετρα βραχυκύκλωματα.[17]



Σχήμα 3.7 Κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας

3.7.3 Υπολογισμός ρεύματος βραχυκύκλωσης μέσω συμμετρικών συνιστωσών

Για τον υπολογισμό των σφαλμάτων ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα :

1. Κατασκευή των τριών κυκλωμάτων ακολουθίας και διασύνδεση τους σημείο του σφάλματος.
2. Υπολογισμός των ρευμάτων και των τάσεων ακολουθίας.
3. Μετασχηματισμός των παραπάνω σε φασικά ρεύματα και τάσεις του τριφασικού συστήματος.

Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται πως διασυνδέονται τα κυκλώματα ακολουθίας για τα παρακάτω σφάλματα που εξετάζουμε:

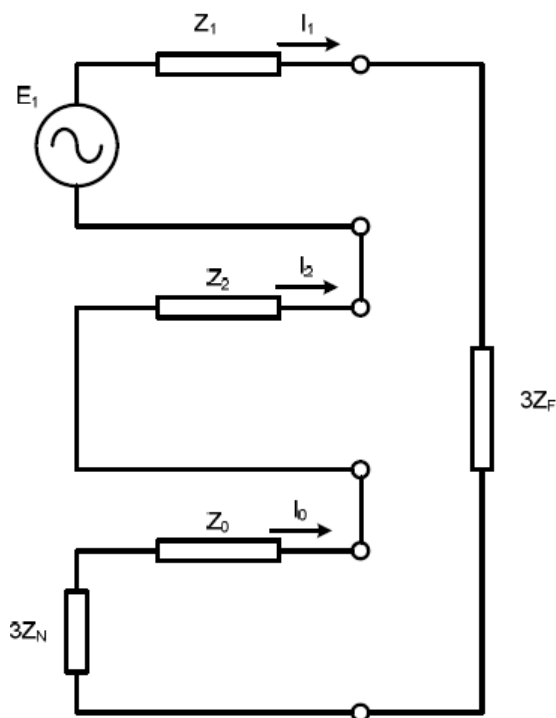
- Μονοφασικό ως προς γη βραχυκύκλωμα
- Διφασικό βραχυκύκλωμα
- Διφασικό ως προς γη βραχυκύκλωμα
- Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη

Υποσημείωση1: Χάρην συντομίας θέτουμε
$$\begin{bmatrix} I_{a(1)} \\ I_{a(2)} \\ I_{a(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} \text{ και } \begin{bmatrix} V_{a(1)} \\ V_{a(2)} \\ V_{a(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_0 \end{bmatrix}$$

Υποσημείωση2: Θεωρούμε την ύπαρξη ουδετέρου (άρα και της αντίστασης Z_N) και αντίσταση σφάλματος (Z_F) ως γενικότερη περίπτωση.

3.7.4 Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα ως προς γη

Τα κυκλώματα ακολουθίας για αυτόν τον τύπο βραχυκυκλώματος συνδέονται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8. Έστω α η προβληματική φάση.



Σχήμα 3.8 Κυκλώματα ακολουθίας για μονοφασικό σφάλμα προς γη με αντίσταση σφάλματος

Από το νόμο του Kirchhoff έχουμε:
$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + 3Z_N + 3Z_F}$$

Από το κύκλωμα ισχύει $I_1 = I_2 = I_0$ και από την σχέση (3.1) $I_\alpha = I_1 + I_2 + I_0$
 άρα $I_\alpha = 3I_1$, όμως $I_\alpha = I_F$ τότε:

Άρα το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι:
$$I_F = \frac{3E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + 3Z_N + 3Z_F}$$

Από το κύκλωμα προκύπτουν οι ακολουθιακές τάσεις:

$$V_1 = E_1 - I_1 Z_1$$

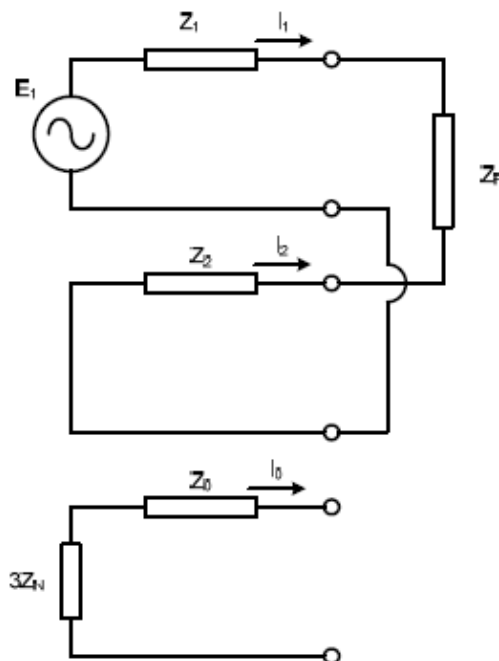
$$V_2 = -I_2 Z_2$$

$$V_0 = -I_0 (Z_0 + 3Z_N)$$

Και με αντικατάσταση στην (3.3) προκύπτουν οι φασικές τάσεις.

3.7.5 Διφασικό βραχυκύκλωμα

Τα κυκλώματα ακολουθίας για αυτόν τον τύπο βραχυκυκλώματος συνδέονται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9. Έστω **b** και **c** οι προβληματικές φάσεις.



Σχήμα 3.9 Κυκλώματα ακολουθίας για διφασικό σφάλμα

Από το νόμο του Kirchhoff έχουμε: $I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_F}$

Επίσης από το κύκλωμα ισχύει ότι $I_1 + I_2 = 0$, $I_0 = 0$ και

από την σχέση (3.3) $I_b = \alpha^2 I_1 + \alpha I_2 + I_0$ άρα

$$I_b = (\alpha^2 - \alpha) I_1 = (\alpha^2 - \alpha) \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_F}, \text{ όμως } I_b = I_F \text{ τότε το ρεύμα}$$

$$\text{βραχυκύκλωσης είναι: } I_F = (\alpha^2 - \alpha) \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_F} = -j\sqrt{3} \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_F}$$

Από το κύκλωμα προκύπτουν οι ακολουθιακές τάσεις:

$$V_0 = 0$$

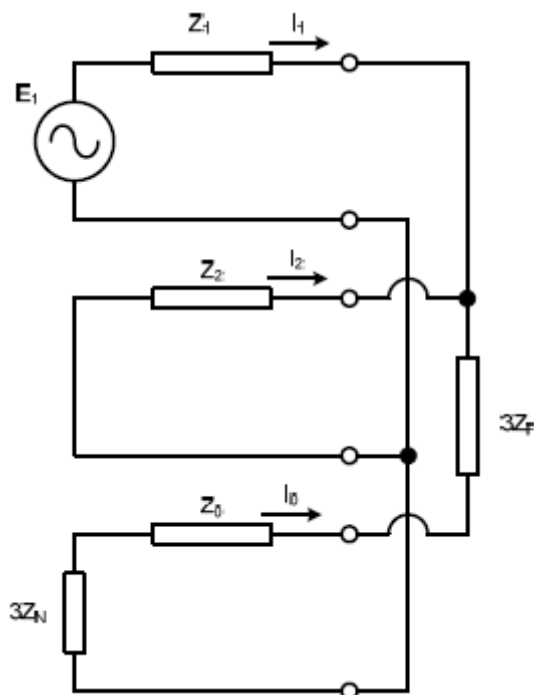
$$V_2 = E_1 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_F}$$

$$V_1 = V_2 + I_1 Z_F = E_1 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_F} + E_1 \frac{Z_F}{Z_1 + Z_2 + Z_F} = E_1 \frac{Z_2 + Z_F}{Z_1 + Z_2 + Z_F}$$

Και με αντικατάσταση στην (3.3) προκύπτουν οι φασικές τάσεις.

3.7.6 Διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη

Τα κυκλώματα ακολουθίας για αυτόν τον τύπο βραχυκυκλώματος συνδέονται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10. Έστω **b** και **c** οι προβληματικές φάσεις.



Σχήμα 3.10 Κυκλώματα ακολουθίας για διφασικό σφάλμα προς γη

Από το νόμο του Kirchhoff έχουμε:
$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + [Z_2 // (Z_0 + 3Z_N + Z_F)]}$$

Επίσης από το κύκλωμα $I_1 + I_2 + I_0 = 0$ και από την σχέση (3.2) ισχύει ότι
$$I_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} (I_b + I_c)$$

όμως $I_F = I_b + I_c = 3I_0$ και

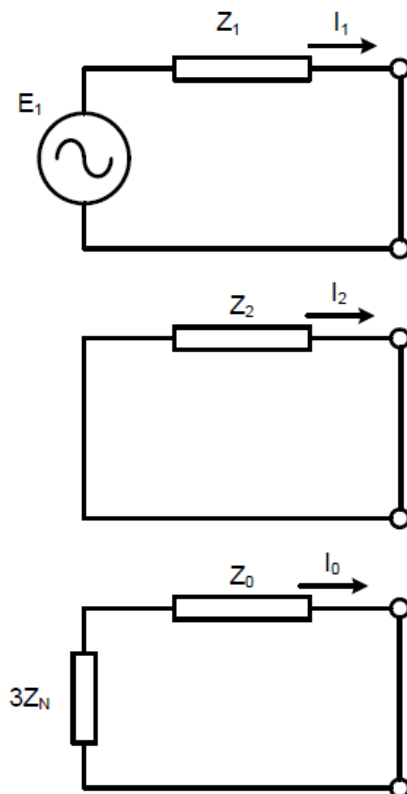
$$I_0 = \frac{-V_2}{Z_0 + 3Z_N + 3Z_F} \quad \text{όμως από το κύκλωμα } V_1 = V_2 \text{ και } V_1 = E_1 - I_1 Z_1$$

Άρα το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι:
$$I_F = 3 \frac{I_1 Z_1 - E_1}{Z_0 + 3Z_N + 3Z_F}$$

Και με αντικατάσταση στην (3.3) και (3.4) προκύπτουν οι φασικές τάσεις.

3.7.7 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη

Τα κυκλώματα ακολουθίας για αυτόν τον τύπο βραχυκυκλώματος συνδέονται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11 Κυκλώματα ακολουθίας για τριφασικό βραχυκύκλωμα

Από το νόμο του Kirchhoff έχουμε: $I_1 = \frac{E_1}{Z_1}$ και $I_2 = I_0 = 0$

Άρα το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι: $I_F = I_1 = \frac{E_1}{Z_1}$, επίσης οι ακολουθιακές τάσεις είναι:

$$V_1 = E_1 - I_1 Z_1$$

$$V_2 = 0$$

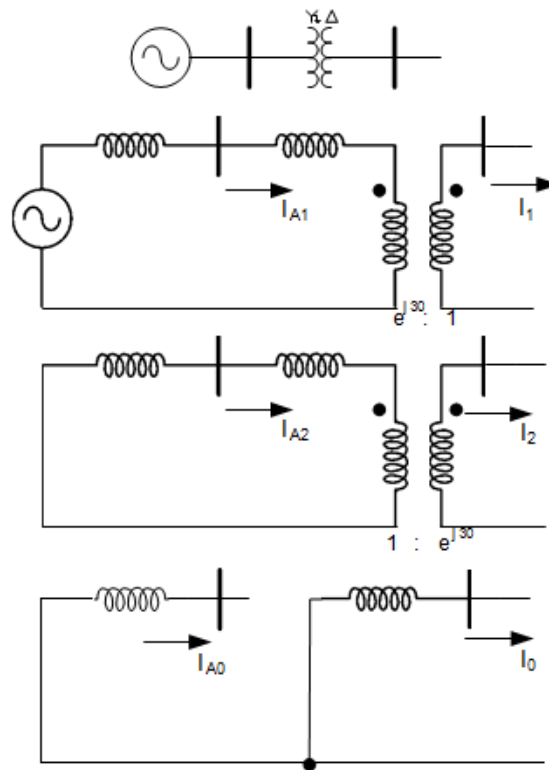
$$V_0 = 0$$

Και με αντικατάσταση στην (3.3) προκύπτουν οι φασικές τάσεις.

3.7.7 Κυκλώματα ακολουθίας στους μετασχηματιστές ισχύος

Στους μετασχηματιστές αστέρα – τριγώνου προκαλείται πάντοτε στροφή γωνίας των διανυσμάτων. Στους μετασχηματιστές αυτούς, δηλαδή, οι μεταβλητές θετικής ακολουθίας στρέφονται κατά $+30^\circ$ από το τύλιγμα τριγώνου στο τύλιγμα αστέρα, ενώ οι μεταβλητές αρνητικής ακολουθίας κατά -30° από το τύλιγμα τριγώνου στο τύλιγμα αστέρα. Το αντίθετο συμβαίνει αν πηγαίνουμε από το τύλιγμα αστέρα στο τύλιγμα τριγώνου. Στις μεταβλητές του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας, αντίθετα, δεν γίνεται καμία στροφή γωνίας.

Την παραπάνω επίδραση των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή στις μεταβλητές ακολουθίας τη μοντελοποιούμε προσθέτοντας στα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας μετασχηματιστές γωνίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12 Κυκλώματα ακολουθίας για τους μετασχηματιστές αστέρα – τριγώνου

Τέλος, στον Πίνακα 2.1 φαίνονται τα κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας διαφόρων τριφασικών μετασχηματιστών.

Μονογραμμικό Διάγραμμα	Κύκλωμα Μηδενικής Ακολουθίας

Πίνακας 3.3 Κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας Μ/Σ

3.7.8 Ρεύμα ουδετέρου

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε ένα τριφασικό σύστημα το άθροισμα των ρευμάτων γραμμής είναι ίσο με το ρεύμα επιστροφής ουδετέρου I_N , δηλαδή:

$$I_N = (I_a + I_b + I_c)$$

Επίσης έχουμε:

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \text{ άρα ισχύει ότι :}$$

$$I_N = 3 I_0 ,$$

δηλαδή το ρεύμα ουδετέρου ισούται με το τριπλάσιο του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας.

Συνεπώς, μπορούμε να κάνουμε τις ακόλουθες παρατηρήσεις :

- Όταν δεν υπάρχει δρόμος επιστροφής σε ένα τριφασικό σύστημα, το I_N είναι μηδέν και άρα δεν υπάρχει ρεύμα μηδενικής ακολουθίας στα ρεύματα γραμμής.
- Επίσης, ένα φορτίο συνδεδεμένο σε τρίγωνο δεν παρέχει δρόμο επιστροφής και άρα τα ρεύματα γραμμής, που ρέουν στο φορτίο, δεν μπορούν να έχουν συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας.
- Επειδή το άθροισμα των πολικών τάσεων σε ένα τριφασικό σύστημα είναι πάντοτε μηδέν, οι συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας των πολικών τάσεων είναι πάντοτε μηδέν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Λογισμικό WinIGS

4.1 Περιγραφή προγράμματος^[18]

Το πρόγραμμα **WinIGS** (**Windows Based Integrated Grounding System**) αξιολογεί την απόδοση ενός συστήματος γείωσης, το οποίο αποτελεί αναπόσπαστο μέρος ενός ηλεκτρικού συστήματος ενέργειας. Επιτρέπει στο χρήστη να διαμορφώσει οποιοδήποτε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και τις δομές γείωσης του. Αναλύει και αξιολογεί την απόδοση του συστήματος υπό κανονικές συνθήκες και υπό συνθήκες σφάλματος μόνιμης κατάστασης, βάση βιομηχανικών προτύπων και κριτηρίων. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ως πρότυπο είτε το IEEE Std. 80 είτε το IEC-479-1, τα οποία είναι ενσωματωμένα στο πρόγραμμα.

Το σύστημα ισχύος μπορεί να περιλαμβάνει οποιοδήποτε αριθμό μονοφασικών και τριφασικών συμμετρικών συσκευών καθώς επίσης και ασύμμετρων στοιχείων. Επί του παρόντος, το πρόγραμμα υποστηρίζει συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν οποιοδήποτε συνδυασμό συσκευών, συμπεριλαμβανομένων :

- Πηγών
- Γραμμών μεταφοράς
- Μετασχηματιστών
- Φορτίων
- Συστημάτων γείωσης

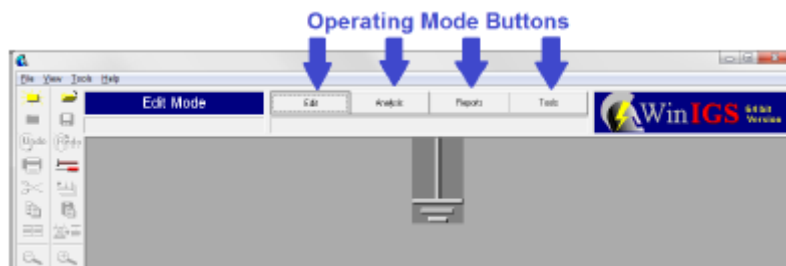
Ένα θεμελιώδες μοντέλο προγράμματος είναι το γεωμετρικό σύστημα γείωσης. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει στο χρήστη να απεικονίσει πολύπλοκα συστήματα γείωσης με λεπτομέρεια και να αξιολογεί την απόδοσή τους, συγκρίνοντας με τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές τάσεις, που λαμβάνονται από το IEEE Std. 80 ή το IEC-479-1.

Τα δεδομένα του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και του γεωμετρικού συστήματος γείωσης επεξεργάζονται μέσω ενός ειδικά διαμορφωμένου και φιλικού προς το χρήστη, περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, το δίκτυο παρουσιάζεται σε μορφή μονογραμμικού διαγράμματος. Η τοπολογία του δικτύου μπορεί να επεξεργαστεί χρησιμοποιώντας το ποντίκι. Οι παράμετροι της κάθε συσκευής μπορούν να διαμορφωθούν με διπλό κλικ πάνω στο σύμβολο της συσκευής. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων, που αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη συσκευή, μπορούν να εμφανιστούν κάνοντας διπλό κλικ πάνω στο σύμβολο της συσκευής.

Το πρόγραμμα **WinIGS** παρέχει στο χρήστη τις εξής δυνατότητες ως προς τη λειτουργία του:

- Σύνταξης (Edit Mode)
- Ανάλυσης (Analysis Mode)
- Αναφορών (Reports Mode)
- Εργαλείων (Tools Mode)

Ο χρήστης μπορεί να διαλέγει την επιθυμητή λειτουργία ανά πάσα στιγμή κάνοντας κλικ στο αντίστοιχο κουμπί, που βρίσκεται στην κορυφή του κύριου παραθύρου του προγράμματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1:



Σχήμα 4.1 Επιλογή κατάστασης λειτουργίας του WinIGS

Μια τυπική μελέτη στο πρόγραμμα ξεκινά με την λειτουργία σύνταξης, όπου ορίζεται η τοπολογία του δικτύου και του συστήματος γείωσης. Στη συνέχεια, επιλέγεται η λειτουργία ανάλυσης, όπου πραγματοποιούνται οι επιθυμητοί υπολογισμοί. Τέλος, επιλέγεται η λειτουργία αναφορών για να εμφανιστούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Η λειτουργία εργαλείων παρέχει πολλές βοηθητικές δυνατότητες που δεν αποτελούν μέρος του κύκλου Σύνταξης-Ανάλυσης-Αναφορών. Πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνει βιβλιοθήκες (καλωδίων, πυλώνων κλπ.), αναλύσεις μηχανικής αντοχής, αντικεραυνικής προστασίας κ.ά.

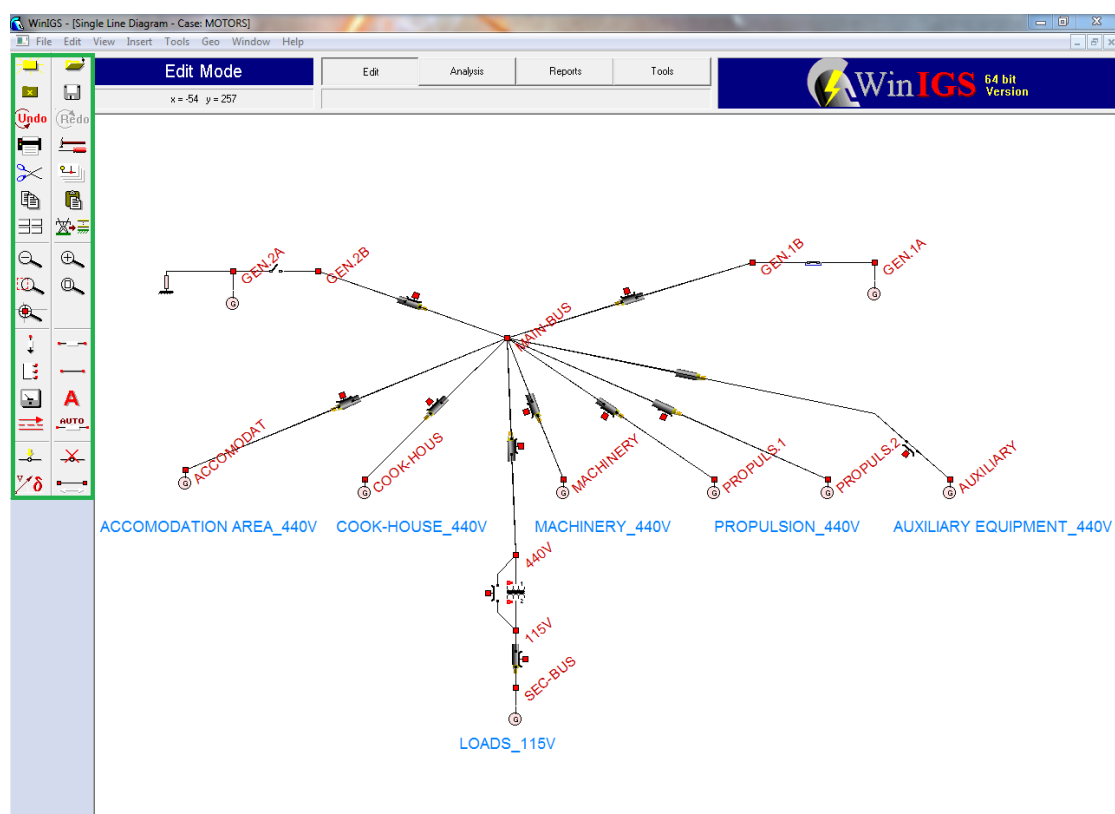
Κάθε βιβλιοθήκη παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να τροποποιήσει τα εκάστοτε στοιχεία, το οποίο βέβαια δεν συνιστάται. Για το λόγο αυτό, το πρόγραμμα περιλαμβάνει συντάκτες για τη δημιουργία νέων στοιχείων, που ενδέχεται να μην υπάρχουν στις βάσεις δεδομένων.

Το λογισμικό **WinIGS** είναι ένα σύγχρονο πρόγραμμα με πολλές δυνατότητες και συνεχής αναβαθμίσεις. Συνεπώς, στις ενότητες που ακολουθούν θα αναλυθούν, εν συντομία, οι σημαντικότερες εφαρμογές του και κυρίως αυτές που χρησιμοποιήθηκαν περισσότερο στις προσομοιώσεις. Σκοπός είναι, να εξοικειωθεί ο αναγνώστης με το λογισμικό και να δημιουργηθεί ένα εγχειρίδιο για μελλοντικές χρήσεις του προγράμματος.

4.2 Λειτουργία Σύνταξης (Edit Mode)

4.2.1 Εισαγωγή Στοιχείων (Network Editor)

Πριν εκτελεσθεί οποιαδήποτε διαδικασία ανάλυσης ο χρήστης πρέπει να ορίσει ένα δίκτυο χρησιμοποιώντας το συντάκτη δικτύου (**Network Editor**), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2, που ακολουθεί :



Σχήμα 4.2 Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου σε λειτουργία σύνταξης

Ο συντάκτης δικτύου βασίζεται σε ένα γραφικό περιβάλλον, το οποίο απεικονίζει το υπό μελέτη σύστημα σε μορφή μονογραμμικού διαγράμματος. Οι διαθέσιμες εντολές βρίσκονται στο αριστερό μέρος της οθόνης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2 (πράσινο πλαίσιο). Κατά τη λειτουργία σύνταξης, οι συσκευές του ηλεκτρικού δικτύου μπορούν να δημιουργηθούν, να τροποποιηθούν ή να διαγραφούν.

Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι το μονογραμμικό διάγραμμα που απεικονίζεται αναπαριστά ένα απόλυτα ορισμένο πολυφασικό σύστημα. Για παράδειγμα ένας κύριος ζυγός, έστω main-bus, μπορεί να έχει έως και πέντε κόμβους, που πρέπει να ορίζονται ως ακολούθως :

- Για τη φάση A, main-bus_A
- Για τη φάση B, main-bus_B
- Για τη φάση C, main-bus_C
- Για τον ουδέτερο, main-bus_N
- Για τη γείωση, main-bus_G

Μερικές από τις πιο συνηθισμένες εντολές είναι οι εξής :



Άνοιγμα φακέλου υπάρχουσας μελέτης



Δημιουργία καινούργιας μελέτης



Κλείσιμο τρέχουσας μελέτης



Άνοιγμα του παραθύρου 'Επιλογές'



Αναδιάταξη των ενεργών παραθύρων ώστε να είναι όλα ορατά



Εισαγωγή επιπρόσθετου κόμβου



Εμφάνιση της ονομαστικής μετατόπιση φάσης σε κάθε ζυγό



Συνεισφορά στοιχείου στο ρεύμα σφάλματος



Άνοιγμα παραθύρου αναφοράς στοιχείου



Εμφάνιση απόστασης από επιλεγμένο ζυγό

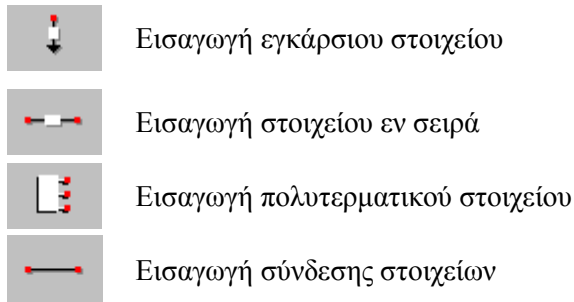
Ο συντάκτης δικτύου επιτρέπει στο χρήστη να ορίσει ένα σύστημα ισχύος που θα προσομοιωθεί με το πρόγραμμα **WinIGS**. Τυπικές λειτουργίες που πραγματοποιούνται με σκοπό τον καθορισμό ενός συστήματος περιλαμβάνουν:

- Εισαγωγή στοιχείων ηλεκτρικών συστημάτων
- Καθορισμός της σύνδεσης μεταξύ αυτών
- Ρύθμιση των παραμέτρων του κάθε στοιχείου

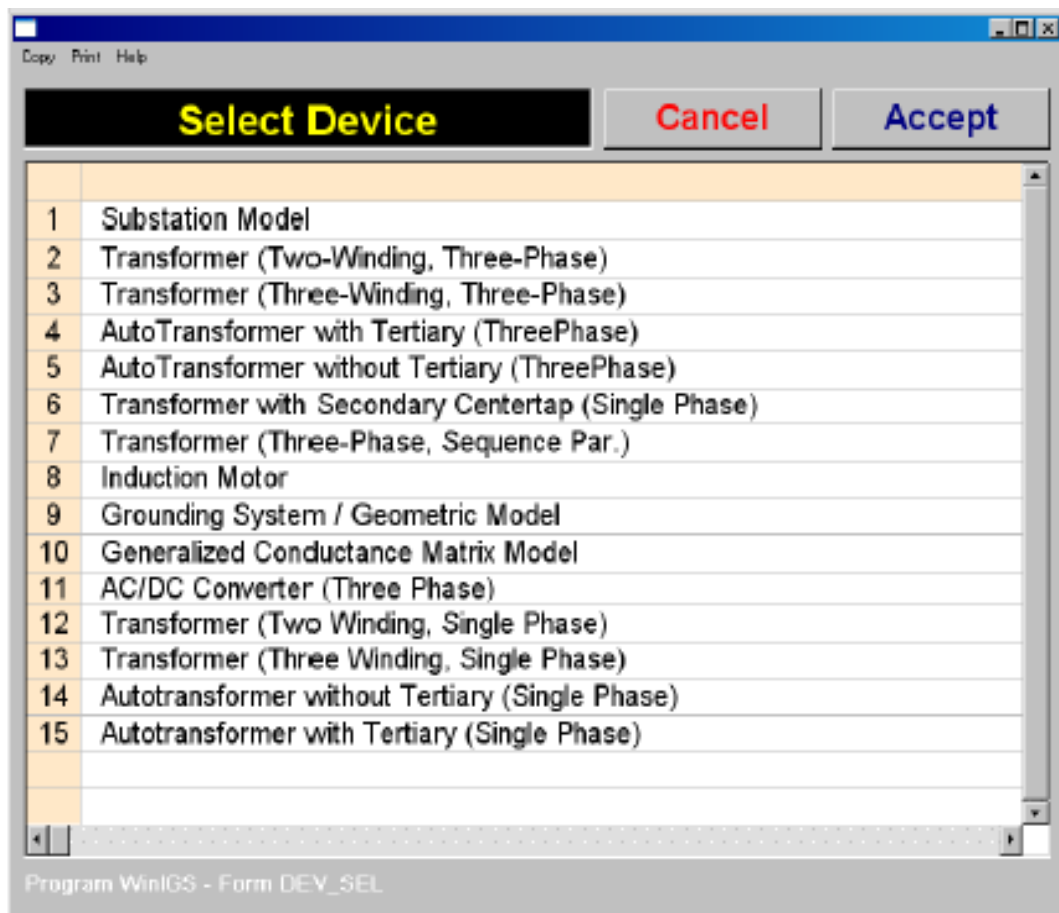
Ένα σύστημα ισχύος απεικονίζεται σε μορφή μονογραμμικού διαγράμματος. Κάθε στοιχείο απεικονίζεται από ένα συγκεκριμένο σύμβολο που περιέχει έναν ή περισσότερους ακροδέκτες. Τα στοιχεία κατατάσσονται ανάλογα με τον αριθμό των ακροδεκτών που περιέχουν, στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Εγκάρσια γειωμένα (έναν ακροδέκτη)
- Εν σειρά (δύο ακροδέκτες)
- Πολυτερματικά (συσκευές με μεταβλητό αριθμό ακροδεκτών)

Τα στοιχεία του συστήματος εισάγονται σε αυτό, χρησιμοποιώντας τα ακόλουθα εικονίδια:



Στο σχήμα 4.3 απεικονίζονται όλες οι πολυτερματικές συσκευές.



Σχήμα 4.3 Πολυτερματικά Στοιχεία

4.2.2 Καθορισμός Παραμέτρων Στοιχείων (Editing Device Parameters)

Οι παράμετροι των στοιχείων του δικτύου καθορίζονται αφού πρώτα επιλεγεί το επιθυμητό στοιχείο, με διπλό κλικ σε αυτό. Για όλα τα στοιχεία, αυτή η διαδικασία ανοίγει ένα παράθυρο, το οποίο περιέχει όλες τις επιλεγμένες παραμέτρους της συσκευής. Παράδειγμα τριφασικής πηγής, με όλες τις παραμέτρους που απαιτούνται, φαίνεται στο σχήμα 4.4 που ακολουθεί :

The screenshot shows the 'Three Phase Source' dialog box in WinIGS. The title bar includes 'Copy', 'Print', and 'Help'. The main title is 'Three Phase Source' and the subtitle is 'Equivalent Source (3-Phase)'. There are 'Accept' and 'Cancel' buttons. The 'Source Voltage' section has the following parameters: Line to Neutral (0.25403 kV), Line to Line (0.44 kV), Phase Angle (0.0 Degrees), Phase Sequence (Positive selected), and Circuit Number (1). The 'Source Impedance' section has a table for Positive, Negative, and Zero sequences. The 'Base' section shows 0.1812316 MVA, 0.44 kV(L-L), 0.238 kA, and 1.068 Ohms. There are 'Update L-N', 'Update L-L', 'Update Ohms', and 'Update PU' buttons. A diagram on the right shows a three-phase source connected to a bus named 'AUX.EQUIP'.

	Ohms	PU	Base
Positive Sequence	Resistance	0.058754	0.055
	Reactance	0.16024	0.15
Negative Sequence	Resistance	0.058754	0.055
	Reactance	0.16024	0.15
Zero Sequence	Resistance	0.029377	0.0275
	Reactance	0.080118	0.075

Base
0.1812316 MVA
0.44 kV(L-L)
0.238 kA
1.068 Ohms

Σχήμα 4.4 Παράμετροι τριφασικής πηγής

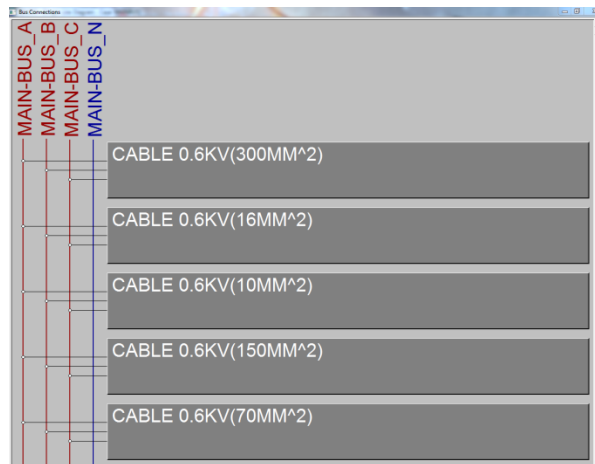
Κάθε στοιχείο ορίζεται από διαφορετικές παραμέτρους, ωστόσο ενδέχεται να υπάρχουν και κάποια κοινά χαρακτηριστικά. Ειδικότερα, όλες οι τιμές που εμφανίζονται σε λευκό πλαίσιο είναι επεξεργάσιμες. Όλα τα στοιχεία, έχουν ένα πλαίσιο τίτλου, όπου ο χρήστης μπορεί να εισάγει τον επιθυμητό τίτλο του στοιχείου.

4.2.3 Σύνδεση Στοιχείων (Connecting Devices)

Το δίκτυο καθορίζει τη σύνδεση των στοιχείων με βάση το όνομα του ζυγού ή των κόμβων. Οι κόμβοι που έχουν το ίδιο όνομα θεωρούνται συνδεδεμένοι. Ωστόσο, οι συνδέσεις των στοιχείων μπορούν να τροποποιηθούν με επεξεργασία του ονόματος των ακροδεκτών.

Ο συντάκτης δικτύου παρέχει ένα εργαλείο για επιβεβαίωση των συνδέσεων. Με διπλό κλικ σε οποιοδήποτε κόμβο ανοίγει ένα παράθυρο, που απεικονίζει όλες τις συνδέσεις των στοιχείων σε αυτό το σημείο του κυκλώματος. Παράδειγμα αυτού, παρουσιάζεται παρακάτω στο σχήμα 4.5 για το ζυγό MAIN-BUS. Κάθε στοιχείο του

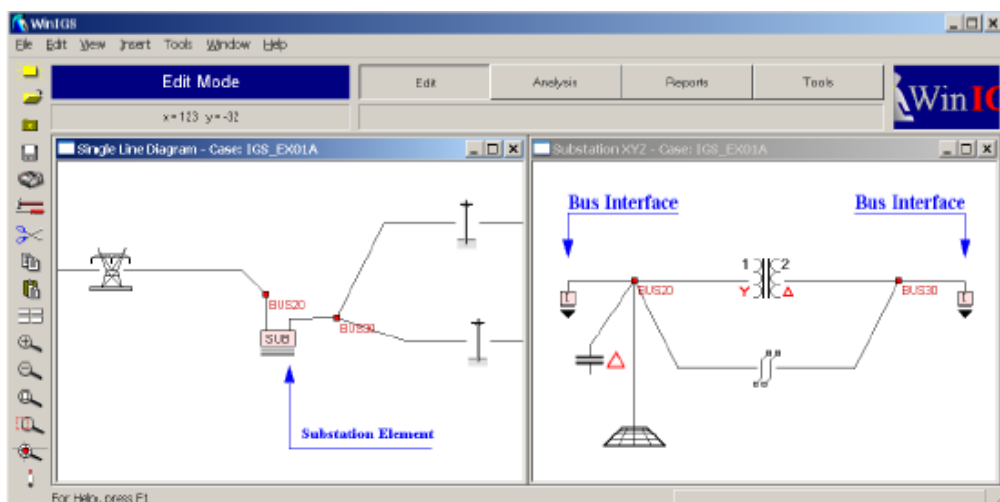
δικτύου που συνδέεται σε αυτό το ζυγό εμφανίζεται σε ορθογώνιο πλαίσιο. Ο χρήστης μπορεί να ελέγξει τις συνδέσεις του δικτύου και να κάνει τις κατάλληλες διορθώσεις, όπου είναι απαραίτητο.



Σχήμα 4.5 Παράθυρο σύνδεσης κόμβων

4.2.4 Υποσταθμοί (Substation Elements)

Για να απλοποιηθεί η διαχείριση ενός μεγάλου δικτύου, συνιστάται η χρήση υποσταθμών. Ένας υποσταθμός μπορεί να περιλαμβάνει οποιοδήποτε αριθμό στοιχείων και απεικονίζεται στο κύριο μονογραμμικό διάγραμμα ως ένα στοιχείο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Κάνοντας διπλό κλικ στο εικονίδιο του υποσταθμού, μπορεί κανείς να δει και να επεξεργαστεί οτιδήποτε εμπεριέχεται σε αυτόν. Οι υποσταθμοί δύναται να έχουν οποιοδήποτε αριθμό τερματικών σημείων, τα οποία συνδέονται σε οποιοδήποτε ζυγό (**Bus Interface**). Στο παράδειγμα του σχήματος 4.6 ο υποσταθμός έχει δύο τερματικά σημεία, τα οποία ορίζουν πως ακριβώς συνδέεται ο υποσταθμός στο κύριο δίκτυο.



Σχήμα 4.6 Υποσταθμός στο κύριο δίκτυο (αριστερά) και δίκτυο υποσταθμού (δεξιά)

4.3 Λειτουργία Ανάλυσης (Analysis Mode)

4.3.1 Εισαγωγή

Η λειτουργία της ανάλυσης είναι διαθέσιμη για όλα τα καλώς ορισμένα δίκτυα. Τυπικά λάθη και ανακρίβειες συναντώνται σε συνδεσμολογίες αγωγών, γειώσεων και παραμέτρων συσκευών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο χρήστης πρέπει να επιστρέψει στη λειτουργία της σύνταξης και να διορθώσει το δίκτυο. Κατά τη λειτουργία της ανάλυσης είναι διαθέσιμες μια σειρά από ενέργειες. Ο πίνακας 4.1 που ακολουθεί περιλαμβάνει τις πιο σημαντικές ενέργειες και μία σύντομη περιγραφή.

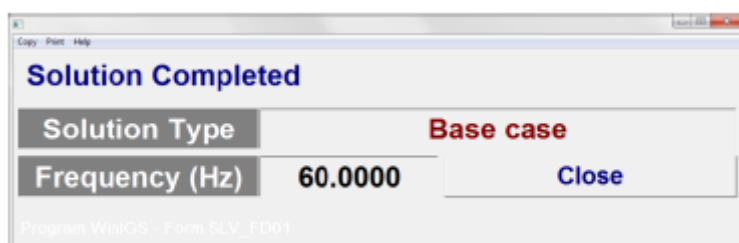
Λειτουργία	Περιγραφή
Base Case	Υπολογίζεται λύση μόνιμης κατάστασης (δεν υπάρχει παρουσία σφαλμάτων)
Fault Analysis	Υπολογίζεται λύση σφάλματος μόνιμης κατάστασης υπό συγκεκριμένο σφάλμα
Maximum Ground Potential Rise	Βρίσκει το σφάλμα που προκαλεί μέγιστη αύξηση τάσης γης και υπολογίζει την τιμή της, σε ορισμένο κόμβο
Node Thevenin Equivalent	Υπολογίζει το ισοδύναμο Thevenin σε ορισμένη θύρα
GPR and Fault Current versus Fault Location	Υπολογίζει μια σειρά σφαλμάτων, σε συγκεκριμένο κόμβο, ώστε να σχεδιαστεί γράφημα αύξησης τάσης γης και ρεύματος σφάλματος σε συνάρτηση με την τοποθεσία σφάλματος
Voltage Probability Density	Υπολογίζει τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης σε συγκεκριμένη θύρα για σφάλματα σε όλο το δίκτυο
Current Probability Density	Υπολογίζει τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του ρεύματος σε συγκεκριμένο κόμβο για σφάλματα σε όλο το δίκτυο
Maximum Induced Voltage	Εκτελεί μια σειρά από σφάλματα ώστε να καθορίσει εκείνο, που προκαλεί την μέγιστη επαγόμενη τάση σε ένα ορισμένο κύκλωμα

Πίνακας 4.1 Εντολές λειτουργίας ανάλυσης

Με την ολοκλήρωση μίας εκ των παραπάνω εντολών, εμφανίζεται μία σύντομη αναφορά για το σφάλμα και την τοποθεσία του, όπως θα δούμε και στις παρακάτω υποενότητες. Ωστόσο, η πλήρης αναφορά είναι διαθέσιμη στην λειτουργία αναφορών (**Reports mode**). Ανάλογα με την εντολή, περιλαμβάνονται πληροφορίες σχετικές με τις τάσεις και τα ρεύματα σε οποιαδήποτε συσκευή του κυκλώματος, την απόδοση της γείωσης κλπ.

4.3.2 Μόνιμη Κατάσταση (Base Case)

Η μόνιμη κατάσταση του συστήματος περιλαμβάνει τις τάσεις και τα ρεύματα σε όλους τους κόμβους του, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Ειδικότερα, όλες οι πηγές λειτουργούν στην ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση, ενώ δεν εφαρμόζονται σφάλματα. Παράδειγμα παραθύρου που εμφανίζεται μετά την ενέργεια αυτή, είναι του σχήματος 4.7 :



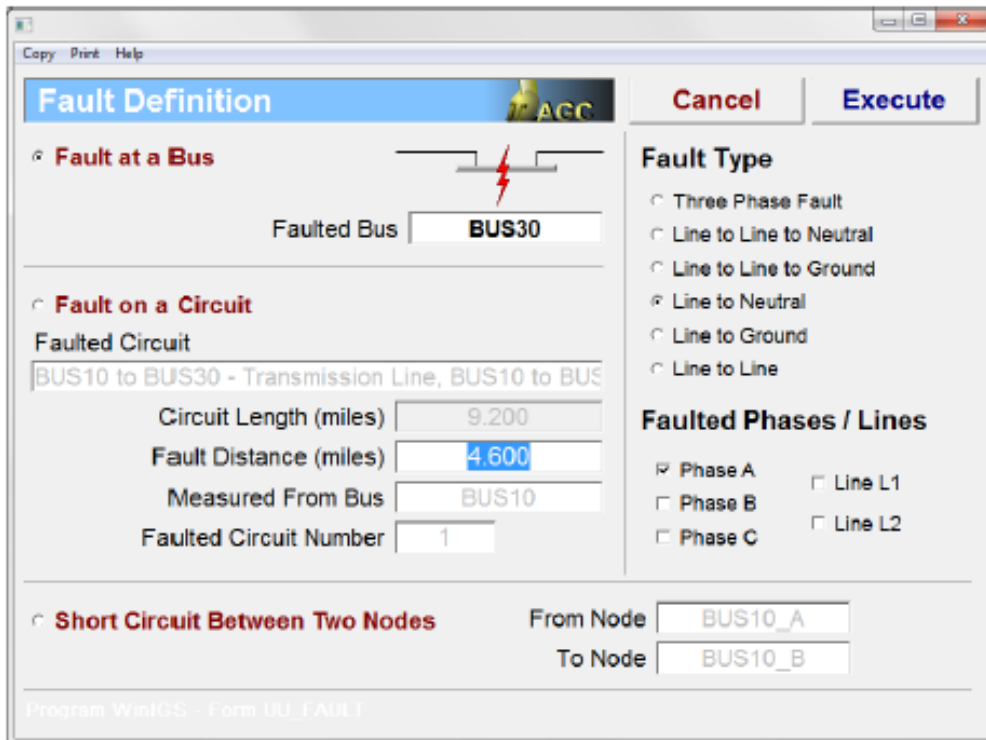
Σχήμα 4.7 Παράθυρο αναφοράς μόνιμης κατάστασης

4.3.3 Ανάλυση Σφάλματος (Fault Analysis)

Η ανάλυση σφάλματος περιλαμβάνει τάσεις και ρεύματα σε όλους τους κόμβους του συστήματος στην μόνιμη κατάσταση και υπό συγκεκριμένο σφάλμα. Όπως και στην κανονική κατάσταση, οι πηγές λειτουργούν στην ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση.

Με την ανάλυση σφάλματος μπορούν να προσομοιωθούν τρεις διακριτές κατηγορίες σφαλμάτων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.8 .

1. Σφάλμα σε ζυγό, όπου απαιτείται ο προσδιορισμός του ζυγού, το είδος του σφάλματος (μονοφασικό, διφασικό προς γη κλπ.), καθώς και των ελαττωματικών φάσεων ή γραμμών του
2. Σφάλμα σε υποκύκλωμα, όπου απαιτείται ο προσδιορισμός του υποκυκλώματος, το είδος σφάλματος και οι ελαττωματικές φάσεις, καθώς και το ακριβές σημείο του σφάλματος
3. Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο επιλεγμένων κόμβων , όπου απαιτείται ο προσδιορισμός των επιθυμητών κόμβων



Σχήμα 4.8 Παράθυρο επιλογής σφάλματος

Όταν η ανάλυση σφάλματος ολοκληρωθεί, εμφανίζεται ένα παράθυρο με τη λύση που επετεύχθη, όπως αυτό του σχήματος 4.9.

Solution Completed		
Solution	Bus Fault	
L-N fault on bus BUS30		
Fault Current	Magnitude (kA)	Phase (deg)
BUS30_A	9.6868	-73.6926
X/R Ratio	3.4174	Diagram
Frequency (Hz)	60.0000	Close

Σχήμα 4.9 Αναφορά ανάλυσης σφάλματος

4.3.4 Ανάλυση Ρεύματος Σφάλματος (Fault Current Analysis)

Αυτή η λειτουργία ουσιαστικά αποτελεί επέκταση της αναφοράς σφάλματος. Η ειδοποιός διαφορά έγκειται στο ότι η ανάλυση ρεύματος σφάλματος δημιουργεί αυτόματα αναφορά, η οποία περιέχει τάσεις και ρεύματα για όλα τα στοιχεία του δικτύου, για κάθε σφάλμα που εξετάζεται.

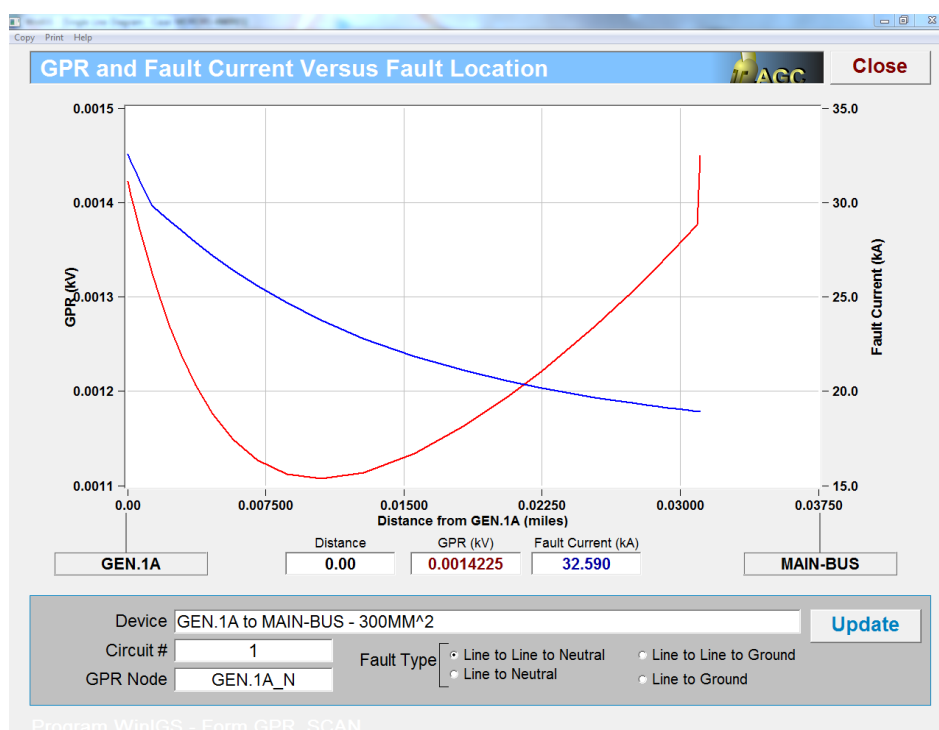
4.3.5 Αύξηση δυναμικού γης και ρεύματος σφάλματος συναρτήσει της τοποθεσίας σφάλματος (GPR and Fault Current versus Fault Location)

Αυτή η διαδικασία υπολογίζει την αύξηση του δυναμικού γης σε έναν επιλεγμένο κόμβο γείωσης, καθώς επίσης και το ρεύμα σφάλματος συναρτήσει της τοποθεσίας σφάλματος κατά μήκος ενός υποκυκλώματος.

Οι ακόλουθες παράμετροι πρέπει να οριστούν :

- Ο κόμβος γης για τον οποίο υπολογίζεται η αύξηση δυναμικού
- Το είδος σφάλματος
- Το κύκλωμα στο οποίο θα εφαρμοστεί το σφάλμα

Τυπικό παράδειγμα αυτής της προσομοίωσης απεικονίζεται στο σχήμα 4.10 .



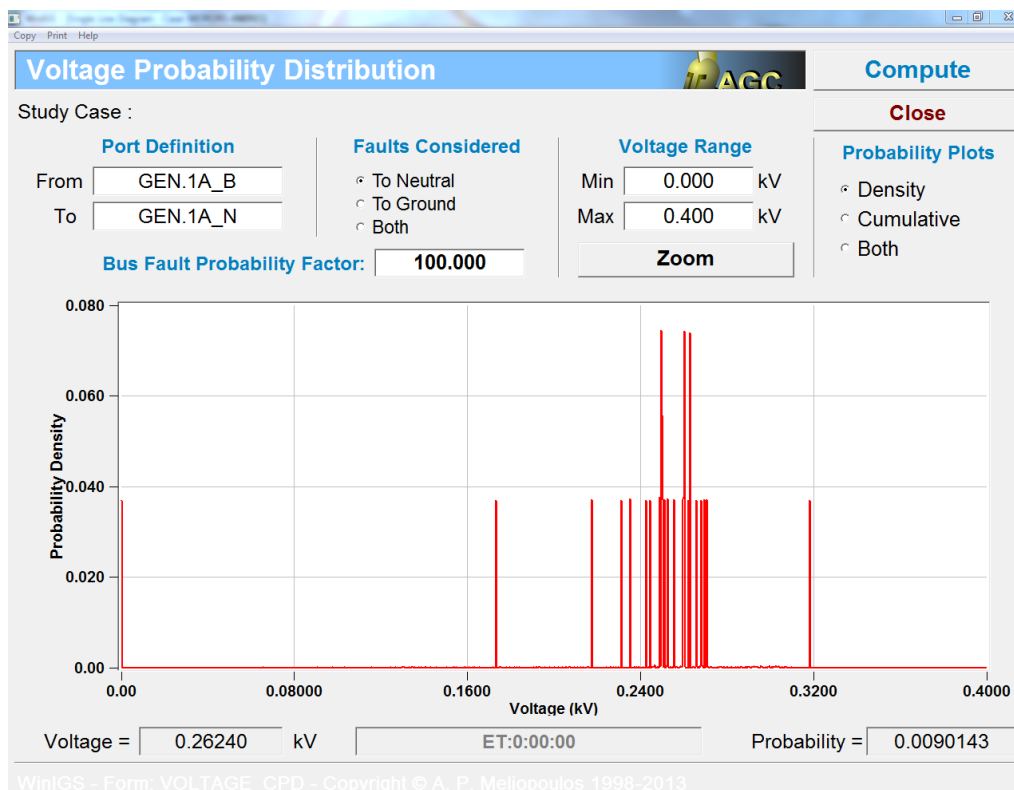
Σχήμα 4.10 Αύξηση δυναμικού γης και ρεύματος σφάλματος συναρτήσει της τοποθεσίας σφάλματος

4.3.6 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης (Voltage Probability Density)

Αυτή η διαδικασία υπολογίζει τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τάσης μεταξύ δύο κόμβων, για σφάλματα που προκαλούνται σε οποιαδήποτε τοποθεσία του κυκλώματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11.

Πρέπει να ορισθούν οι ακόλουθοι παράμετροι:

- Οι κόμβοι μεταξύ των οποίων υπολογίζονται οι τάσεις
- Τα είδη σφαλμάτων που θα ληφθούν υπόψιν
- Το εύρος της τάσης για τον οριζόντιο άξονα του σχεδιαγράμματος



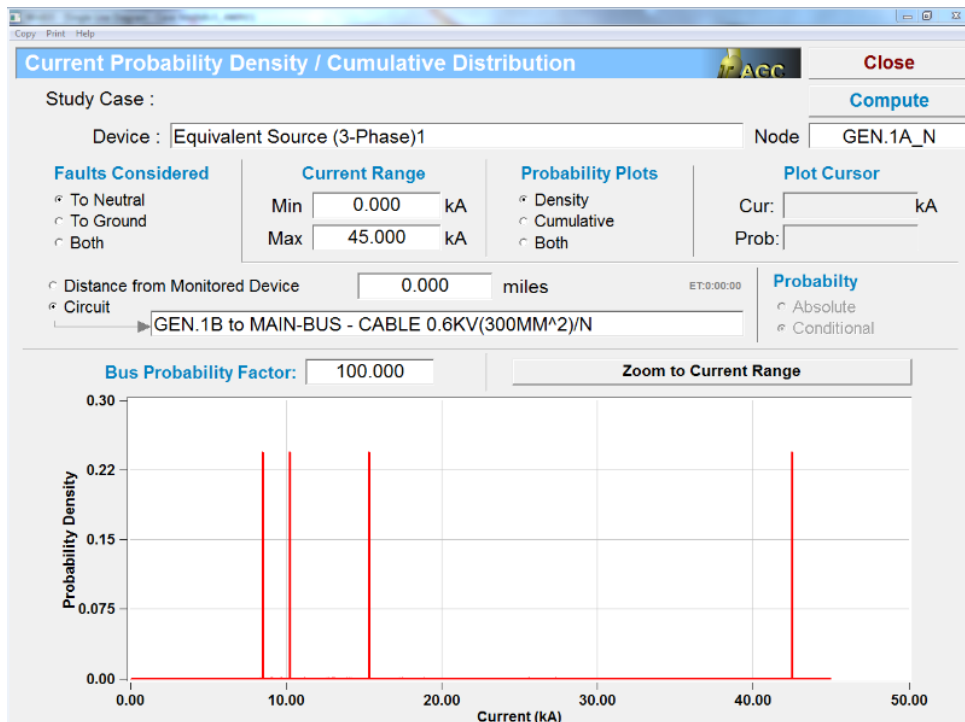
Σχήμα 4.11 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας της τάσης

4.3.7 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του ρεύματος (Voltage Probability Density)

Αυτή η διαδικασία υπολογίζει τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του ρεύματος σε συγκεκριμένο στοιχείο του κυκλώματος για σφάλματα που προκαλούνται σε οποιαδήποτε τοποθεσία του κυκλώματος. Τυπική αναφορά ακολουθεί στο σχήμα 4.12.

Πρέπει να οριστούν οι ακόλουθες παράμετροι:

- Η συσκευή στην οποία υπολογίζεται η κατανομή της πιθανότητας ρεύματος
- Ο κόμβος στον οποίο υπολογίζεται η κατανομή της πιθανότητας ρεύματος
- Τα σφάλματα που λαμβάνονται υπόψιν
- Το εύρος της τάσης για τον οριζόντιο άξονα του σχεδιαγράμματος



Σχήμα 4.12 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας του ρεύματος

4.3.8 Μέγιστη Επαγόμενη Τάση (Maximum Induced Voltage)

Αυτή η διαδικασία, μέσω της ανάλυσης σφάλματος, αναγνωρίζει την κατάσταση σφάλματος που παράγει τη μέγιστη τάση μεταξύ δύο κόμβων. Σφάλματα εφαρμόζονται αυτόματα σε όλους τους ζυγούς του συστήματος και κατά μήκος όλων των κυκλωμάτων. Ειδικότερα, προσομοιώνονται μονοφασικά και διφασικά προς ουδέτερο και/ή προς γη. Ο χρήστης πρέπει ακόμα να ορίσει μεταξύ ποιων κόμβων θα εκτιμηθεί η μέγιστη τάση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των καλωδίων ελέγχου που είναι εγκατεστημένα κατά μήκος των κυκλωμάτων ισχύος, οι επαγόμενες τάσεις οφείλονται σε (α) αγωγιμότητα μέσω του εδάφους, (β) μαγνητική επαγωγή, και (γ) χωρητική σύζευξη. Η αναφερόμενη μέγιστη επαγόμενη τάση περιλαμβάνει τις συνεισφορές των τριών φαινομένων.

Όταν η ανάλυση ολοκληρωθεί, τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι τα εξής:

- Η περιγραφή του σφάλματος που οδηγεί στη μέγιστη επαγόμενη τάση
- Η τιμή της μέγιστης τάσης
- Ο λόγος επαγωγικής αντίδρασης προς αντίσταση (X/R) στο σημείο του σφάλματος
- Η τιμή ρεύματος σφάλματος

Max Transfer / Induced Voltage

Study Case :

Port Definition

From GEN.1A_B
To MACHINERY_C

Faults Considered

- To Neutral
- To Ground
- Both

Compute

Close

ET:0:00:01

Fault Description

Fault On Circuit	N/A	Circuit #	N/A
Fault Type	Line to Neutral Fault		
Fault Location	GEN.1A		
Maximum Transfer /Induced Voltage (kV)	0.6048		
X/R Ratio at Fault Location	11.7003		
Fault Current	Magnitude (kA)	Phase (deg)	
	GEN.1A_A	15.3429	-87.2821

Program WinIGS - Form MAX_VOLTAGE

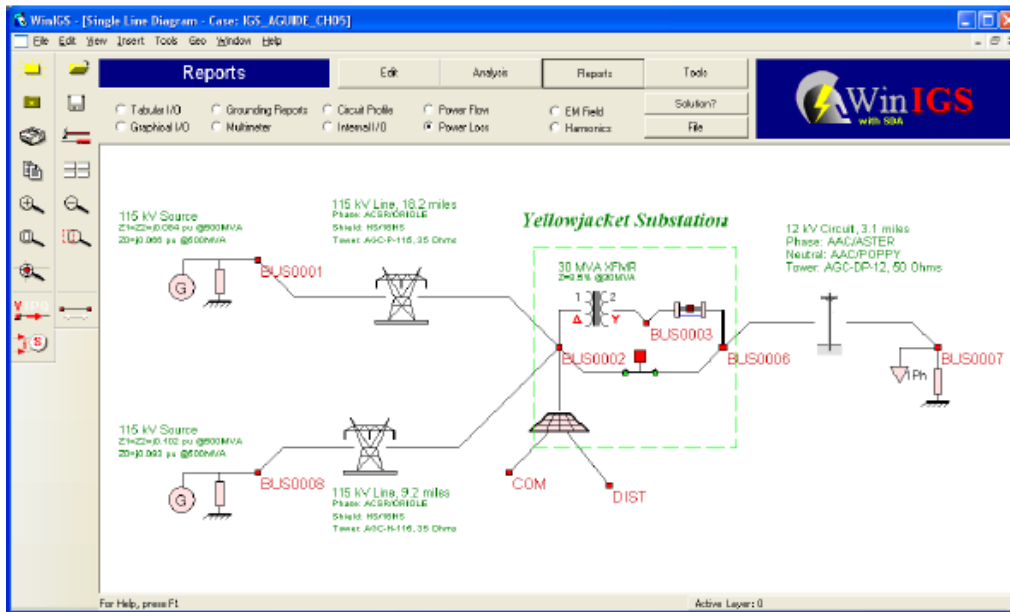
Σχήμα 4.13 Μέγιστη επαγόμενη τάση

4.4 Λειτουργία Αναφορών (Reports Mode)

4.4.1 Εισαγωγή

Μόλις η ανάλυση σφάλματος ή μόνιμης κατάστασης ολοκληρωθεί ο χρήστης μπορεί να μεταβεί στη λειτουργία αναφορών. Το πρόγραμμα **WinIGS** δημιουργεί αναφορές για επιλεγμένες συσκευές ή για ολόκληρο το σύστημα. Ακολουθούν τα βασικά είδη αναφορών, που είναι διαθέσιμα για την εκάστοτε συσκευή και η περιγραφή αυτών που χρησιμοποιήθηκαν ως επί το πλείστον.

- Αναφορά μέσω πινάκων (**Tabular reports**)
- Αναφορά μέσω γραφημάτων (**Graphical reports**)
- Αναφορά γείωσης (**Grounding Reports**)
- Αναφορά Ισχύος (**Power Reports**)
- Αναφορά Απώλειας Ισχύος (**Power Loss Report**)
- Ηλεκτρομαγνητικό Πεδίο (**EM Field**)
- Συνεισφορά Ρεύματος Σφάλματος (**Fault Current Contribution**)



Σχήμα 4.14 Παράθυρο προγράμματος WinIGS σε λειτουργία Αναφορών

4.4.2 Αναφορά μέσω πινάκων (Tabular reports)

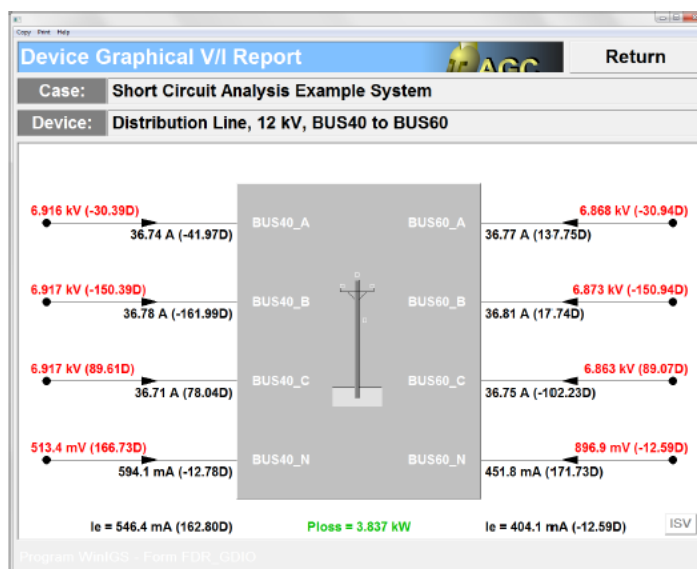
Σε αυτή τη λειτουργία υπολογίζονται οι τιμές τάσης και ρεύματος για επιλεγμένη συσκευή. Τυπική αναφορά εμφανίζεται στο σχήμα 4.15 .

Terminal Voltage and Current Report				
Distribution Line, 12 kV, BUS40 to BUS60				
Node	Voltage		Current	
	Magnitude	Phase	Magnitude	Phase
BUS40_A	6.916 kV	-30.391 Deg	36.74 A	-41.966 Deg
BUS40_B	6.917 kV	-150.395 Deg	36.78 A	-161.985 Deg
BUS40_C	6.917 kV	89.612 Deg	36.71 A	78.039 Deg
BUS40_N	513.4 mV	166.734 Deg	594.1 mA	-12.782 Deg
BUS60_A	6.868 kV	-30.935 Deg	36.77 A	137.752 Deg
BUS60_B	6.873 kV	-150.944 Deg	36.81 A	17.741 Deg
BUS60_C	6.863 kV	89.073 Deg	36.75 A	-102.229 Deg
BUS60_N	896.9 mV	-12.587 Deg	451.8 mA	171.732 Deg
Analysis Frequency		60.0000	Hz	Power Losses

Σχήμα 4.15 Αναφορά μέσω πίνακα

4.4.3 Αναφορά μέσω γραφημάτων (Graphical reports)

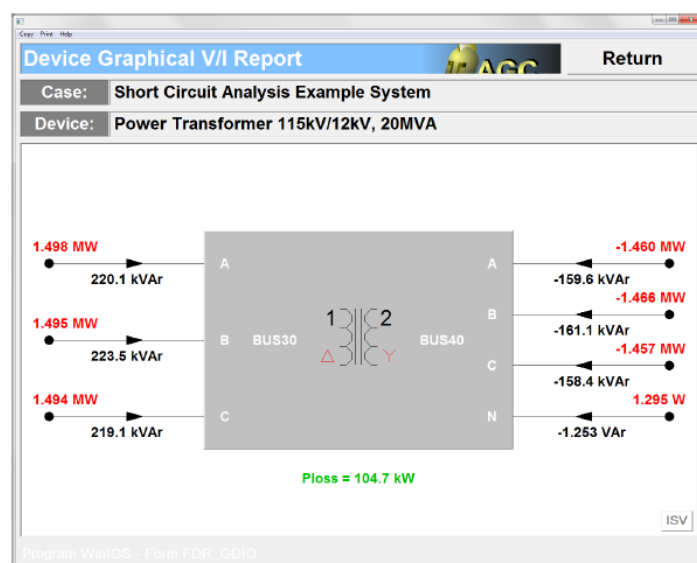
Σε αυτή τη λειτουργία εμφανίζονται οι ίδιες πληροφορίες με την αναφορά μέσω πίνακα, αλλά παρουσιάζονται με ένα σχηματικό διάγραμμα και τους τερματικούς τους. Τυπική αναφορά εμφανίζεται στο σχήμα 4.16.



Σχήμα 4.16 Αναφορά μέσω γραφήματος

4.4.4 Αναφορά Ισχύος (Power Flow Report)

Η αναφορά ισχύος απεικονίζει τη ροή ενεργούς και άεργου ισχύος σε ένα επιλεγμένο στοιχείο. Τυπική αναφορά εμφανίζεται στο σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.17 Αναφορά Ροής Ισχύος

4.4.5 Αναφορά Απώλειας Ισχύος (Power Loss Report)

Η αναφορά απώλειας ισχύος υπολογίζει την πραγματική ισχύ, που καταναλώνεται σε γραμμές μεταφοράς και διανομής. Επιπλέον, παρουσιάζει την συνολική απώλεια ισχύος σε αγωγούς φάσης, μονώσεις ή ουδετέρους, γείωσης κλπ. Τυπική αναφορά εμφανίζεται στο σχήμα 4.18.

Circuit Power Loss Report							
115 kV Transmission Line - Substation 1 to Plant, From bus BUS10 to bus BUS20							
Phase Losses:	254.5 kW		Earth Path Losses:	24.17 kW			
Shield Losses:	71.72 kW		Tower/Pole Ground Losses:	751.4 W			
Total Conductor Losses:	326.3 kW		Total Line Losses:	351.2 kW			
Losses Per Conductor							
	Circuit	Conductor	From Node	Current	To Node	Current	P-Loss
1	CKT2	ACSR / DRAKE	BUS10_A	67.86 A	BUS20_A	68.23 A	51.30 kW
2	CKT2	ACSR / DRAKE	BUS10_B	111.7 A	BUS20_B	129.9 A	169.3 kW
3	CKT2	ACSR / DRAKE	BUS10_C	60.72 A	BUS20_C	52.78 A	33.96 kW
4	CKT2	HS / 5/16HS	BUS10_N	7.592 A	BUS20_N	6.735 A	17.49 kW
5	CKT2	ALUMOWE / 37#10AW	BUS10_N	35.55 A	BUS20_N	34.10 A	54.23 kW

Σχήμα 4.18 Αναφορά Απώλειας Ισχύος

4.5 Λειτουργία Εργαλείων (Tools Mode)

4.5.1 Εισαγωγή

Κατά τη λειτουργία εργαλείων ο χρήστης έχει τις ακόλουθες επιλογές, οι σημαντικότερες εκ των οποίων θα αναλυθούν παρακάτω.

- Βιβλιοθήκη αγωγών (**Conductor Library**)
- Βιβλιοθήκη καλωδίων (**Cable Library**)
- Βιβλιοθήκη πυλώνων (**Tower Library**)
- Παράμετροι ακολουθίας κυκλωμάτων (**Circuit Parameters**)
- Ανάλυση αντικεραυνικής προστασίας (**Lightning Shielding**)
- Μηχανική ανάλυση ζυγών (**Bus Mechanical Analysis**)

4.5.2 Βιβλιοθήκη αγωγών (Conductor Library)

Το πρόγραμμα **WinIGS** παρέχει βιβλιοθήκη αγωγών, η οποία ορίζει αγωγούς για διάφορα μοντέλα γραμμών μεταφοράς. Ο συντάκτης βιβλιοθήκης αγωγών (conductor library editor) επιτρέπει στο χρήστη να επεξεργαστεί τη βιβλιοθήκη. Τα υπάρχοντα δεδομένα συνιστάται να μην αλλάζουν, αλλά να εισάγονται καινούργια εφόσον είναι αναγκαίο. Τυπικό παράδειγμα συντάκτη βιβλιοθήκης αγωγών ακολουθεί στο σχήμα 4.19.

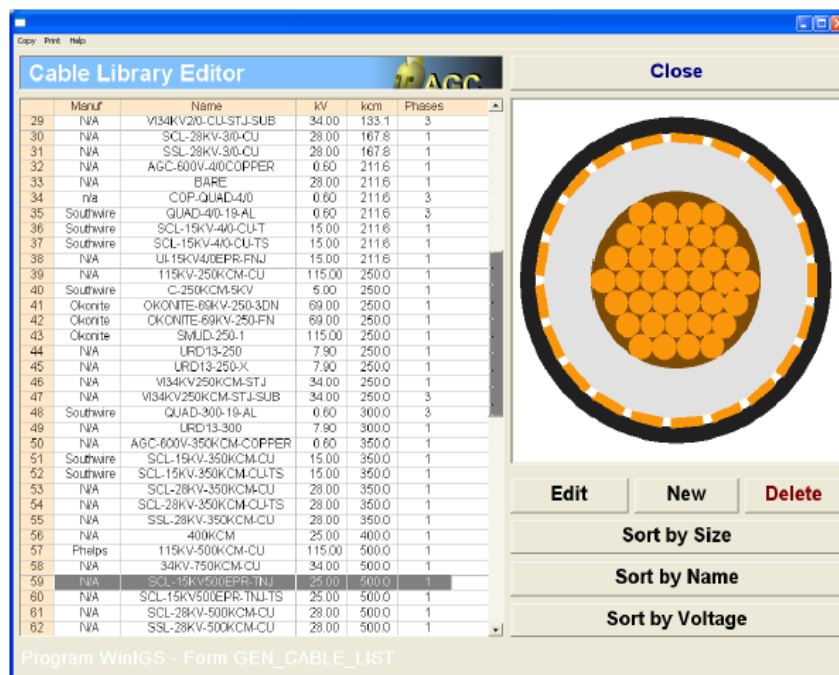
Conductor Type	Sort by Name	Sort by Size	Close
4 AACTW	1 AWG	DCRes	Area
5 ACAR	2 TURKEY	28.2	0.1980
6 ACSR	3 SWAN	41.7	0.2500
7 ACSR-DIAM	4 SWANATE	41.7	0.2570
8 ACSRAW	5 SPARROW	66.4	0.3160
9 ACSREHS	6 SPARATE	66.4	0.3250
10 ALUMINUM	7 ROBIN	83.7	0.3540
11 ALUMOWE	8 RAVEN	105.6	0.3980
12 ALU_PIPE	9 QUAIL	133.1	0.4470
13 ALU_PIPE_C	10 PIGEON	167.8	0.5020
14 BARENEUT	11 PENGUIN	211.6	0.5630
15 BOLTS	12 WAXWING	266.8	0.6090
16 COPPER	13 PARTRIDGE	266.8	0.6420
17 COPPERWE	14 PARTRIDGE/SD	266.8	0.6450
18 COPPERWE1	15 JUNCO	266.8	0.6600
19 COP_CLAD	16 GADWALL	300.0	0.6710
20 EHS	17 OSTRICH	300.0	0.6800
21 HS	18 PHOEBE	300.0	0.6460
22 OPGW	19 PIPER	300.0	0.7000
23 OPTGW	20 PIPER/SSAC	300.0	0.7000
24 RAILROAD	21 OSTRICH/SSAC	300.0	0.6800
25 STEEL	22 ORIOLE	336.4	0.7410
26 STL_PIPE	23 ORIOLE/SSAC	336.4	0.7410
27 ST_STEEL	24 MERLIN	336.4	0.6840
	25 LINNET	336.4	0.7200

NOTE: Resistance in ohms/mile, Area in kcm, Diameter in Inches.

Σχήμα 4.19 Συντάκτης Βιβλιοθήκης Αγωγών

4.5.3 Βιβλιοθήκη καλωδίων (Cable Library)

Η βιβλιοθήκη καλωδίων παρέχει πληθώρα καλωδίων, κυρίως μέσης και υψηλής τάσης. Ο συντάκτης βιβλιοθήκης καλωδίων (cable library editor) καθιστά εφικτή τη προσθήκη νέων στοιχείων στη βάση δεδομένων. Το παράθυρο επιλογής καλωδίου απεικονίζεται στο σχήμα 4.20.



Σχήμα 4.20 Βιβλιοθήκη Καλωδίων

Η διαδικασία δημιουργίας νέων καλωδίων θα δοθεί λεπτομερώς καθώς χρησιμοποιήθηκε για όλα τα καλώδια των προσομοιώσεων.

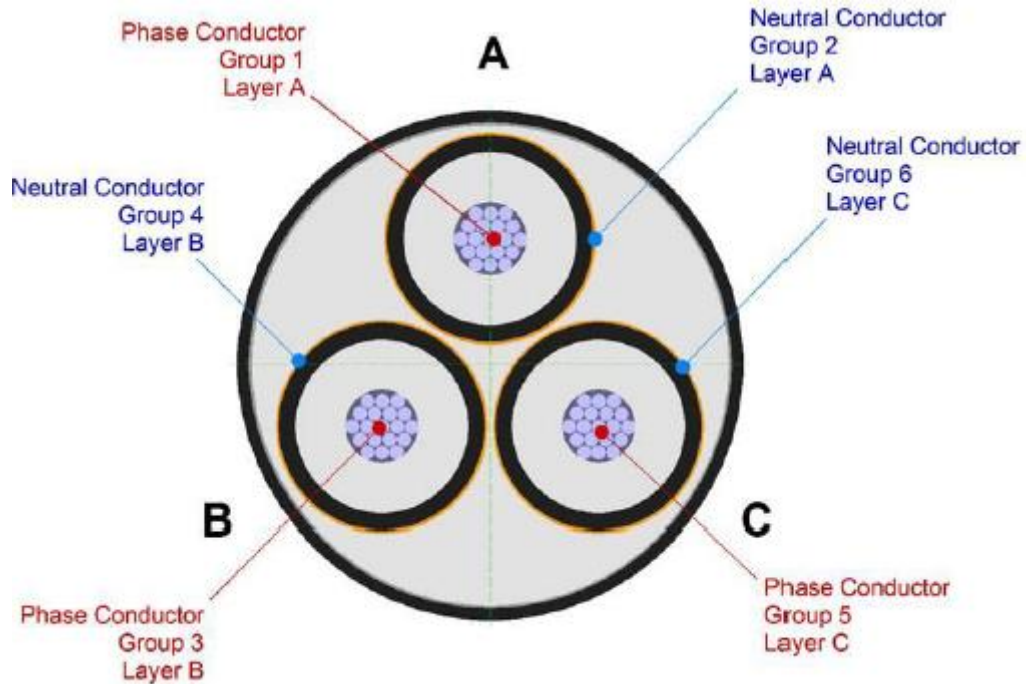
Αρχικά, συμπληρώνονται οι γενικές παράμετροι του καλωδίου, αυτές είναι το όνομα, ο κατασκευαστής, η ονομαστική τάση (V), η ικανότητα μεταφοράς ρεύματος (A) σε κανάλια ή θαμμένα, το βάρος (kg/m) και η ακτίνα κάμψης (m). Στο παράθυρο 4.21 απεικονίζεται τυπικό παράδειγμα.

Σχήμα 4.21 Γενικοί παράμετρων καλωδίου

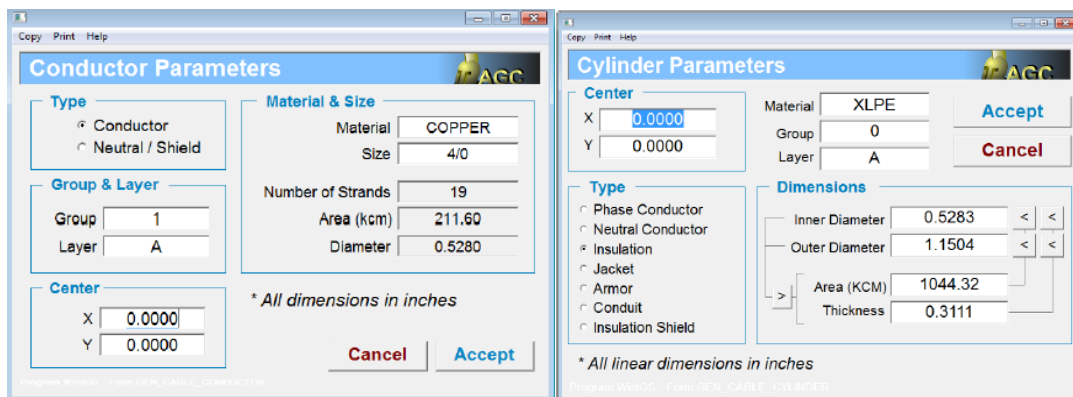
Στη συνέχεια, απαιτούνται πληροφορίες που περιλαμβάνουν, την διάμετρο όλων των στρωμάτων ενός καλωδίου, το είδος του αγωγού και των μονώσεων. Όλες οι παράμετροι εκτός από τις διαμέτρους, επιλέγονται από βιβλιοθήκες. Στο σχήμα 4.22 απεικονίζεται το σχετικό παράθυρο.

Σχήμα 4.22 Τεχνικοί παράμετροι καλωδίου

Όλα τα θεμελιώδη στοιχεία περιλαμβάνουν δύο ακόμα χαρακτηριστικά, την ομάδα (group) και το στρώμα (layer). Η ομάδα καθορίζει την ομαδοποίηση των αγωγών στο σχηματισμό ενός καλωδίου φάσης ή ουδετέρου. Όλοι οι αγωγοί ενός καλωδίου με τον ίδιο αριθμό ομάδας αποκτούν αυτόματα κοινά άκρα. Συνεπώς, αγωγοί που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές φάσεις ή ουδετέρους, οι οποίοι δεν συνδέονται, πρέπει να έχουν διακριτούς αριθμούς ομάδας. Το στρώμα δεν επηρεάζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες του καλωδίου και χρησιμεύει μόνο κατά την σχεδίαση. Οι ομάδες και τα στρώματα παρουσιάζονται ενδεικτικά στο σχήμα 4.23. Τυπικά παράθυρα επεξεργασίας αγωγών και μονώσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.24.

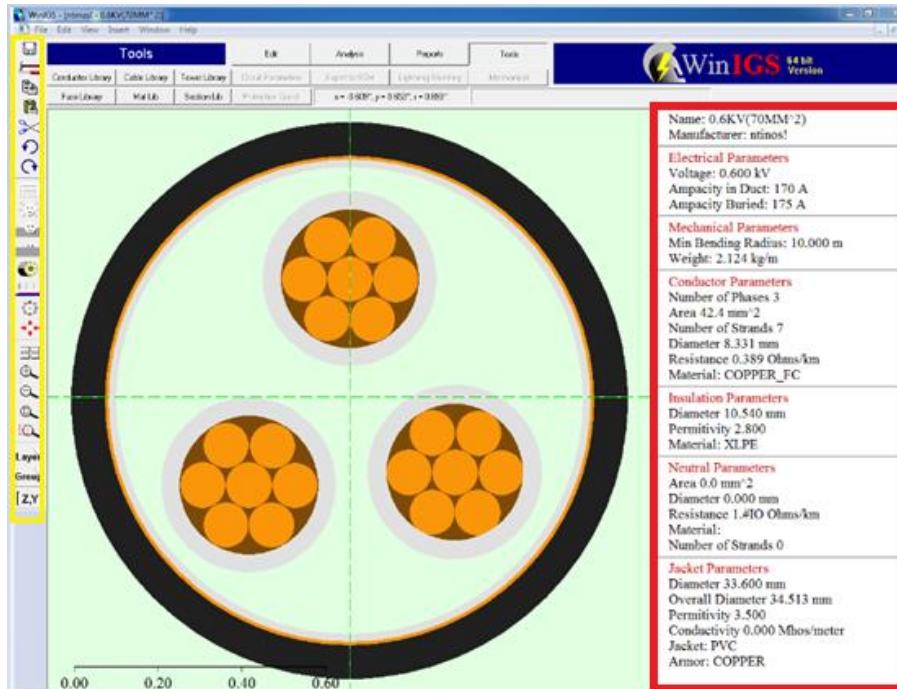


Σχήμα 4.23 Ομάδες και στρώματα καλωδίου



Σχήμα 4.24 Παράθυρο επεξεργασίας αγωγού (αριστερά) και μονώσεων (δεξιά)

Ο χρήστης λοιπόν, με τον συντάκτη βιβλιοθήκης καλωδίων έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει το καλώδιο της αρεσκείας του. Τυπικό παράδειγμα τριφασικού καλωδίου ακολουθεί στο σχήμα 4.25. Σε κόκκινο πλαίσιο είναι όλα τα χαρακτηριστικά του καλωδίου, ενώ σε κίτρινο η γραμμή εντολών.



Σχήμα 4.25 Τριφασικό καλώδιο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Περιγραφή του υπό μελέτη πλοίου

5.1 Πλοίο γενικευμένου τύπου

Η εφαρμογή όσων έχουν περιγραφεί, έγινε πάνω σε ένα γενικευμένου τύπου ανύπαρκτο πλοίο. Τα επίπεδα των τάσεων που εμφανίζονται στα φορτία του πλοίου είναι της τάξεως των 440V και των 115V, και επομένως μιλάμε για φορτία χαμηλής τάσης, ενώ η συχνότητα του δικτύου είναι 60 Hz. Προκειμένου να έχουμε τάση των 115V υπάρχουν δύο μετασχηματιστές υποβιβασμού, ο ένας για τις κύριες γεννήτριες και ο άλλος για τη γεννήτρια έκτακτης ανάγκης.

Στο πλοίο εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες γείωσης. Στην πρώτη περίπτωση, το δίκτυο του πλοίου είναι τριφασικό, τριών αγωγών, με τον **ουδέτερο αγείωτο** (insulated neutral system). Στη δεύτερη περίπτωση, το δίκτυο του πλοίου είναι τριφασικό, τεσσάρων αγωγών, με τον **ουδέτερο γειωμένο μέσω υψηλής αντίστασης** (high resistance grounding system). Συνεπώς, οι δύο τοπολογίες είναι παρόμοιες. Παραμένουν ίδιες οι ισχύεις των φορτίων, οι τιμές των γεννητριών και των μετασχηματιστών, ενώ προστίθενται ο αγωγός του ουδέτερου στα καλώδια και η γείωση στον ουδέτερο στις γεννήτριες.

Η ισχύς για κάθε καταναλωτή του πλοίου δίνονται για την **κανονική κατάσταση πορείας** και την **κατάσταση εκτάκτου ανάγκης**. Τα φορτία έχουν ομαδοποιηθεί σε πίνακες, οι οποίοι είναι οι εξής:

- Χώροι ενδιαίτησης (**ACCOMODATION AREA_440V**)
- Βοηθητικά πρόωσης (**PROPULSION_440V**)
- Βοηθητικά μηχανοστασίου (**MACHINERY_440V**)
- Βοηθητικά σκάφους (**AUXILIARY EQUIPMENT_440V**)
- Μαγειρείο (**COOK-HOUSE_440V**)
- Φωτισμός (**LIGHTING BOARD_115V**)
- Βοηθητικά χώρων ενδιαίτησης (**ACCOMODATION AREA_115V**)
- Βοηθητικά μαγειρείου (**KITCHEN_115V**)
- Έκτακτης ανάγκης (**EMERGENCY BOARD**)

5.2 Ηλεκτρικός ισολογισμός

Ηλεκτρικός ισολογισμός είναι ο υπολογισμός της πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος του συνόλου των καταναλωτών σε ένα πλοίο στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του. Αποτελεί μια πολύ σημαντική μελέτη κατά το στάδιο κατασκευής του πλοίου καθώς συνοψίζει το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου.

Κατά το πρώτο στάδιο του σχεδιασμού του πλοίου μια εκτίμηση του ηλεκτρικού φορτίου του πλοίου με βάση εμπειρικές σχέσεις είναι αρκετή. Στη συνέχεια όμως και εφόσον έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια τα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου θα πρέπει να γίνει λεπτομερής ηλεκτρικός ισολογισμός προκειμένου να γίνει η επιλογή των ηλεκτρογεννητριών του πλοίου, των καλωδίων, των διατάξεων προστασίας του δικτύου κλπ.

Η κατάστρωση του ισολογισμού περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός πίνακα με όλα τα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου, χωρισμένα σε ομάδες π.χ. βοηθητικά πρόωσης, πίνακες φωτισμού κλπ. Ο πίνακας περιλαμβάνει όλες τις καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου π.χ. κατάσταση κανονικής πορείας, κατάσταση χειρισμών, εν όρμω, φόρτωσης κλπ, καθώς και μια στήλη με το πλήθος των όμοιων φορτίων (N), μια στήλη με το βαθμό απόδοσης κάθε καταναλωτή (η), μια στήλη με την αποδιδόμενη ισχύ, μια με την απορροφόμενη ισχύ και μια με την συνολική εγκατεστημένη ισχύ κάθε καταναλωτή. Επιπλέον, η κάθε κατάσταση λειτουργίας αποτελείται από μια στήλη με το συντελεστή λειτουργίας κάθε καταναλωτή (f_s) και μία με την ισχύ λειτουργίας.

Ισχύουν τα ακόλουθα:

- **Ρον.απορροφ. [kW] = Ρον.αποδ. [kW]/ η** , όπου η ο βαθμός απόδοσης καταναλωτή.
- **Ρεγκατ. [kW] = Ρον.απορροφ. [kW]* N**, όπου N το πλήθος όμοιων καταναλωτών.
- $$f_s = \frac{\text{Μέσο φορτίο 24-ώρου}}{\text{ονομαστικό φορτίο}} = \frac{\sum_i P_i t_i}{24 * P_{\text{ον.αποδ.}}}$$
- **Ρλειτ.[kW] = f_s Ρον.απορροφ. [kW]**

5.3 Ισχείς φορτίων

Στην παρούσα διπλωματική οι ισχείς των φορτίων θεωρήθηκαν δεδομένες και παρατίθενται στους πίνακες 5.1 (αναλυτικά ο πίνακας στο παράρτημα Α1) και 5.2. Οι ισχείς των φορτίων παραμένει ίδια στο γειωμένο και στο αγείοτο.

Πίνακας 5.1 Ισχείς φορτίων κανονικής πορείας

ΦΟΡΤΙΑ	Κατάσταση Κανονικής Πορείας							
	N	fs	Ρλειτ. (kW)	cosφ	sinφ	Αεργος Ισχύς (kVar)	Φαιν. Ισχύς (kVa)	Μήκος Καλωδίων (m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΖΥΓΟΙ 115V								Από Μ/Σ
ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΣΥΝΟΛΟ			45,10	1,00	0,00	0,00	45,10	35
ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ ΣΥΝΟΛΟ			3,17	0,56	0,83	4,68	5,65	35
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ ΣΥΝΟΛΟ			57,15	0,83	0,56	38,95	69,17	35
ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΝΑΥΣΙΠΛΟΪΑΣ			10,59	1,00	0,00	0,00	10,59	35
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΑ 115 V								
			116,01	0,89	0,46	43,63	130,51	
ΖΥΓΟΙ 440 V								Από κύριο ζυγό
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΩΣΗΣ ΣΥΝΟΛΟ			380,10	0,79	0,61	282,69	480,13	70
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ ΣΥΝΟΛΟ			14,46	0,50	0,87	24,72	29,01	70
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΣΚΑΦΟΥΣ ΣΥΝΟΛΟ			41,56	0,58	0,81	57,57	71,53	70
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ			121,53	0,73	0,68	109,88	165,38	70
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ ΣΥΝΟΛΟ			35,46	0,90	0,44	7,82	39,53	70
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			709,11	0,77	0,63	526,31	916,10	

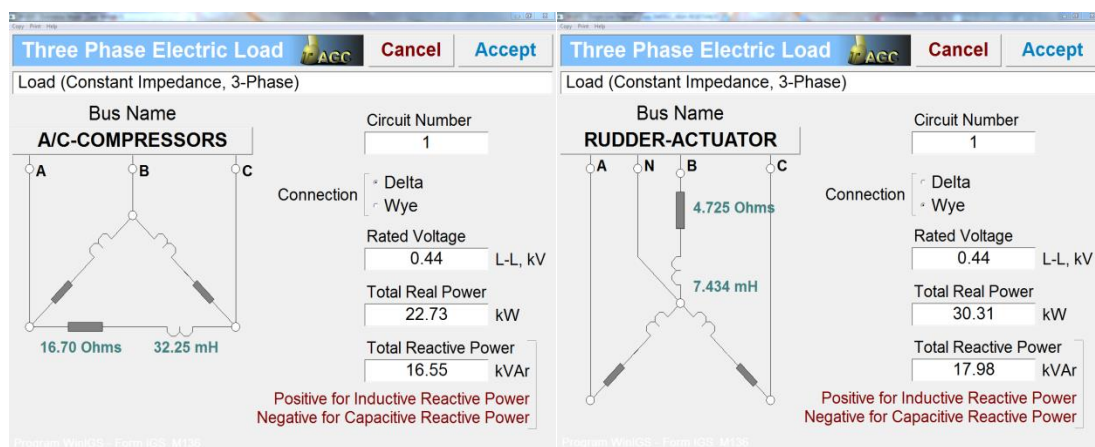
Για την περίπτωση της κατάστασης εκτάκτου ανάγκης, τα φορτία έκτακτης ανάγκης έχουν προσδιορισθεί με βάση τη διεθνή σύμβαση S.O.L.A.S [20] για το πλοίο φαίνονται στον πίνακα 5.2, θεωρώντας **μοναδιαίο** συντελεστή λειτουργίας σε όλα τα φορτία για λόγους ασφαλείας. Τα μήκη των καλωδίων στα φορτία 440V αναφέρονται στην απόσταση των φορτίων από τον πίνακα τους.

Πίνακας 5.2 Ισχείς φορτίων έκτακτης ανάγκης

ΦΟΡΤΙΑ	Κατάσταση Έκτακτης Ανάγκης							
	N	fs	Ρλειτ. (Kw)	cosφ	sinφ	Άεργος Ισχύς (kVar)	Φαινόμε. Ισχύς (kVA)	Μήκος Καλωδίων (m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΖΥΓΟΙ 115V								Από Μ/Σ
Φωτισμός ασφαλείας	1	1,00	10,00	1,00	0,00	0,00	10,00	20
ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΝΑΥΣΙΠΛΟΙΑΣ	1	1,00	21,18	1,00	0,00	0,00	21,18	35
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΑ 115 V			31,18	1,00	0,00	0,00	31,18	
ΖΥΓΟΙ 440 V								Από κύριο ζυγό
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΡΩΣΗΣ								70
Κινητήρες Μηχανισμού Πηδαλίου	1	1,00	30,31	0,86	0,51	17,98	35,24	40
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΣΚΑΦΟΥΣ								70
Αντλία κύτους	1	1,00	17,32	0,86	0,51	10,28	20,14	35
Αντλία πυρκαγιάς	1	1,00	38,96	0,86	0,51	23,12	45,31	40
Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	4	1,00	69,27	0,86	0,51	41,10	80,55	50
Αντλία στεγανών θυρών	1	1,00	4,33	0,86	0,51	2,57	5,03	45
Αντλίες πυρκαγιάς garage	1	1,00	25,98	0,86	0,51	15,41	30,21	25
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			217,34	0,88	0,48	110,46	247,65	

Τα πεδία για τον καθορισμό των φορτίων, είναι η πολική τάση (**Rated Voltage**), η συνολική ενεργός ισχύς (**Total Real Power**), η συνολική άεργος ισχύς (**Total Reactive Power**) καθώς επίσης και η επιλογή συνδεσμολογίας μεταξύ αστέρα

και τριγώνο (**Delta or Wye**). Στο σχήμα 5.1, το οποίο παρατίθεται παρακάτω, απεικονίζονται τυπικά παράθυρα εισαγωγής δεδομένων για τριφασικά φορτία. Παρατηρούμε ότι οι σύνθετες αντιστάσεις υπολογίζονται αυτόματα.



Σχήμα 5.1 Τριφασικά φορτία σε συνδεσμολογία τριγώνου (αριστερά) και αστέρα (δεξιά)

5.4 Γεννήτριες

Με βάση τα αποτελέσματα που παρατίθενται στον πίνακα 5.1 και 5.2 βλέπουμε ότι η συνολική καταναλισκόμενη ισχύς είναι:

Κατάσταση κανονικής πορείας = **709,11 kW**

Κατάσταση έκτακτου ανάγκης = **217,34 kW**

Επιλογή κύριων γεννητριών και γεννήτριας έκτακτης ανάγκης

Ο αριθμός και οι ισχύεις των γεννητριών θα πρέπει να ικανοποιούν την ακόλουθη απαίτηση: με μια 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. Επειδή το συνολικό φορτίο είναι μικρότερο του 2200 kW [1], επιλέγονται δύο γεννήτριες ώστε η κάθε μία να είναι ικανή να καλύψει το φορτίο κανονικής πορείας, που είναι και η δυσμενέστερη κατάσταση κινήσεως του πλοίου από πλευράς ηλεκτρικού φορτίου. Άρα κάθε μια γεννήτρια θα πρέπει υπό φόρτιση 85%-90% να τροφοδοτεί τα **709,11 kW**, δηλαδή η ισχύς της να είναι ίση ή μεγαλύτερη από:

$$709,11 \text{ kW} / 0,85 = 834,25 \text{ kW}$$

Για το πλοίο έχουν επιλεγεί δύο γεννήτριες από την Cummins Generator Technologies, και συγκεκριμένα οι γεννήτριες Stamford HCM634K (4 poles), κλάσης μονώσεως 'H' (110/50°C), ονομαστικής ισχύος 1200 kVA (960kW) και τάσεως 440 V (βλέπε Παράρτημα Α2).

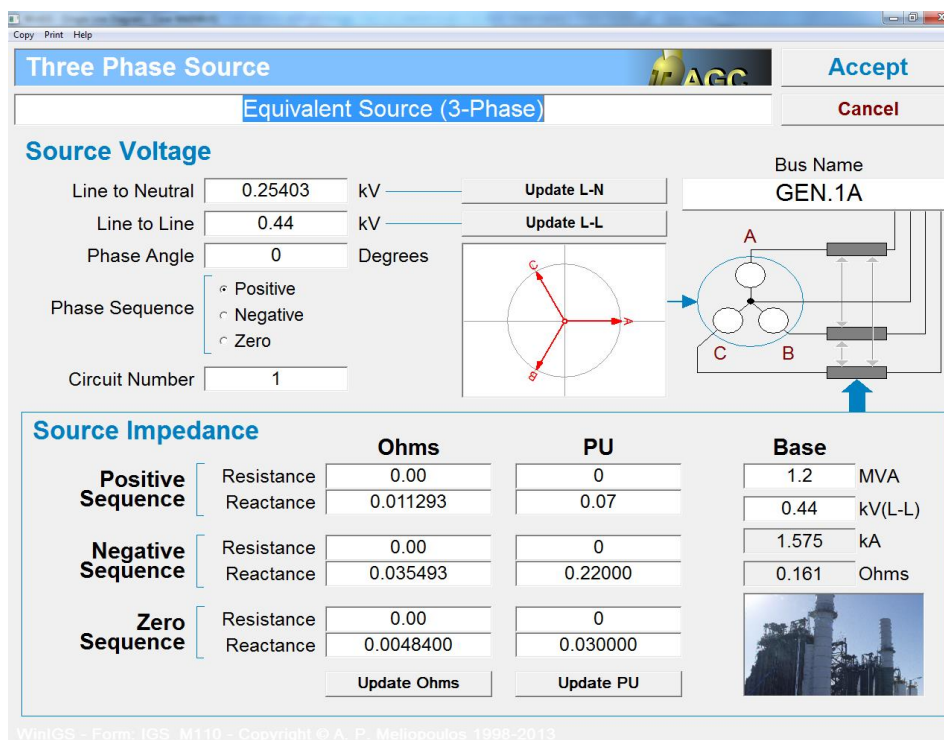
Για την κατάσταση έκτακτης ανάγκης, έχουμε επιλέξει γεννήτρια έκτακτης ανάγκης, τέτοια ώστε σε φόρτιση 85%-90% να καλύπτει το συνολικό φορτίο έκτακτης ανάγκης, όπως υπολογίστηκε παραπάνω, των **217,34 kW**, δηλαδή πρέπει να έχει ισχύ ίση ή μεγαλύτερη από:

$$217,34 \text{ kW} / 0,85 = 255,69 \text{ kW}$$

Αρα επιλέξαμε το μοντέλο Stamford HCM434E (4 poles), κλάσης μονώσεως 'H' (110/50°C), ονομαστικής ισχύος 350 kVA (280kW) και τάσεως 440 V (βλέπε Παράρτημα Α2).

Στο σχήμα 5.2 απεικονίζονται η μία εκ των δύο όμοιων γεννητριών κανονικής πορείας του πλοίου. Τα πεδία για το καθορισμό των γεννητριών είναι:

- Η τάση λειτουργίας, φασική ή πολική (**Source Voltage**).
- Η γωνία φάσης ($0 \sim 360^\circ$) μεταξύ της παραγόμενης τάσης της γεννήτριας και της παραγόμενης τάσης του δικτύου, η οποία πρέπει να είναι μηδέν (**Phase Angle**).
- Η ακολουθία των φάσεων, η οποία πρέπει να είναι σε συμφωνία με την ακολουθία φάσεων του δικτύου (**Phase Sequence**).
- Η βασική ισχύς και τάση, καθώς επίσης και οι σύνθετες αντιστάσεις ακολουθίας (καθορίστηκαν από τον κατασκευαστή, βλ. Παράρτημα Α2), είτε σε ανά μονάδα είτε σε Ohms (**Source Impedance**). Αγνοούνται οι ωμικές αντιστάσεις.



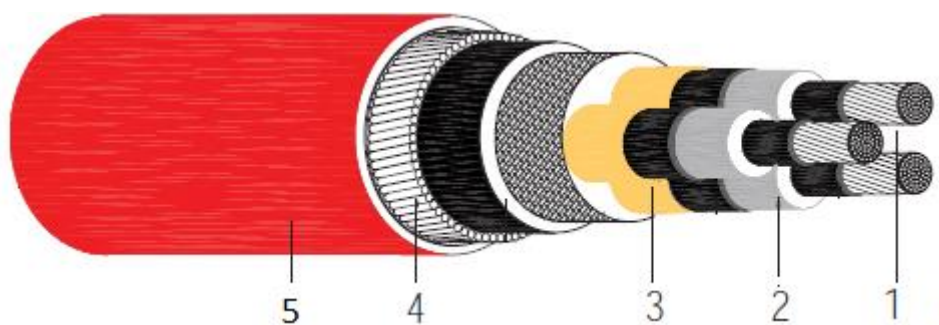
Σχήμα 5.2 Τριφασική γεννήτρια κανονικής πορείας

5.4 Καλώδια

Τα μήκη και οι διατομές των καλωδίων θεωρήθηκαν δεδομένα και συμπεριλαμβάνονται στους πίνακες 5.1 (βλέπε και Παράρτημα Α.1) και 5.2. Όπου υπήρχε έλλειψη δεδομένων, θεωρήθηκαν παρόμοιες τιμές.

Όλα τα καλώδια δημιουργήθηκαν στον *συντάκτη καλωδίων* του προγράμματος με ονομαστική τάση 0,6/1 kV. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους στηρίχτηκαν σε πρότυπα που αφορούν πλοία και θαλάσσιες εγκαταστάσεις. Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται τριφασικό καλώδιο με αριθμημένα τα επιμέρους τμήματα που υλοποιήθηκαν μέσω του προγράμματος και τα οποία είναι τα εξής:

1. Οι αγωγοί (**conductors**) είναι χάλκινοι σύμφωνα με το IEC 60228, κλάσης 2.
2. Η μόνωση (**insulation**) είναι από πολυαιθυλένιο με δικτυωτούς δεσμούς (**XLPE**), σύμφωνα με το IEC60092-351.
3. Η εσωτερική επικάλυψη (**inner covering**) πρέπει να πραγματοποιείται με μη-υγροσκοπικά υλικά όπως είναι το πολυβινυλοχλωρίδιο (**PVC**).
4. Η θωράκιση (**armor**) είναι από πεπλεγμένους χάλκινους αγωγούς, οι οποίοι καλύπτουν τουλάχιστον το 90% της επιφάνειας και πέρα από τη μηχανική αντοχή τους, μπορούν να χρησιμεύσουν και ως αγωγός γείωσης.
5. Το εξωτερικό περίβλημα (**sheath**) πρέπει να είναι από υλικό που να αντέχει τις υψηλές θερμοκρασίες, να είναι στεγανό και άφλεκτο (να μη μεταδίδει τη φωτιά). Χρησιμοποιήθηκε **PVC** καθώς ήταν πολύ κοντά στις απαιτήσεις αυτές σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά της βιβλιοθήκης.



Σχήμα 5.3 Τριφασικό καλώδιο με αριθμημένα τα κύρια μέρη του

Αξίζει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση του γειωμένου συστήματος μέσω υψηλής αντίστασης, πέρα από τους τρεις αγωγούς φάσεων, υπάρχει και ο ουδέτερος αγωγός. Μια συνήθης πρακτική σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ, είναι η διατομή του ουδέτερου αγωγού να λαμβάνεται ίση με εκείνη των φάσεων τόσο στα μονοφασικά κυκλώματα όσο και στα τριφασικά κυκλώματα [22]. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των καλωδίων παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α3.

Όσον αφορά στην **αντίσταση** του καλωδίου σύμφωνα με την υποενότητα 2.1.1 του προτύπου IEC 60287-1-1, η DC αντίσταση ανά μονάδα μήκους του αγωγού στην μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας θ δίνεται από τον τύπο :

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] , \text{ όπου}$$

R_0 είναι η DC αντίσταση του αγωγού στους 20°C (Ω/m).

α_{20} είναι η θερμοκρασιακή σταθερά στους 20°C ανά Κέλβιν

θ είναι η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας σε βαθμούς Κελσίου η οποία καθορίζεται από τον τύπο της μόνωσης που χρησιμοποιείται.

Ωστόσο, όταν ο αγωγός διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα παρατηρούμε την αύξηση της αντίστασης του. Αυτό οφείλεται στο **επιδερμικό φαινόμενο** και στο **φαινόμενο γειτνίασης**.

Το επιδερμικό φαινόμενο οφείλεται στη μαγνητική ροή που δημιουργείται από το εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό, καθώς αυτό αλληλεπιδρά με τον ίδιο τον αγωγό, παράγοντας ένα αντίστροφο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο αντιστέκεται στην διέλευση του ρεύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ρεύμα να μην μπορεί να εκμεταλλευτεί όλη την ωφέλιμη διατομή του αγωγού για την διέλευση του, αλλά ένα μικρό μόνο μέρος στην εξωτερική επιφάνεια. Η προκύπτουσα ανομοιόμορφη πυκνότητα ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πραγματικής αντίστασης του αγωγού και κατά συνέπεια των απωλειών. Η παρουσία αρμονικών ρεύματος επιδεινώνει το επιδερμικό φαινόμενο.

Οι τυπικές απώλειες επιδερμικού φαινομένου σαν ποσοστό της συνολικής απαιτούμενης ισχύος είναι: 2% έως 8%.

Από την άλλη πλευρά, όταν τα καλώδια που τροφοδοτούν διάφορα φορτία οδεύουν σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους, ειδικά στην περίπτωση όδευσης μέσα από σχάρες, τα ρεύματα που τα διαρρέουν παράγουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτά τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία δημιουργούν μια ανομοιόμορφη κατανομή πυκνότητας ρεύματος στην τομή του αγωγού.

Οι τυπικές απώλειες του φαινομένου γειτνίασης σαν ποσοστό της συνολικής απαιτούμενης ισχύος είναι: 4% έως 10%.

Συνεπώς, η αντίσταση εναλλασσόμενου ρεύματος ανά μονάδα μήκους του αγωγού στην μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας δίνεται από τον ακόλουθο τύπο :

$$R = R'(1 + y_s + y_p) , \text{ όπου}$$

R είναι η εν λόγω AC αντίσταση του αγωγού στην μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας

R' είναι η DC αντίσταση του αγωγού στην μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας

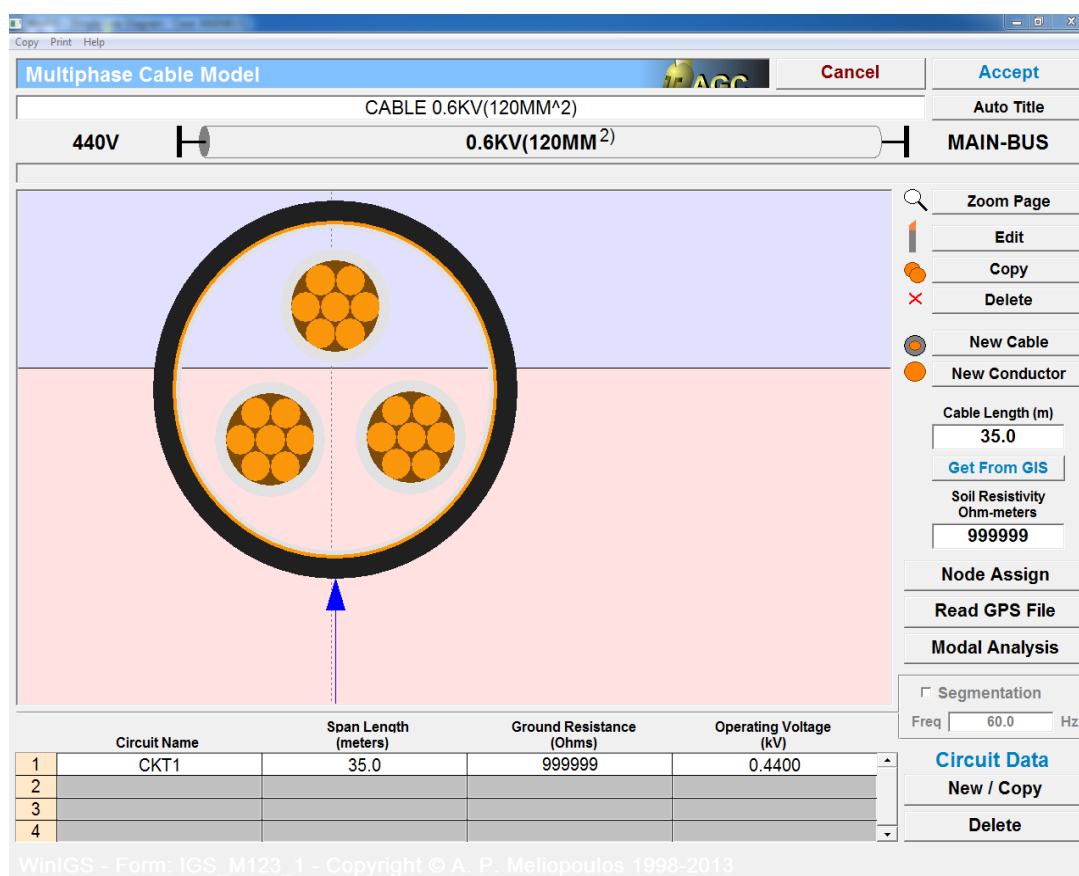
y_s είναι ο συντελεστής επιδερμικού φαινομένου

y_p είναι ο συντελεστής γειτνίασης

Συνεπώς, ως αντίσταση των αγωγών επιλέχθηκε η **AC αντίσταση**, η οποία λαμβάνει υπόψιν και τα παραπάνω φαινόμενα.

Στη συνέχεια, στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται το παράθυρο που εμφανίζεται πριν την σύνδεση ενός καλωδίου από την βιβλιοθήκη στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι:

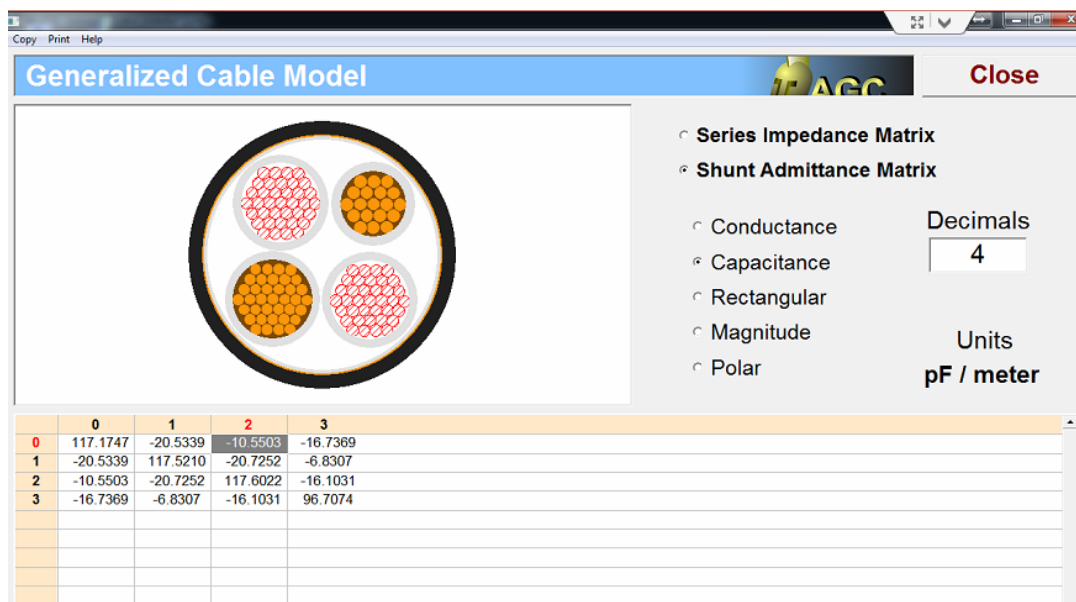
- Το μήκος του καλωδίου
- Η τάση λειτουργίας του (διαφέρει από την ονομαστική του τάση)
- Η αγωγιμότητα του υλικού που το περιβάλλει (επιλέχθηκε ο αέρας)
- Η αντίσταση του υλικού που το περιβάλλει (επιλέχθηκε ο αέρας)



Σχήμα 5.4 Εισαγωγή καλωδίου στο ηλεκτρικό δίκτυο

Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψιν τις **εγκάρσιες χωρητικότητες** που αναπτύσσονται μεταξύ των καλωδίων. Η απαίτηση των προτύπων για άφλεκτα και στεγανά υλικά σε συνδυασμό με την αυξημένη ζήτηση για υψηλά επίπεδα μόνωσης οδηγεί σε σημαντικές τιμές των παράσιτων χωρητικοτήτων [24]. Συνεπώς, κατά τη δημιουργία καινούργιων καλωδίων πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην κατάλληλη διαστασιολόγηση των επιμέρους τμημάτων του. Στο σχήμα 5.5 απεικονίζεται ο πίνακας των εγκάρσιων χωρητικοτήτων ενός τριφασικού καλωδίου με ουδέτερο, όπως αυτός διαμορφώνεται από την

αλληλεπίδραση αγωγών και μονώσεων μεταξύ τους. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα δεν λαμβάνει υπόψιν τις χωρητικότητες προς γη. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο αγείωτο σύστημα δεν έχει δίοδο προς γη.



Σχήμα 5.5 Πίνακας εγκάρσιων χωρητικότητας πολυφασικού καλωδίου

5.5 Μετασηματιστές ισχύος

Από τον πίνακα 5.1 προκύπτει ότι η μέγιστη ζητούμενη ισχύς του μετασηματιστή υποβιβασμού τάσης στο κύριο δίκτυο, είναι ίση με $130.51 \text{ kVA} \times 1,1 = 143.561 \text{ kVA}$ (προσαύξηση 10%, για λόγους ασφαλείας), και επομένως επιλέγεται μετασηματιστής των 160 kVA (ονομαστική ισχύς). Αντίστοιχα, από τον πίνακα 5.2 για την κατάσταση έκτακτης ανάγκης ο μετασηματιστής θα πρέπει να τροφοδοτήσει τα φορτία έκτακτης ανάγκης, τα οποία απορροφούν 31,18 kVA και με προσαύξηση 10%, έχουμε $31,18 \text{ kVA} \times 1,1 = 34,3 \text{ kVA}$. Για την κατάσταση έκτακτης ανάγκης επιλέγεται μετασηματιστής ονομαστικής ισχύος 40 kVA.

Τυπικό παράθυρο εισαγωγής δεδομένων μετασηματιστή είναι αυτό του σχήματος 5.5, όπου απεικονίζεται ο μετασηματιστής υποβιβασμού του κύριου δικτύου. Τα στοιχεία που ζητούνται είναι:

- Η τάση και η συνδεσμολογία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος
- Η ισχύς του μετασηματιστή
- Οι αντιστάσεις τυλιγμάτων
- Ονομαστικές απώλειες πυρήνα

- Ονομαστικό ρεύμα μαγνήτισης

Τα στοιχεία αυτά κανονικά λαμβάνονται από τον κατασκευαστή. Λόγω έλλειψης δεδομένων, πέρα από την ισχύ, οι υπόλοιπες τιμές προσδιορίστηκαν από το πρότυπο IEEE Std 241.

3-Phase Transformer **Cancel** **Accept**

Transformer (2-Winding, 3-Phase)

Side 1 Bus: 440V, 0.44 kV, Delta, Wye

Side 2 Bus: 115V, 0.115 kV, Delta, Wye

Phase Connection: Standard, Alternate

Transformer Rating (MVA): 0.16

Winding Resistance (pu): 0.001

Leakage Reactance (pu): 0.01

Nominal Core Loss (pu): 0.005

Nominal Magnetizing Current (pu): 0.005

Tap Setting (pu): 1.0

Minimum (pu): 1.0

Maximum (pu): 1.0

Number of Taps: 1

Circuit Number: 1

WinTCS - Form: TCS_M104 - Copyright © A. P. Melissopoulos 1998-2013

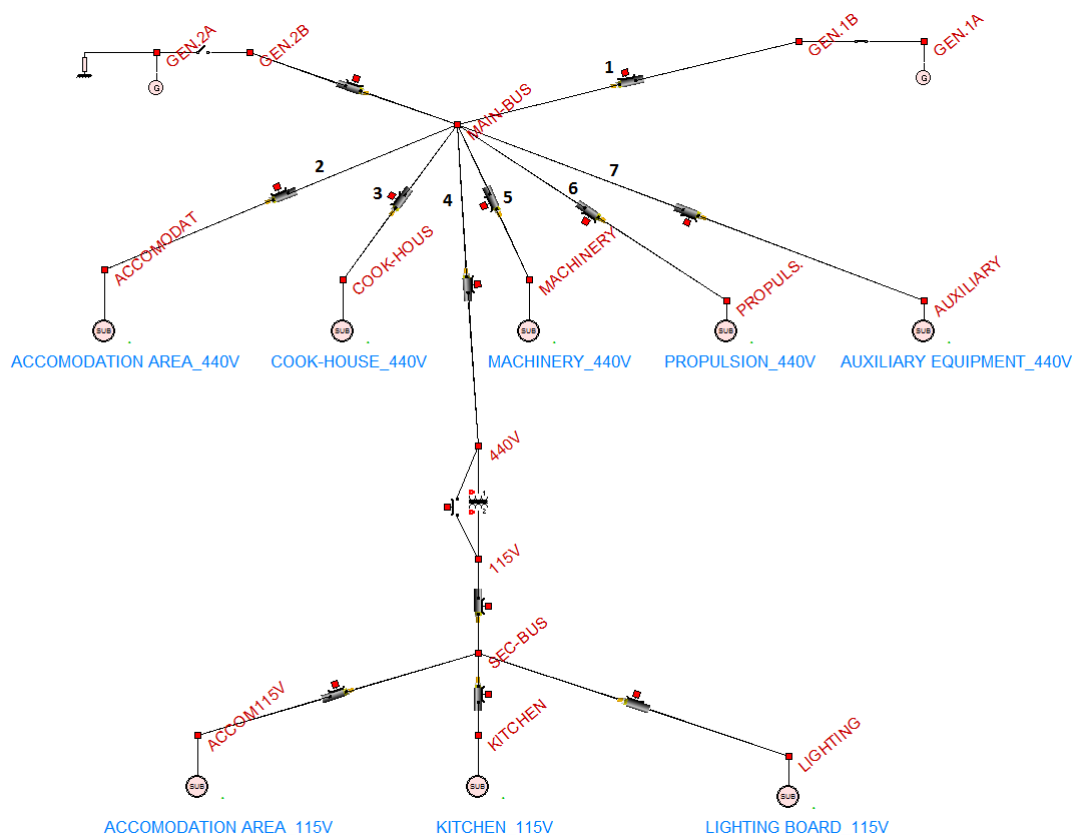
Σχήμα 5.5 Μετασχηματιστής κύριου δικτύου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Προσομοιώσεις στο αγείωτο σύστημα

6.1 Κατάσταση κανονικής πορείας

Το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου για το αγείωτο σύστημα στην κατάσταση κανονικής πορείας παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μία γεννήτρια είναι σε λειτουργία (**GEN.1A**) και καλύπτει όλο το φορτίο, ενώ η δεύτερη (**GEN.2A**) είναι σε εφεδρεία.



Σχήμα 6.1 Ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου

Επιπλέον, στο μονογραμμικό σχέδιο του ηλεκτρικού δικτύου οι γεννήτριες συνδέονται στον κύριο ζυγό (**MAIN-BUS**). Από εκεί τροφοδοτούνται οι πέντε πίνακες των **440V**, καθώς επίσης και ο μετασχηματιστής υποβιβασμού συνδεσμολογίας τριγώνου-τριγώνου. Αυτός με τη σειρά του, συνδέεται με τον δευτερεύοντα ζυγό (**SEC-BUS**), ο οποίος τροφοδοτεί τους τρεις πίνακες των **115V**. Όλα τα φορτία στο αγείωτο σύστημα είναι σε συνδεσμολογία τριγώνου. Στο Παράρτημα Β1.Α παρατίθενται εικόνες από τα διάφορα στοιχεία του ηλεκτρικού δικτύου.

Όπως αναμενόταν τα ρεύματα έχουν **ίσα μέτρα** και **αντίθετες φορές**. Οι τιμές τους ταυτίζονται με τις μετρήσεις του πίνακα 6.2. Η απόκλιση είναι αμελητέα και οφείλεται σε στρογγυλοποιήσεις.

Στους πίνακες 6.2 έως 7.4 που ακολουθούν, παρατίθενται οι τάσεις των φάσεων και του ουδετέρου κάθε ζυγού για το εκάστοτε είδος σφάλματος, για την περίπτωση σφάλματος στον ίδιο το ζυγό. Η περίπτωση μονοφασικού σφάλματος που μελετήθηκε είναι το σφάλμα στη φάση **A** και αντίστοιχα διφασικού σφάλματος, το σφάλμα μεταξύ των φάσεων **B-C**. Επομένως, όσον αφορά στα ρεύματα, παρατίθεται το ρεύμα του σφάλματος (ως ρεύμα στο κελί της φάσης A στο μονοφασικό σφάλμα και ως ρεύμα στα κελιά των φάσεων B και C για το διφασικό σφάλμα) και τα ρεύματα των υπόλοιπων υγιών φάσεων στη θέση του σφάλματος.

Τοποθεσία		Μόνιμη Κατάσταση		Διφασικό Σφάλμα		Τριφασικό Σφάλμα
	Φάση	Τάση (V)	Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ρεύμα (A)	Ρεύμα (A)
GEN.1	A	248.3∠-2	1032.2∠-35.6	367.9∠-3.3	1544.6∠-37	22494.47∠-90
	B	248.3∠-122	1032.1∠-156	187.5∠176.7	9832.8∠-177	22494.47∠150
	C	248.3∠118	1032.9∠84.5	187.5∠176.7	9832.8∠3	22494.47∠30
MAIN-BUS	A	241.7∠-2.45	1032.2∠144.4	332.2∠-0.54	1436.2∠146.4	15122.29∠-72
	B	241.1∠-122.79	1032.1∠24.49	169.4∠179.5	8015.5∠-166.5	15139.68∠168
	C	241.2∠117.84	1032.9∠-96	169.4∠179.48	8015.5∠13.5	15128.05∠47.8
M/Σ 440V	A	239.0∠-2.52	160.6∠-12.59	304.9∠2.59	206.8∠172.51	9861.05∠-52.4
	B	239.4∠-122.8	160.7∠-132.37	155.5∠-177.5	6234.7∠-151.3	9894.3∠-172.3
	C	239.5∠117.76	161.2∠107.49	155.5∠-177.46	6234.7∠28.8	9885.4∠67.51
ACCOMODAT.	A	236.0∠-1.97	190.9∠138.21	277.2∠4.45	226.0∠144.66	6253.77∠-38.4
	B	236.3∠-122.3	190.9∠18.25	141.2∠-175.5	4595∠-136.59	6292.32∠-158
	C	236.6∠118	191.0∠-102.0	141.2∠-175.5	4595∠43.41	6363.86∠81.7
PROPULS.	A	232.2∠-2.18	553.6∠142.4	320.3∠-0.28	770.1∠144.3	8315.6∠-50.93
	B	232.5∠-122.5	553.5∠22.39	163.4∠179.72	5552.3∠-148.7	8299.3∠-170.8
	C	232.5∠118	553.6∠-97.6	163.2∠179.8	5552.3∠31.3	8320.5∠69.22
SEC-BUS	A	63.45∠-4.6	354.5∠167	60.9∠-1.93	645.2∠170	4054.6∠-41.56
	B	63.4∠-124.8	354.7∠47.7	31.2∠178.1	5854.2∠-133.8	4130.1∠-161.09
	C	63.5∠115.7	355.9∠-72.5	31.2∠178.1	5854.2∠46.16	4122.3∠77.77

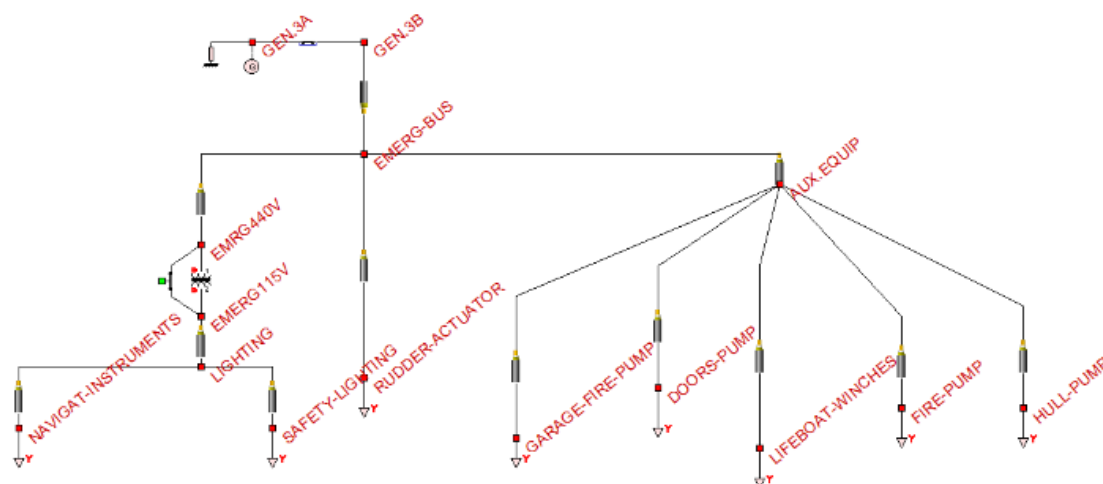
Πίνακας 6.2 Δυναμικά και ρεύματα σε μόνιμη και υπό σφάλμα κατάσταση

Παρατηρήσεις:

- Υπό διφασικό σφάλμα, (στην παρούσα εργασία για λόγους συντομίας και λόγω συμμετρίας όλων των στοιχείων του δικτύου εξετάζεται μόνο η περίπτωση σφάλματος μεταξύ των φάσεων **b-c**) το ρεύμα (\mathbf{I}_A) και η τάση (\mathbf{V}_A) της υγιούς φάσης είναι αυξημένα σε σχέση με τα αντίστοιχα της κανονικής λειτουργίας (βλ. πίνακα 6.2).
- Η τιμή του ρεύματος (\mathbf{I}_A) παραμένει ίδια πριν και μετά το σφάλμα (βλ. πίνακα 6.1). Στο σημείο του σφάλματος παρατηρείται βύθιση τάσης και $\mathbf{V}_B = \mathbf{V}_C$.
- Μετά το σφάλμα ισχύει ότι $\mathbf{I}_B = \mathbf{I}_C$ σε όλα τα καλώδια, καθώς τα φορτία είναι συμμετρικά και $V_B = V_C$.
- Κατά το τριφασικό σφάλμα ισχύει $\mathbf{I}_A = \mathbf{I}_B = \mathbf{I}_C$ κατά μέτρο.
- Σε κάθε καλώδιο, πριν και μετά το σφάλμα στον κύριο ζυγό, παρατηρούμε ότι $\mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C \approx 0$ (βλ. πίνακα 6.1). Κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο αφού $\mathbf{I}_N = \mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C$ και $\mathbf{I}_N = \mathbf{0}$.

6.2 Κατάσταση εκτάκτου ανάγκης

Σε περίπτωση αστοχίας των κύριων γεννητριών, ενεργοποιείται η εφεδρική γεννήτρια. Αυτή τροφοδοτεί τα κρίσιμα φορτία, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3 Ηλεκτρικό δίκτυο εκτάκτου ανάγκης

Συγκεκριμένα, η γεννήτρια (**GEN.3A**) τροφοδοτεί τον κύριο ζυγό (**EMERG-BUS**). Από εκεί αναχωρούν τρία καλώδια, ένα για τον βοηθητικό εξοπλισμό (**AUX-EQUIP**), ένα για το μηχανισμό πηδαλίου (**RUDDER ACTUATOR**) και ένα για τον μετασχηματιστή υποβιβασμού (**EMERG440V**). Ο μετασχηματιστής με την σειρά του τροφοδοτεί τα φορτία των **115V**. Στο Παράρτημα Β1.Β παρατίθεται εικόνες από τα διάφορα στοιχεία του ηλεκτρικού δικτύου. Στον πίνακα 6.3, παρατίθενται τάσεις και ρεύματα, σε κομβικούς ζυγούς του δικτύου, για την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, για διφασικό σφάλμα χωρίς γη και για τριφασικό σφάλμα. Οι τάσεις κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα μηδενίζονται.

Τοποθεσία		Μόνιμη Κατάσταση		Διφασικό Σφάλμα		Τριφασικό
	Φάση	Τάση (V)	Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ρεύμα (A)	Ρεύμα (A)
GEN.3	A	247.5 \pm 1.9	335.7 \pm 134	375.8 \pm 2.79	518.1 \pm 133.1	7654.04 \pm 90
	B	247.8 \pm 122	335.7 \pm 14.1	194.0 \pm 177.2	2874.0 \pm 6.25	7654.04 \pm 150
	C	247.1 \pm 119	335.7 \pm 106	194.0 \pm 177.2	2874.0 \pm 173	7654.04 \pm 30
EMERG 440V	A	241.8 \pm 1.63	23.6 \pm 5.46	354.7 \pm 0.04	502.8 \pm 135.6	1629.8 \pm 17.4
	B	241.1 \pm 122	23.6 \pm 125.4	183.1 \pm 179.9	1258.8 \pm 119	1627.9 \pm 137.5
	C	240.4 \pm 119	23.6 \pm 114.6	183.1 \pm 179.9	1258.8 \pm 61	1627.9 \pm 102.6
EMERG- BUS	A	240.0 \pm 1.66	335.7 \pm 134	359.4 \pm 0.07	502.8 \pm 135.62	6411.3 \pm 75.45
	B	240.2 \pm 122	335.7 \pm 14.1	185.5 \pm 179.9	2814.4 \pm 167	6407.6 \pm 164.59
	C	241.5 \pm 119	335.7 \pm 106	185.5 \pm 179.9	2814.4 \pm 10.3	6413.65 \pm 44.6

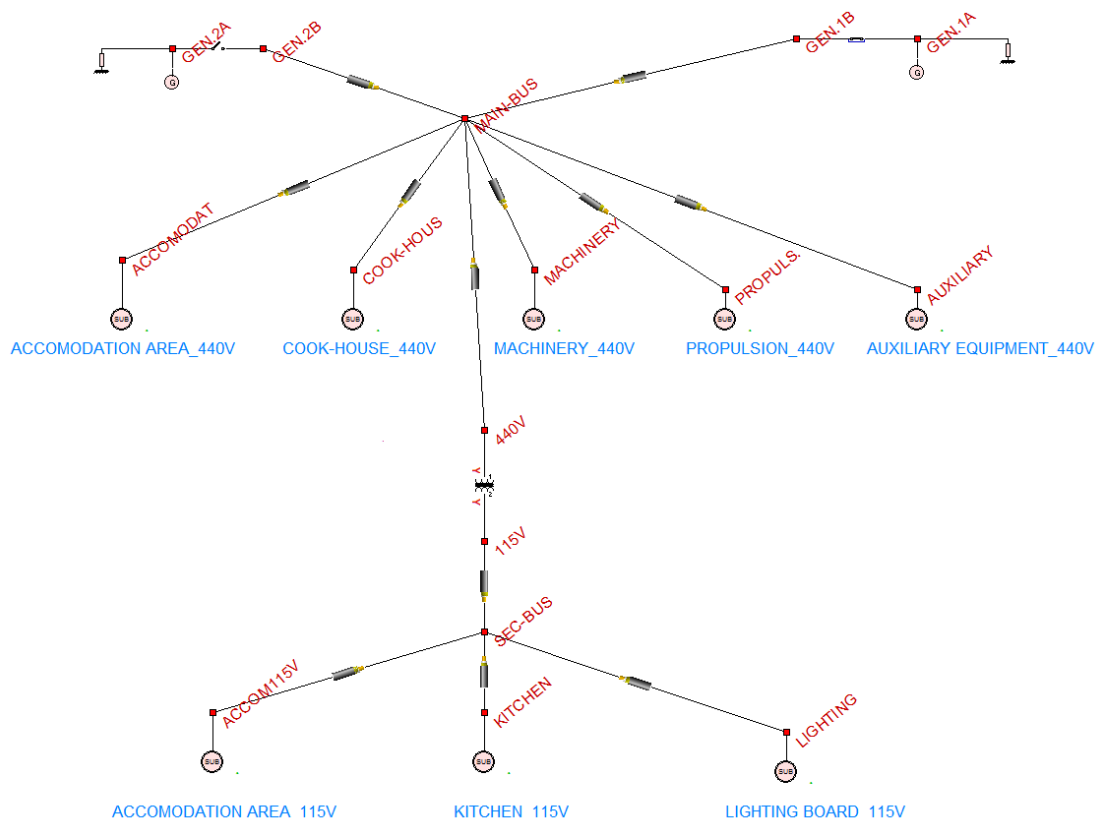
Πίνακας 6.3 Τάσεις και ρεύματα σε μόνιμη και υπό σφάλμα κατάσταση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Προσομοιώσεις στο συμπαγώς γειωμένο σύστημα

7.1 Κατάσταση κανονικής πορείας

Το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου για το γειωμένο σύστημα στην κατάσταση κανονικής πορείας παρουσιάζεται στο σχήμα 7.1. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τοπολογία του δικτύου είναι παρόμοια με αυτή του αγείωτου συστήματος. Η ειδοποιός διαφορά έγκειται στην ύπαρξη ουδετέρου. Τα καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν φέρουν τέσσερις αγωγούς, τρεις των φάσεων και έναν του ουδετέρου, καθώς τα φορτία είναι σε συνδεσμολογία αστέρα. Η γεννήτρια γειώνεται απευθείας στον ουδέτερο κόμβο της, ενώ ο μετασχηματιστής υποβιβασμού είναι σε συνδεσμολογία αστέρα-αστέρα.



Σχήμα 7.1 Ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου (γειωμένο)

Πρέπει να διευκρινιστεί ότι στη **μόνιμη κατάσταση λειτουργίας**, τόσο το αγείωτο όσο και το γειωμένο σύστημα έχουν ανάλογη συμπεριφορά καθώς το σύστημα είναι συμμετρικό και συνεπώς ο ουδέτερος δεν διαρρέεται από ρεύμα.

Στο Παράρτημα Β2.Α παρατίθεται εικόνες από τα διάφορα στοιχεία του ηλεκτρικού δικτύου. Στους πίνακες 7.1 και 7.2, παρατίθενται δυναμικά και ρεύματα, σε κομβικούς ζυγούς του δικτύου για όλα τα πιθανά σφάλματα.

Τοποθεσία		Μονοφασικό Σφάλμα		Διφασικό Σφάλμα	
	Φάση	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)
GEN.1	A	2.8∠85.55	15342.9∠-87.28	370.2∠-3.30	1542.4∠143.19
	B	313.3∠-100.15	1302.9∠51.28	185.1∠176.78	9827.988∠0.50
	C	311.1∠96.41	1289.0∠-124.45	185.1∠176.78	9827.988∠-174
	N	2.8∠85.55	15342.9∠-87.28	0.2∠-89.20	0.0
MAIN-BUS	A	77.19∠-27.29	8506.9∠-62.03	334.2∠0.96	1435.9∠147.22
	B	249.6∠-108.99	1054.7∠45.02	167.5∠179.30	8115.27∠10.1
	C	293.8∠105.28	1218.0∠-113.47	167.5∠179.30	8115.27∠-162.3
	N	77.1∠-27.29	8506.9∠-62.03	12.2∠-79.20	0.0
M/Σ 440V	A	100.4∠-17.75	4674.6∠-45.71	304.8∠3.44	205.4∠172.64
	B	233.6∠-114.57	804.6∠37.15	153.2∠-177.71	6199.1∠27.82
	C	276.3∠111.76	908.7∠-105.48	153.2∠-177.71	6199.1∠-151
	N	100.4∠-17.75	4674.6∠-45.71	11.2∠-65.31	0.0
ACCOMODAT.	A	111.0∠-11.77	3118.5∠-31.87	272.1∠6.57	222.2∠146.00
	B	231.1∠-117.76	179.0∠31.47	139.3∠-175.71	4629.15∠42.19
	C	265.4∠114.75	200.8∠-112.32	139.3∠-175.71	4629.15∠-135.1
	N	111.0∠-11.77	3118.5∠-31.87	15.3∠-51.03	0.0

Πίνακας 7.1 Δυναμικά και ρεύματα υπό μονοφασικό και διφασικό σφάλμα

Παρατηρήσεις:

- Κατά το μονοφασικό σφάλμα το δυναμικό του ουδετέρου αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από την γεννήτρια, καθώς ο αγωγός του ουδετέρου των καλωδίων φέρει αντίσταση, αντίστοιχη της κάθε φάσης. Επιπλέον, ισχύει ότι $I_A \approx I_N$. Το γεγονός ότι έχουν παραπληρωματικές γωνίες και όχι ίσες, οφείλεται στο πρόγραμμα, το οποίο θεωρεί ότι το I_N *εξέρχεται από τον ουδέτερο κόμβο της γεννήτριας* (ισχύει σε όλες τις μετρήσεις).
- Κατά το διφασικό σφάλμα χωρίς γη οι μετρήσεις διαφέρουν ελάχιστα από το αγειώτο σύστημα, καθώς η γείωση δεν έχει καμία επίδραση.

Τοποθεσία		Διφασικό Σφάλμα προς γη		Τριφασικό	
	Φάση	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)
GEN.1	A	205.0∠-3.37	571.5∠145.25	0.0	22494.47∠-90
	B	7.8∠-97.90	26207.55∠126	0.0	22494.47∠150
	C	7.8∠-97.90	26866.63∠52.5	0.0	22494.47∠30
	N	7.8∠-97.90	42506.9∠-88.79	0.0	0.0
MAIN-BUS	A	290.0∠-3.05	1087.3∠142.36	2.6∠-59.91	14784.1∠111.8
	B	90.2∠171.05	11587.34∠173	2.6∠-59.91	14916.3∠-13.7
	C	90.2∠171.05	9051.39∠51.31	2.6∠-59.91	15745.4∠-133.7
	N	90.2∠171.05	10266.6∠124.7	2.6∠-59.91	2224.9∠31.93
M/Σ 440V	A	290.3∠0.82	171.3∠169.75	1.7∠-51.14	9718.0∠129.20
	B	91.6∠178.11	7734.8∠-165.67	1.7∠-51.14	10020.6∠6.04
	C	91.6∠178.11	5924.61∠54.97	1.7∠-51.14	9942.2∠-111.8
	N	91.6∠178.11	5038.6∠144.34	1.7∠-51.14	654.7∠100.71
ACCOMODAT.	A	260.7∠3.54	186.9∠143.42	1.1∠-34.28	5939.7∠144.00
	B	85.3∠-177.78	5173∠-148.63	1.1∠-34.28	6307.0∠21.72
	C	85.3∠-177.78	4482.9∠62.36	1.1∠-34.28	6528.5∠-100.23
	N	85.3∠-177.78	2663.9∠151.32	1.1∠-34.28	608.9∠80.04

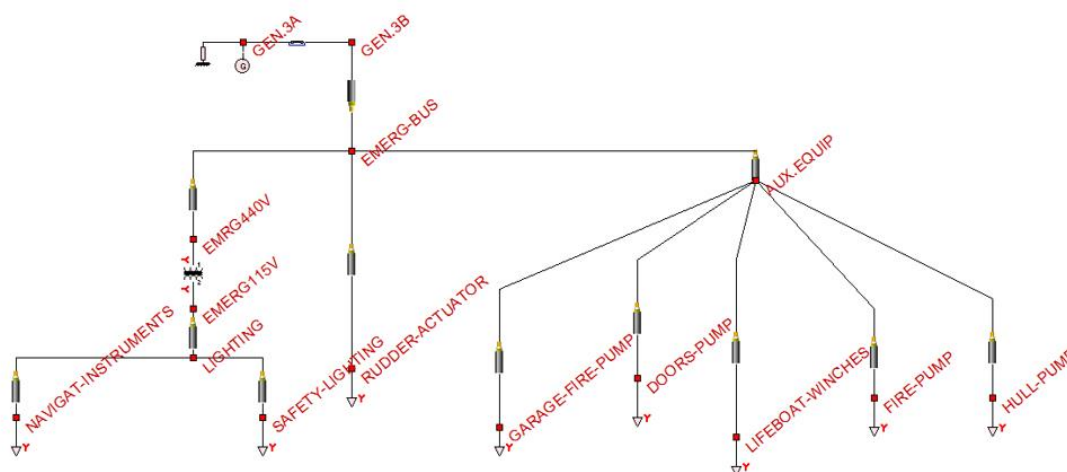
Πίνακας 7.2 Δυναμικά και ρεύματα υπό τριφασικό και διφασικό προς γη σφάλμα

Παρατηρήσεις:

- Ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις ο γενικός τύπος $I_N = I_A + I_B + I_C$.
- Κατά το διφασικό σφάλμα προς γη ισχύει ότι $V_B = V_C = V_N$.

7.2 Κατάσταση εκτάκτου ανάγκης

Σε περίπτωση αστοχίας των κύριων γεννητριών, ενεργοποιείται η εφεδρική γεννήτρια. Το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου για το γειωμένο σύστημα σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης παρουσιάζεται στο σχήμα 7.2. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τοπολογία του δικτύου είναι παρόμοια με αυτή του αγείωτου συστήματος. Η ειδοποιός διαφορά έγκειται στην ύπαρξη ουδετέρου. Τα καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν φέρουν τέσσερις αγωγούς, τρεις των φάσεων και έναν του ουδετέρου, καθώς τα φορτία είναι σε συνδεσμολογία αστέρα. Η γεννήτρια γειώνεται απευθείας στον ουδέτερο κόμβο της, ενώ ο μετασχηματιστής υποβιβασμού είναι σε συνδεσμολογία αστέρα-αστέρα. Στο Παράρτημα Β2.Β παρατίθεται εικόνες από τα διάφορα στοιχεία του ηλεκτρικού δικτύου.



Σχήμα 7.2 Ηλεκτρικό δίκτυο εκτάκτου ανάγκης

Στον πίνακα 7.3 και 7.4, παρατίθενται δυναμικά και ρεύματα, σε κομβικούς ζυγούς του δικτύου, για την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, για διφασικό σφάλμα χωρίς γη και για τριφασικό. Τα δυναμικά κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα μηδενίζονται.

Τοποθεσία		Μονοφασικό Σφάλμα		Διφασικό Σφάλμα	
	Φάση	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)
GEN.3	A	0.1∠20.13	3881.1∠-89.5	379.9∠-2.80	519.5∠133.30
	B	318.7∠-108.4	432.6∠28.58	190.0∠177.2	3032.63∠-176.7
	C	309.2∠103.2	421.7∠-121.6	190.0∠177.2	3032.63∠3.3
	N	0.1∠20.13	3881.1∠-89.5	0.0	0.0
EMERG-BUS	A	33.8∠-49.59	3101.5∠-73.78	362.9∠0.38	503.0∠136.77
	B	287.6∠-107.53	374.0∠23.27	181.9∠179.89	2971.6∠6.28
	C	305.4∠107.65	464.4∠-115.07	181.9∠179.89	2971.6∠-165.22
	N	33.8∠-49.59	3101.5∠-73.78	3.8∠-82.75	19.1∠54.46
EMERG440V	A	113.3∠-13.11	804.8∠-16.06	270.8∠7.91	28.1∠-175.67
	B	232.9∠-118	22.2∠68.35	136.4∠-172.41	1261.31∠-119
	C	258.8∠119.6	25.2∠-72.84	136.4∠-172.41	1261.31∠61.06
	N	113.3∠-13.11	804.8∠-16.06	3.0∠-37.08	0.0

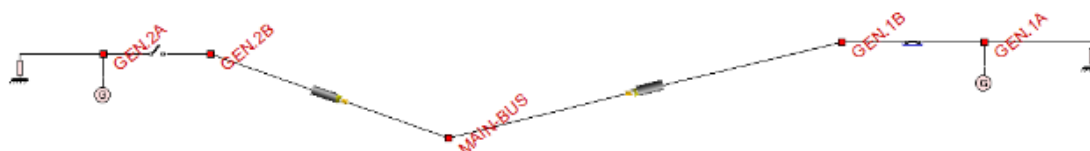
Πίνακας 7.3 Δυναμικά και ρεύματα σε μόνιμη και υπό σφάλμα κατάσταση

Τοποθεσία		Διφασικό Σφάλμα προς γη		Τριφασικό Σφάλμα	
	Φάση	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)
GEN.3	A	359.8∠-2.58	476.1∠133.54	0.0	7654.0420∠-90
	B	0.3∠-175.12	5973.9∠136.35	0.0	7654.0420∠150
	C	0.3∠-175.12	6158.6∠44.65	0.0	7654.0420∠30
	N	0.3∠-175.12	8138.4∠87.43	0.0	0.0
EMERG-BUS	A	269.1∠6.92	24.6∠-177.93	5.0∠-76.47	6359.6∠106.11
	B	86.6∠-178.73	4918.47∠161.7	5.0∠-76.47	6314.9∠-16.16
	C	86.6∠-178.73	4078.47∠57.46	5.0∠-76.47	6505.6∠-136.2
	N	86.6∠-178.73	633.1∠176.53	5.0∠-76.47	423.2∠20.75
EMERG 440V	A	273.3∠6.86	24.6∠2.07	0.5∠-18.79	1610.9∠-17.23
	B	84.7∠-172.7	1421.439∠-129	0.5∠-18.79	1632.2∠-137.5
	C	84.7∠-172.7	1173.7∠77.15	0.5∠-18.79	1638.774∠102
	N	84.7∠-172.7	633.1∠-3.47	0.5∠-18.79	25.8∠118.94

Πίνακας 7.4 Δυναμικά και ρεύματα υπό τριφασικό και διφασικό προς γη σφάλμα

7.3 Ρεύμα βραχυκύκλωσης υπό πλήρες και κενό φορτίο

Στο γειωμένο σύστημα, εξετάστηκε επίσης η επίδραση της φόρτισης του δικτύου προ σφάλματος στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Για το λόγο αυτό, θεωρήθηκε το απλοποιημένο δίκτυο του σχήματος 7.3, όπου δεν υπάρχει κανένα φορτίο, παρά μόνο το καλώδιο που συνδέει την γεννήτρια με τον κύριο ζυγό.



Σχήμα 7.3 Δίκτυο χωρίς φορτία

Στον πίνακα 7.5 που ακολουθεί, συγκρίνονται δυναμικά και ρεύματα του απλοποιημένου δικτύου (χωρίς φορτίο) και αυτού της κανονικής κατάστασης λειτουργίας (πλήρες φορτίο, σχήμα 7.1).

Τα αποτελέσματα αφορούν μονοφασικά, διφασικά και τριφασικά προς γη σφάλματα. Τα σφάλματα πραγματοποιούνται πάντα στον κύριο ζυγό (Main Bus), ενώ οι μετρήσεις αφορούν τόσο τον ίδιο όσο και το ζυγό της γεννήτριας (GEN.1). Τα διφασικά χωρίς γη δεν προσδίδουν κάποια επιπλέον πληροφορία και συνεπώς δεν συμπεριλήφθηκαν.

Μονοφασικό σφάλμα στον κύριο ζυγό					
Τοποθεσία		Χωρίς φορτίο		Υπό πλήρες φορτίο	
	Φάση	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)
GEN.1	A	135.9∠-28.54	8683.0∠-64.18	136.2∠-25.23	8507.0∠117.97
	B	256.5∠-101.79	0.0	248.1∠-107.15	1054.7∠-135
	C	316.2∠109.45	0.0	300.9∠107.56	1217.9∠66.53
	N	0.2∠13488	8683.0∠115.82	4.0∠111.47	8507.0∠117.97
Main Bus	A	78.5∠-31.10	8683.0∠115.82	75.5∠-27.42	8507.0∠-62.03
	B	263.8∠-103.83	0.0	249.6∠-109.38	1054.7∠45.02
	C	317.5∠107.59	0.0	294.8∠105.54	1217.9∠-113.47
	N	78.5∠-31.10	8683.0∠-64.18	75.5∠-27.42	8507.0∠-62.03

Διφασικό σφάλμα στον κύριο ζυγό					
Τοποθεσία		Χωρίς φορτίο		Υπό πλήρες φορτίο	
	Φάση	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)
GEN.1	A	318.0∠-0.90	0.0	309.6∠-3.80	1087.2∠142.4
	B	179.0∠-168.4	11813.9∠-8.24	171.3∠-167.47	12058.9∠-8.13
	C	124.0∠143.97	8532∠-126.1	118.9∠141.43	9059.3∠-125.3
	N	0.3∠-24.68	10872∠127.8	4.8∠-56.35	10266.6∠124.7
Main Bus	A	308.5∠-0.02	0.0	290.0∠-3.05	1087.3∠142.36
	B	97.6∠171.03	11813.9∠171.8	90.2∠171.05	11587.34∠173
	C	97.6∠171.03	8532.0855∠54	90.2∠171.05	9051.39∠51.31
	N	97.6∠171.03	10872.0∠127.8	90.2∠171.05	10266.6∠124.7
Τριφασικό σφάλμα στον κύριο ζυγό					
GEN.1	A	120.2∠-31.08	14784.1∠-68.2	120.0∠-31.19	14784.1∠-68.17
	B	100.0∠-153.50	14916.3∠166.3	100.3∠-153.53	14916.3∠166.3
	C	97.8∠94.59	15745.4∠46.27	97.8∠94.76	15745.4∠46.27
	N	0.0	2224.9∠-148.1	0.3∠-160.74	2224.9∠-148.1
Main Bus	A	2.7 ∠-53.72	14784.1∠111.8	2.6∠-60.06	14784.1∠111.8
	B	2.7 ∠-53.72	14916.3∠-13.7	2.6∠-60.06	14916.3∠-13.66
	C	2.7 ∠-53.72	15745.4∠-134	2.6∠-60.06	15745.4∠-133.7
	N	2.7 ∠-53.72	2224.9∠31.9	2.6∠-60.06	2224.9∠31.93

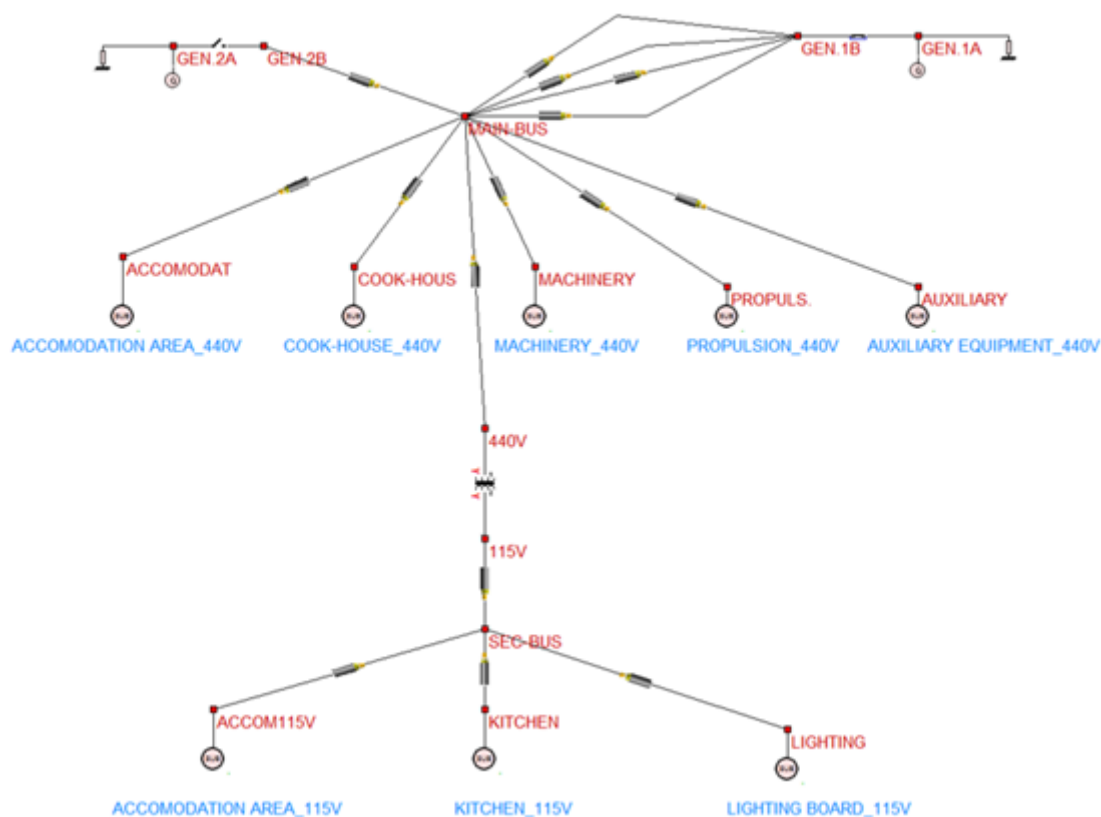
Πίνακας 7.5 Δυναμικά και ρεύματα υπό σφάλμα σε πλήρες και κενό φορτίο

Παρατηρήσεις:

- Υπό διφασικό και μονοφασικό σφάλμα, η τάση στις υγιείς φάσεις αυξάνεται υπό κενό φορτίο, ενώ στις βραχυκυκλωμένες το ρεύμα μειώνεται.
- Υπό τριφασικό σφάλμα, δεν παρουσιάζεται καμία διαφορά, καθώς οι τάσεις των φάσεων στο σημείο αυτό μηδενίζονται και το υπόλοιπο δίκτυο παύει να τροφοδοτείται.

7.4 Επίδραση παράσιτων χωρητικότητας

Στον πίνακα 7.5 παρατηρείται διαφοροποίηση στα δυναμικά των φάσεων σε διάφορους κόμβους του δικτύου, χωρίς αυτή να οφείλεται σε σφάλματα. Για το λόγο αυτό, εξετάστηκε η επίπτωση των παράσιτων χωρητικότητας που εμφανίζονται μέσα σε ένα πολυφασικό καλώδιο σε συγκεκριμένο τμήμα του δικτύου. Συνεπώς, αντικαταστάθηκε το τεσσάρων αγωγών καλώδιο, που συνέδεε τη γεννήτρια με τον κύριο ζυγό, με τέσσερα μονοπολικά, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 7.4.



Σχήμα 7.4 Προσαρμοσμένο ηλεκτρικό δίκτυο

Στην προσομοίωση πραγματοποιήθηκε μονοφασικό και διφασικό σφάλμα στον **κύριο ζυγό** και οι μετρήσεις αφορούν τόσο τον ίδιο όσο και τον ζυγό της γεννήτριας. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 7.6 και συγκρίνονται με τα δυναμικά του δικτύου με πλήρες φορτίο, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στον πίνακα 7.5.

Μονοφασικό σφάλμα στον κύριο ζυγό			
Τοποθεσία		Τετραπολικό καλώδιο	Μονοπολικά καλώδια
	Φάση	Δυναμικό (V)	Δυναμικό (V)
GEN.1	A	136.2∠-25.23	217.4∠-0.31
	B	248.1∠-107.15	250.8∠-119.16
	C	300.9∠107.56	254.1∠114.46
	N	4.0∠111.47	4.0∠89.46
Main Bus	A	75.5∠-27.42	99.8∠-5.57
	B	249.6∠-109.38	224.4∠-127.10
	C	294.8∠105.54	220.2∠108.83
	N	75.5∠-27.42	99.8∠-5.57
Διφασικό σφάλμα στον κύριο ζυγό			
GEN.1	A	309.6∠-3.80	277.8∠-2.39
	B	171.3∠-167.47	204.2∠-131.75
	C	118.9∠141.43	202.7∠128.73
	N	4.8∠-56.35	3.1∠-42.48

Πίνακας 7.6 Σύγκριση τάσεων δικτύου με πολυφασικό καλώδιο και με τέσσερα ισοδύναμα μονοφασικά

Παρατηρήσεις :

- Υπό μονοφασικό σφάλμα, οι τάσεις των υγιών φάσεων είναι σχεδόν ίσες
- Υπό διφασικό σφάλμα οι τάσεις των βραχυκυκλωμένων φάσεων είναι σχεδόν ίσες.

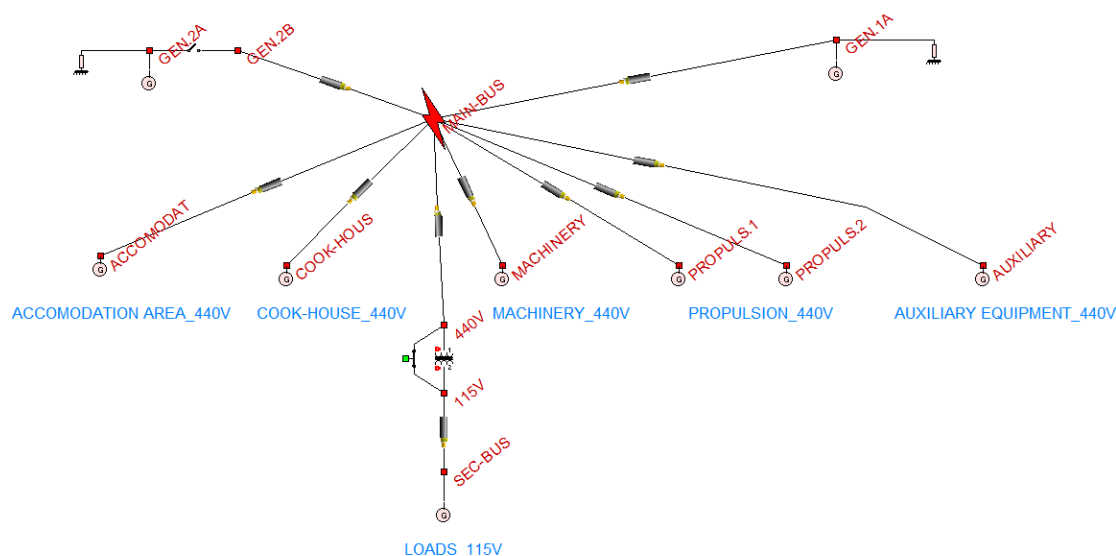
7.5 Συνεισφορά κινητήρων στο ρεύμα βραχυκύκλωσης

Στην παράγραφο 3.5 αναλύθηκε η συμπεριφορά των ηλεκτρικών στοιχείων ενός δικτύου κατά το βραχυκύκλωμα. Συνοψίζοντας, οι στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές είναι αυτές που το τροφοδοτούν και ιδίως οι σύγχρονες, καθώς διαθέτουν τύλιγμα διέγερσης. Ωστόσο, δεν είναι καθόλου αμελητέα και η συνεισφορά των ασύγχρονων μηχανών, κυρίως στην υπομεταβατική και μεταβατική περίοδο.

Σε αυτή την παράγραφο έγινε ομαδοποίηση των φορτίων του εκάστοτε ζυγού, σύμφωνα με το πρότυπο **IEC 61363-1** (βλ. παράγραφο 3.4). Διαθέσιμο μοντέλο ηλεκτρικής μηχανής του προγράμματος ήταν μόνο αυτό της γεννήτριας. Συνεπώς, τα φορτία του κάθε πίνακα ομαδοποιήθηκαν ως σύγχρονες γεννήτριες.

Στόχος είναι να δοθεί μία προσεγγιστική εκτίμηση της αύξησης του ρεύματος σφάλματος από τους κινητήρες και να τονιστεί η σημασία συνυπολογισμού τους σε μελέτες. Το ηλεκτρικό δίκτυο όπως αυτό διαμορφώνεται, απεικονίζεται στο σχήμα 7.5. Ο μετασχηματιστής είναι σε συνδεσμολογία τριγώνου-τριγώνου. Στο Παράρτημα Β2.Γ παρουσιάζονται γεννήτριες του δικτύου.

Η ισχύς του κάθε πίνακα λήφθηκε από το Παράρτημα Α, ενώ οι αντιστάσεις εκτιμήθηκαν βάσει της παραγράφου 3.4.



Σχήμα 7.5 Ομαδοποίηση φορτίων σε ισοδύναμες γεννήτριες.

Κατά την προσομοίωση αυτή, πραγματοποιήθηκαν όλα τα πιθανά σφάλματα στον **κύριο ζυγό**. Στον πίνακα 7.7 παρουσιάζονται συνοπτικά τα δυναμικά και τα ρεύματα των αγωγών του κύριου ζυγού.

Φάση	Μονοφασικό σφάλμα		Διφασικό σφάλμα	
	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)
A	80.5∠-23.24	14905.33∠-61.7	341.5∠2.96	360.52∠-40.4
B	273.1∠-106.95	1403.1∠5.17	171.0∠-178	13943∠-162
C	301.6∠107.98	3370.98∠-13.31	171.0∠-178	13943∠18.0
N	80.5∠-23.24	16843.1∠-54.8	8.1∠-71.86	1424∠-58.1
	Διφασικό σφάλμα προς γη		Τριφασικό σφάλμα	
	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)
A	287.8∠-0.30	2288∠38	2.7∠-54.29	21603.57∠-67
B	89.3∠170.67	18932.18∠175.2	2.7∠-54.29	21739.11∠169
C	89.3∠170.67	15286.09∠52.98	2.7∠-54.29	22633.368∠48
N	89.3∠170.67	16499.9∠-5.2	2.7∠-54.29	2406.4∠-147

Πίνακας 7.7 Σφάλματα στον κύριο ζυγό

Στους πίνακες 7.8 και 7.9 που ακολουθούν, παρουσιάζεται αναλυτικά η επιμέρους συνεισφορά όλων των γεννητριών σε όλες τις καταστάσεις σφάλματος στον **κύριο ζυγό**.

Παρατηρήσεις :

- Από τους πίνακες 7.7-7.9 γίνεται σαφές οι το ρεύμα σφάλματος αυξάνει σημαντικά από τη συνεισφορά των κινητήρων.
- Το ρεύμα του ουδετέρου I_N , κατανέμεται σε όλες τις γεννήτριες αναλογικά με την ισχύ της καθεμίας.

Ζυγός	Μονοφασικό σφάλμα			Διφασικό σφάλμα	
	Φάση	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)
GEN.1	A	136.9∠-23.79	8419.9∠117.07	349.7∠1.45	896.2∠-37.63
	B	262.3∠-104.52	538.2∠149.40	212.6∠-167.11	8185.8∠-170.99
	C	303.1∠109.21	685.9∠-160.10	146.1∠165.14	7943.0∠15.25
	N	1.3∠165.46	9012.5∠-56.76	0.1∠113.49	388.0∠-137.97
ACCOMODAT	A	108.9∠-28.31	1132.5∠-57.70	281.0∠1.32	454.8∠119.01
	B	268.3∠-106.00	166.8∠19.98	121.7∠179.24	1243.7∠-175.57
	C	295.1∠109.72	360.8∠-137.97	87.2∠152.14	1067.6∠52.41
	N	53.5∠-6.55	1244.0∠113.39	59.3∠-173.29	1404.3∠-54.81
COOK-HOUSE	A	91.9∠-28.44	82.4∠-63.97	339.2∠3.39	20.5∠133.99
	B	275.8∠-106.15	28.2∠-52.38	178.7∠-176.19	56.5∠-144.53
	C	296.1∠108.46	35.8∠-99.28	162.3∠-178.57	53.1∠8.77
	N	65.6∠-8.93	140.1∠109.86	7.0∠-57.55	12.7∠51.77
M/Σ 440V	A	80.5∠-23.24	1375.1∠118.49	94.3∠-26.18	1375.1∠-61.51
	B	273.1∠-106.95	1181.0∠-10.28	279.0∠-109.11	1181.0∠169.72
	C	301.6∠107.98	1118.8∠-116.89	313.4∠106.89	1118.8∠63.11
MACHINERY	A	119.5∠-32.04	157.6∠-51.05	331.0∠4.88	58.7∠134.48
	B	266.9∠-105.76	30.7∠29.71	202.7∠-170.27	152.3∠-137.58
	C	296.4∠110.04	44.0∠-137.21	132.4∠176.44	154.9∠17.96
	N	48.0∠4.58	166.0∠124.26	5.5∠-45.78	14.5∠64.74
PROPULS.1	A	96.3∠-25.62	1117.9∠-63.42	336.3∠3.20	405.3∠126.55
	B	270.8∠-106.26	126.1∠-1.57	179.5∠-173.64	1031.6∠-145.24
	C	296.5∠109.22	400.1∠-137.40	157.2∠178.38	1039.4∠11.47
	N	62.8∠-14.66	1316.4∠104.60	5.1∠-66.77	89.7∠38.50
PROPULS.2	A	110.6∠-25.76	2073.0∠-58.70	331.6∠3.43	791.7∠126.92
	B	266.8∠-106.06	287.4∠28.88	187.3∠-169.73	1985.7∠-142.72
	C	293.0∠110.21	670.9∠-139.74	146.0∠173.84	2023.7∠14.64
	N	49.5∠-9.27	2221.6∠111.57	3.2∠-68.19	113.7∠30.74
AUXILIARY	A	96.8∠-28.27	557.8∠-61.96	337.8∠3.37	146.9∠132.13
	B	273.7∠-105.55	171.3∠-45.41	180.3∠-174.94	397.2∠-144.15
	C	294.3∠108.62	223.5∠-99.90	159.1∠-179.68	381.4∠9.97
	N	57.4∠-7.32	902.6∠112.41	5.7∠-57.18	73.1∠52.09

Πίνακας 7.8 Συνεισφορά κινητήρων στο ρεύμα βραχυκύκλωσης υπό μονοφασικό και διφασικό σφάλμα

Ζυγός		Διφασικό σφάλμα προς γη		Τριφασικό σφάλμα	
	Φάση	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)	Δυναμικό (V)	Ρεύμα (A)
GEN.1	A	304.2/-1.88	1059.1/-64.6	120.2/-31.09	14784.1/-68
	B	171.8/-167.6	12037.5/-171	100.1/-153.5	14916.3/-166
	C	119.2/-140.92	9047.9/-53.16	97.8/-94.61	15745.4/-46.3.
	N	1.5/-1.95	10090.3/-53	0.1/-151.72	2224.9/-148
ACCOMODAT	A	281.0/-1.32	454.8/-119.01	37.0/-46.82	1214.0/-63.3
	B	121.7/-179.24	1243.7/-176	32.1/-164.21	1214.9/-176.0
	C	87.2/-152.14	1067.6/-52.41	29.5/-69.77	1231.2/-55.42
	N	59.3/-173.29	1404.3/-54.8	1.5/-16.28	35.0/-158.25
COOK-HOUSE	A	282.9/-1.13	51.5/-120.32	12.9/-62.55	61.6/-67.49
	B	102.9/-170.05	82.9/-163.34	8.8/-170.81	61.7/-172.53
	C	89.1/-163.34	67.4/-73.54	9.8/-40.94	61.6/-52.63
	N	72.8/-174.47	158.5/-57.00	2.7/-56.20	0.2/-19.09
M/Σ 440V	A	296.7/-1.89	1143.1/-62.4	-45.79	1542.1/-63.4
	B	102.2/-175.83	1492.0/-176	-151.11	1574.3/-176.7
	C	87.6/-159.65	1465.3/-49.15	67.91	1561.3/-55.67
MACHINERY	A	277.6/-2.03	58.7/-131.01	48.9/-57.46	173.2/-59.84
	B	135.7/-178.47	182.5/-169.4	44.7/-175.09	173.2/-179.9
	C	82.1/-145.62	141.8/-55.56	44.8/-59.16	173.5/-60.00
	N	53.5/-160.48	187.7/-42.84	2.4/-52.43	0.7/-139.68
PROPULS.1	A	284.1/-0.53	486.4/-110.49	22. /-541.25	1164.8/-66.4
	B	106.9/-176.86	1175.9/-178.2	17.4/-152.64	1165.5/-172.7
	C	88.7/-159.06	1080.9/-51.04	15.8/-76.68	1178.4/-52.44
	N	69.7/-178.35	1489.7/-63.5	1.5/-11.96	32.4/-153.08
PROPULS.2	A	281.1/-0.94	824.6/-115.28	40.9/-37.63	2241.8/-63.3
	B	121.5/-177.4	2256.8/-175	34.3/-154.39	2256.0/-175.2
	C	91.5/-149.49	1997.1/-51.30	32.3/-82.37	2295.3/-54.77
	N	55.1/-177.11	2520.8/-57.5	1.2/-39.29	105.2/-143.5
AUXILIARY	A	281.1/-1.26	332.5/-122.11	17.9/-53.65	437.0/-66.36
	B	109.1/-172.85	566.0/-167.09	13.2/-164.64	436.7/-172.90
	C	90.8/-160.70	450.9/-71.61	13.0/-57.15	440.9/-52.94
	N	63.7/-173.25	1021.0/-55	2.0/-46.04	9.4/-143.95

Πίνακας 7.9 Συνεισφορά κινητήρων στο ρεύμα βραχυκύκλωσης υπό τριφασικό και διφασικό σφάλμα προς γη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Συμπεράσματα

8.1 Συμπεράσματα

Κατά την παρούσα διπλωματική εργασία, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη μελέτη βραχυκυκλωμάτων σε ηλεκτρικό δίκτυο ενός γενικευμένου τύπου πλοίου. Η μέθοδος γείωσης που εφαρμόζεται είναι αναπόσπαστο κομμάτι της μελέτης αυτής, καθώς επηρεάζει τόσο την σχεδίαση (διαστασιολόγηση ζυγών, καλωδίων, διακοπών κλπ.) όσο και την εύρυθμη λειτουργία του ίδιου του συστήματος. Διαπιστώθηκε ότι η γείωση του συστήματος επηρεάζει αισθητά τα σφάλματα προς γη, ενώ τα υπόλοιπα είδη σφάλματος εξαρτώνται κυρίως από την προ σφάλματος τάση και την ισχύ βραχυκύκλωσης του ζυγού.

Οι προσομοιώσεις στο αγείωτο σύστημα περιορίστηκαν από την αδυναμία του προγράμματος να αναπαραστήσει τις εγκάρσιες χωρητικότητες μεταξύ των καλωδίων και της γης. Παράλληλα, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν τόσο για τα τριφασικά όσο και για τα διφασικά βραχυκυκλώματα χωρίς γη, ταυτίζονται με εκείνα του συμπαγώς γειωμένου συστήματος. Από την άλλη πλευρά, η ύπαρξη ουδετέρου στο συμπαγώς γειωμένο σύστημα κατέστησε δυνατή την εκτέλεση όλων των τύπων βραχυκυκλωμάτων.

Αρχικά, σε όλα τα σφάλματα προς γη, οι τάσεις των εμπλεκόμενων φάσεων στο σημείο αυτό τείνουν να μηδενίζονται. Το δυναμικό του ουδετέρου στη θέση του σφάλματος αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από την γεννήτρια λόγω της σύνθετης αντίστασης του ίδιου του αγωγού του ουδετέρου. Υπό μονοφασικό σφάλμα, το πλάτος της τάσης των υγιών φάσεων παραμένει κοντά στην ονομαστική της τιμή, ενώ οι τιμές των ρευμάτων τους αυξάνουν. Στην περίπτωση των διφασικών σφαλμάτων χωρίς γη, παρατηρείται στην υγιή φάση τόσο η αύξηση της τιμής της τάσης όσο και του ρεύματος λειτουργίας της. Απεναντίας, οι τάσεις των φάσεων με το σφάλμα πέρα από το ότι εξισώνονται, μειώνονται αισθητά. Στη συνέχεια, όσον αφορά στα διφασικά σφάλματα προς γη, στον κόμβο της γεννήτριας διαπιστώνεται βύθιση τάσης στην υγιή φάση, ενώ αυξάνει η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης από τις φάσεις στον ουδέτερο. Όσο η θέση του σφάλματος απομακρύνεται από την γεννήτρια, το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται, ενώ στην περίπτωση του συμπαγώς γειωμένου συστήματος η τάση της υγιούς φάσης αυξάνει. Τέλος, στα τριφασικά σφάλματα μηδενίζονται τα δυναμικά φάσεων και ουδετέρου και, συνήθως, πρόκειται για την δυσμενέστερη περίπτωση σφαλμάτων.

Γενικά παρατηρήθηκε σε όλα τα είδη σφαλμάτων, με εξαίρεση τα τριφασικά, πως ένα μικρό ρεύμα συνεχίζει και ρέει στις εσφαλμένες φάσεις, καθώς η τάση τους μπορεί να μηδενίζεται, αλλά όχι απαραίτητα και το δυναμικό τους.

Στις προσομοιώσεις εξετάστηκε επίσης η επίδραση των παράσιτων χωρητικοτήτων, οι οποίες προκαλούνται όπως αποδείχθηκε κυρίως από τα καλώδια διανομής αλλά και από τα τυλίγματα της γεννήτριας. Οι βυθίσεις τάσης ενισχύονται, ενώ παράλληλα παρατηρείται άνιση κατανομή τάσης μεταξύ των φάσεων.

Τέλος, ο συνυπολογισμός των κινητήρων, κυρίως των σύγχρονων επιβεβαίωσε ότι αυξάνουν σε μεγάλο βαθμό το ρεύμα βραχυκύκλωσης.

8.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Με την ολοκλήρωση της εργασίας, προέκυψαν τα παρακάτω θέματα τα οποία θα μπορούσαν να μελετηθούν σε μελλοντικές εργασίες:

- Γεωμετρική αναπαράσταση της δομής της γάστρας, η οποία λειτουργεί ως ηλεκτρόδιο γείωσης και μελέτη σφαλμάτων λαμβάνοντας υπόψη την αντίσταση γείωσης της γάστρας. Χρήση προγραμμάτων γεωμετρικών μοντέλων γείωσης, με σκοπό να προσομοιωθούν καλύτερα οι διάφορες μεθοδολογίες γείωσης.
- Με βάση τα σχέδια του πλοίου, τις κατόψεις κάθε καταστρώματος και τα σχέδια του μηχανοστασίου θα μπορούσαν να υπολογιστούν τα μήκη των καλωδίων όλων των καταναλωτών από τον κεντρικό πίνακα και να υπολογιστεί η πτώση τάσης στα καλώδια, η οποία δεν πρέπει να ξεπερνά το 6%.
- Να υπολογιστεί η μηχανική αντοχή των ζυγών του δικτύου του πλοίου στο μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης του καθενός.
- Να υπολογιστούν οι ασφάλειες και οι διακόπτες του ηλεκτρικού δικτύου.
- Ενσωμάτωση κυκλωματικών μοντέλων κινητήρων στο και δυνατότητα επίλυσης στη μεταβατική κατάσταση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Χρίστος Φραγκόπουλος , Ιωάννης Προυσαλίδης, *Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Τεύχος Α, Ιανουάριος 2005

[2] S. Spagkouros, J. Prousalidis, 'Electric Power Quality Problems in ship systems: A classification method ', *IASME transactions Issue 3, Vol 1, July 2004*

[3] I.M. Προυσαλίδης, I.K. Χατζηλάου, Ε. Στυβακτάκης, Φ. Κανέλλος, Ν. Χατζηαργυρίου, Χ. Φραγκόπουλος, Η. Σοφράς, 'Ηλεκτροπρόωση Πλοίων και Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο: Προβλήματα Ποιότητας Ισχύος', *ΤΕΕ, Αθήνα, Ιανουάριος 2006*.

[4] Dennis T. Hall B.A. (Hons), C. Eng., M.I.E.E., M.I.Mar.E, 'Practical Marine Electrical Knowledge', *Second edition ,1999*.

[5] I.K. Χατζηλάου, I.M. Προυσαλίδης, Γ. Αντωνόπουλος, I.K. Γύπαρης, Π. Βαλλιανάτος, ' Εξελίζεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο', *Ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς στην Ελλάδα – Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές, ΤΕΕ, Αθήνα, 12-13 Ιαν. 2006*.

[6] Roolls – Royce, <http://www.rolls-royce.com/>

[7] *GL Rules and Guidelines, I- Part 1, Chapter 3, GL 2010*

[8] J. Prousalidis and E. Styvaktaki, *Introducing a classification method of Voltage dips in ship electric energy systems, Journal of Marine Engineering and Technology, 2008*.

[9] *Οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου σχετικά με τη θέσπιση τεχνικών προδιαγραφών για τα πλοία εσωτερικής ναυσιπλοΐας, C6-0091/2006 1997/0335(COD) EL Part 2, Μάρτιος 2006*.

[10] John P. Nelson, David Burns, Robert Seitz, Andrew Leoni, *The grounding of marine power systems: problems and solutions, IEEE Paper No.PCIC-2004-17*

[11] *IEEE Recommended Practice for Electrical Installations on Shipboard, October 2002*

[12] *Grounding methods in mission critical facilities, White Paper WP027004*

Eaton Corporation Plc, December 2013

[13] *The National Electrical Code, NFPA 70, The National Fire Protection Association, Inc., 2005 Edition*

[14] R. Ball, G.W. Stephens, *Neutral earthing of marine power systems, 1982*

- [15] IEC 60909-0, *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents*, IEC 2001.
- [16] B. de Metz-Noblat, F. Dumas, C. Poulain, 'Cahier technique no. 158: Calculation of short-circuit currents', *Schneider Electric*.
- [17] Βασιλείου Κ. Παπαδιά, 'Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος II, Ασύμμετρες και Μεταβατικές Καταστάσεις', ΕΜΠ, Αθήνα 1993
- [18] *Windows Based Integrated Grounding System manual*
- [19] A.P.Sakis Meliopoulos, 'Power System Grounding and Transients, an Introduction', 1988
- [20] SOLAS, *Consolidated edition 2009*, IMO
- [21] IEC 60092-359: *Electrical installations in ships - Part 359: Sheathing materials for shipboard power and telecommunication cables*, IEC 1987
- [22] Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ)
- [23] IEEE Std 241, *Recommended Practice for Electric Power Systems in Commercial Buildings*, 1990
- [24] J. Prousalidis, G. Sfakianos, E. Sofras, *Analyzing Voltage Dips in Ship Electric Energy Systems*, National Technical University of Athens

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Ηλεκτρικά στοιχεία δικτύου

Α1. Ισχείς Φορτίων/Διατομή-Μήκος Καλωδίων

ΦΟΡΤΙΑ	Κατάσταση Κανονικής Πορείας								
	N	fs	Ρλειτ. (kW)	cosφ	sinφ	Αεργος Ισχύς (kVar)	Φαιν. Ισχύς (kVa)	S (mm ²)	Μήκος Καλωδ (m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ΖΥΓΟΙ 115V									Από Μ/Σ
ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ									35
Μηχανοστάσιο	1	1,00	22,00	1,00	0,00	0,00	22,00	3*50	10
Γέφυρα	1	0,30	4,50	1,00	0,00	0,00	4,50	3*25	15
Χώροι ενδιαίτησης	2	0,70	16,80	1,00	0,00	0,00	16,80	3*16	15
Καταστρώματος	1	0,20	1,80	1,00	0,00	0,00	1,80	3*10	20
ΣΥΝΟΛΟ			45,10	1,00	0,00	0,00	45,10		
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ									35
Πλυντήριο πιάτων	1	0,20	0,35	0,48	0,88	0,63	0,72	3*1,5	15
Διάφορες συσκευές	4	0,30	2,82	0,57	0,82	4,05	4,93	3*2,5	25
ΣΥΝΟΛΟ			3,17	0,56	0,83	4,68	5,65		
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ									35
Αντλίες θερμού νερού	2	0,70	3,64	0,79	0,61	2,78	4,58	3*2,5	25
Συμπιεστής παγομηχανής	1	0,80	1,04	0,82	0,57	0,73	1,27	3*1,5	45
1Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	12	0,80	8,31	0,82	0,57	5,80	10,14	3*1,5	30
Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	12	0,85	44,16	0,83	0,56	29,65	53,19	3*6	30
ΣΥΝΟΛΟ			57,15	0,83	0,56	38,95	69,17		
ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΝΑΥΣΙΠΛΟΪΑΣ	1	0,50	10,59	1,00	0,00	0,00	10,59		35
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΑ 115 V									
			116,01	0,89	0,46	43,63	130,51		

ΖΥΓΟΙ 440 V									
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΩΣΗΣ									70
Κύριοι Αεροσυμπιεστές	1	0,20	4,33	0,48	0,88	7,91	9,02	3*10	25
Αντλίες λαδιού λίπανσης Κ.Μ	1	0,85	33,12	0,83	0,56	22,23	39,89	3*25	45
Διαχωριστήρες πετρελαίου	1	0,70	12,12	0,79	0,61	9,25	15,25	3*6	55
Αντλία Μετάγγισης Πετρελαίου Diesel	1	0,70	3,03	0,79	0,61	2,31	3,81	3*1,5	40
Αεροσυμπιεστές Εκκινήσεως	1	0,20	6,93	0,48	0,88	12,66	14,43	3*25	30
Αεροσυμπιεστής Αυτοματισμού	1	0,20	6,06	0,48	0,88	11,08	12,63	3*16	15
Αντλία Συμπυκνώματος	1	0,50	5,20	0,71	0,70	5,12	7,29	3*2,5	50
Κινητήρες Μηχανισμού Πηδαλίου	1	0,50	15,15	0,71	0,70	14,93	21,27	3*16	50
Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	0	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00	3*2,5	35
Ανεμιστήρας Προσαγωγής Αέρα Λέβητα	1	0,50	1,73	0,71	0,70	1,71	2,43	3*1,5	35
Αντλίες Κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων	1	0,85	25,76	0,83	0,56	17,29	31,03	3*16	40
Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	1	0,85	7,36	0,83	0,56	4,94	8,86	3*2,5	40
Θερμαντήρες καυσίμου	1	0,70	10,50	1,00	0,00	0,00	10,50	3*2,5	45
Αντλίες μετάγγισης βαρέος πετρελαίου	1	0,50	8,66	0,71	0,70	8,53	12,16	3*6	35
Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλ. νερού	2	0,85	125,12	0,83	0,56	84,00	150,70	3*70	30
Αντλίες ψύξης βαλβίδων	1	0,85	18,40	0,83	0,56	12,35	22,16	3*10	30
Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	1	0,50	3,46	0,71	0,70	3,41	4,86	3*1,5	35
Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	3	0,85	88,32	0,83	0,56	59,29	106,38	3*25	40
Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	1	0,40	4,85	0,65	0,76	5,67	7,46	3*4	45
ΣΥΝΟΛΟ			380,10	0,79	0,61	282,69	480,13		
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ									70
Γερανογέφυρα	1	0,10	1,30	0,37	0,93	3,21	3,46	3*4	25

Τόρνος	1	0,10	0,43	0,37	0,93	1,07	1,15	3*1,5	25
Δρέπανο	1	0,10	0,17	0,37	0,93	0,43	0,46	3*1,5	20
Συσκευή συγκολλήσεων	1	0,10	2,35	0,37	0,93	5,82	6,28	3*10	20
Μονάδα επεξεργασίας Αποβλήτων	1	0,40	8,47	0,65	0,76	9,90	13,03	3*10	35
Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	1	0,10	1,73	0,37	0,93	4,28	4,62	3*6	45
ΣΥΝΟΛΟ			14,46	0,50	0,87	24,72	29,01		
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΣΚΑΦΟΥΣ									
									70
Αντλία κύτους	1	0,20	3,46	0,48	0,88	6,33	7,22	3*6	35
Αντλίες γενικής χρήσεως	1	0,20	8,66	0,48	0,88	15,83	18,04	3*25	40
Αντλία ποσίμου νερού	1	0,50	6,49	0,71	0,70	6,40	9,12	3*4	35
Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	1	0,70	3,03	0,79	0,61	2,31	3,81	3*1,5	30
Αντλίες υγιεινής	2	0,40	6,93	0,65	0,76	8,10	10,66	3*2,5	35
Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας	2	0,30	12,99	0,57	0,82	18,61	22,69	3*10	35
ΣΥΝΟΛΟ			41,56	0,58	0,81	57,57	71,53		
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ									
									70
Συμπιεστές κλιματισμού	1	0,75	22,73	0,81	0,59	16,55	28,12	3*16	45
Συμπιεστές ψυκτικής	2	0,40	6,93	0,65	0,76	8,10	10,66	3*2,5	35
Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	2	0,75	25,98	0,81	0,59	18,92	32,13	3*6	35
Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	2	0,75	19,48	0,81	0,59	14,19	24,10	3*4	25
Αντλίες θαλ. νερού ψυκτικής	2	0,40	1,39	0,65	0,76	1,62	2,13	3*1,5	30
Αντλίες πόσιμου νερού	2	0,50	3,46	0,71	0,70	3,41	4,86	3*1,5	30
Αντλίες αποχέτευσης	2	0,70	12,12	0,79	0,61	9,25	15,25	3*2,5	35
Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	7	0,40	24,24	0,65	0,76	28,35	37,30	3*2,5	45
Ανεκκυστήρας	2	0,20	5,20	0,48	0,88	9,50	10,82	3*4	60
ΣΥΝΟΛΟ			121,53	0,73	0,68	109,88	165,38		
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ									
									70

Κουζίνα	2	0,30	18,00	1,00	0,00	0,00	18,00	3*10	20
Εστίες	2	0,30	12,00	1,00	0,00	0,00	12,00	3*6	25
Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα	1	0,30	1,56	0,57	0,82	2,23	2,72	3*1,5	15
Εξαεριστήρας	1	0,30	3,90	0,57	0,82	5,58	6,81	3*4	25
ΣΥΝΟΛΟ			35,46	0,90	0,44	7,82	39,53		
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			709,11	0,77	0,63	526,31	916,10		

Τα μήκη των καλωδίων στα φορτία και στους υποπίνακες φωτισμού των 115V αναφέρονται στην απόσταση αυτών από τον πίνακα τους.

Διατομές ζυγών και καλωδίων στο πλοίο generic

Είδος πίνακα	Διατομή καλωδίου (mm ²)
Επίπεδο τάσης 115 V	
Κεντρική μπάρα	3*185
Συσκευές μαγειρείου	3*6
Βοηθητικοί χώροι ενδιαίτησης	3*185
Επίπεδο τάσης 440 V	
Κεντρική μπάρα	3*300 για κάθε γεννήτρια
Βοηθητικά πρόωσης	3*150
Βοηθητικά μηχανοστασίου	3*10
Βοηθητικά σκάφους	3*70
Βοηθητικά χώρων ενδιαίτησης	1*95
Συσκευές μαγειρείου	3*16
Μετασχηματιστής 440/115 V	3*120
Έκτακτη ανάγκη	
Κεντρική μπάρα	3*150
Μετασχηματιστής 440/115 V (emergency)	3*10
Βοηθητικά πρόωσης	3*16
Βοηθητικά σκάφους	3*95
Φορτία των 115 V	3*95

A2. Τεχνικά Χαρακτηριστικά Γεννητριών



HCM634K WINDING 312

CONTROL SYSTEM	SEPARATELY EXCITED BY P.M.G.							
A.V.R.	MX321							
VOLTAGE REGULATION	± 0.5 % With 4% ENGINE GOVERNING							
SUSTAINED SHORT CIRCUIT	REFER TO SHORT CIRCUIT DECREMENT CURVES (page 7)							
INSULATION SYSTEM	CLASS H							
PROTECTION	IP23							
RATED POWER FACTOR	0.8							
STATOR WINDING	DOUBLE LAYER LAP							
WINDING PITCH	TWO THIRDS							
WINDING LEADS	6							
STATOR WDG. RESISTANCE	0.0017 Ohms PER PHASE AT 22°C STAR CONNECTED							
ROTOR WDG. RESISTANCE	2.36 Ohms at 22°C							
R.F.I. SUPPRESSION	BS EN 61000-6-2 & BS EN 61000-6-4, VDE 0875G, VDE 0875N. refer to factory for others							
WAVEFORM DISTORTION	NO LOAD < 1.5% NON-DISTORTING BALANCED LINEAR LOAD < 5.0%							
MAXIMUM OVERSPEED	2250 Rev/MIn							
BEARING DRIVE END	BALL. 6224 (ISO)							
BEARING NON-DRIVE END	BALL. 6317 (ISO)							
	1 BEARING				2 BEARING			
WEIGHT COMP. GENERATOR	2541 kg				2581 kg			
WEIGHT WOUND STATOR	1294 kg				1294 kg			
WEIGHT WOUND ROTOR	1093 kg				1408 kg			
WR ² INERTIA	26.5295 kgm ²				25.9823 kgm ²			
SHIPPING WEIGHTS in a crate	2601 kg				2622 kg			
PACKING CRATE SIZE	194 x 92 x 147(cm)				194 x 92 x 147(cm)			
	50 Hz				60 Hz			
TELEPHONE INTERFERENCE	THF<2%				TIF<50			
COOLING AIR	1.614 m ³ /sec 3420 cfm				1.961 m ³ /sec 4156 cfm			
VOLTAGE SERIES STAR	380/220	400/231	415/240	440/254	416/240	440/254	460/266	480/277
KVA BASE RATING FOR REACTANCE VALUES	930	950	970	970	1150	1200	1238	1275
X _d DIR. AXIS SYNCHRONOUS	2.33	2.15	2.04	1.81	2.89	2.69	2.54	2.40
X' _d DIR. AXIS TRANSIENT	0.18	0.17	0.17	0.15	0.23	0.22	0.21	0.20
X'' _d DIR. AXIS SUBTRANSIENT	0.13	0.12	0.11	0.10	0.16	0.15	0.14	0.13
X _q QUAD. AXIS REACTANCE	1.37	1.26	1.20	1.06	1.70	1.58	1.49	1.41
X'' _q QUAD. AXIS SUBTRANSIENT	0.19	0.18	0.17	0.15	0.24	0.22	0.21	0.20
X _l LEAKAGE REACTANCE	0.07	0.06	0.05	0.05	0.08	0.07	0.07	0.06
X ₂ NEGATIVE SEQUENCE	0.18	0.17	0.17	0.15	0.23	0.22	0.21	0.20
X ₀ ZERO SEQUENCE	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
REACTANCES ARE SATURATED				VALUES ARE PER UNIT AT RATING AND VOLTAGE INDICATED				
T' _d TRANSIENT TIME CONST.	0.185 s							
T'' _d SUB-TRANSTIME CONST.	0.025 s							
T' _{do} O.C. FIELD TIME CONST.	3.4s							
T _a ARMATURE TIME CONST.	0.049 s							
SHORT CIRCUIT RATIO	1/X _d							

Γεννήτρια κανονικής κατάστασης λειτουργίας

HCM434E
WINDING 311

STAMFORD

CONTROL SYSTEM	SEPARATELY EXCITED BY P.M.G.							
A.V.R.	MX321	MX341						
VOLTAGE REGULATION	± 0.5 %	± 1.0 %	With 4% ENGINE GOVERNING					
SUSTAINED SHORT CIRCUIT	REFER TO SHORT CIRCUIT DECREMENT CURVES (page 7)							
INSULATION SYSTEM	CLASS H							
PROTECTION	IP23							
RATED POWER FACTOR	0.8							
STATOR WINDING	DOUBLE LAYER LAP							
WINDING PITCH	TWO THIRDS							
WINDING LEADS	12							
STATOR WDG. RESISTANCE	0.009 Ohms PER PHASE AT 22°C SERIES STAR CONNECTED							
ROTOR WDG. RESISTANCE	1.19 Ohms at 22°C							
EXCITER STATOR RESISTANCE	18 Ohms at 22°C							
EXCITER ROTOR RESISTANCE	0.068 Ohms PER PHASE AT 22°C							
R.F.I. SUPPRESSION	BS EN 61000-6-2 & BS EN 61000-6-4,VDE 0875G, VDE 0875N. refer to factory for others							
WAVEFORM DISTORTION	NO LOAD < 1.5% NON-DISTORTING BALANCED LINEAR LOAD < 5.0%							
MAXIMUM OVERSPEED	2250 Rev/Min							
BEARING DRIVE END	BALL. 6317 (ISO)							
BEARING NON-DRIVE END	BALL. 6314 (ISO)							
	1 BEARING				2 BEARING			
WEIGHT COMP. GENERATOR	1024 kg				1030 kg			
WEIGHT WOUND STATOR	470 kg				470 kg			
WEIGHT WOUND ROTOR	400 kg				377 kg			
WR ² INERTIA	4.6331 kgm ²				4.4343 kgm ²			
SHIPPING WEIGHTS In a crate	1095 kg				1100 kg			
PACKING CRATE SIZE	155 x 87 x 107(cm)				155 x 87 x 107(cm)			
	50 Hz				60 Hz			
TELEPHONE INTERFERENCE	THF<2%				TIF<50			
COOLING AIR	0.80 m ³ /sec 1700 cfm				0.99 m ³ /sec 2100 cfm			
VOLTAGE SERIES STAR	380/220	400/231	415/240	440/254	416/240	440/254	460/266	480/277
VOLTAGE PARALLEL STAR	190/110	200/115	208/120	220/127	208/120	220/127	230/133	240/138
VOLTAGE SERIES DELTA	220/110	230/115	240/120	254/127	240/120	254/127	266/133	277/138
KVA BASE RATING FOR REACTANCE VALUES	295	295	295	295	340	350	365	370
X _d DIR. AXIS SYNCHRONOUS	2.53	2.29	2.12	1.89	2.95	2.71	2.59	2.41
X' _d DIR. AXIS TRANSIENT	0.17	0.15	0.14	0.13	0.18	0.16	0.16	0.15
X'' _d DIR. AXIS SUBTRANSIENT	0.12	0.11	0.10	0.09	0.13	0.12	0.11	0.10
X _q QUAD. AXIS REACTANCE	2.17	1.96	1.82	1.62	2.48	2.28	2.18	2.03
X' _q QUAD. AXIS SUBTRANSIENT	0.30	0.27	0.25	0.22	0.35	0.32	0.31	0.28
X _L LEAKAGE REACTANCE	0.06	0.05	0.05	0.04	0.07	0.06	0.06	0.06
X ₂ NEGATIVE SEQUENCE	0.20	0.18	0.17	0.15	0.24	0.22	0.21	0.19
X ₀ ZERO SEQUENCE	0.08	0.07	0.07	0.06	0.09	0.08	0.07	0.07
REACTANCES ARE SATURATED VALUES ARE PER UNIT AT RATING AND VOLTAGE INDICATED								
T _d TRANSIENT TIME CONST.	0.08s							
T' _d SUB-TRANSTIME CONST.	0.019s							
T _{do} O.C. FIELD TIME CONST.	1.7s							
T _a ARMATURE TIME CONST.	0.018s							
SHORT CIRCUIT RATIO	1/X _d							

Γεννήτρια κατάστασης εκτάκτου ανάγκης

A3. Τεχνικά χαρακτηριστικά καλωδίων

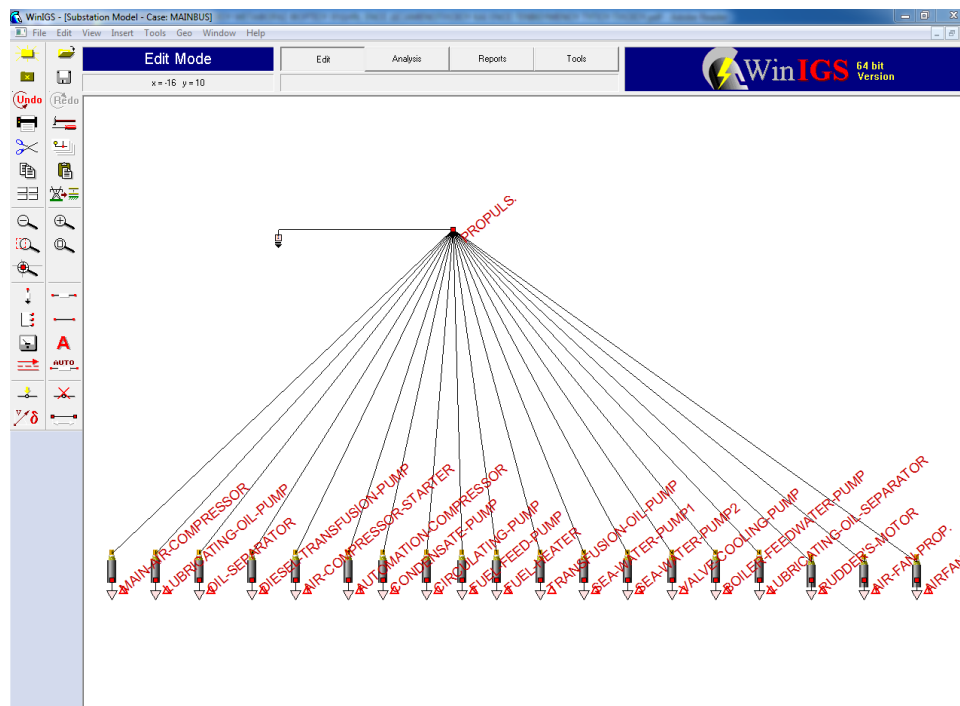
Conductor		Thickness of inner covering (lapped)	Nominal dia. Of inner covering	Dia. Of wire for armour	DC Conductor Resistance (at 20°C)	AC Conductor Resistance (at 90°C)	Cable Weight
Nominal area	Thickness of insulation						
mm ²	mm	mm	mm	mm	Ω/km	Ω/km	Kg/km
1	0.7	0.4	6.2	0.2	15.45	18.1	130
1.5	0.7	0.4	6.9	0.2	9.46	12.1	150
2.5	0.7	0.4	7.7	0.2	5.87	7.41	190
4	0.7	0.4	9.0	0.2	3.93	4.61	260
6	0.7	0.4	10.0	0.2	2.32	3.08	330
10	0.7	0.4	12.3	0.3	1.45	1.83	520
16	0.7	0.4	14.4	0.3	0.933	1.15	730
25	0.9	0.4	18.1	0.3	0.675	0.727	1110
35	0.9	0.4	20.7	0.3	0.494	0.524	1460
50	1.0	0.4	23.9	0.3	0.341	0.387	1900
70	1.1	0.4	28.2	0.3	0.246	0.268	2650
95	1.1	0.4	32.3	0.4	0.195	0.193	3640
120	1.2	0.4	36.2	0.4	0.159	0.153	4490
150	1.4	0.6	40.9	0.4	0.127	0.124	5510
185	1.6	0.6	45.6	0.4	0.0971	0.0991	6820
240	1.7	0.6	51.9	0.4	0.0774	0.0754	8770

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

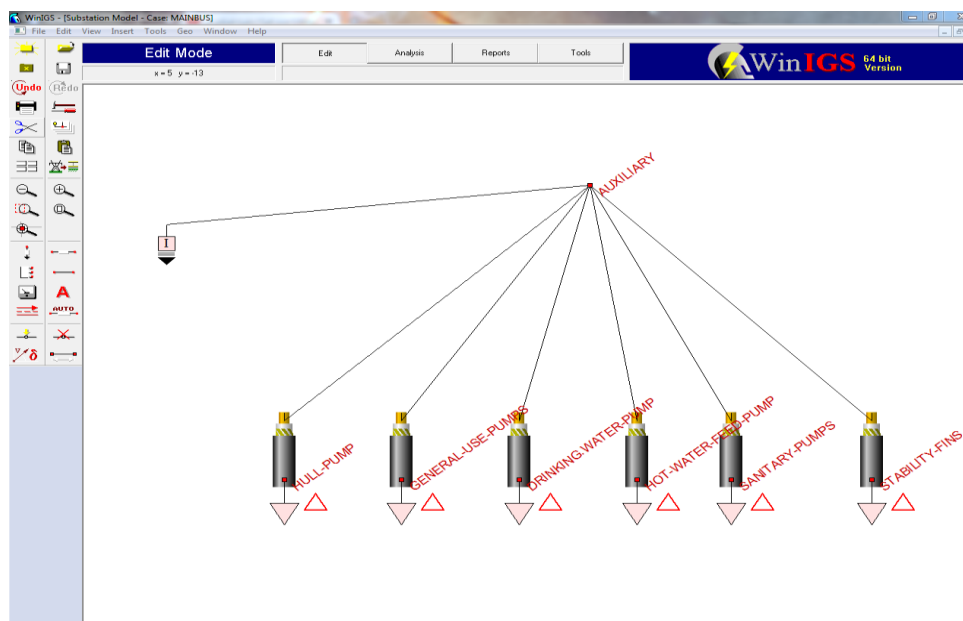
Ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου

Β1. Αγείο σύστημα

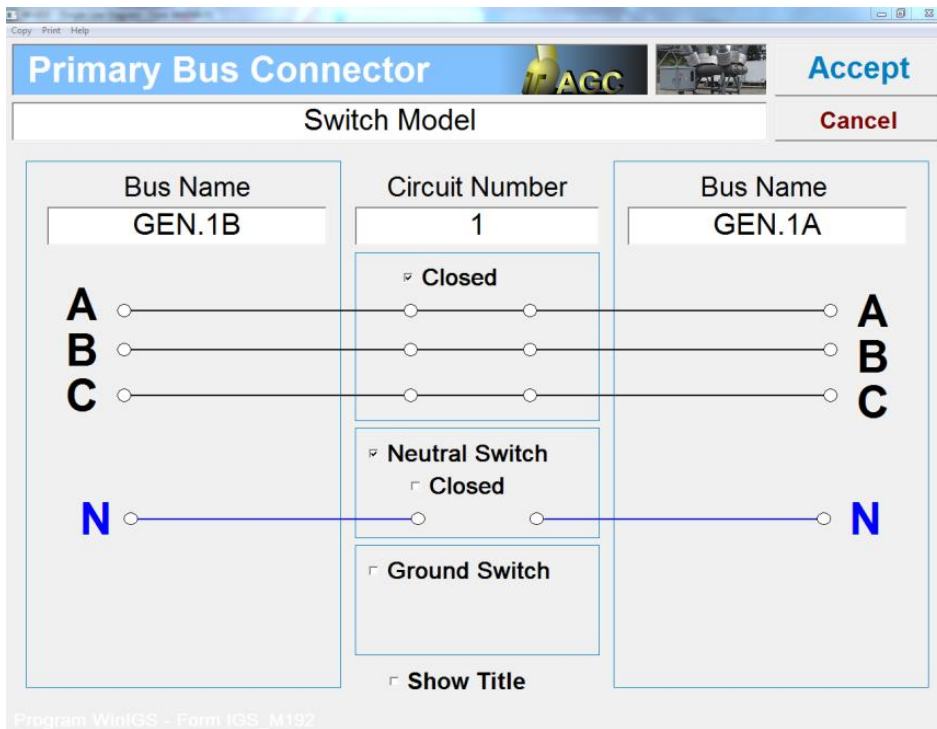
Α) Κατάσταση κανονικής πορείας πλοίου



Σχήμα Β1.1 Φορτία βοηθητικών πρόωσης 440V

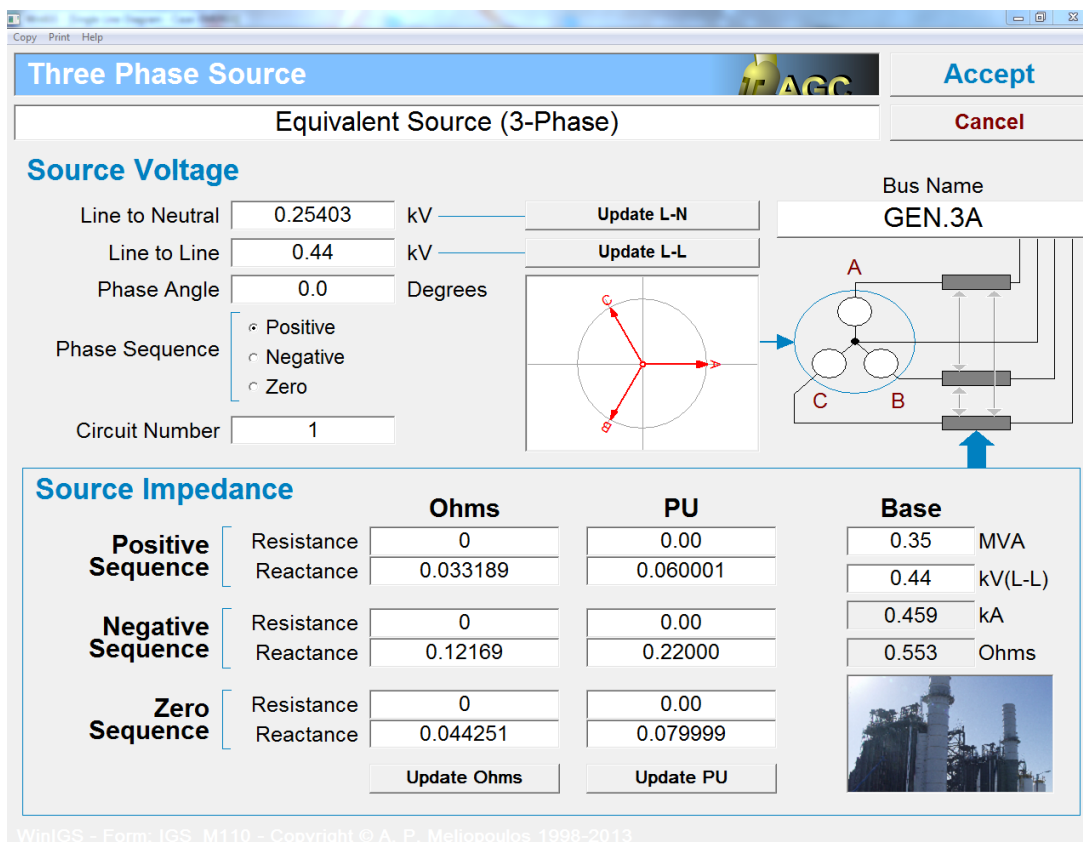


Σχήμα Β1.2 Φορτία βοηθητικών σκάφους 440V



Σχήμα B1.3 Διακόπτης στην κύρια γεννήτρια

B) Κατάσταση εκτάκτου ανάγκης



Σχήμα B1.4 Γεννήτρια έκτακτης ανάγκης

3-Phase Transformer **TRACC** **Cancel** **Accept**

Transformer (2-Winding, 3-Phase)

Side 1 Bus: EMRG440V, 0.44 kV, Delta Wye

Side 2 Bus: EMERG115V, 0.115 kV, Delta Wye

Phase Connection: Standard Alternate

Transformer Rating (MVA): 0.04, Winding Resistance (pu): 0.01, Leakage Reactance (pu): 0.1, Nominal Core Loss (pu): 0.005, Nominal Magnetizing Current (pu): 0.005, Tap Setting (pu): 1.0, Minimum (pu): 1.0, Maximum (pu): 1.0, Number of Taps: 1, Circuit Number: 1

WinIGS - Form: IGS_M104 - Copyright © A. P. Meliopoulos 1998-2013

Σχήμα B1.5 Μετασχηματιστής έκτακτης ανάγκης

Three Phase Electric Load **TRACC** **Cancel** **Accept**

Load (Constant Impedance, 3-Phase)

Bus Name: LIFEBOAT-WINCHES, Circuit Number: 1

Connection: Delta Wye

Rated Voltage: 0.44 L-L, kV, Total Real Power: 69.27 kW, Total Reactive Power: 10.0 kVAr

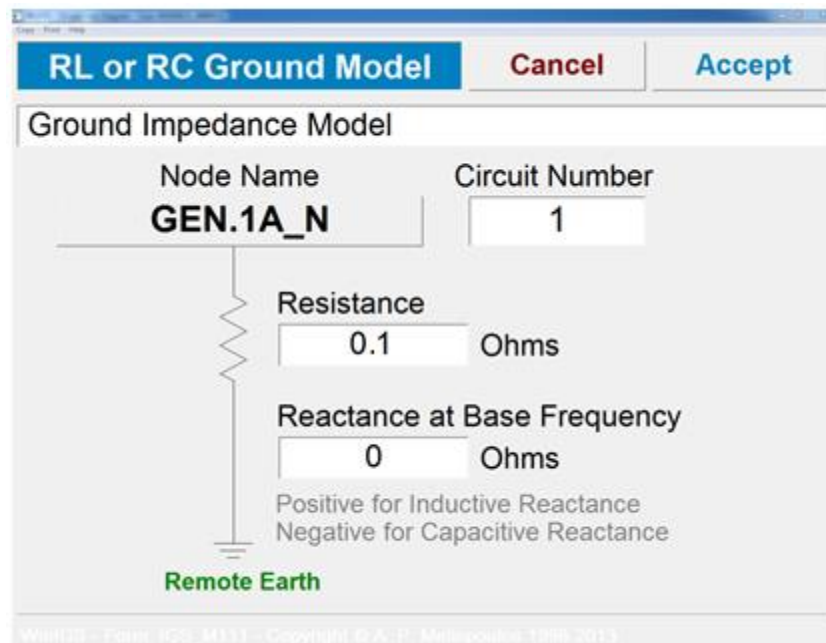
Positive for Inductive Reactive Power
Negative for Capacitive Reactive Power

Program WinIGS - Form IGS_M136

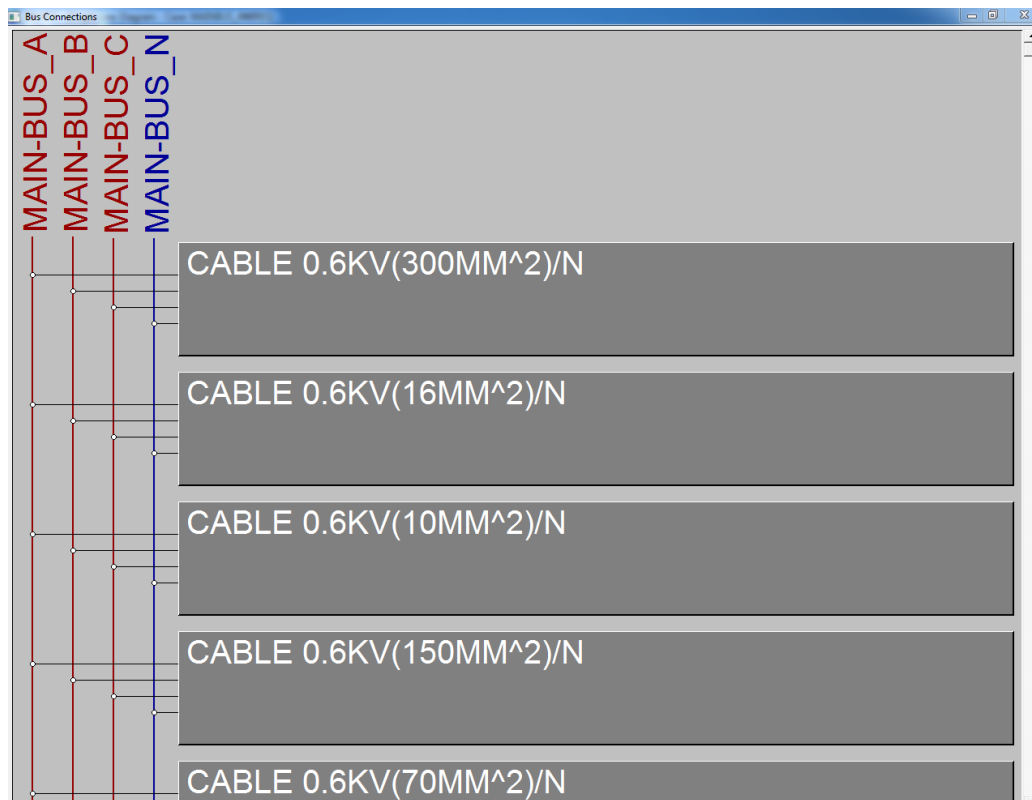
Σχήμα B1.6 Φορτίο σε συνδεσμολογία τριγώνου

B2. Γειωμένο σύστημα

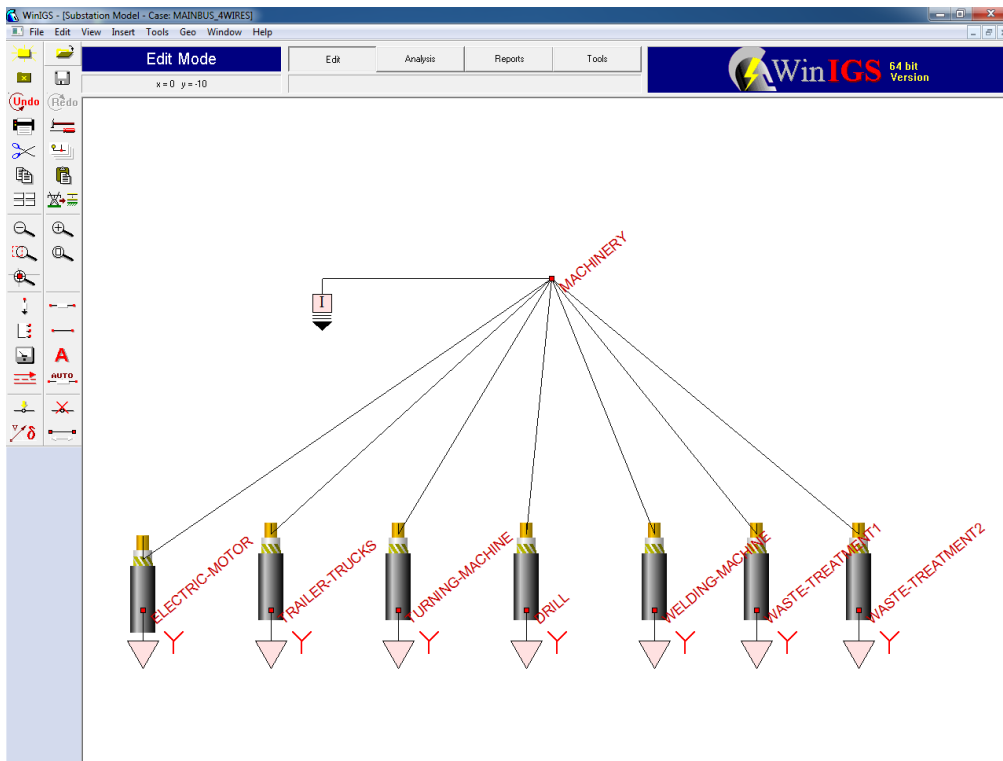
A) Κατάσταση κανονικής πορείας πλοίου



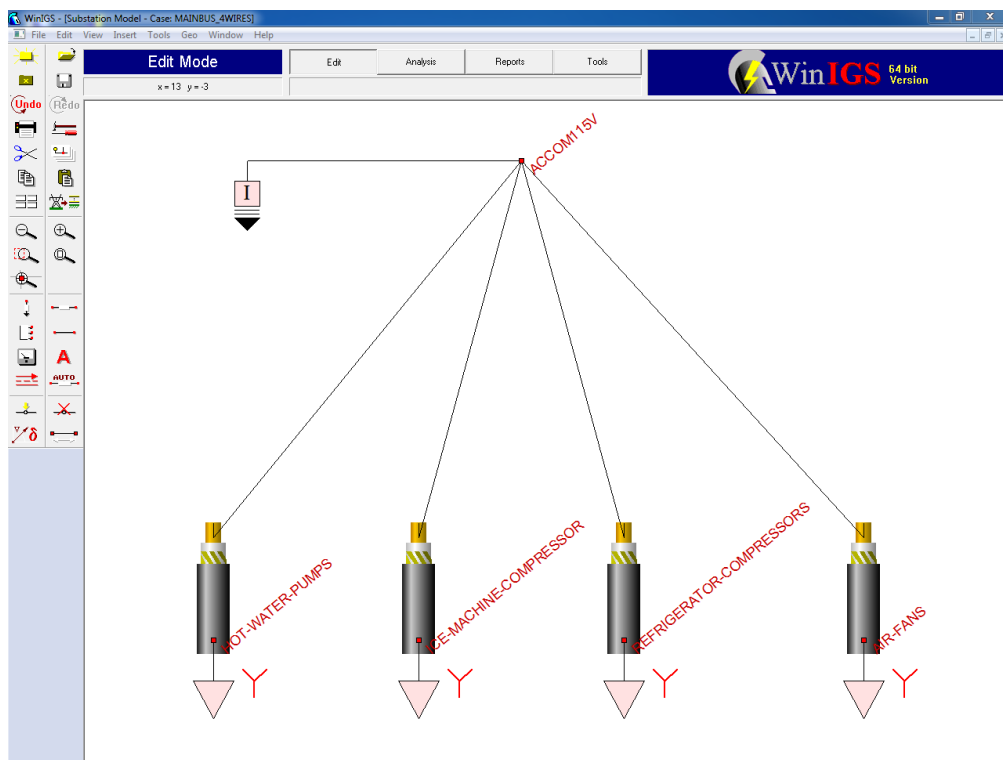
Σχήμα B2.1 Γείωση ουδέτερου γεννήτριας



Σχήμα B2.2 Σύνδεση καλωδίων στον κύριο ζυγό



Σχήμα B2.3 Φορτία βοηθητικών μηχανοστασίου 440V



Σχήμα B2.4 Φορτία χώρων ενδιαίτησης 115V

B) Κατάσταση εκτάκτου ανάγκης

Three Phase Electric Load TRACC Cancel Accept

Load (Constant Impedance, 3-Phase)

Bus Name: **RUDDER-ACTUATOR**

Circuit Number: 1

Connection: Delta Wye

Rated Voltage: 0.44 L-L, kV

Total Real Power: 30.31 kW

Total Reactive Power: 17.98 kVAr

Positive for Inductive Reactive Power
Negative for Capacitive Reactive Power

Program WinIGS - Form IGS_M136

Σχήμα B2.5 Φορτίο σε συνδεσμολογία αστέρα

Multiphase Cable Model TRACC Cancel Accept

CABLE 0.6KV(120MM²)/N

440V 0.6KV(120MM²)/N MAIN-BUS

Zoom Page
Edit
Copy
Delete
New Cable
New Conductor

Cable Length (m): 35.0
Get From GIS
Soil Resistivity Ohm-meters: 999999
Node Assign
Read GPS File
Modal Analysis
Segmentation
Freq: 60.0 Hz

	Circuit Name	Span Length (meters)	Ground Resistance (Ohms)	Operating Voltage (kV)
1	CKT1	35.0	999999.0000	0.4400
2				
3				
4				

WinIGS - Form: IGS_M123_1 - Copyright © A. P. Meliopoulos 1998-2013

Σχήμα B2.6 Τριφασικό καλώδιο με ουδέτερο αγωγό

Γ) Ισοδύναμο ηλεκτρικό δίκτυο με γεννήτριες

Three Phase Source Accept

Equivalent Source (3-Phase) Cancel

Source Voltage

Line to Neutral: 0.25403 kV Update L-N

Line to Line: 0.44 kV Update L-L

Phase Angle: 0 Degrees

Phase Sequence: Positive
 Negative
 Zero

Circuit Number: 1

Bus Name: **ACCOMODAT**

Source Impedance

	Ohms	PU	Base
Positive Sequence	Resistance: 0.065712	0.055000	0.16204 MVA
	Reactance: 0.17922	0.15000	0.44 kV(L-L)
Negative Sequence	Resistance: 0.065712	0.055000	0.213 kA
	Reactance: 0.17922	0.15000	1.195 Ohms
Zero Sequence	Resistance: 0.032856	0.0275	
	Reactance: 0.089608	0.075	

Update Ohms Update PU

WinIGS - Form: IGS_M110 - Copyright © A. P. Meliopoulos 1998-2013

Σχήμα Γ1.1 Ισοδύναμη γεννήτρια βοηθητικών χώρων ενδιαίτησης 440V

Three Phase Source Accept

Equivalent Source (3-Phase) Cancel

Source Voltage

Line to Neutral: 0.066395 kV Update L-N

Line to Line: 0.115 kV Update L-L

Phase Angle: 0.0 Degrees

Phase Sequence: Positive
 Negative
 Zero

Circuit Number: 1

Bus Name: **SEC-BUS**

Source Impedance

	Ohms	PU	Base
Positive Sequence	Resistance: 0.012431	0.07	0.07447 MVA
	Reactance: 0.033387	0.18800	0.115 kV(L-L)
Negative Sequence	Resistance: 0.012431	0.07	0.374 kA
	Reactance: 0.033387	0.18800	0.178 Ohms
Zero Sequence	Resistance: 0.0062156	0.035000	
	Reactance: 0.016693	0.093998	

Update Ohms Update PU

WinIGS - Form: IGS_M110 - Copyright © A. P. Meliopoulos 1998-2013

Σχήμα Γ1.2 Ισοδύναμη γεννήτρια για τα φορτία 115V