

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

**Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την  
απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.**



**Φοιτητής: Ξενοπούλου Μαργαρίτα**  
**ΑΜ: 51204250**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**Γεώργιος Ι. Τσεκούρας**  
**Επίκουρος Καθηγητής του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών**

**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Ιούλιος 2021**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

### **Design principles for port's power system with cold ironing**



**Student: Xenopoulou Margarita**  
**Registration Number: 51204250**

**Supervisor**

**George J. Tsekouras**  
**Assistant-Professor in the Department of Electrical and Electronics Engineering**

**ATHENS-EGALEO, (July) (2021)**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Τσεκούρας Γεώργιος Ι. Επίκουρος Καθηγητής	Π. Σινιόρος Καθηγητής	Ν. Μανουσάκης Επίκουρος Καθηγητής

**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**Ξενοπούλου Μαργαρίτα, Ιούλιος, 2021**

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

### **ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπόγραφα ότι η παρούσα εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα αποκλειστικά και ότι είμαι ο αποκλειστικός συγγραφέας του κειμένου της.

Η εργασία μου δεν προσβάλλει οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας ή προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής ή λογοκλοπής.

Κάθε βοήθεια που έλαβα για την ολοκλήρωση της εργασίας είναι αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στο κείμενό της. Ειδικότερα, έχω αναφέρει ευδιάκριτα μέσα στο κείμενο και με την κατάλληλη παραπομπή όλες τις πηγές δεδομένων, κώδικα προγραμματισμού Η/Υ, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών που χρησιμοποιήθηκαν, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης, και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Επιπλέον, όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης κατά τα διεθνή πρότυπα.

Τέλος δηλώνω ενυπόγραφα ότι αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ημερομηνία: 9-7-2021  
Ξενοπούλου Μαργαρίτα



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Πρώτα από όλα θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον καθηγητή μου κ. Τσεκούρα Γεώργιο, ο οποίος από την πρώτη στιγμή δεν έχει σταματήσει να με εμπνέει και να με βοηθάει να διευρύνω το πεδίο των γνώσεων μου. Επιπλέον θέλω να τον ευχαριστήσω θερμά για το ενδιαφέρον, την υπομονή, την αφοσίωση και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την διεξαγωγή της διπλωματικής αυτής εργασίας, αξίες που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω και σε όλους τους καθηγητές που είχα όλα τα χρόνια της μέχρι τώρα ακαδημαϊκής μου ζωής, για τις εμπειρίες και τις γνώσεις που μου μετέδωσαν και με έκαναν καλύτερο άνθρωπο. Ειδικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Π. Σινιόρο, καθηγητή και τον κ. Ν. Μανουσάκη, επίκουρο καθηγητή για τη συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή εξέτασης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θέλω να εκφράσω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, για την στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου. Πέραν όμως από ότι ήταν συνέχεια στο πλευρό μου, μου έδωσαν και όλα τα εφόδια ώστε να γίνω ένας σωστός Άνθρωπος και αυτό είναι κάτι που δεν μαθαίνεται, αλλά μεταδίδεται.

**Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη  
στους γονείς μου Φωτεινή και Αντώνη**

## Περίληψη

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναλύεται η μέθοδος τροφοδότησης ελλιμενισμένων πλοίων, μέσω των ειδικά διαμορφωμένων ηλεκτρικών εγκαταστάσεων λιμανιών. Αρχικά παρουσιάζεται η συνεισφορά των πλοίων στη μόλυνση του φυσικού περιβάλλοντος, λόγω των επιβλαβών αερίων ρύπων που εκπέμπουν και η ανάγκη που υπάρχει να περιοριστεί το φαινόμενο αυτό. Στη συνέχεια γίνεται λεπτομερής ανάλυση της δομής και των τεχνικών χαρακτηριστικών των στοιχείων της νέας τεχνολογίας που σχετίζεται με τη ψυχρή εκκίνηση πλοίων και επιπλέον παρατίθεται η πλήρης μεθοδολογία προμελέτης μιας τέτοιας εγκατάστασης. Η μελέτη αυτή περιέχει συγκεκριμένα την περιγραφή της διαστασιολόγησης των ηλεκτρικών καλωδίων, τον προσδιορισμό των διατάξεων προστασίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και το πλήρες μαθηματικό υπόβαθρο που αξιοποιείται για να υλοποιηθεί η εγκατάσταση αυτή. Έτσι ως παράδειγμα η διπλωματική αυτή εφαρμόζει τη μεθοδολογία προμελέτης, αρχικά σε ένα τυπικό ντιζελοκίνητο πλοίο, ώστε να διαμορφωθεί πλήρως η διάταξη του ηλεκτρικού του δικτύου και να καταγραφούν οι ενεργειακές του απαιτήσεις. Ακολούθως η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται πιο λεπτομερής για το τυπικό ευρωπαϊκό λιμάνι του Ταλίν, για το οποίο έχουν συλλεχθεί πραγματικά δεδομένα διάταξης και λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο και μέσω του κώδικα που γράφτηκε στο προγραμματιστικό πακέτο Matlab, πραγματοποιείται η εκτίμηση των βασικών παραμέτρων σχεδιασμού, όπως είναι οι απαιτήσεις ισχύος, τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού των υποσταθμών, τα μέγιστα επιτρεπόμενα ρεύματα των καλωδίων κλπ. Τέλος με βάση τα στοιχεία που προέκυψαν από τους υπολογισμούς και τα αντίστοιχα πρότυπα σχεδιασμού παρουσιάζεται η τεχνική περιγραφή της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης πλοίων, ειδικά για το υπό μελέτη λιμάνι του Ταλίν.

## Λέξεις – κλειδιά

σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης, ψυχρή εκκίνηση, διατάξεις διασύνδεσης πλοίου – ξηράς, διαστασιολόγηση καλωδίων, διατάξεις προστασίας, τριφασικά βραχυκυκλώματα, πτώση τάσης, κώδικας Matlab

## **Abstract**

This diploma thesis presents the innovative method of cold ironing in ships, through the specially designed electrical installations of ports. Initially, the contribution of ships as for the pollution of the natural environment is being analyzed, on the occasion of the need that exists to limit this phenomenon. Then a detailed analysis is made of the structure and technical characteristics of the elements of the new technology related to the cold ironing in ships. Based on that analysis, the complete pre-design methodology of such an installation is presented. In particular this study contains the description of the dimensioning of the electrical cables, the determination of the protection devices of the power systems and the complete mathematical background that is required. Thus, as an example, this diploma applies the pre-design methodology, initially on a typical diesel-powered ship, in order to fully configure the layout of its electrical network and to record its energy requirements. The same procedure is then repeated for the typical European port of Tallinn, for which actual layout and operation data have been collected. In this way with the use of the Matlab program, the evaluation of the basic design parameters is calculated. Such parameters are the power requirements, the characteristics of the substation equipment, the maximum permissible currents of the cables, etc. Finally, based on the data obtained from the calculations and the design standards, the technical description of the electrical installation of cold ironing is presented, especially for the under study port of Tallinn.

## **Keywords**

electrical propulsion system, cold ironing installation, equipment of shore – ship connection , cable dimensioning, power protection systems, three-phase short circuits, voltage drop, Matlab

## Περιεχόμενα

<b>Κατάλογος Πινάκων .....</b>	<b>11</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων.....</b>	<b>12</b>
<b>Αλφαβητικό Ευρετήριο .....</b>	<b>17</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>18</b>
<b>Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....</b>	<b>18</b>
<b>Σκοπός και στόχοι .....</b>	<b>18</b>
<b>Μεθοδολογία.....</b>	<b>18</b>
<b>Δομή.....</b>	<b>19</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Εισαγωγικά στοιχεία του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης πλοίου.....</b>	<b>21</b>
<b>1.1 Εισαγωγή στη σχεδίαση συστημάτων πρόωσης &amp; συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων .....</b>	<b>21</b>
<b>1.2 Ηλεκτρική πρόωση.....</b>	<b>25</b>
<b>1.3 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....</b>	<b>30</b>
<b>1.4 Φορτία πρόωσης και ηλεκτρικών καταναλώσεων.....</b>	<b>35</b>
<b>1.5 Περιβαλλοντικές απαιτήσεις κατά IMO.....</b>	<b>37</b>
<b>1.6 Η έννοια της ψυχρής εκκίνησης .....</b>	<b>41</b>
<b>1.7 Τυποποίηση της ψυχρής εκκίνησης .....</b>	<b>42</b>
<b>1.8 Τεχνικά χαρακτηριστικά κατά την τυποποίηση της ψυχρής εκκίνησης .....</b>	<b>44</b>
<b>1.9 Προτεινόμενη δομή της διάταξης ψυχρής εκκίνησης κατά την Ευρωπαϊκή Ένωση .....</b>	<b>45</b>
<b>1.10 Το πρόβλημα του αγείωτου δικτύου πλοίου και του γειωμένου ξηράς .....</b>	<b>46</b>
<b>1.11 Εξοπλισμός ξηράς για ψυχρή εκκίνηση πλοίων .....</b>	<b>50</b>
<b>1.11.1 Μετασηματιστής .....</b>	<b>51</b>
<b>1.11.2 Μετατροπέας.....</b>	<b>52</b>
<b>1.11.3 Αυτόματος διακόπτης ισχύος – Σύστημα προστασίας .....</b>	<b>53</b>
<b>1.11.4 Καλώδια και αγωγοί .....</b>	<b>55</b>
<b>1.11.5 Αλληροασφαλίσεις – Διατάξεις διασύνδεσης.....</b>	<b>56</b>
<b>1.11.6 Πυκνωτές για αντιστάθμιση ισχύος.....</b>	<b>59</b>
<b>1.11.7 Φίλτρα αρμονικών ταλαντώσεων.....</b>	<b>60</b>
<b>1.12 Εξοπλισμός πλοίου για την ψυχρή εκκίνηση .....</b>	<b>62</b>
<b>1.12.1 Διατάξεις διανομής μετασηματισμού και παραλληλισμού ηλεκτρικής ενέργειας .....</b>	<b>62</b>
<b>1.12.2 Διατάξεις εύκαμπτων καλωδίων διασύνδεσης με ρευματοδότες .....</b>	<b>63</b>
<b>1.13 Αναγκαίες τεχνικές μελέτες.....</b>	<b>64</b>
<b>1.14 Ενδεικτικές εγκαταστάσεις.....</b>	<b>66</b>
<b>1.15 Πρόσθετα προβλήματα σε μικρά αυτόνομα νησιά.....</b>	<b>67</b>
<b>1.16 Συμπεράσματα.....</b>	<b>68</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Εκτίμηση ζήτησης φορτίου .....</b>	<b>69</b>
<b>2.1 Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και ισχύος .....</b>	<b>69</b>
<b>2.1.1 Εισαγωγή .....</b>	<b>69</b>
<b>2.1.2 Ανάλυση ηλεκτρικού φορτίου .....</b>	<b>70</b>
<b>2.1.3 Καμπύλες φορτίου .....</b>	<b>71</b>
<b>2.1.4 Τυποποιημένες – Ανοιγμένες καμπύλες φορτίου .....</b>	<b>75</b>
<b>2.2 Ετεροχρονισμός – Ταυτοχρονισμός και καταγραφή διαφόρων ειδών φορτίων .....</b>	<b>75</b>
<b>2.3 Μεθοδολογίες πρόβλεψης φορτίου .....</b>	<b>81</b>
<b>2.4 Συμπεράσματα.....</b>	<b>83</b>



<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Αρχές διαστασιολόγησης καλωδίων .....</b>	<b>84</b>
3.1 Εισαγωγή στα βασικά κριτήρια διαστασιολόγησης ηλεκτρικών καλωδίων .....	84
3.2 Παράγοντες που προσδιορίζουν το μέγιστο διαρκώς επιτρεπόμενο θερμικό ρεύμα .....	84
3.3 Μέγιστο επιτρεπόμενο θερμικό ρεύμα σε καλώδια και αγωγούς εγκαταστάσεων χαμηλής και μέσης τάσης .....	86
3.4 Μεταβαλλόμενη και βραχυχρόνια υπερφόρτιση αγωγών .....	88
3.5 Επιτρεπόμενο ρεύμα σε βραχυκύκλωμα αγωγών .....	90
3.6 Διαστασιολόγηση καλωδίων με βάση την επιτρεπόμενη μέγιστη πτώση τάσης .....	91
3.7 Επιλεκτική προστασία .....	93
3.8 Ευστάθεια .....	94
3.9 Συμπεράσματα .....	98
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Διατάξεις προστασίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας .....</b>	<b>99</b>
4.1 Εισαγωγή στη σχεδίαση συστημάτων πρόωσης και συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων .....	99
4.2 Προστασία υπερεντάσεως .....	100
4.3 Προστασία γραμμών με H/N αποστασέως .....	103
4.4 Διαφορική προστασία γραμμών.....	103
4.5 Προστασία μετασχηματιστών.....	108
4.6 Προστασία γεννητριών.....	110
4.7 Προστασία κινητήρων.....	114
4.8 Προστασία ζυγών, πηνίων και πυκνωτών.....	116
4.9 Συμπεράσματα.....	118
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Υπολογιστικό υπόβαθρο συστημάτων ηλεκτρικών συστημάτων υπό συνθήκες σφαλμάτων.....</b>	<b>120</b>
5.1 Σκοπός και ρόλος της προστασίας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....	120
5.1.1 Εισαγωγή.....	120
5.1.2 Βασικές αρχές και στοιχεία προστασίας.....	121
5.1.3 Διάκριση ειδών σφαλμάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....	121
5.2 <b>Συμμετρικά βραχυκυκλώματα.....</b>	<b>126</b>
5.2.1 Εισαγωγή.....	126
5.2.2 Συμπεριφορά ηλεκτρογεννήτριας σε συμμετρικό βραχυκύκλωμα.....	127
5.2.3 Βραχυκυκλώματα δικτύου.....	132
5.2.4 Μελέτες βραχυκυκλωμάτων μεγάλων δικτύων.....	134
5.3 <b>Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα.....</b>	<b>136</b>
5.3.1 Εισαγωγή.....	136
5.3.2 Ισοδύναμα κυκλώματα τριφασικών δικτύων.....	137
5.3.3 Συμμετρικές συνιστώσες.....	141
5.3.4 Αντιστάσεις ακολουθίας.....	145
5.3.5 Ασύμμετρα σφάλματα.....	146
5.3.6 Σχέσεις μεταξύ μεγεθών γραμμής και μεγεθών τυλιγμάτων αστέρα & τριγώνου.....	151
5.4 <b>Το σύστημα μετασχηματισμού Clarke.....</b>	<b>152</b>
5.4.1 Εισαγωγή.....	152
5.4.2 Μετασχηματισμός Clarke.....	153
5.4.3 Κυκλώματα ακολουθίας.....	156
5.4.4 Ανάλυση σφαλμάτων.....	157
5.5 <b>Υπολογισμοί κατά IEC 60909-0.....</b>	<b>160</b>
5.5.1 Ορισμοί.....	160
5.5.2 Βασική υπολογιστική διαδικασία.....	162
5.5.3 Σύνθετες αντιστάσεις στοιχείων.....	166
5.6 <b>Υπολογισμοί κατά IEC 61363.....</b>	<b>167</b>
5.7 <b>Ειδικά θέματα επίδρασης ρευμάτων βραχυκύκλωσης και τάσεων ανοικτοκύκλωσης.....</b>	<b>170</b>
5.8 <b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>173</b>

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : Μελέτη Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας Λιμανιού με Σύστημα Ψυχρής Εκκίνησης Ελλιμενιζόμενων Πλοίων.....</b>	<b>174</b>
<b>6.1 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λιμανιού.....</b>	<b>174</b>
<b>6.2 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας – τεχνικά χαρακτηριστικά πλοίων.....</b>	<b>180</b>
6.2.1 Εισαγωγή.....	180
6.2.2 Τυπικό κρουαζιερόπλοιο.....	181
6.2.3 Τυπικό φορτηγό πλοίο εμπορευματοκιβωτίων.....	184
6.2.4 Τυπικό φορτηγό πλοίο bulk.....	186
6.2.5 Τυπικό οχηματαγωγό πλοίο.....	187
6.2.6 Τυπικό φορτηγό πλοίο μεταφοράς πετρελαίου.....	188
<b>6.3 Ανάλυση ενεργειακής ζήτησης για διάφορες καταστάσεις ελλιμενισμού.....</b>	<b>190</b>
<b>6.4 Καταγραφή φορτίων – Ενεργειακός ισολογισμός.....</b>	<b>197</b>
<b>6.5 Διαμόρφωση κύριου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....</b>	<b>197</b>
<b>6.6 Καταγραφή φορτίων έκτακτης ανάγκης – Ενεργειακός ισολογισμός και διαμόρφωση συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έκτακτης ανάγκης.....</b>	<b>203</b>
<b>6.7 Έλεγχος συντελεστή ισχύος.....</b>	<b>213</b>
<b>6.8 Διαστασιολόγηση καλωδίων &amp; επιλογή διακοπτικών και προστατευτικών διατάξεων.....</b>	<b>230</b>
<b>6.9 Ανάπτυξη μονογραμμικού διαγράμματος.....</b>	<b>257</b>
<b>6.10 Συμπεράσματα.....</b>	<b>260</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> : Γενικά Συμπεράσματα &amp; Περιοχές για Περαιτέρω Έρευνα.....</b>	<b>261</b>
<b>7.1 Γενικά Συμπεράσματα.....</b>	<b>261</b>
<b>7.2 Περιοχές για Περαιτέρω Έρευνα.....</b>	<b>262</b>
<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....</b>	<b>264</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Τυποποιημένοι πίνακες εταιρειών προς ευρεση τεχνικών χαρακτηριστικών των στοιχείων της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης.....</b>	<b>267</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Παρουσίαση των υπολογισμών της τρέχουσας μελέτης σε μορφή κώδικα του προγράμματος MatLab.....</b>	<b>275</b>

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Καταγραφή βοηθητικών μηχανημάτων πρόωσης πλοίου. [2].....	77
Πίνακας 2.2 : Καταγραφή βοηθητικών μηχανημάτων στους χώρους διανομής του πλοίου. [2].....	78
Πίνακας 2.3 : Καταγραφή βοηθητικών μηχανημάτων σκάφους. [2].....	79
Πίνακας 2.4 : Μεθοδολογίες πρόβλεψης ηλεκτρικού φορτίου εγκατάστασης. [2].....	82
Πίνακας 3.1 : Μέγιστες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες σε αγωγούς καλωδίων για διάφορα μονωτικά. [19].....	85
Πίνακας 3.2: Μέγιστο συνεχώς επιτρεπόμενο ηλεκτρικό ρεύμα σε διαφορετικής διατομής αγωγούς. [19].....	87
Πίνακας 3.3 : Συντελεστής διόρθωσης της έντασης του ρεύματος. [19].....	87
Πίνακας 3.4: Συντελεστής διόρθωσης της επιτρεπόμενης έντασης για περισσότερους από τρεις αγωγούς σε καλώδιο ή σωλήνα. [19].....	88
Πίνακας 4.1: Χρονικό διάστημα ικανότητας υπερφόρτισης ανάλογα με τα ποσοστά της υπερφόρτισης γεννήτριας. [22].....	111
Πίνακας 5.1 : Τελικοί τύποι υπολογισμών εντάσεων και ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε ασύμμετρο σφάλμα. [31].....	149
Πίνακας 5.2 : Παράγοντας τάσης ( c ). [32].....	162
Πίνακας 5.3 : Τύποι υπολογισμών των αρχικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης ανάλογα με το είδος του σφάλματος, σύμφωνα με το πρότυπο IEC-909. [32].....	163
Πίνακας 5.4 : Πίνακας ανάλυσης τύπων υπολογισμού των αντιστάσεων και των αντιδράσεων κατά την μέθοδο ( % / MVA ). [32].....	165
Πίνακας 5.5 : Αναφορικές τιμές για τους όρους ( $Z_1/Z_2$ ) και ( $Z_2/Z_0$ ). [32].....	166
Πίνακας 5.6: Συμβατικά ρεύματα τήξης ( $I_2$ ) και ένα ρεύμα μη τήξης ( $I_1$ ) διαφορικών ασφαλειών.[2].....	171
Πίνακας 5.7: Μέγιστες τιμές ενέργειας διελεύσεως από διακόπτες κατηγορίας (1, 2, 3). [2]	
Πίνακας 6.1: Διάφοροι κύριοι τύποι πλοίων με τις ηλεκτρικές τους απαιτήσεις κατά τον ελλιμενισμό.[30].....	181
Πίνακας 6.2 : Λεπτομερής ηλεκτρικός ισολογισμός για τυπικό ντιζελοκίνητο πλοίο.....	196
Πίνακας 6.3 : Λεπτομερής ενεργειακός ισολογισμός για κατάσταση έκτακτης ανάγκης – πυρκαγιάς.....	202
Πίνακας 6.4: Συντελεστές ισχύος και απορροφούμενη άεργος ισχύ των καταναλωτών ντιζελοκίνητου πλοίου για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας.....	212
Πίνακας 6.5 : Υπολογισμός διατομών καλωδίων με βάση την ένταση του ρεύματος κάθε παροχής.	
Πίνακας 6.6 : Ενδεικτικός υπολογισμός πτώσης τάσης σε καταναλώσεις για τις οποίες είναι γνωστό το μήκος του καλωδίου παροχής.....	219
Πίνακας 6.7 : Υπολογισμός μέγιστης φαινόμενης ισχύος πινάκων και ρεύματος γραμμής τριφασικής παροχής προς εύρεση διατομών καλωδίων.....	222
Πίνακας 6.8 : Υπολογισμός διατομών καλωδίων παροχής και ζυγών πινάκων.....	223
Πίνακας 6.9 : Προσδιορισμός διατομής καλωδίων εγκατάστασης λιμανιού Ταλίν.....	237
Πίνακας 6.10 : Έλεγχος πτώσης τάσεως καλωδίων.....	238
Πίνακας 6.11 : Σύνθετες αντιστάσεις στοιχείων της εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης του λιμανιού του Ταλίν.....	243
Πίνακας 6.12 : Καταγραφή των μέγιστων και των αντίστοιχων κρουστικών ρευμάτων των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων σε διάφορα πιθανά σημεία του δικτύου λιμανιού του Ταλίν.....	251
Πίνακας 6.13 : Καταγραφή των ελάχιστων και των αντίστοιχων κρουστικών ρευμάτων των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων σε διάφορα πιθανά σημεία του δικτύου λιμανιού του Ταλίν.....	252

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Πίνακας 6.14 : Έλεγχος για τελική επιλογή διατομών των καλωδίων της εγκατάστασης του λιμανιού του Ταλίν.....	253
Πίνακας 6.15 : Συνολική καταγραφή μέσω προστασίας της εγκατάστασης του λιμανιού.....	256

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 : Κλασικός κινητήρας πρόωσης. [5].....	26
Εικόνα 1.2 : Παράδειγμα συστήματος ηλεκτροπρόωσης με δύο προπέλες. [6] .....	26
Εικόνα 1.3 : Διάταξη γεννήτριας Σ.Ρ. και ηλεκτροπρόωσης Σ.Ρ. [7].....	28
Εικόνα 1.4 : Τρόποι σύνδεσης γεννητριών Σ.Ρ. σε σύστημα Σ.Ρ. ηλεκτροπρόωσης. [7].....	28
Εικόνα 1.5 : Σύνδεσης γεννητριών Ε.Ρ. σε σύστημα ηλεκτροπρόωσης. [7].....	29
Εικόνα 1.6 : Δίκτυο διανομής έκτακτης ανάγκης. [2].....	32
Εικόνα 1.7 : α) Σύστημα διανομής σειράς, β) Σύστημα παράλληλης διανομής. [7].....	33
Εικόνα 1.8 : Δίκτυο ακτινικής διανομής ηλεκτρολογικής εγκατάστασης. [7] .....	34
Εικόνα 1.9 : Εκπομπή επιβλαβών ρύπων από πλοίο. [8].....	38
Εικόνα 1.10 : Διάγραμμα εκπομπών ρύπων κατά την διάρκεια διάφορων λειτουργιών του πλοίου. [16].....	39
Εικόνα 1.11 : Πλοίο κατά την είσοδο του σε λιμάνι. [10].....	41
Εικόνα 1.12 : Τροφοδοσία πλοίου από αυτόνομο σύστημα γεννητριών (α), τροφοδοσία πλοίου από δίκτυο παροχής λιμανιού (β). [3].....	42
Εικόνα 1.13 : Διάταξη παροχής ηλεκτρικού ρεύματος πλοίου από την ξηρά. [7].....	44
Εικόνα 1.14 : Ολοκληρωμένη εγκατάσταση ψυχρής εκκίνησης πλοίου – λιμένα. [3].....	45
Εικόνα 1.15 : Δομή δικτύου διανομής ξηράς. Ο ουδέτερος γειώνεται στον αστέρα του μετασχηματιστή. [11].....	48
Εικόνα 1.16 : Δομή δικτύου διανομής πλοίου. Αγείωτος ο κοινός κόμβος του αστέρα των γεννητριών. [11].....	49
Εικόνα 1.17 : Διάταξη μετασχηματιστή γαλβανικής απομόνωσης. [11].....	50
Εικόνα 1.18 : Εικονική προσομοίωση της εγκατάστασης λιμένα για ψυχρή εκκίνηση πλοίων. [12].....	51
Εικόνα 1.19 : Μετασχηματιστής Ισχύος. [13].....	51
Εικόνα 1.20 : Παράδειγμα Μετασχηματιστή 230 kV – 156.000 kVA. [14].....	52
Εικόνα 1.21 : Διάταξη τριφασικού κυκλομετατροπέα μονοφασικής και τριφασικής εξόδου. [11].....	53
Εικόνα 1.22 : Διακόπτης Ισχύος SF6 ανάλυση των αριθμών που βρίσκονται στην εικόνα. [15].....	54
Εικόνα 1.23 : Διάταξη πίνακα διακοπτικού υλικού. [16].....	54
Εικόνα 1.24 : Καλώδιο μέσης τάσης με μόνωση. [15].....	55
Εικόνα 1.25 : Καλώδια μέσης τάσης σε εγκατάσταση λιμανιού. [16].....	55
Εικόνα 1.26 : Σύνδεση καλωδίων. [16].....	56
Εικόνα 1.27 : Εγκατάσταση υποδοχής καλωδίων τροφοδοσίας πλοίου. [16].....	56
Εικόνα 1.28 : Υποδοχή καλωδίων τροφοδοσίας πλοίου. [16].....	57
Εικόνα 1.29 : Γερανός μεταφοράς καλωδίων. [16].....	57
Εικόνα 1.30 : Τρεχούμενο γερανοφόρο όχημα. [16].....	58
Εικόνα 1.31 : Μεταφορά καλωδίων τροφοδοσίας πάνω στο πλοίο. [16].....	58
Εικόνα 1.32 : Διανυσματικά διαγράμματα ισχύος. [4].....	59
Εικόνα 1.33 : Κυλινδρικοί πυκνωτές αντιστάθμισης. [17].....	60
Εικόνα 1.34 : Βαθυπερατό φίλτρο RC και RL. [4].....	61
Εικόνα 1.35 : Υψιπερατό φίλτρο RC και RL. [4].....	61
Εικόνα 1.36 : Ζωνοπερατό φίλτρο RLC. [4].....	61



<i>Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.</i>	
Εικόνα 1.37 : Σύστημα ψύξης ή αερισμού των ηλεκτροστασιών του πλοίου. [15].....	62
Εικόνα 1.38 : Θέσεις υποδοχής καλωδίων πάνω στο πλοίο. [15].....	63
Εικόνα 1.39 : Κύλινδρος διαχείρισης καλωδίων. [3].....	64
Εικόνα 1.40 : Σύστημα διαχείρισης καλωδίων τροφοδοσίας πλοίου. [3].....	64
Εικόνα 1.41 : Μονογραμμικό ηλεκτρολογικό διάγραμμα εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης πλοίου. [2].....	65
Εικόνα 1.42 : Παγκόσμια εικόνα εγκαταστάσεων ψυχρής εκκίνησης. [3].....	67
Εικόνα 2.1 : Χρονολογική καμπύλη φορτίου. [18].....	71
Εικόνα 2.2 : Ζώνες φορτίου σε ενδεικτική χρονολογική καμπύλη. [18].....	73
Εικόνα 2.3 : Κατασκευή καμπύλης διάρκειας φορτίου από την αντίστοιχη χρονολογική καμπύλη. [18].....	74
Εικόνα 2.4 : Ζώνες φορτίου ενδεικτικής καμπύλης διάρκειας φορτίου. [18].....	74
Εικόνα 2.5 : Ανηγμένες καμπύλες φορτίων. [18].....	75
Εικόνα 2.6 : Γράφημα εξίσωσης συντελεστή λειτουργίας – απόδοσης. [2].....	80
Εικόνα 3.1 : Μεταβαλλόμενο φορτίο για υπολογισμό του ισοδύναμου θερμικού ρεύματος. [19].....	88
Εικόνα 3.2 : Βραχυχρόνια φόρτιση καλωδίου. Καμπύλη θέρμανσης και ψύξης. [19].....	89
Εικόνα 3.3 : Συντελεστής υπερφόρτισης συναρτήσει του χρόνου φόρτιση $t_{\beta}$ . [19].....	90
Εικόνα 3.4 : Σταθερές αγωγών χαλκού, αλουμινίου και γάλυβα. [19].....	91
Εικόνα 3.5 : Γραμμή τροφοδοσίας με διαδοχικές διατάξεις προστασίας. [19].....	93
Εικόνα 3.6 : Κύκλωμα προς εύρεση μέγιστης μεταφοράς ισχύος μεταξύ δύο θέσεων σε ένα μονοφασικό εναλλασσόμενο δίκτυο. [20].....	94
Εικόνα 3.7 : Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων – ρευμάτων – αντιστάσεων ενός κυκλώματος προς εύρεση μέγιστης μεταφοράς ισχύος μεταξύ δύο θέσεων σε ένα μονοφασικό εναλλασσόμενο δίκτυο, με επαγωγικό φορτίο. [20].....	95
Εικόνα 3.8 : Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων – ρευμάτων – αντιστάσεων ενός κυκλώματος μονοφασικού εναλλασσόμενου δικτύου προς εύρεση μέγιστης μεταφοράς ισχύος μεταξύ δύο θέσεων σε ένα, με χωρητικό φορτίο και $\hat{E}_S < \hat{E}_R$ . [20] .....	96
Εικόνα 3.9 : (α) Μονογραμμικό κύκλωμα δύο θέσεων (G) και (1), (β) Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-εντάσεων-αντιστάσεων, (γ) Διάγραμμα [ισχύος $P$ -γωνίας ισχύος $\delta$ ]. [20].....	97
Εικόνα 4.1 : Τυπικές χαρακτηριστικές χρόνου – εντάσεως H/N υπερεντάσεως αντιστρόφου χρόνου. [21].....	101
Εικόνα 4.2 : Επιλογική συνεργασία σε ακτινικό κύκλωμα. [21].....	101
Εικόνα 4.3 : Τροφοδότηση H/N γης απευθείας από τον κόμβο του M/Σ-YT/MT μέσω M/Σ εντάσεως. [21].....	102
Εικόνα 4.4 α) : Συνδεσμολογίες H/N υπερεντάσεως – κατευθύνσεως, Σύνδεση 90°. [21].....	102
Εικόνα 4.4 β) : Συνδεσμολογίες H/N υπερεντάσεως – κατευθύνσεως, Σύνδεση 30°. [21].....	103
Εικόνα 4.5 : Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας τριών ζυγών. [21].....	104
Εικόνα 4.6 : Σχηματικό διάγραμμα συνδέσεως H/N αποστάσεως. [21].....	105
Εικόνα 4.7 : Σχηματικό διάγραμμα και συνδεσμολογία H/N αποστάσεως. [21].....	105
Εικόνα 4.8 : Παράδειγμα βροχωτού δικτύου πλοίου. [22].....	106
Εικόνα 4.9 : Σχηματική παράσταση των αρχών λειτουργίας διαφορικής προστασίας γραμμών, δεξιά του κυκλοφορούντος ρεύματος, και αριστερά της αντιτιθέμενης τάσεως. [21].....	107
Εικόνα 4.10 : Σύνδεση διαφορικής προστασίας γραμμής με αγωγούς – πιλότο. [21].....	107
Εικόνα 4.11 : Προστασία M/Σ για σφάλματα προς το κέλυφος του. [22].....	110
Εικόνα 4.12 : Παράδειγμα προστασίας γεννήτριας και M/Σ ισχύος υδροηλεκτρικής μονάδας παραγωγής. [22].....	112
Εικόνα 4.13 : Διαφορική προστασία στάτη γεννήτριας με α) Εξωτερικό ουδέτερο κόμβο,	

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.	
β) Εσωτερικό ουδέτερο κόμβο. [21].....	113
Εικόνα 4.14 : Προστασία τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα ΧΤ, α) Διάταξη οργάνων ζεύξεως και προστασίας, β) Συνδεσμολογία ενός απλού αυτόματου διακόπτη , γ) Χαρακτηριστικές ρευμάτων – χρόνου διατάξεων προστασίας. [21] .....	114
Εικόνα 4.15 : Τυπικές χαρακτηριστικές χρόνου – εντάσεως. [21].....	115
Εικόνα 4.16 : Αρχή προστασίας με απλούς Η/Ν υπερεντάσεως ή διαφορικούς Η/Ν. [21].....	116
Εικόνα 4.17 : Διαφορική προστασία ζυγών με Η/Ν τάσεως υψηλής αντιστάσεως. [21].....	117
Εικόνα 4.18 : Προστασία ζυγών με πηνία ζεύξεως, α) Περίπτωση εξωτερικού σφάλματος, β) Περίπτωση εσωτερικού σφάλματος. [21].....	117
Εικόνα 4.19 : Προστασία πηνίων με Η/Ν α) υπερεντάσεως, β) διαφορικούς. [21].....	118
Εικόνα 5.1 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα, φορτίου αστέρα χωρίς ουδέτερο αγωγό υπό συνθήκες τριφασικού βραχυκυκλώματος. [25].....	122
Εικόνα 5.2 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα με γειωμένο τον ουδέτερο κόμβο, φορτίου αστέρα χωρίς ουδέτερο αγωγό υπό συνθήκες τριφασικού βραχυκυκλώματος με γη. [25].....	122
Εικόνα 5.3 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα με γειωμένο τον ουδέτερο κόμβο, φορτίου αστέρα χωρίς ουδέτερο αγωγό υπό συνθήκες μονοφασικού βραχυκυκλώματος με γη. [25].....	123
Εικόνα 5.4 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα με γειωμένο τον ουδέτερο κόμβο, φορτίου αστέρα με γειωμένο τον ουδέτερο αγωγό υπό συνθήκες μονοφασικού βραχυκυκλώματος με γη. [25].....	123
Εικόνα 5.5 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής, φορτίου αστέρα με γειωμένους τους κόμβους αστέρα υπό συνθήκες μονοφασικού βραχυκυκλώματος με γη. [25].....	123
Εικόνα 5.6 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα, φορτίου αστέρα με αγειώτους τους κόμβους αστέρα υπό συνθήκες δύο μονοφασικών σφαλμάτων προς γη που προκαλούν ένα διφασικό βραχυκύκλωμα με γη. [25].....	124
Εικόνα 5.7 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα, φορτίου αστέρα με αγειώτους τους κόμβους αστέρα υπό συνθήκες ανοικτοκύκλωσης όλων των φάσεων. Η ύπαρξη του αγωγού $N'N$ δεν επηρεάζει τη ροή του ρεύματος. [25].....	124
Εικόνα 5.8 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα, φορτίου αστέρα με αγειώτους τους κόμβους αστέρα, αλλά με ύπαρξη ουδέτερου αγωγού υπό συνθήκες ανοικτοκύκλωσης δύο φάσεων. [25].....	125
Εικόνα 5.9 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα, φορτίου αστέρα με αγειώτους τους κόμβους αστέρα υπό συνθήκες ανοικτοκύκλωσης μίας φάσης. [25].....	125
Εικόνα 5.10 : Μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης όταν η στιγμιαία τιμή της τάσεως έχει μηδενική τιμή α) Κοντά , β) Μακριά από τη γεννήτρια. [21].....	127
Εικόνα 5.11 : Τυπική κυματομορφή ρεύματος βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής. [2].....	128
Εικόνα 5.12 : Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας σε βραχυκύκλωμα. [2].....	128
Εικόνα 5.13 : Ροή ρευμάτων βραχυκύκλωσης προς το σημείο του σφάλματος. [21].....	132
Εικόνα 5.14 : Βαθμιαία μείωση αντιστάσεων δικτύου για τον προσδιορισμό της $Z_{ισ}$ του ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin. [21].....	133
Εικόνα 5.15 : Παράσταση συστημάτων ισοδύναμη γεννήτρια και παθητικό δίκτυο. [21].....	135
Εικόνα 5.16 : Ακτινικό ισοδύναμο παθητικού δικτύου (n) κόμβων. [21].....	135
Εικόνα 5.17 : Ακτινικό ισοδύναμο κύκλωμα μεγάλου δικτύου για τον υπολογισμό των βραχυκυκλωμάτων. [21].....	136
Εικόνα 5.18 : Σχηματικές αναπαραστάσεις ασύμμετρων σφαλμάτων. [21].....	137
Εικόνα 5.19 : Ισοδύναμο τριφασικό κύκλωμα κατά Thevenin. [28].....	137

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.	
Εικόνα 5.20 : Τριφασικό φορτίο συνδεσμολογίας αστέρα. [28].....	138
Εικόνα 5.21 : Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα συμμετρικού τριφασικού φορτίου συνδεσμολογίας αστέρα. [28].....	139
Εικόνα 5.22 : Τριφασικό φορτίο συνδεσμολογίας τριγώνου. [28].....	139
Εικόνα 5.23 : Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα τριγωνικού συμμετρικού φορτιού. [28].....	140
Εικόνα 5.24 : Συμμετρικό τριφασικό δίκτυο. [28].....	140
Εικόνα 5.25 : Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα συμμετρικού τριφασικού δικτύου. [28].....	140
Εικόνα 5.26 : Διανυσματική ανάλυση του ασύμμετρου συστήματος τάσεων σε τρία συμμετρικά. [21].....	146
Εικόνα 5.27 : Απεικόνιση τριφασικού συστήματος γεννήτριας, $M/\Sigma$ , γραμμής μεταφοράς. [21]..	142
Εικόνα 5.28 : Διφασικό βραχυκύκλωμα ανάμεσα στις φάσεις ( b-c ). [21].....	143
Εικόνα 5.29 : Απεικόνιση ευθύ, αντίστροφου και ομοπολικού συστήματος, υπό συνθήκες ασύμμετρου βραχυκυκλώματος. [21].....	143
Εικόνα 5.30 : Ισοδύναμο κύκλωμα ευθύ, αντιστρόφου και ομοπολικού συστήματος για συμμετρική τροφοδοσία. [21].....	144
Εικόνα 5.31 : Ισοδύναμο κυκλώματα ακολουθίας τριφασικού συμμετρικού δικτύου. [21].....	145
Εικόνα 5.32 : (α) Κύκλωμα τριφασικής γεννήτριας, (β) Ροή ομοπολικών ρευμάτων κυκλώματος, (γ) Υπολογισμός ομοπολικής αντίστασης κυκλώματος ακολουθίας. [28].....	146
Εικόνα 5.33 : Τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin. [28].....	147
Εικόνα 5.34 : Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας σε μονοφασικό σφάλμα. [21].....	148
Εικόνα 5.35 : Μονοφασικό βραχυκύκλωμα σε ηλεκτρικό σύστημα. [21].....	150
Εικόνα 5.36 : Σύνθεση και σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθίας για μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη. [21].....	150
Εικόνα 5.37 : Συμμετρικές συνιστώσες ρευμάτων τυλίγματος τριγώνου και γραμμής. [28].....	151
Εικόνα 5.38 : Σχηματική ροή ομοπολικών ρευμάτων σε τύλιγμα αστέρα. [28].....	151
Εικόνα 5.39 : Μετατόπιση σημείου ουδετέρου φασικών τάσεων τυλίγματος αστέρα λόγω ομοπολικής συνιστώσας. [28].....	152
Εικόνα 5.40 : Διάταξη τριφασικού κυκλώματος για τον υπολογισμό της αντιστάσεως ακολουθίας άλφα. [28].....	154
Εικόνα 5.41 : Διάταξη τριφασικού κυκλώματος μέτρηση αντίστασης ακολουθίας βήτα. [28].....	155
Εικόνα 5.42 : Κυκλώματα ακολουθίας $\alpha$ , $\beta$ , 0. [28].....	156
Εικόνα 5.43 : Κυκλώματα ακολουθίας $\alpha$ , $\beta$ , 0 με τροποποιημένο το κύκλωμα βήτα. [28].....	157
Εικόνα 5.44 : Κυκλώματα άλφα και βήτα σε περίπτωση τριφασικού σφάλματος. [28].....	157
Εικόνα 5.45 : Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για μονοφασικό σφάλμα. [28].....	158
Εικόνα 5.46 : Κυκλώματα ακολουθίας για διφασικό σφάλμα. [28].....	159
Εικόνα 5.47 : Μεταβατική απόκριση σε μονοφασικό σφάλμα με τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών. [28].....	159
Εικόνα 5.48 : Μεταβατική απόκριση μονοφασικού σφάλματος με τη μέθοδο των συνιστωσών Clarke. [28].....	160
Εικόνα 5.49 : Διάγραμμα προσδιορισμού συντελεστή ( $\kappa$ ). [26].....	164
Εικόνα 5.50 : Διάγραμμα προσδιορισμού συντελεστή ( $\mu$ ). [26].....	165
Εικόνα 5.51 : Τριφασικός ζυγός πίνακα ισχύος. [2].....	168
Εικόνα 5.52 : Πρόταση του Κανονισμού για την προστασία των καλωδίων από υπερφορτίσεις με μικροαυτόματους διακόπτες B, C, D. Το ρεύμα $I_2$ για ( $I_Z \geq I_n$ ) καλύπτει το καλώδιο από υπερφορτίσεις αφού ( $I_2 \leq 1,45 * I_Z$ ). [2].....	171
Εικόνα 6.1 : Διάγραμμα υποσταθμού για υποβιβασμό της τάσης από τα 20kV τα 6.6kV. [16].....	174

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Εικόνα 6.2 : Διάγραμμα υποσταθμού για υποβιβασμό της τάσης από τα 6,6kV τα 440V. [16].....	175
Εικόνα 6.3 : Κάτοψη υποσταθμού λιμανιού. [16].....	176
Εικόνα 6.4 : Απεικόνιση του δικτύου σύνδεσης και τροφοδοσίας λιμένα – πλοίου μέσω σκιτσογραφίας. [30].....	177
Εικόνα 6.5 : Κάτοψη λιμανιού. [34].....	177
Εικόνα 6.6 : Κάτοψη λιμανιού Θεσσαλονίκης. [35].....	178
Εικόνα 6.7 : Λιμάνι με αγκυροβολημένα κρουαζιερόπλοια. [36].....	178
Εικόνα 6.8 : Λιμάνι του Λος Άντζελες. [17].....	179
Εικόνα 6.9 : Λιμάνι της Στοκχόλμης.[17].....	179
Εικόνα 6.10 : Λιμάνι της Αμβέρσας. [37].....	180
Εικόνα 6.11 : Σκίτσα διαφόρων ειδών πλοίων. [30].....	181
Εικόνα 6.12 : Ηλεκτρολογικό διάγραμμα κρουαζιερόπλοιου με 4 γεννήτριες. [33].....	182
Εικόνα 6.14 : Μέση καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς διαφορετικών διαστάσεων κρουαζιερόπλοιων κατά την παραμονή τους στο λιμάνι. [33].....	183
Εικόνα 6.15 : Ποσοστά κατανάλωσης τάσης - ισχύς διαφόρων τύπων κρουαζιερόπλοιων. [33]....	183
Εικόνα 6.16 : Διάγραμμα ηλεκτρικής ισχύος ενός τυπικού κρουαζιερόπλοιου. [33].....	184
Εικόνα 6.17 : Τυπικό πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. [40].....	184
Εικόνα 6.18 : Διάγραμμα μέσης (δεξιά) και μέγιστης (αριστερά) κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος διαφόρων ειδών κιβωτιοφόρων πλοίων κατά την παραμονή τους στο λιμάνι. [33].....	185
Εικόνα 6.19 : Διάγραμμα μέσης απαίτησης ηλεκτρικής ισχύος κιβωτιοφόρων μεγαλύτερων των 140 μέτρων, κατά την παραμονή τους στο χώρο του λιμανιού. [33].....	185
Εικόνα 6.20 : Διάγραμμα μέγιστης απαίτησης ηλεκτρικής ισχύος κιβωτιοφόρων μεγαλύτερων των 140 μέτρων, κατά την παραμονή τους στο χώρο του λιμανιού. [33].....	186
Εικόνα 6.21 : Τυπικό φορτηγό πλοίο ξηρών φορτίων (bulk). [17].....	186
Εικόνα 6.22 : Τυπικό οχηματαγωγό πλοίο κατά την ηλεκτροδότηση του από το λιμάνι. [17].....	187
Εικόνα 6.23 : Μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς οχηματαγωγών πλοίων κατά την κατάσταση πλεύσης. [33].....	187
Εικόνα 6.24 : Μέγιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς οχηματαγωγών πλοίων κατά τη διάρκεια παραμονής τους στο λιμάνι. [33].....	188
Εικόνα 6.25 : Τυπικό φορτηγό πλοίο μεταφοράς πετρελαίου. [41].....	188
Εικόνα 6.26 : Μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρικής ισχύς διαφόρων πετρελαιοφόρων κατά την κατάσταση πλεύσης. [33].....	189
Εικόνα 6.27 : Μέγιστη απαιτούμενη ηλεκτρικής ισχύς διαφόρων πετρελαιοφόρων κατά τη διάρκεια παραμονής τους στο λιμάνι. [33].....	189
Εικόνα 6.28 : Συνοπτική καταγραφή ενεργειακών απαιτήσεων διαφόρων ειδών πλοίων. [33].....	190
Εικόνα 6.29: Διάγραμμα συντελεστή ισχύος κινητήρα επαγωγής σε μερικό φορτίο (P). [20] .....	204
Εικόνα 6.30 : Σκαρίφημα ισοδύναμου δικτύου του υπό μελέτη ντιζελοκίνητου πλοίου, όπου G1.1 , G1.2 οι γεννήτριες του πλοίου, M1 η ισοδύναμη των δύο κύριων αντλιών θαλασσινού νερού (μεγαλύτερη η καθεμία των 50 kW), M2 ο ισοδύναμος κινητήρας όλων των υπολοίπων κινητήρων των 440 V, M3 ο ισοδύναμος κινητήρας όλων των κινητήρων των 115 V.....	229
Εικόνα 6.31 : Κάτοψη λιμανιού του Ταλίν από δορυφόρο. [44].....	230
Εικόνα 6.32 : Σκίτσο κάτοψης λιμανιού του Ταλίν. [43].....	231
Εικόνα 6.33 : Τροφοδοσία κρουαζιερόπλοιων στο λιμάνι του Ταλίν. [43].....	231
Εικόνα 6.34:Ενεργειακή απαίτηση κρουαζιερόπλοιων για το Ταλίν κατά το μήνα Ιούλιο. [33].....	231
Εικόνα 6.35 : Σημεία διασύνδεσης των ελλιμενισμένων πλοίων στις αποβάθρες του Ταλίν. [44]..	233
Εικόνα 6.36 : Αρχικό μονογραμμικό διάγραμμα απεικόνισης καλωδίων της εγκατάστασης του λιμανιού του Ταλίν.....	235



<i>Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.</i>	
Εικόνα 6.37 : Κύκλωμα θετικής ακολουθίας λιμανιού του Ταλίν.....	239
Εικόνα 6.38: Ισοδύναμο διάγραμμα για τον προσδιορισμό των μέγιστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης.....	244
Εικόνα 6.39 : Ισοδύναμο κύκλωμα πιθανά σφάλματα στην Γραμμή Α.....	244
Εικόνα 6.40 : Ισοδύναμο κύκλωμα υπολογισμού μέγιστου τριφασικού βραχυκυκλώματος του σημείου 5.....	246
Εικόνα 6.41 : Διαδοχικό ισοδύναμο κύκλωμα υπολογισμού μέγιστου τριφασικού βραχυκυκλώματος του σημείου 3,4.....	247
Εικόνα 6.42 : Ισοδύναμο κύκλωμα προς εύρεση ελάχιστων τριφασικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης.....	248

## **Αλφαβητικό Ευρετήριο Συντομογραφιών**

ABB : Asea Brown Boveri

IEC : International Electrotechnical Commission (Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή)

IEC : International Electrotechnical Committee (Διεθνή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνίας)

IMO : International Maritime Organization (Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός)

PVC : Polyvinyl Chloride (Χλωριούχο Πολυβινύλιο)

RC : Resistance – Capacitor (Αντίσταση – Πυκνωτής)

RLC : Resistance – Inductor – Capacitor (Αντίσταση – Πηνίο – Πυκνωτής )

RL : Resistance – Inductor (Αντίσταση – Πηνίο)

RMS : Root-Mean-Square (Μέση- Τετραγωνική τιμή- Ρίζας)

SCR : Selective Catalytic Reduction (Επιλεκτική Καταλυτική Αναγωγή)

SFC : Sampling Frequency Converter (Μετατροπέας Συχνότητας)

SOLAS : Convention on Safety Of Life At Sea

ΑΠΕ : Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ΔΕΗ : Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού

Ε.Ρ. : Εναλλασσόμενο Ρεύμα

Η/Ν : Ηλεκτρονόμος

ΚΕΗΕ : Κανονισμός Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων

Μ.Τ. : Μέση Τάση

Μ/Σ : Μετασχηματιστής

ΜΔΝ : Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά

ΟΗΕ : Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών

Σ.Ρ. : Συνεχές Ρεύμα

ΣΑΛ : Στροφές Ανά Λεπτό

ΣΗΕ : Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Χ.Τ. : Χαμηλή Τάση

ΗΕΔ : Ηλεκτρεγερτική Δύναμη

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας**

Καθώς η παγκόσμια ναυτιλία εξαπλώνεται όλο και περισσότερο έχει αρχίσει να επηρεάζει αισθητά τόσο τη ζωή των ανθρώπων όσο και το ευρύτερο περιβάλλον. Για το λόγο αυτό νέες τεχνολογίες έρχονται στο προσκήνιο και στοχεύουν στη βελτίωση των εγκαταστάσεων των πλοίων, τόσο από άποψη κόστους, όσο και από άποψη οικολογικής επίδρασης. Μια τέτοια καινοτόμα τεχνολογία είναι και η μέθοδος της ψυχρής εκκίνησης πλοίων, που η υλοποίησή της αποτελεί και το αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος αυτή στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των αέριων ρύπων και του θορύβου των πλοίων, όσο αυτά βρίσκονται στο χώρο του λιμανιού. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της διακοπής λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών των πλοίων, έτσι δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί κάποια θερμική αντίδραση, ώστε να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα, καθώς αυτό προσφέρεται απευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο ξηράς του λιμανιού.

Το ηλεκτρικό αυτό ρεύμα μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του εκάστοτε πλοίου πιο εύκολα και πιο οικονομικά. Παρόλο που η διαδικασία ακούγεται σχετικά απλή στην πραγματικότητα χρειάζεται εκτεταμένες μελέτες, ώστε να επιλεγούν τα κατάλληλα στοιχεία και να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες αστοχίας της εξυπηρέτησης του συνολικού φορτίου του πλοίου.

Τέτοια παραδείγματα ανάλυσης εγκαταστάσεων ψυχρής εκκίνησης πραγματοποιούνται και στην τρέχουσα εργασία, τόσο από τη μεριά ενός τυπικού πλοίου, όσο και από τη μεριά ενός τυπικού λιμανιού.

### **Σκοπός και στόχοι**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υλοποίηση της μελέτης ηλεκτρικής τροφοδοσίας ελλιμενισμένων πλοίων, σε συνδυασμό με την ανάλυση και τη διαμόρφωση του εξοπλισμού της εγκατάστασης που απαιτείται.

Αρχικά συγκεντρώνονται όλες οι πληροφορίες που παρέχονται από τα αντίστοιχα πρότυπα και τους κανονισμούς και στη συνέχεια αναλύονται τα μαθηματικά μοντέλα των υπολογισμών. Στόχος είναι πρακτικά μέσα από την εφαρμογή των παραπάνω να συνταχθεί μία ολοκληρωμένη τεχνική μελέτη της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης διασύνδεσης λιμένα – πλοίου και από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, με τα αντίστοιχα μεγέθη των προτύπων, να οριστικοποιηθούν ή να βελτιωθούν τα στοιχεία που επιλέχθηκαν.

### **Μεθοδολογία**

Αρχικά κατά την εκτέλεση των υπολογισμών που αφορούν το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου, της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καταγράφονται όλα τα φορτία κατανάλωσης του πλοίου και γίνεται στη συνέχεια η προδιαστασιολόγηση των καλωδίων τροφοδοσίας των διαφόρων αυτών φορτίων, με βάση τη συνολική ισχύς ζήτησης του καθενός.

*Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.*

Έπειτα μέσω του ελέγχου της πτώσης τάσεως, του θερμικού ορίου και των μέγιστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης των κύριων ζυγών τροφοδοσίας γίνεται η οριστικοποίηση των διατομών των καλωδίων και η βέλτιστη επιλογή των αντίστοιχων προστατευτικών διατάξεων.

Στη συνέχεια με παρόμοιο τρόπο πραγματοποιείται και η διαμόρφωση της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης του λιμανιού του Ταλίν που έχει επιλέγει ως ένα πραγματικό λιμάνι προς μελέτη. Στην περίπτωση του λιμανιού, αρχικά καταγράφονται τα υψηλότερα πιθανά φορτία ζήτησης ισχύος που μπορεί να φέρουν τα πλοία που ελλιμενίζονται στις διαθέσιμες θέσεις διασύνδεσης.

Έπειτα με βάση τα πρότυπα γίνεται πάλι η διαστασιολόγηση των στοιχείων όλης της ηλεκτρικής εγκατάστασης ακτινικής δομής, ελέγχονται οι διατομές μέσω του θερμικού ορίου, της πτώσης τάσεως των καλωδίων και του προσδιορισμού των μέγιστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης που περνούν μέσα από τα καλώδια της εγκατάστασης. Τέλος πραγματοποιείται η επιλογή των προστατευτικών διατάξεων και σχεδιάζεται μέσω του προγράμματος του Autocad η συνολική ηλεκτρολογική εγκατάσταση του λιμανιού σε μορφή μονογραμμικού διαγράμματος.

Καθώς το πλήθος των φορτίων που εξετάστηκαν και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί είναι αρκετοί ώστε να πραγματοποιηθούν στο χέρι, αξιοποιήθηκε κατάλληλα για την εκτέλεση της παραπάνω μεθοδολογίας το προγραμματιστικό πακέτο Matlab, με την βοήθεια του οποίου κωδικοποιούνται οι πράξεις και μπορούν να αξιοποιηθούν για διάφορα δεδομένα λιμανιού και πλοίων αντίστοιχα.

## **Δομή**

Η δομή της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη:

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο πραγματοποιείται η πρώτη γνωριμία με το αντικείμενο της ψυχρής εκκίνησης, αναλύεται ο λόγος που άρχισε να αναπτύσσεται η μέθοδος αυτή και καταγράφονται τα στοιχεία που απαρτίζουν, τόσο τον εξοπλισμό του πλοίου όσο και τον αντίστοιχο εξοπλισμό του λιμανιού, προκειμένου να υλοποιηθεί η μεταξύ τους ηλεκτρική διασύνδεση.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος της εκτίμησης ζήτησης φορτίων που θα χρειαστεί αργότερα κατά τη διεξαγωγή της συνολικής μελέτης της συνολικής εγκατάστασης ξηράς – πλοίου.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται λόγος για το κυριότερο στοιχείο των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, τα καλώδια. Αναλύονται οι παράγοντες που οδηγούν στην τελική επιλογή τους και οι έλεγχοι που πρέπει να πραγματοποιηθούν για να επαληθευτεί η επιλογή αυτή.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο καταγράφονται τα σημαντικότερα είδη διατάξεων προστασίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς είναι ένα καθοριστικό κομμάτι στην τελική διαμόρφωση των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων που μελετώνται.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται το αναλυτικό υπολογιστικό υπόβαθρο που αξιοποιείται κατά τη μελέτη σφαλμάτων των ηλεκτρικών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται ο υπολογισμός των μέγιστων ρευμάτων που διαρρέουν τους αγωγούς των εγκαταστάσεων υπό συνθήκες διαφόρων ειδών βραχυκυκλωμάτων.

*Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.*

Καταγράφονται συνολικά δύο μέθοδοι επίλυσης τέτοιων σφαλμάτων αυτή των συμμετρικών συνιστωσών και αυτή του μετασχηματισμού Clarke, καθώς και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί σύμφωνα με τα πρότυπα IEC-60909 για την εγκατάσταση ξηράς και IEC-61363 για την αντίστοιχη εγκατάσταση στο πλοίο.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται η πλήρης μελέτη και η παρουσίαση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ενός ντιζελοκίνητου πλοίου και του λιμανιού του Ταλίν. Πιο αναλυτικά, παρουσιάζεται η δομή του ηλεκτρικού συστήματος διασύνδεσης λιμανιού πλοίου, καταγράφονται τα χαρακτηριστικά διαφόρων ειδών πλοίων και πραγματοποιείται ο λεπτομερής ενεργειακός ισολογισμός για ένα τυπικό ντιζελοκίνητο πλοίο. Στη συνέχεια για το λιμάνι του Ταλίν διαμορφώνεται το δίκτυο τροφοδοσίας της διασύνδεσης ξηράς – πλοίων και γίνεται η διαστασιολόγηση όλων των επιμέρους στοιχείων μέσα από τους κατάλληλους υπολογισμούς. Τέλος παρουσιάζεται και το αντίστοιχο αναλυτικό μονογραμμικό διάγραμμα της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης του Ταλίν.

Τέλος στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και αναφέρονται πιθανές κατευθύνσεις για μελλοντική εργασία σε συνέχεια της τρέχουσας.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Εισαγωγικά στοιχεία του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης πλοίου**

### **1.1 Εισαγωγή στη σχεδίαση συστημάτων πρόωσης & συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων.**

Η μηχανολογία πλοίων είναι ένα πεδίο της γενικής μηχανολογίας που σχετίζεται με το σχεδιασμό και τη λειτουργία μηχανημάτων τα οποία παρατηρούνται σε θαλάσσιες δομές. Στην κατηγορία των μηχανημάτων αυτών συμπεριλαμβάνονται τόσο μηχανολογικά όσο και ηλεκτρολογικά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα παραδείγματα της κατηγορίας αυτής είναι τα συστήματα πρόωσης πλοίων, παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα επεξεργασίας και τροφοδοσίας καυσίμου, τα συστήματα εξαερισμών, υδροσυλλεκτών και έρματος νερού, καθώς και τα συστήματα πυροπροστασίας.

Σε γενικές γραμμές, η μηχανολογία πλοίων περιλαμβάνει συστήματα που εξασφαλίζουν την πλεύση του σκάφους, την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, την κάλυψη του φορτίου καθώς και τις κατάλληλες συνθήκες διαβίωσης του ανθρώπου πάνω σε αυτό. Προκειμένου να σχεδιαστούν και να είναι λειτουργικά τα παραπάνω συστήματα, απαιτείται η χρήση γνώσεων που σχετίζεται τόσο με τις εκάστοτε θαλάσσιες δομές, όσο και με το μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό που τις απαρτίζουν. Για παράδειγμα κατά το σχεδιασμό του συστήματος πρόωσης ενός πλοίου αναγκαία είναι η γνώση των χαρακτηριστικών αντοχής, της επιθυμητής μέγιστης ταχύτητας και του φορτίου που δέχεται η προπέλα.

Αρχικά παρακάτω θα γίνει αναφορά στο σύστημα πρόωσης πλοίου με χρήση ατμού, το οποίο βρίσκει πρακτική εφαρμογή στον τομέα μέχρι και σήμερα. Πρωτοπόρος στον τομέα αυτόν ήταν ο James Watt, ο οποίος μετά από εκτενείς δοκιμές (1769 – 1800) κατασκεύασε μια παλινδρομική ατμομηχανή κατάλληλη για πρακτικές εφαρμογές σε πλοία.

Στη γρήγορη εξέλιξη και αξιοποίηση των ατμοστροβίλων συνέβαλαν τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους. Αρχικά οι μηχανές αυτές δεν έχουν περιορισμό ισχύος. Μπορούν να καλύψουν δηλαδή οποιαδήποτε ισχύ απαιτείται για την πρόωση ενός πλοίου (π.χ. 280000 HP για την πρόωση ενός αεροπλανοφόρου). Επιπλέον σε σύγκριση με τις παλινδρομικές μηχανές οι ατμοστρόβιλοι παρουσιάζουν μειωμένο βάρος, όγκο και απαιτήσεις συντήρησης. Το πλεονέκτημα αυτό όμως έρχεται να το αναιρέσει ο λέβητας, καθώς από οικονομικής άποψης παρουσιάζει αυξημένη κατανάλωση, αλλά είναι αναγκαίος για τη παραγωγή του ατμού.

Παρόλο που ο αριθμός των νεοαυπηγούμενων ατμοκίνητων πλοίων έχει μειωθεί έντονα λόγω της εξέλιξης των κινητήρων Diesel και τελευταία των αεριοστροβίλων, κρίνεται εποικοδομητική η γνωριμία με τα συστήματα αυτά, διότι υπάρχουν ακόμα και σήμερα ενεργά ατμοκίνητα πλοία. Είναι ακόμα γεγονός ότι οι ατμοστρόβιλοι αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής στη στεριά και μπορούν να αξιοποιηθούν συνδυαστικά, σε ντιζελοκίνητα ή αεριοστροβιλοκίνητα πλοία. Εξυπηρετώντας με αυτό τον τρόπο κάποια ηλεκτρικά φορτία, μειώνουν την κατανάλωση καυσίμου, την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και αερίων ρύπων.

Γενικά, στόχος του μηχανικού είναι η ενοποίηση πολλών συστημάτων, με σκοπό αυτά να εξυπηρετούν ένα συγκεκριμένο σκοπό λειτουργιών στο βέλτιστο βαθμό. Για να γίνει όμως σωστή περιγραφή και κατανόηση της μηχανικής δομής ενός πλοίου, θα πρέπει να γίνει ένας λειτουργικός διαχωρισμός των συστημάτων που περιέχονται σε αυτό με κριτήριο τη λειτουργία του εκάστοτε συστήματος, όσο το πλοίο βρίσκεται στη θάλασσα.

Ένα πλοίο ή μια υπεράκτια πλατφόρμα είναι σχεδιασμένα να εκτελούν ένα συγκεκριμένο έργο, μία αποστολή. Η αποστολή αυτή καθορίζει ποιές είναι οι απαιτούμενες λειτουργίες των συστημάτων του πλοίου. Το πρώτο κριτήριο ώστε να γίνει η πληρέστερη ανάλυση των (μηχανολογικών) λειτουργιών δίνεται από το συνολικό φορτίο του πλοίου και από την αποστολή που πρέπει να εκπληρώσει. Άλλες προδιαγραφές όπως η περιοχή αξιοποίησης του πλοίου, η ταχύτητα, ο χρόνος παραμονής στη θάλασσα καθορίζουν την εξειδίκευση της αποστολής του.

Ενδεικτικά υπάρχουν πλοία με τις ακόλουθες συνήθειες αποστολές:

- Μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων (container) σε διηπειρωτικές διαδρομές,
- Ναυτικός στόλος,
- Εκμετάλλευση της θάλασσας για αλιεία,
- Εξερεύνηση της θάλασσας για αέριο και πετρέλαιο,
- Τοποθέτηση σωλήνων στον πυθμένα της θάλασσας.

Με τον καθορισμό της αποστολής του πλοίου προκύπτουν και οι απαιτούμενες γενικές λειτουργίες του. Γενικά σε αυτές συμπεριλαμβάνονται οι λειτουργίες της υπεράκτιας πλατφόρμας πρόσδεσης, οι λειτουργίες εστίασης πληρώματος, και οι γενικές λειτουργίες υποστήριξης. Στις γενικές λειτουργίες υποστήριξης του πλοίου συμπεριλαμβάνονται η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, το σύστημα εξαερισμού, το υδραυλικό σύστημα ισχύος, η τροφοδοσία καυσίμου, η ψύξη και η θέρμανση. Στις λειτουργίες της υπεράκτιας πλατφόρμας, συμπεριλαμβάνεται η πλατφόρμα πρόσδεσης, που σε συνδυασμό με τα συστήματα πρόωσης, πηδαλιούχησης, πλοήγησης και αγκύρωσης παρέχουν σωστή κινητικότητα στο πλοίο, τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά από τον χώρο του λιμένα. Στις λειτουργίες εστίασης πληρώματος συμπεριλαμβάνονται οι καμπίνες, ο εξοπλισμός καθαρισμού, το σύστημα παροχής πόσιμου νερού και το σύστημα διαχείρισης αποβλήτων.

Γενικά με την πάροδο των χρόνων, οι μηχανικοί έχουν καταλήξει στο ακόλουθο ηλεκτρολογικό μοντέλο, ως το οικονομικότερο και πιο σύνθετο στην εξοικονόμηση ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα τα υβριδικά ηλεκτρικά δίκτυα, αποτελούμενα από στρεφόμενες μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, χρησιμοποιούν δίκτυο διανομής (καλώδια, πίνακες, διακόπτες) συνεχούς ρεύματος σε επίπεδα «υψηλής τάσης» της τάξης μεγέθους των 5 kV.

Είναι επόμενο όμως, πως με την αύξηση της τάσης, απαιτείται και ενίσχυση της μόνωσης των καλωδίων του δικτύου. Το μονωτικό υλικό των τυλιγμάτων μίας συσκευής, καθορίζει και την μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί αυτό να λειτουργεί ονομαστικά. Έτσι, τα μονωτικά υλικά αυτά έχουν χωριστεί σε κλάσεις, για την διευκόλυνση της τυποποίησης και της θέσπισης προδιαγραφών.

Στις ναυτικές εφαρμογές συναντώνται οι εξής τρεις κλάσεις:

- Η κλάση Α, όπου τα θερμικά όρια αγγίζουν τους  $105^{\circ}\text{C}$ . Στην συγκεκριμένη, η μόνωση αποτελείται από υλικά όπως βαμβάκι, μετάξι και χαρτί κατάλληλα εμποτισμένα ή καλυμμένα ή εμβαπτισμένα σε διηλεκτρικό υγρό (π.χ. λάδι).
- Η κλάση Ε, όπου η μόνωση αποτελείται από υλικά ή συνδυασμούς υλικών που ανεβάζουν τα θερμικά όρια στους  $120^{\circ}\text{C}$ .
- Η κλάση Β, όπου το θερμικό όριο αγγίζει τους  $130^{\circ}\text{C}$  και η μόνωση αποτελείται κυρίως από μίκα, ίνες γυαλιού, ασβέστιο κ.τ.λ., συνδυασμένα με κατάλληλες ουσίες.

Σήμερα γενικά, πέραν των παραπάνω συστημάτων, καθοριστικό ρόλο παίζει πλέον και η ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία του πλοίου και στην ασφάλεια των επιβατών του. Το ηλεκτρικό σύστημα ενός πλοίου πρέπει να χαρακτηρίζεται από αυτονομία και ανεξαρτησία. Η συνολική ηλεκτρική ισχύς καταναλώνεται στο φωτισμό και στα διάφορα μηχανικά φορτία, όπως τα ψυγεία, οι αντλίες και οι κινητήρες. Στο ειδικό χώρο του μηχανοστασίου, που ονομάζεται ηλεκτροστάσιο, παράγεται η ηλεκτρική ισχύς από σύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες ενεργοποιούνται από διάφορους τύπους κινητήριων μηχανών, σύμφωνα με τον τύπο και την αποστολή του πλοίου.

Γενικά, οι ανάγκες ενός συστήματος καταναλωτών εξυπηρετούνται από διάφορα σύνολα ηλεκτρικών πινάκων, γεννητριών παραγωγής τάσεως καθώς και ηλεκτρικών δικτύων τα οποία στο σύνολό τους αποτελούν μία ηλεκτρική εγκατάσταση. Στην περίπτωση του πλοίου διακρίνονται οι εξής κατηγορίες ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Υπάρχουν οι κύριες εγκαταστάσεις, οι ειδικές εγκαταστάσεις και οι εγκαταστάσεις ηλεκτρικής πρόωσης του πλοίου.

Τις κύριες εγκαταστάσεις απαρτίζουν τα ακόλουθα συστήματα:

1. Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, το οποίο αποτελείται από τις κεντρικές μονάδες με τους αντίστοιχους πίνακες.
2. Το σύστημα πρωτεύουσας διανομής, μέσω του οποίου συνδέονται οι υποσταθμοί και οι υποπίνακες με τους κεντρικούς πίνακες του δικτύου και αποτελεί ένα από τα ζωτικής σημασίας συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, πρωτεύουσα διανομή ονομάζεται το ηλεκτρικό δίκτυο που τροφοδοτεί τον υποσταθμό μετασχηματισμού τάσεως και τις καταναλώσεις μεγάλης ισχύος του πλοίου, μέσω του κέντρου παραγωγής της ηλεκτρικής του ενέργειας.
3. Το σύστημα δευτερεύουσας διανομής, το οποίο διανέμει την ηλεκτρική ισχύ στα συστήματα κινήσεως, φωτισμού και στο ηλεκτρικό δίκτυο έλεγχου τάσεως. Όπου πιο ειδικά δευτερεύουσα διανομή καλείται το ηλεκτρικό δίκτυο το οποίο τροφοδοτεί τις καταναλώσεις μικρής ισχύος του πλοίου, μέσω των μετασχηματιστών του εκάστοτε υποσταθμού, οι οποίοι τροφοδοτούνται από το ηλεκτρικό δίκτυο της πρωτεύουσας διανομής.
4. Καθώς και το σύστημα καταναλώσεων όπου συγκεντρώνονται όλες τις καταναλωτικές συσκευές και διατάξεις.

Στις ειδικές καταναλώσεις ενός πλοίου, ανήκουν οι καταναλώσεις εκείνες που τροφοδοτούνται με ηλεκτρικό ρεύμα διαφορετικού τύπου, από εκείνο που παράγεται στις γεννήτριες (π.χ. ραντάρ, γυροπυξίδες).

Για να μπορεί να αναλυθεί ευκολότερα η κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου στη συνολική διάταξη το πλοίου, είναι βολικό να χωριστεί σε υποσυστήματα. Τα τρία κύρια υποσυστήματα της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης του πλοίου είναι αυτά του φωτισμού, της ισχύος και των επικοινωνιών ναυσιπλοΐας.

Τα υποσυστήματα αυτά συνολικά αποτελούν ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία εξασφαλίζουν αυτάρκεια και αξιοπιστία. Η ραγδαία αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος είναι γεγονός, αφού από τα 5W / DWI το 1890 έφτασε για τα φορτηγά πλοία το 1990 στα 750 W / DWI, ενώ για τα πλοία με ηλεκτρική πρόωση υπερβαίνει σήμερα τα 1500 W/DWI. Κάθε πλοίο οφείλει να συμμορφώνεται στις προδιαγραφές του Νηογνώμονα, των Εθνικών Κανονισμών και των Κανονισμών SOLAS σε ότι αφορά την ηλεκτρολογική του εγκατάσταση.

Οι κύριες εγκατεστημένες γεννήτριες πρέπει να αποδίδουν ισχύ τόση, που να καλύπτει όλα τα φορτία του πλοίου στη δυσμενέστερη αναμενόμενη περίπτωση. Υπάρχουν εγκατεστημένες τουλάχιστον δύο κύριες ηλεκτρογεννήτριες και μία πηγή ασφαλείας, η οποία είναι τοποθετημένη εκτός του ηλεκτροστασίου. Για λόγους ασφαλείας, η πηγή αυτή είναι συνήθως γεννήτρια και λειτουργεί αποκλειστικά με δικό της κινητήρα Diesel. Ακόμα στο κύριο κατάστρωμα βρίσκεται κατάλληλα προστατευμένη μία διάταξη λήψης ρεύματος από τη στεριά και επικοινωνεί άμεσα με τον κύριο πίνακα διανομής.

Καθώς οι συνθήκες λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανημάτων του πλοίου μπορεί να μεταβάλλονται απότομα στο θαλάσσιο περιβάλλον, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι οι μηχανές αυτές θα είναι ικανές να λειτουργούν ακόμα και με κλίση 15° προς τα δεξιά ή αριστερά, σε θερμοκρασία έως 85°C εξωτερικά του μηχανοστασίου και 90 – 95 °C εσωτερικά. Απαραίτητα είναι τα κατάλληλα μέτρα προστασίας, καθώς και ο επαρκής αερισμός των μηχανημάτων, αφού η θερμοκρασία επηρεάζει τόσο την απόδοση, όσο και τη διάρκεια ζωής τους.

Ειδικότερα, μέχρι το 1940, οι εγκαταστάσεις του πλοίου λειτουργούσαν με συνεχές ρεύμα τάσης 110-220 V. Σήμερα, οι εγκαταστάσεις αυτές είναι εναλλασσόμενου ρεύματος και μόνο σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα. Η τιμή της συχνότητας του ρεύματος για ηλεκτροπαραγωγή και κίνηση είναι σταθερή στα 60 Hz για τάση 440 V , ή 50 Hz για τάση 380 V , ενώ στο φωτισμό είναι 60Hz για τάση 110V, ή 50 Hz για τάση 220 V. Παρόλα αυτά, για τα πλοία που φέρουν πολύ ενεργοβόρα συστήματα και έντονο εξηλεκτρισμό, η ονομαστική τάση υπερβαίνει τα 1000 V. Η πλέον δεδομένη τιμή για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων είναι τα 6,6 kV και για μεγάλα κρουαζιερόπλοια τα 11 kV.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης προτιμούνται από τους κατασκευαστές, γιατί παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Αρχικά με υψηλότερη τάση εξασφαλίζεται η μείωση του ρεύματος λειτουργίας και κατά συνέπεια ο εξοπλισμός που απαιτείται, είναι μικρότερων διαστάσεων και ελαφρύτερος.
- Ακόμα, για υψηλές τιμές τάσης, οι απώλειες ηλεκτρικού δικτύου μειώνονται αισθητά, αφού είναι αντιστρόφως ανάλογες του τετραγώνου της τιμής της τάσης λειτουργίας. Π.χ. για δεκαπέντε (15) φορές αύξηση της τάσης από 440 V στα 6 kV, υπάρχει αντίστοιχα μείωση των απωλειών κατά διακόσιες είκοσι πέντε (225) φορές!
- Απαιτείται μικρότερη κατανάλωση καυσίμου.

Επιπλέον οι εγκαταστάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος χαρακτηρίζονται από μικρότερο βάρος, ευκολότερη συντήρηση και μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σύγκριση με εκείνες του συνεχούς ρεύματος. Οι εγκαταστάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος όμως έχουν μεγαλύτερο κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. Αυξάνεται η επικινδυνότητα για τον άνθρωπο από τα 60 V, ενώ οι εγκαταστάσεις συνεχούς ρεύματος, ακόμα και υπό τάση 220 V δεν προκαλούν πάντα θανατηφόρα ηλεκτροπληξία σε περίπτωση επαφής.

Είναι αναγκαίο όλα τα προαναφερόμενα συστήματα να συνεργάζονται μεταξύ τους και να αλληλεπιδρούν το ένα με το άλλο, κάτω από συγκεκριμένες προδιαγραφές, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία του πλοίου. Πιο συγκεκριμένα, ο μηχανικός που ασχολείται με τη θαλάσσια μηχανολογία οφείλει να είναι εξοικειωμένος με την επιστήμη της φυσικής και της ηλεκτρολογίας και να έχει ακόμα τις απαιτούμενες γνώσεις, για να καλύψει τις λειτουργίες σε ποικίλα συστήματα, μηχανήματα και εξαρτήματα. Σημαντικό είναι επίσης, ο μηχανικός να στοχεύει στο οικονομικότερο λειτουργικό σύστημα, το οποίο σε συνδυασμό με όλα τα παραπάνω, διαμορφώνει την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης.

## 1.2 Ηλεκτρική πρόωση

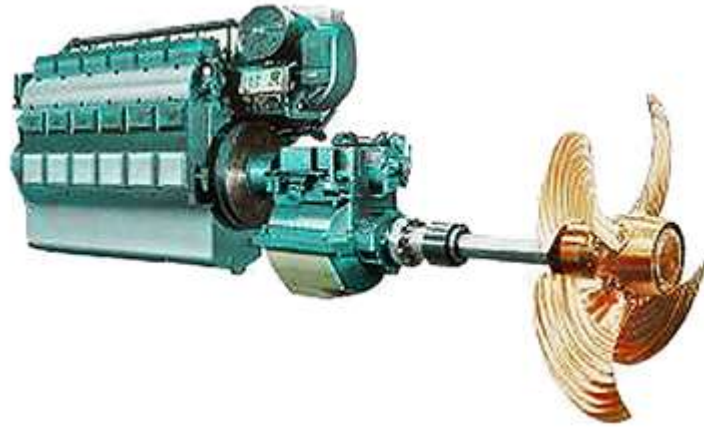
Ηλεκτροπρόωση χαρακτηρίζεται ως η μέθοδος η οποία αξιοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ηλεκτρικές μηχανές με σκοπό την πρόωση των πλοίων. Η ηλεκτρική πρόωση εφαρμόζεται σε κρουαζιερόπλοια, μεγάλα ρυμουλκά, φορτηγά πλοία, παγοθραυστικά, καθώς και σε πολεμικά πλοία. Η ισχύ μιας εγκατάστασης ηλεκτροπρόωσης έχει εύρος από 5000 έως 20000 HP. Τα είδη της ηλεκτροπρόωσης διαχωρίζονται σύμφωνα με το είδος της ηλεκτρικής ενέργειας και τους τύπους των κινητήριων μηχανών. Η ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται, μπορεί να είναι Σ.Ρ. ή Ε.Ρ. και οι κινητήριες μηχανές μπορεί να είναι ατμοστρόβιλοι, μηχανές Diesel ή αεριοστρόβιλοι.

Τα πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης είναι τα ακόλουθα:

- 1) Η εξοικονόμηση ωφέλιμου χώρου.
- 2) Η μείωση της εγκατεστημένης ισχύς.
- 3) Η μείωση του κόστους λειτουργίας και συντηρήσεως.
- 4) Η μείωση θορύβων και κραδασμών.
- 5) Η μεγάλη δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής του έλικα και της ταχύτητας του πλοίου.
- 6) Η αυξημένη αξιοπιστία και ασφάλεια.
- 7) Η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και ειδικά των οξειδίων του νατρίου (NOx).

Τα μειονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης είναι:

- 1) Το μεγάλο κόστος επενδύσεως.
- 2) Οι αυξημένες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης κίνησης, σε σχέση με το αντίστοιχο μηχανικό σύστημα.

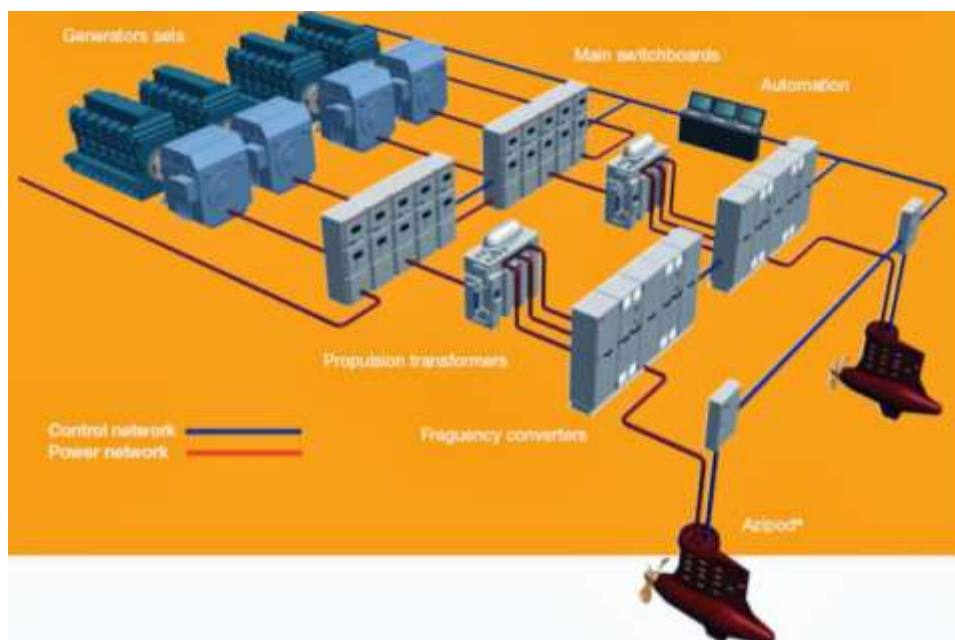


Εικόνα 1.1: Κλασικός κινητήρας πρόωσης. [5]

Παρακάτω, αναγράφονται τα κύρια σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης:

- Πλήρης Ηλεκτροπρόωση: ονομάζεται η εγκατάσταση όπου το πλοίο κινείται εξολοκλήρου από ηλεκτρικούς κινητήρες.
- Ολοκληρωμένη Πλήρης Ηλεκτροπρόωση : χαρακτηρίζεται η εγκατάσταση, όπου τα ζεύγη κινητήρων – γεννητριών τροφοδοτούν, τόσο τους ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης, όσο και τα υπόλοιπα φορτία του πλοίου
- Πλήρες Εξηλεκτρισμένο Πλοίο: ονομάζεται το πλοίο, το οποίο πέρα από τα κύρια συστήματα της ηλεκτρικής εγκατάστασης πρόωσης, έχει εξηλεκτρισμένα και όλα τα υποσυστήματα του.

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος στις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής πρόωσης, όταν κάθε μηχανή λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα περιστροφής και για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 1.2 : Παράδειγμα συστήματος ηλεκτροπρόωσης με δύο προπέλες. [6]

Υπάρχουν δύο τύποι ηλεκτρικών κινητήρων στην ηλεκτρική πρόωση. Οι βραδύστροφοι κινητήρες μεγάλης ροπής, οι οποίοι συνδέονται απευθείας με τον ελικοφόρο άξονα της προπέλας και οι πολύστροφοι κινητήρες, που συνδέονται με τον άξονα αυτό, μέσω ενός μειωτήρα στροφών. Σε κάθε συγκρότημα προώσεως, προβλέπονται έως τέσσερις ηλεκτρικοί κινητήρες, οι οποίοι συνδέονται στον ελικοφόρο άξονα της προπέλας. Όταν χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότεροι ηλεκτρικοί κινητήρες, η σύνδεση τους με την προπέλα, πραγματοποιείται με μειωτήρες στροφών. Ενώ, όταν χρησιμοποιούνται ένας ή δύο ηλεκτρικοί κινητήρες, η σύνδεση αυτή γίνεται απευθείας στον ελικοφόρο άξονα.

Γενικά, οι κινητήριες μηχανές, και ιδιαίτερα οι στρόβιλοι, είναι ταχύστροφες μηχανές, οι οποίες λειτουργούν περίπου με ταχύτητες των 3000 ΣΑΛ. Ενώ οι μηχανές Diesel λειτουργούν με ταχύτητες που φτάνουν τις 1000 ΣΑΛ. Για να λειτουργήσει όμως αποδοτικά η προπέλα, πρέπει να περιστρέφεται πιο αργά, δηλαδή μέχρι τις 500 ΣΑΛ και με μεγάλη ροπή. Για την προσαρμογή των κινητήριων μηχανών στον ελικοφόρο άξονα, απαιτείται μειωτήρας στροφών, ο οποίος αυξάνει την ροπή. Με την ηλεκτροπρόωση, επιτυγχάνεται η περαιτέρω αξιοποίηση βραδύστροφων κινητήρων μεγάλης ροπής, οι οποίοι συνδέονται απευθείας με τον ελικοφόρο άξονα της προπέλας, καταργώντας τη χρήση του μειωτήρα.

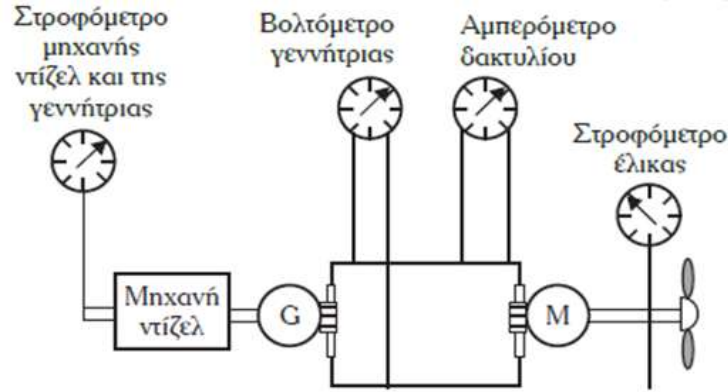
Η πρόωση γίνεται ευκολότερη και ταχύτερη μέσω της ηλεκτροπρόωσης, συγκριτικά με το χειρισμό των μηχανών Diesel και των στροβίλων. Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στον κινητήρα του πλοίου, είναι ίδια είτε η προπέλα κινείται δεξιόστροφα, είτε αριστερόστροφα. Αυτό επιτυγχάνεται, όταν αντιστραφεί η τάση τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος ή όταν συνδεθούν αντίθετα, δύο από τις τρεις φάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος.

Για την παραγωγή Σ.Ρ. μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, είτε γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος με ανορθωτική διάταξη, ενώ την περιστροφή του ελικοφόρου άξονα, θέτουν σε λειτουργία κινητήρες Σ.Ρ. με ανεξάρτητη διέγερση. Για την παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες, ενώ για την ηλεκτρική πρόωση, σύγχρονοι και επαγωγικοί κινητήρες. Η ηλεκτρική πρόωση με Σ.Ρ. είναι η πιο ευέλικτη μέθοδος προώσεως πλοίων. Συνήθως, ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει μηχανή Diesel και γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με ανεξάρτητη διέγερση. Οι γεννήτριες Σ.Ρ. συνδέονται απευθείας στις μηχανές Diesel. Η ισχύς των μηχανών Diesel, κυμαίνεται από 200 έως 1700 HP στις 500 με 1000 ΣΑΛ και έχουν δυνατότητα λειτουργίας με μειωμένες στροφές μέχρι 50% του μέγιστου αριθμού στροφών τους.

Επιλέγονται γεννήτριες Σ.Ρ. ξένης διέγερσης, ώστε η παραγόμενη τάση να καλύπτει μεγάλο εύρος ρυθμίσεως, τόσο στην ορθή, όσο και στην αντίστροφη πολικότητα. Η ισχύς κάθε γεννήτριας κυμαίνεται από 150 έως 1200 kW, με παραγόμενες τάσεις από 220 V έως και 1000 V. Για λόγους ευστάθειας του συστήματος πρόωσης προτιμάται το ρεύμα διεγέρσεως και η μαγνητική ροή του κινητήρα να παραμένουν σταθερά. Η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, καθώς και η αλλαγή της φοράς περιστροφής του τις περισσότερες φορές, επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας την τάση V της γεννήτριας. Προκειμένου να γίνουν πιο κατανοητά τα παραπάνω, στο ακόλουθο σχήμα δίνεται η διάταξη προώσεως με ένα ζεύγος ντιζελογεννήτριας ΣΡ και έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος, συνδεδεμένο στον ελικοφόρο άξονα χωρίς μειωτήρα στροφών.



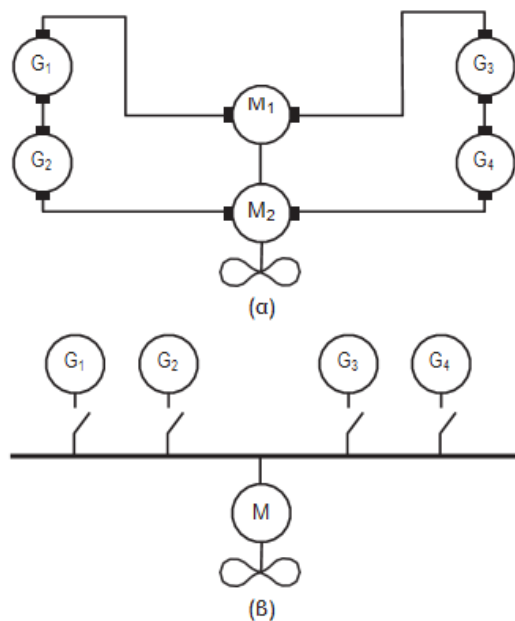
Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 1.3 : Διάταξη γεννήτριας Σ.Ρ. και ηλεκτροπρόωσης Σ.Ρ. [7]

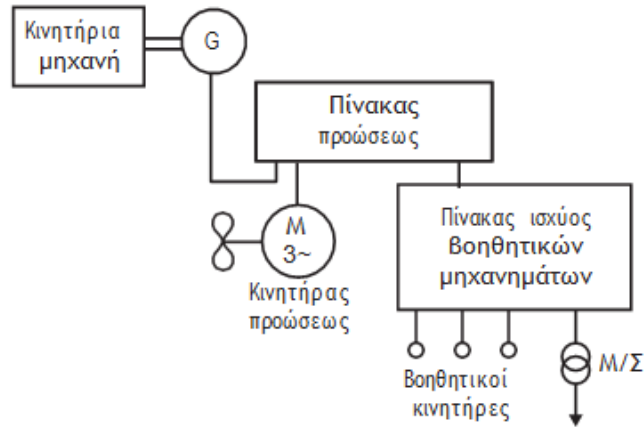
Οι παραπάνω γεννήτριες μπορούν να συνδέονται σε σειρά, ή παράλληλα (Εικόνα 2.4). Το σύστημα πρόωσης με γεννήτριες σε σειρά προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα, οπότε χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών από το σύστημα παράλληλης συνδεσμολογίας. Το βασικό πλεονέκτημα της διάταξης σειράς είναι ότι το φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα, ανάλογα με την ταχύτητα και την τάση, ανεξάρτητα από τις μικρές μεταβολές της ταχύτητας των μηχανών και της τάσεως των γεννητριών.

Στο ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης με παράλληλη σύνδεση των γεννητριών Σ.Ρ. απαιτείται οι γεννήτριες αυτές να φέρουν τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά ακριβές σύστημα ρύθμισης ταχύτητας των κινητήριων μηχανών, καθώς και ακριβές σύστημα ελέγχου της τάσης. Έτσι εξασφαλίζεται η ισοκατανομή του φορτίου μεταξύ των διαφόρων μηχανών του συστήματος.



Εικόνα 1.4 : Τρόποι σύνδεσης γεννητριών Σ.Ρ. σε σύστημα Σ.Ρ. ηλεκτροπρόωσης. [7]

Στην ηλεκτρική πρόωση με Ε.Ρ. από την άλλη, οι γεννήτριες που συνδέονται με τις κινητήριες μηχανές, τροφοδοτούν τους κινητήρες προώσεως μέσω ενός ηλεκτρικού συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει τον κύριο πίνακα, τους μετασχηματιστές και τους μετατροπείς ισχύος.



Εικόνα 1.5 : Σύνδεσης γεννητριών E.P. σε σύστημα ηλεκτροπρόωσης. [7]

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης είναι είτε ασύγχρονοι, οι οποίοι διαθέτουν μία στερεά δομή και παρέχουν μεγάλες ποσότητες ισχύος, είτε σύγχρονοι με μόνιμους μαγνήτες, οι οποίοι έχουν βαθμό απόδοσης 96% - 98%. Την υψηλότερη απόδοση, την εξασφαλίζουν οι σύγχρονοι κινητήρες, κάτι που επιφέρει μείωση του μεγέθους του κινητήρα, μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και μικρότερη ροπή αδράνειας. Οι σύγχρονοι κινητήρες μπορεί να είναι είτε αξονικής ροής, είτε ακτινικής ροής.

Το δισκοειδές σχήμα των κινητήρων ακτινικής και αξονικής ροής είναι το κοινό τους χαρακτηριστικό, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής μεγάλου αριθμού μαγνητικών πόλων για εφαρμογές χαμηλών στροφών και μεγάλης ισχύος, όπως αυτή της πρόωσης πλοίων.

Το σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης με E.P. αποτελείται από μία ή περισσότερες κινητήριες μηχανές, οι οποίες είναι απευθείας συνδεδεμένες, ή μέσω μειωτήρα στροφών με σύγχρονες γεννήτριες. Επιπλέον, υπάρχει ένας σύγχρονος κινητήρας, απευθείας συνδεδεμένος με κάθε έλικα του ελικοφόρου άξονα, καθώς επίσης και ο ηλεκτρικός πίνακας προώσεως μαζί με το σύστημα έλεγχου προώσεως και διεγέρσεως. Η ηλεκτρική πρόωση με E.P. χρησιμοποιείται κυρίως σε πλοία, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλες ηλεκτρικές καταναλώσεις, όπως επιβατικά και φορτηγά πλοία.

Τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης στο E.P. διακρίνονται κυρίως στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

- 1) Σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης E.P. για έλικες μεταβλητού βήματος, το οποίο προτείνεται σε εμπορικά πλοία.
- 2) Σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης E.P. για έλικες σταθερού βήματος, το οποίο παρέχει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια, τόσο για χρήση σε βοηθητικά υποσυστήματα, όσο και για την κίνηση του πλοίου.
- 3) Αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης, όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας και ο έλικας είναι μία ενιαία μονάδα, εμβαπτισμένη στη θάλασσα στο πρυμναίο μέρος του πλοίου.

Στα εμπορικά πλοία, οι τριφασικές γεννήτριες, σταθερής τάσεως και συχνότητας, είναι εκείνες που παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια. Γενικά, το ελεγχόμενο σύστημα ανόρθωσης μετατρέπει την εναλλασσόμενη ημιτονοειδής τάση του ηλεκτρικού δικτύου σε συνεχή. Επιπροσθέτως, οι ελεγχόμενοι αντιστροφείς μπορούν να μετατρέπουν τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη, ανάλογα πάντα με τις ανάγκες των κινητήρων πρόωσης. Τα κυκλώματα τα οποία υλοποιούν τις παραπάνω ενέργειες ονομάζονται μετατροπείς τάσεως και αποτελούνται από ηλεκτρονικά ισχύος όπως δίοδοι, θυρίστορ ή τρανζίστορ.

Πέρα όμως από τις παραγόμενες τάσεις και τα ρεύματα, στα ηλεκτρικά συστήματα πλοίων αναπτύσσεται και ένα σημαντικό πλήθος αρμονικών συνιστωσών. Οι αρμονικές αυτές, αυξάνουν την άεργο ισχύ, η οποία δημιουργεί προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας όσο κυκλοφορεί στην ηλεκτρική εγκατάσταση. Η μεθοδολογία για τη μείωση των αρμονικών περιλαμβάνει:

- 1) Αύξηση αριθμού παλμών ενός μετατροπέα.
- 2) Χρήση κατάλληλων φίλτρων.
- 3) Διαχωρισμός των ευαίσθητων φορτίων μέσω στρεφόμενων μετατροπέων.

### 1.3 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα πλοίο, που βρίσκεται στη θάλασσα, δεν μπορεί να έχει εξωτερική πηγή ρεύματος. Αυτό σημαίνει ότι η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στο πλοίο, πρέπει να παράγεται, να κατανέμεται και να τροποποιείται, όπου χρειάζεται, από το ίδιο το πλοίο. Σε εμπορικά πλοία με ηλεκτρική πρόωση, ένα συνδυαστικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχει ισχύ τόσο στις προωθητικές μηχανές, όσο και στα βοηθητικά ηλεκτρικά υποσυστήματα της εγκατάστασης.

Ο κύριος πίνακας και οι καταναλώσεις ενός εμπορικού πλοίου συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός ηλεκτρικού δικτύου που φέρει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά. Αρχικά, το δίκτυο αυτό αποτελεί ένα αυτόνομο σύστημα με εφεδρικό ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος για την τροφοδότηση ορισμένων φορτίων ζωτικής σημασίας. Επιπλέον περιλαμβάνει επιμέρους δίκτυα με διακεκριμένα συστήματα παραγωγής και φορτία συγκεντρωμένα σε πολύ μικρό χώρο.

Γενικά παρακάτω αναγράφονται τα τρία στάδια στα οποία η ηλεκτρική εγκατάσταση του πλοίου μετατρέπει τη χημική ενέργεια των καυσίμων σε ηλεκτρική αξιοποιήσιμη ενέργεια.

Αρχικά η χημική ενέργεια των καυσίμων μετατρέπεται σε μηχανική στον κινητήρα. Έπειτα η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική στη γεννήτρια. Και στη συνέχεια η ηλεκτρική ενέργεια διαμορφώνεται σε δευτερεύουσα ηλεκτρική ενέργεια, τέτοιων χαρακτηριστικών σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης.

Στα δίκτυα Μ.Τ. ανήκουν τα συστήματα τάσεων πάνω από 1 kV, τα οποία βρίσκουν συχνή εφαρμογή και σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων. Ο σημαντικότερος λόγος αναπτύξεως των δικτύων Μ.Τ. σε ένα πλοίο είναι ουσιαστικά για την εξυπηρέτηση διατάξεων μεγάλης ισχύος. Πιο συγκεκριμένα όταν η συνολική ισχύς των συγχρόνων γεννητριών των πλοίων είναι μεγαλύτερη των 20 MW, τότε απαιτούνται συστήματα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας Μ.Τ. της τάξεως των 11 kV. Σε πλοία, τα οποία απαιτούν μεγάλη ισχύ, η εγκατεστημένη τάση δεν είναι απίθανο να φτάσει και τα 15 kV.

Το πλεονέκτημα της υψηλής τάσης είναι ότι για δεδομένη ισχύ απαιτείται μικρότερο ρεύμα. Αυτό συνεπάγεται, ότι για τις ανάγκες της εγκατάστασης θα χρειαστούν μικρότερης διατομής καλώδια, όπως και ελαφρύτερες γεννήτριες-κινητήρες. Προφανώς όμως, για λόγους ασφαλείας, θα πρέπει να αυξηθεί η μόνωση της ηλεκτρικής εγκατάστασης.

Πιο συγκεκριμένα, ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της χρήσεως δικτύων Μ.Τ. είναι το γεγονός πως όταν αυξάνεται η τάση, μειώνεται η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, άρα και η διατομή και το βάρος των αγωγών.

Τα πλεονεκτήματα αναλυτικότερα είναι:

- Η μείωση του μεγέθους των γεννητριών, κινητήρων, καλωδίων.
- Η εξοικονόμηση χώρου και βάρους.
- Οι σχετικά εύκολες εγκαταστάσεις.
- Η μείωση του κόστους εγκατάστασης.
- Οι λιγότερες απώλειες, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται με μεγαλύτερη αποδοτικότητα η παραγόμενη ισχύς και η μείωση των επιπέδων βραχυκυκλώσεως.

Τα μειονεκτήματα είναι αντίστοιχα:

- Οι υψηλές ιδιότητες των μονωτικών υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται στα καλώδια και τις ηλεκτρικές συσκευές της εγκατάστασης.
- Η μεγάλη επικινδυνότητα για το τεχνικό προσωπικό, γι' αυτόν το λόγο απαιτούνται ενισχυμένα μέτρα ασφαλείας.

Ο κύριος στόχος του κινητήρα στο ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου είναι να κινεί τον άξονα της γεννήτριας. Ο πιο συνηθισμένος κινητήρας για την παραπάνω εφαρμογή είναι ο κινητήρας Diesel, κυρίως για την καλή του απόδοση και το χαμηλό κόστος καυσίμου. Στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων 50Hz, απαιτείται κινητήρας των 750 – 1000 ΣΑΛ ή 1500 ΣΑΛ. Ενώ για εγκαταστάσεις 60Hz, απαιτείται κινητήρας των 900 – 1200 ΣΑΛ ή 1800 ΣΑΛ. Ο κινητήρας Diesel, χρησιμοποιεί υψηλής ποιότητας καύσιμα, τα όποια αποδίδουν στον άξονα 750 έως 1000 ΣΑΛ. Οι αεριοστροβίλοι από την άλλη, συγκριτικά με τους κινητήρες Diesel, φέρουν ελαφρύτερο εξοπλισμό στην εγκατάσταση, αλλά υψηλό κόστος καυσίμου. Πλέον, ακόμα πιο σπάνια, στο ρόλο του κινητήρα συναντάμε τους ατμοστροβίλους.

Η ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία περιστρέφεται από τον κινητήρα της εγκατάστασης, μετατρέπει την κινητική ενέργεια του άξονα της σε ηλεκτρική. Ένα είδος γεννήτριας, με συχνή εφαρμογή σε πλοία, είναι η αξονική γεννήτρια, η οποία κινείται από τον κύριο κινητήρα πρόωσης συνδεδεμένη στον άξονα του, είτε απευθείας, είτε μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων.

Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος συναντιούνται πιο συχνά σε τέτοιες διατάξεις. Ο αριθμός και τα χαρακτηριστικά των γεννητριών αυτών καθορίζονται από το ηλεκτρικό φορτίο του πλοίου, τις διάφορες ρυθμιστικές αρχές καθώς και από τα ανάλογα πρότυπα σχεδιασμού. Για εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 2500 kW, απαιτούνται γεννήτριες E.P. συχνότητας 60Hz/440V ή 50Hz/400V. Έτσι προκύπτει και ο ορισμός του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, το οποίο δεν είναι άλλο από τον συνδυασμό της παραπάνω ηλεκτρικής γεννήτριας με την κύρια κινητήρια μηχανή.

Οι ηλεκτρογεννήτριες που τοποθετούνται σε εμπορικά πλοία πρέπει να παρέχουν τέτοια ισχύ ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη αναρροφούμενη ισχύ των καταναλωτών της εγκατάστασης. Στην περίπτωση βλάβης ή διακοπής για συντήρηση μίας ηλεκτρογεννήτριας είναι απαραίτητο να συνεχίσουν να λειτουργούν συσκευές ζωτικής σημασίας του πλοίου, για τον λόγο αυτό η συνολική ισχύς διαιρείται σε ορισμένο αριθμό ηλεκτρογεννητριών, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης.

Στην πράξη, ο αριθμός των ηλεκτρογεννητριών που θα εγκατασταθούν, γίνεται με βάση τους παρακάτω πρακτικούς κανόνες:

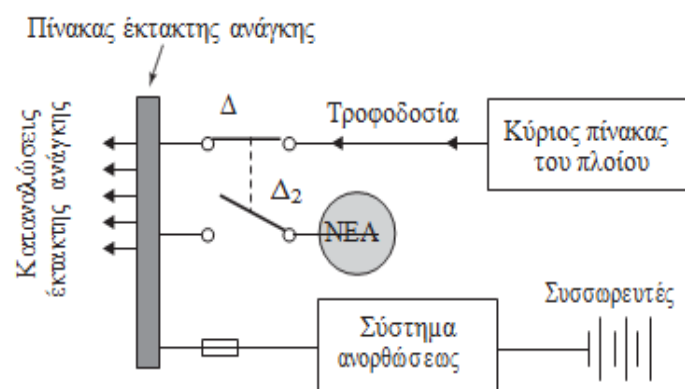
- Για μέγιστο φορτίο μέχρι 500kW, επιλέγονται δύο ηλεκτρογεννήτριες.
- Για μέγιστο φορτίο μέχρι 1.300 kW, επιλέγονται τρεις ηλεκτρογεννήτριες.
- Για μεγαλύτερες ισχύς, επιλέγονται τέσσερις ή περισσότερες γεννήτριες.

Ο κύριος ηλεκτρικός πίνακας της εγκατάστασης του πλοίου λαμβάνει, ελέγχει και διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια από τις γεννήτριες προς όλα τα φορτία, συμπεριλαμβανομένων και των δευτερευόντων υποσυστημάτων. Κάθε πλοίο έχει έναν κεντρικό πίνακα και έναν αντίστοιχο πίνακα του συστήματος έκτακτης ανάγκης.

Τα επιβατικά πλοία, για παράδειγμα, μπορεί να έχουν εγκατεστημένους από δύο έως και περισσότερους κύριους πίνακες, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με ειδικά καλώδια και διακόπτες.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι το μήκος των γυμνών καλωδίων που συνδέουν τη γεννήτρια με το διακόπτη του κεντρικού πίνακα θα είναι όσο γίνεται μικρότερο, ο κύριος πίνακας τοποθετείται σε άμεση γειτνίαση με τη γεννήτρια αυτή. Επιπλέον ο ηλεκτρικός πίνακας τροφοδοτεί μέσω του δικτύου διανομής του πλοίου, τόσο γειτονικά συστήματα, όσο και συστήματα που βρίσκονται αρκετά μακριά από αυτόν.

Για λόγους αξιοπιστίας είναι αναγκαίο να υπάρχει και ένα σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας έκτακτης ανάγκης όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα. Συνήθως στο εφεδρικό αυτό σύστημα συμπεριλαμβάνεται μία γεννήτρια Diesel, ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και ο πίνακας διακοπών έκτακτης ανάγκης. Το σύστημα έκτακτης ανάγκης τοποθετείται στο ανώτερο κατάστρωμα του πλοίου και σε σημείο εύκολα προσβάσιμο. Είναι ένα ανεξάρτητο σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο τροφοδοτεί για τουλάχιστον 36 ώρες τα κύρια συστήματα του πλοίου σε περίπτωση βλάβης της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης.



NEA: Ντιζελογεννήτρια έκτακτης ανάγκης

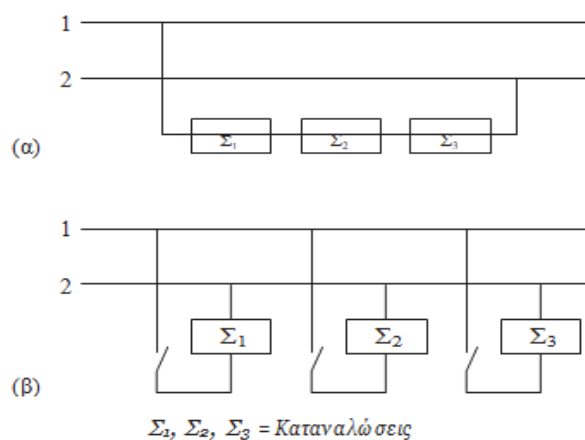
Εικόνα 1.6 : Δίκτυο διανομής έκτακτης ανάγκης. [2]

Γενικά ένα τριφασικό E.P. σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου μπορεί να είναι είτε γειωμένο, είτε αγειώτο. Στην περίπτωση που το τριφασικό αυτό σύστημα είναι γειωμένο, το κεντρικό σημείο της συνδεσμολογίας αστέρα γειώνεται άμεσα με το κήτος του πλοίου.

Ενώ στο αντίστοιχο αγείωτο σύστημα δεν υπάρχει καμία τέτοια γείωση και η διάταξη χαρακτηρίζεται στον αέρα. Σε ένα αγείωτο σύστημα η μία φάση μπορεί να έρθει σε επαφή με το κήτος του πλοίου, λόγω σφάλματος της μόνωσης του καλωδίου, χωρίς όμως να προκαλείται βραχυκύκλωμα. Από την άλλη, σε ένα αντίστοιχο γειωμένο σύστημα, μια τέτοιου είδους επαφή, θα προκαλούσε άμεσα βραχυκύκλωμα ανάμεσα στη φάση και το κήτος του πλοίου(γείωση). Έτσι είναι σημαντικό να ξεκαθαριστεί ότι μόνο σε εγκαταστάσεις πλοίων, η αγείωτη ηλεκτρική εγκατάσταση ενδείκνυται ασφαλέστερη για τον άνθρωπο. Όταν κάποιος έρθει σε επαφή με γυμνό καλώδιο τέτοιου αγείωτου συστήματος, αυτό δεν θα επιφέρει τραυματισμό-ηλεκτροπληξία καθώς δεν παρουσιάζει καμία επαφή ανάμεσα σε φάσεις. Βέβαια θεωρείται ότι όλο το προσωπικό στο πλοίο είναι εξειδικευμένο και εκπαιδευμένο για τέτοιες περιπτώσεις.

Επιπλέον σε ένα γειωμένο σύστημα, το δυναμικό στο κεντρικό σημείο της συνδεσμολογίας αστέρα στο Ε.Ρ. είναι μηδέν, λόγω της επαφής του με το κήτος του πλοίου. Αυτό σημαίνει ότι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των φάσεων και του κήτους είναι συγκεκριμένη και καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής εγκατάστασης. Σε ένα ανάλογο αγείωτο σύστημα με τον ουδέτερο κόμβο στον αέρα όμως, η ακριβής διαφορά δυναμικού του κεντρικού σημείου του αστέρα και του κήτους είναι ακαθόριστη. Παρουσιάζεται έτσι το μειονέκτημα, ότι κατασκευαστικά σε ένα τέτοιο σύστημα, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η απαραίτητη μόνωση των καλωδίων της εγκατάστασης. Στην πράξη όμως, λόγω της χωρητικότητας που αναπτύσσεται μεταξύ των καλωδίων και του κήτους, παρατηρείται ένα χωρητικό ρεύμα. Ακόμα τα φίλτρα αρμονικών ταλαντώσεων, τα οποία χρησιμοποιούνται μαζί με τα σύγχρονα ηλεκτρονικά ισχύος, μειώνουν τις αρμονικές παραμορφώσεις, δημιουργώντας ένα είδος επαφής των φάσεων με το κήτος του πλοίου. Τα παραπάνω φαινόμενα, πρακτικά επαληθεύουν πως στην πραγματικότητα δεν υπάρχει καθαρό αγείωτο σύστημα ηλεκτρικής παροχής σε εγκατάσταση πλοίου.

Συνήθως τα αγείωτα συστήματα με τον ουδέτερο αγωγό στον αέρα αξιοποιούνται σε εγκαταστάσεις πλοίων χαμηλής τάσης (50Hz/400V ή 60Hz/440V). Στις εγκαταστάσεις υψηλής τάσης (1 kV και άνω) χρησιμοποιούνται τα γειωμένα συστήματα ηλεκτρικής παροχής, όπου οι ρυθμιστές διέγερσης γεννητριών εξασφαλίζουν πως σε περίπτωση σφάλματος γείωσης το ρεύμα βραχυκύκλωσης δεν θα αυξηθεί τόσο, ώστε να προκαλέσει θανατηφόρα ατυχήματα (ηλεκτροπληξία).



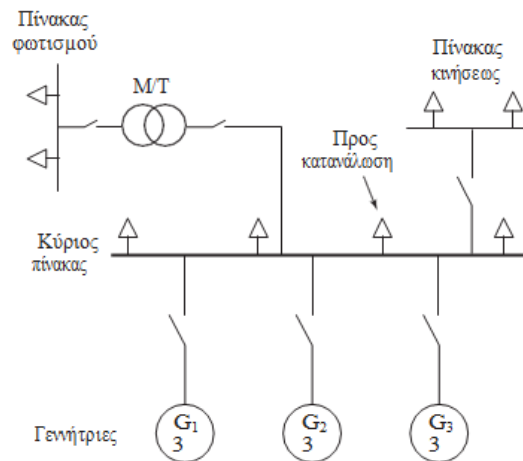
Εικόνα 1.7 : α) Σύστημα διανομής σειράς, β) Σύστημα παράλληλης διανομής. [7]

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.7, η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται με σύστημα διανομής σειράς και σύστημα παράλληλης διανομής.

Στην συνδεσμολογία όπου οι καταναλώσεις είναι εν σειρά, το ρεύμα παραμένει σταθερό, ενώ διαφοροποιείται η τάση στους ακροδέκτες των καταναλώσεων. Η διανομή του ρεύματος σε καταναλωτές συνδεδεμένους σε σειρά, βρίσκει εφαρμογή σε ελάχιστες ηλεκτρικές διατάξεις. Από την άλλη στο σύστημα παράλληλης σύνδεσης, οι καταναλώσεις είναι παραλληλισμένες. Στην περίπτωση αυτή η τάση μένει σταθερή σε όλη την διάταξη, ενώ το ρεύμα, το οποίο απορροφά η κάθε κατανάλωση, είναι διαφορετικό. Γενικά η εγκατεστημένη ισχύς και ο τύπος του πλοίου καθορίζουν την μορφή των ηλεκτρικών δικτύων διανομής.

Η μονογραμμική διαγραμματική μορφή ενός δικτύου της κύριας διανομής είναι συνήθως:

- Απλή ακτινική.
- Ακτινική με υποπίνακες.
- Ακτινική με υποσταθμούς.



Εικόνα 1.8 : Δίκτυο ακτινικής διανομής ηλεκτρολογικής εγκατάστασης. [7]

Τα ηλεκτρικά κυκλώματα μεταξύ του δευτερεύοντος των μετασχηματιστών και των καταναλωτών που τροφοδοτούνται με μειωμένη τάση τροφοδοτούνται από ηλεκτρικά δίκτυα της δευτερεύουσας διανομής, τα οποία έχουν απλή ακτινική μορφή. Όταν η ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου είναι περιορισμένης εκτάσεως και περιλαμβάνει μικρό αριθμό καταναλωτών, το ηλεκτρικό δίκτυο της δευτερεύουσας διανομής είναι μόνο ένα. Δηλαδή, το σύστημα ζυγών του κύριου πίνακα τροφοδοτείται από ένα μετασχηματιστή. Οι καταναλώσεις που συνδέονται στον ζυγό αυτό λειτουργούν με τάση μικρότερη των γεννητριών της εγκατάστασης και συνδέονται ακτινικά.

Τα περισσότερα δίκτυα δευτερεύουσας διανομής παρατηρούνται σε μεγάλα πλοία. Κάθε δίκτυο τροφοδοτείται από ένα μετασχηματιστή, ο οποίος τροφοδοτεί ακτινικά ορισμένο αριθμό καταναλωτών. Το ηλεκτρικό δίκτυο έκτακτης ανάγκης, που αναφέρθηκε νωρίτερα, μπορεί να έχει την απλή ακτινική μορφή. Για τα εμπορικά πλοία οι κανονισμοί απαιτούν την παρουσία μιας αυτόνομης πηγής ηλεκτρικής ενέργειας, ανεξάρτητα απ' την αντίστοιχη κύρια πηγή, (γεννήτριες που τοποθετούνται στο χώρο του ηλεκτροστασίου). Η πηγή αυτή, όταν το κύριο δίκτυο είναι εκτός λειτουργίας, τροφοδοτεί συγκεκριμένα φορτία απαραίτητα για την ασφάλεια και λειτουργία του πλοίου, μέσω ενός δικτύου διανομής έκτακτης ανάγκης.

Το δίκτυο αυτό αποτελείται από:

- Ένα σύστημα συσσωρευτών που καλύπτουν το φορτίο έκτακτης ανάγκης, χωρίς να χρειάζεται η επαναφόρτίσή τους και χωρίς επιπλέον πτώση τάσεως.
- Μία ή περισσότερες μονάδες ηλεκτροπαραγωγών ζευγών.

#### 1.4 Φορτία πρόωσης και ηλεκτρικών καταναλώσεων

Για τις διάφορες χαρακτηριστικές καταστάσεις λειτουργίας ενός πλοίου απαιτείται ο υπολογισμός της συνολικής πραγματικής ηλεκτρικής ισχύς του συνόλου των καταναλώσεων του. Ο υπολογισμός αυτός χαρακτηρίζεται ως ηλεκτρικός ισολογισμός και εξετάζει καταστάσεις όπως για παράδειγμα την κανονική πορεία, τους χειρισμούς ή την κατάσταση παραμονής του πλοίου στο λιμάνι. Είναι λογικό πως από το πρώτο στάδιο του σχεδιασμού ενός πλοίου είναι απαραίτητη μια πρώτη εκτίμηση του συνολικού ηλεκτρικού φορτίου του. Επειδή στο αρχικό στάδιο σχεδίασης δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για λεπτομερή προσδιορισμό, το φορτίο υπολογίζεται προσεγγιστικά, με τη βοήθεια εμπειρικών σχέσεων ή διαγραμμάτων, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω.

Η πιο σημαντική παράμετρος στο σχεδιασμό του συστήματος πρόωσης ενός πλοίου είναι η απαιτούμενη μέγιστη ταχύτητα του, η οποία βασίζεται στην αποστολή του πλοίου και στις εκάστοτε σχεδιαστικές απαιτήσεις του χρήστη. Για να εγκατασταθεί η απαραίτητη ισχύς, ο μηχανικός χρειάζεται πληροφορίες σχετικές με τη συνολική αντίσταση του πλοίου, καθώς και με το είδος της πρόωσης του.

Σε αυτήν την παράγραφο θα αναλυθούν και οι μεταβλητές του συστήματος πρόωσης που καθορίζουν και την συνολική αντίσταση του πλοίου, η οποία απαρτίζεται από τις εξής συνιστώσες:

- Αντίσταση του κήτους του πλοίου: Η δύναμη που χαρακτηρίζεται ως αντίσταση του πλοίου και είναι εκείνη που χρειάζεται ώστε το πλοίο αυτό να ρυμουλκηθεί με συγκεκριμένη ταχύτητα (χωρίς κάποιου είδους πρόωση).
- Αντίσταση τριβής: Είναι η δύναμη που απαρτίζεται από πολλές εφαιπόμενες δυνάμεις, οι οποίες δρουν κατά μήκος του κήτους ως συνέπεια του οριακού στρώματος επαφής νερού-πλοίου.
- Αντίσταση πίεσης: Χαρακτηρίζεται η δύναμη, η οποία ασκείται στο κήτος του πλοίου από φυσικές δυνάμεις, εξαιτίας της διαφοράς πίεσης των μορίων του νερού μπροστά και πίσω από το κινούμενο πλοίο.
- Κυματική αντίσταση: Είναι η αντίδραση που αναπτύσσεται στο πίσω μέρος του πλοίου από τα κύματα που δημιουργούνται κατά την κίνηση του. Η κινητική και η προωθητική ενέργεια των κυμάτων δίνονται από το σύστημα πρόωσης του πλοίου.
- Αντίσταση αέρα: Δεν μπορεί να παραληφτεί και η αντίσταση του ατμοσφαιρικού αέρα, η οποία είναι αντίθετη στην κίνηση του πλοίου, ειδικά σε ταχύπλοα ή πολύ ογκώδη πλοία.

Η λειτουργία του συστήματος πρόωσης του πλοίου είναι να παράγει τέτοια ώθηση, ώστε να ξεπερνιούνται οι τιμές των παραπάνω αντιστάσεων.



Προκειμένου να καθοριστεί και να διαμορφωθεί η μονάδα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου, είναι απαραίτητη η ανάλυση και η καταγραφή της ηλεκτρικής ζήτησης του πλοίου, κάτω από ποικίλες καταστάσεις λειτουργίας. Οι καταστάσεις αυτές εξαρτώνται από το είδος της αποστολής του πλοίου, που μελετάται.

Παρακάτω ωστόσο αναφέρονται οι πιο συνήθεις καταστάσεις λειτουργίας που εξετάζονται σε όλες τις περιπτώσεις πλοίων:

- 1) Λειτουργία στη θάλασσα.
- 2) Λειτουργία κατά τη διάρκεια ελιγμών του πλοίου.
- 3) Λειτουργία στο λιμάνι κατά τη φόρτωση και εκφόρτωση.
- 4) Λειτουργία σε λιμάνι χωρίς φόρτωση και εκφόρτωση.
- 5) Λειτουργία κατά την αγκυροβόληση.

Για τα πλοία ειδικών αποστολών, φυσικά λαμβάνονται υπόψη και άλλες ειδικές καταστάσεις λειτουργίας αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, για να υπάρχουν επαρκής πληροφορίες και στοιχεία, ώστε να γίνει ο σωστός σχεδιασμός των μονάδων ηλεκτρικής ισχύος του πλοίου, χρειάζεται να μελετηθούν από τρεις έως δέκα διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας τουλάχιστον.

Γενικά υπάρχουν τρεις τρόποι προσδιορισμού του φορτίου ζήτησης ενός πλοίου:

1. Εμπειρικοί τύποι.
2. Ανάλυση ηλεκτρικού φορτίου.
3. Προσομοίωση.

Σε ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα γενικά, η πρώτη εκτίμηση του ηλεκτρικού φορτίου γίνεται με εμπειρικούς τύπους και ένας πιο αναλυτικός υπολογισμός επιτυγχάνεται στη συνέχεια, με τη χρήση της ανάλυσης φορτίου.

Η μέθοδος των εμπειρικών τύπων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά, ώστε να διαμορφωθεί μια πρώτη εκτίμηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου. Η μέθοδος είναι πιο αποδοτική όταν βασίζεται σε στοιχεία από μεγάλο αριθμό πλοίων με την ίδια αποστολή και παρόμοιο μέγεθος. Όταν η μέθοδος των εμπειρικών τύπων γίνεται «στο χέρι», μπορεί να γίνει εκτίμηση της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται, αξιοποιώντας τις κύριες διαστάσεις του πλοίου, όπως το μέγεθος ή την εγκατεστημένη ισχύ πρόωσης.

Παρόλα αυτά, για τη λεπτομερή σχεδίαση της εγκατάστασης του πλοίου και των ηλεκτρικών συστημάτων του, πιο ακριβής είναι αυτή της ανάλυσης του ηλεκτρικού φορτίου του. Παρακάτω παρουσιάζονται ονομαστικά οι ιδιότητες των ηλεκτρικών καταναλώσεων, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να γίνει σωστή ανάλυση. Τέτοιες είναι το όνομα, το είδος της εγκατάστασης, το φορτίο αιχμής, εγκατεστημένη κινητήρια ισχύ και η ονομαστική ισχύς που απορροφάται από το ηλεκτρικό δίκτυο διανομής.

Στη συνέχεια αναφέρονται επιπλέον οι παράμετροι που χρειάζεται να καθοριστούν για κάθε κατανάλωση σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας, προκειμένου να ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία.

Τέτοιες παράμετροι είναι συγκεκριμένα:

- Ο αριθμός των καταναλωτών που εξυπηρετούνται όπως αντλίες, μηχανήματα χειρισμών, βοηθητικών χρήσεων και ασφαλείας.
- Ο παράγοντας του φορτίου.
- Ο παράγοντας του ταυτοχρονισμένου φορτίου.
- Η μέση καταναλισκόμενη ισχύς.
- Η εξασφάλιση της οικονομικότερης λειτουργικής διάταξης.

Η ισχύς σε πλήρες φορτίο είναι η μέγιστη ισχύς που πρέπει να παρέχεται από το σύστημα στα μηχανήματα. Η αποδοτικότητα των κινητήριων μηχανών όμως εξασφαλίζεται, όχι από την ισχύ που απορροφάται σε πλήρες φορτίο, αλλά από τη συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική κινητήρια ισχύ που παρέχεται από το δίκτυο.

Ορισμένες κινητήριες μηχανές βέβαια, βρίσκονται σε λειτουργία μόνο σε συγκεκριμένες καταστάσεις, για παράδειγμα τα συστήματα φόρτωσης και εκφόρτωσης στο λιμάνι ή σύστημα πρόωσης στην θάλασσα.

Η εκτίμηση του φορτίου και οι παράγοντες αποδοτικότητας του συστήματος είναι οι πιο δύσκολοι στη μέθοδο ανάλυσης φορτίου. Οι τιμές των παραγόντων αυτών, συνήθως εκτιμούνται αρκετά υψηλότερες από τις αντίστοιχες πραγματικές, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το ρίσκο σχεδίασης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ανίκανο να καλύψει της ανάγκες της εγκατάστασης του πλοίου. Το παραπάνω, απορρέει σε υπερεκτίμηση της συνολικής ζήτησης φορτίου και κατά συνέπεια σε επιλογή εγκατάστασης μεγαλύτερων διαστάσεων. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι κυρίως η αύξηση του μέσου φορτίου των ντιζελογεννητριών, που οδηγεί σε περαιτέρω κατανάλωση καυσίμου.

Μια ακόμα πιο ακριβής εκτίμηση των χαρακτηριστικών της ηλεκτρικής εγκατάστασης, επιτυγχάνεται με την προσομοίωση των λειτουργιών του πλοίου σε διάφορες καταστάσεις. Η μέθοδος αυτή απαιτεί σημαντική εμπάθυνση σε ποικίλες λειτουργίες του πλοίου. Η προσομοίωση λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση των διαφόρων μηχανημάτων της εγκατάστασης και μοντελοποιεί το τελικό φορτίο χρησιμοποιώντας στοχαστικές κατανομές πιθανοτήτων.

## 1.5 Περιβαλλοντικές απαιτήσεις κατά IMO

Στη συγκεκριμένη παράγραφο, παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τις εκτιμήσεις των εκπομπών από τα πλοία, οι επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, καθώς και οι τεχνολογίες για τον έλεγχο των εκπομπών αυτών.

Υπάρχουν κάποιοι διεθνής κανονισμοί που πρέπει να ικανοποιούνται από όλα τα πλοία που εκτελούν διεθνή δρομολόγια. Ο IMO νομοθετεί τους κανονισμούς αυτούς, ο οποίος είναι παράρτημα των Ηνωμένων Εθνών, και έχει ως αποκλειστική αρμοδιότητα την ασφάλεια των πλοίων και την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος από αυτά. Κάποιοι από τους παραπάνω κανονισμούς αφορούν την κατασκευή των πλοίων και κάποιοι άλλοι την ασφαλή λειτουργία τους.

Τα τελευταία χρόνια όμως, οι περισσότεροι νέοι κανονισμοί που έχουν νομοθετηθεί, τόσο σε επίπεδο ΙΜΟ, όσο και σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, αφορούν την πρόληψη της μόλυνσης του περιβάλλοντος από τα πλοία.



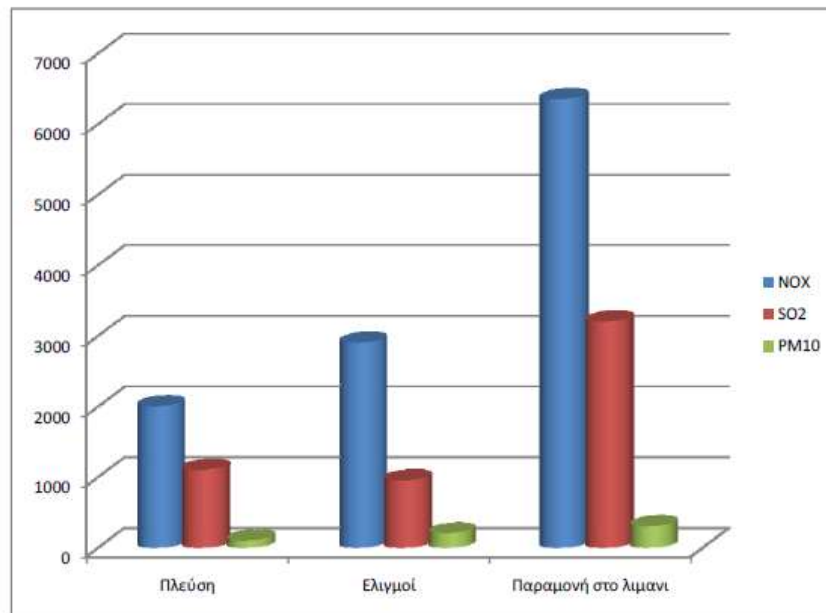
Εικόνα 1.9 : Εκπομπή επιβλαβών ρύπων από πλοίο. [8]

Η μείωση των επιβλαβών ουσιών στα καυσαερίων των πλοίων είναι ένα από τα κύρια ζητήματα που εξυπηρετούν οι κανονισμοί αυτοί. Τέτοιες επιβλαβή ουσίες είναι για παράδειγμα τα οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) και τα οξειδία του θείου ( $\text{SO}_x$ ), καθώς και το διοξείδιου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το οποίο συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Γενικά στα νέα πλοία που κατασκευάζονται ο κανονισμός για τα οξειδία του αζώτου απαιτεί την τοποθέτηση ενός τεράστιου καταλύτη στο μηχανοστάσιο για την αφαίρεση των επιβλαβών αυτών ουσιών από τα καυσαέρια. Από την άλλη η αντιμετώπιση των οξειδίων του θείου επιτυγχάνεται είτε με τη τοποθέτηση ενός δεύτερου τεράστιου καταλύτη, είτε με τη καύση ελαφρύτερου και ακριβότερου καυσίμου. Στο πλαίσιο αυτό, ο ΙΜΟ αποφάσισε να απαγορεύσει την καύση μαζούτ από το 2020, κάτι το οποίο αναμένεται να επιφέρει μεγάλες αναταράξεις στις θαλάσσιες μεταφορές, διότι ορισμένες μελέτες αναφέρουν ότι δεν θα υπάρξει αντίστοιχο «ελαφρύ» καύσιμο ώστε να ικανοποιεί πλήρως τη ζήτηση φορτίου των πλοίων.

Ο κανονισμός 13 του πρωτοκόλλου του 1997 περιέχει όρια για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) από κινητήρες ντίζελ πλοίων. Σύμφωνα με τον κανονισμό 13, οι εκπομπές ( $\text{NO}_x$ ) οποιουδήποτε κινητήρα ντίζελ, με ισχύ άνω των 130 kW εγκατεστημένη σε πλοίο που κατασκευάστηκε μετά την 1η Ιανουαρίου 2000 ή που υφίσταται σημαντική μετατροπή κατά ή μετά την ημερομηνία αυτή, δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα ακόλουθα όρια:

1.  $17\text{g/kWh}$  όταν η  $n$  που είναι η ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα (στροφές στροφαλοφόρου άξονα ανά λεπτό), είναι μικρότερο από 130 Σ.Α.Λ.
2.  $45,0 \cdot n^{(-0,2)} \text{g/kWh}$  όταν η  $n$  είναι 130 ή περισσότερη αλλά μικρότερη από 2.000 Σ.Α.Λ.
3.  $9,8 \text{g/kWh}$  όταν η  $n$  είναι 2.000 Σ.Α.Λ. ή περισσότερη.

Επιπλέον σύμφωνα με τον κανονισμό 14, η περιεκτικότητα σε θείο κάθε μαζούτ που χρησιμοποιείται στα πλοία δεν πρέπει να υπερβαίνει το 4,5% m/m. Για τις περιοχές ελέγχου εκπομπών ( $\text{SO}_x$ ), το όριο αυτό μειώνεται στο 1,5% m/m.



Εικόνα 1.10 : Διάγραμμα εκπομπών ρύπων κατά την διάρκεια διάφορων λειτουργιών του πλοίου. [16]

Η συμβολή των εκπομπών πλοίων στα προβλήματα ποιότητας του αέρα σε πολλές περιοχές του κόσμου αυξάνεται, και πολλές κυβερνήσεις εξετάζουν τώρα τον τρόπο καλύτερης αντιμετώπισης των εκπομπών πλοίων και άλλων λιμένων σε τοπικό, εθνικό και διεθνές επίπεδο. Επίσης, τα σωματίδια που παράγονται από κινητήρες ντίζελ αποτελούν τομέα αυξανόμενης ανησυχίας, καθώς επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία.

Γενικά οι εκπομπές από τους κινητήρες ντίζελ πλοίων προκαλούν ανησυχία στη διεθνή κοινότητα, διότι οι εκπομπές αυτές συμβάλλουν στην τρύπα του όζοντος και τα σωματίδια σε επίπεδο εδάφους, καθώς και σε άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επιπλέον, τα οξείδια του νατρίου ( $\text{NO}_x$ ) και του θείου ( $\text{SO}_x$ ) αντιδρούν (με νερό, οξυγόνο και οξειδωτικά) στην ατμόσφαιρα για να σχηματίσουν όξινη βροχή. Επιπλέον, όπως επισημαίνεται στη μελέτη του IMO για τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από πλοία, θα πρέπει να σημειωθεί η έμμεση επίδραση των εκπομπών  $\text{NO}_x$  στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

Η εναπόθεση αζώτου από κινητήρες ντίζελ συμβάλλει στην αύξηση των επιπέδων αζώτου στα υδατικά συστήματα. Η αυξημένη φόρτωση αζώτου στα υδατικά συστήματα, ιδίως στις παράκτιες εκβολές ποταμών, αναστατώνει τη χημική ισορροπία των θρεπτικών συστατικών που χρησιμοποιούνται από τα υδρόβια φυτά και τα ζώα. Πρόσθετο άζωτο επιταχύνει το φαινόμενο του ευτροφισμού, το οποίο είναι η επιταχυνόμενη παραγωγή οργανικής ύλης, ιδιαίτερα στα φύκια, σε ένα υδατικό σύστημα. Αυτή η αυξημένη ανάπτυξη μπορεί να προκαλέσει πολλές δυσμενείς οικολογικές και οικονομικές επιπτώσεις. Ο ευτροφισμός προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία στις παράκτιες περιοχές με ανεπαρκή ή στρωματοποιημένα επίπεδα κυκλοφορίας νερού. Σε αυτούς τους τομείς, τα φύκια που αναπαράγονται επαρκώς τείνουν να βυθίζονται στον πυθμένα και να αποσυντίθενται, χρησιμοποιώντας το σύνολο ή το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου οξυγόνου και μειώνοντας ή εξαλείφοντας έτσι τους πληθυσμούς ψαριών και οστρακοειδών.

Ο σοβαρός και επίμονος ευτροφισμός συχνά επηρεάζει άμεσα τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Για παράδειγμα, οι απώλειες στους αλιευτικούς πόρους ενός κράτους μπορεί να προκληθούν άμεσα από τους θανάτους ψαριών που συνδέονται με χαμηλό διαλυμένο οξυγόνο και τοξικές ανθίσεις.

Οι κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία αυξάνονται, όταν οι τοξίνες από τις ανθίσεις φυκιών συσσωρεύονται στα βρώσιμα ψάρια και οστρακοειδή, και όταν οι τοξίνες γίνονται αερομεταφερόμενες, προκαλώντας αναπνευστικά προβλήματα λόγω εισπνοής.

Επιπλέον, η μελέτη του IMO για τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από πλοία περιγράφει τις έμμεσες επιπτώσεις των εκπομπών NO<sub>x</sub> στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Η μελέτη αναφέρει ότι εκτός από το CO<sub>2</sub>, το όζον θεωρείται σημαντικό αέριο θερμοκηπίου. Τα πλοία δεν παράγουν άμεσα όζον κατά την καύση του κινητήρα, αλλά εκπέμπουν πρόδρομες ουσίες του όζοντος.

Τα όρια του κανονισμού 13 (NO<sub>x</sub>), βασίζονται στην κατάσταση της τεχνολογίας το 1992 και κατά μέσο όρο οδηγούν σε μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> στο μέγεθος του 30%. Από την παρούσα κατάσταση της τεχνολογίας, οι λύσεις που αναπτύχθηκαν έκτοτε αντικατοπτρίζουν σχετικά απλές τεχνολογίες ελέγχου εκπομπών κινητήρων ντίζελ που βασίζονται σε αλλαγές στον κύλινδρο. Από τη στιγμή που ορίστηκαν τα όρια εκπομπών NO<sub>x</sub> του κανονισμού 13, στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η ναυτιλιακή βιομηχανία ασχολήθηκε με την ανάπτυξη πιο προηγμένων τεχνολογιών ελέγχου εκπομπών για κινητήρες ντίζελ πλοίων. Αυτοί οι κατασκευαστές κινητήρων συνεχίζουν να αναπτύσσουν νέες τεχνολογίες, ειδικά για τη θάλασσα.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις νέες εξελίξεις, οι Ηνωμένες Πολιτείες υιοθέτησαν πρότυπα εκπομπών κινητήρα ντίζελ κάτω των 30 λίτρων ανά κύλινδρο. Αυτά τα πρότυπα, που υιοθετήθηκαν το 1999 και άρχισαν να ισχύουν από το 2004 έως το 2007, ανάλογα με το μέγεθος του κινητήρα, επιφέρουν πρόσθετες τεχνολογίες ελέγχου εκπομπών εντός του κυλίνδρου, όπως τη βελτιστοποίηση καύσης (χρονοδιάγραμμα, γεωμετρία θαλάμου καύσης και στροβιλισμός), τον προηγμένο έλεγχο ψεκασμού καυσίμου, το βελτιωμένο αέρα φόρτισης και τα ηλεκτρονικά χειριστήρια.

Νέες πληροφορίες, υποδηλώνουν ότι ενδέχεται να είναι δυνατή η επιπρόσθετη μείωση εκπομπών πέρα από τους ελέγχους κινητήρα ντίζελ των Ηνωμένων Πολιτειών, χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες για τον έλεγχο NO<sub>x</sub>. Οι τεχνολογίες αυτές, για τη μείωση των NO<sub>x</sub>, περιλαμβάνουν, εισαγωγή νερού στη διαδικασία καύσης, προσροφητές NO<sub>x</sub> και επιλεκτική καταλυτική μείωση. Το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία καύσης για τη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας και κατά συνέπεια τη μείωση του σχηματισμού NO<sub>x</sub>, με ασήμαντη αύξηση στην κατανάλωση καυσίμου. Τα δεδομένα για αυτές τις προσεγγίσεις δείχνουν μείωση κατά 30-40% των NO<sub>x</sub>.

Τέλος μια άλλη τεχνολογία ελέγχου εκπομπών, με βάση καταλύτη NO<sub>x</sub>, είναι η επιλεκτική καταλυτική μείωση (SCR). Οι καταλύτες SCR απαιτούν αμμωνία για τη μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub>. Λόγω των ζητημάτων ασφάλειας με το χειρισμό και την αποθήκευση αμμωνίας, τα περισσότερα συστήματα SCR παράγουν αμμωνία στο σύστημα καταλύτη από την ουρία. Η ουρία αναμιγνύεται σε υδατικό διάλυμα και εγχέεται στην εξάτμιση, όπου η θερμότητα αποσυνθέτει την ουρία, για να παράγει αμμωνία και διοξείδιο του άνθρακα που διοχετεύεται μέσω αντιδραστήρα, όπου μειώνονται οι εκπομπές NO<sub>x</sub>. Με ένα κατάλληλο σύστημα ελέγχου για τη μέτρηση της ουρίας σε αναλογία με τις εκπομπές NO<sub>x</sub> του κινητήρα, οι καταλύτες SCR μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές NO<sub>x</sub> κατά περισσότερο από 90% για ένα σημαντικό κλάσμα του εύρους λειτουργίας του κινητήρα ντίζελ.



Εικόνα 1.11 : Πλοίο κατά την είσοδο του σε λιμάνι. [10]

Είναι γνωστό ότι η ναυσιπλοΐα διαδραματίζει ρόλο κλειδί στην παγκόσμια οικονομία. Σύμφωνα με τον IMO του ΟΗΕ πάνω από το 90% του παγκόσμιου εμπορίου διακινείται μέσω των θαλάσσιων οδών. Πρόκειται για τον οικονομικότερο τρόπο μεταφοράς εμπορευμάτων και πρώτων υλών στον πλανήτη. Οι κανονισμοί που ισχύουν για τον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, των οξειδίων του θείου και αζώτου από τα πλοία, αναμένεται να έχουν σημαντικές συνέπειες για τον κλάδο. Και αυτές θα είναι τόσο οικολογικές, όσο και οικονομικές αν εφαρμοστούν με τον απαραίτητο σεβασμό και την ανάλογη προσοχή.

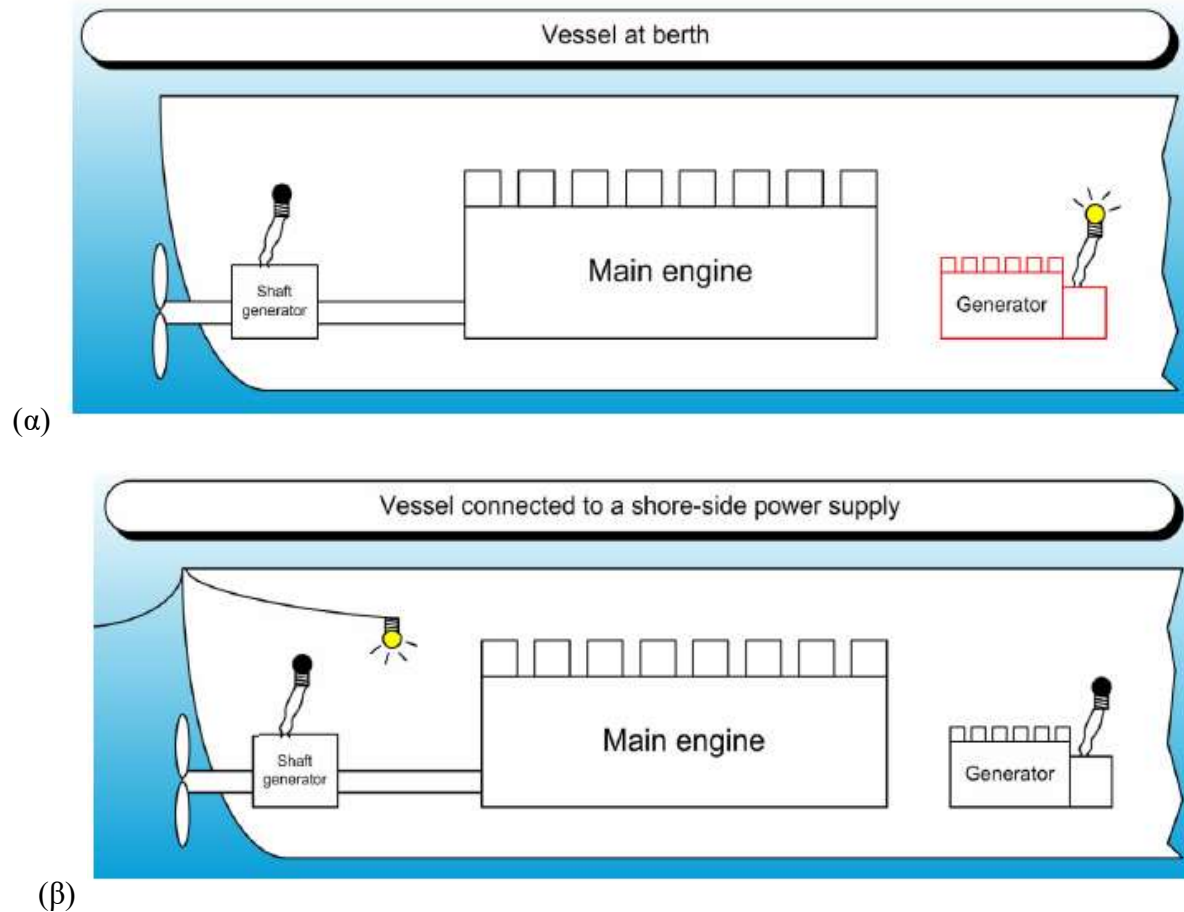
## 1.6 Η έννοια της ψυχρής εκκίνησης

Στον κλάδο της μηχανολογίας, που ασχολείται με την κατασκευή πλοίων, η διάταξη της ψυχρής εκκίνησης είναι γνωστή με διάφορα ονόματα, όπως: εναλλακτική θαλάσσια παροχή ισχύος ή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από την ξηρά.

Γενικά, η ψυχρή εκκίνηση στοχεύει στη βελτίωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα στα λιμάνια και τις παράκτιες πόλεις, στη μείωση των εκπομπών επικίνδυνων ρύπων, καθώς και σε μικρότερο βαθμό στη μείωση εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα, από τις καύσεις των πλοίων. Όλα τα παραπάνω επιτυγχάνονται αντικαθιστώντας την παραγόμενη ισχύ των κινητήρων Diesel με ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο παρέχεται από την ξηρά. Όταν βέβαια τα πλοία ταξιδεύουν ανοιχτά μέσα στη θάλασσα, η ηλεκτρική ενέργεια συνήθως μπορεί να εξασφαλιστεί από αξονικές γεννήτριες, οι οποίες τροφοδοτούνται από την κύρια μηχανή του πλοίου (κινητήρας).

Πριν από την είσοδο ενός πλοίου στο λιμάνι, ξεκινάνε να δουλεύουν οι βοηθητικές γεννήτριες, ώστε να διασφαλιστεί η συνεχής παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει, γιατί ο κύριος κινητήρας, λειτουργεί σε διαφορετικές ταχύτητες από τις ονομαστικές του, λόγω των ελιγμών που πρέπει να πραγματοποιηθούν πριν την αγκυροβόληση του πλοίου. Οι βοηθητικοί κινητήρες, λειτουργούν καθ' όλη τη διάρκεια της επίσκεψης στο λιμάνι και απενεργοποιούνται μόνο όταν το πλοίο επιστρέψει στην ανοιχτή θάλασσα ή όταν αυτό συνδεθεί με το ηλεκτρικό σύστημα παροχής ξηράς.





Εικόνα 1.12 : Τροφοδοσία πλοίου από αυτόνομο σύστημα γεννητριών (α), τροφοδοσία πλοίου από δίκτυο παροχής λιμανιού (β). [3]

## 1.7 Τυποποίηση της ψυχρής εκκίνησης

Προκειμένου να συνδεθεί ένα πλοίο σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο λιμανιού, απαιτείται ένας ειδικός εξοπλισμός, όπως καλώδια, γερανοί, μετατροπείς και μετασχηματιστές υψηλής τάσης. Μέχρι προσφάτως δεν υπήρχαν επίσημα διεθνή πρότυπα, στα οποία να βασίζονται οι μηχανικοί, ώστε να επιλέγουν τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης. Οι επιλογές αυτές γίνονταν με οδηγό τις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις πλοίων.

Παρόλα αυτά, τον Ιούλιο του 2012 δημοσιεύθηκε επίσημα το πρώτο διεθνές πρότυπο σχεδιασμού εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης πλοίου, με την ακόλουθη ονομασία: IEC/ ISO/ IEEE 8005-1 – Συνδέσεις βοηθητικών παροχών λιμανιού – Μέρος 1<sup>ο</sup> : Συστήματα σύνδεσης ακτής υψηλής τάσης – Γενικές απαιτήσεις. Το πρότυπο αυτό περιγράφει τα συστήματα υψηλής τάσης, τόσο στο πλοίο, όσο και στις εγκαταστάσεις του λιμανιού. Ο στόχος του είναι η επαρκής τροφοδότηση του πλοίου με ηλεκτρική ενέργεια, για την πλήρη κάλυψη των φορτίων του, όσο αυτό βρίσκεται στο λιμάνι.

Γενικά, το πρότυπο αυτό ισχύει για εφαρμογές σχεδιασμού, εγκατάστασης και δοκιμής συστημάτων υψηλής τάσης.

Αναλυτικότερα, περιέχει πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των ακόλουθων συστημάτων:

- Σύστημα διανομής υψηλής τάσης ξηράς.
- Εξοπλισμός σύνδεσης από την ξηρά στο πλοίο.
- Μετασχηματιστές.
- Μετατροπείς ημιαγωγών.
- Σύστημα ελέγχου, παρακολούθησης, αλληλεπίδρασης και διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον, όσον αφορά το δίκτυο διανομής του πλοίου, πρέπει να υπάρχει μία ισοδυναμική σύνδεση μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης του πλοίου και της γείωσης της ακτής. Η ισοδυναμική αυτή σύνδεση αποτελεί μέρος του κυκλώματος προστασίας.

Η αξιολόγηση της συμβατότητας των δικτύων πλοίου – λιμένα διενεργείται για την εξασφάλιση της δυνατότητας σύνδεσης του πλοίου με το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμανιού. Εκτιμάται η συμβατότητα κυρίως για να προσδιοριστούν τα ακόλουθα:

- 1) Συμμόρφωση με τις απαιτήσεις αυτού του προτύπου και τυχόν αποκλίσεις από τις συστάσεις.
- 2) Ελάχιστο και μέγιστο πιθανό ρεύμα βραχυκυκλώματος.
- 3) Ονομαστικά χαρακτηριστικά της παράκτιας διάταξης.
- 4) Αποδεκτές διακυμάνσεις τάσης στο δίκτυο του πλοίου.
- 5) Απαιτήσεις ανεκτούς λειτουργίας των συστημάτων του πλοίου, όταν συνδέονται με την τροφοδοσία της ξηράς.
- 6) Έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής του εξοπλισμού πλοίου.
- 7) Εξασφάλιση συμβατότητας συστήματος διανομής (ουδέτερος, μετασχηματιστής ισχύος ακτής, γείωση).
- 8) Λειτουργία προστασίας, παρακολούθησης και συναγερμού σφαλμάτων της γείωσης του πλοίου.
- 9) Το επαρκές μήκος καλωδίων της εγκατάστασης.
- 10) Συμβατότητα κυκλωμάτων προστασίας.

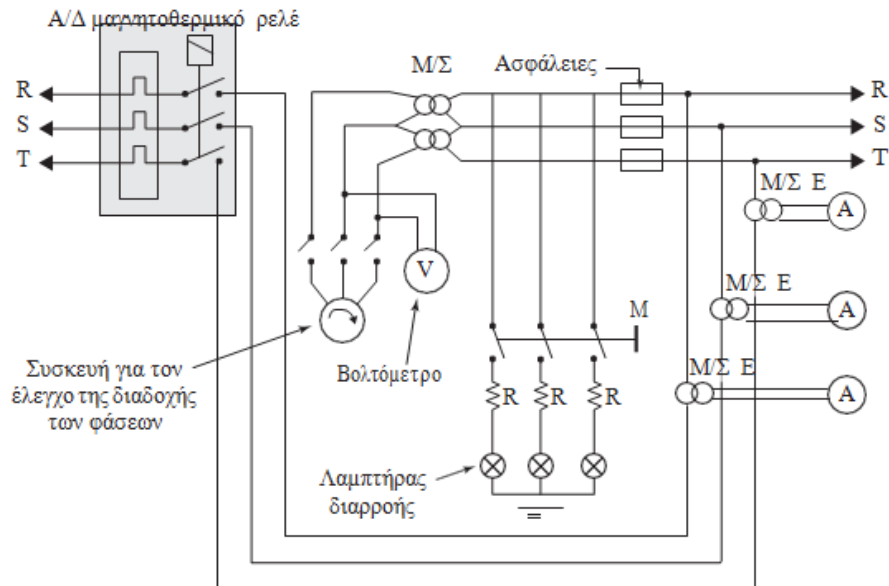
Η ασφάλεια του προσωπικού είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες και πρέπει να διασφαλιστεί ανεξαρτήτως εγκατάστασης ή κόστους. Η κατασκευή του παραπάνω εξοπλισμού με τις αντίστοιχες τυποποιήσεις ασφαλούς λειτουργίας πρέπει να εξασφαλίζουν την ασφάλεια του προσωπικού:

- κατά τη διάρκεια της σύνδεσης του πλοίου με την ξηρά.
- κατά τη διάρκεια όλων των καταστάσεων κανονικής λειτουργίας.
- σε περίπτωση βλάβης.
- κατά την αποσύνδεση του πλοίου.
- όταν το πλοίο είναι εκτός λειτουργίας.

Πρέπει να σημειωθεί επιπλέον, πως όλα τα παραπάνω, αφορούν την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάρκεια των περιόδων που το πλοίο βρίσκεται δεμένο στην αποβάθρα ή κατά την συντήρηση και επισκευή του, όπου το πλοίο βρίσκεται εξ ολοκλήρου στη στεριά.



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 1.13: Διάταξη παροχής ηλεκτρικού ρεύματος πλοίου από την ξηρά. [7]

## 1.8 Τεχνικά χαρακτηριστικά κατά την τυποποίηση της ψυχρής εκκίνησης

Σύμφωνα με τις τυποποιήσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης του πλοίου που μελετάται οφείλουν να είναι συμμορφωμένα, τόσο με τις απαιτήσεις του πλοίου, όσο και με τα διεθνή κατασκευαστικά πρότυπα.

Πιο συγκεκριμένα τα τεχνικά χαρακτηριστικά που πρέπει να διαμορφωθούν κατάλληλα αφορούν κυρίως:

- Την εφαρμογή των διεθνών ηλεκτρικών προτύπων που είναι διαθέσιμα και τις αντίστοιχες οδηγίες εγκατάστασης.
- Το σχεδιασμό της εγκατάστασης και τη δοκιμή των συστημάτων υψηλής τάσης. Τα συστήματα χαμηλής τάσης δεν καλύπτονται από το συγκεκριμένο πρότυπο.
- Τα συστήματα ξηράς, καθώς και τον εξοπλισμό που αφορά τη σύνδεση της ξηράς με το πλοίο.
- Τη διαμόρφωση του εφεδρικού συστήματος έκτακτης ανάγκης.
- Τον ορισμό της ονομαστικής τάσης στα 6.6 – 11 kV. (Δεν υπάρχει ορισμός συγκεκριμένης συχνότητας)
- Τα εξειδικευμένα χαρακτηριστικά πλοίων όπως κρουαζιερόπλοια, πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, δεξαμενόπλοια και αεροπλανοφόρα.

Γενικά, το διεθνές πρότυπο συμβάλλει στην εναρμόνιση του εξοπλισμού της εγκατάστασης πλοίων ψυχρής εκκίνησης, αποφεύγοντας έτσι τυχούσες διαφορές στα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων. Με αυτόν τον τρόπο, στοιχεία όπως τάσεις, ρευματολίπτες και ρευματοδότες, διαμορφώνονται με τέτοιο τρόπο, ώστε η ψυχρή εκκίνηση να μπορεί να χρησιμοποιηθεί πιο αποτελεσματικά σε ποικίλες περιπτώσεις. Με τη χρήση αυτών των τυποποιημένων εγκαταστάσεων, βελτιώνεται η ασφάλεια των συστημάτων, και τα πλοία δεν αντιμετωπίζουν δυσκολίες σύνδεσης σε οποιοδήποτε λιμάνι φέρει αντίστοιχη εγκατάσταση ξηράς.

Σε ότι αφορά την εγκατάσταση του λιμανιού για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε πλοία, υπάρχουν τυποποιήσεις τόσο για τα όργανα όσο και για την προστασία αυτών των διατάξεων. Πιο συγκεκριμένα ο πίνακας διανομής ακτής πρέπει να είναι εφοδιασμένος με:

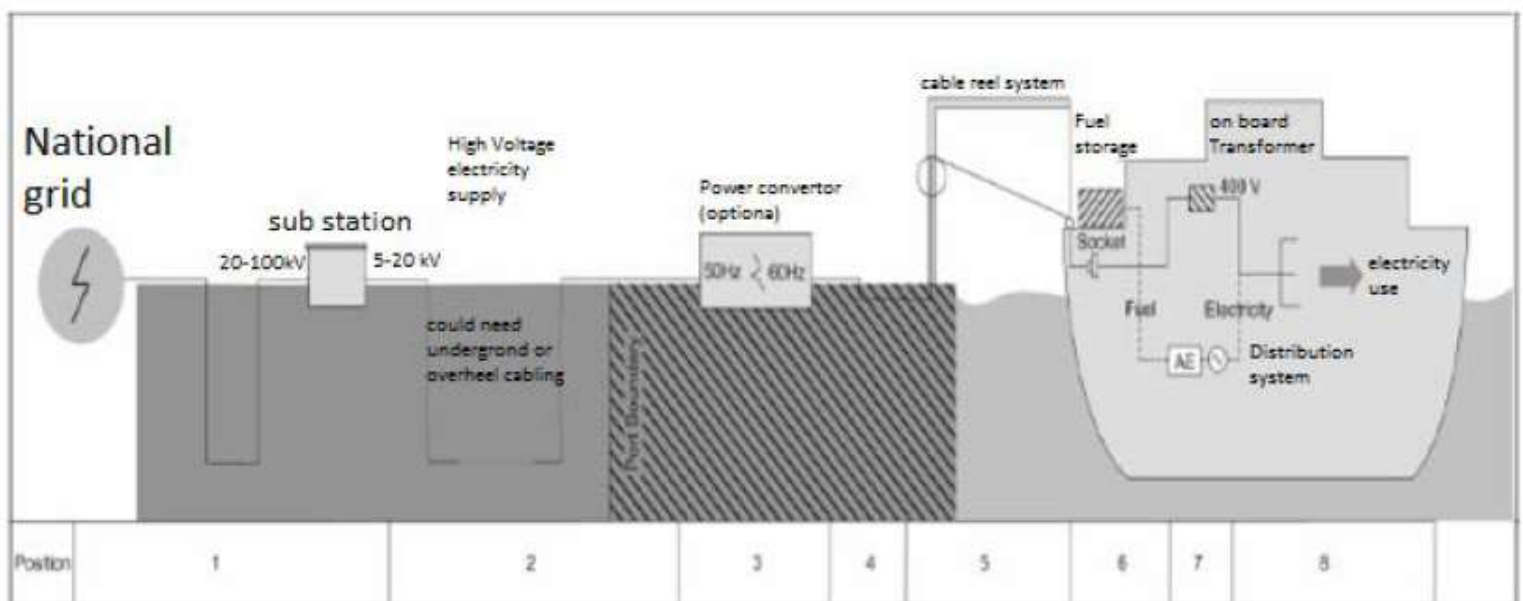
1. Βολτόμετρο: και για τις τρεις φάσεις.
2. Διατάξεις προστασίας έναντι βραχυκυκλώματος: με δυνατότητα ενεργοποίησης και συναγερμού.
3. Διατάξεις προστασίας έναντι υπερέντασης: με δυνατότητα ενεργοποίησης και συναγερμού.
4. Διατάξεις προστασίας έναντι σφάλματος γείωσης: με δυνατότητα συναγερμού.

Τα συστήματα προστασίας, διαθέτουν εφεδρική μπαταρία επαρκή για τουλάχιστον τριάντα λεπτά. Σε περίπτωση αποτυχίας της φόρτισης της μπαταρίας ενεργοποιείται η διαδικασία δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας και στο σύστημα ενεργοποιείται ένας συναγερμός, για να προειδοποιεί το αρμόδιο προσωπικό. Οι συναγερμοί και οι ενδείξεις πρέπει να παρέχονται σε κατάλληλη τοποθεσία, για ασφάλεια και αποτελεσματικότητα.

Ο εξοπλισμός του πλοίου προστατεύεται και ελέγχεται από τα συστήματα προστασίας και ελέγχου του πλοίου. Εάν η παράκτια παροχή ηλεκτρικής ενέργειας αποτύχει για οποιοδήποτε λόγο, ενεργοποιούνται οι γεννήτριες του πλοίου και αποσυνδέεται η παροχή ξηράς. Έτσι επιταχύνεται σταδιακά η εξέλιξη του συγκεκριμένου κλάδου, λόγω της αυξημένης συμβατότητας μεταξύ εγκαταστάσεων στην ξηρά και επί των πλοίων.

## 1.9 Προτεινόμενη δομή της διάταξης ψυχρής εκκίνησης κατά την Ευρωπαϊκή Ένωση

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει παρουσιάσει μια τυπική διαμόρφωση των εγκαταστάσεων ψυχρής εκκίνησης στο άρθρο 2006/339/EK. Η διαμόρφωση αυτή απεικονίζεται στην ακόλουθη Εικόνα 1.14 και είναι ένα αποκεντρωμένο σύστημα, καθώς υπάρχει ένας μετατροπέας συχνότητας σε κάθε θέση της ηλεκτρικής εγκατάστασης πλοίου – λιμένα.



Εικόνα 1.14 : Ολοκληρωμένη εγκατάσταση ψυχρής εκκίνησης πλοίου – λιμένα. [3]

Παρακάτω εξηγούνται επιγραμματικά οι θέσεις της παραπάνω εικόνας.

1. Ένας τοπικός υποσταθμός μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια των 20-100 kV, που παρέχονται από το εθνικό δίκτυο στην απαιτούμενη τάση των 6-20 kV αντίστοιχα.
2. Τα καλώδια παρέχουν την τάση των 6-20 kV στο σύστημα παροχής του λιμανιού.
3. Τα περισσότερα πλοία απαιτούν τροφοδοσία στα 60 Hz, οπότε στο στάδιο αυτό γίνεται μετατροπή των 50 Hz του εθνικού δικτύου σε 60 Hz σύμφωνα με το πρότυπο.
4. Η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στο τερματικό σύστημα του λιμανιού μέσω καλωδίων υψηλής τάσης.
5. Για εύκολο χειρισμό, τα καλώδια, που συνδέουν το τερματικό του λιμανιού με το πλοίο, συνδέονται χρησιμοποιώντας ηλεκτρομηχανικά συστήματα τροφοδοσίας με καλώδια που είναι τοποθετημένα σε «πύργο» τροχών.
6. Η υποδοχή πάνω στο πλοίο για το καλώδιο σύνδεσης.
7. Η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται στη συνέχεια, αν χρειάζεται, από υψηλή τάση σε τάση των 400 V, για χρήση στα δευτερεύοντα συστήματα του πλοίου.  
Η προτεινόμενη θέση για το μετασχηματιστή αυτόν είναι μέσα στο μηχανοστάσιο, δίπλα στον κεντρικό πίνακα.
8. Η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται σε όλη την εγκατάσταση και οι βοηθητικοί κινητήρες απενεργοποιούνται.

Πρόσθετα η συνύπαρξη δύο δικτύων επιτρέπει εύκολα την ανεξάρτητη αναβάθμιση / επέκταση / συντήρηση ενός εκ των δύο. Ειδικά αν το δίκτυο διανομής των λοιπών λιμενικών εγκαταστάσεων προϋπάρχει στο υφιστάμενο λιμάνι και προστίθεται απλά στο δίκτυο ψυχρής εκκίνησης. Συνήθως η διάταξη της ψυχρής εκκίνησης συνδέεται με το τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία του τερματικού συστήματος του λιμανιού από τις λοιπές λιμενικές εγκαταστάσεις.

Αυτό συμβαίνει κυρίως για δύο λόγους:

- Πρώτον, γιατί έτσι προκύπτει ότι μια πιθανή αστοχία τους συστήματος ψυχρής εκκίνησης ή πρόκληση φαινομένων ποιότητας ισχύος, π.χ. αστάθεια τάσης, δε θα επηρεάσει σημαντικά το δίκτυο διανομής των λοιπών λιμενικών εγκαταστάσεων.
- Δεύτερον, για να δοθεί η δυνατότητα διαφορετικών μετρήσεων της κατανάλωσης ενέργειας, εάν απαιτείται.

Ωστόσο, υπάρχουν διαθέσιμα και άλλα μοντέλα συστημάτων ψυχρής εκκίνησης, ανάλογα με τον τύπο του πλοίου που μελετάται και με τις διάφορες ανάγκες κάθε λιμανιού στο οποίο το πλοίο αυτό θα συνδεθεί.

## **1.10 Το πρόβλημα του αγείωτου δικτύου πλοίου και του γειωμένου ξηράς**

Η προστασία έναντι του ηλεκτρικού ρεύματος και ειδικά του ανθρώπου έναντι της ηλεκτροπληξίας εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν εντός της τροφοδοτούμενης εγκατάστασης. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζουν και οι απαιτήσεις που υπάρχουν, τόσο από πλευράς αξιοπιστίας, όσο και από πλευράς προστασίας των ατόμων που εργάζονται εντός του χώρου αυτού.

Για παράδειγμα σε ένα πολεμικό πλοίο τα άτομα, που επιβαίνουν, είναι κατάλληλα εκπαιδευμένα και γνωρίζουν τους κινδύνους του ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι, σε περίπτωση βλάβης, είναι προτιμότερο να τεθεί εκτός λειτουργίας μόνο η προβληματική συσκευή όταν εντοπιστεί, και όχι όλο το ηλεκτρικό δίκτυο της εγκατάστασης, ώστε να διατηρηθεί η μαχητικότητα και η αξιοπιστία του πλοίου.

Καταρχήν, για να γίνουν αντιληπτοί οι τρόποι και τα μέσα προστασίας κατά της ηλεκτροπληξίας, παρακάτω παρουσιάζεται η δομή της γείωσης του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας εγκατάστασης ξηράς. Γενικά το σύστημα γείωσης του υποσταθμού ξηράς σχεδιάζεται ξεχωριστά και είναι ανεξάρτητο από το αντίστοιχο σύστημα γείωσης του πλοίου.

Το σύστημα γείωσης ολόκληρης της εγκατάστασης για να είναι λειτουργικό, πρέπει να είναι πλήρως ενοποιημένο και να αποτελείται από τα εξής:

- Εσωτερική γείωση υποσταθμού ξηράς.
- Σύστημα γείωσης εξωτερικών χώρων εγκατάστασης.
- Γείωση της περιμέτρου και της θεμελίωσης του υποσταθμού ξηράς.
- Τα απαραίτητα υλικά και εξαρτήματα στερέωσης και σύνδεσης.

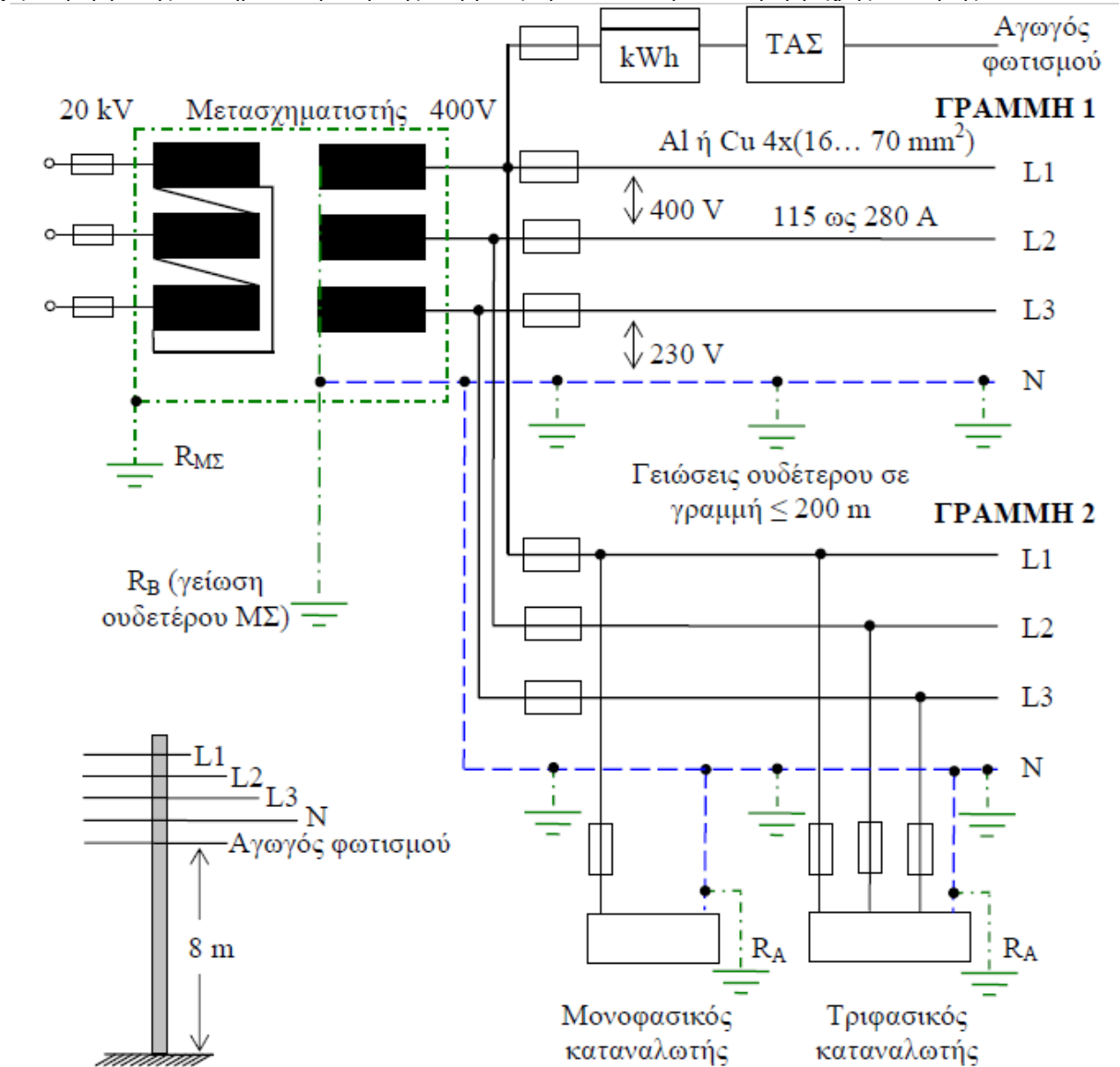
Συγκεκριμένα, το εσωτερικό σύστημα γείωσης του υποσταθμού ξηράς αποτελείται από χάλκινη μπάρα ή πλεξούδα για τη γείωση και την ισοδυναμική σύνδεση, είναι στερεωμένο στα τοιχώματα σε όλους τους χώρους, και σε αυτό συνδέονται τα εξής εξαρτήματα:

- όλα τα μεταλλικά εξαρτήματα του εξοπλισμού με χαλκό.
- οι ουδέτεροι κόμβοι των μετασχηματιστών μέσω μονωμένου, χάλκινου αγωγού.  
(Ο ουδέτερος του μετασχηματιστή απομόνωσης θα συνδέεται μέσω αντιστάτη γείωσης ουδέτερου.)
- όλες οι θύρες του υποσταθμού ξηράς μέσω μονωμένου, εύκαμπτου αγωγού.
- η γείωση περιμέτρου με δύο γυμνούς χάλκινους αγωγούς, και το πλέγμα της εξωτερικής γείωσης με δύο ξεχωριστούς γυμνούς χάλκινους αγωγούς.

Λόγω της μεγάλης έκτασης του εξωτερικού συστήματος γείωσης ξηράς θεωρείται σίγουρο ότι η αντίσταση του εδάφους είναι ιδιαίτερα χαμηλή, συνεπώς όλα τα συστήματα γείωσης είναι συνδεδεμένα στην εξωτερική γείωση. Το σύστημα γείωσης εξωτερικών χώρων αποτελείται γενικά από γυμνό αγωγό επικασσιτερωμένου χαλκού, χωρίς περίβλημα. Ο αγωγός γείωσης διέρχεται από τον ίδιο χάνδακα με τα καλώδια ισχύος MT και XT, τοποθετείται στον πυθμένα του χάνδακα και δεν έρχεται σε επαφή με τους σωλήνες καλωδίων. Ο αγωγός γείωσης συνδέεται μέσω γυμνού χάλκινου αγωγού με τα εξής:

- την πλεξούδα γείωσης του υποσταθμού ξηράς με δύο αγωγούς,
- τους ρευματοδότες ξηράς,
- όλα τα μεταλλικά εξαρτήματα του εξοπλισμού εξωτερικών χώρων, όπως κιβώτια διασύνδεσης κ.λπ.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.15, το δίκτυο χαμηλής τάσης τροφοδοτείται συνήθως μέσω ενός τριφασικού μετασχηματιστή 20kV / 400V, με αγείωτη τη μέση τάση και γειωμένο τον ουδέτερο κόμβο της χαμηλής τάσης.

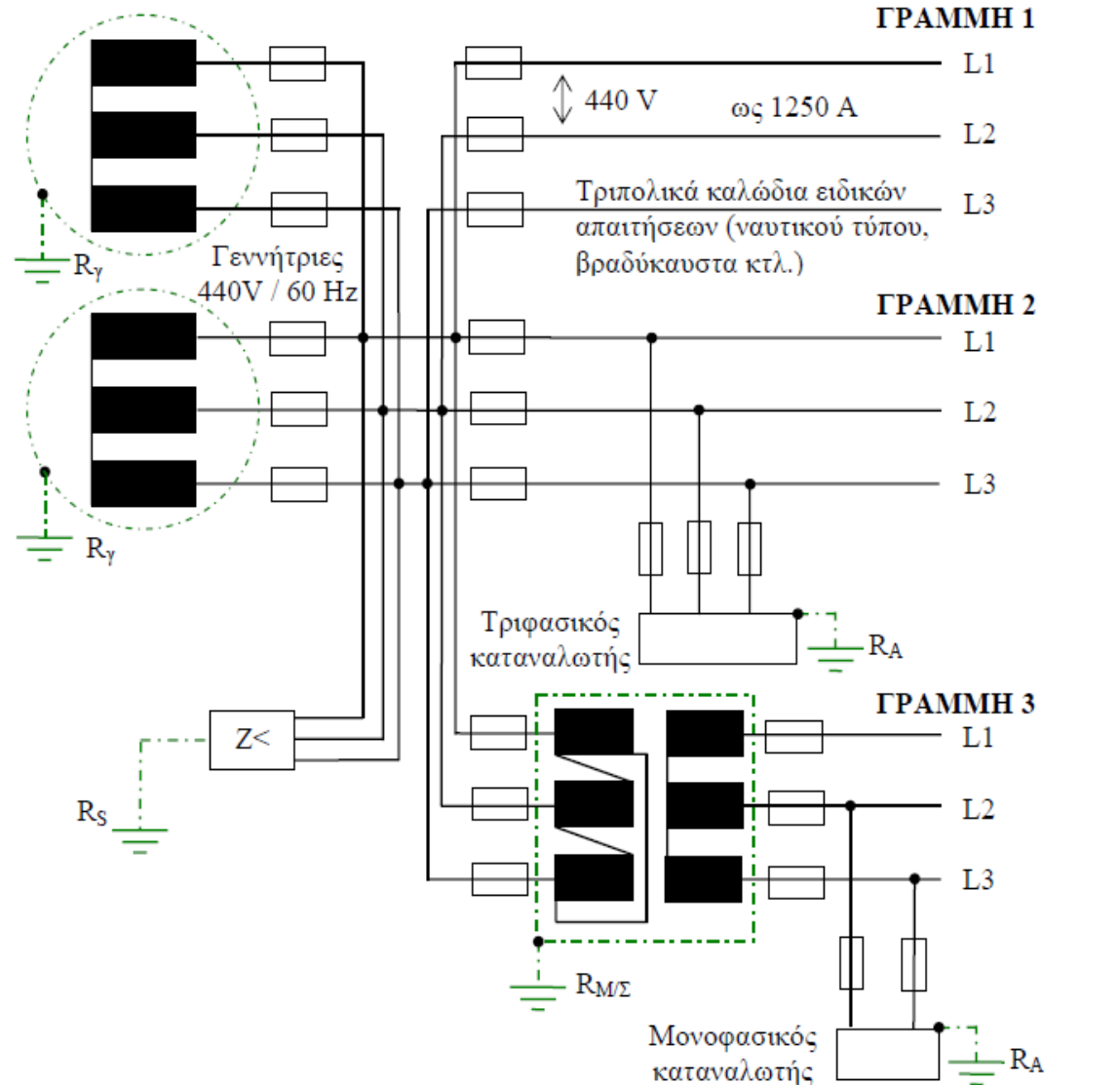


Εικόνα 1.15 : Δομή δικτύου διανομής ξηράς. Ο ουδέτερος γειώνεται στον αστέρα του μετασχηματιστή. [11]

Αντίθετα, στην περίπτωση των δικτύων πλοίων και όσων δικτύων ξηράς σχετίζονται άμεσα με την τροφοδοσία τους υπάρχει μια βασική διαφορά. Η διαφοροποίηση στα πλοία έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχουν γεννήτριες χωρίς γειωμένο τον ουδέτερο κόμβο και το σύστημα είναι πρακτικά αγείο, όπως εικονίζεται και στην ακόλουθη Εικόνα 1.16.

Για την προστασία αυτή, σε περίπτωση που το πλοίο τροφοδοτείται από το δίκτυο ξηράς, είναι απαραίτητος ένας μετασχηματιστής απομόνωσης.

Γενικά, ένα από τα πιο διαδεδομένα μέτρα προστασίας από έμμεση επαφή με αγωγούς είναι ο μετασχηματιστής γαλβανικής απομόνωσης. Ο μετασχηματιστής αυτός πρακτικά τροφοδοτεί μια συσκευή, η οποία δεν είναι πουθενά γειωμένη και το πρωτεύον τύλιγμα του είναι διαχωρισμένο από το δευτερεύον. Έτσι, στην περίπτωση που ο χρήστης έρθει σε επαφή με έναν από τους δύο αγωγούς εξόδου, δεν υπόκειται στον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας, αφού η τάση που αναπτύσσεται στο δευτερεύον είναι εξ' επαγωγής έχοντας καταργήσει την έννοια της φάσης.

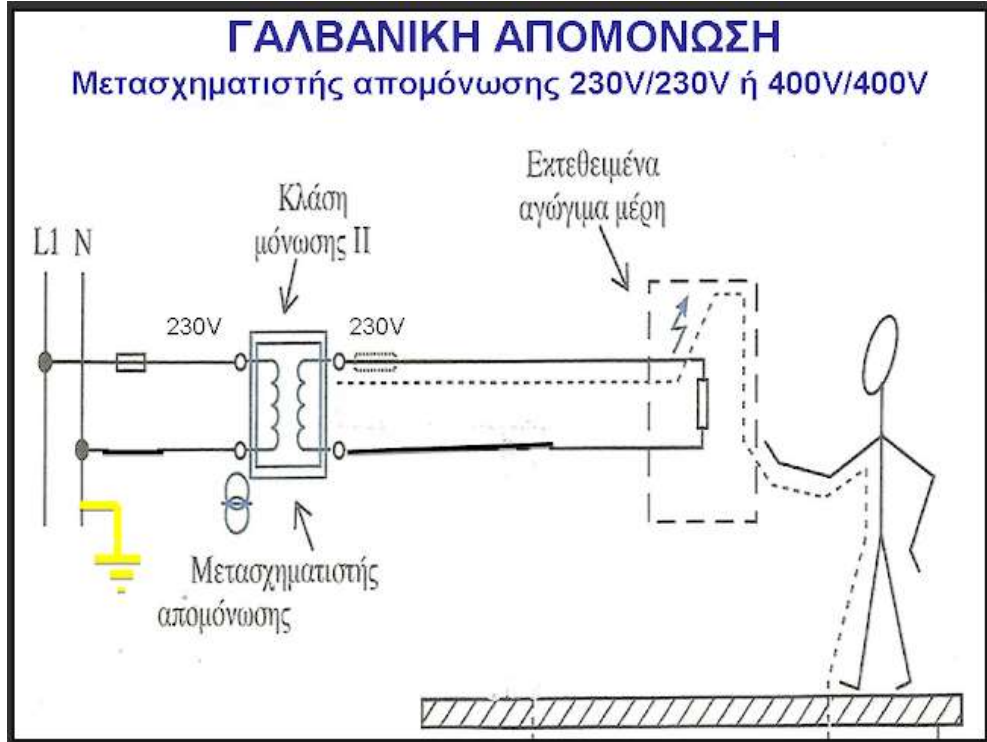


Εικόνα 1.16 : Δομή δικτύου διανομής πλοίου. Αγείωτος ο κοινός κόμβος του αστέρα των γεννητριών. [11]

Ως ισοδυναμική επιφάνεια γείωσης, αξιοποιείται όπου χρειάζεται ο μεταλλικός σκελετός του ίδιου του πλοίου.

Για να αποφευχθούν τυχαία ατυχήματα είναι αναγκαίο, πέρα από τη σωστή εκπαίδευση και την ενημέρωση του προσωπικού του πλοίου, να παρθούν και κάποια επιπρόσθετα μέτρα προστασίας. Τέτοια μέτρα είναι αναλυτικά:

- Οι εγκαταστάσεις με εκτεθειμένα μεταλλικά τμήματα συσκευών ή αγωγών, να είναι συνδεδεμένες μέσω ενός αγωγού προστασίας και συγκεντρωτικά γειωμένες με το κύτος του πλοίου.
- Να χρησιμοποιείται ηλεκτρολογικό υλικό με διπλή ή ενισχυμένη μόνωση, ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα έμμεσης επαφής του ανθρώπου με τους αγωγούς.
- Να δημιουργούνται « μη αγώγιμοι » χώροι, κυρίως στα ηλεκτροστάσια. Δηλαδή, χώροι που να διαθέτουν μονωτικό δάπεδο και μονωτικά τοιχώματα.
- Να υπάρχουν αυτόματες διατάξεις προστασίας, ώστε η επικίνδυνη τάση επαφής σε εκτεθειμένα μεταλλικά μέρη, να μη διαρκεί πάνω από ένα χρονικό διάστημα που να κάνει την ηλεκτροπληξία θανατηφόρα.



Εικόνα 1.17 : Διάταξη μετασχηματιστή γαλβανικής απομόνωσης. [11]

### 1.11 Το πρόβλημα του αγείωτου δικτύου πλοίου και του γειωμένου ξηράς

Στην παράγραφο αυτή γίνεται λεπτομερής ανάλυση της μεθόδου ηλεκτροδότησης ελλιμενισμένων πλοίων από την ξηρά και ταυτόχρονα καταγράφεται ο απαραίτητος εξοπλισμός πλοίων και λιμένων για την υλοποίηση της μεθόδου αυτής.

Η παροχή ενέργειας από την ξηρά γίνεται για την κάλυψη των εξής αναγκών ηλεκτροδότησης του πλοίου κατά την παραμονή του στο λιμάνι:

- Φορτοεκφόρτωση.
- Ανεφοδιασμός.
- Φωτισμός.
- Κλιματισμός.
- Θέρμανση.
- Λοιπά ηλεκτρονικά συστήματα του πλοίου.

Χωρίς τη χρήση της μεθόδου της ψυχρής εκκίνησης, οι παραπάνω λειτουργίες απαιτούν την κατανάλωση τεράστιων ποσοτήτων βαρέων καυσίμων προκαλώντας σημαντική αέρια ρύπανση, ειδικά στην περιοχή του λιμένα.

Για την ορθή λειτουργία της μεθόδου υπάρχουν κάποιες βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούν τόσο τα λιμάνια και τα τοπικά δίκτυα ηλεκτροδότησης, όσο και τα ίδια τα πλοία. Στην περίπτωση των πλοίων και των λιμανιών είναι κυρίως ζήτημα εξοπλισμού, ενώ σε αυτήν του δικτύου ηλεκτροδότησης μεγάλη σημασία έχουν τα μεγέθη τάσης και συχνότητας, τα οποία επηρεάζουν άμεσα τη συμβατότητα των εγκαταστάσεων.

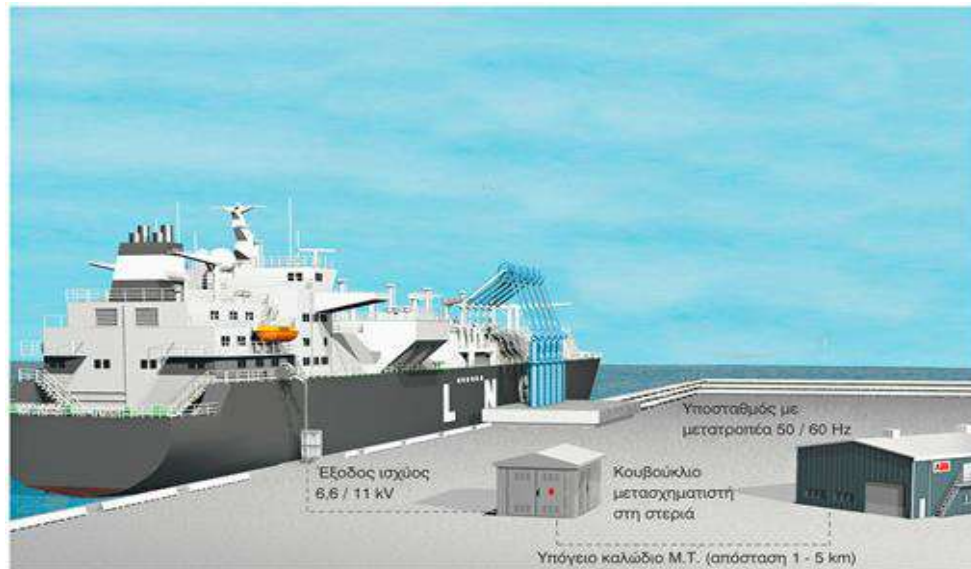


Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Ο εξοπλισμός που χρειάζεται είναι ο εξής:

- Σταθμός παροχής ενέργειας.
- Μετατροπέας τάσης και συχνότητας.
- Εξοπλισμός για τη μεταφορά της ενέργειας.
- Εγκατάσταση διασύνδεσης και διαχείρισης ενέργειας πάνω στο αντίστοιχο πλοίο.

Στη συνέχεια θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση των παραπάνω στοιχείων της εγκατάστασης, καθώς όλος αυτός ο εξοπλισμός πρέπει να επιλέγεται με μεγάλη προσοχή και να πληρεί τις απαιτούμενες προϋποθέσεις.



Εικόνα 1.18 : Εικονική προσομοίωση της εγκατάστασης λιμένα για ψυχρή εκκίνηση πλοίων. [12]

### 1.11.1 Μετασχηματιστής

Σε κάθε υποσταθμού μέσης τάσης ο μετασχηματιστής ισχύος ή απλά μετασχηματιστής είναι από τις βασικότερες συσκευές. Η ηλεκτρική αυτή συσκευή αξιοποιεί ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα ώστε να μετατρέψει την εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός επιπέδου τάσης σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια διαφορετικού επιπέδου τάσης, αλλά ίδιας συχνότητας.



Εικόνα 1.19 : Μετασχηματιστής Ισχύος. [13]



Στην μέθοδο ψυχρής εκκίνησης η παροχή ενέργειας των εγκαταστάσεων συνδέεται συνήθως με το βασικό τοπικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικού ρεύματος. Η εισερχόμενη τάση του ηλεκτρικού ρεύματος από το βασικό δίκτυο θα πρέπει να είναι σε ένα επίπεδο διανομής από 10 kV έως 40 kV ή στο επίπεδο μεταφοράς 60 kV και άνω. Τα περισσότερα σκάφη λειτουργούν με τριφασική τροφοδοσία, 60 Hz και τάση 440V ή 6,6 kV. Επομένως απαιτείται ένας μετασχηματιστής, κατά προτίμηση ξυρού τύπου, ο οποίος θα κατεβάζει την τάση του δικτύου ξηράς και θα την προσαρμόζει στις ανάγκες του εκάστοτε πλοίου.

Παραδείγματος χάρη, στα POL-A και POL-B (που σχετίζονται με τα λιμάνια του Λος Άντζελες και του Λονγκ Μπιτς αντίστοιχα), αξιοποιείται ένας μετασχηματιστής τάσης με ονομαστική ισχύ 100MVA. Το παραπάνω μέγεθος, αν και μεγάλο, είναι λογικό λαμβάνοντας υπόψη τη συνεχή αύξηση της ονομαστικής ισχύος προς βελτίωση της διαχείρισης των φορτίων ψυχρής εκκίνησης. Τα μεγάλα κρουαζιερόπλοια παρουσιάζουν επίσης υψηλή ζήτηση φορτίου.



Εικόνα 1.20 : Παράδειγμα Μετασχηματιστή 230 kV – 156.000 kVA. [14]

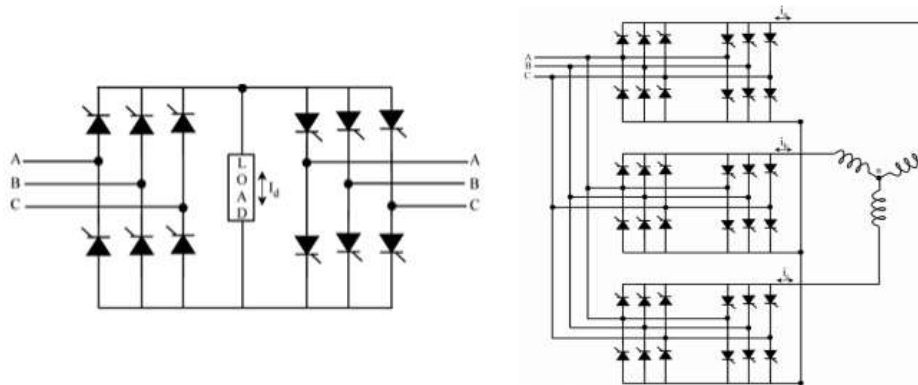
### 1.11.2 Μετατροπέας

Καθώς το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου λειτουργεί με συχνότητα 60Hz, και το εθνικό δίκτυο ηλεκτροδότησης έχει συχνότητα 50Hz, είναι αναγκαίο ο υποσταθμός του λιμανιού να έχει και ένα μετατροπέα συχνότητας (SFC) ή κυκλομετατροπέα. Ο SFC είναι ένας μετατροπέας εναλλασσόμενου σε εναλλασσόμενο ρεύμα ( E.P.– E.P.), ημιτονοειδούς εξόδου και παρέχει στο δίκτυο του πλοίου την απαιτούμενη συχνότητα.

Οι E.P.– E.P. μετατροπείς χωρίζονται σε εκείνους που ρυθμίζουν μόνο την ενεργό τιμή της τάσης και εκείνους που μεταβάλλουν και τη συχνότητα και χαρακτηρίζονται κυκλομετατροπείς. Οι συνηθέστερες εφαρμογές τους είναι σε ηλεκτρονικούς διακόπτες, στον έλεγχο και στην ομαλή εκκίνηση E.P. κινητήρων, σε ροοστάτες και σε λειτουργίες αντιστάθμισης.

Το κύκλωμα του τριφασικού κυκλομετατροπέα μπορεί να δέχεται τριφασική είσοδο και να αποδίδει μονοφασική έξοδο ή να δέχεται τριφασική είσοδο και να αποδίδει τριφασική έξοδο. Οι γωνίες έναυσης ορίζονται έτσι ώστε η αρνητική και η θετική τάση που προκύπτει να ταυτίζονται κατά απόλυτη τιμή.

Στη συνέχεια ρυθμίζεται έτσι ώστε να άγουν για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ο θετικός και ο αρνητικός μετατροπέας παράγοντας έτσι μια εναλλασσόμενη τάση με διαφορετική συχνότητα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.21.



Εικόνα 1.21 : Διάταξη τριφασικού κυκλομετατροπέα μονοφασικής και τριφασικής εξόδου. [11]

Πιο συγκεκριμένα ο μετατροπέας συχνότητας είναι μια πολυμερής διάταξη, η οποία αποτελείται από τα εξής κύρια στοιχεία:

- Τον Ανορθωτή: Ο ανορθωτής είναι μια ηλεκτρική συσκευή που λαμβάνει στην είσοδο της εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο αναστρέφει περιοδικά την κατεύθυνση, και αποδίδει στην έξοδο της συνεχές ρεύμα, το οποίο ρέει μόνο σε προς μια κατεύθυνση.
- Προστατευτική διάταξη εισόδου: Η μονάδα του ανορθωτή διαθέτει προστατευτικές διατάξεις με αυτόματο διακόπτη εισόδου εναλλασσόμενου ρεύματος.
- Αντιστροφέας: Το ηλεκτρονικό κύκλωμα του αντιστροφέα μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Παίζει ρόλο στη διαμόρφωση των τιμών εξόδου, αφού, κατά τη συνεχή του λειτουργία ο αντιστροφέας είναι ικανός να παρέχει έξοδο με τα ακριβή προδιαγεγραμμένα χαρακτηριστικά.

Γενικά, ο SFC τίθεται εκτός λειτουργίας όταν οι διαταραχές στην κανονική παροχή E.P. του δικτύου τροφοδοσίας υπερβαίνουν τις ανοχές που έχουν οριστεί.

### 1.11.3 Αυτόματος διακόπτης ισχύος –Σύστημα προστασίας

Γενικά στην ηλεκτρολογία, διακόπτης ονομάζεται κάθε ηλεκτρικό εξάρτημα που μεταβάλλει τη δυνατότητα διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτό. Ο ιδανικός διακόπτης μεταβάλλει ακαριαία την κατάσταση του και δεν συμβαίνει καμία μετατροπή ενέργειας σε αυτόν και η λειτουργία του είναι πλήρως ανεξάρτητη από το είδος του ηλεκτρικού ρεύματος που το διαρρέει (E.P. ή Σ.Ρ.).

Οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος είναι μια ειδική κατηγορία διακοπών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως μέσο προστασίας και ρόλος τους είναι στην περίπτωση βραχυκυκλώματος να διακόπτουν το πολύ μεγάλο ρεύμα που τους διαρρέουν. Αυτό το πετυχαίνουν, μέσω ειδικών διατάξεων που σβήνουν το τόξο που σχηματίζεται ανάμεσα στις επαφές τους.

Σε δίκτυα χαμηλής τάσης υπάρχουν αυτόματοι διακόπτες των 30kA, 50kA ή και χαμηλότερης τιμής. Πιο αναλυτικά, οι διακόπτες ισχύος, ανάλογα με το ρευστό που χρησιμοποιείται για τη σβέση του τόξου, χωρίζονται σε διακόπτες πτωχού ελαίου, εξαφθοριούχου θείου (SF6) και τους διακόπτες κενού.



Εικόνα 1.22 : Διακόπτης Ισχύος SF6 και ανάλυση των αριθμών που βρίσκονται στην εικόνα. [15]

Στις εγκαταστάσεις ψυχρής εκκίνησης πλοίων μεταξύ της εξόδου του μετασχηματιστή στον υποσταθμό του λιμανιού και των καλωδίων που πηγαίνουν στη βάση σύνδεσης του πλοίου, απαιτείται ένα σύστημα διακοπών ισχύος. Το σύστημα αυτό είναι ένας μηχανισμός που συνδυάζει πολλούς διακόπτες ισχύος και ασφάλειες και μέσα απόξευξης που χρησιμοποιούνται για την επίβλεψη, την προστασία και την απομόνωση του ηλεκτρικού εξοπλισμού τροφοδοσίας των πλοίων. Επιπλέον, ο μηχανισμός αυτός συνδέεται άμεσα με την αξιοπιστία της εγκατάστασης και κρίνεται απαραίτητος για την ασφαλή λειτουργία της, αφού απενεργοποιείται η τροφοδοσία σε περίπτωση βλάβης ή μη φυσιολογικών τιμών τάσης και ρεύματος.

Στην παραπάνω διάταξη ασφαλείας απαιτείται και ένα προστατευτικό ρελέ, για την άμεση προστασία του μετασχηματιστή και των καλωδίων τροφοδοσίας. Τυπικά, ο γενικός πίνακας βρίσκεται σε κάθε μία από τις 2 πλευρές (υψηλής και χαμηλής τάσης) των μεγάλων μετασχηματιστών.



Εικόνα 1.23 : Διάταξη πίνακα διακοπτικού υλικού. [16]

Όπως προκύπτει και από τα παραπάνω, ένα τέτοιο σύστημα είναι απαραίτητο ανάμεσα στην έξοδο του μετασχηματιστή και τα καλώδια που μεταβαίνουν στον ηλεκτρικό πίνακα σύνδεσης της αποβάθρας σε περίπτωση εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης.

#### 1.11.4 Καλώδια - Αγωγοί

Γενικά η κατασκευή που στοχεύει στη μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος ή μηχανικών δυνάμεων σε μια διάταξη ηλεκτρικού κυκλώματος ονομάζεται καλώδιο. Για την κατασκευή ενός καλωδίου χρησιμοποιούνται δύο ή και περισσότερα σύρματα, συνήθως πλεγμένα το ένα γύρω από το άλλο. Στο εσωτερικό των ηλεκτρικών καλωδίων υπάρχει ένας αγωγός χαμηλής αντίστασης, που μεταφέρει το ρεύμα, και η μόνωση του καλωδίου, η οποία εμποδίζει την άμεση επαφή του με γειτονικά αντικείμενα και το προστατεύει από την επικίνδυνη γειτνίαση του με αυτά.

Ο χαλκός (Cu) και το αλουμίνιο (Al) είναι τα πιο διαδεδομένα υλικά που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για την κατασκευή των αγωγών. Με τον χαλκό να είναι κατά 50 % ακριβότερος από το αλουμίνιο.



Εικόνα 1.24: Καλώδιο μέσης τάσης με μόνωση. [15]

Τα καλώδια και οι αγωγοί της ηλεκτρικής εγκατάστασης ενός πλοίου είναι παρόμοια με αυτά της εγκατάστασης ξηράς που το τροφοδοτεί. Προκειμένου τα καλώδια αυτά να διατηρηθούν σε ένα διαχειρίσιμο μέγεθος, η συνολική ισχύς που παρέχει το καθένα δεν ξεπερνά τα 4 MVA. Επομένως δύο καλώδια μπορούν να παρέχουν 8 MVA κ.λπ. Συνήθως, η τάση των 6,6 kV προτιμάται στις εγκαταστάσεις ψυχρής εκκίνησης, καθώς έτσι μειώνεται αισθητά το μέγεθος και η ποσότητα του υλικού των καλωδίων που απαρτίζουν συνολικά την εγκατάσταση.

Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει οικονομία και απλότητα σε τέτοιου είδους ηλεκτρικά συστήματα, αφού γενικά τα παραπάνω καλώδια είναι ακριβά και δύσκολα στη διαχείριση, κυρίως όταν είναι πολύ ογκώδη.



Εικόνα 1.25 : Καλώδια μέσης τάσης σε εγκατάσταση λιμανιού. [16]



Από την άλλη μεριά το μέγεθος των καλωδίων είναι σχεδιασμένο ανάλογα με τις διεθνείς προδιαγραφές σχεδίασης ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Συχνά κάθε καλώδιο διαθέτει έναν αγωγό ανά φάση και ένα ξεχωριστό αγωγό για επικοινωνία και έλεγχο.



Εικόνα 1.26 : Σύνδεση καλωδίων. [16]

Απαραίτητη είναι ακόμα και η τοποθέτηση πολλών διακοπών κοντά στην προβλήτα, ώστε να απενεργοποιείται η κάθε υποδοχή, όταν δεν χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία πλοίου.

#### 1.11.5 Αλληλασφαλίσεις – Διατάξεις διασύνδεσης

Γενικά, στην άκρη κάθε λιμανιού τοποθετούνται οι εγκαταστάσεις υποδοχής καλωδίων τροφοδοσίας οι οποίες από εκεί συνδέονται με τους κοντινούς ηλεκτρικούς πίνακες. Με την άφιξη του πλοίου στο λιμάνι και αφού τοποθετηθούν κατάλληλα τα καλώδια σε αυτές τις εγκαταστάσεις, αφαιρούνται κάποια κλειδιά. Τα κλειδιά αυτά τοποθετούνται σε κατάλληλες κλειδαριές πάνω στον πίνακα με σκοπό τον διαδοχικό έλεγχο του εξοπλισμού, των μηχανημάτων, καθώς και τη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας της τροφοδοσίας.



Εικόνα 1.27 : Εγκατάσταση υποδοχής καλωδίων τροφοδοσίας πλοίου. [16]

Πιο αναλυτικά, η διαδικασία συνδέσεως του πλοίου είναι η ακόλουθη. Όταν οι ακροδέκτες από το πλοίο εισέλθουν στην εγκατάσταση, τότε το κλειδί μπορεί να αφαιρεθεί. Αυτό κλειδώνει τους ακροδέκτες στην υποδοχή αποτρέποντάς τους από το να κινηθούν. Αυτό μπορεί να συμβεί για κάθε ακροδέκτη ή για σύνολο ακροδεκτών.

Έτσι στη συνέχεια ο διακόπτης κλείνει και κρατά τα κλειδιά εγκλωβισμένα. Τότε η ηλεκτρική πηγή ενέργειας στο πλοίο συγχρονίζεται με την ηλεκτρική πηγή ενέργειας που παρέχεται από την ξηρά. Όταν επιτευχθεί αυτός ο συγχρονισμός, ο κεντρικός διακόπτης στο πλοίο κλείνει και αυτό αρχίζει να λαμβάνει ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ οι ντιζελοκινητήρες απενεργοποιούνται.

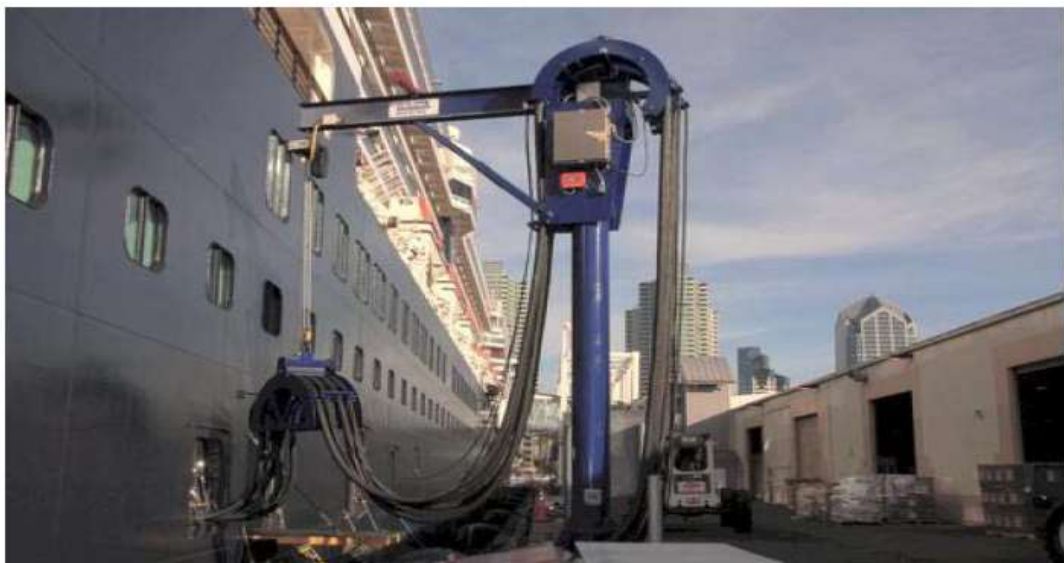


Εικόνα 1.28 : Υποδοχή καλωδίων τροφοδοσίας πλοίου. [16]

Σήμερα, στις σύγχρονες εγκαταστάσεις λιμένα έχουν τοποθετηθεί υποδοχείς καλωδίων τροφοδοσίας κάθε 65 μέτρα, για να εξασφαλίσουν ευελιξία στη σύνδεση, μη γνωρίζοντας που ακριβώς κατά μήκος της αποβάθρας θα δέσει το πλοίο, αλλά και που είναι τοποθετημένα τα καλώδια πάνω στο κάθε πλοίο.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι σύνδεσης των καλωδίων τροφοδοσίας με τα πλοία, και εξαρτώνται κυρίως από το λιμάνι και τη μορφή της εγκατάστασης, που αυτό έχει αναπτύξει. Οι κύριοι τρόποι σύνδεσης είναι οι εξής:

1. Η χρήση γερανού αποτελεί τον πρώτο και πιο διαδεδομένο τρόπο διασύνδεσης πλοίου με την παροχή από το λιμάνι. Σε αυτήν την περίπτωση ο γερανός βρίσκεται στην άκρη του λιμανιού, και τα καλώδια, τα οποία έρχονται από την εγκατάσταση υποδοχής καλωδίων τροφοδοσίας, μεταφέρονται πάνω στο πλοίο μέσω του γερανού.



Εικόνα 1.29 : Γερανός μεταφοράς καλωδίων. [16]

2. Ο δεύτερος τρόπος αξιοποιεί ένα τρεχούμενο γερανοφόρο όχημα, το οποίο ανυψώνει τα καλώδια τροφοδοσίας. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ ιδιαίτερη, και δεν εφαρμόζεται συχνά σε πολλά λιμάνια. Στην περίπτωση αυτή το όχημα καταφθάνει 30 λεπτά πριν τον ελλιμενισμό του πλοίου και συνδέεται μέσω καλωδίων με την εγκατάσταση υποδοχής καλωδίων τροφοδοσίας. Στη συνέχεια, το όχημα μεταφέρει τα καλώδια πάνω στο πλοίο, μέσω του συστήματος ανύψωσης.



Εικόνα 1.30 : Τρεχούμενο γερανοφόρο όχημα. [16]

3. Η εκτενής εγκατάσταση καλωδίων στο χώρο του λιμένα γενικά αποφεύγεται από της αρμόδιες διοικήσεις. Έτσι στις μέρες μας, ο νέος τρόπος που έχει αρχίσει και καθιερώνεται σταδιακά θέλει η μεταφορά όλων των απαιτούμενων καλωδίων να γίνεται από το ίδιο το πλοίο. Με αυτόν τον τρόπο όχι μόνο αποφεύγονται οι παραπάνω εγκαταστάσεις στο λιμάνι, αλλά η σύνδεση πραγματοποιείται πιο εύκολα και πιο γρήγορα. Σε αυτήν την περίπτωση το καρούλι των καλωδίων διασύνδεσης βρίσκεται πάνω στο καράβι και όταν αυτό αγκυροβολήσει στο λιμάνι, τα καλώδια ξετυλίγονται και τα συνδέονται στις εγκαταστάσεις υποδοχής.



Εικόνα 1.31 : Μεταφορά καλωδίων τροφοδοσίας πάνω στο πλοίο. [16]

### 1.11.6 Πυκνωτές για αντιστάθμιση ισχύος

Γενικά κάθε επαγωγικό φορτίο  $Z$ , που τροφοδοτείται από πηγή εναλλασσόμενης τάσης σταθερής ενεργού τιμής  $V$ , καταναλώνει ισχύ με συντελεστή ισχύος  $\cos\phi$ . Η ισχύς αυτή όμως δεν είναι η συνολική που προσφέρεται από το δίκτυο τροφοδοσίας. Υπάρχει και ένα ποσοστό ισχύος, το οποίο αποθηκεύεται ή επιστρέφει στο δίκτυο και δεν καταναλώνεται από το φορτίο. Το ποσοστό αυτό χαρακτηρίζεται ως άεργος ισχύς  $Q$ , ενώ η ωφέλιμη ισχύς που καταναλώνεται τελικά στο φορτίο ονομάζεται ενεργός ισχύς  $P$ . Το μιγαδικό άθροισμα των δύο παραπάνω μεγεθών δίνει τη φαινόμενη ισχύ  $S$ , η οποία είναι η συνολική ισχύς που υπάρχει στο δίκτυο τροφοδοσίας του φορτίου που μελετάται.

$$\hat{S} = P + jQ \quad (\text{Σχέση : 1.1})$$

Στόχος κάθε ηλεκτρικού κυκλώματος είναι ιδανικά η εξάλειψη της άεργου ισχύος, προκειμένου να αξιοποιείται στο έπακρο όλη η διαθέσιμη ισχύς πάνω στο φορτίο.

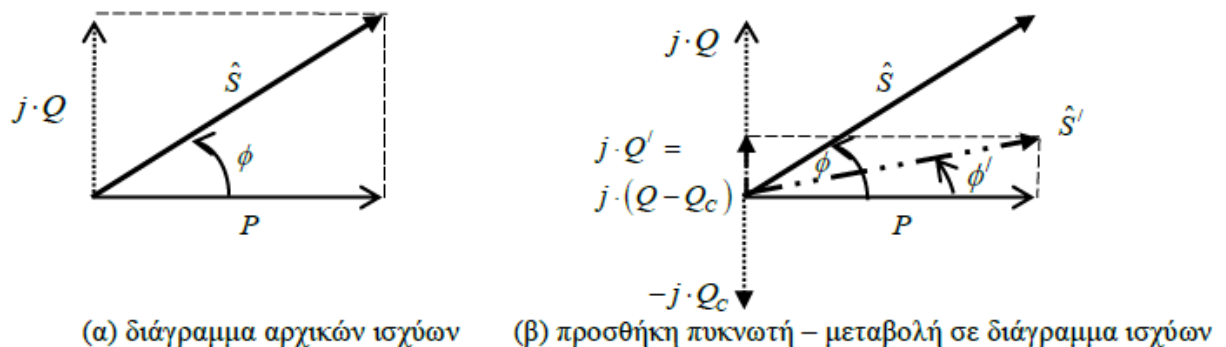
Το μέγεθος που εξετάζει το πόσο αποδοτικό είναι ένα δίκτυο και δίνει ταυτόχρονα πληροφορίες για το επίπεδο της άεργου ισχύος, είναι ο συντελεστής ισχύος  $\cos\phi$ .

$$\cos\phi = \frac{P}{S} \quad (\text{Σχέση : 1.2})$$

Ο συντελεστής αυτός συγχρόνως χαρακτηρίζεται ως επαγωγικός όταν η άεργος ισχύς είναι θετική, δηλαδή στο φορτίο κυριαρχούν τα πηνία. Ενώ χαρακτηρίζεται ως χωρητικός, όταν η άεργος ισχύς είναι αρνητική, δηλαδή στο φορτίο κυριαρχούν οι πυκνωτές και ωμικός όταν δεν υπάρχει άεργος ισχύς, δηλαδή μακροσκοπικά υπάρχουν μόνο αντιστάσεις.

Έτσι προκύπτει πως το ιδανικό κύκλωμα θα έχει συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα ( $\cos\phi = 1$ ), γιατί όσο μειώνεται η άεργος ισχύς, τόσο η φαινόμενη ισχύς  $S$  τείνει να γίνει ίση με την ενεργό ισχύ  $P$ .

Για να επιτευχθεί η «βελτίωση» ή η «διόρθωση» του συντελεστή ισχύος, συνήθως προστίθενται στα κυκλώματα πυκνωτές αντιστάθμισης, καθώς συνήθως κυριαρχούν τα πηνία και μακροσκοπικά παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά. Οι πυκνωτές αυτοί έχουν την ιδιότητα να καταναλώνουν αρνητική άεργο ισχύ ( $-Q$ ), και να την αποθηκεύουν ως χωρητικό φορτίο ανάμεσα στους οπλισμούς τους. Στην παρακάτω Εικόνα 1.32 πραγματοποιείται το διανυσματικό διάγραμμα των ισχύων του δικτύου πριν και μετά την αντιστάθμιση των πυκνωτών.



Εικόνα 1.32 : Διανυσματικά διαγράμματα ισχύος. [4]



Έτσι και στην περίπτωση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας για ψυχρή εκκίνηση πλοίων, απαιτείται η τοποθέτηση τέτοιων πυκνωτών αντιστάθμισης, που παράγουν άεργο ισχύ υπό ονομαστική τάση δικτύου V. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της τοποθέτησης των πυκνωτών αυτών είναι κυρίως ότι σε κυκλώματα, τα οποία φέρουν συντελεστή ισχύος πολύ κοντά στη μονάδα, περιορίζονται σημαντικά οι απαιτήσεις του δικτύου σε ρεύμα και μειώνονται αντίστοιχα τόσο οι διατομές των αγωγών, όσο και οι ωμικές απώλειες πάνω στους υφιστάμενους αγωγούς. Στην Εικόνα 1.33 φαίνονται αντίστοιχοι πυκνωτές.



Εικόνα 1.33 : Κυλινδρικοί πυκνωτές αντιστάθμισης. [17]

Στην περίπτωση εφαρμογής του σε τριφασικού δικτύου η συνδεσμολογία πυκνωτών είναι συνήθως σε τρίγωνο, διότι επιτυγχάνεται γείωση της αναγκαίας χωρητικότητας στο 1/3 της αντίστοιχης της συνδεσμολογίας αστέρα, αρκεί αυτή να αντέχει την επιβαλλόμενη πολική τάση.

### 1.11.7 Φίλτρα αρμονικών ταλαντώσεων

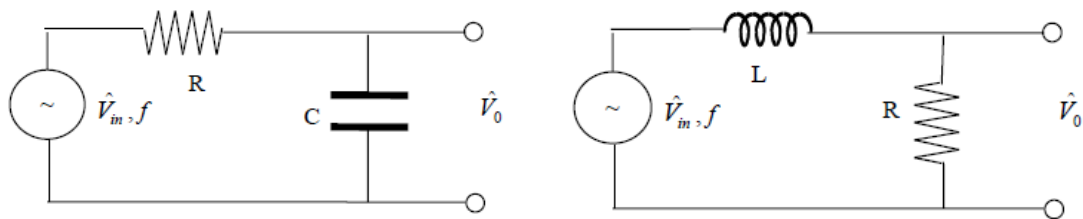
Ένα ακόμα πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα ηλεκτρικά κυκλώματα είναι οι αρμονικές ταλαντώσεις, οι οποίες είναι ο επονομαζόμενος «θόρυβος» και αλλοιώνουν την ποιότητα του ρεύματος, αφού επηρεάζουν άμεσα τη συχνότητά του. Προκειμένου να αποτραπεί το παραπάνω φαινόμενο, η επιστήμη της ηλεκτρολογίας χρησιμοποιεί διατάξεις που ονομάζονται φίλτρα αρμονικών. Γενικά φίλτρο στα ηλεκτρικά κυκλώματα χαρακτηρίζεται εκείνο το κύκλωμα που επιτρέπει τη διέλευση μιας ζώνης συχνοτήτων, ενώ αποκόπτει τις υπόλοιπες συχνοότητες.

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες:

1. Το βαθυπερατό φίλτρο, το οποίο επιτρέπει τη διέλευση συχνοτήτων κάτω από μια χαρακτηριστική κυκλική συχνότητα αναφοράς.
2. Το υψιπερατό φίλτρο, το οποίο επιτρέπει τη διέλευση συχνοτήτων πάνω από μια χαρακτηριστική κυκλική συχνότητα αναφοράς.
3. Το ζωνοπερατό φίλτρο, το οποίο επιτρέπει τη διέλευση συχνοτήτων οι οποίες ανήκουν σε μία ζώνη μεταξύ μιας κατώτερης και μιας ανώτερης χαρακτηριστικής κυκλικής συχνότητας αναφοράς.

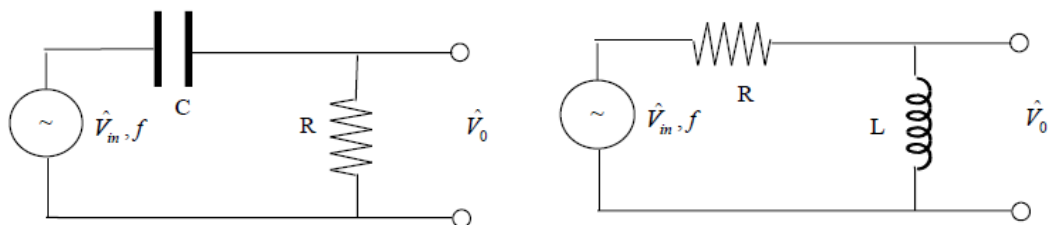
Από τα πιο διαδεδομένα φίλτρα είναι αναλυτικά:

- Το βαθυπερατό φίλτρο RC ή RL, το οποίο αποτελείται από μία ωμική αντίσταση και ένα πυκνωτή ή πηνίο αντίστοιχα σε κατάλληλη σύνδεση.



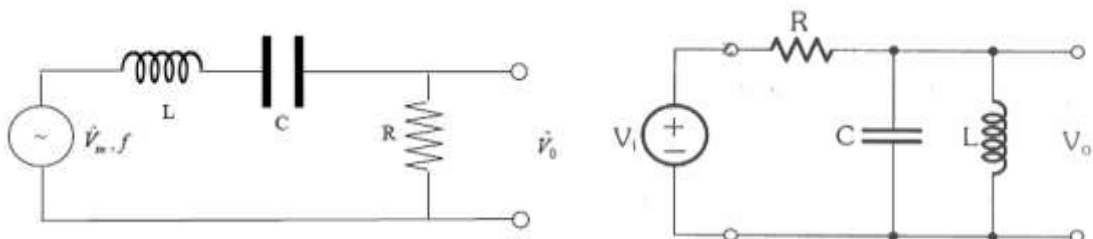
Εικόνα 1.34 : Βαθυπερατό φίλτρο RC και RL. [4]

- Το υψυπερατό φίλτρο RC ή RL, το οποίο αποτελείται από μία ωμική αντίσταση και ένα πυκνωτή ή πηνίο αντίστοιχα σε κατάλληλη σύνδεση.



Εικόνα 1.35 : Υψυπερατό φίλτρο RC και RL. [4]

- Το ζωνοπερατό φίλτρο RLC, το οποίο αποτελείται από τα στοιχεία του πυκνωτή και του πηνίου σε σειρά και μία ωμική αντίσταση σε παράλληλη σύνδεση.



Εικόνα 1.36 : Ζωνοπερατό φίλτρο RLC. [4]

Η διαστασιολόγηση και η διάταξη των μεγεθών των παραπάνω φίλτρων διαμορφώνονται ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε δικτύου που εξετάζεται.

Έτσι και στην περίπτωση του δικτύου ψυχρής εκκίνησης πλοίων, τα φίλτρα κρίνονται απαραίτητα, ώστε να εξασφαλιστεί το μέγιστο κέρδος τάσης του δικτύου τροφοδοσίας και να περιοριστεί ο «θόρυβος».

## 1.12 Εξοπλισμός πλοίου για ψυχρή εκκίνηση

Μετά την ανάλυση των εγκαταστάσεων του λιμανιού που προηγήθηκε, ακολουθεί και η αντίστοιχη αναφορά στον εξοπλισμό, στον παραλληλισμό και τέλος στο μετασχηματισμό της ηλεκτρικής ενέργειας πάνω στο πλοίο.

Είναι αναγκαίο ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός του πλοίου να προστατεύεται και να ελέγχεται από τα συστήματα ελέγχου και προστασίας του ίδιου του πλοίου. Για παράδειγμα στην περίπτωση όπου αστοχήσει η τροφοδοσία από τη ξηρά για οποιοδήποτε λόγο, τότε εξασφαλίζεται η ηλεκτροδότηση του πλοίου από τις ίδιες τις γεννήτριες του, αφού πρώτα αποσυνδεθεί η τροφοδοσία από την ξηρά.

Στα νέα μεγάλα πλοία παρατηρείται τάση διανομής ίση με 6.6 kV, ενώ στα περισσότερα ήδη υπάρχοντα πλοία παρατηρείται αντίστοιχα η τάση των 440V. Άσχετα με το μέγεθος του πλοίου η τάση διανομής των 440V δεν χαρακτηρίζεται ως η ιδανική τάση για την παροχή, λόγω της μεγάλης απαίτησης έντασης ρεύματος. Έτσι για το μετριασμό ζητημάτων, όπως αυτό της πτώσης τάσης, η τροφοδοσία εξυπηρετεί περισσότερο να έχει υψηλότερη τιμή, όπως αυτή των 6.6 kV και να συνοδεύεται με έναν μετασχηματιστή, ο οποίος βρίσκεται είτε στην άκρη του λιμανιού, είτε στο πλοίο, ώστε να παρέχει την τάση των 440V, όταν αυτή απαιτείται.

### 1.12.1 Διατάξεις διανομής μετασχηματισμού και παραλληλισμού ηλεκτρικής ενέργειας

Κατά τη μέθοδο της ψυχρής εκκίνησης, το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι από τα πιο σημαντικά και ταυτόχρονα από τα πιο πολύπλοκα. Όπως και στον εξοπλισμό του λιμανιού έτσι και σε αυτόν του πλοίου το σύστημα καλωδίων και ο μετασχηματιστής μπορεί να βρίσκεται είτε στη στεριά, είτε στο πλοίο.

Σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, κατά την εκτέλεση της ψυχρής εκκίνησης πλοίων, στα λιμάνια υπάρχει ένα σύστημα μεταφοράς και αποθήκευσης των καλωδίων που θα συνδεθούν στο πλοίο. Ωστόσο, είναι ευρέως αποδεκτό πλέον ότι ο παραπάνω εξοπλισμός εξυπηρετεί καλύτερα αν βρίσκεται πάνω στο πλοίο. Έτσι ξεπερνιούνται λειτουργικές δυσκολίες μεταφοράς και σύνδεσης των καλωδίων με το εκάστοτε πλοίο. Απαραίτητος είναι και σε αυτήν την περίπτωση ο επαρκής αερισμός των παραπάνω διατάξεων του πλοίου.



Εικόνα 1.37 : Σύστημα ψύξης ή αερισμού των ηλεκτροστασίων του πλοίου. [15]



Εικόνα 1.38 : Θέσεις υποδοχής καλωδίων πάνω στο πλοίο. [15]

Όσον αφορά την τροφοδοσία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στο πλοίο υπάρχουν οι ακόλουθοι δύο μέθοδοι, ώστε να γίνει η μετάβαση από την ηλεκτροδότηση του πλοίου από τους κινητήρες, στην ηλεκτροδότηση από την ξηρά, στη μη ύπαρξη ή στην ύπαρξη διάταξης παραλληλισμού.

Στην πρώτη μέθοδο, η εσωτερική ηλεκτροδότηση του πλοίου μπορεί να απενεργοποιηθεί και στη συνέχεια να γίνει η σύνδεση με την ηλεκτροδότηση από την ξηρά. Ενώ στη δεύτερη μέθοδο, το πλοίο παραμένει ενεργοποιημένο και συγχρονισμένο με το σύστημα ενέργεια από τη στεριά, για μια ασφαλέστερη μετάβαση του τρόπου τροφοδοσίας, χωρίς αυξομειώσεις της τάσης.

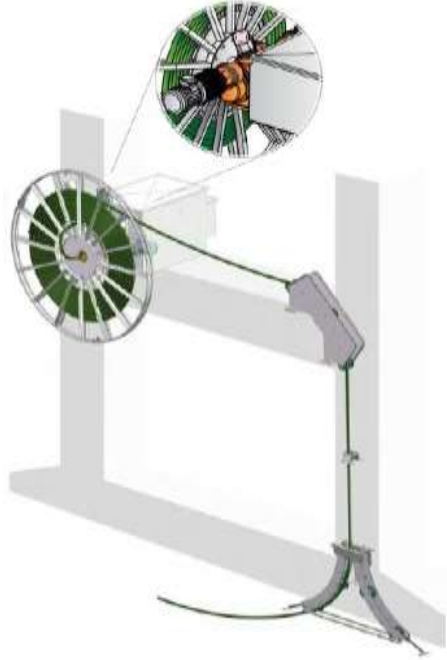
Για παράδειγμα, λόγω των επιπτώσεων στα συστήματα των κρουαζιερόπλοιων σε περίπτωση απώλειας ηλεκτρικής ενέργειας, είναι αναγκαία η ασφαλέστερη και η συνεχόμενη παροχή ρεύματος, οπότε προτιμάται η δεύτερη μέθοδος. Ενώ είναι λιγότερο κρίσιμη στα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, όπου μπορεί να εφαρμοστεί και η πρώτη μέθοδος.

Γενικά όμως, οι διακοπές στην παροχή είναι επιβλαβείς στην αξιοπιστία του εκάστοτε ηλεκτρικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, η ενσωμάτωση εξοπλισμού, για το παραλληλισμό των εγκαταστάσεων πλοίων με αυτών της ξηράς, είναι αναγκαία και αναπόφευκτη.

### 1.12.2 Διατάξεις εύκαμπτων καλωδίων διασύνδεσης με ρευματοδότες

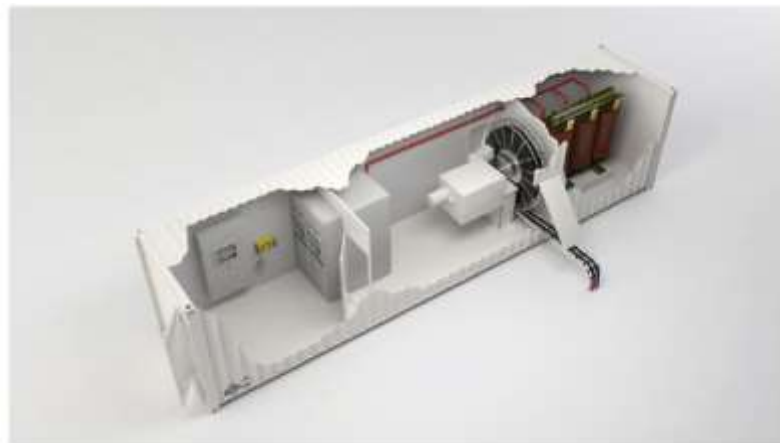
Σε προγενέστερες εγκαταστάσεις πλοίων τα καλώδια μεταφέρονταν στο ηλεκτροστάσιο με χειροκίνητους γερανούς. Αυτή ήταν μία χρονοβόρα και δύσκολη μέθοδος. Ως εκ τούτου, ορισμένες πιο σύγχρονες εταιρίες κινήθηκαν, προκειμένου να δημιουργήσουν κάποια ενσωματωμένα συστήματα διαχείρισης καλωδίων πάνω στο πλοίο, τα οποία αποδείχθηκαν πιο πρακτικά.

Για παράδειγμα, η εταιρεία Conductix-Wampfler Brand ανέπτυξε έναν κύλινδρο καλωδίων ενσωματωμένο πάνω στο ηλεκτροστάσιο του πλοίου, ο οποίος μπορεί να διαχειριστεί ένα ή δύο καλώδια τροφοδοσίας ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ, όπως εικονίζεται και στην Εικόνα 1.39.



Εικόνα 1.39 : Κύλινδρος διαχείρισης καλωδίων. [3]

Η εταιρεία Sam Electronics παρέχει επίσης ένα σύστημα διαχείρισης καλωδίων ενσωματωμένο σε ένα κοντέινερ, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.40.



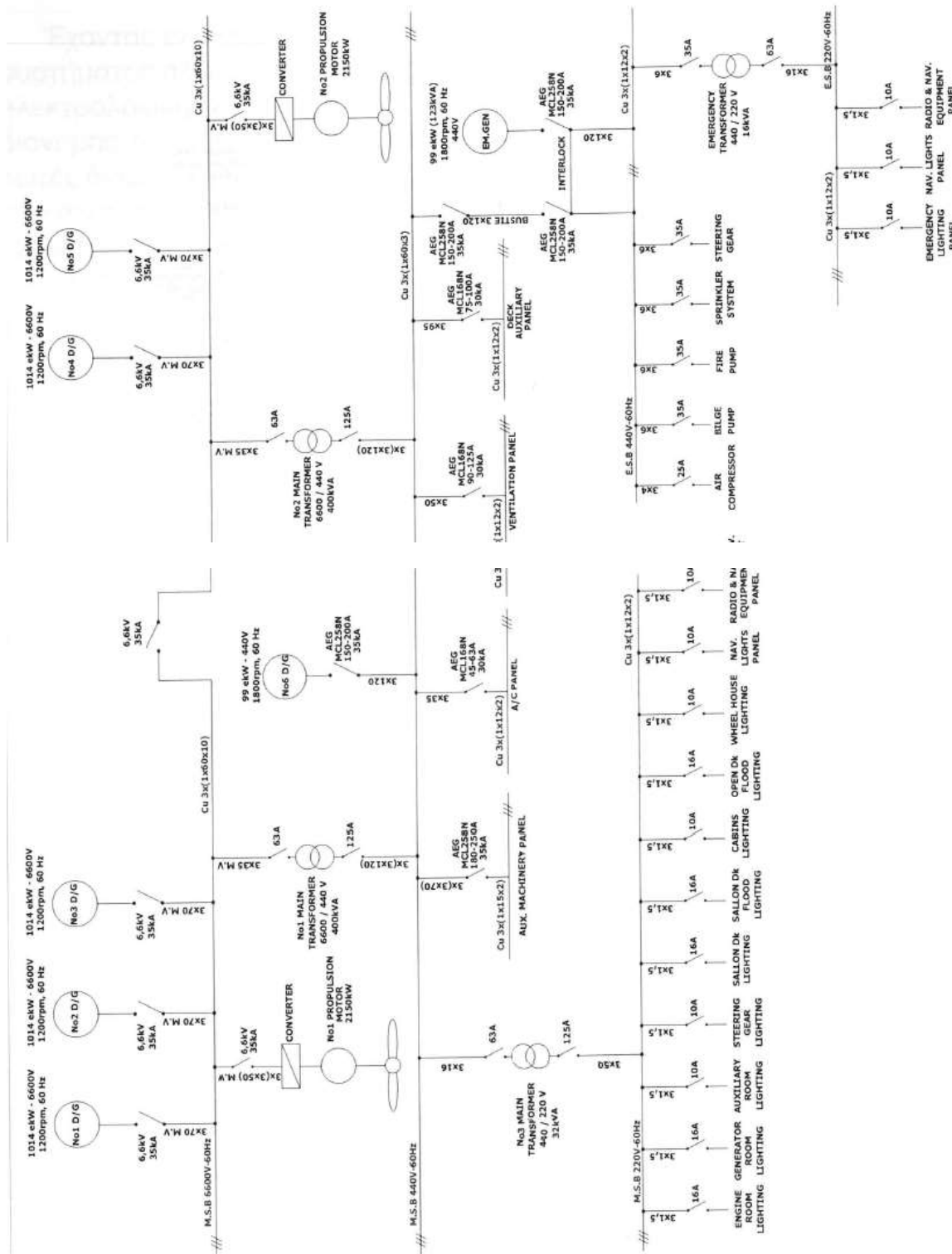
Εικόνα 1.40 : Σύστημα διαχείρισης καλωδίων τροφοδοσίας πλοίου. [3]

### 1.13 Αναγκαίες τεχνικές μελέτες

Κάθε πρωτόπορα μέθοδος που εξετάζεται στον επιστημονικό τομέα οφείλει να συμβιβάζεται με κάποιους κανόνες και πρότυπα ασφαλείας. Ακόμα στόχος της πρέπει να είναι η ενσωμάτωση στο περιβάλλον, στο οποίο στοχεύει, και η αύξηση της λειτουργικότητας και της αξιοπιστίας των συστημάτων που αυτό περιλαμβάνει.

Έτσι και στη μέθοδο της ψυχρής εκκίνησης πλοίων πρέπει να πραγματοποιηθούν πολύπλευρες και πολυάριθμες μελέτες, ώστε με τον κατάλληλο συνδυασμό τιμών και εξοπλισμού, να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Γενικά στην τεχνική μελέτη παρουσιάζεται και το αναλυτικό μονογραμμικό ηλεκτρολογικό διάγραμμα της συνολικής εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης του πλοίου, όπως για παράδειγμα φαίνεται και στην Εικόνα 1.41.



Εικόνα 1.41 : Μονογραμμικό ηλεκτρολογικό διάγραμμα εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης πλοίου. [2]

Πιο συγκεκριμένα σε μια ολοκληρωμένη τεχνική μελέτη συστημάτων ψυχρής εκκίνησης πλοίου είναι αναγκαίο να εξεταστούν και να διαμορφωθούν κατάλληλα οι παρακάτω παράγοντες:

- Κατασκευή και υποδιαίρεση μηχανολογικών και ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων.
- Σκελετός πλοίου.
- Ευστάθεια συστήματος σε περίπτωση βλάβης ή αστοχίας του δικτύου διανομής.
- Πρόσθετες απαιτήσεις για πλοία που έχουν αφύλακτους χώρους μηχανοστασίων.
- Πυροπροστασία (ανίχνευση - κατάσβεση πυρκαγιάς) .
- Σωστικά μέσα.
- Αυτοματισμοί συστημάτων.
- Ειδικές απαιτήσεις και λειτουργίες ανάλογα με την αποστολή του πλοίου.

Πιο αναλυτικά όσον αφορά τα ηλεκτρικά δίκτυα πλοίων στην τεχνική μελέτη που αναφέρεται και παραπάνω πρέπει να συμπεριλαμβάνονται τα εξής:

- Μεγέθη καλωδίων, ασφαλειών και διακοπών εγκατάστασης.
- Διαστασιολόγηση και δομή πινάκων – υποπινάκων.
- Εκτίμηση της ονομαστικής έντασης γραμμής.
- Έλεγχος της πτώσης τάσης κατά μήκος όλων των αγωγών.
- Εκτίμηση σφαλμάτων και ορίων ανοχής της εγκατάστασης.
- Μελέτη και προστασία από βραχυκυκλώματα.

#### **1.14 Ενδεικτικές εγκαταστάσεις**

Στις μέρες μας, η μέθοδος ψυχρής εκκίνησης πλοίων είναι εγκατεστημένη σε όλο και περισσότερα λιμάνια ανά τον κόσμο. Οι περισσότερες τέτοιες αξιοποιήσιμες εγκαταστάσεις βρίσκονται κατά μήκος της ανατολικής ακτής της Βόρειας Αμερικής και της Βόρειας Ευρώπης λόγω της ισχυρής περιβαλλοντικής νομοθεσίας, της κοινοτικής πίεσης και της κοινωνικής ευθύνης. Στην Ασία γενικά, η ψυχρή εκκίνηση είναι μια επερχόμενη τεχνολογία για τη μείωση των τοπικών εκπομπών ρύπων στα λιμάνια και τις γύρω πόλεις.

Σε πολλές από τις παραπάνω περιπτώσεις οι τοπικές κυβερνήσεις έχουν συμβάλλει με επενδύσεις στην εξέλιξη της μεθόδου. Οι σημαντικές μειώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κάνουν τη μέθοδο ψυχρής εκκίνησης μία από τις βέλτιστες επιλογές για την επίτευξη των στόχων ευφορίας στους χώρους των λιμανιών παγκοσμίως.

Η περιβαλλοντική συμμόρφωση των λιμανιών γίνεται σταδιακά ολοένα και πιο σημαντική. Οι διεθνείς κανονισμοί για τα πλοία, που συμφωνήθηκαν από το IMO, είναι ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός, αλλά θεωρείται γενικά ότι απαιτούνται πρόσθετα μέτρα για την αντιμετώπιση των προβλημάτων τοπικής ποιότητας αέρα στα λιμάνια. Εν συντομία, η κοινωνική ευθύνη αποτελεί προϋπόθεση για τη μελλοντική ανάπτυξη των λιμανιών.

Η εφαρμογή της μεθόδου της ψυχρής εκκίνησης βελτιώνει και τη δημόσια εικόνα των υπευθύνων του έργου, οι οποίοι συνδέονται αυτόματα με τις θετικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, αλλά και την υγεία. Έτσι, η μέθοδος αυτή εξυπηρετεί, όχι μόνο το περιβάλλον, αλλά και την εικόνα των εταιριών και των κυβερνήσεων.



Παρακάτω εικονίζεται αναλυτικά σε παγκόσμια κλίμακα η έκταση εφαρμογής της μεθόδου ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 1.42 : Παγκόσμια εικόνα εγκαταστάσεων ψυχρής εκκίνησης. [3]

### 1.15 Πρόσθετα προβλήματα σε μικρά αυτόνομα νησιά

Στην σύγχρονη Ελλάδα, η πλειοψηφία των νησιών ηλεκτροδοτούνται από αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα, τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια κατά κύριο λόγο από τοπικούς θερμικούς σταθμούς παραγωγής. Οι σταθμοί αυτοί συνήθως λειτουργούν με καύσιμο πετρελαίου, βαρύ μαζούτ ή ελαφρύ ντίζελ και σε πιο σπάνιες περιπτώσεις αξιοποιούνται σταθμοί ΑΠΕ (αιολικοί ή φωτοβολταϊκοί). Το ηπειρωτικό ηλεκτρικό δίκτυο αδυνατεί να συνδεθεί με τα νησιά αυτά, λόγω κυρίως διαφόρων τεχνικών και τεχνολογικών δυσκολιών, αλλά και λόγω οικονομικών απαιτήσεων, καθώς τέτοιου είδους διασυνδέσεις χαρακτηρίζονται ως έργα μεγάλων κεφαλαίων.

Η ζήτηση (κατανάλωση σε MWh) ηλεκτρικής ενέργειας, στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά, ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες αλλά και το μέγεθος του νησιού. Για παράδειγμα η ζήτηση μπορεί να αρχίζει από ορισμένες εκατοντάδες MWh στα μικρότερα νησιά, έως και ορισμένες TWh στα μεγαλύτερα ΜΔΝ (Κρήτη). Τα παραπάνω έχουν ως συνέπεια το ηλεκτρικό δίκτυο των νησιών αυτών να πάσχει από τα ακόλουθα δυσάρεστα φαινόμενα.

Αρχικά παρατηρείται το φαινόμενο του ασθενικού δικτύου, κατά το οποίο το δίκτυο παύει να είναι ευσταθές, και παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις στην τάση τροφοδοσίας. Αυτό μπορεί να φθείρει ή και να αχρηστέψει μηχανήματα και εγκαταστάσεις με μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές της πτώσης τάσης.

Υπάρχουν ακόμα και ζητήματα συχνότητας και ανεπάρκειας ισχύος, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται και διανέμεται προέρχεται από συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και σταθμούς ΑΠΕ, οι οποίοι δεν είναι διαρκώς αξιοποιήσιμοι και δεν προσφέρουν πλήρη αυτόνομη αυτοάρκεια στο νησί.



Έτσι και στην περίπτωση της ψυχρής εκκίνησης, όπου ο εξοπλισμός ξηράς βρίσκεται στο λιμάνι του νησιού, παρουσιάζονται τα προαναφερθέντα προβλήματα. Το γεγονός αυτό απαιτεί ειδική μελέτη και διαμόρφωση της εγκατάστασης ξηράς, με σταθεροποιητές τάσης, αντισταθμιστές ενεργού ισχύος και μετασχηματιστές, ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές και να εξασφαλίζεται η ορθή τροφοδοσία του πλοίου.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ακόμα ότι δε φτάνει μόνο να ρυθμιστούν κατάλληλα τα χαρακτηριστικά του ρεύματος τροφοδοσίας του πλοίου. Πρέπει να εξασφαλιστεί ακόμα ότι το ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού μπορεί να καλύψει ταυτόχρονα τόσο τις ηλεκτρικές ανάγκες όλων των καταναλωτών του, όσο και την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ του πλοίου.

### **1.16 Συμπεράσματα**

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, είναι φανερό πως τα οφέλη από την εφαρμογή της μεθόδου της ψυχρής εκκίνησης σε σύγχρονα λιμάνια υπερτερούν σε σχέση με τα προβλήματα ή το κόστος εγκατάστασης της μεθόδου αυτής. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της ηλεκτροδότησης των πλοίων είναι τα τεράστια περιβαλλοντικά οφέλη της αξιοποίησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Έτσι δημιουργούνται λιμάνια φιλικότερα προς το περιβάλλον και βελτιώνεται η ποιότητα εργασίας του προσωπικού όπως και η ποιότητα ζωής των κατοίκων της περιοχής κοντά στο λιμάνι. Ακόμα παρατηρείται μείωση του θορύβου από τη λειτουργία μεγάλων μηχανών εσωτερικής καύσης και εξοικονόμηση χρημάτων και καυσίμων (πετρελαίου).

Ωστόσο για να μπορεί να εφαρμοστεί σωστά η παραπάνω μέθοδος σε λιμάνια, θα πρέπει να υπάρχει μια άσογη συνεργασία ανάμεσα στο λιμάνι, στην πολιτεία και φυσικά στην πλοιοκτήτρια εταιρεία. Όπως έχει ήδη παρατηρηθεί, η επίδραση που έχει η κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος στο τοπικό δίκτυο της πόλης ή του νησιού, που θα βρίσκεται η εγκατάσταση, δεν μπορεί να περάσει απαρατήρητη. Το πρόβλημα αυτό λύνεται όταν οι εταιρείες, που μελετούν το σύστημα διανομής, εκτιμήσουν τη συνολική επίδραση και προτείνουν λύσεις αναβάθμισης και ενίσχυσης του τοπικού δικτύου, προκειμένου να διευκολυνθούν οι συνδέσεις με τα πλοία.

Επομένως σύμφωνα με τις σχετικές μελέτες πάνω στη μέθοδο ψυχρής εκκίνησης πλοίων, αλλά και με βάση τις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις, παρατηρείται ραγδαία άθηση της μεθόδου αυτής, που σταδιακά οδηγεί στην περαιτέρω εξέλιξη της σχετικής τεχνολογίας.

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Εκτίμηση ζήτησης φορτίου

### 2.1 Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και ισχύος

#### 2.1.1 Εισαγωγή

Γενικά ο κύριος στόχος μιας ηλεκτρολογικής εγκατάστασης είναι η ποιοτική, αξιόπιστη και οικονομική εξυπηρέτηση των καταναλωτών που τροφοδοτεί. Έτσι, και στην περίπτωση της εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης πλοίου, ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που πρέπει να εξεταστεί πρώτα, είναι αυτός της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του εξεταζόμενου φορτίου.

Η εκτίμηση του παραπάνω παράγοντα πρέπει να γίνει τόσο στο παρόν, για τον προσδιορισμό και τις μελέτες των αιχμών και της καταναλισκόμενης ενέργειας, όσο και στο μέλλον, για την πρόβλεψη του συνολικού φορτίου που απαιτείται σε βάθος χρόνου.

Η συνολική ηλεκτρική καταναλισκόμενη ισχύ ονομάζεται φορτίο ή ζήτηση του συστήματος, και είναι πρακτικά το άθροισμα όλων των επιμέρους ηλεκτρικών καταναλώσεων της εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης, τόσο για την ξηρά, όσο και για τα πλοία αντίστοιχα.

Πιο αναλυτικά, λόγω των μεγάλων τεχνικών δυσκολιών στην αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας πάνω στο πλοίο, είναι αναγκαίο κάθε χρονική στιγμή η ηλεκτρική επιχείρηση, που διαχειρίζεται την εγκατάσταση, να αξιοποιεί τόσες μονάδες παραγωγής, όσες χρειάζονται για να καλυφθεί το συνολικό φορτίο. Έτσι εξασφαλίζεται η εφεδρεία, ώστε να μπορούν να αντιμετωπίζονται οι αυξομειώσεις της ισχύος σε περίπτωση αστοχίας κάποιας μονάδας τροφοδοσίας.

Η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να παράγεται τη στιγμή που καταναλώνεται. Γι' αυτό η συνολική ισχύς της εγκατάστασης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από τη μέγιστη τιμή του ζητούμενου φορτίου.

Ο λόγος της μέγιστης ζήτησης φορτίου ενός καταναλωτή προς την εγκατεστημένη ισχύ λέγεται συντελεστής ζήτησης.

$$\zeta = \frac{P_A}{P_{εγκ}} * 100\% \text{ (Σχέση : 2.1)}$$

Με τη πάροδο του χρόνου, η αρμόδια ηλεκτρική επιχείρηση οφείλει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει εύκολα και άμεσα τυχούσες δυσανάλογες μεταβολές στη ζήτηση ισχύος, τυχαίες απώλειες μονάδων τροφοδοσίας και περιοδικές συντηρήσεις των μονάδων της εγκατάστασης. Έτσι κρίνεται απαραίτητη η πρόβλεψη της συνολικής ζήτησης ισχύος, τόσο για το μακροπρόθεσμο, όσο και για το βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό του εκάστοτε συστήματος καταναλωτών που μελετάται.

### 2.1.2 Ανάλυση ηλεκτρικού φορτίου

Αρχικά ως φορτίο ενός καταναλωτή χαρακτηρίζεται η μέση ηλεκτρική ισχύς του καταναλωτή  $P(t)$  κατά το διάστημα μιας χρονικής περιόδου ολοκλήρωσης  $\Delta T$ .

$$P(t) = \frac{1}{\Delta T} * \int_t^{t+\Delta T} L(\tau) d\tau \quad (\text{Σχέση : 2.2})$$

Όπου  $L(\tau)$  είναι η στιγμιαία ζήτηση ισχύος τη χρονική στιγμή ( $\tau$ ).

Οι μικρές υψίσυχνες διακυμάνσεις που υπάρχουν στα στιγμιαία φορτία, απαλείφονται με την ολοκλήρωση και έτσι επιτυγχάνεται η εξομάλυνση και κατά συνέπεια το φορτίο παρουσιάζεται πιο ομαλό.

Γενικά το συνολικό φορτίο της εγκατάστασης ισούται κάθε στιγμή με το άθροισμα των φορτίων ή των καταναλώσεων όλων των συσκευών που λειτουργούν τη στιγμή αυτή. Μερικές από τις καταναλώσεις της εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης ελέγχονται χειροκίνητα (φωτισμός, ραδιοεπικοινωνίες), άλλες αυτόματα (αυτοματισμοί, ηλεκτρικά ψυγεία) και άλλες και με τους δύο τρόπους (φούρνοι, φώτα κλιμακοστασίων).

Όσον αφορά το μέγεθος του φορτίου, αυτό διαμορφώνεται από τους καταναλωτές της εγκατάστασης και συχνά μετριέται ως η αντίστοιχη ενεργός καταναλισκόμενη ισχύς (kW ή MW) και πιο σπάνια ως η αντίστοιχη φαινόμενη ισχύς (kVA ή MVA). Το φορτίο μπορεί να αναφέρεται είτε σε μια μόνο συσκευή, είτε σε μια αναχώρηση γραμμής ή υποσταθμό, είτε ακόμα και σε ένα ολόκληρο ηλεκτρικό σύστημα.

Είναι γεγονός, πως τα φορτία μεταβάλλονται ανάλογα με το είδος τους, την ώρα, την ημέρα, την εποχή και τις καιρικές συνθήκες. Για παράδειγμα, οι καταναλώσεις μιας εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης πλοίου παρουσιάζουν αισθητά μεγαλύτερα φορτία κατά τις εργάσιμες ημέρες και ώρες αντίστοιχα. Συσκευές όπως τα κλιματιστικά και τα συστήματα εξαερισμού ενός πλοίου λειτουργούν συγκεκριμένες περιόδους. Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιούνται τους καλοκαιρινούς μήνες για ψύξη και τους χειμερινούς αντίστοιχα για θέρμανση, όταν και όπου αυτό χρειάζεται.

Αρκετές είναι και οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια του 24ώρου. Αυτές παρουσιάζονται κυρίως κατά τις χαρακτηριστικές ώρες της ημέρας, όπως είναι οι ώρες έναρξης και λήξης της έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας πάνω στο πλοίο, κατά την αναχώρηση ή την άφιξη του πλοίου στο λιμάνι ή ακόμα και κατά τη σύνδεση και αποσύνδεση του από το δίκτυο ηλεκτροδότησης ξηράς.

Συνήθως, σε καταστάσεις ανάγκης παρατηρείται ανεπαρκής ηλεκτρική ενέργεια, καθώς το δίκτυο τροφοδοσίας αδυνατεί να καλύψει το φορτίο ζήτησης εκείνη τη χρονική περίοδο. Κάτι τέτοιο μπορεί να προκληθεί από απρόβλεπτες βλάβες του δικτύου ή άλλου μέρους του εξοπλισμού της εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης. Σε μια τέτοια κατάσταση ανάγκης, προκειμένου να μειωθεί αποτελεσματικά και άμεσα το συνολικό φορτίο ζήτησης, συνίσταται η λεγόμενη «απόρριψη φορτίου». Η μέθοδος αυτή διαμορφώνεται σύμφωνα πάντα με ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα που έχει καταρτίσει ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για την εκάστοτε εγκατάσταση. Έτσι για να τροφοδοτούνται επαρκώς και να λειτουργούν ορθά τα κύρια συστήματα του πλοίου, αποσυνδέονται αυτόματα ορισμένα δευτερεύοντα φορτία.

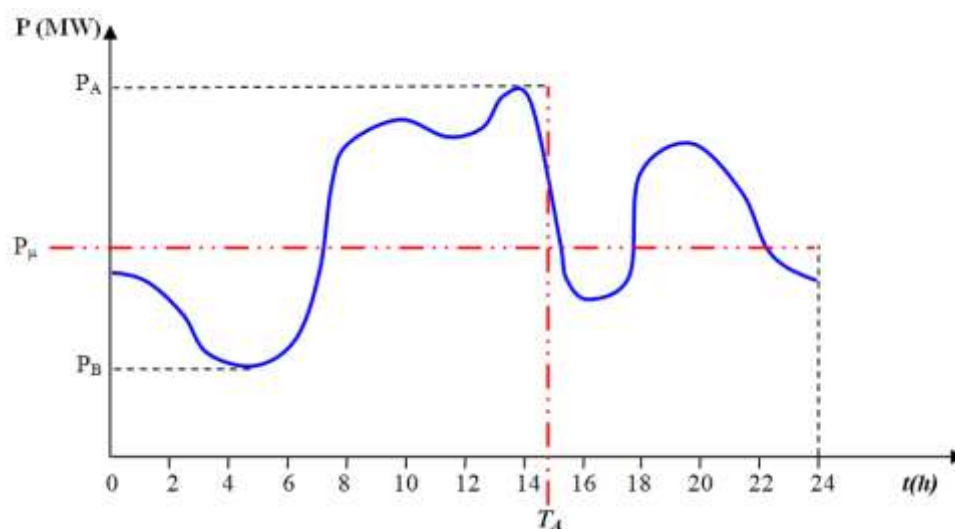
Παρ' όλα αυτά, λόγω είτε της διασύνδεσης του συστήματος, είτε των προδιαγραφών παρεχόμενης ισχύος, τις περισσότερες φορές δεν είναι δυνατή η μείωση του φορτίου με ταυτόχρονη μείωση και της συχνότητας. Επομένως, παρατηρείται άεργος ισχύς, η οποία προκαλεί προβλήματα ευστάθειας στο σύστημα. Τα προβλήματα αυτά προκύπτουν κυρίως με κάθε μείωση της τάσης, αφού οποιαδήποτε ηλεκτρική συσκευή που συνδέεται ή αποσυνδέεται από το δίκτυο επηρεάζει, τόσο τη συχνότητα, όσο και την τάση, ανάλογα με το φορτίο κατανάλωσης της.

Για παράδειγμα ακόμα και μια λάμπα φωτισμού 25W τείνει να ελαττώσει την τάση τροφοδοσίας κατά την λήψη της. Η επίδραση της λάμπας όμως είναι πρακτικά απειροστή και εξισορροπείται μέσω ταυτόχρονης σύνδεσης ή αποσύνδεσης άλλων ηλεκτρικών συσκευών από το δίκτυο της εγκατάστασης. Από την άλλη μεριά, στην περίπτωση μεγάλων φορτίων δεν ισχύει το ίδιο. Ειδικά στα συστήματα πλοίων με ηλεκτροπρόωση, μεγάλα φορτία όπως οι κινητήρες ή οι γεννήτριες του πλοίου, κατά την εκκίνηση ή την απότομη διακοπή λειτουργίας τους, προκαλούν έντονες διαταραχές τάσης και συχνότητας στο δίκτυο τροφοδοσίας. Γι' αυτό και είναι απαραίτητη η συνεχή και ελεγχόμενη λειτουργία τέτοιων φορτίων.

### 2.1.3 Καμπύλες φορτίου

Ένα απαραίτητο εργαλείο για τη διαστασιολόγηση και το σωστό προγραμματισμό των συστημάτων μιας εγκατάστασης, είναι οι καμπύλες φορτίου. Οι καμπύλες αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για τις μελέτες και τις προβλέψεις των συνολικών καταναλώσεων ηλεκτρικής ισχύος της εγκατάστασης που εξετάζεται. Οι πιο διαδεδομένες είναι οι χρονολογικές καμπύλες φορτίου και οι καμπύλες διάρκειας φορτίου, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω.

Πιο συγκεκριμένα η χρονολογική καμπύλη φορτίου είναι η γραφική παράσταση της ζητούμενης ισχύος σε συνάρτηση με το χρόνο στον οποίο ζητήθηκε η αντίστοιχη ισχύς. Όπως εικονίζεται και στην Εικόνα 2.1, οι τεταγμένες του γραφήματος είναι τα φορτία (σε kW ή MW) και οι τετμημένες είναι αντίστοιχα ο χρόνος (ώρες έως και έτη).



Εικόνα 2.1 : Χρονολογική καμπύλη φορτίου. [18]

Σύμφωνα με τους συμβολισμούς της παραπάνω εικόνας προκύπτουν αναλυτικά οι ακόλουθοι επεξηγηματικοί ορισμοί:

- Το φορτίο αιχμής  $P_A$  είναι το μέγιστο φορτίο που παρατηρείται στη χρονολογική καμπύλη κατά την περίοδο μελέτης  $T$ . Μετριέται σε kW ή MW.
- Το φορτίο αιχμής  $P_B$  είναι το μικρότερο φορτίο που παρατηρείται στην χρονολογική καμπύλη κατά την περίοδο μελέτης  $T$ . Μετριέται σε kW ή MW.
- Η περίοδος φορτίου  $T$  είναι η περίοδος μελέτης, στην οποία συμπεριλαμβάνεται η συνολική καμπύλη που αντιπροσωπεύει το φορτίο της εγκατάστασης. Μετριέται σε ώρες, ημέρες, εβδομάδες ή έτη.
- Η κατανάλωση ενέργειας  $E$  είναι το εμβαδόν που περιέχεται στην χρονολογική καμπύλη φορτίου τον άξονα χρόνου και τις δύο παράλληλες ευθείες στα σημεία 0 και  $T$  του άξονα των τετμημένων (x'x). Χαρακτηρίζεται συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια και μετριέται σε kWh, MWh ή GWh.

$$E = \int_0^T P(t)dt \quad (\text{Σχέση : 2.3})$$

- Το μέσο φορτίο  $P_\mu$  προκύπτει πρακτικά από το πηλίκο της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας κατά την περίοδο μελέτης  $T$  προς το αντίστοιχο χρονικό διάστημα μελέτης  $T$  και μετριέται σε kW ή MW.

$$P_\mu = \frac{E}{T} \quad (\text{Σχέση : 2.4})$$

- Ο συντελεστής ομοιομορφίας ή ελάχιστου φορτίου  $m_0$  είναι το πηλίκο του φορτίου βάσης προς το φορτίο αιχμής εκφρασμένο επί τις εκατό.

$$m_0 = \frac{P_B}{P_A} \quad (\text{Σχέση : 2.5})$$

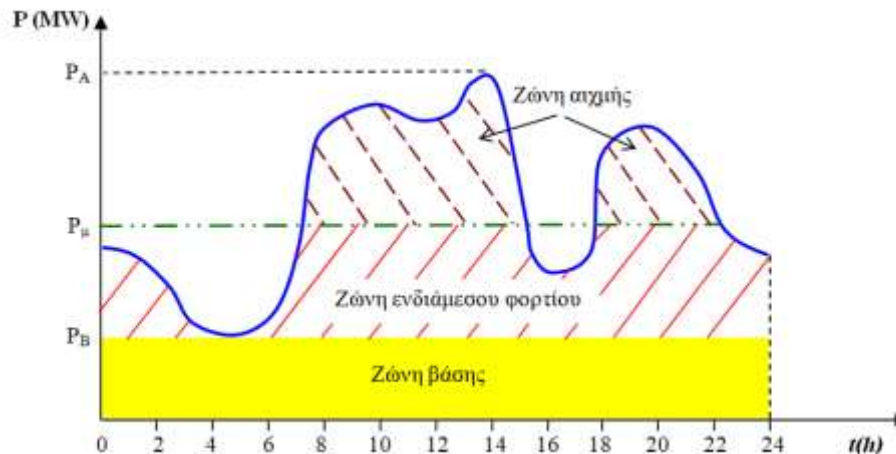
- Ο συντελεστής φορτίου ή μέσου φορτίου  $m$  είναι το πηλίκο του μέσου φορτίου προς το φορτίο αιχμής, συνήθως εκφρασμένο επί τοις εκατό, το οποίο αποτελεί και ένα μέτρο της διακύμανσης της χρονολογικής καμπύλης φορτίου.

$$m = \frac{P_\mu}{P_A} \quad (\text{Σχέση : 2.6})$$

Προκειμένου να μελετηθεί καλύτερα, η χρονολογική καμπύλη φορτίου χωρίζεται σε τρεις ζώνες.

Πιο συγκεκριμένα οι ζώνες αυτές είναι οι εξής:

1. Η ζώνη βάσης, η οποία περιλαμβάνει την περιοχή φορτίων από το μηδέν ως το φορτίο βάσης.
2. Η ζώνη αιχμής, η οποία αφορά τις πιο απότομες υψηλές μεταβολές με μικρή σχετικά διάρκεια. Συνήθως περιλαμβάνει τα φορτία εκείνα που υπερβαίνουν τα 2/3 του ύψους της υψηλότερης αιχμής ή γενικά τα φορτία που βρίσκονται πάνω από το μέσο φορτίο.
3. Η ζώνη κυμαινόμενου ή ενδιάμεσου φορτίου, η οποία περικλείει όλα τα υπόλοιπα φορτία μεταξύ των ζωνών βάσης και αιχμής.



Εικόνα 2.2 : Ζώνες φορτίου σε ενδεικτική χρονολογική καμπύλη. [18]

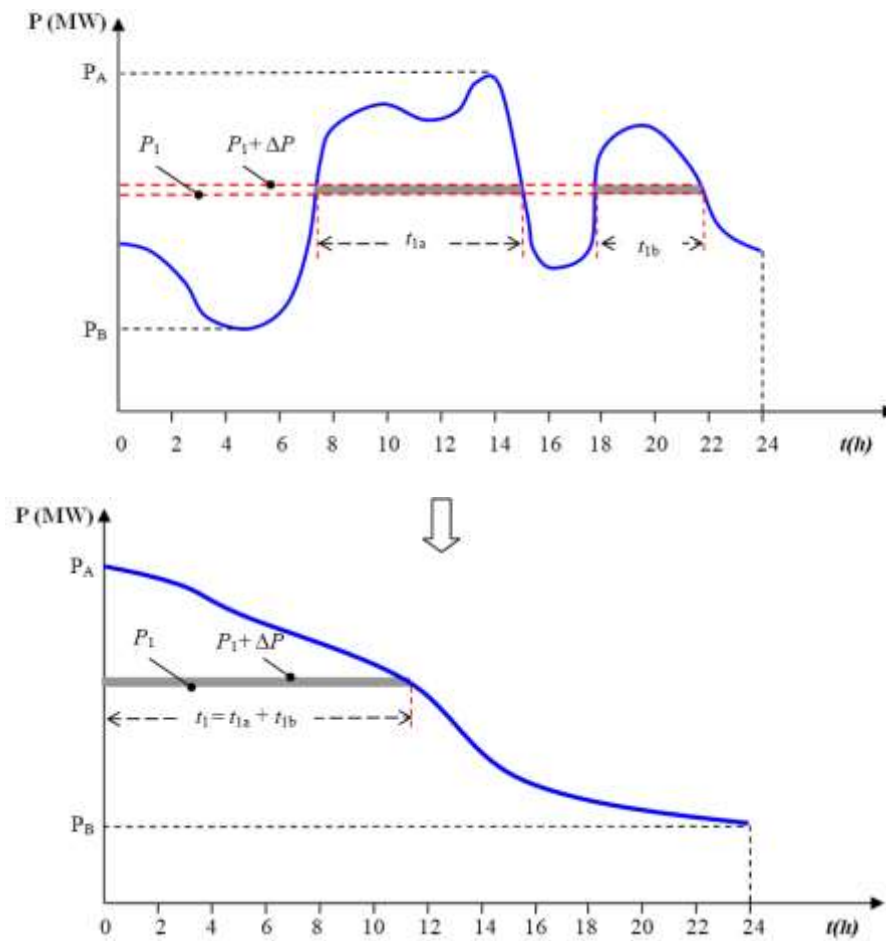
Γενικά το φορτίο βάσης, που είναι και το ελάχιστο φορτίο που απαιτείται από την εγκατάσταση, διαρκεί όλη τη μέρα και η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται κατά την περίοδο μελέτης είναι μεγάλη. Γι' αυτό το λόγο υπάρχουν οι ηλεκτρικές μονάδες βάσης που καλύπτουν τις απαιτήσεις του φορτίου αυτού. Πιο συγκεκριμένα, οι μονάδες βάσης παράγουν ενέργεια με μικρό κόστος παραγωγής (φθηνή kWh). Τέτοια παραδείγματα μονάδων γενικά είναι οι λιγνιτικοί ή πυρηνικοί ατμοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Αντίθετα, το φορτίο αιχμής εξασφαλίζεται από τις μονάδες αιχμής. Οι μονάδες αυτές παράγουν ενέργεια με μεγάλο κόστος παραγωγής (ακριβή kWh), αλλά σχετικά μικρό κόστος εγκατάστασης. Τέτοιες μονάδες είναι κατάλληλες για τέτοια φορτία, αφού αυτά διαρκούν λίγες ώρες της ημέρας και οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια είναι μικρές. Το πιο σύνηθες παράδειγμα αυτών των μονάδων είναι οι αεροστρόβιλοι πετρελαίου ή φυσικού αερίου.

Στην περίπτωση των ενδιάμεσων φορτίων αξιοποιούνται μονάδες παραγωγής ενδιάμεσου κόστους, όπως είναι αυτές του συνδυασμένου κύκλου.

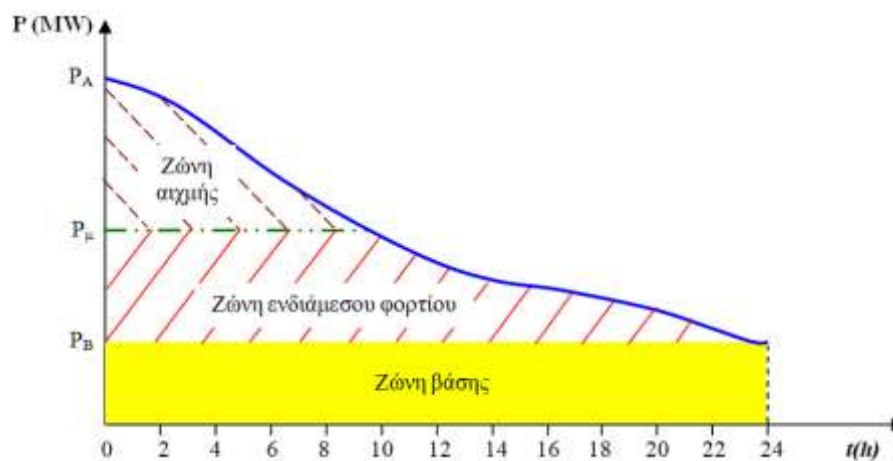
Η δεύτερη κατηγορία γραφήματος που εξετάζεται είναι αυτή της καμπύλης διάρκειας φορτίου, η οποία προκύπτει από την κατάλληλη επεξεργασία της αντίστοιχης χρονολογικής καμπύλης. Είναι ουσιαστικά η γραφική παράσταση της ζητούμενης ισχύος κατά τη χρονική περίοδο μελέτης σε συνάρτηση με το χρόνο, διατεταγμένη σε φθίνουσα σειρά. Ένα χαρακτηριστικό της καμπύλης αυτής είναι ότι ξεκινάει από το φορτίο αιχμής  $P_A$  και καταλήγει στο φορτίο βάσης  $P_B$ , το οποίο αντιστοιχεί πάντοτε στο σύνολο του χρόνου μελέτης  $T$ .

Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται πώς από μια χρονολογική καμπύλη φορτίου κατασκευάζεται η αντίστοιχη καμπύλη διάρκειας φορτίου.



Εικόνα 2.3 : Κατασκευή καμπύλης διάρκειας φορτίου από την αντίστοιχη χρονολογική καμπύλη. [18]

Στην Εικόνα 2.4 φαίνεται πως διαμορφώνονται και οι ζώνες φορτίου μετά τη σχεδίαση της καμπύλης διάρκειας φορτίου.

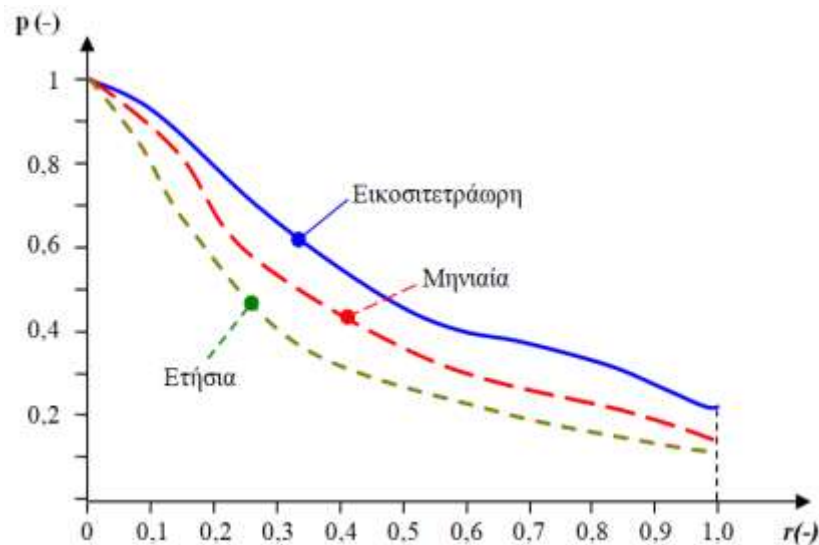


Εικόνα 2.4 : Ζώνες φορτίου ενδεικτικής καμπύλης διάρκειας φορτίου. [18]

#### 2.1.4 Τυποποιημένες – Ανοιγμένες καμπύλες φορτίου

Πολλές φορές κατά τη διάρκεια μιας ηλεκτρολογικής μελέτης απαιτείται η σύγκριση τιμών και στοιχείων κάτω από έναν κοινό παρονομαστή, προκειμένου να γίνουν οι κατάλληλες συγκρίσεις και να επέλθουν τα ανάλογα συμπεράσματα. Έτσι αξιοποιούνται οι ανοιγμένες καμπύλες φορτίων, οι οποίες αποτελούν το κοινό μέτρο σύγκρισης διαφόρων καμπύλων διάρκειας φορτίου, ανεξάρτητα της ζήτησης ισχύος και του χρόνου αναφοράς.

Στην ακόλουθη Εικόνα 2.5 φαίνονται ορισμένες χαρακτηριστικές ανοιγμένες καμπύλες διάρκειας φορτίου ενός συστήματος για διαφορετικές χρονικές περιόδους.



Εικόνα 2.5 : Ανοιγμένες καμπύλες φορτίων. [18]

Το εμβαδόν της εκάστοτε ανοιγμένης καμπύλης είναι πρακτικά η ισοδύναμη ανοιγμένη ενέργεια και υπολογίζεται ως εξής:

$$e = \int_0^1 p(r) dr = \int_0^T \frac{P(t)}{P_A} * \frac{dt}{T} = \frac{P(t)}{P_A * T} * \int_0^T P(t) dt = \frac{E}{P_A * T} = m \quad (\text{Σχέση 2.7})$$

Ουσιαστικά προκύπτει πως το εμβαδόν της ανοιγμένης καμπύλης διάρκειας φορτίου ή της αντίστοιχης ανοιγμένης χρονολογικής καμπύλης είναι ίσο με το συντελεστή φορτίου.

## 2.2 Ετεροχρονισμός – Ταυτοχρονισμός και καταγραφή διαφόρων ειδών φορτίων

Αξίζει να σημειωθεί επιπλέον πως στη μέθοδο υπολογισμού της συνολικής απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας ενός συστήματος, οι αιχμές των καταναλισκόμενων φορτίων συνήθως δεν ταυτίζονται ούτε χρονικά, αλλά ούτε και ποσοτικά μεταξύ τους. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση της εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης πλοίου, όπου τα φορτία είναι πολλά και οι απαιτήσεις ποικίλουν ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας του πλοίου. Έτσι για να γίνει πιο ακριβής και ξεκάθαρη η μελέτη των φορτίων, εισάγονται οι έννοιες των συντελεστών ετεροχρονισμού και ταυτοχρονισμού του φορτίου.



Ο συντελεστής ετεροχρονισμού ( $\varepsilon$ ) είναι ουσιαστικά ο λόγος του αθροίσματος των αιχμών διαφόρων φορτίων  $P_{A-i}$  πλήθους  $N$ , προς τη συνολική αιχμή του συστήματος  $P_{A-tot}$ .

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^N P_{A-i}}{P_{A-tot}} > 1 \quad (\text{Σχέση : 2.8})$$

Ενώ ο συντελεστής ταυτοχρονισμού ( $\sigma$ ) ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής αιχμής του συστήματος  $P_{A-tot}$ , προς το άθροισμα των αιχμών διαφόρων φορτίων  $P_{A-i}$  πλήθους  $N$ . Είναι πρακτικά ο αντίστροφος λόγος του συντελεστή ετεροχρονισμού.

$$\sigma = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{P_{A-tot}}{\sum_{i=1}^N P_{A-i}} < 1 \quad (\text{Σχέση : 2.9})$$

Οι συντελεστές αυτοί παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της εγκατάστασης, αφού καθορίζουν το μέγιστο ποσό ενέργειας που μπορεί να ζητηθεί ταυτόχρονα από τα φορτία του ηλεκτρικού συστήματος που μελετάται. Έτσι το δίκτυο παροχής ηλεκτρικού ρεύματος προσαρμόζεται ώστε να καλύπτει τις απαιτήσεις των φορτίων όλη τη διάρκεια του 24ώρου.

Είναι λογικό πως και στην περίπτωση της εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης πλοίου, ο ακριβής προσδιορισμός του συνολικού ηλεκτρικού φορτίου είναι σωστός, όταν έχουν καθοριστεί λεπτομερώς όλοι οι καταναλωτές του πλοίου αυτού. Παρακάτω καταγράφονται πιο αναλυτικά όλοι οι πιθανοί καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας μιας τέτοιας εγκατάστασης, χωρισμένοι σε κατηγορίες, όπως φαίνεται και στους ακόλουθους Πίνακες 2.1, 2.2, 2.3. Οι κατηγορίες αυτές είναι κυρίως τα βοηθητικά μηχανήματα πρόωσης του πλοίου, τα βοηθητικά μηχανήματα διανομής, οι επικοινωνίες, ο φωτισμός κλπ.

Γενικά το είδος και ο αριθμός των καταναλωτών που βρίσκονται σε λειτουργία, καθώς και το φορτίο του καθενός, εξαρτώνται από την κατάσταση κίνησης του πλοίου. Συγκεκριμένα, υπάρχουν τρεις κύριες καταστάσεις κίνησης:

1. Κανονική πορεία.
2. Χειρισμοί.
3. « Εν όρμω ».

Στη μελέτη καταγράφεται, σε κάθε κατάσταση ξεχωριστά, ο αριθμός  $N$  των καταναλωτών που βρίσκονται σε λειτουργία με τον αντίστοιχο συντελεστή λειτουργίας  $f_s$ . Ο συντελεστής αυτός καθορίζει την απαίτηση σε ηλεκτρική ισχύ του εκάστοτε καταναλωτή, σε σχέση με το ονομαστικό του φορτίο.

$$f_s = \frac{\text{μέσο φορτίο 24ώρου}}{\text{ονομαστικό φορτίο}} = \frac{\sum_i P_i t_i}{24 * P_{\text{ονομ.}}} \quad (\text{Σχέση : 2.10})$$

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

Στους παρακάτω Πίνακες 2.1, 2.2, 2.3 καταγράφονται ενδεικτικά οι μέγιστες τιμές των συντελεστών λειτουργίας  $f_s$  των διαφόρων καταναλωτών για τις τρεις κύριες καταστάσεις κίνησης.

a/a	Περιγραφή Βοηθητικών Πρόωσης	Συντελεστής Λειτουργίας fs Κανονικής Λειτουργίας	Συντελεστής Λειτουργίας fs Εν όρμω	Συντελεστής Λειτουργίας fs Χειρισμών
1	Κύρια και Βοηθητική Αντλία Κυκλοφορίας	0.85	0.7	0.85
2	Κύρια και Βοηθητική Αντλία Συμπυκνώματος	0.40	0.40	0.0
3	Κύρια Τροφοδοτική Αντλία	0.80	-	-
4	Τροφοδοτική Αντλία Ανάγκης	0.00	-	-
5	Τροφοδοτική Αντλία Όρμου	0.00	-	-
6	Αντλία Συμπυκνωμάτων Προθερμαντήρων Χ.Π.	0.65	0.00	0.65
7	Αντλία Μεταγγίσεως Συμπυκνώματος Ψυγείου	0.60	0.60	0.60
8	Αντλία Λαδιού Λιπάνσεως	0.85	0.00	0.85
9	Αντλία Μεταγγίσεως Λαδιού	0.00	-	-
10	Αντλία Κυκλοφορίας Ψυγείου Λαδιού Λιπάνσεως	0.90	0.00	0.90
11	Αντλία Τροφοδοτήσεως Καυσίμου	0.80	0.00	0.80
12	Αντλία Μεταγγίσεως Βαρέως Καυσίμου	0.10	0.00	0.0
13	Υπηρετική Αντλία Θάλασσας	0.80	-	-
14	Τροφοδοτική Αντλία Αποστακτήρα Ακαθάρτων	0.65	-	-
15	Αντλία Κυκλοφορίας Ατμοσφαιρικού Ψυγείου	0.00	-	-
16	Ανεμιστήρας Προσαγωγής Λέβητα	0.90	-	-
17	Αεροσυμπιεστής Αυτοματισμού	0.20	0.20	0.20
18	Καθαριστής Λαδιού Λιπάνσεως	0.35	0.00	0.35
19	Προθερμαντήρας Λαδιού Λιπάνσεως	0.00	0.10	0.00
20	Μηχανισμός Πηδαλίου	0.01	0.00	0.20
21	Ανεμιστήρες Προσαγωγής Μηχανοστασίου	0.85	0.20	0.85
22	Ανεμιστήρες Εξαγωγής Μηχανοστασίου	0.85	0.85	0.85
23	Ανεμιστήρας Αναρροφήσεως Λαβυρίνθων	0.90	0.90	0.90
24	Τύμπανο Προθερμαντήρα Αέρα	0.90	0.00	0.90
25	Φωτισμός Μηχανοστασίου	0.90	0.90	0.90
26	Αντλία Κενού	0.80	0.00	0.80
27	Κύριος Αεροσυμπιεστής	0.10	0.10	0.85
28	Αντλία Κυκλοφορίας Νερού Ψύξεως Κυλίνδρων	0.85	0.00	0.85
29	Αντλία Κυκλοφορίας Νερού Ψύξεως Εμβόλων	0.85	0.00	0.85
30	Αντλία Νερού Ψύξεως Καυστήρων	0.85	0.00	0.85
31	Αντλία Μεταγγίσεως Ελαφρού Πετρελαίου	0.00	-	-

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

32	Καθαριστής Βαρέως Πετρελαίου	0.70	0.00	0.0
33	Καθαριστής Ελαφρού Πετρελαίου	0.00	-	-
34	Βοηθητικός Ανεμιστήρας Κύριας Μηχανής	0.00	0.00	0.85
35	Μηχανισμός Περιστροφής Άξονα	0.00	0.80	0.00
36	Σύστημα Καύσεως Συνδυασμένου Λέβητα	0.50	0.80	0.80
37	Αντλία Λαδιού Λιπάνσεως Μειωτήρα	0.90	0.00	0.90

Πίνακας 2.1 : Καταγραφή βοηθητικών μηχανημάτων πρόωσης πλοίου. [2]

a/a	Περιγραφή Βοηθητικά Χώρων Διανομής	Συντελεστής Λειτουργίας fs Κανονικής Λειτουργίας	Συντελεστής Λειτουργίας fs Εν όρμω	Συντελεστής Λειτουργίας fs Χειρισμών
1	Φωτισμός Διαμερισμάτων	0.40	0.60	0.40
2	Αερισμός Διαμερισμάτων	0.85	0.85	0.85
3	Ατομικοί Ανεμιστήρες	0.30	0.40	0.00
4	Συσκευές Μαγειρείου	0.30	0.30	0.30
5	Συσκευές Πλυντηρίου	0.20	0.20	0.00
6	Συσκευές Νοσοκομείου	0.20	0.20	0.20
7	Ηλεκτρική θέρμανση Νερού	0.00	0.50	0.20
8	Θέρμανση Διαμερισμάτων	0.40	0.40	0.40
9	Αντλία Κυκλοφορίας Ζεστού Νερού	0.70	0.70	0.70
10	Αντλία Κυκλοφορίας Κρύου Νερού	0.70	0.70	0.70
11	Αντλία Πόσιμου Νερού	0.50	0.50	0.50
12	Πίδακες Πόσιμου Νερού	0.30	0.30	0.30
13	Αντλία Κυκλοφορίας Κολυμβητικής Δεξαμενής	0.20	0.00	0.0
14	Αντλία Υγιεινής	0.40	0.40	0.40
15	Εγκατάσταση Αποχετεύσεως	0.70	0.70	0.70
16	Συμπιεστής Ψυκτικής	0.40	0.40	0.40
17	Αντλία Κυκλοφορίας Θάλασσας Ψυκτικής	0.40	0.40	0.40
18	Μεμονωμένα Ψυγεία	0.30	0.30	0.30
19	Συμπιεστής Κλιματισμού	0.75	0.75	0.75
20	Αντλία Κρύου Νερού Κλιματισμού	0.75	0.75	0.75
21	Αντλία Ζεστού Νερού Κλιματισμού	0.75	0.75	0.75
22	Αντλία Κυκλοφορίας θάλασσας Κλιματισμού	0.75	0.75	0.75
23	Ανεμιστήρας Κλιματισμού	0.75	0.75	0.75
24	Αντλία Τροφοδοτήσεως Θαλασσινού Νερού Στον Αποστακτήρα	0.75	0.00	0.00
25	Αντλία Εξαγωγής Υπολειμμάτων Αποστάξεως	0.75	0.00	0.00

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

26	Αντλία Συμπυκνώματος Νερού Αποστάξεως	0.50	0.00	0.00
27	Αντλία Αποστραγγίσεως Αποστακτήρα	0.00	0.60	0.00
28	Αντλία Μεταγγίσεως Αποσταγμένου Νερού	0.60	0.00	0.00
29	Αντλία Τροφοδοτήσεως Χημικών Στο Αποσταγμένο Νερό	0.20	0.00	0.00

Πίνακας 2.2 : Καταγραφή βοηθητικών μηχανημάτων στους χώρους διανομής του πλοίου. [2]

a/a	Περιγραφή Βοηθητικά Σκάφους	Συντελεστής Λειτουργίας fs Κανονικής Λειτουργίας	Συντελεστής Λειτουργίας fs Εν όρμω	Συντελεστής Λειτουργίας fs Χειρισμών
1	Αντλία Πυρκαγιάς	0.00	-	-
2	Αντλία Πυρκαγιάς Και Κύτους	0.00	-	-
3	Αντλία Πυρκαγιάς Γενικής Χρήσεως	0.00	-	-
4	Αντλία Κύτους Και Έρματος	0.20	0.20	0.00
5	Υποβρύχια Αντλία Κύτους	0.10	0.00	0.00
6	Αντλία Έρματος	0.00	0.90	0.00
7	Αντλία Πληρώσεως Φυγοκεντρικών Αντλιών	0.00	0.10	0.00
8	Αεροσυμπιεστής Σκάφους	0.30	0.30	0.30
9	Φωτισμός Καταστρώματος	0.00	0.90	0.00
10	Φωτισμός Ναυσιπλοΐας	0.50	0.00	0.50
11	Φωτισμός Χώρου Ασυρμάτου	0.50	0.00	0.50
12	Εσωτερικές Επικοινωνίες	0.40	0.40	0.40
13	Ηλεκτρονικά	0.45	0.30	0.45
14	Φόρτιση Συσσωρευτών	0.20	0.20	0.20
15	Πίνακας Ελέγχου Συσκευών	0.20	0.20	0.20
16	Γυροπυξίδα	0.40	0.20	0.40
17	Θερμαντές Καταστρώματος	1.00	1.00	1.00
18	Εργαλειομηχανές	0.10	0.10	0.00
19	Αερισμός Φορτίου	0.85	0.85	0.85
20	Ξήρανση Φορτίου	0.60	0.50	0.50
21	Γερανός Μηχανοστασίου	0.00	0.40	0.00
22	Εργάτης Άγκυρας	0.00	-	-
23	Βαρούλκα	0.00	-	-
24	Υδραυλικοί Κινητήρες Καλυμμάτων Κυτών	0.00	0.10	0.00
25	Φορτωτές Φορτίου	0.00	0.35	0.00

Πίνακας 2.3 : Καταγραφή βοηθητικών μηχανημάτων σκάφους. [2]

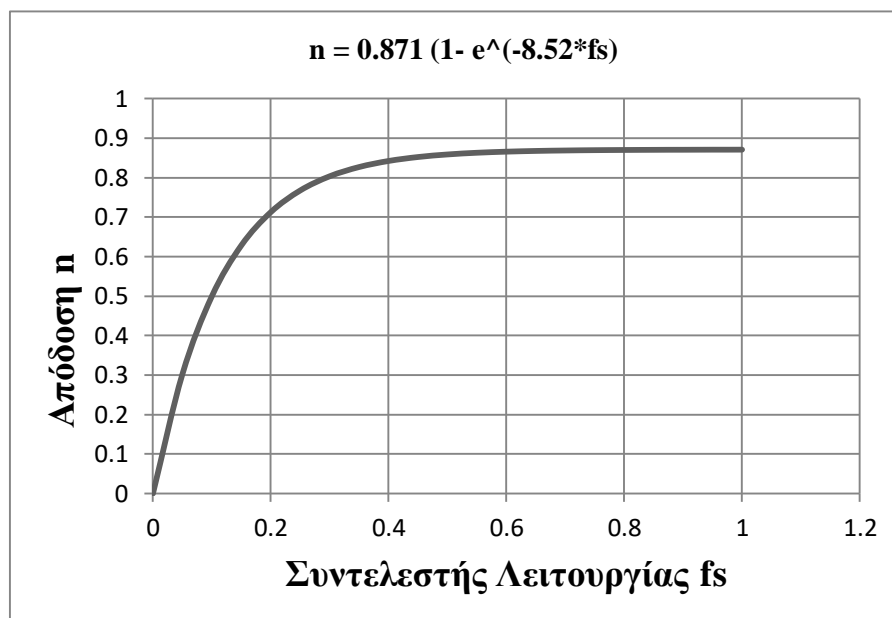
Ο συντελεστής λειτουργίας  $f_s$  συμπεριλαμβάνεται στην εκτίμηση του ηλεκτρικού φορτίου καθώς συσχετίζεται με το βαθμό απόδοσης  $n$  όλων των στοιχείων της ηλεκτρικής εγκατάστασης, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη Εικόνα 2.6.

Στη συνέχεια ο βαθμός απόδοσης σε συνδυασμό με την ονομαστική αποδιδόμενη ισχύ του εκάστοτε καταναλωτή ( $P_{\text{ονομ.αποδ.}}$ ) δίνει την ηλεκτρική ισχύ που απορροφά ο καταναλωτής αυτός στο ονομαστικό του φορτίο, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$P_{\text{ονομ.απορ.}} = \frac{P_{\text{ονομ.αποδ.}}}{n} \quad (\text{Σχέση : 2.11})$$

Επιπλέον η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς αποδίδεται από το σύνολο των καταναλωτών  $N$  που απορροφούν την ίδια ισχύ στο ίδιο ονομαστικό φορτίο ως εξής:

$$P_{\text{εγκατ.}} = N * P_{\text{ονομ.απορ.}} \quad (\text{Σχέση : 2.12})$$



Εικόνα 2.6 : Γράφημα εξίσωσης συντελεστή λειτουργίας – απόδοσης. [2]

Στις εγκαταστάσεις πλοίων συγκεκριμένα, ένα από τα μεγαλύτερα και πιο καθοριστικά μηχανήματα είναι οι γεννήτριες. Σύμφωνα με τον ηλεκτρικό ισολογισμό του εκάστοτε πλοίου, το σύνολο της ισχύος των κύριων γεννητριών πρέπει να καλύπτει τις ανάγκες κινήσεως του πλοίου αυτού, ακόμα και υπό τις δυσμενέστερες συνθήκες. Γενικά σε πλοία μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος, η ισχύ της κάθε γεννήτριας κυμαίνεται συνήθως κοντά στα 4000kW.

Παρ' όλα αυτά, κατά τον υπολογισμό της συνολικής ισχύς μιας εγκατάστασης πλοίου δεν αρκεί να μελετηθεί μόνο η ενεργός ισχύ που καταναλώνεται. Εξίσου σημαντικό ρόλο στον ηλεκτρολογικό ισολογισμό, όπως έχει ήδη αναφερθεί, παίζει και η άεργος ισχύ της εγκατάστασης. Επομένως, συνδυάζοντας και την ενεργό και την άεργο ισχύ μπορεί να εκτιμηθεί, με μεγαλύτερη ακρίβεια, η πραγματική απαίτηση ισχύος των καταναλωτών του πλοίου.

### 2.3 Μεθοδολογίες πρόβλεψης φορτίου

Προκειμένου να εκτιμηθεί η ηλεκτρική ζήτηση της συνολικής εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης πλοίου, τόσο στο παρόν, όσο και στο απώτερο μέλλον, είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν οι κατάλληλες μεθοδολογίες πρόβλεψης φορτίου.

Πιο αναλυτικά παρακάτω αναφέρονται οι τέσσερις κύριες κατηγορίες τέτοιων μεθοδολογιών.

Αρχικά στη πολύ βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου, γίνεται πρακτικά η εκτίμηση ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος της εγκατάστασης από τα επόμενα λεπτά έως μια ώρα, με βήματα μερικών δευτερολέπτων ή λεπτών. Η μέθοδος αυτή στοχεύει στον έλεγχο της σχέσης συχνότητας – φορτίου με το συνολικό σύστημα.

Πιο συγκεκριμένα, εκτιμούνται έτσι οι ανάγκες των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου των γεννητριών, ώστε να πραγματοποιούνται οι απαραίτητες μεταβολές παροχής καυσίμου και οι ρυθμίσεις των επιπέδων τάσης όλων των καταναλωτών.

Στη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη από την άλλη, πραγματοποιείται η πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου για τα επόμενα 24ώρα ή για την τρέχουσα εβδομάδα, με το χρονικό βήμα της μισής ή της μιας ώρας. Στόχος της μεθόδου αυτής είναι κυρίως η ενεργειακή διαχείριση του ηλεκτρικού συστήματος. Αναλυτικότερα, ρυθμίζονται όλα τα βασικά επίπεδα λειτουργιών των μονάδων και διαμορφώνεται η σειρά ένταξης τους σύμφωνα πάντα με τα κριτήρια της οικονομικής κατανομής και των προγραμμάτων συντήρησης.

Στην συνέχεια στην μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου η εκτίμηση της ζήτησης γίνεται για το χρονικό διάστημα του ενός έτους, με το χρονικό βήμα της μιας εβδομάδας. Η μέθοδος αυτή αφορά κυρίως την ρύθμιση του προγράμματος συντήρησης των μονάδων, τόσο της ξηράς, όσο και των συστημάτων του πλοίου, στην περίπτωση της εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης. Έτσι μπορεί να εξασφαλιστεί η αξιόπιστη κάλυψη του φορτίου με τις ήδη υπάρχουσες μονάδες τροφοδοσίας.

Προς καλύτερη κατανόηση όλων των παραπάνω στο Πίνακα 2.4 φαίνονται συγκεντρωτικά οι μεθοδολογίες που προαναφέρθηκαν.

Τέλος, η μακροπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου βοηθάει πρακτικά στην εκτίμηση της συνολικής ζήτησης της εγκατάστασης για τα επόμενα 10-20 έτη, με το χρονικό βήμα του ενός έτους. Η μεθοδολογία αυτή στοχεύει κυρίως στην πρόβλεψη της ετήσιας αιχμής φορτίου και της συνολικής ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας, έτσι ώστε να προκύψει ο πιο λειτουργικός συνδυασμός συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ξηράς – πλοίου, καθώς και οι ονομαστικές τιμές όλων των επιμέρους μηχανημάτων της ψυχρής εκκίνησης.

Είδος Πρόβλεψης	Χρονικός Ορίζοντας		Λειτουργίες για τις οποίες χρειάζεται
	Βήμα	Διάρκεια	
Πολύ βραχυπρόθεσμη	μερικά sec – 1-2 min	30 min	Αυτόματος Έλεγχος Παραγωγής Οικονομική Κατανομή Φορτίου
Βραχυπρόθεσμη	- 15 min ως μερικές ώρες - 1 ώρα (συνήθως)	μερικές ώρες ως 1 εβδομάδα	Ένταξη Μονάδων Υδροθερμική Συνεργασία Ανταλλαγές Ισχύος
Μεσοπρόθεσμη	- Εβδομάδα – μήνα ως και έτος	μερικοί μήνες - 5 έτη	Προγραμματισμός Καυσίμων Χρήση Υδάτινων Πόρων Προγραμματισμός Συντήρησης
Μακροπρόθεσμη	Έτος	10-25 έτη	Προγραμματισμός Ένταξης Μονάδων

Πίνακας 2.4 : Μεθοδολογίες πρόβλεψης ηλεκτρικού φορτίου εγκατάστασης. [2]

Οι παραπάνω μεθοδολογίες πρόβλεψης φορτίου συνεισφέρουν στην τελική διαμόρφωση της εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης πλοίου, καθώς συμπεριλαμβάνουν όλους τους παράγοντες μεταβολής του φορτίου που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Πιο αναλυτικά μερικά παραδείγματα τέτοιων βασικών παραγόντων που συμπεριλαμβάνονται στη μελέτη είναι τα εξής:

1. Οικονομικοί παράγοντες: Η οικονομική κατάσταση, το οικονομικό περιβάλλον και οι ρυθμοί ανάπτυξης της περιοχής όπου βρίσκεται η εγκατάσταση του λιμανιού επηρεάζουν τα όρια παροχής ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να προσφέρει το τοπικό δίκτυο. Τυπικά, οι οικονομικοί παράγοντες συμπεριλαμβάνονται στη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη.
2. Εποχιακοί παράγοντες: Είναι γεγονός πως τα φορτία παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια τόσο του 24ώρου, όσο και του έτους. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται κυρίως στις μεταβολές των καιρικών συνθηκών και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, ειδικά στη θάλασσα. Οι εποχιακοί παράγοντες επηρεάζουν τη μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη.
3. Μετεωρολογικοί παράγοντες: Η θερμοκρασία, η υγρασία, ο άνεμος, η βροχόπτωση και η ηλιοφάνεια/νεφώσεις επηρεάζουν σημαντικά την ηλεκτρική κατανάλωση των συστημάτων του πλοίου, ανάλογα πάντα με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες αυτά λειτουργούν. Αυτό συμβαίνει, καθώς η λειτουργία ενός μεγάλου ποσοστού ηλεκτρικών συσκευών, όπως οι θερμοσυσσωρευτές, τα κλιματιστικά και οι αρδεύσεις, εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Οι μετεωρολογικοί παράγοντες επιδρούν κυρίως στη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη.
4. Τυχαίοι παράγοντες: Τέτοιοι παράγοντες είναι δύσκολο να εκτιμηθούν στη μελέτη της ζήτησης. Τυπικά παραδείγματα είναι οι μεγάλες απεργίες, οι εκλογές, οι Ολυμπιακοί αγώνες κλπ.
5. Αβέβαιοι παράγοντες: Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου, καθώς είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθούν με ακρίβεια. Αφορούν κυρίως τις προοπτικές ανάπτυξης της περιοχής γύρω από το λιμάνι, το ρυθμό ανάπτυξης του πληθυσμού και την πορεία της τοπικής οικονομίας.

## 2.4 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, είναι ξεκάθαρο πως ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να εξασφαλίζεται διαρκώς, είναι η διαθεσιμότητα της. Αρχικά μέσα από την πολύπλευρη μελέτη ζήτησης είναι αναγκαίο να εκτιμηθεί το συνολικό φορτίο της εγκατάστασης και στη συνέχεια να διαμορφωθεί ένα σύστημα τέτοιο ώστε ανά πάσα στιγμή να παρέχει τη ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή πρέπει να έχει χαρακτηριστικά που θα καλύπτουν ταυτόχρονα τις απαιτήσεις όλων των καταναλωτών του πλοίου, σε ότι αφορά την τάση, τη συχνότητα, τους συντελεστές παραμόρφωσης αρμονικών κλπ.

Επιπλέον με βάση τους συντελεστές ταυτοχρονισμού και ετεροχρονισμού, που συμπεριλαμβάνονται στη μελέτη, υπολογίζεται με μεγάλη ακρίβεια η τιμή της ισχύος που χρειάζεται ώστε να επιτευχθεί η ηλεκτρική πληρότητα σε όλα τα συστήματα του πλοίου.



### **3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Αρχές διαστασιολόγησης καλωδίων**

#### **3.1 Εισαγωγή στα βασικά κριτήρια διαστασιολόγησης ηλεκτρικών καλωδίων**

Μετά τη λεπτομερή μελέτη και την εκτίμηση της ζήτησης φορτίου, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, σειρά έχει ο υπολογισμός του ηλεκτρικού ρεύματος, που θα διαρρέει τα καλώδια της εγκατάστασης που μελετάται.

Ο ακριβής προσδιορισμός του ρεύματος είναι απαραίτητος και συμπεριλαμβάνεται στην πλήρη ηλεκτρολογική μελέτη, καθώς από αυτό καθορίζονται το είδος και τα χαρακτηριστικά των καλωδίων όλου του ηλεκτρικού δικτύου της εγκατάστασης. Δεν αρκεί όμως, μόνο η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος για να γίνει η διαστασιολόγηση των αγωγών διανομής. Κάθε καλώδιο που επιλέγεται οφείλει να πληρεί κάποια βασικά ηλεκτρολογικά κριτήρια, ώστε να είναι σε θέση να μεταφέρει το ρεύμα που απαιτείται, με τον ασφαλέστερο και οικονομικότερο τρόπο.

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι ουσιαστικά η παρουσίαση και η ανάλυση των κριτηρίων διαστασιολόγησης καλωδίων, καθώς αυτό είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που πρέπει να εμπεριέχεται σε μια ηλεκτρολογική μελέτη, όπως είναι και εκείνη της εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης πλοίου.

Τα στοιχεία εκείνα που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη βαρύτητα είναι τα ακόλουθα. Αρχικά η πτώση τάσης της γραμμής του κάθε καλωδίου ξεχωριστά, η οποία πρέπει να κυμαίνεται ανάμεσα σε κάποια αυστηρά όρια, ώστε να περιορίζονται οι θερμικές απώλειες και οι απώλειες φορτίου των γραμμών μεταφοράς. Επίσης το θερμικό όριο της κάθε γραμμής, το οποίο καθορίζεται από τη μόνωση του καλωδίου.

Ακόμα το είδος του καλωδίου που χρησιμοποιείται εξαρτάται και από το επιτρεπόμενο ρεύμα που το διαρρέει κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος. Η ανοχή του εκάστοτε καλωδίου, σε τέτοιες περιπτώσεις βλάβης του δικτύου, είναι καθοριστική, κυρίως για την ασφάλεια του ανθρώπινου δυναμικού. Επιπλέον τα χαρακτηριστικά αυτά διαμορφώνονται ανάλογα με τη χρήση και τον τρόπο τοποθέτησης των αγωγών στο δίκτυο. Αυτό συνεπάγεται που σε κάποιες περιπτώσεις απαιτείται και μια επιλεκτική προστασία με ξεχωριστές ιδιότητες, ταιριαστές στις ανάγκες της κάθε εγκατάστασης.

Τέλος ένα εξίσου σημαντικό κριτήριο που θα αναλυθεί σε αυτό το κεφάλαιο, είναι αυτό της ευστάθειας των γραμμών μεταφοράς, το οποίο εξασφαλίζει τόσο τη σταθερή παροχή του ρεύματος, όσο και τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων της εγκατάστασης.

#### **3.2 Παράγοντες που προσδιορίζουν το μέγιστο διαρκώς επιτρεπόμενο θερμικό ρεύμα**

Όπως αναφέρθηκε ήδη ένα από τα βασικά κριτήρια επιλογής καλωδίου είναι το θερμικό οριακό ρεύμα. Γενικά η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία της μόνωσης ενός αγωγού είναι αυτή που καθορίζει και την αντίστοιχη μέγιστη διαρκώς επιτρεπόμενη ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει.

Η μόνωση των καλωδίων, που συχνά αποτελείται από ελαστικό, PVC και πολυαιθυλένιο αντέχει στους 60°C – 90°C σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας και στους 140°C – 160°C σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Βέβαια, οι τιμές των θερμοκρασιών που αντιστοιχούν σε βραχυκύκλωμα ισχύουν παροδικά και για λίγα μόνο δευτερόλεπτα. Η μόνωση από χαρτί ή PVC παρατηρείται κυρίως στις χαμηλές τιμές των θερμοκρασιών, ενώ η μόνωση από δικτυωμένο πολυαιθυλένιο εξυπηρετεί τις υψηλότερες θερμοκρασίες.

Υπάρχουν ωστόσο και μονωτικά καλώδια ειδικών εφαρμογών, όπως το καλώδιο με μόνωση από λάστιχο σιλικόνης, το οποίο αντέχει υψηλότερες θερμοκρασίες, που αγγίζουν τους 180°C σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας και τους 400°C σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Στο παρακάτω Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακές ανοχές διαφόρων μονώσεων καλωδίου.

<b>Μόνωση ή τύπος του καλωδίου</b>	<b>Μέγιστη διαρκής θερμοκρασία °C</b>	<b>Μέγιστη μεταβατική θερμοκρασία °C</b>
<b>PVC A &lt; 300mm<sup>2</sup></b>	70	160
<b>A &gt; 300mm<sup>2</sup></b>	70	140
<b>Πολυαιθυλένιο</b>	70	140
<b>Δικτυωμένο πολυαιθυλένιο</b>	90	250
<b>Χαρτί μάζα μέχρι 6 kV</b>	80	180
<b>Χαρτί μάζα μέχρι 20 kV</b>	65	155
<b>Φυσικό λάστιχο</b>	60	140
<b>Λάστιχο βουτυλίου</b>	80	220
<b>Λάστιχο οξικού βινυλαιθυλίου ή λάστιχο αιθυλενίου-προπυλενίου</b>	120	250
<b>Λάστιχο σιλικόνης</b>	180	>400
<b>Εναέριος αγωγός χαλκού (Cu)</b>	80	170
<b>Εναέριος αγωγός αλουμινίου (Al)</b>	80	130
<b>Εναέριος αγωγός ACSR</b>	80	160
<b>Καλώδια ή αγωγοί με κασσίτερο-κόλληση</b>	-	160

Πίνακας 3.1:Μέγιστες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες αγωγών καλωδίων για διάφορα μονωτικά. [19]

Οι συνεχείς υψηλές θερμοκρασίες στο εσωτερικό ενός καλωδίου έχουν σαν αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της ελαστικότητας και της μηχανικής ανοχής της μόνωσης του. Ενώ σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 200°C, παρατηρείται ρευστοποίηση και καταστροφή της θερμοπλαστικής μόνωσης του αγωγού.

Τα όρια των θερμοκρασιών παίζουν σημαντικό ρόλο και πρέπει να τηρούνται ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια τόσο της εγκατάστασης, όσο και των ανθρώπων, από πυρκαγιές ή αναφλέξεις μονωτήρων. Γι' αυτό, για παράδειγμα σε ζυγούς υποσταθμών ισχύει το αυστηρό θερμικό όριο των 65°C συνεχώς και των 200°C βραχυπρόθεσμα.

Προκειμένου να γίνουν πιο κατανοητά τα παραπάνω στη συνέχεια προσδιορίζεται καλύτερα ο όρος του επιτρεπόμενου ρεύματος. Αρχικά, η διατομή του καλωδίου σε συνδυασμό με τις συνθήκες ψύξης, είναι αυτή που καθορίζει την επιτρεπόμενη εσωτερική ένταση του ρεύματος.

Πιο συγκεκριμένα από τους αγωγούς εκλύεται θερμότητα και οδηγείται στον περιβάλλοντα αέρα μέσω της μόνωσης. Έτσι συγκεντρώνονται οι παράγοντες που διαμορφώνουν τα χαρακτηριστικά του επιτρεπόμενου ρεύματος ενός καλωδίου αγωγού είναι οι ακόλουθοι:

- Η θερμική αντοχή της μόνωσης.
- Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
- Η ύπαρξη άλλων γειτονικών αγωγών ή πηγών θερμότητας.
- Η θερμική αντίσταση της μόνωσης.

Καθώς είναι αρκετά χρονοβόρο και δύσκολο να υπολογίζεται αυτό το θερμικό ρεύμα σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά, έχουν διαμορφωθεί κάποια πρότυπα που συμπίπτουν, με σχετικά μεγάλη ακρίβεια, με τις πραγματικές τιμές των επιτρεπτών εντάσεων, της εκάστοτε διάταξης αγωγών. Πιο συγκεκριμένα διακρίνονται τα ΚΕΗΕ, VDE 100, VDE 0298 και ΔΕΗ-οδηγία 26. Τα πρότυπα των ΚΕΗΕ και VDE 100 αναφέρονται σε μονωμένους αγωγούς με μόνωση PVC ή ελαστικό με μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία 60°C. Δεν περιέχουν τιμές για ενταφιασμένα καλώδια ή μονώσεις από πολυαιθυλένιο. Η ΔΕΗ-οδηγία 26 έχει εκδοθεί για καλώδια ισχύος ενταφιασμένα ή μη. Από την άλλη, οι κανονισμοί VDE 298 απευθύνονται σε ένα ευρύ φάσμα καλωδίων βαρέως τύπου και πολυαιθυλενίου, ενώ επικαλύπτουν και το πρότυπο της ΔΕΗ.

### **3.3 Μέγιστο επιτρεπόμενο θερμικό ρεύμα σε καλώδια και αγωγούς εγκαταστάσεων χαμηλής και μέσης τάσης**

Στη συγκεκριμένη ενότητα γίνεται λόγος σε καλώδια με τάση 0.6/1kV, 3.6/6kV, 6/10kV, 12/20kV και 18/30kV. Γενικά τα επαγόμενα ρεύματα των φάσεων και τα διανορεύματα στους μανδύες και τις μηχανικές ενισχύσεις των καλωδίων, είναι εκείνα που προκαλούν τις περισσότερες απώλειες.

Στον ακόλουθο Πίνακα 3.2 παρουσιάζεται ενδεικτικά το μέγιστο συνεχώς επιτρεπόμενο ηλεκτρικό ρεύμα σε αγωγούς μονωμένους, σωλήνες, καλώδια ελεύθερα ή εντοιχισμένα και καλώδια συνδέσεων που ονομάζονται σειρίδες ή κορδόνια. Ο αριθμός των γειτνιαζόντων αγωγών είναι το πολύ τρεις και η θερμοκρασία περιβάλλοντος αγγίζει τους 30°C.

Όπως φαίνεται και στο Πίνακα 3.2 οι αγωγοί είναι χωρισμένοι σε τρεις ομάδες.

- Ομάδα I: Ορατές ή χωνευτές εντοιχισμένες εγκαταστάσεις με: α) καλώδια τριών ενεργών το πολύ, β) το πολύ τρεις αγωγούς σε σωλήνα.
- Ομάδα II: Μόνο ορατές εγκαταστάσεις με: α) μονοπολικά καλώδια, β) μονωμένους αγωγούς, γ) πολλά μονοπολικά καλώδια ή μονωμένους αγωγούς, όταν η απόσταση τους είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρό τους.
- Ομάδα III: Εύκαμπτα καλώδια για σύνδεση φορητών ή κινητών συσκευών με: τρεις ενεργούς αγωγούς το πολύ.

Διατομή Cu $mm^2$	$I_0$ σε Ampere		
	<b>ΟΜΑΔΑ Ι</b> Ορατές ή χωνευτές εγκαταστάσεις πολυπολικών καλωδίων ή πολλών αγωγών σε σωλήνες	<b>ΟΜΑΔΑ ΙΙ</b> Ορατές εγκαταστάσεις μονοπολικών αγωγών	<b>ΟΜΑΔΑ ΙΙΙ</b> Εύκαμπτα καλώδια συνδέσεων φορητών συσκευών
0.75	9	15	7
1	11	18	9
1.5	14	22	10
2.5	20	31	15
4	25	41	20
6	33	54	26
10	43	70	35
16	60	96	48
25	83	128	65
35	100	153	78
50	127	197	100
70	147	234	-
95	181	287	-
120	208	336	-
150	238	383	-
185	266	435	-
240	310	515	-
300	355	596	-
400	-	710	-
500	-	810	-

Πίνακας 3.2: Μέγιστο συνεχώς επιτρεπόμενο ηλεκτρικό ρεύμα σε διαφορετικής διατομής αγωγούς. [19]

Να σημειωθεί πως ενεργός χαρακτηρίζεται ο αγωγός που φέρει ρεύμα στη στάσιμη κατάσταση. Δεν προσμετρούνται στους ενεργούς αγωγούς ο αγωγός γείωσης και ο τριφασικός ουδέτερος, όταν δεν υπάρχουν αρμονικές.

Γενικά, για να υπολογιστεί η επιτρεπόμενη ένταση ρεύματος  $I_{max}$ , για τελική θερμοκρασία  $\theta_{\tau max}$  και μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος  $\theta_{\pi max}$  εφαρμόζεται ο ακόλουθος τύπος:

$$I_{max} = I * f_{\theta} * f_{\pi} \quad (\text{Σχέση : 3.1})$$

Όπου το  $f_{\theta}$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης της έντασης του ρεύματος και υπολογίζεται, ως προς την θερμοκρασία που παρατηρείται τόσο εσωτερικά του καλωδίου, όσο και εξωτερικά εκείνη την χρονική στιγμή :

$$f_{\theta} = \sqrt{\frac{\theta_{\tau max} - \theta_{\pi max}}{\theta_{\tau} - \theta_{\pi}}} \quad (\text{Σχέση : 3.2})$$

Θερμοκρασία (°C)	30	35	40	45	50	55
Συντελεστής $f_{\theta}$	1.00	0.91	0.82	0.71	0.58	0.41

Πίνακας 3.3 : Συντελεστής διόρθωσης της έντασης του ρεύματος. [19]

Και όπου  $f_{\pi}$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης της επιτρεπόμενης έντασης για περισσότερους από τρεις αγωγούς σε καλώδιο ή σωλήνα. Στην περίπτωση των 3 ενεργών αγωγών το  $f_{\pi} = 1$ .

4 – 6 αγωγοί	$f_{\pi} = 0.8$
7 – 9 αγωγοί	$f_{\pi} = 0.7$

Πίνακας 3.4 : Συντελεστής διόρθωσης της επιτρεπόμενης έντασης για περισσότερους από τρεις αγωγούς σε καλώδιο ή σωλήνα. [19]

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει πως στις γραμμές των γεννητριών και των κινητήρων που είναι πολύ βασικές στην εγκατάσταση της ψυχρής εκκίνησης, χρειάζεται καλώδιο με ελάχιστη διατομή  $2,5\text{mm}^2$ . Αυτό συμβαίνει καθώς το ρεύμα σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται αυξημένο κατά 1.25 του ονομαστικού ρεύματος, για να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς και το αυξημένο ρεύμα εκκίνησης. Το ίδιο ισχύει και για τις γραμμές των πυκνωτών μόνο που σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται το ρεύμα αυξημένο κατά 1.6 του ονομαστικού.

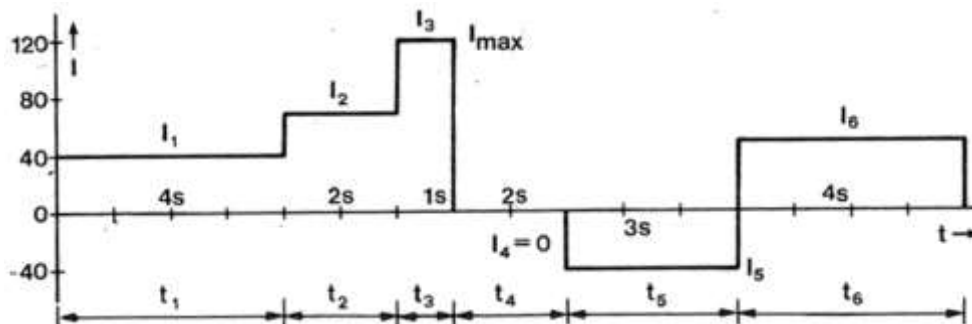
Στην περίπτωση των γυμνών μη μονωμένων αγωγών, όπως συρματόσχοινα ή μπάρες (ζυγοί μεταφοράς), η επιτρεπόμενη φόρτιση δίνεται από το πρότυπο ΚΕΗΕ, όπου για διατομή αγωγών μέχρι  $50\text{mm}^2$ , τα στοιχεία λαμβάνονται από την Ομάδα II του Πίνακα 3.2. Για καλώδια διατομών μεγαλύτερων των  $50\text{mm}^2$ , προτείνεται η ενδεικτική τιμή των  $1,5\text{A/mm}^2$  επιτρεπόμενης πυκνότητας φορτίου.

### 3.4 Μεταβαλλόμενη και βραχυχρόνια υπερφόρτιση αγωγών

Σε περιπτώσεις μεταβαλλόμενων φορτίων, όπως κινητήρες και γεννήτριες, το θερμικό ρεύμα δεν ταυτίζεται με το μέγιστο ρεύμα  $I_{max}$ , που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Το περιοδικά μεταβαλλόμενο ρεύμα ισούται πρακτικά με μια μέση τετραγωνική τιμή  $I_m$ .

$$I_m = \left[ \frac{\int_0^T I^2 dt}{T} \right]^{0.5} = \sqrt{\frac{I_1^2 * t_1 + I_2^2 * t_2 + \dots + I_n^2 * t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (\text{Σχέση : 3.3})$$

Η παραπάνω μέση τετραγωνική ένταση ρεύματος λαμβάνεται υπόψη μόνον όταν η μέγιστη ένταση δεν διαρκεί αρκετά και προκαλείται ανεπίτρεπτη υπερθέρμανση. Η Σχέση 3.3 προκύπτει από την ακόλουθη Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1 : Μεταβαλλόμενο φορτίο για τον υπολογισμό του ισοδύναμου θερμικού ρεύματος. [19]

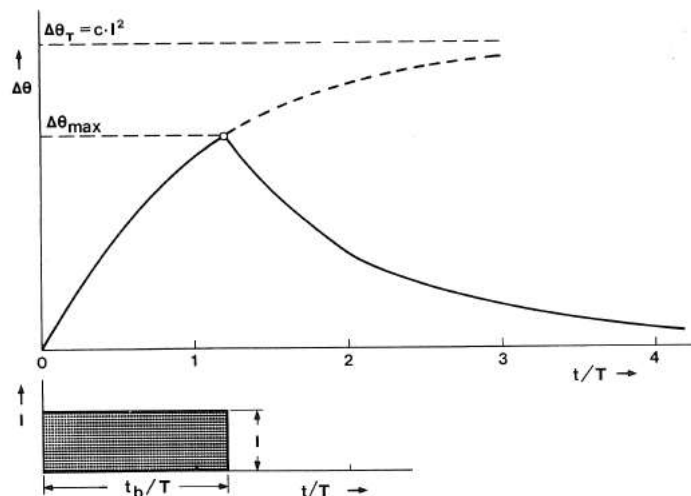
Παρακάτω παρουσιάζονται οι ενδεικτικοί επιτρεπόμενοι χρόνοι του μέγιστου ρεύματος ώστε να εφαρμοστεί ο νόμος της μέσης τετραγωνικής τιμής για το χαλκό που είναι και το πιο σύνηθες υλικό των καλωδίων.

Ενώ στην ακόλουθη Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται η βραχυχρόνια φόρτιση καλωδίου. Πιο αναλυτικά φαίνεται πως με τη φόρτιση ενός καλωδίου παρατηρείται και αύξηση της θερμοκρασίας του σε σχέση με την αιχμή κατά  $\Delta\theta$  και φτάνει στο μέγιστο  $\Delta\theta_{max}$ . Στη συνέχεια, αφού η φόρτιση σταματήσει, το καλώδιο ακολούθως ψύχεται μετά από χρόνο  $t_\beta$ .

Διατομή σε $mm^2$	Μέγιστη επιτρεπόμενη διάρκεια $t_{max}$ του μέγιστου ρεύματος (sec)
< 6	4
10-25	8
35-50	13
70-150	30
> 185	60

Πίνακας 3.5 : Συσχετισμός διατομής καλωδίου και επιτρεπτού χρόνου βραχυκύκλωσης. [19]

Γενικά, ακόμα και σε συνεχείς βραχυχρόνιες φορτίσεις, το καλώδιο δεν πρέπει να ξεπεράσει την επιτρεπόμενη θερμοκρασία του και να υπερθερμανθεί. Επιπλέον ισχύει πως τόσο στη συνεχή, όσο και στη βραχυχρόνια λειτουργία η τελική επιτρεπόμενη θερμοκρασία του καλωδίου είναι η ίδια.



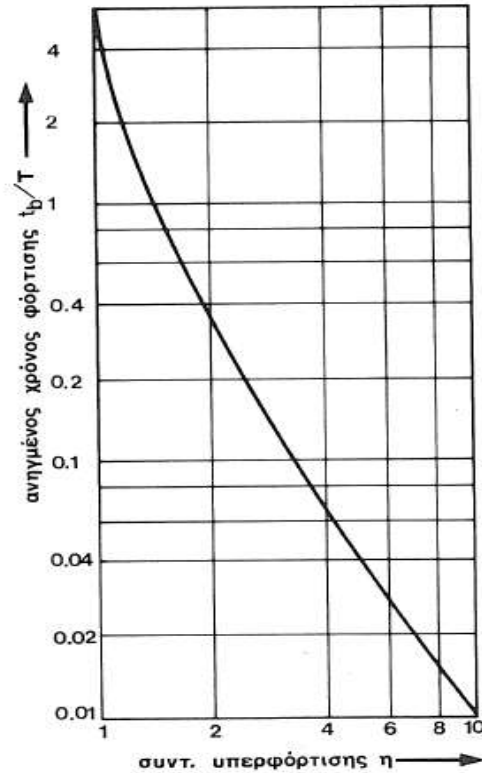
Εικόνα 3.2 : Βραχυχρόνια φόρτιση καλωδίου. Καμπύλη θέρμανσης και ψύξης. [19]

Έτσι προκύπτει πως το ρεύμα βραχυχρόνιας φόρτισης είναι ουσιαστικά το γινόμενο του ρεύματος συνεχούς λειτουργίας επί έναν συντελεστή υπερφόρτισης ( $n$ ).

$$I_{max} = I * n \quad (\text{Σχέση : 3.4})$$

$$\text{Όπου } n = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-\frac{t_\beta}{T}}}} \quad (\text{Σχέση : 3.5})$$

Ο συντελεστής υπερφόρτισης προκύπτει από την ακόλουθη Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3 : Συντελεστής υπερφόρτισης συναρτήσει του χρόνου φόρτισης  $t_{\beta}$ . Ο χρόνος φόρτισης είναι ανηγμένος στη χρονική σταθερά του καλωδίου  $T$ . [19]

### 3.5 Επιτρεπόμενο ρεύμα σε βραχυκύκλωμα αγωγών

Είναι γνωστό πως σε περίπτωση βραχυκύκλωσης δημιουργούνται δυναμικές και θερμικές καταπονήσεις στους αγωγούς, στα εξαρτήματα και στις μονώσεις των καλωδίων. Εκτός από τη μείωση της διάρκειας ζωής των μονώσεων οι υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν στα καλώδια και άλλες βλάβες, όπως πλαστικές παραμορφώσεις στους ακροδέκτες και καταστροφή των συγκολλήσεων που έχει χρησιμοποιηθεί κασσίτερος. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο τα ρεύματα βραχυκύκλωσης να διακόπτονται σε πάρα πολύ μικρούς χρόνους, προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι ζημιές που προκαλούν.

Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος ( $t < 5 \text{sec}$ ), τα καλώδια ή οι μονωμένοι αγωγοί επιτρέπεται να υπερθερμανθούν σε θερμοκρασίες  $160^{\circ}\text{C}$  έως  $250^{\circ}\text{C}$ . Οι τιμές των θερμοκρασιών βραχυκύκλωσης εξαρτώνται από το μονωτικό υλικό των καλωδίων. Υπενθυμίζεται πως οι θερμοκρασίες συνεχούς λειτουργίας κυμαίνονται από  $60^{\circ}\text{C}$  έως  $90^{\circ}\text{C}$ .

Για βραχυκυκλώματα με διάρκεια μέχρι πέντε δευτερόλεπτα μπορεί να θεωρηθεί πως η ενέργεια που έχει μετατραπεί σε θερμότητα λόγω του φαινομένου καταλήγει να αυξάνει τελικά την εσωτερική θερμοκρασία του αγωγού. Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει η σχέση για το επιτρεπόμενο ρεύμα βραχυκυκλώματος του αγωγού από την ακόλουθη εξίσωση ενέργειας:

$$\left(1 + \frac{\alpha(\theta - 20)}{\kappa \cdot A}\right) * I^2 * dt = c * A * d\theta \quad (\text{Σχέση : 3.6})$$

Όπου:

- $\kappa$ : ειδική αγωγιμότητα  $20^{\circ}\text{C}$
- $A$ : διατομή αγωγού
- $\alpha$ : θερμοκρασιακός συντελεστής αύξησης αντίστασης (χαλκός:  $4 \cdot 10^{-3}$ )
- $\theta$ : θερμοκρασία
- $I$ : το μέγιστο ρεύμα
- $c$ : ειδική θερμοχωρητικότητα κατά όγκο
- $d\theta, dt$ : διαφορικά θερμοκρασίας και χρόνου

Μέσα από πράξεις προκύπτει ακόμα ότι το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης:

$$I^2 dt = \frac{c \cdot A^2 \cdot d\theta \cdot \kappa}{(\kappa \cdot A) + \alpha(\theta - 20)} \quad (\text{Σχέση : 3.7})$$

Υλικό	Cu	Al ACSR	St
θερμοχωρητικότητα $c$ σε ( $10^{-3} \text{ J/mm}^3 \text{ C}$ )	3,45	2,449	3,80
αγωγιμότητα $\kappa$ στους $20^{\circ}\text{C}$ σε ( $10^3 \Omega^{-1} \cdot \frac{\text{mm}}{\text{mm}^2}$ )	56	34,80	7,25
Θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης $\alpha$ σε ( $10^{-3}$ )	3,90	4,00	4,50

Εικόνα 3.4: Σταθερές αγωγών χαλκού, αλουμινίου και χάλυβα. [19]

Στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζονται οι συντελεστές  $c$ ,  $\kappa$ ,  $\alpha$  των πιο γνωστών υλικών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά καλώδια.

Γενικά οι επιτρεπόμενες αρχικές και τελικές θερμοκρασίες εξαρτώνται από τα υλικά των αγωγών και των μονωτικών που τα απαρτίζουν. Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι συνήθως εκείνοι του χαλκού του αλουμινίου και του χάλυβα. Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης, η χειρότερη περίπτωση είναι εκείνη όπου το φαινόμενο λαμβάνει χώρα όταν ο αγωγός βρίσκεται στη μέγιστη συνεχώς επιτρεπόμενη θερμοκρασία του. Καθώς το θερμικό όριο σε αυτήν την περίπτωση στενεύει, είναι απαραίτητο το βραχυκύκλωμα να διαρκέσει όσο το δυνατό λιγότερο γίνεται, ώστε να αποφευχθούν τυχαίες βλάβες στους αγωγούς.

### 3.6 Διαστασιολόγηση καλωδίων με βάση την επιτρεπόμενη μέγιστη πτώση τάσης

Το ρεύμα πρέπει να διαρρέει το εσωτερικό των καλωδίων, χωρίς να αλλοιώνονται τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του και κυρίως χωρίς να μειώνεται η τιμή του κατά τη διαδρομή που διανύει από τη μονάδα παραγωγής μέχρι την εκάστοτε κατανάλωση.

Είναι αναγκαίο δηλαδή, η γραμμή του καλωδίου να έχει ιδανικά μηδενική αντίσταση, ώστε να μην ξεπερνιέται η επιτρεπόμενη πτώση τάσης στο εσωτερικό του.

Σε εγκαταστάσεις κίνησης, όπως είναι και αυτή της ψυχρής εκκίνησης πλοίου, η μεγάλη πτώση τάσης στο δίκτυο διανομής του ρεύματος μπορεί να προκαλέσει τόσο σημαντική μείωση της ισχύος, ώστε να αδυνατεί να εκκινήσει ο κινητήρας.



Επιπλέον, το φαινόμενο αυτό σε εγκαταστάσεις φωτισμού, ρίχνει σημαντικά την ένταση του φωτός, κάτι που είναι ιδιαίτερα δυσάρεστο στην περίπτωση μεταβαλλόμενων φορτίων.

Τα επιτρεπόμενα όρια πτώσης τάσης μιας γραμμής ηλεκτρικού ρεύματος είναι 4% για κινητήρες και συσκευές με δικό τους κύκλωμα, όπως φωτισμός και πρίζες γενικής χρήσης (9.2V για ονομαστική τάση τροφοδοσίας  $V_n=230V$ )

Γενικά η πτώση τάσης  $\Delta V$  υπολογίζεται ανηγμένη στην ονομαστική τάση με βάση την αντίσταση  $R$  και την αντίδραση  $X$  ανά μονάδα μήκους, την ισχύ  $P$  και το συντελεστή ισχύος  $\cos\phi$ .

Για μία απλή γραμμή με ένα φορτίο και μια τροφοδότηση, η πτώση τάσης δίνεται ως:

- Μονοφασική γραμμή ( $V =$  φασική τάση)

$$\Delta V = \frac{2 \ell \Psi P}{V} \quad (\text{Σχέση : 3.8})$$

- Τριφασική γραμμή ( $V =$  πολική τάση)

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} \ell \Psi I \cos\phi}{V} \quad (\text{Σχέση : 3.9})$$

Όπου  $\Psi$  είναι η ισοδύναμη αντίσταση ανά μονάδα μήκους.

Για να γίνει η σωστή διαστασιολόγηση των καλωδίων μίας εγκατάστασης και να υπολογιστεί η κατάλληλη διατομή, γίνονται διάφορες δοκιμές, ώστε να βρεθεί προσεγγιστικά η διατομή εκείνη, η οποία ικανοποιεί τους περιορισμούς της πτώσης τάσης.

Γενικά ισχύει πως η διατομή μειώνεται με το τετράγωνο της τάσης. Αν η πτώση τάσης είναι γνωστή, τότε η διατομή υπολογίζεται ως εξής:

- Μονοφασική γραμμή ( $V =$  φασική τάση)

$$A = \frac{2 \ell P}{V^2} * \frac{100}{\kappa * \epsilon} \quad (\text{Σχέση : 3.10})$$

- Τριφασική γραμμή ( $V =$  πολική τάση)

$$A = \frac{\ell P}{V^2} * \frac{100}{\kappa * \epsilon} \quad (\text{Σχέση : 3.11})$$

Όπου:

- $\kappa$ : η αγωγιμότητα στην θερμοκρασία λειτουργίας ( $\Omega^{-1}m * mm^{-2}$ )
- $\epsilon$ : εκατοστιαία πτώση τάσης ( $\epsilon = \frac{\Delta V}{V}100$ )

Έτσι, για παράδειγμα σε κινητήρες μεγάλης ισχύος (π.χ. 500kW) πρέπει να εφαρμοστεί υψηλότερη τάση τροφοδοσίας (π.χ. 6000V), ώστε να είναι ανεκτές οι διατομές των καλωδίων.

Στην περίπτωση όμως που η γραμμή που εξετάζεται εξυπηρετεί πολλά φορτία ( $P_1, P_2, P_3$ ) με απόσταση ( $\ell_1, \ell_2, \ell_3$ ) μεταξύ τους η πτώση τάσης προσδιορίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

- Μονοφασικό σύστημα ( $V$ =φασική τάση)  $\Delta V = 2 \frac{\Psi_1 P_1 \ell_1 + \Psi_2 P_2 \ell_2 + \Psi_3 P_3 \ell_3 + \dots}{V}$  (Σχέση : 3.12)

- Τριφασικό σύστημα ( $V$  = πολική τάση)  $\Delta V = \frac{\Psi_1 P_1 \ell_1 + \Psi_2 P_2 \ell_2 + \Psi_3 P_3 \ell_3 + \dots}{V/\sqrt{3}}$  (Σχέση : 3.13)

Έτσι με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται και διαστασιολογείται η διατομή του αγωγού που τροφοδοτεί πολλαπλές καταναλώσεις.

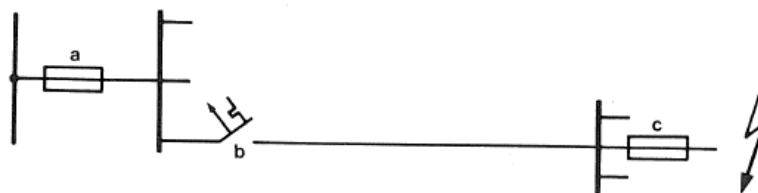
### 3.7 Επιλεκτική προστασία

Στις γραμμές τροφοδοσίας οι διατάξεις των καλωδίων δεν απαρτίζονται μόνο από σκέτα κομμάτια χαλκού και μόνωσης που εκτίνονται από τις μονάδες τροφοδοσίας στους καταναλωτές. Καθοριστικά για την ορθή λειτουργία όλου του δικτύου διανομής είναι και τα συστήματα προστασίας των καλωδίων αυτών. Οι ενεργοί αγωγοί ενός ηλεκτρολογικού κυκλώματος πρέπει να προστατεύονται από μια ή και περισσότερες διαδοχικές διατάξεις, οι οποίες διακόπτουν αυτομάτως τη διέλευση του ρεύματος σε περιπτώσεις υπερφόρτισης και βραχυκυκλωμάτων. Τα μέσα προστασίας που αξιοποιούνται επιλέγονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ρεύματος που διαρρέει το κάθε καλώδιο, το μήκος και τη διατομή του.

Τέτοιες διατάξεις προστασίας είναι αναλυτικότερα:

1. Οι αυτόματοι διακόπτες αξιοποιούν θερμικά και ηλεκτρομαγνητικά στοιχεία. Αντιδρούν άμεσα σε υπερφορτίσεις και βραχυκυκλώματα και είναι φτιαγμένοι ώστε να ανοίγουν, όταν χρειάζεται να κόψουν ένα ανεπιθύμητο ρεύμα, προκειμένου να προστατευόσουν τους αγωγούς.
2. Οι ασφάλειες, που είναι διατάξεις με χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας, ρυθμίζονται από τους κατασκευαστές έτσι ώστε να ενεργοποιούνται σε συγκεκριμένες συνθήκες υπερφόρτισης ή βραχυκυκλώματος.

Στο ακόλουθη Εικόνα 3.5 φαίνονται τα διάφορα μέσα προστασίας κατά μήκος μίας γραμμής. Παρατηρείται ακόμα πως, αφού το σφάλμα βρίσκεται στο άκρο της γραμμής, ενεργοποιείται αυτόματα το μέσο προστασίας (c) και όχι τα άλλα δύο, καθώς αυτό είναι το πιο κοντινό και θα το ανιχνεύσει γρηγορότερα. Έτσι απομονώνεται μόνο το τμήμα του σφάλματος και όχι όλες οι καταναλώσεις της διάταξης.



Εικόνα 3.5: Γραμμή τροφοδοσίας με διαδοχικές διατάξεις προστασίας. [19]

Για να λειτουργήσει σωστά το παραπάνω σύστημα προστασίας πρέπει οι χρόνοι διέγερσης, για το ανεπιθύμητο ρεύμα σφάλματος, να μικραίνουν κατά μήκος της διαδρομής από την τροφοδοσία προς την κατανάλωση. Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει [ $t_a > t_b > t_c$ ].

Η κατάσταση αυτή ορίζεται ως συνεργασία, επιλεκτικότητα ή επιλεκτική προστασία των μέσων προστασίας της γραμμής.

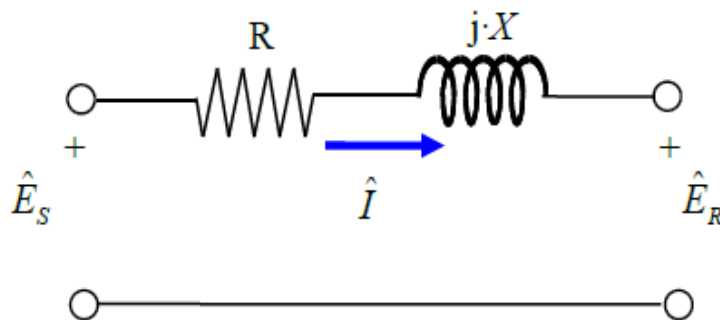
Γενικά συνεργασία επιτυγχάνεται όταν οι χαρακτηριστικές καμπύλες των μέσων προστασίας δεν τέμνονται στις περιοχές ανεπιθύμητων ρευμάτων, ώστε να καλύπτεται όσο το δυνατό μεγαλύτερο φάσμα σφαλμάτων. Στην περίπτωση όπου δεν είναι δυνατή η σύγκριση των χαρακτηριστικών δύο μέσων προστασίας, τότε είναι απαραίτητο οι σχέσεις των ονομαστικών τους ρευμάτων να διαμορφώνονται σύμφωνα με την ακόλουθη εμπειρική σχέση, ώστε να εξασφαλίζεται συνεργασία.

- Για ασφάλεια – ασφάλεια, επικρατεί η σχέση ρευμάτων 1/1,7 (π.χ. 16Α με 35Α).
- Για ασφάλεια – μικροαυτόματο, επικρατεί η σχέση ρευμάτων 1/1,9 (π.χ. 16Α με 32Α).
- Για μικροαυτόματο – μικροαυτόματο, επικρατεί η σχέση ρευμάτων 1/1, (π.χ. 16Α με 25Α).

Ανάλογα με την επιτρεπόμενη ενέργεια διελεύσεως από τις διατάξεις προστασίας, καθορίζεται και το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα που θα περάσει από το καλώδιο. Επομένως διαμορφώνεται και η απαιτούμενη διατομή του αγωγού.

### 3.8 Ευστάθεια

Η ευστάθεια μίας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος σχετίζεται άμεσα με την μέγιστη μεταφορά ισχύος μέσω της γραμμής αυτής. Στην περίπτωση μιας μονοφασικής τριφασικής γραμμής σύνθετης αντίστασης  $Z = R + jX$ , με τάσεις  $\hat{E}_S$  και  $\hat{E}_R$  στις θέσεις ① [τροφοδοσία(s)] και ② [κατανάλωση(R)] αντίστοιχα, η ένταση του ρεύματος  $\hat{I}$  προσδιορίζεται ως εξής:



Εικόνα 3.6: Κύκλωμα προς εύρεση μέγιστης μεταφοράς ισχύος μεταξύ δύο θέσεων σε ένα μονοφασικό εναλλασσόμενο δίκτυο. [20]

Από την εφαρμογή του Νόμου του Kirchhoff στην Εικόνα 3.6 προκύπτει :

$$\hat{E}_S = \hat{E}_R + \hat{I} * Z \rightarrow \hat{E}_S = \hat{E}_R + \hat{I} * (R + jX) \quad (\text{Σχέση : 3.14})$$

Ορίζονται ακόμα:

- η γωνία  $\delta$  μεταξύ των τάσεων  $\hat{E}_S$  και  $\hat{E}_R$ .
- η γωνία  $\varphi$  μεταξύ της τάσης  $\hat{E}_R$  και του ρεύματος  $\hat{I}$  που καθορίζεται από τη συμπεριφορά του φορτίου που τροφοδοτείται.
- η γωνία  $\varphi_Z$  της σύνθετης αντίστασης  $Z$  του αγωγού.
- η γωνία  $a_Z$  η συμπληρωματική της  $\varphi_Z$ , με  $[a_Z = 90^\circ - \varphi_Z = \tan^{-1} \frac{R}{X}]$ .

Έτσι το ρεύμα υπολογίζεται:

$$\hat{I} = \frac{\hat{E}_S - \hat{E}_R}{R + jX} = \frac{\hat{E}^{\angle \delta} - \hat{E}^{\angle 0^\circ}}{|Z|^{\angle \varphi_Z}} = \left( \frac{\hat{E}_S}{|Z|} \right)^{\angle (\delta - \varphi_Z)} - \left( \frac{\hat{E}_R}{|Z|} \right)^{\angle -\varphi_Z} \quad (\text{Σχέση : 3.15})$$

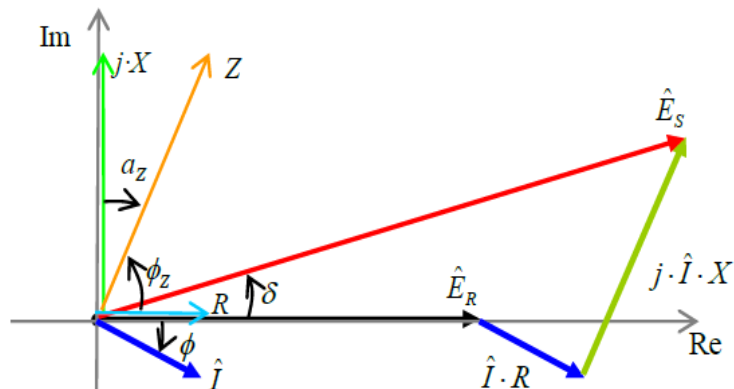
Με  $[|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}]$  (Σχέση : 4.16) το μέτρο της σύνθετης αντίστασης γραμμής.

Η φαινόμενη μιγαδική ισχύς  $S_S$  στη θέση ① θα είναι:

$$S_S = \hat{E}_S^* \hat{I}^* = \hat{E}_S^* \left( \frac{\hat{E}_S - \hat{E}_R}{|Z|^{\angle \varphi_Z}} \right)^* = \left( \frac{\hat{E}_S^2}{|Z|} \right)^{\angle -\varphi_Z} - \left( \frac{\hat{E}_R^* \hat{E}_S}{|Z|} \right)^{\angle (\delta + \varphi_Z)} \quad (\text{Σχέση : 3.17})$$

Έτσι η αντίστοιχη πραγματική ισχύς  $P_S$  στην θέση ① ισούται με:

$$P_S = \frac{\hat{E}_S^2}{|Z|} \cos \varphi_Z - \frac{\hat{E}_R^* \hat{E}_S}{|Z|} \cos(\delta + \varphi_Z) \quad (\text{Σχέση : 3.18})$$



Εικόνα 3.7: Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων – ρευμάτων – αντιστάσεων ενός κυκλώματος προς εύρεση μέγιστης μεταφοράς ισχύος μεταξύ δύο θέσεων σε ένα μονοφασικό εναλλασσόμενο δίκτυο, με επαγωγικό φορτίο. [20]

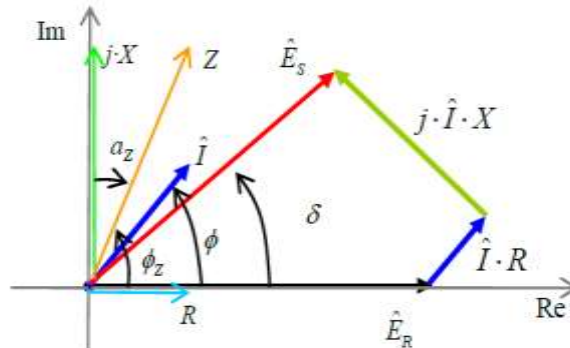
Έτσι η φαινόμενη μιγαδική ισχύς  $S_R$  στη θέση ② θα είναι:

$$S_R = \hat{E}_R^* \hat{I}^* = \hat{E}_R^* \left( \frac{\hat{E}_S - \hat{E}_R}{|Z|^{\angle \varphi_Z}} \right)^* = \left( \frac{\hat{E}_R^* \hat{E}_S}{|Z|} \right)^{\angle (-\delta + \varphi_Z)} - \left( \frac{\hat{E}_R^2}{|Z|} \right)^{\angle \varphi_Z} \quad (\text{Σχέση : 3.19})$$

Οπότε και η αντίστοιχη πραγματική ισχύς  $P_R$  στην θέση ② ισούται με:

$$P_R = \frac{\hat{E}_R^* \hat{E}_S}{|Z|} \cos(\varphi_Z - \delta) - \frac{\hat{E}_R^2}{|Z|} \cos \varphi_Z \quad (\text{Σχέση : 3.20})$$

Προκύπτει πως, στην περίπτωση των πηγών εναλλασσόμενης τάσης, η γωνία  $\delta$  μεταξύ των τάσεων  $\hat{E}_S$  και  $\hat{E}_R$  είναι αυτή που διαδραματίζει τον καθοριστικό ρόλο στη ροή της ενεργού ισχύος. Το κατά πόσο δηλαδή προηγείται ή έπεται ο φασιθέτης του  $\hat{E}_S$  έναντι του  $\hat{E}_R$  και όχι τόσο ο συσχετισμός των μέτρων τους.

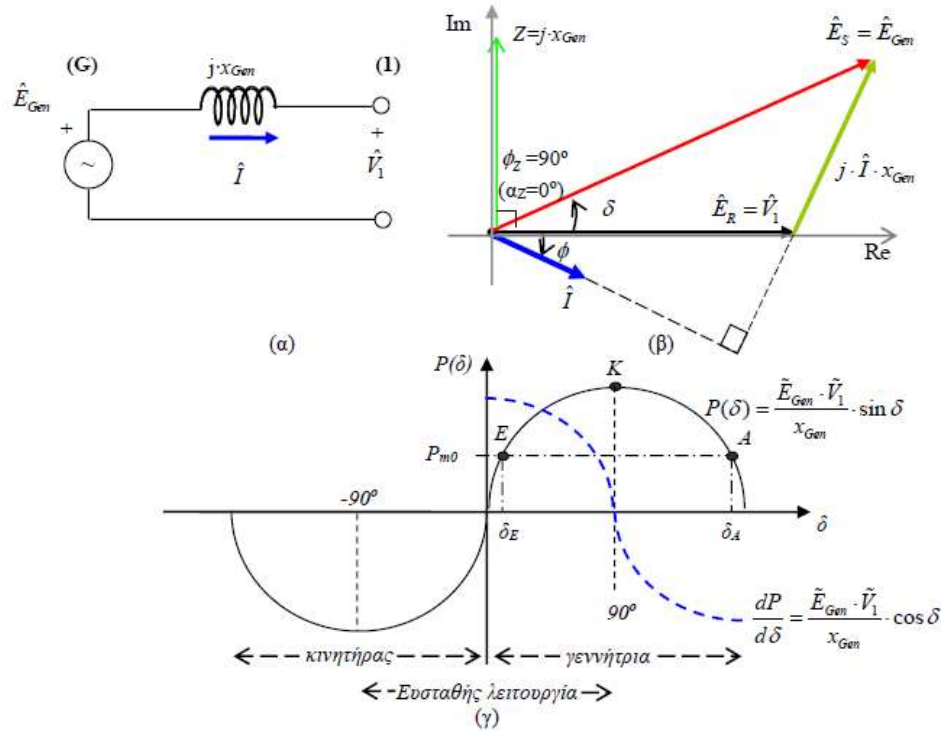


Εικόνα 3.8 : Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων – ρευμάτων – αντιστάσεων ενός κυκλώματος μονοφασικού εναλλασσομένου δικτύου προς εύρεση μέγιστης μεταφοράς ισχύος μεταξύ δύο θέσεων σε ένα, με χωρητικό φορτίο και  $\hat{E}_S < \hat{E}_R$ . [20]

Η προαναφερθείσα ανάλυση αποτελεί ουσιαστικά τη βάση της μελέτης του προβλήματος συνεργασίας μιας σύγχρονης γεννήτριας με το δίκτυο και το φορτίο που τροφοδοτεί. Το πρόβλημα αυτό απασχολεί και τις μελέτες των εγκαταστάσεων ψυχρής εκκίνησης πλοίου και καθορίζει πρακτικά στοιχεία, όπως τη τελική φόρτιση της γραμμής ή τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να δώσει η γεννήτρια χωρίς να αποσυγχρονιστεί. Επομένως, αν αναχθεί η περίπτωση του μονοφασικού κυκλώματος, που αναλύθηκε προηγουμένως, σε αυτή του μονοφασικού ισοδύναμου σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα, προκύπτουν τα εξής:

- Η ηλεκτρεγερτική δύναμη της γεννήτριας  $\hat{E}_{GEN} = \hat{E}_S$ .
- Η ισοδύναμη τάση ακροδεκτών θα είναι  $\hat{V} = \hat{E}_R$  και η αντίστοιχη γωνία ροπής θα είναι πάλι  $\delta$ .
- Η ωμική αντίσταση τυλίγματος  $r_{GEN}$  και η επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος  $x_{GEN}$ , όπως φαίνεται και στο ακόλουθο μονοφασικό κύκλωμα της Εικόνας 3.9 (α).

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 3.9: (α) Μονογραμμικό κύκλωμα δύο θέσεων (G) και (1), (β) Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-εντάσεων-αντιστάσεων, (γ) Διάγραμμα [ισχύος  $P$ -γωνίας ισχύος  $\delta$ ]. [20]

Για τους ακόλουθους τύπους και υπολογισμούς ισχύει γενικά ότι:  $r_{GEN} = 0$ ,  $\varphi_z = 0^\circ$  και  $a_z = 90^\circ$ . Η πραγματική ισχύς  $P$  στην περίπτωση της γεννήτριας προκύπτει:

$$P_R = \frac{\widetilde{E}_{GEN} \cdot \widetilde{V}_1}{x_{GEN}} * \sin \delta \quad (\text{Σχέση : 3.21})$$

Συνεπώς, η ενεργός ισχύ μεταβάλλεται με το ημίτονο της γωνίας  $\delta$ . Η καμπύλη  $P(\delta)$ , που εικονίζεται στην Εικόνα 3.9 (γ), είναι γνωστή ως «χαρακτηριστική καμπύλη ενεργού ισχύος – γωνίας ισχύος  $\delta$ » της σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα.

Η καθαρή μηχανική ισχύς  $P_{mo}$  είναι η ισοδύναμη μηχανική ισχύς με την οποία η γεννήτρια κινείται από την κινητήρια μηχανή, με μηδενισμένες όλες τις απώλειες, μια τέτοια μηχανή είναι για παράδειγμα η ντιζελομηχανή σε ένα πλοίο.

Παρατηρείται πως η ισχύς  $P_{mo}$  αντιστοιχεί στα σημεία  $E$  και  $A$ , με γωνίες  $\delta_E$  και  $\delta_A$  αντίστοιχα. Γενικά η γωνία  $\delta_E$  αντιστοιχεί στην κατάσταση ευσταθούς λειτουργίας, ενώ η γωνία  $\delta_A$  στην κατάσταση ασταθούς λειτουργίας. Το σημείο  $K$  χαρακτηρίζεται ως «σημείο στατικής ευστάθειας» και είναι η μέγιστη ισχύς της γεννήτριας. Οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση της γωνίας  $\delta$  οδηγεί γενικά σε μείωση της αποδιδόμενης ισχύς, όπως φαίνεται και από την καμπύλη. Κάτι τέτοιο σημαίνει πως το φορτίο που τροφοδοτεί η γεννήτρια δεν θα καλύπτεται, με συνέπεια να πέσει το σύστημα σε αστάθεια και να αποσυγχρονιστεί η γεννήτρια αυτή. Γι' αυτό είναι βασικό να είναι έτσι διαμορφωμένα τα χαρακτηριστικά τόσο των γεννητριών, όσο και των καλωδίων του ίδιου του δικτύου διανομής ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του συστήματος. Με αυτό τον τρόπο θα εξυπηρετείται επαρκώς και με ασφάλεια το οποιοδήποτε φορτίο της εγκατάστασης. Συνήθως όμως σε περιορισμένες εγκαταστάσεις δεν υπάρχουν ζητήματα ευστάθειας.

### 3.9 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τις αναφορές του τρέχοντος κεφαλαίου συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά ενός καλωδίου προσδιορίζονται κυρίως από:

1. Την μηχανική καταπόνηση και τις συνθήκες εγκατάστασης και χρήσης τους.
2. Την καταπόνηση από το περιβάλλον.
3. Την θερμική καταπόνηση στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας και το μέγιστο συνεχώς επιτρεπόμενο ρεύμα.
4. Την θερμική καταπόνηση σε βραχυκύκλωμα και το μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος.
5. Την πτώση τάσης της γραμμής μεταφοράς.

Όλα αυτά θα προσδιορίσουν συνδυαστικά την κατασκευή ή τον τύπο των καλωδίων, τον εξωτερικό μανδύα και τη ζώνη της μηχανικής ενίσχυσης τους. Γενικά οι καταστάσεις σφαλμάτων, που αναλύθηκαν παραπάνω, είναι πολύ επικίνδυνες και επηρεάζουν αισθητά την διάρκεια ζωής των αγωγών. Μπορούν όμως να αντιμετωπιστούν με τη χρήση ειδικών διατάξεων προστασίας. Οι κατασκευαστές των ασφαλειών και των διακοπών παρέχουν γενικά στους μηχανικούς τα απαραίτητα διαγράμματα που αφορούν την ενέργεια που επιτρέπεται να περάσει από τα αντίστοιχα μέσα διακοπής ανεπιθύμητων ρευμάτων. Έτσι από την εξέταση των καμπυλών λειτουργίας τους είναι εύκολο να διαπιστωθεί ποια διάταξη είναι η κατάλληλη για την προστασία της εκάστοτε διάταξης που μελετάται.

## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Διατάξεις προστασίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

### 4.1 Εισαγωγή στη σχεδίαση συστημάτων πρόωσης και συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται και αναλύονται οι σημαντικότερες διατάξεις προστασίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ο βασικός σκοπός των διατάξεων αυτών είναι τριπλός. Αρχικά στόχος τους είναι να προλάβουν τη βλάβη των στοιχείων, τα οποία προστατεύουν και αν όχι να περιορίσουν τουλάχιστον στο ελάχιστο την έκταση της. Στη συνέχεια τα μέσα προστασίας πρέπει να είναι σε θέση να απομονώνουν έγκαιρα το στοιχείο της εγκατάστασης που έχει υποστεί τη βλάβη, από το υπόλοιπο σύστημα. Έτσι περιορίζεται η έκταση της διακοπής της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στην κατανάλωση. Τέλος, αναγκαίο είναι οι διατάξεις αυτές να αποτρέπουν ή να περιορίζουν κατά το δυνατόν το ενδεχόμενο να τεθούν σε κίνδυνο περιουσίες ή και ανθρώπινες ζωές.

Κάθε ηλεκτρολογική εγκατάσταση οφείλει να είναι εφοδιασμένοι με τα κατάλληλα όργανα που μπορούν να ανιχνεύουν βλάβες, όπως τα βραχυκυκλώματα, και να δίνουν άμεσα εντολή για τον περιορισμό και την απομόνωση του.

Τέτοια ευαίσθητα όργανα ονομάζονται ηλεκτρονόμοι. Αποτελούν γενικά τη βάση της ηλεκτρικής προστασίας και η κύρια λειτουργία τους είναι η ανίχνευση των ανωμαλιών στα δίκτυα που επιτηρούν, δίνοντας την εντολή απόζευξης και απομόνωσης στα μέσα διακοπής (διακόπτες ισχύος).

Σε μία εγκατάσταση πλοίου, όπως αυτή που εξετάζεται και στην τρέχουσα εργασία, επιλέγονται πάντα οι καταλληλότεροι και οι πιο αξιόπιστοι ηλεκτρονόμοι για την ανίχνευση και την προστασία από τα σφάλματα.

Πιο συγκεκριμένα, οι H/N υπερεντάσεως είναι αυτοί που αξιοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για την προστασία απλών εγκαταστάσεων ή κάποιων πιο σύνθετων ως δεύτερη βαθμίδα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι κυρίως για την απλότητα της χρήσης τους και για την οικονομία που προσφέρουν. Οι H/N αποστάσεως ή διαφορικών από την άλλη παρατηρούνται σε πολύπλοκότερα μη ακτινικά δίκτυα μεταφοράς, καθώς με αυτούς επιτυγχάνεται η απομόνωση όσο το δυνατό μικρότερου τμήματος του δικτύου.

Όσον αφορά τους θερμικούς H/N, εκείνοι εφαρμόζονται για την προστασία των μετασχηματιστών από υπερφορτίσεις, και κυρίως σε μετασχηματιστές υψηλής τάσης. Γενικά η ασφαλέστερη οδός για τον έλεγχο των M/Σ είναι η παρακολούθηση της θερμοκρασίας τους. Στις περιπτώσεις των υπερεντάσεων στους M/Σ χρησιμοποιούνται κανονικά H/N υπερεντάσεως.

Επιπλέον η απλούστερη προστασία που εγκαθίσταται, στην περίπτωση των γεννητριών, είναι μια προστασία υπερεντάσεως αποτελούμενη από H/N αντίστροφου χρόνου. Για τις μεγάλης ισχύος γεννήτριες αξιοποιούνται και πολλές άλλες ειδικές προστασίες, που ονομάζονται και δεύτερης βαθμίδας.

Ενώ από την άλλη, στους κινητήρες μικρού ή μεσαίου μεγέθους οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος είναι το κύριο μέσο προστασίας. Οι διακόπτες αυτοί αποτελούνται από τα θερμικά και τα ηλεκτρομαγνητικά στοιχεία προστασίας αντίστοιχα. Έτσι παρέχεται ταυτόχρονα προστασία από υπερφορτίσεις και μικρές υπερεντάσεις μεγάλης διάρκειας.



Ένα από τα βασικότερα στοιχεία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ζυγοί των υποσταθμών, και ένα σφάλμα τους είναι ικανό να επιφέρει μεγάλης εκτάσεως προβλήματα στο σύστημα. Η προστασία των ζυγών ανατίθεται συνήθως σε διαφορικούς Η/Ν και σε Η/Ν τάσεως υψηλής αντιστάσεως.

Τέλος οι πυκνωτές των εγκαταστάσεων συνήθως προστατεύονται με Η/Ν έλεγχου, ενώ για τα πηνία χρησιμοποιούνται Η/Ν αποστάσεως ή διαφορικοί και Η/Ν υπερεντάσεως ή σύνθετης αντιστάσεως. Στη συνέχεια βέβαια παρουσιάζονται πιο επεξηγηματικά όλα τα είδη προστασίας που μόλις αναφέρθηκαν.

## 4.2 Προστασία υπερεντάσεως

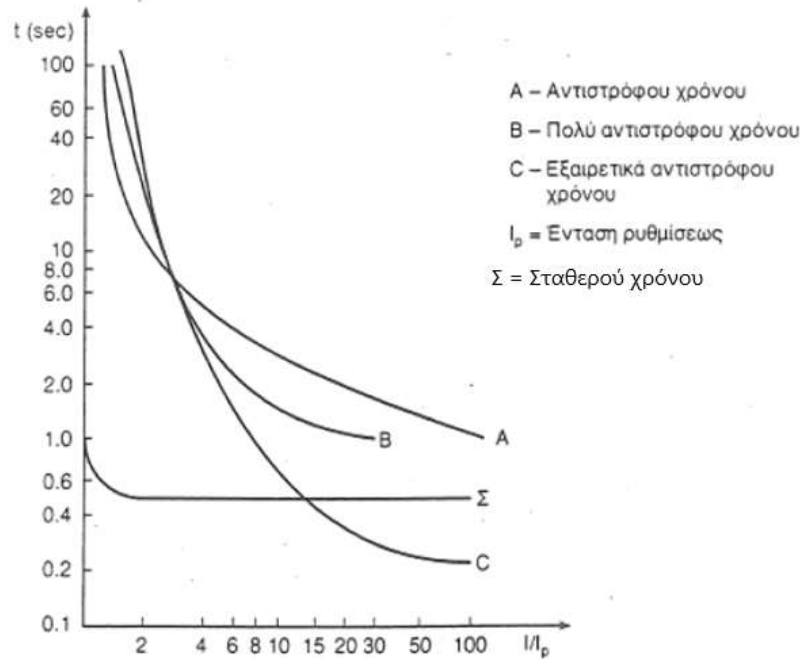
Η προστασία υπερεντάσεως χαρακτηρίζεται ως η απλούστερη και οικονομικότερη προστασία. Βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε απλές εγκαταστάσεις ή και σε πιο σύνθετες ως δεύτερη βαθμίδα προστασίας.

Γενικά ο όρος «υπερένταση» αντιπροσωπεύει εντάσεις πολλαπλάσιες της ονομαστικής έντασης του αγωγού (άνω του διπλάσιου), ενώ για τις εντάσεις που είναι λίγο μεγαλύτερες της ονομαστικής προτιμάται καλύτερα ο όρος «υπερφόρτιση». Αντίστοιχα, διαμορφώνονται τόσο τα συστήματα «προστασίας υπερεντάσεων», όσο και τα συστήματα «προστασίας υπερφορτίσεως». Πιο αναλυτικά, οι Η/Ν υπερεντάσεως διακρίνονται στις εξής κύριες κατηγορίες:

1. Τους απλούς Η/Ν υπερεντάσεως, οι οποίοι δεν διακρίνουν τη κατεύθυνση ροής της υπερεντάσεως και ονομάζονται απλά «Η/Ν υπερεντάσεως».
2. Τους Η/Ν υπερεντάσεως – κατευθύνσεως, όπου υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης τους ως προς την τιμή της εντάσεως διεγέρσεως και συχνά ως προς το χρόνο καθυστέρησης της λειτουργίας τους.
3. Τους «στιγμιαίους Η/Ν υπερεντάσεως», οι οποίοι λειτουργούν ακαριαία όταν η υπερένταση υπερβεί το όριο της διεγέρσεως τους.
4. Τους «Η/Ν υπερεντάσεως χρονικής καθυστέρησης», όπου από κατασκευής τους προβλέπεται χρονική καθυστέρηση και χωρίζεται σε:
  - a. Τους «Η/Ν σταθερού χρόνου», οι οποίοι ανεξάρτητα από την ένταση έχουν καθορισμένο χρόνο από τον κατασκευαστή.
  - b. Τους «Η/Ν αντιστρόφου χρόνου», όπου όσο αυξάνεται η υπερένταση τόσο μειώνεται και ο χρόνος λειτουργίας.

Στην ακόλουθη Εικόνα 4.1 παρατηρούνται οι διάφοροι ρυθμοί μείωσης του χρόνου λειτουργίας των «Η/Ν αντιστρόφου χρόνου». Οι διαφορετικές χαρακτηριστικές καμπύλες, που εικονίζονται στο σχήμα αυτό, πραγματοποιούνται με ηλεκτρομηχανικές επαγωγικές διατάξεις, συνδυαστικά με επανατακτικά ελατήρια ή και πέδες δινορρευμάτων από μόνιμους μαγνήτες.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 4.1 : Τυπικές χαρακτηριστικές χρόνου – εντάσεως H/N υπερεντάσεως αντιστρόφου χρόνου. [21]

Γενικά οι H/N υπερεντάσεως – κατευθύνσεως απαρτίζονται από ένα στοιχείο υπερεντάσεως και ένα αντίστοιχο στοιχείο κατευθύνσεως. Η μεταξύ τους σύνδεση, η οποία καταλήγει στο κλείσιμο της επαφής εξόδου του H/N, πραγματοποιείται έτσι ώστε η ενεργοποίηση του στοιχείου κατευθύνσεως να προηγείται της ενάρξεως λειτουργίας του στοιχείου μετρήσεως της υπερεντάσεως. Παρόλο που κατά τη λειτουργία του συμπεριφέρεται όπως ένας H/N υπερεντάσεως, πρακτικά ενεργοποιείται μόνον όταν πληρούνται οι απαιτήσεις διεγέρσεως του στοιχείου κατευθύνσεως.

Σύμφωνα με την επιλογική συνεργασία μεταξύ δύο μέσων προστασίας υπερεντάσεως έστω A και B (Εικόνα 4.2), είναι γνωστό πως σε περίπτωση σφάλματος ενεργοποιείται μόνο αυτό το στοιχείο που βρίσκεται πιο κοντά στην πλευρά του σφάλματος. Έτσι, στο παράδειγμα της Εικόνας 4.2 ενεργοποιείται το στοιχείο B.

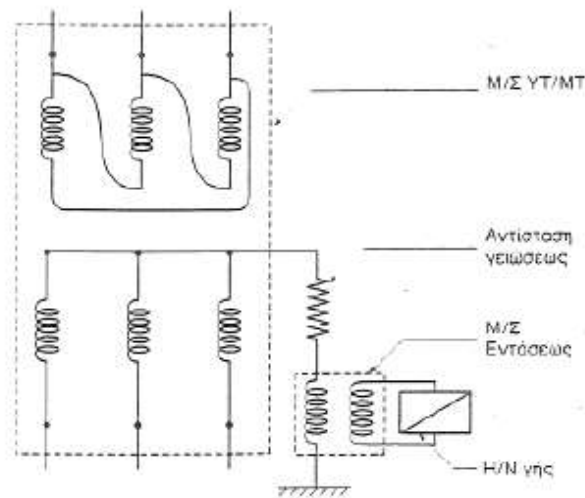


Εικόνα 4.2: Επιλογική συνεργασία σε ακτινικό κύκλωμα. [21]

Η επιλογικότητα αυτή επιτυγχάνεται ουσιαστικά, είτε με τη διαβάθμιση των τιμών που αφορούν τις εντάσεις διεγέρσεως των στοιχείων, είτε με τη ρύθμιση των χρόνων λειτουργίας τους.

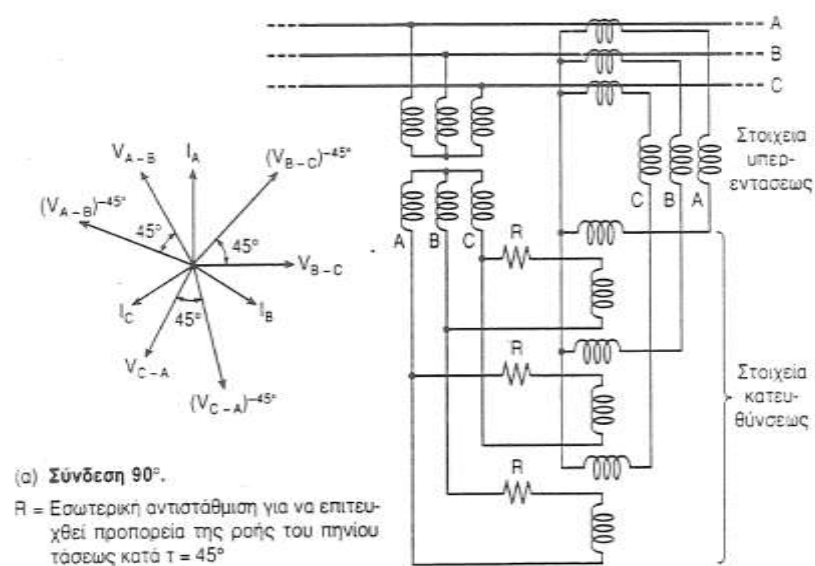
Στη σύνδεση απλών H/N υπερεντάσεως (χωρίς κατεύθυνση), οι «H/N φάσεως» δέχονται τις αντίστοιχες εντάσεις των φάσεων διαιρεμένες δια του λόγου μεταφοράς. Ο «H/N γης» από την άλλη δέχεται το διανυσματικό άθροισμα των εντάσεων των τριών φάσεων, το οποίο ισούται με την ένταση του σφάλματος προς γη.

Στην περίπτωση όπου εξετάζεται μόνο η εγκατάσταση προστασίας γης (Εικόνα 4.3), τότε ο Η/Ν γης τροφοδοτείται απευθείας από τον κόμβο του Μ/Σ - ΥΤ/ΜΤ μέσω ενός Μ/Σ εντάσεως.

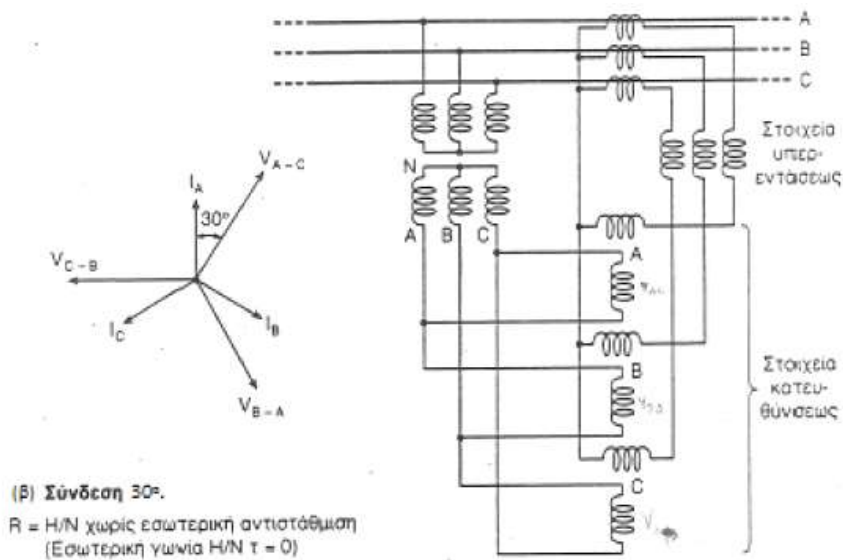


Εικόνα 4.3: Τροφοδότηση Η/Ν γης απευθείας από τον κόμβο του Μ/Σ-ΥΤ/ΜΤ μέσω Μ/Σ εντάσεως. [21]

Σε αντίθεση με τη παραπάνω απλή συνδεσμολογία, οι Η/Ν υπερεντάσεως κατευθύνσεως συνδέονται στο ηλεκτρολογικό σύστημα με σχετικά μεγαλύτερη περιπλοκότητα. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία τους, για όλες τις περιπτώσεις ασύμμετρων σφαλμάτων. Υπάρχει επίσης η πιθανότητα η τάση τροφοδοσίας του Η/Ν, στην περίπτωση βραχυκυκλώματος, να μην επιφέρει την ανάπτυξη της αναγκαίας ροπής στον Η/Ν. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τέτοιου είδους προβλήματα, τα στοιχεία κατευθύνσεως της κάθε φάσεως, τροφοδοτούνται σύμφωνα με την ακόλουθη Εικόνα 4.4(α), αν υπάρχει τριφασικός Η/Ν ή τρεις ξεχωριστοί Η/Ν.



Εικόνα 4.4 α): Συνδεσμολογίες Η/Ν υπερεντάσεως – κατευθύνσεως, Σύνδεση 90°. [21]



Εικόνα 4.4 β): Συνδεσμολογίες H/N υπερεντάσεως – κατευθύνσεως, Σύνδεση 30°.[21]

Στη σύνδεση της Εικόνας 4.4α), αξιοποιούνται H/N των οποίων η εσωτερική αντίσταση παρουσιάζει μέγιστη ροπή όταν η ένταση του πηνίου εντάσεως του H/N προηγείται της τάσεως τροφοδοσίας του πηνίου τάσεως κατά  $\tau = 45^\circ$ . Ενώ αντίστοιχα, στη σύνδεση της Εικόνας 4.4β) η μέγιστη ροπή των H/N παρατηρείται όταν η φυσική γωνία μεταξύ της τάσεως και της εντάσεως, που τροφοδοτούν τα επιμέρους πηνία, είναι μηδενική ( $\tau = 0$ ).

Η επιλογή της καταλληλότερης κάθε φορά συνδεσμολογίας καθορίζεται από τα διάφορα πιθανά σφάλματα του δικτύου, τα οποία διαμορφώνουν ζεύγη εντάσεως – τάσεως, και τα οποία δέχεται ο εκάστοτε H/N στη θέση εγκαταστάσεώς του.

### 4.3 Προστασία γραμμών με H/N αποστάσεως

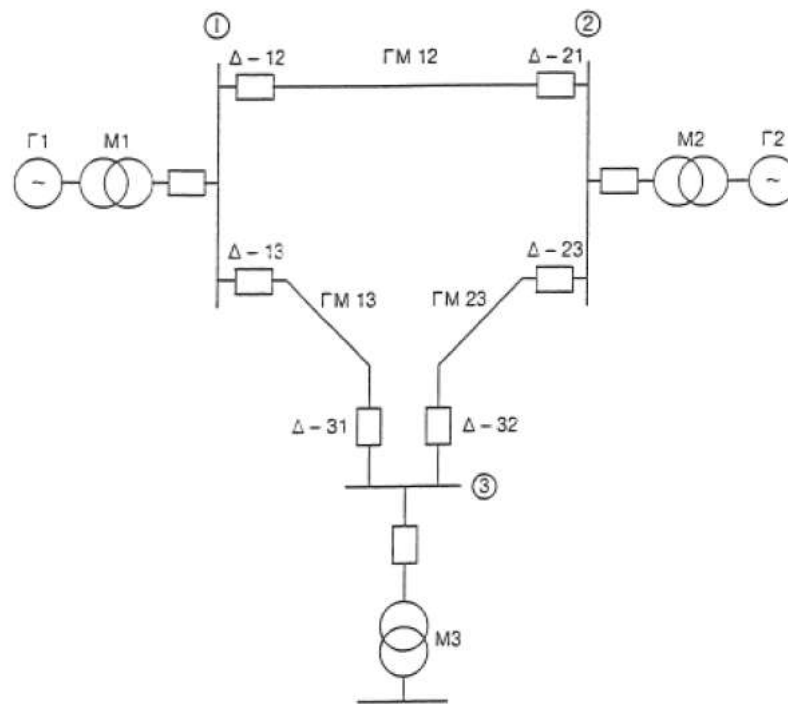
Σε πολύπλοκα δίκτυα μεταφοράς, που δεν είναι ακτινικά, οι H/N υπερεντάσεως απλοί ή κατευθύνσεως αδυνατούν να παρέχουν ακριβή και πλήρη προστασία. Έτσι σε αυτές τις περιπτώσεις αξιοποιούνται καλύτερα διαφορικοί H/N ή και H/N αποστάσεως.

Οι H/N αποστάσεως αποτελούνται από τις ακόλουθες πέντε διατάξεις:

1. Τη διάταξη διεγέρσεως με τη παρουσία σφάλματος μέσα στην επιτρεπόμενη περιοχή. Όπου η επιλογή του τύπου της διάταξης διεγερσης εξαρτάται από το ελάχιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης σε συνδυασμό με το μέγιστο φορτίο της γραμμής.
2. Το στοιχείο μέτρησης της απόστασης του σφάλματος, το οποίο λειτουργεί όταν η μετρούμενη αντίσταση γραμμής είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ρυθμιζόμενη αντίσταση. Γι' αυτό και ονομάζεται H/N ελάχιστης σύνθετης αντίστασης.
3. Το στοιχείο χρονικής καθυστέρησης, το οποίο ρυθμίζει πρακτικά το χρόνο επέμβασης του H/N απόστασης.
4. Το στοιχείο κατευθύνσεως, το οποίο καθορίζει τη λειτουργία του H/N ανάλογα με την φορά της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας στη γραμμή και στους ζυγούς.

5. Το στοιχείο δέσμευσης, το οποίο ματαιώνει τη λειτουργία της προστασίας αποστάσεως σε δύο περιπτώσεις:
- α. Σε περίπτωση βύθισης της τάσης της γραμμής ( $V \cong 0$ ).
  - β. Σε περίπτωση ταλαντώσεων μεταξύ των γεννητριών, όπου οι επακόλουθες μεταβολές της τάσης και της έντασης μετρούνται από τον H/N ως μεταβολές της σύνθετης αντίστασης γραμμής.

Χάρη στους H/N αποστάσεως το σφάλμα περιορίζεται σε όσο το δυνατό μικρότερο τμήμα του δικτύου. Έτσι τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευστάθεια και η αποτελεσματικότητα της χρήσης τους γίνεται ευκολότερα κατανοητή και από την ανάλυση της Εικόνας 4.5.

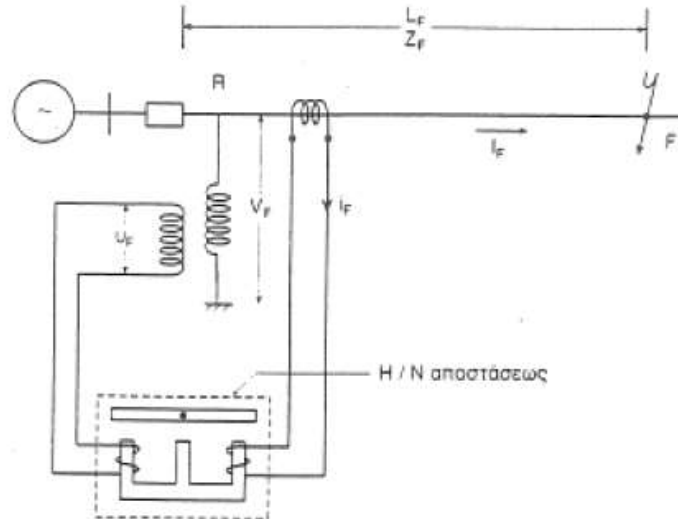


Εικόνα 4.5 : Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας τριών ζυγών. [21]

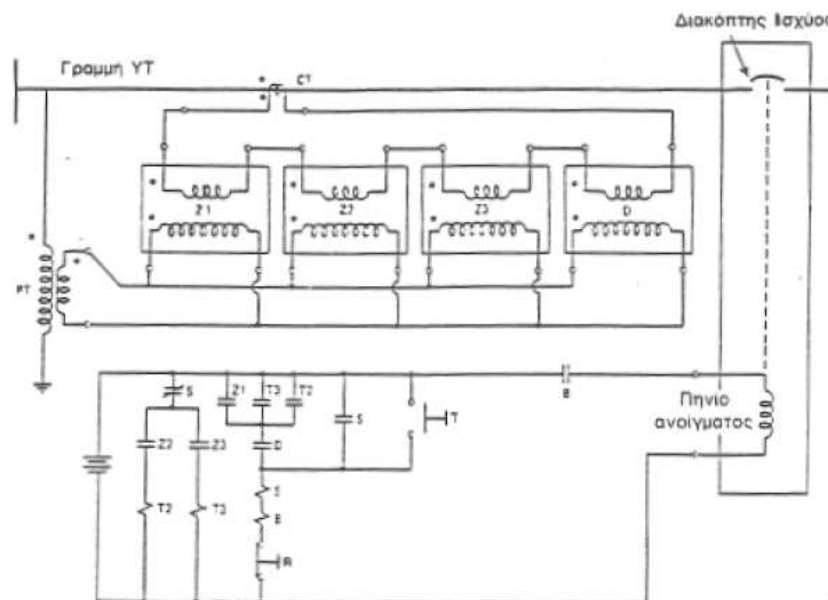
Αν για παράδειγμα παρουσιάζεται σφάλμα στη γραμμή ΓΜ-12, θα ανοίξουν οι H/N των στοιχείων Δ-12 και Δ-21. Στην περίπτωση όμως που οι διακόπτες του δικτύου είναι όλοι H/N υπερεντάσεως – κατευθύνσεως τότε «βλέπουν» το σφάλμα τουλάχιστον και άλλοι δύο από τους υπάρχοντες διακόπτες, ανάλογα πάντα με τις αντιστάσεις των γραμμών και τη θέση του σφάλματος. Έτσι, προκειμένου να αποφευχθούν τέτοιου είδους προβλήματα, οι διακόπτες εξοπλίζονται με H/N αποστάσεως, οι οποίοι, όπως ήδη έχει αναφερθεί, φέρουν τρία στοιχεία μέτρησης σύνθετης αντίστασης γραμμής και ένα στοιχείο κατευθύνσεως.

Γενικά, το αν θα λειτουργήσει ένας H/N αποστάσεως ή όχι, καθορίζεται από την τιμή της σύνθετης αντίστασης γραμμής. Η σύνθετη αυτή αντίσταση προκύπτει από την ισορροπία που επέρχεται από την ταυτόχρονη δράση του ρεύματος σφάλματος στο πηνίο «ρεύματος» και τη δράση της αναπτυσσόμενης τάσης στο σημείο του δικτύου που έχει την ίδια φάση με το πηνίο «τάσης».

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 4.6 : Σχηματικό διάγραμμα συνδέσεως H/N αποστάσεως. [21]

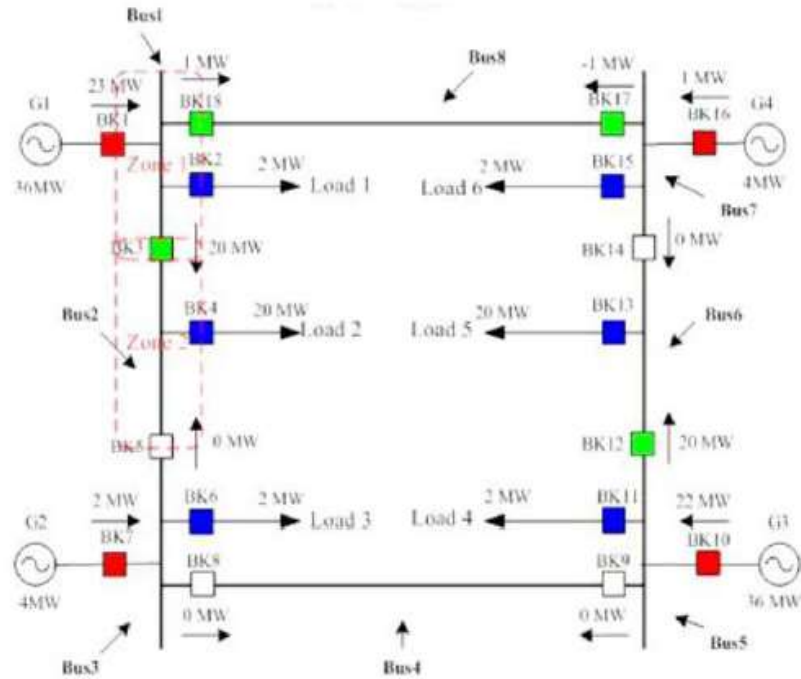


Εικόνα 4.7 : Σχηματικό διάγραμμα και συνδεσμολογία H/N αποστάσεως. [21]

Όπου:

- Τα  $Z_1 Z_2 Z_3$  είναι το στοιχείο πρώτης, δεύτερης, τρίτης ζώνης αντίστοιχα.
- Το D είναι ο H/N κατευθύνσεως.
- Τα  $T_2 T_3$  είναι οι H/N χρονικής καθυστέρησης ζώνης 2,3.
- Το S είναι ο H/N αυτοσυγκρατήσεως.
- Το B είναι ο H/N πτώσεως του διακόπτη.
- Τα T και R είναι τα κομβία «πτώσεως» και «επαναφοράς» του πηνίου του H/N.

Παρ' όλα αυτά, στην περίπτωση των γραμμών διανομής πλοίων, λόγω του περιορισμένου μήκους καλωδίων μεταφοράς ισχύος, δε συνηθίζεται η χρήση H/N αποστάσεως. Οι μοναδικές εφαρμογές που συναντώνται τέτοιοι H/N είναι αυτές των βροχωτών δικτύων.



Εικόνα 4.8 : Παράδειγμα βροχωτού δικτύου πλοίου. [22]

#### 4.4 Διαφορική προστασία γραμμών

Η αρχή της διαφορικής προστασίας εφαρμόζεται για τη σύγκριση ηλεκτρικών μεγεθών στα δύο άκρα του προστατευόμενου στοιχείου. Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση αυτή απαιτείται η επικοινωνία των δύο άκρων. Για μικρές αποστάσεις, όπου το προστατευόμενο στοιχείο είναι ένα μηχανήμα (π.χ. γεννήτρια), η επικοινωνία γίνεται μέσω αγωγών (πilotου).

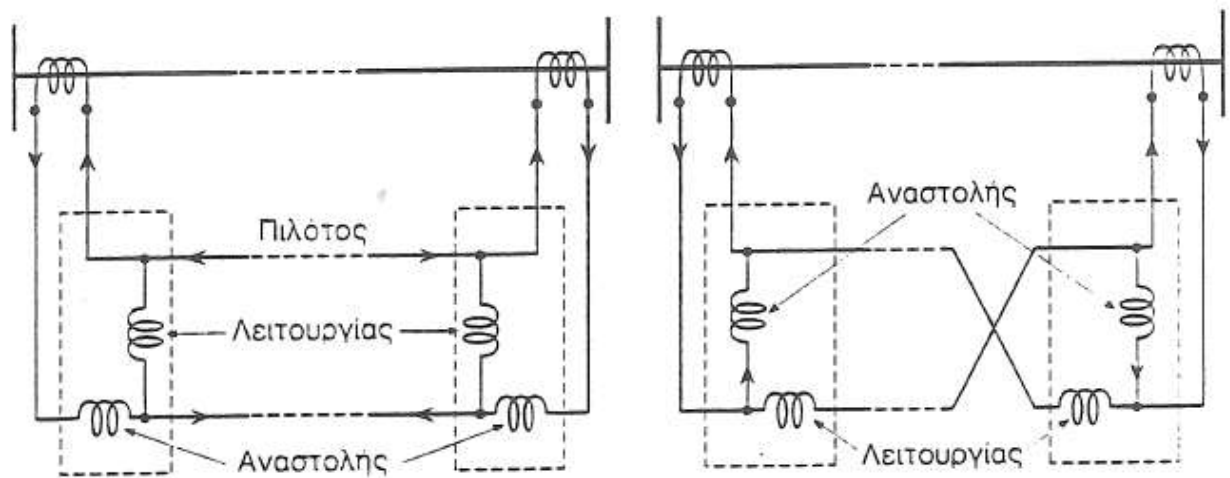
Για μεγάλες αποστάσεις από την άλλη, όπως συμβαίνει στις γραμμές μεταφοράς, η επικοινωνία των δύο άκρων μέσω του pilotου είναι εφικτή μόνο για γραμμές υπόγειων καλωδίων. Στην περίπτωση των εναέριων γραμμών ως κύκλωμα επικοινωνίας αξιοποιούνται, είτε οι αγωγοί της προστατευόμενης γραμμής, είτε οι κατευθυνόμενες κεραίες που εκπέμπουν μικροκύματα.

Μια σύγχρονη λύση αποτελούν και οι οπτικές ίνες, οι οποίες επιτρέπουν την μετάδοση πλήθους σημάτων και τοποθετούνται συνήθως στο εσωτερικό των αγωγών γης της ηλεκτρικής εγκατάστασης, που πρόκειται να προστατευτεί. Έτσι πρακτικά, η προστασία των γραμμών καθορίζεται από τον τρόπο επικοινωνίας των άκρων τους.

Οι δύο κύριες διαφορικές αρχές, που εφαρμόζονται στην περίπτωση διαφορικής προστασίας γραμμών εναλλασσομένου ρεύματος, είναι αυτή του κυκλοφορούντος ρεύματος και αυτή της αντιτιθέμενης τάσεως. Οι δύο παραπάνω περιπτώσεις φέρουν σε κάθε άκρο της γραμμής από έναν H/N, σε αντίθεση με τη διαφορική προστασία μηχανημάτων όπου απαιτείται μόνο ένας H/N.

Όσον αφορά την αρχή κυκλοφορούντος ρεύματος, εκεί οι αγωγοί του pilotου διαρρέονται από το ρεύμα του κανονικού φορτίου. Αντίθετα, στην περίπτωση της αντιτιθέμενης τάσεως, η ένταση δια των pilotων είναι θεωρητικά μηδέν, εφόσον οι παράγοντες από τους M/Σ εντάσεως – τάσεως είναι ακριβώς ίσες.

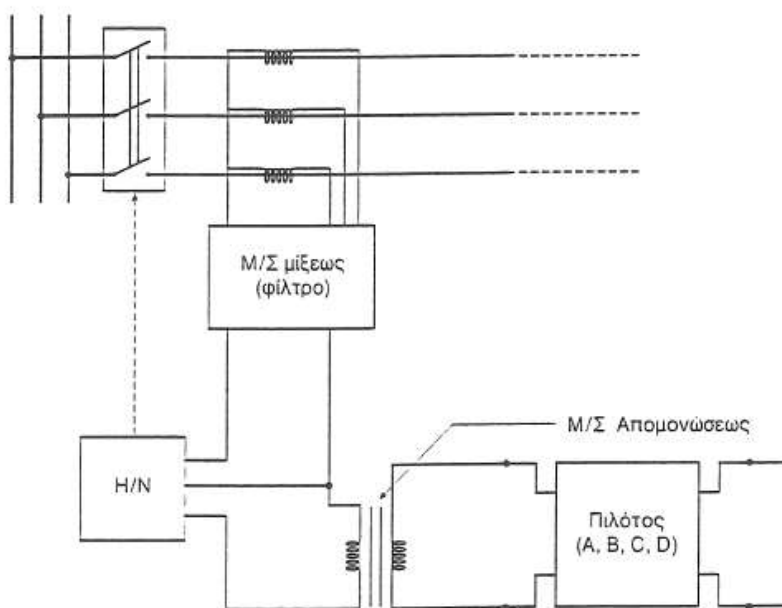
Στην ακόλουθη Εικόνα 4.9 παρουσιάζεται η διάταξη προστασίας των δύο διαφορικών αρχών που προαναφέρθηκαν. Κατά την διάρκεια σφάλματος οι αγωγοί διαρρέονται από ρεύμα ενεργοποιώντας τη κατάλληλη διάταξη προστασίας και στις δύο περιπτώσεις.



Εικόνα 4.9 : Σχηματική παράσταση των αρχών λειτουργίας διαφορικής προστασίας γραμμών, δεξιά του κυκλοφορούντος ρεύματος, και αριστερά της αντιτιθέμενης τάσεως. [21]

Πιο αναλυτικά μια διάταξη διαφορικής προστασίας γραμμής αγωγού – πιλότου αποτελείται από τα εξής στοιχεία όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.9 :

1. Τον Μ/Σ μίξεως, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η επιθυμητή σχέση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.
2. Τον Μ/Σ απομονώσεως, που χρησιμεύει για το διαχωρισμό των πηνίων του Η/Ν από τον πιλότο.
3. Τον πιλότο, μέσω του οποίου διαβιβάζονται τα σήματα από το ένα άκρο της γραμμής στο άλλο.



Εικόνα 4.10 : Σύνδεση διαφορικής προστασίας γραμμής με αγωγούς – πιλότο. [21]



## 4.5 Προστασία μετασχηματιστών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στα σύγχρονα συστήματα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο μηχάνημα είναι αυτό του μετασχηματιστή (Μ/Σ). Γι' αυτό και η προστασία του πρέπει να είναι επαρκής και κατάλληλα διαμορφωμένη, ανάλογα με το είδος της εγκατάστασης και την κατηγορία του Μ/Σ που μελετάται.

Αναλυτικότερα διακρίνονται οι εξής κατηγορίες Μ/Σ :

- Οι Μ/Σ διανομής μέσης – χαμηλής τάσης, το μέγεθος των οποίων κυμαίνεται συνήθως κοντά στα 1000kVA.
- Οι Μ/Σ διανομής υψηλής – μέσης τάσης, οι οποίοι αξιοποιούνται στα συστήματα παραγωγής – μεταφοράς, είτε για την τροφοδότηση και τη διασύνδεση των δικτύων διανομής, είτε για την ανύψωση της τάσεως των γεννητριών των σταθμών.
- Οι αυτομετασχηματιστές, οι οποίοι αντικαθιστούν σε ορισμένες εφαρμογές τους Μ/Σ διανομής υψηλής – μέσης τάσης.
- Οι ειδικοί Μ/Σ, που χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση άλλων συσκευών, όπως είναι οι ανορθωτές ισχύος, οι ηλεκτρικοί φούρνοι κ.α.
- Οι Μ/Σ γείωσης, οι οποίοι συναντιούνται συχνά σε συνδυασμό με τους κοινούς Μ/Σ, για τη γείωση του ουδετέρου κόμβου του δικτύου.

Για όλες όμως τις παραπάνω κατηγορίες, τα αίτια που προκαλούν τις συνηθέστερες βλάβες των Μ/Σ είναι κοινά. Αρχικά διακρίνονται σ' εκείνα που οφείλονται σε εξωτερικά αίτια, όπως είναι οι υπερφορτίσεις ή οι καταπονήσεις από υπερτάσεις και βραχυκυκλώματα του δικτύου. Έπειτα διακρίνονται και σ' εκείνα που αφορούν τις βλάβες των στοιχείων που ανήκουν στους ίδιους τους Μ/Σ. Αυτά με τη σειρά τους χωρίζονται σε βλάβες του κύριου μέρους (τυλιγμάτων, πυρήνα) καθώς και σε βλάβες γενικών εξαρτημάτων (μονωτήρες).

Όσον αφορά τις υπερφορτίσεις, οι μέγιστες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες των τυλιγμάτων είναι αυτές που καθορίζουν τα θερμικά όρια των Μ/Σ. Για παράδειγμα σε Μ/Σ λαδιού, η μέγιστη θερμοκρασία για φυσική κυκλοφορία είναι οι 65°C, ενώ για οριακές συνθήκες λειτουργίας είναι οι 70°C.

Συνήθως, ο έλεγχος των υπερφορτίσεων των Μ/Σ γίνεται αποτελεσματικά με την παρακολούθηση των θερμοκρασιών τους, και επιτυγχάνεται με τη μέτρηση της θερμοκρασίας του λαδιού στο πάνω μέρος του Μ/Σ, μέσω ενός θερμομέτρου. Το θερμομέτρο αυτό, μπορεί να περιλαμβάνει επιπλέον βοηθητικές επαφές, οι οποίες μεταδίδουν πληροφορίες ή δίνουν διακοπτικές εντολές σε ανεμιστήρες ψύξεως ή φορτία – καταναλώσεις.

Έτσι είναι φανερό πως όσο πιο ομοιόμορφη είναι η υπερθέρμανση των διαφόρων μερών του Μ/Σ, τόσο πιο αποτελεσματική είναι και η συγκεκριμένη μέθοδος προστασίας του.

Εναλλακτικά, στους Μ/Σ μεγάλης ισχύος τη λύση στο ζήτημα της προστασίας τη δίνουν θερμικοί Η/Ν ή διατάξεις θερμικής εικόνας. Στόχος τους είναι ουσιαστικά η παρακολούθηση των θερμοκρασιακών μεταβολών του θερμότερου σημείου των τυλιγμάτων του Μ/Σ. Έτσι μπορεί με ασφάλεια να αποφευχθεί έγκαιρα η όποια τυχαία βλάβη παρουσιαστεί στις μονώσεις των τυλιγμάτων.

Το κύριο αίτιο των υπερεντάσεων στους Μ/Σ είναι τα βραχυκυκλώματα, τα οποία μπορεί να συμβούν τόσο στο εσωτερικό, όσο και στο εξωτερικό τους. Τα εξωτερικά βραχυκυκλώματα καταπονούν θερμικά και μηχανικά το Μ/Σ, λόγω των μεγάλων ηλεκτρομηχανικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στα τυλίγματα του.

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) οι Μ/Σ που βγαίνουν στην αγορά δοκιμάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αντέχουν θερμικά σε πλήρη βραχυκυκλώματα διάρκειας 2sec, με ένταση που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$I = \frac{V_N}{Z_t} \quad (\text{Σχέση : 4.1})$$

$$I = U_Z * \frac{U_N^2}{100 * S_N} \quad (\text{Σχέση : 4.2})$$

Όπου:

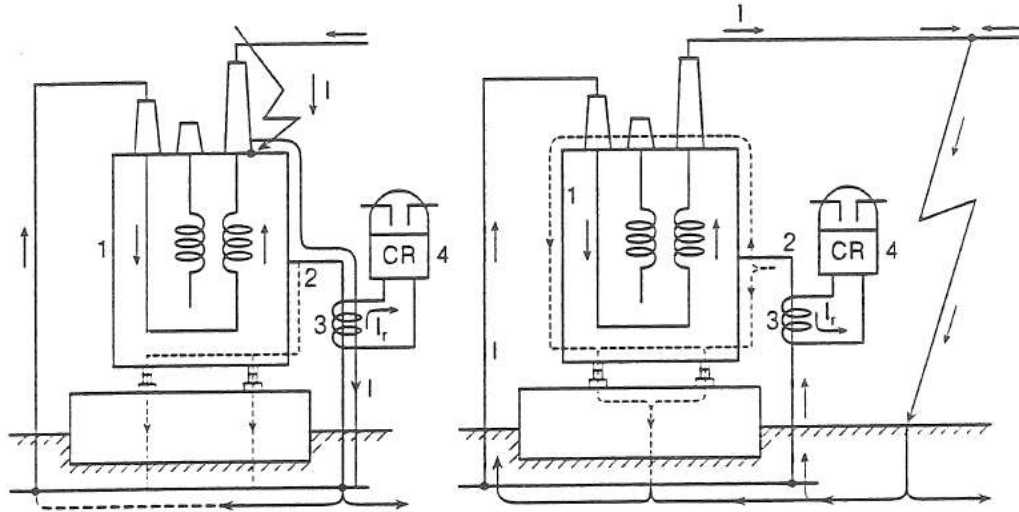
- $V_N$  : η ονομαστική τάση (kV)
- $S_N$  : η ονομαστική ισχύς (MVA)
- $U_Z$  : η τάση βραχυκύκλωσης (%)

Είναι σημαντικό οι προστασίες κατά των υπερεντάσεων των Μ/Σ να ενεργοποιούνται πριν οι συνθήκες φτάσουν κοντά στα όρια αντοχής τους. Ταυτόχρονα όμως, πρέπει να ρυθμίζονται έτσι ώστε να μην λειτουργούν κατά τη διάρκεια των μεταβατικών ρευμάτων φορτίσεως ή ζεύξεως των Μ/Σ.

Είναι γεγονός πως οι μηχανικές καταπονήσεις γενικά προκαλούν «συσσωρευτικές» επιπτώσεις στα τυλίγματα των Μ/Σ, καθώς προκαλούν ορισμένες μετακινήσεις σε αυτά και έτσι όταν επαναλαμβάνονται συχνά μειώνουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους. Για το λόγο αυτό, γίνονται οι κατάλληλες ρυθμίσεις των διακοπών προστασίας, με κριτήριο τις διαφορετικές καμπύλες που προκύπτουν από τα στοιχεία των ίδιων των Μ/Σ. Ουσιαστικά, οι καμπύλες αντοχής είναι αυτές που καθορίζουν τα μέτρα προστασίας έναντι των υπερεντάσεων.

Γενικά σε περίπτωση εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων, προκειμένου να περιοριστεί η βλάβη, τόσο στον Μ/Σ, όσο και στο περιβάλλον όπου βρίσκεται, είναι αναγκαία η ταχύτατη απομόνωση του από το δίκτυο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, χρειάζεται ο έλεγχος της πίεσης εντός του δοχείου του Μ/Σ και της ροής των αερίων που παράγονται λόγω διασπάσεως του μονωτικού λαδιού από τη τοπική υπερθέρμανση, που προκαλείται από το βραχυκύκλωμα.

Πολλά από τα σφάλματα των Μ/Σ παρατηρούνται από βραχυκυκλώματα προς το κέλυφος τους. Τότε εφαρμόζεται η προστασία έναντι υπερεντάσεως που φαίνεται στην Εικόνα 4.11. Στην προστασία αυτή, οι Μ/Σ εδράζονται στο έδαφος μέσω μιας βάσης από τσιμέντο και συναντώνται σε εγκαταστάσεις όπου ο ουδέτερος των τυλιγμάτων γειώνεται απευθείας ή μέσω αντιστάσεως μικρής σχετικά τιμής.



Εικόνα 4.11 : Προστασία Μ/Σ για σφάλματα προς το κέλυφος του. [21]

Στην Εικόνα 4.11 φαίνεται πως γίνεται σύνδεση του μεταλλικού κελύφους του Μ/Σ (σημείο 1), με το πλέγμα γείωσης του υποσταθμού μέσω ενός αγωγού (σημείο 2). Ο αγωγός αυτός συνδέεται με το κέλυφος μόνο σε ένα σημείο, όπου περιλαμβάνεται ένας Μ/Σ εντάσεως (σημείο 3), ο οποίος με τη σειρά του τροφοδοτεί έναν Η/Ν υπερεντάσεως (σημείο 4).

Στην αριστερή διάταξη της Εικόνας 4.11 παρουσιάζεται επίσης η ροή του ρεύματος σε περίπτωση εσωτερικού βραχυκυκλώματος προς το κέλυφος του Μ/Σ. Ο Η/Ν (σημείο 4) διεγείρεται εφόσον η ένταση του αγωγού είναι μεγαλύτερη της οριακής και το ρεύμα μοιράζεται μεταξύ του αγωγού και του κελύφους (σημείο 2).

Αντίθετα, στη δεξιά διάταξη της Εικόνας 4.11 φαίνεται η ροή του ρεύματος στη περίπτωση εξωτερικού βραχυκυκλώματος, όπου δεν προκαλείται διέγερση του Η/Ν. Η ορθή λειτουργία προστασίας, για τις συγκεκριμένες συνθήκες, εξασφαλίζεται με τον κατάλληλο συσχετισμό των αντιστάσεων που παρεμβάλλονται στη ροή των ρευμάτων και είναι εύκολο να ελεγχθούν πειραματικά.

#### 4.6 Προστασία γεννητριών

Είναι γνωστό πως οι γεννήτριες χαρακτηρίζονται ως ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ), και ειδικότερα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων. Για το λόγο αυτό πρέπει να εξασφαλίζεται ένας υψηλός βαθμός προστασίας των διατάξεων αυτών. Έτσι στόχος της προστασίας τους είναι ο περιορισμός των βλαβών λόγω εσωτερικών σφαλμάτων καθώς και η ελαχιστοποίηση των ανωμαλιών από το δίκτυο λόγω εξωτερικών σφαλμάτων.

Στην περίπτωση των σύγχρονων γεννητριών αξίζει να σημειωθεί πως δεν αρκεί μόνο η απομόνωση τους από το δίκτυο κατά τη διάρκεια ενός εσωτερικού σφάλματος, αλλά πρέπει ταυτόχρονα να διακοπεί τόσο η διέγερση, όσο και η παροχή καυσίμου στο κινητήρα της γεννήτριας αυτής.

Οι σημαντικότερες προστασίες που αξιοποιούνται σε διατάξεις γεννητριών είναι αναλυτικότερα:

- Η προστασία από υπερτάσεις και υπερεντάσεις.
- Η προστασία από ασύμμετρα φορτία φάσεων.
- Η προστασία από υπερθέρμανση του στάτη.
- Η προστασία από υπερτάσεις.
- Η προστασία των τυλιγμάτων του στάτη.
- Η προστασία από σφάλματα προς τη γη των τυλιγμάτων του στάτη.
- Η προστασία από σφάλματα στην μόνωση του δρομέα.

Συγκεκριμένα για τις γεννήτριες η απλούστερη προστασία που εγκαθίσταται είναι μια προστασία υπερεντάσεως, η οποία εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος της γεννήτριας. Η προστασία αυτή αποτελείται πρακτικά από έναν H/N αντιστρόφου χρόνου στον κόμβο των M/Σ εντάσεων και δεν πρέπει να λειτουργεί για εξωτερικά βραχυκυκλώματα. Έτσι οι ρυθμίσεις της γίνονται κατ' ανάγκη σε υψηλές τιμές. Ειδικά για την προστασία του τυλίγματος του στάτη από υπερφορτίσεις, σε γεννήτριες ισχύος μεγαλύτερης των 1000kVA, εγκαθίσταται «προστασία θερμικής εικόνας», όμοια με αυτή των M/Σ.

Γενικά οι γεννήτριες υπερφορτίζονται στην περίπτωση που η ζήτηση του φορτίου υπερβαίνει την ονομαστική του ισχύ. Τότε παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων του στάτη γεγονός που μπορεί να καταστρέψει τις μονώσεις των τυλιγμάτων εάν η υπερφόρτιση υπερβεί ορισμένες τιμές και παραταθεί χρονικά. Είναι αναγκαία η επαρκής και διαρκής ψύξη των τυλιγμάτων αυτών. Ακόμα, η προστασία έναντι υπερφορτίσεως διευκολύνεται μέσω του ελέγχου της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων της γεννήτριας.

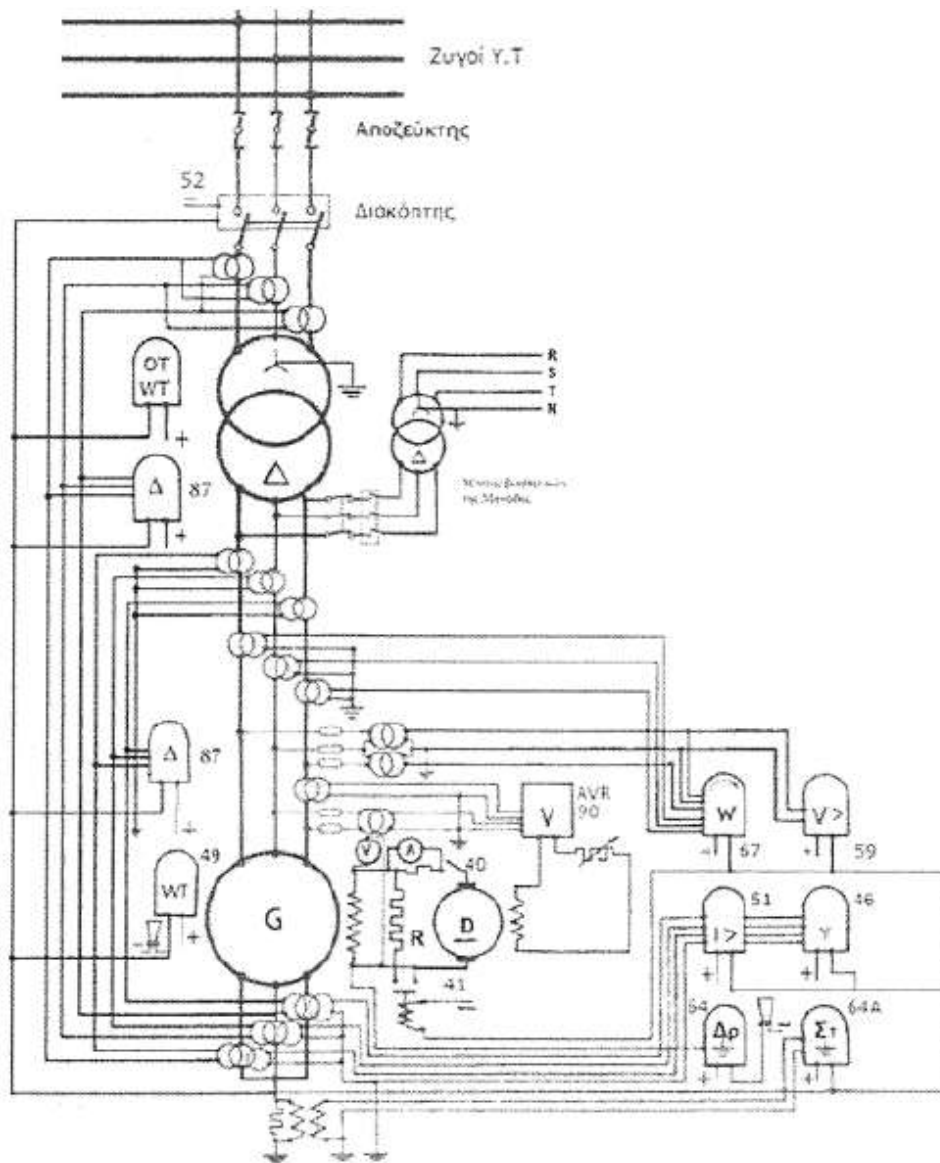
Υπερφόρτιση (%)	10	20	25	40	50
Διάρκεια (min)	60	10	5	2,5	1

Πίνακας 4.1: Χρονικό διάστημα ικανότητας υπερφόρτισης ανάλογα με τα ποσοστά της υπερφόρτισης γεννήτριας. [22]

Ο κύριος στόχος της προστασίας έναντι υπερεντάσεων μιας γεννήτριας είναι η αντιμετώπιση βραχυκυκλωμάτων από τους ακροδέκτες της, μέχρι τους ζυγούς του σταθμού παραγωγής. Η προστασία αυτή επιτυγχάνεται με έναν H/N υπερεντάσεως με υψηλές ρυθμίσεις και χρονική καθυστέρηση για την αποφυγή αποπαραλληλισμού της γεννήτριας λόγω εξωτερικών σφαλμάτων. Ο H/N υπερτάσεως λειτουργεί με καθυστέρηση για τάσεις (110-115)% και ακαριαία για τάσεις (130-150)% της ονομαστικής, δίνοντας την εντολή για άνοιγμα του διακόπτη της γεννήτριας. Την ίδια στιγμή συνδέεται η αντίσταση R (Εικόνα 4.12) παράλληλα με το τύλιγμα του δρομέα (διακόπτης 41) και ανοίγει ο διακόπτης (40) της διέγερσης όπως φαίνεται και στη διάταξη της Εικόνας 4.12.

Κατά τη διάρκεια μονοφασικών ή διφασικών βραχυκυκλωμάτων ή κατά τη διακοπή μιας φάσης του δικτύου, που τροφοδοτεί η γεννήτρια, μπορεί να παρουσιαστεί ασυμμετρία στις εντάσεις των τυλιγμάτων της. Σε τέτοια ασυμμετρία, στα ρεύματα του στάτη δημιουργούνται ρεύματα αρνητικής ακολουθίας, τα οποία δημιουργούν με τη σειρά τους ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο διπλάσιας συχνότητας και αντίθετης φοράς από αυτό του δρομέα.

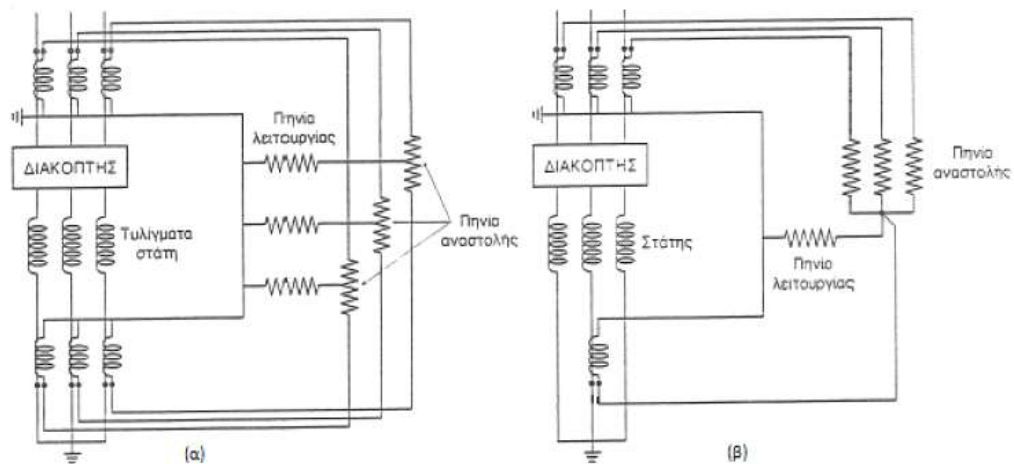
Έτσι παρατηρούνται υπερθέρμανση στο δρομέα καθώς επάγονται διπλάσιες συχνότητες στο σώμα του. Για την αντιμετώπιση της ασυμμετρίας των φάσεων, η προστασία που εφαρμόζεται περιλαμβάνει έναν Η/Ν υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου, ο οποίος οφείλει να καλύπτει την αντοχή της γεννήτριας για συγκεκριμένο χρόνο.



Εικόνα 4.12 : Παράδειγμα προστασίας γεννήτριας και Μ/Σ ισχύος υδροηλεκτρικής μονάδας παραγωγής. [22]

Σε ότι αφορά την προστασία από υπερθέρμανση του στάτη, είναι γνωστό πως το πρόβλημα σε αυτήν την περίπτωση προκαλείται από υπερφόρτιση της γεννήτριας και αντιμετωπίζεται πρακτικά με μια προστασία υπερέντασης. Όταν η υπερφόρτιση διαρκεί για αρκετό χρόνο, τότε καταστρέφεται η μόνωση. Γι' αυτό οι γεννήτριες προστατεύονται από συστήματα μέτρησης πραγματικών θερμοκρασιών στα τυλίγματα της. Αυτό συμβαίνει κυρίως, γιατί ο Η/Ν υπερέντασης είναι ρυθμισμένος αρκετά ψηλά και μπορεί να μην ανιχνεύσει έγκαιρα τις διάφορες χαμηλότερες, αλλά εξίσου επιβλαβείς, υπερφορτίσεις.

Η διαφορική προστασία του στάτη (σημείο 87 – Εικόνα 4.12) αποτελεί τη σπουδαιότερη προστασία των γεννητριών από εσωτερικά σφάλματα. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ψυχρούς αγωγούς (αισθητήρες θερμοκρασίας), οι οποίοι αυξάνουν την αντίσταση τους όσο αυξάνεται και η θερμοκρασία στο εσωτερικό της γεννήτριας. Τοποθετούνται στις αυλακώσεις των τυλιγμάτων του στάτη, ώστε να μετράται η θερμοκρασία σε δύο σημεία του τυλίγματος της κάθε φάσης. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας διάταξης αποτελεί και ο Η/Ν (σημείο 49 –Εικόνα 4.12), ο οποίος συνδέεται με αισθητήρες, μετρά τη θερμοκρασία και ελέγχει το γενικό διακόπτη της γεννήτριας.



Εικόνα 4.13: Διαφορική προστασία στάτη γεννήτριας με α) Εξωτερικό ουδέτερο κόμβο, β) Εσωτερικό ουδέτερο κόμβο. [21]

Στην Εικόνα 4.13-α) τα τυλίγματα της γεννήτριας βρίσκονται σε συνδεσμολογία αστέρα, η οποία είναι και η συνηθέστερη περίπτωση για εξωτερικό ουδέτερο κόμβο. Ενώ, αν η σύνδεση των τυλιγμάτων για το σχεδιασμό του ουδέτερου κόμβου γίνεται εσωτερικά, τότε πραγματοποιείται η συνδεσμολογία που φαίνεται στην Εικόνα 4.13-β).

Σε μεγάλες γεννήτριες συνηθίζεται το τύλιγμα της κάθε φάσης να χωρίζεται σε δύο παράλληλους κλάδους, καθώς σε περίπτωση σφάλματος σε σπείρες της ίδιας φάσης δεν λειτουργεί η διαφορική προστασία που προαναφέρθηκε, αφού δεν παρουσιάζεται καμία διαφορά έντασης στα άκρα των τυλιγμάτων αυτών. Έτσι, ο παραλληλισμός γίνεται πρακτικά ώστε, με τη κατάλληλη προστασία, να συγκρίνονται τα ρεύματα στους κλάδους που διαμορφώνονται και να ανιχνεύονται σφάλματα και σε κάθε φάση ξεχωριστά.

Τέλος αναφορικά με τη προστασία από σφάλμα στη μόνωση του δρομέα της γεννήτριας, αυτή περιλαμβάνει, όχι μόνο τα τυλίγματα του δρομέα, αλλά και τα τυλίγματα και τους αγωγούς του συστήματος διέγερσης.

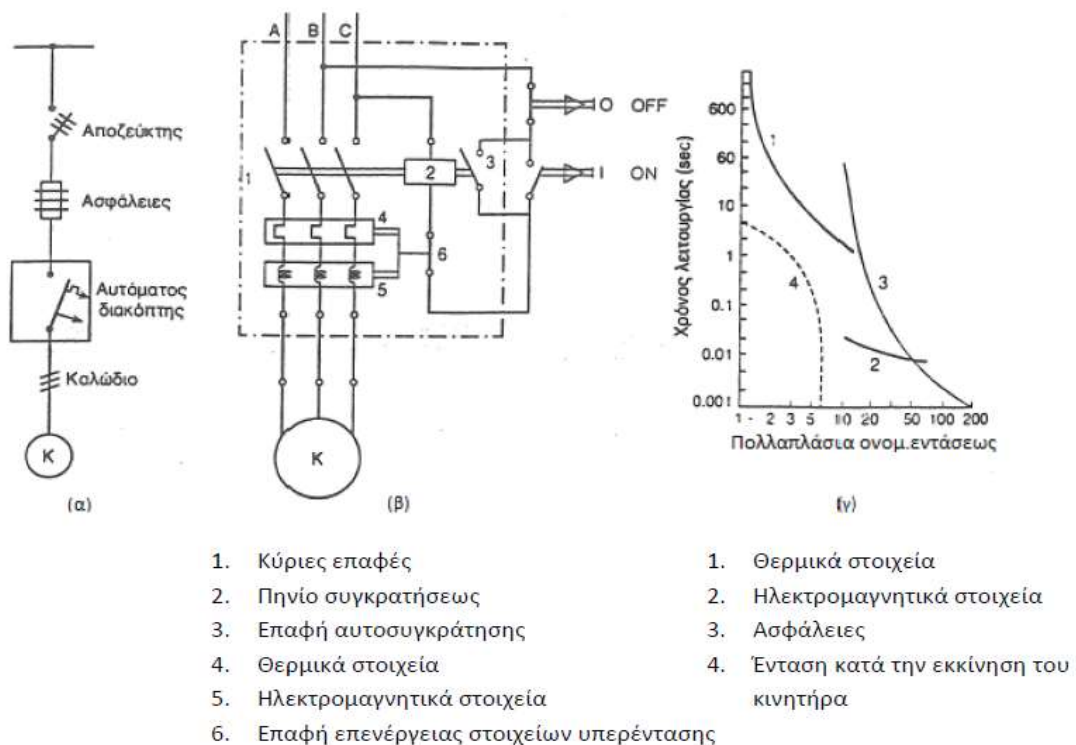
Ένα σφάλμα που θα οφείλεται κυρίως στην καταστροφή της μόνωσης, δε θα επηρεάσει άμεσα τη λειτουργία της διέγερσης, αφού όλα αυτά τα κυκλώματα αποτελούν ένα μονωμένο σύστημα προς τη γη. Παρ' όλα αυτά, δημιουργούνται προϋποθέσεις για σοβαρές ανωμαλίες με την παρουσία κάποιου δεύτερου σφάλματος. Υπάρχει δηλαδή περίπτωση να προκληθεί σοβαρή βλάβη στα τυλίγματα του στάτη εξαιτίας της ανισορροπίας της μαγνητικής ροής.

Η προστασία (σημείο 64 – Εικόνα 4.12) αποτελείται από έναν πυκνωτή σε σειρά με το πηνίο του Η/Ν και με το δευτερεύον του Μ/Σ μικρής ισχύος. Ο συγκεκριμένος Η/Ν απλώς δίνει ακουστική και οπτική σήμανση όταν το κύκλωμα γειωθεί σε οποιοδήποτε σημείο ή έχει χαλάσει η μόνωση, ώστε να ληφθούν έπειτα τα κατάλληλα χειροκίνητα μέτρα από το εκάστοτε προσωπικό.

## 4.7 Προστασία κινητήρων

Όπως οι γεννήτριες, έτσι και οι κινητήρες έχουν τεράστια ποικιλία εφαρμογών στις βιομηχανικές και γενικότερα στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Επομένως είναι εξαιρετικά μεγάλο και το φάσμα των κατασκευαστικών και λειτουργικών απαιτήσεων τους. Τα μεγέθη των κινητήρων κυμαίνονται συνήθως από μερικά W μέχρι πολλά MW. Ανάλογα με την ισχύ του κάθε κινητήρα τα χαρακτηριστικά μεγέθη του, τα χαρακτηριστικά του φορτίου του, καθώς και τον τρόπο λειτουργίας του, απαιτείται και διαφορετική προστασία.

Στην ακόλουθη Εικόνα 4.14 εικονίζεται η συνηθέστερη διάταξη προστασίας κινητήρων χαμηλής τάσης, ισχύος από 1kW και άνω στη περίπτωση οπου δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις προστασίας.



Εικόνα 4.14 : Προστασία τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα ΧΤ, α) Διάταξη οργάνων ζεύξεως και προστασίας, β) Συνδεσμολογία ενός απλού αυτόματου διακόπτη , γ) Χαρακτηριστικές ρευμάτων – χρόνου διατάξεων προστασίας. [21]

Το κύριο μέσο προστασίας κινητήρων αποτελεί ο αυτόματος διακόπτης ισχύος. Ο διακόπτης αυτός αποτελείται από θερμικά και ηλεκτρομαγνητικά στοιχεία προστασίας. Με τα πρώτα ο κινητήρας προστατεύεται από υπερφόρτιση (μικρές εντάσεις, μεγάλης διάρκειας). Ενώ τα ηλεκτρομαγνητικά στοιχεία προστατεύουν το κινητήρα από μεγάλες υπερεντάσεις, όπου απαιτείται η ταχεία απομόνωση του.



Η συνδεσμολογία ενός τέτοιου διακόπτη φαίνεται στην Εικόνα 4.14-β), όπου τα στοιχεία 4 και 5 επενεργούν στην επαφή 6, η οποία διακόπτει την τροφοδότηση του πηνίου συγκρατήσεως 2. Έτσι ο διακόπτης ανοίγει, ενώ η βοηθητική επαφή 3, η οποία ακολουθεί το διακόπτη στο άνοιγμα και στο κλείσιμό του, συνεχίζει να τροφοδοτεί το πηνίο συγκρατήσεως, ακόμα και όταν ο διακόπτης παραμένει κλειστός.

Για κινητήρες σχετικά μεγάλης ισχύος, όπου το πηνίο συγκρατήσεως είναι σχετικά ανεπαρκές στις υποτάσεις, προβλέπεται ένας ιδιαίτερος H/N υποτάσεως. Ακόμα αντί του αυτόματου διακόπτη εγκαθίσταται ένας «επαφέας». Ο επαφέας αυτός είναι ουσιαστικά ένας διακόπτης με περιορισμένη ικανότητα διακοπής υπερεντάσεως. Επιπλέον, η εγκατάσταση ασφαλειών πριν από τις επαφές αυτές είναι αναγκαία προϋπόθεση για τη σωστή και ασφαλή λειτουργία τους, καθώς πρέπει να προστατεύεται από μεγάλες υπερεντάσεις σε περίπτωση βραχυκυκλωμάτων.

Οι παραπάνω προτάσεις αφορούν τόσο τους μικρούς, όσο και τους μεγάλους κινητήρες. Στην Εικόνα 4.15 φαίνονται οι ενδεικτικές «καμπύλες αντοχής» ενός ασύγχρονου κινητήρα σε υπερφόρτιση με δύο διαφορετικά είδη H/N.



Εικόνα 4.15 : Τυπικές χαρακτηριστικές χρόνου – εντάσεως. [21]

Όπως φαίνεται και στο γράφημα οι θερμικοί H/N προσφέρουν καλύτερη προστασία έναντι των H/N υπερεντάσεως αντιστροφου χρόνου που χρησιμοποιούνται συχνά σε διατάξεις προστασίας κινητήρων. Αυτό συμβαίνει καθώς οι θερμικοί H/N

Τα συστήματα διαφορικής προστασίας που αναφέρθηκαν για την προστασία του τυλίγματος του στάτη στις σύγχρονες γεννήτριες, μπορούν να εφαρμοστούν και στους μεγάλης ισχύος κινητήρες σύγχρονους και ασύγχρονους. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι κυρίως η μεγάλη ταχύτητα λειτουργίας, η αυξημένη ευαισθησία και η ανεξαρτησία τους από τις λοιπές προστασίες.

Επίσης και στους κινητήρες εφαρμόζεται η προστασία μέσω ανιχνευτών υπερθερμάνσεως. Τοποθετούνται πρακτικά μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη για να παρακολουθούν τη θερμοκρασία τους και συνήθως ξεκινούν με μια ειδοποίηση (alarm), ώστε σε δεύτερο επίπεδο να προκαλέσουν άνοιγμα του διακόπτη προστασίας. Αυτή η προστασία είναι χρήσιμη για οποιαδήποτε αιτία μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση σε μια διάταξη, όπως υπερφόρτιση ή ανομοιομορφία τάσεων.



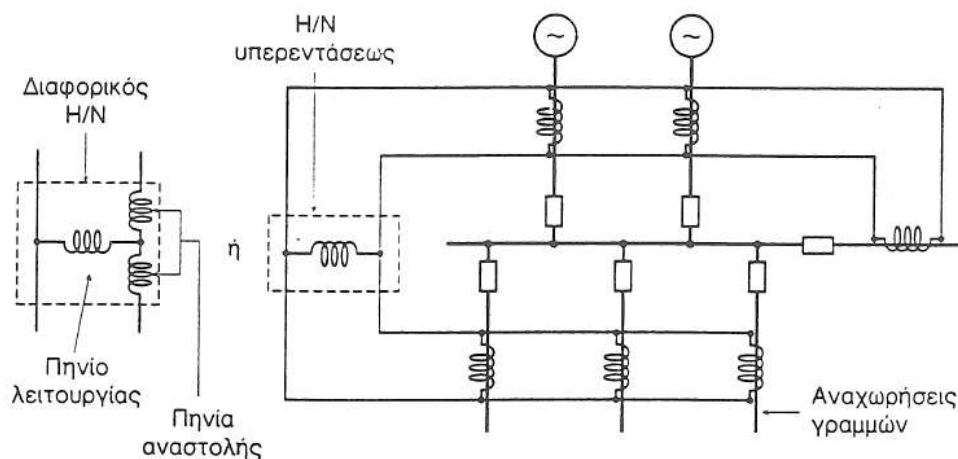
Τέλος, για κινητήρες άνω των 1000V, παρουσιάζονται αρκετές κατασκευαστικές διαφορές. Εκεί αξιοποιούνται Η/Ν που τροφοδοτούνται από Μ/Σ εντάσεως ή τάσεως. Επιπλέον, στους κινητήρες μεγάλης ισχύος υπάρχουν και ειδικές προστασίες για τα μηχανικά τους μέρη, όπως για παράδειγμα είναι οι ανιχνευτές υπερθερμάνσεως εδράνων, οι ανιχνευτές κραδασμών καθώς και η προστασία από υψηλές ροπές στον άξονα των κινητήρων αυτών.

#### 4.8 Προστασία ζυγών, πηνίων και πυκνωτών

Οι ζυγοί αποτελούν και αυτοί με τη σειρά τους ένα πολύ βασικό κομμάτι των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και ένα σφάλμα σε αυτούς είναι ικανό να επιφέρει εκτεταμένες διαταραχές στη λειτουργία όλου του συστήματος. Οι ζυγοί ουσιαστικά περιλαμβάνουν στις διατάξεις τους όλα τα αποζευκτικά στοιχεία των διακόπτων ισχύος ( $\Delta/I$ ), τους Μ/Σ οργάνων καθώς και τους μονωτήρες στηρίξεως των αγώγιμων στοιχείων.

Τα επαγωγικά πηνία, όπως και οι τυχόντες υπάρχοντες πυκνωτές, συνδέονται στους ζυγούς της εγκατάστασης μέσω  $\Delta/I$  και ειδικών ασφαλειών. Ακόμα, για τα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης οι ζυγοί των τριφασικών ΣΗΕ αποτελούνται από τρεις επιμέρους ζυγούς, ένα για κάθε φάση. Ενώ, τα δίκτυα χαμηλής τάσης, όταν πρόκειται για τριφασική ηλεκτρική διάταξη, αποτελούνται συνήθως από πέντε ζυγούς. Οι ζυγοί αυτοί είναι πιο συγκεκριμένα των τριών φάσεων, του ουδετέρου και της γείωσης.

Ο κύριος στόχος των διατάξεων προστασίας των ζυγών είναι η άμεση απομόνωσή του σε περίπτωση σφάλματος, ώστε να μην επεκταθούν οι επιπτώσεις και στα υπόλοιπα στοιχεία του ΣΗΕ. Στην προστασία των ζυγών κατά κανόνα εφαρμόζεται η διαφορική προστασία. Η βασική αρχή της λειτουργίας αυτής αναφέρει πως το αλγεβρικό άθροισμα των εισερχόμενων και των εξερχόμενων ρευμάτων προς τους ζυγούς πρέπει να είναι μηδέν, ώστε να λειτουργεί σωστά η περιβάλλουσα διάταξη.

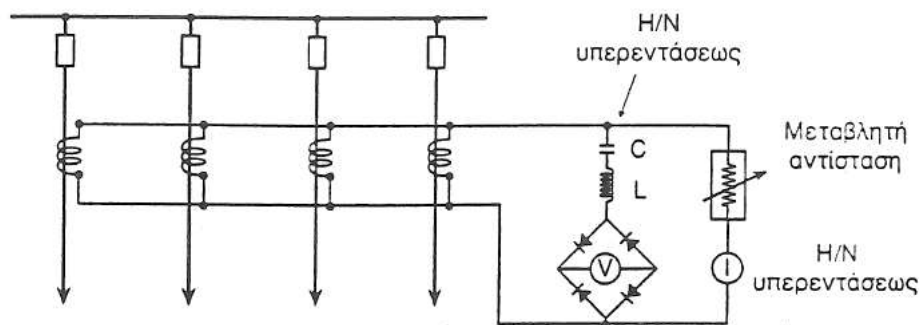


Εικόνα 4.16 : Αρχή προστασίας με απλούς Η/Ν υπερεντάσεως ή διαφορικούς Η/Ν. [21]

Στην παραπάνω Εικόνα 4.16 εικονίζεται ένα τμήμα ζυγών ενός υποσυστήματος, το οποίο περιλαμβάνει δυο τροφοδοτήσεις, μια διασύνδεση με παρακείμενους ζυγούς και τρεις τροφοδοτήσεις γραμμών.

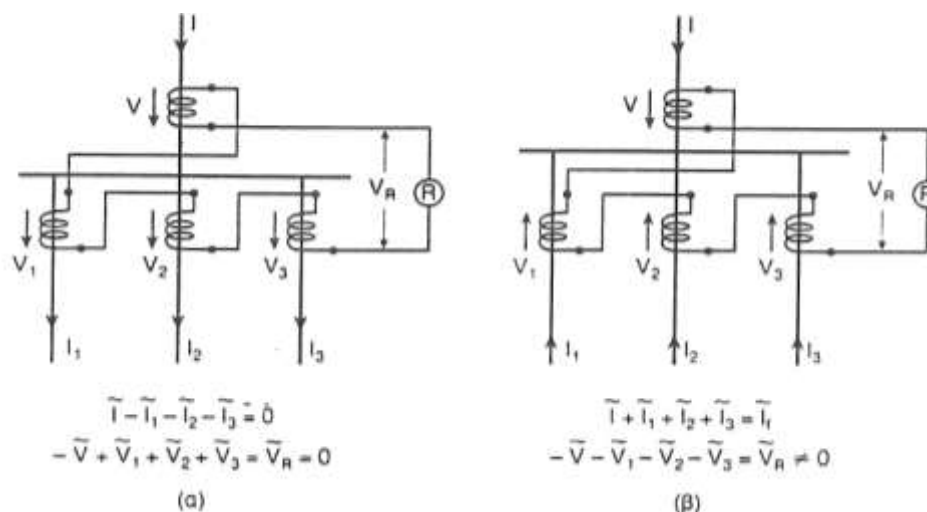
Ένας εναλλακτικός τρόπος προστασίας των ζυγών είναι μέσω H/N τάσεως υψηλής αντιστάσεως. Στην Εικόνα 4.17 φαίνεται πιο αναλυτικά η αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης προστασίας. Ο σχεδιασμός του H/N βασίζεται στον υπολογισμό της τάσεως επί του πηνίου λειτουργίας. Έτσι με βάση το μέγεθος της τάσεως αυτής τα σφάλματα που προκύπτουν διακρίνονται σε εσωτερικά και εξωτερικά.

Το κύκλωμα του πηνίου – πυκνωτή ( L-C), στην Εικόνα 4.17, βρίσκεται σε σειρά με τον H/N υπερεντάσεως και συντονίζεται στα 50Hz, ώστε να εξασφαλίζεται πως δεν θα λειτουργεί ο H/N λόγω των αρμονικών ή της συνεχούς συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Καθώς όμως το κύκλωμα αυτό ενδέχεται να καθυστερήσει τη λειτουργία του H/N σε περίπτωση σφάλματος, προστίθεται επιπλέον και ο H/N υπερεντάσεως. Ο H/N αυτός θα λειτουργήσει πρώτος σε συνθήκες πολύ μεγάλων ρευμάτων σφάλματος. Η μεταβλητή αντίσταση της διάταξης είναι πρακτικά αυτή που περιορίζει τη τάση στα άκρα του H/N υπερεντάσεως.



Εικόνα 4.17 : Διαφορική προστασία ζυγών με H/N τάσεως υψηλής αντιστάσεως. [21]

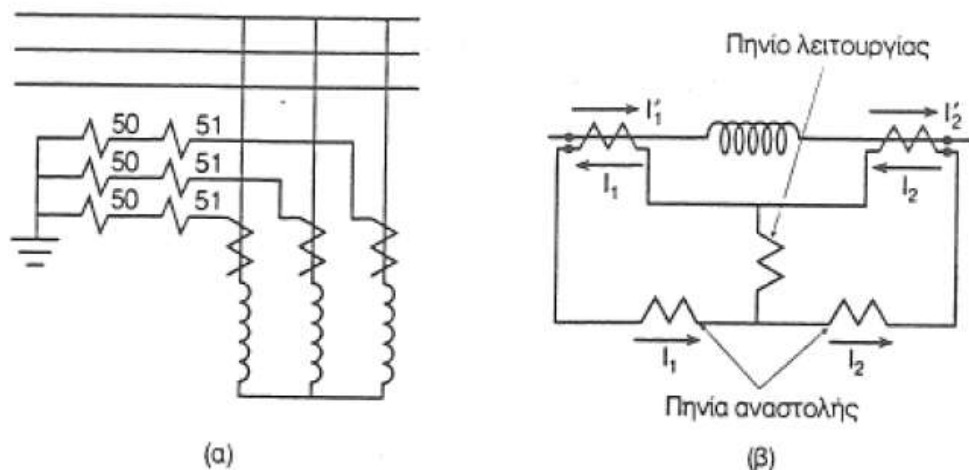
Ακόμα σαν μέσο προστασίας για τους ζυγούς μπορούν να αξιοποιηθούν και τα γραμμικά πηνία ζεύξεως. Σε αυτό το σύστημα στη θέση των συνηθισμένων M/Σ εντάσεως μπαίνουν τα αλληλεπαγωγικά πηνία αέρος, τα οποία παράγουν μια τάση εξ επαγωγής ανάλογη του ρεύματος πρωτεύοντος. Τα δευτερεύοντα τυλίγματα των πηνίων αυτών συνδέονται σε σειρά, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.18.



Εικόνα 4.18: Προστασία ζυγών με πηνία ζεύξεως, α) Περίπτωση εξωτερικού σφάλματος, β) Περίπτωση εσωτερικού σφάλματος. [21]

Γενικά η προστασία ζυγών εφαρμόζεται κυρίως στα δίκτυα υψηλής τάσης, καθώς στα υπόλοιπα δίκτυα, οι ζυγοί προστατεύονται συνήθως μέσω προστασιών άλλων τμημάτων. Βέβαια, στην τελευταία περίπτωση το μειονέκτημα ενδέχεται να είναι η χρονική καθυστέρηση στην απομόνωση των ζυγών.

Συνήθως τα πηνία στις ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις τοποθετούνται είτε σε σειρά για μεταβολή της σύνθετης αντίστασης του συστήματος για μείωση της εντάσεως βραχυκυκλώματος, είτε παράλληλα με σκοπό να αντισταθμίσουν τη χωρητικότητα των γραμμών. Πιο συγκεκριμένα, για τα πηνία συνήθως εφαρμόζεται η ίδια προστασία με εκείνη των γραμμών που αυτά βρίσκονται (H/N αποστάσεως ή διαφορικούς), όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 4.19.



Εικόνα 4.19 : Προστασία πηνίων με H/N α) υπερεντάσεως, β) διαφορικούς. [21]

Τέλος, ο ρόλος των παραλληλισμένων πυκνωτών στα ΣΗΕ, είναι να αντισταθμίζουν και γενικότερα να ελέγχουν τη ροή της άεργου ισχύς των δικτύων διανομής. Σε βιομηχανικά δίκτυα τοποθετούνται κυρίως σε κεντρικούς πίνακες χαμηλής τάσης ή τοπικά σε συσκευές προς διόρθωση του συντελεστή ισχύος και βελτίωση των σχετικών οικονομικών μεγεθών.

Επίσης, παράλληλοι πυκνωτές τοποθετούνται και σε εναέριες γραμμές μέσης τάσης για τη μείωση των απωλειών ή τη ρύθμιση της τάσεως. Πιο σπάνια οι πυκνωτές σε σειρά εγκαθίσταται σε δίκτυα υψηλής τάσης και συνήθως προστατεύονται από τα μέσα προστασίας γραμμών που βρίσκονται.

Οι εντολές ζεύξης – απόζευξης των πυκνωτών από το δίκτυο δίνονται στον αντίστοιχο διακόπτη ισχύος αυτόματα από κατάλληλους H/N ελέγχου και μπορεί να αφορούν ολόκληρη την συστοιχία ή μέρος αυτής.

## 4.9 Συμπεράσματα

Από αυτά που παρουσιάστηκαν στο τρέχον κεφάλαιο, είναι προφανές ότι ο καλός σχεδιασμός, η σωστή κατασκευή και η βέλτιστη επιλογή των ρυθμίσεων των διατάξεων προστασίας, αποτελούν τη βασικότερη προϋπόθεση ώστε να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, αναλύθηκαν οι διάφορες αρχές λειτουργίας των διατάξεων προστασίας. Όπως για παράδειγμα είναι οι προστασίες έναντι υπερεντάσεων, έναντι υπερτάσεων καθώς και οι διαφορικές προστασίες.

Επιπλέον, είναι αναγκαίο να επιλεγεί ο καταλληλότερος συνδυασμός προστασίας ώστε να λειτουργούν με ασφάλεια όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης. Τα πιο σημαντικά στοιχεία όπως ήδη παρουσιάστηκαν και παραπάνω είναι οι μετασχηματιστές, οι γεννήτριες, οι κινητήρες και οι ζυγοί των πηνίων και των πυκνωτών αντίστοιχα.

## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Υπολογιστικό υπόβαθρο ηλεκτρικών συστημάτων υπό συνθήκες σφαλμάτων

### 5.1 Σκοπός και ρόλος της προστασίας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

#### 5.1.1 Εισαγωγή

Είναι γεγονός πως τα διάφορα στοιχεία ενός ηλεκτρικού συστήματος μπορεί να παρουσιάσουν κάποια βλάβη. Στοιχεία όπως, η γεννήτρια, ο Μ/Σ ή ο κινητήρας της ηλεκτρικής εγκατάστασης είναι πιθανόν να επηρεαστούν είτε από εξωτερικά αίτια (π.χ. κεραυνό), είτε από εσωτερικά (π.χ. γήρανση της μονώσεως). Μέσα από τις περιπτώσεις αυτές προκύπτει και ο ορισμός του «σφάλματος», το οποίο είναι ουσιαστικά κάθε μη ομαλή κατάσταση ενός στοιχείου του συστήματος, που οφείλεται κυρίως στην απώλεια της μόνωσης μεταξύ φάσεων ή φάσης – γης.

Η συνηθέστερη κατηγορία σφαλμάτων είναι τα βραχυκυκλώματα, τα οποία αφορούν βλάβες που εκδηλώνονται άμεσα ή εξελίσσονται σταδιακά. Γενικά ως βραχυκύκλωμα χαρακτηρίζεται η αγώγιμη σύνδεση δύο σημείων διαφορετικού δυναμικού μέσω μιας πολύ μικρής ωμικής αντίστασης, που έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την κυκλοφορία πολύ μεγάλου ρεύματος.

Τα σφάλματα διακρίνονται στις εξής τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με το χρόνο που απαιτεί η απαλοιφή τους:

1. Στα «παροδικά» σφάλματα, όπου για παράδειγμα σε ένα εναέριο δίκτυο, η μονωτική ικανότητα του ατμοσφαιρικού αέρα αποκαθίσταται άμεσα μετά την διακοπή του ηλεκτρικού τόξου που δημιουργείται από την διάσταση του αέρα.
2. Στα «αυτοαποσβενύμενα» σφάλματα, τα οποία χαρακτηρίζονται και ως βλάβες όπου είναι περιττή η διακοπή της τάσης, καθώς τα σφάλματα σβένουν από μόνα τους.
3. Στα «ημιμόνιμα» σφάλματα, τα οποία οφείλονται σε εξωτερικές βλάβες του δικτύου, όπως το να πέσει στις γραμμές κάποιο αντικείμενο το οποίο να διακόψει την τάση για κάποια δευτερόλεπτα.
4. Στα «μόνιμα» σφάλματα, κατά τα οποία η ανθρώπινη παρέμβαση κρίνεται απαραίτητη (π.χ. αντικατάσταση μονωτήρα, μετακίνηση αντικειμένου).

Παρ' όλα αυτά σε κάθε περίπτωση από τις παραπάνω, το σημείο όπου εντοπίζεται η βλάβη, πρέπει να απομονώνεται το ταχύτερο δυνατό. Με αυτό τον τρόπο, περιορίζεται το σφάλμα, ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις στο υπόλοιπο σύστημα και αποφεύγεται η δημιουργία επικίνδυνων καταστάσεων για ανθρώπους (π.χ. ηλεκτροπληξία) και πράγματα (π.χ. πυρκαγιά).

Έτσι, η «προστασία» ενός ηλεκτρικού συστήματος έχει ως στόχο την πρόληψη των σφαλμάτων ή στην περίπτωση που αυτό συμβεί τον άμεσο περιορισμό του. Αυτό επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο συνδυασμό Η/Ν, διακοπών ισχύος, ασφαλειών και διαφόρων βοηθητικών στοιχείων (π.χ. Μ/Σ). Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, στην συνέχεια παρουσιάζονται πιο αναλυτικά τέτοιες διατάξεις και στοιχεία προστασίας.

### 5.1.2 Βασικές αρχές και στοιχεία προστασίας

Για να διαμορφωθεί η βέλτιστη προστασία μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη επιλογή του σχήματος της διάταξης των Η/Ν, καθώς και η τοποθέτηση των ιδανικών διακοπών ισχύος, που θα φέρουν την ικανότητα διακοπής εντάσεων βραχυκυκλωμάτων, κανονικής λειτουργίας κλπ.

Τα κυριότερα ποιοτικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου συστήματος προστασίας είναι τα ακόλουθα:

- Η αξιοπιστία της διάταξης, η οποία είναι μεγάλης σημασίας, αφού η μη ορθή λειτουργία της προστασίας συνήθως προκαλεί ζημιές πολλαπλάσιες του κόστους της.
- Η επιλογικότητα, που σχετίζεται με την ικανότητα ενός συστήματος προστασίας να «επιλέγει» πότε πρέπει και πότε όχι να λειτουργήσει, καθώς και πότε πρέπει να ενεργοποιηθεί αν απαιτείται μια ορισμένη χρονική καθυστέρηση. Με άλλα λόγια, η επιλογική λειτουργία της προστασίας είναι αυτή που εξασφαλίζει την απομόνωση μόνο του τμήματος του δικτύου που έχει υποστεί βλάβη.
- Η ταχύτητα λειτουργίας, η οποία καθορίζει πρακτικά το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την εμφάνιση του σφάλματος ως την ενεργοποίηση του κοντινότερου αρμόδιου Η/Ν.

Τα συστήματα προστασίας εκτός από λειτουργικά πρέπει να είναι ταυτόχρονα και οικονομικά. Για το λόγο αυτό εκτιμάται η συνολική δαπάνη της προστασίας, η οποία περιλαμβάνει το κόστος προμήθειας του εξοπλισμού, το κόστος εγκατάστασης και το κόστος συντήρησης.

Αξίζει να σημειωθεί πως συνήθως το συνολικό κόστος των συστημάτων προστασίας είναι εξαιρετικά μικρό, συγκριτικά με την αξία των προστατευόμενων μηχανημάτων (0.5 - 2%). Επομένως, το βασικότερο κριτήριο επιλογής των διατάξεων αυτών γίνεται με την εξασφάλιση της απαιτούμενης προστασίας του εκάστοτε ηλεκτρικού συστήματος που μελετάται.

Κατά τη διάρκεια εξέλιξης ενός σφάλματος τα ηλεκτρικά μεγέθη της συχνότητας, της έντασης και της τάσης επηρεάζονται σημαντικά, αφού το σφάλμα επεκτείνεται γρήγορα. Οι Η/Ν του συστήματος προστασίας όμως, λειτουργούν έτσι ώστε να απομονωθεί μόνο εκείνο το μέρος του δικτύου όπου παρουσιάζεται η βλάβη. Διαφορετικά, υπάρχει κίνδυνος απομόνωσης «υγιών» τμημάτων του δικτύου, γεγονός που μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες στην ηλεκτροδότηση περισσότερων των καταναλωτών.

### 5.1.3 Διάκριση ειδών σφαλμάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

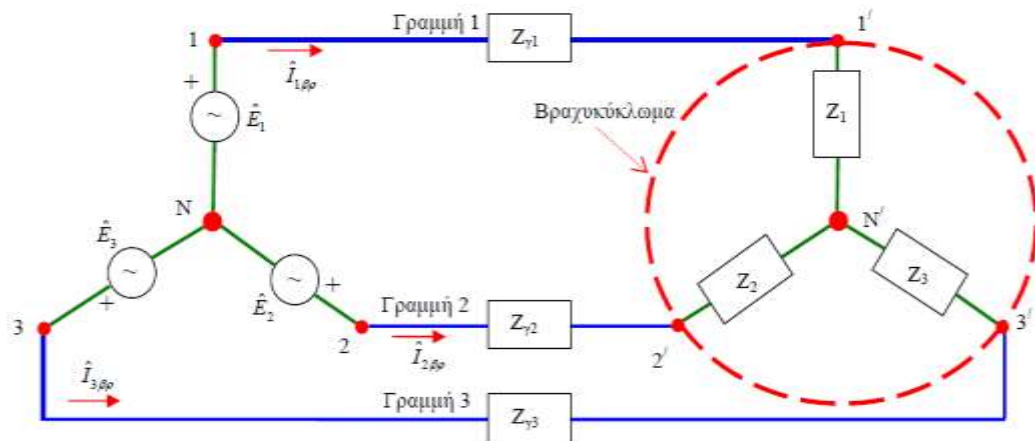
Τα δύο βασικότερα σφάλματα που παρατηρούνται σε τριφασικά συστήματα είναι συγκεκριμένα:

1. Τα βραχυκυκλώματα μεταξύ αγωγών ή αγωγού και γης.
2. Τα ανοικτοκυκλώματα, όπου διακόπτεται η παροχή ρεύματος σε μια ή και σε περισσότερες φάσεις.

Πιο αναλυτικά, τα συνηθέστερα βραχυκυκλώματα που εμφανίζονται σε συνθήκες βλαβών είναι αρχικά, το τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη, το οποίο χαρακτηρίζεται και το πιο επικίνδυνο, καθώς και το μονοφασικό βραχυκύκλωμα με γη, που είναι και το πιο συνηθισμένο.

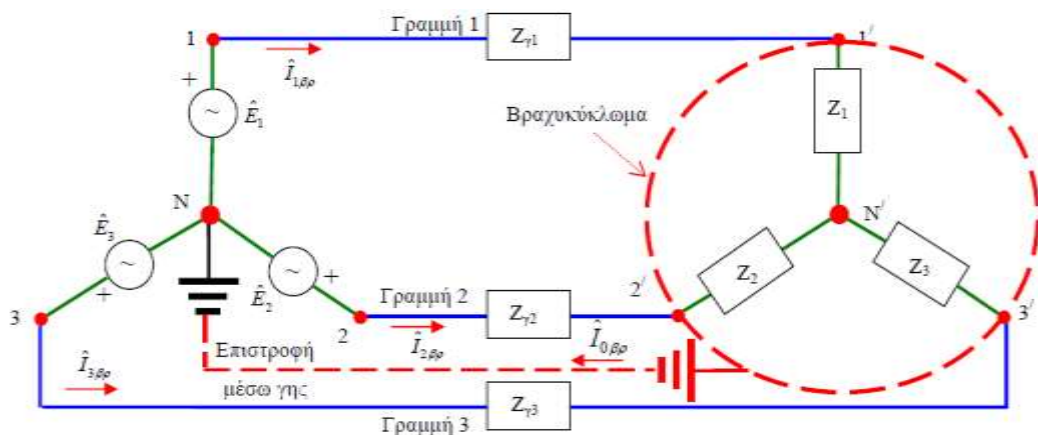
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τριφασικές διατάξεις, όπως αυτές διαμορφώνονται κατά τη διάρκεια των παραπάνω βραχυκυκλωμάτων, προκύπτει να υπολογιστούν οι μέγιστες τιμές των τάσεων και των ρευμάτων κάτω από τις συνθήκες αυτές.

Στην Εικόνα 5.1 φαίνεται αρχικά το τριφασικό βραχυκύκλωμα ενός τριφασικού συστήματος (Y-Y) με τροφοδοσία και φορτίο συνδεδεμένα σε αστέρα, αλλά χωρίς τον ουδέτερο αγωγό  $N'N$ . Στην περίπτωση αυτή, εξουδετερώνονται οι σύνθετες αντιστάσεις φορτίου  $Z_1, Z_2, Z_3$  και ουσιαστικά διαμορφώνεται ένας νέος κοινός κόμβος με μοναδικά φορτία τις σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς  $Z_{\gamma 1}, Z_{\gamma 2}, Z_{\gamma 3}$ .



Εικόνα 5.1 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα, φορτίου αστέρα χωρίς ουδέτερο αγωγό υπό συνθήκες τριφασικού βραχυκυκλώματος. [25]

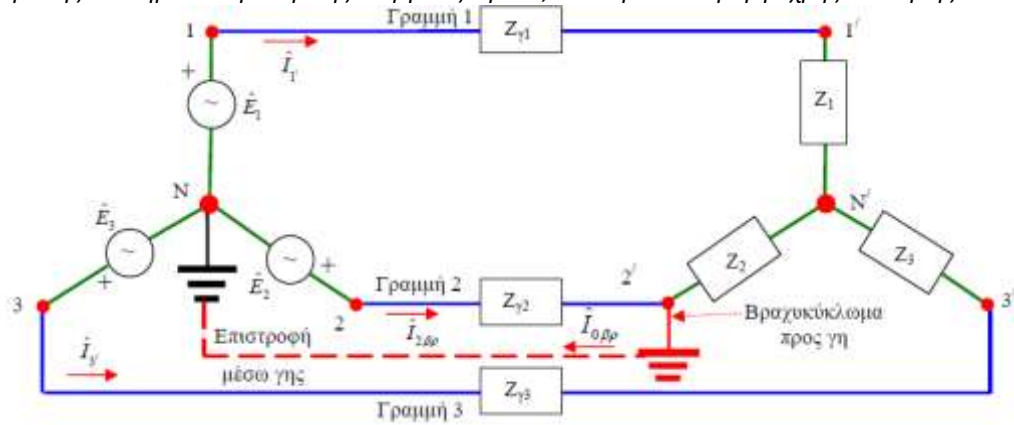
Στην περίπτωση όμως που ο ουδέτερος κόμβος  $N$  της τριφασικής πηγής είναι γειωμένος παρατηρείται η εξής διαφοροποίηση. Αν το σφάλμα γίνεται χωρίς γη, τότε ισχύει ότι αναφέρθηκε και για την περίπτωση της Εικόνας 5.1. Όταν όμως το ίδιο τριφασικό βραχυκύκλωμα γίνεται και προς γη, τότε παρατηρείται η διάταξη της Εικόνας 5.2, όπου μηδενίζεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των κόμβων  $N, 1', 2', 3'$  και αναπτύσσεται ταυτόχρονα ένα ρεύμα επιστροφής  $\hat{I}_{0\beta\rho}$  μέσω της γης.



Εικόνα 5.2 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα με γειωμένο τον ουδέτερο κόμβο, φορτίου αστέρα χωρίς ουδέτερο αγωγό υπό συνθήκες τριφασικού βραχυκυκλώματος με γη. [25]

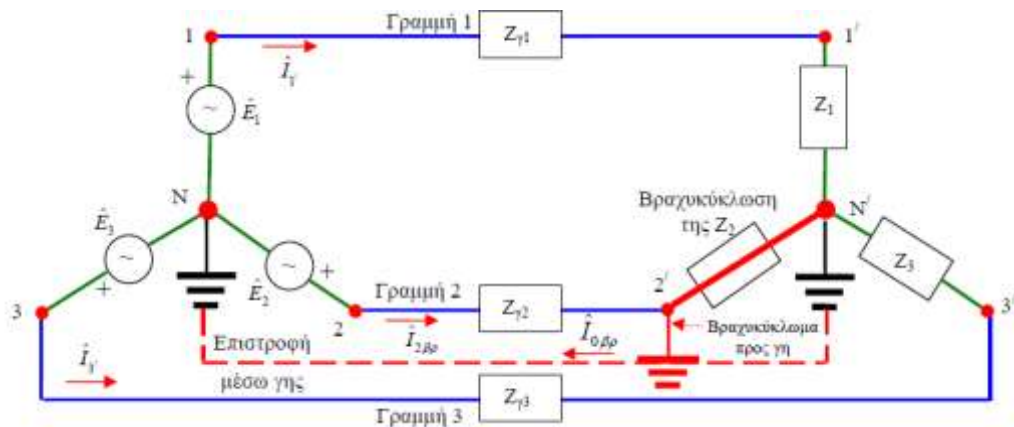
Στην συνέχεια παρουσιάζεται η τριφασική διάταξη κατά την διάρκεια ενός μονοφασικού βραχυκυκλώματος προς γη. Πιο συγκεκριμένα διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις. Αρχικά στην Εικόνα 5.3, όπου ο ουδέτερος κόμβος της πηγής  $N$  είναι γειωμένος, παρατηρείται διαρροή ρεύματος προς τον κόμβο  $N$  κατά την διάρκεια βραχυκυκλώματος.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



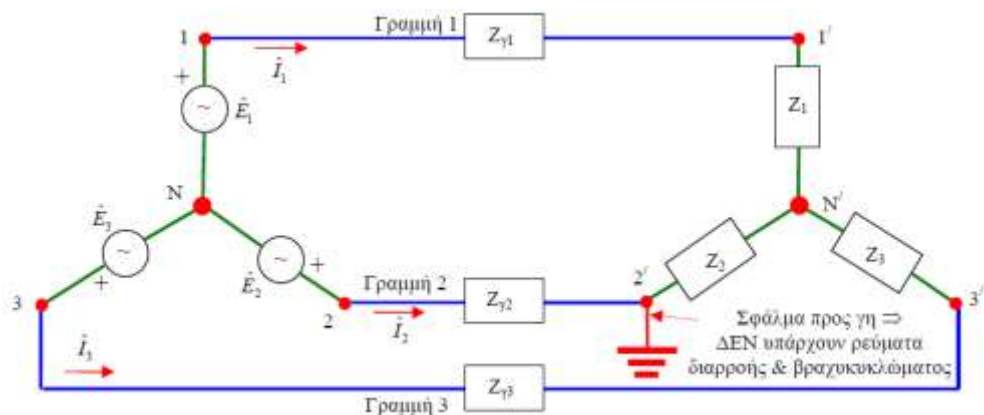
Εικόνα 5.3 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα με γειωμένο τον ουδέτερο κόμβο, φορτίου αστέρα χωρίς ουδέτερο αγωγό υπό συνθήκες μονοφασικού βραχυκυκλώματος με γη. [25]

Στην περίπτωση όμως που ο ουδέτερος κόμβος είναι γειωμένος, τότε αυτόματα εξουδετερώνεται πλήρως η αντίσταση της βραχυκυκλωμένης φάσης, όπως φαίνεται και στη διάταξη της Εικόνας 5.4.



Εικόνα 5.4 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα με γειωμένο τον ουδέτερο κόμβο, φορτίου αστέρα με γειωμένο τον ουδέτερο αγωγό υπό συνθήκες μονοφασικού βραχυκυκλώματος με γη. [25]

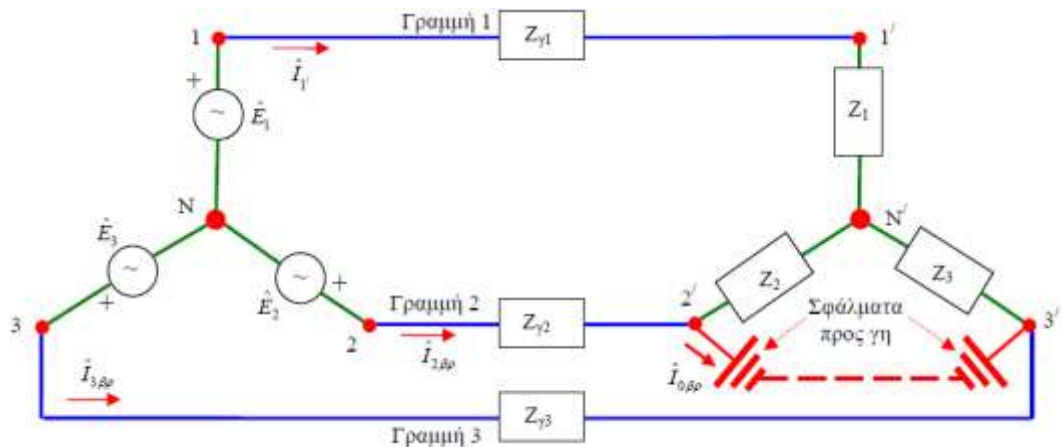
Αντίθετα στην Εικόνα 5.5, όπου δεν είναι γειωμένος κανένας κόμβος αστέρα, δεν «κλείνει» κανένα κύκλωμα και το βραχυκύκλωμα δεν προκαλεί καμία διαρροή ρεύματος.



Εικόνα 5.5 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής, φορτίου αστέρα με γειωμένους τους κόμβους αστέρα υπό συνθήκες μονοφασικού βραχυκυκλώματος με γη. [25]



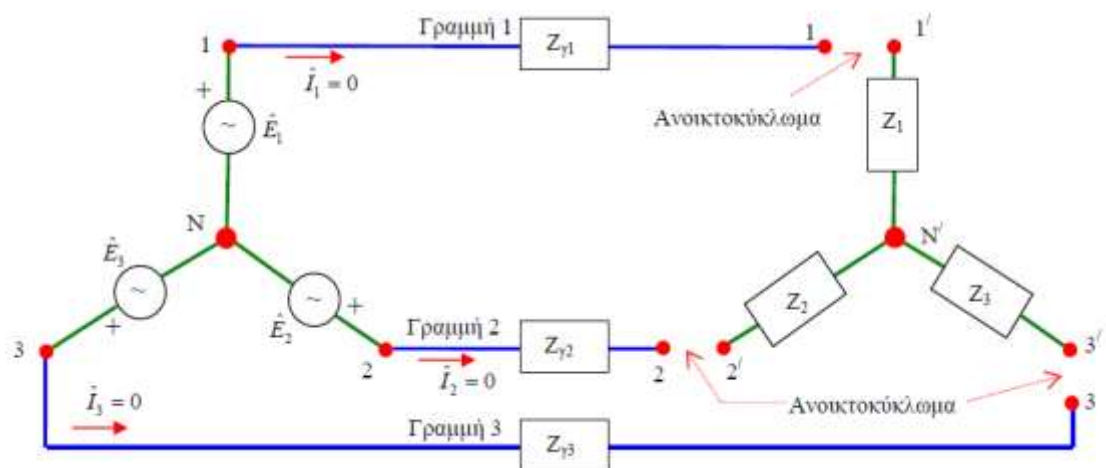
Η παραπάνω διάταξη αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα των αγείωτων συστημάτων και βρίσκει εφαρμογή σε δίκτυα πολλών ειδών πλοίων. Βέβαια είναι γεγονός πως τα αγείωτα αυτά δίκτυα απαιτούν συνεχή επιτήρηση, ώστε να ελαχιστοποιείται όσο το δυνατόν το ενδεχόμενο ένα μονοφασικό σφάλμα που προκαλείται να εξελιχτεί σε διφασικό βραχυκύκλωμα. Τα διφασικά αυτά βραχυκυκλώματα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.6 είναι πολύ πιο σύνθετα από τα μονοφασικά και η αντιμετώπιση τους χαρακτηρίζεται αισθητά δυσκολότερη.



Εικόνα 5.6 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα, φορτίου αστέρα με αγείωτους τους κόμβους αστέρα υπό συνθήκες δύο μονοφασικών σφαλμάτων προς γη που προκαλούν ένα διφασικό βραχυκύκλωμα με γη. [25]

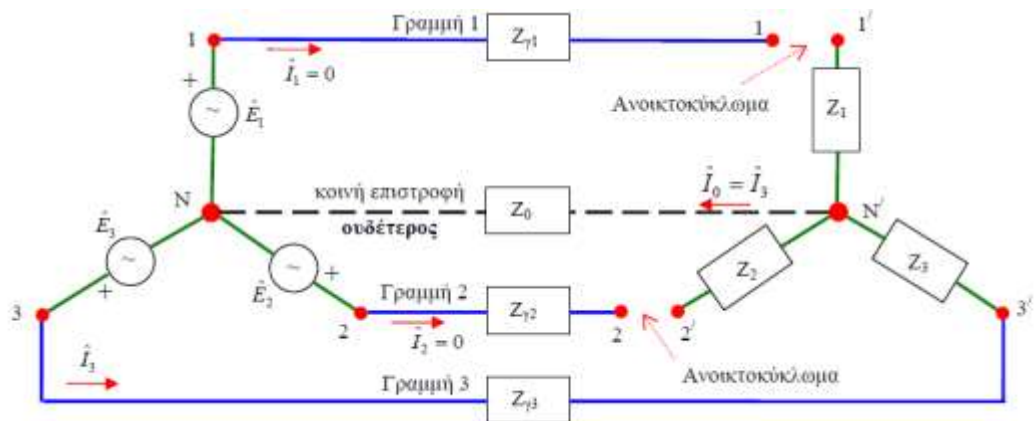
Αντίστοιχα και στην περίπτωση των ανοικτοκυκλωμάτων διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες:

- Το τριφασικό ανοικτοκύκλωμα το οποίο αξίζει να μελετηθεί μόνο όταν υπάρχουν ζεύξεις ως προς γη, διότι διαφορετικά δεν ρέει ρεύμα εντός του κυκλώματος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.7.



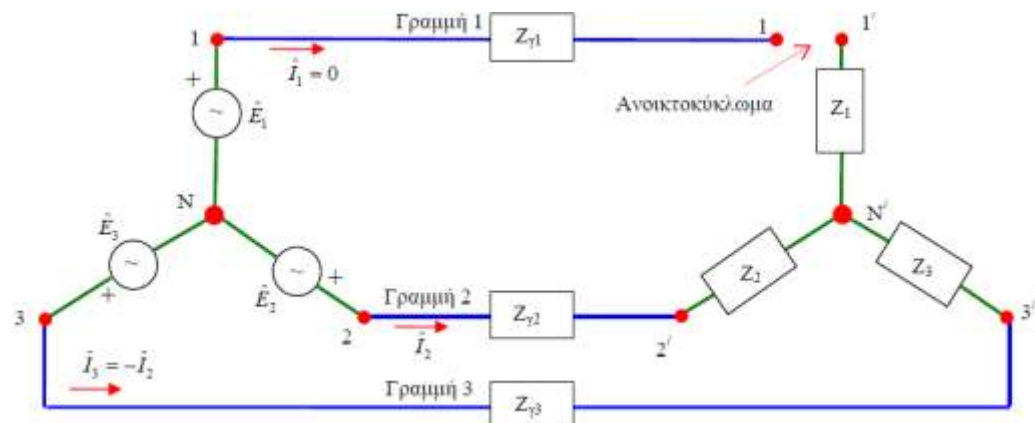
Εικόνα 5.7 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα, φορτίου αστέρα με αγείωτους τους κόμβους αστέρα υπό συνθήκες ανοικτοκύκλωσης όλων των φάσεων. Η ύπαρξη του αγωγού  $N'N$  δεν επηρεάζει τη ροή του ρεύματος. [25]

- Το διφασικό ανοικτοκύκλωμα, στο οποίο υπάρχει ροή ρεύματος εντός του κυκλώματος, αν υπάρχει και ουδέτερος αγωγός, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα, φορτίου αστέρα με αγείωτους τους κόμβους αστέρα, αλλά με ύπαρξη ουδέτερου αγωγού υπό συνθήκες ανοικτοκύκλωσης δύο φάσεων. [25]

- Το μονοφασικό ανοικτοκύκλωμα, το οποίο είναι και σε αυτή την περίπτωση το πιο συνηθισμένο σφάλμα και η διάταξη του φαίνεται στην Εικόνα 5.9.



Εικόνα 5.9 : Αλληλένδετο τριφασικό σύστημα συνδεσμολογίας πηγής αστέρα, φορτίου αστέρα με αγείωτους τους κόμβους αστέρα υπό συνθήκες ανοικτοκύκλωσης μίας φάσης. [25]

Γενικά, η μεγαλύτερη προσοχή κατά τη μελέτη των ανοικτοκυκλωμάτων πρέπει να δοθεί στον προσδιορισμό των τάσεων στους διαφόρους ακροδέκτες. Για παράδειγμα στο κύκλωμα της Εικόνας 5.9 η αναπτυσσόμενη τάση στους ακροδέκτες  $1'$  και  $2'$  ισούται με:

$$\hat{V}_{1'N} = \hat{V}_{2'N} = \hat{V}_{N'N} = \widehat{I_0} * Z_0 = \frac{\hat{E}_3}{Z_{\gamma 3} + Z_3 + Z_0} * Z_0 \quad (\text{Σχέση : 5.1}).$$

$$\text{Όπου, } \hat{I}_3 = \hat{I}_0 = \frac{\hat{E}_3}{Z_{\gamma 3} + Z_3 + Z_0} \quad (\text{Σχέση : 5.2})$$

Ενώ οι τάσεις των ακροδεκτών  $1$  και  $2$  είναι αντίστοιχα ίσες με:

$$\hat{V}_{1N} = \hat{E}_1 \quad (\text{Σχέση : 5.3}) \quad \text{και} \quad \hat{V}_{2N} = \hat{E}_2 \quad (\text{Σχέση : 5.4})$$

Πιο συγκεκριμένα και στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει ουδέτερος αγωγός, τα ρεύματα είναι όλα μηδενικά, αλλά υπάρχουν οι τάσεις:

$$\hat{V}_{1N} = \hat{E}_1, \hat{V}_{2N} = \hat{E}_2, \hat{V}_{1'N} = \hat{V}_{2'N} = \hat{E}_3 \text{ (Σχέση : 5.5)}$$

Έτσι μεταξύ των ακροδεκτών 1 και 1' ή 2 και 2' αναπτύσσονται ουσιαστικά οι πολικές τάσεις έναντι των φασικών που είναι  $\sqrt{3}$  φορές μικρότερες. Επομένως, εξαιτίας τέτοιων καταστάσεων, όπου παρατηρείται η ανάπτυξη μη αναμενόμενων τάσεων στους διάφορους ακροδέκτες, πρέπει να δίνεται προσοχή στα ανοικτοκυκλώματα και αν είναι αναγκαίο να απομονώνονται πλήρως τα εμπλεκόμενα φορτία.

## 5.2 Συμμετρικά βραχυκυκλώματα

### 5.2.1 Εισαγωγή

Μια ιδιαίτερη περίπτωση των ανώμαλων μεταβατικών καταστάσεων, που προαναφέρθηκαν, είναι τα συμμετρικά βραχυκυκλώματα. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα, όταν λόγω βλάβης σε κάποιο σημείο του συστήματος έρθουν σε επαφή και οι τρεις φάσεις μεταξύ τους. Πέρα από τα συμμετρικά ή αλλιώς τριφασικά βραχυκυκλώματα, που είναι και τα πιο επικίνδυνα, υπάρχουν και τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα, όπως είναι τα διφασικά και τα μονοφασικά. Τα τελευταία είναι και τα πιο συνηθισμένα.

Τα πιο «ανώδυνα» βραχυκυκλώματα συναντώνται στα εκτεθειμένα μέρη του δικτύου, όπως στις εναέριες γραμμές ή στους ακροδέκτες του εξοπλισμού. Αντίθετα, τα πιο σπάνια σφάλματα παρατηρούνται στο εσωτερικό μιας συσκευής, όπως σε έναν Μ/Σ ή εντός ενός καλωδίου και είναι εκείνα που χαρακτηρίζονται ως τα πιο καταστροφικά.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα βραχυκυκλώματα είναι μεταβατικά φαινόμενα ηλεκτρικής φύσεως και δυναμικής μορφής. Σε αντίθεση με τις υπερτάσεις, οι οποίες είναι μεταβατικά φαινόμενα διηλεκτρικής μορφής, τα βραχυκυκλώματα διαμορφώνονται ουσιαστικά από τη μαγνητική αντίδραση και αλληλεπίδραση των τυλιγμάτων των γεννητριών.

Ο στιγμιαίος μηδενισμός ή βύθιση της τάσεως σε όλο το δίκτυο παρατηρείται πάντα κατά την εξέλιξη ενός βραχυκυκλώματος, με διαφορετικό αντίκτυπο στο κάθε ζυγό. Η ξαφνική αυτή μείωση της τάσης μειώνει απότομα και την εξερχόμενη ισχύ των γεννητριών. Απόρροια της παραπάνω κατάστασης είναι πρακτικά η δημιουργία μιας προσωρινής περίσσειας κινητήριας ισχύος, η οποία επιταχύνει τη μηχανή και αυξάνει τους κινδύνους που σχετίζονται με την ευστάθεια λειτουργίας του συστήματος.

Γενικά οι υψηλές τιμές, που μπορεί να εκτοξευτεί η τάση κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος, προκαλούν μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις στον εξοπλισμό του συστήματος και εν τέλει τον καταστρέφουν, αν δεν αντιμετωπιστούν έγκαιρα. Την εξουδετέρωση των βραχυκυκλωμάτων αυτών, αναλαμβάνουν τα ανώτερα μέσα διακοπής και προστασίας του συστήματος. Καθοριστικό ρόλο για την επιλογή και τη διαμόρφωση τους παίζει ο υπολογισμός των μέγιστων ρευμάτων που παρατηρούνται σε συνθήκες βραχυκύκλωσης. Πιο συγκεκριμένα, η ικανότητα λειτουργίας των διακοπών ισχύος βασίζεται στη δυσμενέστερη περίπτωση βραχυκυκλώματος, ενώ το σύστημα προστασίας βασίζει τη λειτουργία του στο μέγεθος και τη φορά κατευθύνσεως των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

### 5.2.2 Συμπεριφορά ηλεκτρογεννήτριας σε συμμετρικό βραχυκύκλωμα

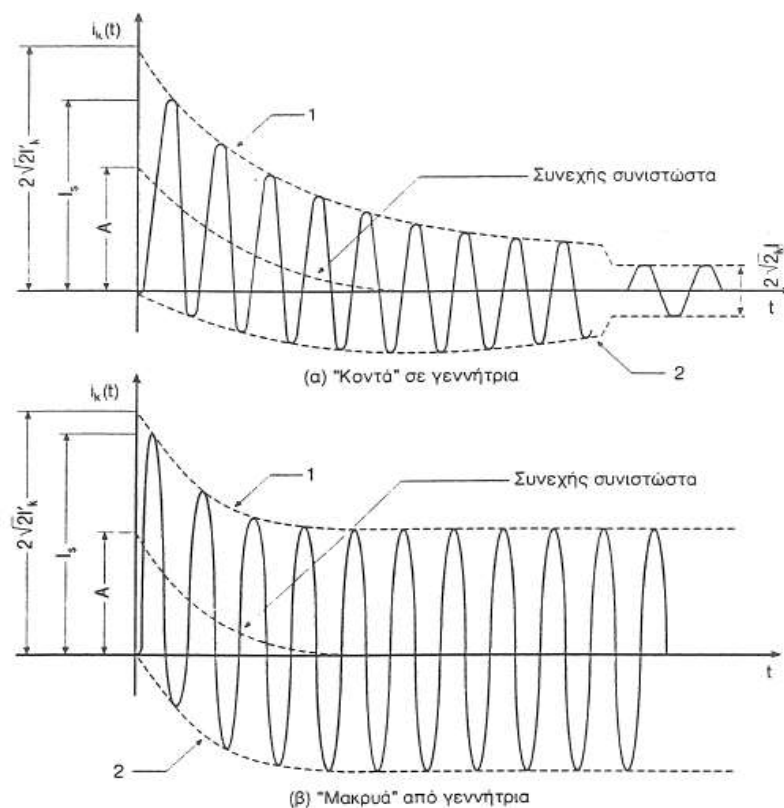
Στις εγκαταστάσεις πλοίων, όπως και σε όλες τις σύνθετες ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις οι γεννήτριες αποτελούν τις κύριες πηγές τροφοδοτήσεως των ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Για το λόγο αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια αυτών των ανωμαλιών του δικτύου.

Γενικά, η μελέτη των φαινομένων αυτών καταλήγει πρακτικά στη βέλτιστη και τελική διαστασιολόγηση των καλωδίων και των διακοπών προστασίας της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης. Πιο συγκεκριμένα, οι κύριοι παράγοντες που εξετάζονται είναι τα θερμικά όρια, η διακύμανση της πτώσης τάσης και τα ρεύματα βραχυκύκλωσης των καλωδίων.

Το ρεύμα μιας σύγχρονης μηχανής (γεννήτριας) αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα, λίγα δευτερόλεπτα αργότερα και κατά τη διάρκεια της μόνιμης κατάστασης βραχυκύκλωσης, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, διαφέρει σημαντικά, λόγω της μεταβαλλόμενης επίδρασης του ρεύματος τυμπάνου στη ροή της μηχανής.

Διακρίνονται συγκεκριμένα δύο είδη βραχυκυκλωμάτων που σχετίζονται με μια γεννήτρια:

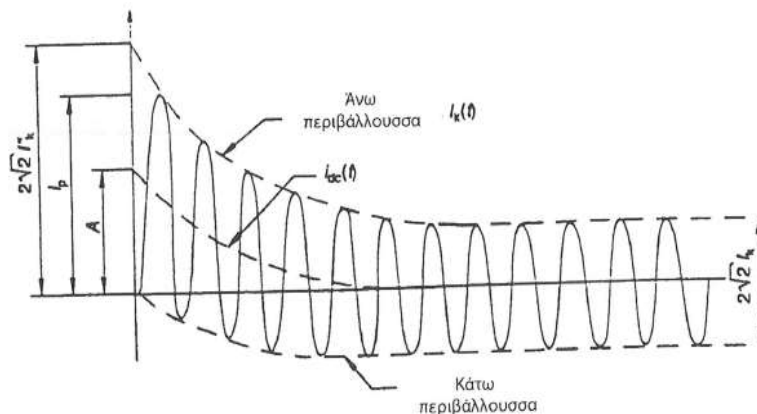
1. «Κοντά» στη σύγχρονη γεννήτρια.
2. «Μακριά» από τη σύγχρονη γεννήτρια ή άλλες στρεφόμενες μηχανές.



Εικόνα 5.10 : Μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης όταν η στιγμιαία τιμή της τάσεως έχει μηδενική τιμή α) Κοντά , β) Μακριά από τη γεννήτρια. [21]

Σύμφωνα με την Εικόνα 5.10 το ρεύμα βραχυκύκλωσης της γεννήτριας αποτελείται από δύο συνιστώσες, μια εναλλασσόμενη και μια συνεχή. Με τη διαφορά πως στην περίπτωση που το φαινόμενο εξελίσσεται κοντά στη γεννήτρια η ενδεικνυόμενη τιμή της εναλλασσόμενης συνιστώσας βαθμιαία ελαττώνεται.

Ενώ στη δεύτερη περίπτωση όπου το βραχυκύκλωμα συμβαίνει μακριά, η εναλλασσόμενη συνιστώσα παραμένει σταθερή.



Εικόνα 5.11 : Τυπική κυματομορφή ρεύματος βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής. [2]

Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικότερα η μελέτη που σχετίζεται με την περίπτωση βραχυκυκλώματος κοντά σε μια σύγχρονη μηχανή που χαρακτηρίζει, εν γένει, όλες τις περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων.

Από την Εικόνα 5.11 προκύπτουν οι ακόλουθοι ορισμοί των ρευμάτων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του φαινομένου:

- $i_k(t)$  : Το συνολικό ρεύμα που ρέει κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος.
- $I_k''$  : Αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ή «υπομεταβατικό» ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι η τιμή του  $i_k(t)$  κατά την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος.
- $I_P$  : Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι η μέγιστη στιγμιαία τιμή του  $i_k(t)$ .
- $I_{ac} - I_k$  : Ρεύμα βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης ή εναλλασσόμενη συνιστώσα είναι η ενδεικνυόμενη τιμή του  $i_k(t)$  που παραμένει μετά την απόσβεση των μεταβατικών φαινομένων.
- $I_{dc}$  : Αποσβεννύμενη μη περιοδική συνιστώσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης.
- $A$  : Αρχική τιμή της μη περιοδικής συνιστώσας.

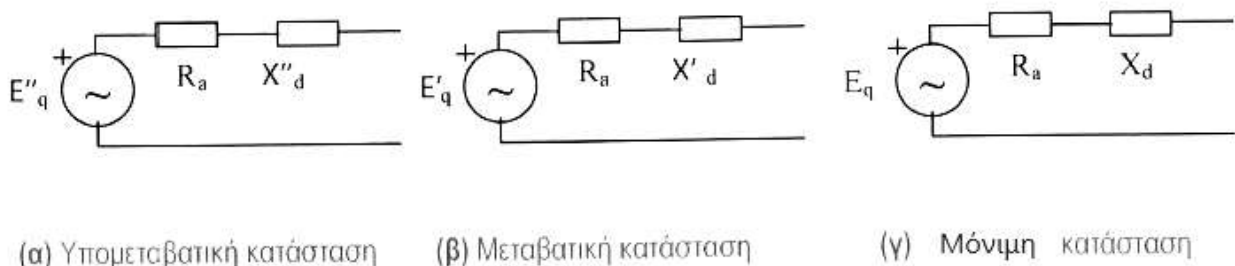
Αρχικά να σημειωθεί πως όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.11 η συνιστώσα Σ.Ρ. ( $I_{dc}$ ) είναι υπεύθυνη για την ασυμμετρία της κυματομορφής ως προς τον άξονα των χρόνων, καθώς σχετίζεται με τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Ο ρόλος της είναι ιδιαίτερα σημαντικός κατά την έναρξη του βραχυκυκλώματος και γι' αυτό δεν γίνεται να αμεληθεί στις μελέτες διαστασιολόγησης των χαρακτηριστικών των καλωδίων και των διακοπτικών στοιχείων. Η χρονική σταθερά απόσβεσης της συμβολίζεται με  $T_{dc}$ .

Η συνιστώσα Ε.Ρ. ( $I_k$ ) από την άλλη, η οποία είναι η κύρια συνιστώσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης, μεταβάλλεται (μειώνεται) χρονικά, κυρίως λόγω των «αποσβέσεων» που προκαλούνται στα επιμέρους τμήματα της μηχανής. Πιο συγκεκριμένα, τα επαγωγικά στοιχεία της μηχανής αποκαθίστανται αρχικά από τις πολύ χαμηλές τιμές τους, στις τελικές τιμές «μόνιμης κατάστασης».

Έτσι διακρίνονται τα εξής επιμέρους χρονικά διαστήματα:

- Η υπομεταβατική κατάσταση: Όπου η μηχανή εμφανίζει τις ελάχιστες δυνατές επαγωγικές αντιδράσεις του ευθύ και του εγκάρσιου άξονα,  $X''_d$  και  $X''_q$  αντίστοιχα. Στις αντιδράσεις αυτές συμμετέχουν κυρίως οι αντιδράσεις του τυμπάνου, του τυλίγματος διέγερσης και κυρίως των τυλιγμάτων αποσβέσεως. Η χρονική αυτή κατάσταση καθορίζεται από τις σταθερές χρόνου,  $T''_d$  και  $T''_q$  αντίστοιχα, και ισούνται περίπου με 2-5 κύκλους (40–100ms για 50Hz). Ιδιαίτερα έντονη σε αυτήν τη φάση είναι η συνιστώσα Σ.Ρ..
- Η μεταβατική κατάσταση: Όπου η μηχανή εμφανίζει μεγαλύτερες επαγωγικές αντιδράσεις του ευθύ και του εγκάρσιου άξονα,  $X'_d$  και  $X'_q$  αντίστοιχα. Στις αντιδράσεις αυτές συμμετέχουν οι αντιδράσεις τυμπάνου και οι αντιδράσεις του τυλίγματος διέγερσης. Η χρονική αυτή κατάσταση καθορίζεται από τις σταθερές χρόνου,  $T'_d$  και  $T'_q$  αντίστοιχα, και ισούνται περίπου με 10-15 κύκλους (200–300ms για 50Hz). Εδώ η συνιστώσα Σ.Ρ. προοδευτικά μηδενίζεται.
- Η μόνιμη κατάσταση βραχυκύκλωσης: Όπου η μηχανή εμφανίζει τις σύγχρονες επαγωγικές αντιδράσεις μόνιμης κατάστασης του ευθύ και του εγκάρσιου άξονα,  $X_d$  και  $X_q$  αντίστοιχα. Στις αντιδράσεις αυτές συμμετέχουν οι αντιδράσεις τυμπάνου και οι αντιδράσεις του τυλίγματος διέγερσης. Η χρονική αυτή κατάσταση καθορίζεται από τις σταθερές χρόνου,  $T_d$  και  $T_q$  αντίστοιχα και διαρκεί όσο υφίσταται και το βραχυκύκλωμα.

Γενικά ισχύει:  $X''_d < X'_d < X_d$  (Σχέση 5.6)



Εικόνα 5.12 : Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας σε βραχυκύκλωμα. [2]

Επιπλέον είναι γνωστό πως οι επαγωγικές αντιδράσεις του εγκάρσιου άξονα της γεννήτριας είναι ίσες με αυτές της μόνιμης κατάστασης βραχυκύκλωσης, γιατί δεν υπάρχει τυλίγμα διεγέρσεως κατά τον εγκάρσιο άξονα, ενώ παρατηρούνται κανονικά τα τυλίγματα αποσβέσεως.

Άρα για τον εγκάρσιο άξονα ισχύει:  $X''_q < X'_q = X_q$  (Σχέση 5.7)

Γενικά το βραχυκύκλωμα «κοντά» στις γεννήτριες έχει την έννοια της μη μεσολάβησης καλωδιώσεων μεγάλου μήκους, έτσι δεν μειώνεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης, οπότε εμφανίζονται όλες οι συνιστώσες του ρεύματος αυτού, με εμφανείς αποσβέσεις [Εικόνα 5.10 (α)]. Αντιθέτως στην περίπτωση των βραχυκυκλωμάτων «μακριά» από τις γεννήτριες, λόγω της παρεμβολής μεγάλων σύνθετων αντιστάσεων, εμφανίζονται τελικά μόνο οι συνιστώσες μεταβατικής και μόνιμης κατάστασης, χωρίς εμφανείς σταθερές χρόνους απόσβεσης [Εικόνα 5.10 (β)]. Στην περίπτωση των πλωτών εγκαταστάσεων τα βραχυκυκλώματα θεωρούνται ότι συμβαίνουν κοντά στις γεννήτριες, ενώ στις εγκαταστάσεις ξηράς συναντώνται και οι δύο περιπτώσεις.

Οι κυματομορφές του ρεύματος βραχυκύκλωσης της Εικόνας 5.11 δίνονται από τους ακόλουθους τύπους.

Για το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ισχύει:

$$i_k(t) = \sqrt{2} * I_{ac}(t) * \cos(\omega t + \theta_a) + i_{dc}(t) \quad (\text{Σχέση 5.8})$$

Η συνιστώσα Ε.Ρ. υπολογίζεται:

$$I_{ac}(t) = (I''_{kd} - I'_{kd}) * e^{-\frac{t}{T''_d}} + (I'_{kd} - I_k) * e^{-\frac{t}{T'_d}} + I_k \quad (\text{Σχέση 5.9})$$

Οι υπομεταβατικές και μεταβατικές αρχικές τιμές των τριφασικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης  $(I''_{kd}, I'_{kd})$  της Σχέσης 6.9, υπολογίζονται από τις ενεργές τιμές των τάσεων  $(E''_{qo}, E'_{qo})$  και τις αντίστοιχες σύνθετες αντιστάσεις  $(Z''_d, Z'_d)$  ως εξής:

$$I''_{kd} = \frac{E''_{qo}}{Z''_d} = \frac{E''_{qo}}{\sqrt{(R_a^2 + X''_d{}^2)}} \quad (\text{Σχέση 5.10})$$

$$I'_{kd} = \frac{E'_{qo}}{Z'_d} = \frac{E'_{qo}}{\sqrt{(R_a^2 + X'_d{}^2)}} \quad (\text{Σχέση 5.11})$$

Όπου  $R_a$  είναι η ωμική αντίσταση του τυμπάνου.

Ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης  $I_k$  είτε δίνεται από τον κατασκευαστή, είτε υπολογίζεται ομοίως από το τύπο:

$$I_k = \frac{E_{qo}}{Z_d} = \frac{E_{qo}}{\sqrt{(R_a^2 + X_d^2)}} \quad (\text{Σχέση 5.12})$$

Οι ενεργές τιμές των τάσεων  $(E''_{qo}, E'_{qo}, E_{qo})$  εξαρτώνται από το ρεύμα της γεννήτριας και το συντελεστή ισχύος  $\cos \varphi_o$  με διαφορά φάσης  $\varphi_o$  μεταξύ φασικής τάσης και ρεύματος πριν το βραχυκύκλωμα ως εξής:

$$E''_{qo} = \left[ \left( \frac{V_o}{\sqrt{3}} * \cos \varphi_o + R_a * I_o \right)^2 + \left( \frac{V_o}{\sqrt{3}} * \sin \varphi_o + X''_d * I_o \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Σχέση 5.13})$$

$$E'_{qo} = \left[ \left( \frac{V_o}{\sqrt{3}} * \cos \varphi_o + R_a * I_o \right)^2 + \left( \frac{V_o}{\sqrt{3}} * \sin \varphi_o + X'_d * I_o \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Σχέση 5.14})$$

$$E_{qo} = \left[ \left( \frac{V_o}{\sqrt{3}} * \cos \varphi_o + R_a * I_o \right)^2 + \left( \frac{V_o}{\sqrt{3}} * \sin \varphi_o + X_d * I_o \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Σχέση 5.15})$$

Στην περίπτωση που η γεννήτρια δούλευε στο ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας  $I_n$  και στην ονομαστική τάση δικτύου  $V_n$  πριν το βραχυκύκλωμα, τότε ισχύει:

$$I_o = I_n = \frac{V_n^2}{S_n} \quad \text{και} \quad V_o = V_n \quad (\text{Σχέση 5.16})$$

Η συνιστώσα Σ.Ρ. της Σχέσης 6.8 υπολογίζεται:

$$i_{dc}(t) = \sqrt{2} * (I''_{kd} - I_o * \sin \varphi_o) * e^{-\frac{t}{T_{dc}}} \quad (\text{Σχέση 5.17})$$

Έτσι η τελική κρουστική τιμή  $I_p$  της πλήρους συνάρτησης  $i_k(t)$  εμφανίζεται μεταξύ των οριακών τιμών της συνάρτησης για  $[t = 0 \text{ sec}]$  και  $[t = \frac{T}{2} = 0.01 \text{ sec (για 50Hz)}]$  κατά την εξέλιξη του βραχυκυκλώματος.

Γενικά, προκειμένου να υπάρχει μια κοινή τυποποίηση των τιμών των επαγωγικών αντιδράσεων που εμπλέκονται σε κάθε περίπτωση, συνηθίζεται αυτές να δίνονται εκφρασμένες στο ανά μονάδα σύστημα, ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά της κάθε γεννήτριας που μελετάται.

Έτσι κατά την αντικατάσταση αξιοποιείται ο ακόλουθος τύπος προκειμένου η ανά μονάδα αντίδραση να είναι εκφρασμένη σε (Ohm):

$$X''_d(\Omega) = X''_{d-\alpha\mu} * \frac{V_N^2}{S_N} \quad (\text{Σχέση 5.18})$$

Οι ενδεικτικές τιμές για τις σύγχρονες μηχανές στο ανά μονάδα σύστημα είναι κυρίως:

- $X''_d = 10 - 20 \%$  (υπομεταβατική κατάσταση)
- $X'_d = 20 - 30 \%$  (μεταβατική κατάσταση)
- $X_d = 150 - 200\%$  (αντίδραση μόνιμης κατάστασης)

Στην περίπτωση σύγχρονης μηχανής με παθητικά στοιχεία η σύνθετη αντίσταση του καλωδίου από την γεννήτρια μέχρι το ζυγό, είναι:  $Z_c = (R_c + jX_c) * \ell$  (Σχέση 5.19)

Όπου το  $\ell$  είναι το μήκος (m) καλωδίου και πρέπει να συμπεριληφθεί στους παραπάνω υπολογισμούς, η  $R_c$  είναι η ωμική αντίσταση καλωδίου ανά μονάδα μήκους και η  $X_c$  είναι η επαγωγική αντίδραση καλωδίου ανά μονάδα μήκους.

Έτσι σε όλους τους παραπάνω τύπους τα  $(Z''_d, Z'_d)$  πρέπει τελικά να αντικατασταθούν με τις συνολικές αντιστάσεις  $(Z''_e, Z'_e)$  οι οποίες υπολογίζονται ως εξής:

$$Z''_e = \sqrt{(R_a + R_c)^2 + (X''_d + X_c)^2} \quad (\text{Σχέση 5.20})$$

$$Z'_e = \sqrt{(R_a + R_c)^2 + (X'_d + X_c)^2} \quad (\text{Σχέση 5.21})$$

Οι τελικές χρονικές σταθερές, που θα αντικατασταθούν στις Σχέσεις 5.9 και 5.17 θα προκύψουν αντίστοιχα από τους ακόλουθους τύπους:

- Για τη συνιστώσα Ε.Ρ.:

$$T''_{ed} = \frac{[(R_a + R_c)^2 + (X''_d + X_c)^2] * X'_d * T''_d}{[(R_a + R_c)^2 + (X''_d + X_c) * (X'_d + X_c)] * X''_d} \quad (\text{Σχέση 5.22})$$

$$T'_{ed} = \frac{[(R_a + R_c)^2 + (X'_d + X_c)^2] * X_d * T'_d}{[(R_a + R_c)^2 + (X'_d + X_c) * (X_d + X_c)] * X'_d} \quad (\text{Σχέση 5.23})$$



- Για τη συνιστώσα Σ.Ρ.:

$$T_{dce} = \frac{X_d'' + X}{2\pi f (R_a + R_c)} \quad (\text{Σχέση 5.24})$$

Οι ενδεικτικές τιμές των αρχικών χρονικών σταθερών για τις σύγχρονες μηχανές είναι κυρίως:

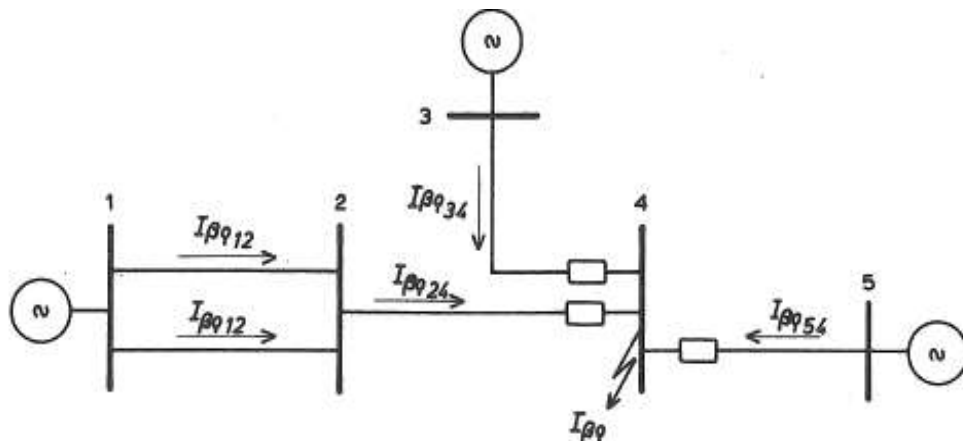
- $T_d'' = 30 - 40 \text{ ms}$  (υπομεταβατική κατάσταση)
- $T_d' = 300 - 500 \text{ ms}$  (μεταβατική κατάσταση)
- $T_d = 1 - 3 \text{ sec}$  (μόνιμη κατάσταση)

Ακολουθώντας έτσι την παραπάνω διαδικασία προκύπτουν με σχετικά μεγάλη ακρίβεια τα κρουστικά ρεύματα βραχυκύκλωσης για  $(t = 0)$  και  $(t = T/2)$ , τα οποία καθορίζουν τα χαρακτηριστικά των διακοπών της εγκατάστασης που συνδέεται η γεννήτρια, όπως και τα όρια της μηχανικής αντοχής των ζυγών της.

### 5.2.3 Βραχυκυκλώματα Δικτύου

Στην περίπτωση που εξελιχθεί ένα βραχυκύκλωμα σε ένα σημείο ενός δικτύου αυτό θα προκαλέσει αυτομάτως μηδενισμό της τάσεως στο σημείο εκείνο και βύθιση της τάσεως κατά μήκος όλου του δικτύου. Αυτό συμβαίνει, γιατί κάθε πηγή του συστήματος, προς την οποία ήταν συνδεδεμένο το σημείο του σφάλματος, θα τροφοδοτήσει με τη σειρά της το βραχυκύκλωμα.

Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 5.13 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα βραχυκύκλωσης δικτύου. Όπως φαίνεται το σφάλμα παρατηρείται στον ζυγό (4), όπου και μηδενίζεται η τάση, ενώ στους άλλους ζυγούς η τάση μειώνεται τόσο λιγότερο, όσο «ισχυρότερος» είναι ο κάθε ζυγός.



Εικόνα 5.13 : Ροή ρευμάτων βραχυκύκλωσης προς το σημείο του σφάλματος. [21]

Το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{\beta\rho}$  αποτελείται από το άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων των ζυγών του δικτύου, καθώς αυτά ρέουν προς το σφάλμα από κάθε κατεύθυνση στην οποία υπάρχει πηγή. Τα ρεύματα βραχυκύκλωσης έχουν, γενικά τιμές πολλαπλάσιες από τα συνήθη ρεύματα φορτίων και ο προσδιορισμός τους είναι αναγκαίος τόσο για τη σχεδίαση, όσο και για τη λειτουργία του συστήματος. Στόχος βέβαια του συστήματος προστασίας του δικτύου είναι η άμεση απομόνωση του βραχυκυκλώματος, ώστε να περιοριστούν τα ρεύματα αυτά στον εκάστοτε ζυγό.

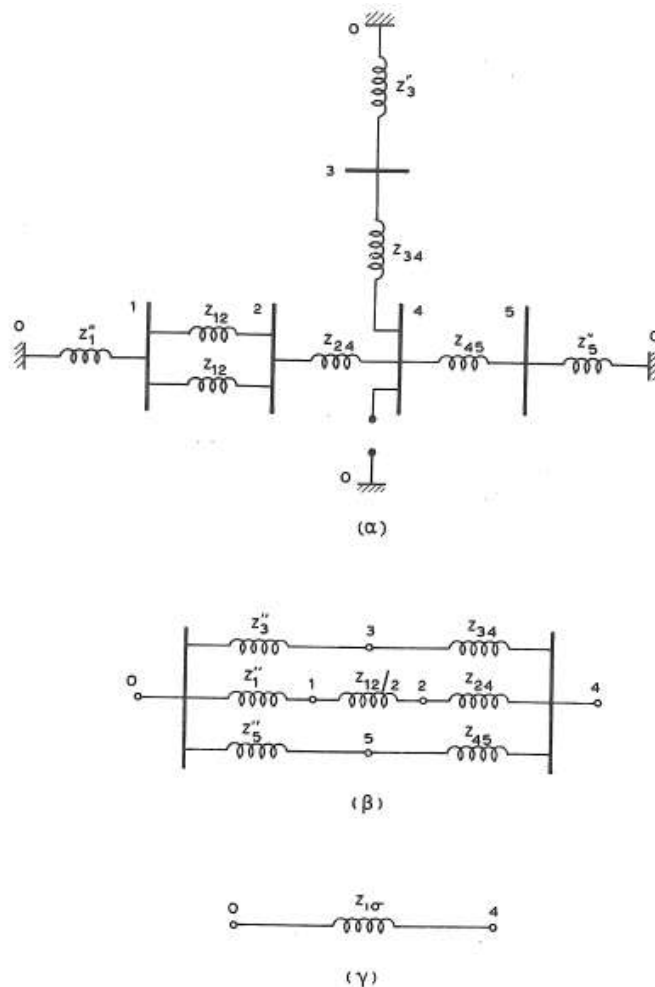
Σε γραμμικά δίκτυα ο πιο κλασικός τρόπος αναλυτικού υπολογισμού των ρευμάτων βραχυκύκλωσης πραγματοποιείται με την εφαρμογή του θεωρήματος Thevenin. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας στα υπολογιζόμενα ρεύματα βραχυκύκλωσης προστίθενται και τα προϋπάρχοντα ρεύματα φορτίων του δικτύου και έτσι προκύπτουν τα συνολικά ρεύματα κατά τη διάρκεια του σφάλματος.

Συνήθως όμως για λόγους ευκολίας, στους υπολογισμούς των ρευμάτων, το δίκτυο θεωρείται πως λειτουργεί εν κενώ και τα ρεύματα των φορτίων χαρακτηρίζονται ασήμαντα.

Σύμφωνα με το παράδειγμα του δικτύου της Εικόνας 5.13, και με την εφαρμογή του θεωρήματος Thevenin προκύπτει πως η τάση πηγής του ισοδύναμου κυκλώματος είναι η τάση που επικρατούσε στη θέση του βραχυκυκλώματος πριν την εκδήλωση του.

$$I_{\beta\rho} = \frac{V_{04}}{Z_{1\sigma}} \quad (\text{Σχέση 5.25})$$

Όπου, η  $Z_{1\sigma}$  είναι η ισοδύναμη αντίσταση που αντιστοιχεί στη συνολική σύνθετη αντίσταση του συστήματος, όπως αυτή φαίνεται από τη θέση του σφάλματος. Η ισοδύναμη αυτή αντίσταση γίνεται πιο κατανοητή μέσα από την Εικόνα 5.14, όπου φαίνονται οι απαραίτητοι μετασχηματισμοί του δικτύου.



Εικόνα 5.14 : Βαθμιαία μείωση αντιστάσεων δικτύου για τον προσδιορισμό της  $Z_{1\sigma}$  του ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin. [21]

Γενικά οι ζυγοί (2) και (4) αντιστοιχούν σε ζυγούς φορτίων, ενώ οι ζυγοί (1), (3) και (5) θεωρούνται ως πηγές τάσης με υπομεταβατικές αντιδράσεις  $Z_1''$ ,  $Z_2''$  και  $Z_3''$  αντίστοιχα. Όπως έχει ήδη ειπωθεί και στην προηγούμενη παράγραφο οι αντιστάσεις του δικτύου συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται ανηγμένες στα βασικά τους μεγέθη, ώστε να διευκολυνθούν οι μελέτες των βραχυκυκλωμάτων.

Η  $Z_{i\sigma}$  που προκύπτει τελικά συμπεριλαμβάνει και τις επαγωγικές αντιδράσεις από την υπομεταβατική μέχρι τη μόνιμη περίοδο του βραχυκυκλώματος και παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή της στην αρχή του σφάλματος.

Η ισχύς βραχυκύκλωσης, η οποία ορίζεται και ως στάθμη βραχυκύκλωσης ή στάθμη σφάλματος αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη θέση ή ζυγό αλλά και σε ολόκληρο το σύστημα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς αυτή, τόσο «ισχυρότερο» από λειτουργική άποψη είναι το σύστημα. Δηλαδή, το σύστημα τείνει να έχει σταθερή τάση, όσο αυξάνεται η ισχύς βραχυκύκλωσης, πράγμα που σημαίνει πως η συνολική τάση του δικτύου δεν επηρεάζεται από τις μικρές ή μεγάλες διαταραχές του συστήματος.

Παρ' όλα αυτά, η αύξηση της ισχύος βραχυκύκλωσης δεν περνάει απαρατήρητη από το δίκτυο. Συνήθως συνοδεύεται από αυξημένες θερμικές και δυναμικές καταπονήσεις για τον εξοπλισμό και τις εγκαταστάσεις του δικτύου. Η συνολική διάταξη σε κάθε περίπτωση βασίζεται, εκτός από το κριτήριο των ροών, και στο κριτήριο της βέλτιστης ισχύος βραχυκύκλωσης, τόσο από λειτουργική άποψη όσο και από άποψη ασφάλειας.

#### 5.2.4 Μελέτες βραχυκυκλωμάτων μεγάλων δικτύων

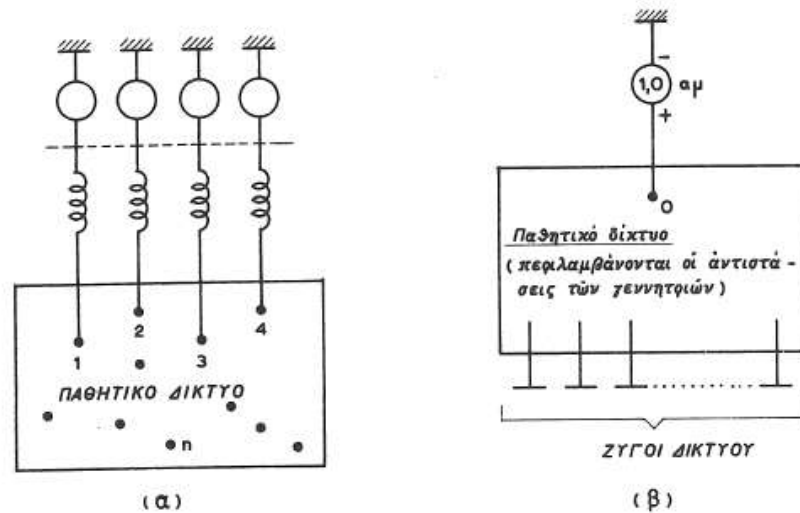
Τα βασικότερα δεδομένα που χρειάζεται να προσδιοριστούν σε μια μελέτη βραχυκυκλωμάτων είναι συγκεκριμένα:

1. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης στο ζυγό που συμβαίνει το σφάλμα.
2. Η στάθμη βραχυκύκλωσης του ζυγού αυτού.
3. Οι ροές των ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε όλο το σύστημα που επηρεάζεται.
4. Οι τάσεις των διαφόρων ζυγών του συστήματος κατά τις πρώτες περιόδους μετά το βραχυκύκλωμα.

Κατά την επίλυση τέτοιων προβλημάτων καθώς πολλές φορές δεν είναι διαθέσιμες οι τιμές των ρευμάτων και των τάσεων προ του σφάλματος, γίνεται η παραδοχή ότι όλες οι τάσεις ζυγών προ του σφάλματος είναι ίσες με τη μονάδα και όλα τα ρεύματα είναι ίσα με το μηδέν στη μέθοδο επίλυσης με το ανά μονάδα σύστημα.

Παρ' όλα αυτά, τις περισσότερες φορές τα ζητούμενα αποτελέσματα από τέτοιες μελέτες περιλαμβάνουν και τα ρεύματα και τα αποτελέσματα μη συμμετρικών σφαλμάτων και γενικά πολλά ακόμη δεδομένα, τα οποία σε συνδυασμό με τις πρακτικές δυσχέρειες που προκύπτουν κατά την απλοποίηση μεγάλων δικτύων, καθιστούν αναγκαία τη χρήση ψηφιακού υπολογιστή.

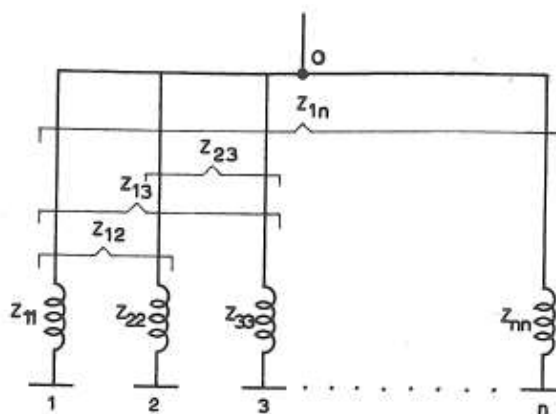
Παρακάτω περιγράφεται συνοπτικά η μέθοδος ακτινικού ισοδύναμου κυκλώματος προς τη μελέτη βραχυκυκλωμάτων σε μεγάλα δίκτυα. Αρχικά όλες οι γεννήτριες του συστήματος κατά το βραχυκύκλωμα ενός ζυγού εκτιμάται ότι έχουν ίσες ΗΕΔ κατά μέγεθος και γωνία.



Εικόνα 5.15 : Παράσταση συστημάτων ισοδύναμη γεννήτρια και παθητικό δίκτυο. [21]

Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.15, πίσω από τις αντιστάσεις των γεννητριών του δικτύου θεωρείται ένας κοινός κόμβος. Ο κόμβος αυτός συνδέει πρακτικά όλα τα ισοδυναμικά σημεία των γεννητριών και οι αντιστάσεις τους μπορούν να περιληφθούν στο δίκτυο, το οποίο πλέον χαρακτηρίζεται ως παθητικό. Οι γεννήτριες παριστάνονται έτσι σαν μία πηγή με κοινή ΗΕΔ, ίση με 1.0 αμ.

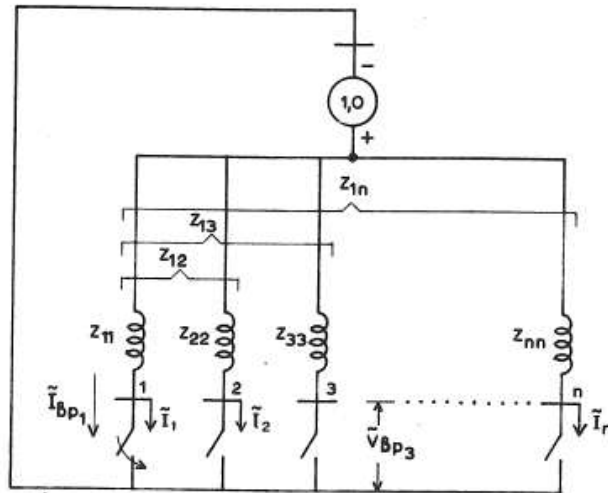
Για να παραχθούν όμως ροές στην παραπάνω διάταξη πρέπει να δημιουργηθεί από κάποιο ζυγό του δικτύου εξωτερική σύνδεση με τον ουδέτερο κόμβο. Έτσι, στην Εικόνα 5.16 παριστάνεται το ακτινικό ισοδύναμο δίκτυο με τις αντιδράσεις των γεννητριών, όπως φαίνεται και από τις προεξοχές των ζυγών της Εικόνας 5.15(β).



Εικόνα 5.16 : Ακτινικό ισοδύναμο παθητικού δικτύου (n) κόμβων. [21]

Η δυνατότητα δημιουργίας βραχυκυκλώματος σε κάθε ζυγό παριστάνεται πρακτικά με διακόπτες σφάλματος στους ζυγούς, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.17. Το κλείσιμο των διακοπών αυτών συνδέει τους ζυγούς με τον ουδέτερο κόμβο και ισοδυναμεί με βραχυκύκλωμα.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός συγκεκριμένου ζυγού και οι τάσεις των άλλων ζυγών κατά την εξέλιξη του φαινομένου δίνονται από το κλείσιμο του διακόπτη σφάλματος του ζυγού αυτού, με όλους τους άλλους ανοιχτούς, και με βάση το μαθηματικό υπόβαθρο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο προσαρμοσμένο με τη βοήθεια των υπολογιστικών εργαλείων στην εκάστοτε εγκατάσταση που μελετάται.



Εικόνα 5.17 : Ακτινικό ισοδύναμο κύκλωμα μεγάλου δικτύου για τον υπολογισμό των βραχυκυκλωμάτων. [21]

### 5.3 Ασύμμετρα Βραχυκυκλώματα

#### 5.3.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να αναλυθούν και να μελετηθούν καλύτερα, τα τριφασικά συστήματα εκφράζονται με τη βοήθεια ισοδύναμων μονοφασικών κυκλωμάτων. Αυτό συμβαίνει μόνο όταν το σύστημα που μελετάται είναι συμμετρικό.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, συμμετρικό χαρακτηρίζεται το σύστημα στο οποίο όλες οι φάσεις είναι ίδιες, δεν υπάρχουν ζεύξεις μεταξύ φάσεων, ή αν υπάρχουν είναι όλες ίσες μεταξύ τους και επιπλέον τροφοδοτούνται από συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων. Παρ' όλα αυτά, στην πράξη τα τριφασικά συστήματα που συναντώνται στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι απολύτως συμμετρικά.

Οι ασυμμετρίες αυτές οφείλονται κυρίως σε ζεύξεις μεταξύ των φάσεων, οι οποίες είναι πρακτικά αμοιβαίες επαγωγικές και χωρητικές αντιδράσεις. Χαρακτηρίζονται όμως πολύ μικρές και μπορούν να αγνοηθούν στους υπολογισμούς, σύμφωνα με τα μαθηματικά μοντέλα που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Έτσι, το σύστημα έχει τη δυνατότητα μονοφασικής ισοδυναμίας, ώστε να απλοποιηθεί και να μελετηθεί ευκολότερα σε περίπτωση ασύμμετρου σφάλματος.

Γενικά ασύμμετρα χαρακτηρίζονται τα σφάλματα εκείνα κατά τα οποία μία τουλάχιστον φάση δεν υφίσταται βραχυκύκλωμα. Διακρίνονται οι εξής κατηγορίες ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων:

- Το μονοφασικό βραχυκύκλωμα, το οποίο εξελίσσεται μεταξύ μίας φάσης και γης.
- Το διφασικό βραχυκύκλωμα, το οποίο είναι ένα σφάλμα μεταξύ δύο μόνο φάσεων.
- Το διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη, το οποίο παρατηρείται μεταξύ δύο φάσεων και γης.

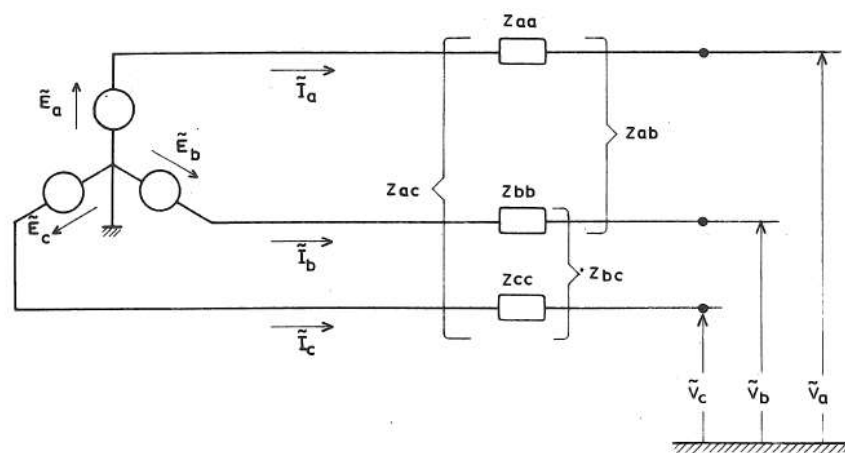
Η ανάλυση και η μελέτη των ασύμμετρων αυτών καταστάσεων λειτουργίας πραγματοποιείται με τη βοήθεια του μαθηματικού εργαλείου του συστήματος των συμμετρικών συνιστωσών που περιγράφεται και πιο αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.



Εικόνα 5.18 : Σχηματικές αναπαραστάσεις ασύμμετρων σφαλμάτων. [21]

### 5.3.2 Ισοδύναμο κυκλώματα τριφασικών δικτύων

Είναι δυνατόν ένα σύνθετο τριφασικό δίκτυο να παρασταθεί με ένα ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin, το οποίο αποτελείται από μία τριφασική πηγή τάσεως και ένα τριφασικό δίκτυο αντιστάσεων, όπως εικονίζεται στην παρακάτω διάταξη.



Εικόνα 5.19 : Ισοδύναμο τριφασικό κύκλωμα κατά Thevenin. [28]

Όπου από τον νόμο τάσεων του Kirchhoff, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις για τις τρεις φάσεις:

$$\tilde{E}_a - \tilde{I}_a * Z_{aa} - \tilde{I}_b * Z_{ab} - \tilde{I}_c * Z_{ac} - \tilde{V}_a = 0 \quad (\text{Σχέση 5.26})$$

$$\tilde{E}_b - \tilde{I}_a * Z_{ab} - \tilde{I}_b * Z_{bb} - \tilde{I}_c * Z_{bc} - \tilde{V}_b = 0 \quad (\text{Σχέση 5.27})$$

$$\tilde{E}_c - \tilde{I}_a * Z_{ac} - \tilde{I}_b * Z_{bc} - \tilde{I}_c * Z_{cc} - \tilde{V}_c = 0 \quad (\text{Σχέση 5.28})$$

Στη συνέχεια αναλύονται τα βασικά τριφασικά δίκτυα και παρουσιάζονται τα ισοδύναμα μονοφασικά και τριφασικά τους κυκλώματα.

Αρχικά, στην Εικόνα 5.20 παρουσιάζεται ένα φορτίο συνδεσμολογίας αστέρα, χωρίς ζεύξεις μεταξύ των φάσεων και με γειωμένο τον ουδέτερο κόμβο μέσω αντιστάσεως.

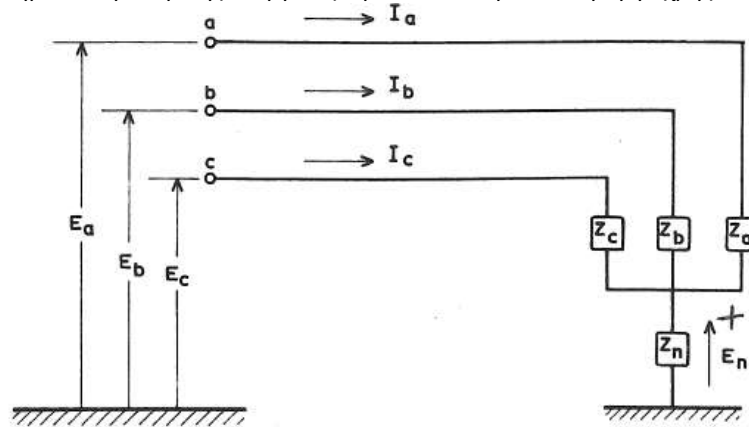
Για τις τάσεις ισχύει πως:

$$\tilde{E}_a - \tilde{E}_n = Z_a * \tilde{I}_a \quad (\text{Σχέση 5.29})$$

$$\tilde{E}_b - \tilde{E}_n = Z_b * \tilde{I}_b \quad (\text{Σχέση 5.30})$$

$$\tilde{E}_c - \tilde{E}_n = Z_c * \tilde{I}_c \quad (\text{Σχέση 5.31})$$

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 5.20 : Τριφασικό φορτίο συνδεσμολογίας αστέρα. [28]

Οι τάσεις των φάσεων συνδέονται μεταξύ τους ως εξής:

$$\tilde{E}_a = \tilde{E}_a \quad (\text{Σχέση 5.32})$$

$$\tilde{E}_b = \tilde{E}_a * a^2 \quad (\text{Σχέση 5.33})$$

$$\tilde{E}_c = \tilde{E}_a * a \quad (\text{Σχέση 5.34})$$

Όπου για τον βοηθητικό συντελεστή ( $\alpha$ ) ισχύει:

$$\alpha = 1^{<120^\circ} = e^{j120^\circ} = -0.5 + j0.866 \quad (\text{Σχέση 5.35}) \quad \text{και} \quad 1 + \alpha + \alpha^2 = 0 \quad (\text{Σχέση 5.36})$$

Κατά κανόνα τα τριφασικά φορτία θεωρούνται συμμετρικά και χωρίς ζεύξεις μεταξύ των φάσεων οπότε:  $Z_a = Z_b = Z_c$  (Σχέση 5.37). Επίσης υπάρχει και συμμετρικό σύστημα τάσεων, έτσι προκύπτει πως η τάση γείωσης θα είναι μηδέν:  $\tilde{E}_n = 0$  (Σχέση 5.38).

Επομένως, οι Σχέσεις 5.29, 5.30, 5.31 γίνονται τελικά:

$$\tilde{E}_a = Z_a * \tilde{I}_a \rightarrow \tilde{I}_a = \frac{\tilde{E}_a}{Z_a} * 1 \quad (\text{Σχέση 5.39})$$

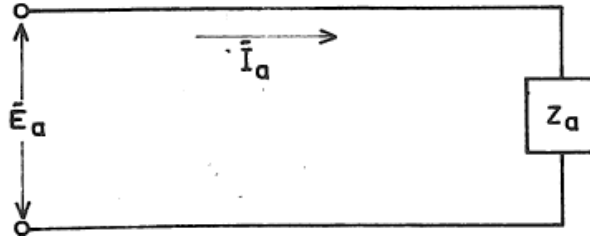
$$\tilde{E}_a * \alpha^2 = Z_a * \tilde{I}_b \rightarrow \tilde{I}_b = \frac{\tilde{E}_a}{Z_a} * \alpha^2 \quad (\text{Σχέση 5.40})$$

$$\tilde{E}_a * \alpha = Z_a * \tilde{I}_c \rightarrow \tilde{I}_c = \frac{\tilde{E}_a}{Z_a} * \alpha \quad (\text{Σχέση 5.41})$$

Έτσι συμπεραίνεται πως ένα τριφασικό συμμετρικό φορτίο συνδεδεμένο σε αστέρα, το οποίο τροφοδοτείται από ένα συμμετρικό σύστημα τάσεων, συμπεριφέρεται όπως τρία ανεξάρτητα μονοφασικά φορτία με συμμετρικά ρεύματα. Επιπλέον, παρατηρείται πως η αντίσταση γείωσης ( $Z_n$ ) δεν λαμβάνει μέρος στις εξισώσεις και το ρεύμα γείωσης ισούται με:  $\tilde{I}_n = \tilde{I}_a + \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 0$  (Σχέση 5.42).

Έτσι, η ανάλυση του συγκεκριμένου συστήματος υπό αυτές τις συνθήκες μπορεί να γίνει με το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.21, όπου χρησιμοποιούνται τα μεγέθη της φάσης ( $\alpha$ ) και τα μεγέθη των άλλων φάσεων προκύπτουν εύκολα από τους συντελεστές «  $1, \alpha^2, \alpha$  » των συμμετρικών τριφασικών μεγεθών.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

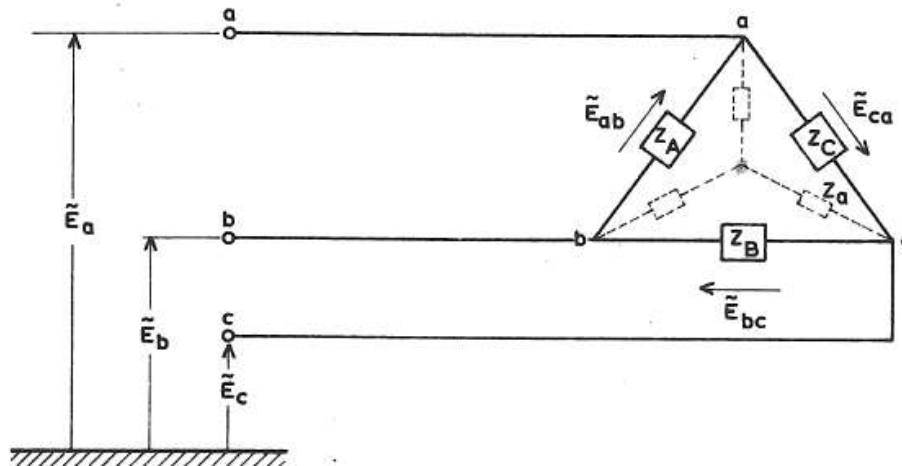


Εικόνα 5.21 : Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα συμμετρικού τριφασικού φορτίου συνδεσμολογίας αστέρα. [28]

Ενώ για ασύμμετρο φορτίο ( $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ ) μετά τους απαραίτητους υπολογισμούς προκύπτει πως:

$$\tilde{I}_n = \tilde{I}_a + \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = \frac{\tilde{E}_n}{Z_n} = \tilde{E}_a * \frac{Z_b Z_c + a^2 Z_a Z_c + a Z_a Z_b}{Z_a Z_b Z_c + Z_n (Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a)} \quad (\text{Σχέση 5.43})$$

Στη συνέχεια φαίνεται στην Εικόνα 5.22 η συνδεσμολογία φορτίου σε τρίγωνο. Η παραπάνω μαθηματική ανάλυση του φορτίου αστέρα εφαρμόζεται και στη περίπτωση του τριγώνου με μόνη διαφοροποίηση πως στην περίπτωση αυτή αξιοποιούνται τα ανά μονάδα μεγέθη ανηγμένα κατά αστέρα, όπου οι υπολογισμοί είναι πιο εύκολοι.



Εικόνα 5.22 : Τριφασικό φορτίο συνδεσμολογίας τριγώνου. [28]

Σαν βασικά μεγέθη επιλέγονται η μονοφασική ισχύς και η πολική τάση και ισχύουν σε αυτή την περίπτωση:

$$E_{\Delta} = \sqrt{3} * E_Y \quad (\text{Σχέση 5.44})$$

$$I_{\Delta} = \frac{I_Y}{\sqrt{3}} \quad (\text{Σχέση 5.45})$$

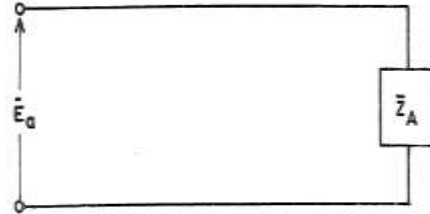
$$Z_{\Delta} = \frac{E_{\Delta}^2}{MVA_{3\phi}} = \frac{3E_Y^2}{MVA_{1\phi}} = 3Z_Y \quad (\text{Σχέση 5.46})$$

Όπου οι μεταβλητές ( $X_{\Delta}$ ) αφορούν στοιχεία στις συνδεσμολογίες τριγώνου και οι μεταβλητές ( $X_Y$ ) αντίστοιχα του αστέρα.

Έτσι η ανάλυση του τριγωνικού φορτίου μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του ισοδύναμου ανηγμένου μονοφασικού κυκλώματος της Εικόνας 5.23, το οποίο περιέχει τις ανηγμένες αντιστάσεις των φορτίων, ίσες αριθμητικά με τις ανηγμένες αντιστάσεις του τριγωνικού φορτίου.



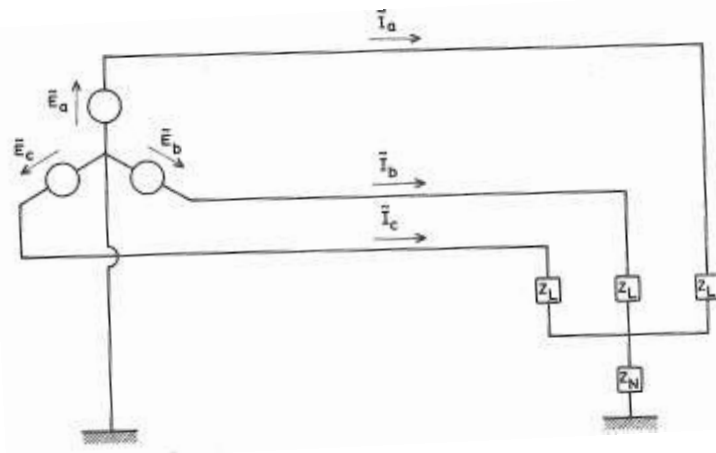
Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 5.23 : Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα τριγωνικού συμμετρικού φορτίου. [28]

Όπου η  $\tilde{E}_a$  είναι η πολική τάση του τριγώνου, η οποία έχει προκύψει από την αναγωγή σε αστέρα. ( $Z_A = Z_Y$ )

Τα συμμετρικά τριφασικά δίκτυα με συμμετρικές πηγές τάσεων μπορούν και αυτά με την σειρά τους να παρασταθούν με ισοδύναμο μονοφασικά κυκλώματα.



Εικόνα 5.24 : Συμμετρικό τριφασικό δίκτυο. [28]

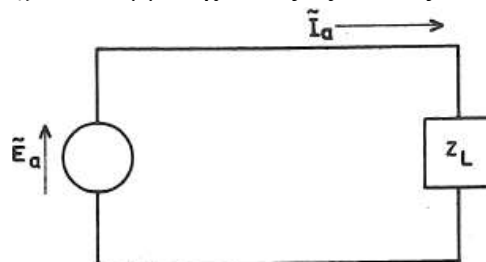
Οι εξισώσεις ρευμάτων σύμφωνα με την Εικόνα 5.24 διαμορφώνονται ως εξής:

$$\tilde{E}_a = Z_L * \tilde{I}_a \rightarrow \tilde{I}_a = \frac{\tilde{E}_a}{Z_L} * 1 \quad (\text{Σχέση 5.47})$$

$$\tilde{E}_a * \alpha^2 = Z_L * \tilde{I}_b \rightarrow \tilde{I}_b = \frac{\tilde{E}_a}{Z_L} * \alpha^2 \quad (\text{Σχέση 5.48})$$

$$\tilde{E}_a * \alpha = Z_L * \tilde{I}_c \rightarrow \tilde{I}_c = \frac{\tilde{E}_a}{Z_L} * \alpha \quad (\text{Σχέση 5.49})$$

Το δίκτυο αυτό έχει το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα της Εικόνας 5.25, αφού ισχύει πως  $\tilde{I}_a + \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 0$  και το στοιχείο ( $Z_n$ ) δεν συμμετέχει στις εξισώσεις.

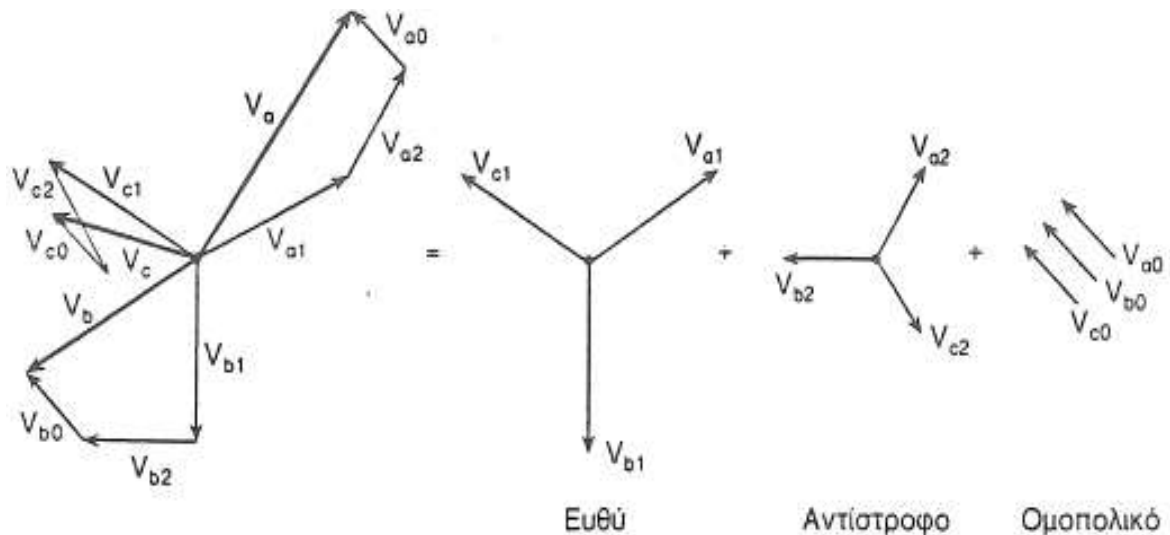


Εικόνα 5.25 : Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα συμμετρικού τριφασικού δικτύου. [28]

### 5.3.3 Συμμετρικές Συνιστώσες

Τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα δημιουργούν συνήθως μια «τοπική ασυμμετρία» στο σύστημα, το οποίο είναι «εκ κατασκευής» συμμετρικό, σε σχέση με το υπόλοιπο μέρος αυτού. Η καλύτερη ανάλυση της δυσάρεστης αυτής κατάστασης, που δημιουργείται στο σύστημα λόγω της τοπικής αυτής ασυμμετρίας, επιτυγχάνεται με τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών, όπως αναλύεται και παρακάτω.

Γενικά ένα σύστημα τριών μη συμμετρικών φασικών διανυσμάτων μπορεί να εκφραστεί ως τρία ξεχωριστά τριφασικά συστήματα, όπως δείχνει και η Εικόνα 5.26.



Εικόνα 5.26: Διανυσματική ανάλυση του ασύμμετρου συστήματος τάσεων σε τρία συμμετρικά. [21]

Ισχύουν δηλαδή για τις διανυσματικές εκφράσεις των τάσεων οι εξής τύποι:

$$\vec{V}_a = \vec{V}_{a1} + \vec{V}_{a2} + \vec{V}_{a0} \quad (\text{Σχέση 5.50})$$

$$\vec{V}_b = \vec{V}_{b1} + \vec{V}_{b2} + \vec{V}_{b0} \quad (\text{Σχέση 5.51})$$

$$\vec{V}_c = \vec{V}_{c1} + \vec{V}_{c2} + \vec{V}_{c0} \quad (\text{Σχέση 5.52})$$

Όπου το σύστημα των  $\vec{V}_{a1}, \vec{V}_{b1}, \vec{V}_{c1}$  αποτελεί το « ευθύ » συμμετρικό σύστημα για το οποίο ισχύει:

$$\vec{V}_{b1} = \alpha^2 * \vec{V}_{a1} \quad (\text{Σχέση 5.53}) \quad \text{και} \quad \vec{V}_{c1} = \alpha * \vec{V}_{a1} \quad (\text{Σχέση 5.54})$$

Το σύστημα των  $\vec{V}_{a2}, \vec{V}_{b2}, \vec{V}_{c2}$  από την άλλη αποτελεί το « αντίστροφο » σύστημα για το οποίο ισχύουν:

$$\vec{V}_{b2} = \alpha * \vec{V}_{a2} \quad (\text{Σχέση 5.55}) \quad \text{και} \quad \vec{V}_{c2} = \alpha^2 * \vec{V}_{a2} \quad (\text{Σχέση 5.56})$$

Τέλος το σύστημα των  $\vec{V}_{a0}, \vec{V}_{b0}, \vec{V}_{c0}$  ονομάζεται ομοπολικό σύστημα και γι' αυτό ισχύει:

$$\vec{V}_{a0} = \vec{V}_{b0} = \vec{V}_{c0} \quad (\text{Σχέση 5.57})$$

Έτσι από τους παραπάνω τύπους οι σχέσεις των τάσεων 5.50, 5.51, 5.52 διαμορφώνονται ως εξής:

$$\vec{V}_a = \vec{V}_{a1} + \vec{V}_{a2} + \vec{V}_{a0} \quad (\text{Σχέση 5.58})$$

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

$$\vec{V}_b = \alpha^2 * \vec{V}_{\alpha 1} + \alpha * \vec{V}_{\alpha 2} + \vec{V}_{\alpha 0} \quad (\text{Σχέση 5.59})$$

$$\vec{V}_c = \alpha * \vec{V}_{\alpha 1} + \alpha^2 * \vec{V}_{\alpha 2} + \vec{V}_{\alpha 0} \quad (\text{Σχέση 5.60})$$

Και επομένως:

$$\vec{V}_{\alpha 1} = \frac{1}{3}(\vec{V}_a + \alpha * \vec{V}_b + \alpha^2 * \vec{V}_c) \quad (\text{Σχέση 5.61})$$

$$\vec{V}_{\alpha 2} = \frac{1}{3}(\vec{V}_a + \alpha^2 * \vec{V}_b + \alpha * \vec{V}_c) \quad (\text{Σχέση 5.62})$$

$$\vec{V}_{\alpha 0} = \frac{1}{3}(\vec{V}_a + \vec{V}_b + \vec{V}_c) \quad (\text{Σχέση 5.63})$$

Για τις εντάσεις ισχύουν οι ακόλουθοι τύποι:

$$\vec{I}_\alpha = \vec{I}_{\alpha 1} + \vec{I}_{\alpha 2} + \vec{I}_{\alpha 0} \quad (\text{Σχέση 5.64})$$

$$\vec{I}_b = \alpha^2 * \vec{I}_{\alpha 1} + \alpha * \vec{I}_{\alpha 2} + \vec{I}_{\alpha 0} \quad (\text{Σχέση 5.65})$$

$$\vec{I}_c = \alpha * \vec{I}_{\alpha 1} + \alpha^2 * \vec{I}_{\alpha 2} + \vec{I}_{\alpha 0} \quad (\text{Σχέση 5.66})$$

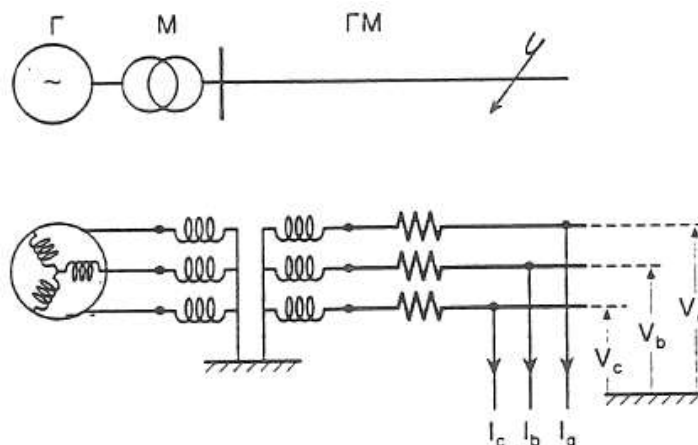
Και επομένως:

$$\vec{I}_{\alpha 1} = \frac{1}{3}(\vec{I}_a + \alpha * \vec{I}_b + \alpha^2 * \vec{I}_c) \quad (\text{Σχέση 5.67})$$

$$\vec{I}_{\alpha 2} = \frac{1}{3}(\vec{I}_a + \alpha^2 * \vec{I}_b + \alpha * \vec{I}_c) \quad (\text{Σχέση 5.68})$$

$$\vec{I}_{\alpha 0} = \frac{1}{3}(\vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c) \quad (\text{Σχέση 5.69})$$

Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών, θεωρείται το στοιχειώδες σύστημα της Εικόνας 5.27, το οποίο απαρτίζεται από μια γεννήτρια (Γ), ένα Μ/Σ και μια γραμμή μεταφοράς (ΓΜ) στο άκρο της οποίας λαμβάνει χώρα ένα μη συμμετρικό βραχυκύκλωμα.

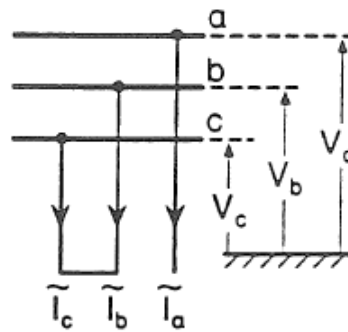


Εικόνα 5.27 : Απεικόνιση τριφασικού συστήματος γεννήτριας, Μ/Σ και γραμμής μεταφοράς. [21]

Σύμφωνα με όσα προηγήθηκαν στο σημείο όπου συμβαίνει το ασύμμετρο βραχυκύκλωμα εμφανίζονται οι μη συμμετρικές τάσεις  $\vec{V}_a, \vec{V}_b, \vec{V}_c$  και οι αντίστοιχες εντάσεις  $\vec{I}_a, \vec{I}_b, \vec{I}_c$ , οι τιμές των οποίων εξαρτώνται από το είδος του βραχυκυκλώματος.

Για παράδειγμα στην περίπτωση που το βραχυκύκλωμα είναι διαφασικό μεταξύ των φάσεων (b-c) της Εικόνας 5.28, τότε θα ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

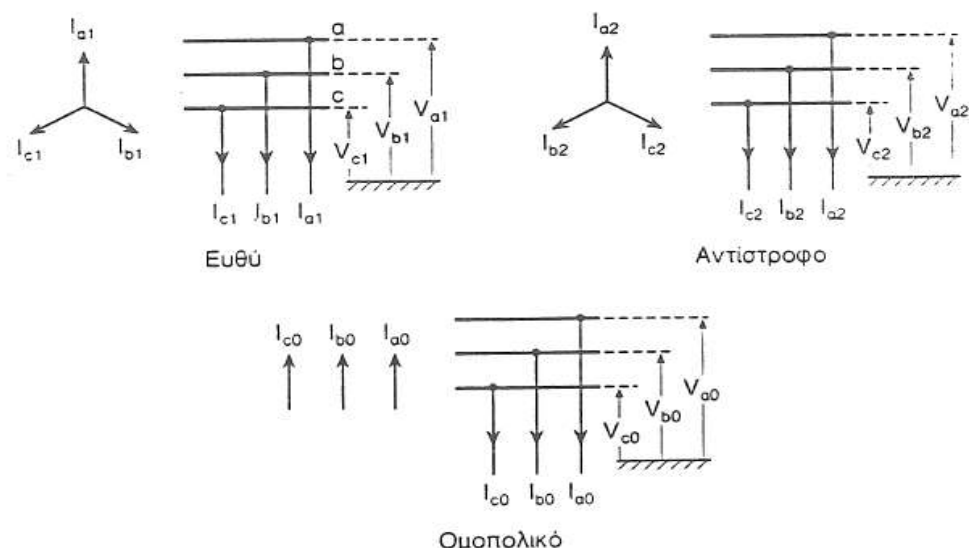
$$\tilde{V}_b = \tilde{V}_c, \tilde{I}_a = 0 \text{ και } \tilde{I}_b = -\tilde{I}_c \text{ (Σχέση 5.70)}$$



Εικόνα 5.28 : Διαφασικό βραχυκύκλωμα ανάμεσα στις φάσεις ( b-c ). [21]

Οι αντιστάσεις του κυκλώματος στη ροή κάθε μιας από τις συνιστώσες εντάσεις θα είναι οι εξής:

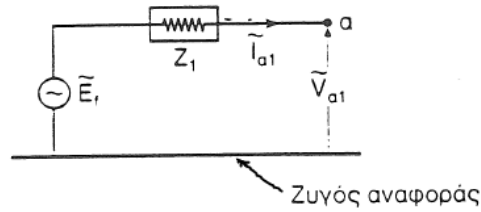
- Για το ευθύ σύστημα, οι αντιστάσεις των επιμέρους στοιχείων του συστήματος ( $\Gamma$ ,  $M/\Sigma$ ,  $\Gamma M$ ) θα είναι οι γνωστές ονομαστικές από τον κατασκευαστή και θα συμβολίζονται με ( $Z_1$ ).
- Για το αντίστροφο σύστημα θα ισχύει πως ( $Z_1 = Z_2$ ) για τα στοιχεία εκείνα που δεν φέρουν κάποιο περιστρεφόμενο μέρος, όπως είναι οι  $M/\Sigma$ , οι γραμμές, τα επαγωγικά πηνία, οι πυκνωτές κλπ. Διαφορετικά θα ισχύει πως ( $Z_1 \neq Z_2$ ) για στοιχεία όπως γεννήτριες, κινητήρες.
- Για το ομοπολικό σύστημα οι αντιστάσεις θα συμβολίζονται με ( $Z_0$ ) και θα διαφέρουν από τις ( $Z_1, Z_2$ ), αφού το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν οι ομοπολικές εντάσεις είναι τελείως διαφορετικό από αυτό των αντίστοιχων ευθέων και αντίστροφων εντάσεων.



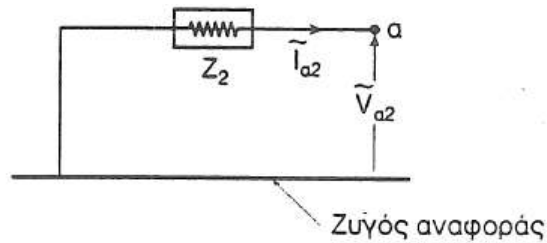
Εικόνα 5.29 : Απεικόνιση ευθύ, αντίστροφου και ομοπολικού συστήματος, υπό συνθήκες ασύμμετρου βραχυκυκλώματος. [21]

Τώρα για κάθε ένα από τα παραπάνω τρία συστήματα προκύπτει το ακόλουθο ισοδύναμο κύκλωμα, όπως αυτό φαίνεται από το σημείο του βραχυκυκλώματος και ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις.

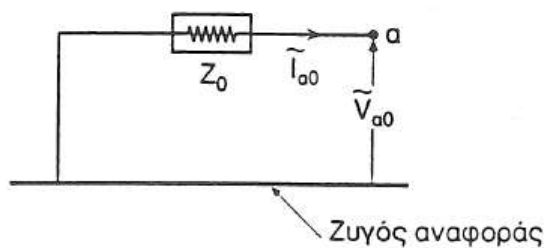
Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Για το ευθύ σύστημα



Για το αντίστροφο σύστημα



Για το ομοπολικό σύστημα

Εικόνα 5.30 : Ισοδύναμο κύκλωμα ευθύ, αντιστρόφου και ομοπολικού συστήματος για συμμετρική τροφοδοσία. [21]

Για τις τάσεις κάθε περίπτωσης ισχύει:

$$\tilde{V}_{a1} = \tilde{E}_f - Z_1 * \tilde{I}_{a1} \quad (\text{Σχέση 5.71})$$

$$\tilde{V}_{a2} = -Z_2 * \tilde{I}_{a2} \quad (\text{Σχέση 5.72})$$

$$\tilde{V}_{a0} = -Z_o * \tilde{I}_{a0} \quad (\text{Σχέση 5.73})$$

Όπου το  $(\tilde{E}_f)$  είναι η φασική τάση στη θέση του σφάλματος ακριβώς πριν συμβεί το βραχυκύκλωμα. Οι  $(Z_1, Z_2, Z_o)$  είναι οι σύνθετες αντιστάσεις όπως αυτές φαίνονται από τη θέση του σφάλματος, αφού βραχυκυκλωθούν οι πηγές κατά τη διαδικασία υπολογισμού των ισοδύναμων κατά Thevenin κυκλωμάτων.

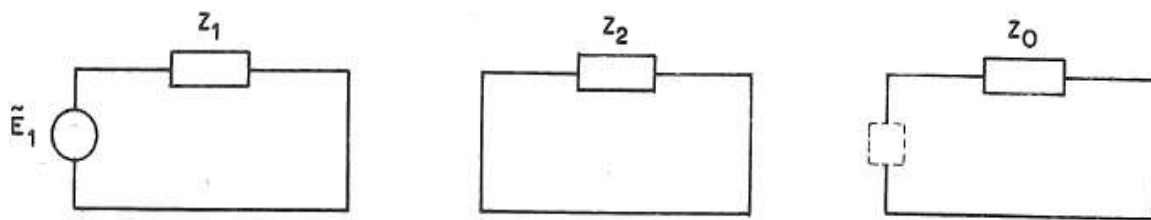
Βασική προϋπόθεση για να ισχύουν τα παραπάνω είναι να χρησιμοποιούνται γραμμικά συστήματα, ώστε η επαλληλία να είναι επιτρεπτή και το σύστημα να χαρακτηρίζεται συμμετρικό. Ακόμα πρέπει οι υπάρχουσες πηγές (V) να είναι μόνο ευθέων τάσεων και όχι αντιστρόφων ή ομοπολικών.

### 5.3.4 Αντιστάσεις ακολουθίας

Τα κυκλώματα τα οποία προκύπτουν από τις παραπάνω απλοποιήσεις ονομάζονται « κυκλώματα ακολουθίας » του συστήματος. Προκειμένου όμως να σχεδιαστούν τα κυκλώματα αυτά, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι αντιστάσεις ακολουθίας όλων των συνιστωσών μερών του συστήματος αυτού, όπως για παράδειγμα οι γεννήτριες, οι Μ/Σ και οι γραμμές του.

Με λίγα λόγια οι αντιστάσεις ακολουθίας είναι οι αντιστάσεις των αντίστοιχων κυκλωμάτων ακολουθίας, τα οποία αντιπροσωπεύουν το αρχικό τριφασικό κύκλωμα.

Η μέθοδος υπολογισμού των αντιστάσεων αυτών είναι η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις και αναφέρει συγκεκριμένα πως πρέπει κάθε στοιχείο να υποβάλλεται γενικά σε μια ομάδα τάσεων ή ρευμάτων θετικής, αρνητικής ή και μηδενικής ακολουθίας και να μετριέται ή να υπολογίζεται στη συνέχεια η αντίστασή του.



α) θετικής ακολουθίας, β) αρνητικής ακολουθίας, γ) μηδενικής ακολουθίας

Εικόνα 5.31 : Ισοδύναμα κυκλώματα ακολουθίας τριφασικού συμμετρικού δικτύου. [21]

Η απλούστερη παράμετρος, η οποία και μελετάται, είναι εκείνη της θετικής ακολουθίας, καθώς ταυτίζεται με εκείνη που παρουσιάζει το στοιχείο κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του.

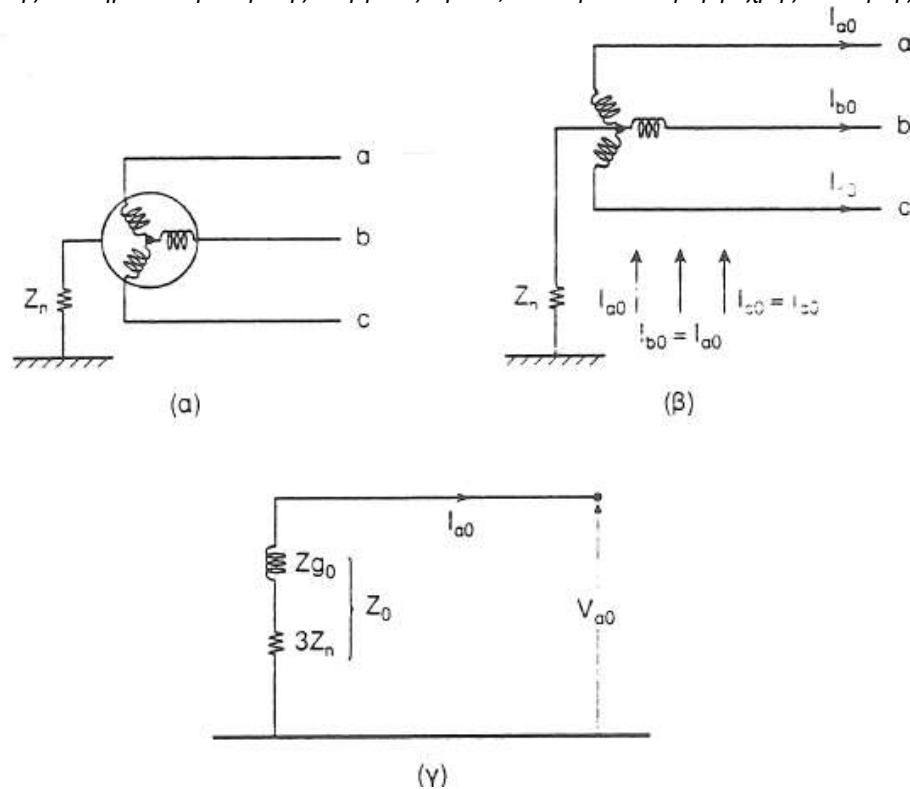
Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση των ομοπολικών συστημάτων, η ανάπτυξη των ομοπολικών τάσεων είναι δυνατή μόνον εφόσον ένα στοιχείο περιλαμβάνει τυλίγματα ή αντιστάσεις συνδεδεμένες κατ' αστέρα, του οποίου ο ουδέτερος κόμβος γειώνεται.

Για παράδειγμα όσον αφορά την γεννήτρια της Εικόνας 5.32(α) η ροή των ομοπολικών ρευμάτων θα είναι σύμφωνα με την Εικόνα 5.32(β), δηλαδή θα διέρχεται μια ένταση από την αντίσταση γείωσης του ουδέτερου κόμβου ( $Z_n$ ).

$$\text{Ισχύει πως: } I_{a0} + I_{b0} + I_{c0} = 3I_{a0} \text{ (Σχέση 5.74)}$$

$$\text{Έτσι η ομοπολική αντίσταση ακολουθίας θα είναι: } Z_0 = Z_{g0} + 3Z_n \text{ (Σχέση 5.75)}$$

Όπου η ( $Z_{g0}$ ) είναι η ομοπολική αντίσταση της ίδιας της γεννήτριας.



Εικόνα 5.32 : (α) Κύκλωμα τριφασικής γεννήτριας, (β) Ροή ομοπολικών ρευμάτων κυκλώματος, (γ) Υπολογισμός ομοπολικής αντίστασης κυκλώματος ακολουθίας. [28]

Ενώ στην περίπτωση υπολογισμού της ομοπολικής αντίστασης  $M/\Sigma$  κατ' αστέρα, ο οποίος γειώνεται μέσω αντίστασης ( $Z_n$ ) ισχύει :

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{M0} = 3Z_n + R_{M0} + jX_{M0} \quad (\text{Σχέση 5.76})$$

Όπου ( $Z_{M0}$ ) είναι η ομοπολική αντίσταση του  $M/\Sigma$ , η οποία χαρακτηρίζεται « άπειρη » για  $M/\Sigma$  συνδεδεμένο σε τρίγωνο ή αστέρα χωρίς γειωμένο τον ουδέτερο κόμβο.

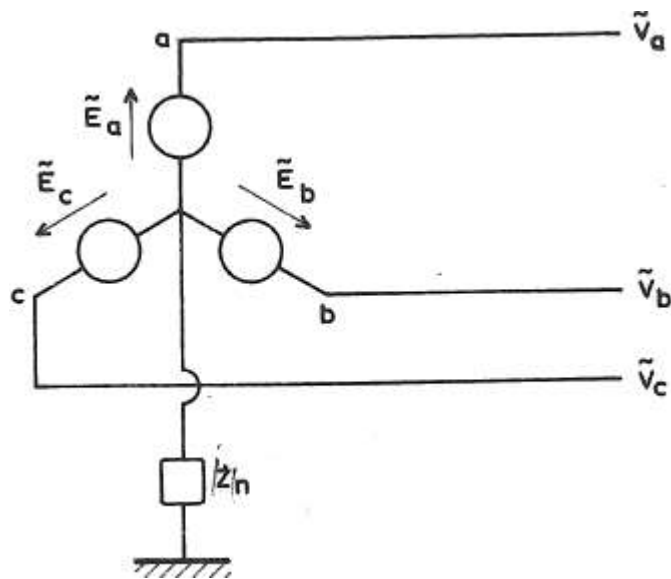
### 5.3.5 Ασύμμετρα σφάλματα

Όπως ήδη έχει αναφερθεί προκειμένου να αναλυθούν τα ασύμμετρα σφάλματα αξιοποιείται η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών. Γίνεται δηλαδή η αντικατάσταση των ρευμάτων και των τάσεων των φάσεων, στη θέση της ασυμμετρίας, με τις αντίστοιχες συμμετρικές συνιστώσες τους, ώστε να επιλυθεί το πρόβλημα.

Οι άγνωστοι παράγοντες είναι ουσιαστικά τα τρία ρεύματα  $\tilde{I}_a, \tilde{I}_b, \tilde{I}_c$  και οι τρεις τάσεις των φάσεων  $\tilde{V}_a, \tilde{V}_b, \tilde{V}_c$ . Σε κάθε περίπτωση ασυμμετρίας διαμορφώνονται ορισμένες σχέσεις μεταξύ των μεγεθών αυτών, οι οποίες αποτελούν τις συνθήκες του προβλήματος και τη βάση για τον υπολογισμό των συμμετρικών συνιστωσών.

Οι συμμετρικές αυτές συνιστώσες είναι συγκεκριμένα οι:  $\tilde{I}_{\alpha 0}, \tilde{I}_{\alpha 1}, \tilde{I}_{\alpha 2}, \tilde{V}_{\alpha 0}, \tilde{V}_{\alpha 1}, \tilde{V}_{\alpha 2}$ , και προσδιορίζονται πιο εύκολα από τα αντίστοιχα φυσικά μεγέθη, καθώς εξαρτώνται από τον προσδιορισμό των αντιστάσεων ακολουθίας. Αυτό από μόνο του αποτελεί το βασικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, αφού οι αντιστάσεις ακολουθίας υπολογίζονται πολύ πιο εύκολα από τις αντίστοιχες ονομαστικές αντιστάσεις των φάσεων.

Για να γίνει πιο κατανοητή η επίλυση των ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων, θεωρείται ένα τριφασικό σύστημα τροφοδοτούμενο από μια συμμετρική τριφασική πηγή, όπου σε αρχικές συνθήκες προ του σφάλματος τα φορτία του συστήματος θεωρούνται μηδενικά. Το σύστημα έχει το τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thevenin, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 5.33.



Εικόνα 5.33 : Τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin. [28]

Στην περίπτωση που το σφάλμα είναι μονοφασικό, δηλαδή εξελίσσεται ανάμεσα στη φάση (α) και τη γη, θα ισχύουν οι εξής βασικές συνθήκες:

$$\tilde{V}_a = 0 \quad (\text{Σχέση 5.77}) \quad \text{και} \quad \tilde{I}_b = \tilde{I}_c = 0 \quad (\text{Σχέση 5.78})$$

Έτσι από την χρήση των συμμετρικών συνιστωσών των τάσεων και των ρευμάτων προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\tilde{V}_a = \tilde{V}_0 + \tilde{V}_1 + \tilde{V}_2 \quad (\text{Σχέση 5.79})$$

$$\tilde{I}_b = \tilde{I}_0 + a^2 * \tilde{I}_1 + a * \tilde{I}_2 \quad (\text{Σχέση 5.80})$$

$$\tilde{I}_c = \tilde{I}_0 + a * \tilde{I}_1 + a^2 * \tilde{I}_2 \quad (\text{Σχέση 5.81})$$

Έτσι με εφαρμογή της Σχέσης 5.78 στις Σχέσεις 5.80, 5.81 προκύπτει:

$$(\alpha^2 - \alpha) * \tilde{I}_1 = (\alpha^2 - \alpha) * \tilde{I}_2 \rightarrow \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 \quad (\text{Σχέση 5.82})$$

Επομένως ισχύει πως:

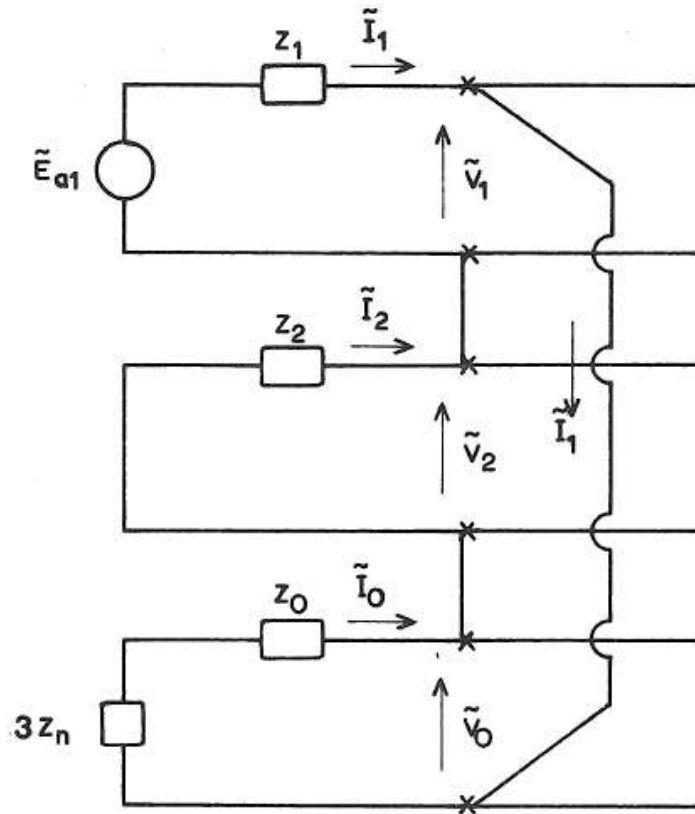
$$\tilde{I}_0 = \frac{1}{3} (\tilde{I}_a + \tilde{I}_b + \tilde{I}_c) = \frac{1}{3} * \tilde{I}_a \quad (\text{Σχέση 5.83})$$

$$\text{Άρα: } \tilde{I}_0 = \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 = \frac{1}{3} * \tilde{I}_a \quad (\text{Σχέση 5.84})$$

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε αυτήν την περίπτωση θα υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\tilde{I}_F = \tilde{I}_a = 3\tilde{I}_0 = \frac{3 * \tilde{E}_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_n} \quad (\text{Σχέση 5.85})$$





Εικόνα 5.34 : Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση μονοφασικού σφάλματος. [21]

Αντίστοιχα αν το σφάλμα είναι διφασικό, δηλαδή εξελίσσεται μόνο μεταξύ των δύο φάσεων (b-c), τότε προκύπτουν οι ακόλουθες βασικές σχέσεις:

$$\tilde{I}_a = 0 \rightarrow \tilde{I}_{a1} + \tilde{I}_{a2} + \tilde{I}_{a0} = 0 \quad (\text{Σχέση 5.86})$$

$$\tilde{I}_b = -\tilde{I}_c \rightarrow \alpha^2 * \tilde{I}_{a1} + \alpha * \tilde{I}_{a2} + \tilde{I}_{a0} = -\alpha * \tilde{I}_{a1} - \alpha^2 * \tilde{I}_{a2} - \tilde{I}_{a0} \quad (\text{Σχέση 5.87})$$

Από τη Σχέση 5.87 έπεται πως:

$$\tilde{I}_{a0} = 0 \text{ και } \tilde{I}_{a1} = -\tilde{I}_{a2} \quad (\text{Σχέση 5.88})$$

$$\text{Επίσης ισχύει ότι: } \tilde{V}_b = \tilde{V}_c \rightarrow \alpha^2 * \tilde{V}_{a1} + \alpha * \tilde{V}_{a2} + \tilde{V}_{a0} = \alpha * \tilde{V}_{a1} + \alpha^2 * \tilde{V}_{a2} + \tilde{V}_{a0} \quad (\text{Σχέση 5.89})$$

$$\text{Από όπου προκύπτει: } \tilde{V}_{a1} = \tilde{V}_{a2} \quad (\text{Σχέση 5.90})$$

Οι Σχέσεις αυτές προσδιορίζουν τη σχέση των κυκλωμάτων όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Από αυτόν υπολογίζονται εύκολα οι τιμές των συνιστωσών και ακολούθως των πραγματικών εντάσεων και τάσεων βραχυκύκλωσης στη θέση της ασυμμετρίας.

Είδος βρα/τος	Εντάσεις και τάσεις στην θέση του βρα/τος	Συνδεσμολογία κυκλωμάτων ακολουθίας
Διφασικό (b-c)	$\tilde{I}_a = 0$ $\tilde{I}_b = -\tilde{I}_c = \tilde{I}_f$ $= (a^2 - a) \frac{\tilde{E}_1}{Z_1 + Z_2}$ $\tilde{V}_a = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} \tilde{E}_1$ $\tilde{V}_b = -\tilde{V}_c = -\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \tilde{E}_1$	
Μονοφασικό προς γη (a-γη)	$\tilde{I}_a = \tilde{I}_f = \frac{3 \tilde{E}_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_n}$ $\tilde{I}_b = \tilde{I}_c = 0$ $\tilde{V}_a = 0$ $\tilde{V}_b = \frac{Z_2 (a^2 - a) + (Z_0 + 3Z_n)(a^2 - 1)}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_n} \tilde{E}_1$ $\tilde{V}_c = \frac{Z_2 (a - a^2) + (Z_0 + 3Z_n)(a - 1)}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_n} \tilde{E}_1$	
Διφασικό προς γη (b-c-γη)	$\tilde{I}_a = 0$ $\tilde{I}_f = \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 3\tilde{I}_{a0}$ $= \frac{3\tilde{E}_f Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0 + 3Z_n (Z_1 + Z_2)}$ $\tilde{V}_a = 3\tilde{V}_{a0} = \frac{3\tilde{E}_f Z_2 (Z_0 + 3Z_n)}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0 + 3Z_n (Z_1 + Z_2)}$ $\tilde{V}_b = \tilde{V}_c = 0$	

Πίνακας 5.1 : Τελικοί τύποι υπολογισμών εντάσεων και ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε ασύμμετρο σφάλμα. [31]

Έτσι στην περίπτωση του διφασικού σφάλματος για το ρεύμα βραχυκύκλωσης ισχύει:

$$\tilde{I}_{a1} = -\tilde{I}_{a2} = \frac{\tilde{E}_f}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{Σχέση 5.91})$$

$$\text{Επομένως: } \tilde{I}_f = \tilde{I}_b = -\tilde{I}_c = a^2 * \tilde{I}_{a1} + a * \tilde{I}_{a2} + \tilde{I}_{a0} = (a^2 - a) * \frac{\tilde{E}_f}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{Σχέση 5.92})$$

$$\text{Επίσης αφού: } \tilde{V}_{a0} = 0 \text{ και } \tilde{V}_{a1} = \tilde{E}_f \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \tilde{V}_{a2} \quad (\text{Σχέση 5.93})$$

Για τις τάσεις βραχυκύκλωσης ισχύουν:

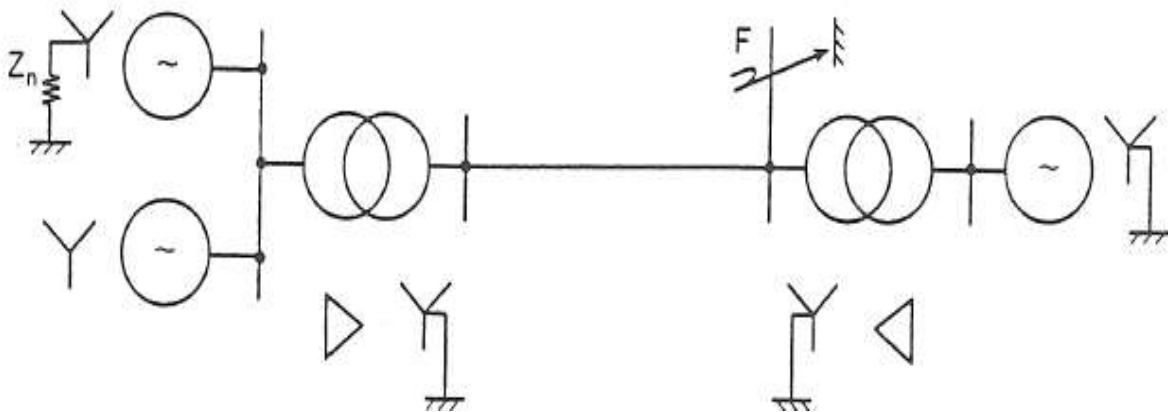
$$\tilde{V}_a = \tilde{V}_{a0} + \tilde{V}_{a1} + \tilde{V}_{a2} = 2\tilde{V}_{a1} = \tilde{E}_f \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{Σχέση 5.94})$$

$$\tilde{V}_b = a^2 * \tilde{V}_{a1} + a * \tilde{V}_{a2} + \tilde{V}_{a0} = -\tilde{V}_{a1} = -\tilde{E}_f \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{Σχέση 5.95})$$

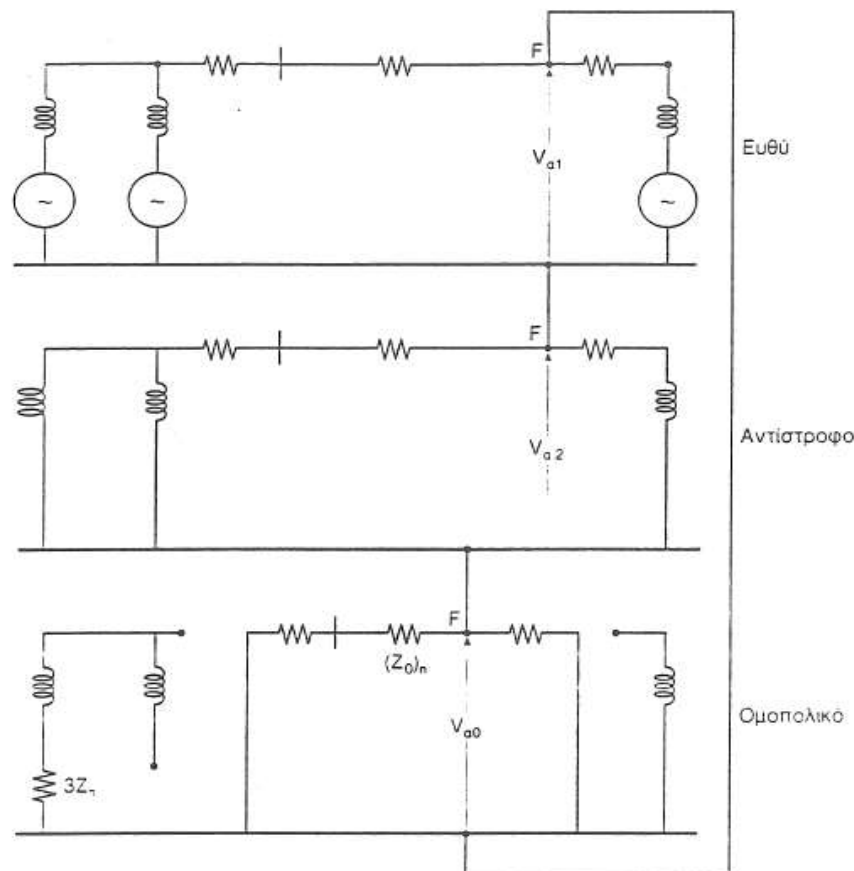
Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζονται οι αντίστοιχοι τύποι και για την πιο σπάνια περίπτωση του διφασικού βραχυκυκλώματος με γη στη θέση του σφάλματος, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.1.

Συχνά είναι απαραίτητο να εξεταστεί η συμπεριφορά των εντάσεων και των τάσεων, όχι μόνο στο σημείο του βραχυκυκλώματος, αλλά και σε διάφορα σημεία όλου του συστήματος. Τότε είναι αναγκαίο να σχεδιαστεί κάθε ένα από τα κυκλώματα ακολουθίας για όλο το υπό μελέτη τμήμα του συστήματος και στη συνέχεια να συνδεθούν όλα μαζί ανάλογα με το είδος του βραχυκυκλώματος.

Για παράδειγμα στο σύστημα της Εικόνας 5.35 παρατηρείται ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα με τα αντίστοιχα κυκλώματα ακολουθίας να διαμορφώνονται και να συνδέονται όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.36.



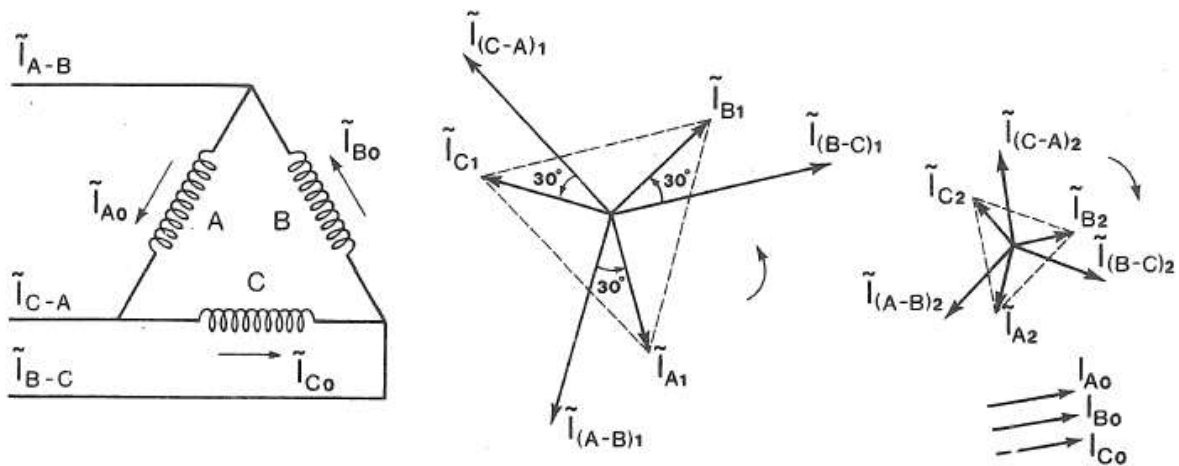
Εικόνα 5.35 : Μονοφασικό βραχυκύκλωμα σε ηλεκτρικό σύστημα. [21]



Εικόνα 5.36 : Σύνθεση και σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθίας για μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη. [21]

**5.3.6 Σχέσεις μεταξύ μεγεθών γραμμής και μεγεθών τυλιγμάτων αστέρα & τριγώνου**  
 Γενικά οι συμμετρικές συνιστώσες των μεγεθών της γραμμής ενός συστήματος προκύπτουν μέσω των συμμετρικών συνιστωσών ρευμάτων ή τάσεων των αντίστοιχων φασικών μεγεθών τυλιγμάτων τριγώνου – αστέρα.

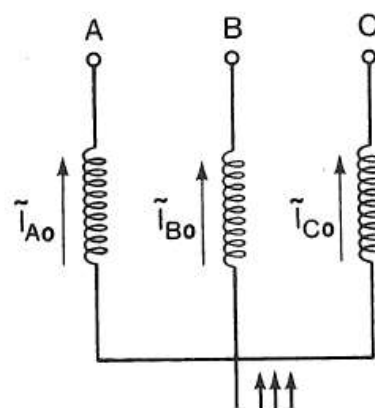
Πιο συγκεκριμένα αρχικά προσδιορίζονται τα ρεύματα σε ένα τύλιγμα τριγώνου μαζί με τις συμμετρικές συνιστώσες τους. Οι τρεις φάσεις του τριγωνικού τυλιγματος έστω ότι συμβολίζονται με (A,B,C), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.37, όπου παρουσιάζονται και τα διανυσματικά συμμετρικά διαγράμματα των συμμετρικών συνιστωσών.



Εικόνα 5.37 : Συμμετρικές συνιστώσες ρευμάτων τυλιγματος τριγώνου και γραμμής. [28]

Γενικά όπως υπάρχουν ρεύματα θετικής ακολουθίας των τυλιγμάτων έτσι υπάρχουν και αντίστοιχα ρεύματα στη γραμμή, τα οποία εκφράζονται ως διανυσματικές διαφορές των πρώτων. Κατά κανόνα τα ρεύματα θετικής ακολουθίας γραμμής έχουν μέτρο 1,73 φορές το μέτρο των ρευμάτων του τριγώνου και « καθυστερούν » κατά 30° (Εικόνα 5.37).

Συγκεκριμένα σε ένα τριγωνικό τύλιγμα όσον αφορά τα ομοπολικά ρεύματα, αυτά ενεργούν ως ρεύματα επιστροφής το ένα του άλλου, έτσι δημιουργούν μέσα στο τύλιγμα ένα συνολικό ρεύμα κυκλοφορίας, ενώ τα ομοπολικά ρεύματα της γραμμής είναι μηδενικά.

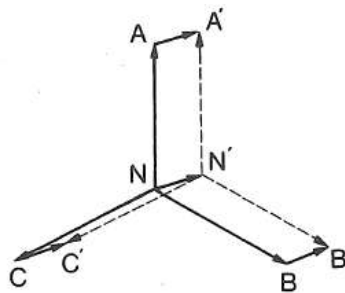


Εικόνα 5.38 : Σχηματική ροή ομοπολικών ρευμάτων σε τύλιγμα αστέρα. [28]

Αντίθετα σε ένα τύλιγμα αστέρα τα ρεύματα θετικής ακολουθίας της γραμμής ταυτίζονται με τα συμμετρικά τριφασικά ρεύματα των τυλιγμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση όμως τα ομοπολικά ρεύματα δεν μπορούν να θεωρηθούν το ένα ως επιστροφή του αλλού και συνεπώς επιστρέφουν στο δίκτυο μέσω του ουδέτερου. Επομένως δεν μπορούν να υπάρξουν ομοπολικά ρεύματα, ούτε στα τυλίγματα, ούτε στη γραμμή, σε ένα τριφασικό σύστημα με μονωμένο ουδέτερο.

Αναφορικά με τις φασικές τάσεις σε ένα τριγωνικό τύλιγμα, αυτές ταυτίζονται με τις τάσεις γραμμής και επομένως έχουν τις ίδιες συμμετρικές συνιστώσες. Το διανυσματικό τους άθροισμα όμως είναι μηδέν δεδομένου πως το τρίγωνο είναι ένα κλειστό κύκλωμα και σε αυτό δε παίζει ρόλο η συμμετρία των τάσεων.

Τέλος, οι ευθείες και αντίστροφες συνιστώσες των τάσεων και των γραμμών σε ένα τύλιγμα αστέρα είναι επόμενο πως θα είναι 1.73 φορές μεγαλύτερες και θα παρουσιάζουν  $30^\circ$  απόκλιση από τις αντίστοιχες των τυλιγμάτων του. Παρ' όλα αυτά οι ομοπολικές συνιστώσες παρουσιάζουν την εξής σημαντική διαφοροποίηση στην περίπτωση της συνδεσμολογίας αστέρα.



Εικόνα 5.39 : Μετατόπιση σημείου ουδέτερου φασικών τάσεων τυλίγματος αστέρα λόγω ομοπολικής συνιστώσας. [28]

Πιο συγκεκριμένα, οι ομοπολικές συνιστώσες των φασικών τάσεων αποτελούν μια κοινή συνιστώσα, η οποία προστίθεται και στις τρεις φάσεις, χωρίς να επηρεάζει τις αντίστοιχες πολικές τάσεις. Προκαλείται με αυτόν τον τρόπο η μετατόπιση του σημείου του ουδέτερου των φασικών τάσεων κατά ίσο διάστημα, όπως δείχνει και η Εικόνα 5.39.

## 5.4 Το σύστημα μετασχηματισμού Clarke

### 5.4.1 Εισαγωγή

Στις προηγούμενες παραγράφους η ανάλυση των ασύμμετρων τριφασικών σφαλμάτων πραγματοποιήθηκε αποκλειστικά από το σύστημα των συμμετρικών συνιστωσών. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχουν άπειρα άλλα δυνατά συστήματα συνιστωσών που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν στην ανάλυση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην περίπτωση όπου το φυσικό σύστημα είναι συμμετρικό η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών εφαρμόζει τέλεια. Εάν όμως το σύστημα δεν χαρακτηρίζεται από συμμετρία, τότε οι διασυνδέσεις μεταξύ των κυκλωμάτων ακολουθίας θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να πετυχαίνουν σημαντικές απλοποιήσεις στο σύστημα.

Την λύση σε τέτοιου είδους προβλήματα τη δίνει συγκεκριμένα η μέθοδος μετασχηματισμού Clarke, η οποία αποτελείται από τις συνιστώσες άλφα, βήτα και μηδέν ( $\alpha, \beta, 0$ ). Οι συνιστώσες αυτές, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, αποδεικνύονται καταλληλότερες για μελέτες μεταβατικών φαινομένων από τις αντίστοιχες συμμετρικές.

Η μεγαλύτερη και σημαντικότερη διαφοροποίηση του μετασχηματισμού Clarke, σε σχέση με τα υπόλοιπα μαθηματικά μοντέλα επίλυσης, είναι το γεγονός πως οι μεταβλητές του μετατρέπονται από ένα στάσιμο πλαίσιο αναφοράς σε ένα άλλο στάσιμο πλαίσιο αναφοράς. Σε αντίθεση η μέθοδος του ευθέως και του εγκάρσιου άξονα ( $d, q$ ) ξεκινάει από ένα στάσιμο πλαίσιο αναφοράς και καταλήγει σε ένα αντίστοιχο στρεφόμενο πλαίσιο.

#### 5.4.2 Μετασχηματισμός Clarke

Ο μετασχηματισμός Clarke ορίζεται πρακτικά από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\tilde{V}_0 = \frac{1}{3} * (\tilde{V}_a + \tilde{V}_b + \tilde{V}_c) \quad (\text{Σχέση 5.96})$$

$$\tilde{V}_\alpha = \frac{1}{3} * (2\tilde{V}_a - \tilde{V}_b - \tilde{V}_c) \quad (\text{Σχέση 5.97})$$

$$\tilde{V}_\beta = \frac{1}{3} * (\sqrt{3}\tilde{V}_b - \sqrt{3}\tilde{V}_c) \quad (\text{Σχέση 5.98})$$

Και αν λυθούν οι σχέσεις αυτές ως προς τις συμμετρικές συνιστώσες, θα ισχύει:

$$\tilde{V}_a = \tilde{V}_0 + \tilde{V}_\alpha \quad (\text{Σχέση 5.99})$$

$$\tilde{V}_b = \tilde{V}_0 - \frac{1}{2}\tilde{V}_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{V}_\beta \quad (\text{Σχέση 5.100})$$

$$\tilde{V}_c = \tilde{V}_0 - \frac{1}{2}\tilde{V}_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{V}_\beta \quad (\text{Σχέση 5.101})$$

Στην περίπτωση αυτή όλοι οι όροι του μετασχηματισμού είναι πραγματικοί αριθμοί. Κατά την επίλυση τέτοιων προβλημάτων συνηθίζεται τα ρεύματα ή οι τάσεις μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας να εκφράζονται μέσω της φάσης ( $\alpha$ ). Ενώ τα αντίστοιχα μεγέθη των άλλων φάσεων ( $b, c$ ) μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν από την κατάλληλη περιστροφή  $\alpha$  ή  $\alpha^2$ .

Οι σχέσεις 5.96, 5.97 και 5.98 στην περίπτωση ενός συμμετρικού τριφασικού συστήματος διαμορφώνονται ως εξής:

$$\tilde{V}_0 = \frac{1}{3} * (\tilde{V}_a + \alpha\tilde{V}_a + \alpha^2\tilde{V}_a) = 0 \quad (\text{Σχέση 5.102})$$

$$\tilde{V}_\alpha = \frac{1}{3} * (2\tilde{V}_a - \alpha^2\tilde{V}_a - \alpha\tilde{V}_a) = \tilde{V}_a \quad (\text{Σχέση 5.103})$$

$$\tilde{V}_\beta = \frac{1}{3} * (\sqrt{3}\alpha^2\tilde{V}_a - \sqrt{3}\alpha\tilde{V}_a) = -j\tilde{V}_a \quad (\text{Σχέση 5.104})$$

Με αντικατάσταση των αποτελεσμάτων των σχέσεων 5.102, 5.103, 5.104 στην 5.100 προκύπτει:

$$\tilde{V}_b = -\frac{1}{2}\tilde{V}_a - \frac{\sqrt{3}}{2}j\tilde{V}_a \quad (\text{Σχέση 5.105})$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει ουσιαστικά το είδος των σχέσεων μεταξύ των συνιστωσών και των φασικών μεγεθών. Όπου για τα φασικά μεγέθη ισχύει:  $\tilde{V}_\varphi = Z_\varphi * \tilde{I}_\varphi$  (Σχέση 5.106).

Με το μετασχηματισμό σε συνιστώσες (α, β, 0), η σχέση 5.106 για την φάση (α) γίνεται:

$$\tilde{V}_\alpha = Z_\alpha * \tilde{I}_\alpha \quad (\text{Σχέση 5.107})$$

Για το συμμετρικό τριφασικό σύστημα, που μελετάται στην προκειμένη περίπτωση, οι αμοιβαίες αντιστάσεις ακολουθίας των συμμετρικών συνιστωσών είναι μηδενικές και για αυτές ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$Z_{\alpha\alpha} = \frac{1}{2}(Z_{11} + Z_{22}) \quad (\text{Σχέση 5.108})$$

$$Z_{\beta\beta} = \frac{1}{2}(Z_{11} + Z_{22}) \quad (\text{Σχέση 5.109})$$

$$Z_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}(Z_{11} + Z_{22}) \quad (\text{Σχέση 5.110})$$

$$Z_{\beta\alpha} = \frac{1}{2}(Z_{11} + Z_{22}) \quad (\text{Σχέση 5.111})$$

$$Z_{00} = Z_{00} \quad (\text{Σχέση 5.112})$$

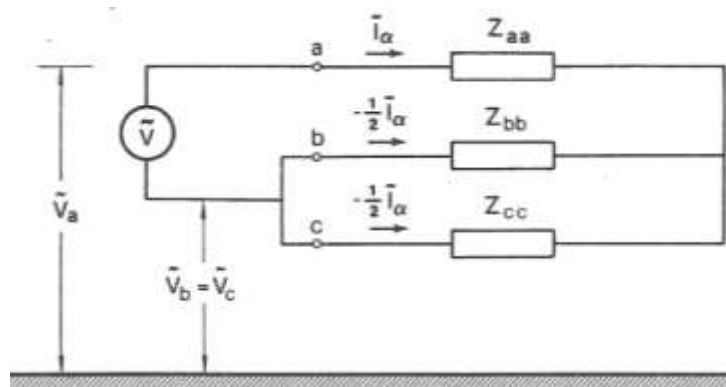
$$Z_{0\alpha} = Z_{\alpha 0} = Z_{0\beta} = Z_{\beta 0} \quad (\text{Σχέση 5.113})$$

Όπου οι αντιστάσεις  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$ ,  $Z_{00}$  είναι οι αντίστοιχες αντιστάσεις ακολουθίας των συμμετρικών συνιστωσών.

Για ( $Z_{11} \neq Z_{22}$ ) υπάρχει ζεύξη μεταξύ των κυκλωμάτων άλφα και βήτα, παρόλο που δεν υπάρχει ζεύξη στα αντίστοιχα κυκλώματα ακολουθίας των συμμετρικών συνιστωσών. Στην περίπτωση αυτή ο μετασχηματισμός Clarke δεν προτιμάται.

Αντίθετα για ( $Z_{11} = Z_{22}$ ) ισχύει ( $Z_{11} = Z_{\alpha\alpha} = Z_{\beta\beta}$ ) και ( $Z_{00} = Z_{00}$ ) με όλες τις ζεύξεις να είναι μηδενικές.

Εάν ένα τριφασικό δίκτυο είναι συμμετρικό ως προς τη φάση (α) με ( $Z_{bb} = Z_{cc} \neq Z_{aa}$ ), τότε η ροή ρευμάτων ακολουθίας άλφα θα υπολογιστεί μέσω της αντίστασης ακολουθίας (α), για το συγκεκριμένο τμήμα του δικτύου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.40.



Εικόνα 5.40 : Διάταξη τριφασικού κυκλώματος για τον υπολογισμό της αντιστάσεως ακολουθίας άλφα. [28]

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Έτσι η αντίσταση του βρόγχου είναι:  $Z_{\beta\rho} = \frac{\tilde{V}}{\tilde{I}_a} = Z_{aa} + \frac{Z_{bb}}{2}$  (Σχέση 5.114)

Τα ρεύματα είναι:  $\tilde{I}_b = \tilde{I}_c = -\frac{1}{2}\tilde{I}_a$  (Σχέση 5.115)

Και αντίστοιχα οι τάσεις είναι:  $\tilde{V}_b = \tilde{V}_c$  (Σχέση 5.116) και  $\tilde{V} = \tilde{V}_a + \tilde{V}_b$  (Σχέση 5.117)

Σύμφωνα με το μετασχηματισμό Clarke ισχύει πως:

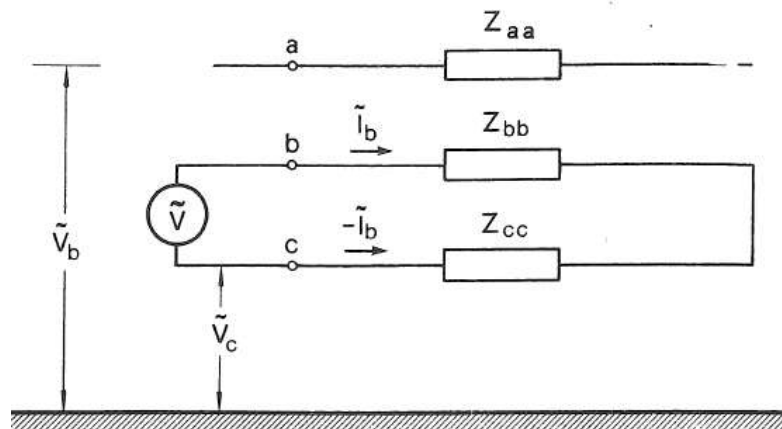
$\tilde{I}_\alpha = \frac{1}{3}(2\tilde{I}_a - \tilde{I}_b - \tilde{I}_c) = \tilde{I}_a$  (Σχέση 5.118)

$\tilde{V}_\alpha = \frac{1}{3}(2\tilde{V}_a - \tilde{V}_b - \tilde{V}_c) = \frac{2}{3}\tilde{V}$  (Σχέση 5.119)

Έτσι η αντίσταση βρόγχου είναι τελικά:  $Z_{\beta\rho} = \frac{3\tilde{V}_\alpha}{2\tilde{I}_\alpha}$  (Σχέση 5.120)

με  $Z_{\alpha\alpha} = \frac{\tilde{V}_\alpha}{\tilde{I}_\alpha} = \frac{2}{3}Z_{\beta\rho}$  (Σχέση 5.121)

Για τον προσδιορισμό της αντίστασης ακολουθίας βήτα χρήσιμο είναι το κύκλωμα της Εικόνας 5.41.



Εικόνα 5.41 : Διάταξη τριφασικού κυκλώματος για τη μέτρηση της αντίστασης ακολουθίας βήτα. [28]

Ισχύει για την αντίσταση βραχυκύκλωσης:  $Z_{\beta\rho} = \frac{\tilde{V}}{\tilde{I}_b}$  (Σχέση 5.122)

Και αφού:  $\tilde{I}_b = -\tilde{I}_c$  (Σχέση 5.123),  $\tilde{I}_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_b)$  (Σχέση 5.124),  $\tilde{V} = \tilde{V}_b - \tilde{V}_c$  (Σχέση 5.125)

Προκύπτει τελικά:  $Z_{\beta\rho} = \frac{\sqrt{3}\tilde{V}_\beta}{\frac{\sqrt{3}}{2}\tilde{I}_\beta}$  (Σχέση 5.126) με  $Z_{\beta\beta} = \frac{\tilde{V}_\beta}{\tilde{I}_\beta} = \frac{1}{2}Z_{\beta\rho}$  (Σχέση 5.127)

Αξίζει να σημειωθεί πως στην παραπάνω ανάλυση οι αντιστάσεις προσδιορίζονται με βάση τις φασικές τάσεις ως προς τον ουδέτερο.



### 5.4.3 Κυκλώματα ακολουθίας

Τα κυκλώματα ακολουθίας του μετασχηματισμού Clarke ακολουθούν παρόμοια μεθοδολογία με αυτή των συμμετρικών συνιστωσών. Στην περίπτωση όπου ( $Z_{11} = Z_{22}$ ) και τα κυκλώματα ακολουθίας των συμμετρικών συνιστωσών δεν έχουν ζεύξεις θα ισχύει:

$$\tilde{V}_0 = \tilde{E}_0 - \tilde{I}_0 * Z_{00} \quad (\text{Σχέση 5.128})$$

$$\tilde{V}_\alpha = \tilde{E}_\alpha - \tilde{I}_\alpha * Z_{\alpha\alpha} \quad (\text{Σχέση 5.129})$$

$$\tilde{V}_\beta = \tilde{E}_\beta - \tilde{I}_\beta * Z_{\beta\beta} \quad (\text{Σχέση 5.130})$$

Και εδώ οι εξισώσεις είναι ανεξάρτητες και τα κυκλώματα ακολουθίας ανεξάρτητα μεταξύ τους. Έτσι, οι συνιστώσες Clarke των τάσεων για συμμετρικό τριφασικό σύστημα θα είναι:

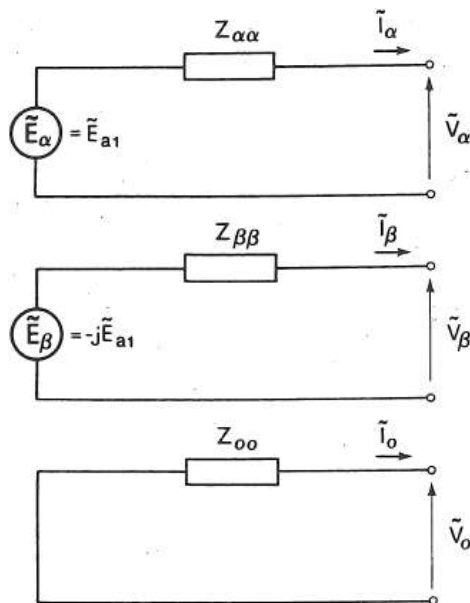
$$\tilde{E}_0 = 0 \quad (\text{Σχέση 5.131})$$

$$\tilde{E}_\alpha = \frac{2}{3} \left( 1 - \frac{\alpha^2 + \alpha}{2} \right) * \tilde{E}_a = \tilde{E}_a \quad (\text{Σχέση 5.132})$$

$$\tilde{E}_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} (\alpha^2 - \alpha) * \tilde{E}_a = -j\tilde{E}_a \quad (\text{Σχέση 5.133})$$

Από όπου προκύπτει πως για συμμετρικές τάσεις:  $\tilde{E}_\alpha = \tilde{E}_{a1}$ ,  $\tilde{E}_\beta = -j\tilde{E}_{a1}$ ,  $\tilde{E}_0 = 0$  (Σχέση 5.134)

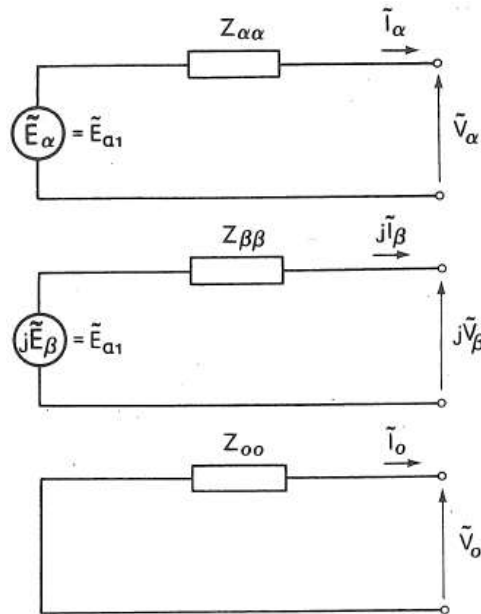
Από τις εξισώσεις αυτές φαίνεται ακόμα πως η συμμετρική τριφασική πηγή περιέχει και άλφα και βήτα συνιστώσες, οι οποίες είναι ίσες σε μέγεθος και διαφέρουν κατά  $90^\circ$  σε φασική απόκλιση.



Εικόνα 5.42 : Κυκλώματα ακολουθίας α, β, 0. [28]

Όπου οι τάσεις ( $\tilde{E}_\alpha$ ,  $\tilde{E}_\beta$ ) είναι οι τάσεις ανοικτοκυκλώσεως όπως φαίνονται από κάποιο σημείο του συστήματος προ του σφάλματος. Ενώ οι αντιστάσεις ( $Z_{00}$ ,  $Z_{\alpha\alpha}$ ,  $Z_{\beta\beta}$ ) αφορούν όλο το δίκτυο όπως αυτές φαίνονται από τις αντίστοιχες τάσεις των ακροδεκτών του συστήματος.

Στην Εικόνα 5.43 φαίνονται τα κυκλώματα ακολουθίας, όταν όλα τα ηλεκτρικά μεγέθη του κυκλώματος βήτα είναι πολλαπλασιασμένα αυθαίρετα με ( $j$ ).



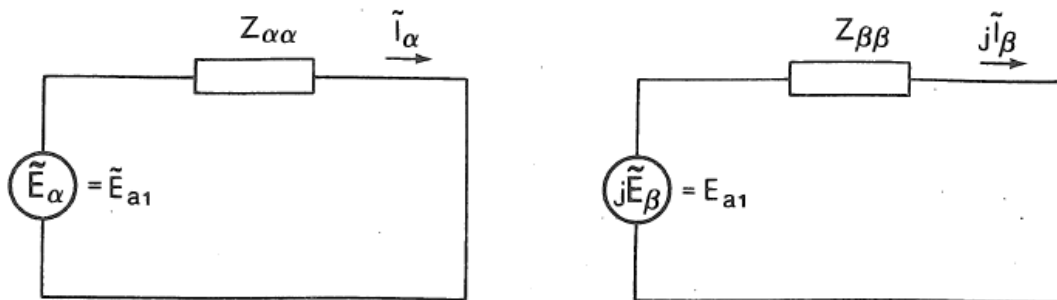
Εικόνα 5.43 : Κυκλώματα ακολουθίας  $\alpha$ ,  $\beta$ , 0 με τροποποιημένο το κύκλωμα βήτα. [28]

#### 5.4.4 Ανάλυση σφαλμάτων

Γενικά κατά την εξέλιξη ενός τριφασικού βραχυκυκλώματος ισχύει:

$$\tilde{V}_a = \tilde{V}_b = \tilde{V}_c = 0 \quad (\text{Σχέση 5.135}) \quad \text{και} \quad \tilde{I}_a + \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 0 \quad (\text{Σχέση 5.136})$$

Τότε σύμφωνα με τους τύπους μετασχηματισμού Clarke προκύπτει:  $\tilde{I}_0 = 0$ ,  $\tilde{V}_\alpha = 0$ ,  $\tilde{V}_\beta = 0$ . Έτσι τα κυκλώματα ακολουθίας θα είναι όπως δείχνει η Εικόνα 5.44.



Εικόνα 5.44 : Κυκλώματα άλφα και βήτα σε περίπτωση τριφασικού σφάλματος. [28]

Διακρίνεται εύκολα πως τα δύο κυκλώματα της Εικόνας 5.44 είναι ίσα και επομένως η λύση για το  $\tilde{I}_\alpha$  θα ταυτίζεται αντίστοιχα με την λύση για το  $\tilde{I}_\beta$ .

$$\tilde{I}_\alpha = \frac{\tilde{E}_\alpha}{Z_{\alpha\alpha}} = j\tilde{I}_\beta \quad (\text{Σχέση 5.137}) \quad \text{και} \quad \tilde{I}_\beta = -j \frac{\tilde{E}_{a1}}{Z_{\beta\beta}} \quad (\text{Σχέση 5.138})$$

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε αυτή την περίπτωση θα υπολογίζεται ως εξής:

$$\tilde{I}_F = \tilde{I}_\alpha = \tilde{I}_a = \frac{\tilde{E}_\alpha}{Z_{\alpha\alpha}} = \frac{\tilde{E}_{a1}}{Z_{11}} \quad (\text{Σχέση 5.139})$$

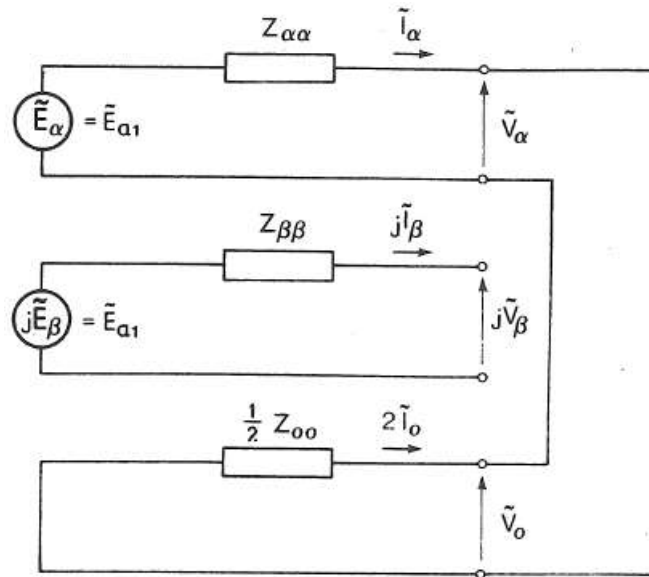
Για συνθήκες μονοφασικού σφάλματος, όπου ( $\tilde{V}_a = 0$ ) και ( $\tilde{I}_b = \tilde{I}_c = 0$ ), οι εξισώσεις Clarke δίνουν:

$$\tilde{V}_\alpha + \tilde{V}_0 = 0 \text{ (Σχέση 5.140)}$$

$$\tilde{I}_\beta = 0 \text{ (Σχέση 5.141)}$$

$$\tilde{I}_\alpha = 2 * \tilde{I}_0 \text{ (Σχέση 5.142)}$$

Για το ομοπολικό κύκλωμα ισχύει:  $\tilde{V}_0 = -2\tilde{I}_0 * \frac{Z_{00}}{2}$  (Σχέση 5.143)



Εικόνα 5.45 : Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για μονοφασικό σφάλμα. [28]

Όσον αφορά την περίπτωση του διαφασικού σφάλματος (b-c) χωρίς γη με βασικές εξισώσεις:

$$\tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 0 \text{ (Σχέση 5.144)}$$

$$\tilde{I}_\alpha = 0 \text{ (Σχέση 5.145)}$$

$$\tilde{V}_b = \tilde{V}_c \text{ (Σχέση 5.146)}$$

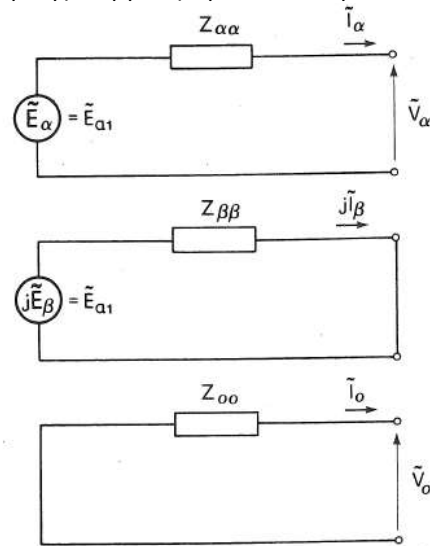
Οι αντίστοιχες σχέσεις που δίνουν οι μετασχηματισμοί Clarke θα είναι:

$$\tilde{V}_\beta = 0 \text{ (Σχέση 5.147)}$$

$$\tilde{I}_\alpha = \tilde{I}_0 = 0 \text{ (Σχέση 5.148)}$$

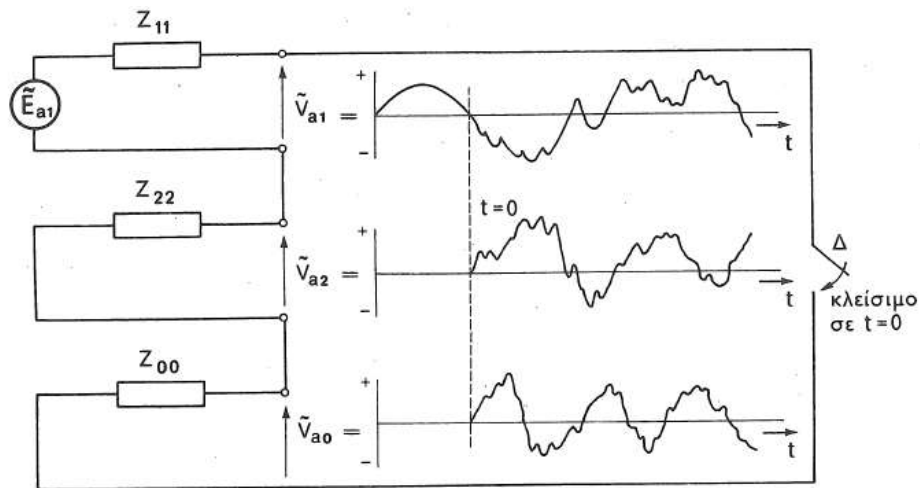
Από τις σχέσεις 5.147, 5.148 φαίνεται πως το ρεύμα σφάλματος παρέχεται μόνο από το κύκλωμα βήτα, αφού το ρεύμα βραχυκύκλωσης για αυτές τις συνθήκες πρέπει να είναι μηδέν στη φάση (α) και ίσο και αντίθετο στις φάσεις (b-c), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.46.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 5.46 : Κυκλώματα ακολουθίας για διαφασικό σφάλμα. [28]

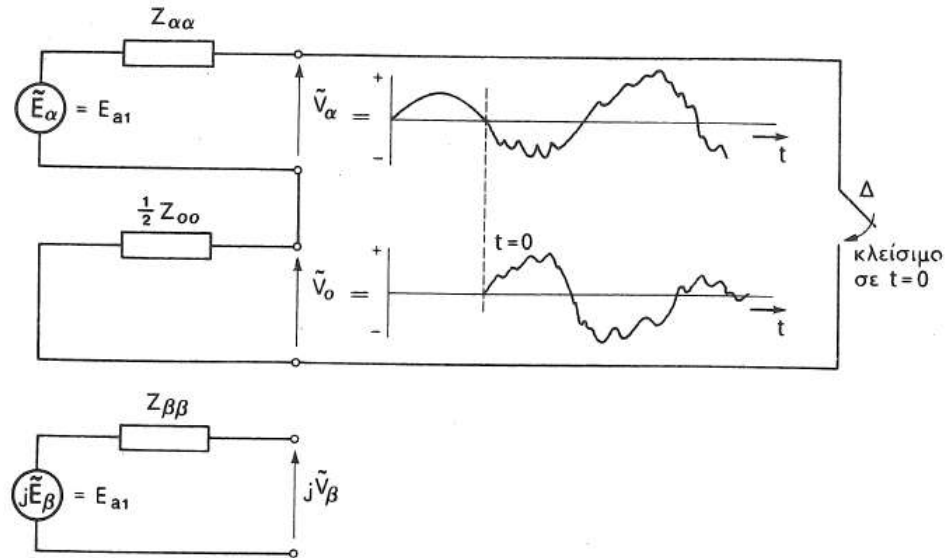
Στη συνέχεια αρχικά γίνεται αναφορά στον τρόπο μελέτης των μεταβατικών καταστάσεων ενός δικτύου με τη χρήση των κυκλωμάτων ακολουθίας των συμμετρικών συνιστωσών.



Εικόνα 5.47 : Μεταβατική απόκριση σε μονοφασικό σφάλμα με τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών. [28]

Η λύση του παραπάνω προβλήματος απαιτεί λεπτομερή ανάλυση, η οποία θα περιλαμβάνει τουλάχιστον και μια μορφή παλμογραφήματος, όπως αυτό της Εικόνας 5.47. Επιπλέον, η λύση για τις συνιστώσες της τάσης ( $\tilde{V}_\alpha$ ) περιέχει πολλές συχνότητες, αλλά είναι εφικτή και σχετικά εύκολη για τις μεταβατικές κυματομορφές. Αντίθετα η επίλυση για τις συνιστώσες των φάσεων (b-c) είναι δυσκολότερη, αφού απαιτεί τον προσδιορισμό όλων των συνιστωσών συχνότητας, οι οποίες στη συνέχεια πρέπει να στραφούν κατά  $(\alpha)$  και  $(\alpha^2)$  αντίστοιχα. Επομένως είναι λογικό πως οι συμμετρικές συνιστώσες δεν είναι κατάλληλες σε πρακτικό κομμάτι, ώστε να επιλύσουν τα περισσότερα μεταβατικά προβλήματα.

Αν όμως το μονοφασικό σφάλμα εκφραστεί μέσω των κυκλωμάτων ακολουθίας των συνιστωσών Clarke, όπως φαίνεται και παρακάτω, τότε η διαδικασία επίλυσης απλοποιείται σημαντικά.



Εικόνα 5.48 : Μεταβατική απόκριση μονοφασικού σφάλματος με τη μέθοδο των συνιστωσών Clarke. [28]

Παρόλο που και πάλι οι τάσεις ( $\tilde{V}_\alpha$ ) και ( $\tilde{V}_0$ ) έχουν λύσεις με πολλαπλές συχνότητες η τελική μετατροπή των συνιστωσών σε μεγέθη φάσεων, ακόμα και για τις μεταβατικές κυματομορφές, πραγματοποιείται χωρίς στροφή, άρα και χωρίς μεγάλη δυσκολία στους υπολογισμούς. Επομένως για αυτούς τους λόγους στην επίλυση των μεταβατικών προβλημάτων οι συνιστώσες Clarke κρίνονται πιο εύστοχες και ευκολόχρηστες από τις αντίστοιχες συμμετρικές.

## 5.5 Υπολογισμοί κατά IEC-60909-0

### 5.5.1 Ορισμοί

Γενικά ο υπολογισμός ενός θερμικού βραχυκυκλώματος δεν είναι μια εύκολη υπόθεση. Γι' αυτό πρέπει να υπάρχει ένας διεθνής κώδικας αποτύπωσης και επίλυσης τέτοιου είδους προβλημάτων. Ένα κοινό παρονομαστή στο παραπάνω ζήτημα έχει δώσει, με μεγάλη επιτυχία, η Διεθνής Επιτροπή Ηλεκτροτεχνίας (IEC).

Ο τομέας του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού διανομής και εγκαταστάσεων της επιτροπής αυτής προσφέρει τεχνολογίες και μοντέλα με εφαρμογή σε όλη την αλυσίδα της ηλεκτροδότησης, από τον υποσταθμό έως το σημείο της κατανάλωσης.

Στη συνέχεια δίνονται οι βασικότεροι ορισμοί των μεγεθών που σχετίζονται με τα ηλεκτρολογικά βραχυκυκλώματα, όπως αυτά παρουσιάζονται από την εταιρία ABB, ώστε να γίνει πιο κατανοητό το περιεχόμενο του τρέχοντος κεφαλαίου.

- Ως βραχυκύκλωμα ορίζεται αρχικά η τυχαία ή σκόπιμη σύνδεση με χαμηλή αντίσταση δύο ή περισσότερων σημείων ενός κυκλώματος με διαφορετική τάση.
- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ουσιαστικά το ρεύμα σε ένα κύκλωμα όπου λαμβάνει χώρα ένα βραχυκύκλωμα.
- Το αναμενόμενο (διαθέσιμο) ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι το ρεύμα που θα προκύψει εάν το βραχυκύκλωμα αντικατασταθεί από μια ιδανική σύνδεση με αμελητέα αντίσταση, χωρίς μεταβολή της τροφοδοσίας του συστήματος.
- Το συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης αποτελείται από την ενεργό τιμή του συμμετρικού εναλλασσόμενου ρεύματος, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συνιστώσα συνεχούς ρεύματος.

- Το αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I''_k$  εξαρτάται πρακτικά μόνο από την ενεργό τιμή του συμμετρικού Ε.Ρ. τη στιγμή που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα, εάν βέβαια η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώματος διατηρεί τη τιμή της στο χρόνο μηδέν ( $t_0$ ).
- Η αρχική συμμετρική (φαινόμενη) ισχύς βραχυκύκλωσης  $S''_k$  προσδιορίζεται από το αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I''_k$ , την ονομαστική τάση του συστήματος  $V_n$  καθώς και τον παράγοντα  $\sqrt{3}$ .  
$$S''_k = \sqrt{3} * I''_k * V_n \text{ (Σχέση 5.149)}$$
- Η συνιστώσα συνεχούς ρεύματος του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $i_{DC}$  ορίζεται ως η μέση τιμή του συνολικού ρεύματος βραχυκύκλωσης από την αρχική τιμή έως τη τιμή μηδέν.
- Το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης καθορίζεται από τη μέγιστη δυνατή στιγμιαία τιμή του αναμενόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης.
- Το συμμετρικό ρεύμα διακοπής βραχυκυκλώματος  $I_\alpha$  είναι ουσιαστικά η ενεργός τιμή του συμμετρικού Ε.Ρ. κατά τη χρονική στιγμή του διαχωρισμού των επαφών της φάσης και της συσκευής διακοπής ρεύματος του συστήματος.
- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης σταθερής κατάστασης  $I_k$  αποτελείται από την ενεργό τιμή του συμμετρικού Ε.Ρ. που παραμένει μετά το πέρας των παροδικών φαινομένων.
- Η ανεξάρτητη πηγή τάσης αποτελεί ένα ενεργό στοιχείο που μπορεί να παρασταθεί ως μία ιδανική πηγή τάσης σε σειρά με ένα παθητικό στοιχείο ανεξάρτητα από τα ρεύματα και τις άλλες τάσεις του δικτύου.
- Η ονομαστική τάση του συστήματος  $V_n$  ορίζεται ως η τάση από γραμμή σε γραμμή (πολική τάση), η οποία είναι καθορισμένη και φέρει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά λειτουργίας στο σύστημα που εφαρμόζεται.
- Το βραχυκύκλωμα μακριά από τη γεννήτρια είναι εκείνο όπου το μέγεθος του συγκεκριμένου ρεύματος βραχυκύκλωσης παραμένει ουσιαστικά σταθερό.
- Το βραχυκύκλωμα κοντά στη γεννήτρια ορίζεται ως το βραχυκύκλωμα όπου τουλάχιστον μια σύγχρονη μηχανή παρέχει ένα αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης μεγαλύτερο από το διπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος της μηχανής.
- Η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώματος θετικής ακολουθίας  $Z_1$  τριφασικού εναλλασσόμενου συστήματος είναι ουσιαστικά η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας, όπως αυτή φαίνεται από τη θέση του σφάλματος.
- Η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώματος αρνητικής ακολουθίας  $Z_2$  τριφασικού εναλλασσόμενου συστήματος από την άλλη αποτελεί τη σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας, όπως αυτή φαίνεται από τη θέση του σφάλματος.
- Ομοίως η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώματος μηδενικής ακολουθίας  $Z_0$  τριφασικού εναλλασσόμενου συστήματος είναι η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας, όπως αυτή φαίνεται από τη θέση του σφάλματος.
- Η ελάχιστη καθυστέρηση χρόνου  $t_{min}$  αποτελεί το συντομότερο χρόνο που απαιτείται από την έναρξη του βραχυκυκλώματος έως ότου ανοίξουν οι πρώτες επαφές των διακοπτικών στοιχείων του συστήματος.

Σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς το σύστημα των κανονισμών της IEC-60909 ορίζει με τη σειρά του τις μεταβλητές της μεθόδου επίλυσης τριφασικών βραχυκυκλωμάτων με συμμετρικές συνιστώσες θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας.

Έτσι ορίζονται ακόμα:

- Το ρεύμα στο σύστημα θετικής ακολουθίας:  $I_m = \frac{1}{3}(I_1 + \alpha I_2 + \alpha^2 I_3)$  (Σχέση 5.150)
- Το ρεύμα στο σύστημα αρνητικής ακολουθίας:  $I_g = \frac{1}{3}(I_1 + \alpha^2 I_2 + \alpha I_3)$  (Σχέση 5.151)
- Το ρεύμα στο σύστημα θετικής ακολουθίας:  $I_0 = \frac{1}{3}(I_1 + I_2 + I_3)$  (Σχέση 5.152)

Όπου  $I_1, I_2, I_3$  αποτελούν τα συμμετρικά ρεύματα που παρέχονται από τριφασική συμμετρική πηγή τάσεων και οι περιστροφικοί συντελεστές  $\alpha = e^{j120^\circ}$ ,  $\alpha^2 = e^{j240^\circ}$ ,  $1 + \alpha^2 + \alpha = 0$ .

Έτσι επέρχεται η γραφική επίλυση του προβλήματος όπως παρουσιάζεται και στη συνέχεια.

### 5.5.2 Βασική υπολογιστική διαδικασία

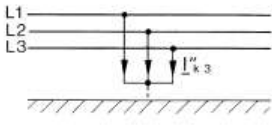
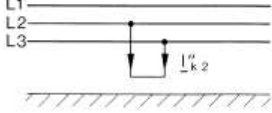
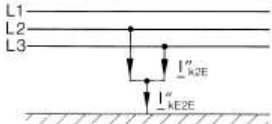
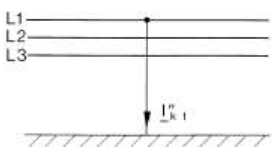
Σύμφωνα με τους κανονισμούς για βραχυκυκλώματα σε εγκαταστάσεις της IEC-60909 τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού των ηλεκτρικών δικτύων καθορίζονται κυρίως από τα ρεύματα βραχυκύκλωσης και τις αντίστοιχες δυνάμεις που προκύπτουν κατά τα φαινόμενα αυτά. Έτσι, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης με βάση τους ακόλουθους κανονισμούς.

Αρχικά είναι γνωστό πως κατά την εξέλιξη του φαινομένου οι θερμοκρασίες, οι επαγωγικές αντιδράσεις, οι αντιστάσεις επαφής και οι αγωγοί αποτελούν κάποιους από τους παράγοντες που μπορούν να μειώσουν το τελικό ρεύμα βραχυκύκλωσης. Δεδομένου όμως, πως η συνεισφορά των στοιχείων αυτών δεν μπορεί να προσδιοριστεί ακριβώς, οι παράγοντες αυτοί συμμετέχουν στους υπολογισμούς μέσω του ειδικού συντελεστή (  $c$  ). Στον ακόλουθο Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται συγκεντρωμένες οι τιμές του συντελεστή (  $c$  ) που συμμετέχουν στον υπολογισμό των αρχικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

Nominal voltage	Voltage factor c for calculating	
	the greatest short-circuit current $c_{max}$	the smallest short-circuit current $c_{min}$
Low voltage		
100 V to 1000 V (see IEC 38, Table I)		
a) 230 V / 400 V	1.00	0.95
b) other voltages	1.05	1.00
Medium voltage		
>1 kV to 35 kV (see IEC 38, Table III)	1.10	1.00
High-voltage		
> 35 kV to 230 kV (see IEC 38, Table IV)	1.10	1.00
380 kV	1.10	1.00

Πίνακας 5.2 : Παράγοντας τάσης (  $c$  ). [32]

Στον Πίνακα 5.3 φαίνονται αναλυτικότερα οι τύποι που αξιοποιούνται προκειμένου να προσδιοριστούν τα αρχικά ρεύματα και η ισχύς βραχυκύκλωσης, ανάλογα πάντα με το είδος του σφάλματος.

Kind of fault	Dimension equations (IEC 909)	Numerical equations of the % / MVA systems
Three-phase fault with or without earth fault	 $I''_{k3} = \frac{1.1 \cdot U_n}{\sqrt{3}  Z_1 }$ $S''_k = \sqrt{3} U_n I''_{k3}$	$I''_{k3} = \frac{1.1 \cdot 100 \%}{ \sqrt{3} Z_1 } \cdot \frac{1}{U_n}$ $S''_k = \frac{1.1 \cdot 100 \%}{Z_1}$
Phase-to-phase fault clear of ground	 $I''_{k2} = \frac{1.1 \cdot U_n}{ Z_1 + Z_2 }$	$I''_{k2} = \frac{1.1 \cdot 100 \%}{ Z_1 + Z_2 } \cdot \frac{1}{U_n}$
Two-phase-to-earth fault	 $I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1.1 U_n}{ Z_1 + Z_0 + Z_0 \frac{Z_1}{Z_2} }$	$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 100 \%}{ Z_1 + Z_0 + Z_0 \frac{Z_1}{Z_2} } \cdot \frac{1}{U_n}$
Phase-to-earth fault	 $I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot U_n}{ Z_1 + Z_2 + Z_0 }$	$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 100 \%}{ Z_1 + Z_2 + Z_0 } \cdot \frac{1}{U_n}$

Πίνακας 5.3 : Τύποι υπολογισμών των αρχικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης ανάλογα με το είδος του σφάλματος, σύμφωνα με το πρότυπο IEC-909. [32]

Παρόλο που υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των μεταβλητών υπολογισμού του τρέχοντος κανονισμού και των αντίστοιχων μεταβλητών που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, είναι προφανές πως οι τύποι και σε όλες τις περιπτώσεις εκφράζονται από τα ίδια ποιοτικά μεγέθη και καταλήγουν σε πανομοιότυπα αποτελέσματα τα οποία καταλήγουν σε ορθά συμπεράσματα.

Κατά τον υπολογισμό του ρεύματος αιχμής  $I_p$  στην μέθοδο επίλυσης του IEC δεν λαμβάνονται υπόψη τα διαδοχικά σφάλματα. Τα συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα υπολογίζονται δεδομένου πως συμβαίνουν ταυτόχρονα και στις τρεις φάσεις.

Έτσι:  $I_p = \kappa * 2 * I''_k$  (Σχέση 5.153)

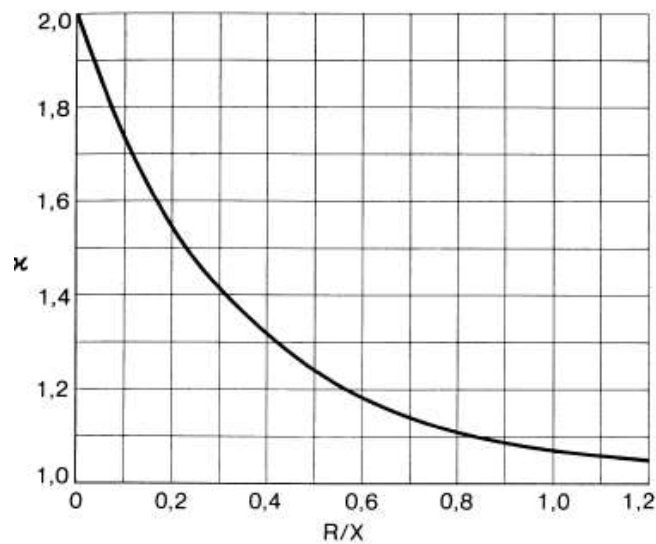
Όπου ( $\kappa$ ) είναι ο παράγοντας που περιέχει τη συνεισφορά του παράγοντα Σ.Ρ. στην εξέλιξη του φαινομένου. Με:  $\kappa = 1,02 + 0,98 * e^{-3\frac{R}{X}}$  (Σχέση 5.154)

Ο ακριβής υπολογισμός του  $I_p$  μέσω του συντελεστή ( $\kappa$ ) είναι δυνατός μόνο σε δίκτυα που φέρουν ίδιο τον όρο ( $R/X$ ) σε όλους τους κλάδους του (συμμετρικό). Στην περίπτωση όπου το δίκτυο περιλαμβάνει παράλληλους κλάδους με πολύ διαφορετικούς όρους ( $R/X$ ) εφαρμόζονται οι παρακάτω μέθοδοι προσέγγισης του ρεύματος.

1. Ο παράγοντας ( $\kappa$ ) προσδιορίζεται ομοίμορφα για τη μικρότερη αναλογία  $\frac{R}{X}$ .
2. Ο συντελεστής ( $\kappa$ ) προσδιορίζεται από την προκύπτουσα σύνθετη αντίσταση  $Z_k = R_k + jX_k$ , όπως αυτή φαίνεται από τη θέση σφάλματος, χρησιμοποιώντας τον όρο ( $1,15\kappa$ ) για τον υπολογισμό του  $I_p$ .
3. Ο παράγοντας ( $\kappa$ ) μπορεί επίσης να υπολογιστεί με τη μέθοδο της ισοδύναμης αντίστασης, όπως αυτή παρουσιάζεται στο πρότυπο IEC-909, παρ.9.1.3.2.



Η μέγιστη τιμή του ( $\kappa = 2$ ) επιτυγχάνεται μόνο στη θεωρητική περίπτωση όπου η αντίσταση ( $R=0$ ) κατά τη διαδρομή που ακολουθεί το βραχυκύκλωμα. Η εμπειρία παρ' όλα αυτά δείχνει πως για ένα βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες μιας γεννήτριας η τιμή του ( $\kappa$ ) δεν ξεπερνά το 1,8 για μηχανές <100MVA. Στην Εικόνα 5.49 παρουσιάζεται το διάγραμμα υπολογισμού του συντελεστή ( $\kappa$ ) συναρτήσει του όρου ( $R/X$ ).



Εικόνα 5.49 : Διάγραμμα προσδιορισμού συντελεστή ( $\kappa$ ). [26]

Για το συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{\alpha}$  από τριφασικό σφάλμα σε μηχανή ισχύει γενικά πως:

$$I_{\alpha} = \mu * I''_{\kappa G} \quad (\text{Σχέση 5.155}) \quad (\text{για σύγχρονη μηχανή})$$

$$I_{\alpha} = \mu * I''_{\kappa Q} \quad (\text{Σχέση 5.156}) \quad (\text{για δίκτυο})$$

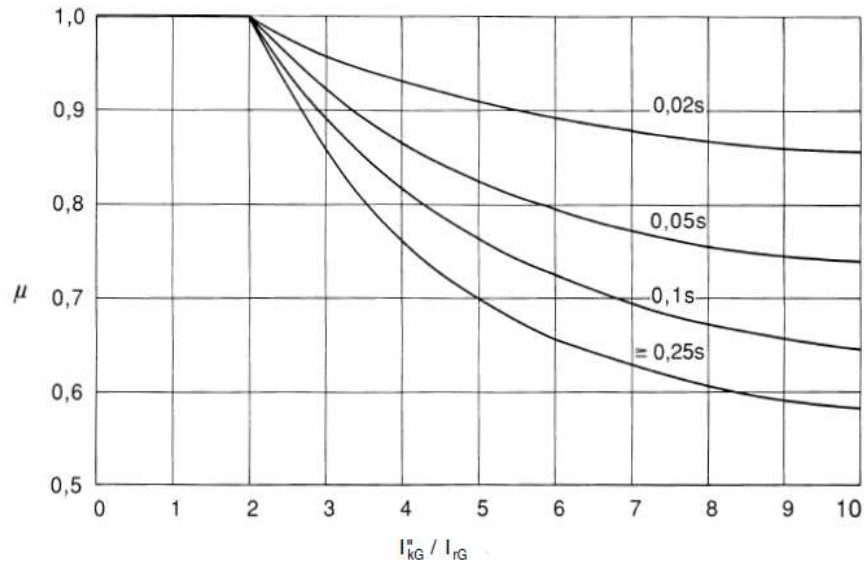
Ο συντελεστής ( $\mu$ ) υποδηλώνει τη συνεισφορά του συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά τη διάρκεια του ελάχιστου χρόνου καθυστέρησης διακοπής ( $t_{min}$ ). Μπορεί να προσδιοριστεί γενικά, είτε από τους ακόλουθους τύπους, είτε από το διάγραμμα της Εικόνας 5.50.

$$\mu = 0,84 + 0,26 * e^{-0,26} * I''_{\kappa G} / I_{rG} \quad (\text{Σχέση 5.157}) \quad (\text{για } t_{min} = 0,02s)$$

$$\mu = 0,62 + 0,72 * e^{-0,32} * I''_{\kappa G} / I_{rG} \quad (\text{Σχέση 5.158}) \quad (\text{για } t_{min} = 0,10s)$$

$$\mu_{max} = 1 \quad (\text{Σχέση 5.159})$$

Όπου  $I''_{\kappa G}$  είναι το αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης του δικτύου της σύγχρονης μηχανής και  $I_{rG}$  είναι το ονομαστικό ρεύμα της σύγχρονης μηχανής.



Εικόνα 5.50 : Διάγραμμα προσδιορισμού συντελεστή (μ). [26]

Ένα από τα συστήματα επίλυσης που αξιοποιεί το IEC είναι και το ανά μονάδα σύστημα (%/MVA), το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε δίκτυα υψηλής τάσης. Οι σύνθετες αντιστάσεις του ηλεκτρικού εξοπλισμού σε αυτή τη μέθοδο υπολογισμού προσδιορίζονται όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.4.

Network component		Impedance z or reactance x	
Synchronous machine	$\frac{x_d''}{S_r}$	$x_d''$ = Subtransient reactance $S_r$ = Rated apparent power	in % in MVA
Transformer	$\frac{u_k}{S_r}$	$u_k$ = Impedance voltage drop $S_r$ = Rated apparent power	in % in MVA
Current-limiting reactor	$\frac{u_r}{S_D}$	$u_r$ = Rated voltage drop $S_D$ = Throughput capacity	in % in MVA
Induction motor	$\frac{I_r / I_{start}}{S_r} \cdot 100\%$	$I_r$ = Rated current $I_{start}$ = Starting current (with rated voltage and rotor short-circuited)	
Line	$\frac{Z' \cdot l \cdot 100\%}{U_n^2}$	$S_r$ = Rated apparent power $Z'$ = Impedance per conductor $U_n$ = Nominal system voltage $l$ = Length of line	in MVA in Ω/km in kV in km
Series capacitor	$-\frac{X_c \cdot 100\%}{U_n^2}$	$X_c$ = Reactance per phase $U_n$ = Nominal system voltage	in Ω in kV
Shunt capacitor	$-\frac{100\%}{S_r}$	$S_r$ = Rated apparent power	in MVA
Network	$\frac{1.1 \cdot 100\%}{S_{kQ}''}$	$S_{kQ}''$ = Three-phase initial symmetrical short-circuit power at point of connection Q	in MVA

Πίνακας 5.4 : Πίνακας ανάλυσης τύπων υπολογισμού των αντιστάσεων και των αντιδράσεων κατά τη μέθοδο (% / MVA). [32]

Ο υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκύκλωσης με το ανά μονάδα σύστημα (% / MVA) αποδίδει γενικά επακριβή αποτελέσματα.

Reference values for  $Z_2/Z_1$  and  $Z_2/Z_0$

		$Z_2/Z_1$	$Z_2/Z_0$
to calculate			
$I_k''$	near to generator	1	–
	far from generator	1	–
$I_k$	near to generator	0.05...0.25	–
	far from generator	0.25...1	–
Networks	with isolated neutral	–	0
	with earth compensation	–	0
	with neutral earthed via impedances	–	0...0.25
Networks with effectively earthed neutral		–	> 0.25

Πίνακας 5.5 : Τιμές αναφοράς για τους όρους ( $Z_1/Z_2$ ) και ( $Z_2/Z_0$ ). [32]

Γενικά, για ρεύματα βραχυκυκλώσεων ασύμμετρων σφαλμάτων, οι εξισώσεις υπολογισμού των αρχικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης  $I_{kG}''$  δίνονται συνοπτικά από τον Πίνακα 5.3.

### 5.5.3 Σύνθετες αντιστάσεις στοιχείων

Όπως είναι γνωστό συνηθίζεται οι αντιστάσεις του ηλεκτρικού εξοπλισμού να δίνονται από τον κατασκευαστή. Παρ' όλα αυτά το πρότυπο του IEC-909 παρέχει αναλυτικούς τύπους υπολογισμών των αντιστάσεων μιας μεγάλης γκάμας δικτύων και εγκαταστάσεων προς καθοδήγηση των μελετητών. Στην τρέχουσα παράγραφο παρουσιάζονται κάποιες από τις συνηθέστερες περιπτώσεις υπολογισμού αντιστάσεων ηλεκτρικών συστημάτων σύμφωνα με το παραπάνω πρότυπο.

Για παράδειγμα, η σύνθετη αντίσταση του συστήματος τροφοδοσίας  $Z_Q$ , όπου γνωστά είναι μόνο η συμμετρική ισχύ σφάλματος  $S_{kQ}''$  ή το αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{kQ}''$  στο σημείο (Q) αντίστοιχα, υπολογίζεται ως εξής:

$$Z_Q = \frac{c \cdot V_{nQ}^2}{S_{kQ}''} = \frac{c \cdot V_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \quad (\text{Σχέση 5.160}) \quad \text{ή εναλλακτικά} \quad Z_Q = R_Q + jX_Q \quad (\text{Σχέση 5.161})$$

Όπου  $V_{nQ}$  είναι η ονομαστική τάση του συστήματος. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει τιμή για την ισοδύναμη ενεργή αντίσταση  $R_Q$  η Σχέση 5.161 γράφεται και  $X_Q = 0,995 * Z_Q$  (Σχέση 5.162) με  $R_Q = 0,1 * X_Q$ .

Κατά τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης μηχανής οι αντιστάσεις των γεννητριών λαμβάνονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$Z_{Gk} = K_G * Z_G = K_G * (R_G + jX_G) \quad (\text{Σχέση 5.163})$$

$$\text{με: } K_G = \frac{V_n}{V_{rG}} * \frac{c_{max}}{1 + X_d'' * \sin \varphi_{rG}} \quad (\text{Σχέση 5.164})$$

Όπου: η  $Z_{Gk}$  είναι η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση γεννήτριας, η  $Z_G$  είναι η αρχική σύνθετη αντίσταση γεννήτριας, ο  $C_{max}$  είναι ο συντελεστής τάσης, η  $V_n$  είναι η ονομαστική τάση του συστήματος τροφοδοσίας, η  $V_{TG}$  είναι η ονομαστική τάση της γεννήτριας και η  $X_d''$  είναι η υπομεταβατική αντίδραση της γεννήτριας σύνθετης αντίστασης.

## 5.6 Υπολογισμοί κατά IEC-61363

Η Διεθνής Επιτροπή Ηλεκτροτεχνίας (IEC), η οποία αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, έχει χωρίσει τους κανονισμούς της ανάλογα με το είδος της εγκατάστασης που παρατηρείται το βραχυκύκλωμα. Η τρέχουσα εργασία εξετάζει την περίπτωση ηλεκτρικής εγκατάστασης σύνδεσης πλοίου-ξηράς. Έτσι είναι λογικό πως χρειάζεται να παρουσιαστούν και τα αντίστοιχα πρότυπα υπολογισμού βραχυκυκλωμάτων σε εγκαταστάσεις E.P. πλοίων.

Ο συγκεκριμένος κλάδος καλύπτεται από τον κανονισμό IEC-61363, ο οποίος ορίζει σε πλωτές εγκαταστάσεις να γίνεται η μελέτη των βραχυκυκλωμάτων για κάθε δίκτυο. Επιπλέον στα πλοία απαιτείται εκτενής μελέτη για τα τριφασικά σφάλματα (δυσμενέστερη περίπτωση). Σε αυτή την περίπτωση όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για τη χρονική στιγμή ίση με τη πρώτη ημιπερίοδο ( $T/2$ ) της ονομαστικής ηλεκτρικής συχνότητας, όπου δεν υπάρχει ακόμα απόσβεση. Από την άποψη αυτή ο κανονισμός IEC-61363 χαρακτηρίζεται πιο αυστηρός, αφού πραγματεύεται πολυπλοκότερα συστήματα.

Στην περίπτωση των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων για παράδειγμα, ο υπολογισμός των τελικών ρευμάτων πραγματοποιείται σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναλυθεί στην ενότητα 5.2. Αναλύονται δηλαδή και οι συνεισφορές των γεννητριών και των παθητικών στοιχείων.

Ομοίως και για τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα η ανάλυση των σφαλμάτων διεξάγεται όπως ήδη έχει παρουσιαστεί και στην ενότητα 5.3. Αυτό συμβαίνει καθώς στον τρόπο υπολογισμού των ρευμάτων υπάρχει ταύτιση, τόσο σε εγκαταστάσεις ξηράς, όσο και σε εγκαταστάσεις πλοίου.

Η διαφοροποίηση τους ουσιαστικά είναι η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων στην τελική διαμόρφωση των χαρακτηριστικών της ηλεκτρικής εγκατάστασης.

Κατά τη φάση της σχεδίασης και μελέτης ενός ηλεκτρικού συστήματος η μελέτη των βραχυκυκλωμάτων παίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς από τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής επιλέγονται και διαστασιολογούνται οι διακόπτες ισχύος των πινάκων τροφοδοσίας. Ενώ ταυτόχρονα γίνονται και οι υπολογισμοί αντοχής των ζυγών τροφοδοσίας των ίδιων των πινάκων.

Στην ξηρά η παραπάνω διαδικασία γίνεται για τάσεις λειτουργίας μεγαλύτερες των 1000V, ενώ για τις πλωτές εγκαταστάσεις επιβάλλεται για κάθε επίπεδο τάσης με μικρές διακυμάνσεις. Έτσι επιλέγονται οι κατάλληλοι διακόπτες ισχύος βάσει των ακόλουθων παραμέτρων.

- Ονομαστική τάση λειτουργίας.
- Ικανότητα ζεύξης σε βραχυκύκλωμα, η οποία σχετίζεται με την κρουστική τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης.
- Ικανότητα διακοπής ρεύματος βραχυκύκλωσης, η οποία ισούται με τη συνιστώσα E.P. για χρόνο διακοπής ίσο με 3-4 περιόδους.

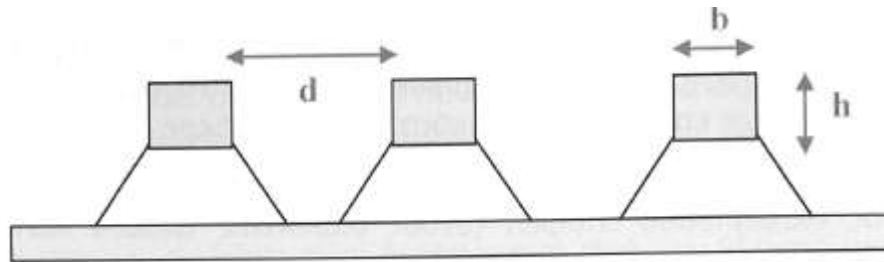
- Ικανότητα διακοπής συνιστώσας Σ.Ρ.
- Χρόνος διαχωρισμού διακοπών.
- Συντελεστής ισχύος κατά τη διακοπή βραχυκυκλώματος.

Οι τυποποιημένες τιμές ικανότητας διακοπής των διακοπών είναι: 10, 15, 25, 36, 50 kA.

Το σημαντικό ερώτημα είναι όμως σε ποιο σημείο είναι καλύτερο να γίνει ο υπολογισμός των ρευμάτων αυτών; Σύμφωνα με το κανονισμό IEC-61363 για τα πλοία η απάντηση του παραπάνω ερωτήματος είναι ουσιαστικά στους κύριους ζυγούς παραγωγής, στους ζυγούς τροφοδοσίας μεγάλων μηχανών και στους ζυγούς τροφοδοσίας μεγάλων φορτίων.

Αναλυτικότερα, οι διαστάσεις των ζυγών τροφοδοσίας των πινάκων εξαρτώνται κυρίως από το μέγιστο ρεύμα που τους διαρρέει κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Ωστόσο, επειδή κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος τα καλώδια αυτά διαρρέονται από πολύ μεγαλύτερα ρεύματα, υπάρχει κίνδυνος ταλάντωσης ή ακόμα και θραύσης τους, εξαιτίας των αναπτυσσόμενων δυνάμεων.

Επομένως η δύναμη μεταξύ των γειτονικών ζυγών υπολογίζεται ως εξής:



Εικόνα 5.51 : Τριφασικός ζυγός πίνακα ισχύος. [2]

$$F = 0,00204 \frac{\ell * I_{\rho}^2}{d} \text{ (kp)} \text{ (Σχέση 5.167)}$$

Όπου ( $\ell$ ) και ( $d$ ) είναι το μήκος και η απόσταση μεταξύ των ζυγών (cm), ενώ  $I_{\rho}$  είναι το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης (kA), όπως αυτό προκύπτει από τη μελέτη του βραχυκυκλώματος.

Η ροπή αντίστασης της ορθογωνικής διατομής του ζυγού είναι αντίστοιχα:

$$W = \frac{h * b^2}{6} \text{ (cm}^3\text{)} \text{ (Σχέση 5.168)}$$

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

Έτσι η ροπή στρέψης των ζυγών θα είναι:

$$M = \frac{F * \ell}{16} \text{ (kp/cm)} \text{ (Σχέση 5.169)}$$

Η ικανοποιητική μηχανική ανοχή των ζυγών ελέγχεται από τη σύγκριση του λόγου ( $M/W$ ), με μέγιστη επιτρεπόμενη κάμψη χάλκινου αγωγού ( $M/W \leq 1200 \text{ kp/cm}^2$ ).

Επιπλέον η συχνότητα μηχανικών ταλαντώσεων ( $f_m$ ) του χάλκινου ζυγού προκύπτει:

$$f_m = \frac{112}{\ell^2} * \sqrt{\frac{J * 1,1 * 10^6}{B}} \text{ (Hz)} \text{ (Σχέση 5.170)}$$

Όπου (B) είναι το βάρος του ζυγού σε (kp) και (J) είναι η ροπή αδράνειας του ζυγού.

$$J = \frac{h * b^3}{12} \text{ (cm}^4\text{)} \text{ (Σχέση 5.171)}$$

Γενικά σύμφωνα με τον IEC για να αποφευχθούν προβλήματα μηχανικού συντονισμού, πρέπει η συχνότητα ( $f_m$ ) να κυμαίνεται μεταξύ των περιοχών (5-10 Hz), διαφορετικά πρέπει να επιλεγούν ράβδοι με άλλα χαρακτηριστικά (μήκος, διατομή κοκ.).

Οι ενδεικτικές τιμές των παραπάνω μεγεθών είναι συγκεκριμένα:

$$B = 0,070 \frac{kp}{cm}, \ell = 100 \text{ εως } 150 \text{ cm}, d = 250 \text{ cm (για τάση } > 1000V)$$

Όπως είναι γνωστό πολλές φορές τα ηλεκτρικά δίκτυα ισχύος με πολλαπλά επίπεδα τάσης λειτουργίας επιλύονται με τη μέθοδο του ανά μονάδα (αμ) συστήματος αναφοράς ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Το σύστημα αυτό διευκολύνει τους υπολογισμούς, καθώς εμπλέκει πράξεις με ενιαία ακρίβεια δεκαδικών ψηφίων, ανεξάρτητα από το ηλεκτρικό μέγεθος. Έτσι συγκρίνονται εύκολα ομοειδή μεγέθη και επιτυγχάνεται γρήγορη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η μεθοδολογία της αναγωγής στο ανά μονάδα σύστημα ακολουθεί τα επόμενα βήματα. Αρχικά καθορίζονται τα μεγέθη βάσεως ως τιμές αναφοράς όλων των υπόλοιπων ηλεκτρικών μεγεθών. Ως θεμελιώδη μεγέθη βάσεως ορίζονται συνήθως τα εξής:

1. Η βασική τάση:  $V_{bas}$
2. Η βασική ισχύς:  $S_{bas}$
3. Η βασική συχνότητα:  $\omega_{bas}, f_{bas}$

Ως παράγωγα μεγέθη βάσεως ορίζονται αντίστοιχα:

1. Το βασικό ρεύμα:  $I_{bas} = \frac{S_{bas}}{V_{bas}}$  (Σχέση 5.172)
2. Η βασική αντίσταση:  $Z_{bas} = \frac{V_{bas}^2}{S_{bas}} = \frac{V_{bas}}{I_{bas}}$  (Σχέση 5.173)
3. Η βασική επαγωγή:  $L_{bas} = \frac{Z_{bas}}{\omega_{bas}}$  (Σχέση 5.174)
4. Η βασική χωρητικότητα:  $C_{bas} = \frac{1}{Z_{bas} * \omega_{bas}}$  (Σχέση 5.175)

Κατά τη επίλυση τέτοιων προβλημάτων στο τέλος υπολογίζονται όλα τα μεγέθη σε απόλυτες τιμές με την αντίστροφη λογική (π.χ.  $A = A_{\alpha\mu} * A_{bas}$ ).

Έτσι όλα τα ηλεκτρικά μεγέθη ανάγονται στην ενιαία βάση μεγεθών αναφοράς. Το «καινούργιο» ηλεκτρικό δίκτυο που προκύπτει επιλύεται κανονικά με τους κανόνες Kirchhoff και Thevenin, χωρίς κάποια ουσιαστική διαφοροποίηση, ως μονοφασικό ισοδύναμο.

## 5.7 Ειδικά θέματα επίδρασης ρευμάτων βραχυκύκλωσης και τάσεων αντοικοκυκλώματος

Τα αποτελέσματα των παραπάνω πράξεων σαφώς και προσδιορίζουν το είδος του εξοπλισμού που θα αξιοποιηθεί στην εγκατάσταση που μελετάται, αλλά δεν είναι αυτά που το οριστικοποιούν τελικά. Η επιλογή των καλωδίων και των διακοπτικών στοιχείων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην πράξη, πραγματοποιείται, αφού συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτά με τα καθορισμένα όρια αντοχής – θέρμανσης – δυναμικών καταπονήσεων κτλ.

Πιο συγκεκριμένα για παράδειγμα η επιλογή των καλωδίων εξαρτάται από την αντοχή της μόνωσης τους σε συνθήκες υπερφόρτωσης ή βραχυκυκλώματος. Η μόνωση καθορίζει επιπλέον και τη διάρκεια ζωής των αγωγών, η οποία εξασφαλίζεται, εφόσον κατά τη λειτουργία τους οι αγωγοί δε ξεπερνούν ορισμένες θερμοκρασίες.

Για κάθε τύπο μόνωσης των καλωδίων ορίζεται και μία μέγιστη θερμοκρασία, την οποία δεν πρέπει να υπερβεί. Διαφορετικά θα υπάρξουν επιπτώσεις στα μονωτικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της μόνωσης. Έτσι, προκειμένου να εξασφαλιστεί η προστασία των αγωγών από υπερφορτίσεις, επιβάλλεται να εγκατασταθεί και κάποιου είδους προστασία, η οποία να ενεργοποιείται τόσο γρήγορα, όσο μεγάλη είναι και η υπερφόρτιση.

Η επιλογή των διατάξεων προστασίας των αγωγών γίνεται σύμφωνα με τον κανονισμό του ΕΛΟΤ-HD384. Ο κανονισμός αυτός ορίζει ότι οι ενεργοί αγωγοί πρέπει να προστατεύονται από μια ή περισσότερες διατάξεις. Τέτοιες διατάξεις μπορεί να είναι, όπως ήδη έχει παρουσιαστεί και σε προηγούμενα κεφάλαια:

- Οι αυτόματοι διακόπτες, οι οποίοι αποτελούνται κυρίως από θερμικά και ηλεκτρομαγνητικά στοιχεία.
- Οι ασφάλειες, οι οποίες καθορίζονται με τη βοήθεια των χαρακτηριστικών τους καμπύλων.

Για να γίνουν πιο κατανοητά τα κριτήρια επιλογής των καλωδίων και των στοιχείων προστασίας τους ορίζονται τα ακόλουθα μεγέθη, σύμφωνα πάντα με τον ΕΛΟΤ-HD384:

- Το  $I_B$  είναι το μέγιστο ρεύμα κανονικής λειτουργίας του κυκλώματος.
- Το  $I_Z$  είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα του αγωγού που εξαρτάται από τη διατομή, το υλικό της μόνωσης και τις συνθήκες εγκατάστασης.
- Το  $I_n$  είναι το ονομαστικό ρεύμα για τις μη ρυθμιζόμενες διατάξεις προστασίας.
- Το  $I_2$  είναι το ρεύμα επέμβασης (λειτουργίας) του μέσου προστασίας.

Έτσι προκύπτουν οι ακόλουθες συνθήκες που συνδέουν τα παραπάνω μεγέθη και πρέπει να εφαρμόζονται ώστε να λειτουργεί σωστά το σύστημα.

Αρχικά, πρέπει ( $I_Z \geq I_B$ ), για το καλώδιο ώστε η διάταξη προστασίας να επιτρέπει τη διέλευση του κανονικού ρεύματος λειτουργίας του αγωγού  $I_B$ . Επομένως πρέπει και ( $I_n \geq I_B$ ).

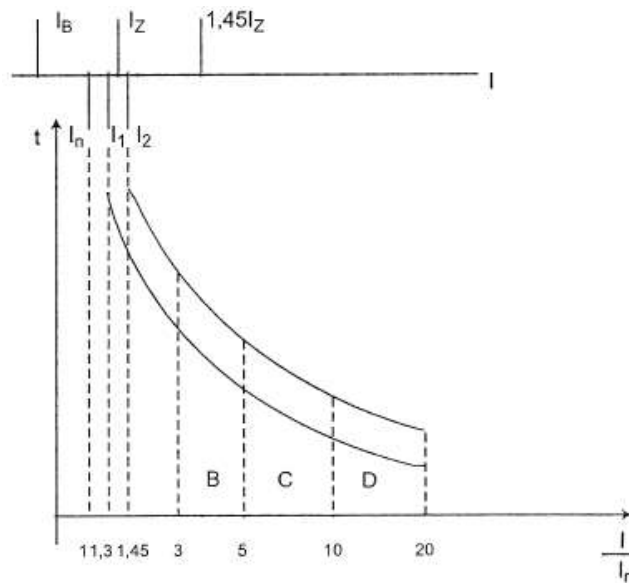
Ακόμα η διάταξη προστασίας δεν πρέπει να επιτρέπει τη μόνιμη διέλευση ρεύματος μεγαλύτερου από το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα του αγωγού, άρα ( $I_Z \geq I_n$ ).

Από τις παραπάνω συνθήκες και τους κατάλληλους υπολογισμούς προκύπτει τελικά πως:

$$(I_B \leq I_n \leq I_Z) \text{ (Σχέση 5.176) και } (I_2 \leq 1,45 * I_Z) \text{ (Σχέση 5.177)}$$

Επομένως για να προστατεύεται σωστά ο αγωγός από υπερφορτίσεις το ονομαστικό ρεύμα της διάταξης προστασίας πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα κανονικής λειτουργίας και ταυτόχρονα μικρότερο από το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα φόρτισης του αγωγού.

Εάν η διάταξη προστασίας είναι αυτόματος διακόπτης, ο αγωγός προστατεύεται όταν ισχύει μόνο η σχέση 5.176. Ενώ, αν ο διακόπτης είναι μη ρυθμιζόμενος, τότε ταυτόχρονα θα πρέπει να ικανοποιείται και η σχέση 5.177. Άρα τότε θα ισχύει ακόμα πως:  $(I_2 \leq 1,45 * I_Z)$  (Σχέση 5.178).



Εικόνα 5.52 : Πρόταση του Κανονισμού για την προστασία των καλωδίων από υπερφορτίσεις με μικροαυτόματους διακόπτες B, C, D. Το ρεύμα  $I_2$  για  $(I_Z \geq I_n)$  καλύπτει το καλώδιο από υπερφορτίσεις, αφού  $(I_2 \leq 1,45 * I_Z)$ . [2]

Όσον αφορά την περίπτωση των ασφαλειών εκείνες έχουν δύο ρεύματα. Ένα ρεύμα τήξης ( $I_2$ ) και ένα ρεύμα μη τήξης ( $I_1$ ) αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στον πίνακα 5.6.

Όνομ. ρεύμα (A)	Συμβατικός χρόνος (h)	Συμβατικά ρεύματα	
		$I_1$	$I_2$
$I_n \leq 63$	1	$1,25I_n$	$1,6I_n$
$63 \leq I_n \leq 160$	2	$1,25I_n$	$1,6I_n$
$160 \leq I_n \leq 400$	3	$1,25I_n$	$1,6I_n$
$400 \leq I_n$	4	$1,25I_n$	$1,6I_n$

Πίνακας 5.6: Συμβατικά ρεύματα τήξης ( $I_2$ ) και ρεύμα μη τήξης ( $I_1$ ) διαφορικών ασφαλειών. [2]

Για τις ασφάλειες με τις απαραίτητες πράξεις προκύπτει πως πρέπει να ισχύει:

$$(I_B \leq I_n \leq 0,906 * I_Z) \text{ (Σχέση 5.179)}$$



Δηλαδή για να προστατευθεί ένας αγωγός με ασφάλειες θα πρέπει η ονομαστική τους τιμή να μην υπερβαίνει το 90% της τιμής του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος του αγωγού ( $I_Z$ ). Αυτό όμως συνεπάγεται από τη μία πλήρη προστασία του αγωγού, αλλά ελλιπή αξιοποίηση του από την άλλη.

Γενικά είναι γνωστό πως ένα αποτέλεσμα των ρευμάτων βραχυκύκλωσης είναι η δημιουργία θερμικών και δυναμικών καταπονήσεων στο εσωτερικό των αγωγών, στις μονώσεις και τα εξαρτήματα τους (ακροδέκτες, αναρτήσεις κτλ). Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που τα ρεύματα αυτά επιβάλλεται να διακόπτονται σε πάρα πολύ μικρούς χρόνους.

Οι δυναμικές καταπονήσεις, που αποτελούν από εγκάρσιες, ελκτικές και απωστικές δυνάμεις, επιφέρουν εφελκυσμό και θλίψη σε όλα τα εξαρτήματα των αγωγών. Ενώ οι υψηλές θερμοκρασίες που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων εκτός του ότι μειώνουν τη διάρκεια ζωής των μονώσεων του αγωγού, μπορεί να προκαλέσουν και πολλές άλλες βλάβες, όπως είναι η καταστροφή των συγκολλήσεων.

Οι ηλεκτροδυναμικές καταπονήσεις συνδέονται άμεσα με τη μέγιστη τιμή της έντασης κατά την πρώτη περίοδο του βραχυκυκλώματος (κρουστικό ρεύμα). Ενώ οι θερμικές καταπονήσεις καθορίζονται από τη χρονική διάρκεια και τη συνολική ενέργεια που αναλύεται κατά την εξέλιξη του φαινομένου.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς κατά IEC ως ειδική ενέργεια διελεύσεως ορίζεται η ειδική θερμική ενέργεια, την οποία ο διακόπτης προστασίας αφήνει να περάσει κατά το βραχυκύκλωμα. Η ενέργεια αυτή μπορεί να μεταφραστεί ουσιαστικά ως ένα θερμικό «πλήγμα» για τα καλώδια και τις συσκευές που βρίσκονται μετά το διακόπτη προστασίας.

Πιο αναλυτικά οι μικροαυτόματοι διακόπτες έχουν τυποποιηθεί σε τρεις ομάδες ανάλογα με τις αντίστοιχες διακοπτικές τους ικανότητες (3, 6, 10 kA). Ακόμα χωρίζονται και σε κατηγορίες, οι οποίες σχετίζονται με την ικανότητα των διακοπών να περιορίζουν το ρεύμα διελεύσεως (1, 2, 3).

Στον ακόλουθο πίνακα 5.7 περιέχονται ενδεικτικά οι παραπάνω τιμές για μικροαυτόματους (B-C) οικιακού τύπου και ονομαστικού ρεύματος μέχρι 32A.

Ονομ. ένταση διακόπτη	Ικανότητα διακοπής φορτίου	Κατηγορία περιορισμού				
		1		2		3
		A <sup>2</sup> s		A <sup>2</sup> s		A <sup>2</sup> s
A	KA	B-C	B	C	B	C
≤16A	3	Χωρίς καθορισμένο όριο περιορισμού	31000	37000	15000	18000
	6		100000	120000	35000	42000
	10		240000	290000	70000	84000
≥16A ≤32A	3		40000	50000	18000	22000
	6		130000	160000	45000	55000
	10		310000	370000	90000	110000

Πίνακας 5.7 : Μέγιστες τιμές ενέργειας διελεύσεως από διακόπτες κατηγορίας (1, 2, 3). [2]

Γενικά οι κατασκευαστές των ασφαλειών και των διακοπών παρέχουν τα σχετικά διαγράμματα που δείχνουν την ενέργεια που επιτρέπεται να περάσει από το εκάστοτε μέσω προστασίας. Έτσι διευκολύνεται, μέσα από την εξέταση των καμπυλών λειτουργίας, η επιλογή της καταλληλότερης διάταξης που χρειάζεται να παρεμβληθεί στην εγκατάσταση που εξετάζεται κάθε φορά.

## **5.8 Συμπεράσματα**

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους το κύριο μέλημα ενός μηχανικού είναι να διαμορφώσει ένα ηλεκτρικό σύστημα το οποίο να λειτουργεί αξιόπιστα και να μπορεί να διαχειριστεί τις δυσάρεστες συνέπειες των σφαλμάτων που είναι πιθανό να προκύψουν κατά τη διάρκεια λειτουργίας του. Το δυσμενέστερο σφάλμα που μπορεί να προκύψει είναι αυτό το τριφασικού βραχυκυκλώματος, καθώς εν γένει τότε αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες εντάσεις.

Το υπολογιστικό υπόβαθρο που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό αποτελεί γενικά το κύριο εργαλείο ενός μηχανικού ενάντια στα ανεπιθύμητα αυτά προβλήματα. Όπου μέσω του κατάλληλου συνδυασμού των κανονισμών, των πινάκων, των διαγραμμάτων και των μαθηματικών τύπων καταλήγει τελικά στο βέλτιστο συνδυασμό των στοιχείων που θα απαρτίσουν σύστημα που μελετάται.

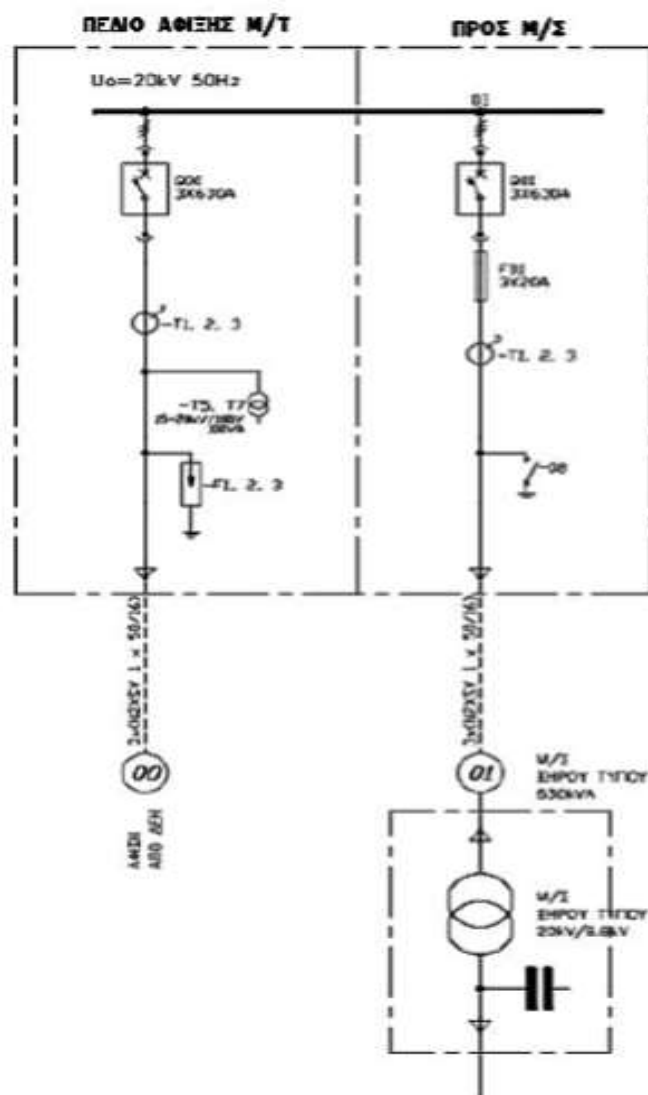
Έτσι και στο κεφάλαιο που ακολουθεί στη συνέχεια της εργασίας αυτής, με βάση τα όσα προηγήθηκαν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση εγκατάστασης λιμανιού με εγκατάσταση ψυχρής εκκίνησης για διάφορα ελλιμενισμένα πλοία.

## 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° : Μελέτη συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λιμανιού με σύστημα ψυχρής εκκίνησης ελλιμενιζόμενων πλοίων

### 6.1 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λιμανιού

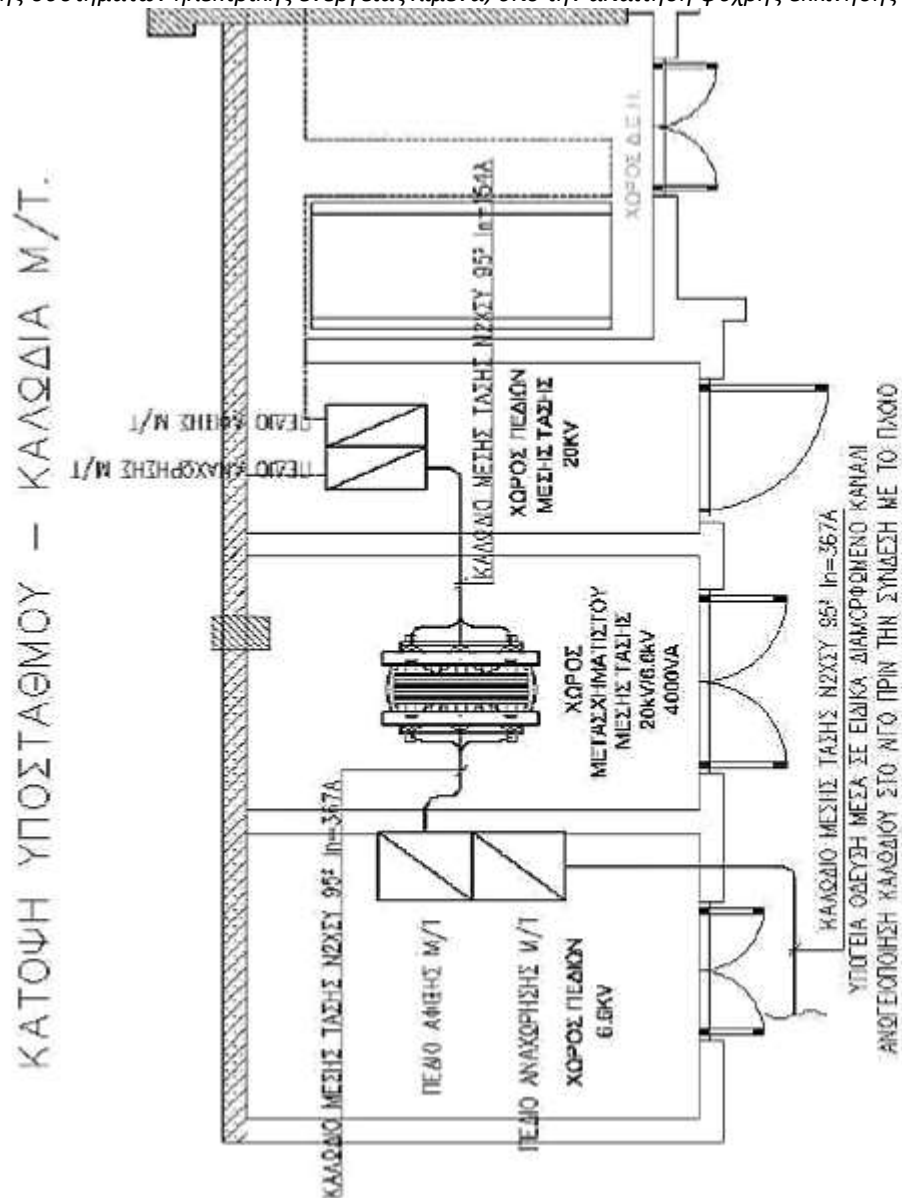
Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της ψυχρής εκκίνησης ενός πλοίου με ηλεκτρική τροφοδότηση από την ξηρά, θα πρέπει να διαμορφωθεί κατάλληλα, τόσο η εγκατάσταση πάνω στο πλοίο, όσο και στην ξηρά.

Αρχικά οι διατάξεις τροφοδοσίας πλοίων του λιμανιού αποτελούνται από δύο επιμέρους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης. Ο πρώτος ονομάζεται υποσταθμός μέσης τάσης, είναι συνήθως επίγειος και τοποθετημένος στην προβλήτα του λιμανιού. Ο ρόλος του είναι κυρίως ο υποβιβασμός της τάσης από τα 20kV τα 6,6kV, μέσω ενός μετασχηματιστή ισχύος. Από την άλλη ο δεύτερος υποσταθμός είναι τοποθετημένος πάνω στο πλοίο ή στο χείλος της αποβάθρας και είναι υπεύθυνος για τον υποβιβασμό της τάσης από τα 6,6kV στην αντίστοιχη χαμηλή τάση των 440V, ή σε άλλη κατάλληλη τάση για την τροφοδοσία πλοίου αν δεν απαιτείται μετατροπέας συχνότητας. Η τάση αυτή είναι και η τάση λειτουργίας όλων των ηλεκτρικών συστημάτων του πλοίου.



Εικόνα 6.1 : Διάγραμμα υποσταθμού για τον υποβιβασμό της τάσης από τα 20kV τα 6.6kV. [16]





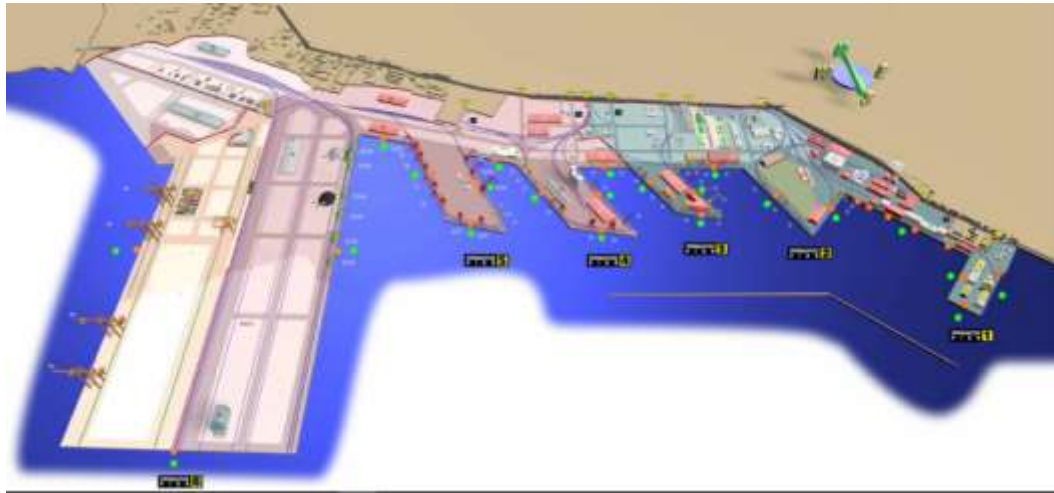
Εικόνα 6.3 : Κάτοψη υποσταθμού λιμανιού. [16]

Στην εικόνα 6.3, της κάτοψης του υποσταθμού του λιμανιού διακρίνονται: ο θάλαμος μέσης τάσης, ο θάλαμος του μετασχηματιστή ισχύος, ο θάλαμος του μετατροπέα συχνότητας και ο θάλαμος ελέγχου της εγκατάστασης.

Γενικά, ο ηλεκτρικός εξοπλισμός του πλοίου θα πρέπει να συνδέεται αυστηρά μόνο με τις παροχές ξηράς που έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν τα χαρακτηριστικά της τάσης, της συχνότητας καθώς και της συνολικής παραμόρφωσης του συστήματος διανομής.

Η εγκατάσταση από πλευράς ξηράς, εκτός από τον υποσταθμό, περιλαμβάνει και το σύστημα γείωσης, τα καλώδια διασύνδεσης ξηράς κοντά στο χείλος της προβλήτας, τα καλώδια σύνδεσής του με το εθνικό δίκτυο ρεύματος 20kV, καθώς και το σύστημα διαχείρισης καλωδίων για τη διασύνδεση του πλοίου με το λιμάνι. Βέβαια ο χώρος της προβλήτας είναι περιορισμένος και για το λόγο αυτό οι εγκαταστάσεις που τοποθετούνται εκεί θα πρέπει να καταλαμβάνουν όσο το δυνατό μικρότερο χώρο. Επομένως στην προβλήτα βρίσκεται συνήθως μόνο ένα κοντέινερ, το οποίο περιλαμβάνει το μετασχηματιστή απομόνωσης και διασύνδεσης με τα πλοία, το διακοπτικό υλικό, τον πίνακα, καθώς και τον απαραίτητο εξοπλισμό προστασίας και ελέγχου. Έτσι ο μετατροπέας συχνότητας μπορεί να βρίσκεται έως και 10 χιλιόμετρα μακριά από το λιμάνι.





Εικόνα 6.6 : Κάτοψη λιμανιού Θεσσαλονίκης. [35]



Εικόνα 6.7 : Λιμάνι με αγκυροβολημένα κρουαζιερόπλοια. [37]

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια από τα μεγαλύτερα λιμάνια παγκοσμίως, όπου έχει εφαρμοστεί η μέθοδος ψυχρής εκκίνησης. Υπάρχει γενικά ανάπτυξη της μεθόδου τόσο στη Βόρεια Αμερική, όσο και στην Ευρώπη. Πιο συγκεκριμένα στο λιμάνι του Λος Άντζελες, το οποίο έχει τη μεγαλύτερη κίνηση από κάθε άλλο λιμάνι στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, η μέθοδος αρχικά είχε αναπτυχθεί κυρίως για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Στο λιμάνι αυτό υπάρχουν δύο διαφορετικά συστήματα. Το ένα εκ των δύο, το οποίο στο δίκτυο χαμηλής τάσης μετατρέπει τα 34,5kV του τοπικού δικτύου σε 6,6kV στα 60Hz και στη συνέχεια στέλνει στο πλοίο τα 440V, δεν χρησιμοποιείται πλέον. Τη θέση του έχει πάρει το σύστημα, το οποίο τροφοδοτεί τα πλοία άμεσα με 6,6kV μέσω των καλωδίων της αποβάθρας. Αυτό είναι εφικτό, διότι τα νέα πλοία είναι σε θέση να δεχθούν 6,6kV επί του σκάφους, καθώς διαθέτουν ενσωματωμένο δικό τους καρούλι καλωδίων και μετατροπέα τάσης. Έτσι εξαλείφεται και η ανάγκη χρήσης βοηθητικών γερανών μεταφοράς στο λιμάνι.



Το 2011 το λιμάνι του Λος Άντζελες ήταν το πρώτο παγκοσμίως που μπόρεσε να τροφοδοτήσει ταυτόχρονα τρεις διαφορετικές γραμμές πλοίων. Επί του παρόντος τα κρουαζιερόπλοια για παράδειγμα στο λιμάνι αυτό απαιτούν ενέργεια που κυμαίνεται από 8MW έως 13MW. Με το σύστημα του λιμανιού στο κέντρο Cruise World να είναι ικανό να μεταφέρει άμεσα έως και 40MW, με 20MW ηλεκτρικής ενέργειας σε δύο διαφορετικά κρουαζιερόπλοια ταυτόχρονα.



Εικόνα 6.8 : Λιμάνι του Λος Άντζελες. [17]

Ενώ στην Ευρώπη το λιμάνι της Στοκχόλμης, το οποίο αποτελεί ένα σημαντικό μέρος υποδομής για τη θαλάσσια μεταφορά αγαθών και ανθρώπων, φιλοξενεί κάθε χρόνο περισσότερα από 11 εκατομμύρια επιβάτες, εύκολα και αποτελεσματικά. Το πρώτο δίκτυο ηλεκτροδότησης πλοίων μέσω της ακτής, είχε εγκατασταθεί στο λιμάνι αυτό από το 1985.



Εικόνα 6.9 : Λιμάνι της Στοκχόλμης. [17]

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και το λιμάνι της Αμβέρσας στο Βέλγιο, το οποίο είναι από τα τρία μεγαλύτερα στην Ευρώπη και το συνολικό κόστος επένδυσης του για την εγκατάσταση των συστημάτων ψυχρής εκκίνησης πλοίων ανέρχεται στα 1.117.829 ευρώ για την κάλυψη ισχύος.



Το σύστημα τροφοδοσίας του λιμανιού είναι ιδιαίτερο και μοναδικό, γιατί πετυχαίνει εναλλαγή μεταξύ 50Hz και 60Hz ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε πλοίου και παρέχει άμεσα τις υπηρεσίες του σε πλοία με τάση 6,6kV μέσω ενός μόνο καλωδίου. Το σύστημα των καλωδίων του λιμανιού αυτού έχει τοποθετηθεί σε υπόγεια αποβάθρα.



Εικόνα 6.10 : Λιμάνι της Αμβέρσας. [37]

## 6.2 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας – τεχνικά χαρακτηριστικά πλοίων

### 6.2.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά τον ελλιμενισμό ενός πλοίου οι κύριες μηχανές του παύουν να λειτουργούν και οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που παράγονται προέρχονται μόνο από τις ηλεκτρογεννήτριες, οι οποίες καταναλώνουν συνήθως πετρέλαιο. Κατά την παραμονή στο λιμάνι το πλοίο έχει την ανάγκη να εξυπηρετήσει τα διάφορα αναγκαία του φορτία, όπως είναι η θέρμανση, ο κλιματισμός, οι ξενοδοχειακές του υπηρεσίες, ο φωτισμός κλπ.

Με την ηλεκτρική διασύνδεση όμως των πλοίων με την παροχή από την ξηρά, η λειτουργία των ηλεκτρογεννητριών διακόπτεται και οι απαιτήσεις σε ισχύ μπορούν να καλυφθούν από το εθνικό δίκτυο, εκμηδενίζοντας έτσι το θόρυβο και τη σχετική ρύπανση.

Κατά τη μελέτη της διαμόρφωσης και υλοποίησης της μεθόδου ψυχρής εκκίνησης όσον αφορά τα ελλιμενιζόμενα πλοία λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

- Οι ενεργειακές τους απαιτήσεις κατά τον ελλιμενισμό
- Η ύπαρξη του πίνακα και των καλωδίων διασύνδεσης με την ξηρά
- Η απαίτησή τους για δυνατότητα παράλληλης λειτουργίας με το ηλεκτρικό δίκτυο. Δηλαδή αν είναι επιτρεπτή ή όχι η μεσολάβηση μιας σύντομης αλλά πλήρους διακοπής λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου (black out) κατά την έναρξη και τη λήξη της σύνδεσης του με την τροφοδοσία του λιμανιού.

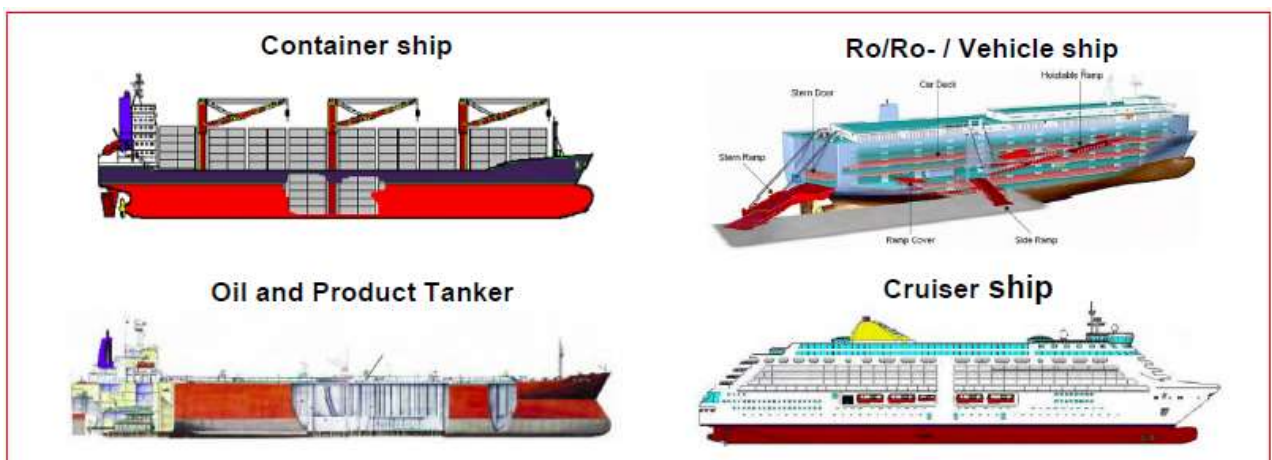
Τα υπονήφια πλοία για μια τέτοια διασύνδεση είναι όσα μπορούν να προσδεθούν στο εκάστοτε λιμάνι. Στον ακόλουθο πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι ενδεικτικοί τύποι πλοίου που φέρουν τη δυνατότητα ηλεκτρικής διασύνδεσης μαζί με τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Τύπος πλοίου	Τάση, Συχνότητα και Μέση απαίτηση ηλεκ. ενέργειας κατά τον ελλιμενισμό	Απαιτείται παράλληλη (συγχρονισμένη) λειτουργία με το ηλεκτρικό δίκτυο
Μεταφοράς Εμπορευματοκιβωτίων	6.6 kV, 60 Hz, 1.5 MW	Συνήθως Ναι
Επιβατηγά – Οχηματαγωγά	400V, 50 Hz, 200 kW ή 440V, 60 Hz, 200 kW	Εξαρτάται
Κρουαζιερόπλοια	11 kV, 60 Hz, 6 MW	Ναι

Πίνακας 6.1 : Διάφοροι κύριοι τύποι πλοίων με τις ηλεκτρικές τους απαιτήσεις κατά τον ελλιμενισμό.[30]

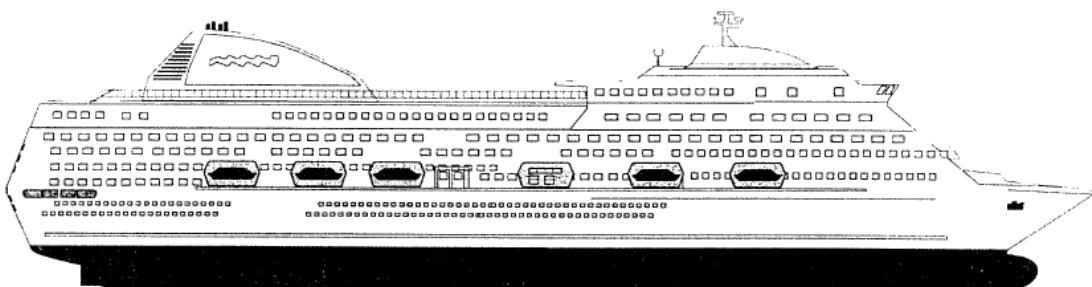
Στην συνέχεια αναλύονται ξεχωριστά τα χαρακτηριστικά και οι ενεργειακές απαιτήσεις διαφόρων τύπων πλοίων, καθώς μέσα από αυτά προκύπτουν τελικά τα ηλεκτρικά μεγέθη των δικτύων που θα τα τροφοδοτήσουν, στα πλαίσια πάντα της μελέτης της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης λιμένα-πλοίου.



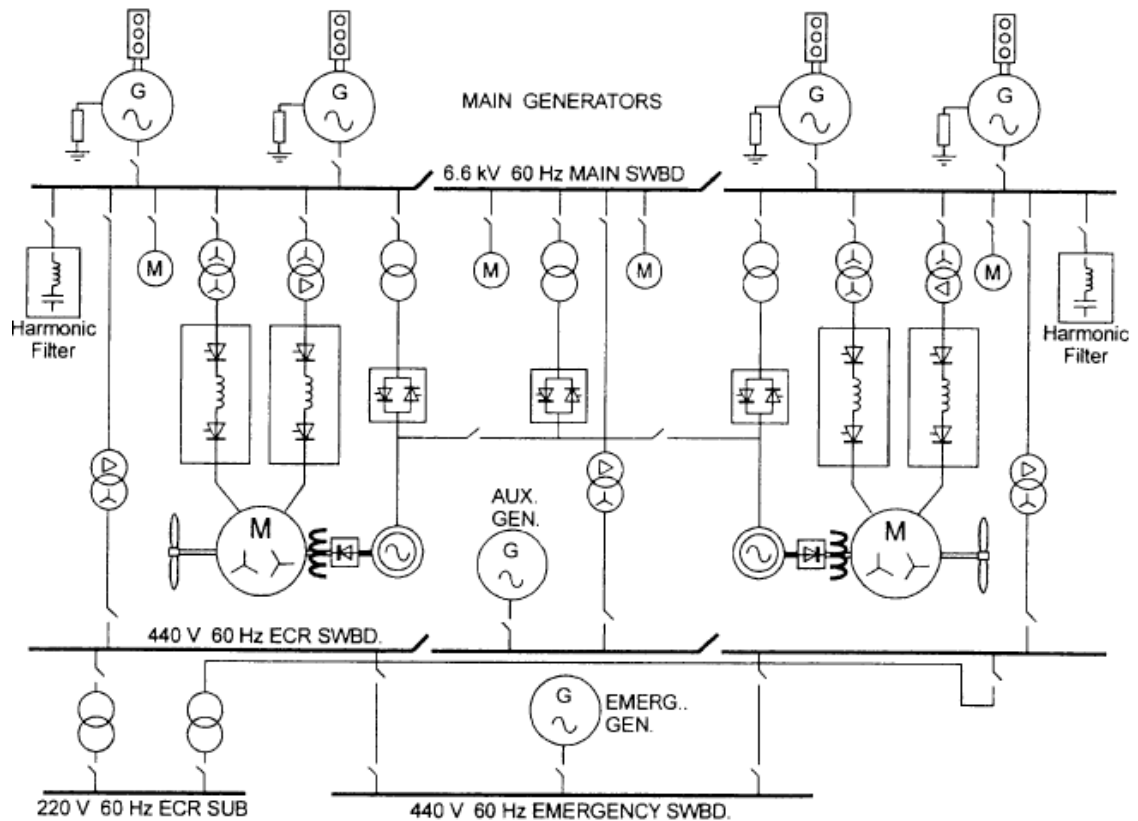
Εικόνα 6.11 : Σκίτσα διαφόρων ειδών πλοίων. [30]

### 6.2.2 Τυπικό κρουαζιερόπλοιο

Το κρουαζιερόπλοιο γενικά είναι ένα επιβατικό πλοίο που αξιοποιείται για ταξίδια αναψυχής, όπου το ίδιο το σκάφος και οι ανέσεις που αυτό προσφέρει αποτελούν μέρος της συνολικής εμπειρίας. Οι κρουαζιέρες έχουν γίνει σημαντικό μέρος της τουριστικής βιομηχανίας με εκατομμύρια επιβάτες κάθε χρόνο. Τα κρουαζιερόπλοια στην πλειοψηφία τους είναι πλοία που μένουν αγκυροβολημένα την ημέρα και ταξιδεύουν τη νύχτα. Ο μέσος όρος παραμονής τους στην αποβάθρα ενός λιμανιού είναι περίπου 10 ώρες. Παρακάτω στην εικόνα 6.12 φαίνεται το ηλεκτρολογικό διάγραμμα του δικτύου διανομής ενός τυπικού κρουαζιερόπλοιο.



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



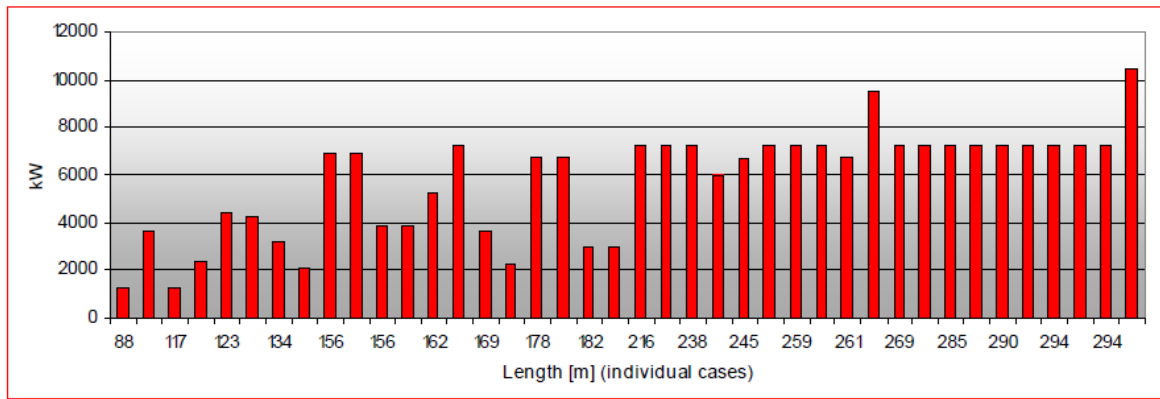
Εικόνα 6.12 : Ηλεκτρολογικό διάγραμμα κρουαζιερόπλοιου με 4 γεννήτριες. [33]



Εικόνα 6.13 : Τυπικό κρουαζιερόπλοιο. [38]

Τα κρουαζιερόπλοια είναι κυρίως ντιζελοκίνητα πλοία και παρουσιάζουν την υψηλότερη κατανάλωση ισχύος που συναντάται σε πλοία, όπως επαληθεύεται και από τις τιμές του διαγράμματος της εικόνας 6.14.

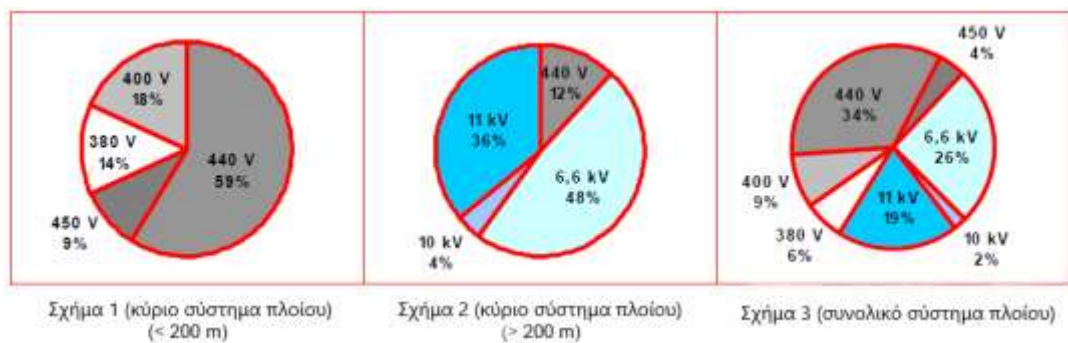
Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 6.14 : Μέση καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς διαφορετικών διαστάσεων κρουαζιερόπλοιων κατά την παραμονή τους στο λιμάνι. [33]

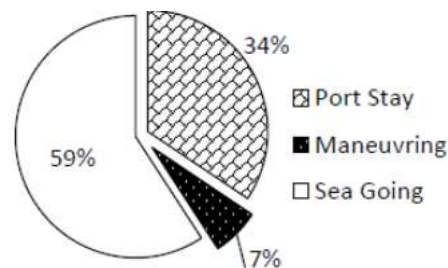
Η μέγιστη ισχύς που καταγράφεται όταν το πλοίο είναι σε κατάσταση πλεύσης φτάνει τα 11MW. Ενώ η μέση ισχύς που καταναλώνεται από τα περισσότερα κρουαζιερόπλοια αγγίζει τα 7MW. Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 1 της εικόνας 6.15, τα περισσότερα κρουαζιερόπλοια κάτω των 200 μέτρων λειτουργούν με χαμηλή τάση, ενώ για μήκος μεγαλύτερο των 200 μέτρων τα ίδια πλοία λειτουργούν με υψηλή τάση. Στο σχήμα 3 της εικόνας συνοψίζονται όλες οι τάσεις ενός συστήματος κρουαζιερόπλοιου με ντιζελοηλεκτρική προώθηση.

Τα σκάφη με μήκος μεγαλύτερο των 200 μέτρων λειτουργούν αποκλειστικά με συχνότητα 60Hz, ενώ τα σκάφη με μικρότερο μήκος μπορούν να λειτουργούν και με συχνότητα 50Hz, ανάλογα με την αποστολή και το σύστημα του πλοίου.



Εικόνα 6.15 : Ποσοστά κατανάλωσης τάσης και ισχύς διαφόρων τύπων κρουαζιερόπλοιων. [33]

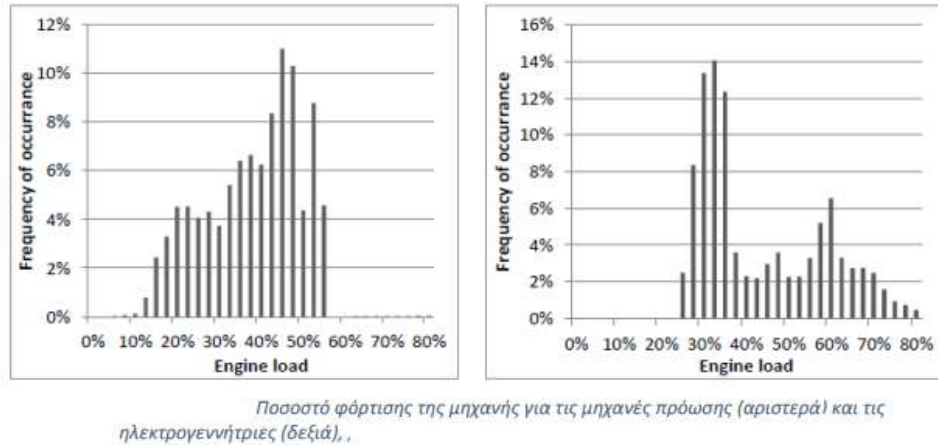
Στην ακόλουθη εικόνα 6.16 φαίνεται ακόμα το ποσοστό του χρόνου που καταλαμβάνει η παραμονή του πλοίου στο λιμάνι, η κατάσταση χειρισμών και η κατάσταση πλεύσης του πλοίου. Επιπλέον καταγράφεται και η συχνότητα εμφάνισης του κάθε ποσοστού φόρτισης των μηχανών, ανάλογα με τον τύπο τους. Έτσι παρουσιάζεται μία πλήρης εικόνα για το ενεργειακό πεδίο του πλοίου.



Ποσοστό του χρόνου που καταλαμβάνει σε ετήσια βάση κάθε κατάσταση του πλοίου.



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 6.16 : Διάγραμμα ηλεκτρικής ισχύος ενός τυπικού κρουαζιερόπλοιου. [33]

Από τα παραπάνω προκύπτει ουσιαστικά πώς το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα η ισχύς που απαιτείται για την προώθηση του πλοίου είναι σαφώς μικρότερη της αντίστοιχης ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύς. Επιπλέον τα ξενοδοχειακά φορτία είναι σ' όλες τις φάσεις λειτουργίας του πλοίου σε σχετικά υψηλά επίπεδα, άρα πρέπει να είναι συνεχώς ενεργειακά εξασφαλισμένα.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου αερίου παρουσιάζουν ζήτηση ισχύος στην ίδια κλίμακα με αυτήν των κρουαζιερόπλοιων και είναι συνήθως και αυτά ντιζελοκίνητα πλοία.

### 6.2.3 Τυπικό φορτηγό πλοίο εμπορευματοκιβωτίων

Όπως αναφέρεται και στο όνομά τους τα πλοία εμπορευματοκιβωτίων χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά μεγάλων εμπορικών κιβωτίων. Τα περισσότερα πλοία του είδους αυτού είναι κατασκευασμένα με ένα ενιαίο μεγάλο κατάστρωμα και με ειδικές θύρες αποθηκεύσεις μεταφερόμενων κιβωτίων, έτσι, ώστε να αξιοποιείται όλος ο διαθέσιμος χώρος. Τα περισσότερα δοχεία που μεταφέρονται σήμερα έχουν μήκος μέχρι 12 μέτρα και φορτώνονται στο πλοίο με τη βοήθεια ειδικών γερανών. Το μεγαλύτερο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων παγκοσμίως είναι ικανό να μεταφέρει σχεδόν 15.200 κιβώτια.



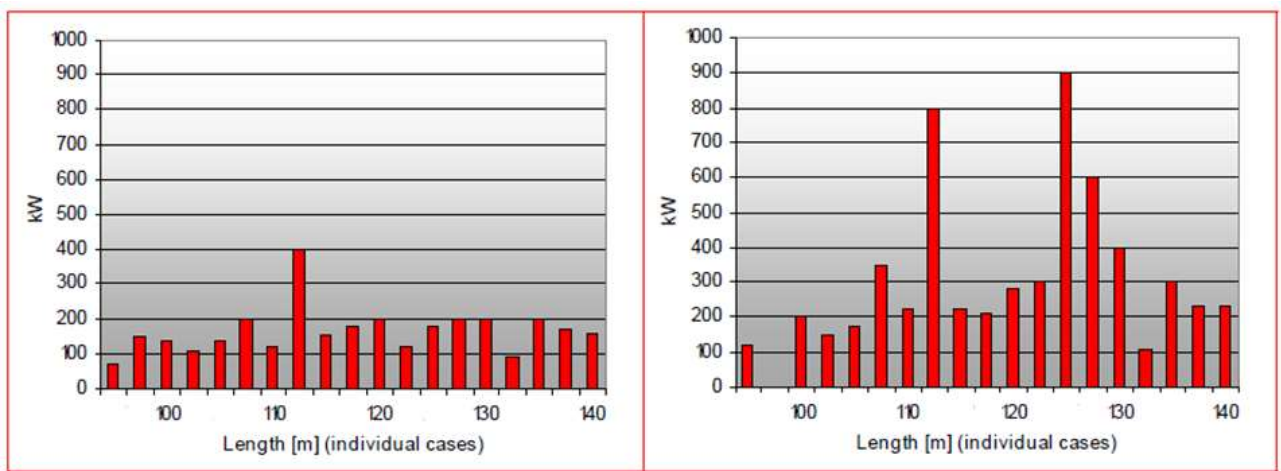
Εικόνα 6.17 : Τυπικό πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. [40]

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Τα πλοία αυτού του είδους, που δεν διακινούν τα φορτία σε μεγάλες ανοιχτές θάλασσες, έχουν μήκος συνήθως έως 140 μέτρα. Ενώ αντίθετα κιβωτιοφόρα που χρησιμοποιούνται για μεταφορές προϊόντων μεταξύ ηπείρων είναι κατά βάση σκάφη μεγαλύτερα από 140 μέτρων.

Έρευνες έχουν δείξει ότι η τάση τέτοιων πλοίων κυμαίνεται από 380V έως 6,6 kV, με την πλειονότητα αυτών να χρησιμοποιεί 440V, ως τάση λειτουργίας. Τα 6,6 kV παρατηρήθηκαν κυρίως σε σκάφη που κατασκευάστηκαν μετά από 2001. Η συχνότητα τους μπορεί να είναι είτε 50Hz, είτε 60Hz.

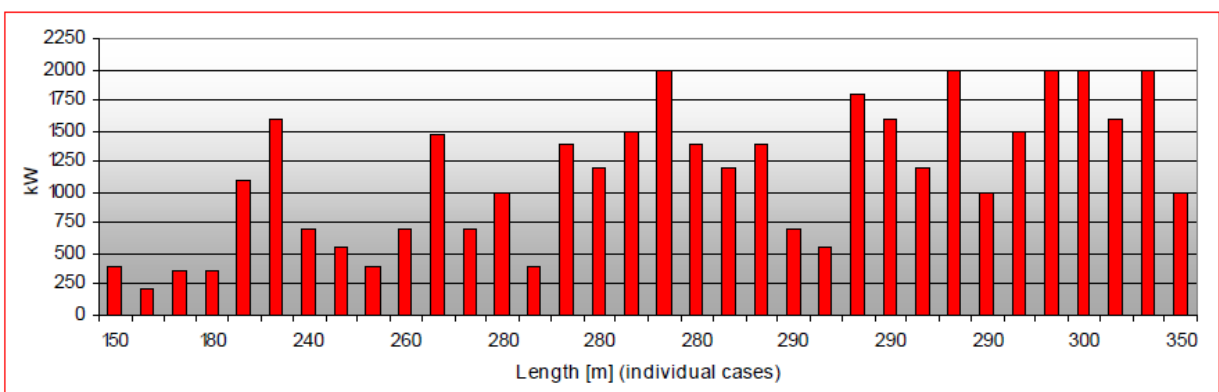
Στην εικόνα 6.18 παρουσιάζονται η μέση και η μέγιστη κατανάλωση ισχύος ενός τυπικού μικρού πλοίου μεταφοράς εμπορευμάτων κατά την παραμονή του στο λιμάνι. Όπως φαίνεται ο άξονας των (x) αντιπροσωπεύει το μήκος του πλοίου σε μέτρα και ο άξονας των (y) αντιπροσωπεύει αντίστοιχα την κατανάλωση ισχύος σε (kW).



Εικόνα 6.18 : Διάγραμμα μέσης (δεξιά) και μέγιστης (αριστερά) κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος διαφόρων ειδών κιβωτιοφόρων πλοίων κατά την παραμονή τους στο λιμάνι. [33]

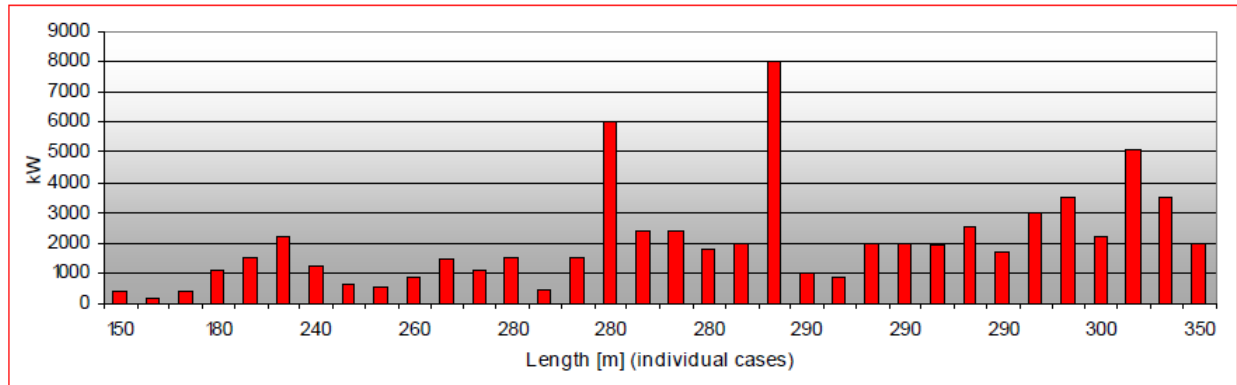
Όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες όλα τα σκάφη που κυμαίνονται μεταξύ 100 και 140 μέτρων δεν απαιτούν ισχύει η μεγαλύτερη του 1MW και ως μέση ισχύ παρουσιάζονται τα 200kW.

Στις εικόνες 6.19 και 6.20 από την άλλη παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα απαίτησης ηλεκτρικής ισχύος των μεγάλων εμπορευματοφόρων πλοίων κατά την κατάσταση εν ορμώ. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται πως η μέση κατανάλωση ισχύος φτάνει τα 2MW, ενώ η μέγιστη αγγίζει τα 8MW.



Εικόνα 6.19 : Διάγραμμα μέσης απαίτησης ηλεκτρικής ισχύος κιβωτιοφόρων μεγαλύτερων των 140 μέτρων, κατά την παραμονή τους στο χώρο του λιμανιού. [33]

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 6.20 : Διάγραμμα μέγιστης απαίτησης ηλεκτρικής ισχύος κιβωτιοφόρων μεγαλύτερων των 140 μέτρων, κατά την παραμονή τους στο χώρο του λιμανιού. [33]

Από έρευνες έχει διαπιστωθεί πως περίπου το 63% των μικρών φορτηγών πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων έχουν ως συχνότητα λειτουργίας τα 50Hz, ενώ έχει παρατηρηθεί πως το 94% των πλοίων αυτού του είδους που κάνουν υπερατλαντικά ταξίδια έχει ως συχνότητα τα 60Hz.

#### 6.2.4 Τυπικό φορτηγό πλοίο bulk

Τα φορτηγά πλοία bulk είναι ουσιαστικά ελεύθερα φορτηγά πλοία που ασχολούνται κυρίως με τη μεταφορά χύμα ξηρών φορτίων, όπως είναι τα σιτηρά, τα κάρβουνα, τα μεταλλεύματα, η ζάχαρη, τα λιπάσματα κλπ. Το ολικό μήκος ενός τυπικού τέτοιου πλοίου είναι τα 225 μέτρα, αλλά μπορεί να φτάσει και τα 300 μέτρα. Τα πλοία αυτά διαθέτουν μόνο ένα μεγάλο υδατοστεγανό κατάστρωμα.



Εικόνα 6.21 : Τυπικό φορτηγό πλοίο ξηρών φορτίων (bulk). [17]

Γενικά τα πλοία των χύδην μεταφορών παρουσιάζουν μικρές ανάγκες ισχύος. Αξιοποιούν κυρίως μεγάλους δίχρονους κινητήρες που καίνε μαζούτ, σε συνδυασμό με μικρότερους κινητήρες ντίζελ, για να καλύψουν τις ανάγκες τους σε ισχύ. Όταν βρίσκονται στο λιμάνι όμως ο κύριος καταναλωτής ισχύος των πλοίων αυτών είναι ο εξοπλισμός φόρτωσης και εκφόρτωσης τους.

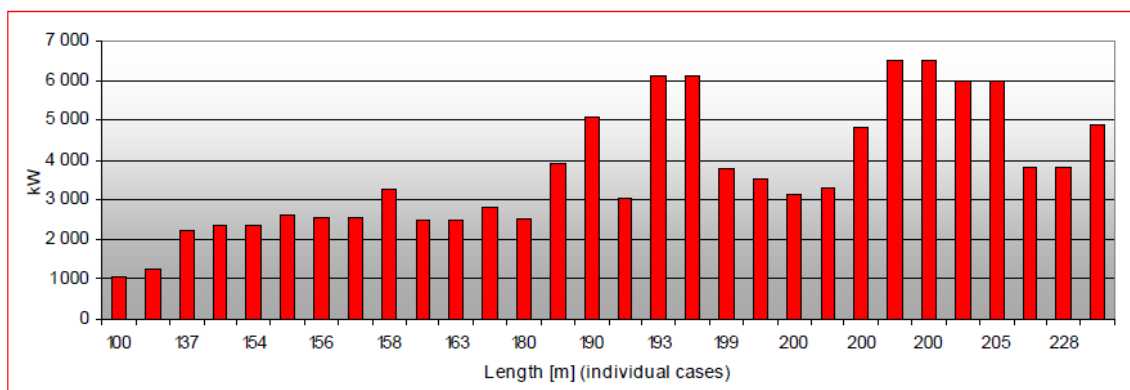
Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων. Ωστόσο, πολλά σκάφη δεν έχουν τους δικούς τους γερανούς. Επομένως χρησιμοποιούν τον αντίστοιχο λιμενικό εξοπλισμό και οι ανάγκες τους σε ισχύ είναι ακόμα πιο χαμηλές. Τα πλοία bulk με μήκος μικρότερο από 200m απαιτούν μέση ισχύ ίση με 300kW και μέγιστη ισχύ ίση με 1MW. Αυτές οι τιμές για τέτοια πλοία με μήκος μεγαλύτερο από 200m γίνονται 1MW και 3,5MW αντίστοιχα. Γενικά πάνω από το 80% των πλοίων μεταφοράς ξηρών φορτίων χαρακτηρίζονται από τάση 440V και πάνω από το 95% αυτών παρουσιάζουν συχνότητα ίση με 60Hz.

### 6.2.5 Τυπικό οχηματαγωγό πλοίο

Τα οχηματαγωγά πλοία είναι μία ειδική κατηγορία πλοίων που έχουν σχεδιαστεί για να μεταφέρουν τροχοφόρα φορτία, όπως αυτοκίνητα, φορτηγά, ημιρυμουλκούμενα ή ρυμουλκούμενα οχήματα. Αυτή είναι και η διαφορά τους με τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που χρησιμοποιούν γεράνο για τη φόρτωση και εκφόρτωση των φορτίων τους. Έχουν συγκεκριμένα ενσωματωμένες ειδικές ράμπες που επιτρέπουν τη μεταφορά των οχημάτων όταν αυτό βρίσκεται στο λιμάνι. Οι ράμπες αυτές μπορεί να είναι μόνο στην πρύμνη του πλοίου ή στην πρύμνη και στην πλώρη για πιο γρήγορη φόρτωση – εκφόρτωση. Τα οχηματαγωγά πλοία γενικά έχουν ένα εύρος μήκους μεταξύ 100 και 250 μέτρων, τιμές που αντιπροσωπεύουν το μικρότερο και το μεγαλύτερο σκάφος αυτού του είδους σήμερα. Στην ακόλουθη εικόνα 6.23 παριστάνεται η μέγιστη παραγόμενη ισχύς επί του σκάφους κατά τη διάρκεια πλεύσης.



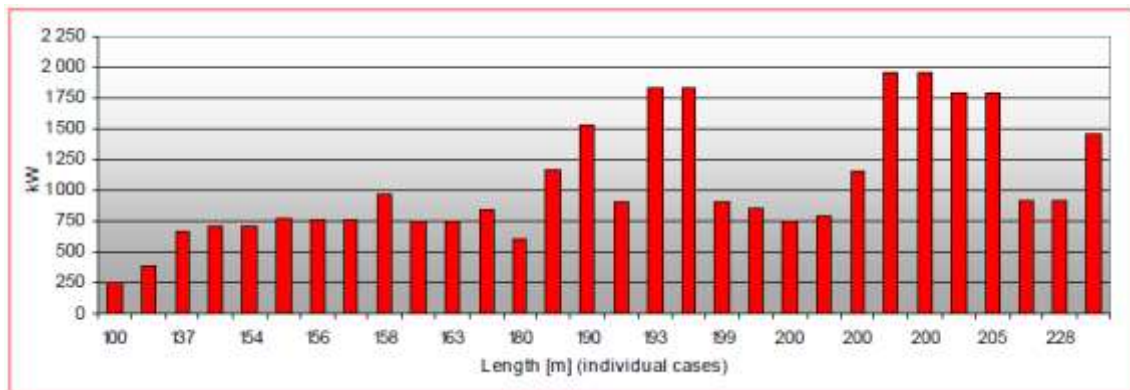
Εικόνα 6.22 : Τυπικό οχηματαγωγό πλοίο κατά την ηλεκτροδότηση του από το λιμάνι. [17]



Εικόνα 6.23 : Μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς οχηματαγωγών πλοίων κατά την κατάσταση πλεύσης. [33]



Ενώ στην εικόνα 6.24 απεικονίζεται η ισχύς που απαιτείται κατά τη διάρκεια ελλιμενισμού διαφόρων μηκών οχηματαγωγών πλοίων.



Εικόνα 6.24 : Μέγιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς οχηματαγωγών πλοίων κατά τη διάρκεια παραμονής τους στο λιμάνι. [33]

Παρατηρείται πως η μέση ζήτηση ισχύος κατά την παραμονή τέτοιων πλοίων στο λιμάνι φτάνει τα 2MW. Στατιστικά έχουν δείξει πως τα περισσότερα οχηματαγωγά πλοία έχουν τάση που κυμαίνεται από 400V έως 460V, ενώ το 70% των πλοίων αυτών παρουσιάζουν συχνότητα 60Hz.

### 6.2.6 Τυπικό φορτηγό πλοίο μεταφοράς πετρελαίου

Τα πετρελαιοφόρα είναι πλοία ειδικά σχεδιασμένα για τη μαζική μεταφορά πετρελαίου. Γενικά υπάρχουν δύο είδη τέτοιων πλοίων:

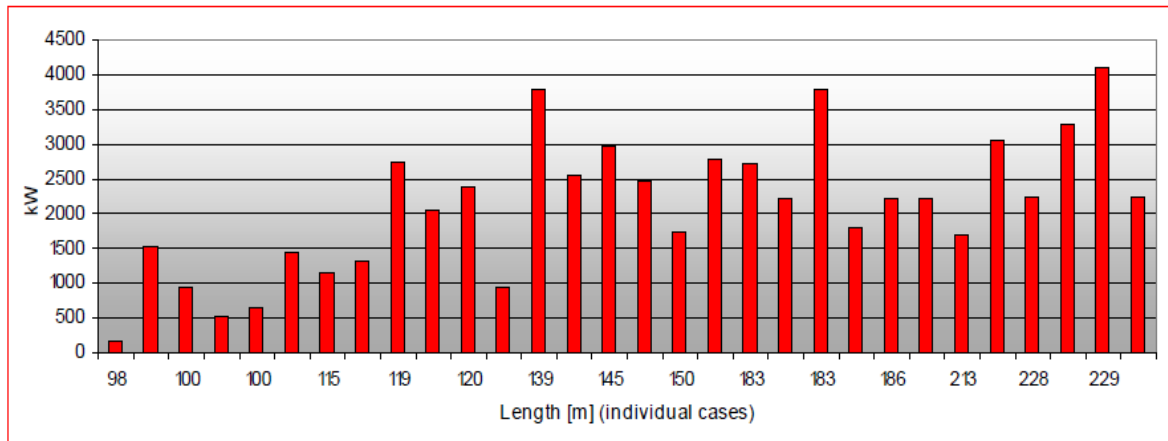
- Το πετρελαιοφόρο με τις τεράστιες δεξαμενές έτοιμοι προς κατανάλωση πετρελαίου.
- Το πετρελαιοφόρο που μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ακατέργαστου αργού πετρελαίου από το σημείο εξαγωγής τους προς τα διυλιστήρια.



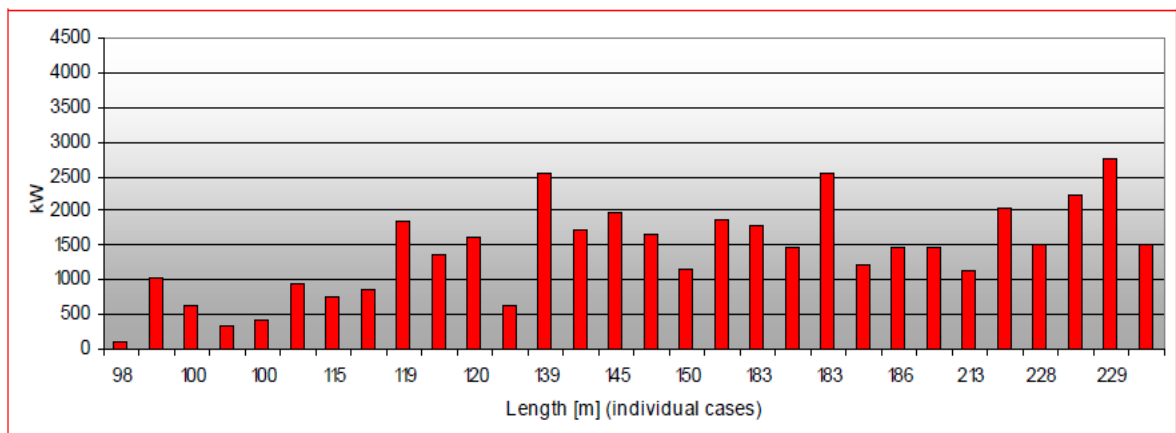
Εικόνα 6.25 : Τυπικό φορτηγό πλοίο μεταφοράς πετρελαίου. [41]

Τα πρώτα είναι κατά κανόνα πολύ μεγαλύτερα και έχουν σχεδιαστεί να μεταφέρουν πετροχημικά προϊόντα από τα διυλιστήρια κοντά σε καταναλωτικές αγορές. Τα πετρελαιοφόρα είναι πλοία με μήκος που ξεκινά από τα 100 μέτρα φτάνει και τα 250 μέτρα.

Στην παρακάτω εικόνα 6.26 παριστάνεται η μέγιστη παραγόμενη ισχύς κατά τη διάρκεια πλεύσης διαφόρων μεγεθών πετρελαιοφόρων, ενώ αντίστοιχα στην εικόνα 6.27 φαίνεται η ισχύς που απαιτούν τα διάφορα μηκών πετρελαιοφόρα κατά τη διάρκεια ελλιμενισμού τους.



Εικόνα 6.26 : Μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρικής ισχύς διαφόρων πετρελαιοφόρων κατά την κατάσταση πλεύσης. [33]



Εικόνα 6.27 : Μέγιστη απαιτούμενη ηλεκτρικής ισχύς διαφόρων πετρελαιοφόρων κατά τη διάρκεια παραμονής τους στο λιμάνι. [33]

Όπως φαίνεται τα πλοία μεταφοράς πετρελαίου παρουσιάζουν μέγιστη απαίτηση ισχύος που φτάνει τα 3MW κατά την ηλεκτροδότηση από την ξηρά. Όλα τα πετρελαιοφόρα ακόμα σύμφωνα με μελέτες παρουσιάζουν τάσεις που βρίσκεται ανάμεσα τα 380V και τα 450V, με το 40% αυτών να έχει τάση ίση με 440V. Ενώ όσον αφορά τη συχνότητα τους τουλάχιστον το 80% των πλοίων αυτών βρίσκονται στα 60Hz.

### 6.3 Ανάλυση Ενεργειακής ζήτησης για διάφορες καταστάσεις ελλιμενισμού

Όπως έχει ήδη παρουσιαστεί και προηγουμένως, οι ενδεικτικότερες τιμές των απαιτήσεων ισχύος διαφόρων πλοίων φαίνονται συνοπτικά και στην εικόνα 6.28.

	Average Power Demand	Peak Power Demand
Container vessels (< 140 m)	170 kW	1 000 kW
Container vessels (> 140 m)	1 200 kW	8 000 kW
Container vessels (total)	800 kW	8 000 kW
Ro/Ro- and Vehicle vessels	1 500 kW	2 000 kW
Oil- and Product tankers	1 400 kW	2 700 kW
Cruise ships (< 200 m)	4 100 kW	7 300 kW
Cruise ships (> 200 m)	7 500 kW	11 000 kW
Cruise ships (total)	5 800 kW	11 000 kW

Εικόνα 6.28 : Συνοπτική καταγραφή ενεργειακών απαιτήσεων διαφόρων ειδών πλοίων. [33]

Στη συνέχεια της τρέχουσας εργασίας παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος υπολογισμού των ενεργειακών αυτών απαιτήσεων, καθώς μέσα από αυτή τη διαδικασία προκύπτουν και τα τελικά χαρακτηριστικά της συνολικής εγκαταστάσεις ψυχρής εκκίνησης του πλοίου.

Γενικά, οι ναυτικοί κινητήρες Diesel είναι οι επικρατέστεροι τύποι μηχανών την ναυτιλία, τόσο για την κίνηση, όσο και για την παραγωγή βοηθητικής ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία. Έτσι η μελέτη του ενεργειακού ισολογισμού που ακολουθεί αφορά ένα τυπικό ντιζελοκίνητο πλοίο, το οποίο λειτουργεί με συχνότητα 60Hz, τάση 440/115V και έχει μήκος που φτάνει περίπου τα 120m. Τα μηχανήματα και οι συσκευές που περιλαμβάνει, μαζί με τα χαρακτηριστικά τους, καταγράφονται αναλυτικά στον πίνακα 6.2.

Συγκεκριμένα, στον ηλεκτρικό ισολογισμό αναφέρονται οι ενεργειακές απαιτήσεις του πλοίου κατά τη διάρκεια τριών καταστάσεων:

1. Κανονικής πορείας
2. Χειρισμών
3. Εν όρμω

Η τρίτη κατάσταση, που αφορά και την παραμονή του πλοίου στο λιμάνι, είναι αυτή που σχετίζεται άμεσα με τον καθορισμό του εξοπλισμού διασύνδεσης και οι τιμές της συμπεριλαμβάνονται στην τελική διαμόρφωση των ηλεκτρικών συστημάτων ξηράς – πλοίου.

Πιο αναλυτικά, όπως φαίνεται και στις πρώτες στήλες του πίνακα 6.1, κατά τη μελέτη του ισολογισμού αυτού χρειάζεται να καταγραφούν για τον κάθε καταναλωτή του πλοίου:

- Ο βαθμός απόδοσης ( $\eta$ ), ο οποίος λαμβάνεται 0,85 για πάσης φύσεως κινητήρες και 1 για ωμικά φορτία, εκτός αν προσδιορίζεται αλλιώς.
- Το πλήθος ( $N$ ).
- Η ονομαστική αποδιδόμενη ισχύς σε (HP) ανά συσκευή ( $P_{ov.αποδ.}(HP)$ ).

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ονομαστική αποδιδόμενη ισχύς σε (kW) ανά συσκευή:

$$P_{ov.αποδ.}(kW) = P_{ov.αποδ.}(HP) * 0.736 \quad (\text{Σχέση 6.1})$$

Με χρήση των αποτελεσμάτων της σχέσης 6.1 προκύπτει η ονομαστική απορροφούμενη ισχύς σε (kW) ως εξής:

$$P_{ov.απορ.}(kW) = \frac{P_{ov.αποδ.}(kW)}{\eta} \quad (\text{Σχέση 6.2})$$

Έτσι υπολογίζεται τελικά η εγκατεστημένη ισχύς σε (kW) ανά κατηγορία συσκευής:

$$P_{εγκατ.}(kW) = P_{ov.απορ.}(kW) * N \quad (\text{Σχέση 6.3})$$

Η ίδια μεθοδολογία επαναλαμβάνεται για όλες τις καταστάσεις λειτουργίας.

Αρχικά για την κατάσταση κανονικής πορείας αναφέρεται το πλήθος ( $N$ ) κινητήρων που βρίσκονται σε λειτουργία. Έπειτα μέσω του συντελεστή λειτουργίας ( $f_s$ ) κάθε συσκευής, ο οποίος αφορά την κατάσταση κανονικής πορείας, προκύπτει η αντίστοιχη ισχύς λειτουργίας ανά κατηγορία συσκευής από τον τύπο:

$$P_{λειτ.}(kW) = P_{ov.απορ.}(kW) * f_s * N \quad (\text{Σχέση 6.4})$$

Ακολούθως και για κάθε κατάσταση ξεχωριστά (εν όρμω, χειρισμών κλπ.) καταγράφονται οι ενεργοί καταναλωτές και παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές λειτουργίας ( $f_s$ ) για την κάθε συσκευή ξεχωριστά. Έτσι προκύπτει εκ νέου η ισχύς λειτουργίας ανά κατηγορία συσκευής από την ίδια σχέση 6.4, αυτή τη φορά όμως για την αντίστοιχη κατάσταση.

Στην προκειμένη περίπτωση υπολογισμών, ο συντελεστής λειτουργίας ( $f_s$ ) για τον κάθε καταναλωτή και την κάθε κατάσταση ξεχωριστά λαμβάνεται από τους έτοιμους πίνακες 2.1, 2.2, 2.3 ή με βάση λογικές παραδοχές.

Για να είναι όμως πιο κατανοητή η παραπάνω διαδικασία και για να είναι ξεκάθαρο το είδος των καταναλωτών που αναγράφονται στον πίνακα 6.2, έχουν γίνει οι εξής ομαδοποιήσεις φορτίων:

- Τα βοηθητικά φορτία προώθησης.
- Τα βοηθητικά του μηχανοστασίου.
- Τα βοηθητικά σκάφους.
- Τα βοηθητικά χώρων εστίασης.
- Οι συσκευές μαγειρείου.
- Οι πίνακες φωτισμού.
- Οι πίνακες οργάνων ναυσιπλοΐας.
- Η εφεδρική παροχή.

Ακόμα για να προκύψουν τα τελικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω έχουν γίνει οι ακόλουθες σημαντικές παραδοχές στους υπολογισμούς του πίνακα 6.2 :

1. Στα βοηθητικά πρόωσης θεωρήθηκε πως από τους τρεις διαχωριστές πετρελαίου ο ένας λειτουργεί, ο δεύτερος είναι σε εφεδρεία και ο τρίτος είναι κατάσταση συντήρησης.
2. Στα βοηθητικά πρόωσης από τους μηχανισμούς περιστροφής άξονα θεωρήθηκε ότι λειτουργεί μόνο 1.
3. Στον πίνακα βοηθητικών μηχανοστασίου οι διάφοροι ηλεκτρικοί κινητήρες αντιμετωπίζονται ως τόρνοι.
4. Στον πίνακα βοηθητικών μηχανοστασίου δεν λειτουργεί καμία εφεδρική παροχή σε αυτές της καταστάσεις λειτουργίας που αναγράφονται.
5. Στα βοηθητικά σκάφους οι αντλίες γενικής χρήσης θεωρούνται πως δεν λειτουργούν, διότι είναι κυρίως αντλίες πυρκαγιάς ή γενικής χρήσης.
6. Στα βοηθητικά σκάφους ο κινητήρας καταπέλτη λειτουργεί μόνο εν ορμώ, με συντελεστή λειτουργίας ( $f_s = 0,1$ ), ενώ στις άλλες καταστάσεις δεν λειτουργεί.
7. Στα βοηθητικά σκάφους οι υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας λειτουργούν και οι δύο με συντελεστή λειτουργίας ( $f_s = 0,1 - 0,0 - 0,0$ ) για τις τρεις καταστάσεις αντίστοιχα.
8. Στα βοηθητικά χώρων εστίασης θεωρείτε πως οι διάφοροι ηλεκτροκινητήρες λειτουργούν όλοι με συντελεστή ( $f_s = 0,4$ ) σε όλες τις καταστάσεις.
9. Στα βοηθητικά χώρων εστίασης οι ανελκυστήρες λειτουργούν και οι δύο με συντελεστή ( $f_s = 0,2 - 0,0 - 0,5$ )(αυξημένο για την κατάσταση εν όρμω λόγω κίνησης ατόμων), για τις τρεις καταστάσεις αντίστοιχα.
10. Στις συσκευές μαγειρείου θεωρήθηκε πως όλες οι συσκευές που είναι παραπάνω από μία (κουζίνα, εστίες) λειτουργούν όλες σε κανονική πορεία και στις υπόλοιπες καταστάσεις λειτουργούν οι μισές.
11. Στον πίνακα φωτισμού για το μηχανοστάσιο τέθηκε ότι ο συντελεστής λειτουργίας είναι ( $f_s = 1$ ) για όλες τις καταστάσεις.
12. Στον πίνακα φωτισμού για το κατάστρωμα τέθηκε πως ο συντελεστής είναι για τις τρεις καταστάσεις αντίστοιχα ( $f_s = 0,0 - 0,0 - 0,9$ ).
13. Στον πίνακα οργάνων ναυσιπλοΐας ο συντελεστής λειτουργίας ορίστηκε για τις τρεις καταστάσεις λεπτομέρειες ( $f_s = 0,5 - 0,5 - 0,25$ ).

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

	ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ	η	N	Εγκατεστημένη Ισχύς				Ισχύς Κανονικής Πορείας			Ισχύς Χειρισμών			Ισχύς εν όρμω		
				P <sub>ον.αποδ.</sub>		P <sub>ον.απορροφ.</sub>	P <sub>εγκατ.</sub>	N	f <sub>s</sub>	P <sub>λειτ.</sub>	N	f <sub>s</sub>	P <sub>λειτ.</sub>	N	f <sub>s</sub>	P <sub>λειτ.</sub>
				PS	KW	KW	KW			KW			KW			KW
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΩΩΣΗΣ</b>																
1	Κύριοι Αεροσυμπιεστές	0,85	2	30,00	22,08	25,98	51,95	1	0,10	2,60	1	0,85	22,08	1	0,10	2,60
2	Αντλίες λαδιού λίπανσης Κ.Μ	0,85	2	45,00	33,12	38,96	77,93	1	0,85	33,12	1	0,85	33,12	0	0,00	0,00
3	Διαχωριστήρες πετρελαίου	0,85	3	20,00	14,72	17,32	51,95	1	0,70	12,12	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
4	Αντλία Μετάγγισης Πετρελαίου Diesel	0,85	1	5,00	3,68	4,33	4,33	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	1	0,10	0,43
5	Αεροσυμπιεστές Εκκινήσεως	0,85	2	40,00	29,44	34,64	69,27	1	0,10	3,46	1	0,80	27,71	1	0,10	3,46
6	Αεροσυμπιεστής Αυτοματισμού	0,85	1	35,00	25,76	30,31	30,31	1	0,20	6,06	1	0,20	6,06	1	0,20	6,06
7	Αντλία Συμπυκνώματος	0,85	2	12,00	8,83	10,39	20,78	1	0,40	4,16	1	0,40	4,16	0	0,00	0,00
8	Κινητήρες Μηχανισμού Πηδαλίου	0,85	2	35,00	25,76	30,31	60,61	1	0,10	3,03	1	0,20	6,06	0	0,00	0,00
9	Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	0,85	2	10,00	7,36	8,66	17,32	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	1	0,80	6,93
10	Ανεμιστήρας Προσαγωγής Αέρα Λέβητα	0,85	1	4,00	2,94	3,46	3,46	1	0,50	1,73	1	0,50	1,73	1	0,20	0,69
11	Αντλίες Κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων Κ.Μ	0,85	2	35,00	25,76	30,31	60,61	1	0,85	25,76	1	0,85	25,76	0	0,00	0,00
12	Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	0,85	2	10,00	7,36	8,66	17,32	1	0,80	6,93	1	0,80	6,93	0	0,00	0,00
13	Θερμαντήρες καυσίμου	1,00	2		15,00	15,00	30,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	1	0,10	1,50
14	Αντλίες μετάγγισης βαρέως πετρελαίου	0,85	2	20,00	14,72	17,32	34,64	1	0,10	1,73	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
15	Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλ. Νερου	0,85	3	90,00	66,24	77,93	233,79	2	0,85	132,48	2	0,85	132,48	0	0,00	0,00
16	Αντλίες ψύξης βαλβίδων Κ.Μ	0,85	2	25,00	18,40	21,65	43,29	1	0,85	18,40	1	0,85	18,40	0	0,00	0,00
17	Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	0,85	2	8,00	5,89	6,93	13,85	1	0,85	5,89	1	0,85	5,89	0	0,00	0,00
18	Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	0,85	4	40,00	29,44	34,64	138,54	3	0,85	88,32	3	0,85	88,32	2	0,20	13,85
19	Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	0,85	2	14,00	10,30	12,12	24,24	1	0,35	4,24	1	0,30	3,64	0	0,00	0,00

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ</b>																
1	Γερανογέφυρα	0,85	1	15,00	11,04	12,99	12,99	1	0,50	6,49	1	0,50	6,49	1	0,00	0,00
2	Τόρνος	0,85	1	5,00	3,68	4,33	4,33	1	0,10	0,43	0	0,00	0,00	1	0,10	0,43
3	Δράπανο	0,85	1	2,00	1,47	1,73	1,73	1	0,10	0,17	0	0,00	0,00	1	0,10	0,17
4	Συσκευή συγκολλήσεων	0,85	1		20,00	23,53	23,53	1	0,10	2,35	0	0,00	0,00	1	0,10	2,35
5	Μονάδα επεξεργασίας Αποβλήτων	0,85	2		18,00	21,18	42,35	1	0,40	8,47	1	0,40	8,47	1	0,40	8,47
6	Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	0,85	4	20,00	14,72	17,32	69,27	1	0,10	1,73	1	0,00	0,00	1	0,10	1,73
7	Εφεδρική παροχή	0,85	2		15,00	17,65	35,29	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ</b>																
1	Αντλία κύτους	0,85	1	20,00	14,72	17,32	17,32	1	0,20	3,46	0	0,00	0,00	1	0,20	3,46
2	Αντλία πυρκαγιάς	0,85	1	45,00	33,12	38,96	38,96	1	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
3	Αντλίες γενικής χρήσης	0,85	2	50,00	36,80	43,29	86,59	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
4	Εργάτης άγκυρας	0,85	2	40,00	29,44	34,64	69,27	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	1	0,10	3,46
5	Εργάτες πρυμνησίων	0,85	1	50,00	36,80	43,29	43,29	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	1	0,20	8,66
6	Αντλία ποσίμου νερού	0,85	2	15,00	11,04	12,99	25,98	1	0,50	6,49	1	0,50	6,49	1	0,50	6,49
7	Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	0,85	1	5,00	3,68	4,33	4,33	1	0,70	3,03	1	0,70	3,03	1	0,70	3,03
8	Αντλία πλυσίματος καταστρώματος	0,85	1	15,00	11,04	12,99	12,99	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
9	Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης	0,85	1	20,00	14,72	17,32	17,32	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	1	0,10	1,73
10	Αντλίες υγιεινής	0,85	2	10,00	7,36	8,66	17,32	2	0,40	6,93	2	0,40	6,93	2	0,40	6,93
11	Υδραυλικές αντλίες περυγίων ευστάθειας	0,85	2	25,00	18,40	21,65	43,29	2	0,10	4,33	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
12	Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	0,85	4	20,00	14,72	17,32	69,27	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
13	Αντλία στεγανών θυρών	0,85	1	5,00	3,68	4,33	4,33	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
14	Αντλία πυρκαγιάς garage	0,85	4	30,00	22,08	25,98	103,91	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00

<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΣΤΙΑΣΗΣ</b>																
1	Συμπιεστές κλιματισμού	0,85	2	40,00	29,44	34,64	69,27	1	0,75	25,98	1	0,75	25,98	1	0,75	25,98
2	Συμπιεστές ψυκτικής	0,85	2	10,00	7,36	8,66	17,32	2	0,40	6,93	2	0,40	6,93	2	0,40	6,93
3	Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	0,85	2	20,00	14,72	17,32	34,64	2	0,75	25,98	2	0,75	25,98	2	0,75	25,98
4	Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	0,85	2	15,00	11,04	12,99	25,98	2	0,75	19,48	2	0,75	19,48	2	0,75	19,48
5	Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	0,85	2	2,00	1,47	1,73	3,46	2	0,40	1,39	2	0,40	1,39	2	0,40	1,39
6	Αντλίες πόσιμου νερού	0,85	2	4,00	2,94	3,46	6,93	2	0,50	3,46	2	0,50	3,46	2	0,50	3,46
7	Αντλίες αποχέτευσης	0,85	2	10,00	7,36	8,66	17,32	2	0,70	12,12	2	0,70	12,12	2	0,70	12,12
8	Αντλίες θερμού νερού	0,85	2	3,00	2,21	2,60	5,20	2	0,70	3,64	2	0,70	3,64	2	0,70	3,64
9	Συμπιεστής παγωτομηχανής	0,85	1	1,50	1,10	1,30	1,30	1	0,80	1,04	1	0,80	1,04	1	0,80	1,04
10	Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	0,85	12	1,00	0,74	0,87	10,39	12	0,80	8,31	12	0,80	8,31	12	0,80	8,31
11	Ανεμιστήρες χώρων ενδίαίτησης	0,85	12	5,00	3,68	4,33	51,95	12	0,85	44,16	12	0,85	44,16	12	0,85	44,16
12	Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	0,85	7	10,00	7,36	8,66	60,61	7	0,40	24,24	7	0,40	24,24	7	0,40	24,24
13	Ανελκυστήρας	0,85	2	15,00	11,04	12,99	25,98	2	0,20	5,20	0	0,00	0,00	2	0,50	12,99
<b>ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ</b>																
1	Κουζίνα	1,00	2		30,00	30,00	60,00	2	0,30	18,00	1	0,30	9,00	1	0,30	9,00
2	Εστίες	1,00	2		20,00	20,00	40,00	2	0,30	12,00	1	0,30	6,00	1	0,30	6,00
3	Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα	0,85	1	6,00	4,42	5,20	5,20	1	0,30	1,56	1	0,30	1,56	1	0,30	1,56
4	Εξαεριστήρας	0,85	1	15,00	11,04	12,99	12,99	1	0,30	3,90	1	0,30	3,90	1	0,30	3,90
5	Πλυντήριο πιάτων	0,85	1	2,00	1,47	1,73	1,73	1	0,20	0,35	1	0,00	0,00	1	0,20	0,35
6	Διάφορες συσκευές	0,85	4		2,00	2,35	9,41	4	0,30	2,82	2	0,30	1,41	2	0,30	1,41



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

<b>ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ</b>																
1	Μηχανοστάσιο	1,00	1		22,00	22,00	22,00	1	1,00	22,00	1	1,00	22,00	1	1,00	22,00
2	Γέφυρα	1,00	1		15,00	15,00	15,00	1	0,50	7,50	1	0,50	7,50	1	0,50	7,50
3	Χώροι ενδιάιτησης	1,00	2		12,00	12,00	24,00	2	0,40	9,60	2	0,40	9,60	2	0,40	9,60
4	Καταστρώματος	1,00	2		9,00	9,00	18,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	2	0,90	16,20
	<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΝΑΥΣΠΛΟΙΑΣ</b>	0,85	1		18,00	21,18	21,18	1	0,50	10,59	1	0,50	10,59	1	0,25	5,29
	<b>ΕΦΕΔΡΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ</b>	0,85	1		15,00	17,65	17,65	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ</b>									<b>664,17</b>			<b>662,03</b>			<b>354,98</b>

Πίνακας 6.2 : Λεπτομερής ηλεκτρικός ισολογισμός για τυπικό ντιζελοκίνητο πλοίο.

Από τον πίνακα προκύπτει ότι η συνολική καταναλισκόμενη ισχύς για τις ενεργειακές απαιτήσεις του πλοίου είναι συνολικά:

1. Κανονικής πορείας = 664,17 kW
2. Χειρισμών = 662,03 kW
3. Εν όρμω = 354,98 kW

#### 6.4 Διαμόρφωση κύριου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου

Αρχικά είναι αναγκαίο να εξασφαλίζεται η διαρκής τροφοδότηση όλων των μηχανημάτων του πλοίου που είναι απαραίτητα για την ασφάλεια και την πρόωση του, ακόμα και όταν δεν λειτουργεί μία από τις κύριες γεννήτριες.

Καθώς το συνολικό φορτίο του υπό μελέτη πλοίου δεν ξεπερνά τα 2.200kW που ορίζει ο κανονισμός της IEC, ο κατάλληλος αριθμός των γεννητριών που θα αξιοποιηθούν σε αυτήν την περίπτωση είναι δύο.

Ακόμα, επειδή πρόκειται για ένα ντιζελοκίνητο πλοίο οι τιμές που παρέχονται από τους κατασκευαστές για ντιζελογεννήτριες είναι αναλυτικά: 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250 kW. Επιπλέον, θα πρέπει να μπορεί να καλυφθεί το φορτίο κανονικής πορείας κατά 70% με 80% από τη μία μόνο γεννήτρια, όταν οι άλλες έχουν βγει εκτός λειτουργίας. Ισχύει δηλαδή πως η μία γεννήτρια πρέπει σίγουρα να κυμαίνεται :

$$664,17 * 0.70 = 464,92 \text{ kW}$$

$$664,17 * 0.80 = 531,37 \text{ kW}$$

Έτσι, η βέλτιστη τυπική επιλογή για το συγκεκριμένο πλοίο είναι να εξοπλιστεί με δύο γεννήτριες των 500kW ως κυρίες ηλεκτρογεννήτριες, που η κάθε μία μπορεί να καλύψει το 75,3% του συνολικού φορτίου κανονικής πορείας.

#### 6.5 Καταγραφή φορτίων έκτακτης ανάγκης – Ενεργειακός ισολογισμός και διαμόρφωσης συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έκτακτης ανάγκης.

Μία ιδιαίτερη και επικίνδυνη κατάσταση, που μπορεί να βρεθεί το πλοίο, είναι αυτή της έκτακτης ανάγκης. Η κατάσταση αυτή απαιτεί ξεχωριστή μελέτη, καθώς ο μηχανικός του πλοίου πρέπει να επιλέξει μία εφεδρική γεννήτρια, η οποία θα εξασφαλίσει ηλεκτρική παροχή στο πλοίο, ακόμα και όταν καμία από τις κύριες ηλεκτρογεννήτριες δεν λειτουργεί. Η γεννήτρια ασφαλείας ουσιαστικά είναι αυτόματα ρυθμισμένη, ώστε να παρέχει ενέργεια σε περίπτωση απώλειας της συνολικής ισχύος λειτουργίας του πλοίου.

Το σοβαρότερο ζήτημα που τίθεται κατά τη μελέτη αυτής της κατάστασης είναι ποιες συσκευές και καταναλώσεις λειτουργούν σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης; Μεγαλύτερη βαρύτητα για την εργασία αυτή έχει κυρίως η κατάσταση παραμονής του πλοίου στο λιμάνι, έτσι εξετάζεται η περίπτωση της πυρκαγιάς ως η δυσμενέστερη έκτακτη κατάσταση που μπορεί να εξελιχθεί στο πλοίο. Οπότε γίνεται αποδεκτό πως οι ενεργοί καταναλωτές θα είναι αναλυτικά οι ακόλουθοι.

Για τα βοηθητικά πρόωσης, όταν η πυρκαγιά εξελιχθεί κατά τη διάρκεια πλεύσης του πλοίου θα λειτουργούν:

- Οι κύριοι αεροσυμπιεστές
- Ο διαχωριστήρας πετρελαίου
- Οι αεροσυμπιεστές εκκινήσεως
- Οι αεροσυμπιεστές αυτοματισμού

- Η αντλία συμπυκνώματος
- Οι κινητήρες μηχανισμού πηδαλίου
- Ο ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα λέβητα
- Η αντλία κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρου
- Οι αντλίες τροφοδοσίας καυσίμου
- Οι αντλίες κυκλοφορίας θαλασσινού νερού
- Οι αντλίες ψύξης βαλβίδων
- Οι αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα
- Οι ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου

Για τα βοηθητικά του μηχανοστασίου: δεν λειτουργεί κανένας καταναλωτής κατά τη διάρκεια έκτακτης ανάγκης.

Για τα βοηθητικά σκάφους λειτουργούν αναλυτικά:

- Η αντλία κήτους με ( $f_s = 0.2$ )
- Η αντλία πυρκαγιάς με ( $f_s = 0.5$ )
- Η αντλία πόσιμου νερού (μία από τις δύο) με ( $f_s = 0.25$ )
- Η αντλία πλυσίματος καταστρώματος με ( $f_s = 0.5$ )
- Η αντλία υγιεινής με ( $f_s = 0.4$ )
- Οι υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας
- Τα βαρούλκα σωσιβίων λέμβων με ( $f_s = 0.5$ )
- Οι αντλίες στεγανών θυρών με ( $f_s = 0.5$ )
- Η αντλία πυρκαγιάς γκαράζ με ( $f_s = 0.75$ )
- Οι αντλίες αποχέτευσης (μία από τις δύο)
- Οι ανεμιστήρες χώρων εστίασης ( οι 6 από τους 12)

Για τις συσκευές του μαγειρείου: δεν λειτουργεί καμία.

Για τους πίνακες φωτισμού: λειτουργεί όλος ο φωτισμός κανονικής πορείας και η γεννήτρια ασφαλείας καλύπτει το φορτίο των 10kW.

Για τον πίνακα ναυσιπλοΐας: λειτουργεί ολόκληρος.

Έτσι το συνολικό φορτίο που εξυπηρετείται υπολογίζεται στη συνέχεια μέσω του πίνακα 6.3 με τους ίδιους τύπους που αξιοποιήθηκαν και στον πίνακα 6.2.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

	ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ	η	N	Εγκατεστημένη Ισχύς				Ισχύς κατάστασης ανάγκης - πυρκαγιάς		
				P <sub>ον.αποδ.</sub>		P <sub>ον.απορροφ.</sub>	P <sub>εγκατ.</sub>	N	f <sub>s</sub>	P <sub>λειτ.</sub>
				PS	KW	KW	KW			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΟΩΣΗΣ</b>									
1	Κύριοι Αεροσυμπιεστές	0,85	2	30,00	22,08	25,98	51,95	1	0,10	2,60
2	Αντλίες λαδιού λίπανσης Κ.Μ	0,85	2	45,00	33,12	38,96	77,93	1	0,85	33,12
3	Διαχωριστήρες πετρελαίου	0,85	3	20,00	14,72	17,32	51,95	1	0,70	12,12
4	Αντλία Μετάγγισης Πετρελαίου Diesel	0,85	1	5,00	3,68	4,33	4,33	0	0,00	0,00
5	Αεροσυμπιεστές Εκκινήσεως	0,85	2	40,00	29,44	34,64	69,27	1	0,10	3,46
6	Αεροσυμπιεστής Αυτοματισμού	0,85	1	35,00	25,76	30,31	30,31	1	0,20	6,06
7	Αντλία Συμπυκνώματος	0,85	2	12,00	8,83	10,39	20,78	1	0,40	4,16
8	Κινητήρες Μηχανισμού Πηδαλίου	0,85	2	35,00	25,76	30,31	60,61	1	0,10	3,03
9	Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	0,85	2	10,00	7,36	8,66	17,32	0	0,00	0,00
10	Ανεμιστήρας Προσαγωγής Αέρα Λέβητα	0,85	1	4,00	2,94	3,46	3,46	1	0,50	1,73
11	Αντλίες Κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων Κ.Μ	0,85	2	35,00	25,76	30,31	60,61	1	0,85	25,76
12	Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	0,85	2	10,00	7,36	8,66	17,32	1	0,80	6,93
13	Θερμαντήρες καυσίμου	1,00	2		15,00	15,00	30,00	0	0,00	0,00
14	Αντλίες μετάγγισης βαρέως πετρελαίου	0,85	2	20,00	14,72	17,32	34,64	0	0,00	0,00
15	Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλ. Νερού	0,85	3	90,00	66,24	77,93	233,79	2	0,85	132,48
16	Αντλίες ψύξης βαλβίδων Κ.Μ	0,85	2	25,00	18,40	21,65	43,29	1	0,85	18,40
17	Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	0,85	2	8,00	5,89	6,93	13,85	1	0,85	5,89
18	Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	0,85	4	40,00	29,44	34,64	138,54	2	0,85	58,88
19	Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	0,85	2	14,00	10,30	12,12	24,24	1	0,35	4,24

	<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ</b>									
1	Γερανογέφυρα	0,85	1	15,00	11,04	12,99	12,99	0	0,00	0,00
2	Τόρνος	0,85	1	5,00	3,68	4,33	4,33	0	0,00	0,00
3	Δράπανο	0,85	1	2,00	1,47	1,73	1,73	0	0,00	0,00
4	Συσκευή συγκολλήσεων	0,85	1		20,00	23,53	23,53	0	0,00	0,00
5	Μονάδα επεξεργασίας Αποβλήτων	0,85	2		18,00	21,18	42,35	0	0,00	0,00
6	Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	0,85	4	20,00	14,72	17,32	69,27	0	0,00	0,00
7	Εφεδρική παροχή	0,85	2		15,00	17,65	35,29	0	0,00	0,00
	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ</b>									
1	Αντλία κύτους	0,85	1	20,00	14,72	17,32	17,32	1	0,20	3,46
2	Αντλία πυρκαγιάς	0,85	1	45,00	33,12	38,96	38,96	1	0,75	29,22
3	Αντλίες γενικής χρήσης	0,85	2	50,00	36,80	43,29	86,59	1	0,50	21,65
4	Εργάτης άγκυρας	0,85	2	40,00	29,44	34,64	69,27	0	0,00	0,00
5	Εργάτες πρυμνησίων	0,85	1	50,00	36,80	43,29	43,29	0	0,00	0,00
6	Αντλία ποσίμου νερού	0,85	2	15,00	11,04	12,99	25,98	1	0,25	3,25
7	Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	0,85	1	5,00	3,68	4,33	4,33	0	0,00	0,00
8	Αντλία πλυσίματος καταστρώματος	0,85	1	15,00	11,04	12,99	12,99	1	0,50	6,49
9	Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης	0,85	1	20,00	14,72	17,32	17,32	0	0,00	0,00
10	Αντλίες υγιεινής	0,85	2	10,00	7,36	8,66	17,32	1	0,40	3,46
11	Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας	0,85	2	25,00	18,40	21,65	43,29	2	0,10	4,33
12	Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	0,85	4	20,00	14,72	17,32	69,27	4	0,05	3,46

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

13	Αντλία στεγανών θυρών	0,85	1	5,00	3,68	4,33	4,33	1	0,05	0,22
14	Αντλία πυρκαγιάς garage	0,85	4	30,00	22,08	25,98	103,91	1	0,75	19,48
	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ</b>									
1	Συμπιεστές κλιματισμού	0,85	2	40,00	29,44	34,64	69,27	0	0,00	0,00
2	Συμπιεστές ψυκτικής	0,85	2	10,00	7,36	8,66	17,32	0	0,00	0,00
3	Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	0,85	2	20,00	14,72	17,32	34,64	0	0,00	0,00
4	Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	0,85	2	15,00	11,04	12,99	25,98	0	0,00	0,00
5	Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	0,85	2	2,00	1,47	1,73	3,46	0	0,00	0,00
6	Αντλίες πόσιμου νερού	0,85	2	4,00	2,94	3,46	6,93	1	0,50	1,73
7	Αντλίες αποχέτευσης	0,85	2	10,00	7,36	8,66	17,32	1	0,70	6,06
8	Αντλίες θερμού νερού	0,85	2	3,00	2,21	2,60	5,20	0	0,00	0,00
9	Συμπιεστής παγωτομηχανής	0,85	1	1,50	1,10	1,30	1,30	0	0,00	0,00
10	Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	0,85	12	1,00	0,74	0,87	10,39	0	0,00	0,00
11	Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	0,85	12	5,00	3,68	4,33	51,95	6	0,85	22,08
12	Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	0,85	7	10,00	7,36	8,66	60,61	0	0,00	0,00
13	Ανελκυστήρας	0,85	2	15,00	11,04	12,99	25,98	0	0,00	0,00
	<b>ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ</b>									
1	Κουζίνα	1,00	2		30,00	30,00	60,00	0	0,00	0,00
2	Εστίες	1,00	2		20,00	20,00	40,00	0	0,00	0,00
3	Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα	0,85	1	6,00	4,42	5,20	5,20	0	0,00	0,00
4	Εξαεριστήρας	0,85	1	15,00	11,04	12,99	12,99	0	0,00	0,00
5	Πλυντήριο πιάτων	0,85	1	2,00	1,47	1,73	1,73	0	0,00	0,00
6	Διάφορες συσκευές	0,85	4		2,00	2,35	9,41	0	0,00	0,00

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

	<b>ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ</b>									
1	Μηχανοστάσιο	1,00	1		22,00	22,00	22,00	1	1,00	22,00
2	Γέφυρα	1,00	1		15,00	15,00	15,00	1	0,50	7,50
3	Χώροι εστίασης	1,00	2		12,00	12,00	24,00	2	0,40	9,60
4	Καταστρώματος	1,00	2		9,00	9,00	18,00	2	0,10	1,80
	<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΝΑΥΣΠΛΟΙΑΣ</b>	0,85	1		18,00	21,18	21,18	1	0,50	10,59
	<b>ΕΦΕΔΡΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ</b>	0,85	1		15,00	17,65	17,65	0	0,00	0,00
	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ</b>									<b>495,25</b>

Πίνακας 6.3 : Λεπτομερής ενεργειακός ισολογισμός για κατάσταση έκτακτης ανάγκης – πυρκαγιάς.

Όπως προκύπτει από τον πίνακα, τον συνολικό φορτίο υπό αυτές τις συνθήκες αγγίζει τα 495,25kW, επομένως για την τρέχουσα μελέτη επιλέγεται μία εφεδρική γεννήτρια συνολικής ισχύος 500kW.

## 6.6 Έλεγχος συντελεστή ισχύος

Κατά τη διάρκεια μελέτης του ενεργειακού ισολογισμού ενός πλοίου υπολογίζεται η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς ανά κατάσταση λειτουργίας και έτσι προκύπτει εύκολα ο αριθμός και το μέγεθος των ηλεκτρογεννητριών που χρειάζονται, ώστε να καλυφθεί το συνολικό φορτίο. Απαραίτητο είναι όμως να εξεταστεί και η έννοια του συντελεστή ισχύος (Σ.Ι.) των ηλεκτρογεννητριών, ο οποίος σχετίζεται άμεσα με την ενεργό και την άεργο ισχύ του φορτίου της εκάστοτε ηλεκτρολογικής εγκατάστασης.

Ο λόγος που υπάρχει ενδιαφέρον στην εξέταση του συντελεστή αυτού είναι κυρίως το γεγονός πως σε κάποιες περιπτώσεις, που η επιλογή των ηλεκτρογεννητριών βασίζεται μόνο στον ενεργειακό υπολογισμό, υπάρχει η πιθανότητα αυτές να αδυνατούν να καλύψουν τις ηλεκτρικές ανάγκες του πλοίου. Αυτό συμβαίνει καθώς κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ο αντίστοιχος συντελεστής ισχύος μπορεί να λαμβάνει πολύ χαμηλές τιμές.

Γενικά είναι γνωστό πως ως ενεργός ισχύς χαρακτηρίζεται κυρίως η ωφέλιμη ισχύς που παράγεται από το ηλεκτρικό δίκτυο και καταναλώνεται στις ωμικές του αντιστάσεις.

Υπολογίζεται για μονοφασικό σύστημα ή ανά μονάδα:

$P = V * I * \cos \varphi$  (Σχέση 6.5α), όπου ( $\cos \varphi$ ) είναι ο συνολικός Σ.Ι. της γεννήτριας.

Και για τριφασικό σύστημα:

$$P = 3 * V_{\varphi} * I_{\varphi} * \cos \varphi \quad (\text{Σχέση 6.5β})$$

Αντίθετα ως άεργος ισχύς ονομάζεται η μη ωφέλιμη ισχύς, που αποθηκεύεται ή επιστρέφει στο ηλεκτρικό δίκτυο, κυρίως από διατάξεις πηνίων και πυκνωτών κινήτρων. Οι κινητήρες γενικά παράγουν μηχανική περιστροφή ή γραμμική κίνηση καταναλώνοντας έτσι άεργο ηλεκτρική ισχύ.

Υπολογίζεται για μονοφασικό σύστημα ή ανά μονάδα:

$$Q = V * I * \sin \varphi \quad (\text{Σχέση 6.6α})$$

Και για τριφασικό σύστημα:

$$Q = 3 * V_{\varphi} * I_{\varphi} * \sin \varphi \quad (\text{Σχέση 6.6α})$$

Η ενεργός και η άεργος ισχύς συναντώνται σε όλους τους αγωγούς του δικτύου, καθώς εκτός από το ωφέλιμο ρεύμα προς κατανάλωση στο εσωτερικό τους τα καλώδια περιέχουν και άλλου είδους καταναλώσεις (ή φορτία), που δεν τους επιτρέπουν να παρουσιάζουν ιδανική συμπεριφορά. Τα καλώδια δηλαδή φορτίζονται θερμικά και εμφανίζουν σύνθετη αντίσταση, οπότε παρουσιάζουν ένα ανώτερο όριο ισχύος λειτουργίας, όπως και κάθε ηλεκτρικό στοιχείο άλλωστε. Έτσι καθώς η συνολική ισχύς διέρχεται από το δίκτυο ένα μέρος της αξιοποιείται ως άεργος ισχύς και ένα άλλο μέρος καταναλώνεται ως ενεργός ισχύς, με συνέπεια να περιορίζεται και η τελική τιμή της ενεργού ισχύος, που φτάνει τελικά τους καταναλωτές.



Το μέτρο ελέγχου του παραπάνω φαινομένου όπως ειπώθηκε και παραπάνω είναι ο συντελεστής ισχύος, ο οποίος σε συνθήκες ημιτονικής μόνιμης κατάστασης συμβολίζεται με  $(\cos \varphi)$ .

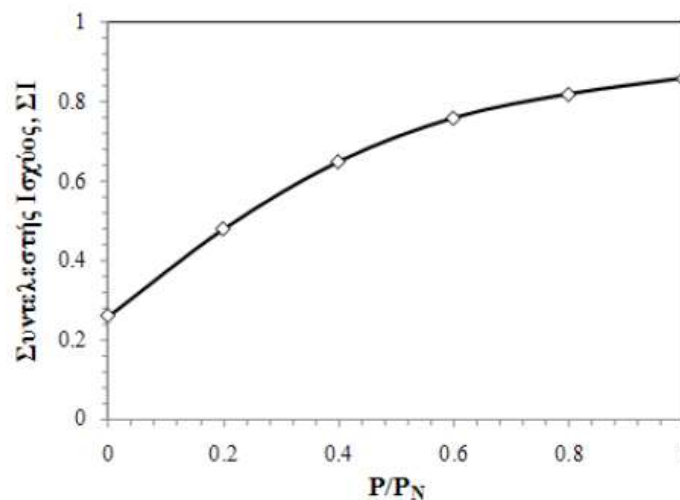
Για να λειτουργήσει ικανοποιητικά ένα ηλεκτρικό δίκτυο, οι κανονισμοί ορίζουν πως ο συντελεστής ισχύος θα πρέπει να κυμαίνεται σε τιμές κοντά στη μονάδα και πιο συγκεκριμένα να ισχύει:

$$0.8 \text{ χωρητικό} \leq (\cos \varphi) \leq 0.8 \text{ επαγωγικό} \quad (\text{Σχέση 6.7})$$

Στην περίπτωση που ένας κινητήρας δεν αξιοποιεί την ονομαστική του ισχύ, τότε θα παρουσιάζει και διαφορετικό  $(\cos \varphi)$ , που μπορεί να προσδιορισθεί από το διάγραμμα της εικόνας 6.29.

Η εξίσωση της ακόλουθης καμπύλης χρησιμοποιείται σε περίπτωση που δεν υπάρχουν ακριβέστερα στοιχεία από τον κατασκευαστή του κινητήρα:

$$y = 0,13026 + 2,3679x - 3,7761x^2 + 3,3126x^3 \quad (\text{Σχέση 6.8}), \text{ όπου } x = \frac{P}{P_N}$$



Εικόνα 6.29: Διάγραμμα συντελεστή ισχύος κινητήρα επαγωγής σε μερικό φορτίο (P). [20]

Έτσι, για να είναι πλήρης ο ενεργειακός ισολογισμός του πλοίου που εξετάζεται, πρέπει να υπολογιστεί ο συνολικός συντελεστής ισχύος ανά κατάσταση λειτουργίας, ως ο μέσος όρος των επιμέρους συντελεστών όλων των καταναλωτών που συμμετέχουν σε κάθε κατάσταση λειτουργίας. Επιπλέον χρειάζεται να καταγραφούν και οι αντίστοιχες τιμές της ενεργού και άεργου ισχύος κάθε καταναλωτή, όπως φαίνεται και στον πίνακα 6.4. Οι στήλες του συντελεστή λειτουργίας και της ισχύος λειτουργίας θα είναι οι ίδιες με αυτές του πίνακα 6.2, του λεπτομερή ηλεκτρικού ισολογισμού.

Ο συντελεστής ισχύος του κάθε καταναλωτή κανονικά προκύπτει από δεδομένα των κατασκευαστών ή από την εξίσωση της καμπύλης της εικόνας 6.29. Στην τρέχουσα εργασία όμως για το συγκεκριμένο πίνακα 6.4 έχει γίνει η παραδοχή ότι ο συντελεστής ισχύος είναι ιδανικά 0,85 για τους κινητήρες και 1 για όλα τα ωμικά φορτία, πλην των συσκευών συγκολλησεως που έχουν, λόγω των αρμονικών, συντελεστή ισχύος 0,8.

Το ημίτονο (**sin φ**) που καταγράφεται υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (\text{Σχέση 6.9})$$

Και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της άεργου ισχύος για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά μέσω του τύπου:

$$Q_{\text{απορ.}} = \frac{P_{\text{λειτ.}}}{\cos \varphi} * \sin \varphi = P_{\text{λειτ.}} * \tan \varphi \quad (\text{Σχέση 6.10})$$

Έτσι προκύπτει και η αντίστοιχη φαινόμενη ισχύς του κάθε καταναλωτή:

$$S = \sqrt{Q^2 + P^2} \quad (\text{Σχέση 6.11})$$

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

	ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ	Κανονική Πορεία							Κατάσταση Χειρισμών							Κατάσταση Εν όρμω						
		N	f <sub>s</sub>	P <sub>ΛΕΙΤ.</sub>	Συντ. Ισχύ-ος		Q <sub>ΛΕΙΤ.</sub>	Μεγιστη Ισχύς	N	f <sub>s</sub>	P <sub>ΛΕΙΤ.</sub>	Συντ Ισχύ-ος		Q <sub>ΛΕΙΤ.</sub>	Μεγιστη Ισχύς	N	f <sub>s</sub>	P <sub>ΛΕΙΤ.</sub>	Συντ. Ισχύ-ος		Q <sub>ΛΕΙΤ.</sub>	Μεγιστη Ισχύς
				KW	cosφ	sinφ	kvar	S (kVa)			KW	cosφ	sinφ	kvar	S (kVa)			KW	cosφ	sinφ	kvar	S (kVa)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΟΩΣΗΣ</b>																					
1	Κύριοι Αεροσυμπιεστές	1	0,10	2,60	0,37	0,93	6,52	7,02	1	0,85	22,08	0,83	0,56	14,84	26,60	1	0,10	2,60	0,37	0,93	6,52	7,02
2	Αντλίες λαδιού λίπανσης Κ.Μ	1	0,85	33,12	0,83	0,56	22,26	39,90	1	0,85	33,12	0,83	0,56	22,26	39,90	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
3	Διαχωριστήρες πετρελαίου	1	0,70	12,12	0,78	0,63	9,73	15,54	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
4	Αντλία Μετάγγισης Πετρελαίου Diesel	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	1	0,10	0,43	0,37	0,93	1,09	1,17
5	Αεροσυμπιεστές Εκκίνησης	1	0,10	3,46	0,37	0,93	8,70	9,36	1	0,80	27,71	0,82	0,57	19,34	33,79	1	0,10	3,46	0,37	0,93	8,70	9,36
6	Αεροσυμπιεστής Αυτοματισμού	1	0,20	6,06	0,48	0,88	11,08	12,63	1	0,20	6,06	0,48	0,88	11,08	12,63	1	0,20	6,06	0,48	0,88	11,08	12,63
7	Αντλία Συμπυκνώματος	1	0,40	4,16	0,65	0,76	4,86	6,39	1	0,40	4,16	0,65	0,76	4,86	6,39	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
8	Κινητήρες Μηχανισμού Πηδαλίου	1	0,10	3,03	0,37	0,93	7,61	8,19	1	0,20	6,06	0,48	0,88	11,08	12,63	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
9	Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	1	0,80	6,93	0,82	0,57	4,84	8,45
10	Ανεμιστήρας Προσαγωγής Αέρα Λέβητα	1	0,50	1,73	0,56	0,83	2,56	3,09	1	0,50	1,73	0,56	0,83	2,56	3,09	1	0,20	0,69	0,48	0,88	1,27	1,44
11	Αντλίες Κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων Κ.Μ	1	0,85	25,76	0,83	0,56	17,31	31,04	1	0,85	25,76	0,83	0,56	17,31	31,04	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
12	Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	1	0,80	6,93	0,82	0,57	4,84	8,45	1	0,80	6,93	0,82	0,57	4,84	8,45	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
13	Θερμαντήρες καυσίμου	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	1	0,10	1,50	0,37	0,93	3,77	4,05
14	Αντλίες μετάγγισης βαρέως πετρελαίου	1	0,10	1,73	0,37	0,93	4,35	4,68	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
15	Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλ. Νερου	2	0,85	132,48	0,83	0,56	89,03	159,61	2	0,85	132,48	0,83	0,56	89,03	159,61	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
16	Αντλίες ψύξης βαλβίδων Κ.Μ	1	0,85	18,40	0,83	0,56	12,36	22,17	1	0,85	18,40	0,83	0,56	12,36	22,17	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
17	Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	1	0,85	5,89	0,83	0,56	3,96	7,09	1	0,85	5,89	0,83	0,56	3,96	7,09	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
18	Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	3	0,85	88,32	0,83	0,56	59,35	106,41	3	0,85	88,32	0,83	0,56	59,35	106,41	2	0,20	13,85	0,48	0,88	25,32	28,86
19	Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	1	0,35	4,24	0,53	0,85	6,79	8,01	1	0,30	3,64	0,57	0,82	5,24	6,38	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ</b>						<b>271,29</b>	<b>449,59</b>						<b>278,10</b>	<b>476,19</b>						<b>62,57</b>	<b>72,99</b>

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

	<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ</b>																					
1	Γερανογέφυρα	1	0,50	6,49	0,56	0,83	9,61	11,60	1	0,50	6,49	0,56	0,83	9,61	11,60	1	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
2	Τόρνος	1	0,10	0,43	0,37	0,93	1,09	1,17	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	1	0,10	0,43	0,37	0,93	1,09	1,17
3	Δράπανο	1	0,10	0,17	0,37	0,93	0,43	0,47	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	1	0,10	0,17	0,37	0,93	0,43	0,47
4	Συσκευή συγκολλήσεων	1	0,10	2,35	0,37	0,93	5,91	6,36	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	1	0,10	2,35	0,37	0,93	5,91	6,36
5	Μονάδα επεξεργασίας Αποβλήτων	1	0,40	8,47	0,65	0,76	9,90	13,03	1	0,40	8,47	0,65	0,76	9,90	13,03	1	0,40	8,47	0,65	0,76	9,90	13,03
6	Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	1	0,10	1,73	0,37	0,93	4,35	4,68	1	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	1	0,10	1,73	0,37	0,93	4,35	4,68
7	Εφεδρική παροχή	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ</b>						<b>31,29</b>	<b>37,31</b>						<b>19,51</b>	<b>24,63</b>						<b>21,68</b>	<b>25,71</b>
	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ</b>																					
1	Αντλία κύτους	1	0,20	3,46	0,48	0,88	6,33	7,22	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	1	0,20	3,46	0,48	0,88	6,33	7,22
2	Αντλία πυρκαγιάς	1	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
3	Αντλίες γενικής χρήσης	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
4	Εργάτης άγκυρας	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	1	0,10	3,46	0,37	0,93	8,70	9,36
5	Εργάτες πρυμνησίον	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	1	0,20	8,66	0,48	0,88	15,83	18,04
6	Αντλία ποσίμου νερού	1	0,50	6,49	0,56	0,83	9,61	11,60	1	0,50	6,49	0,56	0,83	9,61	11,60	1	0,50	6,49	0,56	0,83	9,61	11,60
7	Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	1	0,70	3,03	0,78	0,63	2,43	3,89	1	0,70	3,03	0,78	0,63	2,43	3,89	1	0,70	3,03	0,78	0,63	2,43	3,89
8	Αντλία πλοσίματος καταστρώματος	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
9	Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	1	0,10	1,73	0,37	0,93	4,35	4,68
10	Αντλίες υμεινής	2	0,40	6,93	0,65	0,76	8,10	10,66	2	0,40	6,93	0,65	0,76	8,10	10,66	2	0,40	6,93	0,65	0,76	8,10	10,66
11	Υδραυλικές αντλίες περυγίων ευστάθειας	2	0,10	4,33	0,37	0,93	10,87	11,70	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
12	Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
13	Αντλία στεγανών θυρών	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
14	Αντλία πυρκαγιάς garage	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00
	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ</b>						<b>37,34</b>	<b>45,06</b>						<b>20,14</b>	<b>26,14</b>						<b>55,34</b>	<b>65,44</b>

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ</b>																					
1	Συμπιεστές κλιματισμού	1	0,75	25,98	0,80	0,60	19,48	32,47	1	0,75	25,98	0,80	0,60	19,48	32,47	1	0,75	25,98	0,80	0,60	19,48	32,47
2	Συμπιεστές ψυκτικής	2	0,40	6,93	0,65	0,76	8,10	10,66	2	0,40	6,93	0,65	0,76	8,10	10,66	2	0,40	6,93	0,65	0,76	8,10	10,66
3	Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	2	0,75	25,98	0,80	0,60	19,48	32,47	2	0,75	25,98	0,80	0,60	19,48	32,47	2	0,75	25,98	0,80	0,60	19,48	32,47
4	Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	2	0,75	19,48	0,80	0,60	14,61	24,35	2	0,75	19,48	0,80	0,60	14,61	24,35	2	0,75	19,48	0,80	0,60	14,61	24,35
5	Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	2	0,40	1,39	0,65	0,76	1,62	2,13	2	0,40	1,39	0,65	0,76	1,62	2,13	2	0,40	1,39	0,65	0,76	1,62	2,13
6	Αντλίες πόσιμου νερού	2	0,50	3,46	0,56	0,83	5,12	6,18	2	0,50	3,46	0,56	0,83	5,12	6,18	2	0,50	3,46	0,56	0,83	5,12	6,18
7	Αντλίες αποχέτευσης	2	0,70	12,12	0,78	0,63	9,73	15,54	2	0,70	12,12	0,78	0,63	9,73	15,54	2	0,70	12,12	0,78	0,63	9,73	15,54
8	Αντλίες θερμού νερού	2	0,70	3,64	0,78	0,63	2,92	4,66	2	0,70	3,64	0,78	0,63	2,92	4,66	2	0,70	3,64	0,78	0,63	2,92	4,66
9	Συμπιεστής παγοτομηχανής	1	0,80	1,04	0,82	0,57	0,73	1,27	1	0,80	1,04	0,82	0,57	0,73	1,27	1	0,80	1,04	0,82	0,57	0,73	1,27
10	Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	12	0,80	8,31	0,82	0,57	5,80	10,14	12	0,80	8,31	0,82	0,57	5,80	10,14	12	0,80	8,31	0,82	0,57	5,80	10,14
11	Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	12	0,85	44,16	0,83	0,56	29,68	53,20	12	0,85	44,16	0,83	0,56	29,68	53,20	12	0,85	44,16	0,83	0,56	29,68	53,20
12	Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	7	0,40	24,24	0,65	0,76	28,35	37,30	7	0,40	24,24	0,65	0,76	28,35	37,30	7	0,40	24,24	0,65	0,76	28,35	37,30
13	Ανεκυστήρας	2	0,20	5,20	0,48	0,88	9,50	10,82	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	2	0,50	12,99	0,56	0,83	19,22	23,19
	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ</b>						<b>155,11</b>	<b>241,20</b>						<b>145,61</b>	<b>230,38</b>						<b>164,8</b>	<b>253,5</b>
	<b>ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ</b>																					
1	Κουζίνα	2	0,30	18,00	0,57	0,82	25,95	31,58	1	0,30	9,00	0,57	0,82	12,97	15,79	1	0,30	9,00	0,57	0,82	12,97	15,79
2	Εστίες	2	0,30	12,00	0,57	0,82	17,30	21,05	1	0,30	6,00	0,57	0,82	8,65	10,53	1	0,30	6,00	0,57	0,82	8,65	10,53
3	Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα	1	0,30	1,56	0,57	0,82	2,25	2,73	1	0,30	1,56	0,57	0,82	2,25	2,73	1	0,30	1,56	0,57	0,82	2,25	2,73
4	Εξαεριστήρας	1	0,30	3,90	0,57	0,82	5,62	6,84	1	0,30	3,90	0,57	0,82	5,62	6,84	1	0,30	3,90	0,57	0,82	5,62	6,84
5	Πλυντήριο πιάτων	1	0,20	0,35	0,48	0,88	0,63	0,72	1	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	1	0,20	0,35	0,48	0,88	0,63	0,72
6	Διάφορες συσκευές	4	0,30	2,82	0,57	0,82	4,07	4,95	2	0,30	1,41	0,57	0,82	2,04	2,48	2	0,30	1,41	0,57	0,82	2,04	2,48
	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ</b>						<b>55,81</b>	<b>67,88</b>						<b>31,52</b>	<b>38,36</b>						<b>32,15</b>	<b>39,08</b>
	<b>ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ</b>																					
1	Μηχανοστάσιο	1	1,00	22,00	0,86	0,51	13,05	25,58	1	1,00	22,00	0,86	0,51	13,05	25,58	1	1,00	22,00	0,86	0,51	13,05	25,58
2	Γέφυρα	1	0,50	7,50	0,56	0,83	11,10	13,39	1	0,50	7,50	0,56	0,83	11,10	13,39	1	0,50	7,50	0,56	0,83	11,10	13,39
3	Χώροι ενδιαίτησης	2	0,40	9,60	0,65	0,76	11,22	14,77	2	0,40	9,60	0,65	0,76	11,22	14,77	2	0,40	9,60	0,65	0,76	11,22	14,77
4	Καταστρώματος	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,26	0,97	0,00	0,00	2	0,90	16,20	0,85	0,53	10,04	19,06
	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ</b>						<b>35,37</b>	<b>53,74</b>						<b>35,37</b>	<b>53,74</b>						<b>45,41</b>	<b>72,80</b>

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΝΑΥΣΠΛΟΙΑΣ</b>	<b>1</b>	<b>0,50</b>	<b>10,59</b>	<b>0,56</b>	<b>0,83</b>	<b>15,66</b>	<b>18,91</b>	<b>1</b>	<b>0,50</b>	<b>10,59</b>	<b>0,56</b>	<b>0,83</b>	<b>15,66</b>	<b>18,91</b>	<b>1</b>	<b>0,25</b>	<b>5,29</b>	<b>0,53</b>	<b>0,85</b>	<b>8,47</b>	<b>9,99</b>	
<b>ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ</b>						<b>15,66</b>	<b>18,91</b>						<b>15,66</b>	<b>18,91</b>						<b>8,47</b>	<b>9,99</b>	
<b>ΕΦΕΔΡΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ</b>	<b>0</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,26</b>	<b>0,97</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,26</b>	<b>0,97</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,26</b>	<b>0,97</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	
<b>ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ</b>				<b>0,75</b>		<b>601,87</b>	<b>913,68</b>				<b>0,72</b>		<b>545,91</b>	<b>868,35</b>				<b>0,70</b>		<b>390,4</b>	<b>539,5</b>	

	ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ	Κατάσταση έκτακτης ανάγκης						
		N	f <sub>s</sub>	P <sub>λειτ.</sub>	Συντ.Ισχύος		Q <sub>λειτ.</sub>	Μεγιστη Ισχύς
				KW	cosφ	sinφ	kvar	S (kVa)
	1	2	3	4	5	6	7	8
	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΩΩΣΗΣ</b>							
<b>1</b>	<i>Κύριοι Αεροσυμπιεστές</i>	<b>1</b>	<b>0.10</b>	<b>0.10</b>	<b>0.37</b>	<b>0.93</b>	<b>0.25</b>	<b>0.27</b>
<b>2</b>	<i>Αντλίες λαδιού λίπανσης Κ.Μ</i>	<b>1</b>	<b>0.85</b>	<b>1.70</b>	<b>0.83</b>	<b>0.56</b>	<b>1.14</b>	<b>2.05</b>
<b>3</b>	<i>Διαχωριστήρες πετρελαίου</i>	<b>1</b>	<b>0.70</b>	<b>2.10</b>	<b>0.78</b>	<b>0.63</b>	<b>1.68</b>	<b>2.69</b>
<b>4</b>	<i>Αντλία Μετάγγισης Πετρελαίου Diesel</i>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.26</b>	<b>0.97</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>5</b>	<i>Αεροσυμπιεστές Εκκινήσεως</i>	<b>1</b>	<b>0.10</b>	<b>0.50</b>	<b>0.37</b>	<b>0.93</b>	<b>1.26</b>	<b>1.35</b>
<b>6</b>	<i>Αεροσυμπιεστής Αυτοματισμού</i>	<b>1</b>	<b>0.20</b>	<b>1.20</b>	<b>0.48</b>	<b>0.88</b>	<b>2.19</b>	<b>2.50</b>
<b>7</b>	<i>Αντλία Συμπυκνώματος</i>	<b>1</b>	<b>0.40</b>	<b>2.80</b>	<b>0.65</b>	<b>0.76</b>	<b>3.27</b>	<b>4.31</b>
<b>8</b>	<i>Κινητήρες Μηχανισμού Πηδαλίου</i>	<b>1</b>	<b>0.10</b>	<b>0.80</b>	<b>0.37</b>	<b>0.93</b>	<b>2.01</b>	<b>2.16</b>
<b>9</b>	<i>Μηχανισμοί περιστροφής άξονα</i>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.26</b>	<b>0.97</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>10</b>	<i>Ανεμοστήρας Προσαγωγής Αέρα Λέβητα.</i>	<b>1</b>	<b>0.50</b>	<b>5.00</b>	<b>0.56</b>	<b>0.83</b>	<b>7.40</b>	<b>8.93</b>
<b>11</b>	<i>Αντλίες Κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων Κ.Μ</i>	<b>1</b>	<b>0.85</b>	<b>9.35</b>	<b>0.83</b>	<b>0.56</b>	<b>6.28</b>	<b>11.27</b>
<b>12</b>	<i>Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου</i>	<b>1</b>	<b>0.80</b>	<b>9.60</b>	<b>0.82</b>	<b>0.57</b>	<b>6.70</b>	<b>11.71</b>
<b>13</b>	<i>Θερμαντήρες καυσίμου</i>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.26</b>	<b>0.97</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>14</b>	<i>Αντλίες μετάγγισης βαρέως πετρελαιου</i>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.26</b>	<b>0.97</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

15	Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλ. Νερου	2	0.85	25.50	0.83	0.56	17.14	30.72
16	Αντλίες ψύξης βαλβίδων Κ.Μ	1	0.85	13.60	0.83	0.56	9.14	16.39
17	Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	1	0.85	14.45	0.83	0.56	9.71	17.41
18	Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	2	0.85	30.60	0.83	0.56	20.56	36.87
19	Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	1	0.35	6.65	0.53	0.85	10.64	12.55
							99.38	161.17
	<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ</b>							
1	Γερανογέφυρα	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
2	Τόρνος	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
3	Δράπανο	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
4	Συσκευή συγκολλήσεων	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
5	Μονάδα επεξεργασίας Αποβλήτων	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
6	Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
7	Εφεδρική παροχή	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
							0.00	0.00
	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ</b>							
1	Αντλία κύτους	1	0.20	0.20	0.48	0.88	0.37	0.42
2	Αντλία πυρκαγιάς	1	0.75	1.50	0.8	0.60	1.13	1.88
3	Αντλίες γενικής χρήσης	1	0.50	1.50	0.56	0.83	2.22	2.68
4	Εργάτης άγκυρας	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
5	Εργάτες πρυμνησίων	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
6	Αντλία ποσίμου νερού	1	0.25	1.50	0.54	0.84	2.34	2.78
7	Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
8	Αντλία πλυσίματος καταστρώματος	1	0.50	4.00	0.56	0.83	5.92	7.14
9	Κινητήρας καταπέλη πρύμνης	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
10	Αντλίες υγιεινής	1	0.40	4.00	0.65	0.76	4.68	6.15

11	Υδραυλικές αντλίες περυγίων ευστάθειας	2	0.10	2.20	0.37	0.93	5.52	5.95
12	Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	4	0.05	2.40	0.3	0.95	7.63	8.00
13	Αντλία στεγανών θυρών	1	0.05	0.65	0.3	0.95	2.07	2.17
14	Αντλία πυρκαγιάς garage	1	0.75	10.50	0.8	0.60	7.88	13.13
							39.74	50.28
	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΝΔΙΑΙΤΗΣΗΣ</b>							
1	Συμπιεστές κλιματισμού	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
2	Συμπιεστές ψυκτικής	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
3	Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
4	Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
5	Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
6	Αντλίες πόσιμου νερού	1	0.50	3.00	0.56	0.83	4.44	5.36
7	Αντλίες αποχέτευσης	1	0.70	4.90	0.78	0.63	3.93	6.28
8	Αντλίες θερμού νερού	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
9	Συμπιεστής παγωτομηχανής	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
10	Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
11	Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	6	0.85	56.10	0.83	0.56	37.70	67.59
12	Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
13	Ανελκυστήρας	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
							46.07	79.23
	<b>ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ</b>							
1	Κουζίνα	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
2	Εστίες	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
3	Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
4	Εξαεριστήρας	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00
5	Πλυντήριο πιάτων	0	0.00	0.00	0.26	0.97	0.00	0.00



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

<b>6</b>	<i>Διάφορες συσκευές</i>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.26</b>	<b>0.97</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
							<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
	<b>ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ</b>							
<b>1</b>	<i>Μηχανοστάσιο</i>	<b>1</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>0.86</b>	<b>0.51</b>	<b>0.59</b>	<b>1.16</b>
<b>2</b>	<i>Γέφυρα</i>	<b>1</b>	<b>0.50</b>	<b>1.00</b>	<b>0.56</b>	<b>0.83</b>	<b>1.48</b>	<b>1.79</b>
<b>3</b>	<i>Χώροι ενδιάτισης</i>	<b>2</b>	<b>0.40</b>	<b>2.40</b>	<b>0.65</b>	<b>0.76</b>	<b>2.81</b>	<b>3.69</b>
<b>4</b>	<i>Καταστρώματος</i>	<b>2</b>	<b>0.10</b>	<b>0.80</b>	<b>0.37</b>	<b>0.93</b>	<b>2.01</b>	<b>2.16</b>
							<b>6.89</b>	<b>8.80</b>
	<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΝΑΥΣΠΛΟΙΑΣ</b>	<b>1</b>	<b>0.50</b>	<b>0.00</b>	<b>0.56</b>	<b>0.83</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
							<b>15.66</b>	<b>18.91</b>
	<b>ΕΦΕΔΡΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.26</b>	<b>0.97</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ</b>				<b>0.75</b>		<b>207.74</b>	<b>318.39</b>

Πίνακας 6.4 : Συντελεστές ισχύος και απορροφούμενη άεργος ισχύ των καταναλωτών ντιζελοκίνητου πλοίου για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας.

Από το σύνολο των υπολογισμών του παραπάνω πίνακα προκύπτουν τα εξής:

1. Ο μέσος συντελεστής ισχύος όλων των φορτίων για την κάθε κατάσταση ξεχωριστά είναι:

- Κανονικής πορείας  $\cos \varphi = 0,75$
- Χειρισμών  $\cos \varphi = 0,72$
- Εν όρμω  $\cos \varphi = 0,70$
- Έκτακτη ανάγκη  $\cos \varphi = 0,75$

2. Η συνολική άεργος ισχύς του δικτύου του πλοίου είναι:

- Κανονικής πορείας  $Q = 601,87 \text{ kVar}$
- Χειρισμών  $Q = 545,91 \text{ kVar}$
- Εν όρμω  $Q = 390,4 \text{ kVar}$
- Έκτακτη ανάγκη  $Q = 207,74 \text{ kVar}$

3. Η μέγιστη ισχύς κατανάλωσης των φορτίων του πλοίου είναι:

- Κανονικής πορείας  $S = 913,68 \text{ kVA}$
- Χειρισμών  $S = 868,35 \text{ kVA}$
- Εν όρμω  $S = 539,5 \text{ kVA}$
- Έκτακτη ανάγκη  $S = 318,39 \text{ kVA}$

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει πως ο συντελεστής ισχύος σε όλες τις υπό μελέτη καταστάσεις φόρτισης παραμένει γενικά σε επίπεδα της τάξεως: [ 0,75 - 0,70 ]. Όπως όμως προαναφέρθηκε, για να λειτουργεί ικανοποιητικά ένα ηλεκτρικό δίκτυο, οι κανονισμοί ορίζουν ότι ο Σ.Ι. πρέπει να παίρνει τιμές κοντά στη 1. Στην προκειμένη περίπτωση και παρά το γεγονός ότι η επιλογή των ηλεκτρογεννητριών έγινε με βάση τις λεπτομερώς προϋπολογιζόμενες ανάγκες ηλεκτρικού φορτίου, οι προαναφερόμενες τιμές του Σ.Ι. ίσως (βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα) δημιουργήσουν προβλήματα στην ομαλή λειτουργία του πλοίου. Μια γεννήτρια μπορεί να καλύπτει τις ανάγκες του πλοίου σε kW, ο Σ.Ι. όμως μπορεί να είναι τέτοιος που να μην επιτρέπει την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι ένας λεπτομερής ηλεκτρολογικός ισολογισμός πρέπει να μην περιορίζεται μόνο στον υπολογισμό της απορροφούμενης και απαιτούμενης ισχύος, αλλά να περιλαμβάνει εκτενή μελέτη και υπολογισμό του Σ.Ι. και της άεργου ισχύος.

## **6.7 Διαστασιολόγηση καλωδίων και επιλογή διακοπτικών και προστατευτικών διατάξεων.**

Στη συνέχεια της τρέχουσας μελέτης παρουσιάζονται οι υπολογισμοί προσδιορισμού των διαφόρων καλωδίων τροφοδοσίας των ζυγών, των πινάκων και των ηλεκτρονικών καταναλωτών του εξεταζόμενου πλοίου.

Γενικά τα καλώδια που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις πλοίων πρέπει να είναι άφλεκτα και στεγανά. Άφλεκτα χαρακτηρίζονται τα καλώδια εκείνα που δεν αναφλέγονται, ώστε να δημιουργήσουν ή να μεταδώσουν πυρκαγιά (απλά καταστρέφονται από πολύ υψηλές θερμοκρασίες). Συνήθως η μόνωση τους είναι κατασκευασμένη από αιθυλοπροπυλένιο και χλωριούχο πολυβινύλιο.

Αρχικά για τον υπολογισμό του ονομαστικού εναλλασσόμενου ρεύματος γραμμής  $I_{\gamma}$  μιας συσκευής ισχύει.

- Για μονοφασική παροχή:  $I_{\gamma}[A] = \frac{P_{ov.απορ}}{V \cdot \cos \varphi}$  (Σχέση 6.12)

- Για τριφασική παροχή:  $I_{\gamma}[A] = \frac{P_{ov.απορ}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi}$  (Σχέση 6.13)

Όπου ( $P_{ov.απορ}$ ) είναι η ονομαστική απορροφούμενη ισχύς του πίνακα 6.2, ( $V$ ) είναι η ονομαστική πολική τάση του φορτίου και ( $\cos \varphi$ ) είναι ο συντελεστής ισχύος.

Η τελική ένταση ρεύματος υπολογίζεται ως εξής:

- Για γραμμή φωτισμού ωμικού φορτίου:  $I_{\gamma f}[A] = I_{\gamma}[A]$  (Σχέση 6.14)

- Για γραμμή ηλεκτροκινητήρα:  $I_{\gamma f}[A] = I_{\gamma}[A] * 1,25$  (Σχέση 6.15)

Έτσι με βάση το μέγιστο ρεύμα της κάθε γραμμής επιλέγεται, σύμφωνα με τους αντίστοιχους τυποποιημένους πίνακες, η κατάλληλη διατομή του αγωγού ( $S(mm^2)$ ) για την κάθε περίπτωση, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα.

Στον πίνακα 6.5, όπου παρουσιάζεται η διατομή του κάθε αγωγού βάση της έντασης των ρευμάτων των γραμμών, έχουν θεωρηθεί οι ακόλουθες παραδοχές:

1. Ο συντελεστής ισχύος θεωρείται 0,85 για τους κινητήρες και 1 για όλα τα ωμικά φορτία.
2. Οι συντελεστές ισχύος των συσκευών συγκολλήσεων είναι 0,8 λόγω παρουσίας αρμονικών.
3. Για συσκευές – παροχές (θερμαντήρες καυσίμου, κουζίνα, εστίες, πίνακες φωτισμού και ναυσιπλοΐας) που είναι ωμικά φορτία εφαρμόζεται η σχέση 6.14, ενώ για τα υπόλοιπα ισχύει κανονικά η σχέση 6.15.
4. Οι παροχές των πινάκων φωτισμού και ναυσιπλοΐας θεωρούνται τριφασικές και από εκεί και πέρα διαχωρίζονται σε επιμέρους μονοφασικά κυκλώματα.
5. Η διατομή  $1,0 mm^2$  δεν χρησιμοποιείται σε τέτοιου είδους εγκαταστάσεις και έτσι επιλέγεται απευθείας η αντίστοιχη διατομή  $1,5 mm^2$  ή μεγαλύτερες.
6. Οι καταναλώσεις με εντάσεις ρευμάτων κάτω των 6A μπορούν να ασφαλιστούν με ασφάλειες των 6A.
7. Οι τριφασικές παροχές των καταναλώσεων θα αναγράφονται ως [3\*αντίστοιχη διαδρομή] σαν να μην υπάρχει δηλαδή ο αγωγός γείωσης. Ενώ αντίστοιχα οι μονοφασικές παροχές θα είναι [2\*αντίστοιχη διατομή] σαν να μην συμπεριλαμβάνεται δηλαδή ο αγωγός προστασίας. Στην πραγματικότητα εξαρτάται που γίνεται η γείωση προστασίας.
8. Όλοι οι αγωγοί έχουν ειδική αντίσταση ίση με [ $p = 0,0176 \Omega * mm^2 / m$ ].

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

	ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ	V	N	Ρον.απορροφ.	cosφ	I <sub>γ</sub>	I <sub>γf</sub>	I <sub>τυπ</sub>	I <sub>ασφ</sub>	S
		Volt		kW		A	A	A	A	mm <sup>2</sup>
	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΟΩΣΗΣ</b>									
1	Κύριοι Αεροσυμπιεστές	440	2	25,98	0,85	40,10	50,13	63	63	3*25
2	Αντλίες λαδιού λίπανσης Κ.Μ.	440	2	38,96	0,85	60,15	75,19	84	80	3*25
3	Διαχωριστήρες πετρελαίου	440	3	17,32	0,85	26,73	33,42	34	35	3*6
4	Αντλία Μετάγγισης Πετρελαίου Diesel	440	1	4,33	0,85	6,68	8,35	11	10	3*1.5
5	Αεροσυμπιεστές Εκκινήσεως	440	2	34,64	0,85	53,47	66,83	84	80	3*25
6	Αεροσυμπιεστής Αυτοματισμού	440	1	30,31	0,85	46,78	58,48	63	63	3*16
7	Αντλία Συμπυκνώματος	440	2	10,39	0,85	16,04	20,05	20	20	3*2.5
8	Κινητήρες Μηχανισμού Πηδαλίου	440	2	30,31	0,85	46,78	58,48	63	63	3*16
9	Μηχανισμοί περιστροφής άξονα	440	2	8,66	0,85	13,37	16,71	20	20	3*2.5
10	Ανεμιστήρας Προσαγωγής Αέρα Λέβητα	440	1	3,46	0,85	5,35	6,68	11	10	3*1.5
11	Αντλίες Κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων Κ.Μ.	440	2	30,31	0,85	46,78	58,48	63	63	3*16
12	Αντλίες τροφοδότησης καυσίμου	440	2	8,66	0,85	13,37	16,71	20	20	3*2.5
13	Θερμαντήρες καυσίμου	440	2	15,00	1	19,68	24,60	27	25	3*4
14	Αντλίες μετάγγισης βαρέως πετρελαιου	440	2	17,32	0,85	26,73	33,42	34	35	3*6
15	Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλ. Νερου	440	3	77,93	0,85	120,30	150,38	157	160	3*70
16	Αντλίες ψύξης βαλβίδων Κ.Μ.	440	2	21,65	0,85	33,42	41,77	47	50	3*10
17	Αντλίες τροφοδοτικού νερού λέβητα	440	2	6,93	0,85	10,69	13,37	14	16	3*1.5
18	Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	440	4	34,64	0,85	53,47	66,83	84	80	3*25
19	Διαχωριστήρας λαδιού λίπανσης	440	2	12,12	0,85	18,71	23,39	27	25	3*4

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ</b>										
1	Γερανογέφυρα	440	1	12,99	0,85	20,05	25,06	27	25	3*4
2	Τόρνος	440	1	4,33	0,85	6,68	8,35	11	10	3*1.5
3	Δράπανο	440	1	1,73	0,85	2,67	3,34	6	6	3*1.5
4	Συσκευή συγκολλήσεων	440	1	23,53	0,85	36,32	45,40	47	50	3*10
5	Μονάδα επεξεργασίας Αποβλήτων	440	2	21,18	0,85	32,69	40,86	47	50	3*10
6	Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	440	4	17,32	0,85	26,73	33,42	34	35	3*6
7	Εφεδρική παροχή	440	2	17,65	0,85	27,24	34,05	34	35	3*6
<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ</b>										
1	Αντλία κύτους	440	1	17,32	0,85	26,73	33,42	34	35	3*6
2	Αντλία πυρκαγιάς	440	1	38,96	0,85	60,15	75,19	84	80	3*25
3	Αντλίες γενικής χρήσης	440	2	43,29	0,85	66,83	83,54	84	80	3*25
4	Εργάτης άγκυρας	440	1	34,64	0,85	53,47	66,83	84	80	3*25
5	Εργάτες πρυμνησίων	440	2	43,29	0,85	66,83	83,54	84	80	3*25
6	Αντλία ποσίμου νερού	440	2	12,99	0,85	20,05	25,06	27	25	3*4
7	Αντλία κυκλ. ζεστού νερού	440	1	4,33	0,85	6,68	8,35	11	10	3*1.5
8	Αντλία πλυσίματος καταστρώματος	440	1	12,99	0,85	20,05	25,06	27	25	3*4
9	Κινητήρας καταπέλτη πρύμνης	440	1	17,32	0,85	26,73	33,42	34	35	3*6
10	Αντλίες υγιεινής	440	2	8,66	0,85	13,37	16,71	20	20	3*2.5
11	Υδραυλικές αντλίες πτερυγίων ευστάθειας	440	2	21,65	0,85	33,42	41,77	47	50	3*10
12	Βαρούλκα σωσίβιων λέμβων	440	4	17,32	0,85	26,73	33,42	34	35	3*6
13	Αντλία στεγανών θυρών	440	1	4,33	0,85	6,68	8,35	11	10	3*1.5
14	Αντλία πυρκαγιάς garage	440	4	25,98	0,85	40,10	50,13	63	63	3*25

<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΣΤΙΑΣΗΣ</b>										
1	Συμπιεστές κλιματισμού	440	2	34,64	0,85	53,47	66,83	84	80	3*25
2	Συμπιεστές ψυκτικής	440	2	8,66	0,85	13,37	16,71	20	20	3*2.5
3	Αντλίες γλυκού νερού κλιματισμού	440	2	17,32	0,85	26,73	33,42	34	35	3*6
4	Αντλίες θαλ. νερού κλιματισμού	440	2	12,99	0,85	20,05	25,06	27	25	3*4
5	Αντλία θαλ. νερού ψυκτικής	440	2	1,73	0,85	2,67	3,34	6	6	3*1.5
6	Αντλίες πόσιμου νερού	440	2	3,46	0,85	5,35	6,68	11	10	3*1.5
7	Αντλίες αποχέτευσης	440	2	8,66	0,85	13,37	16,71	20	20	3*2.5
8	Αντλίες θερμού νερού	115	2	2,60	0,85	26,57	33,21	34	35	2*6
9	Συμπιεστής παγωτομηχανής	115	1	1,30	0,85	13,29	16,61	20	20	2*2.5
10	Συμπιεστές διαφόρων ψυγείων	115	12	0,87	0,85	8,86	11,08	14	16	2*1.5
11	Ανεμιστήρες χώρων ενδιαίτησης	115	12	4,33	0,85	44,29	55,36	63	63	2*16
12	Διάφοροι ηλεκτροκινητήρες	440	7	8,66	0,85	13,37	16,71	20	20	3*2.5
13	Ανελκυστήρας	440	2	12,99	0,85	20,05	25,06	27	25	3*4
<b>ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ</b>										
1	Κουζίνα	440	2	30,00	1	39,36	39,36	47	50	3*10
2	Εστίες	440	2	20,00	1	26,24	26,24	34	35	3*6
3	Ανεμιστήρας προσαγωγής αέρα	440	1	5,20	0,85	8,02	10,03	14	10	3*1.5
4	Εξαεριστήρας	440	1	12,99	0,85	20,05	25,06	27	25	3*4
5	Πλυντήριο πιάτων	115	1	1,73	0,85	17,72	22,15	27	25	2*4
6	Διάφορες συσκευές	115	4	2,35	0,85	24,07	30,09	34	35	2*6
<b>ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ</b>										
1	Μηχανοστάσιο	115	1	22,00	1	110,45	110,45	126	125	2*50
2	Γέφυρα	115	1	15,00	1	75,31	75,31	84	80	2*25
3	Χώροι ενδιαίτησης	115	2	12,00	1	60,25	60,25	63	63	2*16
4	Καταστρώματος	115	2	9,00	1	45,18	45,18	47	50	2*10

	<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΝΑΥΣΙΠΛΟΙΑΣ</b>	<b>115</b>	<b>1</b>	<b>21,18</b>	<b>1</b>	<b>106,32</b>	<b>106,32</b>	<b>126</b>	<b>125</b>	<b>2*50</b>
	<b>ΕΦΕΔΡΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ</b>	<b>440</b>	<b>1</b>	<b>17,65</b>	<b>1</b>	<b>23,16</b>	<b>28,95</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>3*6</b>

Πίνακας 6.5 : Υπολογισμός διατομών καλωδίων με βάση την ένταση του ρεύματος κάθε παροχής.

Γενικά η πτώση τάσης στο καλώδιο της κάθε γραμμής μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

- Για μονοφασική παροχή:  $\Delta V[V] = \frac{2 * \ell * \rho * I_{\gamma}}{S}$  (Σχέση 6.16)

- Για τριφασική παροχή:  $\Delta V[V] = \frac{\sqrt{3} * \ell * \rho * I_{\gamma}}{S}$  (Σχέση 6.17)

Όπου ( S ) η διατομή του αγωγού, (  $\ell$  ) το μήκος του αγωγού, (  $\rho$  ) η ειδική αντίσταση, και (  $I_{\gamma}$  ) το ρεύμα γραμμής του καλωδίου.

Σημειώνεται πως η επιτρεπόμενη πτώση τάσης ενός αγωγού θα πρέπει να είναι ίση με 6% της αντίστοιχης ονομαστικής. Στην περίπτωση που αυτή η συνθήκη δεν ικανοποιείται, πρέπει να αναπροσαρμοστεί το μέγεθος της διατομής του αγωγού. Γι' αυτό, είναι απαραίτητο να συμπεριληφθεί στην μελέτη και ο έλεγχος της πτώσης τάσης των καλωδίων που έχουν επιλεγεί.

Επομένως στον ακόλουθο πίνακα 6.6 γίνεται ενδεικτικά ο υπολογισμός της πτώσης τάσης στις γραμμές 11 καταναλώσεων, όπου είναι γνωστές οι αποστάσεις των καλωδίων τους από το μηχανοστάσιο. Σε κανονικές πλήρεις μελέτες εξετάζεται αυστηρά η πτώση τάσης σε όλες τις γραμμές του δικτύου του πλοίου, με τον ίδιο τρόπο που παρουσιάζεται και παρακάτω.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

	ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ	V	I <sub>γ</sub>	S	ℓ	Πτώση Τάσεως ΔV	Μέγ. Επιτρ. Πτώση Τάσεως ΔV <sub>max</sub>
		Volt	A	mm <sup>2</sup>	m	Volt	Volt
	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΠΡΩΣΗΣ</b>						
1	Κύριοι Αεροσυμπιεστές	440	40,10	10	45	5,50	26,4
5	Αεροσυμπιεστές Εκκινήσεως	440	53,47	25	35	2,28	26,4
8	Αεροσυμπιεστής Αυτοματισμού	440	46,78	16	30	2,67	26,4
11	Αντλίες Κυκλοφορίας νερού ψύξης κυλίνδρων Κ.Μ.	440	46,78	16	30	2,67	26,4
15	Κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλ. Νερού	440	120,30	70	40	2,09	26,4
18	Ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα μηχανοστασίου	440	53,47	25	50	3,26	26,4
	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΣΚΑΦΟΥΣ</b>						
3	Αντλίες γενικής χρήσης	440	66,83	25	55	4,48	26,4
4	Εργάτης άγκυρας	440	53,47	25	110	7,17	26,4
5	Εργάτες πρυμνησίων	440	66,83	25	150	12,22	26,4
	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΧΩΡΩΝ ΕΣΤΙΑΣΗΣ</b>						
1	Συμπιεστές κλιματισμού	440	53,47	16	45	4,58	26,4
	<b>ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ</b>						
2	Γέφυρα	115	75,31	25	60	5,51	6,9

Πίνακας 6.6 : Ενδεικτικός υπολογισμός πτώσης τάσης σε καταναλώσεις για τις οποίες είναι γνωστό το μήκος του καλωδίου παροχής.



Καθώς όλες οι καταναλώσεις είναι τριφασικές, στη συγκεκριμένη περίπτωση λόγω της παραπάνω παραδοχής, τα αποτελέσματα προέκυψαν μέσα από την εφαρμογή της σχέσης 6.17. Έτσι παρατηρείται πως όλες οι εξεταζόμενες περιπτώσεις ικανοποιούν το κριτήριο της μέγιστης επιτρεπόμενης πτώσης τάσης. Άρα οι διατομές που επιλέχθηκαν στον πίνακα 6.4 είναι οι βέλτιστες δυνατές.

Επομένως για να προσδιοριστούν στη συνέχεια οι διατομές των ζυγών των πινάκων των διαφόρων καταναλωτών χρειάζεται να ληφθούν υπόψη οι συνολικές τιμές της μέγιστης φαινόμενης ισχύος όλων των πινάκων του πλοίου ξεχωριστά, όπως αυτές έχουν ήδη προκύψει από τον πίνακα 6.4. Έπειτα πρέπει να προσδιοριστεί το μέγιστο ρεύμα γραμμής  $I_{max}[A]$  τροφοδοσίας παροχής κάθε πίνακα, ώστε να επιλέγουν τελικά οι κατάλληλες διατομές.

Το μέγιστο αυτό ρεύμα υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{max}[A] = \frac{S}{\sqrt{3} * V} \quad (\text{Σχέση 6.18})$$

Όπου (S [kW] ) είναι μέγιστη φαινόμενη ισχύς κάθε πίνακα και ( V [Volt] ) είναι η αντίστοιχη τάση της γραμμής του πίνακα.

Τα παραπάνω στοιχεία φαίνονται συγκεντρωμένα στον ακόλουθο πίνακα 6.7.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΩΝ	ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ 6.3	ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΠΟΡΕΙΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ	ΧΕΙΡΙΣΜΟΙ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ	ΕΝ ΟΡΜΩ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΙΣΥΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ (+10%)	ΡΕΥΜΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ
		kVa	kVa	kVa	kVa	kVa	A
1	2	3	4	5	6	7	8
ΖΥΓΟΙ 115V							
ΠΙΝΑΚΕΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ	1, 2, 3, 4	53,74	53,74	72,80	72,80	80,08	402,04
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ	5, 6	5,67	2,48	3,20	5,67	6,24	31,31
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΕΣΤΙΑΣΗΣ	8, 9, 10, 11	69,27	69,27	69,27	69,27	76,20	382,54
ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΝΑΥΣΙΠΛΟΙΑΣ		18,91	18,91	9,99	18,91	20,80	104,43
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ 115 V (=μετασχηματιστής 440 / 115 V)		147,59	144,40	155,26	155,26	170,79	857,42
ΖΥΓΟΙ 440V							
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΩΣΗΣ	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19	449,59	476,19	72,99	476,19	523,81	687,32

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΣΤΑΣΙΟΥ	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	37,31	24,63	25,71	37,31	41,04	53,85
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΣΚΑΦΟΥΣ	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14	45,06	26,14	65,44	65,44	71,98	94,45
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΕΣΤΙΑΣΗΣ	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 13	171,93	161,11	184,30	184,30	202,73	266,01
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΜΑΓΕΙΡΕΙΟΥ	1, 2, 3, 4	62,20	35,89	35,89	62,20	68,42	89,78
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ 440V /115 V (από χαμηλή τάση 115 V)		43,94	42,85	39,79			
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ 440 V		<b>810,03</b>	<b>766,81</b>	<b>424,12</b>	<b>810,03</b>	<b>891,03</b>	<b>1169,18</b>

Πίνακας 6.7 : Υπολογισμός μεγίστης φαινόμενης ισχύος πινάκων και ρεύματος γραμμής τριφασικής παροχής προς εύρεση διατομών καλωδίων.

Από τα στοιχεία του πίνακα 6.7 και με βάση τα κατασκευαστικά πρότυπα της ABB, στον ακόλουθο πίνακα 6.8 παρουσιάζονται αναλυτικά οι διατομές των κύριων ζυγών της εγκατάστασης.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Είδος πίνακα	Ρεύμα τριφασικής γραμμής (A)	Διατομή καλωδίου παροχής (mm <sup>2</sup> )	Κύριος Ζυγός πίνακα (mm <sup>2</sup> )	Ασφαλιστική διάταξη
<b>Επίπεδο τάσης 115 V</b>				
<b>Κεντρική μπάρα</b>	<b>857,42</b>	<b>2x (1*150) ανά φάση</b>	<b>500</b>	<b>Αυτόματος διακόπτης 880 A</b>
<b>Συσκευών μαγειρείου</b>	<b>31,31</b>	<b>3 * 6</b>	<b>100</b>	<b>Αυτόματος διακόπτης 40 A</b>
<b>Βοηθητικών χώρων εστίασης</b>	<b>382,54</b>	<b>1x (1*185) ανά φάση</b>	<b>300</b>	<b>Αυτόματος διακόπτης 400 A</b>
<b>Οργάνων ναυσιπλοΐας</b>	<b>104,43</b>	<b>3*50</b>	<b>100</b>	<b>Ασφάλεια 125 A + αποξεύκτης 160 A</b>
<b>Φωτισμού ανάγκης</b>	<b>50,20</b>	<b>3*16</b>	<b>100</b>	<b>Ασφάλεια 50 A + αποξεύκτης 63 A</b>
<b>Επίπεδο τάσης 440 V</b>				
<b>Κεντρική μπάρα</b>	<b>1169.18 A από φορτία 1544 A / 1640 A από γεννήτριες =&gt; 1600 A</b>	<b>3x (1*300) ανά φάση</b>	<b>1000</b>	
<b>Βοηθητικών πρόωσης</b>	<b>687,32</b>	<b>2x (1*120) ανά φάση</b>	<b>400</b>	<b>Αυτόματος διακόπτης 630 A</b>
<b>Βοηθητικών μηχανοστασίου</b>	<b>53,85</b>	<b>(1*4) ανά φάση</b>	<b>100</b>	<b>Αυτόματος διακόπτης 60 A</b>
<b>Βοηθητικών σκάφους</b>	<b>94,45</b>	<b>(1*25) ανά φάση</b>	<b>100</b>	<b>Αυτόματος διακόπτης 125 A</b>
<b>Βοηθητικών χώρων ενδιάιτησης</b>	<b>266,01</b>	<b>(1*70) ανά φάση</b>	<b>200</b>	<b>Αυτόματος διακόπτης 250 A (ρύθμιση στα 225 A)</b>
<b>Συσκευών μαγειρείου</b>	<b>89,78</b>	<b>(1*10) ανά φάση</b>	<b>100</b>	<b>Αυτόματος διακόπτης 100 A</b>
<b>Μετασχηματιστής 440/115 V</b>	<b>165,28</b>	<b>(1*70) ανά φάση</b>	<b>100</b>	<b>Αυτόματος διακόπτης 250 A (ρύθμιση στα 225 A)</b>

Πίνακας 6.8 : Υπολογισμός διατομών καλωδίων παροχής και ζυγών πινάκων.

Τα αποτελέσματα που γράφονται στους παραπάνω πίνακες υπολογισμών έχουν προσδιοριστεί μέσω του προγράμματος Matlab και οι κώδικες που διαμορφώθηκαν για να επιτευχθεί αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα 2 της τρέχουσας εργασίας.

Τέλος, απαραίτητος είναι ακόμα και ο υπολογισμός των μέγιστων ρευμάτων που περνάνε από τους κύριους ζυγούς των πινάκων, ο οποίος επιτυγχάνεται μέσα από την ακόλουθη μελέτη των βραχυκυκλωμάτων. Όπως έχει αναλυθεί και στο κεφάλαιο 5, η μελέτη των βραχυκυκλωμάτων πραγματοποιείται προσεγγιστικά και περιλαμβάνει τους ακόλουθους βασικούς υπολογισμούς.

Αρχικά τη χρονική στιγμή πριν την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος ( $t < 0$ ) θα ισχύει:

- Οι γεννήτριες είναι φορτισμένες στο 75% της ονομαστικής τους ισχύος με επαγωγικό συντελεστή ισχύος (τη χειρότερη τιμή από τον ισολογισμό). Οπότε το αρχικό ρεύμα τους θα ισούται με:

$$\tilde{I}_{G-0}[A] = \frac{0.75 * P_{ov.G}[kW]}{\sqrt{3} * V_{0-πολ.}[kV] * \cos\phi_G} \quad (\text{Σχέση 6.19})$$

- Οι κινητήρες που είναι μεγαλύτεροι από 50kW αντιμετωπίζονται ξεχωριστά, ενώ όλοι οι υπόλοιποι λαμβάνονται ως ένας ομαδοποιημένος κινητήρας. Το ρεύμα τους υπολογίζεται, ενώ είναι φορτισμένοι με βάση τη χειρότερη κατάσταση από πλευράς ισολογισμού, με τον αντίστοιχο επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Έτσι ισχύει πώς:

$$\tilde{I}_{M-0}[A] = \frac{P_{ov.M}[kW]}{\sqrt{3} * V_{0-πολ.}[kV] * \cos\phi_M} \quad (\text{Σχέση 6.20})$$

- Όλα τα ωμικά φορτία δεν συμπεριλαμβάνονται στη μελέτη των βραχυκυκλωμάτων.

Έπειτα από την χρονική στιγμή εκδήλωσης του βραχυκυκλώματος ( $0^- < t < 0^+$ ) θα ισχύει:

- Η αρχική τάση όλων των μηχανών και των ακροδεκτών των γεννητριών θα είναι η αντίστοιχη ονομαστική τάση του δικτύου:

$$\hat{V}_{G-0} = \hat{V}_{M-0} = \hat{V}_0 = \frac{V_{0-πολ.} \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \quad [V] \quad (\text{Σχέση 6.21})$$

- Για τις ΗΕΔ των γεννητριών ειδικά η τάση προκύπτει ως εξής:

$$\hat{E}_G'' = \hat{V}_{G-0} + \hat{I}_{G-0} * (R_G + jX_{d-G}'') \quad (\text{Σχέση 6.22})$$

Όπου  $(\hat{E}_G'')$  είναι η ισοδύναμη τάση διέγερσης της γεννήτριας στην αρχή του βραχυκυκλώματος,  $(R_G)$  είναι η ισοδύναμη αντίσταση και  $(X_{d-G}'')$  είναι η υπομεταβατική αντίδραση της γεννήτριας.

- Για τις ΗΕΔ των κινητήρων από την άλλη ισχύει πώς:

$$\hat{E}_M'' = \hat{V}_{M-0} + \hat{I}_{M-0} * (R_M + jX_{d-M}'') \quad (\text{Σχέση 6.23})$$

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Όπου  $(\hat{E}_M'')$  είναι η ισοδύναμη τάση διέγερσης του κινητήρα κατά την έναρξη του βραχυκυκλώματος,  $(R_M)$  είναι η ισοδύναμη αντίσταση και  $(X_{d-M}'')$  είναι η υπομεταβατική αντίδραση του κινητήρα.

Τέλος για τη χρονική περίοδο μετά την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος ( $t > 0$ ) θα αξιοποιηθούν οι ακόλουθες σχέσεις:

- Για τις γεννήτριες θα ισχύει ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ίσο με:

$$\hat{I}_{SC-G} = \frac{\hat{E}_G''}{R_G + jX_{d-G}''} \quad (\text{Σχέση 6.24})$$

- Για τους κινητήρες ομοίως το ρεύμα βραχυκυκλώσει προκύπτει:

$$\hat{I}_{SC-M} = \frac{\hat{E}_M''}{R_M + jX_{d-M}''} \quad (\text{Σχέση 6.25})$$

Έτσι το τελικό ρεύμα βραχυκύκλωσης θα ισούται με:  $I_{SC} = \sum \hat{I}_{SC-M} + \sum \hat{I}_{SC-G}$  (Σχέση 6.26)

Ενώ το αντίστοιχο κρουστικό ρεύμα θα είναι ίσο με:  $I_{SC} = 2 * \sqrt{2} * |\hat{I}_{SC}|$  (Σχέση 6.27)

Η μελέτη αυτή χαρακτηρίζεται ως προσεγγιστική και χονδρική, καθώς δεν εξετάζει λεπτομερώς τον ισολογισμό του πλοίου για όλες τις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας και περιέχει αρκετές απλοποιήσεις στη διαδικασία των υπολογισμών. Έτσι για την εκτίμηση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης του συγκεκριμένου πλοίου που παρουσιάζεται θα προκύψουν τα ακόλουθα αποτελέσματα σύμφωνα με τους παραπάνω τύπους.

Πριν την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος ( $t < 0$ )

- Οι γεννήτριες είναι φορτισμένες στο 75% της ονομαστικής ισχύς με επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0,87 (τυπική τιμή), οπότε το αντίστοιχο αρχικό ρεύμα για την κάθε γεννήτρια ξεχωριστά, με βάση τη σχέση 6.19, είναι ίσο με:

$$\tilde{I}_{G-0} = \frac{0,75 * 500}{\sqrt{3} * 0,440 * 0,87} = 565,59 \text{ A} \Rightarrow \tilde{I}_{G-0} = 565,59 \angle^{-29,54^\circ} \text{ A}$$

- Τα ωμικά φορτία του πλοίου, όπως είναι ο θερμαντήρας καυσίμου, οι κουζίνες, οι εστίες και ο φωτισμός δεν συμμετέχουν στη μελέτη των βραχυκυκλωμάτων.
- Οι κινητήρες που είναι μεγαλύτεροι των 50 kW είναι ουσιαστικά μόνο οι δύο κύριες αντλίες κυκλοφορίας θαλασσινού νερού (77,93 kW καθεμία – πλήθος 3). Ενώ οι υπόλοιποι που είναι μικρότεροι των 50 kW, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, της τάσης των 440V και της τάσης των 115V. Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες υπολογισμών, από πλευράς κινητήρων η χειρότερη φόρτιση εμφανίζεται στην κατάσταση χειρισμών, όπου η ισχύς των κύριων αντλιών κυκλοφορίας θαλασσινού νερού είναι 132,48 kW, η ισχύς του ισοδύναμου κινητήρα στα 440 V είναι 436,55 kW, η ισχύς του ισοδύναμου κινητήρα στα 115 V είναι 62,05 kW. Σημειώνεται φυσικά ότι σε μια πραγματική μελέτη θα γινόταν η μελέτη βραχυκύκλωσης για όλες τις καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου.

- Για την ισοδύναμη κύρια αντλία κυκλοφορίας θαλασσινού νερού με ονομαστικό συντελεστή ισχύος 0,85 προκύπτει ότι:

$$\tilde{I}_{M-0} = \frac{132,48}{\sqrt{3} * 0,440 * 0,85} = 204,51 \text{ A} \Rightarrow \tilde{I}_{M1-0} = 204,51 \angle^{-21,79^\circ} \text{ A}$$

- Για όλους υπόλοιπους κινητήρες τάσης 440 V συνολικής ισχύος 436,55 kW με ονομαστικό συντελεστή ισχύος 0,85 προκύπτει ότι:

$$\tilde{I}_{M2-0} = \frac{436,55}{\sqrt{3} \cdot 0,440 \cdot 0,85} = 673,9 \text{ A} \Rightarrow \tilde{I}_{M2-0} = 673,9 \angle^{-21,79^\circ} \text{ A}$$

- Για τους κινητήρες τάσης 115 V συνολικής ισχύος 62,05 kW με ονομαστικό συντελεστή ισχύος 0,85 και με αναγωγή στην τάση των 440 V προκύπτει ότι :

$$\tilde{I}_{M3-0} = \frac{62,05}{\sqrt{3} \cdot 0,440 \cdot 0,85} = 95,79 \text{ A} \Rightarrow \tilde{I}_{M3-0} = 95,79 \angle^{-21,79^\circ} \text{ A}$$

Μόλις εκδηλωθεί το βραχυκύκλωμα ( $0^- < t < 0^+$ ) πάνω στον κύριο ζυγό των 440 V έχουμε ότι:

- Θεωρείται ότι η αρχική τάση στους ακροδέκτες των μηχανών και των γεννητριών είναι η ονομαστική τάση του δικτύου (με αναγωγή στο σύστημα τάσης 440 V), δηλαδή:

$$\hat{V}_{G-0} = \hat{V}_{M-0} = \hat{V}_{M2-0} = \hat{V}_{M3-0} = \hat{V}_0 = 440 \angle^{0^\circ} \text{ V}$$

- Τα τυπικά χαρακτηριστικά της κάθε γεννήτριας είναι  $R_G = 0,00005 \text{ p.u.}$  και  $X''_{d,G} = 0,10 \text{ p.u.}$  Οπότε σε πραγματικές τιμές είναι:

$$Z_G [\Omega] = \frac{V_{0-\pi\omega\lambda}^2}{S_{ov-G}} * Z_G [p.u.] \Rightarrow Z_G [\Omega] = \frac{440^2}{625.000} * Z_G [p.u.] = 0,30976 * Z_G [p.u.]$$

$$\Rightarrow R_G = 0,30976 * 0,00005 = 0,000015488 \Omega \ \& \ X''_{d-G} = 0,30976 * 0,10 = 0,030976 \Omega$$

Όπου  $Z_G$  είναι η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση βάσης γεννήτριας σε  $\Omega$ ,  $S_{ov-G}$  η φαινόμενη ισχύς της γεννήτριας ίση  $P_{ov-G} / \cos \phi_{ov-G}$ , με  $P_{ov-G}$  ίση με 500 kW και  $\cos \phi_{ov-G} = 0,80$  (τυπική ονομαστική τιμή για γεννήτρια).

Έτσι για κάθε μία από τις γεννήτριες ισχύει ότι:

$$\hat{E}_G'' = \frac{440 \angle^{0^\circ}}{\sqrt{3}} + 565,59 \angle^{-29,54^\circ} * (0,000015488 + j0,030976) \Rightarrow$$

$$\hat{E}_G'' = \frac{440 \angle^{0^\circ}}{\sqrt{3}} + 565,59 \angle^{-29,54^\circ} * 0,030976004 \angle^{89,71^\circ} \Rightarrow$$

$$\hat{E}_G'' = \frac{440 \angle^{0^\circ}}{\sqrt{3}} + 17,520 \angle^{60,17^\circ} = 262,7490 + j15,1987 \Rightarrow \hat{E}_G'' = 263,188 \angle^{3,31^\circ} \text{ V}$$

- Για την ισοδύναμη κύρια αντλία κυκλοφορίας θαλασσινού νερού οι τυπικές τιμές είναι του μικρού κινητήρα (<100 kW) -αφού καθεμία είναι μικρότερη των 100 kW-, δηλαδή  $R_M = 0,07 \text{ p.u.}$  και  $X''_{d,M} = 0,188 \text{ p.u.}$ , οπότε:

$$Z_M [\Omega] = \frac{V_{0-\pi\omega\lambda}^2}{S_{ov-M1}} * Z_{M1} [p.u.] \Rightarrow Z_M [\Omega] = \frac{440^2}{155860} * Z_M [p.u.] = 1,24214 * Z_M [p.u.]$$

$$\Rightarrow R_M = 1,24214 * 0,07 = 0,08695 \Omega \ \& \ X''_{d-M} = 1,24214 * 0,188 = 0,23352 \Omega$$

Όπου  $Z_M$  είναι η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση βάσης κινητήρα σε  $\Omega$ ,  $S_{ov-M}$  η φαινόμενη ισχύς του κινητήρα ίση  $P_{ov-M} / \cos \phi_{ov-M}$ , με  $P_{ov-M}$  ίση με 132,48 kW και  $\cos \phi_{ov-M} = 0,85$  (τυπική ονομαστική τιμή κινητήρα).

Άρα λαμβάνοντας υπόψη ότι λειτουργούν δύο κινητήρες η ισοδύναμη τάση διέγερσης είναι:

$$\hat{E}_M'' = \frac{440 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 204,51 \angle -21,79^\circ * (0,08695 + j0,23352) \Rightarrow$$

$$\hat{E}_M'' = \frac{440 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 204,51 \angle -21,79^\circ * 0,24918 \angle 69,58^\circ \Rightarrow$$

$$\hat{E}_M'' = \frac{440 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 50,9598 \angle 47,79^\circ = 219,797 - j37,745 \Rightarrow \hat{E}_M'' = 223,013 \angle -9,74^\circ \text{ V}$$

- Για τον ισοδύναμο κινητήρα των μικρότερων κινητήρων των 50 kW στα 440 V συνολικής ισχύος 436,55 kW οι τυπικές τιμές είναι του μικρού κινητήρα (<100 kW), δηλαδή  $R_M = 0,07 \text{ p.u.}$  και  $X_{d,M}'' = 0,188 \text{ p.u.}$ , οπότε:

$$Z_{M2}[\Omega] = \frac{V_{0-\pi 0 \lambda}^2}{S_{ov-M2}} * Z_{M2}[p.u.] \Rightarrow Z_{M2}[\Omega] = \frac{440^2}{513.588,23} * Z_{M2}[p.u.] = 0,37695 * Z_{M2}[p.u.]$$

$$\Rightarrow R_{M2} = 0,37695 * 0,07 = 0,02639 \Omega \text{ \& } X_{d-M2}'' = 0,37695 * 0,188 = 0,07086 \Omega$$

Όπου  $Z_{M2}$  είναι η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση βάσης κινητήρα σε  $\Omega$ ,  $S_{ov-M2}$  η φαινόμενη ισχύς του κινητήρα ίση  $P_{ov-M2} / \cos \phi_{ov-M2}$ , με  $P_{ov-M2}$  ίση με 412,30 kW και  $\cos \phi_{ov-M2} = 0,85$  (τυπική ονομαστική τιμή κινητήρα).

Άρα η ισοδύναμη τάση διέγερσης είναι:

$$\hat{E}_{M2}'' = \frac{440 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 673,9 \angle -21,79^\circ * (0,02639 + j0,07086) \Rightarrow$$

$$\hat{E}_{M2}'' = \frac{440 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 673,9 \angle -21,79^\circ * 0,0756 \angle 69,57^\circ \Rightarrow$$

$$\hat{E}_{M2}'' = \frac{440 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 50,9468 \angle 47,78^\circ = 219,799 - j37,7297 \Rightarrow \hat{E}_{M2}'' = 223,014 \angle -9,74^\circ \text{ V}$$

- Για τον ισοδύναμο κινητήρα των μικρότερων κινητήρων των 50 kW στα 115V συνολικής ισχύος 62,05 kW οι τυπικές τιμές είναι του μικρού κινητήρα (<100 kW), δηλαδή  $R_M = 0,07 \text{ p.u.}$  και  $X_{d,M}'' = 0,188 \text{ p.u.}$ , οπότε ανηγμένα στο επίπεδο τάσης των 440 V:

$$Z_{M3}[\Omega] = \frac{V_{0-\pi 0 \lambda}^2}{S_{ov-M3}} * Z_{M3}[p.u.] \Rightarrow Z_{M3}[\Omega] = \frac{440^2}{76.529,4} * Z_{M3}[p.u.] = 2,52975 * Z_{M3}[p.u.]$$

$$\Rightarrow R_{M3} = 2,52975 * 0,07 = 0,17708 \Omega \text{ \& } X_{d-M3}'' = 2,52975 * 0,188 = 0,47559 \Omega$$

Όπου  $Z_{M3}$  είναι η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση βάσης κινητήρα σε  $\Omega$ ,  $S_{ov-M3}$  η φαινόμενη ισχύς του κινητήρα ίση  $P_{ov-M3} / \cos \phi_{ov-M3}$ , με  $P_{ov-M3}$  ίση με 62,05 kW και  $\cos \phi_{ov-M3} = 0,85$  (τυπική ονομαστική τιμή κινητήρα).

Πέρα όμως αυτής της σύνθετης αντίστασης υπάρχει και η αντίστοιχη αντίσταση του μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης, ο οποίος έχει τα εξής ονομαστικά στοιχεία: 160 kVA,



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.  
440/115 V, 60 Hz, ονομαστική τάση βραχυκύκλωσης 4%, απώλειες χαλκού υπό ονομαστικό ρεύμα ίσες 2350 Watt.

Οπότε η ισοδύναμη ωμική και αντίσταση ανηγμένη στα 440 V του μετασχηματιστή υπολογίζεται ως εξής:

$$S_{ov-M/\Sigma} [\text{VA}] = \sqrt{3} * V_{0-πολ} * I_{ov} \Rightarrow I_{ov} [\text{A}] = \frac{S_{ov-M/\Sigma}}{\sqrt{3} * V_{0-πολ}} \Rightarrow I_{ov} = \frac{160.000}{\sqrt{3} * 440} = 209,95 \text{ A}$$

$$R_{M/\Sigma(440V)} [\Omega] = \frac{P_{απωλειών} [\text{W}]}{3 * I_{ov}^2} = \frac{2350}{3 * 209,95^2} = 0,017772 \Omega$$

Όπου  $V_{0-πολ}$  είναι η ισοδύναμη πολική τάση των 440 V,  $S_{ov-M/\Sigma}$  η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του μετασχηματιστή ίση με 160 kVA,  $I_{ov}$  το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή (στην παρούσα περίπτωση στην πλευρά των 440 V),  $R_{M/\Sigma_{440V}}$  η ισοδύναμη ωμική αντίσταση ανηγμένη στα 440 V,  $P_{απωλειών_{Cu}}$  οι ισοδύναμες απώλειες χαλκού του μετασχηματιστή.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση του M/Σ ανηγμένη στα 440 V ως

$$\text{εξής: } Z_{M/\Sigma} [\Omega] = \frac{V_{0-πολ}^2}{S_{ov-M/\Sigma}} * Z_{M/\Sigma} [p.u.] \Rightarrow Z_{M/\Sigma(440V)} = \frac{440^2}{160.000} * Z_{M/\Sigma} [p.u.] = 1,21 * Z_{M/\Sigma} [p.u.]$$

$$\Rightarrow Z_{M/\Sigma \beta\rho\alpha\chi.-(440V)} = 1,21 * Z_{M/\Sigma\beta\rho\alpha\chi.} = 1,21 * 0,04 = 0,0484 \Omega$$

$$\Rightarrow X_{\frac{M}{\Sigma(440V)}} = \sqrt{Z_{M/\Sigma\beta\rho\alpha\chi.-(440V)}^2 - R_{M/\Sigma(440V)}^2} \Rightarrow X_{M/\Sigma(440V)} = \sqrt{0,0484^2 - 0,017772^2}$$

$$\Rightarrow X_{M/\Sigma(440V)} = 0,04502 \Omega$$

Όπου  $Z_{M/\Sigma}$  είναι η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση βάσης μετασχηματιστή σε  $\Omega$ ,  $S_{ov-M/\Sigma}$  η φαινόμενη ισχύς του μετασχηματιστή ίση με 160 kVA,  $X_{M/\Sigma_{440V}}$  η αντίστοιχη ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση ανηγμένη στα 440 V,  $Z_{M/\Sigma-\beta\rho\alpha\chi.-440V}$  η αντίστοιχη ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση ανηγμένη στα 440 V.

Ο συγκεκριμένος μετασχηματιστής τροφοδοτεί τον ισοδύναμο κινητήρα, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα, οπότε οι συνολικές αντιστάσεις είναι οι εξής:

$$R_{M3-total} = R_{M3} + R_{M/\Sigma(440V)} = 0,17708 + 0,017772 = 0,19485 \Omega$$

$$X_{M3-total} = X_{M3} + X_{M/\Sigma(440V)} = 0,47559 + 0,04502 = 0,52061 \Omega$$

Άρα η ισοδύναμη τάση διέγερσης είναι:

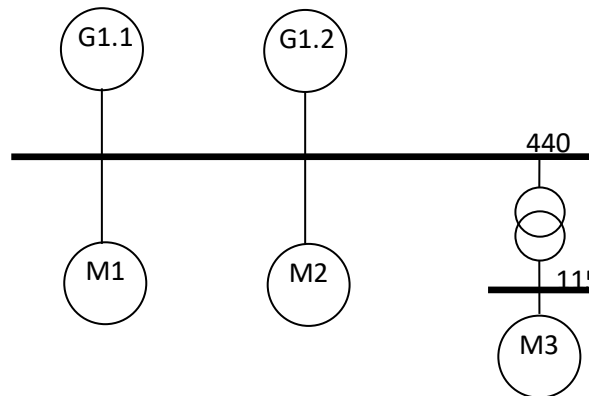
$$\hat{E}_{M3}'' = \frac{440 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 95,79 \angle -21,79^\circ * (0,19485 + j0,52061) \Rightarrow$$

$$\hat{E}_{M3}'' = \frac{440 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 95,79 \angle -21,79^\circ * 0,55588 \angle 69,48^\circ \Rightarrow$$

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

$$\hat{E}_{M3}'' = \frac{440 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 53,248 \angle 47,69^\circ = 218,1906 - j39,3776 \Rightarrow \hat{E}_{M2}'' = 221,715 \angle -10,23^\circ \text{ V}$$

Επισημαίνουμε ότι το βραχυκύκλωμα γίνεται στο ζυγό των 440 V.



Εικόνα 6.30 : Σκαρίφημα ισοδύναμου δικτύου του υπό μελέτη ντιζελοκίνητου πλοίου, όπου G1.1 , G1.2 οι γεννήτριες του πλοίου, M1 η ισοδύναμη των δύο κύριων αντλιών θαλασσινού νερού (μεγαλύτερη η καθεμία των 50 kW), M2 ο ισοδύναμος κινητήρας όλων των υπολοίπων κινητήρων των 440 V, M3 ο ισοδύναμος κινητήρας όλων των κινητήρων των 115 V.

Μετά την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος ( $t > 0^+$ ) στο ζυγό των 440 V:

- Για τις γεννήτριες ισχύει ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ίσο με βάση τη σχέση 6.24:

$$\hat{I}_{SC-G} = \frac{\hat{E}_G''}{R_G + jX_{d-G}''} = \frac{263,188 \angle 3,31^\circ}{0,000015488 + j0,030976} = 8.496,51 \angle -86,40^\circ \text{ A}$$

- Για την ισοδύναμη κύρια αντλία θαλασσινού νερού (M1), δεδομένου ότι λειτουργούν δύο, ισχύει ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ίσο με βάση τη σχέση 6.25:

$$\hat{I}_{SC-M1} = 2 * \frac{\hat{E}_{M1}''}{R_{M1} + jX_{d-M1}''} = 2 * \frac{223,013 \angle -9,74^\circ}{0,08695 + j0,23352} = 2 * 894,987 \angle -79,01^\circ = 1789,97 \angle -79,01^\circ \text{ A}$$

- Για τον ισοδύναμο κινητήρα των υπολοίπων κινητήρων των 440 V ισχύει ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ίσο με βάση τη σχέση 6.25:

$$\hat{I}_{SC-M2} = \frac{\hat{E}_{M2}''}{R_{M2} + jX_{d-M2}''} = \frac{223,014 \angle -9,74^\circ}{0,02639 + j0,07086} = 2.949,92 \angle -79,01^\circ \text{ A}$$

- Για τον ισοδύναμο κινητήρα των κινητήρων των 115 V ανηγμένα στο ζυγό των 440 V ισχύει ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ίσο με βάση τη σχέση 6.25:

$$\hat{I}_{SC-M3} = \frac{\hat{E}_{M3}''}{R_{M3} + jX_{d-M3}''} = \frac{221,715 \angle -10,23^\circ}{0,19485 + j0,52061} = 398,85 \angle -79,71^\circ \text{ A}$$

- Το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ίσο με βάση τη σχέση 6.26:

$$\hat{I}_{SC} = \sum \hat{I}_{SC-M} + \sum \hat{I}_{SC-G} = 2 * 8.496,51 \angle -86,40^\circ + 1789,97 \angle -79,01^\circ + 2.949,92 \angle -79,01^\circ + 398,85 \angle -79,71^\circ$$

$$\Rightarrow \hat{I}_{SC} = 1.067,000 - j16.959,488 + 341,2357 - j1757,143 + 562.366 + j2.895,82 + 71,247 - j392,435$$

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

$$\Rightarrow \hat{I}_{SC} = 2041,849 - j22004,886 = 22099.4253 \angle -84,69^\circ \text{ A}$$

Το ρεύμα αυτό αναπτύσσεται σε όλους τους ζυγούς των 440 V θεωρώντας τις μεταξύ τους αντιστάσεις μηδενικές.

- Το δυσμενέστερο κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης στους ζυγούς των 440 V προκύπτει μέσω της σχέσης 6.27:

$$I_{SCD} = 2 * \sqrt{2} * |\hat{I}_{SC}| = 2 * \sqrt{2} * 22099.4253 = \mathbf{62,507 \text{ kA}}$$

## 6.8 Ανάλυση ηλεκτρολογικής εγκατάστασης λιμανιού για διάφορες καταστάσεις ελλιμενισμού

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και παραπάνω, η παρούσα εργασία παρουσιάζει την ηλεκτρομηχανική περιγραφή και τις τεχνικές προδιαγραφές του έργου της ηλεκτρικής διασύνδεσης ενός λιμένα και των ελλιμενιζόμενων σε αυτόν πλοίων, μέσω της απαίτησης ψυχρής εκκίνησης. Η μέθοδος αυτή φαίνεται να είναι η πιο οικονομικοτεχνικά συμφέρουσα λύση για όλα τα εμπλεκόμενα μέρη (Αρχή διαχείρισης λιμένα, πλοία, τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο κοκ). Έτσι στη συνέχεια αναλύεται ένα τυπικό παράδειγμα ενεργειακού ισολογισμού ενός λιμανιού. Επιπλέον παρουσιάζεται και η ανάλυση διαφόρων καταστάσεων ελλιμενισμού πλοίων, έτσι ώστε να προκύψουν τελικά οι ενεργειακές απαιτήσεις και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, τόσο του εξοπλισμού του πλοίου, όσο και του δικτύου ξηράς, που θα το τροφοδοτήσει.

Γενικά, η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να προσφέρει ένα δίκτυο δεν είναι άπειρη. Αυτό σημαίνει πως το δίκτυο παροχής ενέργειάς του λιμανιού μπορεί να τροφοδοτεί μέχρι ένα συγκεκριμένο αριθμό πλοίων, εφόσον αυτά πληρούν τα απαραίτητα κριτήρια.

Τα κριτήρια αυτά σχετίζονται με τις διαστάσεις του πλοίου, τα φορτία που κουβαλάει καθώς και τις ενεργειακές του απαιτήσεις. Για παράδειγμα δεν μπορεί ένα μεγάλο φορτηγό πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων να ελλιμενιστεί σε ένα απλό μικρό σχετικά τουριστικό νησί. Αρχικά το λιμάνι του νησιού δεν διαθέτει τον απαραίτητο χώρο και εξοπλισμό, ώστε να εξυπηρετήσει κατάλληλα τις διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης του πλοίου. Και επιπλέον αν το νησί τροφοδοτεί ήδη κάποιο κρουαζιερόπλοιο, θα δυσκολευτεί να παρέχει επαρκή ηλεκτρική ισχύ και στο κιβωτιοφόρο πλοίο. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια δεδομένα που δίνουν μία ακριβέστερη εικόνα της ζήτησης ενέργειας στο τυπικό τερματικό σταθμό του λιμανιού του Ταλίν, στην Εσθονία.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 6.31 : Κάτοψη λιμανιού του Ταλίν από δορυφόρο. [44]

Ο τερματικός σταθμός (A) όπως φαίνεται και το σκίτσο της εικόνας 6.32, μπορεί να τροφοδοτεί ταυτόχρονα μέχρι πέντε ελλιμενιζόμενα κρουαζιερόπλοια. Παρακάτω έχουν συγκεντρωθεί τα δεδομένα άφιξης, αναχώρησης καθώς και οι ενεργειακές απαιτήσεις διαφόρων κρουαζιερόπλοιων, που έδεσαν στο λιμάνι αυτό.

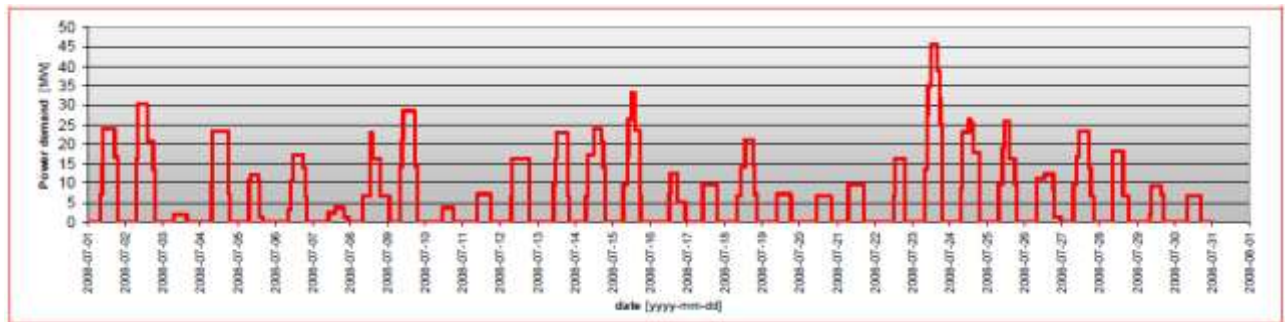


Εικόνα 6.32 : Σκίτσο κάτοψης λιμανιού του Ταλίν. [43]



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.  
Εικόνα 6.33 : Τροφοδοσία κρουαζιερόπλοιων στο λιμάνι του Ταλίν. [43]

Για να εξεταστεί σωστά ο βαθμός κάλυψης, έχουν επιλεγεί δεδομένα άφιξης για την περίοδο του Ιουλίου του 2008, όπου παρατηρείται και η μέγιστη κίνηση των κρουαζιερόπλοιων στο λιμάνι κατά τη διάρκεια του έτους.



Εικόνα 6.34 : Ενεργειακή απαίτηση κρουαζιερόπλοιων για το λιμάνι Ταλίν κατά το μήνα Ιούλιο. [33]

Από τα διαγράμματα απαίτησης ισχύος φαίνεται πως για παράδειγμα στην εύκολη και συνήθη περίπτωση ενός σκάφους με μέγιστη ηλεκτρική απαίτηση 5MW, σε κατάσταση ελλιμενισμού, το δίκτυο του Ταλίν μπορεί να ανταποκριθεί με ευκολία στην κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων. Στη χειρότερη περίπτωση όμως, που παρατηρείται στις 23 Ιουλίου για το έτος του 2008, ο τερματικός του λιμανιού καλείται να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα τις ενεργειακές ανάγκες πέντε τέτοιων κρουαζιερόπλοιων. Η ενεργειακή ζήτηση τότε αγγίζει περίπου τα 35MWA.

Έτσι παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η μελέτη για τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού δικτύου του λιμανιού Ταλίν, ώστε αυτό να μπορεί να τροφοδοτήσει με ηλεκτρική ενέργεια τα κρουαζιερόπλοια που το επισκέπτονται.

Προτείνεται ειδικά για το συγκεκριμένο λιμάνι ο σχεδιασμός πέντε θέσεων για ηλεκτροδότηση πλοίων. Στα σημεία (A, B, C, D, E) θα είναι οι ενδεικτικές θέσεις διασύνδεσης των πλοίων, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.35. Στη συγκεκριμένη μελέτη γίνεται η ανάλυση για τα μεγάλα κρουαζιερόπλοια ισχύος έως και 8MW και όχι τα μικρά, όπως υδροπτέρυγα και μικρά δελφίνια που ταξιδεύουν κυρίως σε κοντινές αποστάσεις και δένουν στις πύλες, γιατί το στίγμα τους στο περιβάλλον είναι μικρό συγκριτικά με τα μεγάλα.

Είναι γνωστό επίσης πως η συχνότητα με την οποία λειτουργούν τέτοια πλοία είναι τα 60Hz. Αφού το δίκτυο του Ταλίν λειτουργεί στα 50Hz, χρειάζεται μετατροπή της συχνότητας. Για να επιτευχθεί αυτό, υπάρχουν δύο βασικές παραλλαγές στο σχεδιασμό ενός συστήματος ψυχρής εκκίνησης. Στη μια περίπτωση, η κάθε θέση σύνδεσης πλοίου έχει το δικό της μετατροπέα συχνότητας, ενώ στην άλλη η μετατροπή συχνότητας γίνεται για όλες τις θέσεις στον κεντρικό υποσταθμό. Η δεύτερη περίπτωση κρίνεται καταλληλότερη, γιατί θα δημιουργηθεί μια κεντρική μονάδα μετατροπής συχνότητας στον κύριο υποσταθμό, η οποία διαστασιολογείται με βάση τη συνολική ισχύ, που πρόκειται να ζητηθεί από πλοία των 60Hz. Έτσι μειώνεται το κόστος σε σχέση με την πρώτη περίπτωση, όπου θα έπρεπε να τοποθετηθεί ένας μετατροπέας σε καθεμία από τις πέντε θέσεις. Κάτι το οποίο δεν εξυπηρετείται και από άποψη χώρου, καθώς στις αποβάθρες δεν μπορεί να τοποθετηθεί ξεχωριστός υποσταθμός σε κάθε θέση σύνδεσης, ο οποίος να περιέχει τον εκάστοτε μετατροπέα συχνότητας.



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Έτσι στον κεντρικό υποσταθμό, ο οποίος θα τοποθετηθεί στον τερματικό Α, μαζί με τη μονάδα μετατροπής συχνότητας, θα τοποθετηθούν και δύο μετασχηματιστές. Ο ένας, ο οποίος θα τοποθετηθεί αριστερά του μετατροπέα, θα κατεβάζει την τάση από τα 20 kV, που είναι η τάση του δικτύου της πόλης, στην τάση εισόδου του μετατροπέα. Ενώ ο άλλος, που θα τοποθετηθεί αριστερά του μετατροπέα, θα ανεβάζει την τάση εξόδου του μετατροπέα ξανά στα 20 kV.

Αυτή η άνοδος της τάσης αποσκοπεί στο να γίνει η διανομή της ισχύος από τον κύριο υποσταθμό προς τις θέσεις ελλιμενισμού σε υψηλή τάση, έτσι ώστε να διέρχεται ρεύμα με μικρή ένταση από τα καλώδια διανομής. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μικρή απαιτούμενη διατομή και επομένως μικρότερο κόστος. Έτσι, σε κάθε μία από τις πέντε θέσεις σύνδεσης (Α, Β, C, D, E) θα πρέπει να υπάρχει ένας μετασχηματιστής απομόνωσης, ο οποίος θα κατεβάζει την τάση από τα 20 kV στην τάση που απαιτείται από τα πλοία.



Εικόνα 6.35 : Σημεία διασύνδεσης των ελλιμενισμένων πλοίων στις αποβάθρες του Ταλίν. [44]

Για να γίνει η επιλογή των ονομαστικών ισχύων των μετασχηματιστών και της μονάδας μετατροπής συχνότητας, θα πρέπει να υπολογιστεί η μέγιστη πιθανή ζήτηση ισχύος για κάθε πύλη και άρα για κάθε θέση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου εξετάζεται η κατάσταση εν όρμω, η ζήτηση ισχύος, του κάθε πλοίου που συνδέεται, θα ανέρχεται περίπου στα 4,994MW ή 6,24MVA. Η ισχύς αυτή είναι μικρότερη από τα συνολικά 8MVA που είναι εγκατεστημένα στο πλοίο, καθώς σε αυτήν την κατάσταση οι ενεργειακές απαιτήσεις πέφτουν, καθώς είναι ανενεργά τα συστήματα πρόωσης. Στη συγκεκριμένη μελέτη γίνεται συγκεκριμένα η παραδοχή πως σε κατάσταση ελλιμενισμού το κάθε πλοίο που συνδέεται καλύπτει τις ενεργειακές του ανάγκες με τρεις ηλεκτρογεννήτριες των 2,08MVA η κάθε μία.

Επομένως προκύπτει πως, αφού η ισχύς είναι άνω του 1 MVA, θα πρέπει να γίνει σύνδεση υψηλής τάσης, σύμφωνα με το πρότυπο ISO/IEC/IEEE 80005-1. Έτσι οι μετασχηματιστές απομόνωσης που ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ξενοπούλου Μαργαρίτα

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων. Θα βρίσκονται στην κάθε θέση σύνδεσης θα κατεβάσουν την τάση στα 6,6 kV και όχι στα 0,44 kV. Το κάθε πλοίο από τη μεριά του, αν η κύρια τάση λειτουργίας του είναι στα 0.44 kV, θα πρέπει να έχει μετασχηματιστή με λόγο τάσεων 6,6/0,44 kV.

Οι τιμές διαστασιολόγησης των μετασχηματιστών της κάθε θέσης είναι τυποποιημένες σύμφωνα με τα πρότυπα της ABB, όπως φαίνεται και στον πίνακα (10) του παραρτήματος 1, έτσι για την περίπτωση όπου τα μέγιστα δυνατά φορτία που εξετάζονται είναι όλα ίδια, σε όλα τα διαθέσιμα σημεία θα τοποθετηθεί μετασχηματιστής ονομαστικής ισχύος 6,3MVA για να καλυφτεί η ζήτηση.

Αθροιστικά η συνολική ισχύς των μετασχηματιστών απομόνωσης, και των πέντε θέσεων ελλιμενισμού, ανέρχεται στα 31,2 MVA. Άρα, η μονάδα μετατροπής συχνότητας θα πρέπει να έχει ισχύ τουλάχιστον 31,2 MVA. Οι μετατροπείς συχνότητας παρέχονται από την κατασκευαστική εταιρεία (ABB), από την οποία θα γίνει η επιλογή των τυποποιημένων μεγεθών, όπως φαίνεται και από τον πίνακα (8) του παραρτήματος 1. Έτσι θα επιλεχθούν συνολικά πέντε μετατροπείς με ονομαστική ισχύ 7 MVA ο καθένας, για λόγους συμμετρίας και θα συνδεθούν παράλληλα, ώστε να καλύπτουν συνολικά 35MVA. Οι μετατροπείς αυτοί έχουν τάση εισόδου 1,725 kV και τάση εξόδου 2,3 kV.

Επομένως θα αξιοποιηθούν αντίστοιχα και πέντε μετασχηματιστές πριν και μετά τους μετατροπείς συχνότητας, με ισχύ 8MVA ο κάθε ένας. Η επιλογή των συγκεκριμένων Μ/Σ πραγματοποιήθηκε πάλι με βάση τα πρότυπα της ABB του πίνακα (10) του παραρτήματος 1.

Τα μήκη των καλωδίων που συνδέουν τον κεντρικό υποσταθμό του τερματικού Α, με τους μετασχηματιστές των θέσεων σύνδεσης, υπολογίστηκαν μετρώντας τις αντίστοιχες αποστάσεις στο Google Earth, που παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα και στην εικόνα 6.35.

Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

- Μέχρι το σημείο Α είναι 415 μέτρα
- Μέχρι το σημείο Β είναι 640 μέτρα.
- Μέχρι το σημείο C είναι 650 μέτρα.
- Μέχρι το σημείο D είναι 670 μέτρα.
- Μέχρι το σημείο E είναι 915 μέτρα.

Για τη σύνδεση των μετασχηματιστών που βρίσκονται στις αποβάθρες με τα πλοία θα χρησιμοποιηθεί ένα υπόγειο καλώδιο 25 μέτρων και ένα εναέριο 50 μέτρων που θα συνδέεται με το πλοίο. Το εναέριο καλώδιο πρέπει να είναι αρκετά μακρύ, ώστε να υπάρχει περιθώριο και να μη διατρέχει κίνδυνο τεντώματος και κοψίματος.

Επιπλέον πρέπει να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς και το εσωτερικό καλώδιο του πλοίου 100m, το οποίο συνδέει το εναέριο καλώδιο 50m του λιμανιού με τις γεννήτριες του εκάστοτε πλοίου. Οι γεννήτριες αυτές επιλέχτηκαν με την σειρά τους σύμφωνα με τον αντίστοιχο κατάλογο της ABB, όπως φαίνεται και στον πίνακα (6) του παραρτήματος 1.

Οι ζυγοί τροφοδοσίας της εγκατάστασης είναι διπλοί ζυγοί. Το είδος των ζυγών αυτών προτιμάται κυρίως για μεγάλες εγκαταστάσεις. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που παρουσιάζει είναι η εύκολη συντήρηση τμημάτων της εγκατάστασης, χωρίς την αναγκαστική διακοπή της παροχής σε όλο το δίκτυο. Η τμηματοποίηση αυτή αυξάνει τη συνολική λειτουργική ευκαμψία του δικτύου, γι' αυτό προτιμάται και σε εγκαταστάσεις λιμανιών.

Κατά την ακόλουθη μελέτη διαμόρφωσης του ηλεκτρολογικού δικτύου του λιμανιού του Ταλίν πραγματοποιήθηκαν διαδοχικά οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

- Προδιαστασιολόγηση καλωδίων εγκατάστασης.
- Έλεγχος πτώσης τάσεως καλωδίων.

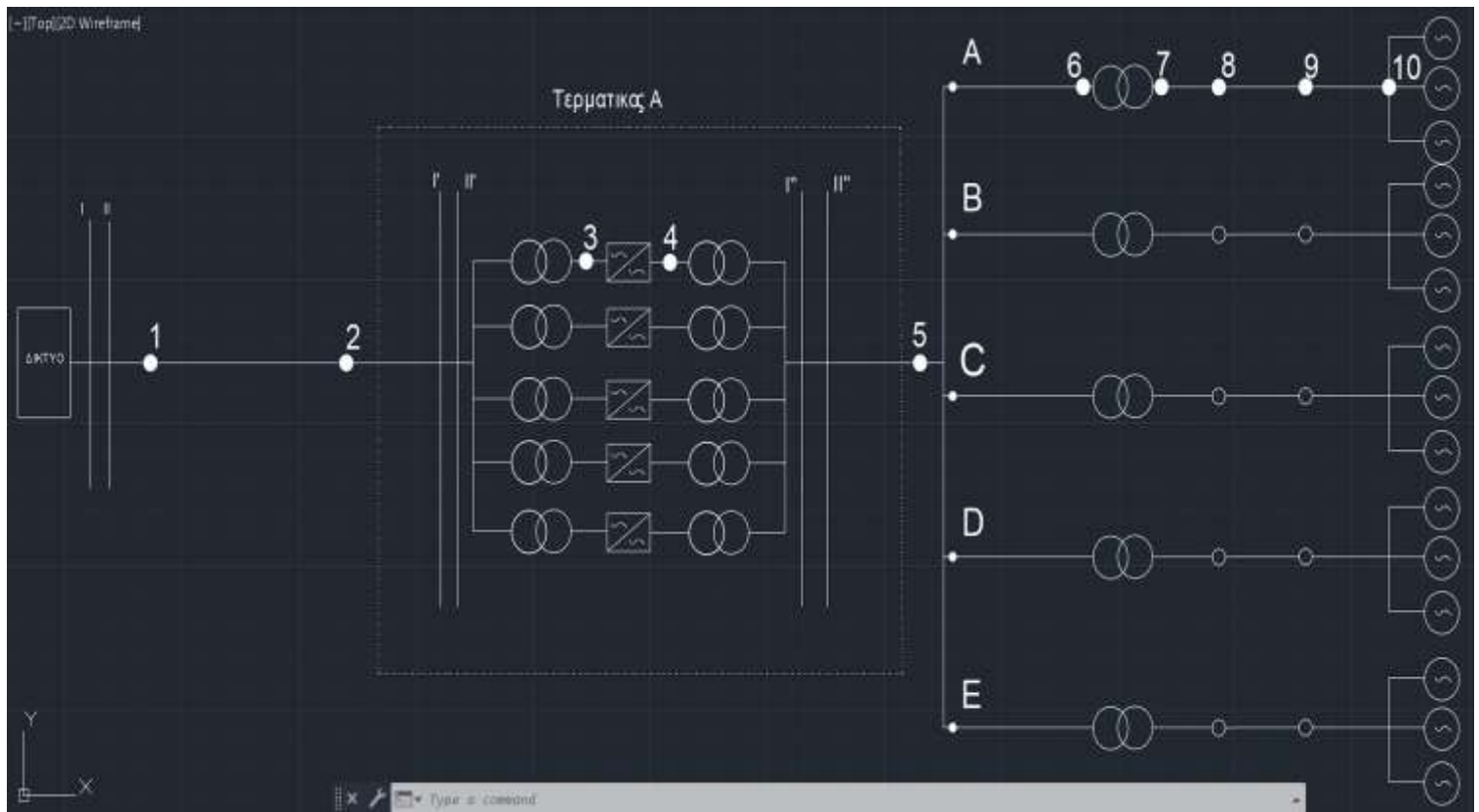
Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

- Υπολογισμός μέγιστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης διαφόρων σημείων της εγκατάστασης.
- Προσδιορισμός διατάξεων προστασίας και οριστικοποίηση τεχνικών χαρακτηριστικών της εγκατάστασης.

Κάθε καλώδιο της παραπάνω εγκατάστασης διαρρέεται από ρεύμα που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$I_{max} = \frac{S_{on}}{\sqrt{3} \cdot V_{on}} [A] \text{ Σχέση 6.28}$$

Με βάση αυτό το ρεύμα και τους πίνακες από το βιβλίο της αναφοράς [20], που παρουσιάζονται και στο παράρτημα 1, συμπληρώνεται ο ακόλουθος αναλυτικός πίνακας 6.9, όπου φαίνεται το είδος, η διατομή και τα χαρακτηριστικά του κάθε καλωδίου που επιλέχθηκε.



Εικόνα 6.36 : Αρχικό μονογραμμικό διάγραμμα απεικόνισης καλωδίων της εγκατάστασης του λιμανιού του Ταλίν.



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

A/A	L [m]	S [MVA]	Vn [kV]	I <sub>max</sub> [A]	ΠΙΝΑΚΑΣ 6.21 [20]			Ιτυποποιημένο [A]	S [mm <sup>2</sup> ]
1	200	20	20	577,350	ΚΑΛΩΔΙΟ ΘΑΜΜΕΝΟ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	ΔΙΚΤΥΩΜΕΝΟ ΠΟΛΥΑΙΘ.	Cu	601	300
	200	20	20	577,350	ΚΑΛΩΔΙΟ ΘΑΜΜΕΝΟ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	ΔΙΚΤΥΩΜΕΝΟ ΠΟΛΥΑΙΘ.	Cu	601	300
A/A	L [m]	S [MVA]	Vn [kV]	I <sub>max</sub> [A]	ΠΙΝΑΚΑΣ 6.21 [20]			I <sub>z</sub> [A]	S [mm <sup>2</sup> ]
2	415	6,3	20	181,865	ΚΑΛΩΔΙΟ ΘΑΜΜΕΝΟ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	ΔΙΚΤΥΩΜΕΝΟ ΠΟΛΥΑΙΘ.	Cu	189	35
3	640	6,3	20	181,865	ΚΑΛΩΔΙΟ ΘΑΜΜΕΝΟ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	ΔΙΚΤΥΩΜΕΝΟ ΠΟΛΥΑΙΘ.	Cu	189	35
4	650	6,3	20	181,865	ΚΑΛΩΔΙΟ ΘΑΜΜΕΝΟ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	ΔΙΚΤΥΩΜΕΝΟ ΠΟΛΥΑΙΘ.	Cu	189	35
5	670	6,3	20	181,865	ΚΑΛΩΔΙΟ ΘΑΜΜΕΝΟ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	ΔΙΚΤΥΩΜΕΝΟ ΠΟΛΥΑΙΘ.	Cu	189	35
6	915	6,3	20	181,865	ΚΑΛΩΔΙΟ ΘΑΜΜΕΝΟ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	ΔΙΚΤΥΩΜΕΝΟ ΠΟΛΥΑΙΘ.	Cu	189	35
A/A	L [m]	S [MVA]	Vn [kV]	I <sub>max</sub> [A]	ΠΙΝΑΚΑΣ 6.21 [20]			I <sub>z</sub> [A]	S [mm <sup>2</sup> ]
7	25	6,24	6,6	545,858	ΚΑΛΩΔΙΟ ΘΑΜΜΕΝΟ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	ΔΙΚΤΥΩΜΕΝΟ ΠΟΛΥΑΙΘ.	Cu	601	300
A/A	L [m]	S [MVA]	Vn [kV]	I <sub>max</sub> [A]	ΠΙΝΑΚΑΣ 6.9 [20]			I <sub>z</sub> [A]	S [mm <sup>2</sup> ]
8	50	6,24	6,6	545,858	ΚΑΛΩΔΙΟ ΣΤΟΝ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΑΕΡΑ	ΔΙΚΤΥΩΜΕΝΟ ΠΟΛΥΑΙΘ.	Cu	627	240

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

A/A	L [m]	S [MVA]	Vn [kV]	I <sub>max</sub> [A]		I <sub>max</sub> (A) = IB / (n1*n2)	ΠΙΝΑΚΑΣ 6.9 [20]	I <sub>z</sub> [A]	S [mm <sup>2</sup> ]
9	100	6,24	6,6	545,858	ΚΑΛΩΔΙΟ ΣΤΟΝ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΑΕΡΑ ΠΑΝΩ ΣΕ ΣΤΗΡΙΓΜΑ	673,867	ΔΙΚΤΥΩΜΕΝΟ ΠΟΛΥΑΙΘ. Cu	715	300
					n1 (40 °c) ΠΙΝΑΚΑΣ 6.12 [20]				
					0,91				
					n2 (Πάνω Σε Στηρίγματα) ΠΙΝΑΚΑΣ 6.16 [20]				
					0,89				

Πίνακας 6.9 : Προσδιορισμός διατομής καλωδίων εγκατάστασης λιμανιού Ταλίν.

Από τα αποτελέσματα του πίνακα παρατηρείται πως ο αγωγός των 200m, που έρχεται από το δίκτυο της ΔΕΗ και καταλήγει στον πρώτο ζυγό του τερματικού, διαρρέεται από ρεύμα 1154,7 Α. Σύμφωνα με τις τυποποιημένες διατομές των καλωδίων της αγοράς δεν υπάρχει καλώδιο τέτοιο που να εξυπηρετεί το συγκεκριμένο ρεύμα. Έτσι επιλέγονται δύο καλώδια που παραλληλίζονται ώστε να μεταφέρουν το καθένα το μισό του ονομαστικού ρεύματος.

Επιπλέον, καθώς το εσωτερικό καλώδιο του πλοίου βρίσκεται σε ένα ιδιαίτερο περιβάλλον, απαιτείται και η ανάλογη διόρθωση του μέγιστου ρεύματος που θα περάσει μέσα από αυτό. Οι συντελεστές διόρθωσης προκύπτουν από τους αντίστοιχους πίνακες (3 και 4) του παραρτήματος 1.

Προκειμένου να ελεγχθούν οι παραπάνω διατομές πραγματοποιείται, ο έλεγχος της πτώσης τάσης σε όλα τα καλώδια. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC-60909, η επιτρεπόμενη πτώση τάσης πάνω στις γραμμές της εγκατάστασης δεν πρέπει να ξεπερνάει το 6% της ονομαστικής τάσης του εκάστοτε καλωδίου. Ισχύει δηλαδή για τριφασική παροχή:

$$\Delta V[V] = \frac{\sqrt{3} * \ell * p * I_{max}}{S} \quad (\text{Σχέση 6.28})$$

Όπου ( S ) η διατομή του αγωγού, (  $\ell$  ) το μήκος του αγωγού, ( p ) η ειδική αντίσταση η οποία είναι σταθερή για όλα τα χάλκινα καλώδια, και (  $I_{max}$  ) το ρεύμα γραμμής του καλωδίου.

$$\text{Οπότε: } u_k = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V}{\frac{V_{on}}{\sqrt{3}}} < 6\% \quad (\text{Σχέση 6.29})$$

Στη συνέχεια, από τον παρακάτω πίνακα υπολογισμού της πτώσης τάσεως σε όλα τα καλώδια της εγκατάστασης, φαίνεται πως οι τιμές είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια και έτσι δεν απαιτείται καμία διόρθωση στις ήδη επιλεγμένες διατομές.

Γραμμές	L [m]	S [MVA]	Vn [kV]	I <sub>max</sub> [A]	ρ [Ω·mm <sup>2</sup> /m]	S [mm <sup>2</sup> ]	ΔV [Volt]	ΔV/V [%]
Διπλό καλώδιο	200	20	20	577.350	0.0176	300	11.733	0.102%
	200	20	20	577.350	0.0176	300	11.733	0.102%
A	415	6.3	20	181.865	0.0176	35	106.128	0.919%
B	640	6.3	20	181.865	0.0176	35	102.960	0.892%
C	650	6.3	20	181.865	0.0176	35	101.376	0.878%
D	670	6.3	20	181.865	0.0176	35	65.736	0.569%
E	915	6.3	20	181.865	0.0176	35	144.936	1.255%
Υπόγειο Καλώδιο πλοίου	25	6.24	6.6	545.858	0.0176	300	1.387	0.036%
Εναέριο Καλώδιο πλοίου	50	6.24	6.6	545.858	0.0176	240	3.467	0.091%
Εσωτερικό καλώδιο πλοίου	100	6.24	6.6	545.858	0.0176	300	6.849	0.1797%

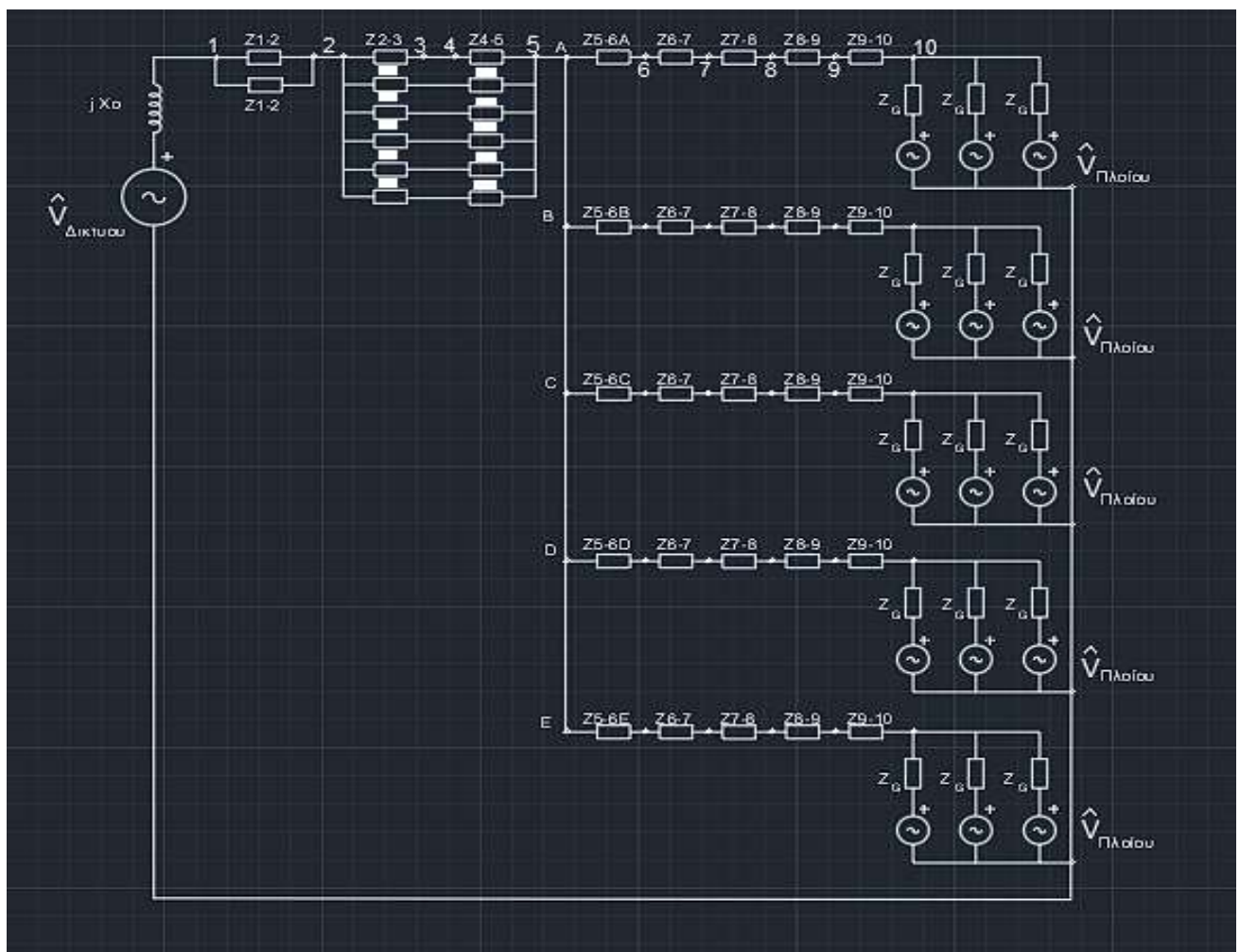
Πίνακας 6.10 : Έλεγχος πτώσης τάσεως καλωδίων.

Το επόμενο βήμα, της τρέχουσας μελέτης για το λιμάνι του Ταλίν, αφορά τη μελέτη βραχυκυκλωμάτων του δικτύου. Κατά την εκτέλεση της μεθοδολογίας που παρουσιάζεται παρακάτω είναι αναγκαίο να προσδιοριστούν όλες οι σύνθετες αντιστάσεις των στοιχείων που απαρτίζουν την εγκατάσταση του λιμανιού.

Κατά την εκτέλεση των ακόλουθων υπολογισμών έχουν παρθεί οι εξής παραδοχές:

- Η μέγιστη ισχύς βραχυκύκλωσης του δικτύου είναι:  $S_{\Delta βραχ.} = 350 MVA$
- Οι μετατροπείς συχνότητας παρουσιάζουν ιδανικά μηδενική σύνθετη αντίσταση
- Η τάση του δικτύου ταυτίζεται με την τάση των γεννητριών των πλοίων  
 $V_{\Delta δικτυου} = V_{\text{Πλοίου}} = 20 kV$
- Η ωμική αντίσταση του δικτύου της ΔΕΗ θεωρείται αμελητέα  $R_{\Delta δικτυου} = 0$
- Οι γεννήτριες των πλοίων λαμβάνονται όλες με τα ίδια χαρακτηριστικά
- Όλοι οι υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί με την αναγωγή των στοιχείων στα 20kV

Με δεδομένες όλες τις σύνθετες αντιστάσεις των στοιχείων της εγκατάστασης, προκύπτει το κύκλωμα θετικής ακολουθίας της εικόνας 6.37, το οποίο θα αξιοποιηθεί κατάλληλα για τον προσδιορισμό των μέγιστων και των ελάχιστων τριφασικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης στα διάφορα πιθανά σημεία εμφάνισης σφαλμάτων.



Εικόνα 6.37 : Κύκλωμα θετικής ακολουθίας λιμανιού του Ταλίν.

Επομένως για τη σύνθετη αντίσταση των 3 γεννητριών του πλοίου θα ισχύει:

Για τη μία γεννήτρια του πλοίου στα 2,080 MVA, τιμή που έχει προκύψει από τις τυποποιημένες τιμές του πίνακα (6) του παραρτήματος 1, με  $\cos \varphi = 0.8$ , ισχύει ότι η αντίσταση και η υπομεταβατική αντίδραση προκύπτουν αντίστοιχα μέσα από τον πίνακα (7) του παραρτήματος 1 ανηγμένες στο ανά μονάδα σύστημα ως εξής:

$$R_G = 0,0154 \text{ p.u.}, \quad X''_{dG} = 0,22 \text{ p.u.}$$

Άρα οι αντίστοιχες τιμές μετά τον παραλληλισμό των γεννητριών (3x2,080MVA) προκύπτουν:

$$R_{G/3} = \frac{R_G}{3} = 0,005133 \text{ p.u.}, \quad X''_{dG/3} = \frac{X''_{dG}}{3} = 0,0733 \text{ p.u.}$$

Τα στοιχεία αυτά ανοιγμένα στο πραγματικό σύστημα θα είναι:

$$Z_{G/3} = \frac{V_{\text{ov-G}}^2}{S_{\text{ov-G/3}}} * Z_{G/3}[\text{p.u.}] = \frac{6600^2}{6,24*10^6} * Z_{G/3}[\text{p.u.}]$$

$$Z_{G/3} = 6,98077 * (R_{G/3} + jX''_{dG/3})$$

$$Z_{G/3} = 0,03583 + j0,5117$$

Και με αναγωγή στα 20 kV θα είναι τελικά:

$$Z_{G/3} = \left(\frac{20000}{6600}\right)^2 * (0,03583 + j0,5117) = 0,3290 + j4,6978 \Omega$$

Για την εσωτερική γραμμή του πλοίου ( $\ell=100\text{m}$ ), η αντίσταση και η υπομεταβατική αντίδραση προκύπτουν μέσα από τον πίνακα (9) του παραρτήματος 1.

$$R_{9,10} = 0,082 \frac{\Omega}{\text{km}} \Rightarrow R_{9,10} = 0,082 \frac{\Omega}{\text{km}} * 0,1\text{km} = 0,0082 \Omega$$

$$X''_{d9,10} = 0,097 \frac{\Omega}{\text{km}} \Rightarrow X''_{d9,10} = 0,097 \frac{\Omega}{\text{km}} * 0,1\text{km} = 0,0097 \Omega$$

Και με αναγωγή στα 20 kV θα είναι τελικά:

$$Z_{9,10} = \left(\frac{20000}{6600}\right)^2 * (0,0082 + j0,0097) = 0,07528 + j0,08905 \Omega$$

Για την εναέρια γραμμή διασύνδεσης του πλοίου ( $\ell=50\text{m}$ ), η αντίσταση και η υπομεταβατική αντίδραση προκύπτουν μέσα από τον πίνακα (9) του παραρτήματος 1.

$$R_{8,9} = 0,101 \frac{\Omega}{\text{km}} \Rightarrow R_{8,9} = 0,101 \frac{\Omega}{\text{km}} * 0,05\text{km} = 0,00505 \Omega$$

$$X''_{d8,9} = 0,102 \frac{\Omega}{\text{km}} \Rightarrow X''_{d8,9} = 0,102 \frac{\Omega}{\text{km}} * 0,05\text{km} = 0,0051 \Omega$$

Και με αναγωγή στα 20 kV θα είναι τελικά:

$$Z_{8,9} = \left(\frac{20000}{6600}\right)^2 * (0,00505 + j0,0051) = 0,04636 + j0,04682 \Omega$$

Για την υπόγεια γραμμή τροφοδοσίας του πλοίου ( $\ell=25\text{m}$ ), η αντίσταση και η υπομεταβατική αντίδραση προκύπτουν μέσα από τον πίνακα (9) του παραρτήματος 1.

$$R_{7,8} = 0,082 \frac{\Omega}{\text{km}} \Rightarrow R_{7,8} = 0,082 \frac{\Omega}{\text{km}} * 0,025\text{km} = 0,00205 \Omega$$

$$X''_{d7,8} = 0,097 \frac{\Omega}{\text{km}} \Rightarrow X''_{d7,8} = 0,097 \frac{\Omega}{\text{km}} * 0,025\text{km} = 0,002425 \Omega$$

Και με αναγωγή στα 20 kV θα είναι τελικά:

$$Z_{7,8} = \left(\frac{20000}{6600}\right)^2 * (0,00205 + j0,002425) = 0,01882 + j0,02226 \Omega$$

Για τον μετασχηματιστή απομόνωσης (3) με ονομαστική ισχύ 6,3MVA και τάση στα 20kV, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του λαμβάνονται μέσα από τον πίνακα (10) του παραρτήματος 1 ως εξής:

Οι απώλειες χαλκού:  $P_{cu} = P_{load} - P_{no-load} = 45000W - 6000W = 39000W$

Η σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ:  $Z_{M/Σ} = 0.0715 \text{ p.u.}$

Το ονομαστικό του ρεύμα προκύπτει:  $I_{M/Σ} = \frac{S_{ov-M/Σ}}{\sqrt{3} \cdot V_{ov-M/Σ}} = \frac{6,3 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 181,86A$

Άρα:  $R_{6,7} = \frac{P_{cu}}{3 \cdot I_{M/Σ}^2} = 0.68 \Omega$

$Z_{M/Σ} = \frac{V_{ov-M/Σ}^2}{S_{ov-M/Σ}} \cdot Z_{M/Σ} [p.u.] = \frac{20000^2}{6,3 \cdot 10^6} \cdot 0,0715 = 4,54 \Omega$

$X''_{d6,7} = \sqrt{Z_{M/Σ}^2 - R_{M/Σ}^2} = 4,489 \Omega$

Επομένως:  $Z_{6,7} = 0,68 + j4,489 \Omega$

Για τις γραμμές A ( $\ell=415m$ ), B( $\ell=640m$ ), C( $\ell=650m$ ), D( $\ell=670m$ ), E( $\ell=915m$ ), η αντίσταση και η υπομεταβατική αντίδραση προκύπτουν μέσα από τον πίνακα (7) του παραρτήματος 1. Στις γραμμές αυτές δεν χρειάζεται αναγωγή αφού είναι ήδη ανηγμένες στα 20kV.

$R_{(5,6)A} = 0,671 \frac{\Omega}{km} \Rightarrow R_{7,8} = 0,671 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,415km = 0,2785 \Omega$

$X''_{d(5,6)A} = 0,151 \frac{\Omega}{km} \Rightarrow X''_{d7,8} = 0,151 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,415km = 0,0626 \Omega$

$Z_{(5,6)A} = 0,2785 + j0,0626 \Omega$

$R_{(5,6)B} = 0,671 \frac{\Omega}{km} \Rightarrow R_{7,8} = 0,671 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,640km = 0,4294 \Omega$

$X''_{d(5,6)B} = 0,151 \frac{\Omega}{km} \Rightarrow X''_{d7,8} = 0,151 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,640km = 0,0966 \Omega$

$Z_{(5,6)B} = 0,4294 + j0,0966 \Omega$

$R_{(5,6)C} = 0,671 \frac{\Omega}{km} \Rightarrow R_{7,8} = 0,671 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,650km = 0,4361 \Omega$

$X''_{d(5,6)C} = 0,151 \frac{\Omega}{km} \Rightarrow X''_{d7,8} = 0,151 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,650km = 0,0982 \Omega$

$Z_{(5,6)C} = 0,4361 + j0,0982 \Omega$

$R_{(5,6)D} = 0,671 \frac{\Omega}{km} \Rightarrow R_{7,8} = 0,671 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,670km = 0,4496 \Omega$

$X''_{d(5,6)D} = 0,151 \frac{\Omega}{km} \Rightarrow X''_{d7,8} = 0,151 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,670km = 0,1012 \Omega$

$Z_{(5,6)D} = 0,4496 + j0,1012 \Omega$

$R_{(5,6)E} = 0,671 \frac{\Omega}{km} \Rightarrow R_{7,8} = 0,671 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,915km = 0,614 \Omega$

$X''_{d(5,6)E} = 0,151 \frac{\Omega}{km} \Rightarrow X''_{d7,8} = 0,151 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,915km = 0,1382 \Omega$

$Z_{(5,6)E} = 0,614 + j0,1382 \Omega$

Για τον μετασχηματιστή απομόνωσης (2) με ονομαστική ισχύ 8MVA και τάση στα 2,3kV, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του λαμβάνονται μέσα από τον πίνακα (10) του παραρτήματος 1 ως εξής:

Οι απώλειες χαλκού:  $P_{cu} = P_{load} - P_{no-load} = 56000W - 7000W = 49000W$

Η σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ:  $Z_{M/Σ} = 0,0835 \text{ p.u.}$

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Το ονομαστικό του ρεύμα προκύπτει:  $I_{M/\Sigma} = \frac{S_{ov-M/\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot V_{ov-M/\Sigma}} = \frac{8 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 2.3 \cdot 10^3} = 2008,175A$

Άρα:  $R_{4,5} = \frac{P_{cu}}{3 \cdot I_{M/\Sigma}^2} = 0,00405 \Omega$

$Z_{M/\Sigma} = \frac{V_{ov-M/\Sigma}^2}{S_{ov-M/\Sigma}} \cdot Z_{M/\Sigma} [p. u.] = \frac{2300^2}{8 \cdot 10^6} \cdot 0,0835 = 0,5522 \Omega$

$X''_{d4,5} = \sqrt{Z_{M/\Sigma}^2 - R_{M/\Sigma}^2} = 0,5520 \Omega$

Επομένως:  $Z_{4,5} = 0,00405 + j0,5520 \Omega$

Από τον παραλληλισμό των πέντε Μ/Σ (2) προκύπτει επιπλέον:

$Z_{\frac{4,5}{5}} = \frac{0,00405}{5} + j \frac{0,5520}{5} = 0,00081 + j0,1104 \Omega$

Και με την αναγωγή στα 20kV θα προκύψει τελικά:

$Z_{4,5} = (0,00405 + j0,5520) / \left(\frac{2300}{20000}\right)^2 = 0,3063 + j4,16 \Omega$

$Z_{\frac{4,5}{5}} = (0,00081 + j0,1104) / \left(\frac{2300}{20000}\right)^2 = 0,0613 + j0,8328 \Omega$

Για το μετασχηματιστή (1) με ονομαστική ισχύ 8MVA και τάση στα 20kV, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του λαμβάνονται μέσα από τον πίνακα (10) του παραρτήματος 1 ως εξής:

Οι απώλειες χαλκού:  $P_{cu} = P_{load} - P_{no-load} = 56000W - 7000W = 49000W$

Η σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ:  $Z_{M/\Sigma} = 0.0835 p. u.$

Το ονομαστικό του ρεύμα προκύπτει:  $I_{M/\Sigma} = \frac{S_{ov-M/\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot V_{ov-M/\Sigma}} = \frac{8 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 230,94A$

Άρα:  $R_{2,3} = \frac{P_{cu}}{3 \cdot I_{M/\Sigma}^2} = 0,3062 \Omega$

$Z_{M/\Sigma} = \frac{V_{ov-M/\Sigma}^2}{S_{ov-M/\Sigma}} \cdot Z_{M/\Sigma} [p. u.] = \frac{20000^2}{8 \cdot 10^6} \cdot 0,0835 = 4,175 \Omega$

$X''_{d2,3} = \sqrt{Z_{M/\Sigma}^2 - R_{M/\Sigma}^2} = 4,1637 \Omega$

Επομένως:  $Z_{2,3} = 0,3062 + j4,1637 \Omega$

Από τον παραλληλισμό των πέντε Μ/Σ (1) προκύπτει:

$Z_{(2,3)/5} = \frac{0,3062}{5} + \frac{j4,1637}{5} = 0,06124 + j0,8327 \Omega$

Για την υπόγεια γραμμή του δικτύου ( $\ell=200m$ ), η αντίσταση και η υπομεταβατική αντίδραση προκύπτουν μέσα από τον πίνακα (7) του παραρτήματος 1.

$R_{1,2} = 0,082 \frac{\Omega}{km} \Rightarrow R_{7,8} = 0,082 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,200km = 0,0164 \Omega$

$X''_{d7,8} = 0,097 \frac{\Omega}{km} \Rightarrow X''_{d7,8} = 0,097 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,200km = 0,0208 \Omega$

Από τον παραλληλισμό των πέντε Μ/Σ (1) προκύπτει:

$Z_{(2,3)/2} = \frac{0,0164}{2} + \frac{j0,0208}{5} = 0,0082 + j0,0104 \Omega$

Τέλος για την υπομεταβατική αντίδραση του δικτύου της ΔΕΗ ισχύει από το πρότυπο της ABB πως:

$X''_{d0} = 0,995 \cdot \frac{1,1 \cdot V_{ov-\Deltaικτυου}^2}{S_{ov-\Deltaικτυου}} = 0,995 \cdot \frac{1,1 \cdot 20000^2}{350000000} = 1,2508 \Omega$

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Στον ακόλουθο πίνακα 6.11 καταγράφονται συγκεντρωτικά όλες οι αντιστάσεις που μόλις υπολογίστηκαν.

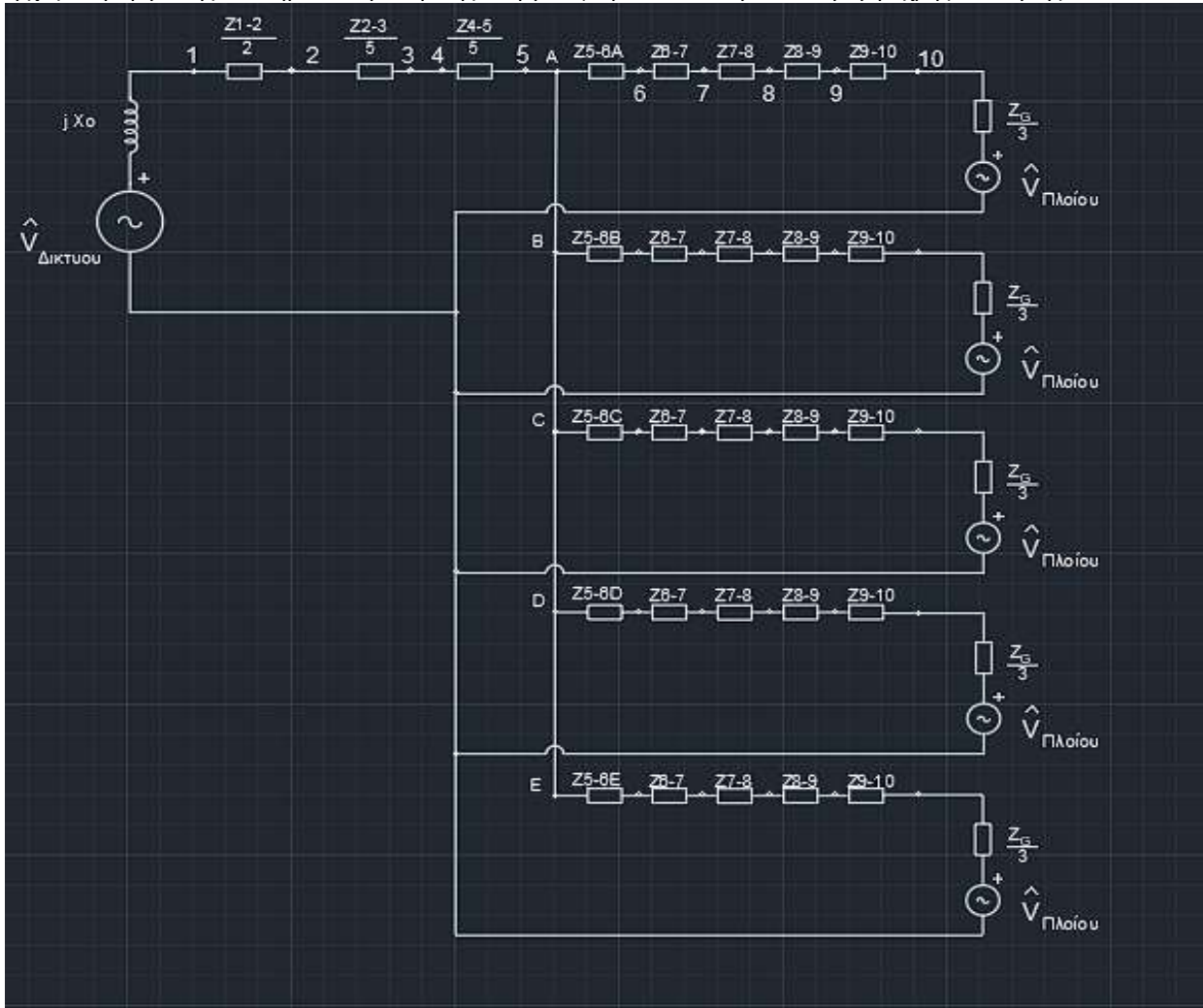
Καταναλώσεις	Z	R	Xd
	Ω	Ω	Ω
<b>Γεννήτρια πλοίου</b>	<b>Z(G)</b>	<b>0.1075</b>	<b>1.5351</b>
Συνολικό φορτίο πλοίου (x 3)	Z(G/3)	0.0329	4.6978
Γραμμή πλοίου εσωτερική 100m	Z(9-10)	0.07528	0.08905
Γραμμή πλοίου εναέρια 50m	Z(8-9)	0.4636	0.0468
Γραμμή πλοίου υπόγεια 25m	Z(7-8)	0.01882	0.02226
Μετασχηματιστής απομόνωσης 3 ( 6.3MVA)	Z(6-7)	0.68	4.489
Γραμμή A (415m)	Z(5-6)A	0.2785	0.0626
Γραμμή B (640m)	Z(5-6)B	0.4294	0.0966
Γραμμή C (650m)	Z(5-6)C	0.4361	0.0982
Γραμμή D (670m)	Z(5-6)D	0.4496	0.1012
Γραμμή E (915m)	Z(5-6)E	0.614	0.1382
<b>Μετασχηματιστής 2 (8MVA)</b>	<b>Z(4-5)</b>	<b>0.3063</b>	<b>4.16</b>
Μετασχηματιστής 2 (8MVA) (x 5)	Z(4-5)/5	0.0613	0.8328
Μετατροπέας 7MVA (x 5)	Z(3-4)	0	0
<b>Μετασχηματιστής 1 (8MVA)</b>	<b>Z(2-3)</b>	<b>0.3062</b>	<b>4.1637</b>
Μετασχηματιστής 1 (8MVA) (x 5)	Z(2-3)/5	0.06124	0.8327
<b>Γραμμή δικτύου 200m</b>	<b>Z(1-2)</b>	<b>0.0164</b>	<b>0.0208</b>
Γραμμή δικτύου 200m (x 2)	Z(1-2)/2	0.0082	0.0104
Αντίδραση Δικτύου ΔΕΗ	Z(0)	0	1.2508

Πίνακας 6.11 : Σύνθετες αντιστάσεις στοιχείων της εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης του λιμανιού του Ταλίν.

Για τον προσδιορισμό των μέγιστων τριφασικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης λαμβάνεται υπόψη το διάγραμμα της εικόνας 6.38

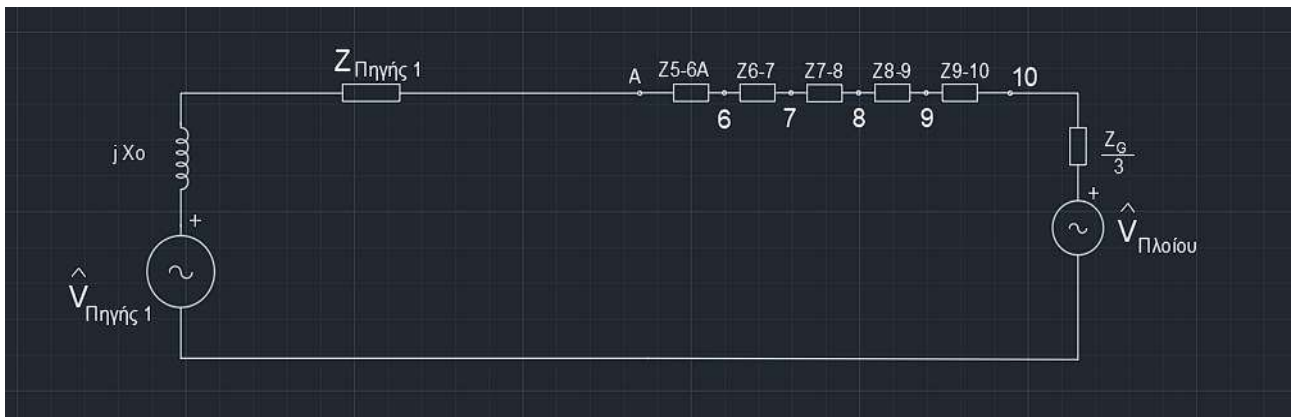


Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Εικόνα 6.38: Ισοδύναμο διάγραμμα για τον προσδιορισμό των μέγιστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση όπου όμοια πλοία είναι συνδεδεμένα και στις πέντε θέσεις ταυτόχρονα. Ο προσδιορισμός των τριφασικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης για τα σημεία 10, 9, 8, 7 και 6 για την παρακάτω μελέτη έχουν γίνει στη γραμμή A, η οποία τροφοδοτεί το πιο κοντινό πλοίο και παρουσιάζει τα δυσμενεστέρα αποτελέσματα σε περίπτωση σφάλματος, λόγω μικρότερης απόστασης καλωδίων. Σε αυτήν την περίπτωση το ισοδύναμο κύκλωμα θα είναι το εξής.



Εικόνα 6.39 : Ισοδύναμο κύκλωμα πιθανά σφάλματα στην Γραμμή A.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Όπου:

$$\hat{V}_{Πηγής1} = \frac{\frac{\hat{V}_{Δικτυου}}{jX''_{d0} + Z_{(1,2)/2} + Z_{(2,3)/5} + Z_{(4,5)/5}} + \frac{\hat{V}_{πλοιου}}{Z_{(5,6)B} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}}}{\frac{1}{jX''_{d0} + Z_{(1,2)/2} + Z_{(2,3)/5} + Z_{(4,5)/5}} + \frac{1}{Z_{(5,6)B} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}}} +$$

$$\frac{\frac{\hat{V}_{Πλοιου}}{Z_{(5,6)C} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}}}{1} + \frac{\frac{\hat{V}_{Πλοιου}}{Z_{(5,6)D} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}}}{1} + \frac{\frac{\hat{V}_{Πλοιου}}{Z_{(5,6)E} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}}}{1}}{\frac{1}{Z_{(5,6)C} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}} + \frac{1}{Z_{(5,6)D} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}} + \frac{1}{Z_{(5,6)E} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}}}}$$

Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 10 της γραμμής A ισχύει:

$$\hat{I}_{sc10} = \frac{\hat{V}_{πλοιου}}{Z_{G/3}} + \frac{\hat{V}_{Πηγής1}}{Z_{Πηγής1} + Z_{(5,6)A} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10}}$$

Καθώς όμως αυτό το ρεύμα είναι το ανηγμένο στα 20kV, το πραγματικό θα είναι το αντίστοιχο των 6,6kV. Άρα:

$$\hat{I}_{max10} = \frac{20000}{6600} * \hat{I}_{sc10}$$

Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 9 της γραμμής A ισχύει:

$$\hat{I}_{sc9} = \frac{\hat{V}_{πλοιου}}{Z_{G/3} + Z_{9,10}} + \frac{\hat{V}_{Πηγής1}}{Z_{Πηγής1} + Z_{(5,6)A} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9}}$$

Καθώς όμως αυτό το ρεύμα είναι το ανηγμένο στα 20kV, το πραγματικό θα είναι το αντίστοιχο των 6,6kV. Άρα:

$$\hat{I}_{max9} = \frac{20000}{6600} * \hat{I}_{sc9}$$

Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 8 της γραμμής A ισχύει:

$$\hat{I}_{sc8} = \frac{\hat{V}_{πλοιου}}{Z_{G/3} + Z_{9,10} + Z_{8,9}} + \frac{\hat{V}_{Πηγής1}}{Z_{Πηγής1} + Z_{(5,6)A} + Z_{6,7} + Z_{7,8}}$$

Καθώς όμως αυτό το ρεύμα είναι το ανηγμένο στα 20kV, το πραγματικό θα είναι το αντίστοιχο των 6,6kV. Άρα:

$$\hat{I}_{max8} = \frac{20000}{6600} * \hat{I}_{sc8}$$

Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 7 της γραμμής A ισχύει:

$$\hat{I}_{sc7} = \frac{\hat{V}_{πλοιου}}{Z_{G/3} + Z_{9,10} + Z_{8,9} + Z_{7,8}} + \frac{\hat{V}_{Πηγής1}}{Z_{Πηγής1} + Z_{(5,6)A} + Z_{6,7}}$$

Καθώς όμως αυτό το ρεύμα είναι το ανηγμένο στα 20kV, το πραγματικό θα είναι το αντίστοιχο των 6,6kV. Άρα:

$$\hat{I}_{max7} = \frac{20000}{6600} * \hat{I}_{sc7}$$

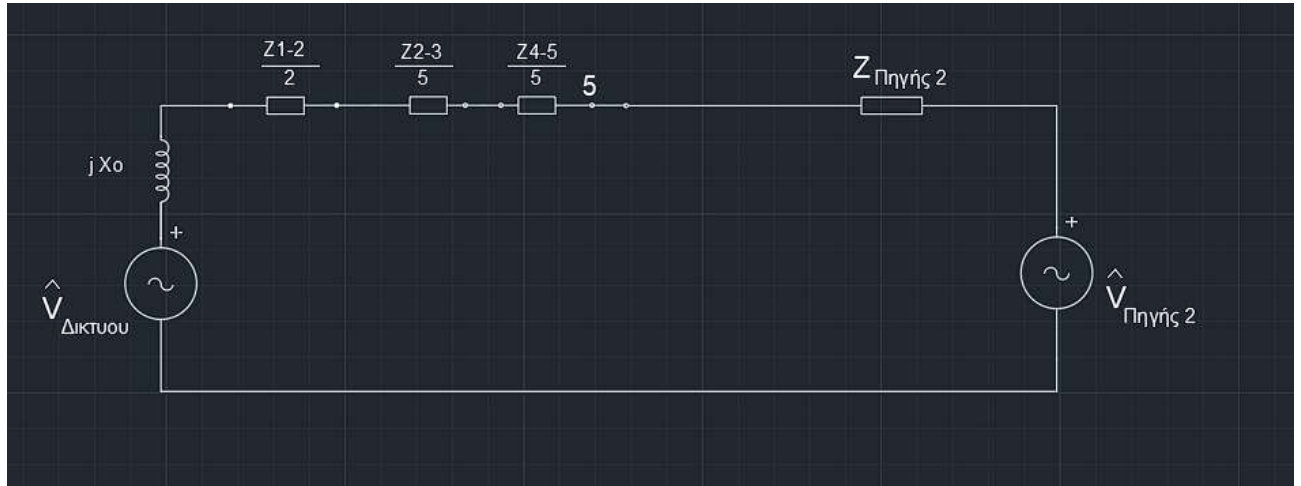
Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 6 της γραμμής A ισχύει:

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

$$\hat{I}_{sc6} = \frac{\hat{V}_{\pi\lambda\omicron\iota\omicron\upsilon}}{Z_{G/3} + Z_{9,10} + Z_{8,9} + Z_{7,8} + Z_{6,7}} + \frac{\hat{V}_{\pi\eta\gamma\eta\varsigma 1}}{Z_{\pi\eta\gamma\eta\varsigma 1} + Z_{(5,6)A}} = \hat{I}_{max6}$$

Το ρεύμα αυτό λαμβάνει χώρα στα αριστερά του Μ/Σ απομόνωσης και είναι ανηγμένο στα 20kV, οπότε δεν χρειάζεται κάποια τροποποίηση.

Ο προσδιορισμός του μέγιστου τριφασικού βραχυκυκλώματος του σημείου 5 υπολογίζεται με βάση το ακόλουθο ισοδύναμο κύκλωμα.



Εικόνα 6.40 : Ισοδύναμο κύκλωμα υπολογισμού μέγιστου τριφασικού βραχυκυκλώματος του σημείου 5.

Όπου η τάση και αντίσταση ισοδύναμης πηγής είναι:

$$\hat{V}_{\pi\eta\gamma\eta\varsigma 2} = \frac{\hat{V}_{\pi\lambda\omicron\iota\omicron\upsilon}}{Z_{(5,6)A} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}} + \frac{\hat{V}_{\pi\lambda\omicron\iota\omicron\upsilon}}{Z_{(5,6)B} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}} +$$

$$\frac{\hat{V}_{\pi\lambda\omicron\iota\omicron\upsilon}}{Z_{(5,6)C} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}} + \frac{\hat{V}_{\pi\lambda\omicron\iota\omicron\upsilon}}{Z_{(5,6)D} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}} + \frac{\hat{V}_{\pi\lambda\omicron\iota\omicron\upsilon}}{Z_{(5,6)E} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}}$$

$$\frac{1}{Z_{\pi\eta\gamma\eta\varsigma 2}} = \frac{1}{Z_{(5,6)A} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}} + \frac{1}{Z_{(5,6)B} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}} +$$

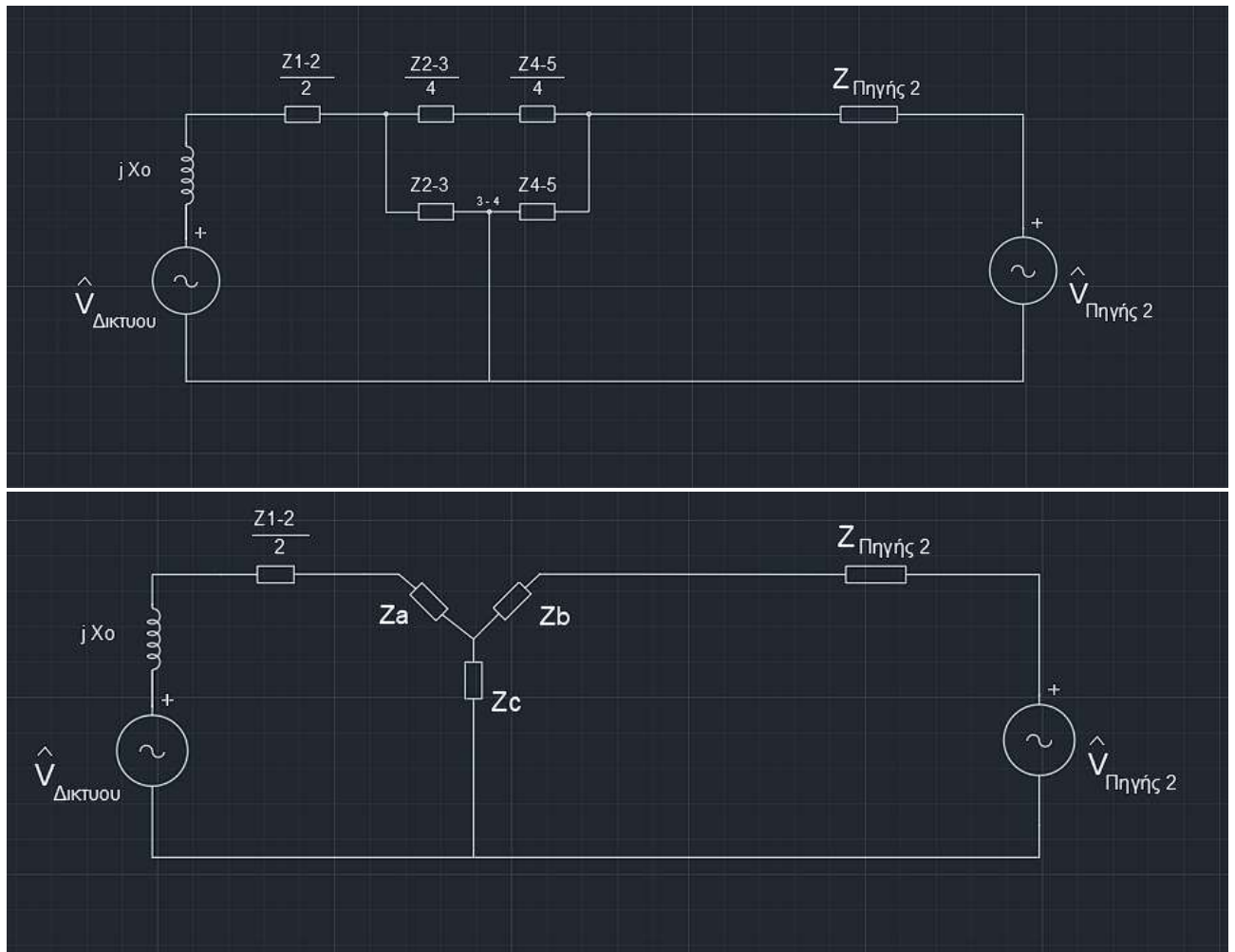
$$\frac{1}{Z_{(5,6)C} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}} + \frac{1}{Z_{(5,6)D} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}} + \frac{1}{Z_{(5,6)E} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10} + Z_{G/3}}$$

Έτσι για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 5 θα ισχύει:

$$\hat{I}_{sc5} = \frac{\hat{V}_{\Delta\iota\kappa\tau\upsilon\omicron}}{jX''_{d0} + Z_{(1,2)/2} + Z_{(2,3)/5} + Z_{(4,5)/5}} + \frac{\hat{V}_{\pi\eta\gamma\eta\varsigma 2}}{Z_{\pi\eta\gamma\eta\varsigma 2}} = \hat{I}_{max5}$$

Το ρεύμα αυτό που αντιστοιχεί στο ζυγό τροφοδοσίας των πλοίων του τερματικού και είναι ήδη ανηγμένο στα 20kV, οπότε δεν χρειάζεται κάποια τροποποίηση.

Όσον αφορά το μέγιστο τριφασικό ρεύμα βραχυκύκλωσης του σημείου 4 και 3 εκεί προκύπτει διαδοχικά το ακόλουθο ισοδύναμο κύκλωμα.



Εικόνα 6.41 : Διαδοχικό ισοδύναμο κύκλωμα υπολογισμού μέγιστου τριφασικού βραχυκυκλώματος του σημείου 3,4.

Όπου:

$$Z_a = \frac{\frac{Z_{2,3}+Z_{4,5}}{4} * Z_{2,3}}{\frac{Z_{2,3}+Z_{4,5}}{4} + Z_{2,3} + Z_{4,5}}, \quad Z_b = \frac{\frac{Z_{2,3}+Z_{4,5}}{4} * Z_{4,5}}{\frac{Z_{2,3}+Z_{4,5}}{4} + Z_{2,3} + Z_{4,5}}, \quad Z_c = \frac{Z_{4,5} * Z_{2,3}}{\frac{Z_{2,3}+Z_{4,5}}{4} + Z_{2,3} + Z_{4,5}}$$

Οπότε για το σημείο 4 και 3 διαμορφώνεται η ισοδύναμη τάση και αντίσταση ως εξής:

$$\hat{V}_{\Piηγής 3} = \frac{\frac{\hat{V}_{\Deltaικτύου}}{jX_{\Delta} + Z_{(1,2)}/2 + Z_a} + \frac{\hat{V}_{\Piηγής 2}}{Z_{\Piηγής 2} + Z_b}}{\frac{1}{jX_{\Delta} + Z_{(1,2)}/2 + Z_a} + \frac{1}{Z_{\Piηγής 2} + Z_b}}$$

$$\frac{1}{Z_{\Piηγής 3}} = \frac{1}{jX_{\Delta} + Z_{(1,2)}/2 + Z_a} + \frac{1}{Z_{\Piηγής 2} + Z_b}$$

Έτσι για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 4 και 3 θα ισχύει:

$$\hat{I}_{sc4,3} = \frac{\hat{V}_{\Piηγής 3}}{Z_{\Piηγής 3} + Z_c} = \hat{I}_{sc3} = \hat{I}_{sc4}$$

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Το ρεύμα αυτό αντιστοιχεί στα 20kV, οπότε χρειάζεται να γίνει μια τροποποίηση για το σημείο 3 και 4, ώστε να προκύψουν τα αντίστοιχα πραγματικά ρεύματα.

Πιο συγκεκριμένα για το σημείο 3 γίνεται αναγωγή στο δευτερεύον του Μ/Σ (1) στα 1,725kV:

$$\hat{I}_{max3} = \frac{20000}{1725} * \hat{I}_{sc4,3}$$

Ενώ για το σημείο 4 γίνεται αναγωγή στο πρωτεύον του Μ/Σ (2) στα 2,3kV:

$$\hat{I}_{max4} = \frac{20000}{2300} * \hat{I}_{sc4,3}$$

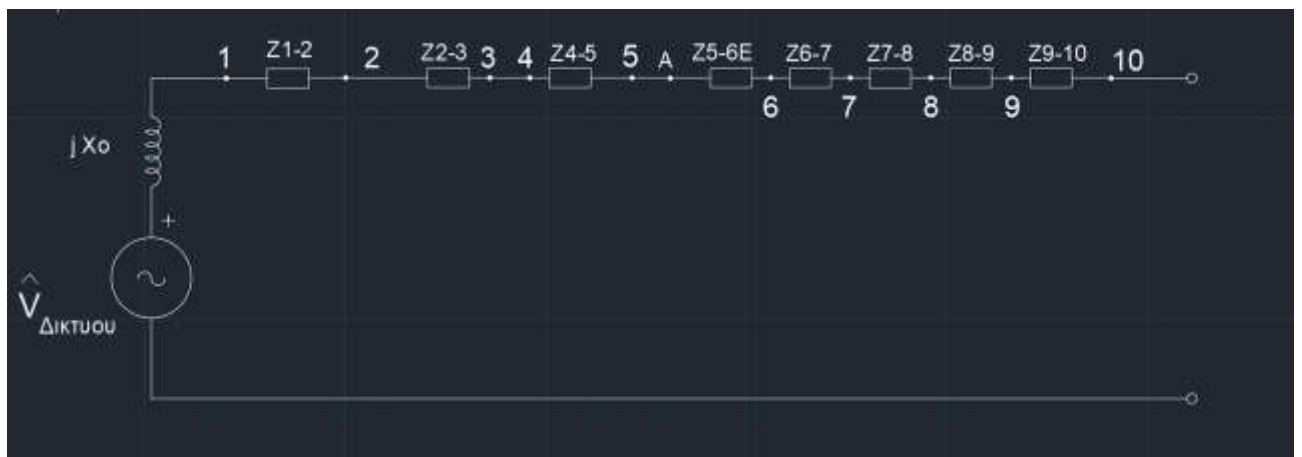
Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 2 της γραμμής του δικτύου ισχύει:

$$\hat{I}_{sc2} = \frac{\hat{V}_{\Deltaικτυου}}{jX_{\Delta} + Z_{(1,2)/2}} + \frac{\hat{V}_{\Piηγής3}}{Z_{\Piηγής2} + Z_{(2,3)/5} + Z_{(4,5)/5}} = \hat{I}_{max2}$$

Και τέλος για το σημείο 1 της γραμμής του δικτύου ισχύει:

$$\hat{I}_{sc1} = \frac{\hat{V}_{\Deltaικτυου}}{jX_{\Delta}} + \frac{\hat{V}_{\Piηγής3}}{Z_{\Piηγής2} + Z_{(1,2)/2} + Z_{(2,3)/5} + Z_{(4,5)/5}} = \hat{I}_{max1}$$

Απαραίτητο είναι ακόμα να προσδιοριστούν και τα αντίστοιχα ελάχιστα τριφασικά ρεύματα βραχυκύκλωσης των παραπάνω σημείων. Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται το δίκτυο χωρίς καθόλου γεννήτριες, δηλαδή όταν δεν υπάρχει κανένα πλοίο στις θέσεις διασύνδεσης. Σε αυτή την περίπτωση τα βραχυκυκλώματα των σημείων 10, 9, 8, 7, 6 θεωρούνται πως λαμβάνουν χώρα στην γραμμή E, η οποία παρουσιάζει και το μεγαλύτερο μήκος. Τότε το ισοδύναμο κύκλωμα προκύπτει ως εξής.



Εικόνα 6.42 : Ισοδύναμο κύκλωμα προς εύρεση ελάχιστων τριφασικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 10 της γραμμής E ισχύει:

$$\hat{I}_{10} = \frac{\hat{V}_{\Deltaικτυου}}{jX_{d0} + Z_{1,2} + Z_{2,3} + Z_{4,5} + Z_{(5,6)E} + Z_{6,7} + Z_{7,8} + Z_{8,9} + Z_{9,10}}$$

Καθώς όμως αυτό το ρεύμα είναι το ανηγμένο στα 20kV, το πραγματικό θα είναι το αντίστοιχο των 6,6kV. Άρα:

$$\hat{I}_{min10} = \frac{20000}{6600} * \hat{I}_{10}$$

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 9 της γραμμής E ισχύει:

$$\hat{I}_9 = \frac{\hat{V}_{\Delta\iota\kappa\tau\omicron\upsilon}}{jX_{d0}+Z_{1,2}+Z_{2,3}+Z_{4,5}+Z_{(5,6)E}+Z_{6,7}+Z_{7,8}+Z_{8,9}}$$

Καθώς όμως αυτό το ρεύμα είναι το ανηγμένο στα 20kV, το πραγματικό θα είναι το αντίστοιχο των 6,6kV. Άρα:

$$\hat{I}_{min9} = \frac{20000}{6600} * \hat{I}_9$$

Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 8 της γραμμής E ισχύει:

$$\hat{I}_8 = \frac{\hat{V}_{\Delta\iota\kappa\tau\omicron\upsilon}}{jX_{d0}+Z_{1,2}+Z_{2,3}+Z_{4,5}+Z_{(5,6)E}+Z_{6,7}+Z_{7,8}}$$

Καθώς όμως αυτό το ρεύμα είναι το ανηγμένο στα 20kV, το πραγματικό θα είναι το αντίστοιχο των 6,6kV. Άρα:

$$\hat{I}_{min8} = \frac{20000}{6600} * \hat{I}_8$$

Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 7 της γραμμής E ισχύει:

$$\hat{I}_7 = \frac{\hat{V}_{\Delta\iota\kappa\tau\omicron\upsilon}}{jX_{d0}+Z_{1,2}+Z_{2,3}+Z_{4,5}+Z_{(5,6)E}+Z_{6,7}}$$

Καθώς όμως αυτό το ρεύμα είναι το ανηγμένο στα 20kV, το πραγματικό θα είναι το αντίστοιχο των 6,6kV. Άρα:

$$\hat{I}_{min7} = \frac{20000}{6600} * \hat{I}_7$$

Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 6 της γραμμής E ισχύει:

$$\hat{I}_6 = \frac{\hat{V}_{\Delta\iota\kappa\tau\omicron\upsilon}}{jX_{d0}+Z_{1,2}+Z_{2,3}+Z_{4,5}+Z_{(5,6)E}} = \hat{I}_{min10}$$

Καθώς το ρεύμα είναι το ανηγμένο στα 20kV δεν χρειάζεται τροποποίηση.

Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 5 του ζυγού ισχύει:

$$\hat{I}_5 = \frac{\hat{V}_{\Delta\iota\kappa\tau\omicron\upsilon}}{jX_{d0}+Z_{1,2}+Z_{2,3}+Z_{4,5}} = \hat{I}_{min5}$$

Καθώς το ρεύμα είναι το ανηγμένο στα 20kV δεν χρειάζεται τροποποίηση.

Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 4,3 ισχύει:

$$\hat{I}_{4,3} = \frac{\hat{V}_{\Delta\iota\kappa\tau\omicron\upsilon}}{jX_{d0}+Z_{1,2}+Z_{2,3}}$$

Καθώς όμως αυτό το ρεύμα είναι το ανηγμένο στα 20kV, το πραγματικό για το σημείο 4 θα είναι το αντίστοιχο των 2,3 kV. Άρα:

$$\hat{I}_{min4} = \frac{20000}{2300} * \hat{I}_{4,3}$$

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Και ομοίως το πραγματικό ρεύμα για το σημείο 3 θα είναι το αντίστοιχο των 1,725kV. Άρα:

$$\hat{I}_{min3} = \frac{20000}{1725} * \hat{I}_{4,3}$$

Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 2 της γραμμής του δικτύου ισχύει:

$$\hat{I}_2 = \frac{V_{\Delta\iota\kappa\tau\omicron\upsilon}}{jX_{d0} + Z_{1,2}} = \hat{I}_{min2}$$

Καθώς το ρεύμα είναι το ανηγμένο στα 20kV δεν χρειάζεται τροποποίηση.

Για το βραχυκύκλωμα στο σημείο 1 της γραμμής του δικτύου ισχύει:

$$\hat{I}_1 = \frac{V_{\Delta\iota\kappa\tau\omicron\upsilon}}{jX_{d0}} = \hat{I}_{min1}$$

Καθώς το ρεύμα είναι το ανηγμένο στα 20kV δεν χρειάζεται τροποποίηση.

Λόγω των εκτεταμένων πράξεων των παραπάνω υπολογισμών, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 6.12 προέκυψαν μέσω της κωδικοποίησης των υπολογισμών αυτών στο πρόγραμμα του Matlab. Οι κώδικες των υπολογισμών παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα 2.

Σημείο Βραχυκυκλώματος	Στοιχεία που συμμετέχουν στο βραχυκύκλωμα από την μεριά του πλοίου	Μέγιστο Ρεύμα τριφασικού Βραχυκυκλώματος	Μέγιστο Κρουστικό Ρεύμα τριφασικού Βραχυκυκλώματος
		Isc max [kA]	Ip max [kA]
10A	Συνολικό φορτίο πλοίου	22,7296	64,2890
9A	Συνολικό φορτίο πλοίου Γραμμή πλοίου εσωτερική	22,6491	64,0613
8A	Συνολικό φορτίο πλοίου Γραμμή πλοίου εσωτερική Γραμμή πλοίου εναέρια	22,6112	63,9541
7A	Συνολικό φορτίο πλοίου Γραμμή πλοίου εσωτερική Γραμμή πλοίου εναέρια Γραμμή πλοίου υπόγεια	22,5933	63,9035
6A	Συνολικό φορτίο πλοίου Γραμμή πλοίου εσωτερική Γραμμή πλοίου εναέρια Γραμμή πλοίου υπόγεια Μετασχηματιστής απομόνωσης 3	16,0254	45,3267

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

5	Συνολικό φορτίο πλοίου Γραμμή πλοίου εσωτερική Γραμμή πλοίου εναέρια Γραμμή πλοίου υπόγεια Μετασχηματιστής απομόνωσης Γραμμή τροφοδοσίας x 5 Όλα τα στοιχεία που αναγραφονται για το σημείο συνολικά και από τις 5 γραμμές τροφοδοσίας πλοίων (A, B, C, D, E)	17,2576	48,8119
4	Όλα τα στοιχεία του σημείου 5 Μετασχηματιστής 2 (x 5)	60,8125	172,0037
3	Όλα τα στοιχεία του σημείου 5 Μετασχηματιστής 2 (x 5)	81,0834	229,3385
2	Όλα τα στοιχεία του σημείου 5 Μετασχηματιστής 2 (x 5) Μετασχηματιστής 1 (x 5)	21,4188	60,5815
1	Όλα τα στοιχεία του σημείου 5 Μετασχηματιστής 2 (x 5) Μετασχηματιστής 1 (x 5) Γραμμή δικτύου (x 2)	21,5299	60,8958

Πίνακας 6.12 : Καταγραφή των μέγιστων και των αντίστοιχων κρουστικών ρευμάτων των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων σε διάφορα πιθανά σημεία του δικτύου λιμανιού του Ταλίν.

Σημείο Βραχυκυκλώματος	Στοιχεία που συμμετέχουν στο βραχυκύκλωμα	Ελάχιστο Ρεύμα τριφασικού Βραχυκυκλώματος	Ελάχιστο Κρουστικό Ρεύμα τριφασικού Βραχυκυκλώματος
		Isc min [kA]	I <sub>p</sub> min [kA]
10E	Συνολικό φορτίο πλοίου	4,1901	11,8514
9E	Συνολικό φορτίο πλοίου Γραμμή πλοίου εσωτερική	4,2183	11,9312
8E	Συνολικό φορτίο πλοίου Γραμμή πλοίου εσωτερική Γραμμή πλοίου εναέρια	4,2333	11,9736
7E	Συνολικό φορτίο πλοίου Γραμμή πλοίου εσωτερική Γραμμή πλοίου εναέρια Γραμμή πλοίου υπόγεια	4,2405	11,9939



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

6E	Συνολικό φορτίο πλοίου Γραμμή πλοίου εσωτερική Γραμμή πλοίου εναέρια Γραμμή πλοίου υπόγεια Μετασχηματιστής απομόνωσης 3	2,0506	5,8000
5	Συνολικό φορτίο πλοίου Γραμμή πλοίου εσωτερική Γραμμή πλοίου εναέρια Γραμμή πλοίου υπόγεια Μετασχηματιστής απομόνωσης Γραμμή τροφοδοσίας x 5 Όλα τα στοιχεία που αναγράφονται για το σημείο συνολικά και από τις 5 γραμμές τροφοδοσίας πλοίων(A, B, C, D, E)	2,0791	5,8806
4	Όλα τα στοιχεία του σημείου 5 Μετασχηματιστής 2 (x 5)	31,9401	90,3402
3	Όλα τα στοιχεία του σημείου 5 Μετασχηματιστής 2 (x 5)	42,5868	120,4537
2	Όλα τα στοιχεία του σημείου 5 Μετασχηματιστής 2 (x 5) Μετασχηματιστής 1 (x 5)	15,7262	44,4804
1	Όλα τα στοιχεία του σημείου 5 Μετασχηματιστής 2 (x 5) Μετασχηματιστής 1 (x 5) Γραμμή δικτύου (x 2)	15,9890	45,2237

Πίνακας 6.13 : Καταγραφή των ελάχιστων και των αντίστοιχων κρουστικών ρευμάτων των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων σε διάφορα πιθανά σημεία του δικτύου λιμανιού του Ταλίν.

Με δεδομένα τα μέγιστα ρεύματα βραχυκύκλωσης των καλωδίων πρέπει στη συνέχεια να γίνει και ο έλεγχος της διατομής των καλωδίων αυτών. Χρειάζεται δηλαδή να εξεταστεί αν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αγωγών που επιλέχτηκαν στην προδιαστασιολόγηση ικανοποιούν ταυτόχρονα τα κριτήρια της πτώσης τάσης, του θερμικού ορίου και του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Έτσι, σύμφωνα με τους Πίνακες 13 και 14 του παραρτήματος 1, συμπληρώνονται οι ακόλουθοι Πίνακας 6.14α, 6.14β, στους οποίους καταγράφονται οι βέλτιστες τελικές διατομές των καλωδίων της εγκατάστασης του λιμανιού του Ταλίν.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Σημείο της εγκατάστασης όπως φαίνεται από το μονογραμμικό διάγραμμα	Μήκος καλωδίων L(m)	Τάση (kV)	Αρχική επιλεχθείσα διατομή S(mm <sup>2</sup> )	Ρεύμα βραχυκύκλωσης από υπολογισμούς (kA)	Ονομαστικό ρεύμα καλωδίου (θερμικό όριο) (A) από υπολογισμούς	Πτώση τάσης καλωδίου (ΔV%) από υπολογισμούς	Μέγιστο Ρεύμα βραχυκύκλωσης καλωδίου από κατασκευαστή (kA)	Ονομαστικό ρεύμα καλωδίου από κατασκευαστή (θερμικό όριο)(A)	Επιτρεπόμενη πτώσης τάσης καλωδίων ΔV (%)	Έλεγχος διατομής με βάση το ρεύμα βραχυκύκλωσης, το θερμικό όριο και την πτώση τάσης του καλωδίου
9A	100	6.6	<b>300</b>	22,649	673,983	0,179 %	34,5	715	6%	<b>Αποδεκτή</b> (και για τα 3 κριτήρια)
8A	50	6.6	<b>240</b>	22,611	545,858	0,091 %	27,6	627	6%	<b>Αποδεκτή</b> (και για τα 3 κριτήρια)
7A	25	6.6	<b>300</b>	22,593	545,858	0,036 %	34,5	601	6%	<b>Αποδεκτή</b> (και για τα 3 κριτήρια)
5 (A,B,C,D,E)	415 (A)	20	<b>35</b>	17,257	181,865	0,919%	5,02	189	6%	<b>Απορρίπτεται</b> (για το ρεύμα βραχυκύκλωσης)
	640 (B)	20	<b>35</b>	17,257	181,865	0,892%	5,02	189	6%	<b>Απορρίπτεται</b> (για το ρεύμα βραχυκύκλωσης)
	650 (C)	20	<b>35</b>	17,257	181,865	0,878%	5,02	189	6%	<b>Απορρίπτεται</b> (για το ρεύμα βραχυκύκλωσης)
	670 (D)	20	<b>35</b>	17,257	181,865	0,569%	5,02	189	6%	<b>Απορρίπτεται</b> (για το ρεύμα βραχυκύκλωσης)
	915 (E)	20	<b>35</b>	17,257	181,865	1,255%	5,02	189	6%	<b>Απορρίπτεται</b> (για το ρεύμα βραχυκύκλωσης)
1	200(x2)	20	<b>300</b>	21,529	577,350	0,102 %	43,1	601	6%	<b>Αποδεκτή</b> (και για τα 3 κριτήρια)

Πίνακας 6.14α : Έλεγχος για επιλογή διατομών των καλωδίων τις εγκατάστασης του Ταλίν (από προδιαστασιολόγηση).

Σημείο της εγκατάστασης όπως φαίνεται από το μονογραμμικό διάγραμμα	Μήκος καλωδίων L(m)	Τάση (kV)	Επιλεχθείσα διατομή 1ης επανάληψης S(mm <sup>2</sup> )	Ρεύμα βραχυκύκλωσης από υπολογισμούς (kA)	Ονομαστικό ρεύμα καλωδίου (θερμικό όριο) (A) από υπολογισμούς	Πτώση τάσης καλωδίου (ΔV%) από υπολογισμούς	Μέγιστο Ρεύμα βραχυκύκλωσης καλωδίου από κατασκευαστή (kA)	Ονομαστικό ρεύμα καλωδίου από κατασκευαστή (θερμικό όριο) (A)	Επιτρεπόμενη πτώσης τάσης καλωδίων ΔV (%)	Έλεγχος διατομής καλωδίων 1ης επανάληψης με βάση το ρεύμα βραχυκύκλωσης, το θερμικό όριο και την πτώση τάσης
9A	100	6.6	300	22,649	673,983	0,179 %	34,5	715	6%	<b>Αποδεκτή</b> (και για τα 3 κριτήρια)
8A	50	6.6	240	22,611	545,858	0,091 %	27,6	627	6%	<b>Αποδεκτή</b> (και για τα 3 κριτήρια)
7A	25	6.6	300	22,593	545,858	0,036 %	34,5	601	6%	<b>Αποδεκτή</b> (και για τα 3 κριτήρια))
5 (A,B,C,D,E)	415 (A)	20	150	17,263	181,865	0,214 %	21,5	410	6%	<b>Αποδεκτή</b> (και για τα 3 κριτήρια)
	640 (B)	20	150	17,263	181,865	0,208 %	21,5	410	6%	<b>Αποδεκτή</b> (και για τα 3 κριτήρια)
	650 (C)	20	150	17,263	181,865	0,205 %	21,5	410	6%	<b>Αποδεκτή</b> (και για τα 3 κριτήρια)
	670 (D)	20	150	17,263	181,865	0,133 %	21,5	410	6%	<b>Αποδεκτή</b> (και για τα 3 κριτήρια)
	915 (E)	20	150	17,263	181,865	0,293 %	21,5	410	6%	<b>Αποδεκτή</b> (και για τα 3 κριτήρια)
1	200(x2)	20	300	21,529	577,350	0,102 %	43,1	601	6%	<b>Αποδεκτή</b> (και για τα 3 κριτήρια)

Πίνακας 6.14β : Έλεγχος για τελική επιλογή διατομών των καλωδίων της εγκατάστασης του Ταλίν (1<sup>η</sup> Επανάληψη).

Στον έλεγχο που πραγματοποιείται στον πίνακα 6.14α διαπιστώνεται πως η διατομή του καλωδίου, που αντιστοιχεί στο σημείο 5 της εγκατάστασης και συνδέει τον διπλό ζυγό του τερματικού Α με τον μετασχηματιστή απομόνωσης της κάθε θέσης διασύνδεσης, δεν μπορεί να αντέξει το ρεύμα βραχυκύκλωσης που υπολογίστηκε και που θα διαρρεύσει σε περίπτωση σφάλματος. Έτσι σύμφωνα με τους πίνακες 13 και 14 του παραρτήματος πραγματοποιείται η 1<sup>η</sup> επανάληψη της συνολικής διαδικασίας και επιλέγεται η επόμενη διαθέσιμη διατομή που μπορεί να αντέξει το μέγιστο αναμενόμενο αυτό ρεύμα βραχυκύκλωσης. Επιπλέον γίνεται εκ νέου ο υπολογισμός του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης και της πτώσης τάσεως του καλωδίου της καινούργιας διατομής, μέσω της αντικατάστασης των νέων δεδομένων στους ήδη διαμορφωμένους κώδικες του Matlab και ελέγχονται ξανά τα τρία κριτήρια, όπως ορίζουν τα πρότυπα διαμόρφωσης ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

Όπως φαίνεται και στον πίνακα 6.14β αναλυτικά οι νέες διατομές που επιλέχθηκαν ικανοποιούν τα κριτήρια όποτε και δεν χρειάζεται να τροποποιηθούν περαιτέρω. Έτσι τα τελικά τεχνικά χαρακτηριστικά των καλωδίων του δικτύου διασύνδεσης ξηράς – πλοίου φαίνονται συγκεντρωτικά στα ακόλουθα μονογραμμικά διαγράμματα.

Γενικά κατά τη διεξαγωγή μιας πραγματικής μελέτης βραχυκυκλωμάτων ενός δικτύου, απαραίτητο είναι να εξεταστούν και τα διφασικά και τα μονοφασικά σφάλματα εξίσου αναλυτικά. Στην τρέχουσα εργασία όμως μελετώνται μόνο τα τριφασικά, καθώς είναι αυτά που, κατά κανόνα, παρουσιάζουν τα μέγιστα ρεύματα, ώστε να γίνει η διαστασιολόγηση των προστατευτικών διατάξεων του δικτύου του λιμανιού.

Τέλος σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα για τα μέγιστα ρεύματα των βραχυκυκλωμάτων και τους αντίστοιχους πίνακες τυποποιημένων αποζευκτών και διακοπών ισχύος (πίνακας 11 και 12 του παραρτήματος 1), προκύπτει τελικά και η ακόλουθη διάταξη προστασίας για τη συνολική εγκατάσταση του λιμανιού του Ταλίν. Αναλυτικότερα η τοποθέτηση των μέσων προστασίας φαίνεται και στο μονογραμμικό διάγραμμα που ακολουθεί.

Χρειάζεται να σημειωθεί πως οι δύο ασφάλειες, που τοποθετούνται στην αρχή του τερματικού Α στο καλώδιο του δικτύου της ΔΕΗ, αντιστοιχούν σε ασφάλειες των 40 Α, σύμφωνα με το πρότυπο. Επιπλέον οι διακόπτες ισχύος είναι όλοι τύποι SF6 και έχουν στο εσωτερικό τους εξαφθοριούχο θείο.

Καθώς δεν μεσολαβεί κάποιο φορτίο στα σημεία διασύνδεσης των διπλών ζυγών, οι διατάξεις προστασίας θα είναι ίδιες εκατέρωθεν του κάθε διπλού ζυγού. Ομοίως και στο σημείο 8, όπου γίνεται απλά η ένωση δύο καλωδίων και δεν μεσολαβεί κάποιο φορτίο, δεν τοποθετούνται στοιχεία προστασίας. Τέλος, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο μονογραμμικό διάγραμμα της συνολικής εγκατάστασης, όλες οι διατάξεις προστασίας που παρουσιάζονται για την γραμμή Α θα ισχύουν και για τις γραμμές Β, C, D, E, αφού όλες έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά και εξυπηρετούν όμοια φορτία.

Σημείο της εγκατάστασης όπως φαίνεται από το μονογραμμικό διάγραμμα	Αποζεύκτες				Διακόπτες Ισχύος			
	Συνολικός αριθμός για το κάθε σημείο	Τάση (kV)	Ονομ. ρεύμα (A)	Μέγιστο Ρεύμα βραχυκύκλωσης (kA)	Συνολικός αριθμός για το κάθε σημείο	Τάση (kV)	Ονομ. ρεύμα (A)	Μέγιστο Ρεύμα βραχυκύκλωσης (kA)
<b>10A</b>	x11	6.6	<b>600</b>	40	X5	6.6	<b>600</b>	25
<b>9A</b>	x2	6.6	<b>600</b>	40	x1	6.6	<b>600</b>	25
<b>7A</b>	x2	6.6	<b>600</b>	40	x1	6.6	<b>600</b>	25
<b>6A</b>	x1	20	<b>200</b>	40	x1	20	<b>200</b>	21
<b>5 και 5'</b>	x27	20	<b>200</b>	40	x11	20	<b>200</b>	21
<b>2 και 2'</b>	x18	20	<b>200</b>	40	x8	20	<b>630</b>	21
<b>1</b>	x10	20	<b>200</b>	40	x3	20	<b>630</b>	21

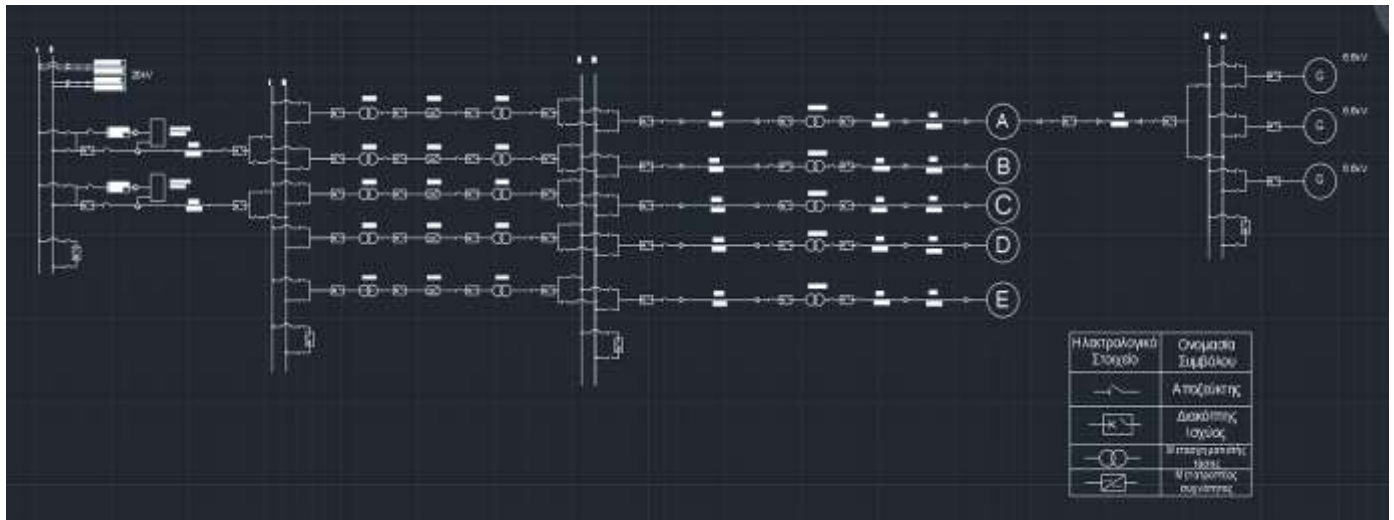
Πίνακας 6.15 : Συνολική καταγραφή μέσω προστασίας της εγκατάστασης του λιμανιού.

Γενικά, για απαιτήσεις ισχύος πάνω από αυτές τις τιμές που υπολογίστηκαν, το δίκτυο της ξηράς του Ταλίν δύσκολα μπορεί να ανταπεξέλθει, τόσο από άποψη παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και από άποψη διαθέσιμου χώρου. Για να είναι οποιοδήποτε λιμάνι σε θέση να ικανοποιήσει μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις, από τις ήδη υπάρχουσες, θα πρέπει να αναβαθμιστεί η ηλεκτρολογική του υποδομή και να αυξηθεί ταυτόχρονα το πλήθος των σημείων διασύνδεσης των πλοίων, όσο αυτό είναι εφικτό.

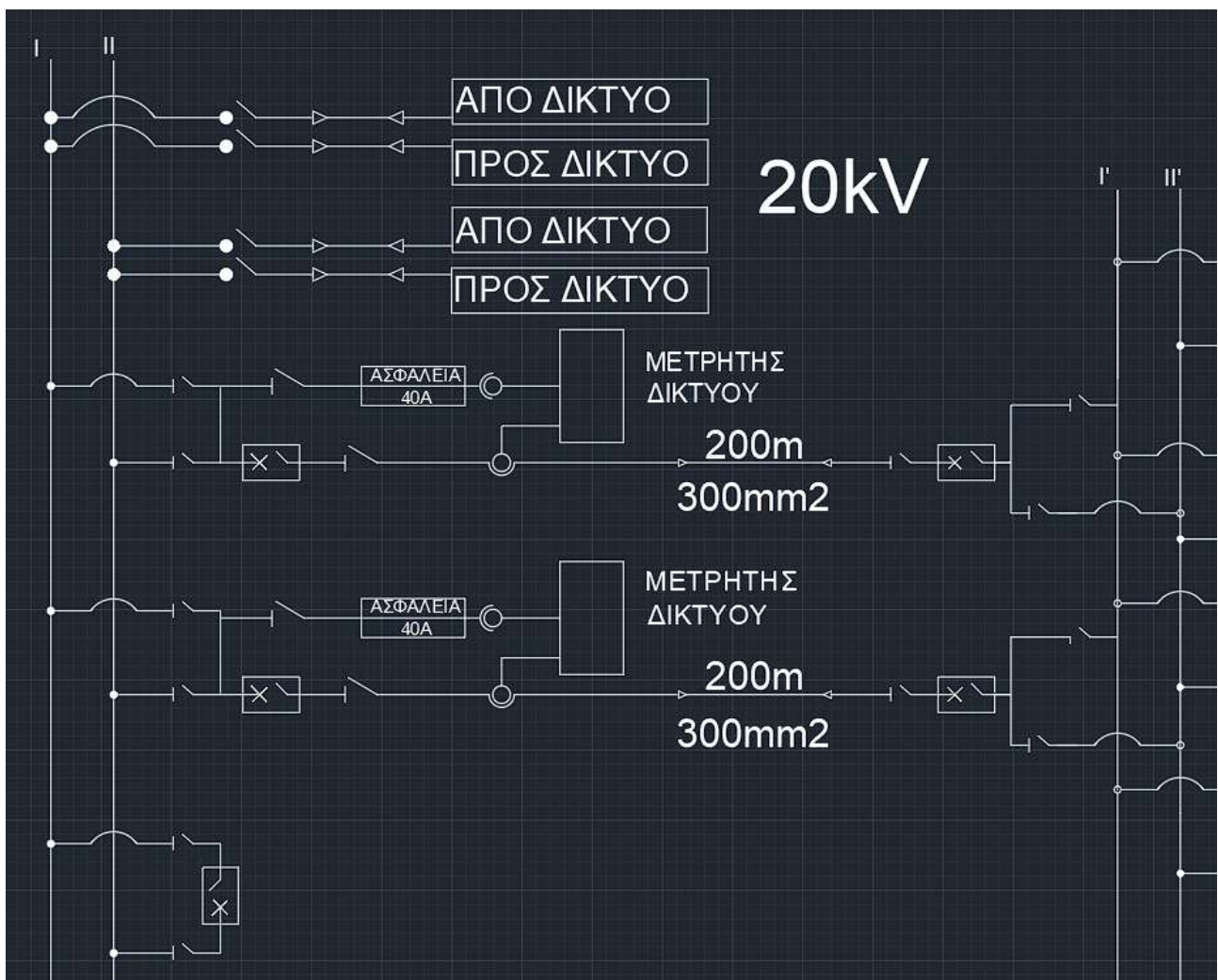
Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

## 6.9 Ανάπτυξη μονογραμμικού διαγράμματος

Στην συνέχεια παρουσιάζεται το μονογραμμικό σχέδιο ολόκληρης της εγκατάστασης διασύνδεσης πλοίων στο λιμάνι του Ταλίν, όπως αυτό διαμορφώθηκε από τους παραπάνω υπολογισμούς. Τα ακόλουθα σχέδια έχουν πραγματοποιηθεί στο πρόγραμμα του AutoCad.

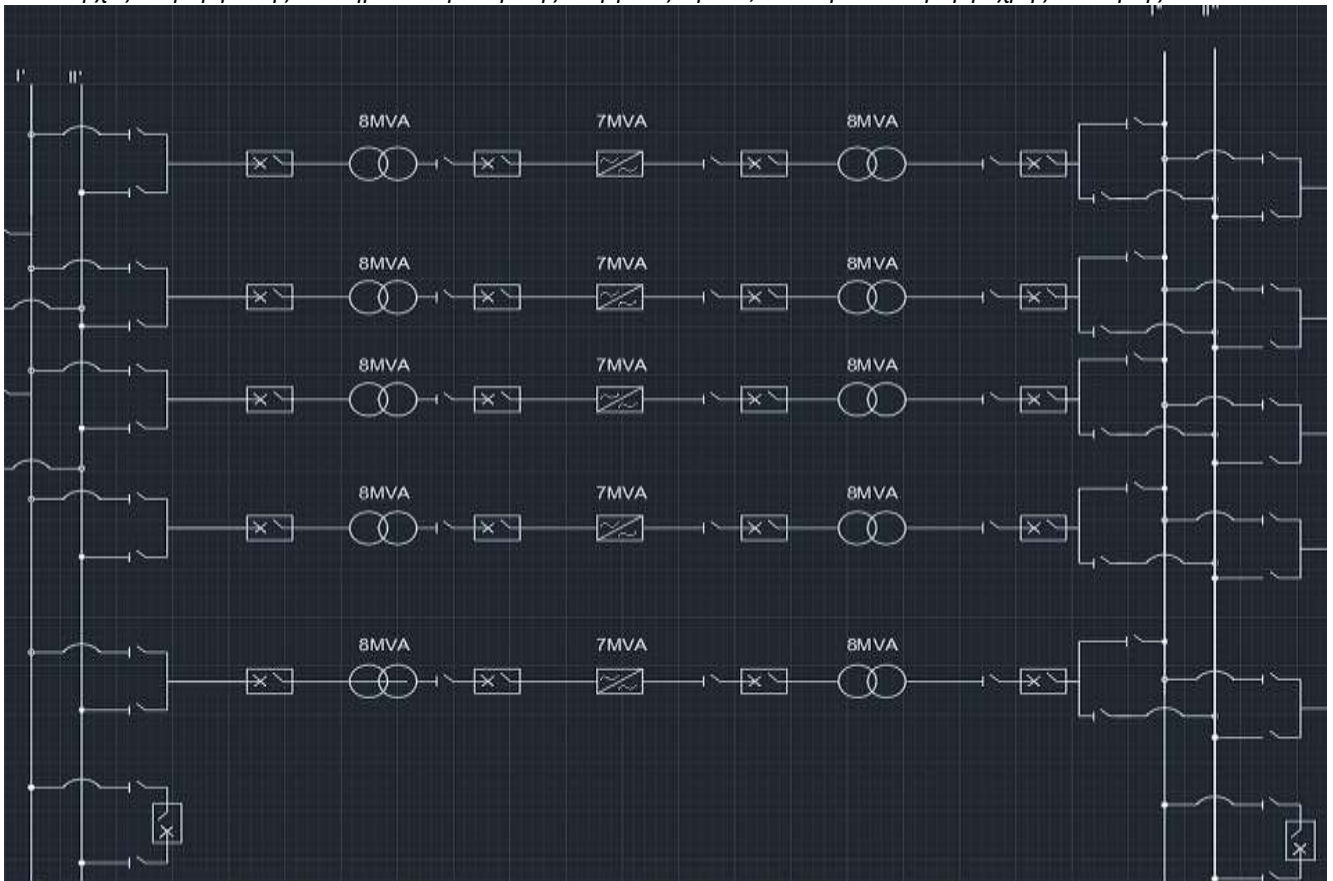


Σχήμα 6.1: Μονογραμμικό σχέδιο ολόκληρης της εγκατάστασης διασύνδεσης πλοίων στο λιμάνι του Ταλίν

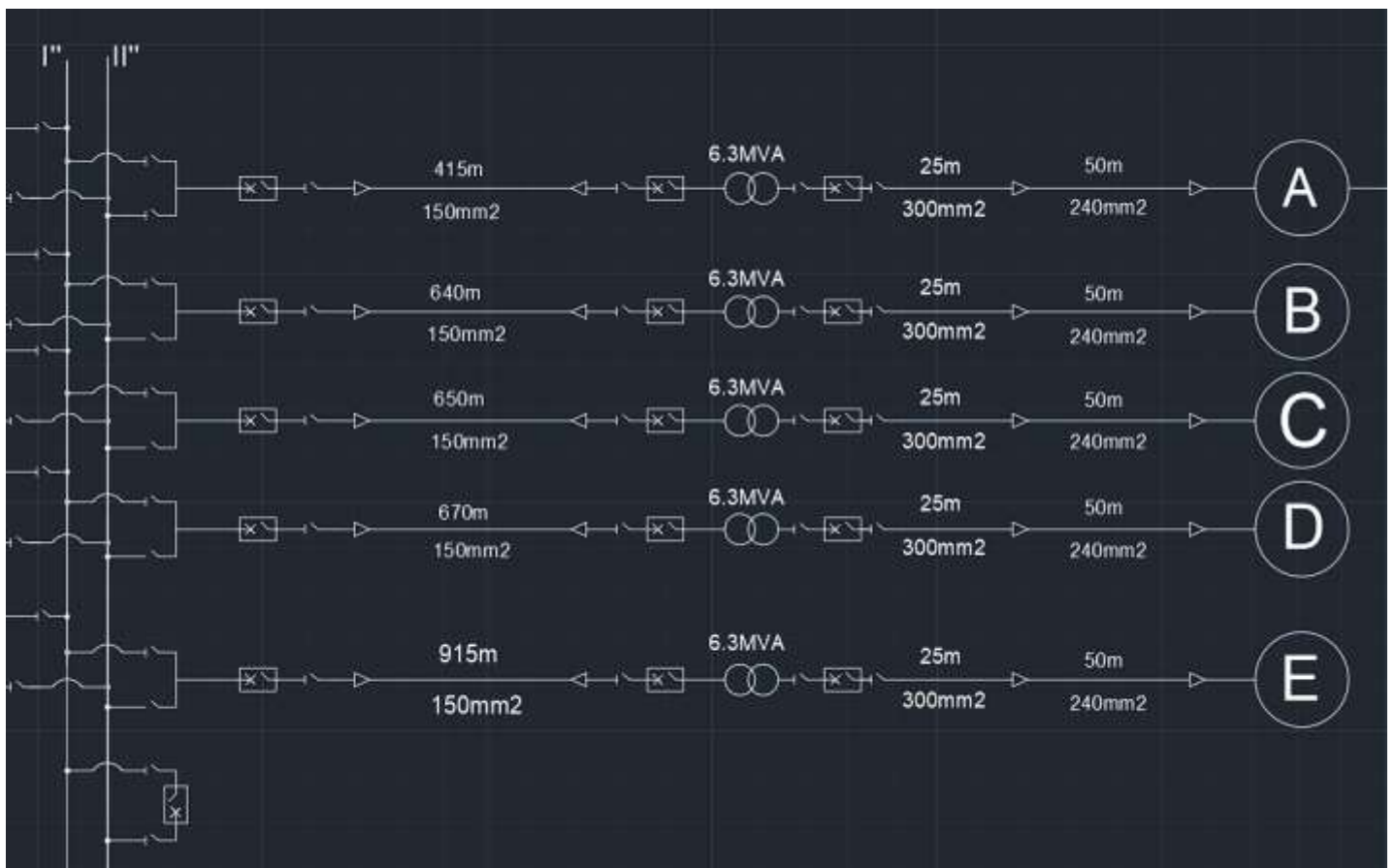


Σχήμα 6.2: Τμήμα διασύνδεσης του τερματικού με το τοπικό δίκτυο είναι το εξής:

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



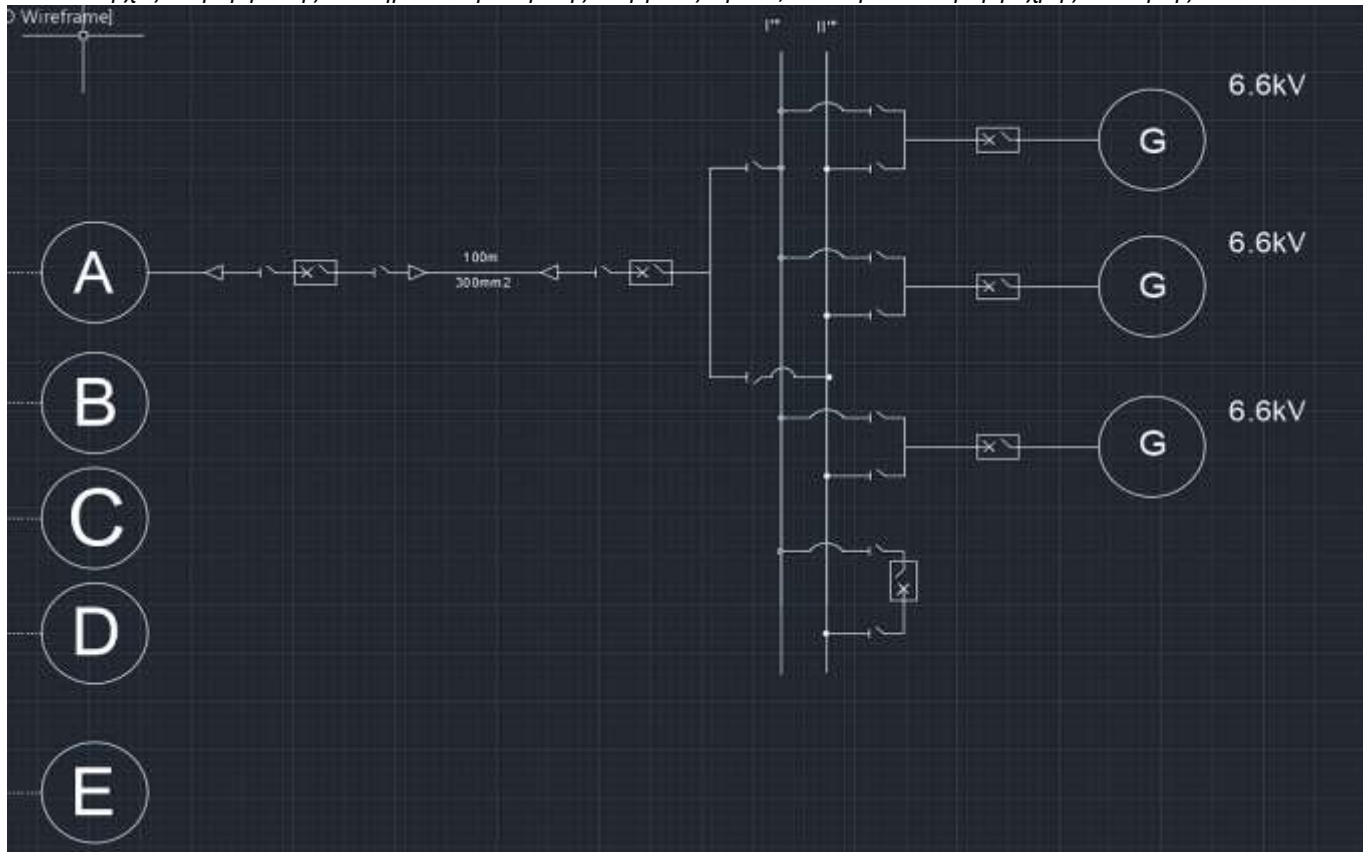
Σχήμα 6.3: Εσωτερική διάταξη του τερματικού υποσταθμού Α του λιμανιού του Ταλίν.



Σχήμα 6.4: Οι πέντε γραμμές τροφοδοσίας των πλοίων, όπως αυτές διαμορφώνονται από τους παραπάνω υπολογισμούς.



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.



Σχήμα 6.5: Σημεία διασύνδεσης και καλώδια τροφοδοσίας των γεννητριών των πλοίων. Σημειώνεται πως στις θέσεις B, C, D και E πραγματοποιείται ταυτόχρονα η ίδια διάταξη που εικονίζεται και για την θέση A.

Ηλεκτρολογικό Στοιχείο	Ονομασία Συμβόλου
	Αποζεύκτης
	Διακόπτης Ισχύος
	Μετασχηματιστής τάσης
	Μετατροπέας συχνότητας

Σχήμα 6.6 : Υπόμνημα συμβόλων για τα παραπάνω μονογραμμικά διαγράμματα.



## 6.10 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα των προηγούμενων παραγράφων μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα.

Αρχικά όσον αφορά την εκτίμηση ισχύος των ηλεκτρογεννητριών ενός σκάφους οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν, παρόλο που δεν ήταν οι ακριβέστερες δυνατές, έδωσαν μία πολύ καλή προσέγγιση για τα χαρακτηριστικά της κατηγορίας του εξεταζόμενου του πλοίου. Επιπλέον παρατηρείται πως υπάρχει μεγάλη διακύμανση της ζήτησης ισχύος ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας του πλοίου, η κατάσταση κανονικής πορείας παρουσιάζει υψηλότερο φορτίο, καθώς τότε λειτουργούν όλα τα βοηθητικά μηχανήματα πρόωσης του πλοίου. Σημαντικό όμως είναι και το ποσοστό της ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνεται όσο βρίσκεται το πλοίο στο λιμάνι.

Γι' αυτό με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα και τα ενδεικτικά μεγέθη των ηλεκτρολογικών στοιχείων του δικτύου του πλοίου μπορεί να διαμορφωθεί ένα σύστημα ηλεκτρικής διασύνδεσης με την ξηρά. Με αυτόν τον τρόπο, στο πλοίο παρατηρείται συνήθως κέρδος όσον αφορά το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, συγκριτικά με ένα απλό πλοίο που συνδέεται σε λιμάνι με σύστημα ψυχρής εκκίνησης.

Βέβαια απαιτούνται κάποιες προϋποθέσεις ώστε να είναι συμφέρουσα μία τέτοια επένδυση εγκατάστασης ψυχρής εκκίνησης. Οι προϋποθέσεις αυτές σχετίζονται με τις δυνατότητες του εκάστοτε λιμανιού και του τοπικού δικτύου της γύρω περιοχής. Έτσι για ένα τυπικό Ευρωπαϊκό λιμάνι διαμορφώθηκε το βέλτιστο δυνατό ηλεκτρολογικό σύστημα, μέσω της εξέτασης των σημαντικότερων παραμέτρων και της καταγραφής των συνηθέστερων φορτίων πλοίων. Στην πράξη υπάρχουν όμως πολλά περισσότερα φορτία και ιδιαιτερότητες ανάλογα με το είδος και την αποστολή τόσο του λιμανιού, όσο και του κάθε πλοίου που ελλιμενίζεται εκεί.

Επομένως ο μηχανικός βασισμένος σε όλα όσα καταγράφονται στους αντίστοιχους κανονισμούς μπορεί να διαμορφώσει και να εξελίξει τέτοια συστήματα που να ταιριάζουν σε άπειρα λιμάνια και ακόμα περισσότερα πλοία, ώστε να βελτιώνεται όλο και περισσότερο η σχέση του ανθρώπου με το θαλάσσιο περιβάλλον.

## **7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> : Γενικά συμπεράσματα και περιοχές για περαιτέρω έρευνα**

### **7.1 Γενικά συμπεράσματα**

Ο σύγχρονος κόσμος στοχεύει μέρα με τη μέρα όλο και περισσότερο την αξιοποίηση καινοτόμων ιδεών προς τη βελτίωση της ποιότητας ζωής του ανθρώπου, αλλά και την προστασία του πλανήτη, όπου φιλοξενείται. Έτσι στο θαλάσσιο τομέα, που είναι από τους σημαντικότερους για το παγκόσμιο εμπόριο και τη μετακίνηση, έχουν αυξηθεί αισθητά οι ανάγκες βελτίωσης προς όφελος του ανθρώπου, αλλά και του άμεσα επηρεαζόμενου περιβάλλοντος.

Έτσι εναλλακτικοί τρόποι μείωσης των εκπομπών από τα πλοία που βρίσκονται στη θάλασσα έχουν παραταχθεί στο τραπέζι της τεχνολογικής επανάστασης. Τέτοιες βελτιώσεις έρχονται σε υψηλή τιμή, επομένως οι επιχειρήσεις στο ναυτιλιακό τομέα παγκοσμίως πρέπει να επενδύσουν πολλά χρήματα στις απαραίτητες υποδομές για την υλοποίηση τέτοιων ιδεών.

Ο διεθνής ναυτιλιακός οργανισμός εργάζεται κυρίως για τον έλεγχο και τον περιορισμό των αερίων του θερμοκηπίου. Στην προσπάθειά του αυτή ένας καινούργιος, αλλά ισχυρός σύμμαχος είναι η μέθοδος της ψυχρής εκκίνησης πλοίων, που αποτελεί και το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Πιο αναλυτικά οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα των πλοίων θεωρούνται ότι προέρχονται από τις κύριες και βοηθητικές μηχανές, που είναι συνήθως ντιζελογεννήτριες. Οι γεννήτριες αυτές καταναλώνουν καύσιμα ώστε να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε όλα τα μηχανήματα του πλοίου. Έτσι τα μηχανήματα αυτά με τη σειρά τους συνεργάζονται, ώστε να πλέει το σκάφος με ασφάλεια και ταυτόχρονα να εκπληρώνονται οι επιχειρησιακές του απαιτήσεις.

Κατά την παραμονή του πλοίου όμως στο χώρο του λιμανιού η συσσώρευση των καυσαερίων από τις παραπάνω ενέργειες γίνεται όλο και πιο δυσάρεστη. Τη λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να τη δώσει η εφαρμογή της μεθόδου ψυχρής εκκίνησης στα ελλιμενισμένα αυτά πλοία. Το σύστημα ηλεκτροδότησης ελλιμενισμένων πλοίων παρουσιάζει γενικά τεράστια περιβαλλοντικά οφέλη. Στους χώρους των λιμανιών συγκεκριμένα μειώνει τις εκπομπές των αερίων ρύπων σε ποσοστό ως και 98%. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται λιμάνια με χώρους εργασίας καλύτερων προδιαγραφών, φιλικότερα προς το περιβάλλον αλλά και τους κατοίκους γύρω από αυτό.

Γενικά το σύστημα της ψυχρής εκκίνησης περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών ενός ελλιμενισμένου πλοίου, αλλά συμπληρώνεται και με υπηρεσίες απομάκρυνσης λυμάτων, σκουπιδιών, παροχής θερμότητας – ψύξης κ.α., ώστε να καλύπτονται επαρκώς λειτουργικές του απαιτήσεις.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι και η μείωση του συνολικού θορύβου από τις μεγάλες γεννήτριες των πλοίων. Αφού κατά την παραμονή τους στο λιμάνι αυτές δεν χρειάζεται να λειτουργούν, καθώς το τοπικό δίκτυο καλύπτει τις ηλεκτρικές απαιτήσεις όλων των συστημάτων του εκάστοτε πλοίου.

Τέλος ένα εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα που επηρεάζει κυρίως τους πλοιοκτήτες και τις μεγάλες ναυτιλιακές εταιρείες σχετίζεται με την εξοικονόμηση πετρελαίου, μιας και το κόστος της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων ολοένα και αυξάνεται. Ακόμα ως αποτέλεσμα της μειωμένης χρήσης των ηλεκτρογεννητριών των πλοίων είναι και η μειωμένη φθορά τους, άρα και η καθυστέρηση της διαδικασίας συντήρησής τους.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων. Καθώς όμως κάθε νόμισμα παρουσιάζει δύο όψεις, έτσι και η μέθοδος της ψυχρής εκκίνησης συνοδεύεται από κάποια μειονεκτήματα.

Αρχικά υπάρχει πρόβλημα με την επίδραση που θα έχει η αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος το τοπικό δίκτυο του λιμανιού. Βέβαια τέτοιου είδους θέματα λύνονται μέσω των αρχικών μελετών που πραγματοποιούνται κατά τη διαμόρφωση της εγκατάστασης. Έτσι εκτιμάται η συνολική επίδραση και παρουσιάζονται λύσεις αναβάθμισης και ενίσχυσης του τοπικού δικτύου και του δικτύου του λιμανιού, προκειμένου να διευκολυνθούν οι συνδέσεις με τα πλοία.

Ένα ακόμα μειονέκτημα αποτελεί και ο χώρος που απαιτείται από τους υποσταθμούς, τόσο στο χώρο της προβλήτας, όσο και στην εγκατάσταση που βρίσκεται πάνω στο πλοίο. Δυσάρεστο ακόμα για τις τοπικές αρχές κάθε λιμανιού μπορεί να είναι το κόστος συντήρησης, η εποπτεία και ο έλεγχος που γίνεται από το εξειδικευμένο προσωπικό του λιμανιού, καθώς και η εκτίμηση της διάρκειας ζωής της ηλεκτρολογικής υποδομής της εγκατάστασης.

## 7.2 Γενικά συμπεράσματα περιοχές για περαιτέρω έρευνα

Στην τρέχουσα διπλωματική εργασία πέρα από τον ενεργειακό ισολογισμό ενός ντιζελοκίνητου πλοίου εκπονείται και μία εμπειριστατωμένη ηλεκτρολογική μελέτη για την εγκατάσταση του συστήματος ψυχρής εκκίνησης στο λιμάνι του Ταλίν στην Εσθονία. Ο κύριος στόχος της μελέτης αυτής είναι η διαμόρφωση ενός συστήματος που να είναι ικανό να εξυπηρετήσει τις ηλεκτρικές ανάγκες των κρουαζιερόπλοιων που το επισκέπτονται. Η πραγματοποίηση μιας τέτοιας έρευνας χαρακτηρίζεται ευκολότερη σε σχέση με παλαιότερα καθώς όλες οι πληροφορίες δίνονται συγκεντρωτικά από τα πρότυπα. Επιπλέον υπάρχει και η απαραίτητη εμπειρία στο σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων καθώς όλο και περισσότερα λιμάνια ανά τον κόσμο εφαρμόζουν τη μέθοδο της ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη σχεδίαση μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι να συγκεντρωθούν οι αναγκαίες πληροφορίες της ζήτησης ισχύος των πλοίων κατά τον ελλιμενισμό τους, η τάση και η συχνότητα λειτουργίας των δικτύων τους, καθώς και οι διαθέσιμες παροχές των αντίστοιχων δικτύων του λιμανιού που εξετάζεται. Πιο συγκεκριμένα για να γίνει ακόμα πιο πλήρης η παραπάνω μελέτη μπορούν να αναλυθούν τα ακόλουθα πεδία:

- Αρχικά σαν συνέχεια της διπλωματικής αυτής εργασίας θα μπορούσε να γίνει η αντίστοιχη μελέτη του ενεργειακού ισολογισμού και άλλων ειδών πλοίων όπως εμπορευματοκιβωτίων ή πετρελαιοφόρων. Με αυτόν τον τρόπο λιμάνια, όπως αυτό του Ταλίν, θα είναι σε θέση να γνωρίζουν τις απαιτήσεις όλων των πλοίων που μπορεί να τα επισκεφτούν και έτσι να διαμορφώσουν ένα σύστημα που να τροφοδοτεί ακόμα μεγαλύτερη γκάμα πιθανών φορτίων. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να απαλλαγεί οριστικά όλη η ευρύτερη περιοχή του λιμανιού από τους επιβλαβείς ρύπους των πλοίων.
- Με τον ίδιο τρόπο θα μπορούσαν να μελετηθούν και άλλα ευρωπαϊκά λιμάνια ώστε να επεκταθεί περαιτέρω η εγκατάσταση της ψυχρής εκκίνησης ανά τον κόσμο. Εξάλλου, με τη βοήθεια των σύγχρονων προγραμμάτων προσομοίωσης των δικτύων οι διαδικασίες μελέτης γίνονται πιο εύκολες και γρήγορες στις μέρες μας. Οπότε θα μπορούσε κάποιος να αναπτύξει ένα σχετικό κώδικα υπολογισμών ροής φορτίου υπό ομαλές συνθήκες και υπό συνθήκες σφάλματος.

- Όπως για παράδειγμα, στην παρούσα εργασία έγινε χρήση του λογισμικού του Matlab για την επίλυση των δύσκολων υπολογισμών των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων του δικτύου του λιμανιού, έτσι και σε πιο λεπτομερείς και εκτεταμένες μελέτες μπορούν οι μηχανικοί μέσα από εξελιγμένα προγράμματα προσομοίωσης να υπολογίσουν και άλλες παραμέτρους που χρειάζονται ώστε να διαμορφωθεί τελικά η εκάστοτε εγκατάσταση. Τέτοιες μελέτες μπορεί να εξετάζουν επιπλέον και τα άλλα είδη βραχυκυκλωμάτων, όπως τα μονοφασικά και τα διφασικά βραχυκυκλώματα, τα οποία δεν αναλύονται στην τρέχουσα διπλωματική εργασία. Ο λόγος που αξίζει να μελετηθούν και αυτά τα είδη σφαλμάτων είναι κυρίως το γεγονός πως σε κάποιες περιπτώσεις παρουσιάζουν εξίσου υψηλά ρεύματα, που δεν πρέπει να αγνοηθούν στην τελική διαστασιολόγηση των στοιχείων. Επιπλέον τα όρια των ρευμάτων βραχυκύκλωσης χρειάζονται για τη διαστασιολόγηση και τη ρύθμιση των αυτόματων διακοπών ισχύος.
- Σαν εναλλακτικά σενάρια μελέτης μπορούν να αναλυθούν και οι περιπτώσεις όπου το δίκτυο του λιμανιού τροφοδοτεί ταυτόχρονα πολλά πλοία διαφορετικών χαρακτηριστικών και απαιτήσεων. Έτσι συγκεντρώνονται παραπάνω περιπτώσεις τροφοδότησης και το δίκτυο του λιμανιού σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να προσαρμόζεται ειδικά για κάθε μία από αυτές.
- Επιπλέον, πέρα από τα στοιχεία διαμόρφωσης της εγκατάστασης του ηλεκτρικού δικτύου ενός λιμανιού, απαραίτητη είναι και η τεchnοοικονομική αξιολόγηση της ψυχρής εκκίνησης, που πρόκειται να εφαρμοστεί. Κάθε εγκατάσταση οφείλει να προσαρμοστεί στο λιμάνι και στις ηλεκτρικές δυνατότητες του ευρύτερου τοπικού δικτύου που απευθύνεται. Επομένως χρειάζεται να γνωρίζουν οι τοπικές αρχές κάθε λιμανιού το κόστος καθώς και τον τρόπο που η εγκατάσταση θα συνδέεται με το τοπικό δίκτυο. Για παράδειγμα υπάρχει σημαντική διαφορά στο κόστος και στην διαμόρφωση της συνολικής εγκατάστασης στην περίπτωση όπου αυτή τροφοδοτείται από το τοπικό δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας του λιμανιού, από ένα σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) της ευρύτερης περιοχής ή μέσω ειδικών συσσωρευτών.
- Τέλος ανάλογα με τα πλοία που προσδένουν σε κάθε λιμάνι, μέσω του συστήματος ψυχρής εκκίνησης, χρειάζεται να γίνει και η αντίστοιχη μελέτη του βέλτιστου τρόπου λειτουργίας των μονάδων ξηράς σε συνεργασία με τις αντίστοιχες μονάδες των πλοίων. Σε κάποιες περιπτώσεις δηλαδή υπάρχει το ενδεχόμενο να χρειάζεται να λειτουργούν σε ένα ποσοστό οι γεννήτριες καυσίμων των πλοίων και κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας από το λιμάνι. Για παράδειγμα πλοία, όπως τα υγραεριοφόρα (LNG), ενδέχεται να πρέπει να καίνε διαρκώς στις μηχανές τους μέρος διαφεύγοντος φυσικού αερίου, προκειμένου αυτό να μην καταλήξει στην ατμόσφαιρα. Έτσι απαιτούνται περαιτέρω διαμορφώσεις στο συνολικό σύστημα, ώστε αυτό να λειτουργεί σωστά κάτω από τέτοιες συνθήκες.

## Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

1. H.K. Woud, D. Stapersma: “Design of propulsion and electric power generation systems”, Publications IMAREST, 1<sup>η</sup> έκδοση 2002, επανατύπωση 2008.
2. Χ.Α. Φραγκόπουλος, Ι. Προυσαλίδης: «Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου», Εκδόσεις daVinci, Αθήνα 2019.
3. Μ.Ο. Kritikos: “A cold ironing feasibility study and cost benefit analysis”, Diploma Thesis,
4. School of Naval Architecture and Marine Engineering, National Technical University of Athens, June 2017.
5. Γ. Ι. Τσεκούρας: «Μονοφασικά εναλλασσόμενα κυκλώματα ημιτονοειδούς μόνιμης κατάστασης», ΠΑΔΑ, 2018.
6. Πρόωση-πλοίου: <https://el.wikipedia.org/wiki>
7. Κατασκευαστική εξέλιξη συστημάτων πλοίων: <http://elzoni.gr/html/ent/459/ent.42459.asp>
8. Α.Γ. Βλάχος: «Ηλεκτρικές μηχανές – Τόμος Β», Αθήνα 2016, Ευγενίδειο ίδρυμα.
9. <http://b2green.gr/el/post/82926/to-sos-apo-ton-imo-gia-tis-ekpompes-aerion>
10. ABB: “System project guide for passenger vessels”, 2011
11. Ηλίας Μπέλλος: Στο «Κόκκινο» οι ρύποι από τα κρουαζιερόπλοια, Η Καθημερινή, 30/06/2019.
12. Γεώργιος Ι. Τσεκούρας, Δρ.Γ.Καλοκύρης, Γ.Τσαμόπουλος: Εργαστηριακές Σημειώσεις «Θεωρία Κυκλωμάτων Ιβ» – Τόμος Α, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.
13. ABB Review – ABB Group Technical Magazine: Ηλεκτροδότηση Ελλιμενισμένων Πλοίων, Σεπτέμβριος 2011.
14. <http://oaedhlectrologoi.blogspot.com>
15. <http://Indiamark.com/proddetail/high-voltage-power-transformer.html>
16. Τσιλίρης Χριστόδουλος: Διατάξεις υποσταθμών σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων – λιμανιών, Εμπορικό Ναυτικό Κρήτης, 2016.
17. Καραφουλίδης Πασχάλης: Ανάλυση της διαδικασίας ηλεκτροδότησης ελλιμενισμένων πλοίων από την ξηρά και εφαρμογή σε λιμάνια της Κρήτης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013.
18. Πυκνωτής αντιστάθμισης άεργου ισχύος ξηρού τύπου: <http://ergo-tel.gr>
19. Γ. Ι. Τσεκούρας: «Μέρος Ε – Κεφάλαιο 2 – Πρόβλεψη φορτίου και ενέργειας» σημειώσεις στο μάθημα «Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας» του 5<sup>ου</sup> εξαμήνου, Τ.Ε.Ι. Αθήνας, Τμήμα Μηχανικών Ενεργειακής Τεχνολογίας Τ.Ε.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

20. Πέτρος Ντοκόπουλος: «Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης», Εκδόσεις Ζήτη, 1992.
21. Γ. Ι. Τσεκούρας: «4ο κεφάλαιο- Βασικά θεωρήματα ηλεκτροτεχνίας», ΠΑΔΑ, 2018.
22. Μ.Π. Παπαδόπουλος: «Προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας», Εκδόσεις ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα, 1997.
23. Καρραρήγα Μυρσίνη: «Αρχές λειτουργίας διατάξεων προστασίας υπερεντάσεων και σχεδίασης ηλεκτρικών δικτύων πολεμικών πλοίων», Διπλωματική εργασία, Μάιος 2017.
24. A. Ter. Gazarian: “Energy storage for power systems”, Peter Peregrinus Ltd, IEE, 1994.
25. Κ. Κριτωτάκης: «Εισαγωγή στην Προστασία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2012.
26. Γ. Ι. Τσεκούρας: «6ο κεφάλαιο- Πολυφασικά εναλλασσόμενα συστήματα», ΣΝΔ, 2011.
27. ABB, “Switchgear Manual”, 10<sup>th</sup> edition.
28. Β.Κ. Παπαδιάς: «Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος Ι, Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας», Αθήνα 1985.
29. Β.Κ. Παπαδιάς: «Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος ΙΙ, Ασύμμετρες και μεταβατικές καταστάσεις», Αθήνα 1985.
30. Παναγιώτης Ηλιόπουλος: Μελέτη Οικονομοτεχνικής Εφικτότητας Πλοίου Ακτοπλοΐας Με Ηλεκτρική Πρόωση Με Εφαρμογή Αντίστοιχων Διεθνών Κανονισμών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2017
31. Dennis T. Hall B.A. (Hons), C.Eng, M.I.E.E., M.I.Mar.E. : Practical Marine Electrical Knowledge, Second Edition.
32. Κωνσταντίνος Κωτσιόπουλος: Διατάξεις υποσταθμών σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων – λιμανιών, Σχολή Μηχανικών Εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας, 2013
33. Patrik Ericsson, Ismir Fazlagic : Shore Side Power Supply, Chalmers University Of Technology, 2008
34. [www.mypreveza.gr/2020/10/](http://www.mypreveza.gr/2020/10/)
35. [www.glaropoulos.com/wp-content/uploads/2017/01/hatis-olth.jpg](http://www.glaropoulos.com/wp-content/uploads/2017/01/hatis-olth.jpg)
36. [www.Tanea.gr/2020/02/03/economy](http://www.Tanea.gr/2020/02/03/economy)

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

37. [www.eleftherostypos.gr/diethni/](http://www.eleftherostypos.gr/diethni/)
38. [www.cruisewithco.uk/cruise-advice/](http://www.cruisewithco.uk/cruise-advice/)
39. [www.dspace.lib.ntua.gr](http://www.dspace.lib.ntua.gr)
40. [www.Naftikachronika.gr/2021/05/05/](http://www.Naftikachronika.gr/2021/05/05/)
41. [www.newmoney.gr/roh/palmos-oikonomias/](http://www.newmoney.gr/roh/palmos-oikonomias/)
42. [www.google.gr/maps/space/Vana+Kalasadam/ts-ee/Port\\_of\\_Tallin/](http://www.google.gr/maps/space/Vana+Kalasadam/ts-ee/Port_of_Tallin/)
43. [www.cruisemapper.com/ports/tallin\\_port\\_46](http://www.cruisemapper.com/ports/tallin_port_46)
44. *Google\_Earth\_pro*
45. *Kritikos Orfeas Markos :A Cold Ironing Feasibility study and Cost-Benefit analysis*, National Technical University of Athens, 2017

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Τυποποιημένοι πίνακες εταιρειών προς ευρεση τεχνικών χαρακτηριστικών των στοιχείων της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Μονωτικό	χαρτί-μάζα								PVC			PE			VPE (XLPE)			
Μεταλλικός μανδύας	Μόλυβδος					Αλουμίνιο			—			—			—			
Κωδικός π.χ.	N(A) KBA	N(A) HKBA	N(A) EKBA			N(A) KLEY			N(A)YSEY <sup>1)</sup> N(A)YHSY <sup>4)</sup>			N(A) 2YSY			N(A) 2XSY			
Κανονισμός VDE	VDE 0255								VDE 0271			DIN 57273/ VDE 0273			DIN 57273/ VDE 0273			
Επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας	65°C		70°C			65°C		70°C	70°C			70°C			90°C			
Διάταξη	⊕	⊖	⊖	⊕	⊕	⊖	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊖	⊕	⊕	⊕	⊖	⊕	⊕
Όνομαστική διατομή χαλκού, mm <sup>2</sup>	Φόρτιση σε Ampère, για χαλκό, 6/10 kV																	
25	99	112	114	126	147	99	124	145	114	120	140	—	133	158	—	162	191	
35	120	135	138	153	179	121	151	175	138	145	170	143	161	190	173	195	231	
50	144	161	165	184	216	146	181	211	165	174	205	170	192	228	206	234	277	
70	181	200	205	231	272	183	228	262	204	217	256	212	240	284	257	292	345	
95	221	245	251	282	332	223	277	316	247	264	311	258	291	344	313	354	418	
120	254	281	289	327	385	257	319	361	284	304	359	297	335	396	360	407	481	
150	290	320	328	373	438	294	362	403	322	343	401	338	378	440	410	460	537	
185	332	365	375	430	502	336	414	453	367	393	457	386	432	500	469	527	612	
240	389	425	440	510	593	395	487	520	430	464	536	455	509	585	553	621	716	
300	442	484	501	584	675	450	550	569	490	528	607	—	579	660	—	709	811	
400	509	555	589	696	793	518	641	635	574	619	690	—	665	728	—	815	901	
500	—	—	665	791	893	—	714	682	—	—	—	—	750	810	—	921	1006	

Πίνακας 1: Μέγιστη επιτρεπόμενη διαρκής φόρτιση εναέριων καλωδίων 6/10 kV κατά VDE 0298, από το βιβλίο του Ντοκόπουλου [Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης].



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

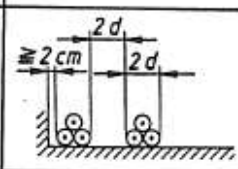
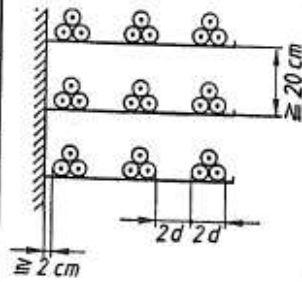
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
μόνωση	χαρτί-μάζα						πολυαιθυλ.	δικτυωμένο πολυαιθ.		
μανδύας	μόλυβδος				αλουμίνιο		—		—	
κωδικός	N(A) HKB A	N(A) EK BA	N(A)KA		N(A)KLEY		N(A)2YSY		N(A)2XSY	
κανονισμός VDE	VDE 0255						DIN 57273		DIN 57273 IEC 502	
επιτρεπόμενη θερμο.	65°C						70°C		90°C	
διάταξη	⊕	⊖	⊕⊖	⊕⊕	⊕⊖	⊕⊕	⊕⊖	⊕⊕	⊕⊖	⊕⊕
ονομαστική διατομή Cu mm <sup>2</sup>	φόρτιση σε Ampère, για χαλκό 12/20 kV									
25	123	126	139	153	138	149	—	—	—	—
35	148	151	166	184	165	179	176	198	189	213
50	175	180	196	219	194	212	208	233	223	250
70	220	222	240	269	237	256	254	283	273	304
95	264	268	287	321	282	300	302	335	325	361
120	298	304	327	363	319	334	343	378	368	407
150	336	343	366	404	355	364	381	412	410	445
185	380	388	414	454	399	400	430	460	463	498
240	440	453	479	519	456	445	496	525	534	569
300	496	511	539	578	505	478	556	583	601	633
400	559	591	618	650	563	520	623	628	674	686
500	—	661	689	713	615	556	692	689	750	756

**Πίνακας 2: Μέγιστη επιτρεπόμενη διαρκής φόρτιση ενταφιασμένων καλωδίων 12/20kV κατά IEC 502, από το βιβλίο του Ντοκόπουλου [Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης].**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Κατασκευή καλωδίου	μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας	μέγιστη επιτρεπόμενη ανημέωση θερμοκρασίας	Συντελεστές διόρθωσης, για θερμοκρασία περιβάλλοντος σε °C								
			10	15	20	25	30	35	40	45	50
Δικτ. πολ. 2Χ, (XLPE)	°C	°K	—	—	—	—	—	—	—	—	—
90	—	—	1,15	1,12	1,08	1,04	1,0	0,96	0,91	0,87	0,82
Πολυαιθ. 2Υ, PE Πολυβιν. Υ, V	70	—	1,22	1,17	1,12	1,07	1,0	0,94	0,87	0,79	0,71
μάζα-χαρτί περιζωμένα καλ. 0,6/1-3,6/6 kV 6/10 kV	80 65	55 35	1,05 1,0	1,05 1,0	1,05 1,0	1,05 1,0	1,0 1,0	0,95 0,93	0,89 0,85	0,84 0,76	0,77 0,65
μονοπολικά τριών μανδύων Höchststädter 0,6/1-3,6/6kV 6/10 kV 12/20kV 18/30kV	80 70 65 60	55 45 35 30	1,05 1,06 1,0 1,0	1,05 1,06 1,0 1,0	1,05 1,06 1,0 1,0	1,05 1,06 1,0 1,0	1,0 1,0 1,0 1,0	0,95 0,94 0,93 0,91	0,89 0,87 0,85 0,82	0,84 0,79 0,76 0,71	0,77 0,71 0,65 0,58

**Πίνακας 3: Διορθωτικοί θερμοκρασιακοί συντελεστές εναέριων καλωδίων 6/10 kV από το βιβλίο του Ντοκόπουλου [Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης].**

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

διάταξη των καλωδίων	συγκεντρωμένα ανά τριάδες με απόσταση διπλάσια της διαμέτρου και >2 cm απόσταση απ' τον τοίχο				
πλήθος τριφασικών συστημάτων		1	2	3	
ακουμπισμένα στο έδαφος		0,95	0,90	0,88	
πάνω σε ανοιχτά κανάλια περιορισμένου αερισμού	πλήθος καναλιών				
	1	0,95	0,90	0,88	
	2	0,90	0,85	0,83	
	3	0,88	0,83	0,81	
6	0,86	0,81	0,79		

Πίνακας 4: Διορθωτικοί συντελεστές καλωδίων 6/10kV από το βιβλίο του Ντοκόπουλου [Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης].

No.	Type <sup>1)</sup>	Rated apparent power	Rated voltage and deviation <sup>2)</sup>		Power factor	Relative values of reactances					DC time constant		
			$S_{r0}$	$U_{r0}$		$\pm p_0$	$\cos\phi_{r0}$	$x_d^{(1)}$	$x_{dext}^{(1)}$	$x_d''$		$x_{(2)}^{(1)}$	$x_{(1)}^{(1)}$
			MVA	kV		%	-	-	-	-		-	-
1	TG2	100	10,5	±5	0,80	1,77	1,45	0,134	-	-	0,246		
2	TG2	125	10,5	±5	0,80	2,13	1,87	0,16	0,18	0,08	0,46		
3	TG2	180	10,5	±5	0,90	1,83	1,77	0,25	0,23	0,14	0,48		
4	TG2	353	18,0	±5	0,85	2,264	2,17	0,167	0,204	0,089	0,194		
5	TG2	388,9	17,5	±5	0,90	2,42	2,188	0,205	0,202	0,099	0,250		
6	TG2	64	13,8	±5	0,85	1,865	1,865	0,179	0,170	0,104	0,220		
7	SG20	290	18	±5	0,90	1,03	0,96	0,22	0,22	0,14	0,36		
8	SG14	48	10	±5	0,90	0,78	-	0,169	0,170	0,05	0,16		
9	SM2	1,45	10	+5 -10	0,90	1,63	-	0,166	0,166	0,046	0,04		
10	SM3	3,4	4,0	±5	0,80	2,675	2,675	0,249	0,303	-	0,116		
11	SC10	40	13,8	±5	0	1,35	1,35	0,119	0,129	-	0,1425		
12	SC6	100	10,5	±5	0	1,78	1,60	0,20	0,25	0,095	0,57		

Πίνακας 5: Τυποποιημένες αντιδράσεις σύγχρονων γεννητριών από πρότυπο IEC-69090.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

## Power tables, 4 poles

AMG 0500, 0560 and 0630

60 Hz /1800 rpm, 4.0 - 13.8 kV \*)

### 60 HZ 4 POLES / 1800 RPM

IP 23	T° amb. 40°C - pf. 0.8	Duty:	Continuous, kWe / kVA			
			T° rise:	CL.F 105K		
Machine No.	Type	Voltage:	12.5 kV		6-6.6 kV	
			kWe	kVA	kWe	kVA
C158	AMG 0500BJ04 DAP		783	979	880	1100
C157	AMG 0500BK04 DAP		961	1202	1080	1350
C248	AMG 0500BK04 DAP		1189	1486	1336	1670
C469	AMG 0500BM04 DAP		1331	1664	1464	1830
C463	AMG 0500CP04 DAP		1513	1891	1664	2080
C457	AMG 0500CR04 DAP		1593	1991	1752	2190
C150	AMG 0560AE04 DAP		1455	1818	1600	2000
C149	AMG 0560AF04 DAP		1636	2045	1800	2250
C151	AMG 0560AF04 DAP		1731	2164	1904	2380
C152	AMG 0560AG04 DAP		2000	2500	2200	2750
C153	AMG 0560AH04 DAP		2218	2773	2440	3050

Πίνακας 6: Τυποποιημένες γεννήτριες των 6.6kV, 60Hz του καταλόγου της ABB.

Voltage 12/20 (22) kV Single Core armoured copper conductors

Typical technical data

Design Standards:

BS 6622

BS 7835

Nominal cross-sectional area	mm <sup>2</sup>	70	95	120	150	185	240	300	400	500	630	800	1000
Diameter over conductor	mm	9.8	11.5	12.8	14.3	15.9	18.4	20.5	23.2	26.2	30.3	34.7	38
Approximate diameter over insulation	mm	22	23.7	25	26.5	28.1	30.6	33.1	36.2	39.2	43.3	47.7	51.4
Approximate overall diameter	mm	38	40	41	43	44	47	51	54	57	61	68	73
Approximate weight of cable	kg/m	2000	2400	2700	3050	3450	4150	5050	6000	7150	8750	10800	13050
Minimum bending radius (static)	mm	750	800	850	850	900	950	1050	1100	1150	1250	1350	1450
Maximum pulling tension on cable	kg	350	475	600	750	925	1200	1500	2000	2500	3150	4000	5000
Maximum DC resistance @20°C	Ω/km	0.2680	0.1930	0.1530	0.1240	0.0991	0.0754	0.0601	0.0470	0.0366	0.0283	0.0221	0.0176
Maximum AC resistance@ 90°C	Ω/km	0.3420	0.2470	0.1960	0.1590	0.1270	0.0976	0.0785	0.0624	0.0499	0.0403	0.0336	0.0288
Inductance	mH/km	0.454	0.432	0.413	0.400	0.390	0.372	0.362	0.349	0.338	0.326	0.310	0.301
Reactance@50Hz	Ω/km	0.143	0.136	0.130	0.126	0.123	0.117	0.114	0.110	0.106	0.103	0.097	0.095
Impedance @ 50Hz @ 90°C	Ω/km	0.371	0.281	0.235	0.203	0.177	0.152	0.138	0.126	0.117	0.11	0.103	0.099

Πίνακας 7: Πίνακας χαρακτηριστικών καλωδίων 20kV της εταιρείας Nexans.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Model	Nominal power [MVA]	Indoor cabinet	
		Dimensions HWD [m]	Weight [kg]
PCS 6000 SFC-4000	4	2.5 x 4.9 x 1.2	5200
PCS 6000 SFC-5000	5	2.5 x 4.9 x 1.2	5200
PCS 6000 SFC-6000	6	2.5 x 4.9 x 1.2	5200
PCS 6000 SFC-7000	7	2.5 x 4.9 x 1.2	5200

**Πίνακας 8 : Μοντέλα μετατροπών ισχύος με τάση εισόδου 1,725 kV και τάση εξόδου 2,3kV της ABB για υψηλές ισχύς.**

Voltage 6.35/11 (12) kV Three Core armoured copper conductors

Typical technical data

Design Standards:  
BS 6622  
BS 7835

Nominal cross-sectional area	mm <sup>2</sup>	3x70	3x95	3x120	3x150	3x185	3x240	3x300	3x400
Diameter over conductor	mm	9.8	11.5	12.8	14.3	15.9	18.4	20.5	23.2
Approximate diameter over insulation	mm	17.8	19.5	20.8	22.3	23.9	26.4	28.9	32.0
Approximate overall diameter	mm	60	65	68	72	75	82	89	95
Approximate weight of cable	kg/m	6750	8000	9100	10250	11650	14900	17450	20850
Minimum bending radius (static)	mm	750	800	850	900	900	1000	1100	1150
Maximum pulling tension on cable	kg	1050	1425	1800	2250	2775	3600	4500	5000
Maximum DC resistance @20°C	Ω/km	0.2680	0.1930	0.1530	0.1240	0.0991	0.0754	0.0601	0.0470
Maximum AC resistance@ 90°C	Ω/km	0.3420	0.2470	0.1960	0.1600	0.1280	0.0986	0.0798	0.0640
Inductance	mH/km	0.350	0.333	0.320	0.310	0.303	0.290	0.280	0.271
Reactance@50Hz	Ω/km	0.110	0.105	0.100	0.097	0.095	0.091	0.088	0.085
Impedance @ 50Hz @ 90°C	Ω/km	0.359	0.268	0.220	0.187	0.160	0.134	0.119	0.107

**Πίνακας 9 : Πίνακας χαρακτηριστικών καλωδίων 6.6kV της εταιρείας Nexans.**



<b>Large Distribution Transformers</b>					
Typical datas for 20/10 kV transformer with off-load or on-load tap-changer					
Rated power kVA	Tap-changer	No-Load Loss W	Load Loss W	Impedance %	Total Weight kg
3150	±2x2.5%	3500	25000	6.35	6250
	±9x1.67%	3800	25500	6.35	10000
4000	±2x2.5%	4200	29000	6.35	7500
	±9x1.67%	4500	31000	6.35	12100
5000	±2x2.5%	4900	35000	7.15	9300
	±9x1.67%	5000	39000	7.15	13400
6300	±2x2.5%	6000	45000	7.15	13200
	±9x1.67%	6200	45000	7.15	15400
8000	±2x2.5%	7000	56000	8.35	15300
	±9x1.67%	7200	56000	8.35	18100
10000	±2x2.5%	8100	65000	8.35	17200
	±9x1.67%	8200	68000	8,35	20600

**Πίνακας 10 :** Κατάλογος χαρακτηριστικών τυποποιημένων μετασχηματιστών σύμφωνα με την εταιρεία της ABB.

VersaRupter Switch - Technical Details										
Rated Voltage (kV)	Rated Maximum Voltage (kV)	Rated Current (A)	BIL (kV)	60 Hz Withstand 1 minute (kV)	Pole Spacing (in/mm)	Momentary asymmetrical (kA)	Fault-making asymmetrical (kA)	Peak Withstand (peak kA)	Fault-making (peak kA)	Short time current symmetrical (kA/sec)
4.73	4.76	200	60	19	5.91/150	40	40	65	65	25/2
		600								
		1200								
12-13.8	15	200	95	36	6.69/170	40	40	65	65	25/2
		600								
		1200								
13.8	15	600	95	36	9.25/235	61	61	N/A	N/A	40/3
		1200								
14.4	15.5	600	110	50	9.25/235	61	61	N/A	N/A	40/3
		1200								
12-16.5	17	200	110	50	9.25/235	40	40	65	65	25/2
		600								
		1200								
23.9-24.9	27	200	125	60	10.8/275	40	40	N/A	N/A	25/2
		600								
		1200								
34.5	38	600	150	80	14.1/360	40	30	N/A	N/A	25/2
		800								

**Πίνακας 11 :** Τυποποιημένοι αποζεύκτες διατάξεων προστασίας σύμφωνα με το πρότυπο της εταιρείας ABB.

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Electrical characteristics	GSec/T1 and GSec/IB			
	kV	12	17.5	24
Rated voltage				
Power frequency withstand voltage (50/60 Hz, 1 min)				
- Line to line and line to earth	kV	28 (1)	38	50
- Between open contacts	kV	32	45	60
Lightning impulse withstand voltage (BIL 1.2/50 μs)				
- Line to line and line to earth	kV	75	95	125
- Between open contacts	kV	85	110	145
Rated frequency	Hz	50 / 60	50 / 60	50 / 60
Rated current (40 °C)	A	800	800	630
Rated short-time withstand current	kA	21 (3s) / 25 (2s)	21 (3s) / 25 (2s)	21 (3s) / 25 (2s)
Making capacity (peak current)	kAp	65	54.5	54.5
Making capacity of separate earthing switch (GSec/IB)	kAp	62.5	62.5	62.5
Breaking capacity				
- Active load	A	800	800	630
- No-load transformers	A	16	16	16
- No-load lines	A	25	25	25
- No-load cables	A	50	50	50
- Ring circuits	A	800	800	630

Πίνακας 12 : Τυποποιημένοι διακόπτες ισχύος διατάξεων προστασίας σύμφωνα με το πρότυπο της εταιρείας ABB.

Όνομαστική διατομή αγωγού mm <sup>2</sup>	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500
Όνομαστική διατομή θωράκισης* mm <sup>2</sup>	16	16	16	16	16	25	25	25	25	35	35
Κατασκευή κατά VDE 0273											
Μορφή αγωγού	rm	rm	rm	rm	rm	rm	rm	rm	rm	rm	rm
Πέχος μόνωσης mm	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Πέχος μανδύα mm	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Εξωτερική διάμετρος mm	28	30	31	33	34	36	37	40	42	45	48
	Cu										
	Al	28	29	31	33	34	36	37	40	42	46
Δεδομένα για την μεταφορά											
Βόρος kg/km	Cu	1150	1300	1550	1850	2100	2500	2950	3450	4100	5050
	Al	-	980	1100	1250	1350	1550	1750	2000	2250	2700
Μήκος παράδοσης km		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0
Τύπος τυλιγμένου (DIN 46391)		250	250	250	250	250	250	220	250	200	250
Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά											
Αντίσταση στο συνεχές, Ω/km	Cu	0,514	0,379	0,262	0,189	0,150	0,122	0,0972	0,0740	0,0590	0,461
20°C	Al	-	0,628	0,435	0,313	0,248	0,202	0,161	0,122	0,0976	0,0763
Αντίσταση λειτουργίας στους 70°C, Ω/km	Cu	0,659	0,486	0,337	0,244	0,195	0,161	0,129	0,100	0,0812	0,0670
	Al	-	0,808	0,5661	0,404	0,321	0,2564	0,211	0,161	0,130	0,0105
Αντεπαγωγή λειτουργίας δδ mH/km		0,484	0,461	0,435	0,415	0,399	0,385	0,373	0,358	0,347	0,334
Χωρητικότητα λειτουργίας μF/km		0,159	0,175	0,196	0,216	0,235	0,254	0,273	0,304	0,329	0,368

Ικανότητα φόρτισης κατά VDE 0298 Teil 2/... 77.

Συμμετρική λειτουργία											
Εγκατάσταση στο έδαφος <sup>1</sup>	δδ A	Cu	189	223	273	325	368	410	463	534	601
		Al	-	173	211	252	287	320	362	421	474
Εγκατάσταση στον αέρα <sup>2</sup>	δδ A	Cu	199	238	296	358	412	466	532	627	715
		Al	-	184	229	278	320	363	415	493	563
Βραχυκύκλωμα <sup>3</sup>											
Όνομαστικό ρεύμα I <sub>BN</sub> για διάγραφα T <sub>k</sub> = 1 s	Αγωγός kA	Cu	5,02	7,18	10,0	13,6	17,2	21,5	26,6	34,5	43,1
		Al	-	4,63	6,48	8,79	11,1	13,9	17,1	22,2	27,8
	θωράκιση kA	Cu	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	5,1	5,1	5,1	7,1

Πίνακας 13 : Πίνακας παρουσίασης τεχνικών χαρακτηριστικών καλωδίων ονομαστικής τάσης 20 kV, από το βιβλίο του Ντοκόπουλου [Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης].

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

Διατομή mm <sup>2</sup>	1,5	2,5	4	6	10	16	25/16	35/16	50/25	70/35	95/50	120/70	150/70	185/90	240/120	300/150
<b>Κατασκευαστικά στοιχεία</b>																
Τύπος αγωγού	U	U	U	R	R	R	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Πάχος μόνωσης, mm	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	1,4	1,4	1,6	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
Εξ. διάμετρος, mm	13	14	17	18	20	22	27	26	31	32	37	40	44	50	57	63
<b>Στοιχεία μεταφοράς</b>																
Βάρος κατασκευής	250	310	485	600	810	1100	1600	1750	2400	2800	3800	4750	5700	7650	9850	121000
Μήκος κατασκευής	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	2000	2000	1000	1000	1000	1000	750	600	300
Τύμπανο DIN 46391	091	101	121	121	121	141	161	200	200	181	200	200	220	220	256	221
<b>Ηλεκτρικές ιδιότητες</b>																
Αντίσταση D.C. στους 20 <sup>o</sup> C, Ω/km	12,1	7,41	4,61	3,08	1,83	1,15	0,727	0,524	0,387	0,268	0,193	0,153	0,124	0,0991	0,0754	0,601
Ενεργός αντίσταση A.C. στους 70 <sup>o</sup> C, 50 mH Ω/km	14,5	8,87	5,52	3,69	2,19	1,38	0,870	0,627	0,463	0,321	0,232	0,184	0,150	0,120	0,9226	0,0749
Αντιπαγωγή λειτουργίας mH/km	0,366	0,340	0,339	0,321	0,301	0,285	0,274	0,261	0,263	0,254	0,253	0,250	0,247	0,248	0,245	0,245
<b>Επιτρεπόμενη φόρτιση</b>																
στο έδαφος (A)	26	3425	44	56	75	98	128	155	184	225	271	309	348	394	458	518
στον αέρα	18,6		33	42	57	75	100	122	149	188	232	269	308	354	419	481
Σε βροχονέφλαμα διαρροής 1 sec (kA) I <sub>th</sub>	0,173	0,288	0,460	0,690	1,15	1,84	2,87	4,02	5,75	8,05	10,9	13,8	17,2	21,3	27,6	34,5

**Πίνακας 14 :** Πίνακας παρουσίασης τεχνικών χαρακτηριστικών καλωδίων ονομαστικής τάσης 6,6 kV, από το βιβλίο του Ντοκόπουλου [Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης].

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

### Παρουσίαση των υπολογισμών της τρέχουσας μελέτης σε μορφή κώδικα του προγράμματος MatLab.

Κώδικας 1 : Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2 της τρέχουσας εργασίας.

```
clc;
clear;

%Table_1

i = [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19;
1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13;
14; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 1; 2; 3; 4; 5; 6;
1; 2; 3; 4; 1; 1;];

n = [0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.85; 0.85; 0.85; 1.00; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 1.00; 1.00; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 0.85; 0.85;];

N = [2.00; 2.00; 3.00; 1.00; 2.00; 1.00; 2.00; 2.00; 2.00;
1.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 3.00; 2.00; 2.00; 4.00; 2.00;
1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 2.00; 4.00; 2.00; 1.00; 1.00; 2.00;
2.00; 1.00; 2.00; 1.00; 1.00; 1.00; 2.00; 2.00; 4.00; 1.00;
4.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 1.00;
12.00; 12.00; 7.00; 2.00; 2.00; 2.00; 1.00; 1.00; 1.00; 4.00;
1.00; 1.00; 2.00; 2.00; 1.00; 1.00;];

Pon_apod_PS = [30.00; 45.00; 20.00; 5.00; 40.00; 35.00; 12.00; 35.00;
10.00; 4.00; 35.00; 10.00; 20.38; 20.00; 90.00; 25.00; 8.00; 40.00;
14.00; 15.00; 5.00; 2.00; 27.17; 24.46; 20.00; 20.38; 20.00; 45.00;
50.00; 40.00; 50.00; 15.00; 5.00; 15.00; 20.00; 10.00; 25.00; 20.00;
5.00; 30.00; 40.00; 10.00; 20.00; 15.00; 2.00; 4.00; 10.00; 3.00;
1.50; 1.00; 5.00; 10.00; 15.00; 40.76; 27.17; 6.00; 15.00; 2.00;
2.72; 29.89; 20.38; 16.30; 12.23; 24.46; 20.38;];

Pon_apod_KW = Pon_apod_PS.*0.736;

Pon_apor_KW = Pon_apod_KW./n;

Pegat_KW = Pon_apor_KW.*N;

N_kan_leit = [1.00; 1.00; 1.00; 0.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00;
0.00; 1.00; 1.00; 1.00; 0.00; 1.00; 2.00; 1.00; 1.00; 3.00;
1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 0.00; 1.00; 1.00;
0.00; 0.00; 0.00; 1.00; 1.00; 0.00; 0.00; 2.00; 2.00; 0.00;
0.00; 0.00; 1.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00;
1.00; 12.00; 12.00; 7.00; 2.00; 2.00; 2.00; 1.00; 1.00; 1.00;
4.00; 1.00; 1.00; 2.00; 0.00; 1.00; 0.00;];
```





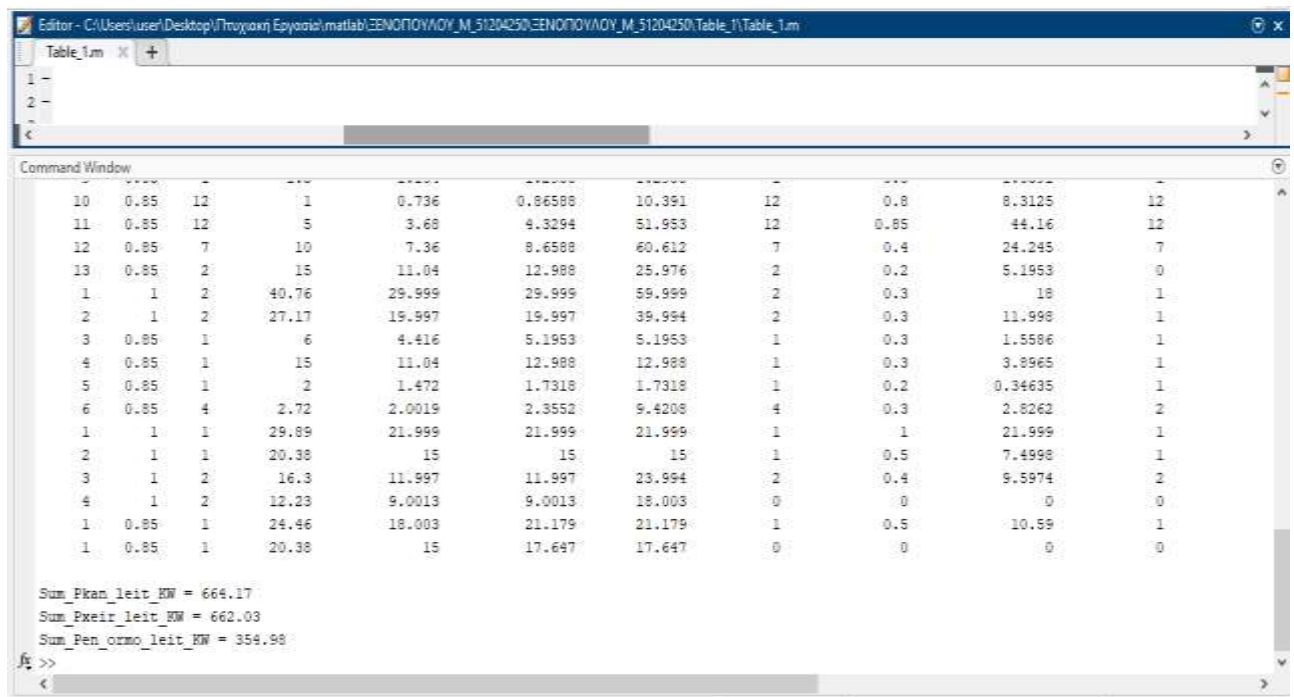
Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

```
T =
table(i,n,N,Pon_apod_PS,Pon_apod_KW,Pon_apor_KW,Pegat_KW,N_kan_leit,fs_kan_leit,
Pkan_leit_KW,N_xeir_leit,fs_xeir_leit,Pxeir_leit_KW,N_en_ormo_leit,fs_en_ormo_le
it,Pen_ormo_leit_KW);

T.Properties.VariableNames = varNames

fprintf('Sum_Pkan_leit_KW = %4.2f\nSum_Pxeir_leit_KW =
%4.2f\nSum_Pen_ormo_leit_KW =
%4.2f\n',Sum_Pkan_leit_KW,Sum_Pxeir_leit_KW,Sum_Pen_ormo_leit_KW)
```

Απεικόνιση αποτελεσμάτων κώδικα 1 στο πρόγραμμα του MatLab.



Κώδικας 2 : Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.3 της τρέχουσας εργασίας.

```
clc;
clear;

%Table_2

i = [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19;
1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13;
14; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 1; 2; 3; 4; 5; 6;
1; 2; 3; 4; 1; 1;];

n = [0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.85; 0.85; 0.85; 1.00; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 1.00; 1.00; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 0.85; 0.85;];
```

*Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.*

```

N = [2.00; 2.00; 3.00; 1.00; 2.00; 1.00; 2.00; 2.00; 2.00;
1.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 3.00; 2.00; 2.00; 2.00; 4.00; 2.00;
1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 2.00; 4.00; 2.00; 1.00; 1.00; 2.00;
2.00; 1.00; 2.00; 1.00; 1.00; 1.00; 2.00; 2.00; 4.00; 1.00;
4.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 1.00;
12.00; 12.00; 7.00; 2.00; 2.00; 2.00; 1.00; 1.00; 1.00; 4.00;
1.00; 1.00; 2.00; 2.00; 1.00; 1.00;];

Pon_apod_PS = [30.00; 45.00; 20.00; 5.00; 40.00; 35.00; 12.00; 35.00;
10.00; 4.00; 35.00; 10.00; 20.38; 20.00; 90.00; 25.00; 8.00; 40.00;
14.00; 15.00; 5.00; 2.00; 27.17; 24.46; 20.00; 20.38; 20.00; 45.00;
50.00; 40.00; 50.00; 15.00; 5.00; 15.00; 20.00; 10.00; 25.00; 20.00;
5.00; 30.00; 40.00; 10.00; 20.00; 15.00; 2.00; 4.00; 10.00; 3.00;
1.50; 1.00; 5.00; 10.00; 15.00; 40.76; 27.17; 6.00; 15.00; 2.00;
2.72; 29.89; 20.38; 16.30; 12.23; 24.46; 20.38;];

Pon_apod_KW = Pon_apod_PS.*0.736;

Pon_apor_KW = Pon_apod_KW./n;

Pegat_KW = Pon_apor_KW.*N;

N_anagis = [1.00; 1.00; 1.00; 0.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00;
0.00; 1.00; 1.00; 1.00; 0.00; 0.00; 2.00; 1.00; 1.00; 2.00;
1.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 1.00; 1.00;
1.00; 0.00; 0.00; 1.00; 0.00; 1.00; 0.00; 1.00; 2.00; 4.00;
1.00; 1.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 1.00; 1.00; 0.00;
0.00; 0.00; 6.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00;
0.00; 1.00; 1.00; 2.00; 2.00; 1.00; 0.00;];

fs_anagis = [0.10; 0.85; 0.70; 0.00; 0.10; 0.20; 0.40; 0.10;
0.00; 0.50; 0.85; 0.80; 0.00; 0.00; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.35; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.20; 0.75;
0.50; 0.00; 0.00; 0.25; 0.00; 0.50; 0.00; 0.40; 0.10; 0.05;
0.05; 0.75; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.50; 0.70; 0.00;
0.00; 0.00; 0.85; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00;
0.00; 1.00; 0.50; 0.40; 0.10; 0.50; 0.00;];

Panagis_KW = Pon_apor_KW.*N_anagis.*fs_anagis;

Sum_Panagis_KW = sum(Panagis_KW);

varNames =
{'i', 'n', 'N', 'Pon_apod_PS', 'Pon_apod_KW', 'Pon_apor_KW', 'Pegat_KW', 'N_anagis', 'fs_anagis', 'Panagis_KW'};
varTypes =
{'float', 'float', 'float', 'float', 'float', 'float', 'float', 'float', 'float', 'float'};
T =
table(i,n,N,Pon_apod_PS,Pon_apod_KW,Pon_apor_KW,Pegat_KW,N_anagis,fs_anagis,Panagis_KW);
T.Properties.VariableNames = varNames

fprintf('Sum_Panagis_KW = %4.2f\n',Sum_Panagis_KW)

```

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.  
Απεικόνιση αποτελεσμάτων κώδικα 2 στο πρόγραμμα του MatLab.

```

Editor - C:\Users\user\Desktop\Πτυχιική Εργασία\matlab\ΞΕΝΟΠΟΥΛΟΥ_M_51204250\ΞΕΝΟΠΟΥΛΟΥ_M_51204250\Table_2\Table_2.m
Table_2.m
38
39 fprintf('Sum_Panagis_KW = %4.2f\n',Sum_Panagis_KW)

Command Window

7 0.85 2 10 7.36 8.6588 17.318 1 0.7 6.0612
8 0.85 2 3 2.208 2.5976 5.1953 0 0 0
9 0.85 1 1.5 1.104 1.2988 1.2988 0 0 0
10 0.85 12 1 0.736 0.86588 10.391 0 0 0
11 0.85 12 5 3.68 4.3294 51.953 6 0.85 22.08
12 0.85 7 10 7.36 8.6588 60.612 0 0 0
13 0.85 2 15 11.04 12.988 25.976 0 0 0
1 1 2 40.76 29.999 29.999 59.999 0 0 0
2 1 2 27.17 19.997 19.997 39.994 0 0 0
3 0.85 1 6 4.416 5.1953 5.1953 0 0 0
4 0.85 1 13 11.04 12.988 12.988 0 0 0
5 0.85 1 2 1.472 1.7318 1.7318 0 0 0
6 0.85 4 2.72 2.0019 2.3552 9.4208 0 0 0
1 1 1 29.89 21.999 21.999 21.999 1 1 21.999
2 1 1 20.38 15 15 15 1 0.5 7.4998
3 1 2 16.3 11.997 11.997 23.994 2 0.4 9.5974
4 1 2 12.23 9.0013 9.0013 18.003 2 0.1 1.8003
1 0.85 1 24.46 18.003 21.179 21.179 1 0.5 10.59
1 0.85 1 20.38 15 17.647 17.647 0 0 0

Sum_Panagis_KW = 495.25
>>
    
```

Κώδικας 3 : Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.4 της τρέχουσας εργασίας.

```

clc;
clear;

%Table_3

i = [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19;
1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13;
14; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 1; 2; 3; 4; 5; 6;
1; 2; 3; 4; 1; 1;];

N_kan_poria = [1.00; 1.00; 1.00; 0.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00;
0.00; 1.00; 1.00; 1.00; 0.00; 1.00; 2.00; 1.00; 1.00; 3.00;
1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 0.00; 1.00; 1.00;
0.00; 0.00; 0.00; 1.00; 1.00; 0.00; 0.00; 2.00; 2.00; 0.00;
0.00; 0.00; 1.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00;
1.00; 12.00; 12.00; 7.00; 2.00; 2.00; 2.00; 1.00; 1.00; 1.00;
4.00; 1.00; 1.00; 2.00; 0.00; 1.00; 0.00;];

fs_kan_poria = [0.10; 0.85; 0.70; 0.00; 0.10; 0.20; 0.40; 0.10;
0.00; 0.50; 0.85; 0.80; 0.00; 0.10; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.35; 0.50; 0.10; 0.10; 0.10; 0.40; 0.10; 0.00; 0.20; 0.00;
0.00; 0.00; 0.00; 0.50; 0.70; 0.00; 0.00; 0.40; 0.10; 0.00;
0.00; 0.00; 0.75; 0.40; 0.75; 0.75; 0.40; 0.50; 0.70; 0.70;
0.80; 0.80; 0.85; 0.40; 0.20; 0.30; 0.30; 0.30; 0.30; 0.20;
0.30; 1.00; 0.50; 0.40; 0.00; 0.50; 0.00;];

P_leit_kan_poria = [2.60; 33.12; 12.12; 0.00; 3.46; 6.06; 4.16;
3.03; 0.00; 1.73; 25.76; 6.93; 0.00; 1.73; 132.48; 18.40; 5.89;
88.32; 4.24; 6.49; 0.43; 0.17; 2.35; 8.47; 1.73; 0.00; 3.46;
0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 6.49; 3.03; 0.00; 0.00; 6.93; 4.33;
0.00; 0.00; 0.00; 25.98; 6.93; 25.98; 19.48; 1.39; 3.46; 12.12;
3.64; 1.04; 8.31; 44.16; 24.24; 5.20; 18.00; 12.00; 1.56; 3.90;
    
```

*Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.*

```
0.35; 2.82; 22.00; 7.50; 9.60; 0.00; 10.59; 0.00;];

cosf_kan_poria = [0.37; 0.83; 0.78; 0.26; 0.37; 0.48; 0.65; 0.37;
0.26; 0.56; 0.83; 0.82; 0.26; 0.37; 0.83; 0.83; 0.83; 0.83;
0.53; 0.56; 0.37; 0.37; 0.37; 0.65; 0.37; 0.26; 0.48; 0.26;
0.26; 0.26; 0.26; 0.56; 0.78; 0.26; 0.26; 0.65; 0.37; 0.26;
0.26; 0.26; 0.80; 0.65; 0.80; 0.80; 0.65; 0.56; 0.78; 0.78;
0.82; 0.82; 0.83; 0.65; 0.48; 0.57; 0.57; 0.57; 0.57; 0.48;
0.57; 0.86; 0.56; 0.65; 0.26; 0.56; 0.26;];

sinf_kan_poria = sqrt(1-(cosf_kan_poria.^2));

Qapor_kan_poria = (P_leit_kan_poria./cosf_kan_poria).*sinf_kan_poria;

Smax_kan_poria = sqrt((Qapor_kan_poria.^2)+(P_leit_kan_poria.^2));

N_xeirismon = [1.00; 1.00; 0.00; 0.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00;
0.00; 1.00; 1.00; 1.00; 0.00; 0.00; 2.00; 1.00; 1.00; 3.00;
1.00; 1.00; 0.00; 0.00; 0.00; 1.00; 1.00; 0.00; 0.00; 0.00;
0.00; 0.00; 0.00; 1.00; 1.00; 0.00; 0.00; 2.00; 0.00; 0.00;
0.00; 0.00; 1.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00;
1.00; 12.00; 12.00; 7.00; 0.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00;
2.00; 1.00; 1.00; 2.00; 0.00; 1.00; 0.00;];

fs_xeirismon = [0.85; 0.85; 0.00; 0.00; 0.80; 0.20; 0.40; 0.20;
0.00; 0.50; 0.85; 0.80; 0.00; 0.00; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.30; 0.50; 0.00; 0.00; 0.00; 0.40; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00;
0.00; 0.00; 0.00; 0.50; 0.70; 0.00; 0.00; 0.40; 0.00; 0.00;
0.00; 0.00; 0.75; 0.40; 0.75; 0.75; 0.40; 0.50; 0.70; 0.70;
0.80; 0.80; 0.85; 0.40; 0.00; 0.30; 0.30; 0.30; 0.30; 0.00;
0.30; 1.00; 0.50; 0.40; 0.00; 0.50; 0.00;];

P_leit_xeirismon = [22.08; 33.12; 0.00; 0.00; 27.71; 6.06; 4.16;
6.06; 0.00; 1.73; 25.76; 6.93; 0.00; 0.00; 132.48; 18.40; 5.89;
88.32; 3.64; 6.49; 0.00; 0.00; 0.00; 8.47; 0.00; 0.00; 0.00;
0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 6.49; 3.03; 0.00; 0.00; 6.93; 0.00;
0.00; 0.00; 0.00; 25.98; 6.93; 25.98; 19.48; 1.39; 3.46; 12.12;
3.64; 1.04; 8.31; 44.16; 24.24; 0.00; 9.00; 6.00; 1.56; 3.90;
0.00; 1.41; 22.00; 7.50; 9.60; 0.00; 10.59; 0.00;];

cosf_xeirismon = [0.83; 0.83; 0.26; 0.26; 0.82; 0.48; 0.65; 0.48;
0.26; 0.56; 0.83; 0.82; 0.26; 0.26; 0.83; 0.83; 0.83; 0.83;
0.57; 0.56; 0.26; 0.26; 0.26; 0.65; 0.26; 0.26; 0.26; 0.26;
0.26; 0.26; 0.26; 0.56; 0.78; 0.26; 0.26; 0.65; 0.26; 0.26;
0.26; 0.26; 0.80; 0.65; 0.80; 0.80; 0.65; 0.56; 0.78; 0.78;
0.82; 0.82; 0.83; 0.65; 0.26; 0.57; 0.57; 0.57; 0.57; 0.26;
0.57; 0.86; 0.56; 0.65; 0.26; 0.56; 0.26;];

sinf_xeirismon = sqrt(1-(cosf_xeirismon.^2));

Qapor_xeirismon = (P_leit_xeirismon./cosf_xeirismon).*sinf_xeirismon;

Smax_xeirismon = sqrt((Qapor_xeirismon.^2)+(P_leit_xeirismon.^2));

N_en_ormo = [1.00; 0.00; 0.00; 1.00; 1.00; 1.00; 0.00; 0.00;
1.00; 1.00; 0.00; 0.00; 1.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 2.00;
0.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 0.00; 1.00; 0.00;
0.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 0.00; 1.00; 2.00; 0.00; 0.00;
0.00; 0.00; 1.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00;
1.00; 12.00; 12.00; 7.00; 2.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00;
2.00; 1.00; 1.00; 2.00; 2.00; 1.00; 0.00;];
```

*Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.*

```

fs_en_ormo = [0.10; 0.00; 0.00; 0.10; 0.10; 0.20; 0.00; 0.00;
0.80; 0.20; 0.00; 0.00; 0.10; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 0.20;
0.00; 0.00; 0.10; 0.10; 0.10; 0.40; 0.10; 0.00; 0.20; 0.00;
0.00; 0.10; 0.20; 0.50; 0.70; 0.00; 0.10; 0.40; 0.00; 0.00;
0.00; 0.00; 0.75; 0.40; 0.75; 0.75; 0.40; 0.50; 0.70; 0.70;
0.80; 0.80; 0.85; 0.40; 0.50; 0.30; 0.30; 0.30; 0.30; 0.20;
0.30; 1.00; 0.50; 0.40; 0.90; 0.25; 0.00;];

P_leit_en_ormo = [2.60; 0.00; 0.00; 0.43; 3.46; 6.06; 0.00; 0.00;
6.93; 0.69; 0.00; 0.00; 1.50; 0.00; 0.00; 0.00; 0.00; 13.85;
0.00; 0.00; 0.43; 0.17; 2.35; 8.47; 1.73; 0.00; 3.46; 0.00;
0.00; 3.46; 8.66; 6.49; 3.03; 0.00; 1.73; 6.93; 0.00; 0.00;
0.00; 0.00; 25.98; 6.93; 25.98; 19.48; 1.39; 3.46; 12.12; 3.64;
1.04; 8.31; 44.16; 24.24; 12.99; 9.00; 6.00; 1.56; 3.90; 0.35;
1.41; 22.00; 7.50; 9.60; 16.20; 5.29; 0.00;];

cosf_en_ormo = [0.37; 0.26; 0.26; 0.37; 0.37; 0.48; 0.26; 0.26;
0.82; 0.48; 0.26; 0.26; 0.37; 0.26; 0.26; 0.26; 0.26; 0.48;
0.26; 0.26; 0.37; 0.37; 0.37; 0.65; 0.37; 0.26; 0.48; 0.26;
0.26; 0.37; 0.48; 0.56; 0.78; 0.26; 0.37; 0.65; 0.26; 0.26;
0.26; 0.26; 0.80; 0.65; 0.80; 0.80; 0.65; 0.56; 0.78; 0.78;
0.82; 0.82; 0.83; 0.65; 0.56; 0.57; 0.57; 0.57; 0.57; 0.48;
0.57; 0.86; 0.56; 0.65; 0.85; 0.53; 0.26;];

sinf_en_ormo = sqrt(1-(cosf_en_ormo.^2));

Qapor_en_ormo = (P_leit_en_ormo./cosf_en_ormo).*sinf_en_ormo;

Smax_en_ormo = sqrt((Qapor_en_ormo.^2)+(P_leit_en_ormo.^2));

varNames =
{'i', 'N_kan_poria', 'fs_kan_poria', 'P_leit_kan_poria', 'cosf_kan_poria', 'sinf_kan_
poria', 'Qapor_kan_poria', 'Smax_kan_poria', 'N_xeirismon', 'fs_xeirismon', 'P_leit_x
eirismon', 'cosf_xeirismon', 'sinf_xeirismon', 'Qapor_xeirismon', 'Smax_xeirismon', '
N_en_ormo', 'fs_en_ormo', 'P_leit_en_ormo', 'cosf_en_ormo', 'sinf_en_ormo', 'Qapor_en
_ormo', 'Smax_en_ormo',};

varTypes =
{'float', 'float', 'float', 'float', 'float', 'float', 'float', 'float', 'float',
'float', 'float', 'float', 'float', 'float', 'float', 'float', 'float', 'float',
'float', 'float',};

T =
table(i,N_kan_poria,fs_kan_poria,P_leit_kan_poria,cosf_kan_poria,sinf_kan_poria,
Qapor_kan_poria,Smax_kan_poria,N_xeirismon,fs_xeirismon,P_leit_xeirismon,cosf_xe
irismon,sinf_xeirismon,Qapor_xeirismon,Smax_xeirismon,N_en_ormo,fs_en_ormo,P_lei
t_en_ormo,cosf_en_ormo,sinf_en_ormo,Qapor_en_ormo,Smax_en_ormo);
T.Properties.VariableNames = varNames

```

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.  
Απεικόνιση αποτελεσμάτων κώδικα 3 στο πρόγραμμα του MatLab.

i	N_kan_poria	fs_kan_poria	P_leit_kan_poria	cosf_kan_poria	sinf_kan_poria	Qapor_kan_poria	Smax_kan_poria	N_xeirismos
1	1	0.1	2.6	0.37	0.92903	6.5253	7.027	1
2	1	0.85	33.12	0.83	0.55776	22.257	39.904	1
3	1	0.7	12.12	0.78	0.62578	9.7237	15.538	0
4	0	0	0	0.26	0.96561	0	0	0
5	1	0.1	3.46	0.37	0.92903	8.6877	9.3514	1
6	1	0.2	6.06	0.48	0.87727	11.076	12.625	1
7	1	0.4	4.16	0.65	0.75993	4.9636	6.4	1
8	1	0.1	3.03	0.37	0.92903	7.608	8.1892	1
9	0	0	0	0.26	0.96561	0	0	0
10	1	0.5	1.73	0.86	0.52849	2.9595	3.0893	1
11	1	0.85	25.76	0.83	0.55776	17.311	31.036	1
12	1	0.8	6.93	0.82	0.57236	4.8372	8.4512	1
13	0	0	0	0.26	0.96561	0	0	0
14	1	0.1	1.73	0.37	0.92903	4.3439	4.6757	0
15	2	0.85	132.48	0.83	0.55776	89.027	159.61	2
16	1	0.85	18.4	0.83	0.55776	12.365	22.169	1
17	1	0.85	4.86	0.83	0.55776	9.0481	7.0644	1

Κώδικας 4 : Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.5 της τρέχουσας εργασίας.

```

clc;
clear;

%Table_4

i = [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19;
1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13;
14; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 1; 2; 3; 4; 5; 6;
1; 2; 3; 4; 1; 1;];

V = [440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00;
440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00;
440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00;
440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 115.00; 115.00;
115.00; 115.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 115.00; 115.00;
115.00; 115.00; 115.00; 115.00; 115.00; 440.00;];

N = [2.00; 2.00; 3.00; 1.00; 2.00; 1.00; 2.00; 2.00; 2.00;
1.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 3.00; 2.00; 2.00; 4.00; 2.00;
1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 2.00; 4.00; 2.00; 1.00; 1.00; 2.00;
1.00; 2.00; 2.00; 1.00; 1.00; 1.00; 2.00; 2.00; 4.00; 1.00;
4.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 2.00; 1.00;
12.00; 12.00; 7.00; 2.00; 2.00; 2.00; 1.00; 1.00; 1.00; 4.00;
1.00; 1.00; 2.00; 2.00; 1.00; 1.00;];

Pon_apor = [25.98; 38.96; 17.32; 4.33; 34.64; 30.31; 10.39; 30.31;
8.66; 3.46; 30.31; 8.66; 15.00; 17.32; 77.93; 21.65; 6.93; 34.64;
12.12; 12.99; 4.33; 1.73; 23.53; 21.18; 17.32; 17.65; 17.32; 38.96;
43.29; 34.64; 43.29; 12.99; 4.33; 12.99; 17.32; 8.66; 21.65; 17.32;
4.33; 25.98; 34.64; 8.66; 17.32; 12.99; 1.73; 3.46; 8.66; 2.60;

```

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

```

1.30; 0.87; 4.33; 8.66; 12.99; 30.00; 20.00; 5.20; 12.99; 1.73;
2.35; 22.00; 15.00; 12.00; 9.00; 21.18; 17.65;];

cosf = [0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.85; 0.85; 0.85; 1.00; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 0.85;
0.85; 0.85; 0.85; 0.85; 1.00; 1.00; 0.85; 0.85; 0.85;
1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00; 1.00;];

Ig = (Pon_apor./(sqrt(3).*V.*cosf)).*1000;

Igf = Ig.*1.25;

varNames = {'i','V','N','Pon_apor','cosf','Ig','Igf'};
varTypes = {'float','float','float','float','float','float','float'};
T = table(i,V,N,Pon_apor,cosf,Ig,Igf);
T.Properties.VariableNames = varNames
    
```

Απεικόνιση αποτελεσμάτων κώδικα 4 στο πρόγραμμα του MatLab.

The screenshot shows the MATLAB Command Window with the following table output:

i	V	N	Pon_apor	cosf	I <sub>g</sub>	I <sub>gf</sub>
1	440	2	25.98	0.85	40.106	50.132
2	440	2	38.96	0.85	60.143	78.179
3	440	3	17.32	0.85	26.737	33.421
4	440	1	4.33	0.85	6.6843	8.3554
5	440	2	34.64	0.85	53.474	66.843
6	440	1	30.31	0.85	46.79	58.488
7	440	2	10.39	0.85	16.039	20.049
8	440	2	30.31	0.85	46.79	58.488
9	440	2	8.66	0.85	13.369	16.711
10	440	1	3.46	0.85	5.3413	6.6766
11	440	2	30.31	0.85	46.79	58.488
12	440	2	8.66	0.85	13.369	16.711
13	440	2	15	1	19.682	24.603
14	440	2	17.32	0.85	26.737	33.421
15	440	3	77.93	0.85	120.3	150.38
16	440	2	21.65	0.85	33.421	41.777
17	440	2	6.93	0.85	10.698	13.372
18	440	4	34.64	0.85	53.474	66.843

Κώδικας 5 : Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.6 της τρέχουσας εργασίας.

```

clc;
clear;

%Table_5

i = [1; 5; 8; 11; 15; 18; 3; 4; 5; 1; 2;];
V = [440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00;
440.00; 115.00;];
    
```



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

```
Ig = [40.10; 53.47; 46.78; 46.78; 120.30; 53.47; 66.83; 53.47; 66.83;
53.47; 75.31;];

S = [10.00; 25.00; 16.00; 16.00; 70.00; 25.00; 25.00; 25.00; 25.00;
16.00; 25.00;];

L = [45.00; 35.00; 30.00; 30.00; 40.00; 50.00; 55.00; 110.00; 150.00;
45.00; 60.00;];

DV = ((sqrt(3)).*(L).*(0.0176).*(Ig))./(S);

DVmax = (V).*(0.06);

varNames = {'i','V','Ig','S','L','DV','DVmax'};
varTypes = {'float','float','float','float','float','float','float'};
T = table(i,V,Ig,S,L,DV,DVmax);
T.Properties.VariableNames = varNames
```

Απεικόνιση αποτελεσμάτων κώδικα 5 στο πρόγραμμα του MatLab.

The screenshot shows the MATLAB Editor window with the following code in the script editor:

```
1 - |clc;
2 - clear;
3
4 - %Table_5
5
6 - i = [1; 5; 8; 11; 15; 18; 3; 4; 5; 1; 2;];
7 - V = [440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 440.00; 115.00;];
8 - Ig = [40.10; 53.47; 46.78; 46.78; 120.30; 53.47; 66.83; 53.47; 66.83; 53.47; 75.31;];
9 - S = [10.00; 25.00; 16.00; 16.00; 70.00; 25.00; 25.00; 25.00; 25.00; 16.00; 25.00;];
10 - L = [45.00; 35.00; 30.00; 30.00; 40.00; 50.00; 55.00; 110.00; 150.00; 45.00; 60.00;];
```

The Command Window displays the following table of results:

i	V	Ig	S	L	DV	DVmax
1	440	40.1	10	45	5.5009	26.4
5	440	53.47	25	35	2.282	26.4
8	440	46.78	16	30	2.6738	26.4
11	440	46.78	16	30	2.6738	26.4
15	440	120.3	70	40	2.0956	26.4
18	440	53.47	25	50	3.26	26.4
3	440	66.83	25	55	4.482	26.4
4	440	53.47	25	110	7.1719	26.4
5	440	66.83	25	150	12.224	26.4
1	440	53.47	16	45	4.5843	26.4
2	115	75.31	25	60	5.5098	6.9

Στην συνέχεια του παραρτήματος παρουσιάζεται ο κώδικας υπολογισμού των μέγιστων και ελάχιστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης της εγκατάστασης του λιμανιού του Ταλίν, που καταγράφονται στους πίνακες 6.12 και 6.13 αντίστοιχα.

Κώδικας 6.6 : Προσδιορισμός των σύνθετων αντιστάσεων όλων των στοιχείων – Προσδιορισμός των μέγιστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης όλων των πιθανών σημείων – Προσδιορισμός των ελάχιστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης όλων των πιθανών σημείων.

```
clear;
clc;

%For Each Same Ship Generator.

N_G = 3; %Number of available same ship generators.
S_G_nom = 2.08; %MVA
Cosf_G = 0.8;
R_G_pu = 0.0154; %p.u.
X_d_G_pu = 0.22; %p.u.

R_G_total_pu = R_G_pu/N_G; %p.u. , %R total for N parallel same ship generators.
X_d_G_total_pu = X_d_G_pu/N_G; %p.u. , %X total for N parallel same ship
generators.
Z_G_total_pu = complex(R_G_total_pu, X_d_G_total_pu); %p.u. , %Z total for N
parallel same ship generators. (Cartesian Coordinates)
Z_G_total_pu_abs = abs(Z_G_total_pu); %p.u.
Z_G_total_pu_theta = rad2deg(angle(Z_G_total_pu)); %degrees

V_ship_nom_pri_abs = 20; %kv , %Primary Nominal Voltage Transformer 20/6.6kV.
V_ship_nom_pri_theta = 0; %degrees
V_ship_nom_pri = complex((V_ship_nom_pri_abs*cos(V_ship_nom_pri_theta)),
(V_ship_nom_pri_abs*sin(V_ship_nom_pri_theta))); %kv (Cartesian Coordinates)

V_ship_nom_sec_abs = 6.6; %kv , %Secondary Nominal Voltage Transformer 20/6.6kV.
V_ship_nom_sec_theta = 0; %degrees
V_ship_nom_sec = complex((V_ship_nom_sec_abs*cos(V_ship_nom_sec_theta)),
(V_ship_nom_sec_abs*sin(V_ship_nom_sec_theta))); %kv (Cartesian Coordinates)

a=(V_ship_nom_pri_abs)/(V_ship_nom_sec_abs);

Z_G_total_sec =
(((V_ship_nom_sec_abs*(10^3))^2)/(N_G*S_G_nom*(10^6)))*Z_G_total_pu; %Ohm
(Cartesian Coordinates)
Z_G_total_sec_abs = abs(Z_G_total_sec); %Ohm
Z_G_total_sec_theta = rad2deg(angle(Z_G_total_sec)); %degrees
R_G_total_sec = real(Z_G_total_sec); %Ohm
X_d_G_total_sec = imag(Z_G_total_sec); %Ohm

Z_G_total_pri = Z_G_total_sec*(a^2); %Ohm (Cartesian Coordinates)
Z_G_3 = Z_G_total_pri;
Z_G_total_pri_abs = abs(Z_G_total_pri); %Ohm
Z_G_total_pri_theta = rad2deg(angle(Z_G_total_pri)); %degrees
R_G_total_pri = real(Z_G_total_pri); %Ohm
X_d_G_total_pri = imag(Z_G_total_pri); %Ohm

%For indoor ship line.

L_indoor_ship_line = 100; %m
r_indoor_ship_line = 0.082; %Ohm/Km
x_indoor_ship_line = 0.097; %Ohm/Km
```

*Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.*

```
R_indoor_ship_line_sec = r_indoor_ship_line*L_indoor_ship_line*(10^-3); %Ohm , %  
For Secondary Nominal Voltage Transformer 3 20/6.6kV.  
X_indoor_ship_line_sec = x_indoor_ship_line*L_indoor_ship_line*(10^-3); %Ohm  
Z_indoor_ship_line_sec = complex(R_indoor_ship_line_sec,  
X_indoor_ship_line_sec); %Ohm (Cartesian Coordinates)  
Z_indoor_ship_line_sec_abs = abs(Z_indoor_ship_line_sec); %Ohm  
Z_indoor_ship_line_sec_theta = rad2deg(angle(Z_indoor_ship_line_sec)); %degrees  
  
R_indoor_ship_line_pri = R_indoor_ship_line_sec*(a^2); %Ohm , %For Primary  
Nominal Voltage Transformer 3 20/6.6kV.  
X_indoor_ship_line_pri = X_indoor_ship_line_sec*(a^2); %Ohm  
Z_indoor_ship_line_pri = complex(R_indoor_ship_line_pri,  
X_indoor_ship_line_pri); %Ohm (Cartesian Coordinates)  
Z_9_10 = Z_indoor_ship_line_pri;  
Z_indoor_ship_line_pri_abs = abs(Z_indoor_ship_line_pri); %Ohm  
Z_indoor_ship_line_pri_theta = rad2deg(angle(Z_indoor_ship_line_pri)); %degrees  
  
%For overhead seaport line.  
  
L_overhead_seaport_line = 50; %m  
r_overhead_seaport_line = 0.102; %Ohm/Km  
x_overhead_seaport_line = 0.101; %Ohm/Km  
  
R_overhead_seaport_line_sec =  
r_overhead_seaport_line*L_overhead_seaport_line*(10^-3); %Ohm , % For Secondary  
Nominal Voltage Transformer 3 20/6.6kV.  
X_overhead_seaport_line_sec =  
x_overhead_seaport_line*L_overhead_seaport_line*(10^-3); %Ohm  
Z_overhead_seaport_line_sec = complex(R_overhead_seaport_line_sec,  
X_overhead_seaport_line_sec); %Ohm (Cartesian Coordinates)  
Z_overhead_seaport_line_sec_abs = abs(Z_overhead_seaport_line_sec); %Ohm  
Z_overhead_seaport_line_sec_theta = rad2deg(angle(Z_overhead_seaport_line_sec));  
%degrees  
  
R_overhead_seaport_line_pri = R_overhead_seaport_line_sec*(a^2); %Ohm , %For  
Primary Nominal Voltage Transformer 3 20/6.6kV.  
X_overhead_seaport_line_pri = X_overhead_seaport_line_sec*(a^2); %Ohm  
Z_overhead_seaport_line_pri = complex(R_overhead_seaport_line_pri,  
X_overhead_seaport_line_pri); %Ohm (Cartesian Coordinates)  
Z_8_9 = Z_overhead_seaport_line_pri;  
Z_overhead_seaport_line_pri_abs = abs(Z_overhead_seaport_line_pri); %Ohm  
Z_overhead_seaport_line_pri_theta = rad2deg(angle(Z_overhead_seaport_line_pri));  
%degrees  
  
%For underground seaport line.  
  
L_underground_seaport_line = 25; %m  
r_underground_seaport_line = 0.082; %Ohm/Km  
x_underground_seaport_line = 0.097; %Ohm/Km  
  
R_underground_seaport_line_sec =  
r_underground_seaport_line*L_underground_seaport_line*(10^-3); %Ohm , % For  
Secondary Nominal Voltage Transformer 3 20/6.6kV.  
X_underground_seaport_line_sec =  
x_underground_seaport_line*L_underground_seaport_line*(10^-3); %Ohm  
Z_underground_seaport_line_sec = complex(R_underground_seaport_line_sec,  
X_underground_seaport_line_sec); %Ohm (Cartesian Coordinates)  
Z_underground_seaport_line_sec_abs = abs(Z_underground_seaport_line_sec); %Ohm  
Z_underground_seaport_line_sec_theta =  
rad2deg(angle(Z_underground_seaport_line_sec)); %degrees
```

*Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.*

```
R_underground_seaport_line_pri = R_underground_seaport_line_sec*(a^2); %Ohm ,
%For Primary Nominal Voltage Transformer 3 20/6.6kV.
X_underground_seaport_line_pri = X_underground_seaport_line_sec*(a^2); %Ohm
Z_underground_seaport_line_pri = complex(R_underground_seaport_line_pri,
X_underground_seaport_line_pri); %Ohm (Cartesian Coordinates)
Z_7_8 = Z_underground_seaport_line_pri;
Z_underground_seaport_line_pri_abs = abs(Z_underground_seaport_line_pri); %Ohm
Z_underground_seaport_line_pri_theta =
rad2deg(angle(Z_underground_seaport_line_pri)); %degrees

%For Transformer 3.

P_no_load_loss_T_3 = 6000; %W
P_load_loss_T_3 = 45000; %W
Pcu_T_3 = P_load_loss_T_3 - P_no_load_loss_T_3; %W
S_T_3_nom = 6.30; %MVA
Z_T_3_pu = 0.0715; %p.u.
I_T_3_nom_abs = (S_T_3_nom*(10^6))/(sqrt(3)*V_ship_nom_pri_abs*(10^3)); %A
R_T_3 = (Pcu_T_3)/(3*(I_T_3_nom_abs^2)); %Ohm
Z_T_3_abs = (((V_ship_nom_pri_abs*(10^3))^2)/(S_T_3_nom*(10^6)))*Z_T_3_pu; %Ohm
X_T_3 = sqrt((Z_T_3_abs^2)-(R_T_3^2)); %Ohm
Z_T_3 = complex(R_T_3, X_T_3); %Ohm Cartesian Coordinates
Z_6_7 = Z_T_3;
Z_T_3_ABS = abs(Z_T_3); %Ohm
Z_T_3_THETA = rad2deg(angle(Z_T_3)); %degrees

%For underground seaport line A.

L_underground_seaport_line_A = 415; %m
r_underground_seaport_line_A = 0.671; %Ohm/Km
x_underground_seaport_line_A = 0.151; %Ohm/Km

R_underground_seaport_line_A =
r_underground_seaport_line_A*L_underground_seaport_line_A*(10^-3); %Ohm , % For
Secondary Nominal Voltage Transformer 2 2.3/20kV.
X_underground_seaport_line_A =
x_underground_seaport_line_A*L_underground_seaport_line_A*(10^-3); %Ohm
Z_underground_seaport_line_A = complex(R_underground_seaport_line_A,
X_underground_seaport_line_A); %Ohm (Cartesian Coordinates)
Z_5_6_A = Z_underground_seaport_line_A;
Z_underground_seaport_line_A_abs = abs(Z_underground_seaport_line_A); %Ohm
Z_underground_seaport_line_A_theta =
rad2deg(angle(Z_underground_seaport_line_A)); %degrees

%For underground seaport line B.

L_underground_seaport_line_B = 915; %m
r_underground_seaport_line_B = 0.671; %Ohm/Km
x_underground_seaport_line_B = 0.151; %Ohm/Km

R_underground_seaport_line_B =
r_underground_seaport_line_B*L_underground_seaport_line_B*(10^-3); %Ohm , % For
Secondary Nominal Voltage Transformer 2 2.3/20kV.
X_underground_seaport_line_B =
x_underground_seaport_line_B*L_underground_seaport_line_B*(10^-3); %Ohm
Z_underground_seaport_line_B = complex(R_underground_seaport_line_B,
X_underground_seaport_line_B); %Ohm (Cartesian Coordinates)
Z_5_6_B = Z_underground_seaport_line_B;
Z_underground_seaport_line_B_abs = abs(Z_underground_seaport_line_B); %Ohm
Z_underground_seaport_line_B_theta =
rad2deg(angle(Z_underground_seaport_line_B)); %degrees
```

```
%For underground seaport line C.

L_underground_seaport_line_C = 670; %m
r_underground_seaport_line_C = 0.671; %Ohm/Km
x_underground_seaport_line_C = 0.151; %Ohm/Km

R_underground_seaport_line_C =
r_underground_seaport_line_C*L_underground_seaport_line_C*(10^-3); %Ohm , % For
Secondary Nominal Voltage Transformer 2 2.3/20kV.
X_underground_seaport_line_C =
x_underground_seaport_line_C*L_underground_seaport_line_C*(10^-3); %Ohm
Z_underground_seaport_line_C = complex(R_underground_seaport_line_C,
X_underground_seaport_line_C); %Ohm (Cartesian Coordinates)
Z_5_6_C = Z_underground_seaport_line_C;
Z_underground_seaport_line_C_abs = abs(Z_underground_seaport_line_C); %Ohm
Z_underground_seaport_line_C_theta =
rad2deg(angle(Z_underground_seaport_line_C)); %degrees

%For underground seaport line D.

L_underground_seaport_line_D = 650; %m
r_underground_seaport_line_D = 0.671; %Ohm/Km
x_underground_seaport_line_D = 0.151; %Ohm/Km

R_underground_seaport_line_D =
r_underground_seaport_line_D*L_underground_seaport_line_D*(10^-3); %Ohm , % For
Secondary Nominal Voltage Transformer 2 2.3/20kV.
X_underground_seaport_line_D =
x_underground_seaport_line_D*L_underground_seaport_line_D*(10^-3); %Ohm
Z_underground_seaport_line_D = complex(R_underground_seaport_line_D,
X_underground_seaport_line_D); %Ohm (Cartesian Coordinates)
Z_5_6_D = Z_underground_seaport_line_D;
Z_underground_seaport_line_D_abs = abs(Z_underground_seaport_line_D); %Ohm
Z_underground_seaport_line_D_theta =
rad2deg(angle(Z_underground_seaport_line_D)); %degrees

%For underground seaport line E.

L_underground_seaport_line_E = 640; %m
r_underground_seaport_line_E = 0.671; %Ohm/Km
x_underground_seaport_line_E = 0.151; %Ohm/Km

R_underground_seaport_line_E =
r_underground_seaport_line_E*L_underground_seaport_line_E*(10^-3); %Ohm , % For
Secondary Nominal Voltage Transformer 2 2.3/20kV.
X_underground_seaport_line_E =
x_underground_seaport_line_E*L_underground_seaport_line_E*(10^-3); %Ohm
Z_underground_seaport_line_E = complex(R_underground_seaport_line_E,
X_underground_seaport_line_E); %Ohm (Cartesian Coordinates)
Z_5_6_E = Z_underground_seaport_line_E;
Z_underground_seaport_line_E_abs = abs(Z_underground_seaport_line_E); %Ohm
Z_underground_seaport_line_E_theta =
rad2deg(angle(Z_underground_seaport_line_E)); %degrees

%For Transformer 2.
```

```

N_T_2 = 5; %Number of available same Transformers 2.
V_T_2_nom_pri_abs = 2.3; %kV
V_T_2_nom_pri_theta = 0; %degrees
V_T_2_nom_pri = complex((V_T_2_nom_pri_abs*cos(V_T_2_nom_pri_theta)),
(V_T_2_nom_pri_abs*sin(V_T_2_nom_pri_theta))); %kV (Cartesian Coordinates)
V_T_2_nom_sec_abs = 20; %kV
V_T_2_nom_sec_theta = 0; %degrees
V_T_2_nom_sec = complex((V_T_2_nom_sec_abs*cos(V_T_2_nom_sec_theta)),
(V_T_2_nom_sec_abs*sin(V_T_2_nom_sec_theta))); %kV (Cartesian Coordinates)
Pcu_T_2 = 49000; %W
S_T_2_nom = 8.0; %MVA
Z_T_2_pu = 0.0835; %p.u.
I_T_2_nom_abs = (S_T_2_nom*(10^6))/(sqrt(3)*V_T_2_nom_pri_abs*(10^3)); %A
R_T_2 = (Pcu_T_2)/(3*(I_T_2_nom_abs^2)); %Ohm
Z_T_2_abs = (((V_T_2_nom_pri_abs*(10^3))^2)/(S_T_2_nom*(10^6)))*Z_T_2_pu; %Ohm
X_T_2 = sqrt((Z_T_2_abs^2)-(R_T_2^2)); %Ohm
Z_T_2 = (complex(R_T_2, X_T_2))/((V_T_2_nom_pri_abs/V_T_2_nom_sec_abs)^2); %Ohm
(Cartesian Coordinates)
Z_4_5 = Z_T_2;
Z_T_2_ABS = abs(Z_T_2); %Ohm
Z_T_2_THETA = rad2deg(angle(Z_T_2)); %degrees

R_total_T_2 = R_T_2/N_T_2; %Ohm
X_total_T_2 = X_T_2/N_T_2; %Ohm
Z_total_T_2 = (complex(R_total_T_2,
X_total_T_2))/((V_T_2_nom_pri_abs/V_T_2_nom_sec_abs)^2); %Ohm (Cartesian
Coordinates)
Z_4_5_5 = Z_total_T_2;
Z_total_T_2_abs = abs(Z_total_T_2); %Ohm
Z_total_T_2_theta = rad2deg(angle(Z_total_T_2)); %degrees

%For frequency converters.

Z_3_4 = complex(0, 0);

%For Transformer 1.

N_T_1 = 5; %Number of available same Transformers 1.
V_T_1_nom_pri_abs = 20; %kV
V_T_1_nom_pri_theta = 0; %degrees
V_T_1_nom_pri = complex((V_T_1_nom_pri_abs*cos(V_T_1_nom_pri_theta)),
(V_T_1_nom_pri_abs*sin(V_T_1_nom_pri_theta))); %kV (Cartesian Coordinates)
V_T_1_nom_sec_abs = 1.725; %kV
V_T_1_nom_sec_theta = 0; %degrees
V_T_1_nom_sec = complex((V_T_1_nom_sec_abs*cos(V_T_1_nom_sec_theta)),
(V_T_1_nom_sec_abs*sin(V_T_1_nom_sec_theta))); %kV (Cartesian Coordinates)
Pcu_T_1 = 49000; %W
S_T_1_nom = 8.0; %MVA
Z_T_1_pu = 0.0835; %p.u.
I_T_1_nom_abs = (S_T_1_nom*(10^6))/(sqrt(3)*V_T_1_nom_pri_abs*(10^3)); %A
R_T_1 = (Pcu_T_1)/(3*(I_T_1_nom_abs^2)); %Ohm
Z_T_1_abs = (((V_T_1_nom_pri_abs*(10^3))^2)/(S_T_1_nom*(10^6)))*Z_T_1_pu; %Ohm
X_T_1 = sqrt((Z_T_1_abs^2)-(R_T_1^2)); %Ohm
Z_T_1 = complex(R_T_1, X_T_1); %Ohm (Cartesian Coordinates)
Z_2_3 = Z_T_1;
Z_T_1_ABS = abs(Z_T_1); %Ohm
Z_T_1_THETA = rad2deg(angle(Z_T_1)); %degrees

R_total_T_1 = R_T_1/N_T_1; %Ohm
X_total_T_1 = X_T_1/N_T_1; %Ohm
Z_total_T_1 = complex(R_total_T_1, X_total_T_1); %Ohm (Cartesian Coordinates)

```

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

```
Z_2_3_5 = Z_total_T_1;
Z_total_T_1_abs = abs(Z_total_T_1); %Ohm
Z_total_T_1_theta = rad2deg(angle(Z_total_T_1)); %degrees

%For underground incoming line from the power network.

L_underground_incoming_power_network_line = 200; %m
r_underground_incoming_power_network_line = 0.082; %Ohm/Km
x_underground_incoming_power_network_line = 0.104; %Ohm/Km
N_underground_incoming_power_network_line = 2;

R_underground_incoming_power_network_line =
r_underground_incoming_power_network_line*L_underground_incoming_power_network_l
ine*(10^-3); %Ohm
X_underground_incoming_power_network_line =
x_underground_incoming_power_network_line*L_underground_incoming_power_network_l
ine*(10^-3); %Ohm
Z_underground_incoming_power_network_line =
complex(R_underground_incoming_power_network_line,
X_underground_incoming_power_network_line); %Ohm (Cartesian Coordinates)
Z_1_2 = Z_underground_incoming_power_network_line;
Z_underground_incoming_power_network_line_abs =
abs(Z_underground_incoming_power_network_line); %Ohm
Z_underground_incoming_power_network_line_theta =
rad2deg(angle(Z_underground_incoming_power_network_line)); %degrees

R_total_underground_incoming_power_network_line =
R_underground_incoming_power_network_line/N_underground_incoming_power_network_l
ine; %Ohm
X_total_underground_incoming_power_network_line =
X_underground_incoming_power_network_line/N_underground_incoming_power_network_l
ine; %Ohm
Z_total_underground_incoming_power_network_line =
complex(R_total_underground_incoming_power_network_line,
X_total_underground_incoming_power_network_line); %Ohm (Cartesian Coordinates)
Z_1_2_2 = Z_total_underground_incoming_power_network_line;
Z_total_underground_incoming_power_network_line_abs =
abs(Z_total_underground_incoming_power_network_line); %Ohm
Z_total_underground_incoming_power_network_line_theta =
rad2deg(angle(Z_total_underground_incoming_power_network_line)); %degrees

%For power network.

V_network_nom_abs = 20; %kV
V_network_nom_theta = 0; %degrees
V_network_nom = complex((V_network_nom_abs*cos(V_network_nom_theta)),
(V_network_nom_abs*sin(V_network_nom_theta)));
Sk_network = 350; %MVA
R_network = 0; %Ohm
X_d_o_network = (0.995*1.1*(V_network_nom*(10^3))^2)/(Sk_network*(10^6)); %Ohm
Z_network = complex(R_network, X_d_o_network); %Ohm
Z_0 = Z_network;
Z_network_abs = abs(Z_network); %Ohm
Z_network_theta = rad2deg(angle(Z_network)); %degrees

%Calculation of tallinn seaport short circuits in the case of Ship mooring at
the nearest terminal interconnection L = 415 m, WITH ALL LOADS.
```

Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

\*\*\*\*At the nearest terminal interconnection position L = 415 m, the largest short-circuit current develops, compared to the other terminal interconnection positions.\*\*\*%

```
Y_0_122_235_455 = 1/(Z_0 + Z_1_2_2 + Z_2_3_5 + Z_4_5_5); %S
Y_56B_67_78_89_910_G3 = 1/(Z_5_6_B + Z_6_7 + Z_7_8 + Z_8_9 + Z_9_10 + Z_G_3); %S
Y_56C_67_78_89_910_G3 = 1/(Z_5_6_C + Z_6_7 + Z_7_8 + Z_8_9 + Z_9_10 + Z_G_3); %S
Y_56D_67_78_89_910_G3 = 1/(Z_5_6_D + Z_6_7 + Z_7_8 + Z_8_9 + Z_9_10 + Z_G_3); %S
Y_56E_67_78_89_910_G3 = 1/(Z_5_6_E + Z_6_7 + Z_7_8 + Z_8_9 + Z_9_10 + Z_G_3); %S
```

```
Y_0_122_235_455_56B_56C_56D_56E_67_78_89_910_G3 = Y_0_122_235_455 +
Y_56B_67_78_89_910_G3 + Y_56C_67_78_89_910_G3 + Y_56D_67_78_89_910_G3 +
Y_56E_67_78_89_910_G3; %S
```

```
I_0_122_235_455 = V_network_nom*Y_0_122_235_455; %KA
I_56B_67_78_89_910_G3 = V_ship_nom_pri*Y_56B_67_78_89_910_G3; %KA
I_56C_67_78_89_910_G3 = V_ship_nom_pri*Y_56C_67_78_89_910_G3; %KA
I_56D_67_78_89_910_G3 = V_ship_nom_pri*Y_56D_67_78_89_910_G3; %KA
I_56E_67_78_89_910_G3 = V_ship_nom_pri*Y_56E_67_78_89_910_G3; %KA
```

```
I_0_122_235_455_56B_56C_56D_56E_67_78_89_910_G3 = I_0_122_235_455 +
I_56B_67_78_89_910_G3 + I_56C_67_78_89_910_G3 + I_56D_67_78_89_910_G3 +
I_56E_67_78_89_910_G3; %KA
```

```
V_source_1 = I_0_122_235_455_56B_56C_56D_56E_67_78_89_910_G3 /
Y_0_122_235_455_56B_56C_56D_56E_67_78_89_910_G3; %V
Z_source_1 = 1 / Y_0_122_235_455_56B_56C_56D_56E_67_78_89_910_G3; %Ohm
```

%For short circuit at point 10 of line A, L = 415 m.

```
Y_G3 = 1 / Z_G_3; %S
Y_source1_56A_67_78_89_910 = 1 / (Z_source_1 + Z_5_6_A + Z_6_7 + Z_7_8 + Z_8_9 +
Z_9_10); %S
```

```
I_G3 = V_ship_nom_pri*Y_G3; %KA
I_source1_56A_67_78_89_910 = V_source_1*Y_source1_56A_67_78_89_910; %KA
I_sc_10 = I_G3 + I_source1_56A_67_78_89_910; %KA
I_Sc_10_max = I_sc_10*a; %KA at 6,6 kV.
I_Sc_10_max_abs = abs(I_Sc_10_max); %KA at 6,6 kV.
I_Sc_10_max_theta = rad2deg(angle(I_Sc_10_max)); %degrees
```

%For short circuit at point 9 of line A, L = 415 m.

```
Y_G3_910 = 1 / (Z_G_3 + Z_9_10); %S
Y_source1_56A_67_78_89 = 1 / (Z_source_1 + Z_5_6_A + Z_6_7 + Z_7_8 + Z_8_9); %S
```

```
I_G3_910 = V_ship_nom_pri*Y_G3_910; %KA
I_source1_56A_67_78_89 = V_source_1*Y_source1_56A_67_78_89; %KA
I_sc_9 = I_G3_910 + I_source1_56A_67_78_89; %KA
I_Sc_9_max = I_sc_9*a; %KA at 6,6 kV.
I_Sc_9_max_abs = abs(I_Sc_9_max); %KA at 6,6 kV.
I_Sc_9_max_theta = rad2deg(angle(I_Sc_9_max)); %degrees
```

%For short circuit at point 8 of line A, L = 415 m.

```
Y_G3_910_89 = 1 / (Z_G_3 + Z_9_10 + Z_8_9); %S
Y_source1_56A_67_78 = 1 / (Z_source_1 + Z_5_6_A + Z_6_7 + Z_7_8); %S
```

```
I_G3_910_89 = V_ship_nom_pri*Y_G3_910_89; %KA
I_source1_56A_67_78 = V_source_1*Y_source1_56A_67_78; %KA
I_sc_8 = I_G3_910_89 + I_source1_56A_67_78; %KA
```



Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.

```
I_sc_8_max = I_sc_8*a; %KA at 6,6 kV.
I_sc_8_max_abs = abs(I_sc_8_max); %KA at 6,6 kV.
I_sc_8_max_theta = rad2deg(angle(I_sc_8_max)); %degrees

%For short circuit at point 7 of line A, L = 415 m.

Y_G3_910_89_78 = 1 / (Z_G_3 + Z_9_10 + Z_8_9 + Z_7_8); %S
Y_source1_56A_67 = 1 / (Z_source_1 + Z_5_6_A + Z_6_7); %S

I_G3_910_89_78 = V_ship_nom_pri*Y_G3_910_89_78; %KA
I_source1_56A_67 = V_source_1*Y_source1_56A_67; %KA
I_sc_7 = I_G3_910_89_78 + I_source1_56A_67; %KA
I_sc_7_max = I_sc_7*a; %KA at 6,6 kV.
I_sc_7_max_abs = abs(I_sc_7_max); %KA at 6,6 kV.
I_sc_7_max_theta = rad2deg(angle(I_sc_7_max)); %degrees

%For short circuit at point 6 of line A, L = 415 m.

Y_G3_910_89_78_67 = 1 / (Z_G_3 + Z_9_10 + Z_8_9 + Z_7_8 + Z_6_7); %S
Y_source1_56A = 1 / (Z_source_1 + Z_5_6_A); %S

I_G3_910_89_78_67 = V_ship_nom_pri*Y_G3_910_89_78_67; %KA
I_source1_56A = V_source_1*Y_source1_56A; %KA
I_sc_6_max = I_G3_910_89_78_67 + I_source1_56A; %KA at 20 kV.
I_sc_6_max_abs = abs(I_sc_6_max); %KA at 20 kV.
I_sc_6_max_theta = rad2deg(angle(I_sc_6_max)); %degrees

%For short circuit at point 5.

Y_56A_67_78_89_910_G3 = 1/(Z_5_6_A + Z_6_7 + Z_7_8 + Z_8_9 + Z_9_10 + Z_G_3); %S
Y_56B_67_78_89_910_G3 = 1/(Z_5_6_B + Z_6_7 + Z_7_8 + Z_8_9 + Z_9_10 + Z_G_3); %S
Y_56C_67_78_89_910_G3 = 1/(Z_5_6_C + Z_6_7 + Z_7_8 + Z_8_9 + Z_9_10 + Z_G_3); %S
Y_56D_67_78_89_910_G3 = 1/(Z_5_6_D + Z_6_7 + Z_7_8 + Z_8_9 + Z_9_10 + Z_G_3); %S
Y_56E_67_78_89_910_G3 = 1/(Z_5_6_E + Z_6_7 + Z_7_8 + Z_8_9 + Z_9_10 + Z_G_3); %S

Y_56A_56B_56C_56D_56E_67_78_89_910_G3 = Y_56A_67_78_89_910_G3 +
Y_56B_67_78_89_910_G3 + Y_56C_67_78_89_910_G3 + Y_56D_67_78_89_910_G3 +
Y_56E_67_78_89_910_G3; %S

I_56A_67_78_89_910_G3 = V_ship_nom_pri*Y_56A_67_78_89_910_G3; %KA
I_56B_67_78_89_910_G3 = V_ship_nom_pri*Y_56B_67_78_89_910_G3; %KA
I_56C_67_78_89_910_G3 = V_ship_nom_pri*Y_56C_67_78_89_910_G3; %KA
I_56D_67_78_89_910_G3 = V_ship_nom_pri*Y_56D_67_78_89_910_G3; %KA
I_56E_67_78_89_910_G3 = V_ship_nom_pri*Y_56E_67_78_89_910_G3; %KA

I_56A_56B_56C_56D_56E_67_78_89_910_G3 = I_56A_67_78_89_910_G3 +
I_56B_67_78_89_910_G3 + I_56C_67_78_89_910_G3 + I_56D_67_78_89_910_G3 +
I_56E_67_78_89_910_G3; %KA

V_source_2 = I_56A_56B_56C_56D_56E_67_78_89_910_G3 /
Y_56A_56B_56C_56D_56E_67_78_89_910_G3; %V
Z_source_2 = 1 / Y_56A_56B_56C_56D_56E_67_78_89_910_G3; %Ohm

Y_source2 = 1 / Z_source_2; %S
I_source2 = V_source_2*Y_source2; %KA

I_sc_5_max = I_0_122_235_455 + I_source2; %KA at 20 kV.
I_sc_5_max_abs = abs(I_sc_5_max); %KA at 20 kV.
I_sc_5_max_theta = rad2deg(angle(I_sc_5_max)); %degrees

%For short circuit at point 4 and at point 3.
```

```

Za = (((Z_2_3+Z_4_5)/4)*Z_2_3) / (((Z_2_3+Z_4_5)/4) + Z_2_3 + Z_4_5); %Ohm
Zb = (((Z_2_3+Z_4_5)/4)*Z_4_5) / (((Z_2_3+Z_4_5)/4) + Z_2_3 + Z_4_5); %Ohm
Zc = (Z_2_3*Z_4_5) / (((Z_2_3+Z_4_5)/4) + Z_2_3 + Z_4_5); %Ohm

Y_0_122_Za = 1/(Z_0 + Z_1_2_2 + Za); %S
Y_source2_Zb = 1/(Z_source2 + Zb); %S

Y_0_122_Za_source2_Zb = Y_0_122_Za + Y_source2_Zb; %S

I_0_122_Za = V_network_nom*Y_0_122_Za; %KA
I_source2_Zb = V_source2*Y_source2_Zb; %KA
I_0_122_Za_source2_Zb = I_0_122_Za + I_source2_Zb; %KA

V_source_3 = I_0_122_Za_source2_Zb / Y_0_122_Za_source2_Zb; %V
Z_source_3 = 1 / Y_0_122_Za_source2_Zb; %Ohm

I_sc_4 = V_source_3 / (Z_source_3 + Zc); %KA
I_sc_3 = I_sc_4; %KA

I_Sc_4_max = (V_T_2_nom_sec_abs / V_T_2_nom_pri_abs)*I_sc_4; %KA at 2.3 kV
I_Sc_4_max_abs = abs(I_Sc_4_max); %KA at 2.3 kV
I_Sc_4_max_theta = rad2deg(angle(I_Sc_4_max)); %degrees

I_Sc_3_max = (V_T_1_nom_pri_abs / V_T_1_nom_sec_abs)*I_sc_3; %KA at 1.725 kV
I_Sc_3_max_abs = abs(I_Sc_3_max); %KA at 1.725 kV
I_Sc_3_max_theta = rad2deg(angle(I_Sc_3_max)); %degrees

%For short circuit at point 2.

Y_source2_455_235 = 1 / (Z_source2 + Z_4_5_5 + Z_2_3_5); %S
Y_0_122 = 1 / (Z_0 + Z_1_2_2); %S

I_source2_455_235 = V_source_3*Y_source2_455_235; %KA
I_0_122 = V_network_nom*Y_0_122; %KA
I_Sc_2_max = I_source2_455_235 + I_0_122; %KA at 20kV
I_Sc_2_max_abs = abs(I_Sc_2_max); %KA at 20kV
I_Sc_2_max_theta = rad2deg(angle(I_Sc_2_max)); %degrees

%For short circuit at point 1.

Y_source2_455_235_122 = 1 / (Z_source2 + Z_4_5_5 + Z_2_3_5 + Z_1_2_2); %S
Y_0 = 1 / Z_0; %S

I_source2_455_235_122 = V_source_3*Y_source2_455_235_122; %KA
I_0 = V_network_nom*Y_0; %KA
I_Sc_1_max = I_source2_455_235_122 + I_0; %KA at 20kV
I_Sc_1_max_abs = abs(I_Sc_1_max); %KA at 20kV
I_Sc_1_max_theta = rad2deg(angle(I_Sc_1_max)); %degrees

%Calculation of tallinn seaport short circuits in the case of Ship mooring at
the longest terminal interconnection L = 915 m , WITH NO LOAD (GENS...).
%***At the longest terminal interconnection position L = 915 m, the shortest
short-circuit current develops, compared to the other terminal interconnection
positions.***%

%For short circuit at point 10.

Y_0_12_23_45_56E_67_78_89_910 = 1 / (Z_0 + Z_1_2 + Z_2_3 + Z_4_5 + Z_5_6_E +
Z_6_7 + Z_7_8 + Z_8_9 + Z_9_10); %S

I_sc_10_min = V_network_nom*Y_0_12_23_45_56E_67_78_89_910; %KA

```

*Αρχές διαμόρφωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λιμένα, υπό την απαίτηση ψυχρής εκκίνησης πλοίων.*

```
I_sc_10_min = (V_ship_nom_pri_abs / V_ship_nom_sec_abs)*I_sc_10_min; %KA at 6.6kV
I_sc_10_min_abs = abs(I_sc_10_min); %KA at 6.6kV
I_sc_10_min_theta = rad2deg(angle(I_sc_10_min)); %degrees

%For short circuit at point 9.

Y_0_12_23_45_56E_67_78_89 = 1 / (Z_0 + Z_1_2 + Z_2_3 + Z_4_5 + Z_5_6_E + Z_6_7 + Z_7_8 + Z_8_9); %S
I_sc_9_min = V_network_nom*Y_0_12_23_45_56E_67_78_89; %KA
I_sc_9_min = I_sc_9_min*a; %KA at 6.6kV
I_sc_9_min_abs = abs(I_sc_9_min); %KA at 6.6kV
I_sc_9_min_theta = rad2deg(angle(I_sc_9_min)); %degrees

%For short circuit at point 8.

Y_0_12_23_45_56E_67_78 = 1 / (Z_0 + Z_1_2 + Z_2_3 + Z_4_5 + Z_5_6_E + Z_6_7 + Z_7_8); %S
I_sc_8_min = V_network_nom*Y_0_12_23_45_56E_67_78; %KA
I_sc_8_min = I_sc_8_min*a; %KA at 6.6kV
I_sc_8_min_abs = abs(I_sc_8_min); %KA at 6.6kV
I_sc_8_min_theta = rad2deg(angle(I_sc_8_min)); %degrees

%For short circuit at point 7.

Y_0_12_23_45_56E_67 = 1 / (Z_0 + Z_1_2 + Z_2_3 + Z_4_5 + Z_5_6_E + Z_6_7); %S
I_sc_7_min = V_network_nom*Y_0_12_23_45_56E_67; %KA
I_sc_7_min = I_sc_7_min*a; %KA at 6.6kV
I_sc_7_min_abs = abs(I_sc_7_min); %KA at 6.6kV
I_sc_7_min_theta = rad2deg(angle(I_sc_7_min)); %degrees

%For short circuit at point 6.

Y_0_12_23_45_56E = 1 / (Z_0 + Z_1_2 + Z_2_3 + Z_4_5 + Z_5_6_E); %S
I_sc_6_min = V_network_nom*Y_0_12_23_45_56E; %KA at 20kV
I_sc_6_min_abs = abs(I_sc_6_min); %KA at 20kV
I_sc_6_min_theta = rad2deg(angle(I_sc_6_min)); %degrees

%For short circuit at point 5.

Y_0_12_23_45 = 1 / (Z_0 + Z_1_2 + Z_2_3 + Z_4_5); %S
I_sc_5_min = V_network_nom*Y_0_12_23_45; %KA at 20kV
I_sc_5_min_abs = abs(I_sc_5_min); %KA at 20kV
I_sc_5_min_theta = rad2deg(angle(I_sc_5_min)); %degrees

%For short circuit at point 4 and at point 3.

Y_0_12_23 = 1 / (Z_0 + Z_1_2 + Z_2_3); %S
I_sc_4_min = V_network_nom*Y_0_12_23; %KA
I_sc_3_min = I_sc_4_min; %KA

I_sc_4_min = (V_T_2_nom_sec_abs / V_T_2_nom_pri_abs)*I_sc_4_min; %KA at 2.3 kV
I_sc_4_min_abs = abs(I_sc_4_min); %KA at 2.3 kV
I_sc_4_min_theta = rad2deg(angle(I_sc_4_min)); %degrees

I_sc_3_min = (V_T_1_nom_pri_abs / V_T_1_nom_sec_abs)*I_sc_3_min; %KA at 1.725 kV
I_sc_3_min_abs = abs(I_sc_3_min); %KA at 1.725 kV
I_sc_3_min_theta = rad2deg(angle(I_sc_3_min)); %degrees

%For short circuit at point 2.
```

```

Y_0_12 = 1 / (Z_0 + Z_1_2); %S
I_Sc_2_min = V_network_nom*Y_0_12; %KA at 20kV
I_Sc_2_min_abs = abs(I_Sc_2_min); %KA at 20kV
I_Sc_2_min_theta = rad2deg(angle(I_Sc_2_min)); %degrees

%For short circuit at point 1.

I_Sc_1_min = I_0; %KA at 20kV
I_Sc_1_min_abs = abs(I_Sc_1_min); %KA at 20kV
I_Sc_1_min_theta = rad2deg(angle(I_Sc_1_min)); %degrees

fprintf('\nI_Sc_10_max = %4.4f < %4.2f kA   I_Sc_10_min = %4.4f < %4.2f
kA\n',I_Sc_10_max_abs, I_Sc_10_max_theta, I_Sc_10_min_abs, I_Sc_10_min_theta)
fprintf('\nI_Sc_09_max = %4.4f < %4.2f kA   I_Sc_09_min = %4.4f < %4.2f
kA\n',I_Sc_9_max_abs, I_Sc_9_max_theta, I_Sc_9_min_abs, I_Sc_9_min_theta)
fprintf('\nI_Sc_08_max = %4.4f < %4.2f kA   I_Sc_08_min = %4.4f < %4.2f
kA\n',I_Sc_8_max_abs, I_Sc_8_max_theta, I_Sc_8_min_abs, I_Sc_8_min_theta)
fprintf('\nI_Sc_07_max = %4.4f < %4.2f kA   I_Sc_07_min = %4.4f < %4.2f
kA\n',I_Sc_7_max_abs, I_Sc_7_max_theta, I_Sc_7_min_abs, I_Sc_7_min_theta)
fprintf('\nI_Sc_06_max = %4.4f < %4.2f kA   I_Sc_06_min = %4.4f < %4.2f
kA\n',I_Sc_6_max_abs, I_Sc_6_max_theta, I_Sc_6_min_abs, I_Sc_6_min_theta)
fprintf('\nI_Sc_05_max = %4.4f < %4.2f kA   I_Sc_05_min = %4.4f < %4.2f
kA\n',I_Sc_5_max_abs, I_Sc_5_max_theta, I_Sc_5_min_abs, I_Sc_5_min_theta)
fprintf('\nI_Sc_04_max = %4.4f < %4.2f kA   I_Sc_04_min = %4.4f < %4.2f
kA\n',I_Sc_4_max_abs, I_Sc_4_max_theta, I_Sc_4_min_abs, I_Sc_4_min_theta)
fprintf('\nI_Sc_03_max = %4.4f < %4.2f kA   I_Sc_03_min = %4.4f < %4.2f
kA\n',I_Sc_3_max_abs, I_Sc_3_max_theta, I_Sc_3_min_abs, I_Sc_3_min_theta)
fprintf('\nI_Sc_02_max = %4.4f < %4.2f kA   I_Sc_02_min = %4.4f < %4.2f
kA\n',I_Sc_2_max_abs, I_Sc_2_max_theta, I_Sc_2_min_abs, I_Sc_2_min_theta)
fprintf('\nI_Sc_01_max = %4.4f < %4.2f kA   I_Sc_01_min = %4.4f < %4.2f
kA\n',I_Sc_1_max_abs, I_Sc_1_max_theta, I_Sc_1_min_abs, I_Sc_1_min_theta)

```

Απεικόνιση αποτελεσμάτων κώδικα 6 στο πρόγραμμα του MatLab.

```

I_Sc_10_max = 22.7296 < -83.90 kA   I_Sc_10_min = 4.1901 < -83.68 kA
I_Sc_09_max = 22.6491 < -83.85 kA   I_Sc_09_min = 4.2183 < -83.94 kA
I_Sc_08_max = 22.6112 < -83.53 kA   I_Sc_08_min = 4.2333 < -84.11 kA
I_Sc_07_max = 22.5933 < -83.48 kA   I_Sc_07_min = 4.2405 < -84.17 kA
I_Sc_06_max = 16.0254 < -75.00 kA   I_Sc_06_min = 2.0506 < -83.77 kA
I_Sc_05_max = 17.2576 < -84.25 kA   I_Sc_05_min = 2.0791 < -86.25 kA
I_Sc_04_max = 60.8125 < -85.88 kA   I_Sc_04_min = 31.9401 < -86.60 kA
I_Sc_03_max = 81.9834 < -85.88 kA   I_Sc_03_min = 42.5668 < -86.60 kA
I_Sc_02_max = 21.4188 < -88.13 kA   I_Sc_02_min = 15.7262 < -89.26 kA
I_Sc_01_max = 21.5299 < -89.39 kA   I_Sc_01_min = 15.9590 < -90.00 kA

```