

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΡΑΦΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ

Γεώργιος Π. Δήμιζας

Επιβλέπων: Αντωνόπουλος Αντώνιος,
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιανουάριος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΡΑΦΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ

Γεώργιος Π. Δήμιζας

Επιβλέπων: Αντωνόπουλος Αντώνιος,
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27^η Ιανουαρίου 2021.

.....
Αντωνόπουλος Αντώνιος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Προυσαλίδης Ιωάννης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κλαδάς Αντώνιος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2021

Copyright © Γεώργιος Π. Δήμιζας, 2021.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λειτουργικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης.

Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

.....
Γεώργιος Π. Δήμιζας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την περιγραφή, την ανάλυση και τη μελέτη των βασικών μηχανισμών και αυτοματισμών ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση πλοίων του εμπορικού στόλου. Βασικό αντικείμενο μελέτης αποτελεί η ανάλυση σύγχρονων τριφασικών ηλεκτρογεννητριών, ιδίως σε παράλληλη λειτουργία, η διαδικασία παραλληλισμού τους και η μελέτη των αυτοματισμών που χρησιμοποιούνται ευρέως για τον έλεγχο, τη ρύθμιση, την προστασία και τη λειτουργία τους. Για τη σφαιρική προσέγγιση και πλήρη κατανόηση των μηχανισμών αυτών, περιγράφονται οι επιμέρους θεωρητικές έννοιες οι οποίες αφορούν στην ανάλυση μονοφασικών και τριφασικών δικτύων, στη μετάδοση ισχύος, στις βασικές αρχές λειτουργίας σύγχρονων εναλλακτήρων, στη διαδικασία συγχρονισμού και παραλληλισμού τους αλλά και στη βασική δομή ενός ηλεκτρικού δικτύου πλοίου.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ξεκίνησε η ανάπτυξη του εκπαιδευτικού προγράμματος **Marine Electronic Circuit Simulator** με σκοπό την πρακτική εμπέδωση των προαναφερθέντων. Το πρόγραμμα αυτό αποτελεί ολοκληρωμένο γραφικό περιβάλλον που προσφέρει τη δυνατότητα σχεδίασης, ελέγχου και παρατήρησης απλών ηλεκτρικών διατάξεων συνεχούς και εναλλασσομένου ρεύματος αλλά και το χειρισμό σύνθετων ηλεκτρικών πινάκων ισχύος. Το πρόγραμμα εξομοίωσης χωρίζεται σε τέσσερις αυτόνομες ενότητες. Η πρώτη ενότητα αφορά στη σχεδίαση διατάξεων συνεχούς ρεύματος με χρήση μπαταριών. Η δεύτερη παρέχει εργαλεία ανάπτυξης και σχεδιασμού γραμμικών RLC κυκλωμάτων συνεχούς και εναλλασσομένου ρεύματος προσφέροντας στο χρήστη τη δυνατότητα εποπτικής μελέτης με μετρήσεις και διαγράμματα αξιοποιώντας εικονικά όργανα εργαστηρίου (πολύμετρο, παλμογράφο). Η τρίτη ενότητα αφορά στη σχεδίαση τριφασικών συμμετρικών και ασύμμετρων δικτύων προσφέροντας τη δυνατότητα μελέτης διαφορετικών συνδεσμολογιών (αστέρα – τριγώνου). Τέλος, το τέταρτο και βασικότερο μέρος αποτελεί εργαλείο πλήρους εξομοίωσης της διαδικασίας παραλληλισμού σύγχρονων ηλεκτρογεννητριών από τους πίνακες λειτουργίας τους σε εικονικό μηχανοστάσιο. Η σχεδίαση βασίζεται σε πραγματική εικόνα μηχανοστασίου και αξιοποιεί πλήθος παραμέτρων.

Στα επί μέρους κεφάλαια αναπτύσσεται τόσο το θεωρητικό μέρος που συντέλεσε στη σχεδίαση και στην κατανόηση των προαναφερθέντων φαινομένων όσο και ο τρόπος με τον οποίο υλοποιήθηκε το πρόγραμμα εξομοίωσης, τα εργαλεία σχεδίασης που επιλέχθηκαν και οι συνήθεις χειρισμοί λειτουργίας.

Λέξεις κλειδιά: ηλεκτρογεννήτριες, σύγχρονες μηχανές, παραλληλισμός, ναυτιλία, μηχανοστάσιο, πρόγραμμα εξομοίωσης, python

Abstract

The present thesis explores the description, analysis and study of the main (and auxiliary) machinery as well as the most commonly used automations used for power production and transfer in marine vessels. The main subject of this research is the nature of synchronous alternators and more specifically; diesel generators in parallel use, the process of synchronization and the automations used for their control, protection, and functioning. To establish a theoretical background and facilitate the overall understanding of these systems, several concepts are described in the first chapters. These include individual theoretical concepts concerning the analysis of single and multiphase electrical networks, power transmission and production, the basic principles of operation of synchronous alternators, the process of synchronization as well as the main structure of the ship's electrical network.

Within the scope of this project, development of the **Marine Electronic Circuit Simulator** training program began with the aim of the practical comprehension the aforementioned concepts. This graphical user interface contains tools for design, control and observation of simple electrical AC and DC structures, three phase networks and the operation of switchboard panels. The simulation program is divided into four autonomous sections. The first section deals with the design of simple DC circuits. The second one provides tools for the development and the design of linear RLC circuits with both AC and DC power supply, offering the possibility of supervisory study with measurements and diagrams utilizing virtual lab equipment (multimeter and oscilloscope). The third section examines the design of three-phase electrical networks providing the ability to select the connection type (star, delta etc.). Finally, the fourth and most vital part of this program contains tools for simulating completely the process of synchronization of synchronous alternators from the main switchboard of a virtual Engine Control Room (ECR). The design of the ECR is based on a common, real-life engine room, utilizing plenty of parameters.

Throughout this project, there is an exploration of both the theoretical part, which contributed to the design and the understanding of the aforementioned phenomena, and also the way that the simulation program was implemented.

It was concluded that the ever-evolving technological advancement of automations used in marine vessels dictates the necessity of virtualization of these systems for better training of operators and students.

Key words: diesel generators, synchronization, electronics, marine, engine room, simulation, GUI, python

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Προυσαλίδη ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα να συνδυάσω το αντικείμενο εργασίας μου με το πεδίο σπουδών μου μέσω της συνεργασίας μας, η οποία οδήγησε και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους τριτοετείς φοιτητές της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ με τους οποίους συνεργαστήκαμε στο πλαίσιο του εργαστηρίου Ηλεκτροτεχνίας και με τη συμμετοχή τους βελτιώθηκε και εξελίχθηκε το πρόγραμμα εξομοίωσης.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αντωνόπουλο ο οποίος δέχθηκε να αναλάβει την επίβλεψη της εργασίας και τον κ. Κλαδά που παρευρέθη στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συντέλεσαν όλα αυτά τα χρόνια στην ολοκλήρωση των σπουδών μου και ιδίως τον πατέρα μου, Παναγιώτη, ο οποίος συνέβαλε τα μέγιστα δίνοντας μου την αφορμή, το κίνητρο και τα μέσα για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και του προγράμματος εξομοίωσης.

Γεώργιος Π. Δήμιζας
Αθήνα 2021

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
Ευχαριστίες.....	7
Περιεχόμενα.....	8
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	11
1.1 Σκοπός.....	11
1.2 Οργάνωση.....	12
Κεφάλαιο 2: Εισαγωγικές έννοιες.....	13
2.1 Γραμμικά κυκλώματα.....	13
2.1.1 Πηγές τάσης και ρεύματος.....	13
2.1.2 Περιγραφή γραμμικών στοιχείων.....	14
2.1.3 Ηλεκτρική εμπέδηση.....	17
2.1.4 Ημιτονική Μόνιμη Κατάσταση.....	18
2.2 Η έννοια της ισχύος.....	19
2.2.1 Στιγμιαία ισχύς.....	19
2.2.2 Ενεργός (Πραγματική) Ισχύς.....	20
2.2.3 Άεργος (φανταστική) Ισχύς.....	20
2.2.4 Φαινόμενη Ισχύς.....	21
2.2.5 Συντελεστής Ισχύος.....	21
2.3 Τριφασικά Δίκτυα.....	22
2.3.1 Συμμετρικά Δίκτυα.....	23
2.3.2 Φασικά και πολικά μεγέθη.....	23
2.3.3 Συνδεσμολογία Αστέρα.....	24
2.3.4 Συνδεσμολογία Τριγώνου.....	25
2.3.5 Ουδέτερος κόμβος.....	26
2.3.6 Μη συμμετρικά τριφασικά συστήματα.....	26
2.3.7 Μετασχηματισμός αστέρα – τρίγωνο.....	27
Κεφάλαιο 3: Γεννήτριες εναλλασσομένου ρεύματος.....	29

3.1 Αρχή λειτουργίας σύγχρονων γεννητριών	29
3.1.1 Δομή σύγχρονων γεννητριών	30
3.1.2 Βασική λειτουργία	31
3.1.3 Μονοφασικό ισοδύναμο	33
3.1.4 Χαρακτηριστικά λειτουργίας	34
3.1.5 Μέθοδοι διέγερσης	36
3.2 Τρόποι ελέγχου σύγχρονων γεννητριών	38
3.2.1 Ρύθμιση συχνότητας – speed governor	38
3.2.2 Ρύθμιση τάσης – voltage droop	39
3.2.3 Μαθηματικές σχέσεις P-δ και Q-V	41
3.2.4 Αυτόματος ρυθμιστής τάσης – AVR	43
3.3 Παράλληλη λειτουργία εναλλακτών	44
3.3.1 Προϋποθέσεις παραλληλισμού	45
3.3.2 Όργανα μέτρησης – χειρισμού	45
3.3.3 Διαδικασία παραλληλισμού	49
3.3.4 Επιμερισμός φορτίων	51
Κεφάλαιο 4: Μηχανοστάσιο και ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου	55
4.1 Μηχανοστάσιο και έλεγχος μηχανοστασίου	55
4.1.1 Μηχανοστάσιο	55
4.1. Engine control room	56
4.2 Ηλεκτρικό δίκτυο	60
4.2.1 Διαστάσεις ηλεκτρικού δικτύου	60
4.2.2 Βοηθητικό δίκτυο τροφοδοσίας (Auxiliary network)	61
4.2.3 Συμπληρωματικό δίκτυο	63
4.2.4 Power Management System (PMS)	65
Κεφάλαιο 5: Πρόγραμμα εξομοίωσης	69
5.1 Εργαλεία ανάπτυξης λογισμικού	69
5.1.1 Γλώσσα προγραμματισμού	69
5.1.2 Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος	70
5.1.3 Οργάνωση κώδικα	70

5.1.4 Βιβλιοθήκες.....	71
5.2 Γραφικό περιβάλλον	72
5.2.1 Κύριο Μενού - Main Menu.....	72
5.2.2 Κυκλώματα ΣΡ - DC Circuits	74
5.2.3 Γραμμικά κυκλώματα - RLC Circuits	75
5.2.4 Τριφασικά κυκλώματα - Three phase.....	77
5.2.5 Συγχρονισμός γεννητριών - Synchro.....	78
5.2.6 Διαδικασία εξομοίωσης αυτόματου παραλληλισμού.....	81
5.2.7 Διαδικασία εξομοίωσης χειροκίνητου παραλληλισμού	84
5.3 Μαθηματικό μοντέλο και διαγράμματα ροής	87
5.3.1 DC Circuits.....	87
5.3.2 RLC Circuits.....	88
5.3.3 3-Phase.....	89
5.3.4 Synchro	90
5.4 Πειραματική δοκιμή.....	92
5.4.1 Όργανα μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών – Απλές μετρήσεις.....	93
5.4.2 Τριφασικά κυκλώματα και μετρήσεις.....	93
5.4.3 Συμπεράσματα και προτάσεις	93
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προοπτικές εξέλιξης	95
6.1 Συμπεράσματα	95
6.2 Προοπτικές εξέλιξης	95
Παράρτημα Ι:.....	97
1 ^η Εργαστηριακή άσκηση Ηλεκτροτεχνίας, 3 ^ο εξάμηνο ΣΝΜΜ/ΕΜΠ.....	97
2 ^η Εργαστηριακή άσκηση Ηλεκτροτεχνίας,3 ^ο εξάμηνο ΣΝΜΜ/ΕΜΠ.....	103
Παράρτημα ΙΙ:.....	109
Βιβλιογραφία.....	109

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η περιγραφή, η ανάλυση και η μελέτη βασικών αυτοματισμών που χρησιμοποιούνται σε εμπορικά πλοία και βρίσκουν εφαρμογές τόσο στη βιομηχανία όσο και στη ναυτιλία. Κυρίαρχο αντικείμενο μελέτης αποτελεί ο παραλληλισμός σύγχρονων τριφασικών ηλεκτρογεννητριών, η διαδικασία παραλληλισμού τους και η μελέτη των αυτοματισμών που χρησιμοποιούνται ευρέως για τον έλεγχο και τη λειτουργία αυτών.

Για την προοδευτική μελέτη και κατανόηση των συστημάτων αυτών, περιγράφονται τμηματικά οι επιμέρους θεωρητικές έννοιες ώστε ξεκινώντας από απλή ανάλυση γραμμικών μονοφασικών δικτύων να γίνει κατανοητή η μελέτη σύνθετων φαινομένων που παρατηρούνται σε χρήση παραλληλισμένων τριφασικών ηλεκτρογεννητριών.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ξεκίνησε η ανάπτυξη του εκπαιδευτικού προγράμματος **Marine Electronic Circuit Simulator** με σκοπό την πρακτική εμπέδωση των προαναφερθέντων. Το πρόγραμμα, αυτό αποτελεί ολοκληρωμένο γραφικό περιβάλλον που προσφέρει τη δυνατότητα στο χρήστη να σχεδιάσει, να ελέγξει και να διαχειριστεί από απλές ηλεκτρονικές διατάξεις μέχρι πολύπλοκα συστήματα ελέγχου ηλεκτρονικών ισχύος.

Το **Marine Electronic Circuit Simulator** αποτελείται από επί μέρους υποπρογράμματα τα οποία σε μεγάλο βαθμό ακολουθούν και τη δομή της παρούσας εργασίας. Τα πρώτα υποπρογράμματα προσφέρουν τη δυνατότητα εξοικείωσης με εικονικό εργαστηριακό εξοπλισμό (πολύμετρο, παλμογράφο, breadboard κ.λ.π.) για την ανάπτυξη γραμμικών κυκλωμάτων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος. Στη συνέχεια παρέχονται εργαλεία εξομοίωσης τριφασικών δικτύων με σύνθετα φορτία σε βασικές συνδεσμολογίες (αστέρα και τριγώνου). Με τον τρόπο αυτό «χτίζονται» τα απαραίτητα εφόδια για την κατανόηση των εργαλείων που προσφέρονται στο τελευταίο (μέχρι ώρας) μέρος του προγράμματος το οποίο αφορά στη διαδικασία παραλληλισμού τριφασικών ηλεκτρογεννητριών με χρήση εικονικού μηχανοστασίου, το οποίο οπτικά εξομοιώνει πραγματικά μηχανοστάσια πλοίων κατά το μέγιστο δυνατό τρόπο.

1.2 Οργάνωση

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι εισαγωγικές έννοιες και συγκεκριμένα πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση του τρόπου λειτουργίας των γραμμικών κυκλωμάτων τα οποία αποτελούν βασικά εργαλεία στην υλοποίηση των υποπρογραμμάτων DC Circuits και RLC Circuits του προγράμματος εξομοίωσης. Στην ενότητα 2.3 αναλύονται τριφασικά κυκλώματα τα οποία εφαρμόστηκαν τόσο στην υλοποίηση του υποπρογράμματος 3-phase αλλά παράλληλα αποτέλεσαν τα βασικά θεμέλια για την κατανόηση και τη σχεδίαση του βασικού προγράμματος που αφορά στον παραλληλισμό σύγχρονων ηλεκτρογεννητριών.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι βασικές αρχές των σύγχρονων μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος με αναλυτικές αναφορές στη λειτουργία τους ως γεννήτριες, οι τρόποι διέγερσης τους, οι περιφερειακοί μηχανισμοί ελέγχου τους και η διαδικασία παραλληλισμού τους. Η μελέτη αφορά τόσο στη θεωρητική λειτουργία παραλληλισμένων και μη εναλλακτῆρων όσο και στους τρόπους με τους οποίους αυτό επιτυγχάνεται στην πράξη.

Το 4^ο κεφάλαιο αποτελεί το σημείο τομής μεταξύ των θεωρητικών περιγραφών των προαναφερθέντων κεφαλαίων και του προγράμματος εξομοίωσης. Συγκεκριμένα, περιγράφεται η κεντρική δομή του μηχανοστασίου στα πλοία, οι βασικοί αυτοματισμοί που συναντώνται, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου και στον εξοπλισμό που το διαμορφώνει. Παράλληλα, δίνονται οι βασικοί ορισμοί και οι περιγραφές που διαφοροποιούν τη χρήση εναλλακτῆρων στην βιομηχανία από τη χρήση στη ναυτιλία.

Στο κεφάλαιο 5 αναλύεται το πρόγραμμα εξομοίωσης, τα εργαλεία που αξιοποιήθηκαν στη σχεδίασή του και ο τρόπος με τον οποίο δομήθηκε ο κώδικας. Επιπλέον αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο μέσω των μαθηματικών σχέσεων που εξετάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και διαγραμμάτων ροής για τις βασικές περιπτώσεις λειτουργίας.

Το 6^ο κεφάλαιο ενσαρκώνει τη φιλοδοξία του γράφοντα παρουσιάζοντας μελλοντικές προοπτικές εξέλιξης του προγράμματος εξομοίωσης και ενδεχόμενες πρακτικές εφαρμογές.

Κεφάλαιο 2: Εισαγωγικές έννοιες

Για την κατανόηση τόσο του θεωρητικού όσο και του πρακτικού μέρους της εργασίας καθίσταται αναγκαία η εξοικείωση του αναγνώστη με τις βασικές έννοιες που περιγράφονται στο κεφάλαιο αυτό. Για την ευκολότερη ανάγνωση παρατίθενται κυκλωματικές διατάξεις και γραφικές παραστάσεις που σχεδιάστηκαν από το πρόγραμμα **marine electronic circuit simulator** που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας αυτής και για το οποίο πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στο 5^ο κεφάλαιο.

2.1 Γραμμικά κυκλώματα

Με τον όρο γραμμικά κυκλώματα εννοούνται όλα τα συστήματα που περιγράφουν ηλεκτρικά κυκλώματα που υπακούουν στην αρχή της επαλληλίας, δηλαδή το σήμα εξόδου μπορεί να περιγραφεί ως γραμμικός συνδυασμός των σημάτων εισόδου.

Θεωρώντας έξοδο $F(x)$ και εφαρμόζοντας εισόδους της μορφής ax_1 , bx_2 , η έξοδος μπορεί να γραφεί ως:

$$F(ax_1 + bx_2) = F(ax_1) + F(bx_2) \quad (2.1.1)$$

Γενικεύοντας για απείρως μετρήσιμο αριθμό εισόδων η (2.1.1) παίρνει τη μορφή:

$$F\left[\sum_{k=0}^n (a_n x_n)\right] = \sum_{k=0}^n [F(a_n x_n)] \quad (2.1.2)$$

2.1.1 Πηγές τάσης και ρεύματος

Σε κάθε ηλεκτρονική / ηλεκτρική διάταξη απαιτείται προσφορά ενέργειας για τη δημιουργία ροής ρεύματος η οποία εξασφαλίζεται μέσω ηλεκτρικών πηγών. Κατά σύμβαση υπάρχουν δύο κύριες μορφές ανεξάρτητων ηλεκτρικών πηγών: οι ανεξάρτητες πηγές τάσης και οι ανεξάρτητες πηγές ρεύματος. Ο όρος «ανεξάρτητες» οφείλεται στο γεγονός ότι η προσφερόμενη ενέργεια προκαθορίζεται από τις απαιτήσεις του υλικού και της σχεδίασης και δεν «ελέγχονται» από επιμέρους κυκλωματικές διατάξεις.

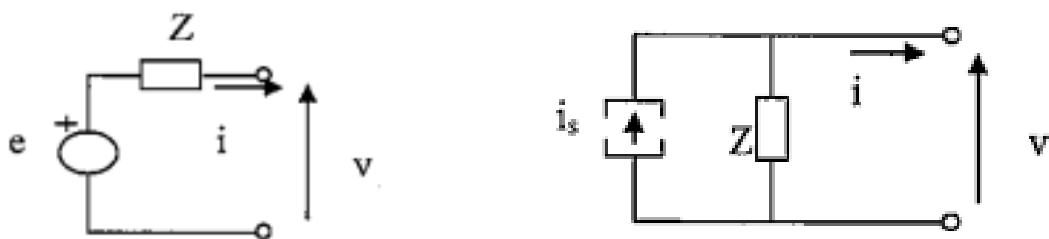
Ιδανική πηγή τάσης:

Η ιδανική πηγή τάσης παρέχει την καθορισμένη διαφορά δυναμικού U_s μεταξύ των ακροδεκτών της ανεξάρτητα από το ρεύμα που τη διαρρέει. Το ποσό του ρεύματος καθορίζεται από τα στοιχεία που συνδέονται στα άκρα της.

Ιδανική πηγή ρεύματος:

Η ιδανική πηγή ρεύματος παρέχει την καθορισμένη ένταση ρεύματος I_S στο κύκλωμα στο οποίο θα συνδεθεί, ανεξάρτητα από τη διαφορά δυναμικού που θα αναπτυχθεί στα άκρα της. Η τιμή της τάσης που θα αναπτυχθεί στα άκρα της πηγής ρεύματος καθορίζεται από τα στοιχεία που συνδέονται στα άκρα της.

Σε πραγματικές συνθήκες τόσο η τάση όσο και το ρεύμα στις πηγές τάσης και ρεύματος, αντίστοιχα, παρουσιάζουν πτώση τάσης/ρεύματος η οποία οφείλεται στις εσωτερικές αντιστάσεις των πηγών. Έτσι, για λόγους πληρότητας, ως μη ιδανική πηγή τάσης ορίζεται η ιδανική πηγή τάσης συνδεδεμένη εν' σειρά με αντιστάτη τιμής r και η μη ιδανική πηγή ρεύματος ως ιδανική πηγή ρεύματος συνδεδεμένη εν' παραλλήλω με αντιστάτη τιμής r .



Σχήμα 2.1.1 Μη ιδανική πηγή τάσης και ρεύματος [2]

2.1.2 Περιγραφή γραμμικών στοιχείων

Ως γραμμικά στοιχεία ορίζονται τα στοιχεία στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί ο νόμος του Ωμ, δηλαδή η εξάρτηση τάσης – ρεύματος είναι της μορφής:

$$V = I \cdot Z \quad (2.1.3)$$

όπου,

V: η διαφορά δυναμικού στα άκρα του στοιχείου

I: το ρεύμα που διαρρέει το στοιχείο

Z: η σύνθετη αντίσταση του στοιχείου

Στην ανάλυση γραμμικών κυκλωμάτων τρία είναι τα κύρια στοιχεία που χρησιμοποιούνται: ο αντιστάτης, ο πυκνωτής και το πηνίο.

Αντιστάτης:

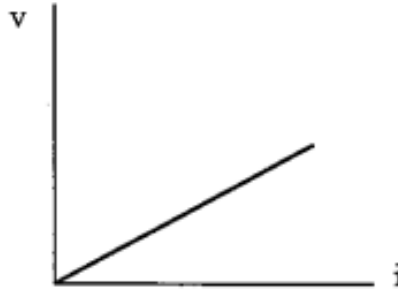
Ο αντιστάτης παρουσιάζει αμιγώς ωμική αντίσταση η οποία συμβολίζεται με R και η (2.3) παίρνει την μορφή (Νόμος του Ohm):

$$V = I \cdot R \quad (2.1.4)$$

Η ωμική τιμή του αντιστάτη μπορεί να είναι σταθερή ή και μεταβαλλόμενη (ροοστάτες, ποτενσιόμετρα). Οι συνηθέστεροι τύποι αντιστατών που κυκλοφορούν στο εμπόριο είναι αντιστάτες μίγματος άνθρακα (carbon composition), αντιστάτες

φιλμ άνθρακα (carbon film), αντιστάτες φιλμ μετάλλου (metal film), αντιστάτες φιλμ οξειδίου του κασσίτερου (tin oxide film) και κεραμομεταλλικοί αντιστάτες (cermet).

Η ωμική αντίσταση αναπαριστά το φυσικό μέγεθος των απωλειών ενέργειας Joule που αποδίδεται κατά προσέγγιση με μία χαρακτηριστική ευθεία σταθερής κλίσης και ίσης με το μέγεθος R.



Σχήμα 2.1.2 Χαρακτηριστική v-i ωμικής αντίστασης τιμής R [2]

Πυκνωτής:

Ο πυκνωτής σχηματίζεται από δύο αγωγούς ανάμεσα στους οποίους βρίσκεται μονωτικό υλικό (αέρας, πλαστικό, μίκα κλπ). Οι αγωγοί ονομάζονται οπλισμοί του πυκνωτή και το παρεμβαλλόμενο μέσο ονομάζεται διηλεκτρικό του πυκνωτή.

Βασικό χαρακτηριστικό κάθε πυκνωτή είναι η ιδιότητά του να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο, επομένως ηλεκτρική ενέργεια. Όταν ένας πυκνωτής είναι φορτισμένος, οι οπλισμοί του έχουν ηλεκτρικά φορτία κατά μέτρο ίσα και αντίθετα. Ονομάζουμε φορτίο του πυκνωτή (Qc) το φορτίο του θετικά φορτισμένου οπλισμού του. Μεταξύ των οπλισμών ενός φορτισμένου πυκνωτή αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού, την οποία ονομάζουμε τάση του πυκνωτή (Vc).

Το σταθερό πηλίκο του φορτίου ενός πυκνωτή προς την τάση του ονομάζεται χωρητικότητα του πυκνωτή:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1.5)$$

Η σχέση που συνδέει τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του πυκνωτή με το ρεύμα που τον διαρρέει προκύπτει ως:

$$I_c(t) = C \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (2.1.6)$$

όπου,

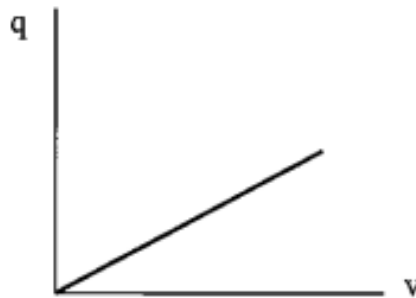
V_c: η διαφορά δυναμικού στα άκρα του πυκνωτή

I_c: το ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή

C: η χωρητικότητα του πυκνωτή (σχέση 2.1.5)

Η χωρητικότητα αναπαριστά το φυσικό μέγεθος της συσσώρευσης φορτίου (q) εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από την εφαρμογή τάσης που

αποδίδεται κατά προσέγγιση με μία χαρακτηριστική ευθεία σταθερής κλίσης και ίσης με το μέγεθος C.



Σχήμα 2.1.3 Χαρακτηριστική q-v χωρητικότητας $C = \frac{q}{V}$ [2]

Πηνίο:

Το πηνίο αποτελείται από ένα συρμάτινο τύλιγμα που έχει την ιδιότητα να αναπτύσσει μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του όταν διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Το πεδίο αυτό «συγκεντρώνεται» στο εσωτερικό του πηνίου και λειτουργεί ως συσσωρευτής μαγνητικής ενέργειας.

Χαρακτηριστικό μέγεθος του πηνίου είναι η αυτεπαγωγή η οποία προκύπτει από τον αριθμό των τυλιγμάτων, το πάχος και τις ιδιότητες του αγωγίμου υλικού που το σχηματίζει.

Η σχέση που συνδέει τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του πηνίου με το ρεύμα που το διαρρέει προκύπτει ως:

$$V_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt} \quad (2.1.7)$$

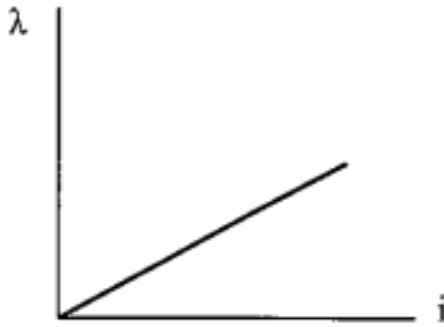
όπου,

V_L : η διαφορά δυναμικού στα άκρα του πηνίου

I : το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο

L : η αυτεπαγωγή του πηνίου

Η αυτεπαγωγή αναπαριστά το φυσικό μέγεθος της επαγόμενης τάσης εξαιτίας της μαγνητικής ροής (λ) ανά έλιγμα που δημιουργείται από την κυκλοφορία ρεύματος που αποδίδεται κατά προσέγγιση με μία ευθεία σταθερής κλίσης και ίσης με το μέγεθος L.



Σχήμα 2.1.4 Χαρακτηριστική λ-*i* επαγωγής $L = \frac{\lambda}{i}$ [2]

2.1.3 Ηλεκτρική εμπέδηση

Η ηλεκτρική εμπέδηση (electrical impedance) αναφέρεται ως γενικευμένη αντίσταση στα κυκλώματα εναλλασσομένου ρεύματος και περιγράφει τη σύνθετη αντίσταση που προκαλούν τα στοιχεία όταν τα μεγέθη της τάσης και της έντασης δεν είναι συμφασικά.

Ορίζοντας ως θ τη διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και έντασης, η ηλεκτρική εμπέδηση σε πολική μορφή ισούται με:

$$Z = |Z|e^{j\theta} \quad (2.1.8)$$

Αντίστοιχα, σε καρτεσιανή μορφή η σχέση (2.1.8) λαμβάνει την μορφή:

$$Z = R + jX \quad (2.1.9)$$

όπου,

R: το ωμικό φορτίο της σύνθετης αντίστασης

X: το χωρητικό/επαγωγικό φορτίο της σύνθετης αντίστασης

Η ηλεκτρική εμπέδηση του ωμικού αντιστάτη ισούται με την τιμή της ωμικής αντίστασης και δίνεται από την σχέση:

$$Z_R = R \quad (2.1.10)$$

Η ηλεκτρική εμπέδηση του πυκνωτή που αντιστοιχεί στην χωρητικότητά του είναι:

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (2.1.11)$$

Η ηλεκτρική εμπέδηση του πηνίου που αντιστοιχεί στην αυτεπαγωγή του είναι:

$$Z_L = j\omega L \quad (2.1.12)$$

Στις σχέσεις (2.1.11) και (2.1.12) ως ω ορίζεται η γωνιακή ταχύτητα που συνδέεται με τη συχνότητα λειτουργίας του κυκλώματος (f) με τον τύπο:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.1.13)$$

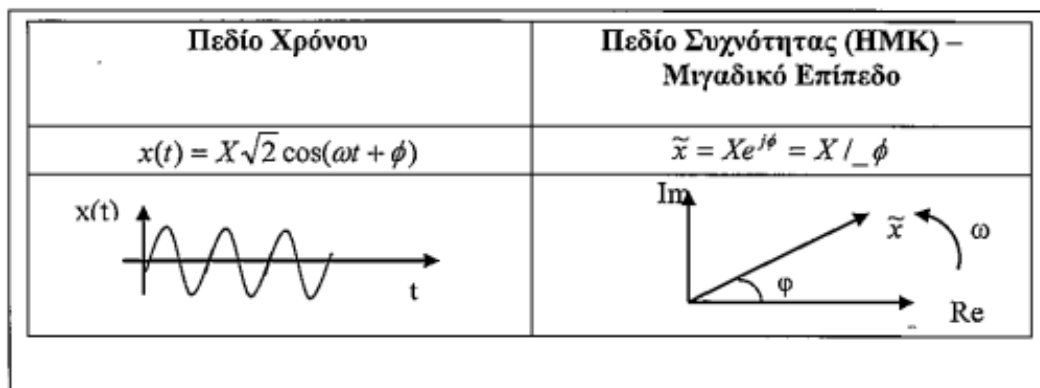
2.1.4 Ημιτονική Μόνιμη Κατάσταση

Εφόσον οι πηγές τάσης και έντασης και κατ' επέκταση τα αναπτυσσόμενα μεγέθη σε κόμβους και κλάδους του κυκλώματος είναι ημιτονοειδή μεγέθη γνωστής γωνιακής συχνότητας (ω) και τα στοιχεία που το απαρτίζουν είναι γραμμικά το κύκλωμα μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκεται στην Ημιτονική Μόνιμη Κατάσταση (ΗΜΚ).

Στην ειδική αυτή περίπτωση οι χαρακτηριστικές του κυκλώματος προσεγγίζονται ως στρεφόμενοι μιγάδες και μπορούν να γραφούν με τη μορφή:

$$\mathbf{x} = \mathbf{X} \cdot e^{j\varphi} = \mathbf{X} \angle \varphi \quad (2.1.14)$$

Το μιγαδικό μέγεθος \mathbf{x} μπορεί να θεωρηθεί ως διάνυσμα στο μιγαδικό επίπεδο το οποίο στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω . Το μέγεθος X καλείται μέτρο ενώ το μέγεθος φ καλείται γωνία του στρεφόμενου μιγά.



Σχήμα 2.1.5 Συσχέτιση στρεφόμενων μιγάδων και συναρτήσεων χρόνου [2]

Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να θεωρήσουμε ότι:

$$v(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t) \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{V} = V \angle 0 \quad (2.1.15)$$

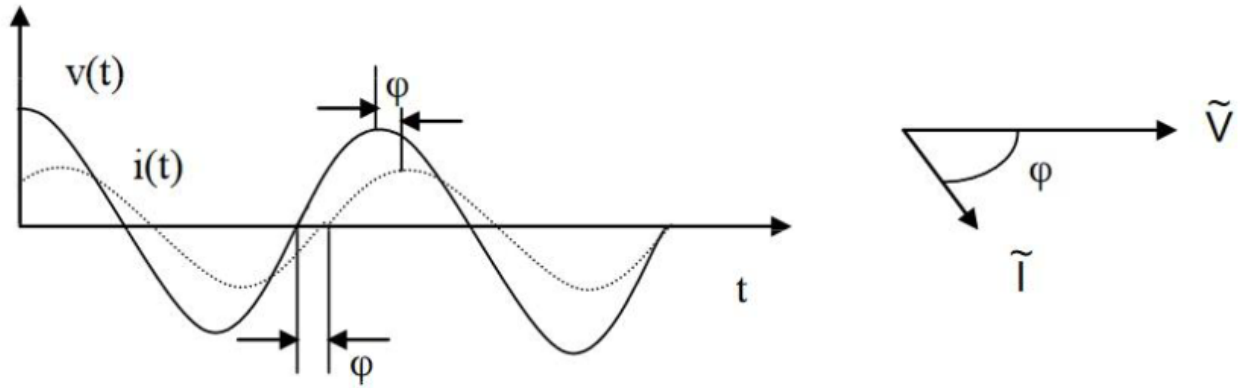
$$i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t - \varphi) \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{I} = I \angle \varphi \quad (2.1.16)$$

όπου,

V, I : η ενεργός τιμή της τάσης και της έντασης

\mathbf{V}, \mathbf{I} : ο στρεφόμενος μιγάς (phasor) της τάσης και της έντασης

φ : η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος



Σχήμα 2.1.6 Αναπαράσταση της γωνίας φ στο πεδίο του χρόνου (αριστερά) και στο πεδίο της συχνότητας (δεξιά) [2]

2.2 Η έννοια της ισχύος

2.2.1 Στιγμιαία ισχύς

Σε κάθε ηλεκτρικό δίκτυο η στιγμιαία ηλεκτρική ισχύς ορίζεται ως ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας στο πεδίο του χρόνου και προκύπτει από τη σχέση:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.2.1)$$

όπου,

$p(t)$: η στιγμιαία τιμή της ισχύος σε Watt [W]

$v(t)$: η στιγμιαία τιμή της τάσης στα άκρα του κλάδου σε Volt [V]

$i(t)$: η στιγμιαία τιμή της έντασης του ρεύματος του κλάδου σε Ampere [A]

Από τον ορισμό της στιγμιαίας ισχύος και το θεώρημα μέσης τιμής του ολοκληρωτικού λογισμού προκύπτει η μέση τιμή της ισχύος:

$$P = \frac{\int p(t) dt}{T} = \frac{\int v(t) \cdot i(t) dt}{T} \quad (2.2.2)$$

όπου,

T : το χρονικό διάστημα μίας περιόδου σε seconds [s]

Αντικαθιστώντας στη (2.2.1) τις εκφράσεις των τάσεων (2.1.15) και των ρευμάτων (2.1.16) προκύπτει ότι η στιγμιαία ισχύς περιγράφεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} p(t) &= 2 \cdot V \cdot I \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t - \varphi) \\ \Leftrightarrow p(t) &= 2 \cdot V \cdot I \cdot \frac{\cos(2\omega t - \varphi) + \cos\varphi}{2} \\ \Leftrightarrow p(t) &= V \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot (1 + \cos(2\omega t)) + V \cdot I \cdot \sin\varphi \cdot \sin(2\omega t) \quad (2.2.3) \end{aligned}$$

2.2.2 Ενεργός (Πραγματική) Ισχύς

Από τα παραπάνω προκύπτει η έκφραση της πραγματικής ισχύος σε συνθήκες ΗΜΚ:

$$P = V \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (2.2.4)$$

Και αντίστοιχα, η στιγμιαία πραγματική ισχύς στο πεδίο του χρόνου:

$$p(t) = P \cdot (1 + \cos(2\omega t)) + V \cdot I \cdot \sin\varphi \cdot \sin(2\omega t) \quad (2.2.5)$$

Μονάδα μέτρησης της πραγματικής ισχύος είναι τα W (Watt) και αντιστοιχεί στην προσφορά των αμιγώς ωμικών φορτίων του κυκλώματος.

Στοιχείο	Τάση	Ρεύμα	Ενεργός Ισχύς
Αντίσταση R		$I = I \angle 0^\circ$	$P = IV = I^2R$
Πηνίο L		$I = I \angle -90^\circ$	$P = 0$
Πυκνωτής C	$V = V \angle 0^\circ$	$I = I \angle 90^\circ$	$P = 0$
Σύνθετη αντίσταση Z		$I = \frac{V}{Z} = I \angle -\varphi$	$P = VI \cos\varphi$

Πίνακας 2.2.1 Ενεργός Ισχύς για στοιχεία R, L, C, Z [2]

2.2.3 Άεργος (φανταστική) Ισχύς

Κατά τρόπο δυαδικό με την ενεργό ορίζεται η άεργος ως:

$$Q = V \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (2.2.6)$$

Και αντίστοιχα, η στιγμιαία φανταστική ισχύς στο πεδίο του χρόνου:

$$p(t) = V \cdot I \cdot \sin\varphi \cdot \sin(2\omega t) \quad (2.2.7)$$

Μονάδα μέτρησης της φανταστικής ισχύος είναι τα VAR (VoltAmpere reactive) και αντιστοιχεί στην προσφορά των επαγωγικών/χωρητικών φορτίων.

Στοιχείο	Τάση	Ρεύμα	Άεργος Ισχύς
Αντίσταση R		$I = I \angle 0^\circ$	$Q = 0$
Πηνίο L		$I = I \angle -90^\circ$	$Q = IV = I^2X_L$
Πυκνωτής C	$V = V \angle 0^\circ$	$I = I \angle 90^\circ$	$Q = IV = -I^2X_C$
Σύνθετη αντίσταση Z		$I = \frac{V}{Z} = I \angle -\varphi$	$Q = VI \sin\varphi$

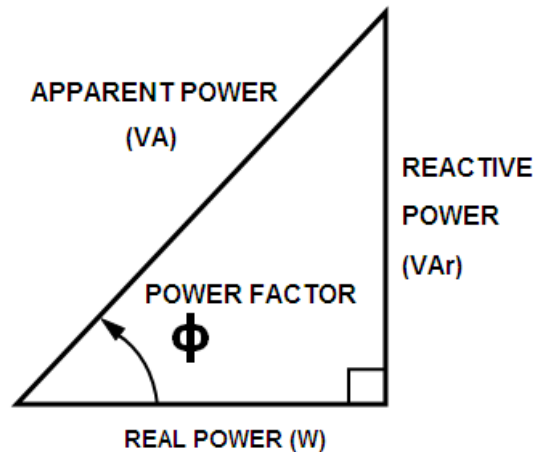
Πίνακας 2.2.1 Άεργος Ισχύς για στοιχεία R, L, C, Z [2]

2.2.4 Φαινόμενη Ισχύς

Η μιγαδική ισχύς ορίζεται ως:

$$\mathbf{S} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I} = V \cdot I \cdot (\cos\varphi + j \cdot \sin\varphi) = P + j \cdot Q \quad (2.2.8)$$

Το πραγματικό μέρος της μιγαδικής ισχύος αντιστοιχεί στην ενεργό ισχύ ενώ το φανταστικό στην άεργο. Στο σχήμα (2.2.1) απεικονίζεται το τρίγωνο ισχύος το οποίο παριστά γεωμετρικά τη σχέση των μεγεθών S, P και Q.



Σχήμα 2.2.1 Τρίγωνο Ισχύος

Το μέτρο της μιγαδικής ισχύος ονομάζεται φαινόμενη ισχύς και ισούται με:

$$S = |\mathbf{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2} = |\mathbf{V}| \cdot |\mathbf{I}| \quad (2.2.9)$$

Μονάδα μέτρησης της φαινόμενης ισχύος είναι τα VA (VoltAmpere).

2.2.5 Συντελεστής Ισχύος

Ως συντελεστής ισχύος ορίζεται το αδιάστατο μέγεθος που αντιστοιχεί στην ποσότητα της ενεργού ισχύος ως προς την φαινόμενη ισχύ:

$$\Sigma I = \frac{P}{S} \quad (2.2.10)$$

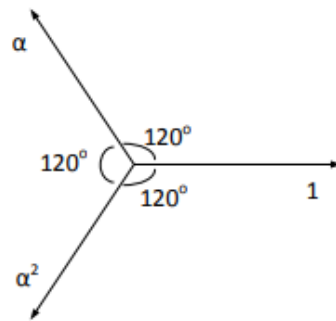
Αντικαθιστώντας στην (2.2.10) τους τύπους της ενεργού και της φαινόμενης ισχύος προκύπτει τελικά:

$$\Sigma I = \cos\varphi \quad (2.2.11)$$

Ως εκ τούτου ο συντελεστής ισχύος μπορεί να θεωρηθεί ως μέτρο ελέγχου της ενεργού (άρα και της άεργου) ισχύος που κυκλοφορεί στο δίκτυο. Όπως προέκυψε από τον πίνακα 2.2.1 η άεργος ισχύς του πηνίου είναι θετική, δηλαδή το πηνίο προσφέρει άεργο στο δίκτυο και στην περίπτωση αυτή το υπό-δίκτυο έχει συντελεστή ισχύος επαγωγικό. Στην περίπτωση του πυκνωτή η άεργος αποκτά αρνητική τιμή, δηλαδή ο πυκνωτής καταναλώνει άεργο και στην περίπτωση αυτή το υπό-δίκτυο έχει συντελεστή ισχύος χωρητικό.

2.3 Τριφασικά Δίκτυα

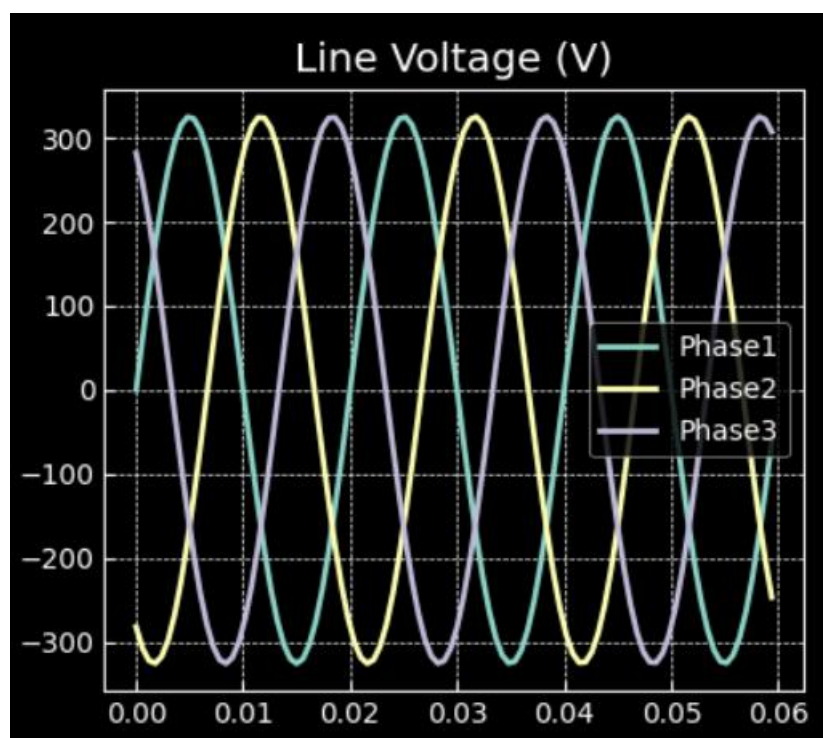
Ως τριφασικό ορίζεται το δίκτυο τριών φάσεων ίδιου πλάτους τάσης με διαφορά φάσης 120° ανά φάση.



Σχήμα 2.3.1 Πολική απεικόνιση τριφασικού δικτύου [1]

Κύρια πλεονεκτήματα των τριφασικών δικτύων έναντι των μονοφασικών είναι:

- **Στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές πολλών φάσεων.** Οι πολυφασικοί κινητήρες έχουν τη δυνατότητα αυτοεκκίνησης (έναντι των μονοφασικών που απαιτούν βοηθητικά μέσα), έχουν υψηλότερο συντελεστή ισχύος και καλύτερη μηχανική απόδοση (μέγεθος, υλικό, συχνότητα, ροπή).
- **Οικονομικότερη μετάδοση ισχύος** (χαμηλότερη χρήση καλωδίου/χαλκού).
- **Σταθερότερη ισχύς.**
- **Υψηλότερη διαβάθμιση.**



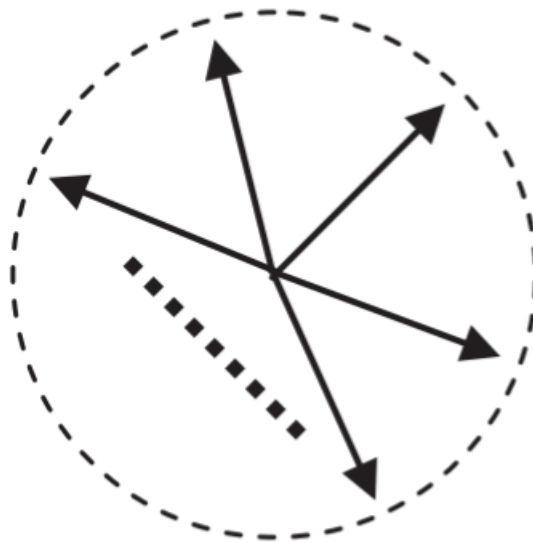
Σχήμα 2.3.2 Τριφασικό δίκτυο $230V_{RMS}$, 50Hz στο πεδίο του χρόνου

2.3.1 Συμμετρικά Δίκτυα

Στην ειδική περίπτωση όπου οι σύνθετες αντιστάσεις των φορτίων κάθε φάσης είναι ίσες το δίκτυο καλείται συμμετρικό.

Γενικεύοντας, ως συμμετρικό πολυφασικό δίκτυο (με πλήθος N φάσεων) ορίζεται το σύστημα το οποίο:

- Αποτελείται από N όμοια κυκλώματα συνδεδεμένα μεταξύ τους.
- Όλα τα N κυκλώματα αποτελούνται από ίσες σύνθετες αντιστάσεις.
- Τα μέτρα των πηγών (τάσης ή έντασης) των επιμέρους κυκλωμάτων είναι ίσα μεταξύ τους κατά μέτρο, ενώ τα ορίσματα των πηγών διαφέρουν κατά ακέραια πολλαπλάσια της ποσότητας $2\pi/N$ (rad).

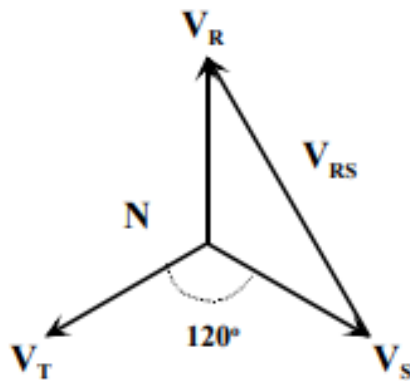


Σχήμα 2.3.3 Στρεφόμενοι μιγάδες πολύ-φασικού συστήματος [2]

2.3.2 Φασικά και πολικά μεγέθη

Τόσο στα συμμετρικά όσο και στα ασύμμετρα τριφασικά δίκτυα συναντώνται τα παρακάτω μεγέθη:

- Φασική τάση (V_ϕ): η διαφορά δυναμικού κάθε φάσης με τον κοινό κόμβο.
- Πολική τάση (V_π): η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο φάσεων.
- Φασικό ρεύμα (I_ϕ): το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο εξόδου.
- Πολικό ρεύμα (I_π): το ρεύμα που διαρρέει κάθε γραμμή.



Σχήμα 2.3.4 Σχέση Πολικής-Φασικής τάσης τριφασικού δικτύου [3]

Βάσει των ορισμών και του **σχήματος 2.3.4** προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} V_{RS} &= V_R - V_S \\ \Leftrightarrow |V_{RS}| &= V_0\sqrt{3} \quad (2.3.1) \end{aligned}$$

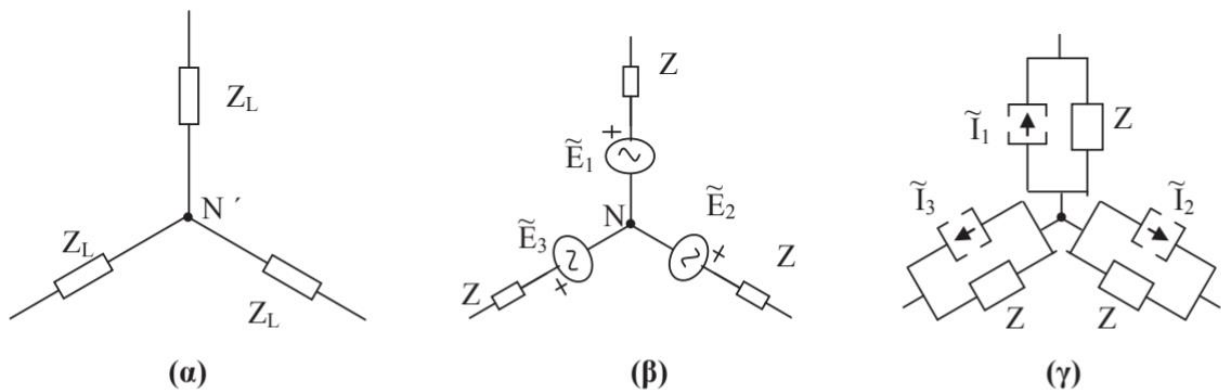
όπου,

V_R, V_S, V_T : η φάση κάθε τάσης (φασική τάση) ίση με V_0

V_{RS} : η τάση μεταξύ φάσης R και φάσης S (πολική τάση)

2.3.3 Συνδεσμολογία Αστέρα

Η πλέον συνηθισμένη τοπολογική σύνδεση που συναντάται στα τριφασικά δίκτυα είναι η συνδεσμολογία του αστέρα (Y), η οποία φαίνεται στο **σχήμα 2.3.5**.



Σχήμα 2.3.5 Συνδεσμολογία Αστέρα σε:
(α) σύνθετες αντιστάσεις, (β) πηγές τάσεις, (γ) πηγές έντασης [3]

Τόσο η φασική όσο και η πολική τάση του αστέρα συμπίπτουν με τις αντίστοιχες τάσεις του τριφασικού συστήματος που αναλύθηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Δηλαδή:

$$V_{Y\varphi} = V_{\varphi} \quad \text{και} \quad V_{Y\pi} = V_{\pi} = V_{Y\varphi}\sqrt{3} \quad (2.3.2)$$

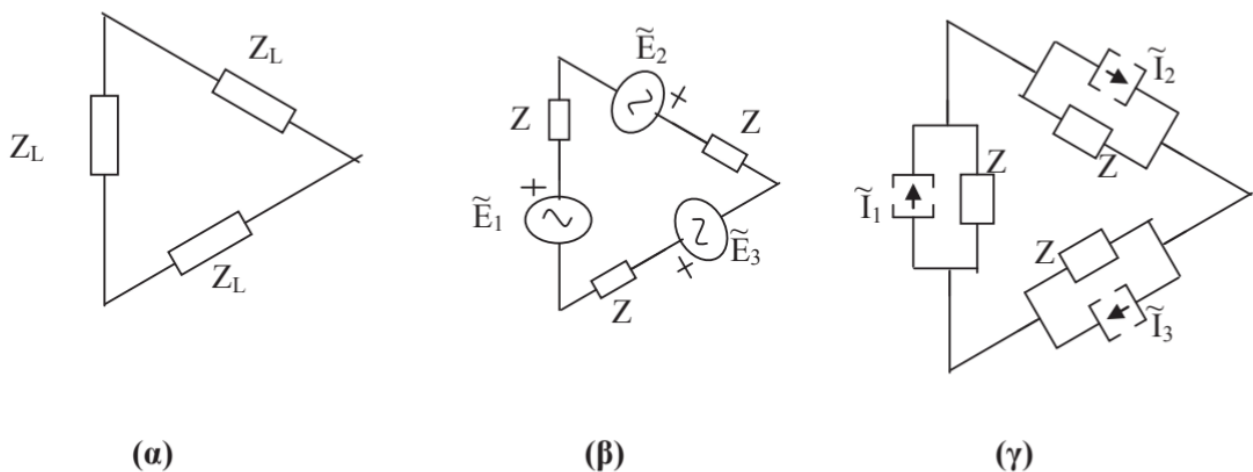
Ρεύμα γραμμής του αστέρα καλείται το ρεύμα που διαρρέει την κάθε φάση και ορίζεται όπως το ρεύμα των τριφασικών δικτύων, στις προηγούμενες ενότητες.

$$I_{Y\varphi} = I_{\varphi} \quad (2.3.3)$$

Τέλος, ως αντίσταση φορτίου (Z_{φ}) ορίζεται η αντίσταση που εμφανίζει ένα σύστημα καταναλωτών ως προς τον αγωγό τροφοδοσίας κάθε φάσης.

2.3.4 Συνδεσμολογία Τριγώνου

Η δεύτερη συνηθισμένη τοπολογική σύνδεση που συναντάται στα τριφασικά δίκτυα είναι η συνδεσμολογία του τριγώνου (Δ), η οποία φαίνεται στο **σχήμα 2.3.6**.



Σχήμα 2.3.6 Συνδεσμολογία Τριγώνου σε:
(α) σύνθετες αντιστάσεις, (β) πηγές τάσεις, (γ) πηγές έντασης [3]

Κατά πλήρη αντιστοιχία με την περίπτωση του αστέρα, τόσο η φασική όσο και η πολική ένταση του τριγώνου συμπίπτουν με τις αντίστοιχες εκφράσεις των ρευμάτων του τριφασικού συστήματος που αναλύθηκε στις προηγούμενες παραγράφους.

Δηλαδή:

$$I_{\Delta\varphi} = I_{\varphi} \quad \text{και} \quad I_{\Delta\pi} = I_{\pi} = I_{\Delta\varphi}\sqrt{3} \quad (2.3.4)$$

Αντιθέτως, η πολική και η φασική τάση στην περίπτωση του τριγώνου ισούνται και αντιστοιχούν με την έκφραση της πολικής τάσης στο τριφασικό σύστημα.

$$V_{\Delta\varphi} = V_{\Delta\pi} = V_{\pi} = V_{\varphi}\sqrt{3} \quad (2.3.5)$$

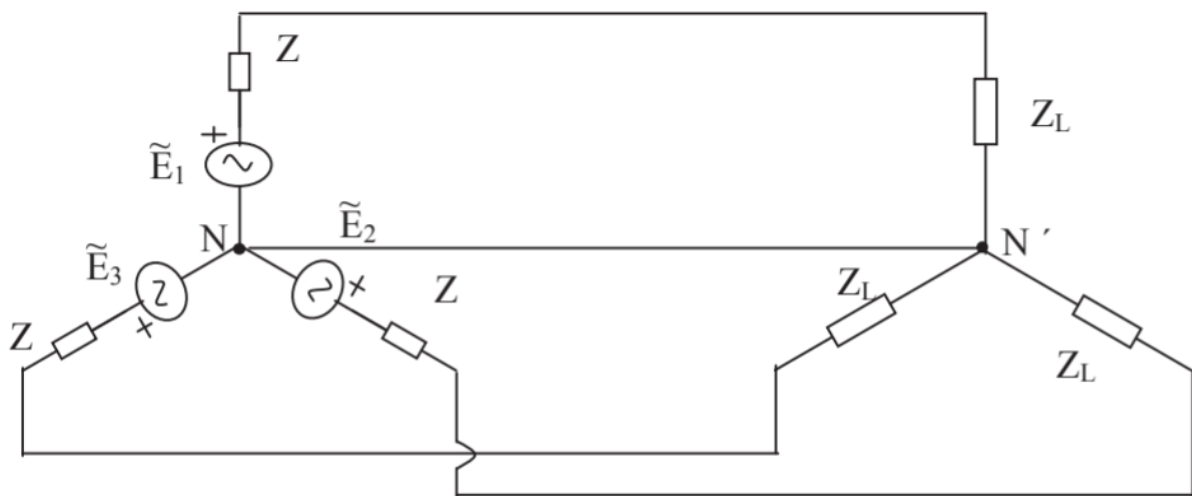
2.3.5 Ουδέτερος κόμβος

Στην συνδεσμολογία του αστέρα εμφανίζεται ο κοινός κόμβος ο οποίος σε περιπτώσεις συμμετρικής λειτουργίας παρουσιάζει δυναμικό 0 (είτε ως στιγμιαία τιμή, είτε ως στρεφόμενος μιγάς).

$$V_N = V_{N'} = 0 \quad (2.3.6)$$

Για διατάξεις με συνδεσμολογία πηγών και φορτίων κατά αστέρα (σχήμα 2.3.7) η σύνδεση $N'N$ μεταξύ των ουδέτερων καλείται ουδέτερος αγωγός και σε περίπτωση συμμετρικής λειτουργίας το ρεύμα που τον διαρρέει ισούται με 0.

$$i_{NN'}(t) = 0 \quad (2.3.7)$$



Σχήμα 2.3.7 Πηγές και φορτία σε συνδεσμολογία αστέρα (Y) [3]

Εύκολα προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε συμμετρικά τριφασικά δίκτυα, είτε είναι γειωμένος είτε όχι ο κοινός κόμβος, δεν παρουσιάζεται κάποια διαφορά στις τάσεις και στα ρεύματα των φάσεων.

2.3.6 Μη συμμετρικά τριφασικά συστήματα

Ωστόσο, στα μη συμμετρικά συστήματα ο ουδέτερος κόμβος παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον μιας και το δυναμικό του παύει να είναι μηδέν και διαρρέεται από ρεύμα.

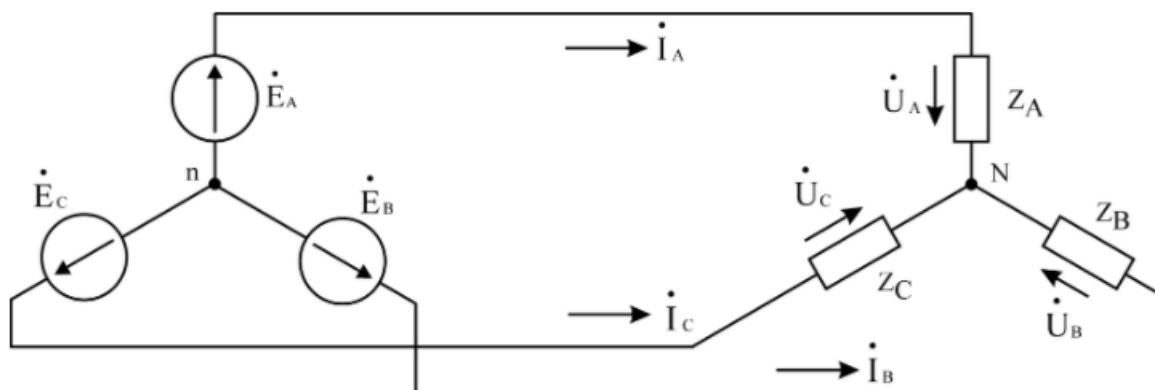
Το δυναμικό του ουδέτερου καλείται ουδέτερη μετατόπιση, συμβολίζεται U_{Nn} και ισούται με:

$$U_{Nn} = \frac{Ea \frac{1}{Za} + Eb \frac{1}{Zb} + Ec \frac{1}{Zc}}{\frac{1}{Za} + \frac{1}{Zb} + \frac{1}{Zc}} \quad (2.3.7)$$

όπου,

E_A, E_B, E_C : οι στρεφόμενοι μιγάδες των εισόδων σε κάθε φάση

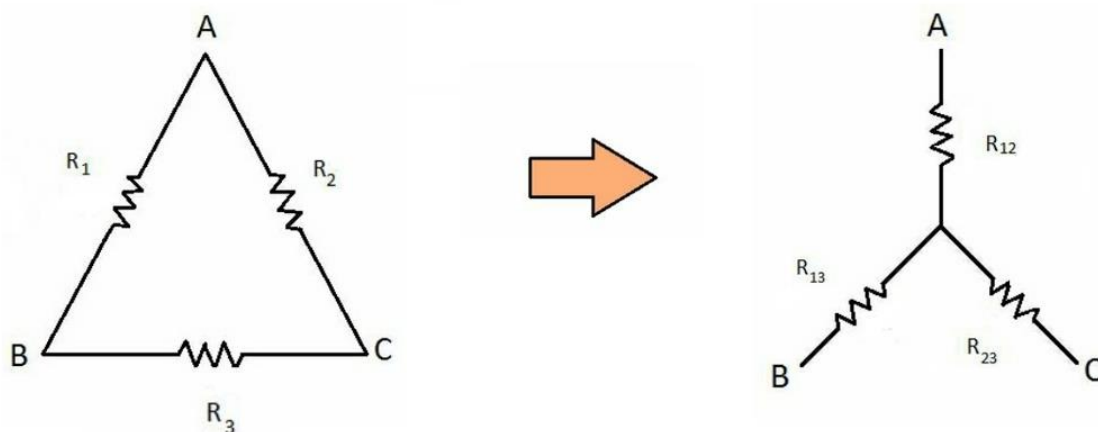
Z_A, Z_B, Z_C : οι σύνθετες αντιστάσεις του φορτίου σε κάθε φάση



Σχήμα 2.3.8 Ασύμμετρο τριφασικό δίκτυο σε συνδεσμολογία αστέρα
(πηγή <https://eltctricon.ru>)

2.3.7 Μετασχηματισμός αστέρα – τρίγωνο

Θεωρώντας φορτία R_1, R_2, R_3 σε συνδεσμολογία τριγώνου και φορτία R_{12}, R_{23}, R_{31} σε συνδεσμολογία αστέρα στη σχέση (2.3.8) φαίνεται η ισοδυναμία μεταξύ των δύο διατάξεων. Η σχέση αυτή καλείται και τύπος μετασχηματισμού κατά Kennelly και μπορεί να γενικευτεί σε σύνθετες αντιστάσεις, πηγές τάσης και πηγές ρεύματος.



Σχήμα 2.3.9 Μετασχηματισμός Kennelly

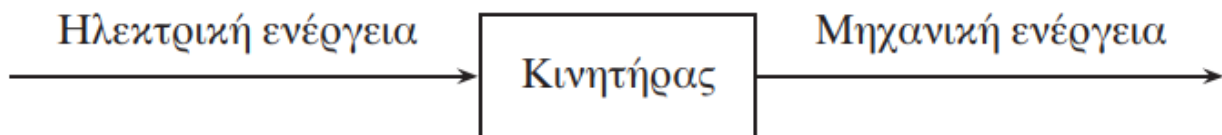
$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2.3.8)$$

Κεφάλαιο 3: Γεννήτριες εναλλασσομένου ρεύματος

3.1 Αρχή λειτουργίας σύγχρονων γεννητριών

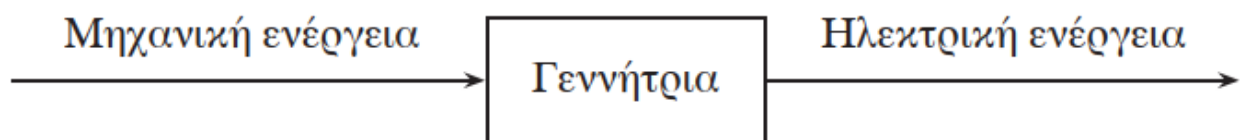
Αρχικά, είναι σημαντικό να αποσαφηνιστεί ότι η ίδια ηλεκτρική μηχανή μπορεί να λειτουργήσει είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας. Το είδος λειτουργίας της καθορίζεται από τη φορά της μετατροπής ενέργειας όπως φαίνεται αναλυτικά στα σχήματα 3.1 και 3.2.

Κατά τη λειτουργία κινητήρα, η ηλεκτρική μηχανή απορροφά ηλεκτρική ισχύ μετατρέποντάς την σε μηχανικό έργο, δηλαδή περιστροφική κίνηση φορτίων. Τα συνηθέστερα φορτία σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αντλίες, συμπιεστές, ανυψωτικές μηχανές, έλικες κλπ.



Σχήμα 3.1 Ενεργειακή μετατροπή σε ηλεκτρικό κινητήρα

Κατά τη λειτουργία γεννήτριας, η ηλεκτρική μηχανή απορροφά μηχανική ενέργεια μετατρέποντάς την σε ηλεκτρική. Η στρεφόμενη μηχανή που προσφέρει ισχύ καλείται κινητήρια μηχανή.



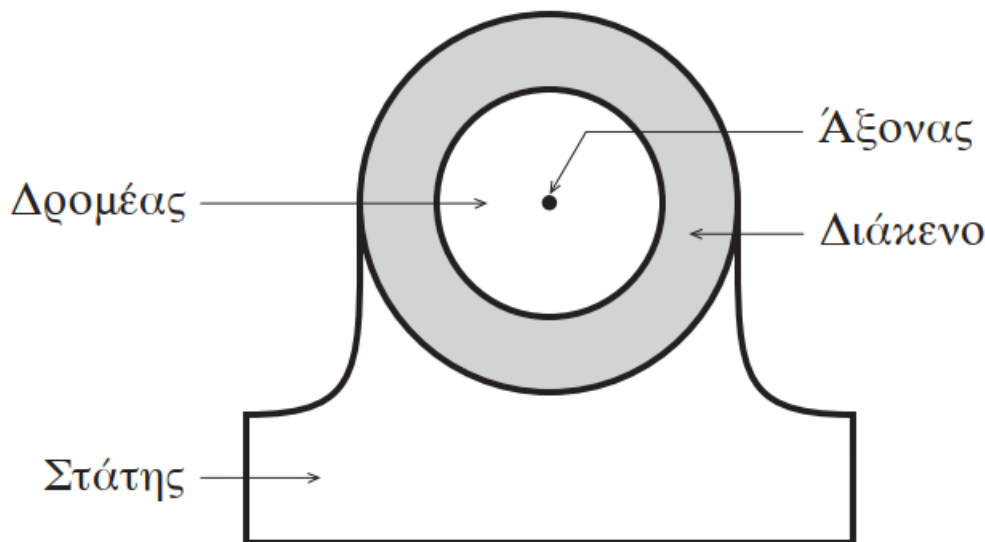
Σχήμα 3.2 Ενεργειακή μετατροπή σε ηλεκτρική γεννήτρια

3.1.1 Δομή σύγχρονων γεννητριών

Έτσι, ως σύγχρονη τριφασική γεννήτρια (ή εναλλακτήρας) ορίζεται η ηλεκτρική μηχανή που μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Η γεννήτρια αποτελείται από δύο κύρια μέρη:

- Δρομέας (Rotor): καλείται το κινητό μέρος της γεννήτριας, σχήματος κυλινδρικού και στις περισσότερες περιπτώσεις διαθέτει τύλιγμα στο οποίο ή θα επιβάλλεται εξωτερική διέγερση (τύλιγμα διέγερσης) ή βραχυκυκλώνεται
- Στάτης (Stator): καλείται το ακίνητο μέρος της γεννήτριας, το σχήμα του οποίου είναι σαν «κούφιος» κύλινδρος από σιδηρομαγνητικό υλικό και συνήθως περιλαμβάνει το τύλιγμα του τυμπάνου (μέσω του οποίου πραγματοποιείται η ανταλλαγή της ενέργειας)

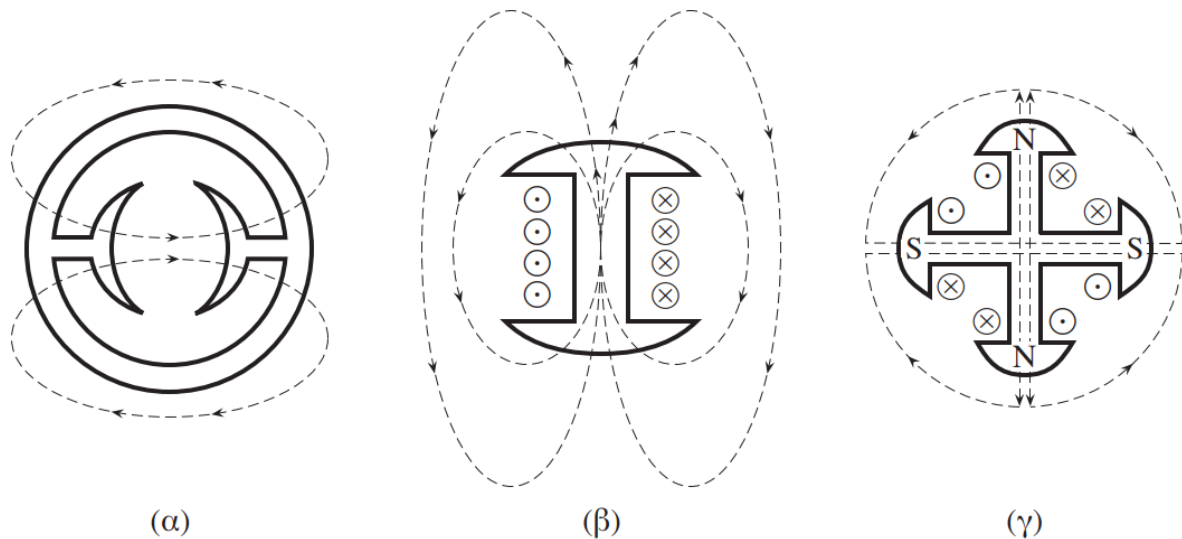


Σχήμα 3.1.1 Κύρια συνιστώσα μέρη στρεφόμενης ηλεκτρικής μηχανής

Το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα αποτελείται από ατμοσφαιρικό αέρα και συνήθως βρίσκεται στην τάξη των χιλιοστών (mm). Στο χώρο αυτό λαμβάνει χώρα η αλληλεπίδραση μαγνητικών πεδίων στάτη - δρομέα και παράγεται ροπή.

Οι αγωγοί των τυλιγμάτων τίθενται σε ειδικές θέσεις είτε στο στάτη είτε στο δρομέα οι οποίες καλούνται «αύλακες των τυλιγμάτων», μέσα στο διάκενο. Ο τρόπος περιέλιξης και τοποθέτησης των τυλιγμάτων καθορίζει το είδος και το πλήθος των πόλων της μηχανής. Όταν οι πόλοι είναι εμφανείς καλούνται έκτυποι, σε αντίθετη περίπτωση ο φορέας των τυλιγμάτων (είτε ο δρομέας, είτε ο στάτης) καλείται κυλινδρικός. Η εκτυπότητα των πόλων μπορεί να είναι στα τυλίγματα του δρομέα, του στάτη ή και των δύο.

Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος συναντώνται στάτες με έκτυπους πόλους, απεναντίας έκτυποι πόλοι στον δρομέα συνηθίζονται σε σύγχρονες μηχανές χαμηλών ταχυτήτων. Τέλος, σε ασύγχρονες μηχανές συναντώνται δρομείς κυλινδρικού σχήματος και στάτες με αύλακες σε όλη την περιφέρειά τους.



Σχήμα 3.1.2 Περιπτώσεις εκτυπότητας πόλων σε
 (α) στάτη (μηχανή ΣΡ)
 (β) δρομέα (σύγχρονη μηχανή δύο πόλων)
 (γ) δρομέα (σύγχρονη μηχανή τεσσάρων πόλων)

3.1.2 Βασική λειτουργία

Η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας βασίζεται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης των δυο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που σχηματίζονται από το τύλιγμα της διέγερσης και από το τύλιγμα του επαγωγισμού. Συνήθως το τύλιγμα διέγερσης βρίσκεται στο δρομέα και διαρρέεται από συνεχές ρεύμα το οποίο λόγω της περιστροφής του δρομέα προκαλεί μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Το τύλιγμα του επαγωγισμού (τυμπάνου) βρίσκεται στο στάτη και αποτελείται από τρία τυλίγματα τοποθετημένα με 120° διαφορά. Τα ρεύματα που διαρρέουν τα τυλίγματα του επαγωγισμού είναι εναλλασσόμενα σταθερής συχνότητας που καθορίζεται από τη συχνότητα περιστροφής του δρομέα τα οποία συνιστούν ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα ρευμάτων. Το στρεφόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που προκαλείται στα τυλίγματα του επαγωγισμού έχει την ίδια συχνότητα με την ηλεκτρική συχνότητα των ρευμάτων που δημιουργούνται στα τυλίγματα και είναι ανάλογη του αριθμού των πόλων και του ρυθμού περιστροφής.

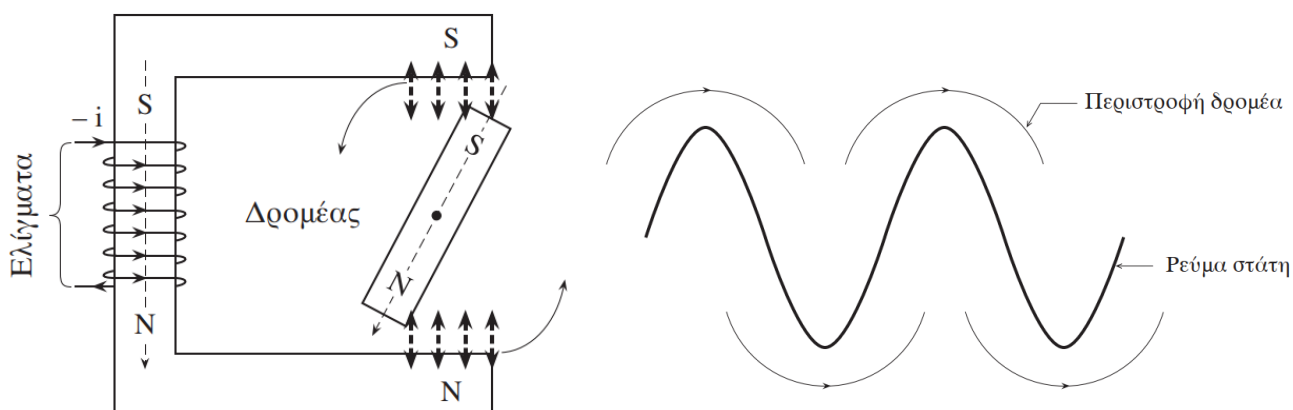
$$f = \frac{p}{2} \frac{n}{60} \quad (3.1.1)$$

όπου,

f : η συχνότητα των ρευμάτων του στάτη σε **Hertz (Hz)**

p : ο αριθμός των πόλων της μηχανής

n : η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε στροφές το λεπτό (**RPM**)



Σχήμα 3.1.3 Διπολική σύγχρονη γεννήτρια

(α) Εικονική απεικόνιση

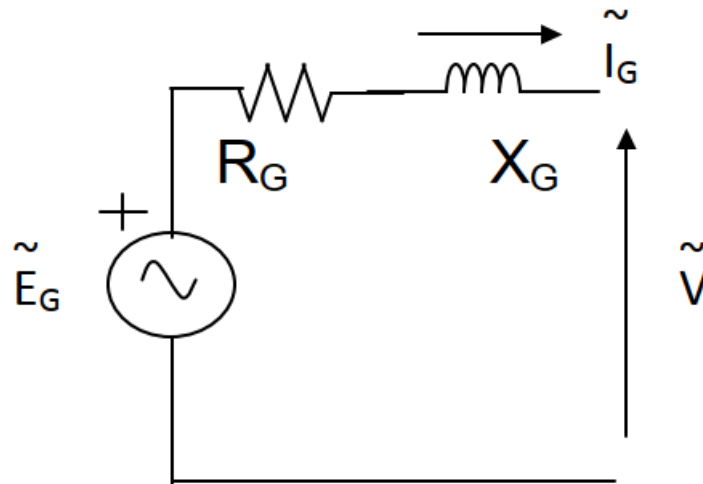
(β) Συσχέτιση συχνότητας - ταχύτητας

Παραδείγματος χάριν, στη σύγχρονη διπολική γεννήτρια του **σχήματος 3.1.3** οι πόλοι του δρομέα απέχουν 180° από θέση σε θέση, γεγονός που προκαλεί μεταβολή της πολικότητας του ρεύματος στάτη κατά 180° σε κάθε μετακίνηση του δρομέα από τον έναν πόλο στον αμέσως επόμενο, δηλαδή μηχανική στρέψη 180° . Συνεπώς, η συχνότητα των ρευμάτων του στάτη είναι ίση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

Το συνεχές ρεύμα του κυκλώματος διέγερσης παράγεται συνήθως από βοηθητική πηγή συνεχούς ρεύματος η οποία καλείται διεγέρτρια και τοποθετείται στην άκρη του άξονα του εναλλακτήρα. Σε περίπτωση που ο εναλλακτήρας χρησιμοποιείται ως συσσωρευτής ρεύματος, η τροφοδοσία ρεύματος στον δρομέα πραγματοποιείται με χρήση ψυκτρών (brushes). Εναλλακτικά, για την τροφοδότηση του δρομέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρή γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος με ανορθωτική διάταξη για τη μετατροπή του σε συνεχές. Στην περίπτωση αυτή δεν απαιτείται η χρήση ψυκτρών, γι' αυτό και η διάταξη αυτή καλείται brushless.

3.1.3 Μονοφασικό ισοδύναμο

Κάθε σύγχρονη γεννήτρια μπορεί να αναπαρασταθεί κυκλωματικά ως ιδανική πηγή τάσης σταθερής συχνότητας, όπως προκύπτει από την (3.1.1) εν σειρά συνδεδεμένη με σύνθετη αντίσταση. Το ωμικό μέρος της αντίστασης αντιστοιχεί στις πραγματικές απώλειες, ενώ το επαγωγικό μέρος στις επαγωγές που προκαλούν τα τυλίγματα του στάτη.

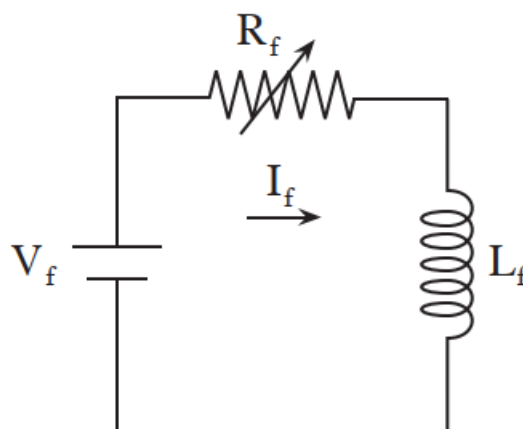


Σχήμα 3.1.4 Μονοφασικό ισοδύναμο σύγχρονης γεννήτριας

όπου,

- E_G : η εξ' επαγωγής τάση της γεννήτριας
- V : η τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας
- R_G : η ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων τυμπάνου
- X_G : η επαγωγική αντίσταση των τυλιγμάτων τυμπάνου
- I_G : το ρεύμα φάσης τυμπάνου της γεννήτριας

Για τον προσδιορισμό της επαγόμενης τάσης της γεννήτριας καθίσταται αναγκαία η ανάλυση του κυκλώματος διέγερσης συνεχούς ρεύματος (σχήμα 3.1.5).



Σχήμα 3.1.5 Κύκλωμα διέγερσης συνεχούς ρεύματος

όπου,

V_f : η τάση διέγερσης συνεχούς ρεύματος

R_f : η ωμική (μεταβαλλόμενη) αντίσταση του κυκλώματος διέγερσης

L_f : η επαγωγή που προκαλείται στα τυλίγματα της διεγέρτριας

I_f : το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα

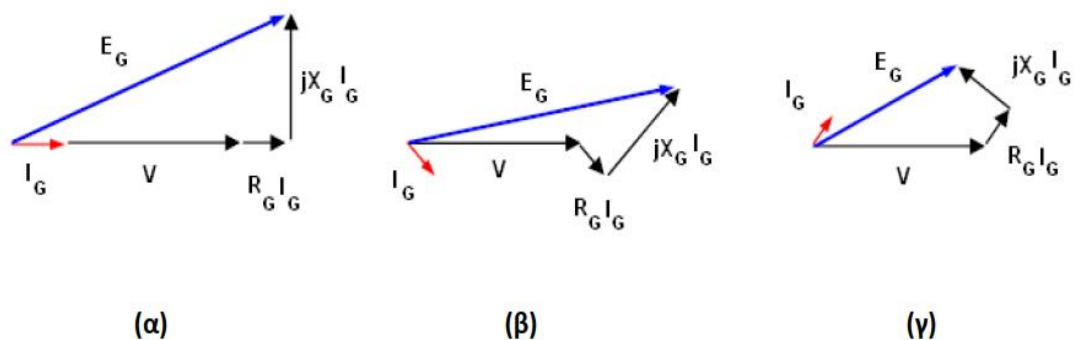
3.1.4 Χαρακτηριστικά λειτουργίας

Εφαρμόζοντας Νόμο Τάσεων Kirchhoff στο μονοφασικό ισοδύναμο του σχήματος 3.1.4 προκύπτει η σχέση:

$$E_G = V + (R_G + X_G) I_G \quad (3.1.2)$$

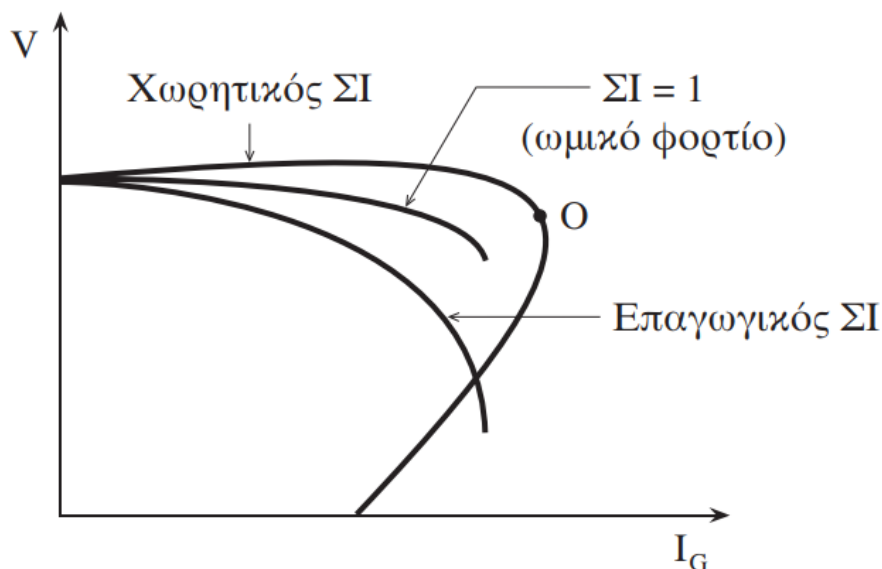
Από τη σχέση (3.1.2) εξάγουμε τρεις περιπτώσεις λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας βάσει του συντελεστή ισχύος που προκύπτει από τις τιμές των $R_G + X_G$ όπως διατυπώθηκαν στην ενότητα 2.2.

- Ωμικός Συντελεστής Ισχύος (σχήμα 3.1.5α):
- Επαγωγικός Συντελεστής Ισχύος (σχήμα 3.1.5β):
- Χωρητικός Συντελεστής Ισχύος (σχήμα 3.1.5γ):



Σχήμα 3.1.6 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων σύγχρονης γεννήτριας με: (α) Ωμικό φορτίο, (β) Επαγωγικό φορτίο και (γ) Χωρητικό φορτίο

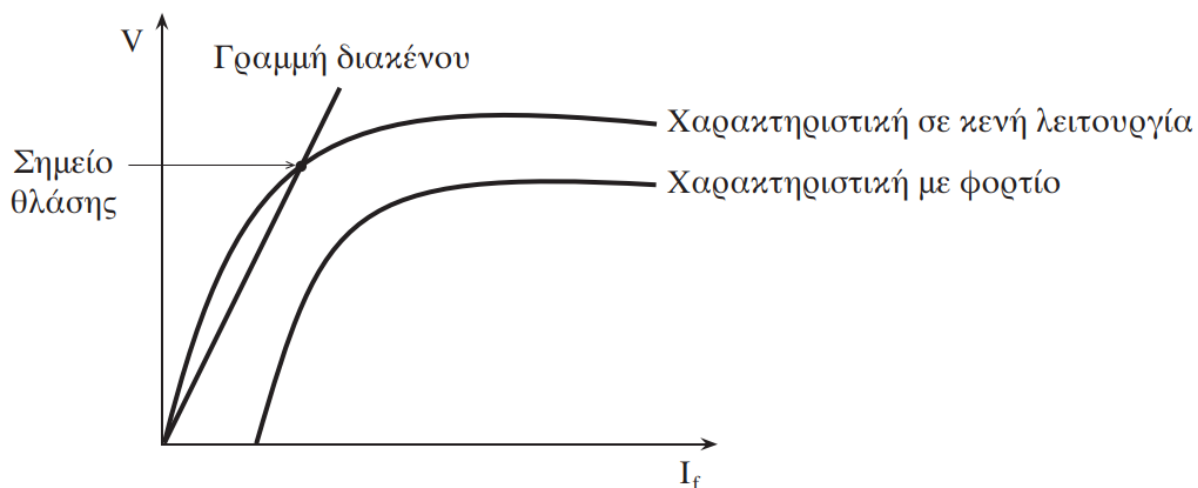
Στο **σχήμα 3.1.7** παρατίθενται οι χαρακτηριστικές ταχύτητας τυμπάνου – ρεύματος τυμπάνου ($V - I_G$) της σύγχρονης γεννήτριας για διαφορετικούς συντελεστές ισχύος.



Σχήμα 3.1.7 Χαρακτηριστικές ταχύτητας τυμπάνου – ρεύματος τυμπάνου ($V - I_G$)

Από το **σχήμα 3.1.7** προκύπτει ότι η αύξηση του ρεύματος τυμπάνου προκαλεί μείωση της τάσης ακροδεκτών σε ωμική και επαγωγική φόρτιση. Αντιθέτως, στην περίπτωση της χωρητικής φόρτισης παρουσιάζονται αυξητικές τάσεις μέχρι το κρίσιμο σημείο «Ο» μετά τη διέλευση του οποίου ο μηχανισμός πτώσης τάσης καθίσταται ασταθής προκαλώντας κατάρρευση τάσης.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες που απεικονίζουν τη συσχέτιση της τάσης των ακροδεκτών με το ρεύμα διέγερσης (**σχήμα 3.1.8**).



Σχήμα 3.1.8 Χαρακτηριστικές τάσης ακροδεκτών – ρεύμα διέγερσης ($V - I_f$)

Εύκολα εξάγεται το συμπέρασμα ότι με την ανεξέλεγκτη αύξηση του ρεύματος διέγερσης επέρχεται κορεσμός μετά τη διέλευση του σημείου θλάσης. Περαιτέρω αύξηση του ρεύματος διέγερσης δεν οδηγεί σε αύξηση της τάσης, αντιθέτως προκαλεί μικρή μείωση, η οποία μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Ως γραμμή διάκεινου ορίζεται η γραμμική περιοχή από την αρχή των αξόνων μέχρι το σημείο θλάσης που προσεγγίζει τη χαρακτηριστική λειτουργίας χωρίς φορτίο.

3.1.5 Μέθοδοι διέγερσης

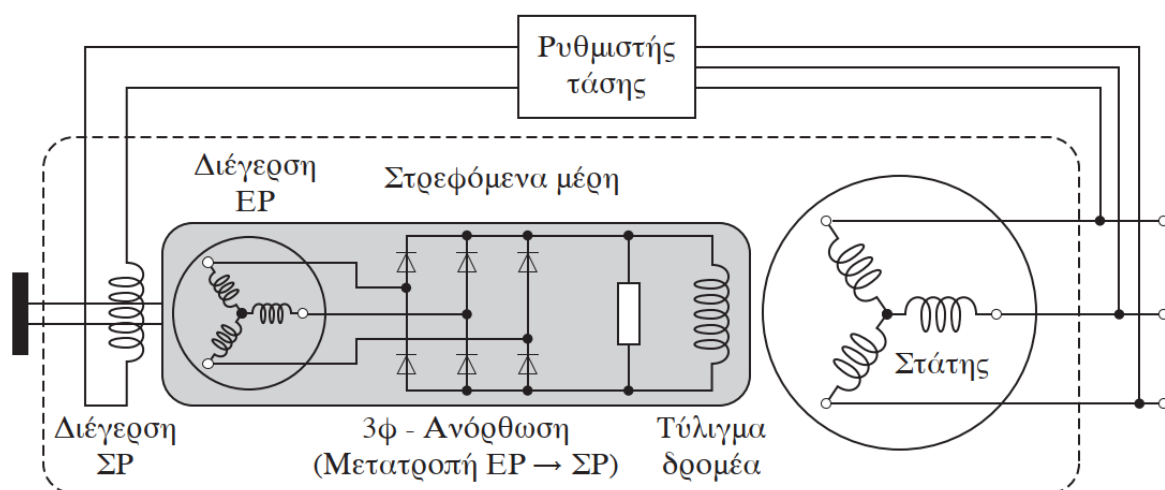
Οι βασικότεροι παράγοντες που καθορίζουν την ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) είναι η μηχανική ταχύτητα περιστροφής (rotational speed), η οποία αναπτύσσεται με χρήση εξωτερικής κινητήριας μηχανής και η μαγνητική ροή (magnetic flux) που προκαλείται από τη διέλευση ρεύματος στα τυλίγματα διέγερσης.

Οι μέθοδοι διέγερσης διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Περιστροφικές (rotary).
- Στατικές (static).

Περιστροφική Διέγερση:

Ο πιο συνήθης τρόπος διέγερσης είναι περιστροφικός με χρήση γεννήτριας συνεχούς ή εναλλασσομένου ρεύματος με ανορθωτική διάταξη η οποία βρίσκεται στον άξονα του δρομέα και περιστρέφεται με την ίδια μηχανική ταχύτητα. Σε αρκετές εφαρμογές συναντάται και περιστρεφόμενη βοηθητική γεννήτρια (pilot exciter) για την τροφοδότηση του πεδίου διέγερσης. Οι γεννήτριες αυτές είναι εναλλασσομένου ρεύματος μόνιμου μαγνήτη με παραγόμενη τάση της τάξεως των kHz η οποία ανορθώνεται και τροφοδοτεί το πεδίο της βασικής διεγέρτριας.



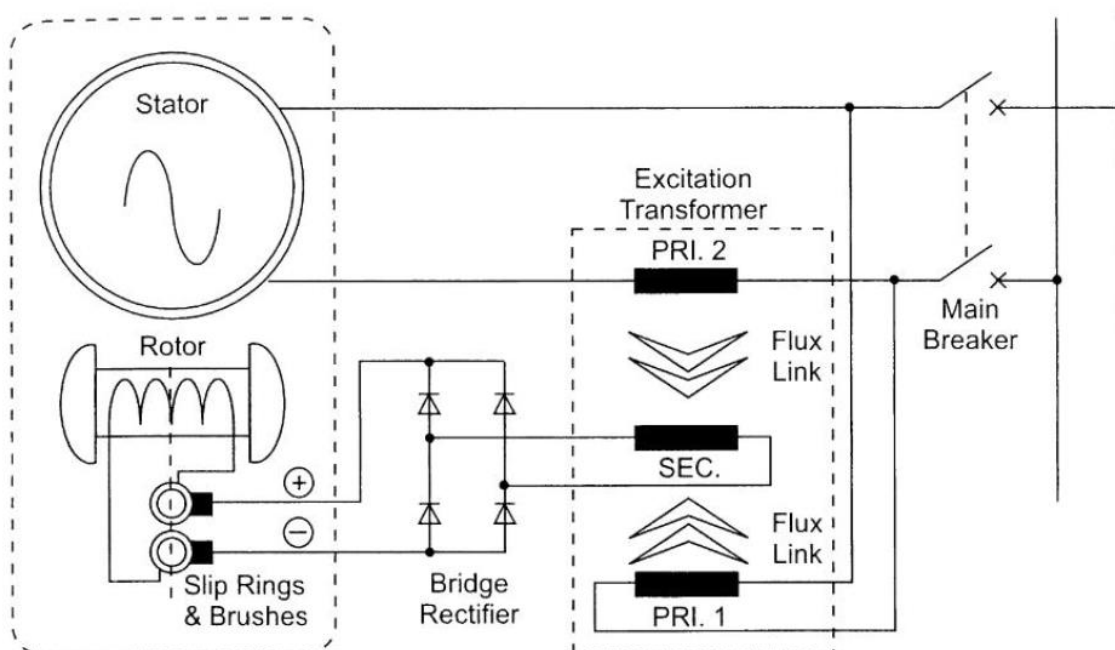
Σχήμα 3.1.9 Σύγχρονη brushless γεννήτρια ναυτιλιακού τύπου.

Σε περίπτωση που ο εναλλακτήρας χρησιμοποιείται ως συσσωρευτής ρεύματος η τροφοδοσία ρεύματος στο δρομέα πραγματοποιείται με χρήση ψυκτρών (brushes). Εναλλακτικά, για την τροφοδότηση του δρομέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρή γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος με ανορθωτική διάταξη για τη μετατροπή του σε συνεχές. Στην περίπτωση αυτή δεν απαιτείται η χρήση ψυκτρών γι' αυτό και η διάταξη αυτή καλείται brushless. Όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.1.9** η εναλλασσόμενη τάση της διεγέρτριας ανορθώνεται μέσω κυκλώματος πλήρους ανόρθωσης με διόδους οι οποίες προσαρτώνται στον άξονα της γεννήτριας. Παράλληλα, στα τυλίγματα συνδέεται αντιστάτης προστασίας (surge protection resistor) για την προστασία των διόδων από υψηλές τάσεις που προκαλούνται από απότομες μεταβολές του ρεύματος διέγερσης.

Βασικό μειονέκτημα των γεννητριών με περιστρεφόμενη διέγερση είναι η αργή τους απόκριση σε απότομες μεταβολές φορτίου. Ενδεικτικά, ο χρόνος απόκρισης για μεταβολή φορτίου της τάξεως του 15% αντιστοιχεί σε χρόνο μεγαλύτερο του ενός δευτερολέπτου (Practical Marine Electrical Knowledge - Hall 1999).

Στατική Διέγερση:

Το πεδίο διέγερσης της γεννήτριας αντλεί το απαιτούμενο συνεχές ρεύμα μέσω στατικής διέγερσης μετασχηματιστή/ανορθωτή απευθείας από την έξοδο της γεννήτριας. Στην περίπτωση αυτή ο αντίστοιχος χρόνος απόκρισης για μεταβολή φορτίου της τάξεως του 15% αντιστοιχεί σε χρόνο μικρότερο του ενός δεκάτου του δευτερολέπτου (Practical Marine Electrical Knowledge - Hall 1999). Οι διατάξεις αυτές καλούνται σύνθετης διέγερσης (compound excitation) καθώς ελέγχονται μέσω της τάσης (shunt effect) και του ρεύματος ανατροφοδότησης (series effect).



Σχήμα 3.1.10 Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα σύνθετης διέγερσης

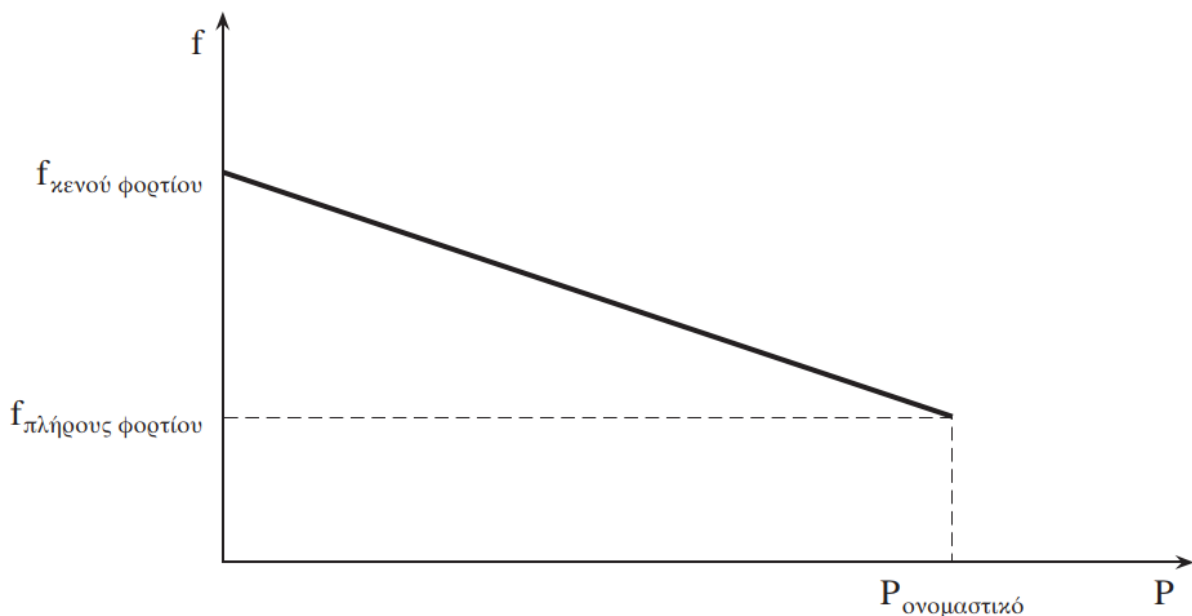
3.2 Τρόποι ελέγχου σύγχρονων γεννητριών

Η σύγχρονη γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτούμενη από δύο διαφορετικές και ανεξάρτητες μεταξύ τους πηγές. Συγκεκριμένα, τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια που δημιουργεί το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της διέγερσης και μηχανική ενέργεια η οποία προκαλείται μέσω του φαινομένου της επαγωγής στο δεύτερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

3.2.1 Ρύθμιση συχνότητας – speed governor

Η μηχανική ενέργεια μέσω του φαινομένου της επαγωγής μετατρέπεται σε ενεργό ισχύ. Η μηχανική ενέργεια συνήθως προσφέρεται από εξωτερική στρεφόμενη μηχανή η οποία καλείται κινητήρια μηχανή (prime mover). Στην περίπτωση των σύγχρονων ηλεκτρογεννητριών σε πλοία ο συνηθέστερος τύπος κινητήριων μηχανών, σήμερα, είναι οι diesel κινητήρες, εναλλακτικά χρησιμοποιούνται αεριοστρόβιλοι, ατμοστρόβιλοι κ.λ.π. Η ταχύτητα στρέψης της κινητήριας μηχανής καθορίζει τη συχνότητα του παρεχόμενου ρεύματος.

Για την εξασφάλιση της -κατά το δυνατόν σταθερότερης- παρεχόμενης συχνότητας στο δίκτυο χρησιμοποιούνται διατάξεις αυτόματης ρύθμισης συχνότητας (speed governor) όπου καθορίζουν μηχανικά την ταχύτητα περιστροφής. Η διάταξη αυτή καθορίζει την ποσότητα καυσίμου και βάσει αυτού καθορίζεται και η παρεχόμενη ισχύς. Συγκεκριμένα, αύξηση του ρυθμού έκχυσης καυσίμου της κινητήριας μηχανής οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας στρέψης άρα και της παρεχόμενης ισχύος. Ο μηχανισμός αυτός καλείται f-P μηχανισμός.



Σχήμα 3.2.1 Χαρακτηριστική συχνότητας – ισχύος (f – P)

Στο **σχήμα 3.2.1** φαίνεται η χαρακτηριστική συχνότητας περιστροφής του δρομέα, παρεχόμενης ενεργού ισχύος. Η ευθεία αυτή καλείται και κκανόνας καυσίμου της

κινητήριας μηχανής» και η κλίση της είναι προσεγγιστικά σταθερή. Η κλίση της ευθείας καλείται βαθμός αναλογίας συχνότητας ή στατισμός συχνότητας και καθορίζεται αποκλειστικά από τις κατασκευαστικές προδιαγραφές της γεννήτριας. Δεδομένου σταθερού στατισμού συχνότητας είναι προφανές ότι μετατόπιση της ευθείας παράλληλα προς τα επάνω αντιστοιχεί σε αύξηση του ρυθμού έκχυσης καυσίμου στην κινητήρια μηχανή που συνεπάγεται αύξηση της παραγόμενης ισχύος άρα και αύξηση της συχνότητας.

Ο στατισμός συχνότητας ορίζεται από τη σχέση:

$$x_p = \frac{n_L - n_V}{n_N} = \frac{f_L - f_V}{f_N} \quad (3.2.1)$$

όπου,

n_L : η ταχύτητα περιστροφής σε μηδενικό φορτίο

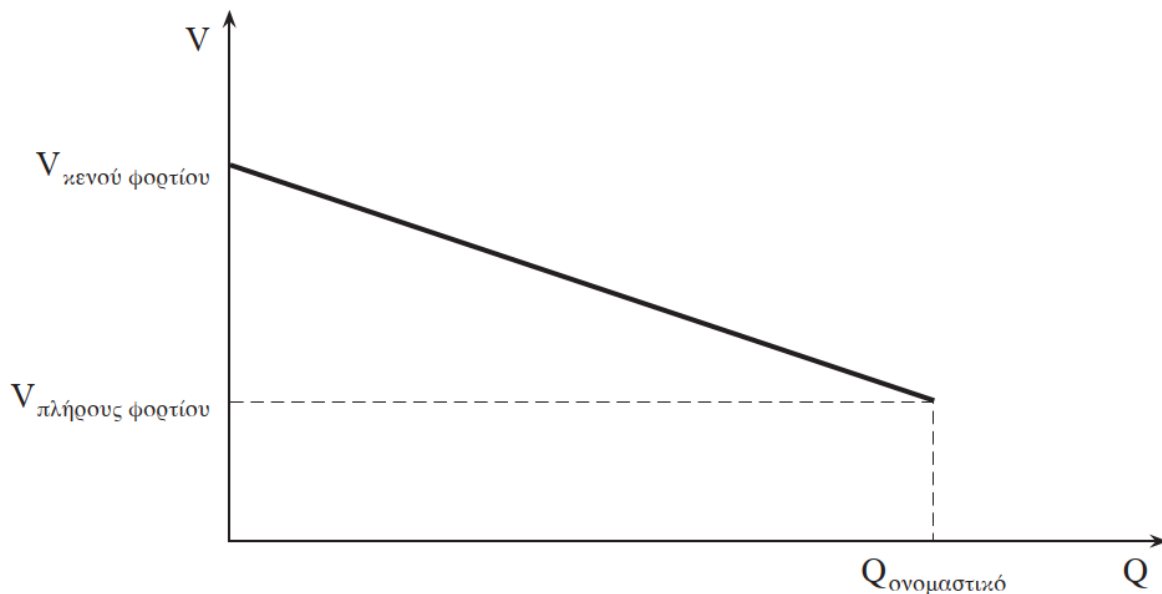
n_V : η πραγματική ταχύτητα περιστροφής στο φορτίο

n_N : η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής

3.2.2 Ρύθμιση τάσης – voltage droop

Η ηλεκτρική ενέργεια που δημιουργείται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της διέγερσης μετατρέπεται σε ενέργεια άεργου ισχύος. Η ενέργεια, αυτή, καθορίζει το μέτρο της τάσης των ακροδεκτών και καθορίζεται (συνήθως) μέσω πηγής συνεχούς ρεύματος.

Προκειμένου να διατηρείται σταθερή η τάση των ακροδεκτών της γεννήτριας παρεμβάλλεται διάταξη αυτόματου ελέγχου που καθορίζει το μηχανισμό ελέγχου της τάσης παράγοντας άεργο ισχύ στη σύγχρονη γεννήτρια. Ο μηχανισμός αυτός καλείται V-Q μηχανισμός ελέγχου.



Σχήμα 3.2.2 Χαρακτηριστικές τάσης ακροδεκτών – Άεργου ισχύος ($V - Q$)

Στο **σχήμα 3.2.1** παρουσιάζεται η χαρακτηριστική της πολικής τάσης των ακροδεκτών της γεννήτριας συναρτήσει της άεργου ισχύος. Η κλίση της χαρακτηριστικής καλείται βαθμός αναλογίας τάσης (ή στατισμός τάσης – voltage droop) και καθορίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά σχεδίασης.

Ο μηχανισμός $V-Q$ καθορίζεται μέσω του ρυθμιστή τάσης (voltage regulator) ο οποίος παρεμβαίνει άμεσα στη γεννήτρια. Όπως προκύπτει από το **σχήμα 3.2.1** αύξηση του συνεχούς ρεύματος της διεγέρτριας οδηγεί σε μετατόπιση της χαρακτηριστικής προς τα πάνω το οποίο συνεπάγεται αύξηση της άεργου ισχύος και αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της γεννήτριας. Απεναντίας, μείωση του ρεύματος της διεγέρτριας προκαλεί μείωση της προσφερόμενης άεργου άρα και μείωση της τάσης στους ακροδέκτες της γεννήτριας.

Ο στατισμός τάσης ορίζεται από την σχέση:

$$x_Q = \frac{\Delta V}{\Delta Q} = - \frac{2X}{E \cos \delta} \quad (3.2.2)$$

όπου,

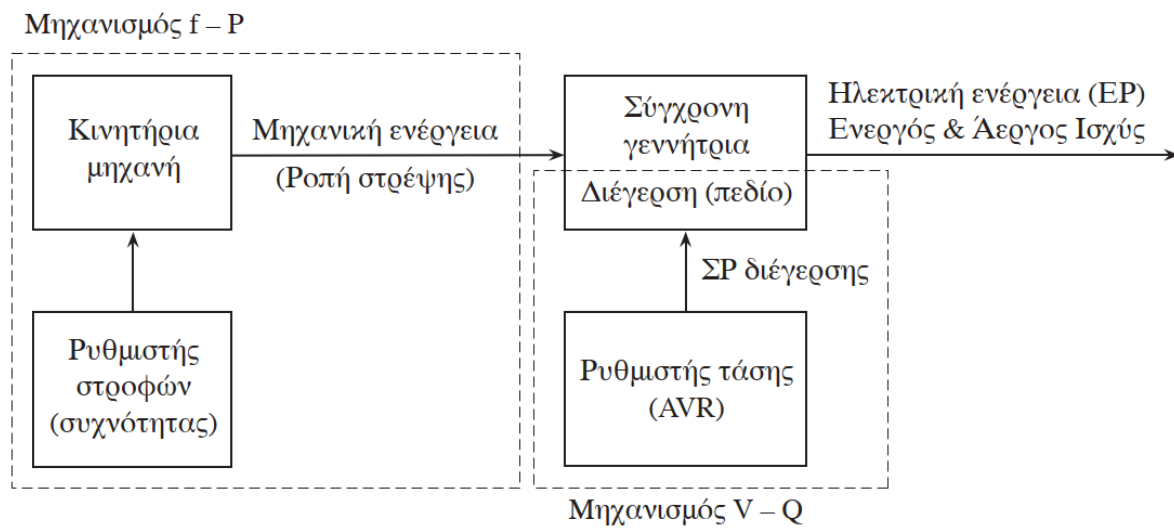
X : η σύγχρονη αντίδραση τυλίγματος

E : η εσωτερική τάση της γεννήτριας

δ : η γωνία ισχύος (ρυθμίζεται από το ρυθμιστή στροφών του κινητήρα)

Ο πιο συνηθισμένος μηχανισμός ελέγχου $V-Q$ είναι ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης (Automatic Voltage Regulator) συχνά αναφερόμενος και ως AVR για τον οποίο θα πραγματοποιηθεί εκτενής αναφορά στην επόμενη ενότητα.

Οι μηχανισμοί που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες λειτουργούν ανεξάρτητα. Ο τρόπος διασύνδεσής τους σε διαγραμματική μορφή φαίνεται στο **σχήμα 3.2.3**.



Σχήμα 3.2.2 Μηχανικό ισοδύναμο σύγχρονης γεννήτριας

3.2.3 Μαθηματικές σχέσεις P-δ και Q-V

Από το μονοφασικό ισοδύναμο του **σχήματος 3.1.4** η σχέση που δίνει το ρεύμα εξόδου της γεννήτριας συναρτήσει της ΗΕΔ μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$I = \frac{E - V}{R + jX} \quad (3.2.3)$$

όπου,

- E: η εξ' επαγωγής τάση της γεννήτριας
- V: η τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας
- R: η ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων τυμπάνου
- X: η επαγωγική αντίσταση των τυλιγμάτων τυμπάνου
- I: το ρεύμα φάσης τυμπάνου της γεννήτριας

Ενώ η αντίστοιχη έκφραση της μιγαδικής ισχύος είναι: $S = V \cdot I^*$ (3.2.2)

Θεωρώντας ως διάνυσμα αναφοράς την τάση ακροδεκτών (V) και σχετικές γωνίες φ και δ των μεγεθών E και I, αντίστοιχα, διαμορφώνονται οι εξής εκφράσεις για την ισχύ:

$$P = \frac{V}{R^2 + X^2} \cdot [(E \cdot \cos\delta - V)R + X \cdot E \cdot \sin\delta] \quad (3.2.4)$$

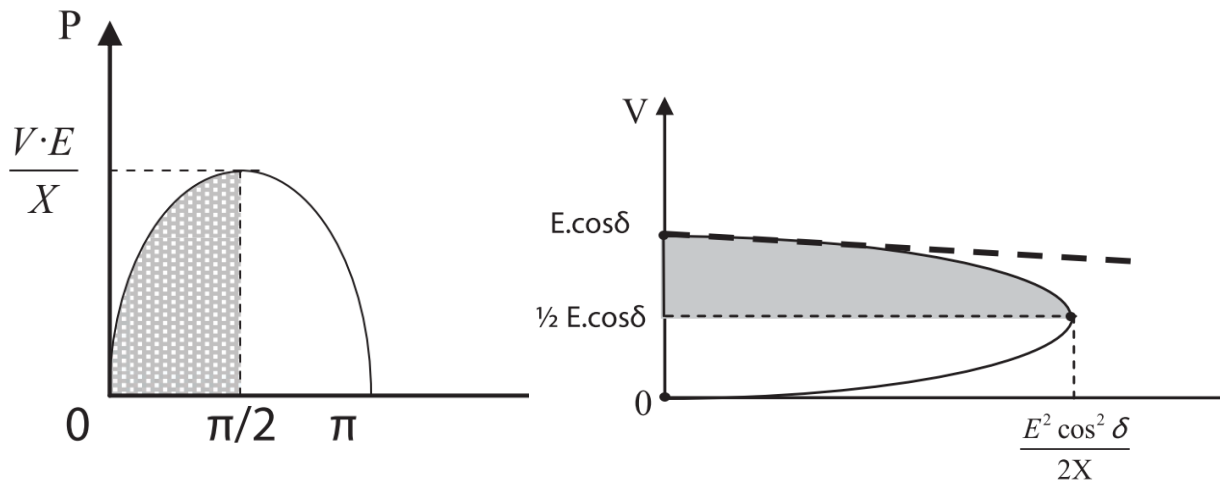
$$Q = \frac{V}{R^2 + X^2} \cdot [(E \cdot \cos\delta - V)X + R \cdot E \cdot \sin\delta] \quad (3.2.5)$$

Θεωρώντας $R \ll X$ οι παραπάνω σχέσεις λαμβάνουν την μορφή:

$$P = \frac{V \cdot E}{X} \cdot \sin\delta \quad (3.2.6)$$

$$Q = \frac{V}{X} \cdot (E \cdot \cos\delta - V) \quad (3.2.7)$$

Στο **σχήμα 3.2.3** αναπαριστάνται γραφικά οι παραπάνω σχέσεις οι οποίες αποτελούν τους κανόνες P-δ και Q-V αντίστοιχα.



Σχήμα 3.2.3 Διάγραμμα:

- (α) ενεργού ισχύος P προς γωνία ισχύος δ
- (β) άεργου ισχύος Q προς μέτρο τάσης V

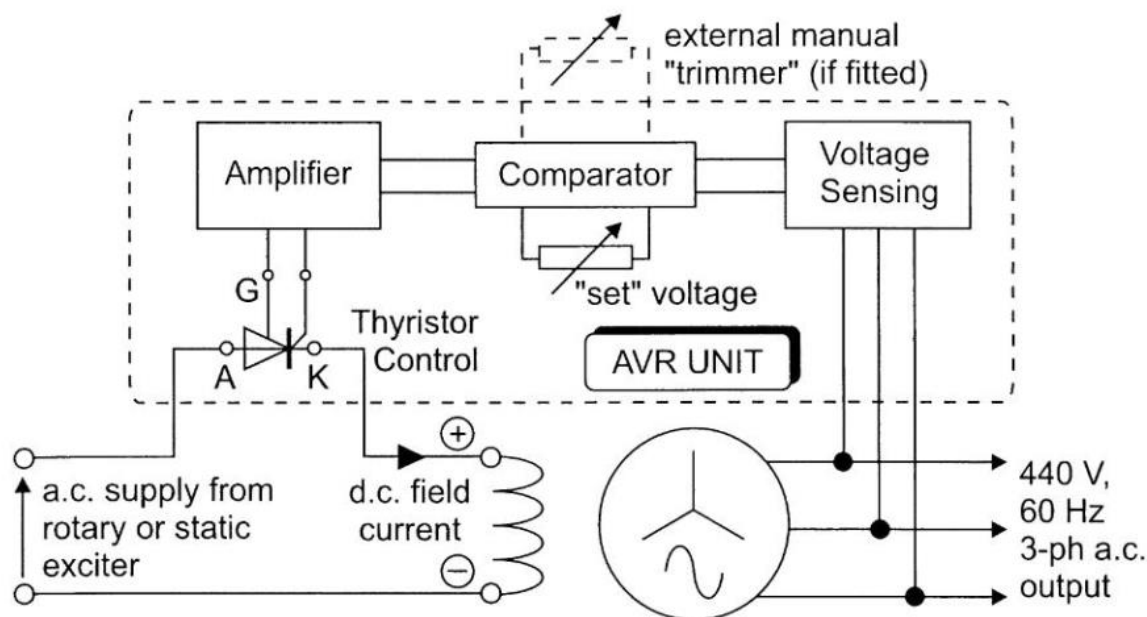
Οι σκιασμένες περιοχές αντιστοιχούν στις στατικά ευσταθείς περιοχές λειτουργίας οι οποίες εκφράζονται από τις σχέσεις:

$$\delta \leq \frac{\pi}{2} \quad \& \quad P \leq \frac{V \cdot E}{X} \quad (3.2.8)$$

$$\frac{1}{2} \cdot E \cdot \cos\delta \leq V \leq E \cdot \cos\delta \quad \& \quad Q \leq \frac{1}{2X} \cdot E^2 \cdot \cos^2\delta \quad (3.2.9)$$

3.2.4 Αυτόματος ρυθμιστής τάσης – AVR

Σκοπός του AVR είναι η διατήρηση της τάσης εξόδου σε προκαθορισμένη τιμή, η οποία συνήθως επιλέγεται από κάποιο στοιχείο μεταβαλλόμενης ωμικής αντίστασης (τρίμερο, ποτενσιόμετρο) που βρίσκεται στην πλακέτα του AVR. Το κύκλωμα ελέγχου περιλαμβάνει μετασχηματιστή, κύκλωμα ανόρθωσης, εξομάλυνσης, διόδους zener, mosfet και thyristor. Η πλακέτα του AVR βρίσκεται είτε στον πίνακα ελέγχου της γεννήτριας (δηλαδή στο Main Switch Board, στην περίπτωση των πλοίων) είτε τοπικά πάνω στη γεννήτρια.



Σχήμα 3.2.3 Απλοποιημένο κύκλωμα ελέγχου AVR

Στο **σχήμα 3.2.3** φαίνεται ένα απλοποιημένο κύκλωμα ελέγχου AVR το οποίο απεικονίζει την κεντρική λογική ελέγχου που επικρατεί στα περισσότερα AVR του εμπορίου. Το κύκλωμα των μετασχηματιστών εισόδου (voltage sensing unit), «διαβάζει» την τάση της διεγέρτριας όπως επίσης και την τάση εξόδου της γεννήτριας όπου την ανορθώνει και την εξομαλύνει. Με τον τρόπο αυτό δημιουργεί ένα ασθενές συνεχές ρεύμα το οποίο αναλογεί στην τάση εξόδου της γεννήτριας. Το ρεύμα αυτό συγκρίνεται με το ρεύμα αναφοράς που παράγεται μέσω μιας συστοιχίας από αντιστάτες, διόδους zener και έναν μεταβλητό αντιστάτη (τρίμερο) από τον οποίο καθορίζεται και η ακριβής τιμή της τάσης αναφοράς. Το σήμα σφάλματος που προκύπτει από τη σύγκριση των προαναφερθέντων ενισχύεται και προκαλεί τη μεταβολή του πεδίου της γεννήτριας πυροδοτώντας μια συστοιχία από θυρίστορ (thyristor control circuit).

Το AVR, εν γένει, αξιοποιείται για:

- Σταθεροποίηση της τάσης εξόδου της γεννήτριας με άμεση χρονική απόκριση.
- Γρήγορη συγκέντρωση τάσης κατά την εκκίνηση της γεννήτριας.
- Ισοκαταμερισμό των φορτίων κατά την παράλληλη λειτουργία.
- Ενδεικτικά σφάλματος (trip/alarm) σε περιπτώσεις υπέρτασης/υπότασης.

Το AVR επιτυγχάνει ακρίβεια της τάξης του $\pm 2.5\%$ της καθορισμένης από τον χρήστη τιμής σε συνθήκες πλήρους φόρτωσης. Ενδεικτικά, ο χρόνος απόκρισης για βύθιση τάσης της τάξεως του 15% αντιστοιχεί σε χρόνο απόκρισης 1.5 δευτερολέπτου για πλήρη επαναφορά τάσης (Practical Marine Electrical Knowledge - Hall 1999).

3.3 Παράλληλη λειτουργία εναλλακτών

Ως παραλληλισμός εναλλακτών καλείται η ταυτόχρονη χρήση δύο ή και περισσότερων εναλλακτών των οποίων οι έξοδοι τροφοδοτούν από κοινού το ίδιο δίκτυο. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι εναλλακτές είναι ιδίου κατασκευαστή, τύπου και μεγέθους και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά είναι πανομοιότυπα. Κατά τον παραλληλισμό τα φορτία μπορούν να κατανεμηθούν με οποιονδήποτε τρόπο μεταξύ των εναλλακτών.

Τα βασικά πλεονεκτήματα χρήσης παραλληλισμένων εναλλακτών είναι:

- **Συνεχής λειτουργία και γρηγορότερη συντήρηση.** Για τη σωστή λειτουργία των ηλεκτρογεννητριών απαιτείται συστηματική συντήρηση του μηχανικού μέρους (καθαρισμός φίλτρων και αντλιών καυσίμου, έλεγχος και αντικατάσταση των λαδιών λίπανσης, καθαρισμός του συστήματος ψύξης κ.α) η οποία δίνεται αναλυτικά από τον κατασκευαστή βάσει των ωρών εργασίας της γεννήτριας. Κάτω από συνθήκες που καθίσταται αδύνατη η διακοπή της παρεχόμενης ενέργειας, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των πλοίων, κατά τη διάρκεια της συντήρησης μίας γεννήτριας είναι αναγκαία η παροχή της απαιτούμενης ενέργειας από κάποια άλλη.
- **Αποδοτικότητα.** Οι σύγχρονες ηλεκτρογεννήτριες, όπως παρουσιάστηκε και στην προηγούμενη ενότητα, είναι πιο αποδοτικές σε υψηλότερα φορτία, γεγονός που καθιστά αντι-οικονομική την χρήση μίας ηλεκτρογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 1.2MVA στο 20% της ισχύος της έναντι τριών παραλληλισμένων ηλεκτρογεννητριών ονομαστικής ισχύος 400kVA στο 60% της ισχύος τους.
- **Μικρό μέγεθος εναλλακτών.** Αναλογικά με την ισχύ που μπορεί να προσφέρει μία ηλεκτρογεννήτρια αυξάνεται και το μέγεθος της. Με την αύξηση του μεγέθους των μηχανικών εξαρτημάτων γίνεται δύσκολη η χρήση και η συντήρηση της γεννήτριας.
- **Αξιοπιστία και σταθερότητα.** Σε περίπτωση μηχανικής βλάβης σε δίκτυο τροφοδοτούμενο από μία και μόνο ηλεκτρογεννήτρια είναι αναπόφευκτη η πρόκληση διακοπής τροφοδοσίας (black out). Απεναντίας, σε δίκτυο τροφοδοτούμενο από παραλληλισμένες ηλεκτρογεννήτριες σε περίπτωση μηχανικής βλάβης της μιας εξ' αυτών τα φορτία αυτόματα θα μοιραστούν στην άλλη / στις άλλες.

3.3.1 Προϋποθέσεις παραλληλισμού

Για την επίτευξη του παραλληλισμού δύο, ή και περισσότερων, εναλλακτών είναι αναγκαία η σύμπτωση τάσης και πολικότητας. Ωστόσο, καθότι η τάση μεταβάλλεται διαρκώς, δεν αρκεί η σύμπτωση των μέσων μεγεθών αλλά απαιτείται η στιγμιαία τιμή της τάσης να ταυτίζεται τόσο ως προς το μέγεθος όσο και ως προς την πολικότητα. Για τη διατήρηση της σύμπτωσης των τάσεων στο πέρασμα του χρόνου απαιτείται και η ταύτιση της συχνότητας λειτουργίας. Τέλος, η διαδοχή των φάσεων είναι αναγκαία σε όλους τους εναλλακτές και καθορίζεται κατά τη σύνδεση του εναλλακτήρα με τους ζυγούς.

Συνοπτικά, οι βασικές προϋποθέσεις για την επίτευξη παραλληλισμού είναι:

1. Ίδια διαδοχή φάσεων
2. Ίσες συχνότητες
3. Ίσες τάσεις
4. Τάσεις 'εν φάσει' μία προς μία

3.3.2 Όργανα μέτρησης – χειρισμού

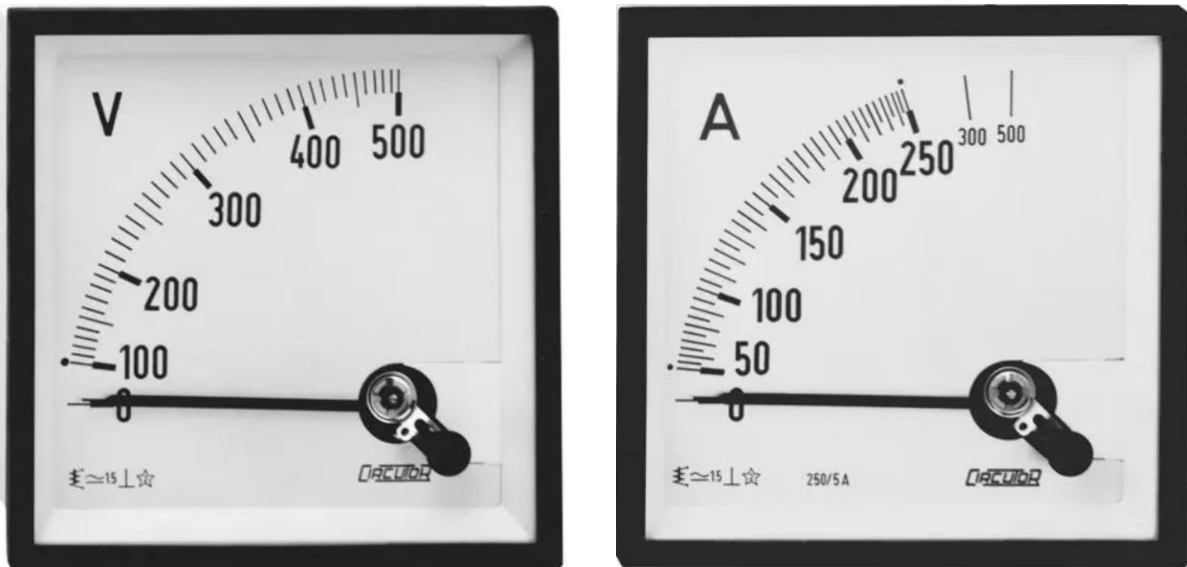
Για τον έλεγχο της σύμπτωσης τάσεων και συχνοτήτων απαιτούνται τα παρακάτω όργανα μέτρησης:

- Βολτόμετρο
- Αμπερόμετρο
- Συχνόμετρο
- Συγχρονοσκόπιο
- Λυχνίες συγχρονισμού

Στα περισσότερα πλοία τα όργανα αυτά βρίσκονται στο Main Switch Board (MSB) του μηχανοστασίου (Engine Control Room – ECR). Το δίκτυο περιλαμβάνει συνήθως τρεις ηλεκτρογεννήτριες και ο πίνακας χειρισμού της καθεμίας βρίσκεται στο MSB. Επιπλέον υπάρχει και ο πίνακας συγχρονισμού (synchro panel) στον οποίο βρίσκονται το συγχρονοσκόπιο, οι λυχνίες πλοήγησης, τα όργανα μέτρησης ισχύος για κάθε γεννήτρια, επιλεκτικοί διακόπτες, χειρωνακτικοί ρυθμιστικοί διακόπτες και πλήκτρα χειρισμού.

Βολτόμετρο - Αμπερόμετρο

Απεικονίζουν την τάση και το ρεύμα της κάθε φάσης (η οποία καθορίζεται από επιλεκτικό διακόπτη) της κάθε ηλεκτρογεννήτριας.



Σχήμα 3.3.1 Αναλογικό βολτόμετρο (αριστερά), αμπερόμετρο (δεξιά)

Συχνόμετρο

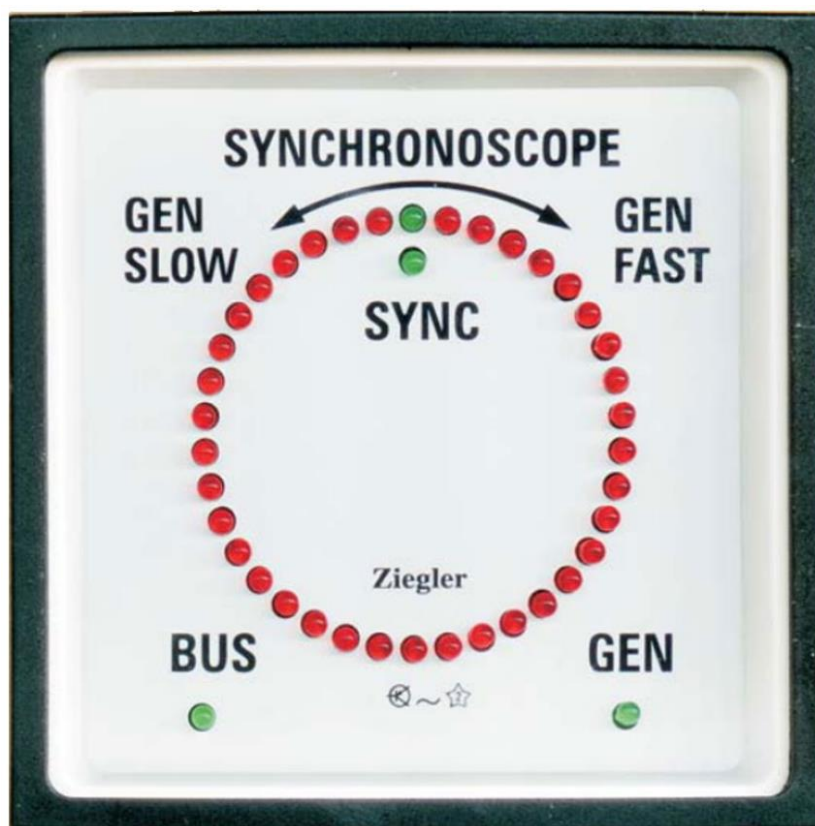
Απεικονίζει τη συχνότητα λειτουργίας της εκάστοτε γεννήτριας η οποία μετράται βασιζόμενη στην αρχή του συντονισμού. Αποτελείται από μια σειρά ελασμάτων με το ένα άκρο τους βιδωμένο σε κοινή βάση, τα οποία πάλλονται μεταξύ πόλων ηλεκτρομαγνήτη. Το κάθε έλασμα έχει διαφορετική συχνότητα συντονισμού, οπότε πάλλεται με μέγιστο πλάτος ταλάντωσης όταν η συχνότητα του Ε.Ρ. συμπέσει με την ιδιοσυχνότητά του.



Σχήμα 3.3.2 Αναλογικό συχνόμετρο

Συγχρονοσκόπιο

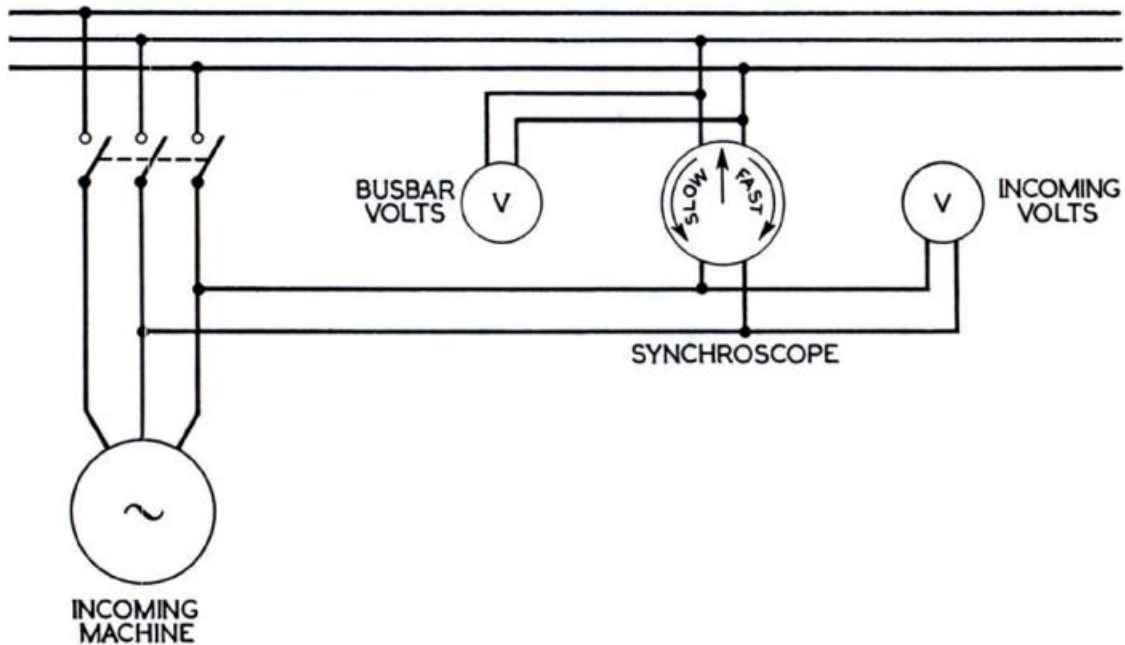
Το συγχρονοσκόπιο αποτελείται από δύο τυλίγματα, από τα οποία το ένα είναι συνδεδεμένο με τους ζυγούς του δικτύου και το άλλο συνδέεται μέσω επιλογέα με τη γεννήτρια που πρόκειται να παραλληλισθεί. Ο δείκτης του περιστρέφεται ελεύθερα προς οποιαδήποτε από τις δύο κατευθύνσεις. Όταν ο δείκτης περιστρέφεται με φορά ωρολογιακή (βέλος με την ένδειξη 'FAST'), σημαίνει ότι η γεννήτρια έχει υψηλή ταχύτητα περιστροφής (συχνότητα υψηλότερη εκείνης του δικτύου). Αντιωρολογιακή φορά περιστροφής (βέλος με την ένδειξη 'LOW') σημαίνει χαμηλή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής του δείκτη είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά συχνοτήτων μεταξύ εναλλακτήρα και δικτύου. Μία στροφή του δείκτη ανά δευτερόλεπτο αντιστοιχεί σε διαφορά συχνοτήτων κατά 1% περίπου.



Σχήμα 3.3.3 Αναλογικό συγχρονοσκόπιο

Όταν οι συχνότητες δικτύου και γεννήτριας συμπέσουν, ο δείκτης σταθεροποιείται στην κατακόρυφη θέση, που είναι η γωνιακή διαφορά φάσεων μεταξύ δικτύου και γεννήτριας. Όταν η γεννήτρια είναι συγχρονισμένη με το δίκτυο, η διαφορά αυτή είναι μηδενική και ο δείκτης βρίσκεται στην κατακόρυφη θέση με το βέλος προς τα πάνω (θέση '12' του ρολογιού).

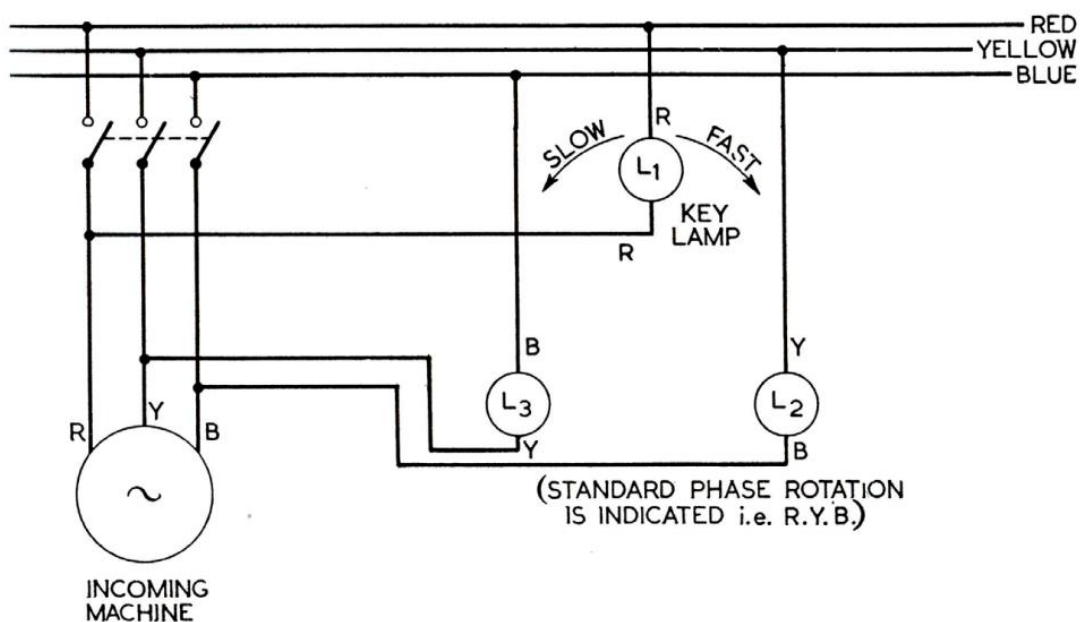
Για να αποφευχθεί λανθασμένη ένδειξη, ο δείκτης είναι έτσι κατασκευασμένος, ώστε να πέφτει έξω από την κατακόρυφη θέση εάν κάποιο από τα τυλίγματα δεν είναι ενεργοποιημένο. Ας σημειωθεί ότι το συγχρονοσκόπιο δεν πρέπει να παραμένει συνδεδεμένο περισσότερο από 20 min κάθε φορά, διότι δεν είναι σχεδιασμένο για συνεχή λειτουργία.



Σχήμα 3.3.4 Σύνδεση συγχρονοσκοπίου στο δίκτυο (Watson 1990)

Λυχνίες συγχρονισμού

Οι λυχνίες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της τάσης και της πολικότητας είτε σε συνδυασμό με το συγχρονοσκόπιο είτε ανεξάρτητα από αυτό.



Σχήμα 3.3.5 Σύνδεση συγχρονοσκοπίου στο δίκτυο (Watson 1990)

Η λυχνία L1 είναι συνδεδεμένη στην ίδια φάση μεταξύ ζυγών και του προς παραλληλισμό εναλλακτήρα, ενώ οι λυχνίες L2 και L3 είναι σταυρωτά συνδεδεμένες μεταξύ των δύο άλλων φάσεων. Εάν οι συχνότητες δικτύου και εναλλακτήρα διαφέρουν, οι λυχνίες ανάβουν η μία μετά την άλλη. Εάν είναι τοποθετημένες σε σχήμα τριγώνου, τα φώτα φαίνονται σαν να περιστρέφονται. Η φορά περιστροφής (δηλ. ωρολογιακή ή αντιωρολογιακή) δείχνει εάν ο εναλλακτήρας περιστρέφεται γρήγορα ή αργά, όπως και στο συγχρονοσκόπιο. Η κατάλληλη στιγμή για σύνδεση του εναλλακτήρα με το δίκτυο είναι όταν η λυχνία L1 είναι σβηστή και οι άλλες δύο είναι εξίσου φωτεινές. Εάν η διαδοχή των φάσεων του εναλλακτήρα δε συμπίπτει με εκείνη του δικτύου, τότε οι τρεις λυχνίες ανάβουν και σβήνουν ταυτόχρονα. Το σφάλμα διορθώνεται με εναλλαγή της σύνδεσης δύο οποιωνδήποτε από τις φάσεις του εναλλακτήρα με τους ζυγούς.

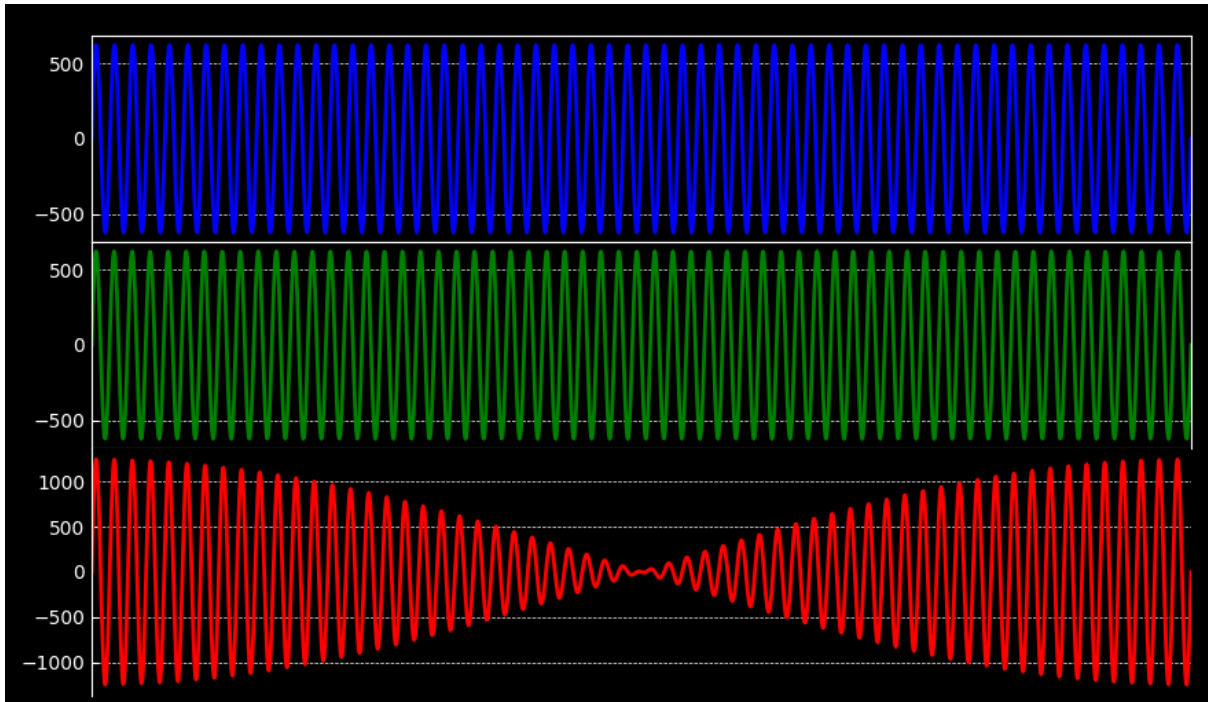
3.3.3 Διαδικασία παραλληλισμού

Έστω ότι το δίκτυο τροφοδοτείται από μία ηλεκτρογεννήτρια, η διαδικασία παραλληλισμού δεύτερης ηλεκτρογεννήτριας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τα παρακάτω βήματα:

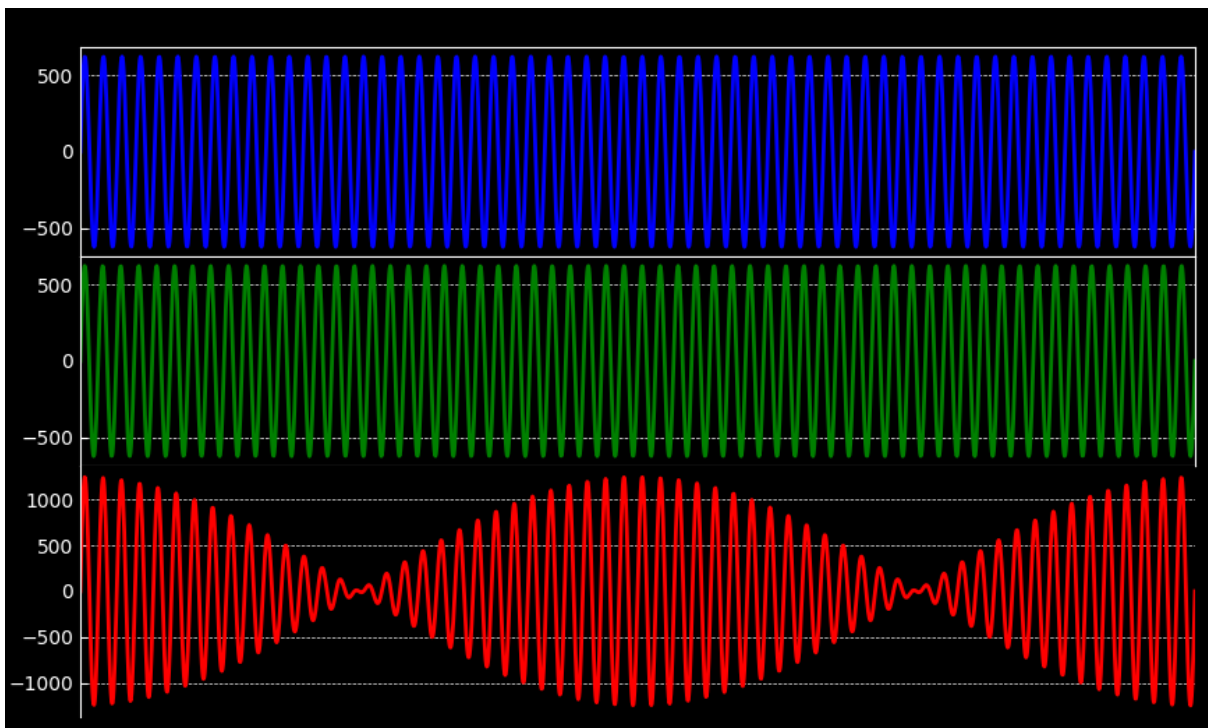
- Ρυθμίζεται, μέσω του governor speed control, η ταχύτητα περιστροφής της ηλεκτρογεννήτριας ώστε η συχνότητα της να είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή του δικτύου (της τάξης του 1%).
- Ρυθμίζεται η τάση του εναλλακτήρα ώστε να είναι λίγο μεγαλύτερη από την τάση του δικτύου (της τάξης του 5%).
- Οπλίζεται ο διακόπτης σύνδεσης (Air Circuit Breaker – ACB) όταν οι δύο γεννήτριες βρίσκονται σε φάση. Για να επιτευχθεί ο συμφασισμός ο ACB πρέπει να οπλίσει τη στιγμή που ο δείκτης του συγχρονοσκοπίου βρίσκεται στην ανώτερη θέση, περιστρεφόμενος δεξιόστροφα με γωνιακή ταχύτητα μικρότερη του 1 RPS.

Με τη μικρή διαφορά τάσης και συχνότητας της ηλεκτρογεννήτριας επιτυγχάνεται αυτόματη φόρτωση ενός μικρού μέρους του συνολικού φορτίου κατά τον παραλληλισμό. Σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει ο κίνδυνος η εν' παραλληλισμό ηλεκτρογεννήτρια να απορροφήσει ισχύ από το δίκτυο λειτουργώντας ως κινητήρας (motoring) γεγονός που μπορεί να καταστρέψει τη μηχανή. Στις περισσότερες εγκαταστάσεις υπάρχει αυτοματισμός προστασίας (reverse power protection) που αφοπλίζει αυτόματα τον ACB όταν τα φορτία της ηλεκτρογεννήτριας πέσουν κάτω από ένα όριο (συνήθως το 10% της ονομαστικής τιμής της ισχύος).

Η διαφορά συχνότητας μεταξύ του δικτύου και της γεννήτριας οδηγεί σε διακρότημα. Στα **σχήματα 3.3.6** και **3.3.7** φαίνεται το διακρότημα που δημιουργείται για αποκλίσεις συχνοτήτων 2Hz και 4Hz, αντίστοιχα. Όπως εύκολα προκύπτει, η βέλτιστη στιγμή σύνδεσης είναι όταν το διακρότημα μηδενίζεται.



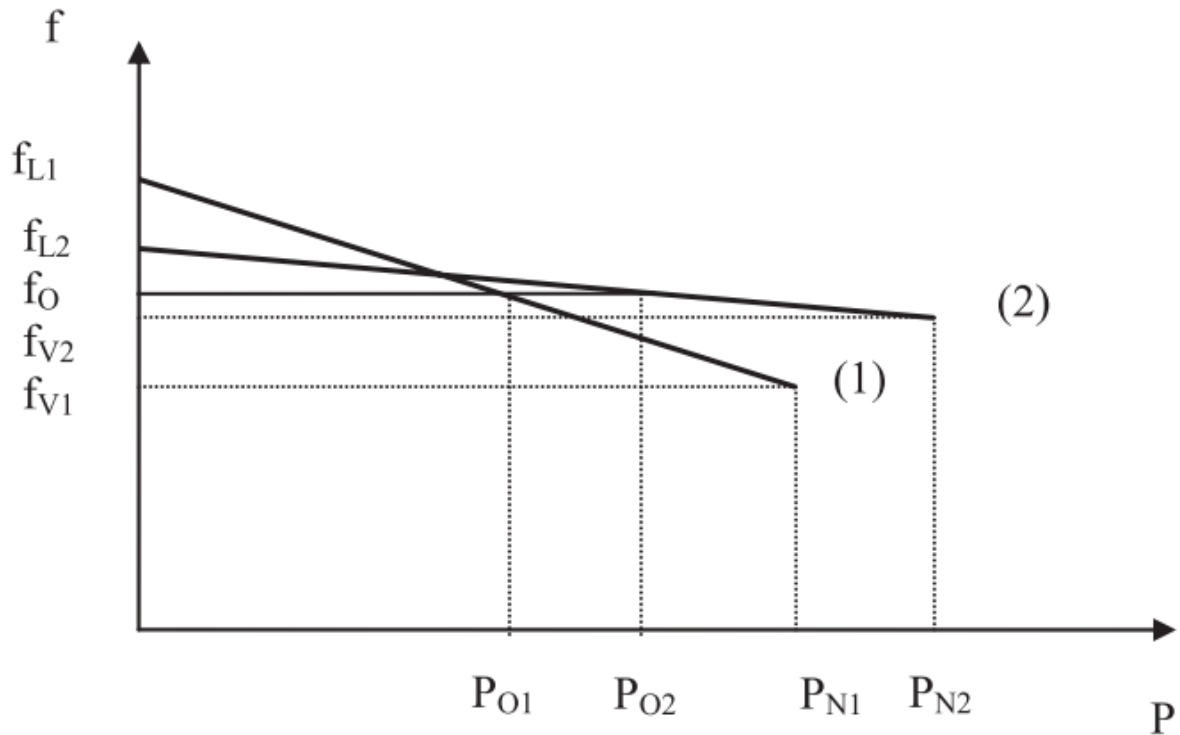
Σχήμα 3.3.6 Γραφική αναπαράσταση διακροτήματος (κόκκινο) για συχνότητες: δικτύου 60Hz (μπλε), εν' παραλληλισμού γεννήτριας 62Hz (πράσινο)



Σχήμα 3.3.7 Γραφική αναπαράσταση διακροτήματος (κόκκινο) για συχνότητες: δικτύου 60Hz (μπλε), εν' παραλληλισμού γεννήτριας 64Hz (πράσινο)

3.3.4 Επιμερισμός φορτίων

Ο επιμερισμός των ενεργών φορτίων μεταξύ παραλληλισμένων ηλεκτρογεννητριών επιτυγχάνεται μέσω της ρύθμισης των στατισμών συχνότητας, δηλαδή των κλίσεων των χαρακτηριστικών f-P.



Σχήμα 3.3.8 Κοινό διάγραμμα f-P συνεργασίας παραλληλισμένων εναλλακτήρων

Θεωρώντας παραλληλισμένους εναλλακτήρες με συνολικό ενεργό φορτίο P_0 , τότε το φορτίο κάθε εναλλακτήρα και η κοινή συχνότητα λειτουργίας υπολογίζονται από το παρακάτω σύστημα:

$$\text{Εναλλακτήρας 1: } f = f_{L1} - x_{P1} \cdot \frac{P_{O1}}{P_{N1}} \cdot f_{N1} = f_{L1} - (f_{L1} - f_{V1}) \cdot \frac{P_{O1}}{P_{N1}} \quad (3.3.1)$$

$$\text{Εναλλακτήρας 2: } f = f_{L2} - x_{P2} \cdot \frac{P_{O2}}{P_{N2}} \cdot f_{N2} = f_{L2} - (f_{L2} - f_{V2}) \cdot \frac{P_{O2}}{P_{N2}} \quad (3.3.2)$$

$$\text{Συνολικό φορτίο: } P_0 = P_{O1} + P_{O2} \quad (3.3.3)$$

όπου,

f: η συχνότητα λειτουργίας των εναλλακτήρων

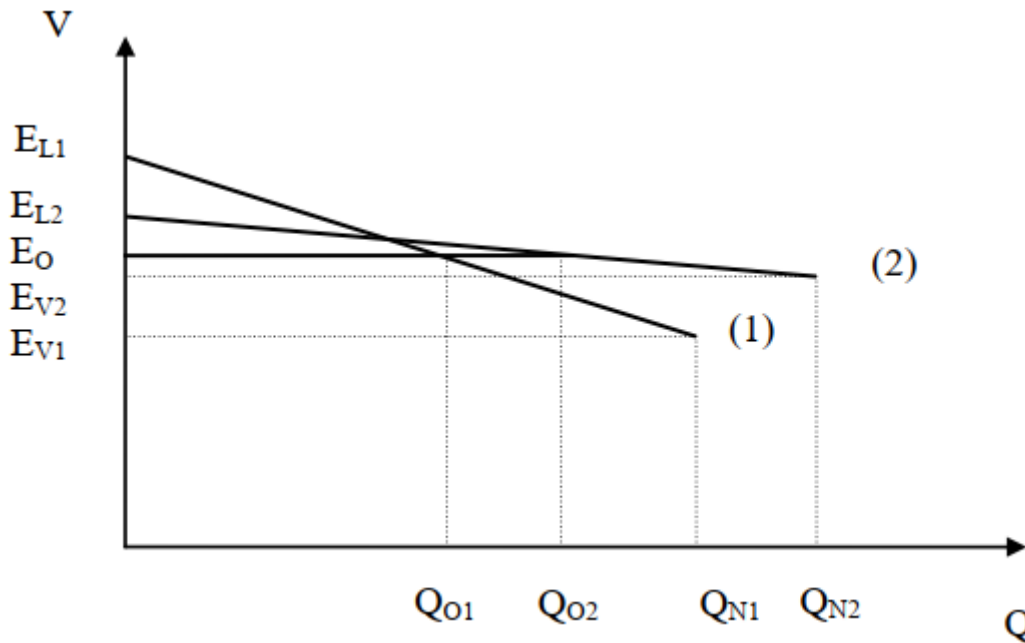
f_{L1} : η συχνότητα του 1^{ου} εναλλακτήρα σε μηδενικό φορτίο

f_{L2} : η συχνότητα του 2^{ου} εναλλακτήρα σε μηδενικό φορτίο

f_{V1} : η συχνότητα του 1^{ου} εναλλακτήρα σε φορτίο P_{O1}

f_{V2} : η συχνότητα του 2^{ου} εναλλακτήρα σε φορτίο P_{O2}

Ο επιμερισμός των έργων φορτίων μεταξύ παραλληλισμένων ηλεκτρογεννητριών επιτυγχάνεται μέσω της ρύθμισης των στατισμών τάσης (voltage droop), δηλαδή των κλίσεων των χαρακτηριστικών V-Q. Σε αντίθεση με τον επιμερισμό ενεργών φορτίων δεν είναι γραμμικός. Ωστόσο, όπως προέκυψε από την σχέση (3.2.7) στην προηγούμενη ενότητα η σχέση V-Q μπορεί να προσεγγιστεί γραμμικά όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.9.



Σχήμα 3.3.9 Κοινό διάγραμμα V-Q συνεργασίας παραλληλισμένων εναλλακτήρων

a. Πρωτεύουσα ρύθμιση ή Αυτορρύθμιση

Μεταβολή της συνολικής φόρτισης (ενεργού και έργου) θα προκαλέσει αλλαγές και στον επιμερισμό των φορτίων στις παραλληλισμένες ηλεκτρογεννήτριες βάσει των στατισμών τάσης και συχνότητας. Η μεταβολή, αυτή, καλείται πρωτεύουσα ρύθμιση.

Για τη μαθηματική μελέτη των παραπάνω θεωρούμε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούμενο από M_t παραλληλισμένες ηλεκτρογεννήτριες με συνολική ζήτηση φορτίων P_{tot} και Q_{tot} αντίστοιχα, συχνότητες μηδενικού φορτίου $f_{L1}, f_{L2}, \dots, f_{LM_t}$ και ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις E_1, E_2, \dots, E_{M_t}

Οι σχέσεις (3.3.1) και (3.3.3) που περιγράφουν τον καταμερισμό ενεργών φορτίσεων βάσει των στατισμών συχνότητας λαμβάνουν τη μορφή:

$$f = f_{Lk} - x_{Pk} \cdot \frac{P_{Ok}}{P_{Nk}} \cdot f_{Nk}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, M_t \quad (3.3.4)$$

$$P_{tot} = \sum_{k=1}^{M_t} P_k \quad (3.3.5)$$

Ομοίως, ο καταμερισμός έργων φορτίσεων διαμορφώνεται από τις γραμμικοποιημένες εξισώσεις που περιγράφουν τις χαρακτηριστικές V-Q:

$$V = E_k - x_{Qk} \cdot \frac{Q_k}{Q_{Nk}} \cdot V_{Nk}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, M_t \quad (3.3.6)$$

$$Q_{tot} = \sum_{k=1}^{M_t} Q_k \quad (3.3.7)$$

b. Δευτερεύουσα ρύθμιση

Κατά τη διαδικασία της αυτορρύθμισης το νέο σημείο λειτουργίας αντιστοιχεί σε τάση και συχνότητα αριετά διαφορετική από τις ονομαστικές. Η διαδικασία εξάλειψης του σφάλματος, αυτού, καλείται δευτερεύουσα ρύθμιση. Ποιοτικά αυτό που συμβαίνει είναι η παράλληλη μετατόπιση των χαρακτηριστικών V-Q, f-P μίας εκ των ηλεκτρογεννητριών (διατηρώντας σταθερούς τους στατισμούς) με σκοπό τη διόρθωση της τάσης και της συχνότητας.

Θεωρώντας ονομαστική τάση V_N και ονομαστική συχνότητα f_N και ότι η κάθε γεννήτρια φορτίζεται αναλογικά με την ονομαστική της ισχύ σε σχέση με τις άλλες, δηλαδή P_k και Q_k προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$P_k = \frac{P_{Nk}}{\sum_{k=0}^n P_{Nk}} P_{O\Delta}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, M_t \quad (3.3.8)$$

$$Q_k = \frac{Q_{Nk}}{\sum_{k=0}^n Q_{Nk}} Q_{O\Delta}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, M_t \quad (3.3.9)$$

Ο επιμερισμός ενεργού φόρτισης, θέτοντας ως απαίτηση η παραγόμενη ενεργός ισχύς από κάθε γεννήτρια να είναι ίση με την ποσότητα P_k , προσδιορίζει την τιμή της συχνότητας μηδενικής φόρτισης f_{Lk} από την σχέση:

$$f_{Lk} = f_N + x_{Pk} \cdot \frac{P_k}{P_{Nk}} \cdot f_{Nk} \quad (3.3.10)$$

Αντίστοιχα, γνωρίζοντας την αναλογική φόρτιση κάθε γεννήτριας (Q_k) οι ΗΕΔ των γεννητριών (E_k) υπολογίζονται ως εξής:

$$E_k = \sqrt{\left(\frac{P_k X_k}{V_N}\right)^2 + \left(\frac{Q_k X_k}{V_N} + V_N\right)^2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, M_t \quad (3.3.11)$$

Τέλος, οι γωνίες ισχύος δ_k υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\tan\delta_k = \frac{P_k X_k}{Q_k X_k + V_N^2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, M_t \quad (3.3.12)$$

Κεφάλαιο 4: Μηχανοστάσιο και ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου

4.1 Μηχανοστάσιο και έλεγχος μηχανοστασίου

Το μηχανοστάσιο αποτελεί, ίσως, το βασικότερο τμήμα ενός πλοίου καθώς περιλαμβάνει τις ηλεκτρικές μηχανές, τα συστήματα και τους αυτοματισμούς λειτουργίας καθώς επίσης και όλους τους βοηθητικούς μηχανισμούς και τους πίνακες ελέγχου. Χωρίς τους μηχανισμούς του μηχανοστασίου το πλοίο καθίσταται αδύνατο να επιτελέσει οποιαδήποτε λειτουργία.

4.1.1 Μηχανοστάσιο

Στο χώρο του μηχανοστασίου βρίσκονται, εκτός των άλλων, η κινητήρια μηχανή, ο μηχανισμός ελέγχου στρέψης (steering gear), οι γεννήτριες παροχής τάσης, ο λέβητας παροχής ατμού (καζάνι), οι φυγοκεντρικοί διαχωριστές (purifiers) καυσίμου και λαδιού και οι αντλίες πυρόσβεσης. Κάθε μηχανικό τμήμα του μηχανοστασίου αποτελεί αυτοτελή μονάδα λειτουργίας η οποία περιλαμβάνει αυτοματισμούς και ηλεκτρικό πίνακα λειτουργίας τοπικά. Ωστόσο, ο γενικός έλεγχος όλων των μηχανών πραγματοποιείται από τους γενικούς πίνακες λειτουργίας και χειρισμού που βρίσκονται στο χώρο ελέγχου του μηχανοστασίου (engine control room – ECR).

Τα κύρια τμήματα του μηχανοστασίου, συγκεντρωτικά, είναι:

- **Κύρια μηχανή**, της οποίας ο άξονας συνδέεται με την προπέλα του πλοίου, μέσω της οποίας πραγματοποιείται η πρόωση. Στην πλειοψηφία τους οι κινητήριες μηχανές καταναλώνουν πετρέλαιο (diesel oil και heavy fuel oil). Ο βασικός μηχανισμός ελέγχου μπορεί να είναι πνευματικός (ο λογικός έλεγχος πραγματοποιείται με ροή αέρα) ή ηλεκτρονικός μέσω ψηφιακής μονάδας ελέγχου.
- **Ηλεκτρογεννήτριες**, για την παροχή και κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλοίου. Το δίκτυο συνήθως περιλαμβάνει τρεις ηλεκτρογεννήτριες (κατά κανόνα 2 έως 5), ιδίου τύπου και κατασκευαστή οι οποίες τροφοδοτούν το δίκτυο παράλληλα.
- **Σύστημα ψύξης μηχανής**, το οποίο αποτελείται από αντλίες που απορροφούν θαλασσινό νερό και το χρησιμοποιούν για την ψύξη της μηχανής μέσω θερμικής επαγωγής.
- **Αντλίες λαδιού λίπανσης**, στις ηλεκτρογεννήτριες και στην κύρια μηχανή.
- **Καζάνι**, η αλλιώς boiler το οποίο εξασφαλίζει την παροχή ατμού σε σταθερή πίεση για διάφορες χρήσεις όπως η θέρμανση του καυσίμου για μείωση του ιξώδους του, δηλαδή αύξηση της απόδοσης, παροχή ζεστού νερού και θέρμανσης, διατήρηση θερμοκρασίας φορτίου (σε δεξαμενόπλοια) κ.α.
- **Μηχανισμός πηδαλίου**, για τη στρέψη του πλοίου.

- **Φυγοκεντρικός διαχωριστής καυσίμου**, η αλλιώς purifier που αποτελείται από αντλίες, φίλτρα και ρυθμιστές για την επεξεργασία και τον καθαρισμό του καυσίμου.
- **Φυγοκεντρικός διαχωριστής λαδιού**, ο οποίος λειτουργεί όπως ο αντίστοιχος διαχωριστής καυσίμου και ευθύνεται για τον καθαρισμό των λαδιών λίπανσης.
- **Σύστημα πυρόσβεσης**, το οποίο περιλαμβάνει αντλίες πυρκαγιάς (fire pump) και αντλία ψεκασμού – πυρόσβεσης (sprinkler pump) οι οποίες αντλούν θαλάσσιο νερό το οποίο χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση πυρκαγιάς σε όλους του χώρους του πλοίου.

4.1. Engine control room

Ο χώρος ελέγχου και χειρισμού περιλαμβάνει τους πίνακες διανομής ισχύος και τους πίνακες ελέγχου και χειρισμού των περισσότερων αυτοματισμών του μηχανοστασίου. Συνήθως περιλαμβάνει έναν κεντρικό πίνακα ελέγχου (Main Switch Board – MSB) στον οποίο βρίσκονται οι πίνακες διανομής, οι πίνακες ελέγχου των ηλεκτρογεννητριών, πλήκτρα χειρισμού βοηθητικών μηχανών (όπως γερανοί, αντλίες και κομπρέσορες), πίνακες φωτισμού κ.α.



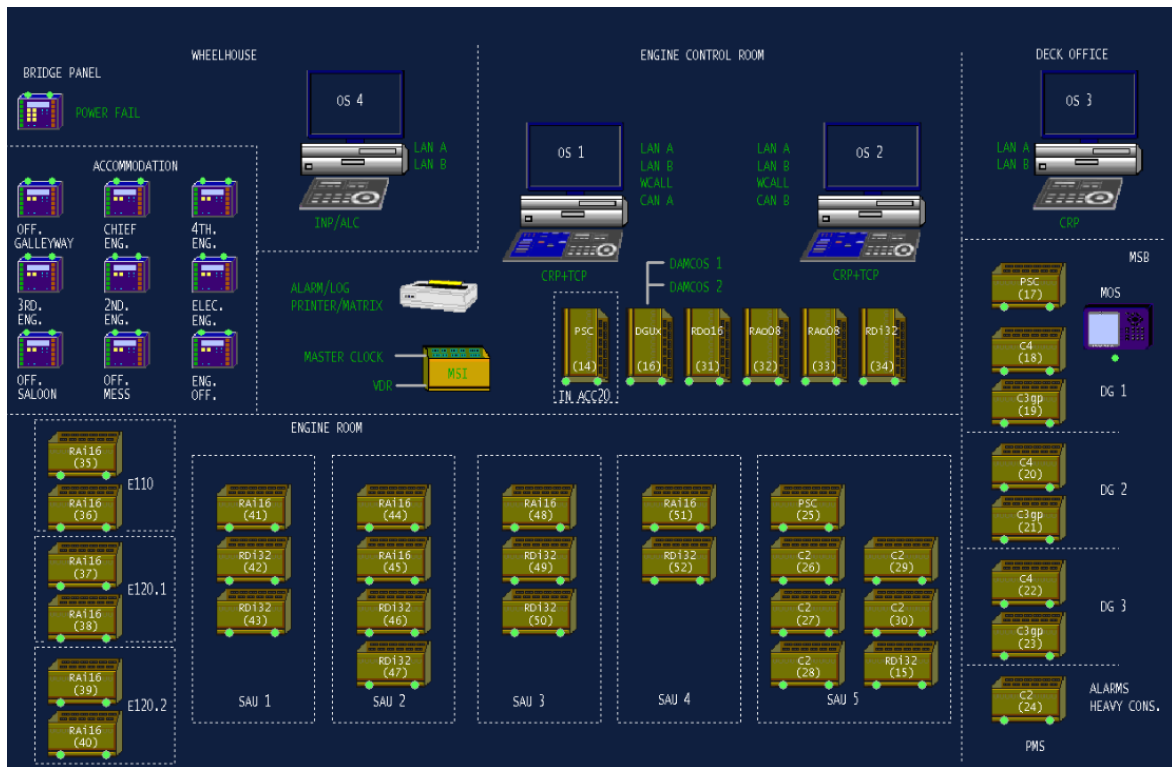
Σχήμα 4.1.1 Engine Control Room
(πηγή: <https://www.wingd.com>)

Το MSB ουσιαστικά αποτελεί δίκτυο διανομής ενέργειας προσφέροντας τη δυνατότητα ελέγχου της ροής ενέργειας από τις πηγές εισόδου (ηλεκτρογεννήτριες) προς τους καταναλωτές ισχύος. Η διανομή ισχύος πραγματοποιείται μέσω διακοπών ασφαλείας (circuit breakers) και αυτοματισμών προστασίας του τροφοδοτούμενου εξοπλισμού από υπερφόρτωση, βραχυκυκλώματα και απότομες μεταβολές τροφοδοσίας αλλά και του κεντρικού πίνακα από επιστροφές ρευμάτων.

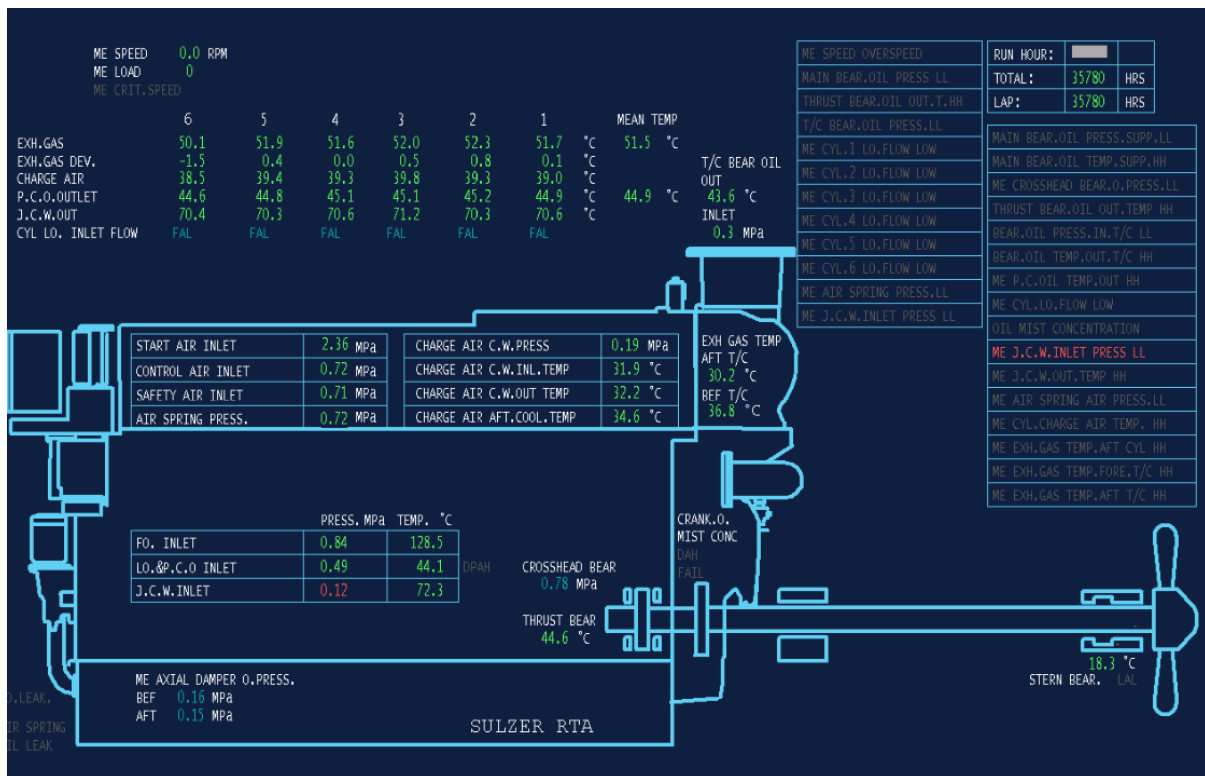


Σχήμα 4.1.2 Main Switchboard
(πηγή: <https://www.jrcs.co.jp>)

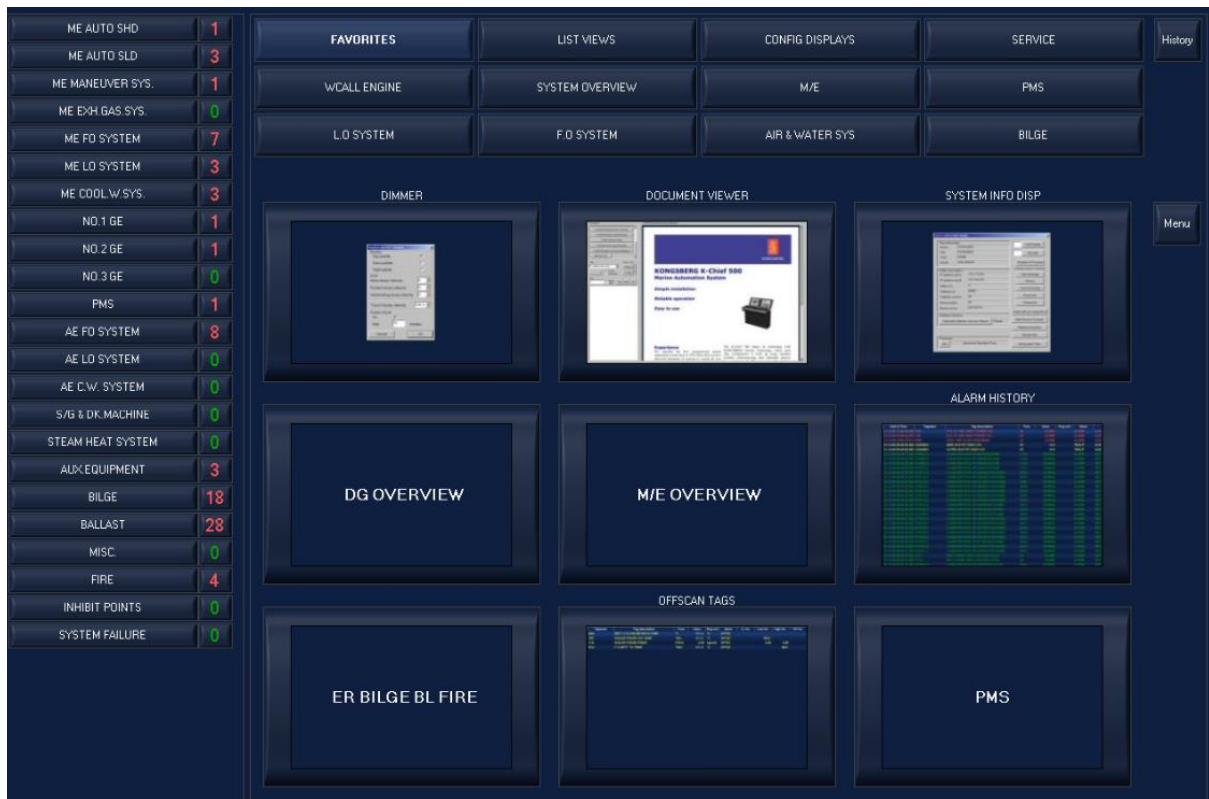
Στο ECR βρίσκεται, ακόμα, πληθώρα οργάνων μέτρησης τάσης, ρεύματος, συχνότητας, θερμοκρασίας, πίεσης κ.α για κάθε επιμέρους εξοπλισμό του μηχανοστασίου προσφέροντας τη δυνατότητα σφαιρικής εποπτείας. Στις πιο σύγχρονες εγκαταστάσεις συναντώνται και ψηφιακά συστήματα απεικόνισης σφαλμάτων (Alarm Monitoring System - AMS) τα οποία λαμβάνουν δεδομένα από αισθητήρες, κεντρικές μονάδες αυτοματισμού με μικροελεγκτή του περιφερειακού εξοπλισμού και PLC απεικονίζοντάς τα συγκεντρωτικά σε ένα ενιαίο υπολογιστικό σύστημα. Για λόγους ασφαλείας το AMS αποτελείται από δύο αυτόνομους υπολογιστές ώστε σε περίπτωση βλάβης του ενός να λειτουργεί εφεδρικά ο δεύτερος. Ορισμένα AMS διαθέτουν και γραφική απεικόνιση της επικοινωνίας μεταξύ των επιμέρους μονάδων (**σχήμα 4.1.3**), απεικονίσεις επιμέρους μετρήσεων σε κάθε μηχανικό σύστημα χωριστά (**σχήμα 4.1.4**) αλλά και συγκεντρωτικές λίστες με την αναλυτική περιγραφή λειτουργίας και την τρέχουσα κατάσταση κάθε επιμέρους σήματος μέτρησης (**σχήμα 4.1.5**).



Σχήμα 4.1.3 Kongsberg Alarm Monitoring System – System Overview
(πηγή: <https://www.kongsberg.com>)



Σχήμα 4.1.4 Kongsberg Alarm Monitoring System – ME Overview
(πηγή: <https://www.kongsberg.com>)



Σχήμα 4.1.5 Kongsberg Alarm Monitoring System – Alarm List
 (πηγή: <https://www.kongsberg.com>)

4.2 Ηλεκτρικό δίκτυο

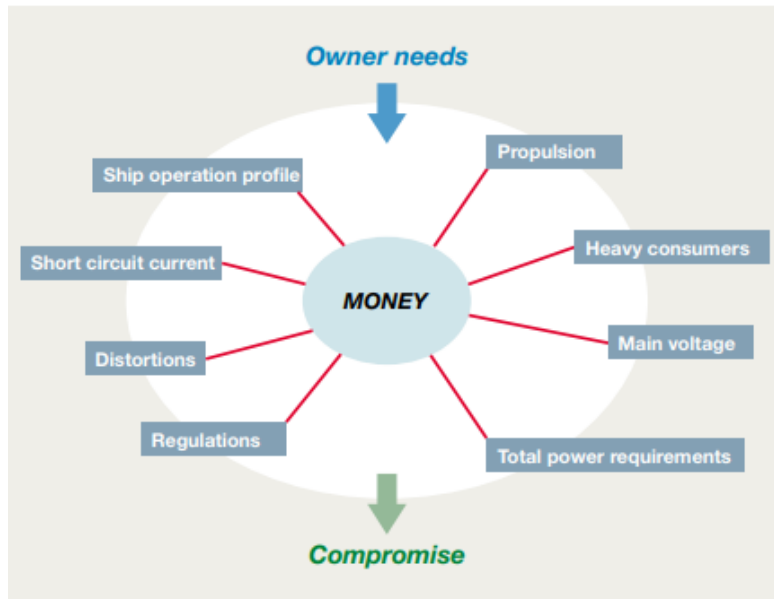
Όπως είναι γνωστό, στα πλοία υπάρχει ειτεταμένη αξιοποίηση όλων των ηλεκτρικών μηχανών. Οι γεννήτριες χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η πιο συνηθισμένη αξιοποίηση είναι σε ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη H/ Z, αλλά όχι σπάνια και η παραγωγή με εξαρτημένες γεννήτριες που κινούνται από την κύρια μηχανή του πλοίου, τις λεγόμενες «γεννήτριες άξονα». Κατά κανόνα οι γεννήτριες των H/ Z, αλλά και οι γεννήτριες άξονα είναι σύγχρονες. Ωστόσο, υφίστανται και δελεαστικές οικονομικά λύσεις με ασύγχρονες γεννήτριες άξονα. Σημειώνεται ότι σε ένα πλοίο εγκαθίστανται περιορισμένος αριθμός γεννητριών (δύο έως πέντε). Οι κινητήρες χρησιμοποιούνται όπου υπάρχει ανάγκη για κίνηση. Έτσι, αξιοποιούνται σε πάρα πολλά βοηθητικά μηχανήματα (αντλίες, συμπιεστές, εργάτες, ανεμιστήρες, βίντζια, ανυψωτικά μηχανήματα κ.ο.κ.). Ωστόσο, είναι δυνατή η αξιοποίηση για πρόωση του πλοίου, δηλαδή η κύρια προωστήρια μηχανή να είναι κάποιος ηλεκτρικός κινητήρας πολύ μεγάλης ισχύος. Εξάλλου, πολύ συχνά ηλεκτρικοί κινητήρες μεγάλης ισχύος στρέφουν και πλευρικούς προωστήριους μηχανισμούς που βοηθούν στην αυξημένη ικανότητα ελιγμών του πλοίου. Οι κινητήρες κατά κανόνα είναι ασύγχρονες μηχανές, καθώς, εν γένει είναι μικρότερων διαστάσεων, μειωμένων αναγκών συντήρησης και χαμηλότερου κόστους. Στις περιπτώσεις ηλεκτρικής πρόωσης, εμφανίζονται και εφαρμογές σύγχρονων κινητήρων, όπως και άλλων πιο ειδικού τύπου μηχανών με σκοπό την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης (αναφορικά σε μεγάλη προωστήρια ισχύ σε συνδυασμό με μικρό όγκο και βάρος) [3].

4.2.1 Διαστάσεις ηλεκτρικού δικτύου

Βασικό κριτήριο για τη διαστασιολόγηση και τη δομή του ηλεκτρικού δικτύου αποτελεί ο τύπος του πλοίου. Επιπλέον καθοριστικό ρόλο παίζουν το μέγεθος, η ισχύς της κύριας μηχανής και ο σκοπός χρήσης (από τον οποίο καθορίζονται και οι καταναλωτές ισχύος).

Βάσει των προαναφερθέντων παρουσιάζονται οι παρακάτω ηλεκτρικές ανάγκες ανάλογα με τον τύπο του πλοίου:

- Κοντέινερ (container ships), στα οποία οι μηχανισμοί χειρισμού του φορτίου καθορίζουν τις ηλεκτρικές απαιτήσεις.
- Δεξαμενόπλοια (tanker ships), όπου οι αντλίες του φορτίου και οι αεροσυμπιεστές (compressors) αποτελούν τα βασικά χαρακτηριστικά στον καθορισμό του δικτύου τα οποία εξαρτώνται από το μέγεθος των δεξαμενών και τον τύπο του φορτίου.
- Επιβατικά πλοία, στα οποία βασικοί καταναλωτές ισχύος είναι τα συστήματα ψύξης (air conditioning systems), ο εξοπλισμός της κουζίνας – μαγειρείου και οι εγκάρσιοι προωθητές (transverse thrusters) για την πλοήγηση του πλοίου κατά τις αφίξεις σε λιμάνια.
- Πλοία ηλεκτρικής πρόωσης, στα οποία ο μηχανισμός πρόωσης αποτελεί εφ' εαυτού του βασικό σχεδιαστικό κριτήριο του ηλεκτρικού δικτύου.



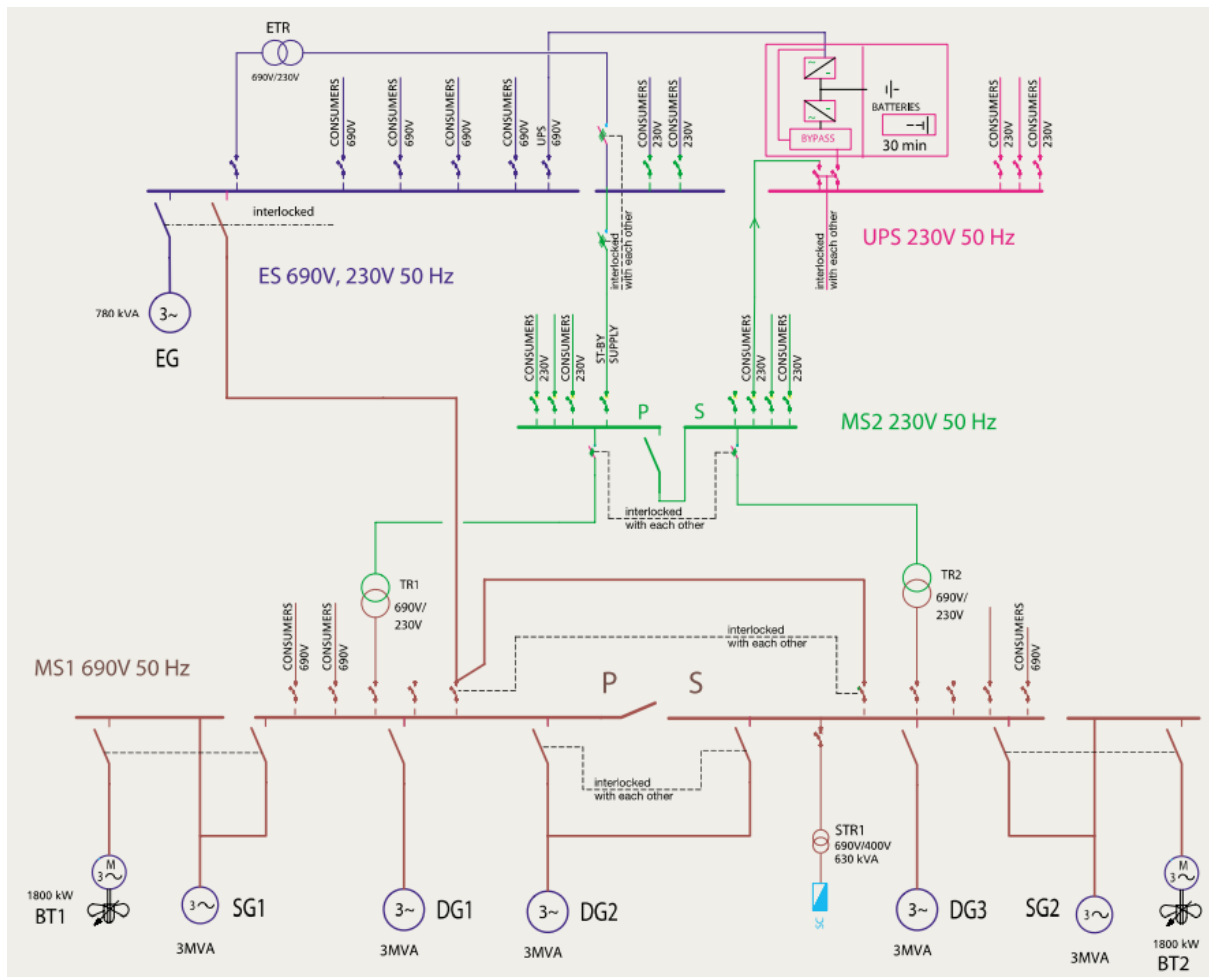
Σχήμα 4.2 Παράγοντες σχεδίασης ηλεκτρικού δικτύου πλοίου [8]

Ο σχεδιασμός του ηλεκτρικού δικτύου ενός πλοίου γίνεται βάσει προιαθορισμένων προτύπων τα οποία διαμορφώνονται βάσει των απαιτήσεων της κλάσης, της σημαίας και διεθνών κανονισμών περί ασφάλειας πληρωμάτων.

4.2.2 Βοηθητικό δίκτυο τροφοδοσίας (Auxiliary network)

Κατά κανόνα η τροφοδότηση του δικτύου στα πλοία πραγματοποιείται από αυτόνομες βοηθητικές ηλεκτρογεννήτριες οι οποίες και καλούνται βοηθητικές μηχανές (auxiliary engines). Το βοηθητικό δίκτυο τροφοδοσίας περιλαμβάνει από δύο έως πέντε σύγχρονες ηλεκτρογεννήτριες με μία ή δύο από αυτές να τροφοδοτούν το δίκτυο εκ' περιτροπής. Σε συνθήκες αυξημένων ενεργειακών αναγκών (π.χ. φόρτωση – εκφόρτωση) ο αριθμός των παραλληλισμένων ηλεκτρογεννητριών αυξάνεται.

Ως κινητήριες μηχανές για την παροχή της μηχανικής ενέργειας των βοηθητικών μηχανών χρησιμοποιούνται diesel μηχανές. Η μηχανές, αυτές, συστεγάζονται με τις ηλεκτρογεννήτριες και ο πίνακας χειρισμού τους, συνήθως, είναι κοινός τόσο στο χώρο της μηχανής (engine side) όσο και στον πίνακα ελέγχου (main switchboard).



Σχήμα 4.2 Δίκτυο χαμηλής τάσης βοηθητικού σταθμού ισχύος πλοίου [8]

Οι ρυθμιστές στροφών (governor speed controllers) που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στα πλοία είναι μηχανικοί/υδραυλικοί και σε σπάνιες περιπτώσεις ηλεκτρονικοί, οι οποίοι προτιμώνται σε πιο σύνθετες εφαρμογές. Ο έλεγχος της ταχύτητας στρέψης πραγματοποιείται είτε μέσω των στατισμών συχνότητας (speed droop), όπως περιγράφηκε αναλυτικά στην ενότητα 3.2.1, είτε μέσω ισοχρονισμού (zero droop).

Η μέθοδος ρύθμισης μέσω του στατισμού συχνότητας αποτελεί την επικρατέστερη λύση καταμερισμού φορτίων, ενδεικτικά για περιστροφική ταχύτητα 500 rpm που αντιστοιχεί σε συχνότητα 50Hz χωρίς φορτίο με στατισμό συχνότητας 4% η ταχύτητα μειώνεται κατά 20% για μεταβολή φορτίου από 0% σε 100% (The ship's electrical network, engine control and automation by Kari Valkeejärvi, Marine Technology, Wärtsilä Corporation).

Η μέθοδος ισοχρονισμού επιμερισμού φορτίων προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια διατηρώντας τη συχνότητα λειτουργίας σταθερή. Η μέθοδος αυτή μπορεί να επιτευχθεί μόνο με χρήση ηλεκτρονικού governor συμβατό με την ηλεκτρογεννήτρια. Οι ηλεκτρονικοί governor περιέχουν αυτόνομη μονάδα επεξεργασίας και επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω τοπικού δικτύου λαμβάνοντας ακριβή δεδομένα από κάθε γεννήτρια χωριστά. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αυτόματα ο παραλληλισμός χωρίς την ύπαρξη άλλης μονάδας (π.χ. Power Management System).

4.2.3 Συμπληρωματικό δίκτυο

Το ηλεκτρικό δίκτυο, πέραν των ηλεκτρογεννητριών τροφοδοσίας είναι απαραίτητο να περιλαμβάνει και γεννήτρια εκτάκτου ανάγκης (emergency generator - EG) η οποία πρέπει να βρίσκεται εν' αναμονή (stand by) ώστε σε περίπτωση διακοπής τροφοδοσίας ή οποιουδήποτε προβλήματος προκύψει από την κύρια παροχή να βρίσκεται σε θέση να τροφοδοτήσει αυτόματα τους απαραίτητους –για τη λειτουργία του πλοίου- καταναλωτές (συστήματα πλοήγησης, φωτισμός κ.α).

Η EG, συνήθως, είναι αυτόνομη και ανεξάρτητη από τα συστήματα του μηχανοστασίου με δικό της πίνακα χειρισμού, ανεξάρτητη παροχή καυσίμου και σύστημα λίπανσης και ψύξης και στεγάζεται σε εύκολα προσβάσιμο σημείο του πλοίου. Οι καταναλωτές που τροφοδοτεί το δίκτυο της περιλαμβάνουν τα φώτα ανάγκης και πλοήγησης, τα συστήματα πλοήγησης και επικοινωνίας, τις αντλίες φωτιάς και πυρόσβεσης και τους αυτοματισμούς στρέψης της προπέλας (steering gear). Οι προαναφερθέντες καταναλωτές βρίσκονται συνδεδεμένοι στον «εκτάκτου ανάγκης πίνακα διανομής» (emergency switchboard) από τον οποίο εκκινεί αυτόματα η EG τροφοδοτώντας τον απαραίτητο εξοπλισμό σε διάστημα μικρότερο των 45 δευτερολέπτων.

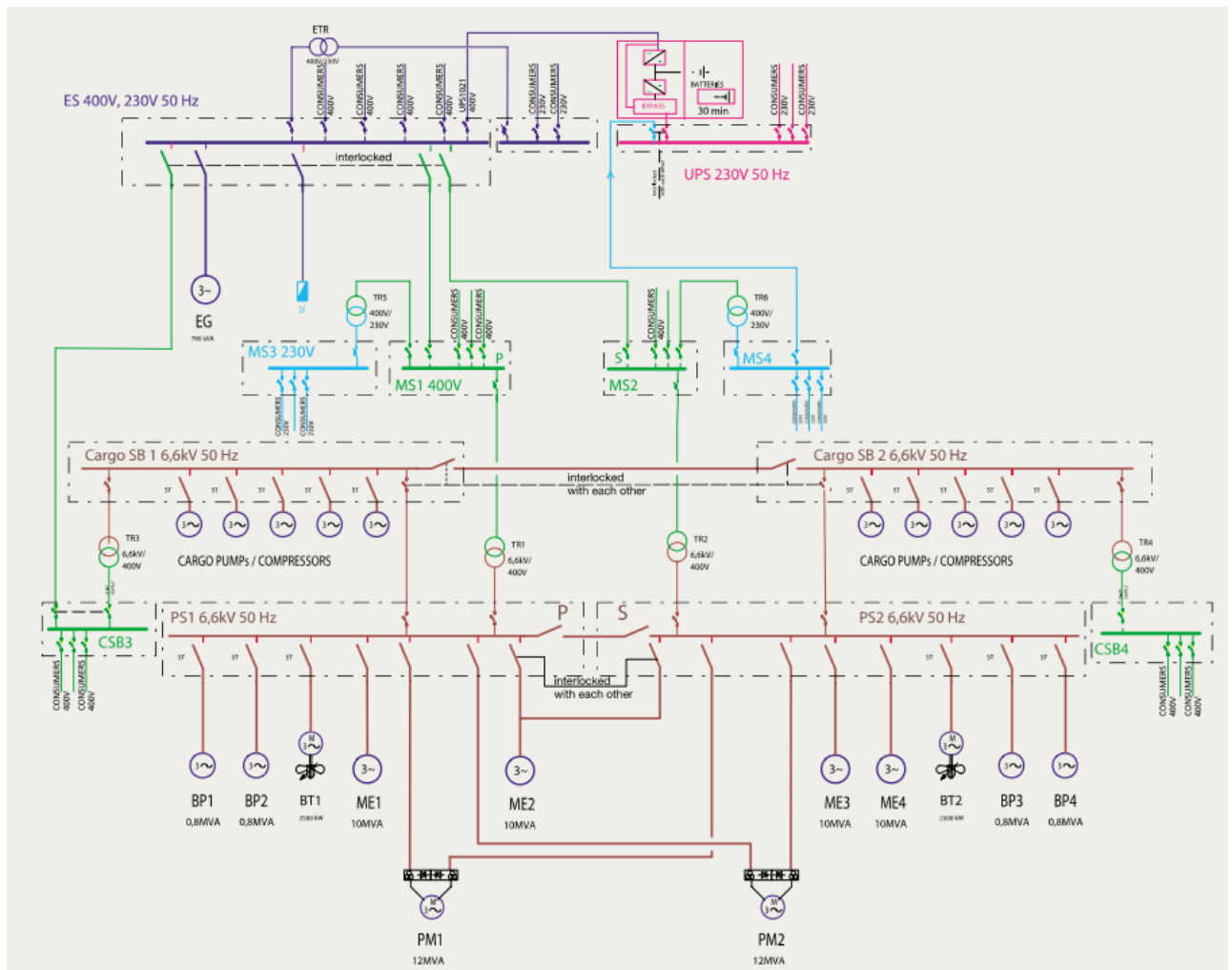
Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις το δίκτυο περιλαμβάνει και αυτόνομες μονάδες UPS (Uninterruptible Power Supply) ή μπαταρίες για την εξασφάλιση αυτόνομης ηλεκτροδότησης επιλεγμένων εξοπλισμών για διάστημα έως και μισής ώρας. Οι πηγές αυτές συνήθως χρησιμοποιούνται για λόγους προστασίας ηλεκτρονικών υπολογιστών ή μονάδων οι οποίες μπορούν να καταστραφούν από τις απότομες διακοπές της τροφοδοσίας.

Πέραν των βοηθητικών γεννητριών (Auxiliary Generators) το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου περιλαμβάνει και εξαρτημένες γεννήτριες άξονα (Shaft Generators – SG) οι οποίες οδηγούνται από τον άξονα της κύριας μηχανής. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι μηχανές αυτές χρησιμοποιούνται μόνο για την οδήγηση πλευριών προωστήριων μηχανισμών κατά την πλοήγηση όσο οι γεννήτριες του πλοίου αξιοποιούνται στην τροφοδότηση του ηλεκτρικού δικτύου. Για λόγους προστασίας του δικτύου και αποφυγή υπερφόρτωσης απαιτούνται οι κάτωθι διασυνδέσεις:

- Όταν ο ACB του δικτύου είναι κλειστός ο ACB της SG είναι απαραίτητως ανοιχτός.
- Όταν ο ACB της SG είναι κλειστός, ο ACB του δικτύου είναι απαραίτητως ανοιχτός.
- Όταν ο ACB των προωστήριων μηχανών είναι κλειστός, ο ACB της SG είναι απαραίτητως ανοιχτός.
- Κατά το συγχρονισμό της SG με τις υπόλοιπες ηλεκτρογεννήτριες ο ACB σπλίζει με μικρή χρονική καθυστέρηση.

Επίσης είναι ιδιαίτερος σημαντικό κατά τη λειτουργία της SG η ταχύτητα του πλοίου άρα και οι στροφές της κύριας μηχανής να είναι προκαθορισμένες ώστε η συχνότητα της SG να διατηρείται σταθερή.

Για τον λόγο αυτό η χρήση SG συνήθίζεται σε μηχανές που περιέχουν σύστημα ελεγχόμενης βηματικής πρόωσης (Controllable Pitch Propeller - CPP), το οποίο ενεργοποιείται μέσω συμπλέκτη (clutch) και καθορίζει την ταχύτητα πρόωσης από τις κλίσεις των πτερυγίων της προπέλας, διατηρώντας τις στροφές της μηχανής σταθερές.



Σχήμα 4.3 Δίκτυο μέσης τάσης βοηθητικού σταθμού ισχύος σε LNG [8]

4.2.4 Power Management System (PMS)

Βασικός σκοπός ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας (Power Management System – PMS) είναι ο έλεγχος των ηλεκτρογεννητριών, ο αυτόματος παραλληλισμός, η εξασφάλιση διαθέσιμης ενέργειας όταν αλλάζουν οι ενεργειακές απαιτήσεις και η προστασία από διακοπές τροφοδοσίας (black outs). Το PMS αποτελεί αυτόνομη ή ενσωματωμένη μονάδα αυτοματισμού με δυνατότητα λειτουργίας αυτόματη (auto mode), υποβοηθούμενη (remote control) και χειροκίνητη (local control).

Οι κύριες λειτουργίες που επιτελεί το PMS είναι:

- Έναρξη – διακοπή γεννητριών
- Συστήματα προστασίας γεννητριών
- Αυτόματος συγχρονισμός
- Αυτόματη εκκίνηση stand by γεννήτριας
- Αυτόματος ισοκαταμερισμός φορτίων (σε περίπτωση droop control)
- Έλεγχος αύξησης του φορτίου
- Παρακολούθηση διακοπών τροφοδοσίας (blackout monitoring)
- Επιτήρηση «απαιτητικών» καταναλωτών
- Αυτόματη διακοπή φορτίων
- Έλεγχος και διατήρηση συχνότητας λειτουργίας
- Διαφορετικά προγράμματα λειτουργίας - ελέγχου
- Έλεγχος και μεταφορά φορτίου στην Shaft Generator

(πηγή: The ship's electrical network, engine control and automation by Kari Valkeejärvi, Marine Technology, Wärtsilä Corporation)

Έναρξη – διακοπή γεννητριών

Ο έλεγχος των γεννητριών μπορεί να επιτευχθεί αυτόματα ή χειροκίνητα. Σε περίπτωση αυτόματου ελέγχου από το PMS (στο οποίο απαιτείται η γεννήτρια να είναι σε stand by mode) επιτελούνται οι εξής λειτουργίες

- Ειδοποίηση εκκίνησης
- Έναρξη ελέγχου εξάρτησης φορτίου
- Ειδοποίηση διακοπής τροφοδοσίας
- Επιλογή ελέγχου τρόπου εκκίνησης
- Ειδοποίηση σφάλματος διακοπής
- Διακοπή λειτουργίας μηχανής
- Διακοπή ελέγχου εξάρτησης φορτίου

Αυτόματος συγχρονισμός

Ο αυτόματος συγχρονισμός επιτυγχάνεται μέσω επιμέρους μονάδων ανάγνωσης και ελέγχου της τάσης, της συχνότητας και της φάσης κάθε ηλεκτρογεννήτριας. Το PMS ρυθμίζει την τάση και τη συχνότητα μέσω του governor και του AVR και οπλίζει

αυτόματα τον ACB όταν η εν' παραλληλισμό γεννήτρια βρίσκεται σε φάση με το δίκτυο.

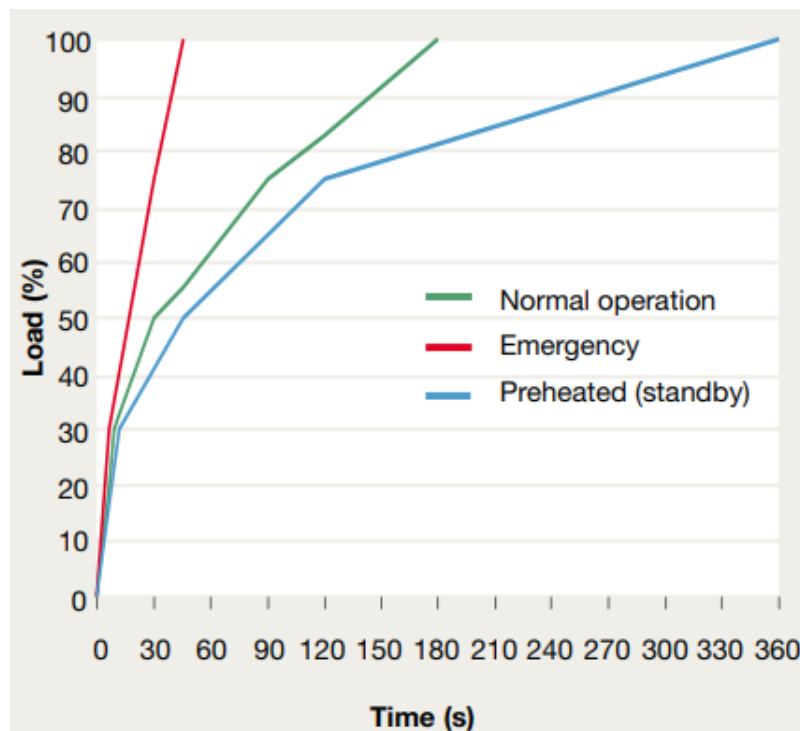
Έλεγχος εξάρτησης φορτίου

Το PMS διαβάζει την κατανάλωση κάθε ηλεκτρογεννήτριας και το συγκρίνει με τα όρια κατανάλωσης (τα όποια καθορίζονται συνήθως από το χειριστή) και αναλόγως προσθέτει ή αφαιρεί γεννήτριες από το δίκτυο. Βασικός γνώμονας είναι η εξασφάλιση αποδοτικότητας και οικονομίας καυσίμου.

Για την αυτόματη εκκίνηση της ηλεκτρογεννήτριας πρέπει η διαθέσιμη ισχύς να είναι μικρότερη του προκαθορισμένου ορίου (start limit) και η μέση κατανάλωση φορτίου και το μέσο ρεύμα των εν λειτουργία γεννητριών στο δίκτυο να ξεπερνά ένα καθορισμένο ποσοστό για συγκεκριμένη διάρκεια χρόνου. Ομοίως, για την αυτόματη διακοπή μιας εν λειτουργία ηλεκτρογεννήτριας συνδεδεμένης στο δίκτυο πρέπει η διαθέσιμη ισχύς να είναι μεγαλύτερη του προκαθορισμένου ορίου (stop limit) και η μέση κατανάλωση φορτίου των εν λειτουργία γεννητριών στο δίκτυο να διατηρείται σε μικρότερο από ένα καθορισμένο ποσοστό για συγκεκριμένη διάρκεια χρόνου.

Έλεγχος αύξησης φορτίου

Κατά την ομαλή εκκίνηση μια γεννήτριας η αύξηση του φορτίου πρέπει να διατηρείται κάτω από ένα όριο, το οποίο δίνεται από τον κατασκευαστή (σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4 Μέγιστο ποσοστό φόρτωσης κατά την εκκίνηση [8]

Το PMS κατά την εκκίνηση ακολουθεί προκαθορισμένη χρονική καμπύλη ρύθμισης του speed droop η οποία ακολουθεί τις χαρακτηριστικές του **σχήματος 4.4**. Σε περίπτωση απότομης αύξησης των φορτίων εκκίνησης η γεννήτρια οδηγείται σε υπερφόρτωση (overcurrent) και το PMS εμφανίζει μήνυμα σφάλματος. Σε ηλεκτρονικά governor που ακολουθούν τη μέθοδο του ισοχρονισμού δεν εμφανίζεται αυτό το πρόβλημα καθώς η εκκίνηση της γεννήτριας δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές των φορτίων του δικτύου μέχρις ότου η γεννήτρια ολοκληρώσει τη διαδικασία φόρτωσης.

Παρακολούθηση διακοπών τροφοδοσίας (blackout monitoring)

Όλες οι διαθέσιμες γεννήτριες εκκινούν και συνδέονται αυτόματα στο δίκτυο όταν για κάποιο λόγο πραγματοποιηθεί black out. Η πρώτη γεννήτρια που «θα μπει» στο δίκτυο θα συνδεθεί άμεσα χωρίς συγχρονισμό ενώ όλες οι επόμενες θα συγχρονιστούν μία προς μία και θα καταναλωθούν αυτόματα τα φορτία τους.

Επιτήρηση «απαιτητικών» καταναλωτών

Το PMS ελέγχει τα προς τροφοδότηση φορτία και σε περίπτωση «απαιτητικού» καταναλωτή για τον οποίο δεν επαρκεί η διαθέσιμη ισχύς των εν' λειτουργία ηλεκτρογεννητριών εκκινεί αυτόματα μία εκ' των stand by ηλεκτρογεννητριών και δεν επιτρέπει τη διασύνδεσή του στο δίκτυο μέχρις ότου υπάρχει η επαρκής διαθέσιμη ισχύς.

Αυτόματη διακοπή φορτίων

Σε περίπτωση παρατεταμένης υπερφόρτωσης το PMS «πετάει» εκτός δικτύου καταναλωτές μη-ζωτικής σημασίας για το πλοίο όπως (AC compressors, αντλίες, εξαερισμός εστιατορίου κ.α).

Διαφορετικά προγράμματα λειτουργίας - ελέγχου

Το PMS παρέχει δυνατότητα επιλογής τρόπου ελέγχου και διαχείρισης για την εξασφάλιση της βέλτιστης λειτουργίας του δικτύου. Ενδεικτικά, οι διαθέσιμες επιλογές είναι:

- Harbour mode: κατά την οποία η ενεργειακές απαιτήσεις είναι χαμηλές.
- Manoeuvring mode: κατά την οποία σε περίπτωση παράλληλης λειτουργίας γεννητριών η αυτόματη διακοπή λόγω χαμηλών φορτίων είναι ανεπιθύμητη και μπλοκάρεται από το PMS.
- Sea mode: κατά την οποία οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι υψηλές και χρησιμοποιούνται όλοι οι αυτοματισμοί ελέγχου του PMS.

Έλεγχος και μεταφορά φορτίου στην Shaft Generator

Κατά τη μεταφορά φορτίου στην SG το PMS εξασφαλίζει τη συμφωνία συχνότητας και συμφωνία τάσης, πραγματοποιεί τη διαδικασία συγχρονισμού, ισοκατανέμει τα φορτία και οπλίζει τον ACB.

Κεφάλαιο 5: Πρόγραμμα εξομοίωσης

5.1 Εργαλεία ανάπτυξης λογισμικού

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται τα εργαλεία και οι μέθοδοι που αξιοποιήθηκαν για τη σχεδίαση του εκπαιδευτικού προγράμματος εξομοίωσης **Marine Electronic Circuit Simulator**.

Σκοπός του προγράμματος είναι η πρακτική εμπέδωση των θεωρητικών εννοιών που περιγράφονται στα προηγούμενα κεφάλαια και ιδίως ο τρόπος με τον οποίο αξιοποιούνται στο χώρο της ναυτιλίας τις τελευταίες δεκαετίες. Το εργαλείο αυτό θα μπορούσε να βρει εφαρμογή τόσο στην εκπαίδευση φοιτητών (ναυπηγών, μηχανολόγων, ηλεκτρολόγων) όσο και πληρωμάτων πλοίων του εμπορικού στόλου καθώς προσφέρονται εργαλεία σχεδίασης τόσο απλών διατάξεων όσο και πρακτικής εξομοίωσης σε –κατά το δυνατόν– πραγματικές συνθήκες.

Η βασική δομή περιλαμβάνει απλά σχεδιαστικά εργαλεία κυκλωμάτων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος αλλά και βασικών τριφασικών διατάξεων με ηλεκτρογεννήτριες ρυθμιζόμενης τάσης και ισχύος. Ωστόσο, το βασικότερο τμήμα του προγράμματος αφορά στο φαινόμενο του παραλληλισμού σύγχρονων ηλεκτρογεννητριών με εστίαση στο χειρισμό των αυτοματισμών λειτουργίας και προστασίας που βρίσκονται στο main switchboard. Η γραφική απεικόνιση είναι εμπνευσμένη από πραγματική εικόνα μηχανοστασίου και διατίθενται όλες οι βασικές μορφές χειρισμού (αυτόματη / χειροκίνητη), μπουτόν χειρισμού, ενδεικτικά όργανα, επιλεκτικοί διακόπτες και ενδεικτικά σφάλματος. Για λόγους απλότητας έχουν παραληφθεί οι μηχανικοί παράγοντες λειτουργίας για τους οποίους θεωρούμε δεδομένη την ορθή λειτουργία. Εκτός από τα ενδεικτικά σφάλματος που απεικονίζονται στο γραφικό περιβάλλον σε περίπτωση λανθασμένου χειρισμού εμφανίζονται αναδυόμενα παράθυρα με αναλυτική περιγραφή του σφάλματος.

5.1.1 Γλώσσα προγραμματισμού

Το ολοκληρωμένο γραφικό περιβάλλον αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού python και συγκεκριμένα έκδοση python 3.7. Το μεγαλύτερο μέρος του κώδικα γράφτηκε σε Visual Studio Code 2017 και αποτελεί δομημένο αντικειμενοστραφή κώδικα.

Η python αποτελεί γενικού σκοπού interpreted γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου. Αποτελεί αντικειμενοστραφή γλώσσα και προσφέρεται για ανάπτυξη γραφικού περιβάλλοντος καθώς διαθέτει εύχρηστα σχεδιαστικά εργαλεία.

Βασικά πλεονεκτήματα της python αποτελούν:

- Πλήθος βιβλιοθηκών με τυποποιημένα εργαλεία.
- Δυνατότητα δημιουργίας ολοκληρωμένου περιβάλλοντος χωρίς (άμεση) χρήση άλλης γλώσσας προγραμματισμού.
- Υψηλή δημοτικότητα, η οποία οδηγεί σε πλήθος πληροφοριών αναρτημένων στο διαδίκτυο και άμεσης αναζήτησης σφαλμάτων - αστοχιών.

5.1.2 Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος

Το γραφικό περιβάλλον αναπτύχθηκε με χρήση της βιβλιοθήκης Tkinter η οποία αποτελεί ενσωματωμένο εργαλείο της python. Η Tkinter περιλαμβάνει ολοκληρωμένα εργαλεία ανάπτυξης γραφικού περιβάλλοντος και διεπαφής χρησιμοποιώντας των διεργημένα TCL ο οποίος βρίσκεται ενσωματωμένος στον διεργημένα της python.

Η Tkinter περιλαμβάνει εργαλεία σχεδίασης για frame, widget, button, label και πλήθος άλλων τυποποιημένων αντικειμένων βασιζόμενων σε parent-child related δομή.

Για τη δημιουργία της απεικόνισης του γραφικού περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται εικόνες png οι οποίες σχεδιάστηκαν και προσαρμόστηκαν με χρήση του εργαλείου Photoshop της Adobe και του open source σχεδιαστικού προγράμματος Inkscape.

5.1.3 Οργάνωση κώδικα

Το πρόγραμμα αποτελείται από 7 επί μέρους αυτοτελή υποπρογράμματα καθένα εκ των οποίων επιτελεί διαφορετικές λειτουργίες.

- simulator.py
- setup.py
- dc_power.py
- messages.py
- rlc_circuits.py
- three_phase.py
- synchro.py

Το simulator.py αποτελεί την κύρια συνάρτηση του προγράμματος. Δημιουργεί το γραφικό περιβάλλον, το κεντρικό μενού, αρχικοποιεί την επιφάνεια διεπαφής και χειρίζεται τα υπόλοιπα υποπρογράμματα.

Το setup.py δημιουργήθηκε ως βοηθητικό εργαλείο για τη μετατροπή του προγράμματος σε εκτελέσιμη μορφή (.exe) χρησιμοποιώντας το εργαλείο cx_Freeze.

Το αρχείο `messages.py` περιλαμβάνει τις συναρτήσεις εκτύπωσης μηνυμάτων στην οθόνη του χρήστη καλούμενο από τα άλλα υποπρογράμματα. Οι συναρτήσεις δέχονται ως όρισμα τον τύπο του μηνύματος και το περιεχόμενο και όταν κληθούν δημιουργούν αναδυόμενο παράθυρο στο οποίο εμφανίζεται το ζητούμενο μήνυμα.

Τα υπόλοιπα υποπρογράμματα καλούνται από την κύρια συνάρτηση βάσει της επιλογής του χρήστη στο αρχικό μενού, από το οποίο παρέχεται η δυνατότητα επιλογής μεταξύ τεσσάρων διαφορετικών περιβάλλοντων εργασίας (work spaces) για τα οποία πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στην ενότητα 5.2.

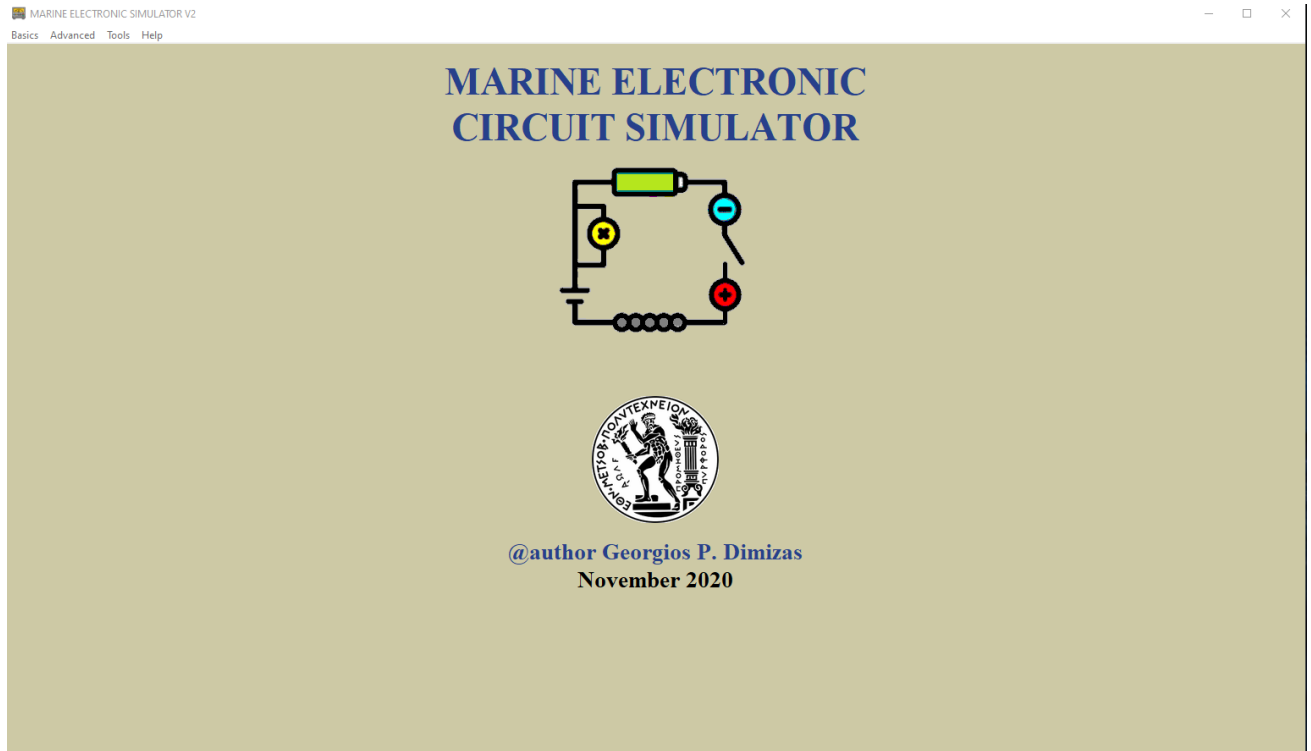
5.1.4 Βιβλιοθήκες

Στη συνέχεια παρατίθενται οι βιβλιοθήκες τις `python` που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του προγράμματος:

- **tkinter:** για τη σχεδίαση του γραφικού περιβάλλοντος
- **PIL:** για την επεξεργασία εικόνων (.png)
- **pandas:** για δημιουργία και ανάλυση δυναμικών δομών
- **numpy:** για δημιουργία και ανάλυση δυναμικών δομών
- **matplotlib:** για εκτύπωση διαγραμμάτων
- **math:** για υλοποίηση σύνθετων μαθηματικών εκφράσεων
- **cmath:** για υλοποίηση μαθηματικών εκφράσεων στο σύνολο των μιγαδικών.
- **sys:** για δυνατότητα επικοινωνίας του προγράμματος με το λειτουργικό
- **cx_Freeze:** για τη δημιουργία εκτελέσιμου κώδικα (.exe)

5.2 Γραφικό περιβάλλον

Κατά την εκκίνηση του προγράμματος εμφανίζεται το λογότυπο εκκίνησης και το αρχικό μενού (σχήμα 5.1) από το οποίο επιλέγει ο χρήστης work environment από τα πεδία Basics και Advanced.



Σχήμα 5.1 Αρχική σελίδα προγράμματος

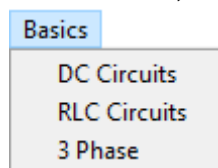
5.2.1 Κύριο Μενού - Main Menu

Κατά την εκκίνηση του προγράμματος στο κεντρικό μενού εμφανίζονται οι επιλογές

- Basics
- Advanced
- Tools
- Help.

Basics

Πατώντας το πεδίο Basics ανοίγει παράθυρο από το οποίο επιλέγεται το περιβάλλον εργασίας (workspace environment).



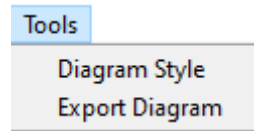
Αναλυτικές οδηγίες για κάθε περιβάλλον δίνονται στις επόμενες ενότητες.

Advanced

Πατώντας το πεδίο **Advanced** ανοίγει παράθυρο με μόνη επιλογή **Synchro** το οποίο αποτελεί το περιβάλλον παραλληλισμού των ηλεκτρογεννητριών

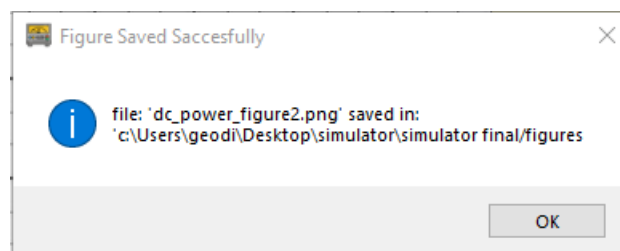
Tools

Στο πεδίο **tools** βρίσκονται εργαλεία επεξεργασίας και αποθήκευσης των διαγραμμάτων.



Από την επιλογή **Diagram Style** επιλέγεται ο τύπος και το χρώμα των διαγραμμάτων μέσα από μία λίστα προεπιλεγμένων στυλ.

Το εργαλείο **Export Diagram** παρέχει τη δυνατότητα άμεσης αποθήκευσης των διαγραμμάτων στον φάκελο **figures**, εντός του φακέλου που βρίσκεται το εκτελέσιμο. Κατά την ολοκλήρωση της αποθήκευσης εμφανίζεται μήνυμα που δίνει αναλυτικά το **path folder** στο οποίο αποθηκεύτηκαν τα διαγράμματα σε μορφή εικόνας.



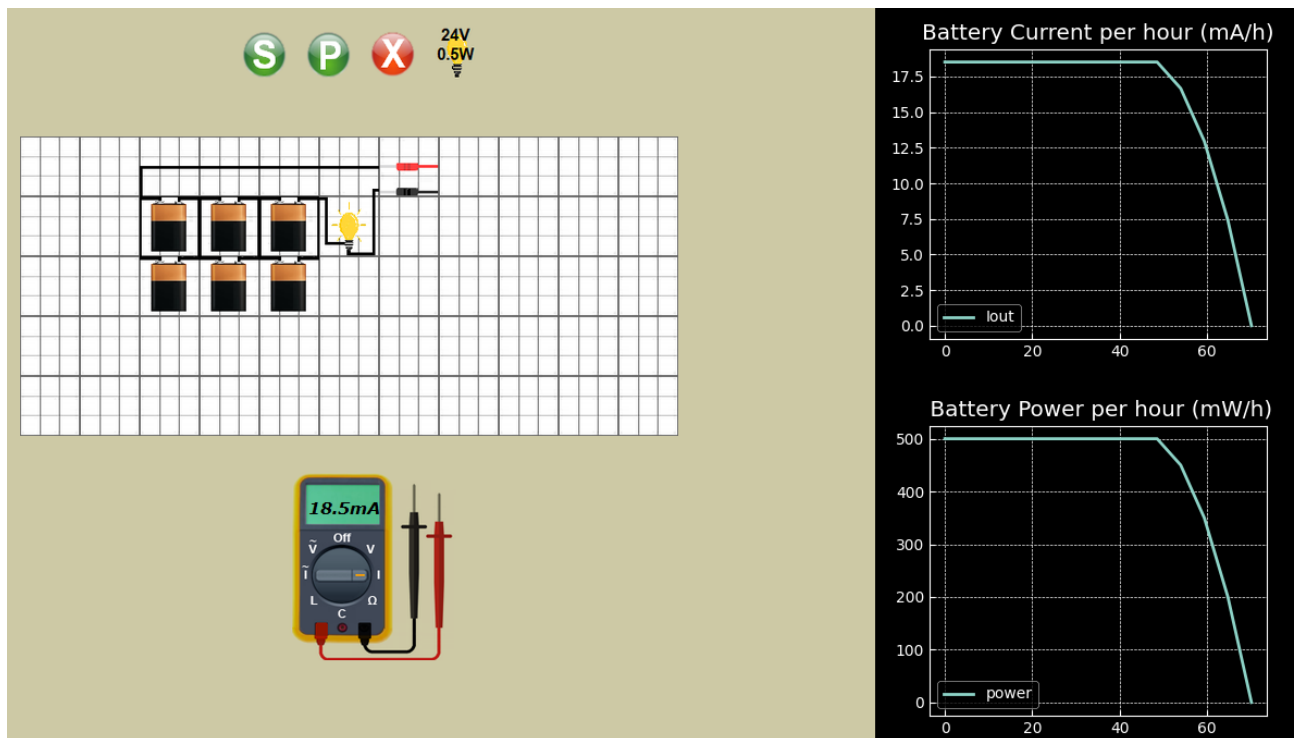
Το όνομα του αρχείου δίνεται αυτόματα βάσει του περιβάλλοντος από το οποίο εκτελέστηκε με δείκτη την σειρά αποθήκευσης. Να σημειωθεί ότι κατά την ολοκλήρωση της εκτέλεσης συνίσταται να μεταφερθούν οι εικόνες σε φάκελο της επιλογής του χρήστη καθώς σε μελλοντική χρήση του προγράμματος ο δείκτης αποθήκευσης μηδενίζεται με αποτέλεσμα οι εικόνες να επανεγγράφονται.

Help

Στο πεδίο **Help** βρίσκεται η επιλογή **User Manual** η οποία ανοίγει παράθυρο με αναλυτικές οδηγίες χρήσης διαφορετικές για κάθε υποπρόγραμμα.

5.2.2 Κυκλώματα ΣΡ - DC Circuits

Το περιβάλλον, αυτό, περιλαμβάνει βασικά εργαλεία σχεδίασης κυκλωμάτων συνεχούς ρεύματος με χρήση μπαταριών. Οι λειτουργικότητες που διαθέτει είναι πολύ βασικές καθώς σκοπός του είναι η εξοικείωση του χρήστη με το περιβάλλον εξομοίωσης.



Σχήμα 5.2 DC Circuits – workspace environment

Στο ανώτερο μέρος της οθόνης βρίσκονται τα πλήκτρα χειρισμού από τα οποία καθορίζει ο χρήστης τον αριθμό των στοιχείων (μπαταριών) που επιθυμεί να συνδέσει, τον τρόπο σύνδεσης (σειρά / παράλληλα) και το φορτίο εξόδου.

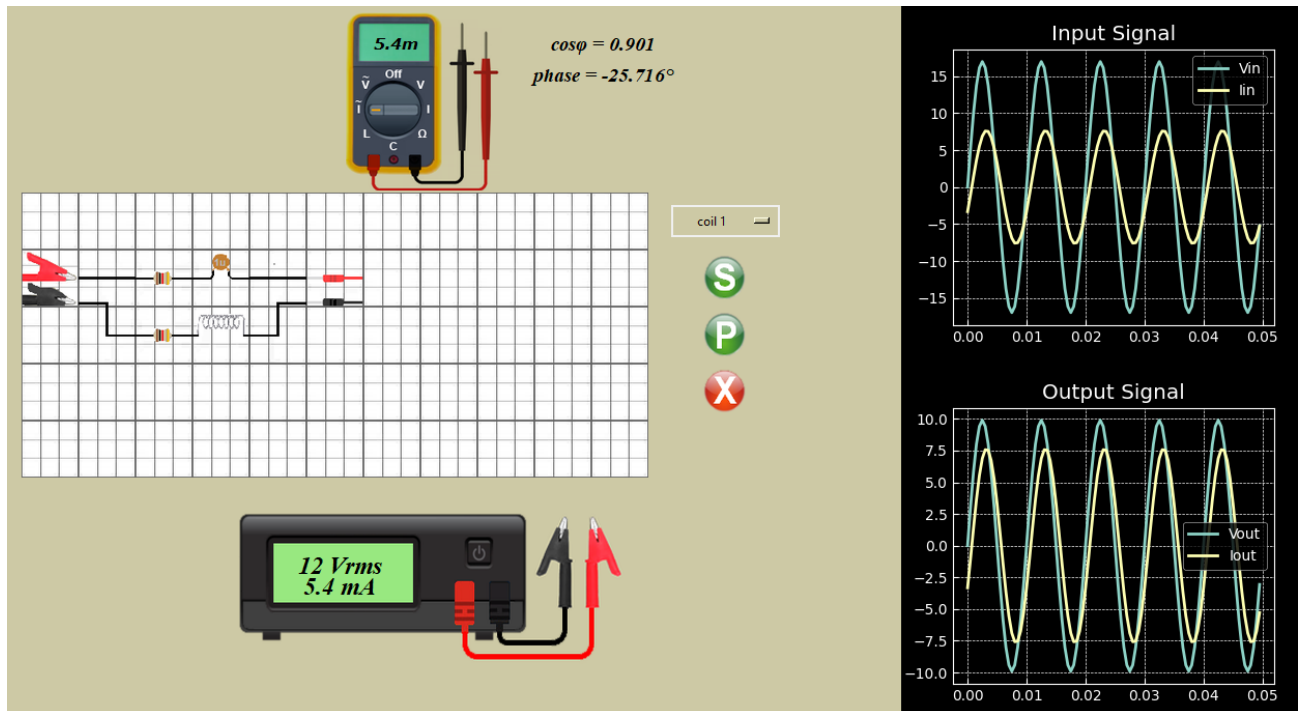
Ακριβώς από κάτω βρίσκεται το breadboard στο οποίο φαίνεται το κύκλωμα που σχεδιάζει ο χρήστης όπως επίσης και τα καλώδια του πολύμετρου συνδεδεμένα στο σημείο μέτρησης.

Στο κάτω μέρος της οθόνης βρίσκεται το πολύμετρο το οποίο περιλαμβάνει 8 διακριτές επιλογές μέτρησης. Κάνοντας κλικ σε καθεμία ο δείκτης στρέφεται μία θέση δεξιά αλλάζοντας τον τρόπο μέτρησης.

Τέλος, στο δεξί μέρος της οθόνης βρίσκονται τα διαγράμματα εξόδου του κυκλώματος στα οποία απεικονίζεται το ρεύμα και η ισχύς της μπαταρίας συναρτήσει του χρόνου βάσει της διάταξης που σχεδιάστηκε.

5.2.3 Γραμμικά κυκλώματα - RLC Circuits

Το περιβάλλον αυτό περιλαμβάνει βασικά εργαλεία για την προσομοίωση γραμμικών κυκλωμάτων τόσο συνεχούς όσο και εναλλασσόμενου ρεύματος.



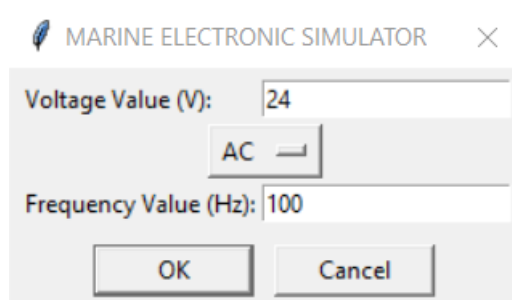
Σχήμα 5.3 RLC Circuits – workspace environment

Στο ανώτερο μέρος της οθόνης βρίσκεται το πολύμετρο το οποίο περιλαμβάνει 8 διακριτές επιλογές μέτρησης. Κάνοντας κλικ σε καθεμία ο δείκτης στρέφεται μία θέση δεξιά αλλάζοντας τον τρόπο μέτρησης. Τα probes συνδέονται αυτόματα στο breadboard (εφ' όσον υπάρχουν στοιχεία).

Ακριβώς από κάτω βρίσκεται το breadboard στο οποίο φαίνεται το κύκλωμα που σχεδιάζει ο χρήστης όπως επίσης και τα καλώδια του πολύμετρου και του τροφοδοτικού συνδεδεμένα στα σημεία εισόδου και εξόδου. Στο δεξιό μέρος του breadboard βρίσκονται τα πλήκτρα χειρισμού από τα οποία επιλέγεται ο τύπος (και η τιμή) του στοιχείου όπως επίσης και η θέση την οποία θέλουμε να προστεθεί (σε σειρά / παράλληλα).

Στο δεξί μέρος της οθόνης βρίσκονται τα διαγράμματα εξόδου του κυκλώματος στα οποία απεικονίζεται το ρεύμα και η τάση εισόδου και εξόδου. Τα διαγράμματα ενημερώνονται αυτόματα με κάθε αλλαγή που πραγματοποιείται στο κύκλωμα προσομοίωσης.

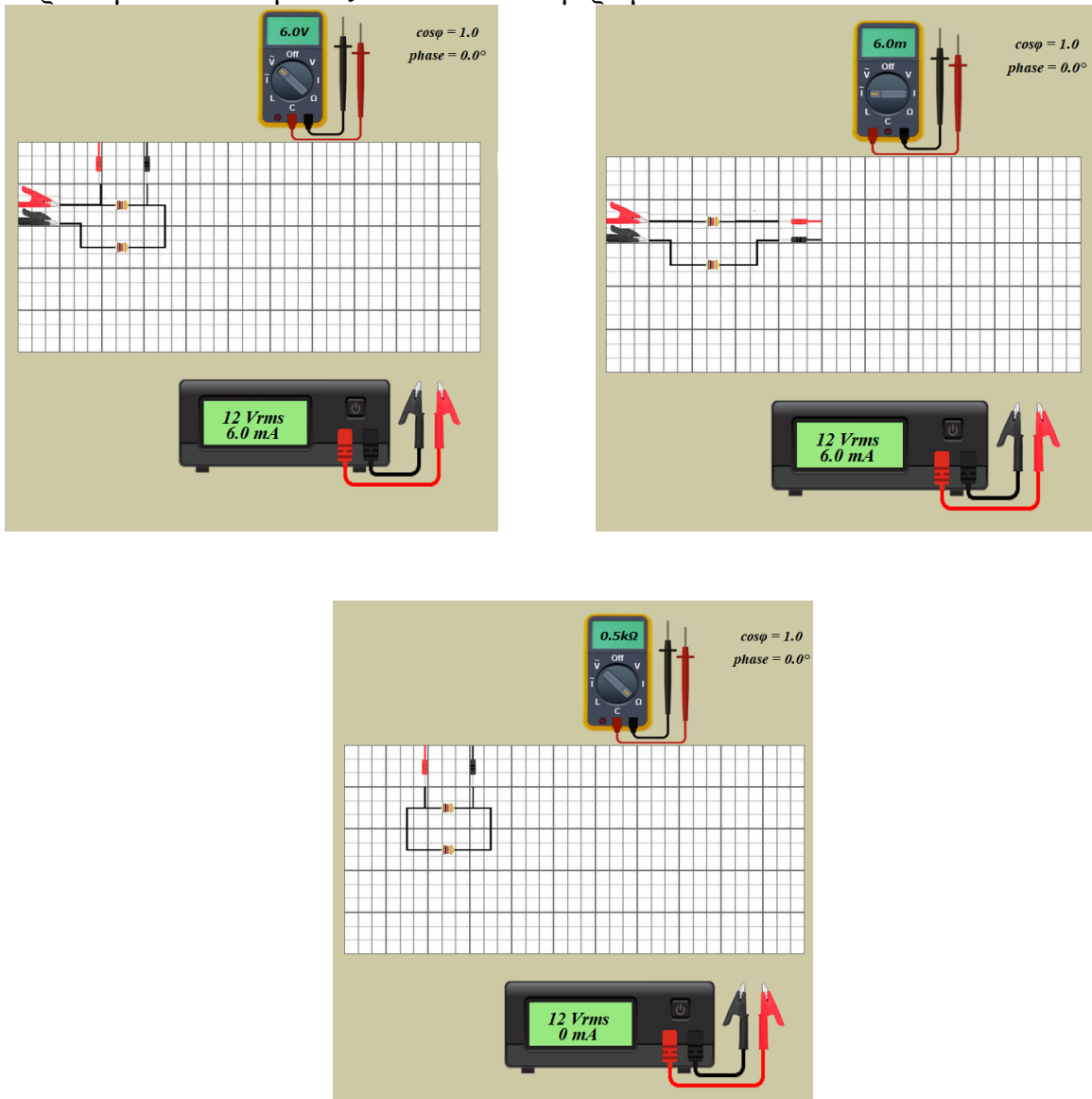
Τέλος, στο κατώτερο μέρος της οθόνης βρίσκεται το τροφοδοτικό. Πατώντας πάνω στο τροφοδοτικό εμφανίζεται αναδυόμενο παράθυρο από το οποίο μπορεί ο χρήστης να επιλέξει τιμή τάσης εισόδου (μέχρι 48V), τύπο τάσης (dc/ac) και συχνότητα.



Σχήμα 5.4 Επιλογή τάσης και συχνότητας τροφοδοτικού

Όπως αναφέρθηκε, τα καλώδια μέτρησης του πολύμετρου συνδέονται αυτόματα βάσει του τύπου μέτρησης. Έτσι διακρίνονται 3 περιπτώσεις:

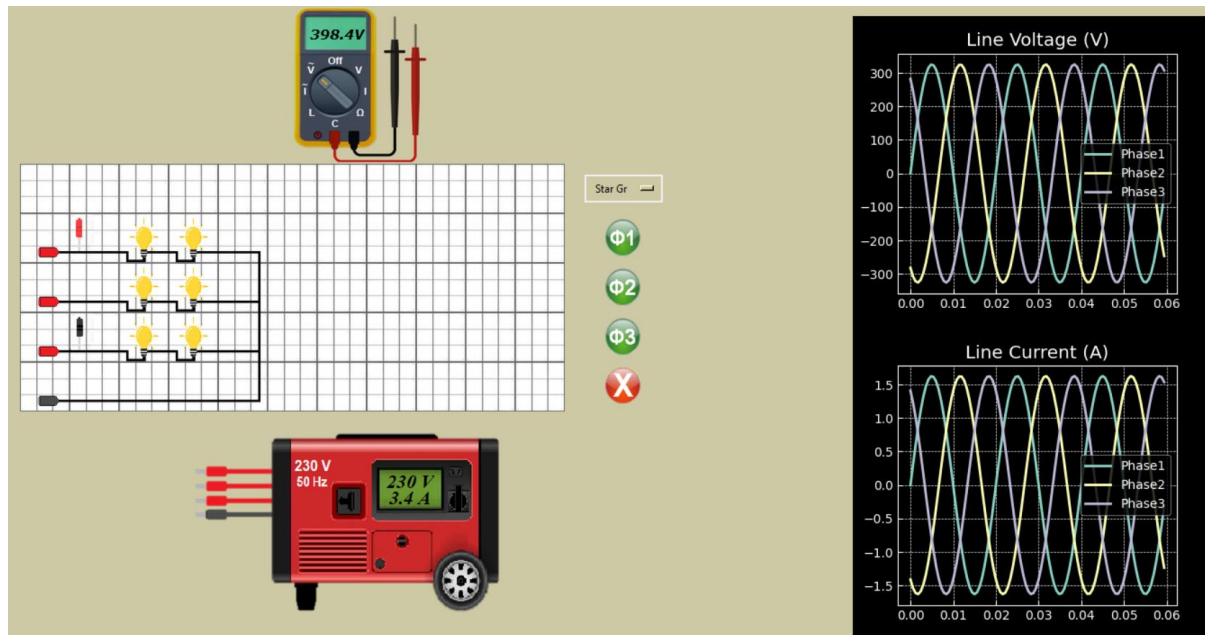
- Μέτρηση ρεύματος, το πολύμετρο συνδέεται σε σειρά
- Μέτρηση τάσης, το πολύμετρο συνδέεται παράλληλα
- Σε μέτρηση αντίστασης, χωρητικότητας, αυτεπαγωγής το πολύμετρο συνδέεται παράλληλα και αυτομάτως αποσυνδέεται η τροφοδοσία.



Σχήμα 5.5 Μέτρηση τάσης, ρεύματος, αντίστασης

5.2.4 Τριφασικά κυκλώματα - Three phase

Το περιβάλλον αυτό περιλαμβάνει βασικά εργαλεία για την προσομοίωση τριφασικών κυκλωμάτων συμμετρικού και ασύμμετρου σύνθετου φορτίου.



Σχήμα 5.6 Three phase – workspace environment

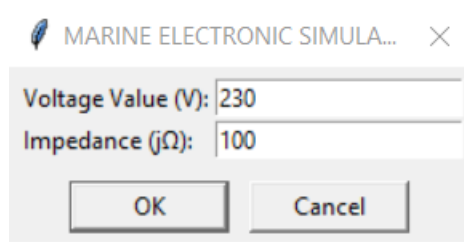
Στο ανώτερο μέρος της οθόνης βρίσκεται το πολύμετρο το οποίο περιλαμβάνει 8 διακριτές επιλογές μέτρησης. Κάνοντας κλικ σε καθεμία ο δείκτης στρέφεται μία θέση δεξιά αλλάζοντας τον τρόπο μέτρησης. Τα probes συνδέονται αυτόματα στο breadboard (εφ' όσον υπάρχουν στοιχεία).

Ακριβώς από κάτω βρίσκεται το breadboard στο οποίο φαίνεται το κύκλωμα που σχεδιάζει ο χρήστης όπως επίσης και τα καλώδια τροφοδοσίας από τη γεννήτρια. Στο δεξί μέρος του breadboard βρίσκονται τα πλήκτρα χειρισμού από τα οποία επιλέγεται η φάση στην οποία θα προστεθεί το φορτίο και ο τρόπος σύνδεσης πατώντας στον επιλογέα:

- None - Καμία συνδεσμολογία
- Star - Συνδεσμολογία αστέρα
- Star Gr - Συνδεσμολογία αστέρα με γειωμένο τον κοινό κόμβο
- Delta - Συνδεσμολογία τριγώνου

Στο δεξί μέρος της οθόνης βρίσκονται τα διαγράμματα εξόδου του κυκλώματος στα οποία απεικονίζεται το ρεύμα και η τάση εξόδου. Τα διαγράμματα ενημερώνονται αυτόματα με κάθε αλλαγή που πραγματοποιείται στο κύκλωμα προσομοίωσης.

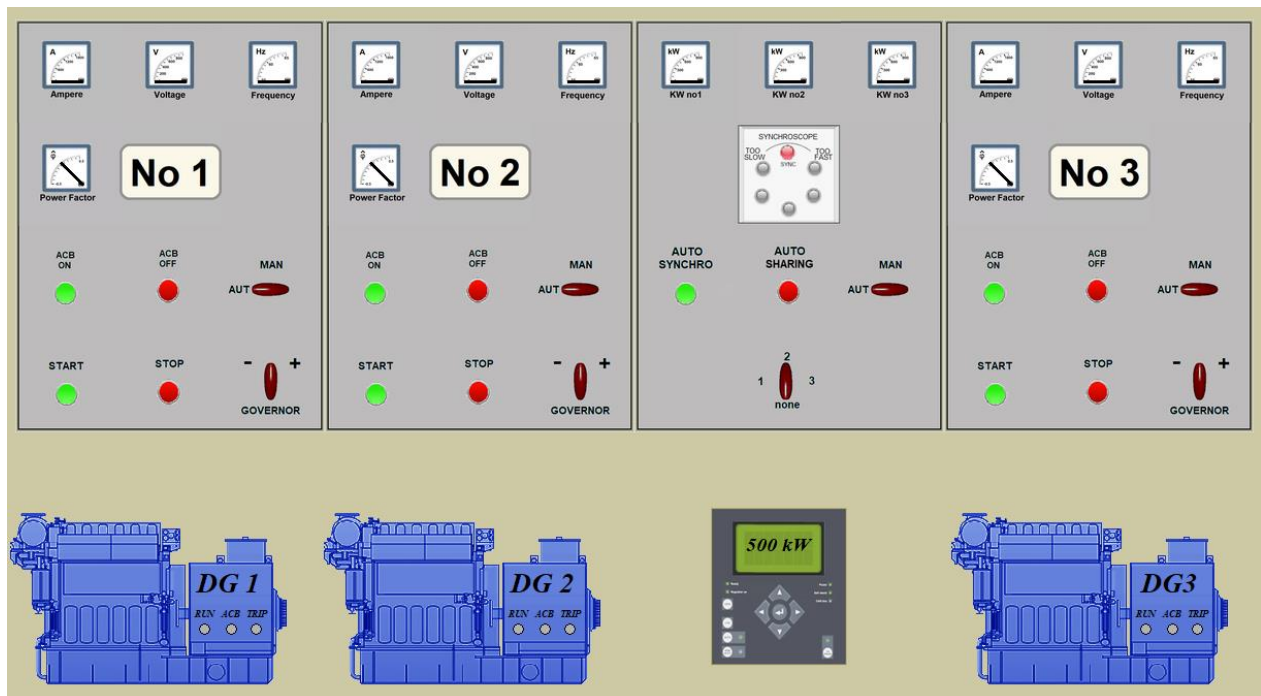
Τέλος, στο κατώτερο μέρος της οθόνης βρίσκεται η τριφασική γεννήτρια. Πατώντας πάνω στη γεννήτρια ανοίγει αναδυόμενο παράθυρο από το οποίο επιλέγεται η RMS τιμή της τάσης εισόδου και η ηλεκτρική εμπέδηση η οποία αντιστοιχεί στην επαγωγή των τυλιγμάτων της γεννήτριας.



Σχήμα 5.7 Επιλογή τάσης και εμπέδησης τριφασικής γεννήτριας

5.2.5 Συγχρονισμός γεννητριών - Synchro

Το περιβάλλον αυτό περιλαμβάνει βασικά εργαλεία για την προσομοίωση της διαδικασίας παραλληλισμού σύγχρονων τριφασικών ηλεκτρογεννητριών από τους πίνακες λειτουργίας του main switchboard.

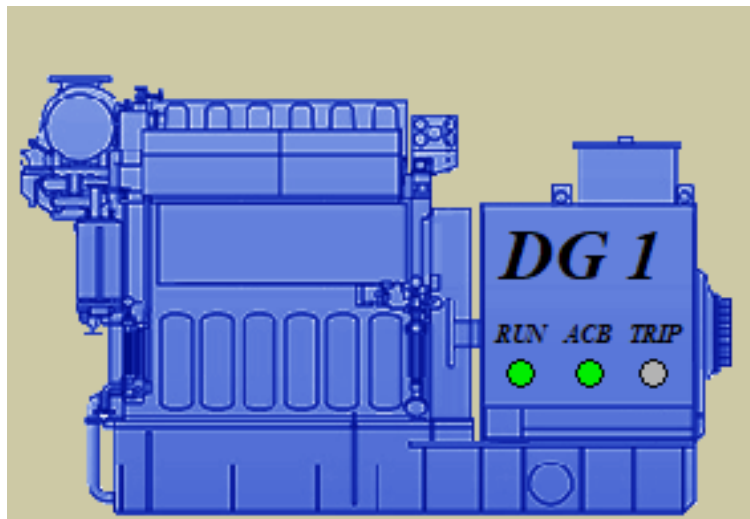


Σχήμα 5.8 Synchro – workspace environment

Στο ανώτερο μέρος της οθόνης βρίσκονται οι πίνακες χειρισμού των ηλεκτρογεννητριών και ο πίνακας συγχρονισμού. Κάθε πίνακας περιλαμβάνει όργανα ένδειξης ρεύματος, τάσης, συχνότητας και συντελεστή ισχύος. Ακόμα, υπάρχουν τα μπουτόν χειρισμού start / stop για έναρξη / σταμάτημα της diesel και acb on / acb off για τον οπλισμό / αφοπλισμό του Air Circuit Breaker. Επιπλέον, υπάρχει ο επιλεκτικός διακόπτης auto / manual από τον οποίο καθορίζεται ο τρόπος λειτουργίας της diesel μεταξύ αυτόματου χειρισμού (μέσω του PMS) και χειροκίνητου. Τέλος, από τον επιλεκτικό διακόπτη governor motor controller δίνεται εντολή για αύξηση και μείωση της συχνότητας στρέψης, δεξί κλικ προκαλεί

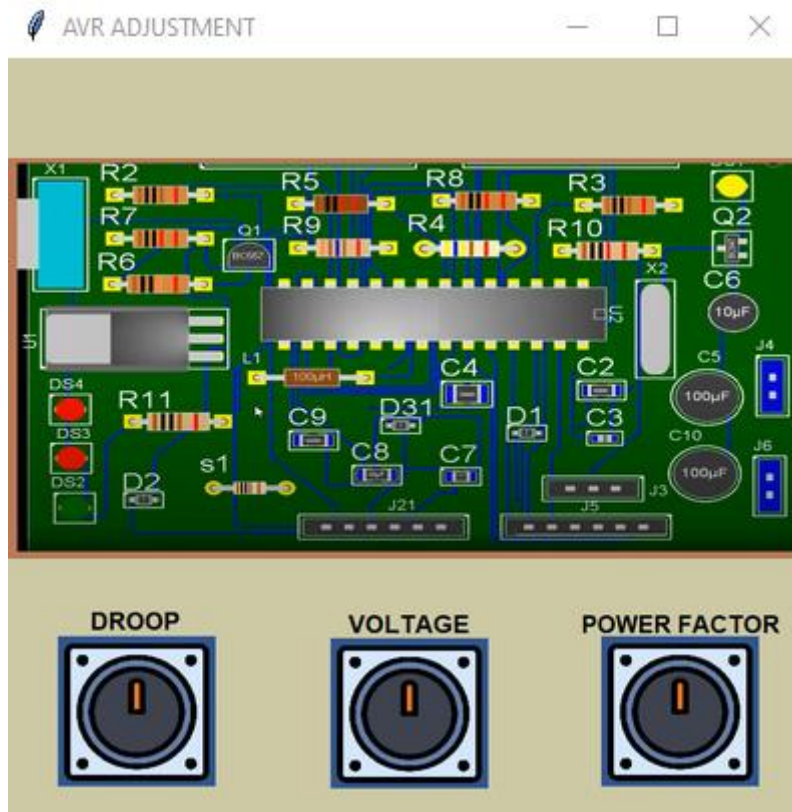
δεξιόστροφη στρέψη του διακόπτη η οποία αντιστοιχεί σε αύξηση, αριστερό κλικ προκαλεί αριστερόστροφη στρέψη του διακόπτη η οποία αντιστοιχεί σε μείωση. Μετά την άρση του κλικ ο διακόπτης επιστρέφει στην κεντρική θέση. Ο πίνακας συγχρονισμού περιλαμβάνει όργανο ένδειξης ισχύος για κάθε ηλεκτρογεννήτρια, συγχρονισκόπιο, πλήκτρα χειρισμού για αυτόματη φόρτωση και αυτόματο μοίρασμα φορτίων, επιλεκτικό διακόπτη auto / manual για τον καθορισμό αυτόματου (μέσω του PMS) και χειροκίνητου συγχρονισμού και, τέλος, επιλεκτικό διακόπτη (none, 1, 2, 3) που καθορίζει την προς παραλληλισμό γεννήτρια.

Ακριβώς κάτω από τους πίνακες βρίσκονται οι προσόψεις των ηλεκτρογεννητριών στις οποίες περιλαμβάνονται ενδεικτικά λαμπάκια λειτουργίας (RUN), κατάστασης του διακόπτη σύνδεσης με το δίκτυο (ACB) και alarm σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας ή black out λόγω λανθασμένου χειρισμού (TRIP) τα οποία αλλάζουν χρώμα ανάλογα με την κατάσταση της γεννήτριας. Ακόμη, υπάρχει και η πρόσοψη του PMS από την οποία καθορίζονται τα φορτία της κατανάλωσης από το χρήστη.



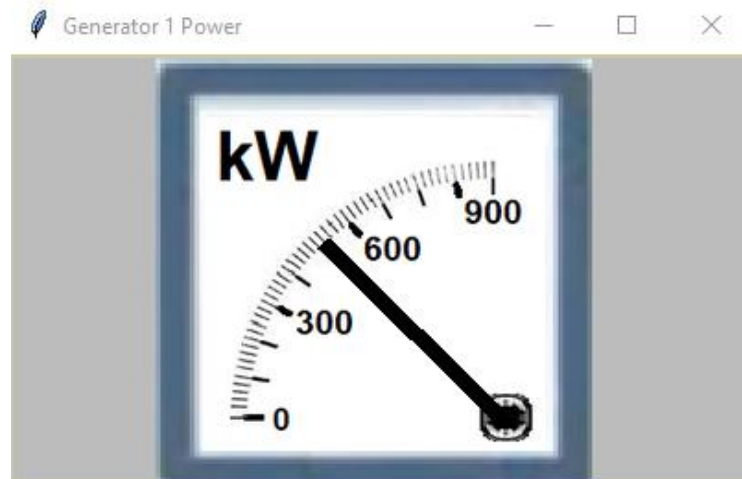
Σχήμα 5.10 Diesel Generator Alarm Indicators

Τέλος, πατώντας πάνω στη γεννήτρια εμφανίζεται η πλακέτα του AVR με τρία ποτενσιόμετρα για χειροκίνητη παρέμβαση στον στατιστή τάσης (droop), την τάση εξόδου (voltage) και το συντελεστή ισχύος (power factor) -μέσω προσφοράς άεργου- στο δίκτυο.



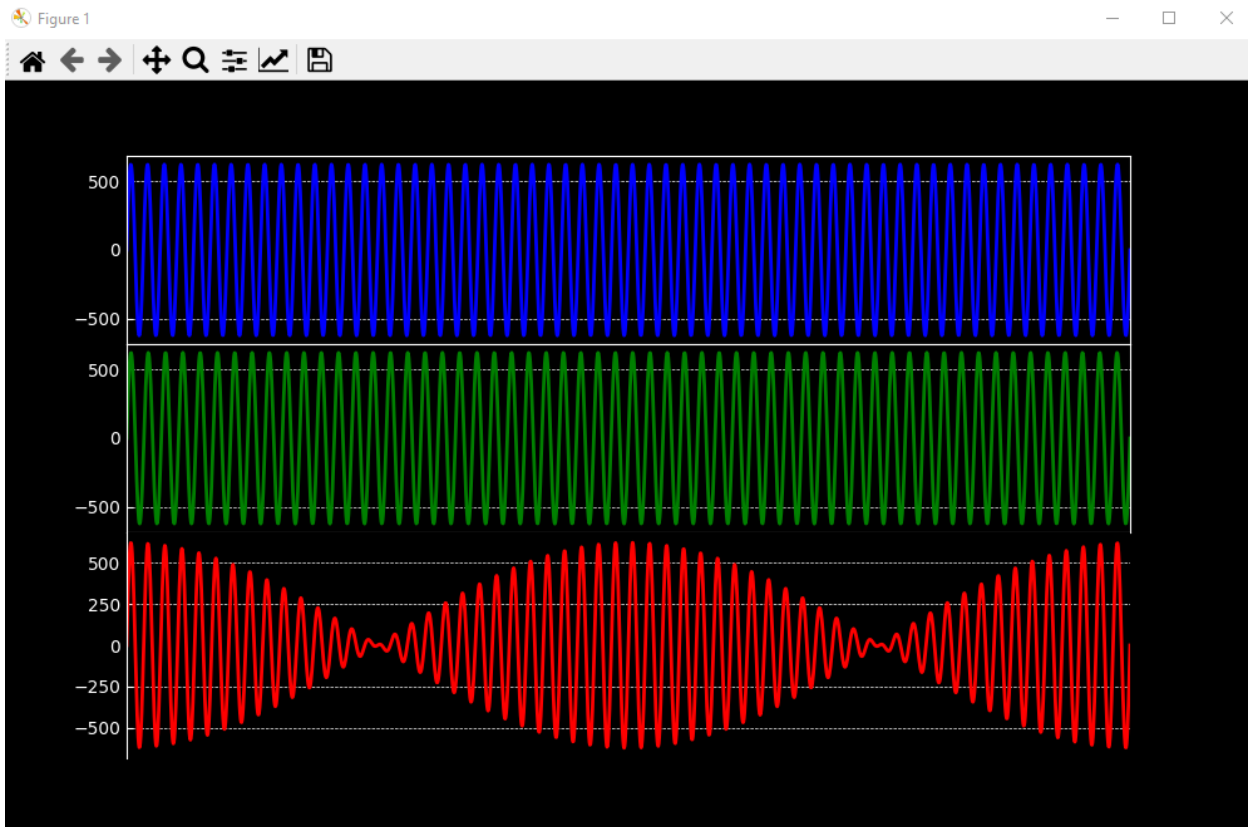
Σχήμα 5.10 AVR Adjustment (pop up window)

Επιπρόσθετη λειτουργικότητα αποτελεί η δυνατότητα μεγέθυνσης των οργάνων ένδειξης. Πατώντας στο επιθυμητό όργανο δημιουργείται αναδυόμενο παράθυρο με την ένδειξή του σε ευκρινή κλίμακα (σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.10 DG1 kW indicator (pop up window)

Τελευταία λειτουργικότητα αποτελεί η δυνατότητα παρακολούθησης των διαγραμμάτων τάσης του δικτύου, της εν' παραλληλισμό γεννήτριας και της τάσης που θα προκύψει στο δίκτυο μετά τον παραλληλισμό τους. Με τη δυνατότητα αυτή ο χρήστης μπορεί να παρακολουθήσει την επίδραση της διαφοράς συχνότητας των προς παραλληλισμό εναλλακτών και να πειραματιστεί με αυτή.



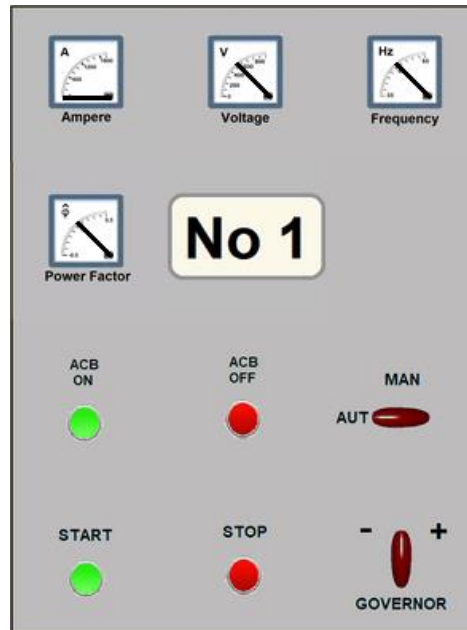
Σχήμα 5.11 Διάγραμμα εξόδου (pop up window):
 (μπλε) τάσης δικτύου
 (πράσινο) τάσης προς παραλληλισμό γεννήτριας
 (κόκκινο) τάσης που θα προκύψει από τον παραλληλισμό των δύο

5.2.6 Διαδικασία εξομοίωσης αυτόματου παραλληλισμού

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα προσφέρεται η δυνατότητα εξομοίωσης παραλληλισμού τόσο μέσω PMS όσο και χειροκίνητα. Στη συνέχεια δίνονται χαρακτηριστικές εκτελέσεις του αυτόματου παραλληλισμού.

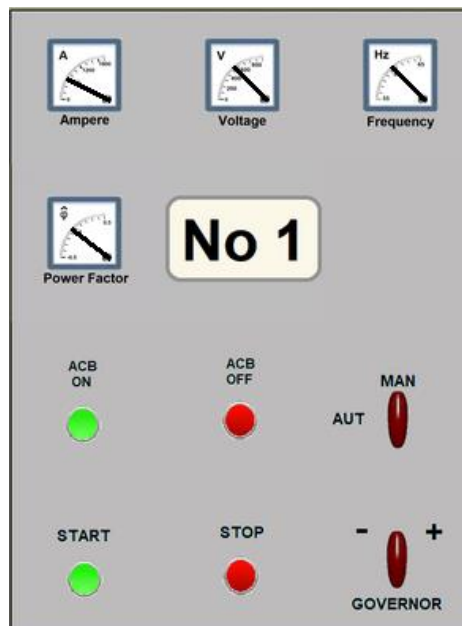
Βήμα πρώτο είναι ο καθορισμός των προς παραλληλισμό ηλεκτρογεννητριών. Στο πλαίσιο του παραδείγματος επιλέγονται οι 1 και 2 με φορτία κατανάλωσης στα 500kW. Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί είναι η εξής:

1. Εκκίνηση της πρώτης γεννήτριας πατώντας το πλήκτρο start στον πίνακά της



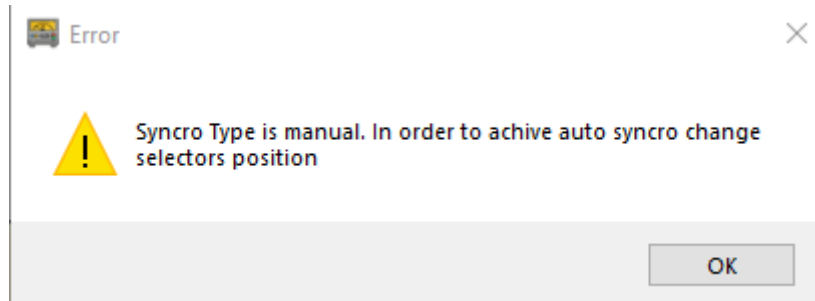
Τα όργανα ένδειξης τάσης και συχνότητας μπαίνουν σε λειτουργία όπως αντίστοιχα ανάβει πράσινο το ενδεικτικό λειτουργίας run.

2. Πάτημα του πλήκτρου ACB ON, αφού πρώτα γυρίσει ο επιλεκτικός διακόπτης στο manual. Το όργανο ένδειξης ρευμάτων και ισχύος μπαίνουν σε λειτουργία όπως επίσης γίνεται πράσινο το ενδεικτικό κατάστασης του ACB. (Για την πρώτη γεννήτρια που συνδέεται στο δίκτυο δεν απαιτείται συγχρονισμός).



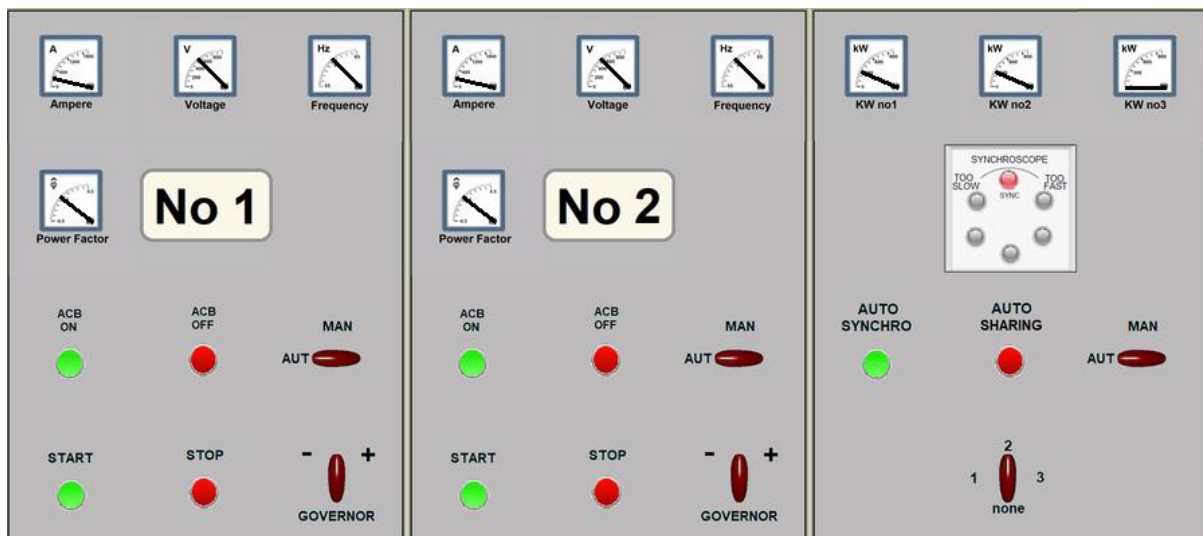
3. Εκκίνηση της δεύτερης ηλεκτρογεννήτριας πατώντας start στον τοπικό της πίνακα. Η συμπεριφορά που παρουσιάζεται είναι όμοια με της πρώτης (μπαίνουν σε λειτουργία τα όργανα μέτρησης τάσης και συχνότητας και ανάβει το ενδεικτικό run).

4. Για τον αυτόματο παραλληλισμό είναι αναγκαία προϋπόθεση να γυρίσουν «αυτο» οι επιλεκτικοί διακόπτες των ηλεκτρογεννητριών και του πίνακα συγχρονισμού από τον οποίο επιλέγεται ο αριθμός της προς παραλληλισμό γεννήτριας (δηλαδή για το παράδειγμα ο αριθμός 2).



Σε περίπτωση παράληψης του 4^{ου} βήματος εμφανίζεται μήνυμα σφάλματος.

5. Τέλος, αφού όλοι οι διακόπτες ρυθμιστούν σωστά πατώντας στο «AUTO SYNCHRO» του πίνακα συγχρονισμού, θα πραγματοποιηθεί ο παραλληλισμός και θα ισοκατανεμηθούν τα φορτία μεταξύ των δύο γεννητριών.



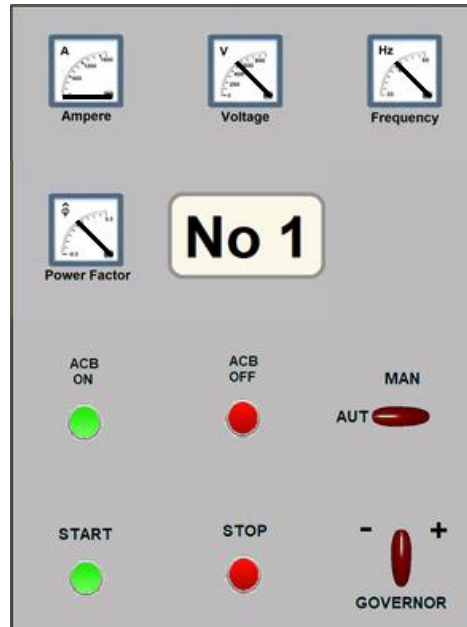
Κατά πλήρη αναλογία μπορεί να προστεθεί και η τρίτη ηλεκτρογεννήτρια στο δίκτυο, καθώς επίσης και να αποσυνδεθεί οποιαδήποτε επιλέγοντας τον αριθμό της από τον επιλεκτικό διακόπτη του πίνακα συγχρονισμού πατώντας στο πλήκτρο «AUTO SHARING».

Επίσης, πατώντας πάνω στο εικονίδιο του PMS μπορούν να μεταβληθούν τα φορτία κατανάλωσης η μεταβολή των οποίων ισοκατανέμεται στις εν λειτουργία ηλεκτρογεννήτριες

5.2.7 Διαδικασία εξομοίωσης χειροκίνητου παραλληλισμού

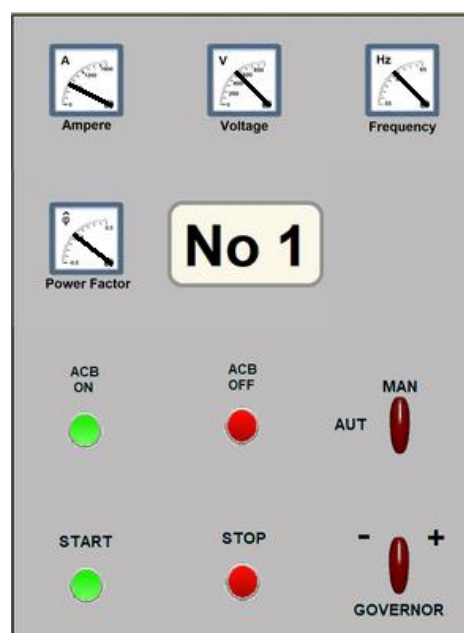
Όμοια με πριν, επιλέγονται οι ηλεκτρογεννήτριες 1 και 2 με φορτία κατανάλωσης στα 500kW. Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί είναι η εξής:

1. Εκκίνηση της πρώτης γεννήτριας πατώντας το πλήκτρο start στον πίνακά της



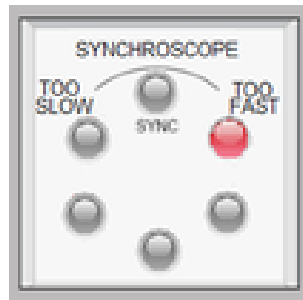
Τα όργανα ένδειξης τάσης και συχνότητας μπαίνουν σε λειτουργία όπως αντίστοιχα ανάβει πράσινο το ενδεικτικό λειτουργίας run.

2. Πάτημα του πλήκτρου ACB ON, αφού πρώτα γυρίσει ο επιλεκτικός διακόπτης στο «manual». Το όργανο ένδειξης ρευμάτων και ισχύος μπαίνουν σε λειτουργία όπως επίσης γίνεται πράσινο το ενδεικτικό κατάστασης του ACB. (Για την πρώτη γεννήτρια που συνδέεται στο δίκτυο δεν απαιτείται συγχρονισμός).



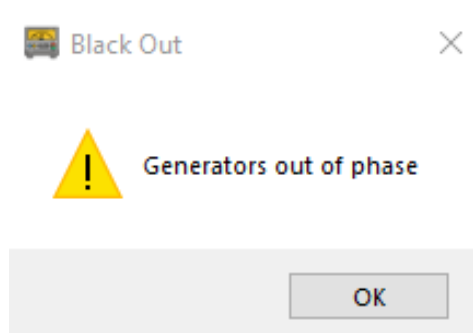
3. Εκκίνηση της δεύτερης ηλεκτρογεννήτριας πατώντας «start» στον τοπικό της πίνακα. Η συμπεριφορά που παρουσιάζεται είναι όμοια με της πρώτης (μπαίνουν σε λειτουργία τα όργανα μέτρησης τάσης και συχνότητας και ανάβει το ενδεικτικό run).

4. Για το χειροκίνητο παραλληλισμό είναι αναγκαία προϋπόθεση να γυρίσουν «manual» οι επιλεκτικοί διακόπτες των ηλεκτρογεννητριών και του πίνακα συγχρονισμού από τον οποίο επιλέγεται ο αριθμός της προς παραλληλισμό γεννήτριας (δηλαδή για το παράδειγμα ο αριθμός 2).



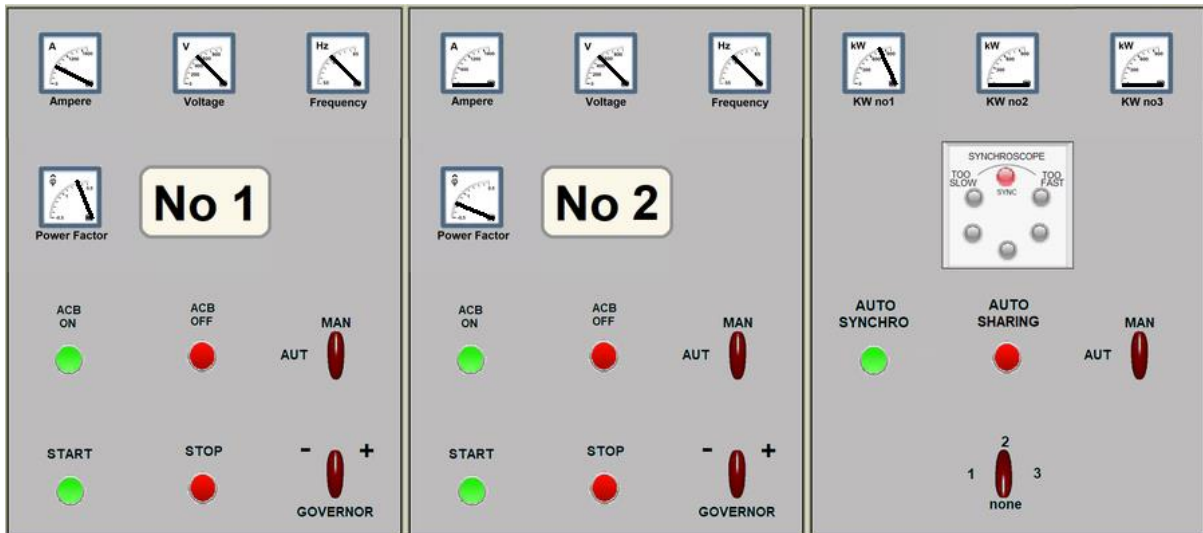
Κατά το στάδιο, αυτό, το ενδεικτικό του συγχροσκοπίου θα αρχίσει να στρέφεται βάσει τις διαφορές συχνότητας των δύο γεννητριών. Δεξιόστροφη στρέψη σημαίνει μεγαλύτερη συχνότητα της προς παραλληλισμό γεννήτριας από τη συχνότητα λειτουργίας του δικτύου, ενώ αριστερόστροφη στρέψη αντιστοιχεί σε μικρότερη συχνότητα. Όσο μεγαλύτερη η διαφορά συχνότητας τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα στρέψης του συγχροσκοπίου.

5. Αφού ρυθμιστούν οι συχνότητες μέσω επιλογής των governor motor controllers και το ενδεικτικό βρίσκεται στην ανώτερη θέση για την ολοκλήρωση του συγχρονισμού, πρέπει να οπλίσει χειροκίνητα ο διακόπτης της 2^{ης} γεννήτριας πατώντας στο ACB ON του πίνακά της.

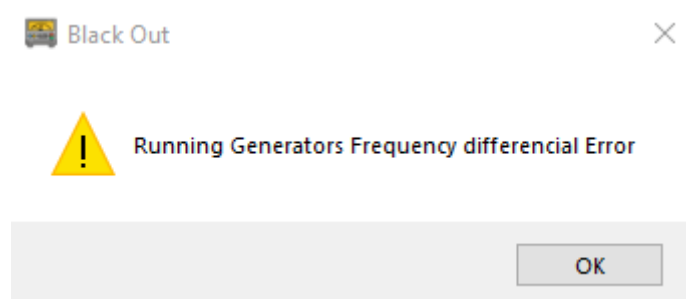


Σε περίπτωση πατήματος του ACB ON σε λανθασμένη θέση του συγχροσκοπίου εμφανίζεται μήνυμα σφάλματος και προκαλείται black out.

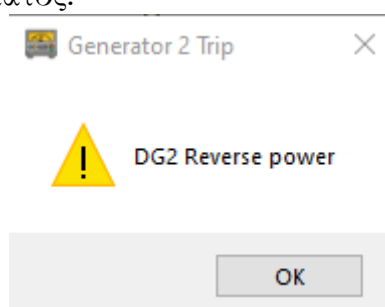
6. Με την επιτυχή ολοκλήρωση του συγχρονισμού θα ανάψει το ενδεικτικό του ACB της δεύτερης γεννήτριας και θα προκληθούν μεταβολές στις τιμές των συντελεστών ισχύος και τον φορτίων, στα οποία παρατηρείται μικρή αύξηση λόγω της μεταβολής των συντελεστών ισχύος.



7. Η κατανομή των φορτίων πραγματοποιείται μέσω των πλήκτρων του governor motor controller. Για αύξηση των φορτίων της δεύτερης ηλεκτρογεννήτριας πρέπει να πατηθεί δεξί κλικ στο button του πίνακά της και αριστερό κλικ στο αντίστοιχο button του πίνακα της πρώτης. Κάθε πάτημα προκαλεί μεταβολή των φορτίων, των ρευμάτων και του συντελεστή ισχύος της όπως επίσης και μικρή αύξηση της συχνότητας (όσο ο συντελεστής ισχύος μικραίνει κατά απόλυτη τιμή). Αυξάνοντας μόνο τα φορτία της δεύτερης γεννήτριας χωρίς αντίστοιχη μείωση της πρώτης θα προκληθεί αποσυγχρονισμός λόγω απόκλισης συχνοτήτων το οποίο θα οδηγήσει σε black out.



Αντίστοιχα, πιθανός λανθασμένος χειρισμός κατά το χειροκίνητο συγχρονισμό είναι η μείωση των φορτίων της ηλεκτρογεννήτριας σε αρνητικές τιμές δηλαδή η μετατροπή της γεννήτριας σε κινητήρα, όπου στην περίπτωση αυτή παρεμβαίνει ο αυτοματισμός προστασίας σταματώντας τη λειτουργία της γεννήτριας (trip) με εμφάνιση αντίστοιχου μηνύματος.



5.3 Μαθηματικό μοντέλο και διαγράμματα ροής

5.3.1 DC Circuits

Για την υλοποίηση και τον προσδιορισμό ρευμάτων και τάσεων χρησιμοποιήθηκε ο νόμος του Ohm και οι νόμοι παράλληλης και εν' σειρά σύνδεσης πηγών τάσης. Κάθε στοιχείο (μπαταρία) αντιμετωπίστηκε ως ιδανική πηγή τάσης 9V με μέγιστο ρεύμα 15mA. Επιπροσθέτως, για λόγους πληρότητας τέθηκε ως παράμετρος η διάρκεια ζωής κάθε στοιχείου στις 500mA. Η αντίσταση του λαμπτήρα προσδιορίστηκε στα 100Ω με χαρακτηριστικά μεγέθη 24V, 0.5W.

Δεδομένου του αριθμού των στοιχείων σε σειρά και παράλληλα, προσδιορίζεται η συνολική τάση και το μέγιστο ρεύμα της συστοιχίας ως:

$$V_{\text{tot}} = N_S \cdot 9V \quad (5.3.1)$$

$$I_{\text{max}} = N_P \cdot 15mA \quad (5.3.2)$$

όπου,

N_S : ο αριθμός των εν σειρά συστοιχιών

N_P : ο αριθμός των παράλληλων συστοιχιών

Θεωρώντας το λαμπτήρα ως σταθερό καταναλωτή 500mW ονομαστικής τάσης 24V, όσο η τάση στα άκρα του είναι μικρότερη των 18V ο λαμπτήρας δεν ανάβει, ενώ ξεπερνώντας τα 36V ο λαμπτήρας σπάει. Για λόγους καλαισθησίας προστέθηκε η δυνατότητα μεταβολής της «ένταση» φωτός του λαμπτήρα ανάλογα με την πληρότητα ισχύος που δέχεται από τη συστοιχία εισόδου.

Το ρεύμα στα άκρα του λαμπτήρα προσδιορίζεται από το νόμο του Ohm εφόσον η παρεχόμενη, από τα στοιχεία, ισχύς επαρκεί για την τροφοδότηση του φορτίου (δηλαδή διατηρείται στα 500mW). Για τιμές ρεύματος – τάσης που δεν επαρκούν για την τροφοδότηση του φορτίου ($P < 500mW$) το ρεύμα τροφοδοσίας λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του.

Δηλαδή:

$$I = \frac{V_{\text{tot}}}{R}, \text{ για } P = I \cdot V_{\text{tot}} \geq 500 \quad (5.3.3)$$

$$I = I_{\text{max}} \text{ για } P = I \cdot V_{\text{tot}} < 500 \quad (5.3.4)$$

Η διάρκεια ζωής της συστοιχίας που αποτυπώνεται στα διαγράμματα

προσδιορίζεται ως:

$$t_{\text{cutoff}} = \frac{Ah}{I} \cdot N_P \quad (5.3.5)$$

όπου,

A_h : οι αμπερώρες κάθε στοιχείου

N_p : ο αριθμός των παράλληλων στοιχείων

5.3.2 RLC Circuits

Ο σχεδιασμός της διαδικασίας ανάλυσης, υπολογισμού και επίλυσης των ζητούμενων κυκλωμάτων χωρίζεται σε τρεις περιπτώσεις:

- Μέτρηση χαρακτηριστικών (αντίστασης, χωρητικότητας, αυτεπαγωγής)
- Μέτρηση συνεχούς τάσης - ρεύματος
- Μέτρηση εναλλασσόμενης τάσης - ρεύματος

Για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών μεγεθών ο υπολογισμός γίνεται βάσει των στοιχείων που βρίσκονται συνδεδεμένα εν σειρά και παράλληλα δεδομένης της τιμής κάθε στοιχείου, καθώς με τη στρέψη του πολύμετρου στις θέσεις μέτρησης αντίστασης (Ω), χωρητικότητας (C) και αυτεπαγωγής (L) αποσυνδέεται η τροφοδοσία. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται αναδρομικά κάθε φορά που προστίθεται νέο στοιχείο με αρχικές καταστάσεις μηδενικής αντίστασης και αυτεπαγωγής και άπειρης χωρητικότητας (βραχυκύκλωμα).

Για την ανάλυση κυκλωμάτων συνεχούς ρεύματος, γνωστής τάσης εισόδου ο προσδιορισμός γίνεται με απλή εφαρμογή του νόμου του Ohm. Τα πηνία αντιμετωπίζονται σαν βραχυκυκλώματα ενώ οι πυκνωτές ως ανοιχτοκυκλώματα.

Τέλος, η ανάλυση κυκλωμάτων εναλλασσομένου ρεύματος βασίζεται στη μέθοδο ανάλυσης κυκλωμάτων δεύτερης τάξης. Καθ' ότι, όμως, η σχεδίαση του κυκλώματος πραγματοποιείται σε έναν κλάδο και τα σημεία εισόδου και εξόδου είναι τυποποιημένα, η ανάλυση του κυκλώματος πραγματοποιείται με τον προσδιορισμό της σύνθετης αντίστασης του φορτίου, θεωρώντας όλα τα στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά. Έτσι το ρεύμα εξόδου είναι:

$$I_{out} = \frac{V_{in}}{Z_{tot}} \quad (5.3.5)$$

όπου,

I_{out} : το ρεύμα εξόδου

V_{in} : η τάση εισόδου

Z_{tot} : η συνολική σύνθετη αντίσταση

Αντίστοιχα, για τον προσδιορισμό της τάσης εξόδου μπορεί να θεωρηθεί σύνθετος διαιρέτης τάσης για τον οποίο ισχύει:

$$V_{out} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot V_{in} \quad (5.3.5)$$

όπου,

V_{out} : η τάση εξόδου

V_{in} : η τάση εισόδου

Z_1 : η σύνθετη αντίσταση στον κλάδο εξόδου

Z_2 : η σύνθετη αντίσταση του κλάδου που ρέει προς τη γείωση

5.3.3 3-Phase

Για την ανάλυση των τριφασικών δικτύων πραγματοποιείται ξεχωριστή διαδικασία ανάλογα με τον τύπο της συνδεσμολογίας.

Αρχικά υπολογίζεται το φορτίο κάθε γραμμής, θεωρώντας την αντίσταση κάθε λαμπτήρα 100Ω και ηλεκτρική εμπέδηση X καθοριζόμενη από τον χρήστη η οποία αντιστοιχεί σε φορτίο σύνθετης αντίστασης $X \text{ j}\Omega$ συνδεδεμένη σε σειρά σε κάθε φάση. Στη συνέχεια υπολογίζεται η πολική τάση και μετασχηματίζονται σε καρτεσιανή μορφή τα μεγέθη.

Αστέρας με γειωμένο τον κοινό κόμβο:

Αφού προσδιοριστεί η σύνθετη αντίσταση κάθε φάσης υπολογίζεται το αντίστοιχο ρεύμα:

$$I_{\Gamma} = \frac{V_{\varphi}}{\sqrt{X^2 + R^2}} = |I_{\Gamma}| \angle \varphi \quad (5.3.6)$$

όπου,

I_{Γ} : το ρεύμα γραμμής

V_{φ} : η φασική τάση

R : η ωμική αντίσταση του φορτίου

X : η επαγωγική αντίσταση (λόγω εμπέδησης της γεννήτριας)

φ : η διαφορά φάσης

Αστέρας χωρίς γειωμένο τον κοινό κόμβο:

Αφού προσδιοριστεί η σύνθετη αντίσταση κάθε φάσης, προσδιορίζεται η μετατόπιση ουδετέρου (U_{Nn}) από τη σχέση 2.3.7 και καθορίζεται το ρεύμα γραμμής όπως στην περίπτωση του γειωμένου κόμβου θεωρώντας τον αριθμητή $V_{\varphi} - U_{Nn}$ δηλαδή:

$$I_{\Gamma} = \frac{V_{\varphi} - U_{Nn}}{\sqrt{X^2 + R^2}} = |I_{\Gamma}| \angle \varphi \quad (5.3.7)$$

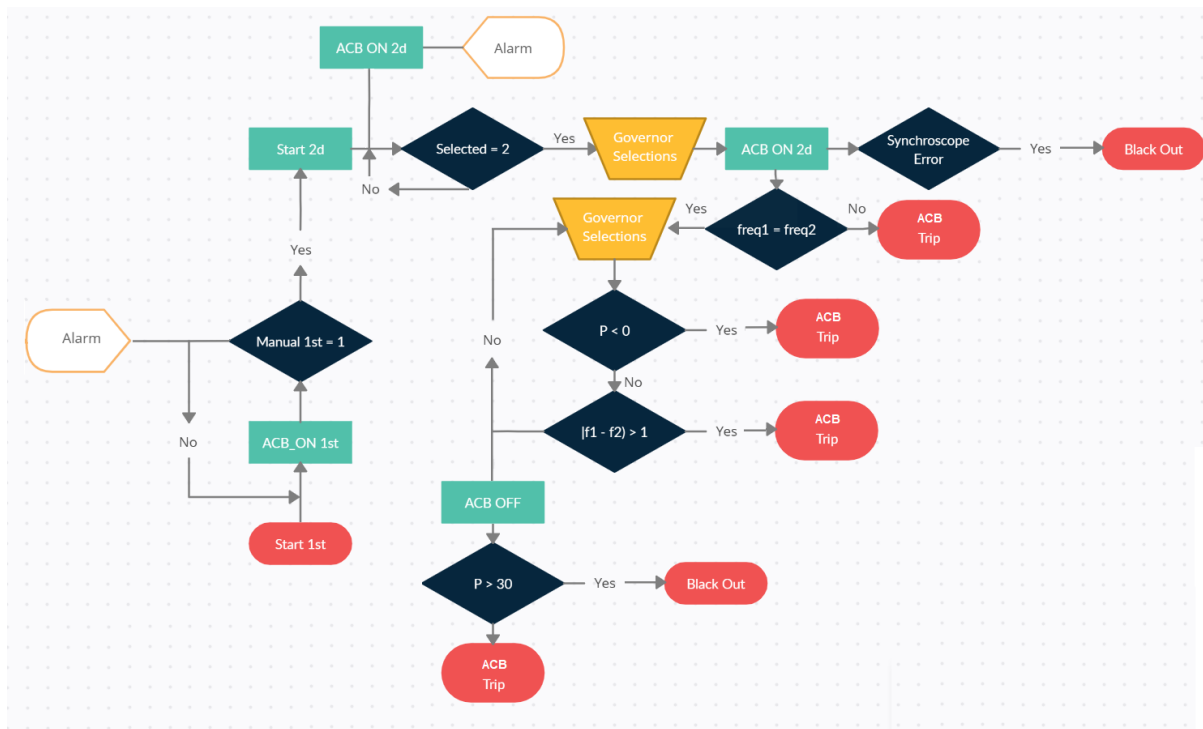
Τρίγωνο:

Χρησιμοποιώντας τον τύπο μετασχηματισμού κατά Kennely (σχέση 2.3.8) προκύπτει ισοδύναμο κύκλωμα με αυτό του αστέρα (χωρίς γειωμένο κόμβο). Συνεπώς, ο προσδιορισμός των ρευμάτων ανάγεται στη μέθοδο που ήδη αναφέρθηκε.

5.3.4 Synchro

Η φασική τάση κάθε γεννήτριας αρχικοποιείται στα 440V και η συχνότητα στα 60Hz κατά την εκκίνησή της. Όταν οπλίσει ο ACB και το δίκτυο τροφοδοτείται από μία και μόνο γεννήτρια η φαινόμενη ισχύς της γεννήτριας παίρνει την τιμή των φορτίων κατανάλωσης όπου έχει ορίσει ο χρήστης. Έτσι από την σχέση (3.2.2) προσδιορίζεται το ρεύμα της γεννήτριας. Η μεταβολή στη συχνότητα αντιστοιχεί σε $\pm 0.5\text{Hz}$ για κάθε πάτημα του governor controller. Για να οπλίσει ο ACB χειροκίνητα (πατώντας το πλήκτρο ACB ON) θα πρέπει ο επιλεκτικός διακόπτης της γεννήτριας να είναι γυρισμένος στο MANUAL και οι συχνότητες να είναι ίσες.

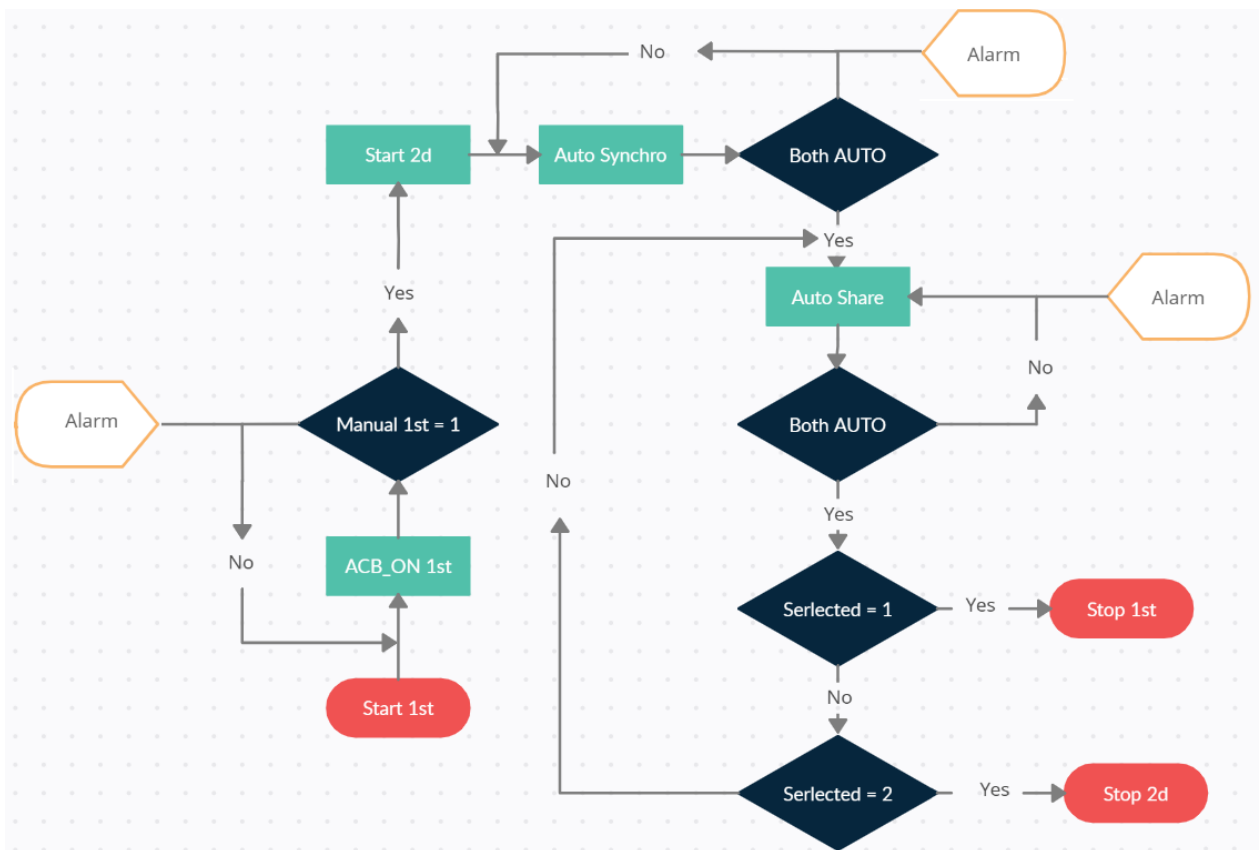
Για το χειροκίνητο συγχρονισμό, εφόσον βρίσκεται συνδεδεμένη στο δίκτυο μία γεννήτρια και μία δεύτερη έχει εκκινήσει επιλέγεται από τον επιλεκτικό διακόπτη του πίνακα συγχρονισμού ο αριθμός που αντιστοιχεί στην προς παραλληλισμό γεννήτρια και το συγχρονοσκόπιο μπαίνει σε λειτουργία (με την προϋπόθεση ότι εκτός των τοπικών διακοπών είναι επιλεγμένος στο MANUAL και ο διακόπτης του πίνακα συγχρονισμού). Εάν πατηθεί ο ACB ενώ η ένδειξη του συγχρονοσκοπίου δεν βρίσκεται στην ανώτερη θέση γίνεται black out και εμφανίζεται αντίστοιχο μήνυμα λάθους στο χρήστη. Εάν ο ACB οπλίσει σε σωστή θέση, οι συντελεστές ισχύος των δύο γεννητριών αλλάζουν τιμή σε 0.7 και -0.7 αντίστοιχα, ενώ η τάση και η συχνότητα παραμένουν σταθερές. Η αντίστοιχη μεταβολή των ΣΙ για τρεις παραλληλισμένες γεννήτριες είναι 0.8, 0.8, -0.6. Η παρέμβαση του governor controller προκαλεί αύξηση -και μείωση αντίστοιχα- του ΣΙ κατά ± 0.05 και της συχνότητας κατά $\pm 0.2\text{Hz}$ ανά πάτημα του διακόπτη και στις δύο γεννήτριες και αύξηση 10kW στα φορτία της πρώτης.



Σχήμα 5.12 Διάγραμμα ροής χειροκίνητου παραλληλισμού δύο γεννητριών

Για το σωστό καταμερισμό των φορτίων πρέπει να πατώνται εναλλάξ οι διακόπτες αύξησης της προς παραλληλισμό γεννήτριας και μείωσης της εν λειτουργία για την διατήρηση της συχνότητας στα 60Hz. Μονομερής χρήση του διακόπτη αύξησης ή μείωσης αντίστοιχα οδηγεί σε διαφορά συχνότητας η οποία όταν ξεπεράσει το 1Hz οδηγεί σε black out. Εφόσον τα φορτία της γεννήτριας γίνουν κάτω από 30kW επιτρέπεται ο αφοπλισμός του ACB (πάτημα του ACB OF), σε διαφορετική περίπτωση θα πραγματοποιηθεί black out. Επίσης όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.2.7. , μείωση των φορτίων σε αρνητικές τιμές οδηγεί τη γεννήτρια σε trip για την αποφυγή motoring. Η παραπάνω περιγραφή φαίνεται αναλυτικά στο διάγραμμα ροής του **σχήματος 5.12**.

Η διαδικασία του αυτόματου παραλληλισμού επιτυγχάνει αυτόματα την προαναφερθείσα διαδικασία οδηγώντας σε ισομοιρασμό φορτίων. Κατά το πάτημα του πλήκτρου συγχρονισμού (Auto Synchro) πρέπει όλοι οι διακόπτες να είναι γυρισμένοι στο AUTO, όπως αντίστοιχα και για τη μεταφορά φορτίων (Auto Sharing). Στο διάγραμμα ροής του **σχήματος 5.13** περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία αυτόματου συγχρονισμού δύο γεννητριών.



Σχήμα 5.13 Διάγραμμα ροής αυτόματου παραλληλισμού δύο γεννητριών

Κατά πλήρη αντιστοιχία πραγματοποιείται και ο συγχρονισμός τρίτης γεννήτριας, με τις ίδιες προϋποθέσεις και τους ίδιους ελέγχους και στις τρεις γεννήτριες.

5.4 Πειραματική δοκιμή

Το πρόγραμμα **Marine Electronic Circuit Simulator** αξιοποιήθηκε στην διεξαγωγή των εργαστηριακών ασκήσεων του μαθήματος της Ηλεκτροτεχνίας 3^{ου} εξαμήνου της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Με τον τρόπο αυτό δόθηκε η ευκαιρία δοκιμής και ελέγχου των σφαλμάτων λειτουργίας από πλήθος χρηστών με θεωρητικό υπόβαθρο αποτελώντας εφαλτήριο λάκτισμα για διορθώσεις και προσθήκες.

Το εργαστήριο του μαθήματος περιλαμβάνει δύο εργαστηριακές ασκήσεις. Η πρώτη αφορά στη σχεδίαση γραμμικών κυκλωμάτων συνεχούς και εναλλασσομένου ρεύματος και η δεύτερη στην ανάλυση τριφασικών δικτύων με συμμετρικό και ασύμμετρο φορτίο. Οι εκφωνήσεις των εργαστηριακών ασκήσεων βρίσκονται στο παράρτημα.

5.4.1 Όργανα μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών – Απλές μετρήσεις

Η άσκηση πραγματοποιήθηκε σε τρία μέρη:

- Μέτρηση τάσης συνεχούς ρεύματος
- Μετρήσεις RLC
- Μέτρηση εναλλασσομένου ρεύματος

Στο πρώτο μέρος ζητήθηκε από τους φοιτητές να σχεδιάσουν διατάξεις με συστοιχίες μπαταριών στο περιβάλλον DC Circuits και να συγκρίνουν τις μετρήσεις του προγράμματος με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές, αποδεικνύοντας τους νόμους τάσεων και ρευμάτων του Kirchhoff αλλά και τους τύπους παράλληλης και εν σειρά σύνδεσης πηγών τάσης.

Στο δεύτερο μέρος ζητήθηκε η μέτρηση των βασικών μεγεθών αντιστατών, πυκνωτών και πηνίων στο περιβάλλον RLC Circuits συνδεσμολογημένα σε σειρά και παράλληλα και η σύγκριση με τις θεωρητικές τιμές. Επίσης ζητήθηκε η τροφοδότηση καθενός από τα παραπάνω στοιχεία με συνεχή τάση εισόδου, η καταγραφή των μετρήσεων και η σύγκριση με τις θεωρητικές τιμές.

Στο τρίτο μέρος ζητήθηκε σχεδίαση γραμμικών κυκλωμάτων με RLC στοιχεία σε AC τροφοδοσία με διαφορετικές τάσεις και συχνότητες, η καταγραφή και η σύγκριση των μετρήσεων.

5.4.2 Τριφασικά κυκλώματα και μετρήσεις

Στη δεύτερη εργαστηριακή άσκηση ζητήθηκε από τους φοιτητές η σχεδίαση τριφασικών κυκλωμάτων με συμμετρικά και ασύμμετρα φορτία σε συνδεσμολογία αστέρα και τριγώνου γνωστής τάσης εισόδου στο περιβάλλον 3-phase, η καταγραφή της φασικής τάσης, της πολικής τάσης, του ρεύματος γραμμής, του ρεύματος φάσης, της φαινόμενης ισχύος, της πραγματικής ισχύος, της άεργου ισχύος και του συντελεστή ισχύος και η σύγκριση των μετρήσεων με τις θεωρητικές τιμές.

5.4.3 Συμπεράσματα και προτάσεις

Η συμμετοχή των φοιτητών ήταν καθοριστική καθώς παρατηρήθηκαν ατέλειες και σχεδιαστικές αστοχίες αναφορικά με:

- Σφάλματα απεικόνισης μετρούμενων μεγεθών, τα οποία διορθώθηκαν.
- Σχεδιαστικές τροποποιήσεις για ευκολότερη χρήση (διάταξη αντικειμένων, συνδυασμός χρωμάτων κ.α.).
- Δυνατότητα παρέμβασης στον τρόπο εμφάνισης των γραφικών παραστάσεων.
- Παραμόρφωση εικονιδίων σε τετράγωνα αναλύσεις οθόνης σταθερών υπολογιστών. Για τη διόρθωση του προβλήματος αυτού προστέθηκε κώδικας όπου διαβάζει την ανάλυση οθόνης του χρήστη και προσαρμόζει το μέγεθος των εικονιδίων αναλόγως.

- Ζητήματα ασυμβατότητας σε διαφορετικά λειτουργικά συστήματα. Η λειτουργία σε windows προγενέστερα των windows 7 δεν κατέστη εφικτή καθώς η έκδοση της python 3.7 δεν υποστηρίζεται σε παλαιότερες εκδόσεις.

Επίσης συζητήθηκαν προτάσεις και ιδέες για περαιτέρω λειτουργικότητες οι οποίες αναλύονται στο κεφάλαιο 6.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προοπτικές εξέλιξης

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε και αναπτύχθηκε ο τρόπος λειτουργίας των σύγχρονων τριφασικών ηλεκτρογεννητριών στα πλοία, ο τρόπος παραλληλισμού τους και οι αυτοματισμοί που τον επιτυγχάνουν. Για το σκοπό αυτό υλοποιήθηκε πρόγραμμα εξομοίωσης που προσφέρει στο χρήστη τη δυνατότητα υλοποίησης, παρατήρησης και ελέγχου της διαδικασίας του παραλληλισμού.

Βασικό συμπέρασμα που αποτέλεσε και την αφορμή εκκίνησης του συγκεκριμένου εγχειρήματος είναι η αναγκαιότητα ψηφιοποίησης των διαδικασιών χειρισμού των αυτοματισμών της ναυτιλίας που αποσκοπεί στην καλύτερη εκπαίδευση από πλευράς χειριστών και τεχνικών. Η συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία που ενσωματώνεται στις μηχανές των πλοίων, η αύξηση των ηλεκτρονικών αυτοματισμών και η χρήση μικροελεγκτών και PLC οδηγεί τα πληρώματα σε δυσκολία χειρισμού η οποία οφείλεται στην έλλειψη εξοικείωσης με τους μηχανισμούς αυτών. Η δημιουργία προγραμμάτων εξομοίωσης βασισμένη σε σχέδια εγκατάστασης συνδυάζοντας τις λειτουργικότητες των συστημάτων με το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο θα βοηθούσε τόσο στην καλύτερη κατάρτιση των χειριστών όσο και στην ευκολία ελέγχου και επισκευής τους. Ο ισχυρισμός αυτός επιβεβαιώνεται και από την αυξητική τάση δημιουργίας τέτοιων προγραμμάτων αλλά και εκπαιδευτικών κέντρων επιμόρφωσης που αξιοποιώντας εξομοιωτές παρέχουν εκπαίδευση και εξειδίκευση σε τεχνικούς και σπουδαστές.

6.2 Προοπτικές εξέλιξης

Όπως προέκυψε και από την αλληλεπίδραση με τους φοιτητές της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ που κλήθηκαν να χρησιμοποιήσουν το πρόγραμμα εξομοίωσης, καθίσταται αναγκαία η περαιτέρω εξέλιξή του.

Αρχικός στόχος είναι η ενσωμάτωση πιο σύνθετων μαθηματικών υπολογισμών με σκοπό την επίτευξη –κατά το δυνατόν– πραγματικών συνθηκών εξομοίωσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με χρήση ρουτίνων καθυστέρησης, οι οποίες εξομοιώνουν τις μηχανικές καθυστερήσεις απόκρισης κάθε σταδίου. Επίσης, το μοντέλο υλοποίησης του παραλληλισμού θα μπορούσε να προσαρμοστεί και να εφαρμοστεί βάσει σχεδίων συγκεκριμένης εγκατάστασης γεγονός το οποίο θα προσέφερε πιο ρεαλιστικά δεδομένα εισόδου και πιο ακριβή αποτελέσματα.

Επιπλέον, σημαντική θα ήταν η ενσωμάτωση μηχανικών βλαβών στις περιπτώσεις λανθασμένου χειρισμού (wrong cases). Αυτό θα προσέφερε στο χρήστη τη δυνατότητα μιας πιο σφαιρικής κατανόησης των θεωρητικών φαινομένων αλλά και την εμπειρία διαχείρισης πάσης φύσεως προβλημάτων όταν καθίσταται αναγκαία η αντιμετώπισή τους σε πραγματικές συνθήκες.

Τέλος, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί επέκταση του συγκεκριμένου εξομοιωτή ώστε να συμπεριληφθούν περισσότεροι αυτοματισμοί μηχανοστασίου (κύρια μηχανή, καζάνι, alarm monitoring κλπ) με τελικό σκοπό την δημιουργία εικονικού Engine Control Room. Στον εξομοιωτή αυτό ο χρήστης θα καλούταν να χειριστεί όλους τους αυτοματισμούς του μηχανοστασίου έχοντας μπροστά του τη συνολική εικόνα του main switchboard. Ιδανικά, η υλοποίηση του εικονικού ECR σε τρισδιάστατο γραφικό περιβάλλον θα αποτελούσε ένα πολύ καλό εκπαιδευτικό πρόγραμμα με άμεσο πρακτικό αντίκτυπο τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε εμπορικό επίπεδο.

Παράρτημα Ι:

1^η Εργαστηριακή άσκηση Ηλεκτροτεχνίας, 3^ο εξάμηνο ΣΝΜΜ/ΕΜΠ Γνωριμία με όργανα μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών - Απλές Μετρήσεις

Τα ζητούμενα κυκλώματα θα υλοποιηθούν με το εκπαιδευτικό πρόγραμμα **Marine Electronic Circuit Simulator**. Πληροφορίες για το πρόγραμμα θα βρείτε στο site του μαθήματος.

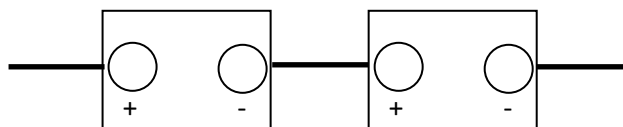
1^ο μέρος: Μέτρηση τάσης και ρεύματος ΣΡ

Απαιτούμενος Εξοπλισμός:

- Μπαταρίες 9V
- Λαμπτήρας 0,5W - 24V
- Ψηφιακό Πολύμετρο

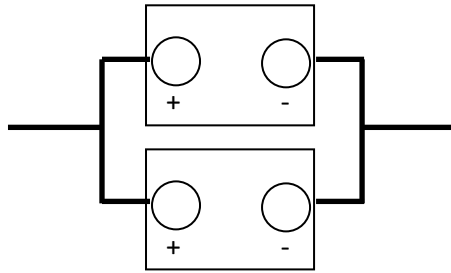
Για την διεξαγωγή του 1^{ου} μέρους επιλέξτε το περιβάλλον **DC Circuits** που θα βρείτε στο πεδίο **Basics** του κύριου μενού.

A) Συνδέστε σε σειρά δύο μπαταρίες 9 V πατώντας στο εικονίδιο **S**. Μετρήστε και καταγράψτε τη συνολική τάση. Για την μέτρηση μπορείτε να χρησιμοποιήσετε το πολύμετρο σε επιλογή μέτρησης τάσης (τα probs του πολύμετρου συνδέονται αυτόματα)



	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου
9 V σε σειρά	

B) Συνδέστε παράλληλα δύο μπαταρίες 9 V πατώντας στο εικονίδιο **P**. Ομοίως μετρήστε και καταγράψτε τη συνολική τάση:



	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου
9 V παράλληλα	

Γ) Συνδέστε 3 μπαταρίες των 9V σε σειρά, επιλέξτε το πολύμετρο σε μέτρηση συνεχούς ρεύματος και τοποθετήστε φορτίο ονομαστικής τιμής 500mW, 24V πατώντας στο αντίστοιχο εικονίδιο. Καταγράψτε το ρεύμα εξόδου και την συνολική ισχύ χρησιμοποιώντας είτε το πολύμετρο είτε τα διαγράμματα εξόδου.

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου σε mA	Συνολική Ισχύς
3x 9V σε σειρά		

Δ) Συνδέστε 3 μπαταρίες των 9V παράλληλα, επιλέξτε το πολύμετρο σε μέτρηση συνεχούς ρεύματος και τοποθετήστε φορτίο ονομαστικής τιμής 500mW, 24V πατώντας στο αντίστοιχο εικονίδιο. Καταγράψτε το ρεύμα εξόδου και την συνολική ισχύ χρησιμοποιώντας είτε το πολύμετρο είτε τα διαγράμματα εξόδου.

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου σε mA	Συνολική Ισχύς
3x 9V παράλληλα		

Ε) Επαναλάβετε τα πειράματα Γ και Δ με περισσότερες συστοιχίες (εν σειρά και παράλληλα) και καταγράψτε τις παρατηρήσεις σας.

Συστοιχία	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου σε mA	Συνολική Ισχύς

Ποιά εκτιμάτε ότι είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κάθε μπαταρίας (μέγιστο ρεύμα σε mA και χωρητικότητα σε Ah).

Μέγιστο ρεύμα στοιχείου	Χωρητικότητα (Ah)

2^ο μέρος: Μετρήσεις LCR

Απαιτούμενος Εξοπλισμός:

- Αντιστάτες, Πηκνωτές, Πηνία
- Ψηφιακό Πολύμετρο
- Τροφοδοτικό 48V

Για την διεξαγωγή του 2^{ου} μέρους επιλέξτε το περιβάλλον **RLC Circuits** που θα βρείτε στο πεδίο **Basics** του κύριου μενού.

A) Γυρίστε το πολύμετρο σε μέτρηση αντίστασης (R), συνδέστε δύο (ή και περισσότερους) αντιστάτες σε σειρά πατώντας στα εικονίδια S ή P αντίστοιχα.

Μετρήστε και καταγράψτε την συνολική ωμική αντίσταση.

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου
1 ^{ος} αντιστάτης	
2 ^{ος} αντιστάτης	
3 ^{ος} αντιστάτης	
Συνολική αντίσταση	

B) Γυρίστε το πολύμετρο σε μέτρηση αντίστασης (R), συνδέστε δύο αντιστάτες παράλληλα πατώντας στα εικονίδια S και P αντίστοιχα. Μετρήστε και καταγράψτε την συνολική ωμική αντίσταση.

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου
1 ^{ος} αντιστάτης	
2 ^{ος} αντιστάτης	
Συνολική αντίσταση	

Για εξάσκηση! (Προαιρετικά)

Κατασκευάστε φορτίο 55kΩ με κατά το δυνατών λιγότερα στοιχεία. Έχετε στην διαθεσή σας αντιστάτες των 100Ω, 1kΩ, 10kΩ, 22kΩ, 100kΩ και 470kΩ. Πόσους αντιστάτες χρησιμοποιήσατε;

Γ) Γυρίστε το πολύμετρο σε μέτρηση χωρητικότητας (C), συνδέστε δύο (ή και περισσότερους) πυκνωτές σε σειρά πατώντας στα εικονίδια S ή P αντίστοιχα.

Μετρήστε και καταγράψτε την συνολική χωρητικότητα.

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου
1 ^{ος} πυκνωτής	
2 ^{ος} πυκνωτής	
3 ^{ος} πυκνωτής	
Συνολική χωρητικότητα	

Δ) Γυρίστε το πολύμετρο σε μέτρηση χωρητικότητας (C), συνδέστε δύο πυκνωτές παράλληλα πατώντας στα εικονίδια S και P αντίστοιχα. Μετρήστε και καταγράψτε την συνολική χωρητικότητα.

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου (kΩ)
1 ^{ος} πυκνωτής	
2 ^{ος} πυκνωτής	
Συνολική χωρητικότητα	

Ε) Γυρίστε το πολύμετρο σε μέτρηση αυτεπαγωγής (L), συνδέστε δύο (ή και περισσότερα) πηνία σε σειρά πατώντας στα εικονίδια S ή P αντίστοιχα. Μετρήστε και καταγράψτε την συνολική αυτεπαγωγή.

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου
1 ^ο πηνίο	
2 ^ο πηνίο	
3 ^ο πηνίο	
Συνολική αυτεπαγωγή	

ΣΤ) Γυρίστε το πολύμετρο σε μέτρηση αυτεπαγωγής (L), συνδέστε δύο πηνία παράλληλα πατώντας στα εικονίδια S και P αντίστοιχα. Μετρήστε και καταγράψτε την συνολική αυτεπαγωγή.

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου (kΩ)
1 ^ο πηνίο	
2 ^ο πηνίο	
Συνολική αυτεπαγωγή	

Ζ) Πατώντας πάνω στο τροφοδοτικό επιλέξτε συνεχή (DC) τάση 12V. Τροφοδοτήστε διαδοχικά έναν αντιστάτη, ένα πηνίο, και έναν πυκνωτή. Καταγράψτε το ρεύμα και την τάση εξόδου ρυθμίζοντας το πολύμετρο σε μέτρηση τάσης και ρεύματος αντίστοιχα. Τι παρατηρείτε σε κάθε περίπτωση;

	Τιμή	Τάση εξόδου	Ρεύμα εξόδου
Αντιστάτης			
Πυκνωτής			
Πηνίο			

Για εξάσκηση! (Προαιρετικά)

Θεωρήστε ότι θέλετε να σχεδιάσετε διάταξη για την τροφοδοσία μικροελεγκτή 5V, άπειρης εσωτερικής αντίστασης, μέγιστου ρεύματος 10mA. Η τάση εισόδου που έχετε στην διάθεσή σας είναι 20V DC. Υλοποιήστε το ζητούμενο κύκλωμα αποκλιστικά με χρήση αντιστατών.

3^ο μέρος: Μέτρηση ρεύματος ΕΡ

Απαιτούμενος Εξοπλισμός:

- Αντιστάτες, Πηκνωτές, Πηνία
- Ψηφιακό Πολύμετρο
- Τροφοδοτικό 48V
- Παλμογράφος

A) Ρυθμίστε εναλλασόμενη τάση εισόδου (AC) στα 12V, 100Hz πατώντας πάνω στο τροφοδοτικό. Τροφοδοτήστε διαδοχικά έναν αντιστάτη 1kΩ, έναν πυκνωτή 1μF και ένα πηνίο 1H. Καταγράψτε τα ρεύματα εξόδου σε κάθε περίπτωση γυρνώντας το πολύμετρο σε μέτρηση ac τάσης και ac ρεύματος αντίστοιχα.

	Τιμή Στοιχείου	Τάση εξόδου (rms)	Ρεύμα εξόδου (rms)	Συντελεστής Ισχύος	Φάση I-V
Αντιστάτης					
Πυκνωτής					
Πηνίο					

Συγκρίνετε τις γραφικές παραστάσεις εισόδου και εξόδου και καταγράψτε τις παρατηρήσεις σας.

B) Ρυθμίστε εναλλασόμενη τάση εισόδου (AC) στα 12V, 100Hz πατώντας πάνω στο τροφοδοτικό. Συνδέστε σε σειρά έναν αντιστάτη 1kΩ και έναν πυκνωτή 1nF, καταγράψτε την RMS τιμή του ρεύματος εξόδου γυρνώντας το πολύμετρο σε μέτρηση ac ρεύματος. Επαναλάβετε διαδοχικά την διαδικασία για μεγαλύτερες συχνότητες διατηρώντας σταθερή την τάση τροφοδοσίας.

Συχνότητα	Ρεύμα εξόδου (rms)	Συντελεστής Ισχύος	Φάση
100 Hz			
1 kHz			
10 kHz			
100 kHz			
1 GHz			

Τι παρατηρείτε;

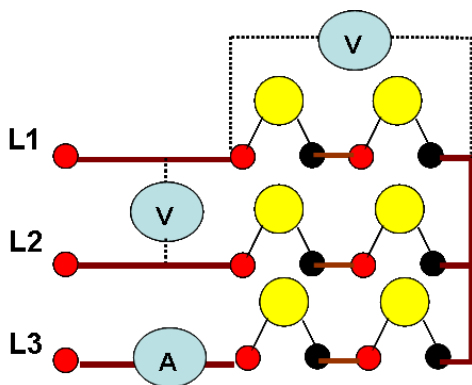
2^η Εργαστηριακή άσκηση Ηλεκτροτεχνίας, 3^ο εξάμηνο ΣΝΜΜ/ΕΜΠ Τριφασικά Κυκλώματα και Μετρήσεις

Τα ζητούμενα κυκλώματα θα υλοποιηθούν με το εκπαιδευτικό πρόγραμμα **Marine Electronic Circuit Simulator**. Πληροφορίες για το πρόγραμμα θα βρείτε στο site του μαθήματος.

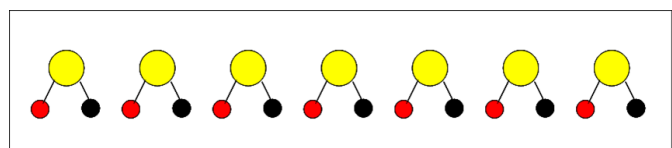
Για την διεξαγωγή όλων των ερωτημάτων επιλέξτε το περιβάλλον **3-Phases** που θα βρείτε στο πεδίο **Basics** του κύριου μενού.

Για την υλοποίηση όλων των διατάξεων αρχικά τοποθετήστε τα ζητούμενα φορτία σε κάθε φάση, πατώντας τα αντίστοιχα button (Φ1, Φ2, Φ3) και επιλέξτε την συνδεσμολογία από τον επιλογέα στο πάνω μέρος των button. Πατώντας στην γεννήτρια μπορείτε να επιλέξετε την rms τιμή της τάσης εισόδου (φασική) και την ηλεκτρική εμπέδηση (η οποία αντιστοιχεί στην σύνθετη αντίσταση που προκαλούν τα τυλίγματα της γεννήτριας). Για την μέτρηση τάσης και ρεύματος αντίστοιχα γυρίστε το πολύμετρο στην αντίστοιχη θέση και επιλέξτε τα σημεία του κυκλώματος που θέλετε να τοποθετηθούν τα probes.

A) Συνθέστε συμμετρικό τριφασικό κύκλωμα σε συνδεσμολογία **αστέρα (Y) με γειωμένη την κοινή γραμμή**. Τροφοδοτήστε το κύκλωμα από τριφασικό τροφοδοτικό **230V** (φασική τάση), **μηδενικής σύνθετης αντίστασης** και μετρήστε την τάση εισόδου στη συστοιχία. Θεωρώντας αυτό το μέγεθος ως διάνυσμα αναφοράς, υπολογίστε ρεύμα και ισχύ (ενεργό, άεργο, φαινόμενη και συντελεστή ισχύος) σε μία φάση τροφοδοσίας. Τι ισχύει για τις άλλες δύο φάσεις; Εκτιμήστε την ωμική αντίσταση ενός λαμπτήρα από το λόγο τάσης προς ρεύμα. Σχεδιάστε τις συνδέσεις στο Σχήμα A.2.



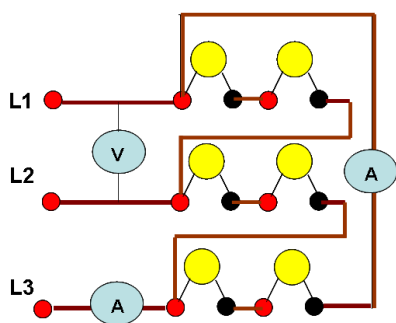
Σχήμα A.1



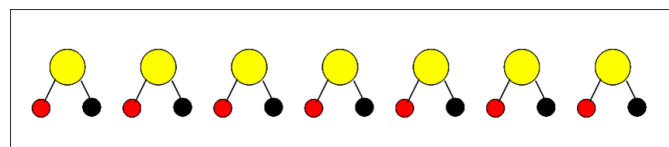
Σχήμα A.2

	L1	L2	L3
V(V) πολική			
I(A) γραμμής			
V(V) φασική			
S(VA)			
P(W)			
Q(VAr)			
Pf (cosφ)			
R _λ			

B) Συνθέστε **συμμετρικό** τριφασικό κύκλωμα σε συνδεσμολογία **τριγώνου (Δ)**. Τροφοδοτήστε το κύκλωμα από τριφασικό τροφοδοτικό. Τροφοδοτήστε το κύκλωμα από τριφασικό τροφοδοτικό **230V** (φασική τάση), **μηδενικής σύνθετης αντίστασης** και μετρήστε την τάση εισόδου στη συστοιχία. Θεωρώντας αυτό το μέγεθος ως διάνυσμα αναφοράς, υπολογίστε ρεύμα και ισχύ (ενεργό, άεργο, φαινόμενη και συντελεστή ισχύος) σε μία φάση τροφοδοσίας. Τι ισχύει για τις άλλες δύο φάσεις; Εκτιμήστε την ωμική αντίσταση ενός λαμπτήρα από το λόγο τάσης προς ρεύμα. Σχεδιάστε τις συνδέσεις στο Σχήμα B.2.



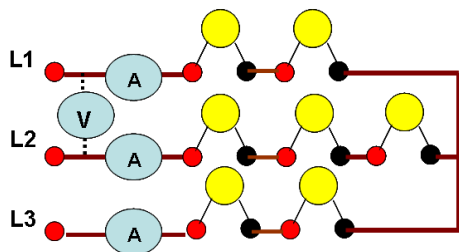
Σχήμα B.1



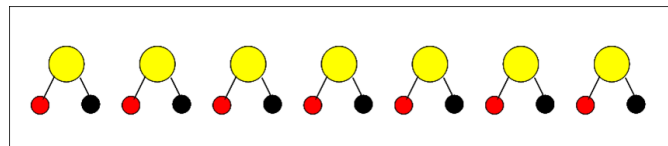
Σχήμα B.2

	L1	L2	L3
V(V) πολική			
I(A) γραμμής			
I(A) στο τρίγωνο			
S(VA)			
P(W)			
Q(VAr)			
Pf			
R _λ			

Γ) Συνθέστε **ασύμμετρο** τριφασικό κύκλωμα σε συνδεσμολογία **αστέρα (Υ) με γειωμένη την κοινή γραμμή**. Εάν τροφοδοτηθεί το κύκλωμα από τριφασικό τροφοδοτικό 230V (φασική τάση), μηδενικής σύνθετης αντίστασης υπολογίστε τάση, ρεύμα και ισχύ (ενεργό, άεργο, φαινόμενη και συντελεστή ισχύος) σε κάθε φάση τροφοδοσίας. Σχεδιάστε τις συνδέσεις στο Σχήμα Γ.2.



Σχήμα Γ.1

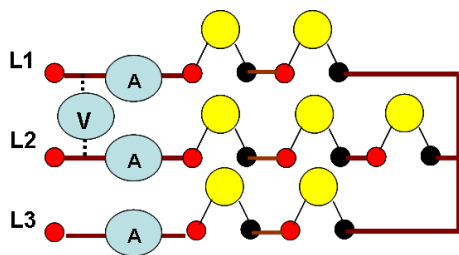


Σχήμα Γ.2

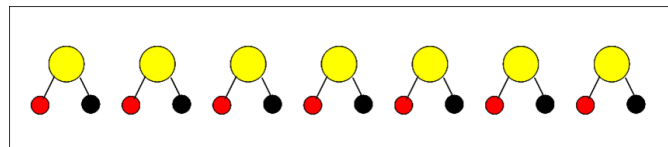
	L1	L2	L3	Σύνολο
V(V) πολική				
I(A) γραμμής				
V(V) φασική				
S(VA)				
P(W)				
Q(VAr)				
Pf				

Δ) Συνθέστε **ασύμμετρο** τριφασικό κύκλωμα σε συνδεσμολογία **αστέρα (Υ)** με **γειωμένη την κοινή γραμμή**. Εάν τροφοδοτηθεί το κύκλωμα από τριφασικό τροφοδοτικό **230V** (φασική τάση) και **σύνθετη αντίσταση $100j\Omega$** υπολογίστε τάση, ρεύμα και ισχύ (ενεργό, άεργο, φαινόμενη και συντελεστή ισχύος) σε κάθε φάση τροφοδοσίας. Σχεδιάστε τις συνδέσεις στο Σχήμα Δ.2.

Συγκρίνεται τα διαγράμματα τάσης και ρεύματος με τα αντίστοιχα του ερωτήματος Γ και καταγράψτε τις παρατηρήσεις σας.



Σχήμα Δ.1

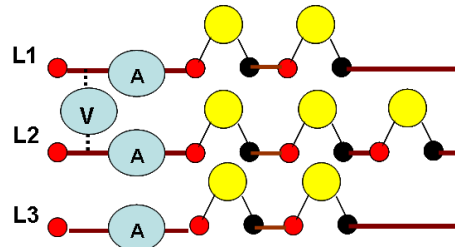


Σχήμα Δ.2

	L1	L2	L3	Σύνολο
V(V) πολική				
I(A) γραμμής				
V(V) φασική				
S(VA)				
P(W)				
Q(VAr)				
Pf				

Για εξάσκηση! (Προαιρετικά)

Ε) Συνθέστε **ασύμμετρο** τριφασικό κύκλωμα σε συνδεσμολογία **αστέρα (Υ) ΧΩΡΙΣ γείωση στον κοινό κόμβο**. Εάν τροφοδοτηθεί το κύκλωμα από τριφασικό τροφοδοτικό **230V** (φασική τάση) μηδενικής σύνθετης αντίστασης υπολογίστε τάση και ρεύμα γραμμής και συγκρίνετε με τ' αντίστοιχα αποτελέσματα του ερωτήματος Γ. Τι παρατηρείτε;



Σχήμα Ε.1

Παράρτημα ΙΙ:

Βιβλιογραφία

- [1] Εμμανουήλ Ν. Πρωτονατάριος, Μιχαήλ Ε. Θεολόγου 1995. Μαθήματα Ειδικής Ηλεκτροτεχνίας – Γραμμικά Κυκλώματα. Εκδόσεις Συμμετρία.
- [2] Ιωάννης Προυσαλίδης 2014, Βασικές Αρχές Ηλεκτροτεχνίας. Εκδόσεις Ι. Σιδέρης
- [3] Ιωάννης Προυσαλίδης 2012, Ηλεκτροτεχνικές Εφαρμογές σε Πλοία και Πλωτές Κατασκευές, εκδόσεις Συμμετρία.
- [4] Κ. Βουρνάς, Γ. Κοντοζής 2010, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, εκδόσεις Συμμετρία.
- [5] Χ. Φραγκόπουλος, Ι. Προυσαλίδης 2019. Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου, εκδόσεις Da Vinci.
- [6] Nives Vidak, Marine Engineering Course, Dubrovnik 2016
- [7] Journal of Marine Engineering & Technology: Automated Control System with Process of the use of Ship's Power Station. Jan Idzikowski & Grzegorz Grzeczka 2017.
- [8] Royal Belgian Institute of Marine Engineers: The ship's electrical network, engine control and automation by Kari Valkeekarvi, Marine Technology, Wartsila Corporation.
- [9] Marine Machinery Systems – Tools and Architecture, Egil Christoffer Sandbakken 2010 Norwegian University of Science and Technology.
- [10] Dennis T. Hall B.A. Practical Marine Electrical Knowledge, publishers Witherby 1999.
- [11] Ship Systems Automation Technology, ASNE Intelligent Ship Symposium 1994 – Reprint Ship Systems Automation Technology.
- [12] 12th Century Ship Automation Systems, Sarp Gurenli, Yildiz Technical University – Naval Architecture and Maritime Faculty – Department of Naval Architecture & Marine Engineering, December 2019
- [13] Massachusetts Institute of Technology – Department of Electrical Engineering and Computer Science 6.061 Introduction to Power Systems. Class notes Chapter 9: Synchronous Machine and Winding Models, J. L. Kirtley Jr.
- [14] Parallel Operation Program of Marine Power Station Simulation based on Visual C++, Haowen Chen, Ming Bai, Rui Zhang, Weishan Li, Runda Lu, Jieqi Zou – International Symposium of Energy Science and Chemical Engineering 2015.
- [15] Python GUI Programming Cookbook - Second Edition By Burkhard Meier May 2017.
- [16] John Grayson, Python and Tkinter Programming Paperback – Illustrated, January 1, 2000