

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

**ΘΕΜΑ: “ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΑΣΚΗΣΕΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ”**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ ΜΙΧΑΗΛ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ι.ΠΡΟΥΣΑΛΙΔΗΣ, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ 2018**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα αναπληρωτή καθηγητή της Σχολής, Κ. Ιωάννη Προυσαλίδη για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου και για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Δημοσθένη Σπαθή που με υποστήριξε όλο αυτό το διάστημα και με βοήθησε σε οποιαδήποτε δυσκολία αντιμετώπισα καθώς επίσης και για τη συνεισφορά του στην εκτέλεση των πειραματικών ασκήσεων που απαιτήθηκαν.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια όχι μόνο εκπόνησης της διπλωματικής αλλά και περάτωσης του συνόλου των σπουδών μου, όπως επίσης και σε όλους τους φίλους και αγαπημένα μου πρόσωπα.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες .....	2
Λίστα Εικόνων .....	6
Λίστα Σχημάτων .....	7
Πρόλογος .....	8
Abstract .....	9

### 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

1.1 Εισαγωγή στα ηλεκτρικά στοιχεία R,L,C.....	10
1.2 Σύνδεση ηλεκτρικών στοιχείων R,L,C.....	11
1.3 Τι ονομάζουμε μπαταρία, αντιστάτη, πυκνωτή, πηνίο.....	12
1.4 Βασικά χαρακτηριστικά των τριφασικών κυκλώματων.....	14
1.5 Μετασηματιστές .....	16
1.6 Εισαγωγή στις ηλεκτρικές μηχανές.....	18
1.6Α Μηχανές συνεχούς ρεύματος .....	20
1.6Β Σύγχρονες μηχανές ΕΡ.....	22
1.6Γ Ασύγχρονες μηχανές ΕΡ.....	25

### 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

2.1 1 <sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση Ηλεκτροτεχνίας .....	30
2.2 2 <sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση Ηλεκτροτεχνίας .....	33
2.3 Ηλεκτροτεχνικές Εφαρμογές και Εργαστήριο .....	36

### 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΠΛΟΙΩΝ-ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ

3.1 Εισαγωγή .....	42
3.2 Ηλεκτροπρόωση και Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο .....	43
3.3 Εξομοιωτής Ηλεκτρικού Δικτύου Πλοίου .....	44
3.4 Κεντρικό Σύστημα Παρακολούθησης και Λειτουργίας Συστήματος - PMS/EPMACS (ενοποιημένο SCADA παρακολούθησης, καταγραφής) .....	47
3.5 Διερεύνηση προβλημάτων ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος .....	50

## **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> ΜΕΛΕΤΗ ΕΞΟΜΟΙΩΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΛΟΙΟΥ**

4.1 Περιγραφή του υπό μελέτη συστήματος και του εξοπλισμού που το απαρτίζουν.....51

4.2 Ανάλυση τρόπου λειτουργίας του grid emulator .....53

## **Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

5.1 Γενικά Συμπεράσματα .....69

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....70

**Παράρτημα Α** .....71

**Παράρτημα Β**.....77

**Βιβλιογραφία**.....84

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Μπαταρία .....	13
Εικόνα 1.2 Αντιστάτης .....	13
Εικόνα 1.3 Πηνίο .....	13
Εικόνα 1.4 Πυκνωτής .....	13
Εικόνα 1.5 Διάταξη δρομέα κλωβού .....	26
Εικόνα 1.6 Διάταξη δρομέα με δακτυλίους .....	27
Εικόνα 1.7 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή όπου βασίζεται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα .....	28
Εικόνα 4.1 SLD - 0 GEN – 0 .....	54
Εικόνα 4.2 GEN2 - 0 GEN - 0 LOAD .....	55
Εικόνα 4.3 GEN2 – 1 GEN – 0 LOAD .....	56
Εικόνα 4.4 R - L LOAD .....	57
Εικόνα 4.5 SLD - 1 GEN – LOAD 1600 R-L .....	58
Εικόνα 4.6 SLD – 1 GEN - LOAD 3200 R-L .....	59
Εικόνα 4.7 GEN 3 – AUTO SYNCH – BEFORE .....	60
Εικόνα 4.8 GEN 3 – AUTO SYNCH – AFTER .....	61
Εικόνα 4.9 SLD – 2 GEN – LOAD 3200 R-L .....	62
Εικόνα 4.10 SLD – 2 – GEN LOAD 4800 R – L .....	63
Εικόνα 4.11 MOTOR 1 - OPEN 1500 RPM .....	64
Εικόνα 4.12 MOTOR 1 - CLOSED 1500 RPM .....	65
Εικόνα 4.13 SLD -2 GEN – LOAD 4800 R – L – MOTOR 1 1500 RPM .....	66
Εικόνα 4.14 SLD – 2 GEN – LOAD 4800 R-L – MOTOR 1 1450 RPM .....	67
Εικόνα 4.15 SLD – 2 GEN – LOAD 4800 R-L - MOTOR 1 1400 RPM .....	68
Εικόνα 4.16 SLD – 2 GEN – LOAD 4800 R-L – MOTOR 1 1350 RPM .....	69

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 Σύνδεση αντιστάσεων σε σειρά .....	11
Σχήμα 2 Σύνδεση αντιστάσεων παράλληλα .....	11
Σχήμα 3 Τυπική συνδεσμολογία αστέρα και τριγώνου .....	15
Σχήμα 4 Διάταξη Μετασχηματιστή .....	16
Σχήμα 5 Διπολική Μηχανή .....	20
Σχήμα 6 Τετραπολική Μηχανή .....	20
Σχήμα 7 Αναπαράσταση του τυλίγματος τυμπάνου μέσα στις αυλακώσεις .....	21
Σχήμα 8 Τομή σύγχρονης μηχανής .....	22
Σχήμα 9 Τρίγωνο ισχύος συμμετρικών τριφασικών συστημάτων .....	35
Σχήμα 10 Τροφοδοτικά D.C 0-30 V, 0-5 A .....	39
Σχήμα 11 Μετατροπέας 1φ 220/50 Hz σε 3φ 380/ 0-50 Hz .....	39
Σχήμα 12 Οι γεννήτριες προς παραλληλισμό (σημειώνονται οι τρεις φάσεις “a”, “b”, “c”) .....	40
Σχήμα 13 Αυτοσχέδια διάταξη ελέγχου συνθηκών και υλοποίησης του παραλληλισμού .....	40
Σχήμα 14 Διάγραμμα του πειραματικού συστήματος .....	45
Σχήμα 15 Απλοποιημένο διάγραμμα του πειραματικού συστήματος .....	46
Σχήμα 16 Καμπύλη ισχύος – ταχύτητας περιστροφής κινητήρα επαγωγής .....	46
Σχήμα 17 Αρχιτεκτονική του δικτύου δεδομένων .....	49

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Μέτρηση τάσης μπαταριών .....	30
Πίνακας 2.2 Μέτρηση τάσης μπαταριών σε σειρά .....	30
Πίνακας 2.3 Μέτρηση τάσης μπαταριών παράλληλα .....	31
Πίνακας 2.4 Πειραματική μέτρηση επαγωγής πηνίων .....	31
Πίνακας 2.5 Μέτρηση επαγωγής σε σειρά και παράλληλα .....	31
Πίνακας 2.6 Πειραματική μέτρηση χωρητικότητας πυκνωτών .....	32
Πίνακας 2.7 Μέτρηση χωρητικότητας σε σειρά και παράλληλα .....	32
Πίνακας 2.8 Πειραματική μέτρηση αντίστασης αντιστατών .....	32
Πίνακας 2.9 Μέτρηση αντίστασης σε σειρά και παράλληλα .....	32
Πίνακας 2.10 Μετρήσεις συμμετρικού τριφασικού κυκλώματος σε συνδεσμολογία (Υ) .....	33
Πίνακας 2.11 Μετρήσεις συμμετρικού τριφασικού κυκλώματος σε συνδεσμολογία (Δ) .....	33
Πίνακας 2.12 Μετρήσεις ασύμμετρου τριφασικού κυκλώματος σε συνδεσμολογία (Υ) .....	34
Πίνακας 2.13 Τάση τυλίγματος με πρωτεύον σε (Υ) και δευτερεύον σε (Δ) .....	36
Πίνακας 2.14 Τάση τυλίγματος με πρωτεύον και δευτερεύον σε (Υ) .....	36
Πίνακας 2.15 Ωμομέτρηση τυλιγμάτων κινητήρα .....	37
Πίνακας 2.16 Ωμομέτρηση τυλιγμάτων γεννήτριας .....	37
Πίνακας 2.17 Αποτελέσματα με λειτουργία γεννήτριας χωρίς διέγερση και χωρίς φορτίο .....	38
Πίνακας 2.18 Αποτελέσματα με λειτουργία γεννήτριας σε διέγερση και κενό φορτίο .....	38
Πίνακας 4.1 Βασικά χαρακτηριστικά του grid emulator .....	51

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι διπλός αφού αρχικά επιδιώκει την καλύτερη εξοικείωση του αναγνώστη με βασικούς όρους της Ηλεκτροτεχνίας και των Ηλεκτρικών Μηχανών μέσα από θεωρητικές και πειραματικές προσεγγίσεις. Επιπλέον, ο αναγνώστης έρχεται σε επαφή με την καινοτόμα τεχνολογία του Εξομοιωτή Ηλεκτρικού Δικτύου Πλοίου για τη διερεύνηση ζητημάτων βελτιστοποιημένου σχεδιασμού και λειτουργίας των υποσυστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων υπό το πρίσμα της εξοικονόμησης ενέργειας και της φιλικότητας προς το περιβάλλον. Γι αυτό το λόγο, περιλαμβάνονται θεωρητικές αναλύσεις, προσομοιώσεις και πειραματικές δοκιμές που καθιστούν την τεχνολογία αυτή πιο κατανοητή.

Λόγω της πειραματικής φύσης της εργασίας χρειάστηκαν πέραν του συμβατικού εξοπλισμού (καλώδια, βύσματα, ασφάλειες και τροφοδοτικά) και όργανα ακριβείας όπως το Fluke Power Analyzer, Dranetz BMI PX5-400 καθώς και τα αντίστοιχα λογισμικά τους για την καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων στον Η/Υ.

Ειδικότερα, η εργασία αυτή αποτελείται από τέσσερα μέρη όπου:

- Το πρώτο μέρος αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο της λειτουργίας των σύγχρονων και των ασύγχρονων μηχανών καθώς και αναλυτικότερη επεξήγηση βασικών εννοιών της ηλεκτροτεχνίας όπως τα τριφασικά κυκλώματα.
- Το δεύτερο μέρος παρουσιάζει όλα τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ασκήσεων Ηλεκτροτεχνίας και Ηλεκτροτεχνικών εφαρμογών τα οποία καταγράφηκαν με βίντεο για την καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη.
- Το τρίτο μέρος ασχολείται θεωρητικά με τον εξομοιωτή ηλεκτρικού δικτύου πλοίου (grid emulator) και τη σημαντική συμβολή του για τη βέλτιστη διανομή και επιθεώρηση της ηλεκτρικής ισχύος στα διάφορα συστήματα του πλοίου με σημαντικότερο κριτήριο την μείωση της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος.
- Το τέταρτο μέρος και το πιο σημαντικό αποτελεί τη ρύθμιση, τη λειτουργία ~~και~~ του grid emulator της MARINELIVE που βρίσκεται στους εργαστηριακούς χώρους της Σχολής καθώς και την καταγραφή μετρήσεων μέσω Η/Υ για διάφορες συνθήκες λειτουργίας.



## **ABSTRACT**

The main goal of this bachelor's thesis is to introduce the basic terms of Electrology and Electric Machines to the reader via theoretical and experimental approaches. In addition, the reader has the opportunity to get in contact with the innovative technology of the Ship's Power Network Simulator to explore optimized design and operational issues of the ships' power sub-systems in terms of energy saving and environmental friendliness. For this reason, theoretical analysis, simulations and experimental tests are used in the present assignment in order to make this technology more comprehensible.

Due to the experimental nature of the work, besides the conventional equipment (cables, plugs, fuses and power supplies), precision instruments were used as well, such as Fluke Power Analyzer, Dranetz BMI PX5-400 and their software for recording and storing of the measurements in the computer.

To be more specific, the present bachelor's thesis consists of four parts:

- In the first part, the theoretical background of the modern and asynchronous machines' operation and a more detailed explanation of basic concepts of electrotechnics, such as the three-phase circuits, are analyzed.
- In the second part, there is a presentation of the results of the laboratory exercises of Electrotechnics and Electrotechnical Applications, which were recorded with video for a better understanding of the reader.
- In the third part, there is a theoretical study of the grid emulator and its important contribution to the optimal distribution and inspection of the electrical power in the various ship systems, setting the reduction of the marine environment's pollution as the major criterion.
- In the last and most important part, the adjustment and the operation of the grid emulator of MARINELIVE, which is located in the University's Laboratory premises, are analyzed and there are presented the recordings of measurements made via PC for various operating conditions.

# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## Βασικές έννοιες των ηλεκτρικών κυκλωμάτων

### 1.1 Εισαγωγή στα ηλεκτρικά στοιχεία R,L,C

Αρχικά, είναι αναγκαίο να οριστούν και να επεξηγηθούν τα βασικότερα ηλεκτρικά στοιχεία για την καλύτερη κατανόηση των όσων θα περιγραφούν παρακάτω. Έτσι, υποθέτοντας ότι υπάρχει μια ηλεκτρική αντίσταση  $R$  τάση  $V(t)$  στα άκρα της η οποία είναι μια συνάρτηση του χρόνου  $t$ , τότε η αντίσταση αυτή διαρρέεται από ρεύμα  $I(t)$ , ώστε για κάθε  $t$  να ισχύει:

$$V(t) = R \cdot I(t),$$

με την παραπάνω σχέση να αποτυπώνει το γνωστό νόμο του Ohm.

Η ηλεκτρική αντίσταση  $R$  αναφέρεται σαν **“ωμική” αντίσταση** και ορίζεται ως η δυσκολία μετακίνησης των φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος.

Υποθέτουμε τώρα ότι έχουμε ένα πηνίο με συντελεστή αυτεπαγωγής  $L$ . Αν  $V(t)$  είναι η τάση στα άκρα του και  $I(t)$  το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο, τότε ισχύει:

$$V(t) = L \, dI(t)/dt$$

Το πηνίο αναφέρεται συχνά και σαν **“αυτεπαγωγή”** και ορίζεται ως η δυσκολία αλλαγής κινητικής κατάστασης των ηλεκτρικών φορέων. Υποτίθεται ότι είναι  $L$  σταθερό.

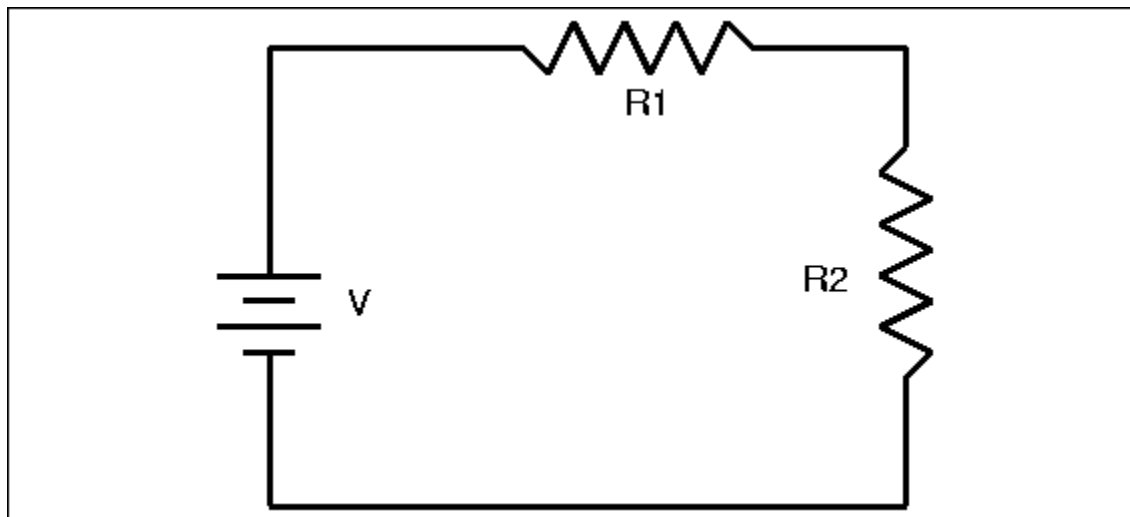
Αν τώρα έχουμε πυκνωτή με χωρητικότητα  $C$ , με τάση  $V(t)$  στα άκρα του, που διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I(t)$ , τότε ισχύει:

$$I(t) = C \, dV(t)/dt, \text{ όπου } C \text{ σταθερή ποσότητα.}$$

Ως **χωρητικότητα** ορίζεται η εφαρμογή μια διαφοράς δυναμικού μεταξύ δύο αγωγών που βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους που οδηγεί στην ανάπτυξη ενός ηλεκτρικού πεδίου λόγω του συσσωρευόμενου ηλεκτρικού φορτίου.

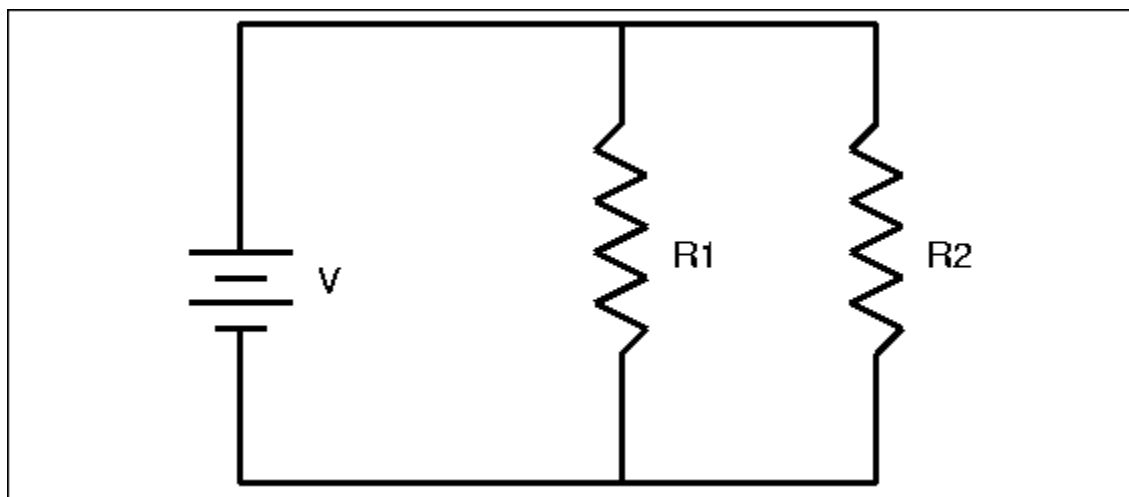
## 1.2 Σύνδεση ηλεκτρικών στοιχείων L,C,R

Είναι γνωστό ότι δύο στοιχεία με αντιστάσεις  $R_1, R_2$  είναι συνδεδεμένα σε σειρά όταν διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα  $I$ , δηλαδή το ρεύμα που διαρρέει το ένα, στη συνέχεια διαρρέει και το άλλο. Συνεπώς  $R=R_1+R_2$ , όπου  $R$  η ολική αντίσταση των στοιχείων.



Σχήμα 1. Σύνδεση αντιστάσεων σε σειρά

Αντίστοιχα, όταν δύο στοιχεία είναι συνδεδεμένα ώστε να έχουν τους ίδιους ακροδέκτες, τότε εμφανίζεται παράλληλη σύνδεση. Συνεπώς,  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ , όπου  $R$  η ολική αντίσταση.



Σχήμα 2. Σύνδεση αντιστάσεων παράλληλα

### **1.3 Τι ονομάζουμε “μπαταρία”, αντιστάτη, πηνίο, πυκνωτή;**

Ο όρος **μπαταρία** σημαίνει ότι δύο ή περισσότερα ηλεκτρικά στοιχεία έχουν ενωθεί μεταξύ τους για να δώσουν μαζί την ενέργεια τους (βλ. Εικόνα 1.1). Πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος μπαταρία και για τα μεμονωμένα στοιχεία. Τα στοιχεία μπορούν να ενωθούν σε σειρά, παράλληλα, ή σε συνδυασμό των δύο.

Όταν ενώνονται ο θετικός πόλος του ενός με τον αρνητικό πόλο του δευτέρου, τότε θεωρούμε ότι είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Στην περίπτωση αυτή, η μπαταρία έχει τάση ίση με το άθροισμα των τάσεων των επί μέρους στοιχείων, ενώ η χωρητικότητα της παραμένει όση η χωρητικότητα του ενός στοιχείου.

Όταν ενώνονται όλοι οι θετικοί πόλοι μαζί και αντιστοίχως όλοι οι αρνητικοί μαζί, λέμε ότι είναι ενωμένα παράλληλα. Στην περίπτωση αυτή αθροίζονται οι χωρητικότητες όλων των στοιχείων, ενώ η τάση της παραμένει όση και η τάση ενός στοιχείου.

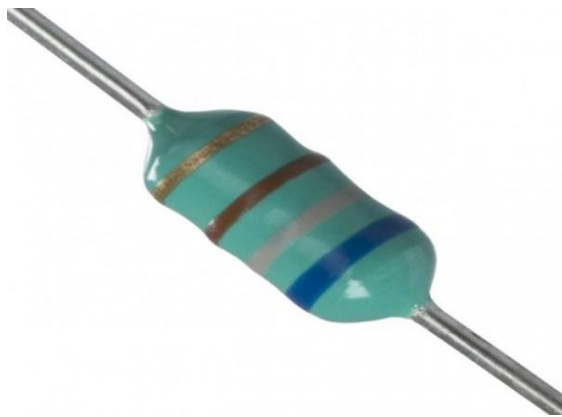
**Αντιστάτης** καλείται ένα διακριτό ηλεκτρικό στοιχείο το οποίο εμφανίζει κυρίως συμπεριφορά ωμικής αντίστασης (βλ. Εικόνα 1.2). **Πηνίο** καλείται ένα διακριτό ηλεκτρικό στοιχείο το οποίο εμφανίζει κυρίως συμπεριφορά επαγωγής (βλ. Εικόνα 1.3). Τέλος, **πυκνωτής** καλείται το διακριτό ηλεκτρικό στοιχείο, το οποίο εμφανίζει κυρίως συμπεριφορά χωρητικότητας (βλ. Εικόνα 1.4). Παρακάτω, παρουσιάζονται αντίστοιχες εικόνες για τις παραπάνω έννοιες.



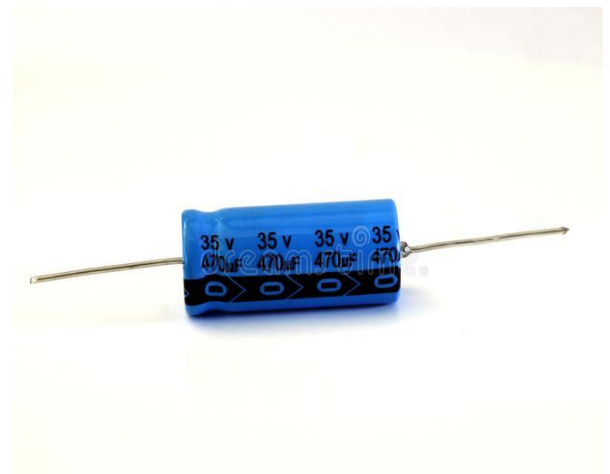
**Εικόνα 1.1 Μπαταρία**



**Εικόνα 1.2 Αντιστάτης**



**Εικόνα 1.3 Πηνίο**



**Εικόνα 1.4 Πυκνωτής**

## 1.4 Βασικά χαρακτηριστικά τριφασικών κυκλωμάτων

Τα τριφασικά κυκλώματα Ε.Ρ. αποτελούν τη σπουδαιότερη κατηγορία κυκλωμάτων Ε.Ρ., αφού χρησιμοποιούνται σε ευρεία κλίμακα στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η πλειονότητα των ηλεκτρικών μηχανών είναι τριφασικές, λόγω των καταλυτικών πλεονεκτημάτων τους έναντι των μονοφασικών (υψηλότερη απόδοση, υψηλότερη ροπή, λιγότερος θόρυβος κλπ.)

Αναλυτικότερα, πρόκειται για ηλεκτρικά δίκτυα στα οποία αναγνωρίζεται ότι υπάρχει ομοιότητα μεταξύ τριών υπό-κυκλωμάτων. Εάν αυτή η ομοιότητα ικανοποιεί συγκεκριμένους περιορισμούς τότε μπορεί η επίλυση να γίνει ευκολότερα με ένα μόνο από τα τρία υπό-κυκλώματα (το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα).

Οι δύο πιο χαρακτηριστικές συνδεσμολογίες είναι η συνδεσμολογία **αστέρα (Υ)** και η συνδεσμολογία **τρίγωνου (Δ)**.

Η **φασική τάση** του αστέρα συμπίπτει με τη φασική τάση του τριφασικού συστήματος και η **πολική τάση** συμπίπτει με την αντίστοιχη πολική του συστήματος. Άρα, έχουμε:

$$V_{y\phi} = V_{\phi}$$

$$V_{y\pi} = V_{\pi}$$

$$V_{y\phi} = \frac{V_{y\pi}}{\sqrt{3}}$$

Ουσιαστικά, φασική τάση καλείται η διαφορά δυναμικού (τάση) μεταξύ του αγωγού μίας φάσεως και του ουδέτερου ή της γης. Αντίστοιχα, πολική τάση καλείται η διαφορά δυναμικού (τάση) μεταξύ των αγωγών δύο φάσεων.

Επιπλέον, τα ρεύματα που ρέουν στις φάσεις του αστέρα είναι ίδια με τα ρεύματα που ρέουν στις αντίστοιχες φάσεις (πόλους του συστήματος). Άρα, έχουμε:

$$I_{y\phi} = I_{\pi}$$

Συνεπώς, **ρεύμα γραμμής** καλείται το ρεύμα που εξέρχεται από το σύστημα των πηγών, διαρρέει τα καλώδια τροφοδοσίας και τροφοδοτεί τα συστήματα των καταναλωτών (φορτίων). Τέλος, **αντίσταση ανά φάση  $Z_{\phi}$** , καλείται η αντίσταση που εμφανίζει ένα σύστημα καταναλωτών ως προς τον αγωγό τροφοδοσίας κάθε φάσεως (η σύνθετη αντίσταση που συναντά το ρεύμα γραμμής).

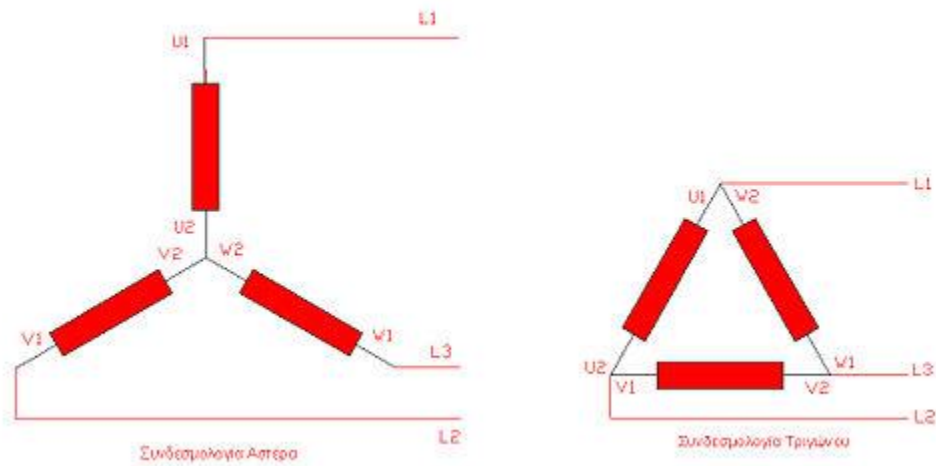
Από την άλλη μεριά, στη συνδεσμολογία **τρίγωνου (Δ)** ισχύει ότι το ρεύμα του πόλου είναι το διανυσματικό άθροισμα των φασικών ρευμάτων των δύο φάσεων του φορτίου που συνδέονται στον εν λόγω πόλο (σύμφωνα με τον 1<sup>ο</sup> κανόνα του Kirchoff). Επομένως:

$$I_{d\phi} = \frac{I_{\pi}}{\sqrt{3}}$$

Αντίθετα, η φασική τάση του φορτίου και η πολική τάση του φορτίου είναι ίσες και μάλιστα ίσες και με την αντίστοιχη πολική τάση του τριφασικού συστήματος. Δηλαδή:

$$V_{d\phi} = V_{d\pi} = V_{\pi} = \sqrt{3}V_{\phi}$$

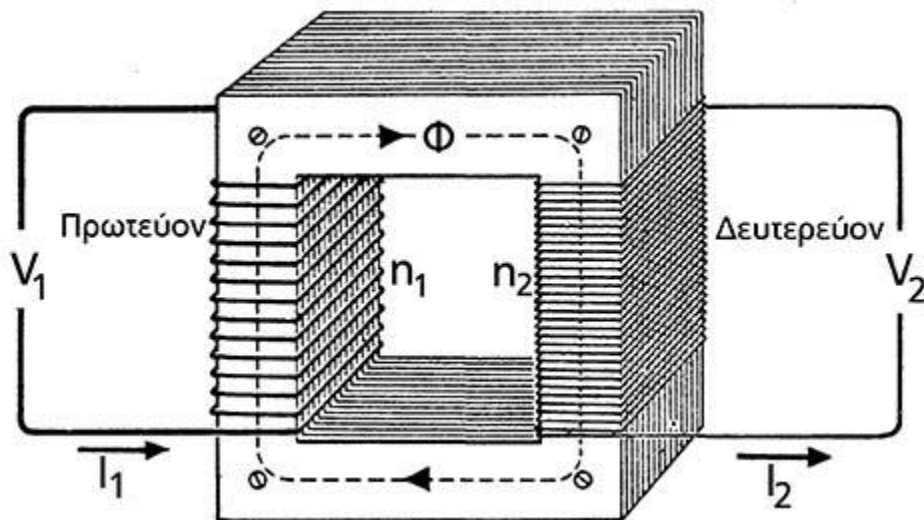
Η συνδεσμολογία **αστέρα (Y)** και **τριγώνου (Δ)** όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, έχει ένα κοινό σημείο, το οποίο ονομάζεται ουδέτερος του φορτίου και συνδέεται με τον ουδέτερο του τριφασικού συστήματος τάσεων ενώ του τριγώνου δεν παρουσιάζει κανένα κοινό σημείο.



**Σχήμα 3. Τυπική συνδεσμολογία αστέρα και τριγώνου**

## 1.5 Μετασχηματιστές

Ο μετασχηματιστής είναι ηλεκτρική μηχανή που μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε επίσης ηλεκτρική ενέργεια υπό διαφορετική όμως τάση. Ειδικότερα, αποτελεί βέβαια μη στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή που στην πιο απλή μορφή του αποτελείται, από δύο πηνία, περιτυλιγμένα γύρω από τον πυρήνα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4. Διάταξη Μετασχηματιστή

Η λειτουργία του βασίζεται στο φαινόμενο της επαγωγής. Συμβατικά, το ένα πηνίο που ονομάζεται πρωτεύον επιβάλλεται τάση, που ισοδυναμεί με επιβολή μαγνητικού πεδίου σε αυτό το τυλίγμα, και το άλλο που ονομάζεται δευτερεύον αντιδρά στην εξωτερική επιβολή με ανάπτυξη επαγόμενης τάσης (ΗΕΔ) στα άκρα του, που τείνει να εξουδετερώσει το μαγνητικό πεδίο. Η αντίδραση αυτή είναι τόσο πιο έντονη, όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός των ελιγμάτων (σπειρών) του τυλιγματος, ενώ επίσης εξαρτάται και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων. Ο λόγος:

$$\alpha = \frac{N_1}{N_2},$$

ονομάζεται λόγος μετασχηματισμού. Οι τάσεις  $V_1, V_2$  είναι εναλλασσόμενες της ίδιας συχνότητας  $f$ . Αν  $\alpha > 1$  τότε ο μετασχηματιστής υποβιβάζει την τάση  $V_1$  ενώ αν  $\alpha < 1$  τότε



ανυψώνει την τάση  $V_1$ . Ο μετασχηματιστής έχει δύο ονομαστικές τάσεις: μία για το πρωτεύον ( $V_{1on}$ ) και μια για το δευτερεύον ( $V_{2on}$ ) και ισχύει:

$$\alpha = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_{1on}}{V_{2on}},$$

δηλαδή ο λόγος των ονομαστικών τάσεων είναι πάντα ίσος με το λόγο μετασχηματισμού. Η ονομαστική ισχύς είναι ίδια για το πρωτεύον και το δευτερεύον και φυσικά, όπως σ' όλες τις υπόλοιπες ηλεκτρικές μηχανές, δεν είναι υποχρεωτικό ο μετασχηματιστής να λειτουργεί στα ονομαστικά του μεγέθη.

## 1.6 Εισαγωγή στις ηλεκτρικές μηχανές

Μια στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή αποτελείται από δύο μέρη: α) τον στάτη (stator) που είναι το ακίνητο μέρος και β) το δρομέα (rotor) που είναι το περιστρεφόμενο μέρος και ανάμεσα τους υπάρχει το διάκενο της μηχανής. Επιπλέον, στο δρομέα είναι προσαρμοσμένος και ο άξονας της μηχανής ώστε να αποτελούν ένα σώμα.

Αναλυτικότερα, ο άξονας (και ο δρομέας) περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega_m$  που ονομάζεται μηχανική γωνιακή ταχύτητα ή συχνότητα  $f_m$  που ονομάζεται μηχανική συχνότητα ώστε να ισχύει, όπως είναι γνωστό από την περιστροφική κίνηση:

$$\omega_m = 2 \pi f_m$$

Αν ο δρομέας εκτελεί  $n$  περιστροφές ανά λεπτό, τότε έχουμε:

$$f_m = \frac{n}{60} \Rightarrow \omega_m = 2\pi \frac{n}{60} \text{ rpm}$$

Μια στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή μπορεί να είναι είτε ηλεκτρική γεννήτρια είτε ηλεκτρικός κινητήρας. Ειδικότερα, η ηλεκτρική γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική και, συνεπώς, αν ο άξονας περιστρέφεται με μηχανική ροπή  $T_m$  τότε η γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ισχύ  $P_e$  που δίνεται από τον τύπο:

$$P_m = T_m \omega_m$$

Η ισχύς αυτή μπαίνει στην ηλεκτρική γεννήτρια και μετατρέπεται, οπότε εξέρχεται ως ηλεκτρική ισχύς  $P_e$  που λόγω ισχύς απωλειών  $P_a$  μέσα στη μηχανή είναι πάντα μικρότερη της  $P_m$ . Δηλαδή:

$$P_m = P_a + P_e$$

και ο βαθμός αποδόσεως  $k$  είναι:

$$k = \frac{P_e}{P_m}$$

Από τη φορά της ροής της ισχύος σε μία ηλεκτρική γεννήτρια ο άξονας μπορεί να θεωρηθεί είσοδος της μηχανής ενώ οι (ηλεκτρικοί) ακροδέκτες η έξοδος της μηχανής. Έτσι, η μηχανική ισχύς αναφέρεται και ως ισχύς εισόδου της γεννήτριας ενώ η ηλεκτρική ισχύς ως ισχύς εξόδου. Άρα, ο βαθμός αποδόσεως  $k$  είναι:  $k = \frac{P_{out}}{P_{in}}$

Από την άλλη, ο ηλεκτρικός κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ  $P_e$  σε μηχανική  $P_m$ . Ειδικότερα, παρέχουμε ηλεκτρική ισχύ  $P_e$  στους ακροδέκτες της μηχανής και παίρνουμε μηχανική ισχύ στον άξονα της. Επομένως, για δεδομένη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του άξονα  $\omega_m$  και δεδομένη ροπή  $T_m$ , η μηχανική ισχύς θα ισούται με:

$$P_m = T_m \omega_m$$

Αντίστοιχα, η ηλεκτρική ισχύς  $P_e$  που μπαίνει στη μηχανή μετατρέπεται στη μηχανική ισχύ  $P_m$ . Ένα μέρος όμως μετατρέπεται σε απώλειες  $P_a$ , έτσι έχουμε όπως και για την ηλεκτρική γεννήτρια:

$$P_e = P_a + P_m,$$

και βαθμό απόδοσης:

$$k = \frac{P_m}{P_e}$$

Η φορά ροής της ισχύος στο κινητήρα είναι αντίθετη απ' αυτή της γεννήτριας, οπότε είσοδος θεωρούνται οι ακροδέκτες του κινητήρα ενώ έξοδος είναι ο άξονας του. Ως εκ τούτου, ισχύς εισόδου  $P_{in}$  είναι η ηλεκτρική ισχύς  $P_e$  ενώ ισχύς εξόδου η μηχανική ισχύς  $P_m = P_{out}$ . Ο βαθμός αποδόσεως είναι:

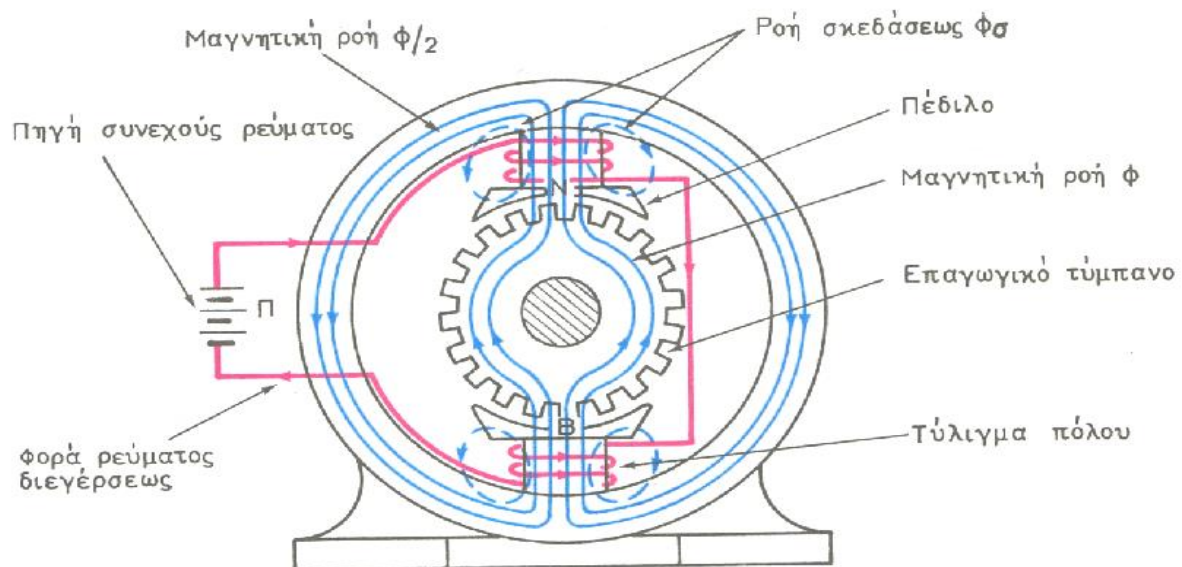
$$k = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Τέλος, η μετατροπή της ισχύος από τη μία μορφή στην άλλη γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

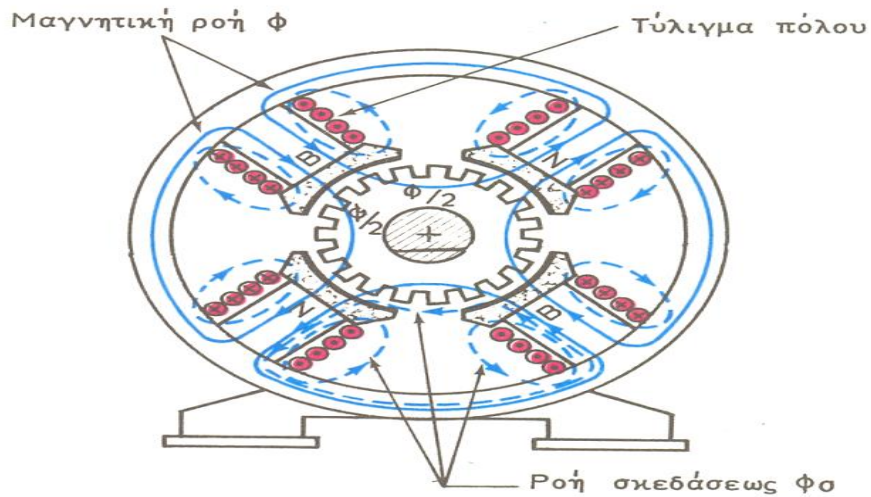
## 1.6A Μηχανές συνεχούς ρεύματος (D.C.)

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος (γεννήτριες ή κινητήρες) μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική (στο συνεχές ρεύμα) όταν λειτουργούν ως γεννήτριες και την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική όταν λειτουργούν ως κινητήρες.

Το τύλιγμα πεδίου ή διεγέρσεως  $f$  τοποθετείται στο στάτη και τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα  $I_f$ . Ειδικότερα, τοποθετείται σε προεξοχές που φέρει ο στάτης, και καθώς οι δύο απέναντι (αντιδιαμετρικές) προεξοχές διαρρέονται από ρεύμα, προκαλείται μαγνητικό πεδίο παρόμοιο με αυτό ενός ραβδόμορφου μαγνήτη. Γι' αυτό, οι προεξοχές ονομάζονται "έκτυποι" πόλοι και εμφανίζονται κατά ζεύγη γι αυτό ο αριθμός τους είναι πάντα άρτιος. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι διατάξεις μιας διπολικής και μιας τετραπολικής μηχανής.

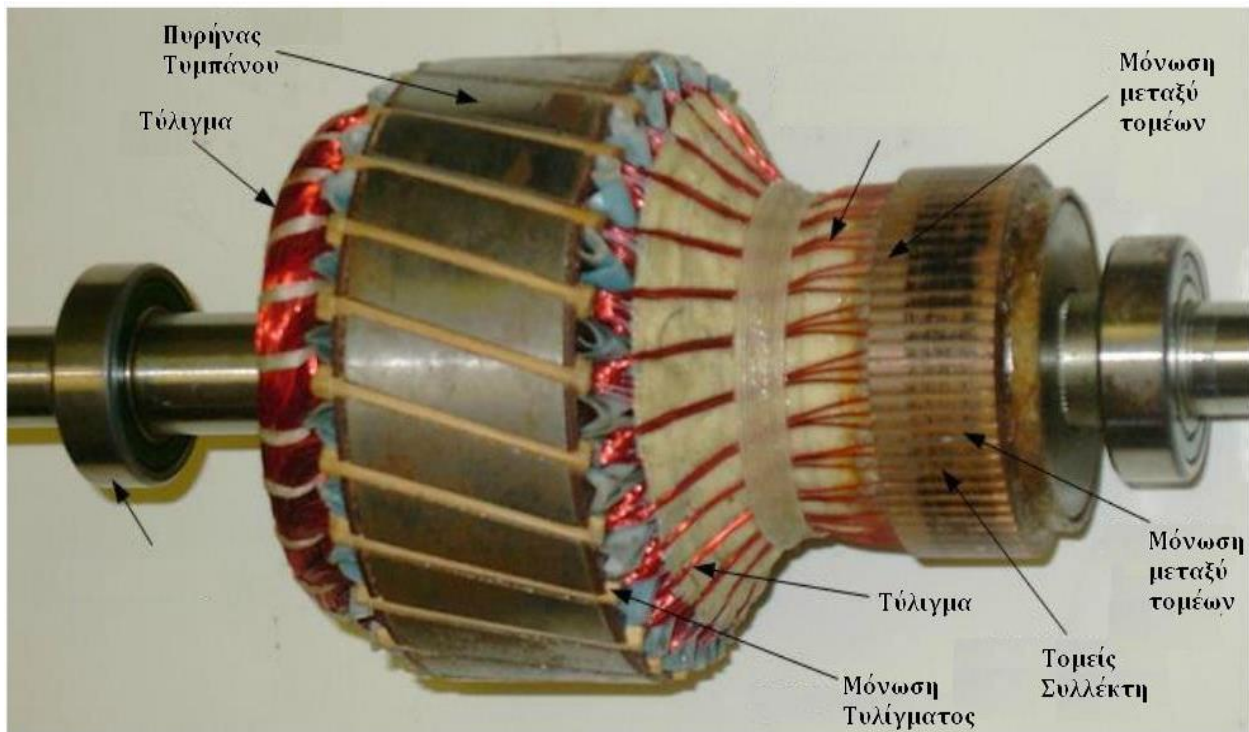


Σχήμα 5. Διπολική Μηχανή



**Σχήμα 6.** Τετραπολική Μηχανή

Το τύλιγμα τυμπάνου είναι τοποθετημένο στο δρομέα μέσα σε αυλακώσεις που είναι παράλληλες στον άξονα της μηχανής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 7.** Αναπαράσταση του τυλίγματος τυμπάνου μέσα στις αυλακώσεις

Καθώς ο δρομέας περιστρέφεται, περιστρέφεται και το τύλιγμα τυμπάνου. Τέλος, η ηλεκτρική επαφή εξασφαλίζεται με τη βοήθεια των "ψηκτρών", που ολισθαίνοντας εξασφαλίζουν την αγώγιμη σύνδεση.

## 1.6B Σύγχρονες Μηχανές ΕΡ (A.C)

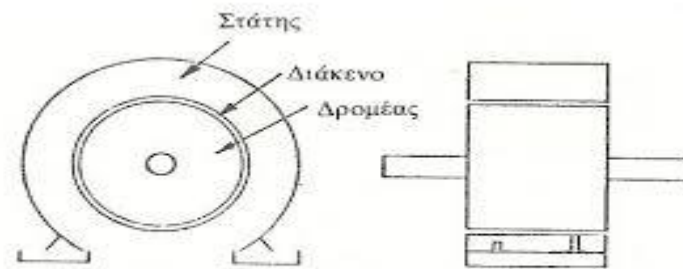
Οι σύγχρονες μηχανές είναι μηχανές διπλής τροφοδότησης όπου το τύλιγμα διέγερσης βρίσκεται συνήθως στο δρομέα ενώ το τύλιγμα επαγωγισμού στο στάτη. Αναλυτικότερα, το τύλιγμα διέγερσης διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, αλλά δεδομένου ότι στρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα, το προκύπτον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι και αυτό στρεφόμενο. Επίσης, το τύλιγμα επαγωγισμού (τυμπάνου) βρίσκεται στο στάτη και αποτελείται από τρία τυλίγματα κατανομημένα στο χώρο κατά  $120^\circ$ , ενώ τα ρεύματα που τα διαρρέουν είναι εναλλασσόμενου ρεύματος συγκεκριμένης ηλεκτρικής συχνότητας. Το προκύπτον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι στρεφόμενο στο χώρο με ταχύτητα που ισούται με την ηλεκτρική συχνότητα των ρευμάτων και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα  $n_\sigma$  δίνεται από τη σχέση:

$$n_\sigma = 120 \frac{f}{P},$$

όπου η σύγχρονη ταχύτητα μετριέται σε rpm, ενώ η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι:

$$\omega_\sigma = 2\pi \frac{n}{60}, \text{ δηλαδή } \omega_\sigma = 4\pi \frac{f}{P} \text{ (r/s)}$$

Για σταθερή συχνότητα ρεύματος στο στάτη ( $f$ ) η ταχύτητα  $n_\sigma$  είναι σταθερή, αφού το  $P$  είναι σταθερό σε μια μηχανή. Η σταθερότητα του  $n_\sigma$  καθιστά τις σύγχρονες μηχανές πολύ χρήσιμες σε εφαρμογές όπου απαιτείται σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται δύο όψεις της σύγχρονης μηχανής.



**Σχήμα 8.** Τομή σύγχρονης μηχανής

Όσον αφορά τις σύγχρονες μηχανές, η σύγχρονη ηλεκτρική γεννήτρια έχει ευρύτατη χρήση και αποτελεί την συσκευή που μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η κινητήρια μηχανή (prime mover) δηλαδή η πηγή της κινητικής ή καλύτερα της μηχανικής ενέργειας μπορεί να είναι μια παλινδρομική μηχανή (ΜΕΚ), ένας ατμοστρόβιλος ή ακόμα και ένας υδροστρόβιλος.

Η γεννήτρια αποτελείται από δύο μέρη: το ακίνητο μέρος της που λέγεται στάτορας (στάτης-stator), στο οποίο υπάρχουν μαγνήτες (συγκεκριμένα ηλεκτρομαγνήτες) και το κινητό μέρος της που λέγεται ρότορας (δρομέας-rotor) στο οποίο υπάρχουν πηνία. Ο δρομέας της γεννήτριας μπορεί να είναι είτε κυλινδρικός, είτε έκτυπων πόλων.

Η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας οφείλεται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης δύο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, ανεξάρτητων μεταξύ τους, αυτού του τυλίγματος διέγερσης και του αντίστοιχου του τυλίγματος του επαγωγισμού. Στη σύγχρονη γεννήτρια ΕΡ, το τύλιγμα διέγερσης, βρίσκεται συνήθως στο δρομέα ενώ το τύλιγμα επαγωγισμού στο στάτη. Για την ακρίβεια, το τύλιγμα διέγερσης διαρρέεται από ΣΡ, αλλά δεδομένου ότι στρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα, το προκύπτον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δηλαδή η αντίστοιχη ΜΕΔ είναι στρεφόμενο. Από την άλλη, το τύλιγμα επαγωγισμού βρίσκεται στο στάτη και αποτελείται από τρία τυλίγματα κατανεμημένα στο χώρο κατά 120°, ενώ τα ρεύματα που τα διαρρέουν είναι ΕΡ συγκεκριμένης ηλεκτρικής συχνότητας. Επομένως, το προκύπτον Η/Μ πεδίο είναι στρεφόμενο στο χώρο με ταχύτητα που ισούται με την ηλεκτρική συχνότητα των ρευμάτων. Προφανώς, για να διατηρείται η περιστροφική κίνηση πρέπει τα δύο πεδία να κινούνται με την ίδια ταχύτητα, δηλαδή η ηλεκτρική συχνότητα να ταυτίζεται με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής. Ειδικότερα, η σχέση που συνδέει την ηλεκτρική συχνότητα των ρευμάτων, τάσεων, ΜΕΔ κλπ. με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα για την περίπτωση των σύγχρονων μηχανών είναι:

$$F = \frac{Pn\sigma}{120},$$

Επιπλέον, λόγω του φαινομένου της επαγωγής, αναπτύσσεται στο στάτη “ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ επαγωγής” (Η.Ε.Δ.) που έχει ημιτονοειδή μορφή, και ονομάζεται αλλιώς “τάση διεγέρσεως”. Έστω,  $E_f$  η ενεργός τιμή της φασικής τάσης η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$E_f = \pi \sqrt{2} f k_w N_\phi \Phi_f,$$

Όπου:  $k_w$  μια σταθερά (συντελεστής τυλίγματος του στάτη)

$N_\phi$  ο αριθμός ελιγμάτων σε σειρά ανά φάση

$\Phi_f$  η μαγνητική ροή ανά πόλο που οφείλεται στο  $I_f$

Η  $\Phi_f$  είναι ευθέως ανάλογη του ρεύματος  $I_f$ . Έτσι, όπως φαίνεται από τη σχέση, η  $E_f$  είναι και αυτή ευθέως ανάλογη του ρεύματος πεδίου  $I_f$  (του δρόμεα). Μπορούμε δηλαδή να γράψουμε:

$$E_f = k_o I_f$$

Όπου  $k_o$  μία σταθερά, το ρεύμα του δρομέα  $I_f$  ονομάζεται ρεύμα διεγέρσεως.

Για την κατασκευή του σύγχρονου κινητήρα ισχύουν τα ίδια ακριβώς με την κατασκευή της σύγχρονης γεννήτριας με μοναδική διαφορά στη φορά της ροής της ισχύος, αφού ο κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ σε μηχανική. Ο στάτης του τριφασικού σύγχρονου κινητήρα τροφοδοτείται από πηγή εναλλασσόμενης τάσης και παράγεται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο (στο διάκενο)  $P$  πόλων με ταχύτητα σε (rpm):

$$n_{\sigma} = \frac{120f}{P} \text{ ή σε r/s:}$$

$$\omega_{\sigma} = \frac{4\pi f}{P}$$

όπου  $f$  είναι η συχνότητα της επιβαλλόμενης τάσης.

Ταυτόχρονα, διαβιβάζεται συνεχές ρεύμα  $I_f$  στο δρομέα και λόγω της αλληλεπίδρασης των ρευμάτων, ο δρομέας στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα  $n_{\sigma}$  :

$$n_{\sigma} = \frac{120f}{P},$$

λόγω της ροπής που παράγεται.

Αν  $T_m$  είναι η μηχανική ροπή και  $P_m$  η ισχύς στον άξονα, τότε είναι:

$$P_m = T_m \omega_{\sigma},$$

αφού ο δρομέας (και ο άξονας) στρέφεται με ταχύτητα  $\omega_{\sigma}$ .



## 1.6Γ Ασύγχρονες μηχανές ΕΡ

Οι ασύγχρονες μηχανές ή μηχανές επαγωγής είναι ένα είδος ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως κινητήρες και σε ελάχιστες περιπτώσεις ως γεννήτριες. Ο κυριότερος λόγος της πολύ διαδεδομένης χρήσης τους είναι η απλότητα της κατασκευής των κινητήρων. Πιο συγκεκριμένα, ο στάτης ενός κινητήρα επαγωγής φέρει συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, που είναι συμμετρικά τοποθετημένο. Έτσι, αν το τύλιγμα αυτό συνδεθεί με συμμετρική τριφασική πηγή, τότε τριφασικό συμμετρικό σύστημα ρευμάτων που διαρρέουν το τύλιγμα του στάτη, προκαλεί μαγνητικό πεδίο στο διάκενο. Το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο έχει μορφή όμοια με το πεδίο περιστρεφόμενων μαγνητών που έχουν πλήθος  $P/2$ . Δηλαδή ο αριθμός των πόλων είναι ίσος με  $P$ . Έτσι, η ταχύτητα περιστροφής του πεδίου δίνεται από τη σχέση:

$$n_{\sigma} = 120 \frac{f}{P}, (\text{rpm})$$

όπου  $f$  είναι η συχνότητα σε Hz της εναλλασσόμενης τάσης στο στάτη. Η  $n_{\sigma}$  μπορεί να δίνεται σε r/sec από τη σχέση:

$$n_{\sigma} = 4 \pi \frac{f}{P}, (\text{r/s})$$

όπως και στις σύγχρονες μηχανές, η  $n_{\sigma}$  ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα, αφού δεν υπάρχει διαφορά ως προς το στάτη.

Όσον αφορά το δρομέα της ασύγχρονης μηχανής είναι ένα τύλιγμα βραχυκυκλωμένο, που βρίσκεται μέσα στο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής από το τύλιγμα του δρομέα έχει σαν αποτέλεσμα να επάγεται Η.Ε.Δ (τάση εξ επαγωγής) στο τύλιγμα του δρομέα. Όμως, επειδή το τύλιγμα είναι βραχυκυκλωμένο, έχουμε τελικά επαγωγικό ρεύμα στο τύλιγμα του δρομέα. Το ρεύμα του δρομέα δέχεται μαγνητική δύναμη από το πεδίο του στάτη οπότε έχουμε την εμφάνιση ροπής η οποία περιστρέφει το δρομέα με ταχύτητα  $n$  (rpm). Η ταχύτητα ( $n$ ) περιστροφής του δρομέα είναι γενικά διαφορετική από τη σύγχρονη ταχύτητα  $n_{\sigma}$ . Από το γεγονός αυτό προκύπτει η ονομασία "Ασύγχρονη Μηχανή" ενώ η αιτιολογία του όρου "Μηχανή Επαγωγής" από τα παραπάνω. Με σκοπό την εύκολη ποσοτική αναπαράσταση αυτών των συμπληρωματικών ταχυτήτων, είναι αναγκαίο να ορίσουμε το μέγεθος της ολίσθησης της ασύγχρονης μηχανής  $S$ , ως η διαφορά της μηχανικής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα  $n$ , από τη σύγχρονη ταχύτητα  $n_{\sigma}$ , δηλαδή:

$$s = n_{\sigma} - n / n_{\sigma}$$

και ισχύει  $0 < s < 1$  αφού είναι πάντα  $0 < n < n_{\sigma}$ . Από την τιμή της ολίσθησης  $s$  εξαρτάται η κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα επαγωγής. Αν  $f$  είναι η συχνότητα της επιβαλλόμενης τάσης στο στάτη, το ρεύμα του δρομέα (επαγωγικό) έχει συχνότητα  $sf$ . Κατά την εκκίνηση της μηχανής, οπότε ο δρομέας (rotor) δεν έχει αρχίσει να περιστρέφεται, είναι  $n=0$  οπότε η

παραπάνω σχέση δίνει  $S_{εκκ}=1$ . Σε λειτουργία εν κενώ (χωρίς φορτίο) είναι  $S_{κφ}=0$  αφού χωρίς φορτίο είναι  $n=n_σ$ , δηλαδή τότε και ο δρομέας στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Σε πολλές περιπτώσεις, ο δρομέας αντί για τύλιγμα φέρει ράβδους χαλκού βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους. Έχουμε τότε “κινητήρα επαγωγής τύπου κλωβού” όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Και αν αντικαταστήσουμε στις αρχικές σχέσεις της ταχύτητας καταλήγουμε στη σχέση:

$$s = 1 - \frac{\omega_m}{\omega_s}$$



**Εικόνα 1.5** Διάταξη Δρομέα κλωβού

Είναι σημαντικό να αναφερθεί και ένα δεύτερο είδος δρομέα που ονομάζεται δρομέας με δακτυλίους. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του δρομέα με δακτυλίους όπως φαίνονται και στην παρακάτω εικόνα είναι ότι:

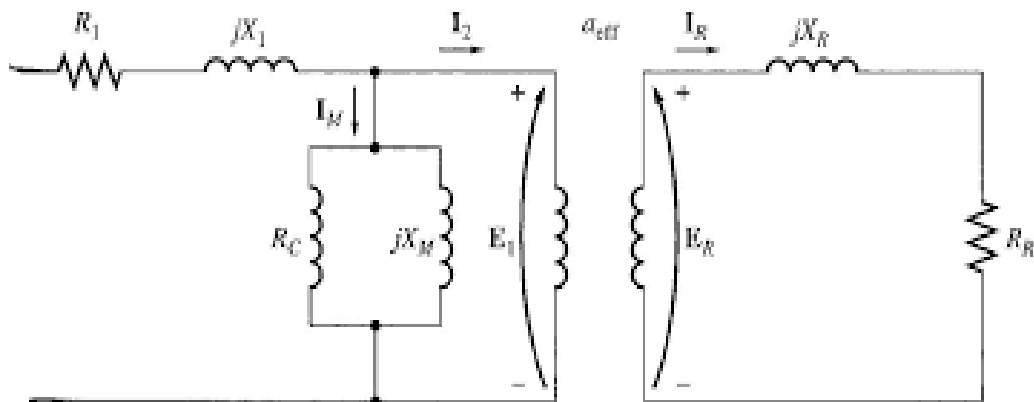
- Έχει τρεις περιελίξεις όμοιες με τις περιελίξεις στο στάτη (για τον τριφασικό κινητήρα).
- Οι τρεις φάσεις ενώνονται σε αστέρα.
- Τα τρία άκρα των φάσεων συνδέονται με δακτυλίους.
- Πάνω στους δακτυλίους εφάπτονται ψήκτρες (brushes) για να έχουμε πρόσβαση στις εντάσεις του δρομέα.
- Χρησιμοποιείται λιγότερο συχνά από τον δρομέα κλωβού, λόγω της κατασκευής του (πιο ακριβός και χρειάζεται περισσότερη συντήρηση λόγω των ψηκτρών).
- Η ανάλυση της λειτουργίας των δύο δρομέων είναι η ίδια.



**Εικόνα 1.6** Διάταξη δρομέα με δακτυλίου

Ιδιαίτερης σημασίας στις ασύγχρονες μηχανές χρήζουν οι κινητήρες επαγωγής που έχουν ευρεία χρήση κυρίως στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικό της καθολικής χρήσης τους είναι ότι οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου, της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Το κυριότερο πλεονέκτημα του ασύγχρονου κινητήρα σχετίζεται με την απλή κατασκευαστική δομή του δρομέα.

Επομένως, είναι αναγκαίο να περιγράψουμε τον τρόπο εκτέλεσης υπολογισμών σε κινητήρες επαγωγής, όπου τη λύση δίνει το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα. Όμως, για την εξαγωγή του ισοδύναμου κυκλώματος ενός επαγωγικού κινητήρα, λαμβάνεται υπόψη ότι η λειτουργία του είναι όμοια με αυτή ενός μετασχηματιστή όχι ακριβώς όμως αφού η συχνότητα της τάσης στο δρομέα διαφέρει από αυτή του στάτη. Συνεπώς, το τύλιγμα του στάτη μπορεί να θεωρηθεί ως το πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή με αντίσταση  $R_1$ , η οποία παριστάνει τις θερμικές απώλειες στους αγωγούς του αντίστοιχου τριφασικού τυλίγματος. Σημειώνεται πως εξαιτίας της παρουσίας του διάκενου, η σύζευξη μεταξύ των δύο επιμέρους κυκλωμάτων στην περίπτωση του επαγωγικού κινητήρα δεν είναι τόσο καλή, όσο στην περίπτωση ενός καλά σχεδιασμένου μετασχηματιστή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συνολική ροή που δημιουργείται από το κύκλωμα του στάτη μπορεί να αναλυθεί σε δύο μέρη: α) στο τμήμα ροής που σχετίζεται με το κύκλωμα του δρομέα (αμοιβαία ροή) και β) στη ροή σχεδίασης, η οποία παριστάνεται μέσω της αντίδρασης  $X_1$ . Επιπλέον, το  $I_M$  είναι το ρεύμα μαγνήτισης δηλαδή η αιτία ανάπτυξης της μαγνητικής ροής, στο οποίο αντιστοιχίζεται η αντίδραση  $X_M$ . Για το ρεύμα απωλειών του σιδηρομαγνητικού υλικού εισάγεται η ωμική αντίσταση  $R_C$ , περιγράφοντας τις απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων. Η εσωτερική τάση  $E_1$  σχετίζεται με την τάση  $E_R$ , που επάγεται στο δρομέα μέσω του λόγου μετασχηματισμού  $\alpha$ . Προφανώς, η  $E_R$  είναι αυτή που προκαλεί την κυκλοφορία ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα του δρομέα. Ειδικότερα, η βασική διαφορά ανάμεσα στα κυκλωματικά ισοδύναμα του μετασχηματιστή και του επαγωγικού κινητήρα εντοπίζεται όχι τόσο στα μεγέθη του στάτη, αλλά σε αυτά του δρομέα και προέρχεται από την επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του δρομέα στα μεγέθη  $E_R$ ,  $R_R$  και  $X_R$ .



**Εικόνα 1.7** Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή, όπου βασίζεται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα

Η τάση που επάγεται στους αγωγούς του δρομέα εξαρτάται άμεσα από τη σχετική ταχύτητα του ως προς το πεδίο του στάτη. Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερη είναι η σχετική ταχύτητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της επαγόμενης τάσης. Πιο συγκεκριμένα, αν ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος (π.χ. κατά την εκκίνηση του κινητήρα), η τάση στα τυλίγματα του είναι η μέγιστη δυνατή. Αντίθετα, όταν ο δρομέας περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα, η τάση στους αγωγούς του είναι μηδενική. Για οποιαδήποτε άλλη τιμή της ταχύτητας περιστροφής, η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη της ολίσθησης:

$$E_R = s E_{R0}$$

Όσον αφορά την αντίδραση του δρομέα, αυτή εξαρτάται τόσο από την αυτεπαγωγή του, όσο και από τη συχνότητα του ρεύματος που το διαρρέει. Επειδή η τελευταία συνδέεται με την ηλεκτρική συχνότητα, μέσω της σχέσης  $\omega_R = s \omega_e$ , προκύπτει άμεσα πως η αντίδραση του δρομέα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$X_R = \omega_R L_R = s \omega_e L_R = s X_{R0},$$

όπου  $X_{R0}$  η αντίδραση του δρομέα, όταν αυτός είναι ακινητοποιημένος. Από την άλλη πλευρά, για το ρεύμα του δρομέα, έχουμε:

$$I_R = E_R / R_R + j X_R \Rightarrow I_R = (E_{R0} / R_R / s) + j X_{R0}$$

Με άλλα λόγια, το κύκλωμα του δρομέα μπορεί να θεωρηθεί ότι τροφοδοτείται από μια σταθερή πηγή τάσης  $E_{R0}$  και περιλαμβάνει μια μεταβλητή σύνθετη αντίσταση  $R_R / s + j X_{R0}$ . Γίνεται φανερό πως όταν η ολίσθηση είναι μικρή, το ωμικό μέρος λαμβάνει μεγάλες τιμές και το ρεύμα μεταβάλλεται γραμμικά με την ολίσθηση. Αντιθέτως, για μεγάλες τιμές της ολίσθησης, το ρεύμα προσεγγίζει μια σταθερή τιμή.

Τέλος, μηχανές όπως ο επαγωγικός κινητήρας που χρειάζονται τροφοδοσία μόνο του στάτη χαρακτηρίζονται ως απλής διέγερσης, σε αντιδιαστολή με τις μηχανές των οποίων ο

στάτης, όσο και ο δρομέας τροφοδοτούνται από εξωτερικές πηγές και οι οποίες ονομάζονται διπλής διέγερσης.

Παρότι δεν χρησιμοποιείται ιδιαίτερα λόγω των μειονεκτημάτων που διαθέτει, γίνεται αναφορά μερικών στοιχείων και για την ασύγχρονη γεννήτρια που η λειτουργία της πραγματοποιείται σε ταχύτητα περιστροφής μεγαλύτερη από την σύγχρονη ταχύτητα έως και τη διπλάσια τιμή της ( $n_s < n < 2n_s$ ) ή για αρνητικές τιμές ολίσθησης ( $-1 < s < 0$ ). Με δεδομένο ότι το ρεύμα θεωρείται εισερχόμενο, αλλά και ότι επιβάλλεται μηχανική ισχύς στον άξονα της μηχανής, προκύπτει ότι η ασύγχρονη γεννήτρια απορροφά αρνητική ενεργό ισχύ από το δίκτυο και συνεπώς προσδίδει ενεργό ισχύ στο δίκτυο που συνδέεται. Επίσης, εφόσον δεν υφίσταται δεύτερο ανεξάρτητο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο προκύπτει ότι η ασύγχρονη γεννήτρια απορροφά άεργο ισχύ, στοιχείο το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη φάση της μελέτης της εγκατάστασης της.

Οι ανάγκες σε άεργο ισχύ καλύπτονται από:

- 1) Άλλες γεννήτριες, σύγχρονες όμως, που συνδέονται στο ίδιο δίκτυο με την ασύγχρονη
- 2) Συστοιχία πυκνωτών που συνδέονται παράλληλα στην έξοδο της ασύγχρονης γεννήτριας
- 3) Στρεφόμενο (σύγχρονο) πυκνωτή, δηλαδή σύγχρονη μηχανή που λειτουργεί ως άφορτος σύγχρονος κινητήρας ρυθμισμένος μέσω της διέγερσης σε πολύ χαμηλό συντελεστή ισχύος, ώστε να παράγει μόνον άεργο ισχύ.

## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### 2.1 1<sup>η</sup> ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑΣ

Στην 1<sup>η</sup> εργαστηριακή άσκηση γίνεται μια πρώτη γνωριμία με όργανα μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών πραγματοποιώντας απλές μετρήσεις. Αρχικά, είναι κάλο να αναφερθούμε στον απαιτούμενο εξοπλισμό που περιλαμβάνει:

- αναλογικό βολτόμετρο
- ψηφιακό βολτόμετρο
- δοκιμαστικό τάσης
- δοκιμαστικό κατσαβίδι
- ΣΡ μπαταρίες
- ΕΡ variac (σε διάφορα επίπεδα τάσης)/ πρίζα ΕΡ

1<sup>ο</sup> Μέρος: Μέτρηση Συνεχούς Τάσης

α) Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μέτρηση συνεχούς τάσης των μπαταριών με χρήση βολτόμετρου και έγινε καταγραφή των παρακάτω μετρήσεων:

**Πίνακας 2.1 Μέτρηση τάσης μπαταριών**

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτόμετρου
9 V	2.862 V
9 V	3.131 V

β) Έπειτα, συνδέσαμε σε σειρά τις δύο παραπάνω μπαταρίες και η συνολική τάση προέκυψε:

**Πίνακας 2.2 Μέτρηση τάσης μπαταριών σε σειρά**

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτόμετρου
9 V σε σειρά	5.898 V

γ) Τέλος, έγινε παράλληλη σύνδεση των παραπάνω μπαταριών και η συνολική τάση προέκυψε:

**Πίνακας 2.3 Μέτρηση τάσης μπαταριών παράλληλα**

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτόμετρου
9 V παράλληλα	3.122 V

Οι παραπάνω μετρήσεις σε σχέση με τις θεωρητική τους τιμές είναι παραπλήσιες αφού, η θεωρητική συνολική τάση σε σειρά είναι:  $V_{ολ} = V_1 + V_2 = 5.993V$  ενώ στην παράλληλη σύνδεση, εφόσον οι τάσεις των μπαταριών είναι διαφορετικές, στα κοινά τους άκρα οι μπαταρίες εμφανίζουν τάση σε τιμή ενδιάμεση των δύο τιμών δηλαδή μεταξύ 2.862 και 3.131 V (καθώς η μπαταρία με τη μεγαλύτερη τάση φορτίζει την μπαταρία με την μικρότερη).

2<sup>ο</sup> Μέρος: Μετρήσεις LCR

Σε αυτό το μέρος χρησιμοποιήθηκαν επίσης ένα πολύμετρο-γέφυρα LCR ψηφιακό και διάφοροι αντιστάτες, πυκνωτές και πηνία.

Αρχικά, διαλέγουμε μερικά πηνία και ελέγχουμε την ακρίβεια της τυποποιημένης τιμής τους μετρώντας την τιμή της επαγωγής τους με το πολύμετρο-γέφυρα.

**Πίνακας 2.4 Πειραματική μέτρηση επαγωγής πηνίων**

	Θεωρητική Τιμή Επαγωγής	Μέτρηση
1 <sup>ο</sup> πηνίο		3.3982 mH
2 <sup>ο</sup> πηνίο		4.8163 mH

Έπειτα, γίνεται σύνδεση σε σειρά και παράλληλα των παραπάνω πηνίων και παραθέτουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε σύγκριση τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές:

**Πίνακας 2.5 Μέτρηση επαγωγής σε σειρά και παράλληλα**

	Θεωρητική Τιμή Επαγωγής	Μέτρηση
Συνδυασμός Σειράς	8.2145 mH	8.0624 mH
Παράλληλος Συνδυασμός	1.9928 mH	1.9735 mH

Παρατηρούμε ότι η απόκλιση των της θεωρητικής τιμής από την πειραματική μέτρηση είναι κάτω από 2%.

Έπειτα, μετρήθηκε η χωρητικότητα δύο πυκνωτών με το πολύμετρο-γέφυρα και συγκρίθηκε με τη θεωρητική τιμή τους.

**Πίνακας 2.6 Πειραματική μέτρηση χωρητικότητας πυκνωτών**

	Θεωρητική Τιμή Χωρητικότητας	Μέτρηση
1 <sup>ος</sup> πυκνωτής	330 $\mu\text{F}$	400.53 $\mu\text{F}$
2 <sup>ος</sup> πυκνωτής	220 $\mu\text{F}$	187.39 $\mu\text{F}$

Αντίστοιχα, έγινε σύνδεση των πυκνωτών σε σειρά και παράλληλα και μετρήθηκε η συνολική χωρητικότητα.

**Πίνακας 2.7 Μέτρηση χωρητικότητας σε σειρά και παράλληλα**

	Θεωρητική Τιμή Χωρητικότητας	Μέτρηση
Συνδυασμός Σειράς	104.27 $\mu\text{F}$	126.74 $\mu\text{F}$
Παράλληλος Συνδυασμός	587.92 $\mu\text{F}$	586.09 $\mu\text{F}$

Τέλος, μετρήθηκε η τιμή αντίστασης δύο αντιστατών:

**Πίνακας 2.8 Πειραματική μέτρηση αντίστασης αντιστατών**

	Θεωρητική Τιμή Αντίστασης	Μέτρηση
1 <sup>ος</sup> αντιστάτης		177.86 $\text{m}\Omega$
2 <sup>ος</sup> αντιστάτης		187.18 $\text{m}\Omega$

Η σύνδεση των παραπάνω σε σειρά και παράλληλα έδωσε τις παρακάτω μετρήσεις:

**Πίνακας 2.9 Μέτρηση αντίστασης σε σειρά και παράλληλα**

	Θεωρητική Τιμή Αντίστασης	Μέτρηση
Συνδυασμός Σειράς	365.05 $\text{m}\Omega$	375.82 $\text{m}\Omega$
Παράλληλος Συνδυασμός	91.74 $\text{m}\Omega$	95.554 $\text{m}\Omega$

Παρατηρούμε ότι οι θεωρητικές και οι πειραματικές τιμές παρουσιάζουν απόκλιση μικρότερη από 5%.



## 2.2 2<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση Ηλεκτροτεχνίας

Η δεύτερη άσκηση ασχολείται κυρίως με τριφασικά κυκλώματα και αντίστοιχες μετρήσεις. Τα όργανα που απαιτούνται είναι:

- τριφασική τροφοδοσία 15 V (πολική)
- συστοιχία λαμπτήρων
- αμπερόμετρα-βολτόμετρα.

Αρχικά, συνδέεται συμμετρικό τριφασικό κύκλωμα σε συνδεσμολογία **αστέρα (Υ)**. Τροφοδοτείται το κύκλωμα από τριφασικό τροφοδοτικό και μετράμε την τάση εισόδου στη συστοιχία. Θεωρώντας το μέγεθος αυτό ως διάνυσμα αναφοράς, υπολογίζεται το ρεύμα και η ισχύς (ενεργός, άεργος, φαινόμενη και συντελεστής ισχύος) σε μια φάση τροφοδοσίας καθώς και την ωμική αντίσταση ενός λαμπτήρα.

**Πίνακας 2.10 Μετρήσεις συμμετρικού τριφασικού κυκλώματος σε συνδεσμολογία (Υ)**

	L1	L2	L3
V(V) πολική	15.93	15.78	15.94
I(A) γραμμής	0.1	0.1	0.1
V(V) φασική	9.22	9.21	9.14
S(VA)	2.759	2.733	2.760
P(W)	2.759	2.733	2.760
Q(VAr)	0	0	0
Pf(cosφ)	1	1	1
R <sub>A</sub>	92.2	92.1	91.4

Επειδή οι λαμπτήρες έχουν αμιγώς ωμική συμπεριφορά, η άεργος ισχύς που απορροφούν είναι ίση με 0, ο δε συντελεστής ισχύος τους ίσος με 1.

Στη συνέχεια, συνδέεται τριφασικό κύκλωμα σε συνδεσμολογία τριγώνου ( $\Delta$ ), και μετρώνται τα αντίστοιχα μεγέθη όπως και στη συνδεσμολογία αστέρα. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 2.11 Μετρήσεις συμμετρικού τριφασικού κυκλώματος σε συνδεσμολογία ( $\Delta$ )**

	L1	L2	L3
V(V) πολική	15.59	15.63	15.41
I(A) γραμμής	0.15	0.15	0.14
I(A) στο τρίγωνο	0.27	0.27	0.26
S(VA)	4.050	4.060	3.736
P(W)	4.050	4.060	3.736
Q(VAr)	0	0	0
Pf(cos $\phi$ )	1	1	1
R <sub>A</sub>	103.93	104.2	110.07

Τέλος, συνδέεται ασύμμετρο τριφασικό κύκλωμα σε συνδεσμολογία αστέρα ( $Y$ ). Εάν τροφοδοτηθεί το κύκλωμα από τριφασικό τροφοδοτικό (15 V πολική τάση) ζητείται να υπολογιστεί η τάση, το ρεύμα και η συνολική ισχύς σε κάθε φάση τροφοδοσίας.

**Πίνακας 2.12 Μετρήσεις ασύμμετρου τριφασικού κυκλώματος σε συνδεσμολογία ( $Y$ )**

	L1	L2	L3	Σύνολο
V(V) πολική	16.00	16.02	15.78	
I(A) γραμμής	0.12	0.1	0.11	
V(V) φασική	8.73	10.19	8.80	
S(VA)	1.0476	1.019	0.968	3.0346
P(W)	1.0476	1.019	0.968	3.0346
Q(VAr)	0	0	0	0
Pf	1	1	1	

Τα μεγέθη της πολικής και φασικής τάσης καθώς και ρεύμα γραμμής μετρήθηκαν απευθείας από αμπερόμετρο και βολτόμετρο.

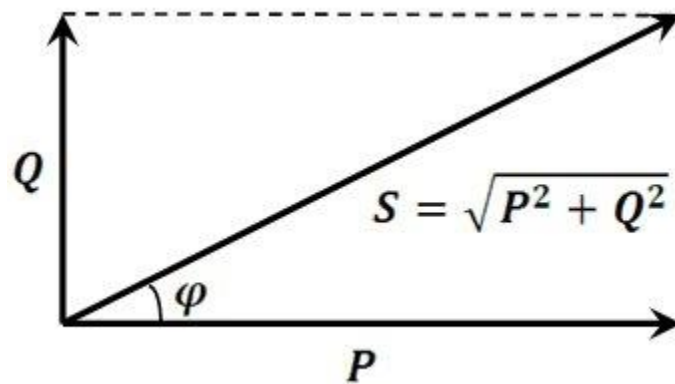
Ανεξάρτητα, από τον τρόπο σύνδεσης του συμμετρικού τριφασικού φορτίου ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

Για την ενεργό ισχύ, ισχύει:  $P = V I \cos\phi$  W (Watt)

Για την άεργο ισχύ, ισχύει:  $Q = V I \sin\phi$  Var (Volt – ampers reactive)

Για τη συνολική ισχύ σε τριφασικό κύκλωμα, ισχύει:  $S = \sqrt{3} V_{\pi} I$  VA (Volt – ampers)

Όπου  $\phi$  είναι η φασική γωνία μεταξύ της φασικής τάσης και του ρεύματος γραμμής, που είναι ίση με τη γωνία της μιγαδικής αντίστασης του κάθε κλάδου του φορτίου. Σημειώνεται ότι και στα συμμετρικά τριφασικά συστήματα ισχύει το τρίγωνο ισχύος που φαίνεται παρακάτω:



**Σχήμα 9.** Τρίγωνο ισχύος συμμετρικών τριφασικών συστημάτων

Για τον συντελεστή ισχύος, ισχύει  $P_f = \frac{P}{S} = \cos\phi$ ,

Όπου στους υπολογισμούς μας θεωρείται ίσο με 1, αφού  $\phi = 0$  μοίρες

Και η αντίσταση  $R_A = \frac{V\phi}{I}$

Για την ισχύ σε ασύμμετρα τριφασικά φορτία ισχύει ότι η τριφασική πραγματική και άεργος ισχύς ισούται με το άθροισμα των ισχύων των κλάδων.

## **2.3 ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ**

### **1<sup>ο</sup> Μέρος**

#### **Δοκιμές σε μετασχηματιστή**

Σε αυτό το μέρος γίνεται συνδεσμολόγηση τριφασικών μετασχηματιστών όπου στην πρώτη περίπτωση μετράμε την τάση του τυλίγματος έχοντας το πρωτεύον σε αστέρα (Υ) και το δευτερεύον σε τρίγωνο (Δ) και στη δεύτερη περίπτωση έχουμε πρωτεύον και δευτερεύον σε αστέρα. Επομένως, έχουμε για την τάση τυλίγματος:

A) Υd (πρωτεύον σε αστέρα, δευτερεύον σε τρίγωνο)

**Πίνακας 2.13 Τάση τυλίγματος με πρωτεύον σε (Υ) και δευτερεύον σε (Δ)**

<b>Τάση <u>τυλίγματος</u></b>	<b>Πρωτεύον (πλευρά χαμηλής τάσης)</b>	<b>Δευτερεύον (πλευρά υψηλής τάσης)</b>
Υd	9.16 V	132.4 V

B) Υd (πρωτεύον και δευτερεύον σε αστέρα)

**Πίνακας 2.14 Τάση τυλίγματος με πρωτεύον και δευτερεύον σε (Υ)**

<b>Τάση <u>τυλίγματος</u></b>	<b>Πρωτεύον (πλευρά χαμηλής τάσης)</b>	<b>Δευτερεύον (πλευρά υψηλής τάσης)</b>
Υd	10.27 V	148.5 V

## 2<sup>ο</sup> Μέρος

### Στρεφόμενες Ηλεκτρικές Μηχανές ΕΡ

Για την διεξαγωγή της εργαστηριακής άσκησης αυτής απαιτείται ο εξής εξοπλισμός:

- Ζεύγη ηλεκτρικού κινητήρα (3φ ΕΡ 230/400V/50Hz/1500rpm)-Ηλεκτρικής γεννήτριας (3φ ΕΡ 8.5/15V/50Hz/1500rpm),
- Αντιστροφείς-inverters (1φ τροφοδοσία- 3φ έξοδος 0-50Hz/0-400V))
- Πολύμετρα γέφυρες RLC
- Πολύμετρα αμπερομέτρησης, βολτομέτρησης
- Τροφοδοτικές μονάδες 0-5V DC, 0-3A
- διατάξεις παραλληλισμού
- παλμογράφοι παρακολούθησης διαδικασίας παραλληλισμού.

A) Σε πρώτο στάδιο γίνεται ωμομέτρηση και συνδεσμολόγηση των τυλιγμάτων κινητήρα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 2.15 Ωμομέτρηση τυλιγμάτων κινητήρα**

$R_{M1}(\Omega)$	$R_{M2}(\Omega)$	$R_{M3}(\Omega)$	Μέση Τιμή $R_M(\Omega)$
44.0	44.1	44.1	44.06

B) Έπειτα γίνεται ωμομέτρηση και συνδεσμολόγηση τυλιγμάτων γεννήτριας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

**Πίνακας 2.16 Ωμομέτρηση τυλιγμάτων γεννήτριας**

$R_{G1}(\Omega)$	$R_{G2}(\Omega)$	$R_{G3}(\Omega)$	Μέση τιμή $R_G(\Omega)$
0.2	0.2	0.2	0.2
<b>Αντίσταση τυλίγατος διέγερσης <math>R_f(k\Omega)</math>: 1.92</b>			

### **Γ) Δοκιμή λειτουργίας αυτόνομης γεννήτριας**

#### **Γ.1 Λειτουργία με τη γεννήτρια χωρίς διέγερση και χωρίς φορτίο**

Στη δοκιμή αυτή ο κινητήρας περιστρέφεται με μόνο φορτίο το δρομέα της (άφορτης) γεννήτριας. Ουσιαστικά, πρόκειται για μία λειτουργία του κινητήρα σχεδόν σε κενό φορτίο. Παρακάτω, μετριοούνται το ρεύμα γραμμής και ρεύμα τυλίγματος του κινητήρα σε συνδεσμολογία τρίγωνο Δ, ρυθμίζοντας το τροφοδοτικό σε συχνότητες 25 και 50 Hz αντίστοιχα.

**Πίνακας 2.17 Αποτελέσματα με λειτουργία γεννήτριας χωρίς διέγερση και χωρίς φορτίο**

Ρεύμα τυλίγματος κινητήρα $I_M$	Ρεύμα Γραμμής κινητήρα $I_{M,γρ}$	Συχνότητα εξόδου τροφοδοτικού $f$ (Hz)	Εκτιμώμενη ταχύτητα περιστροφής δρομέα (RPM)
0.65A	1.1 A	25	750
0.73A	1.25 A	50	1500

Η ταχύτητα περιστροφής δρομέα προέκυψε από τον τύπο  $n = 300 f$  (rpm)

#### **Γ.2 Λειτουργία με τη γεννήτρια σε διέγερση και κενό φορτίο**

Στη δοκιμή αυτή ο κινητήρας περιστρέφει τη γεννήτρια που έχει διέγερση αλλά δεν έχει φορτίο. Ο κινητήρας περιστρέφεται με μόνο φορτίο το δρομέα της (άφορτης) γεννήτριας. Πρόκειται για μια λειτουργία του κινητήρα σχεδόν σε κενό φορτίο. Η τάση εξόδου της γεννήτριας, η οποία μετράται, ταυτίζεται με την ΗΕΔ της.

**Πίνακας 2.18 Αποτελέσματα με λειτουργία γεννήτριας σε διέγερση και κενό φορτίο**

Συνεχής Τάση διέγερσης γεννήτριας $V_f$ (V)	Ρεύμα Τυλίγματος Διέγερσης Γεννήτριας	Πολική Τάση Εξόδου Γεννήτριας	Ρεύμα γραμμής Κινητήρα
0	0.44 A	6.270 V	0.69 A
1	0.79 A	10.93 V	0.70 A

Η διαφορά των δύο μετρήσεων είναι ότι στην πρώτη τροφοδοτήσαμε τη γεννήτρια με συνεχές ρεύμα της τάξεως των 0.65 A και τάση 2.1 V ενώ στη δεύτερη με ρεύμα 1.26 A και τάση 4.0 V για αυτό και η πολική τάση εξόδου της γεννήτριας στη δεύτερη μέτρηση είναι σχεδόν διπλάσια από την πρώτη όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα.

#### Δ. Παραλληλισμός γεννητριών και συγχρονισμένη λειτουργία

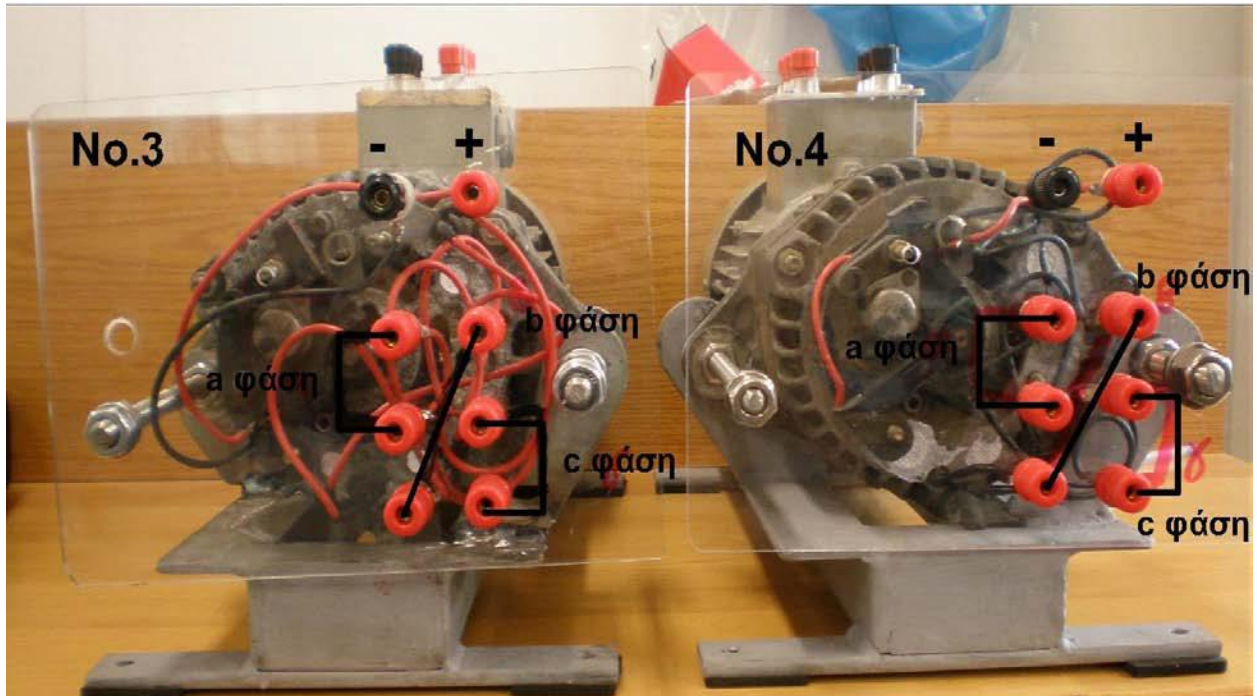
Αρχικά, είναι κάλο να αναφερθούμε στον εξοπλισμό που θα χρειαστεί για την επίτευξη του παραλληλισμού ο οποίος παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 10. Τροφοδοτικά D.C 0-30 V, 0-5 A



Σχήμα 11. Μετατροπέας 1φ 220/50 Hz σε 3φ 380/ 0-50 Hz



Σχήμα 12. Οι γεννήτριες προς παραλληλισμό (σημειώνονται οι τρεις φάσεις "a", "b", "c").



Σχήμα 13. Αυτοσχέδια διάταξη ελέγχου συνθηκών και υλοποίησης του παραλληλισμού



## **Βήματα για την επίτευξη του παραλληλισμού των γεννητριών**

**Βήμα 1:** Συνδέεται ο Inverter στην πρίζα ασφαλείας 220 V<sub>a.c</sub> και από την τριφασική του έξοδο (L1,L2,L3) τροφοδοτείται ο ηλεκτροκινητήρας (κινητήρια μηχανή) σε συνδεσμολογία τριγώνου (το βήμα αυτό ισχύει και για τις δύο γεννήτριες).

**Βήμα 2:** .Στις εξόδους των τυλιγμάτων στον στάτη της γεννήτριας υλοποιείται συνδεσμολογία τριγώνου αποκλειστικά και μόνο με τον τρόπο που φαίνεται στο σχήμα 12.

**Βήμα 3:** Σύνδεση των τροφοδοτικών συνεχούς ρεύματος με τα τυλίγματα διέγερσης της κάθε γεννήτριας (Προσοχή στη σωστή σύνδεση των πόλων μεταξύ τροφοδοτικών και τυλιγμάτων διέγερσης, δηλαδή "θετικό με θετικό" και "αρνητικό με αρνητικό").

**Βήμα 4:** Σύνδεση των φάσεων της κάθε γεννήτριας στην διάταξη ελέγχου συνθηκών και επίτευξής του παραλληλισμού στις εισόδους (μπόρνες) που βρίσκονται κάτω από τις λάμπες πυρακτώσεως. Στις κόκκινες μπόρνες (L1,L2,L3) τοποθετούμε τις φάσεις της Νο.3 γεννήτριας ενώ στις μαύρες (L1',L2',L3') τοποθετούνται οι φάσεις της Νο.4 γεννήτριας, όπως φαίνεται και στο σχ.13.

**Βήμα 5:** Τίθενται σε λειτουργία οι ηλεκτρογεννήτριες μέσω του inverter πατώντας το μπουτόν που έχει ανάγλυφο το γράμμα 'I',για σταμάτημα των γεννητριών πιέζεται το μπουτόν του inverter που έχει ανάγλυφο το γράμμα 'O', και γίνεται ρύθμιση με το ποτενσιόμετρο της συχνότητας στα 50 Hz και στις δύο.

**Βήμα 6:** Αφού οι γεννήτριες πάρουν τις ονομαστικές τους στροφές ρυθμίζεται η τάση διέγερσης από τα στροφέια των τροφοδοτικών σχήμα 10 (ανάλογα με τα ζεύγη γεννητριών που επιλέγονται).

**Βήμα 7:** Σύνδεση ενός βολτόμετρου μεταξύ των φάσεων **a** και **b** στην κάθε γεννήτρια, ώστε να γίνει έλεγχος της συνθήκης ισότητας των τάσεων. Επίσης συνδέεται ο παλμογράφος για την παρατήρηση του διακροτήματος που δημιουργείται μεταξύ των δυο γεννητριών.

**Βήμα 8:** Από την διάταξη των λαμπτήρων πλοήγησης παρατηρείται αν υπάρχει ορθή ακολουθία των φάσεων, αν δεν υπάρχει τότε γίνεται αντιμετάθεση των φάσεων **b** και **c** στην μια γεννήτρια. Στην συνέχεια παρατηρείται αν με τις συγκεκριμένες τιμές διέγερσης επιτυγχάνεται ο συγχρονισμός των γεννητριών, ιδανικές συνθήκες για παραλληλισμό είναι η επίτευξη του «σβησίματος» των λαμπτήρων πάνω από 2 sec, αν είναι ικανές οι συνθήκες γίνεται μετάβαση στο Βήμα 9<sup>ο</sup> ειδάλλως γίνεται επιστροφή στο Βήμα 6 και μεταβάλλονται λίγο οι τιμές των τάσεων διέγερσης από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν.

**Βήμα 9:** Είναι σε θέση να σπλιστεί ο διακόπτης του παραλληλισμού και να επιτευχθεί σωστός παραλληλισμός.

## **3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΠΛΟΙΩΝ-ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ**

### **3.1 Εισαγωγή**

Τα πλοία στα οποία στηρίζονται οι θαλάσσιες μεταφορές αποτελούν πηγές ρύπων που συντείνουν στο «φαινόμενο του θερμοκηπίου» κατά ένα σημαντικό ποσοστό. Για το λόγο αυτό, με πρωτοβουλία του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας (International Maritime Organization- IMO) που τελεί υπό την αιγίδα του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών, τα τελευταία χρόνια έχει ξεκινήσει μία προσπάθεια ελέγχου και περιορισμού της ρύπανσης που προκαλούν.

Η ποσοτικοποιημένη πιστοποίηση γίνεται μέσω ενός δείκτη σχεδίασης των ενεργειακών συστημάτων του πλοίου, του επονομαζόμενου Energy Efficiency Design Index – EEDI. Εξάλλου, σε διαβούλευση για μελλοντική έκδοση σχετικής οδηγίας από τον IMO είναι ο αντίστοιχος δείκτης λειτουργίας των ενεργειακών συστημάτων του πλοίου, ο επονομαζόμενος Energy Efficiency Operation Index – EEOI. Αμφότεροι οι δείκτες αξιολόγησης των επιδόσεων των ενεργειακών συστημάτων του πλοίου μετρούν την ανηγμένη ποσότητα παραγόμενου CO<sub>2</sub> ως προς το ωφέλιμο παραγόμενο μεταφορικό έργο.

Τέλος, για την επιτυχημένη παρακολούθηση, εποπτεία και καταγραφή των επιδόσεων ενός πλοίου όσον αφορά στην κατανάλωση καυσίμου και την παραγωγή ρύπων, κάθε πλοίο θα πρέπει να διαθέτει ένα Σχέδιο Κεντρικής Διαχείρισης των επιδόσεών του, το επονομαζόμενο Ship Energy Efficiency Management Plan - SEEMP. Ο τρόπος σχεδίασης και λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος δεν έχει ακόμη προτυποποιηθεί, ωστόσο, ήδη όλες οι σύγχρονες ναυπηγήσεις διαθέτουν ένα Κεντρικό Σύστημα Ενεργειακής Παρακολούθησης (Power Management System-PMS) στο οποίο μπορεί να ενσωματωθεί και το SEEMP.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η εποπτική παρακολούθηση της απόδοσης του πλοίου, κατά την αποστολή του απαιτεί το σχεδιασμό και την εγκατάσταση ενός πολυμετρητικού συστήματος, το οποίο πρέπει να συνδυάζει την επίτευξη του στόχου μέτρησης-παρακολούθησης-καταγραφής μαζί με επικουρικό σύστημα αποφάσεων του εκάστοτε χειριστή σε όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος (κτήσης, λειτουργίας και συντήρησης). Το μετρητικό αυτό σύστημα θα πρέπει να ενσωματώνεται στο Κεντρικό Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης (Power Management System) και μπορεί να περιλαμβάνει τα εξής:

- βέλτιστη λειτουργία ΣΗΕ πλοίου (παρακολούθηση ενεργειακής ροής σε ενεργό και άεργο ισχύ και συμβάντων ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος )
- βέλτιστη λειτουργία συστήματος πρόωσης πλοίου
- βέλτιστη εκμετάλλευση συνθηκών πλεύσης

### **3.2 Ηλεκτροπρόωση και Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο**

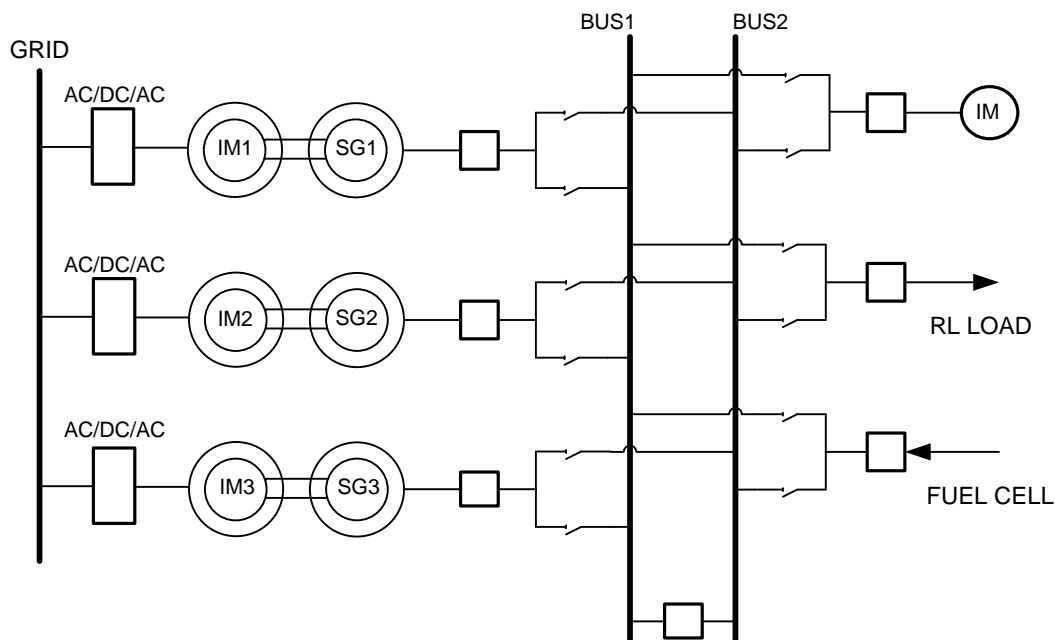
Ως ηλεκτροπρόωση ορίζεται, το είδος εκείνο της πρόωσης στο οποίο οι άξονες του πλοίου κινούνται, είτε απευθείας είτε σπανιότερα μέσω μειωτήρων, από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές όπως ντίζελ, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους. Φυσικά, οι θερμικές μηχανές (κινητήρες ντίζελ, αεριοστρόβιλοι ή ατμοστρόβιλοι) εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης, αλλά αντί να κινούν απευθείας το αξονικό σύστημα με την έλικα κινούν ηλεκτρογεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης, οπότε και αναφέρονται στη βιβλιογραφία σαν “prime movers” (‘κινητήριες μηχανές’). Η προωστήρια εγκατάσταση συμπληρώνεται από κάποιο σύστημα ελέγχου για τον χειρισμό της, δηλαδή την κράτηση-εκκίνηση, την αυξομείωση στροφών και την αλλαγή φοράς περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων. Επιπλέον, στο πλαίσιο του έντονου εξηλεκτρισμού όλων των επιμέρους υποσυστημάτων των πλοίων (κι όχι μόνον αυτό της πρόωσης) μελετάται το πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship) ως μία πλατφόρμα σχεδίασης ενεργειακά αποδοτικού πλοίου που εύκολα ενσωματώνει όλες τις «φιλικές προς το περιβάλλον» αναπτυσσόμενες τεχνολογίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα πλοία με ηλεκτροπρόωση, προς το παρόν, δεν υπόκεινται στους περιοριστικούς κανονισμούς ρύπανσης σύμφωνα με τους δείκτες EEDI/ΕΕΟΙ.

Στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ (ΣΝΜΜ/ΕΜΠ) είχε ανατεθεί η ανάπτυξη και καλλιέργεια τεχνογνωσίας Πλήρως Εξηλεκτρισμένου Πλοίου και η δημιουργία ενός Κέντρου Αριστείας στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος της Ε.Ε. MARINELIVE (MARine Electrical InitiatiVE). Μεταξύ των δράσεων του έργου MARINELIVE περιλαμβάνεται και η κατασκευή στις εγκαταστάσεις της ΣΝΜΜ/ΕΜΠ πειραματικής διάταξης – εξομοιωτή ηλεκτρικού δικτύου πλοίου με ή χωρίς ηλεκτροπρόωση.

### 3.3 Εξομοιωτής Ηλεκτρικού Δικτύου Πλοίου

Ο Εξομοιωτής Ηλεκτρικού Δικτύου Πλοίου (Ship Electric Grid Emulator) που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου MARINELIVE αποτελεί μικρογραφία ενός τυπικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) πλοίου.

Το δίκτυο του εξομοιωτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 14 διαθέτει τρεις σύγχρονες γεννήτριες (δύο των 5.9 kVA και μία των 5 kVA), οι οποίες (ή όποιες είναι σε λειτουργία) τροφοδοτούν ένα παθητικό φορτίο RL ή/και ένα τριφασικό κινητήρα επαγωγής, ενώ υπάρχει πρόβλεψη για συνδέσεις άλλων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας, είτε απευθείας (για εξομίωση διασύνδεσης ξηράς και cold-ironing), είτε μέσω διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος (για σύνδεση κυψελών καυσίμου Fuel Cells, όπως η μονάδα NEXA K00-792 του γερμανικού οίκου Heliocentris, ή άλλων ανανεώσιμων πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας).



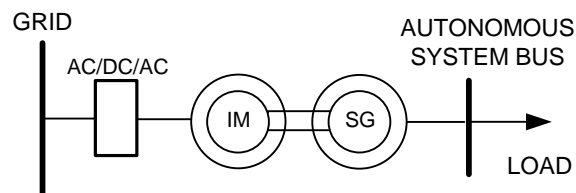
**Σχήμα 14.** Διάγραμμα του πειραματικού συστήματος

Κάθε γεννήτρια έχει ως κινητήρια μηχανή (prime mover) ένα κινητήρα επαγωγής που οδηγείται από ένα μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος, ο οποίος με τη σειρά του τροφοδοτείται από τον πίνακα του εργαστηρίου. Σημειώνεται ότι, καθώς η τάση των γεννητριών είναι ήδη χαμηλή (400 V πολική), δεν χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές υποβιβασμού/ανύψωσης της τάσης στο σύστημα.

Το σύστημα είναι ηλεκτρικά αυτόνομο από το δίκτυο (ΔΕΗ) που τροφοδοτεί τους μετατροπείς ισχύος (όπως και το ηλεκτρικό δίκτυο ενός πλοίου), με εξαίρεση την τροφοδοσία των βοηθητικών κυκλωμάτων. Εξάλλου, όσον αφορά το σύστημα γείωσης, ακολουθείται η

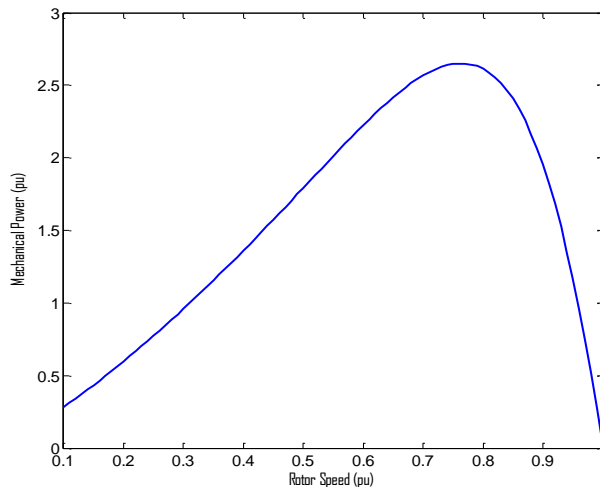
λογική του «αγείωτου» συστήματος, όπως συμβαίνει στην πλειονότητα των πλοίων, επομένως όλες οι τριφασικές διατάξεις συνδέονται κατά «αστέρα με αγείωτο κόμβο» ή κατά «τρίγωνο».

Όσον αφορά στη συχνότητα του αυτόνομου συστήματος, η χρήση κινητήρων επαγωγής ως κινητήριες μηχανές (αντί π.χ. ενός κινητήρα diesel με ρυθμιστή στροφών) παρουσιάζει ιδιαιτερότητες. Στη συνέχεια περιγράφεται σύντομα πώς εξασφαλίζεται η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Για το σκοπό αυτό θεωρείται ότι οι τρεις ή όσες γεννήτριες λειτουργούν στο σύστημα είναι ίδιες, όπως και οι κινητήρες επαγωγής που τις οδηγούν. Επίσης, οι κινητήρες επαγωγής τροφοδοτούνται από τους μετατροπείς ισχύος με ονομαστική τάση και συχνότητα. Με τις υποθέσεις αυτές οι γεννήτριες μπορούν να θεωρηθούν ως μία ισοδύναμη η οποία οδηγείται από έναν (ισοδύναμο) κινητήρα επαγωγής και τροφοδοτεί το συνολικό φορτίο του αυτόνομου συστήματος, όπως στο Σχήμα 15.



**Σχήμα 15.** Απλοποιημένο διάγραμμα του πειραματικού συστήματος

Η μηχανική ισχύς που αποδίδει ο κινητήρας επαγωγής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής υπό ονομαστική τερματική τάση και συχνότητα φαίνεται στο Σχήμα 16, όπου τα μεγέθη είναι ανηγμένα στις ονομαστικές τους τιμές (ανά μονάδα σύστημα).



**Σχήμα 16.** Καμπύλη ισχύος – ταχύτητας περιστροφής κινητήρα επαγωγής

Ως γνωστόν, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα επαγωγής σε κανονική λειτουργία είναι πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα (1 α.μ.), δηλαδή στο τμήμα της καμπύλης του Σχήματος 16, με τη μεγάλη αρνητική κλίση. Για παράδειγμα για παραγωγή ισχύος ίση με το μισό της ονομαστικής (0.5 α.μ.), η ταχύτητα περιστροφής είναι περίπου 0.98 α.μ. Δεδομένου ότι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα του κινητήρα επαγωγής είναι και η σύγχρονη

ταχύτητα του αυτόνομου συστήματος (οι δρομείς των δύο ηλεκτρικών μηχανών έχουν κοινό άξονα), τότε η συχνότητα του αυτόνομου συστήματος είναι 98% της ονομαστικής, δηλαδή ίση με 49 Hz.

Υποθέτοντας ιδανικό τον ρυθμιστή τάσης της γεννήτριας και καθαρά ωμικό φορτίο, τότε σε ένα άλλο σημείο λειτουργίας με μεγαλύτερη αγωγιμότητα του φορτίου, η γεννήτρια θα αποδίδει την απαιτούμενη αυξημένη ισχύ, όπως και ο κινητήρας. Όπως φαίνεται από την χαρακτηριστική καμπύλη του Σχήματος 16, σε αυτό το σημείο λειτουργίας ο κινητήρας θα λειτουργεί σε χαμηλότερες στροφές, άρα η συχνότητα του αυτόνομου συστήματος θα είναι χαμηλότερη, π.χ. 97% της ονομαστικής ή 48,5 Hz-

Επομένως, θεωρώντας ευθεία την χαρακτηριστική ισχύος – στροφών του κινητήρα επαγωγής στην περιοχή λειτουργίας, ο κινητήρας λειτουργεί ως ισοδύναμο μιας πηγής μηχανικής ροπής για την γεννήτρια (όπως ένας στρόβιλος) με τον ρυθμιστή στροφών της. Η κλίση της χαρακτηριστικής ορίζει τον στατισμό του ισοδύναμου ρυθμιστή στροφών, αλλά με μηδενική παραγωγή στα 50 Hz, που είναι η συχνότητα τροφοδοσίας του κινητήρα από τον μετατροπέα.

Η δευτερεύουσα ρύθμιση της συχνότητας (ώστε αυτή να διατηρείται ακριβώς στα 50 Hz) γίνεται μέσω του κεντρικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Αυτή αναλαμβάνεται από μία γεννήτρια (ρυθμίζουσα) και έναν αναλογικό-ολοκληρωματικό (PI) ρυθμιστή με είσοδο το σφάλμα της συχνότητας του αυτόνομου συστήματος και μεταβλητή ελέγχου την συχνότητα τροφοδοσίας του κινητήρα της ρυθμίζουσας γεννήτριας.

Εφόσον λειτουργούν παράλληλα δύο γεννήτριες, ένας δεύτερος PI ρυθμιστής με μεταβλητή ελέγχου τη συχνότητα τροφοδοσίας του κινητήρα της μη ρυθμίζουσας γεννήτριας, εξασφαλίζει τον καταμερισμό της ισχύος στις γεννήτριες, όπως επιθυμείται από τον χειριστή.

### **3.4 Κεντρικό Σύστημα Παρακολούθησης και Λειτουργίας Συστήματος- PMS/ΕΡΜΑCS (ενοποιημένο SCADA παρακολούθησης, καταγραφής)**

Για την παρακολούθηση λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει ένα Σύστημα Διαχείρισης Ηλεκτρικής Ενέργειας (Power Management System-PMS ή Electric Power Management And Control Systems – ΕΡΜΑCS) ενοποιημένο με σύστημα για προστασία των ηλεκτρικών μηχανών, των ζυγών αλλά και του συνολικού συστήματος διακίνησης ηλεκτρικής ισχύος. Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιούνται ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι προστασίας (H/N) του οίκου Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) με έδρα τις Η.Π.Α. Οι ψηφιακοί H/N εκτός της προστασίας παρέχουν και δυνατότητες τηλεμετρήσεων και τηλεχειρισμών. Αυτές υλοποιούνται με χρήση των ενσωματωμένων καρτών επικοινωνιών των H/N.

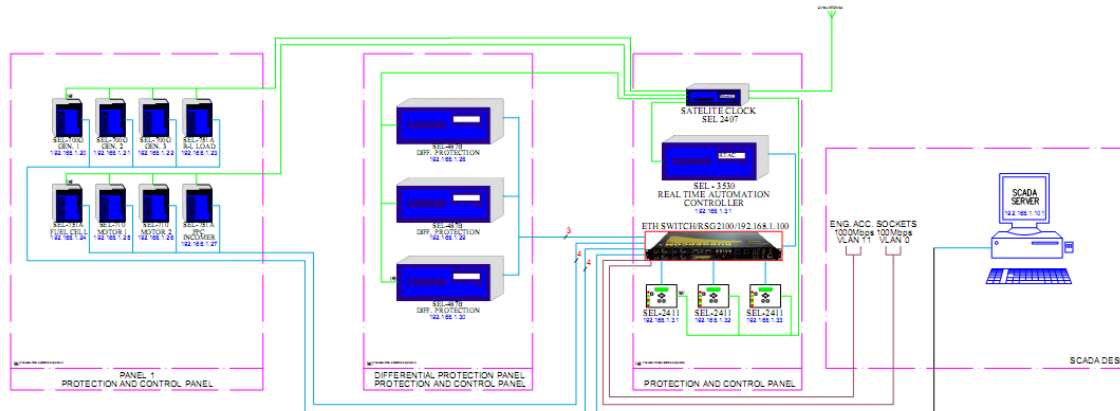
Έχουν αναπτυχθεί πληθώρα πρωτοκόλλων επικοινωνιών για χρήση σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα IEC-60870-5-104/103/101, DNP3.0, MODBUS και IEC-61850, [IEC 2004]. Το τελευταίο αποτελεί την αιχμή της τεχνολογίας στις μέρες μας. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο που βασίζεται στην αρχιτεκτονική SERVER – CLIENT και χρησιμοποιεί το ETHERNET (ηλεκτρικό ή οπτικό) ως φυσικό μέσο. Με χρήση του IEC-61850 μπορούν να ληφθούν σε ένα κεντρικό σύστημα τηλεποπτείας και τηλεχειρισμών (Supervisory Control And Data Acquisition System – SCADA) πληθώρα μετρήσεων αλλά και να γίνουν χειρισμοί σε απομακρυσμένα στοιχεία του ηλεκτρικού δικτύου.

Το δίκτυο δεδομένων στο οποίο βασίζεται η εφαρμογή SCADA, όπως στο Σχήμα 17, απαρτίζεται από τους ψηφιακούς H/N προστασίας, το κεντρικό Managed Ethernet Switch (ETHSW), έναν κεντρικό ελεγκτή για τις αυτοματοποιημένες διαδικασίες (Real Time Automation Controller – RTAC) και τον κεντρικό Ηλεκτρονικό Υπολογιστή (H/Y) του συστήματος, ο οποίος αποτελεί και τον SCADA Server. Το σύστημα πλαισιώνεται επίσης από έναν δικτυακό, έγχρωμο, τεχνολογίας LASER εκτυπωτή για την εκτύπωση καμπυλών, μετρήσεων, γεγονότων και σημάνσεων.

Όσον αφορά στην αρχιτεκτονική του συστήματος η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 17, όλοι οι H/N και οι λοιπές συσκευές συνδέονται ακτινικά με το ETHSW μέσω ηλεκτρικού δικτύου Ethernet (100Mbps - UTP Cat6). Το εγκατεστημένο ETHSW είναι του οίκου RuggedCom και είναι πλήρως παραμετροποιήσιμο, γεγονός που επιτρέπει την υλοποίηση πληθώρας Virtual Lan (VLAN) για κάθε διαφορετική εφαρμογή του δικτύου δεδομένων. Το δίκτυο δεδομένων απασχολείται από τις παρακάτω εφαρμογές:

- Δεδομένα Τηλεχειρισμών και Τηλεποπτείας, πρωτόκολλο IEC-61850.MMS
- Ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των H/N αλλά και μεταξύ H/N και RTAC, πρωτόκολλο IEC61850.Goose
- Δεδομένα εφαρμογής παραμετροποίησης των H/N αλλά και λήψης συμβάντων (event recorder), πρωτόκολλο TELNET & FTP.

Το δίκτυο δεδομένων, πλαισιώνεται από ένα δορυφορικό δέκτη χρόνου, του οίκου SEL, το οποίο λαμβάνει ακριβή χρόνο διαμέσου του δορυφορικού συστήματος γεωγραφικού εντοπισμού (GPS) και τον διανέμει με χρήση του πρωτοκόλλου IRIG-B00x σε όλες τις συσκευές του δικτύου δεδομένων.



**Σχήμα 17.** Αρχιτεκτονική του δικτύου δεδομένων

Το διαδραστικό περιβάλλον ανθρώπου – μηχανής (Human Machine Interface - HMI), το οποίο αποτελεί και την «κορυφή» του συστήματος SCADA υλοποιείται με τη χρήση του λογισμικού ZenOn Energy Edition του Αυστριακού οίκου Copra-Data. Πρόκειται για μια εφαρμογή με πληθώρα δυνατοτήτων η οποία έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την υψηλή αξιοπιστία και τον υψηλό βαθμό χρηστικότητας. Η υψηλή αξιοπιστία εξασφαλίζεται από τα υποσυστήματα τα οποία πλαισιώνουν το HMI και τα οποία έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από κορυφαίες στο χώρο εταιρίες (SEL – RUGGEDCOM – HP – COPA DATA). Ο υψηλός βαθμός χρηστικότητας εξασφαλίζεται από το περιβάλλον ανάπτυξης του HMI.

Έτσι, με γνώμονα όλα τα παραπάνω αναπτύχθηκε ένα πολυπαραθυρικό περιβάλλον το οποίο παρέχει στον χρήστη πυκνή και συνάμα κατανοητή πληροφόρηση σχετικά με το ηλεκτρικό δίκτυο. Μέσω του HMI παρέχεται η δυνατότητα εκτέλεσης χειρισμών στα διακοπτικά και όχι μόνο στοιχεία του δικτύου. Αναλυτικότερα, παρέχεται η δυνατότητα:

- Χειρισμού (Άνοιγμα – Κλείσιμο) των διακοπών ισχύος.
- Χειρισμού (Άνοιγμα – Κλείσιμο) των αποζευκτών.
- Αυτοματοποιημένων ακολουθιακών εντολών (π.χ. μεταγωγή ζυγού).
- Εντολών Αύξησης και Μείωσης του μέρους της ενεργού ισχύος που αναλαμβάνει κάθε γεννήτρια πλην της ρυθμίζουσας.

Αρχική εικόνα του HMI αποτελεί το Μονογραμμικό διάγραμμα του ηλεκτρικού δικτύου. Πρόκειται για μια δυναμική εικόνα η οποία, αφενός παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του ηλεκτρικού δικτύου στο χρήστη του HMI, και αφετέρου παραπέμπει, με κατάλληλους χειρισμούς, σε λεπτομερείς εικόνες του ηλεκτρικού δικτύου.



Οι πληροφορίες οι οποίες εμφανίζονται στο Μονογραμμικό διάγραμμα αφορούν τόσο στην κατάσταση των διακοπτικών στοιχείων ισχύος (διακόπτες, αποζεύκτες) όσο και σε ηλεκτρικές μετρήσεις στους ζυγούς. Οι καταστάσεις των διακοπών καθώς και οι μετρήσεις προέρχονται από τις ψηφιακές συσκευές προστασίας και ελέγχου.

Οι μετρήσεις που απεικονίζονται στο HMI αφορούν τα κάτωθι μεγέθη:

- Τάση.
- Συχνότητα.
- Ρεύμα.
- Ενεργός και Άεργος Ισχύς (Εισερχόμενη – Εξερχόμενη ως προς κάποιο στοιχείο).
- Συντελεστής Ισχύος.
- Ενεργός και Άεργος Ενέργεια.

Όλες οι μετρήσεις αποθηκεύονται ανά λεπτό στην εσωτερική βάση δεδομένων της εφαρμογής HMI και είναι διαθέσιμες για περαιτέρω επεξεργασία, όπως δημιουργία γραφημάτων και αναφορών. Παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής των μετρήσεων σε αρχεία της μορφής Comma Separated Values (CSV) ή σε βάση δεδομένων SQL για περαιτέρω επεξεργασία από τρίτα λογισμικά (spreadsheets κλπ.)

Το HMI υποστηρίζει την λειτουργία δυναμικού χρωματισμού (Automatic Line Coloring), δηλαδή μεταβάλλει το χρώμα των στοιχείων του (διακόπτης – αποζεύκτης – ζυγός) ανάλογα με τις καταστάσεις των διακοπτικών στοιχείων και την ύπαρξη ή την απώλεια τάσης σε κάποια κομβικά σημεία (π.χ ζυγοί).

Τέλος, στη λίστα συμβάντων του HMI καταγράφεται οτιδήποτε συμβαίνει στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η λίστα σημάτων αποτελεί συμπληρωματικό εργαλείο της λίστας συμβάντων, αφού στη λίστα σημάτων καταγράφονται μόνο ενεργοποιήσεις σημάτων και όχι οι απενεργοποιήσεις αυτών. Προφανώς, η λίστα σημάτων αποτελεί υποσύνολο της λίστας συμβάντων. Κρίνεται σκόπιμο να αναφέρουμε ότι χρόνοι ενεργοποίησης – απενεργοποίησης και αναγνώρισης όλων των καταχωρήσεων της λίστας σημάτων και της λίστας συμβάντων είναι εξαιρετικά ακριβείς με ακρίβεια ms, αφού όλες πληροφορίες που διακινούνται στο δίκτυο δεδομένων και αφορούν την εφαρμογή HMI είναι time-stamped με ακρίβεια 1 ms.

### **3.5 Διερεύνηση προβλημάτων ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος**

Στον εξομοιωτή ηλεκτρικού δικτύου πλοίου υπάρχει εκτεταμένη δυνατότητα μελέτης μεταβατικών καταστάσεων λειτουργίας και διαταραχών όπως συμμετρικά και ασύμμετρα βραχυκυκλώματα, καθώς και συμβάντα ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος (παροδικές βυθίσεις και ανυψώσεις τάσης) ρυθμιζόμενης έντασης και διάρκειας. Όσον αφορά στα βραχυκυκλώματα, αυτά λαμβάνουν χώρα με ελεγχόμενο τρόπο από κατάλληλα σχεδιασμένους ηλεκτρονόμους ισχύος, ενώ τα συμβάντα ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος λαμβάνουν χώρα με την παρεμβολή της διάταξης διαταραχών (event generator) **IPC-480V-200A** του κατασκευαστικού οίκου Power Standards Laboratory (ΗΠΑ).

Με τη βοήθεια αυτού του εξοπλισμού μπορεί να γίνεται εξομοίωση λειτουργίας διαφόρων διαμορφώσεων ηλεκτρικών δικτύων σχεδόν όλων των τύπων πλοίων και σε συνδυασμό με εξειδικευμένο λογισμικό προσομοίωσης Η/Υ να πραγματοποιείται διερεύνηση σύνθετων φαινομένων ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας.

## 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΜΕΛΕΤΗ ΕΞΟΜΟΙΩΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι η μελέτη και η περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του εξομοιωτή ηλεκτρικού δικτύου πλοίου (grid emulator) της MARINELIVE που βρίσκεται στο εργαστήριο της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών μέσα από μετρήσεις για διαφορετικές παραμέτρους του συστήματος.

### 4.1 Περιγραφή του υπο μελέτη συστήματος και του εξοπλισμού που το απαρτίζουν

Αρχικά, ο εξομοιωτής ηλεκτρικού δικτύου πλοίου (grid emulator) είναι ένα σύστημα διαχείρισης και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί ουσιαστικά μια μικρογραφία του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του εξομοιωτή περιγράφονται περιληπτικά στο παρακάτω πίνακα:

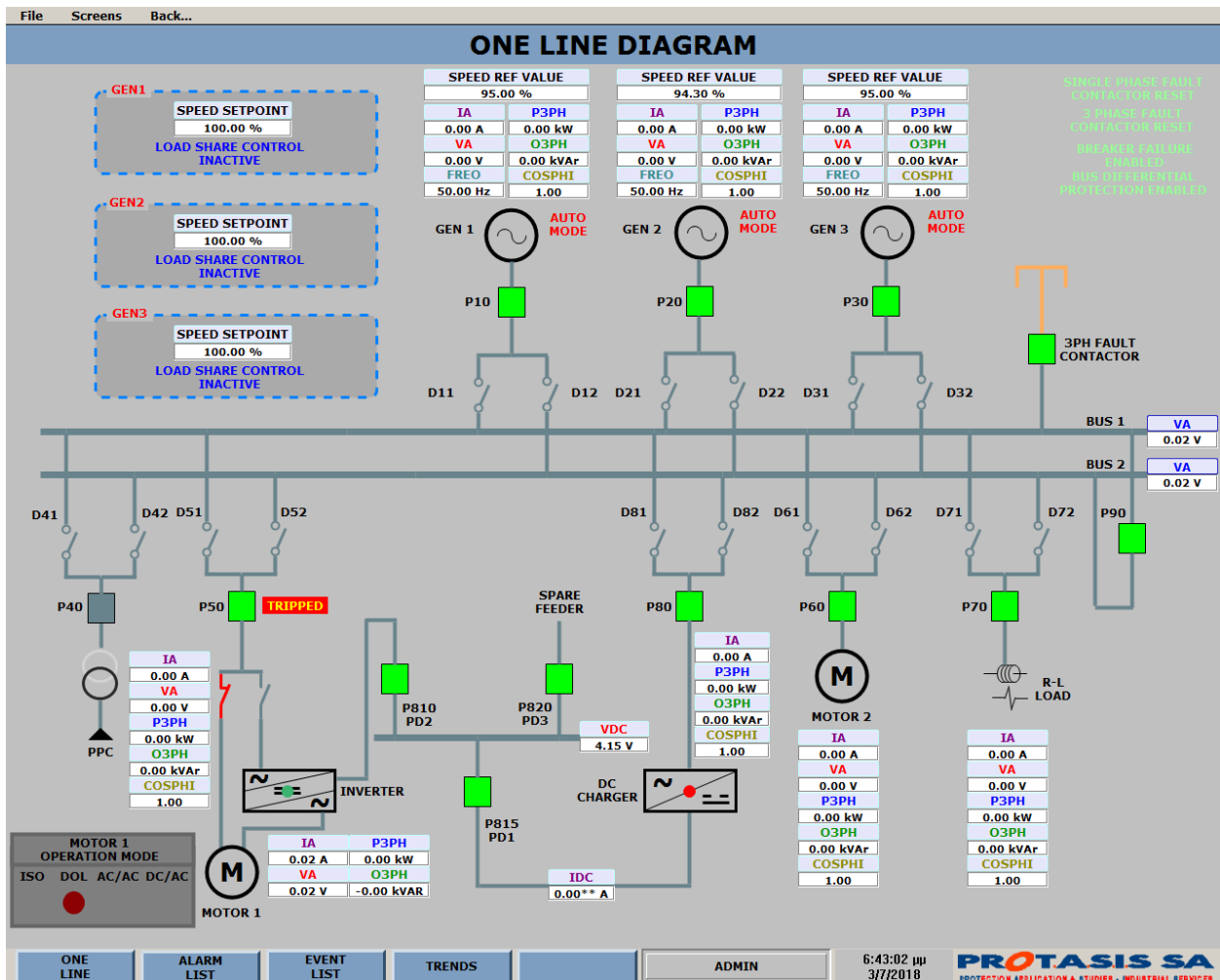
**Πίνακας 4.1** Βασικά χαρακτηριστικά του grid emulator

Σετ Γεννητριών	2 σετ από 3-φ 400V/50 Hz/5,9kW/pf=0.8 ind (Κατασκευαστής Focquet/Βέλγιο, τύπος FB4SA)  1 σετ από 3-φ 400V/50 HZ/5.0Kw/pf=0.8ind. (Κατασκευαστής GENKO/UK, τύπος RF201A)  Αυτόματους ρυθμιστές τάσης: AVR's (Κατασκευαστής BASLER/USA-FRANCE:DECS-100)
Φορτίο κινητήρα	Επαγωγικός Κινητήρας EP: 3Kw  (Κατασκευαστής Focquet/Belgium, τύπος MF3A4)  Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος: Siemens G120/5.5Kw/400V/50Ha/4 τεταρτοκύκλια)

R-L παθητικό φορτίο	3-φ 400 V/50 Hz/4.8kW +2kVAr κλιμακώμενο με 3 σκάλες (Ειδικός σχεδιασμός από RITA transformers)
Γεννήτρια ελέγχου διάταξης διαταραχών	IPC-480 V/200A (κατασκευαστής Power Standards Laboratory-PSL (USA) )
Ψηφιακοί Ηλεκτρονόμοι Προστασίας	SEL-700 G προστατευτικό γεννήτριας SEL-751 A προστατευτικό τροφοδοσίας SEL-710 προστατευτικό κινητήρα SEL-487B διαφορικά ρελέ SEL-2407 ρολόι GPS Κατασκευαστής: SEL/USA
Κυψέλη Καυσίμου	NEXA K00-792 Κατασκευαστής: "Heliocentris Energie Systeme GmbH" - GERMANY

## 4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΟΠΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ GRID EMULATOR

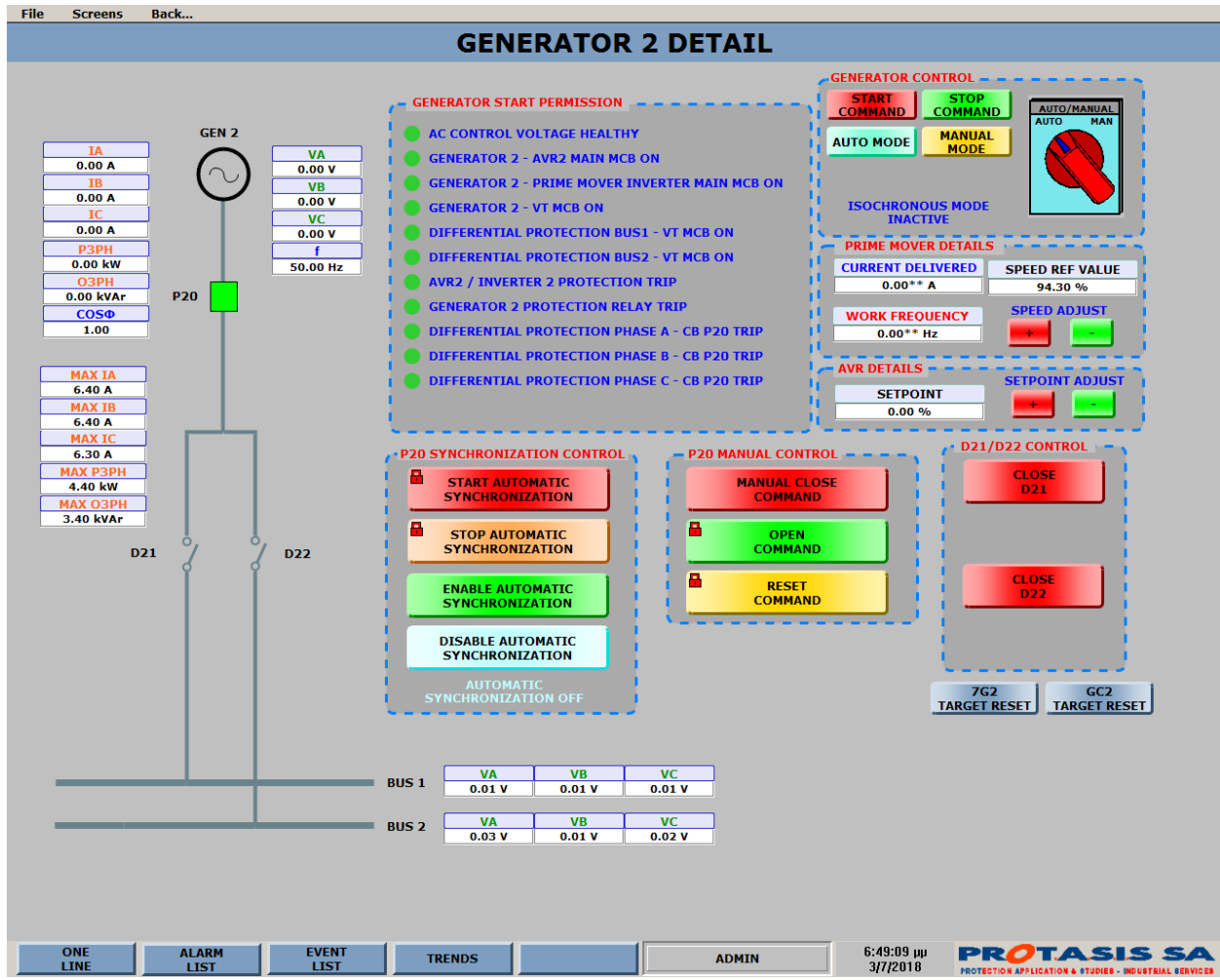
Αρχικά, είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι γίνεται χρήση υπολογιστή για την εκκίνηση του εν λόγω συστήματος και συγκεκριμένα για την τροφοδότηση των γεννητριών και τη διανομή της μέσα στους ζυγούς. Συνεπώς, για την καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη τραβήχτηκαν στιγμιότυπα από την οθόνη του υπολογιστή σε διάφορες καταστάσεις του μηχανικού συστήματος. Η εικόνα 4.1 αφορά την μηδενική κατάσταση που δεν έχει τεθεί καμία γεννήτρια σε λειτουργία και έχουμε μηδενικό φορτίο και παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 4.1 SLD - 0 GEN - 0

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1, το πράσινο χρώμα στους διάφορους διακόπτες δηλώνει ότι κάθε τμήμα του συστήματος είναι κλειστό. Η μελέτη που θα πραγματοποιηθεί αφορά τη διανομή ενέργειας στον κινητήρα 1 και στο παθητικό φορτίο R-L που προσομοιώνει το φωτισμό του πλοίου.

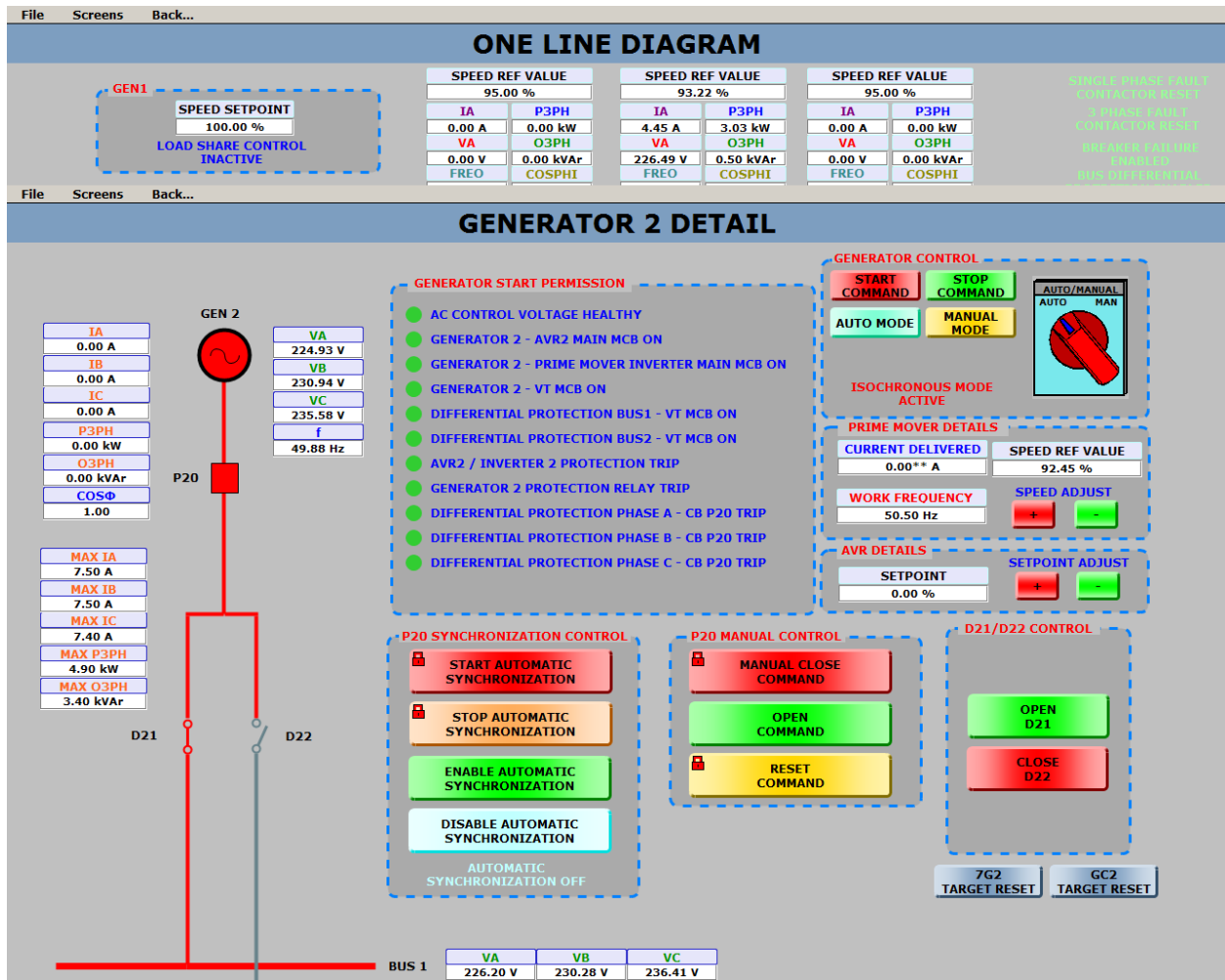
Η εκκίνηση του συστήματος πραγματοποιείται, ανοίγοντας τη γεννήτρια νούμερο 2, οπότε παρατίθεται η αρχική κατάσταση της γεννήτριας όπως φαίνεται στην οθόνη του υπολογιστή.



Εικόνα 4.2 GEN2 - 0 GEN - 0 LOAD

Η γεννήτρια 2 ξεκινάει τη λειτουργία της χρησιμοποιώντας την εντολή **START COMMAND** που βρίσκεται στη κατηγορία **Generator control** της εικόνας 4.2. Έπειτα, πιέζεται το κουμπί **CLOSE D21** ώστε να κλείσει ο αποζεύκτης που ελέγχει τη παροχή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη γεννήτρια. Τέλος, χρησιμοποιείται η εντολή **MANUAL CLOSE COMMAND P20** για να ανοίξει ο διακόπτης που επιτρέπει τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος.

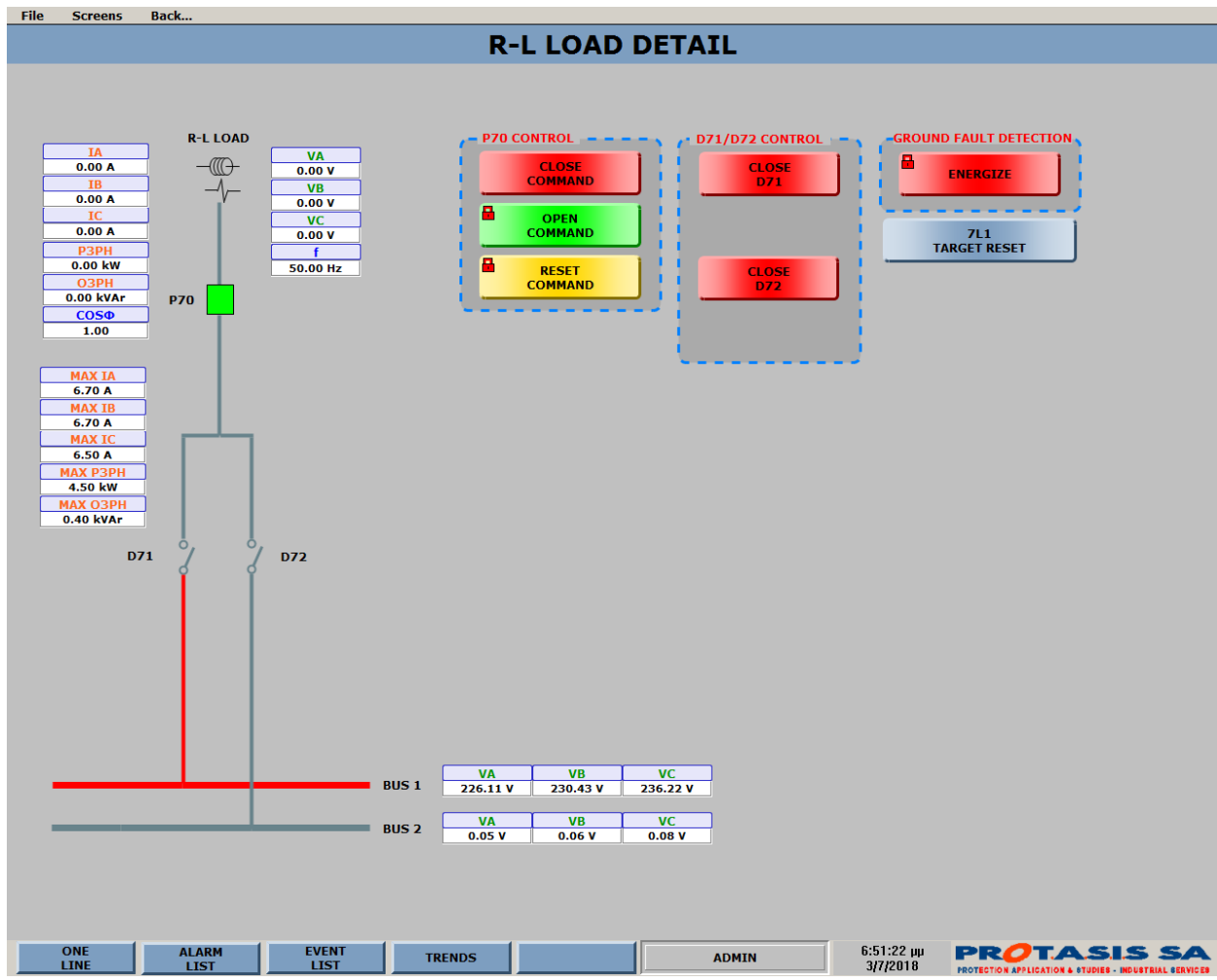
Αφού η γεννήτρια 2 ξεκινήσει τη λειτουργία της στην οθόνη του υπολογιστεί εμφανίζεται η εικόνα 4.3 :



**Εικόνα 4.3 GEN2 – 1 GEN – 0 LOAD**

Όπου πλέον η γεννήτρια, ο διακόπτης και ο αποζεύκτης έχουν κόκκινο χρώμα που επιβεβαιώνει τη λειτουργία της.

Στη συνέχεια, ασχολούμαστε με την τροφοδοσία του τμήματος **R - L LOAD** το οποίο φαίνεται αναλυτικότερα στην εικόνα 4.4:



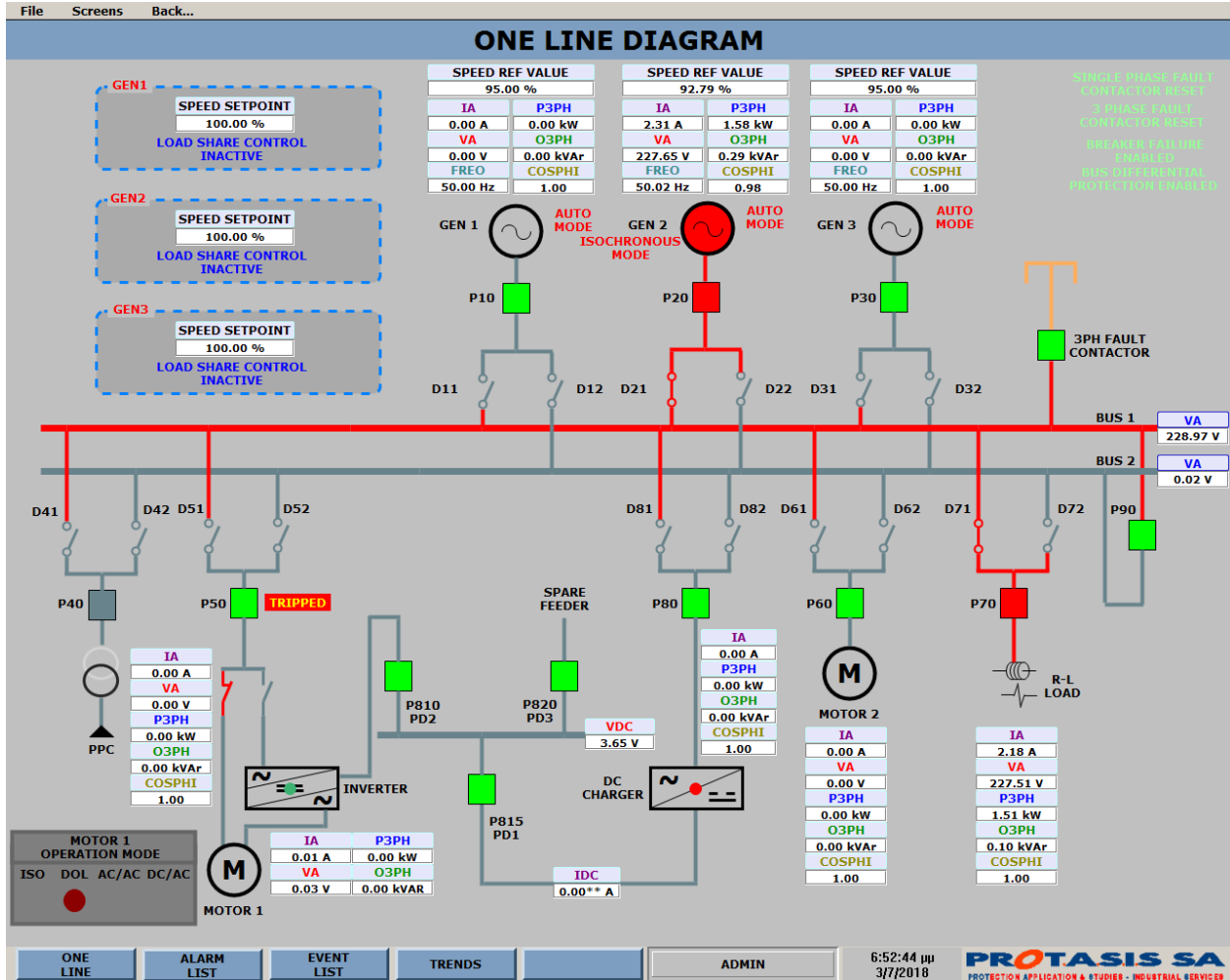
Εικόνα 4.4 R - L LOAD

Συνεπώς, πατάμε τα κουμπιά **CLOSE D71** και **CLOSE COMMAND P70** με σκοπό να επιτρέπεται η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος στο εν λόγω κύκλωμα.



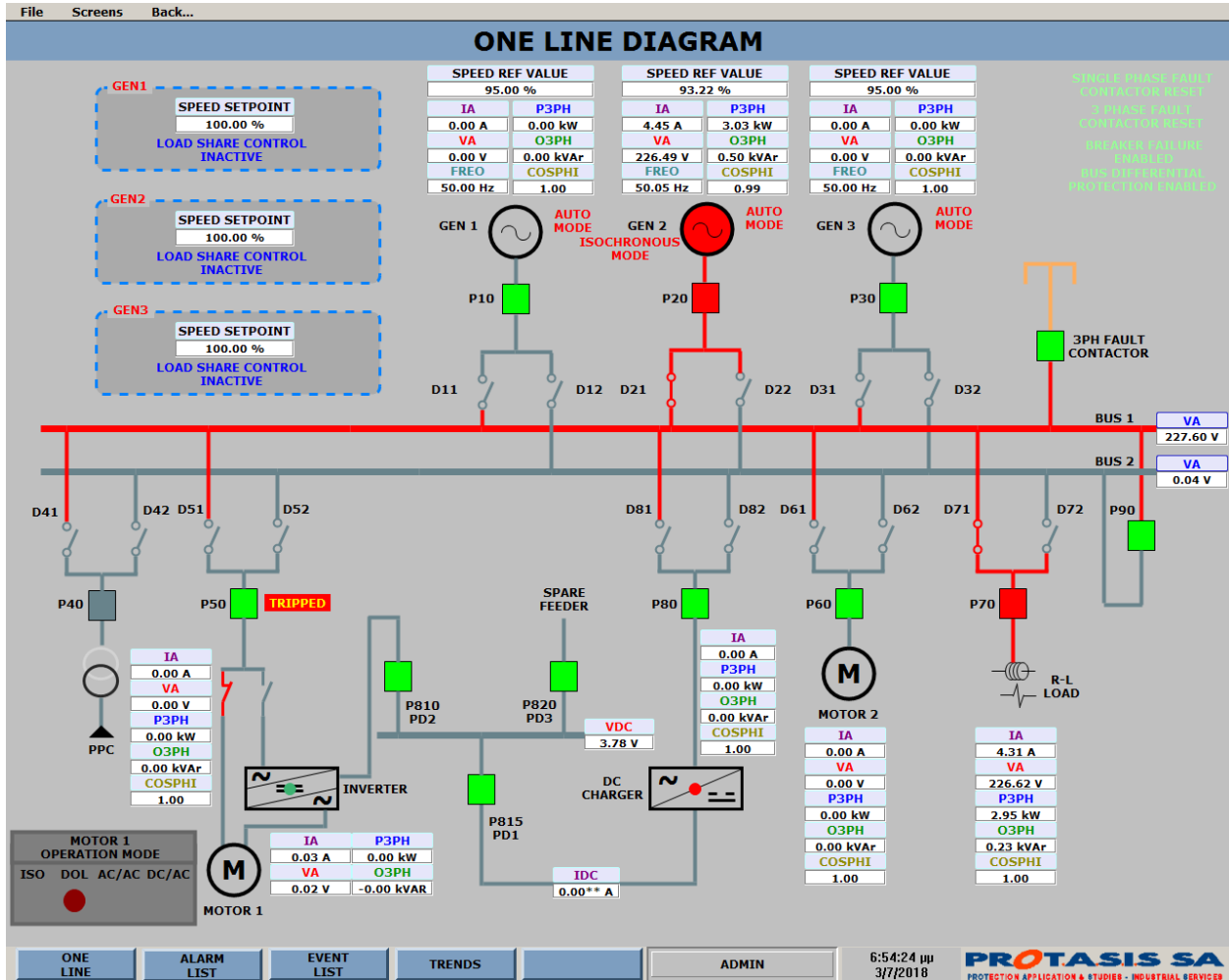
Έπειτα, καταγράφουμε τα αποτελέσματα με ταυτόχρονη λειτουργία της γεννήτριας 2 και του **R-L LOAD** σε 2 διαφορετικές καταστάσεις.

Αναλυτικότερα, για την πρώτη σκάλα του **R-L LOAD** στα 1600 W (2.3 A ανά φάση) έχουμε:



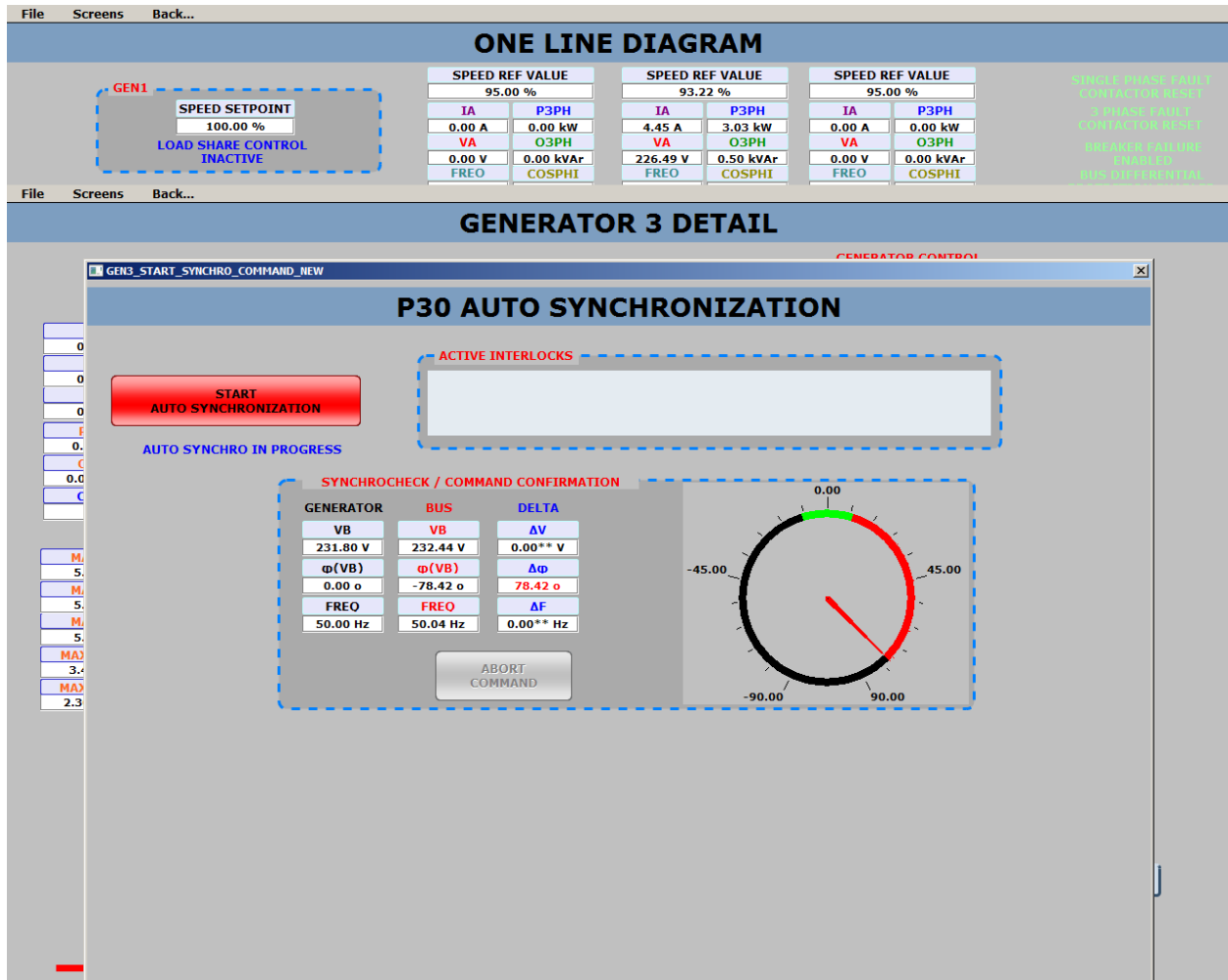
Εικόνα 4.5 SLD - 1 GEN – LOAD 1600 R-L

Στη δεύτερη σκάλα του R-L LOAD στα 3200 W (4.5 A ανά φάση), έχουμε :

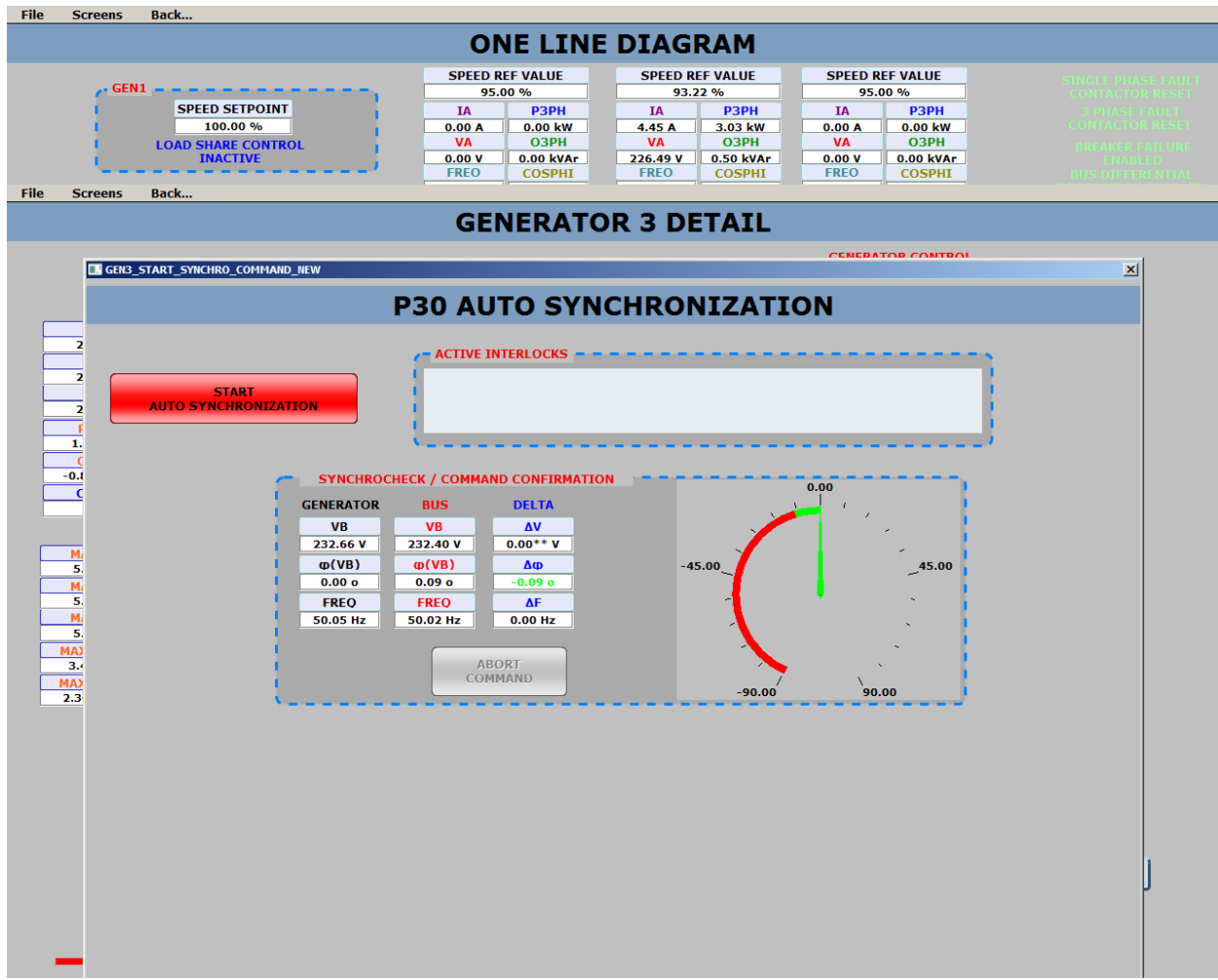


Εικόνα 4.6 SLD – 1 GEN - LOAD 3200 R-L

Στη συνέχεια, θα ανοίξουμε και τη γεννήτρια νούμερο 3 για να καταγραφούν νέες μετρήσεις. Όμως, για να ξεκινήσει η γεννήτρια 3 πρέπει να παραλληλιστεί με την γεννήτρια 2 που βρίσκεται ήδη σε λειτουργία. Όπως κάναμε και με τη γεννήτρια 2, εκτελούμε την εντολή **CLOSE D31** και μετά πατάμε το κουμπί **ENABLE AUTOMATIC SYNCHRONIZATION** ώστε να ενεργοποιηθεί η δυνατότητα παραλληλισμού των δύο γεννητριών, δηλαδή η λειτουργία τους σε ίδια φάση, ίδια τάση και ίδια συχνότητα. Έπειτα, πατάμε το κουμπί **START AUTOMATIC SYNCHRONIZATION** που σηματοδοτεί την έναρξη της διαδικασίας παραλληλισμού. Στις παρακάτω εικόνες 4.7 και 4.8 φαίνεται το αρχικό και το τελικό στάδιο παραλληλισμού.



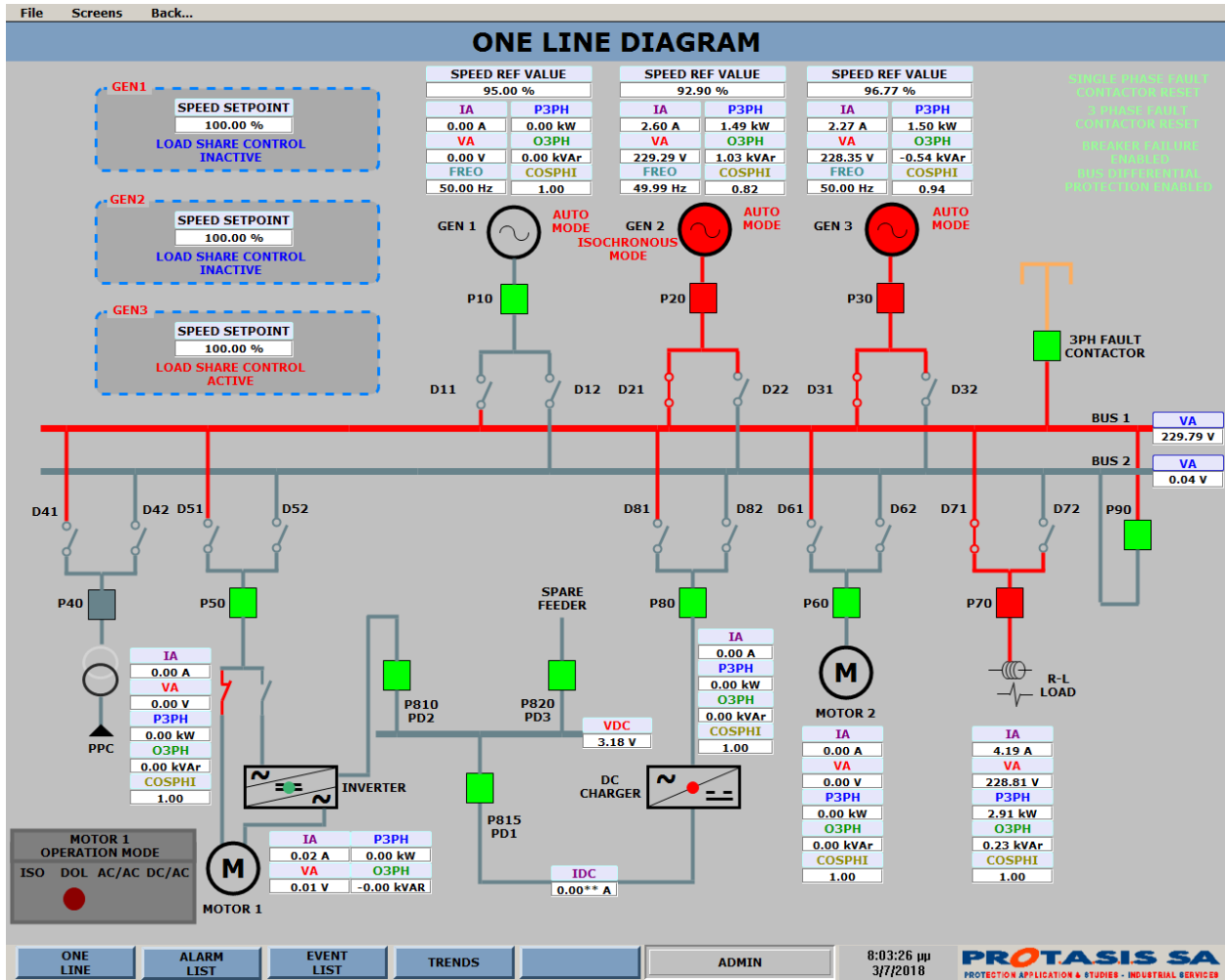
Εικόνα 4.7 GEN 3 – AUTO SYNCH - BEFORE



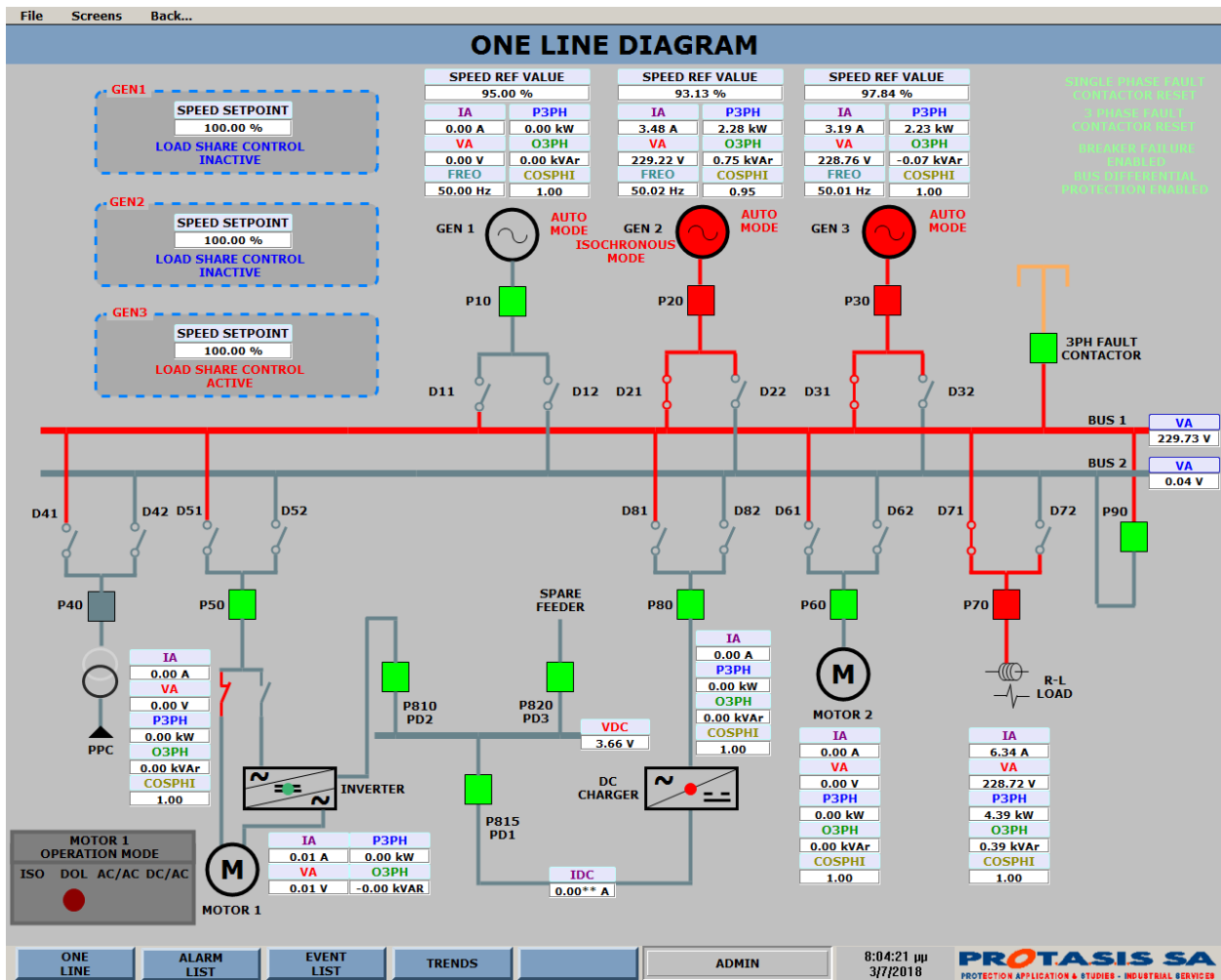
Εικόνα 4.8 GEN 3 – AUTO SYNCH - AFTER

Από τις παραπάνω εικόνες είναι εύκολα αντιληπτό ότι η διαφορά φάσης πριν τον παραλληλισμό είναι  $\Delta\phi=90^\circ$  ενώ μετά τον παραλληλισμό  $\Delta\phi=0^\circ$  που σημαίνει ότι η γεννήτρια 3 είναι έτοιμη για λειτουργία. Γενικότερα, όταν ο δείκτης βρεθεί περί της πράσινης περιοχής τότε σημαίνει ότι ο παραλληλισμός έχει επιτευχθεί.

Στο σημείο αυτό, θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις με ταυτόχρονη λειτουργία των δύο γεννητριών και του **R - L LOAD** στη σκάλα των 3200 W (4.5 A ανά φάση) και στη σκάλα των 4800 W (6.8 A ανά φάση). Στις εικόνες 4.9 και 4.10 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα:

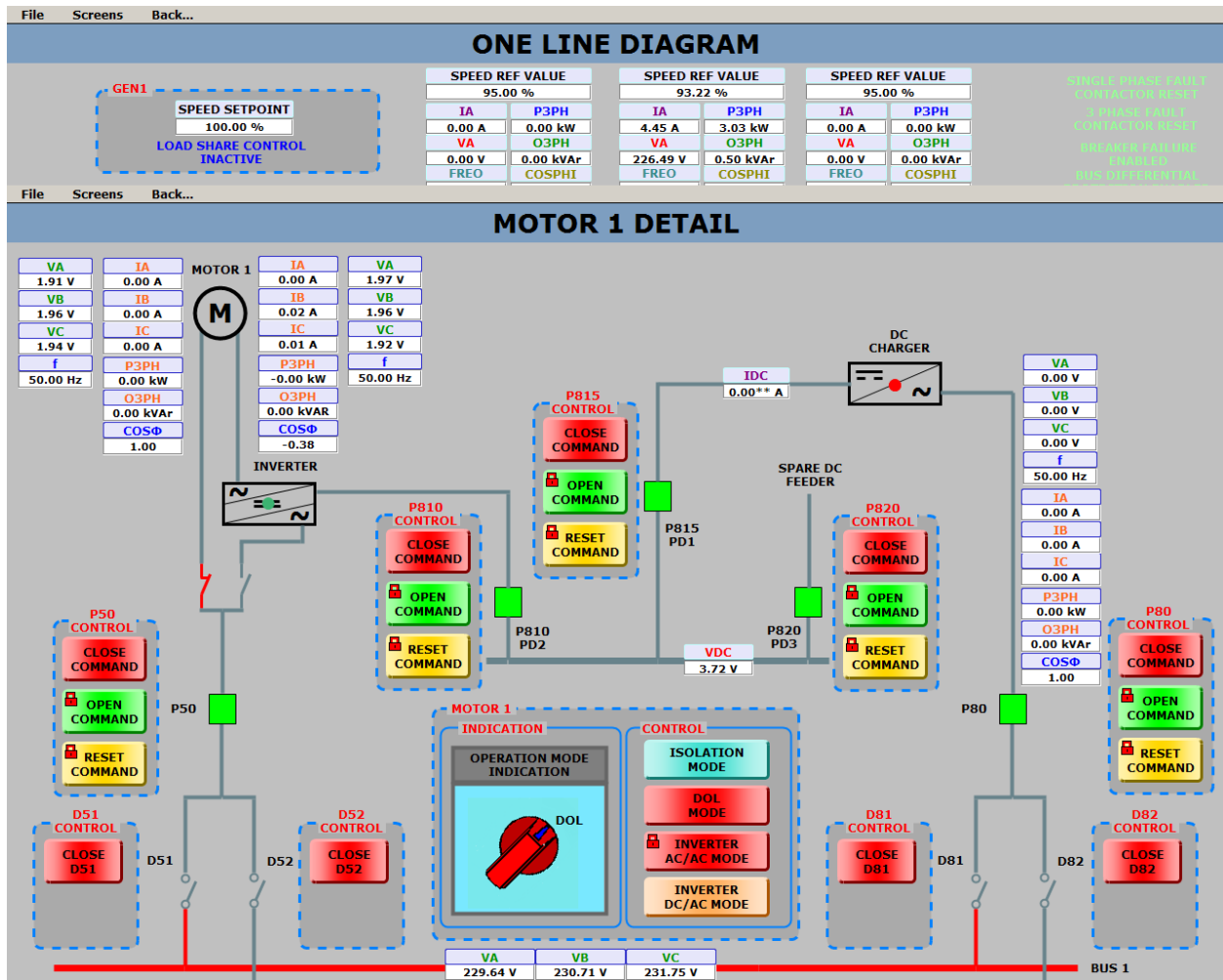


Εικόνα 4.9 SLD – 2 GEN – LOAD 3200 R-L



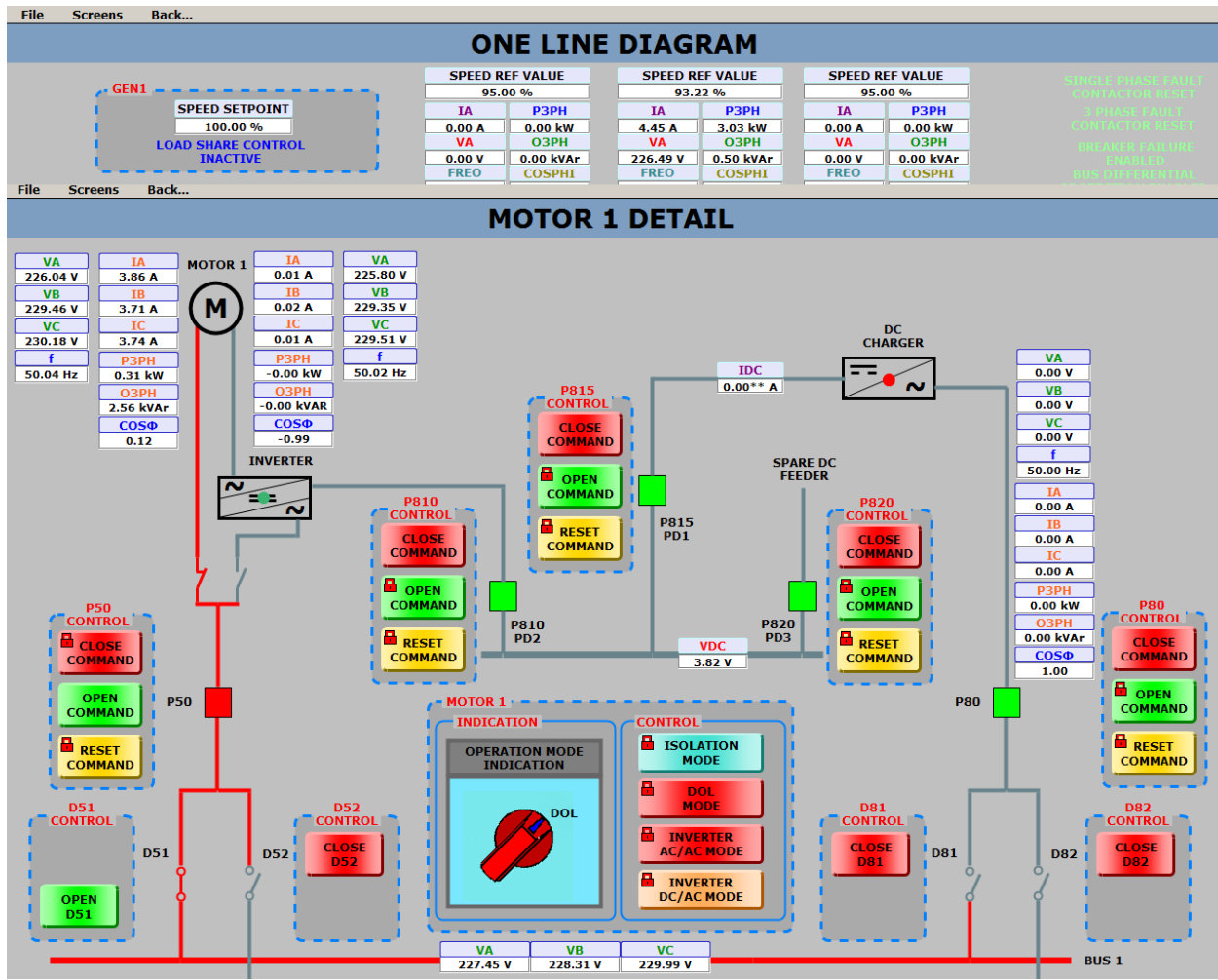
Εικόνα 4.10 SLD – 2 – GEN LOAD 4800 R - L

Εφόσον, και οι δύο γεννήτριες έχουν τεθεί πλέον σε λειτουργία, θα ενεργοποιήσουμε και τον κινητήρα (MOTOR 1) σε ταχύτητα περιστροφής  $n_0=1500$  rpm.



Εικόνα 4.11 MOTOR 1 - OPEN 1500 RPM

Στην εικόνα 4.11 παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα του **MOTOR 1** πριν τη λειτουργία του καθώς είναι οι διακόπτες είναι ακόμα ανοιχτοί.

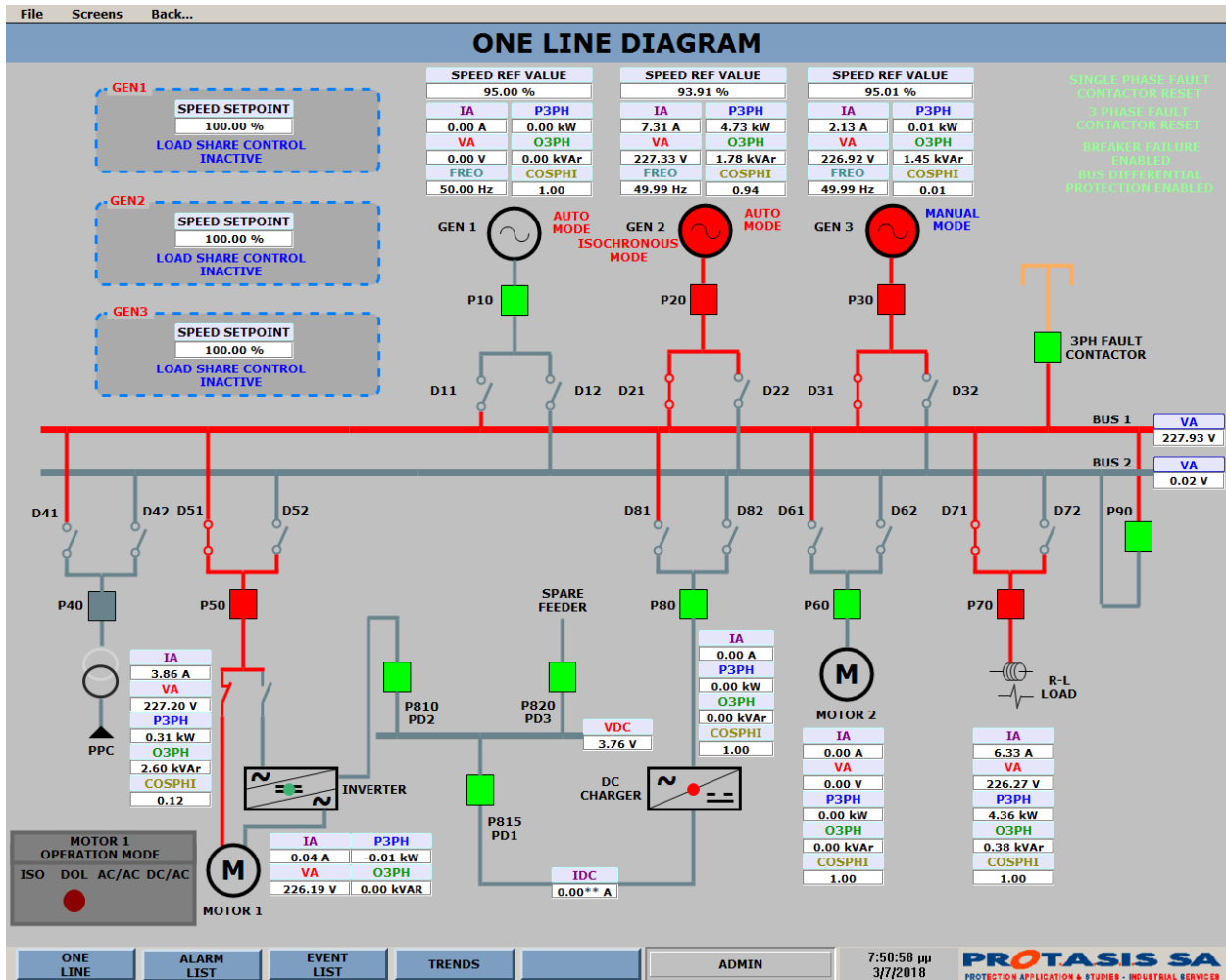


Εικόνα 4.12 MOTOR 1 - CLOSED 1500 RPM

Αντιθέτως, στην εικόνα 4.12 παρουσιάζεται ο κινητήρας σε λειτουργία αφού χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές **CLOSE D51** και **CLOSE COMMAND P50** για να κλείσουν οι διακόπτες και να ανοίξει το κύκλωμα.

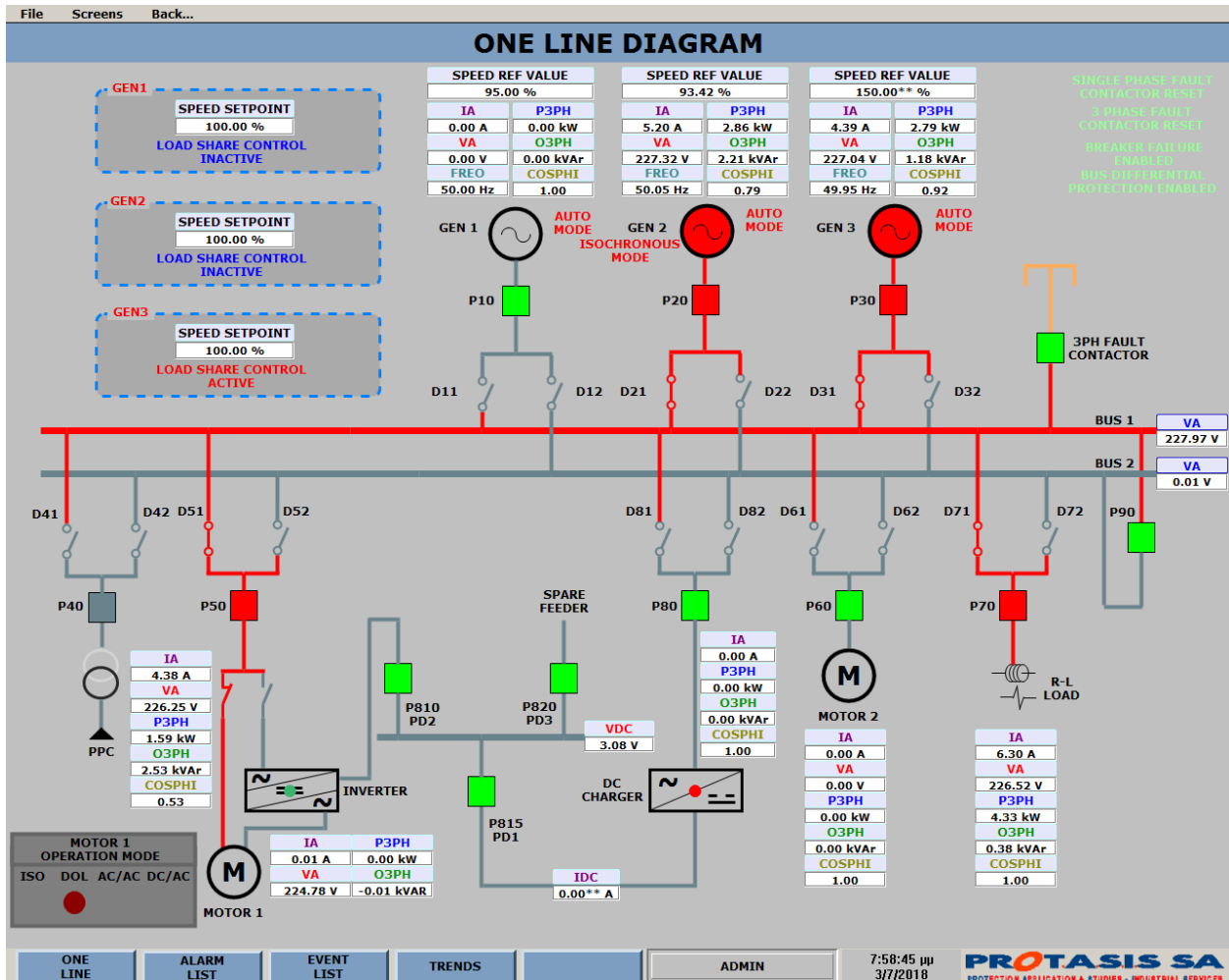


Πλέον, με τη παράλληλη λειτουργία των δύο γεννητριών και του κινητήρα με ταχύτητα περιστροφής ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα του και του R-L LOAD στα 4800 W, έχουμε:

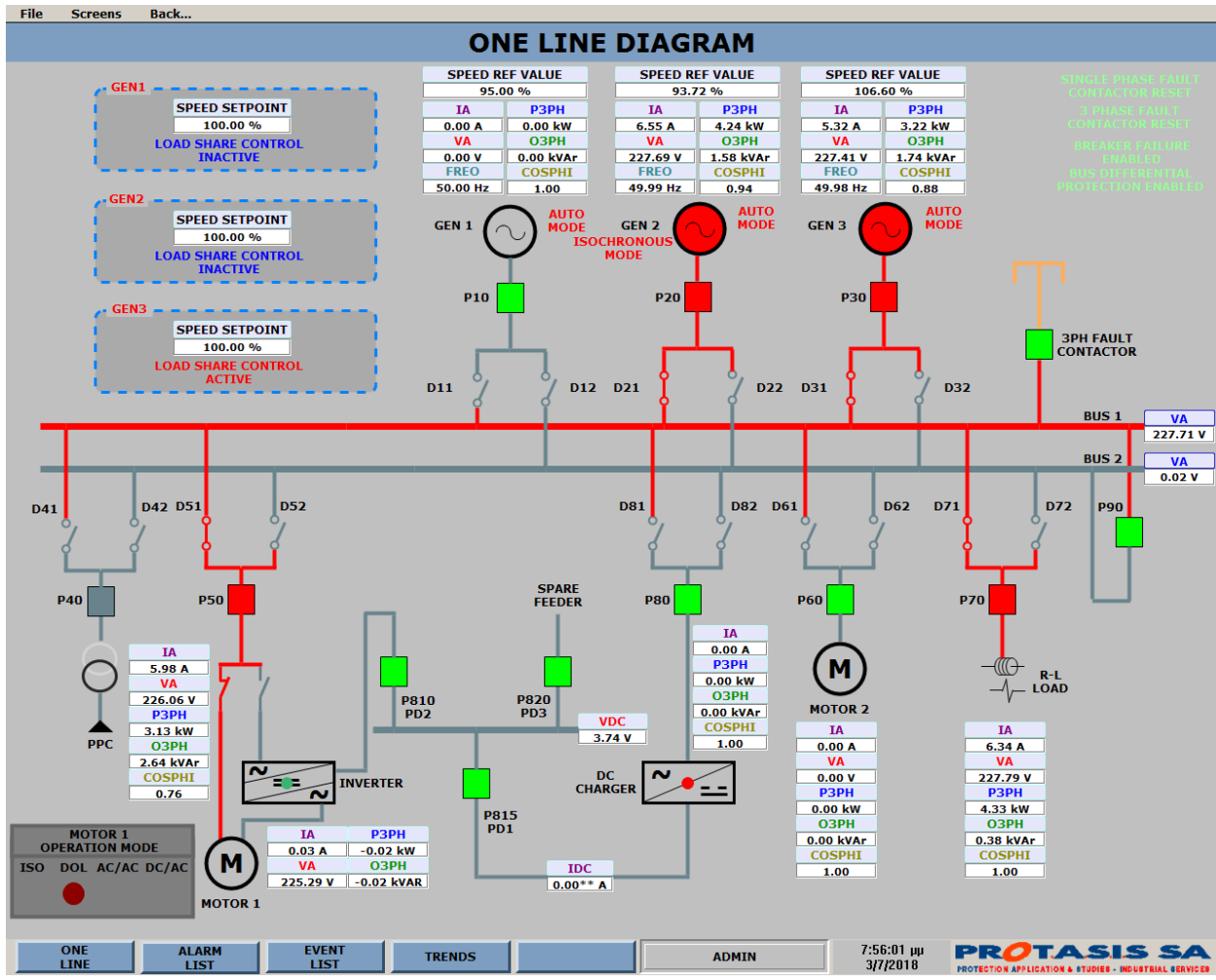


Εικόνα 4.13 SLD -2 GEN – LOAD 4800 R – L – MOTOR 1 1500 RPM

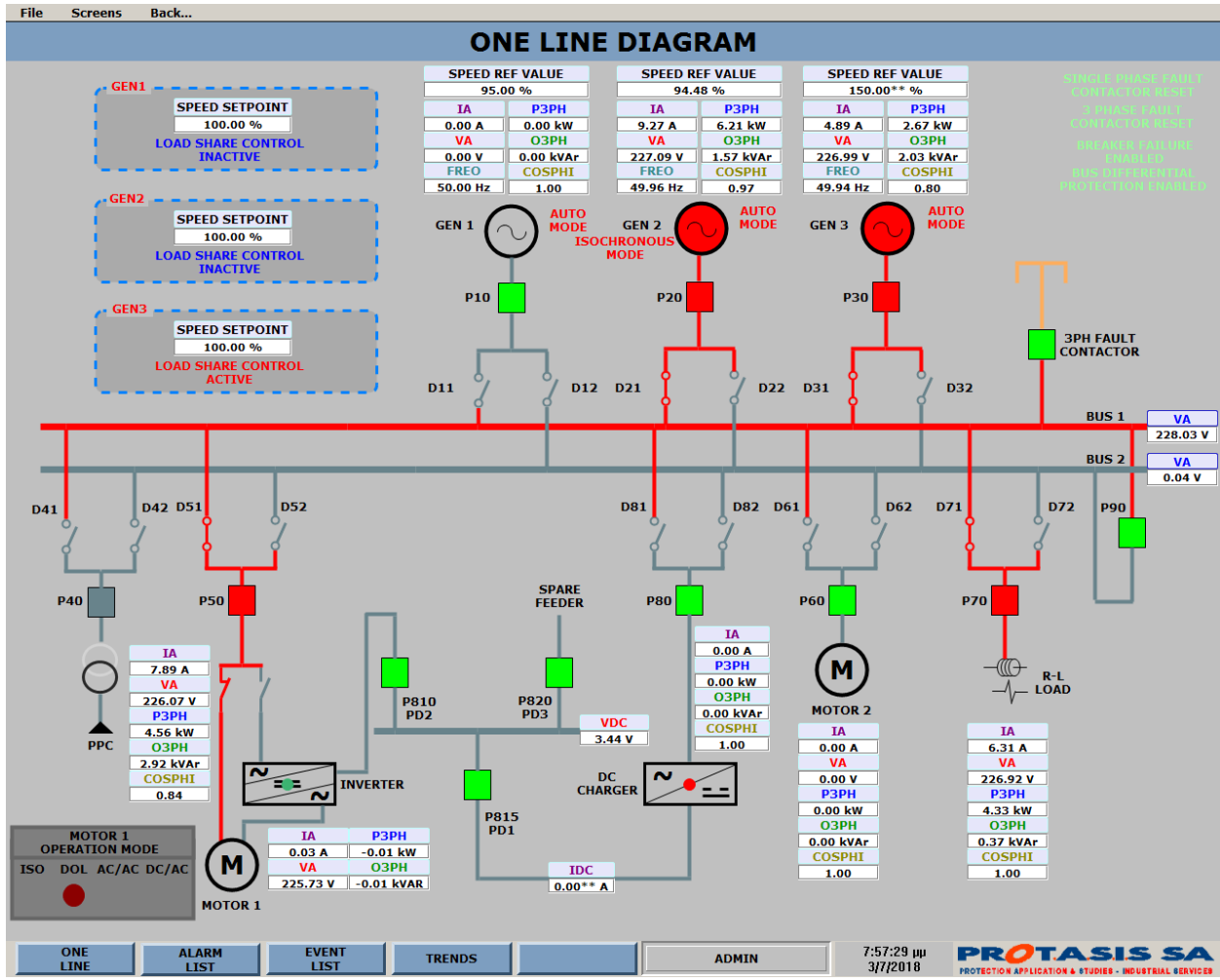
Για να κατανοήσουμε καλύτερα την παραπάνω μέτρηση θα γίνει σύγκριση για διάφορες ταχύτητες του MOTOR – 1 δηλαδή με ταχύτητα περιστροφής χαμηλότερης της σύγχρονης ταχύτητας. Ειδικότερα, οι μετρήσεις θα πραγματοποιηθούν για ταχύτητα περιστροφής  $n_1=1450\text{rpm}$ ,  $n_2=1400\text{rpm}$ ,  $n_3=1350\text{rpm}$  και παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες. Σημειώνεται ότι η αλλαγή των στροφών του κινητήρα έγινε χειροκίνητα.



Εικόνα 4.14 SLD – 2 GEN – LOAD 4800 R-L – MOTOR 1 1450 RPM



Εικόνα 4.15 SLD – 2 GEN – LOAD 4800 R-L - MOTOR 1 1400 RPM



Εικόνα 4.16 SLD – 2 GEN – LOAD 4800 R-L – MOTOR 1 1350 RPM

Αν συγκρίνουμε τις παραπάνω μετρήσεις, παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και απομακρύνεται από την τιμή της σύγχρονης ταχύτητας, έχουμε αύξηση της ροπής (P3PH) λόγω τριβών. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η ισχύς δεν ισομοιράζεται στις δύο γεννήτριες αλλά η γεννήτρια σε isochronous mode τραβάει περισσότερη ισχύ αφού ανοίχτηκε πρώτη και συνεπώς παράγει περισσότερη ισχύ.

## **5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

#### **5.1 Γενικά Συμπεράσματα**

Ανακεφαλαιώνοντας, στο πρώτο σκέλος αυτής της διπλωματικής εργασίας αναλύθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο για την επιτυχή εκτέλεση των εργαστηριακών ασκήσεων των μαθημάτων της Ηλεκτροτεχνίας καθώς και των Ηλεκτροτεχνικών Εφαρμογών και Εργαστήριο.

Ειδικότερα, η 1<sup>η</sup> εργαστηριακή άσκηση πραγματοποιήθηκε τη μέτρηση τάσης ΣΡ καθώς και διάφορες μετρήσεις LCR για αντίστοιχα πηνία, πυκνωτές και αντιστάτες. Αντίστοιχα, η 2<sup>η</sup> εργαστηριακή άσκηση ασχολείται κυρίως με τα συμμετρικά/ασύμμετρα τριφασικά κυκλώματα και με μετρήσεις των βασικών ηλεκτρικών μεγεθών για συνδεσμολογία αστέρα και τριγώνου.

Όσον αφορά την εργαστηριακή άσκηση των Ηλεκτροτεχνικών Εφαρμογών σχετίζονται 1) με δοκιμές σε μετασχηματιστές – προσδιορισμό παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος – τριφασικές συνδεσμολογίες, 2) μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τριφασικών μηχανών ΕΡ και 3) παραλληλισμό γεννητριών.

Για όλα τα παραπάνω πειράματα πραγματοποιήθηκαν βιντεοσκοπήσεις για την ευκολότερη κατανόηση του αναγνώστη και την καλύτερη επεξήγηση των μετρήσεων μέσα από οπτικοακουστικά μέσα.

Το δεύτερο σκέλος της διπλωματικής εργασίας αποτελούνταν με τη θεωρητική και πειραματική προσέγγιση του εξομοιωτή ηλεκτρικού δικτύου πλοίου (grid emulator) και αποτελεί ουσιαστικά μια μικρογραφία του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου, το οποίο ευθύνεται για τη διαχείριση, τη διανομή και τη παρακολούθηση της ηλεκτρικής ενέργειας.

## 5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Σχετικά με μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες πέραν της επέκτασης των ήδη υπάρχουσών ασκήσεων στα πλαίσια των μαθημάτων «Ηλεκτροτεχνίας» και «Ηλεκτροτεχνικών Εφαρμογών», ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος εκμετάλλευσης όλων των εργαλείων και των δυνατοτήτων του grid emulator. Έτσι καταγράφονται οι εξής ιδέες:

- Καλύτερη παρουσίαση του sag generator (αρχή λειτουργίας του, εξομοίωση φαινομένων κλπ)
- Παρουσίαση του DC υπο-δικτύου του Grid emulator (με καλύτερη περιγραφή και σύνθεση εργαστηριακών ασκήσεων κυρίως επιδεικτικού χαρακτήρα)
- Προσομοίωση του δικτύου και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων με αυτά των πειραματικών μετρήσεων.

Ήδη προς αυτή την κατεύθυνση έγιναν προσπάθειες στο πλαίσιο δύο ερευνητικών προγραμμάτων. Αρχικά, το πρόγραμμα “DEFKALION” που επικεντρώθηκε στη σε βάθος διερεύνηση θεμάτων ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος που προκύπτουν στο πλοίο. Έπειτα το πρόγραμμα “DC-ship” που συγκρίνει τα πλεονεκτήματα ΣΡ έναντι ΕΡ του ηλεκτρικού δικτύου, όσον αφορά την εγκατάσταση και τη λειτουργία τους με σκοπό την αποδοτικότητα του πλοίου σύμφωνα με τους δείκτες EEDI/ΕΕΟΙ (εστιάζοντας στη κατανάλωση καυσίμου και σχετικών εκπομπών όπως ορίζονται από τον IMO). Τέλος, στο πλαίσιο δραστηριοτήτων για χρήση της ηλεκτρικής διασύνδεσης πλοίου ξηράς (cold ironing) μπορεί να δημιουργηθούν εργαστηριακές ασκήσεις στον grid emulator αξιοποιώντας τη δυνατότητα του να συγχρονίζονται οι γεννήτριές του με το κεντρικό δίκτυο.

Τέλος, μπορεί να δρομολογηθεί η ανάπτυξη ενός Σχεδίου Κεντρικής Διαχείρισης των επιδόσεων (SEEMP) ενσωματωμένο στο σύστημα (SCADA) του Grid emulator. Πιο συγκεκριμένα, το κεντρικό σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου του συνόλου του ηλεκτρικού δικτύου (με όλες τις κρίσιμες παραμέτρους λειτουργίας) θα είναι η “ιδανική πλατφόρμα” για την ανάπτυξη του SEEMP για το ηλεκτρικό πλοίο. Τέλος, περαιτέρω διερεύνηση και ανάπτυξη των δεικτών EEDI/ΕΕΟΙ για πλοία με ηλεκτρική πρόωση.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Οι εκφωνήσεις των της 1<sup>ης</sup> και της 2<sup>ης</sup> εργαστηριακής άσκησης παρουσιάζονται παρακάτω:

**Εργαστηριακές ασκήσεις ηλεκτροτεχνίας**  
**1<sup>η</sup> εργαστηριακή άσκηση**  
*Γνωριμία με όργανα μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών - Απλές Μετρήσεις*

Ημερομηνία: _____ Ομάδα: _____	Φοιτητής 1: _____ Φοιτητής 2: _____ Φοιτητής 3: _____ Φοιτητής 4: _____ Φοιτητής 5: _____
-----------------------------------	---

**1<sup>ο</sup> μέρος: Μέτρηση τάσης ΣΡ/ΕΡ**

*Απαιτούμενος Εξοπλισμός*

- βολτόμετρο ψηφιακό,
- βολτόμετρο αναλογικό,
- Δοκιμαστικό τάσης (voltage tester),
- δοκιμαστικό κατσαβίδι
- ΣΡ μπαταρίες (μία, εν σειρά, παράλληλα)
- ΕΡ ντρίβ (σε διάφορα επίπεδα τάσης) /πρίζα ΕΡ

*Διεξαγωγή άσκησης*

**Μέτρηση συνεχούς τάσης**

Α) Μετρήστε την τάση εξόδου των μπαταριών που διατίθενται και καταγράψτε τις μετρήσεις σας:

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου
9 V	
9 V	

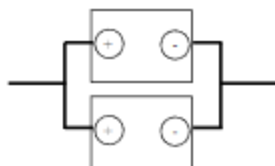
Β) Συνδέστε σε σειρά (Προσοχή στις συνδέσεις) δύο μπαταρίες 9 V μετρήστε και καταγράψτε τη συνολική τάση

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου
9 V σε σειρά	

1 & 2<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση Ηλεκτροτεχνίας

Γ) Συνδέστε παράλληλα (Προσοχή στις συνδέσεις) δύο μπαταρίες 9 V μετρήστε και καταγράψτε τη συνολική τάση:

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου
9 V παράλληλα	



#### Μέτρηση εναλλασσόμενης τάσης

Μετρήστε την τάση εξόδου του variac σε τέσσερις (4) διαφορετικές θέσεις:

	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου	Ένδειξη Δοκιμαστικού Τάσης
1 <sup>η</sup> θέση		
2 <sup>η</sup> θέση		
3 <sup>η</sup> θέση		
4 <sup>η</sup> θέση		

#### 2<sup>ο</sup> μέρος: Μετρήσεις LCR

Απαιτούμενος Εξοπλισμός:

- πολύμετρο-γέφυρα LCR ψηφιακό
- αντιστάτες, πυκνωτές, πηνία

Διεξαγωγή άσκησης

A) Διαλέξτε μερικά πηνία και ελέγξτε την ακρίβεια της τυποποιημένης τιμής τους μετρώντας την τιμή της επαγωγής τους με το πολύμετρο-γέφυρα

	Θεωρητική Τιμή επαγωγής	Μέτρηση
1 <sup>ο</sup> πηνίο		
2 <sup>ο</sup> πηνίο		

1 & 2<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση Ηλεκτρονικής



Β) Διαλέξτε μερικούς πυκνωτές και ελέγξτε την ακρίβεια της τυποποιημένης τιμής τους μετρώντας την τιμή της χωρητικότητάς τους με το πολύμετρο-γέφυρα

	Θεωρητική Τιμή χωρητικότητας	Μέτρηση
1 <sup>ος</sup> πυκνωτής		
2 <sup>ος</sup> πυκνωτής		

Γ) Διαλέξτε μερικούς αντιστάτες και ελέγξτε την ακρίβεια της τυποποιημένης τιμής τους μετρώντας την τιμή της αντίστασής τους με το πολύμετρο-γέφυρα

	Θεωρητική Τιμή αντίστασης	Μέτρηση
1 <sup>ος</sup> αντιστάτης		
2 <sup>ος</sup> αντιστάτης		

Δ) Συνδέστε δύο πηνία σε σειρά (αυτά της δοκιμής (Α)) και επαληθεύστε το θεωρητικό τύπο για τη συνολική επαγωγή:

	Θεωρητική Τιμή επαγωγής	Μέτρηση
1 <sup>ο</sup> πηνίο		
2 <sup>ο</sup> πηνίο		
Συνδυασμός σειράς		

Ε) Συνδέστε δύο πηνία παράλληλα (αυτά της δοκιμής (Α)) και επαληθεύστε το θεωρητικό τύπο για τη συνολική επαγωγή:

	Θεωρητική Τιμή επαγωγής	Μέτρηση
1 <sup>ο</sup> πηνίο		
2 <sup>ο</sup> πηνίο		
Παράλληλος Συνδυασμός		

ΣΤ) Συνδέστε δύο πυκνωτές σε σειρά (αυτά της δοκιμής (Β)) και επαληθεύστε το θεωρητικό τύπο για τη συνολική χωρητικότητα:

	Θεωρητική Τιμή χωρητικότητας	Μέτρηση
1 <sup>ος</sup> πυκνωτής		
2 <sup>ος</sup> πυκνωτής		
Συνδυασμός σειράς		

Ζ) Συνδέστε δύο πυκνωτές παράλληλα (αυτά της δοκιμής (Β)) και επαληθεύστε το θεωρητικό τύπο για τη συνολική χωρητικότητα:

	Θεωρητική Τιμή χωρητικότητας	Μέτρηση
1 <sup>ος</sup> πυκνωτής		
2 <sup>ος</sup> πυκνωτής		
Παράλληλος Συνδυασμός		

Η) Συνδέστε δύο αντιστάτες σε σειρά (αυτά της δοκιμής (Γ)) και επαληθεύστε το θεωρητικό τύπο για τη συνολική αντίσταση:

	Θεωρητική Τιμή αντίστασης	Μέτρηση
1 <sup>ος</sup> αντιστάτης		
2 <sup>ος</sup> αντιστάτης		
Συνδυασμός σειράς		

Θ) Συνδέστε δύο αντιστάτες παράλληλα (αυτά της δοκιμής (Γ)) και επαληθεύστε το θεωρητικό τύπο για τη συνολική αντίσταση:

	Θεωρητική Τιμή αντίστασης	Μέτρηση
1 <sup>ος</sup> αντιστάτης		
2 <sup>ος</sup> αντιστάτης		
Παράλληλος συνδυασμός		

### 3<sup>ο</sup> μέρος: Μέτρηση ρεύματος EP

*Διεξαγωγή άσκησης*

Απαιτούμενος Εξοπλισμός:

- αμπερόμετρο ψηφιακό
- πηγή ρεύματος 0-20 mA

Μετρήστε με το ψηφιακό αμπερόμετρο-τσιμπίδα και καταγράψτε την ενεργό τιμή του ρεύματος διαφόρων φορτίων EP.

	Ένδειξη Ψηφιακού Αμπερομέτρου
Φορτίο 1:	
Φορτίο 2:	

Συνδέστε στην έξοδο της πηγής ρεύματος έναν αντιστάτη γνωστής ομικής αντίστασης, ενώ παράλληλα συνδέστε ένα ψηφιακό βολτόμετρο και ρυθμίστε την πηγή ρεύματος ώστε να παράγει διαδοχικά 4mA, 10 mA Και 20 mA. Μετρήστε την ένδειξη του βολτομέτρου και επαληθεύσατε την ένδειξη της πηγής ρεύματος διαγράφοντας την τάση με την τιμή της αντίστασης.

Ένδειξη Πηγής ρεύματος	Ένδειξη Ψηφιακού Βολτομέτρου	Ωμική αντίσταση αντιστάτη	Διαίρεση τάσης/αντίσταση
4 mA			
10 mA			

## 2<sup>η</sup> Εργαστηριακή άσκηση Ηλεκτροτεχνίας\_3<sup>ο</sup> εξάμηνο ΣΝΜΜ/ΕΜΠ

### Τριφασικά κυκλώματα και μετρήσεις

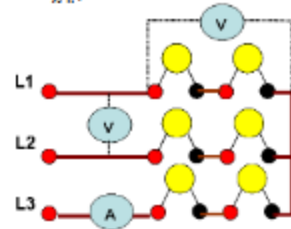
#### Όργανα που χρειάζονται

Τριφασική τροφοδοσία 15 V (πολική)  
 Συστοιχία λαμπτήρων  
 Αμπερόμετρα – Βολτόμετρα

Ημερομηνία: \_\_\_\_\_ Εργ. Ομάδα: \_\_\_\_\_

Φοιτητής 1: \_\_\_\_\_  
 Φοιτητής 2: \_\_\_\_\_  
 Φοιτητής 3: \_\_\_\_\_  
 Φοιτητής 4: \_\_\_\_\_  
 Φοιτητής 5: \_\_\_\_\_

**A)** Συνθέστε συμμετρικό τριφασικό κύκλωμα σε συνδεσμολογία **αστέρα (Y)**. Τροφοδοτήστε το κύκλωμα από τριφασικό τροφοδοτικό 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.



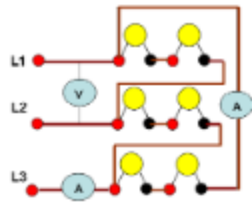
Σχήμα A.1



Σχήμα A.2

	L1	L2	L3
V(V) πολική			
I(A) γραμμής			
V(V) φασική			
S(VA)			
P(W)			
Q(VAr)			
Pf (cosφ)			
R <sub>λ</sub>			

**B)** Συνθέστε **συμμετρικό** τριφασικό κύκλωμα σε συνδεσμολογία **τριγώνου (Δ)**. Τροφοδοτήστε το κύκλωμα από τριφασικό τροφοδοτικό. Τροφοδοτήστε το κύκλωμα από τριφασικό τροφοδοτικό 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.



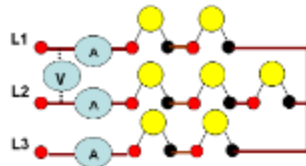
Σχήμα Β.1



Σχήμα Β.2

	L1	L2	L3
V(V) πολική			
I(A) γραμμής			
I(A) στο τρίγωνο			
S(VA)			
P(W)			
Q(VAr)			
Pf			
R <sub>s</sub>			

Γ) Συνθέστε ασύμμετρο τριφασικό κύκλωμα σε συνδεσμολογία αστέρα (Y). Εάν τροφοδοτηθεί το κύκλωμα από τριφασικό τροφοδοτικό (15 V πολική τάση) 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				

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Σε αυτό τμήμα της εργασίας παραθέτονται περισσότερες και ευκρινέστερες φωτογραφίες για τον εξοπλισμό και τα κομμάτια που απαρτίζουν τον εξομοιωτή ηλεκτρικού πλοίου που τραβήχτηκαν μέσα στο εργαστήριο.

### Φωτογραφίες- Εικόνες



**Εικόνα 1α.** Ηλεκτρικές Μηχανές του Εξομοιωτή Ηλεκτρικού Δικτύου Πλοίου



**Εικόνα 2α.** Κεντρική Μονάδα Ελέγχου Εξομοιωτή



**Εικόνα 2β.** Κεντρική Μονάδα Ελέγχου Εξομοιωτή

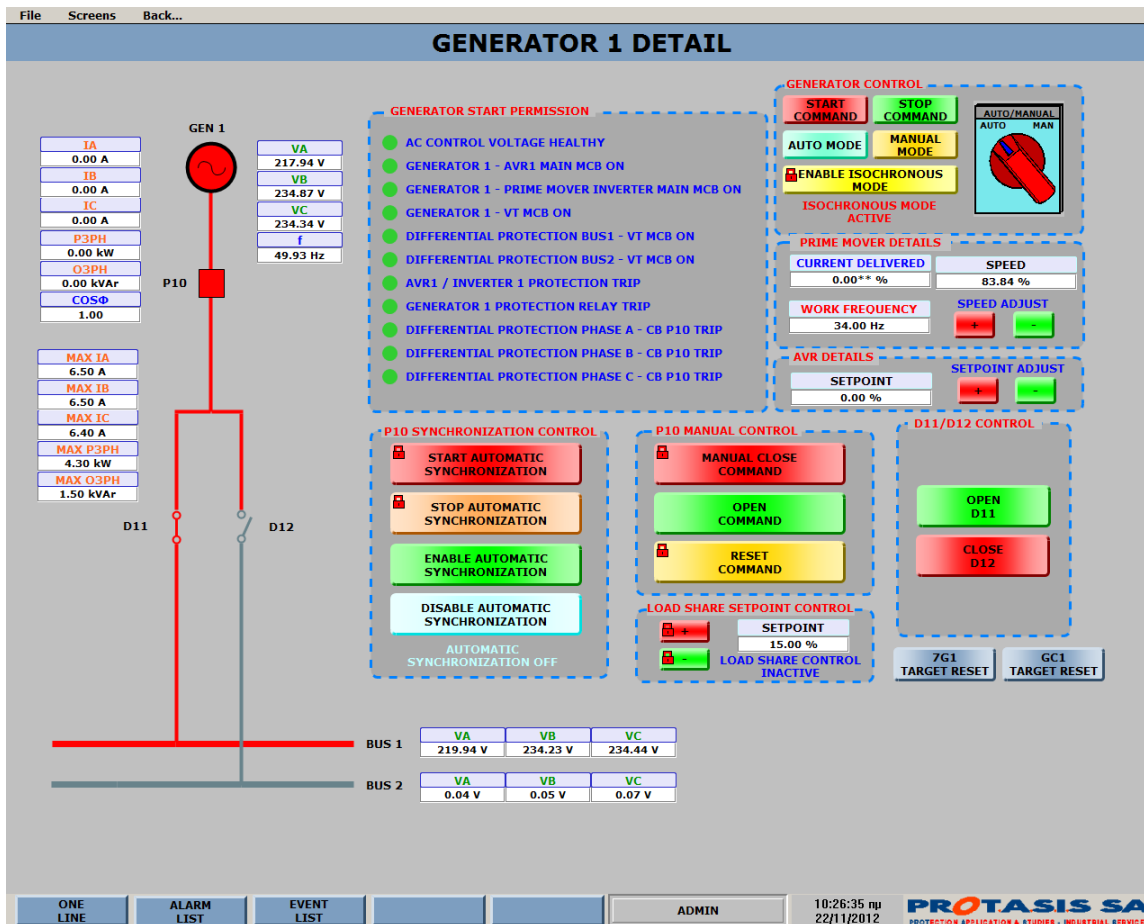


**Εικόνα 3α.** Υποσυστήματα Διανομής και Προστασίας Εξομοιωτή

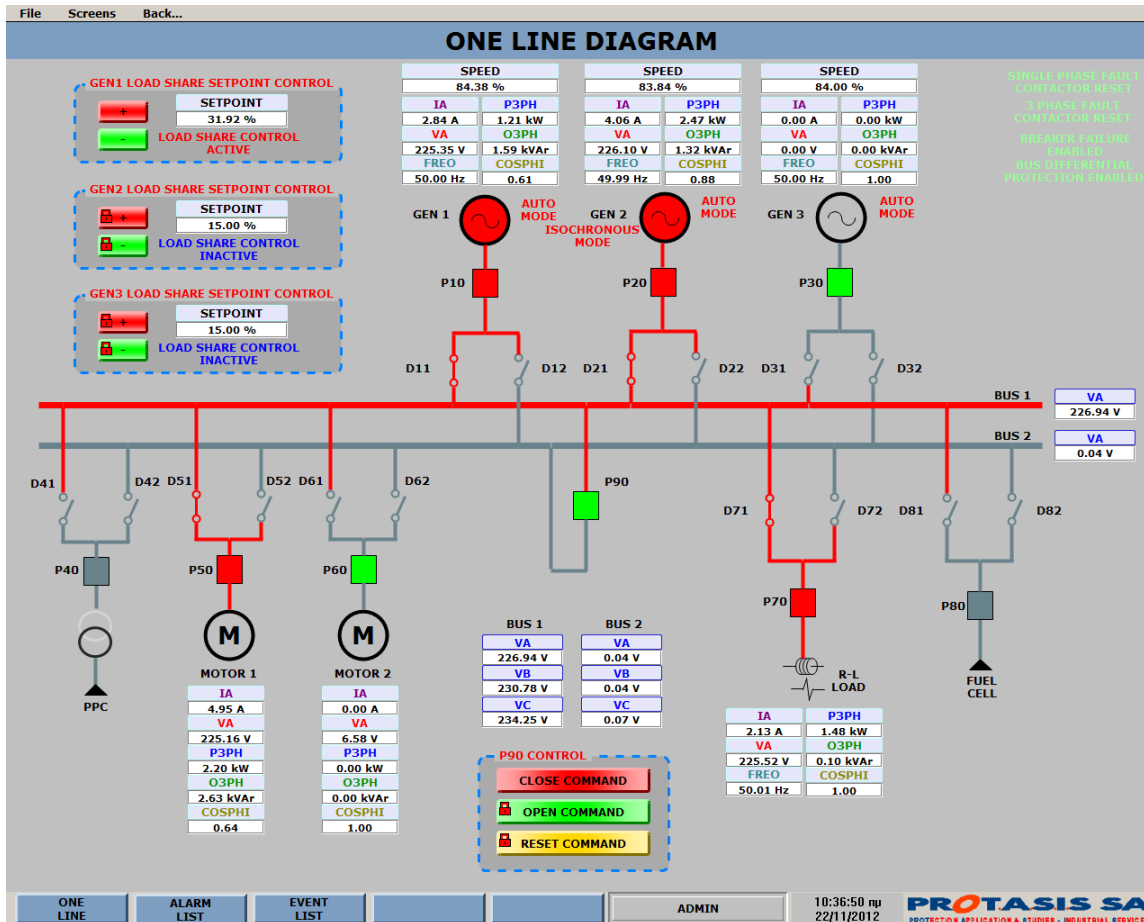


**Εικόνα 4α.** Κυψέλη καυσίμου NEXA K00-792





Εικόνα 5α. Διαχείριση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας



Εικόνα 6α. Διαχείριση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας



Εικόνα 7α. Γεννήτρια διαταραχών IPC-480V-200A



Εικόνα 8α. Κινητήρας του εξομοιωτή ηλεκτρικού δικτύου πλοίου ρυθμιζόμενος στις 1500 rpm



Εικόνα 9α. Οι τρεις διαφορετικές κλίμακες ισχύς του R-L φορτίου

## **Βιβλιογραφία**

### **Συγγράμματα**

- [1] Προυσαλίδης Ι. (Ιούλιος 2003), «ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑΣ» , Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα.
- [2] Προυσαλίδης Ι., Ιωαννίδης Ι. (2003), 3<sup>η</sup> Εργαστηριακή άσκηση 9<sup>ου</sup> Εξαμήνου, «ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΟΥ ΖΕΥΓΟΥΣ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ».
- [3] Φραγκόπουλος Χ., Προυσαλίδης Ι. (2005), «ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΙΟΥ» τεύχος Α' «ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ, ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟ», Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα.
- [4] Τρωγάδας Ν. , «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ (ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ-ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ)».
- [5] Προυσαλίδης Ι., «ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΙΩΝ».
- [6] Προυσαλίδης Ι., 2<sup>η</sup> Εργαστηριακή άσκηση 3<sup>ου</sup> Εξαμήνου.
- [7] Stephen J. Chapman, 4<sup>η</sup> Έκδοση, «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ»
- [8] Basler Electric (2005), «INSTRUCTION MANUAL FOR DIGITAN EXCITATION CONTROL SYSTEM DECS-100».
- [9] Προυσαλίδης Ι., Βαλιανάτος Π., Στυβακτάκης Ν. (Ιούνιος 2006), «ON STARTING-UP LARGE POWER MOTORS ROTATING HIGH INERTIA LOADS IN AUTONOMOUS SYSTEMS», Marine Engineers Review
- [10] Lui, T.J., Stirling, W., Marcy, H.O. 2010 "Get Smart", *IEEE power & energy magazine*, Vol. 8, no 3, pp. 66-78.

### **Σύνδεσμοι στο διαδίκτυο**

<http://zapdoc.tips/marinelive-grid-emulator.html>

<http://www.marinelive.org>

<http://www.marinelive.org/5th-and-6th-marinelive-workshops/>