



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση συστήματος ελέγχου αξονικής γεννήτριας και
ανάλυση λειτουργίας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας
πλοίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευστράτιος Ι. Χατζηνικολάου

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση συστήματος ελέγχου αξονικής γεννήτριας και
ανάλυση λειτουργίας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας
πλοίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευστράτιος Ι. Χατζηνικολάου

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Ιανουαρίου 2013.

Α. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ι. Προυσαλίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2013

.....

Ευστράτιος Ι. Χατζηνικολάου

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

Copyright © Ευστράτιος Χατζηνικολάου 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένα πρότυπο σύστημα ελέγχου αξονικών γεννητριών με τη χρήση ενός μετατροπέα τεσσάρων τεταρτημορίων. Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου επιτρέπει την παραγωγή ισχύος σταθερής τάσης και συχνότητας ακόμα και σε περιπτώσεις μεταβολής των στροφών της κύριας κινητήριας μηχανής. Επίσης, επιτρέπει τη λειτουργία της αξονικής γεννήτριας ως κινητήρα σε περίπτωση βλάβης της κινητήριας μηχανής ή για ενίσχυση αυτής. Για την επιβεβαίωση της λειτουργίας της προτεινόμενης διάταξης μοντελοποιήθηκε το πραγματικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ενός σύγχρονου πλοίου και προσομοιώθηκε σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK σε τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας:

- Απομονωμένη λειτουργία γεννητριών ντήζελ
- Παράλληλη λειτουργία αξονικών γεννητριών και γεννητριών ντήζελ
- Απομονωμένη λειτουργία αξονικών γεννητριών
- Λειτουργία έκτακτης ανάγκης με χρήση της αξονικής μηχανής ως κινητήρα

Μέσω των προσομοιώσεων επιβεβαιώθηκε η άμεση απόκριση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου κατά την εμφάνιση μεταβατικών φαινομένων όπως η αιφνίδια αύξηση του φορτίου του συστήματος του πλοίου κατά 69% και η επιτάχυνση του άξονα των αξονικών γεννητριών κατά 10%. Επίσης διαπιστώθηκε η ικανότητα των αξονικών μηχανών, η ισχύς των οποίων αντιστοιχεί στο 8% της ισχύος των κύριων μηχανών, να εξασφαλίζουν το 50% της ονομαστικής ταχύτητας σε έκτακτες περιπτώσεις λειτουργίας. Τέλος, προτάθηκε μια μέθοδος για τον υπολογισμό της ελάχιστης κατανάλωσης καυσίμου και αποτιμήθηκαν οι ωφέλειες από την εφαρμογή της προτεινόμενης σε σύγκριση με την υπάρχουσα διαμόρφωση του ηλεκτρικού συστήματος του πλοίου που εξετάστηκε. Αξίζει να σημειωθεί πως η προτεινόμενη διαμόρφωση επιτρέπει την πλήρη αξιοποίηση των αξονικών γεννητριών οδηγώντας σε εξοικονόμηση καυσίμου της τάξης του 3%.

Λέξεις κλειδιά

Αξονική γεννήτρια, ηλεκτρικό σύστημα πλοίου, μετατροπέας τεσσάρων τεταρτημορίων, διανυσματικός έλεγχος

Abstract

This diploma thesis proposes an innovative control system for the shaft generators, by implementing a back to back converter in the ship propulsion system. The proposed system ensures that the switchboards operate at constant frequency and voltage under variable engine speed. It also enables operation of the shaft generator as motor in case of failure in the propulsion engine or running in parallel with the main engine. To validate the operation of the proposed system, the complete model of the ship power system was built and used for simulation in the MATLAB/SIMULINK environment, for four different operating modes:

- Isolated operation of diesel generators
- Parallel operation of shaft generators and diesel generators
- Isolated operation of shaft generators
- Emergency operation with the shaft generator running in motor mode

The aforementioned simulations confirmed the immediate response of the proposed control system at the onset of transients such as a sudden load increase by 30% or an acceleration of the shaft speed by 10%. The simulations also demonstrated the shaft system's ability, the power of which corresponds to 8% of the main engine's power, in order to provide 50% of the rated shaft speed in emergency operation. Finally, a method for calculating the minimum fuel oil consumption is proposed and the benefits of implementing the proposed control scheme compared to the existing configuration of the examined vessel are assessed. It is worth noting that the proposed configuration allows full utilization of the shaft generators, leading to 3% fuel savings.

Key words

Shaft generator, back to back converter, ship power system, vector control

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Αντώνιο Κλάδα, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με την παρούσα εργασία. Η καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια εκπόνησης ήταν πολύτιμη. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Χαράλαμπο Πάτσιο για την άψογη συνεργασία μας, τη συνεχή υποστήριξη και τη βοήθεια που μου πρόσφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	11
1.1. Αξονικές γεννήτριες	11
1.2. Κατηγοριοποίηση αξονικών γεννητριών.....	12
1.2.1. Σύστημα ανάληψης ισχύος σταθερών στροφών.....	12
1.2.2. Σύστημα ανάληψης ισχύος με μηχανικό έλεγχο συχνότητας.....	13
1.2.3. Σύστημα ανάληψης ισχύος με ηλεκτρικό έλεγχο συχνότητας	14
1.3. Πλεονεκτήματα αξονικών γεννητριών	16
1.4. Μειονεκτήματα αξονικών γεννητριών	16
1.5. Στόχος της διπλωματικής εργασίας.....	17
1.6. Δομή της διπλωματικής εργασίας	18
Κεφάλαιο 2 : Περιγραφή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου	21
2.1. Περιγραφή πλοίου	21
2.2. Σύστημα αξονικών γεννητριών του υπό μελέτη πλοίου.....	21
2.3. Ηλεκτρικό δίκτυο του υπό μελέτη πλοίου.....	23
2.4. Αποφυγή παραλληλισμού των αξονικών γεννητριών με τις γεννήτριες ντήζελ	27
2.5. Ηλεκτρικός ισολογισμός του υπό μελέτη πλοίου.....	27
2.6. Καταστάσεις λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου.....	30
2.7. Μετρήσεις σε πραγματικές καταστάσεις λειτουργίας.....	35
Κεφάλαιο 3 : Μοντελοποίηση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου	41
3.1. Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών.....	42
3.1.1. Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών	44
3.2. Τριφασικός αντιστροφείας πηγής τάσης	46
3.2.1. Μοντέλο αντιστροφείας πηγής τάσης	48
3.3. Μηχανές εσωτερικής καύσης (diesel)	49
3.3.1. Έλεγχος ταχύτητας της μηχανής εσωτερικής καύσης.....	49

3.3.2. Μοντέλο μηχανής εσωτερικής καύσης και ρυθμιστή στροφών	50
3.4. Γεννήτριες εσωτερικής καύσης	52
3.4.1. Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας με τυλιγμένο δρομέα	52
3.4.2. Μοντέλο του συστήματος διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας.....	61
3.5. Μοντελοποίηση των φορτίων του Σ.Η.Ε του πλοίου	67
Κεφάλαιο 4 : Σύστημα ελέγχου αξονικών γεννητριών	71
4.1.Έλεγχος ανορθωτή στην πλευρά της αξονικής γεννήτριας.....	72
4.1.1 Στρατηγική ελέγχου του ανορθωτή στην πλευρά της αξονικής γεννήτριας	72
4.1.2. Διαμόρφωση εύρους παλμών με βρόχο ελέγχου ρεύματος.....	73
4.1.3. Μοντέλο ελεγκτή του ανορθωτή στην πλευρά της αξονικής γεννήτριας.....	75
4.2.Έλεγχος αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου.....	78
4.2.1. Στρατηγική ελέγχου του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου	78
4.2.2. Μοντέλο ελεγκτή του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου	81
4.2.3. Συγχρονισμός στη συχνότητα του δικτύου	82
Κεφάλαιο 5 : Προσομοίωση καταστάσεων λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου.....	85
5.1. Απομονωμένη λειτουργία γεννητριών εσωτερικής καύσης (ντήζελ).....	85
5.2. Παράλληλη λειτουργία αξονικών γεννητριών με γεννήτριες εσωτερικής καύσης	91
5.2.1. Προσομοίωση μεταβατικής συμπεριφοράς συστήματος.....	92
5.2.2. Προσομοίωση μόνιμης κατάστασης – Λειτουργία αξονικών γεννητριών ως σύγχρονοι πυκνωτές.....	100
5.3 Κατάσταση έκτακτης ανάγκης – απομονωμένη λειτουργία αξονικών γεννητριών	102
5.4 Κατάσταση έκτακτης ανάγκης – χρήση αξονικής γεννήτριας ως κινητήρα	109
Κεφάλαιο 6 : Αποτίμηση ωφελειών λειτουργίας της αξονικής γεννήτριας με το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου	119
6.1. Υπολογισμός της κατανάλωσης των μηχανών του πλοίου	119
6.2.Οικονομική αποτίμηση υπάρχοντος σεναρίου λειτουργίας	121
6.3.Οικονομική αποτίμηση προτεινόμενου σεναρίου λειτουργίας.....	123
6.4. Οικονομικά συμπεράσματα εφαρμογής του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου.....	125

Κεφάλαιο 7 : Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα.....	127
7.1. Συμπεράσματα.....	127
7.2. Σημεία προαγωγής της επιστήμης.....	128
7.3. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.....	129
Βιβλιογραφία.....	131
Παράρτημα.....	133
Παράρτημα Α: Μοντελοποίηση συστήματος γεννητριών εσωτερικής καύσης.....	133
Α1: Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας με τυλιγμένο δρομέα.....	134
Α2: Μοντελοποίηση μηχανής εσωτερικής καύσης και ρυθμιστή στροφών.....	138
Α2: Μοντελοποίηση συστήματος διέγερσης σύγχρονης μηχανής.....	140
Παράρτημα Β : Μοντελοποίηση συστήματος αξονικών γεννητριών.....	141
Β1: Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών.....	142
Β2: Μοντελοποίηση συστήματος ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής-Έλεγχος προσανατολισμένος στο πεδίο.....	144
Β3: Μοντελοποίηση συστήματος ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου-Έλεγχος συνιστωσών δυο αξόνων (d-q).....	148
Παράρτημα Γ: Μοντελοποίηση φορτίων του πλοίου.....	151

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η τεχνολογία των αξονικών γεννητριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ισχύος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων. Στη συνέχεια περιγράφονται οι κατηγορίες των αξονικών γεννητριών και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση αυτών. Τέλος παρατίθενται οι στόχοι της διπλωματικής εργασίας που αφορούν στην ανάπτυξη ενός κατάλληλου συστήματος για τον έλεγχο των αξονικών γεννητριών.

1.1. Αξονικές γεννήτριες

Αξονική γεννήτρια (shaft generator) ονομάζεται κάθε γεννήτρια η οποία λαμβάνει μηχανική ισχύ από το αξονικό σύστημα του σκάφους.

Η χρήση αξονικών γεννητριών σε συνδυασμό με δίχρονες κύριες μηχανές ντήζελ κατά τη δεκαετία του ογδόντα, αποτέλεσε την πιο συνηθισμένη πρακτική για την παραγωγή ενέργειας στα πλοία καθώς την περίοδο εκείνη οι περισσότερες γεννήτριες ντήζελ ήταν αδύνατο να λειτουργήσουν με βαρύ πετρέλαιο ενώ ακόμα και εκείνες που έκαιγαν βαρύ πετρέλαιο ήταν οικονομικά ασύμφορες. Επομένως, η χρήση των αξονικών γεννητριών αποτέλεσε και συνεχίζει να αποτελεί μια οικονομική λύση για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

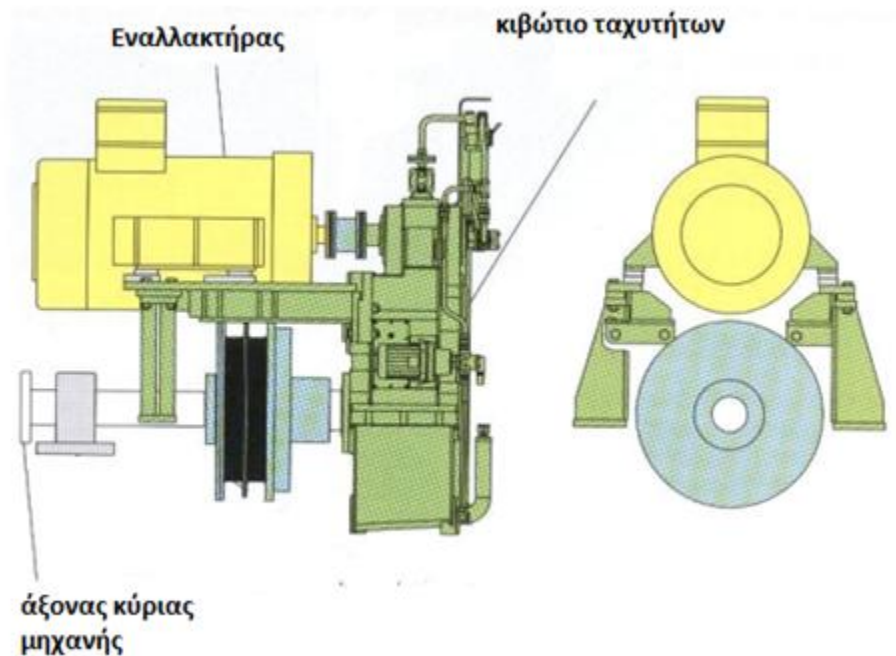
Για τις μηχανές που χρησιμοποιούνται ως αξονικές γεννήτριες διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

α) Σύγχρονες γεννήτριες οι οποίες οδηγούνται από ένα μηχανικό, υδραυλικό ή ηλεκτρικό σύστημα κίνησης και είναι διατεταγμένες έτσι ώστε να λειτουργούν με μια σταθερή συχνότητα.

β) Ασύγχρονες γεννήτριες οι οποίες λειτουργούν με μεταβλητή συχνότητα διέγερσης στο κύκλωμα του δρομέα. Οι διαμορφώσεις με τις γεννήτριες αυτού του τύπου βρίσκονται προς το παρόν σε πειραματικό στάδιο.

γ) Γεννήτριες συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος οι οποίες χρησιμοποιούν μετατροπείς για να συνδεθούν με το σύστημα ισχύος.

Όσον αφορά γενικά τη διάταξη μίας αξονικής γεννήτριας αυτή αποτελείται από ένα γραναζοκιβώτιο ανάληψης ισχύος (PTO, Power Take Off) το οποίο συνδέεται με διάφορους τρόπους στον άξονα της κύριας προωστήριας μηχανής. Το γραναζοκιβώτιο παίρνει κίνηση από την κύρια μηχανή και τη διοχετεύει σε ένα εναλλακτήρα με σκοπό τη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Ένα σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει από τη στρέψη της κύριας μηχανής με μεταβλητή ταχύτητα είναι η μεταβολή της συχνότητας στην έξοδο της αξονικής γεννήτριας. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με διάφορες μεθόδους, όπως μέσω μετατροπής σε συνεχές ρεύμα ή με τη χρήση κάποιου πολύπλοκου μειωτήρα στροφών. Μια ενδεικτική διάταξη αξονικής γεννήτριας παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1 .



Σχήμα 1.1 Διάταξη αξονικής γεννήτριας [1]

1.2. Κατηγοριοποίηση αξονικών γεννητριών

Οι αξονικές γεννήτριες κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με το σύστημα ελέγχου τους. Η κατηγοριοποίηση των αξονικών γεννητριών [2] είναι η ακόλουθη.

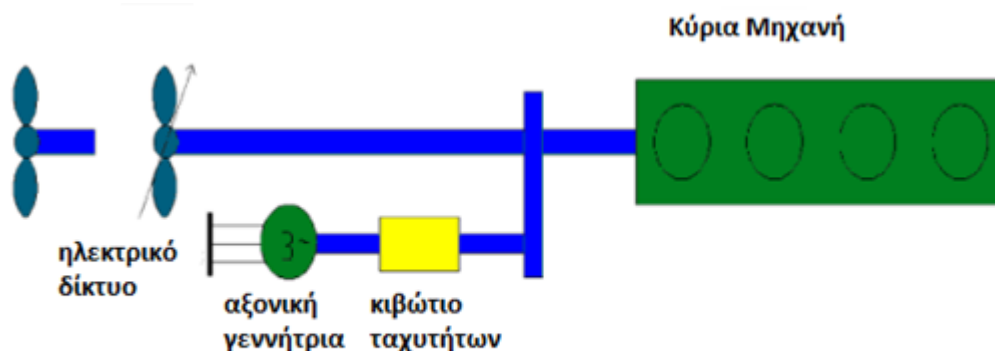
1.2.1. Σύστημα ανάληψης ισχύος σταθερών στροφών

Οι γεννήτριες με σύστημα ανάληψης ισχύος σταθερών στροφών (PTO/GCR, Power Take Off/Gear Constant Ratio) είναι οι απλούστερου τύπου αξονικές γεννήτριες καθώς δεν περιλαμβάνουν κανενός είδους σύστημα ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής των και των συχνοτήτων που παράγουν. Συνήθως οι γεννήτριες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω, καθώς τότε αν το πλοίο διαθέτει έλικα μεταβλητού βήματος είναι δυνατόν η κύρια μηχανή του να δουλεύει σε σταθερές στροφές. Παρά το γεγονός ότι η έλικα μεταβλητού βήματος είναι γενικά μία δαπανηρή λύση πρόωσης, επιλέγεται καθώς εξασφαλίζει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως είναι η λειτουργία της μηχανής στο βέλτιστο σημείο καθώς και καλύτερους και γρηγορότερους ελιγμούς του πλοίου. Επιπλέον, οι γεννήτριες αυτού του τύπου είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ρεύματος μεταβλητής συχνότητας (π.χ. 50-60 Hz). Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι το

φορτίο της κύριας μηχανής μπορεί να μεταβάλλεται από 83% έως 100% της μέγιστης τιμής (MCR, Maximum Continuous Rating). Αυτό βέβαια σημαίνει ότι οι καταναλωτές που είναι ευαίσθητοι σε μεταβαλλόμενες τιμές συχνότητας πρέπει να τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια είτε μέσω ενός μετατροπέα συχνότητας, είτε μέσω γεννητριών ντήζελ με αυτού του είδους τις περιπτώσεις όμως, να είναι αρκετά σπάνιες. Οι γεννήτριες τύπου PTO/GCR είναι αδύνατο να λειτουργήσουν παράλληλα με γεννήτριες ντήζελ εξ' αιτίας της μεταβαλλόμενης περιστροφικής ταχύτητας του ελικοφόρου άξονα, και συνεπώς και της ηλεκτρικής συχνότητας ακόμα και στις περιπτώσεις χρήσεις έλικας μεταβλητού βήματος. Όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλώ, τότε μπορεί να τεθεί σε λειτουργία η αξονική γεννήτρια PTO/GCR και να παράγει στο πλοίο την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια με τις γεννήτριες ντήζελ εκτός λειτουργίας. Κατά τη διάρκεια όμως των ελιγμών του σκάφους, όπου οι στροφές της κύριας μηχανής αυξομειώνονται, οι γεννήτριες PTO/GCR μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδότηση των προωραίων βοηθητικών προωστήρων (bow-thrusters), οι οποίοι μπορούν να λειτουργούν με μεταβαλλόμενη συχνότητα, ενώ οι γεννήτριες ντήζελ θα εξυπηρετούν τις υπόλοιπες ανάγκες του σκάφους[3].

1.2.2. Σύστημα ανάληψης ισχύος με μηχανικό έλεγχο συχνότητας

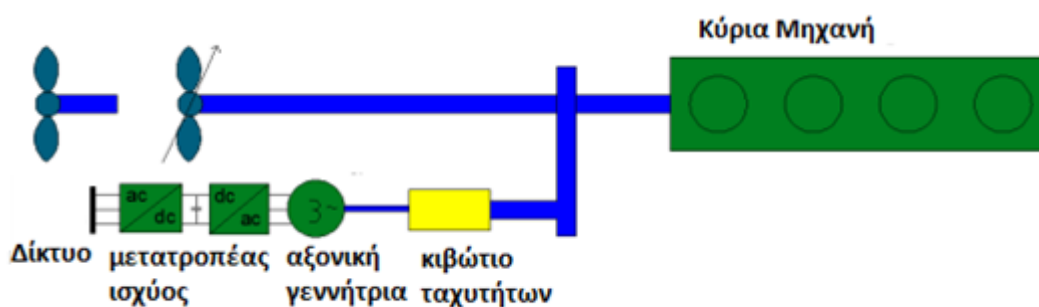
Οι αξονικές γεννήτριες με σύστημα ανάληψης ισχύος με μηχανικό έλεγχο συχνότητας (PTO/RCF, Power Take Off/Renk Constant Frequency) έχουν την ίδια διάταξη με τις παραπάνω με την προσθήκη ενός κιβωτίου ταχυτήτων, συνήθως πλανητικού τύπου (RCF). Το κιβώτιο ταχυτήτων χρησιμοποιείται για να σταθεροποιεί όσο το δυνατόν την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της αξονικής γεννήτριας, σε κάθε ενδεχόμενη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του ελικοφόρου άξονα της κύριας μηχανής. Το εύρος των ταχυτήτων του κιβωτίου ταχυτήτων είναι ρυθμισμένο έτσι ώστε να λειτουργεί μεταξύ του 100% και 70% της κύριας μηχανής για ορισμένο MCR. Ένα σύστημα ηλεκτρονικού ελέγχου εξασφαλίζει ότι η συχνότητα του ρεύματος που παράγεται από την αξονική γεννήτρια είναι ίδια με αυτή που παράγουν οι γεννήτριες ντήζελ επιτρέποντας έτσι στην γεννήτρια να λειτουργεί είτε μόνη της είτε παράλληλα με τις γεννήτριες ντήζελ, μέσω βέβαια του κιβωτίου ταχυτήτων. Επιπλέον, οι γεννήτριες αυτές συνδέονται με τον ελικοφόρο άξονα μέσω πολύδισκου συμπλέκτη, ο οποίος επιτρέπει τη σύμπλεξη ή την αποσύμπλεξη των γεννητριών με τον ελικοφόρο άξονα[3].



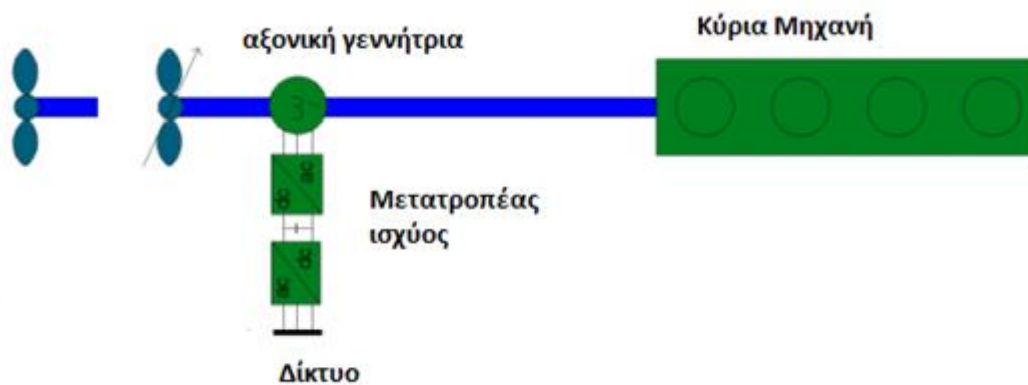
Σχήμα 1.2 Διάταξη αξονικής γεννήτριας με σύστημα ανάληψης ισχύος σταθερών στροφών/ Διάταξη αξονικής γεννήτριας με σύστημα ανάληψης ισχύος με μηχανικό έλεγχο συχνότητας με συμβατική προπέλα ή προπέλα ελεγχόμενου βήματος [4]

1.2.3. Σύστημα ανάληψης ισχύος με ηλεκτρικό έλεγχο συχνότητας

Η διάταξη των αξονικών γεννητριών με σύστημα ανάληψης ισχύος με ηλεκτρικό έλεγχο (PTO/CFE, Power Take Off/ Constant Frequency Electrical) αποτελείται από ένα κιβώτιο ταχυτήτων, την γεννήτρια και ένα σύστημα ηλεκτρικού ελέγχου όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3 ή εναλλακτικά από μια γεννήτρια χαμηλών στροφών με σύστημα ηλεκτρικού ελέγχου όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4. Στην πρώτη περίπτωση, υπάρχει ένα κιβώτιο ταχυτήτων με σταθερό λόγο και το σύστημα ελέγχου είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή της μεταβαλλόμενης συχνότητας σε σταθερή. Το σύστημα ελέγχου γενικά αποτελείται από έναν ανορθωτή και έναν αντιστροφέα, οι οποίοι πέρα από τη διατήρηση της συχνότητας και της τάσης του ζυγού σταθερές αναλαμβάνουν να ρυθμίσουν και την ενεργό ισχύ που θα προσφερθεί στο δίκτυο. Παρόλα αυτά είναι πιθανόν να αποφευχθεί η χρήση του κιβωτίου ταχυτήτων, εάν επιλεχθεί μια γεννήτρια με μεγάλο αριθμό πόλων. Σε αυτή τη τοπολογία συνηθίζεται να χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη λόγω της ικανότητας τοποθέτησης υψηλού αριθμού μονίμων μαγνητών στο δρομέα[4].



Σχήμα 1.3 Διάταξη αξονικής γεννήτριας με σύστημα ανάληψης ισχύος με ηλεκτρικό έλεγχο [4]



Σχήμα 1.4 Διάταξη αξονικής γεννήτριας με σύστημα ανάληψης ισχύος με ηλεκτρικό έλεγχο χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων [4]

Η τοποθέτηση των αξονικών γεννητριών φαίνεται ανά κατηγορία στον παρακάτω πίνακα :

	Alternative types and layouts of shaft generator	Design	Seating	Total efficiency (%)
PTO/GCR	1	BW I/GCR	On engine (vertical generator)	92
	2	BW II/GCR	On tanktop	92
	3	BW III/GCR	On engine	92
	4	BW IV/GCR	On tanktop	92
PTO/RCF	5a 5b	BW I/RCF	On engine (vertical generator)	88-91
	6a 6b	BW II/RCF	On tanktop (vertical generator)	88-91
	7a 7b	BW III/RCF	On engine	88-91
	8a 8b	BW IV/RCF	On tanktop	88-91
PTO/CFE	9a 9b	BW I/CFE	On engine (vertical generator)	81-85
	10a 10b	BW II/CFE	On tanktop	81-85
	11a 11b	BW III/CFE	On engine	81-85
	12a 12b	BW IV/CFE	On tanktop	81-85
	13a 13b	DMG/CFE	On engine	84-88
	14a 14b	SMG/CFE	On tanktop	84-88

Types of PTO

Πίνακας 1.1 Διατάξεις αξονικών γεννητριών [2]

1.3. Πλεονεκτήματα αξονικών γεννητριών

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης αξονικών γεννητριών είναι τα παρακάτω[3]:

1. Μικρές απαιτήσεις σε όγκο - Οι αξονικές γεννήτριες τοποθετούνται κοντά στην κύρια μηχανή ή στον ελικοφόρο άξονα χωρίς να έχουν την απαίτηση ύπαρξης δευτερευόντων μηχανημάτων.
2. Χαμηλό κόστος επένδυσης (PTO/GCR) - Το κόστος επένδυσης, εξαρτάται από τον τύπο και την ποιότητα κατασκευής της αξονικής γεννήτριας. Για παράδειγμα, οι αξονικές γεννήτριες με σύστημα ανάληψης ισχύος σταθερών στροφών είναι αρκετά φτηνές, ενώ οι αξονικές γεννήτριες με σύστημα ανάληψης ισχύος με ηλεκτρικό ή μηχανικό έλεγχο είναι ακριβότερες.
3. Χαμηλό κόστος εγκατάστασης - Οι αξονικές γεννήτριες, δεν απαιτούν ιδιαίτερα περίπλοκα συστήματα έδρασης, ούτε συστήματα εξαγωγής καυσαερίων, παρά μόνο μερικές συνδέσεις για τα διάφορα βοηθητικά μηχανήματα. Επίσης, ο χρόνος εγκατάστασης τους είναι αρκετά μικρότερος σε σύγκριση με μία συμβατική γεννήτρια ντήζελ.
4. Υψηλή αξιοπιστία - Οι αξονικές γεννήτριες, λόγω των λίγων απαρτιζόμενων μηχανικών εξαρτημάτων έχουν βαθμό αξιοπιστίας σχεδόν ίσο με εκείνο των κύριων μηχανών που τις κινούν.
5. Χαμηλό κόστος συντήρησης – Ενδεικτικά, αναφέρεται πως κατά το αρχικό χρονικό διάστημα της λειτουργίας μίας αξονικής γεννήτριας, το μόνο που χρειάζεται η ίδια από πλευράς συντήρησης, είναι η τακτική επιθεώρηση της στάθμης του ελαίου λίπανσης, καθώς και η αντικατάστασή του (όπως και του φίλτρου λαδιού) όποτε αυτό κριθεί σκόπιμο.
6. Μεγάλη διάρκεια ζωής – Οι αξονικές γεννήτριες δεν υπόκεινται σε μεγάλη φθορά. Ακόμα και τα μηχανικά εξαρτήματα τα οποία χρήζουν αντικατάστασης όπως για παράδειγμα μηχανοκίνητες αντλίες λαδιού κ.τ.λ. έχουν ιδιαίτερα μεγάλη διάρκεια ζωής.
7. Χαμηλά επίπεδα θορύβου - Τα επίπεδα θορύβου των αξονικών γεννητριών είναι αρκετά χαμηλότερα από εκείνα των υπόλοιπων γεννητριών.

1.4. Μειονεκτήματα αξονικών γεννητριών

Τα μειονεκτήματα της χρήσης των αξονικών γεννητριών συνοψίζονται στη συνέχεια[3]:

1. Δεν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια όταν τα πλοία βρίσκονται σε στάση στο λιμάνι - Στις περιπτώσεις αυτές, τα πλοία καλύπτουν τις απαιτήσεις τους για ηλεκτρική ενέργεια μέσω συμβατικών γεννητριών. Παρ' όλα αυτά, σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις για ηλεκτρική ενέργεια είναι ιδιαίτερα μεγάλες τότε με αποσύμπλεξη της

έλικας καθίσταται δυνατή η χρήση της κύριας μηχανής του σκάφους σε συνδυασμό με τη αξονική γεννήτρια.

2. Επιπλέον φόρτιση της κύριας μηχανής - Όταν μία αξονική γεννήτρια συνδέεται στον ελικοφόρο άξονα μίας μηχανής, τότε αυξάνεται το φορτίο της και κατ' επέκταση αυξάνεται η κατανάλωση καυσίμου και η κατανάλωση σε λιπαντικό έλαιο, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή της κύριας προωστήριας μηχανής.
3. Μειωμένη απόδοση της κύριας μηχανής και της έλικας του πλοίου για τις αξονικές γεννήτριες με σύστημα ανάληψης ισχύος σταθερών στροφών (PTO/GCR) – Καθώς η παραγόμενη συχνότητα από την αξονική γεννήτρια πρέπει να είναι σταθερή, κατά τη χρήση των αξονικών γεννητριών τύπου PTO/GCR, η έλικα μεταβλητού βήματος πρέπει να περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, ακόμα και σε μειωμένο φορτίο.
4. Αδυναμία παράλληλης σύνδεσης των αξονικών γεννητριών με σύστημα ανάληψης ισχύος σταθερών στροφών (PTO/GCR) με συμβατικές γεννήτριες - Οι αξονικές γεννήτριες τύπου PTO/GCR, δεν μπορούν να λειτουργήσουν παράλληλα με συμβατικές γεννήτριες λόγω του ότι η συχνότητα δεν είναι ίδια. Όταν η απαίτηση για φορτίο υπερβαίνει τις δυνατότητες των συμβατικών γεννητριών, τότε η αξονική γεννήτρια αναλαμβάνει να παράγει την επιπλέον απαιτούμενη ενέργεια που οδηγείται σε καταναλωτές μη ευαίσθητους στην ηλεκτρική συχνότητα από ξεχωριστό ηλεκτρικό δίκτυο.
5. Πολυπλοκότερη διάταξη αξονικού συστήματος - Η εγκατάσταση μίας αξονικής γεννήτριας σε ένα πλοίο συνεπάγεται την ύπαρξη διατάξεων σύμπλεξης της ίδιας με τον ελικοφόρο άξονα του πλοίου, γεγονός που συντελεί στην αύξηση της πολυπλοκότητας του αξονικού συστήματος.

1.5. Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αυξημένη πολυπλοκότητα της διάταξης του αξονικού συστήματος εξαιτίας της χρήσης των αξονικών γεννητριών αποτελεί ένα σημαντικό μειονέκτημα. Με στόχο την απλοποίηση της διάταξης και την αποφυγή των απωλειών που οφείλονται στο κιβώτιο ταχυτήτων, επιλέγεται η πιο αξιόπιστη λύση της τοποθέτησης της αξονικής γεννήτριας απευθείας στον άξονα της κύριας μηχανής. Όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 1.2.3., στην τοπολογία αυτή συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη. Τα πλεονεκτήματα της μηχανής αυτής σε σύγκριση με τη σύγχρονη μηχανή με τυλιγμένο δρομέα εντοπίζονται στο μικρότερο όγκο της κατασκευής αλλά και στη βελτιωμένη απόδοση εξαιτίας της απουσίας του συστήματος διέγερσης. Η απουσία ωστόσο της διέγερσης στερεί από τη σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών την ικανότητα ρύθμισης έργου ισχύος. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται εύκολα χάρη στη πρόοδο των ηλεκτρονικών ισχύος. Οι νέες τεχνολογίες επιτρέπουν τη χρήση μετατροπέων τεσσάρων τεταρτημορίων οι οποίοι ελέγχουν την έργο ισχύ που εγχέεται στο δίκτυο όπως συμβαίνει κατά τις επικουρικές υπηρεσίες που προσφέρουν οι ανεμογεννήτριες προς το δίκτυο, στα ηπειρωτικά συστήματα. Στόχος είναι λοιπόν η ανάπτυξη ενός κατάλληλου συστήματος ηλεκτρικού ελέγχου των αξονικών γεννητριών, το οποίο θα επιτρέπει τον έλεγχο της τάσης του

δικτύου μέσω της έγχυσης αέργου ισχύος αλλά και τη διατήρηση σταθερής συχνότητας εξόδου ακόμα και για μεταβαλλόμενη ταχύτητα στρέψης της κύριας μηχανής. Η άρση των περιορισμών της σταθερής ταχύτητας στρέψης, οδηγεί στην αύξηση της απόδοσης της κύριας μηχανής και της έλικας του πλοίου και συμβάλει στη δημιουργία ενός πιο ευέλικτου συστήματος καθώς καταργούνται οι περιορισμοί όσον αφορά στην παράλληλη λειτουργία των αξονικών γεννητριών με τις γεννήτριες ντήζελ, οι οποίοι υφίστανται στα πλοία που περιλαμβάνουν αξονικές γεννήτριες με σύστημα ανάληψης ισχύος σταθερών στροφών (PTO/GCR). Τέλος να σημειωθεί πως το νέο σύστημα ελέγχου θα πρέπει να επιτρέπει την αντίστροφη ροή ισχύος ώστε να είναι εφικτή η χρήση της αξονικής μηχανής ως κινητήρα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

1.6. Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο επιχειρείται μια επισκόπηση της τεχνολογίας των αξονικών γεννητριών. Παρουσιάζονται οι κατηγορίες των αξονικών γεννητριών και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης αυτών. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας που αφορά στην ανάπτυξη ενός ευέλικτου συστήματος ελέγχου αξονικών γεννητριών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζεται το υπό μελέτη πλοίο. Περιγράφεται το ηλεκτρικό δίκτυο καθώς και το σύστημα των αξονικών γεννητριών του πλοίου, ενώ γίνεται ειδική αναφορά στις αιτίες που επιβάλουν την αποφυγή του παραλληλισμού των αξονικών γεννητριών και των γεννητριών ντήζελ. Στη συνέχεια αποτυπώνεται ο ηλεκτρικός ισολογισμός του πλοίου, οι καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου αλλά και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λήφθηκαν σε πραγματικές καταστάσεις λειτουργίας και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο επιχειρείται η μοντελοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου. Η μοντελοποίηση εφαρμόζεται σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK. Όσον αφορά τις αξονικές γεννήτριες, παρουσιάζονται τα μοντέλα της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών και του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης. Για τη μοντελοποίηση των μηχανών ντήζελ χρησιμοποιείται το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας με τυλιγμένο δρομέα σε συνδυασμό με το μοντέλο του συστήματος διέγερσης. Επίσης γίνεται αναλυτική περιγραφή του μοντέλου της μηχανής ντήζελ και του ρυθμιστή στροφών για τον έλεγχο της ταχύτητας της γεννήτριας ντήζελ. Τέλος αναλύονται στοιχεία για τη μοντελοποίηση των φορτίων του πλοίου σύμφωνα με τα δεδομένα που προκύπτουν από τον ηλεκτρικό ισολογισμό και τις πραγματικές μετρήσεις.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στο σύστημα ελέγχου των αξονικών γεννητριών. Αρχικά περιγράφεται ο έλεγχος του ανορθωτή στην πλευρά της μηχανής που επιτρέπει τον καθορισμό της ενεργού ισχύος που παρέχει η μηχανή στο σύστημα κατά τη λειτουργία γεννήτριας ή την ταχύτητα αυτής στην περίπτωση λειτουργίας κινητήρα. Στη συνέχεια περιγράφεται η μέθοδος ελέγχου του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου με βάση τον οποίο

διατηρείται η τάση στο σύνδεσμο συνεχούς ρεύματος σταθερή ενώ παράλληλα ρυθμίζεται και η άεργος ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο για τη διατήρηση της τάσης στα ονομαστικά επίπεδα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που λήφθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου του συστήματος του πλοίου. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για τέσσερις καταστάσεις λειτουργίας. Στην πρώτη παρουσιάζεται η απομονωμένη λειτουργία των γεννητριών ντήζελ. Στη δεύτερη το σύστημα του πλοίου τροφοδοτείται από το συνδυασμό των αξονικών γεννητρών και των γεννητρών ντήζελ σύμφωνα με τα δεδομένα που προέκυψαν από τον ηλεκτρικό ισολογισμό. Στην τρίτη εξετάζεται η περίπτωση απομονωμένης λειτουργίας των αξονικών γεννητριών ενώ στην τέταρτη, οι γεννήτριες ντήζελ τροφοδοτούν αποκλειστικά τα φορτία του πλοίου ενώ οι αξονικές μηχανές λειτουργούν ως κινητήρες έκτακτης ανάγκης. Στις τρεις πρώτες περιπτώσεις, οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για τη λειτουργία πλοήγησης στη θάλασσα και περιλαμβάνουν τη βίαιη είσοδο στο σύστημα ενός φορτίου που προσομοιώνει τους πλευρικούς προωστήριους μηχανισμούς κατά τους ελιγμούς, ώστε να εξεταστεί η απόκριση του συστήματος κατά το μεταβατικό αυτό φαινόμενο.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού της ειδικής κατανάλωσης των μηχανών του πλοίου και υπολογίζεται η κατανάλωση σύμφωνα με το υπάρχον σενάριο λειτουργίας για ένα ταξίδι διάρκειας επτά ωρών. Στη συνέχεια υπολογίζεται η κατανάλωση με τη νέα διάταξη των αξονικών γεννητριών που σχεδιάστηκε, καταλήγοντας στην αποτίμηση των ωφελειών που προκύπτουν από τη λειτουργία των αξονικών με το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου.

Στο έβδομο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία, παρουσιάζεται η επιστημονική συνεισφορά της εργασίας και προτείνονται θέματα τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενα μελλοντικής έρευνας.

Κεφάλαιο 2 : Περιγραφή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το ηλεκτρικό δίκτυο του υπό μελέτη πλοίου. Επίσης παρουσιάζεται αναλυτικά το σύστημα των αξονικών γεννητριών και περιγράφονται οι καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου. Τέλος παρουσιάζεται ο ηλεκτρικός ισολογισμός αλλά και τα δεδομένα μετρήσεων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο κεφάλαιο 3 όπου περιγράφεται η διαδικασία μοντελοποίησης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου με στόχο τη διεξαγωγή προσομοιώσεων, οι οποίες πραγματοποιούνται στο κεφάλαιο 5.

2.1. Περιγραφή πλοίου

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το ηλεκτρικό σύστημα ενός σύγχρονου φορτηγού πλοίου (RoRo-Trailer-Passenger). Το πλοίο έχει ηλικία περίπου δέκα ετών και είναι ναυπηγημένο στη Γερμανία[5]. Το ακρωνύμιο RoRo (Roll on/Roll off) χαρακτηρίζει ένα σύγχρονο τύπο φορτηγών πλοίων, περισσότερο οχηματαγωγών, σε προέκταση των πλοίων τακτικών γραμμών μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, κοντέινερς ή κυρίως οχημάτων άνευ αυτοκίνησης πχ ρυμούλκες. Τα φορτία, οχήματα ή κοντέινερς φορτώνονται από ειδικούς ελκυστήρες (τράκτορες) με ρυμούλκησή τους μέσα στο χώρο φόρτωσης του πλοίου από ειδικό, συνήθως αναδιπλούμενο καταπέλτη, όπου τελικά προωθείται η φόρτωσή τους. Η διαδικασία της φόρτωσης ονομάζεται Roll on (board) ενώ η εκφόρτωσή τους λέγεται Roll off (board). Η φόρτωση και εκφόρτωση αυτών των πλοίων γίνεται ταχύτατα καθώς υπολογίζεται ότι ο χρόνος φορτοεκφόρτωσης που απαιτείται για αυτά τα πλοία είναι το 1/6 του χρόνου που απαιτείται για τα πλοία εμπορευματοκιβωτίων (container ships). Το υπό μελέτη πλοίο έχει επίσης τη δυνατότητα να μεταφέρει επιβάτες, καθώς διαθέτει τέσσερα καταστρώματα κατάλληλα σχεδιασμένα για τη φιλοξενία τους. Η κατασκευή της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης ενός τέτοιου πλοίου είναι μια αρκετά σύνθετη εργασία λόγω των πολλών και διαφορετικών καταναλωτών ενέργειας στα διάφορα τμήματα του πλοίου αλλά και των αρκετά αυστηρών προδιαγραφών ασφαλείας καθώς το πλοίο μεταφέρει ανθρώπους[5].

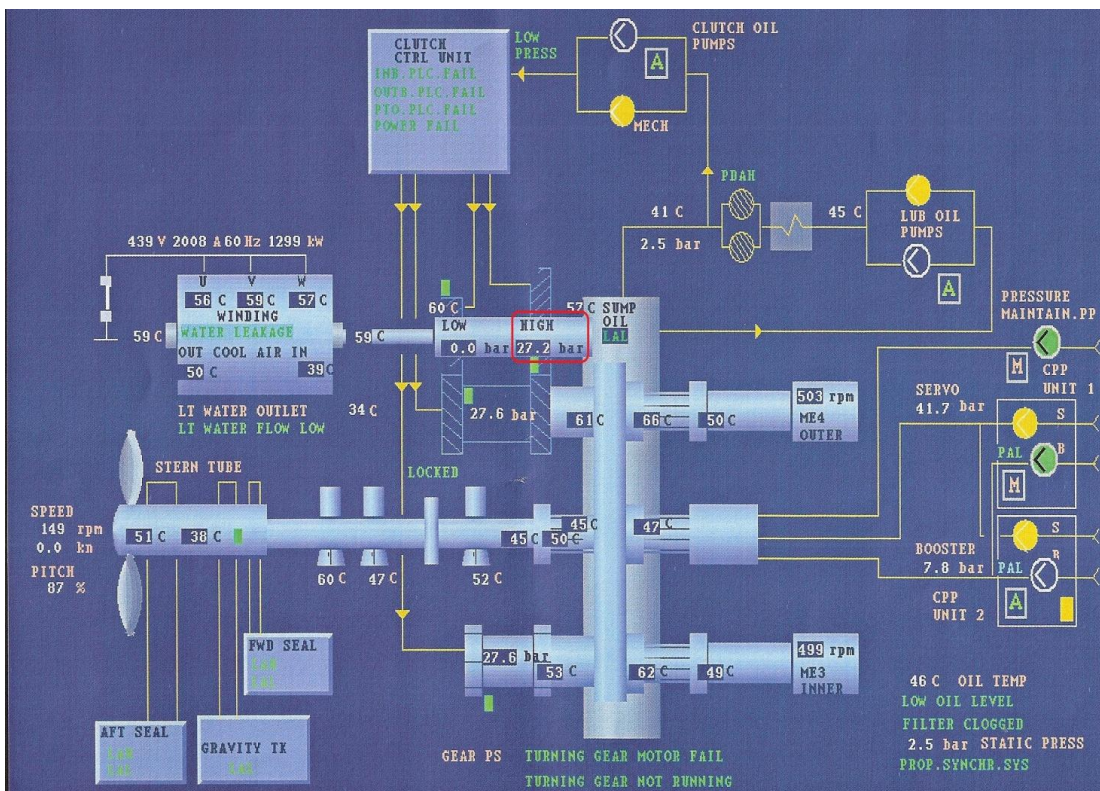
2.2. Σύστημα αξονικών γεννητριών του υπό μελέτη πλοίου

Το υπό μελέτη πλοίο διαθέτει τέσσερις μηχανές ντήζελ της εταιρείας Wartsila. Οι μηχανές αυτές συνδέονται ανά δύο με το αντίστοιχο γρανάζι στο μειωτήρα στροφών της εταιρείας Schelde. Οι συγκεκριμένοι μειωτήρες είναι δυο εισόδων - μιας εξόδου και έχουν σχεδιαστεί ώστε να δέχονται δύο εισόδους από δυο μηχανές ντήζελ ισχύος 12.000 kW, μέγιστης συνεχούς περιστροφής στις 500 ΣΑΛ και περιστροφική ταχύτητα προπέλας στις παραπάνω συνθήκες στις 149 ΣΑΛ.

Κάθε γραναζοκιβώτιο είναι εξοπλισμένο με δυο υδραυλικούς συμπλέκτες τριβής. Τα ενσωματωμένα κύρια ωστικά έδρανα έχουν επιλεγεί για συνεχές φορτίο στη προπέλα 1200 kN. Το εξάρτημα ανάληψης ισχύος (PTO) για τον εναλλακτήρα τοποθετείται στην εξωτερική πρυμναία πλευρά.

Η λίπανση συνιστά κρίσιμο παράγοντα εξαιτίας των τριβών που αναπτύσσονται και προσφέρεται από μια ενσωματωμένη αντλία ενώ υπάρχει και μια ηλεκτρική αντλία σε αναμονή. Όλα τα εξαρτήματα συναρμολογούνται μαζί με τις κατάλληλες σωληνώσεις και καλωδιώσεις.

Σύμφωνα με το σχήμα 2.1, όπου απεικονίζεται ένα στιγμιότυπο από το σύστημα εποπτείας της προπέλας και της αξονικής γεννήτριας, οι άξονες των δυο προωστήριων μηχανών συνδέονται στο μειωτήρα στροφών και περιστρέφουν το αντίστοιχο γρανάζι του. Στο κέντρο του μειωτήρα στροφών υπάρχει ένα γρανάζι το οποίο αναλαμβάνει τη περιστροφή της προπέλας. Στην εξωτερική πλευρά του μειωτήρα στροφών υπάρχει ένα ακόμη γρανάζι το οποίο κινεί το εξάρτημα PTO το οποίο στη συνέχεια κινεί την αξονική γεννήτρια. Να σημειωθεί εδώ πως το PTO μπορεί να λειτουργήσει σε δυο ταχύτητες, μια υψηλή και μια χαμηλή και συμπλέκεται με τη βοήθεια υδραυλικού συστήματος[5].



Σχήμα 2.1 Στιγμιότυπο από το σύστημα εποπτείας της προπέλας και της αξονικής γεννήτριας [5]

Το πολύπλοκο σύστημα που παρουσιάζεται παραπάνω αναλαμβάνει να κινήσει την έλικα και την αξονική γεννήτρια και μπορεί να λειτουργήσει με τη συνεισφορά είτε της μίας είτε και των δύο προωστήριων μηχανών.

Μάλιστα να σημειωθεί πως δε γίνεται χρήση ηλεκτρονικών ισχύος για τη λειτουργία της αξονικής γεννήτριας και το σύστημα αναλαμβάνει να περιστρέφει τον άξονα της αξονικής γεννήτριας αλλά και της έλικας με σταθερές στροφές. Η δυνατότητα περιστροφής των παραπάνω υποσυστημάτων με σταθερές στροφές οφείλεται στο γεγονός ότι το πλοίο διαθέτει έλικα μεταβλητού βήματος, επομένως η πρόωση του επηρεάζεται άμεσα από τη κλίση των πτερυγίων κάθε έλικας του

ονομαστικής ισχύος 2100 kVA, ενώ είναι διαθέσιμες και δυο αξονικές γεννήτριες του οίκου ABB ονομαστικής ισχύος 2400 kVA. Επίσης στο πλοίο υπάρχει και μια γεννήτρια ντήζελ, εκτάκτου ανάγκης του οίκου CATERPILLAR ονομαστικής ισχύος 1125 kVA.

Το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου διαθέτει δύο επίπεδα τάσης στα 440 V και 230 V συχνότητας 60 Hz.

Από τη διάταξη του ηλεκτρικού δικτύου και των διακοπών του(σχήμα 2.3), φαίνεται ότι υπάρχει μια συμμετρία στη δομή του. Συγκεκριμένα, υπάρχουν τέσσερις μεγάλοι ζυγοί, οι οποίοι αποτελούν τμήμα του κύριου ζυγού του δικτύου και με τη χρήση διακοπών μπορούν να διαχωρίσουν το δίκτυο σε ένα έως τέσσερα διακριτά υποδίκτυα. Στο αριστερό και στο δεξί άκρο του δικτύου εντοπίζονται οι ζυγοί των αξονικών γεννητριών στους οποίους συνδέονται άμεσα οι αξονικές γεννήτριες και οι πλευρικοί προωστήριοι μηχανισμοί καθώς επίσης και δυο από τους τρεις πίνακες τροφοδοσίας των φορτηγών ψυγείων. Στο κέντρο του δικτύου υπάρχουν δύο μεγάλοι ζυγοί, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να ενωθούν μέσω διακόπτη. Η γεννήτρια ντήζελ 3 συνδέεται στον αριστερό ζυγό και η γεννήτρια ντήζελ 1 συνδέεται στο δεξί ζυγό. Τέλος, η γεννήτρια ντήζελ 2 έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει τόσο στο δεξί, όσο και στον αριστερό ζυγό. Το μεγαλύτερο μέρος των καταναλωτών τροφοδοτούνται από τους δύο κεντρικούς ζυγούς. Επίσης υπάρχουν δυο επιπλέον πίνακες, ο πίνακας εκτάκτου ανάγκης και ο κύριος πίνακας των 230 V που αφορά το φωτισμό και τις μικροσυσκευές που λειτουργούν σε αυτή τη τάση[5].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι καταναλωτές που βρίσκονται στο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου[5].

1. Πλευρικοί προωστήριοι μηχανισμοί (Bow Thrusters , Stern Thruster)

Το πλοίο διαθέτει συνολικά τρεις πλευρικούς προωστήριους μηχανισμούς οι οποίοι αποτελούνται από μεγάλους ασύγχρονους κινητήρες που λειτουργούν στα 440 V.

Δύο από αυτούς είναι πρωαίοι (εμπρός μέρος) με μέγιστη ενεργό ισχύ 1000 kW ενώ ένας είναι πρυμναίος (πίσω μέρος) με μέγιστη ενεργό ισχύ 1400 kW. Όπως παρατηρείται στο δίκτυο του πλοίου το ένα πρωαίο και το πρυμναίο προπελάκι συνδέονται στο ζυγό της αξονικής γεννήτριας 1. Ο ζυγός αυτός μπορεί να συνδεθεί και να τροφοδοτηθεί είτε με το κεντρικό ζυγό μέσω διακόπτη είτε με την αξονική γεννήτρια 1. Το πρωαίο προπελάκι τροφοδοτείται είτε από την αξονική γεννήτρια 2 είτε από τον κεντρικό ζυγό.

2. Κέντρα ελέγχου κινητήρων (MCC, Motor Control Centers)

Το πλοίο διαθέτει πολλούς μικρούς κινητήρες οι οποίοι έχουν διάφορες χρήσεις και είναι καταναλωμένοι στα διάφορα επίπεδα του πλοίου. Οι κινητήρες αυτοί μπορεί να αποτελούν διάφορες συσκευές όπως αντλίες, συμπιεστές αέρα, φυγοκεντρωτές καυσίμου, εργαλεία μηχανοστασίου, κινητήρες για τους κάβους ή τις άγκυρες κλπ. Σύμφωνα με το σχήμα ,υπάρχουν στο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου τέσσερα στοιχεία τύπου MCC, τα στοιχεία αυτά αποτελούν ομαδοποιημένους πίνακες εκκίνησης κινητήρων και ελέγχουν το μεγαλύτερο μέρος από τους κινητήρες του πλοίου.

3. Πρίζες φορτηγών ψυγείων (Reefer sockets)

Το υπό μελέτη πλοίο, δεδομένου ότι είναι επιβατηγό οχηματαγωγό, μπορεί να μεταφέρει φορτηγά ψυγεία ή εμπορευματοκιβώτια ψυγεία. Τα ψυγεία αυτά θα πρέπει να τροφοδοτηθούν από κάποια

πηγή κατά τη διάρκεια του ταξιδιού στη θάλασσα, ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες, ώστε να διατηρηθεί το περιεχόμενό τους. Το πλοίο επομένως, διαθέτει ειδικές πρίζες στην οροφή των καταστρωμάτων για τα φορτηγά, οι οποίες μπορούν να συνδεθούν με αυτά και να τα τροφοδοτήσουν στα 440V. Υπάρχουν τρία τέτοια στοιχεία, τα οποία βασίζονται σε ένα μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων ονομαστικής φαινόμενης ισχύος 287.5 KVA, ο οποίος τροφοδοτείται από τον κύριο πίνακα 440 V και δίνει τόσο 440 V όσο και 230 V. Σημειώνεται ότι οι παροχές των 230 V χρησιμεύουν για τη τροφοδοσία με ρεύμα αυτοκινούμενων τροχόσπιτων και όχι φορτηγών.

4. Συνδέσεις με ακτή (Shore Connection)

Το πλοίο διαθέτει δυο ειδικές υποδοχές, μια προωαία και μια πρυμναία, με τις οποίες ο κύριος πίνακας 440 V του πλοίου μπορεί να τροφοδοτηθεί από το δίκτυο της ξηράς. Οι υποδοχές αυτές κυρίως χρησιμεύουν κατά τη διάρκεια δεξαμενισμού του πλοίου, όπου χρειάζονται κάποια φορτία εντός του πλοίου αλλά οι γεννήτριες του μπορεί να μην λειτουργούν, είτε για πρακτικούς λόγους, είτε για λόγους συντήρησης.

5. Μαγειρείο (Galley)

Στο δίκτυο του πλοίου υπάρχουν δυο μετασχηματιστές των 240 KVA και δυο μετασχηματιστές των 60 KVA που τροφοδοτούν το μαγειρείο στα 440 και 230 V αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι στο μαγειρείο υπάρχουν αρκετά μηχανήματα για τη παρασκευή φαγητού τα οποία κινούνται από κινητήρες, αλλά και αρκετά μεγάλα ψυγεία.

6. Κύριος Πίνακας 230 V (MSB 230V)

Το πλοίο διαθέτει τρεις μετασχηματιστές 440/230 των 287.5 KVA, οι οποίοι τροφοδοτούν το πίνακα των 230 V. Ο πίνακας αυτός χρησιμεύει για τη τροφοδοσία του φωτισμού και μικροσυσκευών όπως υπολογιστές, τηλεοράσεις κλπ.

7. Διάφοροι Καταναλωτές (consumers)

Υπάρχουν διάφοροι καταναλωτές τόσο στα 440 V όσο και στα 230 V.

8. Πίνακας Εκτάκτου Ανάγκης (Emergency Switchboard , ESB 440V)

Ο πίνακας αυτός αποτελείται από δυο τμήματα, τα οποία είναι σε διαφορετικά επίπεδα τάσης και τα οποία συνδέονται με τη βοήθεια δυο γραμμών και μετασχηματιστών υποβιβασμού. Στη πλευρά των 440 V βρίσκεται η γεννήτρια εκτάκτου ανάγκης, ενώ στη πλευρά των 230 V υπάρχει η συσκευή που τροφοδοτεί τις μπαταρίες του συστήματος εκτάκτου ανάγκης (Teps converter). Για λόγους ασφαλείας, το πλοίο πρέπει να διαθέτει και μπαταρίες για τη τροφοδοσία των κρίσιμων φορτίων μέχρι να εκκινήσει η γεννήτρια εκτάκτου ανάγκης.

2.4. Αποφυγή παραλληλισμού των αξονικών γεννητριών με τις γεννήτριες ντήζελ

Το υπό μελέτη πλοίο έχει σχεδιαστεί με βάση συγκεκριμένα σενάρια λειτουργίας(παράγραφος 2.6.). Τα σενάρια λειτουργίας του πλοίου περιγράφουν αναλυτικά ποιοι συνδυασμοί ηλεκτρογεννητριών τροφοδοτούν το πλοίο σε κάθε διακριτή κατάσταση λειτουργίας του.

Παρόλα αυτά συνηθίζεται να ακολουθείται η τακτική να μην είναι παραλληλισμένες οι αξονικές γεννήτριες με τις γεννήτριες ντήζελ. Η επιλογή αυτή γίνεται κυρίως για λόγους ασφαλείας από το προσωπικό του πλοίου καθώς οι αξονικές γεννήτριες μπορούν να επηρεάζονται από τις εξωτερικές συνθήκες (θάλασσα, καιρικές συνθήκες, ελιγμοί) ενώ οι γεννήτριες ντήζελ είναι απόλυτα ελεγχόμενες και προστατευμένες από τις εξωτερικές μεταβολές του περιβάλλοντος. Επομένως, οι γεννήτριες ντήζελ αναλαμβάνουν τα σημαντικά φορτία του πλοίου ενώ οι αξονικές τα λιγότερο σημαντικά.

Σε περίπτωση θαλασσοταραχής, το πλοίο δέχεται έντονες ριπές αέρα και ενδέχεται να πάρει απότομα μια ελαφρά κλίση από τη μια πλευρά. Η κλίση αυτή είναι δυνατόν να φέρει πιο κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας τη μια έλικα και να κρατήσει την άλλη χαμηλότερα. Το γεγονός αυτό προκαλεί αλλαγή στο φορτίο της έλικας με ενδεχόμενη αύξηση ή μείωση της ταχύτητας περιστροφής της.

Αν γίνει απότομα η αλλαγή στο φορτίο της έλικας, ο ρυθμιστής στροφών (governor) των κύριων μηχανών μπορεί να μην προλάβει να αντιδράσει έγκαιρα με αποτέλεσμα να προκληθούν έντονες αυξομειώσεις στη συχνότητα περιστροφής της έλικας αλλά και της αξονικής γεννήτριας.

Εάν ο ρυθμιστής στροφών δεν καταφέρει να διατηρήσει τη συχνότητα περιστροφής των αξόνων στα επιθυμητά όρια, θα επενεργήσει στο σύστημα της αξονικής γεννήτριας κάποια προστασία υποσυχνότητας ή υπερσυχνότητας με αποτέλεσμα τη διακοπή της λειτουργία της.

Οι προϋποθέσεις παραλληλισμού δύο γεννητριών είναι οι ακόλουθες[6] :

- Ίδια διαδοχή φάσεων
- Ίσες συχνότητες
- Ίσες τάσεις
- Τάσεις μια προς μια σε φάση

Όταν η αξονική γεννήτρια είναι παραλληλισμένη με τη γεννήτρια ντήζελ σοβαρή πιθανότητα αποσυγχρονισμού τους, αν οι ρυθμιστές τους δεν αντιδρούν με την ίδια ταχύτητα.

Παρόμοια κατάσταση προκύπτει και κατά τη διαδικασία ελιγμών του πλοίου καθώς και τότε ενδέχεται να πάρει κάποια κλίση το πλοίο, με πιθανή συνέπεια όσα περιγράφηκαν παραπάνω[5].

2.5. Ηλεκτρικός ισολογισμός του υπό μελέτη πλοίου

Ηλεκτρικός ισολογισμός [6] είναι ο υπολογισμός της πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος του συνόλου των καταναλωτών σε ένα πλοίο στις διάφορες χαρακτηριστικές καταστάσεις λειτουργίας του, όπως για παράδειγμα στη κανονική πορεία, στη λειτουργία ελιγμών κ.λπ. Ο προσδιορισμός του ηλεκτρικού φορτίου με λεπτομέρεια είναι εφικτός όταν έχουν καθοριστεί με ακρίβεια τα στοιχεία των καταναλωτών ηλεκτρισμού στο πλοίο. Με τη βοήθεια του ηλεκτρικού ισολογισμού επιλέγονται οι γεννήτριες που θα χρησιμοποιηθούν για τη τροφοδότηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου.

Στις μελέτες αυτές, λαμβάνονται συνήθως υπόψη μόνο οι ενεργειακές ανάγκες ενεργού ισχύος[7]. Παρόλα αυτά, τα ηλεκτρικά δίκτυα των πλοίων είναι δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη και άεργου ισχύος, η οποία θα πρέπει και αυτή να ληφθεί υπόψη στη μελέτη ηλεκτρικού ισολογισμού. Στη παρούσα διπλωματική εργασία, οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν αφορούσαν αποκλειστικά στην ενεργό ισχύ του συστήματος. Η άεργος ισχύς υπολογίστηκε με βάση τους συντελεστές ισχύος για τα επιμέρους φορτία και παρουσιάζεται αναλυτικότερα στη μοντελοποίηση του συστήματος.

Τα αποτελέσματα του ηλεκτρικού ισολογισμού του υπό μελέτη πλοίου, με βάση τον αναλυτικό ισολογισμό που δόθηκε από τη διαχειρίστρια εταιρία του πλοίου[5], παρουσιάζονται στο πίνακα 2.2.

Ομάδα	Πορεία στη θάλασσα SG1 (KW)	Πορεία στη θάλασσα SG2 (KW)	Πορεία στη θάλασσα DG (KW)	Ελιγμοί (KW)	Λιμάνι (KW)	Ανάπαυση στο λιμάνι (KW)	2 κύριες μηχανές σε λειτουργία έκτακτης ανάγκης (KW)	Έκτακτη ανάγκη (KW)
Βοηθητικά μηχανήματα πρόωσης	624,9	602,2	1227,2	1301,9	368	220,3	514,4	34,4
Βοηθητικά μηχανήματα μηχανοστασίου	141,6	161,1	250,4	287,5	286,2	132,5	42,7	18,9
Βοηθητικά μηχανήματα για τη λειτουργία του πλοίου	108,3	83	188,2	123,7	157,6	61	30,3	318,6
Εξαερισμός, Κλιματισμός, Θέρμανση	309,4	464,6	776	776	895,1	553,6	156,3	12,1
Συσκευές ψύξης	151,9	133,5	285,3	285,3	172,8	21,9	26,9	0
Μηχανήματα καταστρώματος	51,4	29,9	50,3	22,6	236,4	184,7	19,1	154,1
Εξοπλισμός Μαγειρείου	97,3	103,4	200,7	182,2	182,2	100,7	0	0
Μηχανήματα εργασίας	0	3,5	3,5	3,5	5,3	10,6	0	0
Φωτισμός	28,6	124,1	152,7	152,7	157,6	66,5	41,5	41,5
Ναυσιπλοΐα	3,3	18,2	20,3	20,3	20,3	7,3	20,3	20,3
Προπελάκια	0	0	0	2192,1	0	0	0	0
Σύνολο	1516,7	1723,5	3154,6	5347,8	2481,5	1359,1	851,5	599,9
Χρήση καλοκαιριού	1507,4	1670,7	3091,4	5284,6	2439,8	1319,8	851,5	599,9
Χρήση χειμώνα	1466,5	1597,9	2978,7	5171,9	2305,5	1183,2	851,5	599,9

Πίνακας 2.2 Ηλεκτρικός ισολογισμός πλοίου

Ο ηλεκτρικός ισολογισμός αποτελείται από ένα πίνακα, ο οποίος στις γραμμές του παρουσιάζει τους ηλεκτρικούς καταναλωτές, ενώ οι στήλες του αποτελούν τις διακριτές καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου. Κάθε στήλη διαθέτει επιμέρους δεδομένα όπως πόσα στοιχεία από κάθε είδος είναι σε λειτουργία, ο βαθμός απόδοσης κάθε συσκευής, η ζητούμενη μηχανική ισχύς και η ηλεκτρική ισχύς[5].

Ο πίνακας 2.2 αποτελεί μια συνοπτική μορφή του ηλεκτρικού ισολογισμού. Κάθε γραμμή του πίνακα αντιστοιχεί σε μια ομάδα φορτίων και οι στήλες του πίνακα αντιστοιχούν στις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου, συνεπώς ένα στοιχείο του πίνακα δείχνει την ενεργό ισχύ που απαιτείται για να λειτουργήσουν τα στοιχεία της αντίστοιχης ομάδας στη συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας. Οι τελευταίες γραμμές δείχνουν το άθροισμα των επιμέρους στοιχείων κάθε στήλης και γίνεται μια διάκριση σε χειμώνα και καλοκαίρι. Η διάκριση αυτή γίνεται διότι το χειμώνα λειτουργούν κάποια συστήματα θέρμανσης στη γάστρα του πλοίου, ώστε να μην ψύχονται τα συστήματα πρόωσης αλλά και το καύσιμο, ενώ ο κλιματισμός είναι περιορισμένος. Αντιθέτως το καλοκαίρι λειτουργεί ο κλιματισμός και τα συστήματα θέρμανσης στη γάστρα του πλοίου καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια λόγω του ζεστού καιρού.

Ειδικότερα, οι στήλες 1 και 2 του πίνακα περιγράφουν τις καταναλώσεις κάθε μιας από τις έντεκα ομάδες φορτίων, όταν αυτό βρίσκεται εν πλω και τροφοδοτείται με ηλεκτρισμό από τις δυο αξονικές γεννήτριες. Η κάθε στήλη παρουσιάζει την ενεργό ισχύ που προσφέρει η κάθε αξονική σε κάθε ομάδα φορτίων.

Η στήλη 3 περιγράφει τις καταναλώσεις ανά ομάδα φορτίων όταν το πλοίο είναι εν πλω και η ηλεκτροπαραγωγή γίνεται αποκλειστικά με γεννήτριες ντζελ.

Η στήλη 4 περιγράφει τις καταναλώσεις του πλοίου ανά ομάδα, όταν αυτό πραγματοποιεί ελιγμούς. Η ιδιαιτερότητα αυτής της κατάστασης έγκειται στο γεγονός ότι είναι σε λειτουργία ένας ή περισσότεροι πλευρικοί προωστήριοι μηχανισμοί οι οποίοι κινούνται από μεγάλης ισχύος ηλεκτρικούς κινητήρες. Η κατάσταση αυτή απαντάται για λίγα λεπτά, συνήθως όταν το πλοίο προσεγγίζει ή αναχωρεί από το λιμάνι, ενώ σε αυτή τη κατάσταση παρατηρείται και η μέγιστη ενεργειακή κατανάλωση.

Η στήλη 5 περιγράφει τις καταναλώσεις ανά ομάδα του πλοίου όταν αυτό βρίσκεται αγκυροβολημένο στο λιμάνι και είτε φορτώνει είτε εκφορτώνει αλλά ο απόπλους του θα λάβει χώρα σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Η στήλη 6 περιγράφει τις καταναλώσεις ανά ομάδα φορτίου όταν το πλοίο είναι αγκυροβολημένο στο λιμάνι και δεν θα αποπλεύσει σύντομα από αυτό, συνεπώς δε φιλοξενεί επιβάτες πλην ίσως ορισμένων μελών του πληρώματος.

Η διαφορά μεταξύ των στηλών 5 και 6 έγκειται στο ότι το πλοίο, στη τελευταία κατάσταση, έχει μειωμένη κατανάλωση δεδομένου ότι πολλές συσκευές είναι ανενεργές.

Η στήλη 7 περιγράφει τις καταναλώσεις του πλοίου όταν αυτό βρίσκεται σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης και μπορούν να τροφοδοτηθούν μόνο λίγοι αλλά κρίσιμοι για την ασφάλεια του πλοίου καταναλωτές. Η ηλεκτροπαραγωγή προέρχεται μόνο από τη γεννήτρια έκτακτης ανάγκης και τροφοδοτούνται τα συστήματα λειτουργίας των προωστήριων μηχανών. Σε αυτή τη κατάσταση δηλαδή, το πλοίο μπορεί να κινηθεί με τις δικές του προωστήριες μηχανές ενδεχομένως με μειωμένη ταχύτητα.

Τέλος, η στήλη 8 περιγράφει τις καταναλώσεις των επιμέρους ομάδων κατά τη κατάσταση έκτακτης ανάγκης, όπου τροφοδοτούνται λίγα κρίσιμα φορτία, αλλά το πλοίο δεν έχει τη δυνατότητα να κινηθεί μόνο του, συνεπώς δε τροφοδοτούνται τα υποσυστήματα των προωστήριων μηχανών. Για το λόγο αυτό η συνολική κατανάλωση της στήλης 8 είναι μειωμένη σε σχέση με αυτή της στήλης 7[5].

2.6. Καταστάσεις λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου

Το υπό μελέτη πλοίο έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με συγκεκριμένα σενάρια λειτουργίας[5]. Στηριζόμενος στα σενάρια αυτά, ο μελετητής προσδιόρισε ποιοι συνδυασμοί γεννητριών ντήζελ και αξονικών γεννητριών θα λειτουργούν καθώς και ποια φορτία θα τροφοδοτούν. Τα σενάρια λειτουργίας ακολουθούν παρακάτω:

A) Λειτουργία λιμανιού:

- 1) Μια ή περισσότερες γεννήτριες ντήζελ σε λειτουργία.
- 2) Η γεννήτρια έκτακτης ανάγκης τροφοδοτεί τον κύριο ζυγό μέσω γραμμής μεταφοράς. Παράλληλη λειτουργία μεταξύ της γεννήτριας έκτακτης ανάγκης και το πολύ δυο γεννητριών ντήζελ μόνο για μεταφορά φορτίων.

B) Λειτουργία ελιγμών:

- 1) Οι γεννήτριες ντήζελ τροφοδοτούν τον κύριο ζυγό και οι διακόπτες που συνδέουν το κύριο ζυγό με τους ζυγούς των αξονικών γεννητριών είναι κλειστοί.
- 2) Οι γεννήτριες ντήζελ τροφοδοτούν το κύριο ζυγό και οι αξονικές γεννήτριες τους δικούς τους ζυγούς.

Γ) Λειτουργία θάλασσας :

- 1) Το λιγότερο δυο γεννήτριες ντήζελ τροφοδοτούν το κύριο ζυγό.
- 2) Η αξονική γεννήτρια 2 τροφοδοτεί το αριστερό μέρος του κύριου πίνακα και η αξονική γεννήτρια 1 τροφοδοτεί το δεξί μέρος του κύριου πίνακα .

Δ) Λειτουργία έκτακτης ανάγκης :

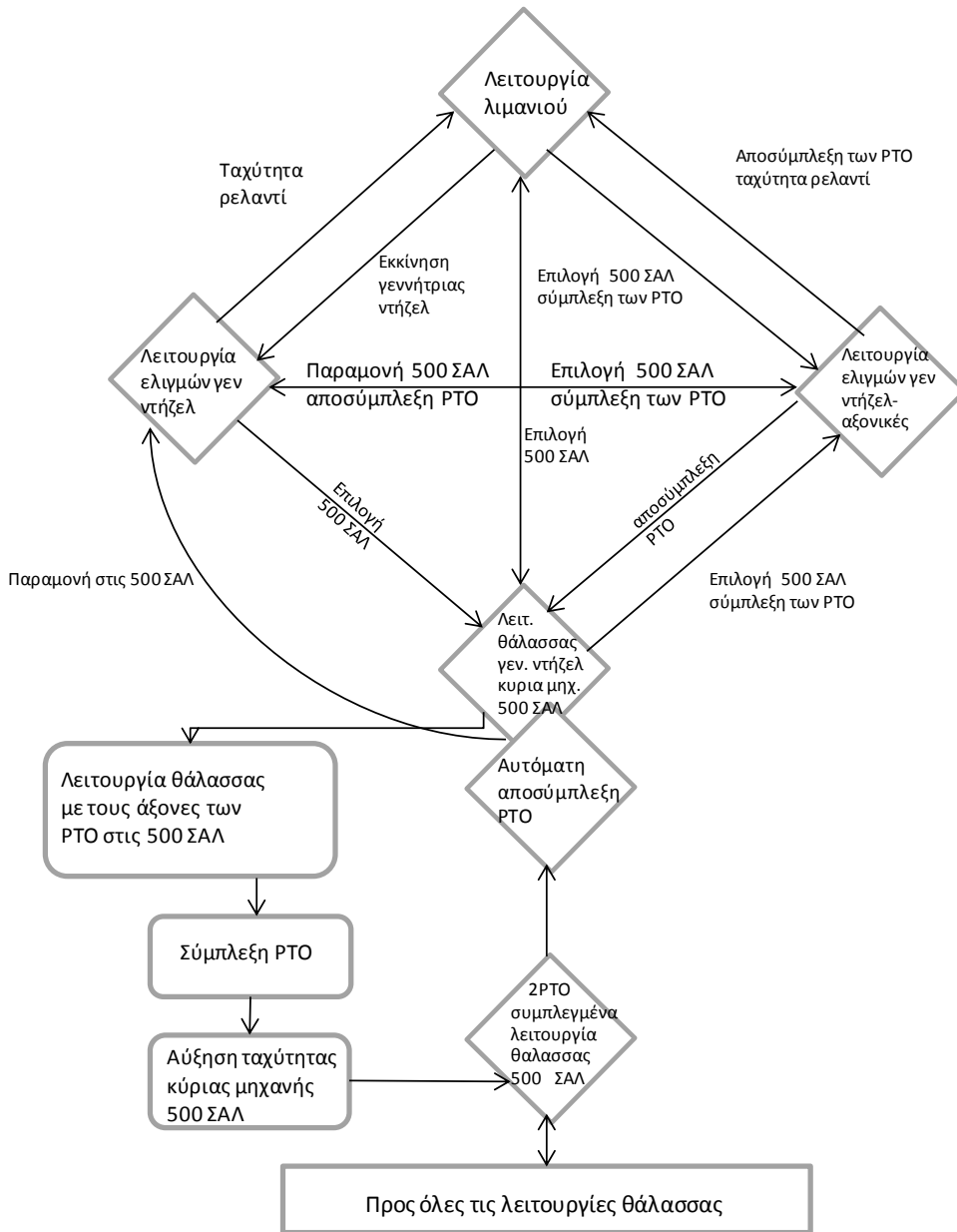
- 1) Σε περίπτωση black out ο αυτόματος διακόπτης της γεννήτριας έκτακτης ανάγκης ανοίγει και η τελευταία τροφοδοτεί το πίνακα έκτακτης ανάγκης και τους καταναλωτές MCC που απαιτούνται για να λειτουργήσουν οι προωσθήριες μηχανές.

Ε) Λειτουργία μεταφοράς φορτίων:

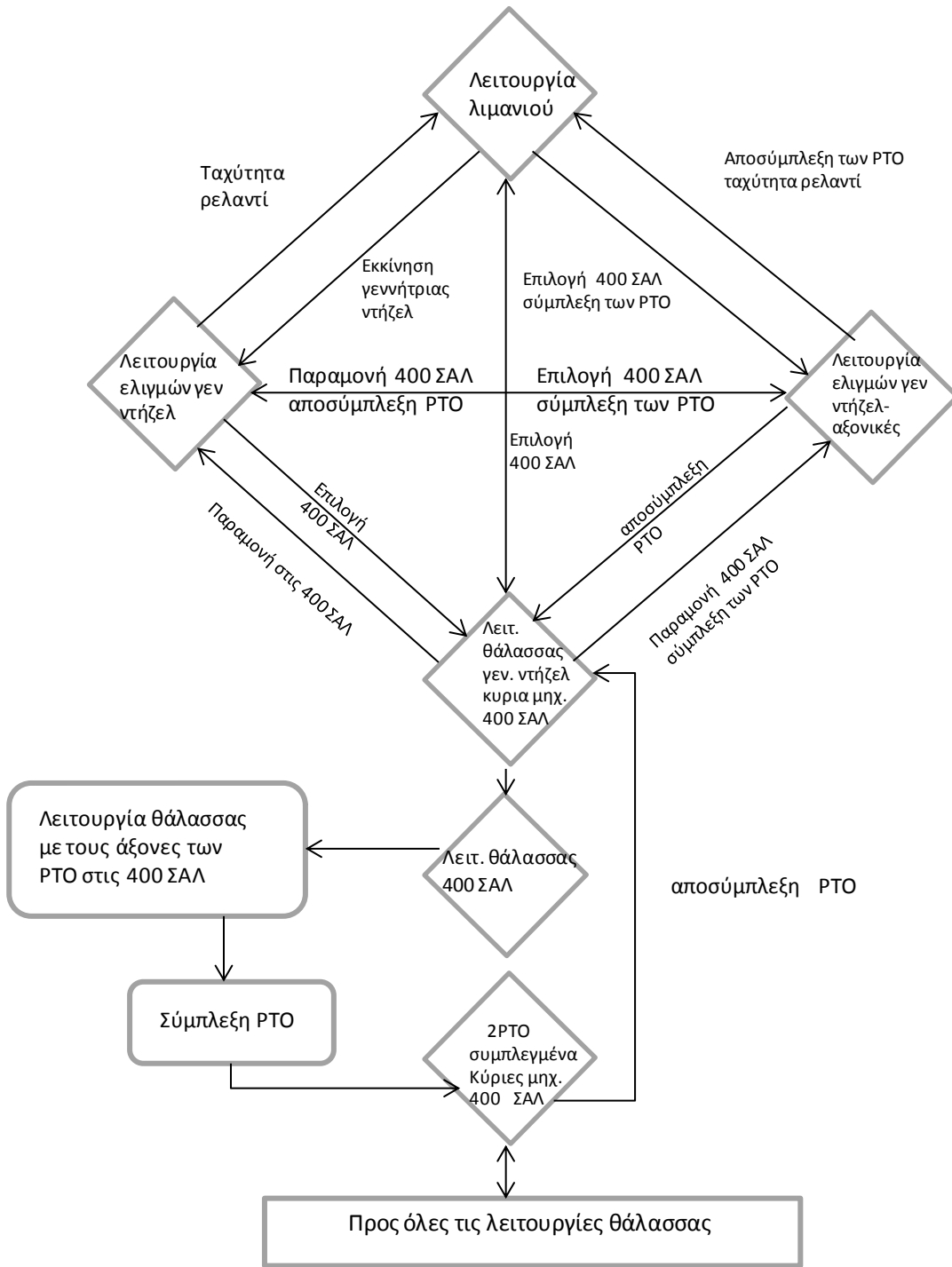
- 1) Παράλληλη λειτουργία δυο γεννητριών ντήζελ και μιας αξονικής γεννήτριας μόνο για μεταφορά φορτίων.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί πως τα πραγματικά σενάρια λειτουργίας του πλοίου διαφέρουν από αυτά της αρχικής μελέτης. Το πλοίο στη πραγματικότητα διαθέτει ένα σύνολο προγραμματισμένων καταστάσεων οι οποίες ελέγχονται και υλοποιούνται από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Επίσης το προσωπικό του πλοίου μπορεί να παρακάμψει το πρόγραμμα ελέγχου και των διαφόρων καταστάσεων του πλοίου και να κάνει χειροκίνητες ρυθμίσεις, δημιουργώντας διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας από τις προγραμματισμένες[5].

Τα διαγράμματα ροής των αυτοματοποιημένων καταστάσεων λειτουργίας του πλοίου ακολουθούν στη συνέχεια[5]:



Σχήμα 2.4 Καταστάσεις λειτουργίας με τις κύριες μηχανές στις 500 ΣΑΛ

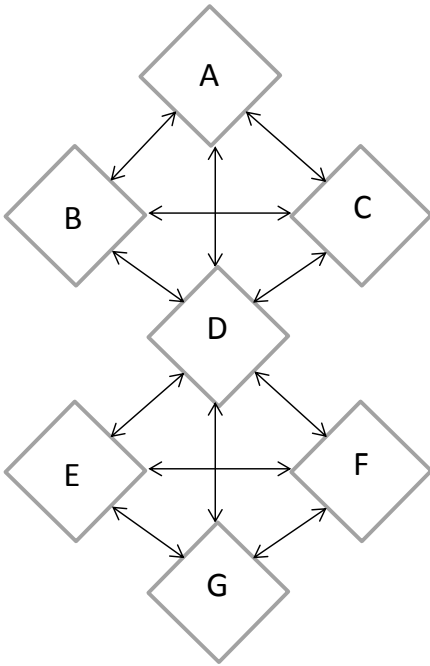


Σχήμα 2.5 Καταστάσεις λειτουργίας με τις κύριες μηχανές στις 400 ΣΑΛ



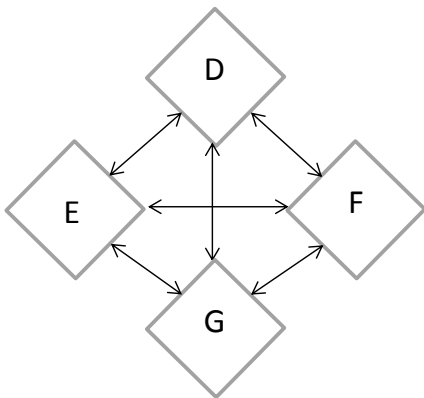
Σχήμα 2.6 Λειτουργίες θάλασσας

Λειτουργία θάλασσας 500 ΣΑΛ



ΜΕΤΑΒΑΣΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ	ΜΕΤΑΒΑΣΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ
AB	20''	DE	2'42''
BD	24''	EG	1'13''
AC	2'21''	DF	10'29''
CD	30''	FG	57''
AD	19''	DG	1'23''
BA	20''	EF	3'18''
DB	46''	ED	54''
CA	28''	GE	59''
DC	3'03''	FD	2'
DA	19''	GF	1'04''
		GD	1'23''
		FE	3'18''

Λειτουργία θάλασσας 400 ΣΑΛ



ΜΕΤΑΒΑΣΕΙΣ	ΧΡΟΝΟΣ
DE	2'25''
EG	1'06''
DF	2'09''
FG	52''
DG	4'10''
EF	3'38''
ED	1'01''
GE	59''
FD	2'
GF	1'04''
GD	1'14''
FE	3'38''

Σχήμα 2.7 Χρόνοι μετάβασης μεταξύ καταστάσεων

2.7. Μετρήσεις σε πραγματικές καταστάσεις λειτουργίας

Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο λήφθηκαν από το σύστημα εποπτείας του πλοίου το μήνα Ιανουάριο του έτους 2011[5]. Στις ακόλουθες μετρήσεις παρατίθεται η ώρα λήψης της μέτρησης η οποία συσχετίζεται με τη πραγματική κατάσταση του πλοίου τη συγκεκριμένη στιγμή. Επιπλέον, παρουσιάζεται για κάθε μια γεννήτρια εξαιρουμένης της γεννήτριας έκτακτης ανάγκης, η ενεργός ισχύς P. Στο κεφάλαιο 2.6 παρουσιάστηκαν οι διακριτές καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου κατά τη φάση σχεδίασής του. Στην πράξη υπάρχει μια ακόμη κατάσταση λειτουργίας η οποία εφαρμόζεται χειροκίνητα και την ονομάζουμε Γ3[5]. Στην κατάσταση αυτή το πλοίο βρίσκεται εν πλω και το ηλεκτρικό του δίκτυο χωρίζεται σε δυο τμήματα, το ένα εκ των οποίων αναλαμβάνει να το τροφοδοτήσει μια αξονική γεννήτρια, ενώ το δεύτερο τροφοδοτείται από μια ή περισσότερες γεννήτριες ντήζελ.

Ημερομηνία μετρήσεων 20/1/2011	Κατ. Λειτουργ.	ΑΞΟΝΙΚΗ 1	ΑΞΟΝΙΚΗ 2	DIESEL 1	DIESEL 2	DIESEL 3	ΣPgen
ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ		P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)
13:59	A1	0	0	698	694	703	2095
15:43	Γ3	0	1279	0	1154	0	2433
18:10	Γ3	0	1294	0	1178	0	2472
19:50	Γ3	0	1327	0	1171	0	2498
22:45	A1	0	0	1068	0	1071	2139
23:45	Γ3	0	1367	0	1125	0	2492

Ημερομηνία μετρήσεων 21/1/2011	Κατ. Λειτ.	ΑΞΟΝΙΚΗ 1	ΑΞΟΝΙΚΗ 2	DIESEL 1	DIESEL 2	DIESEL 3	ΣPgen
ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ		P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)
2:03	Γ3	0	1315	0	1145	0	2460
3:46	Γ3	0	1338	0	1121	0	2459
5:50	Β2	95	160	843	841	863	2802
7:49	Α1	0	0	0	903	919	1822
12:50	Α1	0	0	614	603	612	1829
14:03	Α1	0	0	1018	0	1025	2043
21:33	Α1	0	0	816	791	788	2395
23:42	Ε1	0	1134	667	567	0	2368

Ημερομηνία μετρήσεων 22/1/2011	Κατ. Λειτ.	ΑΞΟΝΙΚΗ 1	ΑΞΟΝΙΚΗ 2	DIESEL 1	DIESEL 2	DIESEL 3	ΣPgen
ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ		P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)
2:23	Γ3	0	1331	0	1088	0	2419
3:46	Γ3	0	1354	0	1100	0	2454
6:59	Α1	0	0	1025	0	1031	2056
7:53	Α1	0	0	858	0	854	1712

10:54	A1	0	0	862	0	863	1725
11:54	A1	0	0	858	0	861	1719
17:37	A1	0	0	1203	0	1191	2394
19:56	A1	0	0	1216	0	1207	2423
22:03	A1	0	0	1046	0	1034	2080
23:50	Γ3	0	1224	1210	0	0	2434

Ημερομηνία μετρήσεων 23/1/2011	Κατ. Λειτ.	ΑΞΟΝΙΚΗ 1	ΑΞΟΝΙΚΗ 2	DIESEL 1	DIESEL 2	DIESEL 3	ΣPgen
ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ		P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)
2:12	Γ3	0	1228	1185	0	0	2413
3:54	Γ3	0	1228	1194	0	0	2422
6:21	A1	0	0	987	0	978	1965
8:12	A1	0	0	883	0	884	1767
11:59	A1	0	0	940	0	937	1877
14:22	A1	0	0	994	0	983	1977
15:59	Γ3	0	1285	0	1230	0	2515
18:06	Γ3	0	1292	0	1191	0	2483

19:47	Γ3	0	1300	0	1232	0	2532
22:26	A1	0	0	1039	0	1024	2063
23:57	Γ3	0	1209	1162	0	0	2371

Ημερομηνία μετρήσεων 24/1/2011	Κατ. Λειτουργ.	ΑΞΟΝΙΚΗ 1	ΑΞΟΝΙΚΗ 2	DIESEL 1	DIESEL 2	DIESEL 3	ΣΡgen
ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ		P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)	P (KW)
1:52	Γ3	0	1248	1136	0	0	2384
3:49	Γ3	0	1206	1189	0	0	2395

Πίνακας 2.3 Μετρήσεις παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου

Από τις μετρήσεις προκύπτει πως οι πιο συχνά εμφανιζόμενες καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου είναι οι A1 και Γ3. Οι καταστάσεις B1 και E1 εμφανίζονται μια φορά. Ορισμένες καταστάσεις είναι εξαιρετικά σπάνιο να εμφανιστούν καθώς σχετίζονται με καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπως οι καταστάσεις A2 και Δ1. Επιπροσθέτως οι διαχειριστές του πλοίου αποφεύγουν, όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2.4, να παραλληλίζουν τις αξονικές γεννήτριες με τις γεννήτριες ντήζελ, ενώ επίσης αποφεύγουν και να χρησιμοποιούν αποκλειστικά γεννήτριες ντήζελ ή αποκλειστικά αξονικές γεννήτριες κατά την εν πλω λειτουργία του σκάφους. Για λόγους οικονομίας και αξιοπιστίας επιλέγουν τον συνδυασμό αξονικής και γεννητριών ντήζελ. Τα παραπάνω δικαιολογούν την υψηλή συχνότητα εμφάνιση της κατάστασης Γ3 και την απουσία των καταστάσεων Γ1, Γ2. Τέλος η κατάσταση B1 επίσης αποφεύγεται, καθώς υπάρχει μεγάλη πιθανότητα black-out κατά τους ελιγμούς, γεγονός το οποίο θα αφήσει το πλοίο ακυβέρνητο σε μια πολύ κρίσιμη κατάσταση. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η κατάσταση B2 ως ασφαλέστερη επιλογή, καθώς οι αξονικές γεννήτριες τροφοδοτούν αποκλειστικά τα προπελάκια και οι γεννήτριες ντήζελ όλα τα άλλα φορτία του πλοίου[5].

Τα δεδομένα των μετρήσεων που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.3 σε συνδυασμό με τα ποσοστά φόρτισης των γεννητριών του πλοίου που δίνονται στον πίνακα 2.4 χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου(κεφάλαια 3 και 4) και τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων (κεφάλαιο 5).

ΩΡΑ ΛΗΨΗΣ	Κατ. Λειτουργ.	ΑΞΟΝΙΚΗ 1	ΑΞΟΝΙΚΗ 2	DIESEL 1	DIESEL 2	DIESEL 3
20/1/2011		%	%	%	%	%
13:59	A1			41	41	41
15:43	Γ3		66.6		68	
18:10	Γ3		67.4		70	
19:50	Γ3		59.1		69	
22:45	A1			63		63
23:45	Γ3		71.2		67	
21/1/2011						
2:03	Γ3		68.5		68	
3:46	Γ3		69.7		66	
5:50	B2	4.9	8.3	50	50	51
7:49	A1				53	54
12:50	A1			36	35	36
14:03	A1			60		60
21:33	A1			48	47	46
23:42	E1		59.1	40	34	
22/1/2011						
2:23	Γ3		69.3		53	
3:46	Γ3		70.5		65	
6:59	A1			61		61
7:53	A1			51		50
10:54	A1			51		51
11:54	A1			51		51
17:37	A1			71		70
19:56	A1			72		71
22:03	A1			62		61
23:50	Γ3		63.7	72		
23/1/2011						
2:12	Γ3			64	70	

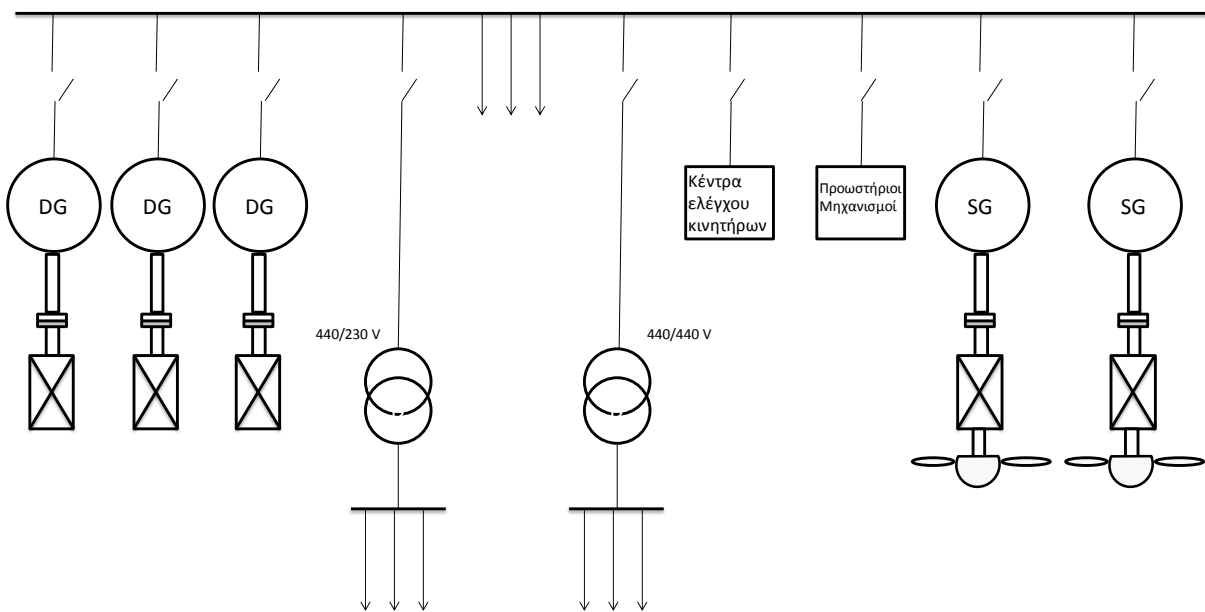
3:54	Γ3	64	71	
6:21	A1		58	58
8:12	A1		52	52
11:59	A1		55	55
14:22	A1		59	58
15:59	Γ3	66.9		73
18:06	Γ3	67.3		71
19:47	Γ3	67.7		73
22:26	A1		61	61
23:57	Γ3	63	69	
24/1/2011				
1:52	Γ3	65	67	
3:49	Γ3	62.8	70	

Πίνακας 2.4 Ποσοστά φόρτισης γεννητριών του πλοίου

Κεφάλαιο 3 : Μοντελοποίηση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου

Η μοντελοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου του υπό μελέτη πλοίου που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου MATLAB/SIMULINK. Σύμφωνα με την παράγραφο 2.3, το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου τροφοδοτείται από τρεις γεννήτριες ντήζελ ονομαστικής ισχύος 2.100 kVA και δυο αξονικές γεννήτριες, ονομαστικής ισχύος 2.400 kVA. Το σύστημα των αξονικών γεννητριών αποτελείται από τις γεννήτριες μόνιμων μαγνητών και από το αντίστοιχο σύστημα ηλεκτρικού ελέγχου με τη χρήση μετατροπέων για τον έλεγχο της ενεργού ισχύος εξόδου αλλά και τη διατήρησης της τάσης και της συχνότητας του δικτύου. Οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών έχουν επιλεγεί με κριτήριο την υψηλή τους απόδοση και τον μικρότερο όγκο σε σύγκριση με τις αντίστοιχες σύγχρονες γεννήτριες τυλιγμένου δρομέα. Το σύστημα ελέγχου των αξονικών γεννητριών περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των σύγχρονων γεννητριών μόνιμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται στις αξονικές γεννήτριες καθώς και των σύγχρονων γεννητριών με τυλιγμένο δρομέα που χρησιμοποιούνται στις γεννήτριες ντήζελ. Επίσης εξετάζεται η μοντελοποίηση της μηχανής εσωτερικής καύσης και του ρυθμιστή στροφών καθώς και του συστήματος διέγερσης των γεννητριών ντήζελ. Τέλος παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των καταναλωτών του πλοίου με τη χρήση των δεδομένων που προκύπτουν από τον ηλεκτρικό ισολογισμό και τις μετρήσεις της παραγράφου 2.7.

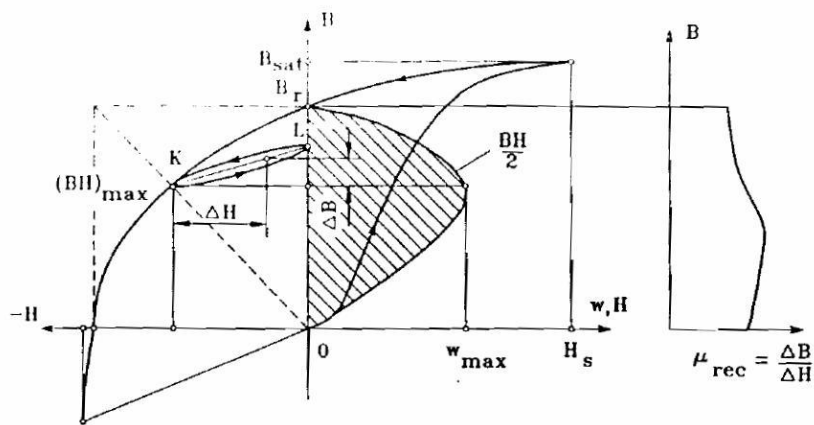


Σχήμα 3.1 Ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου

3.1. Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών

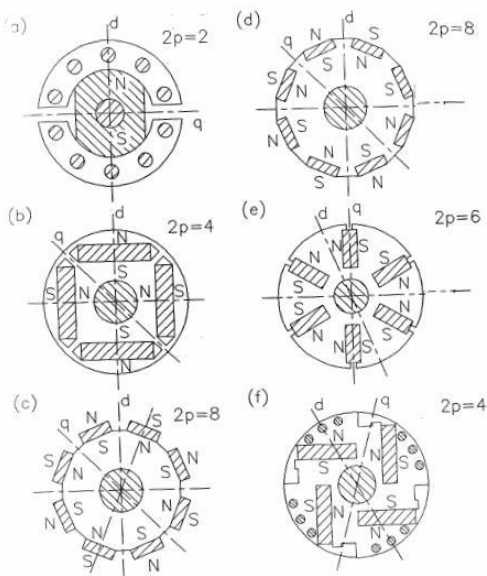
Τα πρώτα συστήματα που χρησιμοποιούσαν μόνιμους μαγνήτες ως διέγερση σε μηχανές αναπτύχθηκαν από το 19^ο αιώνα (J .Henry (1831) , H . Pixii (1832) ,F.Watkins (1835))[8]. Εξαιτίας της χαμηλής ποιότητας των μαγνητικών υλικών η απόδοση τέτοιων συστημάτων δεν ήταν ιδιαίτερα αποδοτική. Τα συστήματα αυτά εμφάνιζαν προβλήματα απομαγνήτισης σε έντονες πεδιακές μεταβολές με αποτέλεσμα το ενδιαφέρον γρήγορα να στραφεί σε συστήματα ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης. Σήμερα, με την εξέλιξη της επιστήμης των υλικών και τη χρήση κράματος από νεοδύμιο κατασκευάστηκαν μόνιμοι μαγνήτες που παρουσιάζουν μεγάλη σταθερότητα στα χαρακτηριστικά τους, γεγονός που τα έκανε ιδιαίτερα ελκυστικά λόγω των μεγάλων πλεονεκτημάτων που δίνουν στα συστήματα ηλεκτροκίνησης. Στον αντίποδα της τεχνολογίας των μόνιμων μαγνητών βρίσκονται οι μηχανές επαγωγής οι οποίες αποτέλεσαν την ατμομηχανή της ηλεκτροκίνησης τον 20^ο αιώνα. Σήμερα εξαιτίας της προόδου στους τομείς των ηλεκτρονικών ισχύος και των συστημάτων ελέγχου η χρήση τους εντατικοποιήθηκε. Βασικά πλεονεκτήματα των μηχανών αυτών είναι το χαμηλό τους κόστος και η σχετικά απλή κατασκευή σε συνδυασμό με την αξιοπιστία που προσφέρουν. Μειονεκτήματα αυτών το μικρό διάκενο και η λειτουργία υπό χαμηλότερο συντελεστή ισχύος συγκριτικά με τις σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών[9]. Η σύγχρονη γεννήτρια επομένως προσφέρει καλύτερη απόδοση δεδομένου ότι δεν υπάρχει ηλεκτρική σύνδεση στο δρομέα με αποτέλεσμα μειωμένες απώλειες. Επίσης ένα επιπλέον πλεονέκτημα της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών είναι η ανάπτυξη μεγαλύτερης ροπής ή ισχύος εξόδου ανά μονάδα. Τέλος, η δυναμική συμπεριφορά είναι καλύτερη στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο.

Η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών μπορεί να παράγει μαγνητική ροή στο διάκενο χωρίς κανένα σύστημα διέγερσης ούτε ηλεκτρομαγνητική μετατροπή. Όπως κάθε άλλο φερομαγνητικό υλικό, η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών περιγράφεται από ένα $B - H$ βρόγχο υστέρησης. Συγκεκριμένα ο βρόγχος αυτός για τις μηχανές αυτού του τύπου είναι πεπλατυσμένος όπως δείχνει και το σχήμα 3.2. Η αρχή λειτουργίας των μηχανών αυτών περιγράφεται από το τμήμα της καμπύλης μαγνητίσεως που βρίσκεται στο δεύτερο τεταρτημόριο, γνωστή και ως απομαγνητίζουσα καμπύλη. Στη περίπτωση που μια ανάστροφη πυκνότητα μαγνητικής ροής εφαρμόζεται στην ήδη υπάρχουσα, η συνολική πυκνότητα μαγνητικής ροής πέφτει ώσπου τελικά φτάνει στο σημείο K , σχήμα 3.2. Εν συνεχεία, όταν η ανάστροφη αυτή ροή αφαιρεθεί τότε, η πυκνότητα μαγνητικής ροής επιστρέφει στο σημείο που ήταν αρχικά (σημείο L) κατά μήκος ενός μικρού βρόγχου υστέρησης. Με τον τρόπο αυτό παρατηρείται ότι η εφαρμογή ενός ανάστροφου πεδίου έχει ως συνέπεια τη μείωση του παραμένοντα μαγνητισμού. Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία προκύπτει εκ νέου μείωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής σε σημείο αρκετά κοντά στο K όπως και πριν. Ο μικρός αυτός βρόγχος υστέρησης μπορεί να αντικατασταθεί από μια γραμμή η οποία ονομάζεται χαρακτηριστική απομαγνήτισης και έχει μια κλίση που ονομάζεται διαφορική διαπερατότητα. Όσο το πλάτος του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου H δε ξεπερνά τη μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο K , ο μόνιμος μαγνήτης θεωρείται ότι παραμένει ικανοποιητικά μόνιμος ως προς το μαγνητικό του πεδίο [9]. Στη περίπτωση που εφαρμοστεί ένα μεγαλύτερο πεδίο H , τότε η μείωση της συνολικής πυκνότητας μαγνητικής ροής θα είναι μικρότερη του σημείου K .



Σχήμα 3.2 Τυπική μορφή βρόγχου υστέρησης μηχανής μόνιμων μαγνητών

Οι δύο συνηθέστεροι τύποι μηχανών μόνιμων μαγνητών είναι αυτοί με ομοιόμορφο στρεφόμενο, ημιτονοειδές κατανεμημένο πεδίο στάτη και οι διακοπτικοί, τραπεζοειδείς (με πεδίο στο στάτη το οποίο εναλλάσσεται διακοπτικά σε διακριτά βήματα). Κατασκευαστικά οι μηχανές μόνιμων μαγνητών ποικίλουν, στο σχήμα 3.3 φαίνονται μερικές τοπολογίες που εφαρμόζονται στη κατασκευή του δρομέα τέτοιων μηχανών. Τα τυλίγματα του στάτη είναι τοποθετημένα μέσα σε αύλακες.



Σχήμα 3.3 Συνήθεις τοπολογίες που εφαρμόζονται στην κατασκευή του δρομέα μηχανών μόνιμων μαγνητών

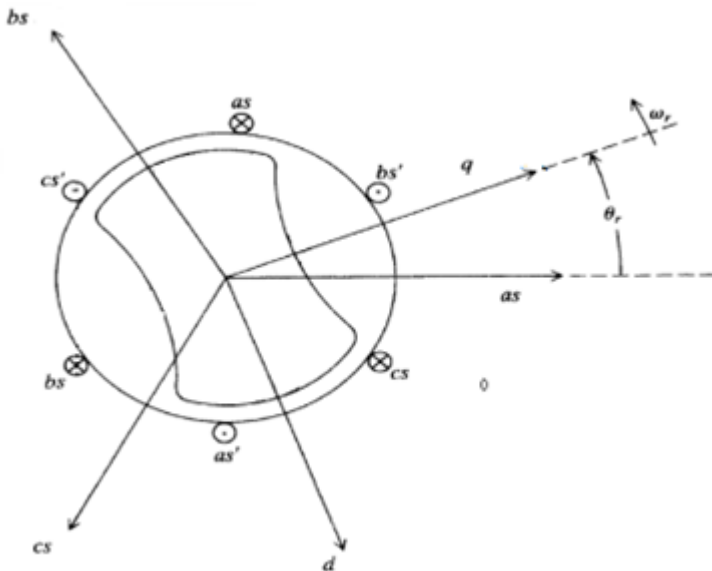
3.1.1. Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών

Η αξονική γεννήτρια της παρούσας εργασίας μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών του SIMULINK/MATLAB (παράρτημα σχήμα 10-12). Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει την λειτουργία της γεννήτριας χρησιμοποιώντας ένα πλαίσιο αναφοράς δύο αξόνων (d-q) που περιστρέφεται με την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4 .

Ο μετασχηματισμός δυο αξόνων (d-q) μετατρέπει με τη βοήθεια της μήτρας T_{abc-dq} , τα τριφασικά μεγέθη από ένα σταθερό τριφασικό σύστημα συντεταγμένων (abc) στο στρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων (d-q), απλοποιώντας την ανάλυση των τριφασικών κυκλωμάτων. Η μήτρα μετασχηματισμού δίνεται από τη σχέση 3.1.

$$T_{abc-dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Οι παράμετροι του μοντέλου έχουν συμπληρωθεί με βάση τις παραμέτρους της υπάρχουσας σύγχρονης μηχανής. Οι εξισώσεις γενικευμένης θεωρίας που περιγράφουν το μοντέλο της γεννήτριας είναι οι ακόλουθες.



Σχήμα 3.4 Στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (d-q)

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\lambda_{sd}}{dt} - \omega_r \lambda_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\lambda_{sq}}{dt} + \omega_r \lambda_{sd} \end{cases} \quad (3.2)$$

όπου λ_{sd} , λ_{sq} είναι οι d και q πυκνότητες της μαγνητικής ροής στο διάκενο και δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{cases} \lambda_{sd} = L_s i_{sd} + \psi_{pm} \\ \lambda_{sq} = L_s i_{sq} \end{cases} \quad (3.3)$$

ψ_{pm} , είναι η μαγνητική ροή του μόνιμου μαγνήτη . Η ηλεκτρομαγνητική ροπή δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$T_e = \frac{m_s n_p}{2} (\lambda_{sq} i_{sd} - \lambda_{sd} i_{sq}) \quad (3.4)$$

Όπου m_s είναι ο αριθμός των φάσεων και n_p ο αριθμός των ζευγών πόλων. Από την 3.4 και τις 3.3 προκύπτει η τελική εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής.

$$T_e = -\frac{m_s n_p}{2} ((L_{sq} - L_{sd}) i_{sd} i_{sq} - \psi_{pm} i_{sq}) \quad (3.5)$$

Οι εξισώσεις 3.6 περιγράφουν το μοντέλο της γεννήτριας μόνιμων μαγνητών όπως αυτό υλοποιείται στο MATLAB/SIMULINK.

$$i_{sd} = \frac{V_{sd} + \omega_r L_s i_{sq}}{L_s + R_s}$$

$$i_{sq} = \frac{V_{sq} - \omega_r L_s i_{sd} - \omega_r \psi_{pm}}{L_s + R_s} \quad (3.6)$$

$$T_e = -\frac{m_s n_p}{2} ((L_{sq} - L_{sd}) i_{sd} i_{sq} - \psi_{pm} i_{sq})$$

$$\omega_r = \frac{n_p}{J_s + B} (T_T - T_e)$$

$$\theta_r = \frac{\omega_s}{s}$$

Οι παράμετροι του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

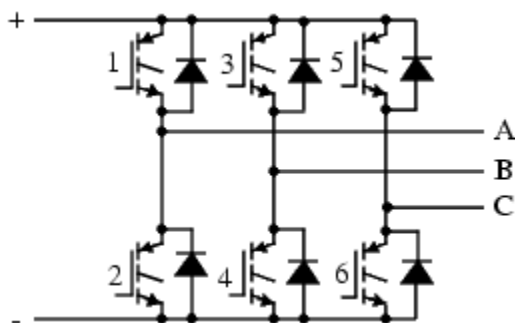
Αντίσταση στάτη	Rs (ohm)	9.2840e-4
Επαγωγές	[Ld(H),Lq(H)]	[1.8621e-4,8.3822e-5]
Ροή σύζευξης	(Vs)	0.97462
Σταθερά τάσης		530.3295
(V_peak L-L/krpm)		
Σταθερά ροπής	(Nm/A_peak)	4.3858
Ζεύγη πόλων	p	3

Πίνακας 3.1 Παράμετροι μοντέλου σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών

3.2. Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης

Ο τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης μετατρέπει τη συνεχή τάση σε τριφασική εναλλασσόμενη μεταβλητή, ενεργής τιμής και μεταβλητής συχνότητας. Ο τριφασικός αντιστροφέας επομένως, καθιστά δυνατή τη σύνδεση της διάταξης με το δίκτυο.

Το κύκλωμα ενός τυπικού τριφασικού αντιστροφέα με IGBT φαίνεται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5 Τριφασικός αντιστροφέας με IGBT

Οι ημιαγώγιμοι διακόπτες λειτουργούν ως διακόπτες που μπορούν να βρίσκονται είτε σε κατάσταση αγωγής είτε σε κατάσταση αποκοπής. Οι δίοδοι στα άκρα των διακοπών χρειάζονται για επαγωγικά φορτία διότι εξασφαλίζουν τη κυκλοφορία της άεργου ισχύος καθώς και τη ροή ρεύματος αντίθετης φοράς από εκείνη των ελεγχόμενων διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα.

Η λειτουργία του αντιστροφέα βασίζεται στους θετικούς παλμούς έναυσης που δίνονται στις πύλες δυο κάθε φορά εκ των έξι διακοπτικών στοιχείων με αποτέλεσμα αυτά να μεταβαίνουν σε κατάσταση αγωγής. Συνεπώς συνδέουν τη συνεχή τάση εισόδου στα άκρα του φορτίου έτσι ώστε να δημιουργείται στα άκρα του ένας θετικός παλμός τάσης με εύρος ίσο με τη χρονική διάρκεια αγωγής των αντίστοιχων διακοπτικών στοιχείων. Κατά τη φάση αυτή δεν άγουν οι υπόλοιποι διακόπτες. Στη συνέχεια αφαιρούνται οι παλμοί οδήγησης από τα προηγούμενα διακοπτικά στοιχεία και τα εφαρμόζονται σε άλλα δυο και ούτω καθεξής.

Η τάση εξόδου του αντιστροφέα αποτελείται από τη βασική αρμονική συνιστώσα και από τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες οι οποίες πρέπει να εξαλειφθούν ή να μειωθούν. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ένα φίλτρο στην έξοδο του αντιστροφέα. Το μέγεθος, το βάρος, και το κόστος του φίλτρου εξαρτώνται από το πλάτος και τη συχνότητα της βασικής αρμονικής. Για την αποφυγή της χρήσης φίλτρου χρησιμοποιείται μια τεχνική γνωστή ως Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (SPWM). Σύμφωνα με τη τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται τρεις όμοιες ημιτονοειδής κυματομορφές αναφοράς, μια για κάθε ημιγέφυρα, και μια τριγωνική κυματομορφή φορέα συγχρονισμένες μεταξύ τους. Οι ημιτονοειδής κυματομορφές παρουσιάζουν διαφορά φάσης 120° η κάθε μια από τις άλλες όπως συμβαίνει σε ένα τυπικό τριφασικό σύστημα.

Τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και της κυματομορφής του φορέα ορίζουν τις κυματομορφές των παλμών έναυσης των IGBTs. Αυτό που επιτυγχάνεται με την τεχνική SPWM είναι η μετατόπιση της κυριάρχουσας ανώτερης αρμονικής συνιστώσας σε συχνότητα πολύ υψηλότερη από αυτή της βασικής αρμονικής συνιστώσας. Η κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική είναι η αρμονική η οποία έχει το μέγιστο συντελεστή παραμόρφωσης (Distortion Factor) που δίνεται από τη σχέση:

$$D_n\% = 100 \left(\frac{V_{AB,n}}{n^2} \right) \quad (3.7)$$

Το πλάτος και η τάξη της κυριάρχουσας ανώτερης αρμονικής συνιστώσας δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$V_{(AB,d)max} = 0.27V_c$$

$$d = F_{nc} - 2 \quad (3.8)$$

$$F_{nc} = \frac{F_c}{F_r}$$

Όπου F_{nc} η ανηγμένη συχνότητα του φορέα και V_c είναι η συνεχής τάση εισόδου του αντιστροφέα. Ο συντελεστής διαμόρφωσης (modulation factor), ο οποίος παίρνει τιμές από 0 έως 1, είναι ο λόγος του πλάτους της κυματομορφής αναφοράς A_r (ημίτονου) προς το πλάτος της κυματομορφής φορέα A_c (τριγωνικού παλμού) και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$M_f = \frac{A_r}{A_c} \quad (3.9)$$

Το πλάτος κυματομορφής φορέα A_c παραμένει σταθερό με αποτέλεσμα αυξομειώνοντας το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς A_r να αυξομειώνονται τα εύρη των παλμών έναυσης και κατά συνέπεια να αυξομειώνεται η ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας. Το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα είναι:

$$V_{AB1} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_c M_f \quad (3.10)$$

Είναι προφανές από τα παραπάνω ότι η μεταβολή του συντελεστή διαμόρφωσης επιτρέπει τη ρύθμιση της τάσης εξόδου του αντιστροφέα στην επιθυμητή τιμή.

3.2.1. Μοντέλο αντιστροφέα πηγής τάσης

Για τη μοντελοποίηση του αντιστροφέα πηγής τάσης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της οικουμενικής γέφυρας (universal bridge block) το οποίο υπάρχει στη βιβλιοθήκη ηλεκτρονικών ισχύος του Simulink. Η οικουμενική γέφυρα μπορεί να υλοποιήσει ένα τριφασικό μετατροπέα ισχύος που αποτελείται από έως έξι διακόπτες ισχύος συνδεδεμένους σε διάταξη γέφυρας. Ο τύπος του διακόπτη ισχύος και η διάταξη του μετατροπέα μπορούν να επιλεγούν από το παράθυρο διαλόγου. Η οικουμενική γέφυρα επιτρέπει τη προσομοίωση μετατροπέων που χρησιμοποιούν συσκευές με φυσική μεταγωγή (διόδοι, θυρίστρο) αλλά και συσκευές με εξαναγκασμένη μεταγωγή (GTO, IGBT, MOSFET). Στο συγκεκριμένο μοντέλο επιλέγεται η λειτουργία γέφυρας IGBT – διόδων. Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Αριθμός γεφυρών	3
Αντίσταση καταστολής R_s (Snubber resistance) (Ohms)	1e6
Χωρητικότητα καταστολής C_s (Snubber capacitance) (F)	Inf

Ηλεκτρονικά ισχύος	IGBT/Diodes
Ron (Ohms)	1e-6
Τάσεις (Forward voltages)	
[Device Vf (V) , diode Vfd (V)]	[0 0]
[Tf(s) , Tt(s)]	[0 0]

Πίνακας 3.2 Παράμετροι μοντέλου οικουμενικής γέφυρας

3.3. Μηχανές εσωτερικής καύσης (diesel)

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης (diesel) αποτελούν σημαντικό κομμάτι της σύγχρονης πραγματικότητας καθώς χρησιμοποιούνται ευρέως στην αυτοκίνηση και σε άλλες εφαρμογές. Οι κινητήριες μηχανές ντίζελ είναι ελκυστικές σε εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη απόκριση για απαιτήσεις φορτίου αιχμής ή όταν η τοπική ζήτηση για επιπλέον ισχύ επιβάλλει αύξηση της πηγής ισχύος. Δεδομένου ότι η απόκριση της κινητήριας μηχανής είναι ταχύτατη, είναι απαραίτητο οι τεχνικές ελέγχου να συγκλίνουν γρήγορα και να έχουν μικρό υπολογιστικό κόστος. Ο νεκρός χρόνος της μηχανής ντίζελ είναι μη γραμμική συνάρτηση των συνθηκών λειτουργίας καθώς και της ταχύτητας της μηχανής. Το γεγονός αυτό υποβαθμίζει σημαντικά τις επιδόσεις της κινητήριας μηχανής. Παρόλα αυτά, η χρήση συγκεκριμένων αναλογικών-ολοκληρωτικών(PI) ελεγκτών βελτιώνει σημαντικά την απόδοση των μηχανών αυτών[10].

3.3.1. Έλεγχος ταχύτητας της μηχανής εσωτερικής καύσης

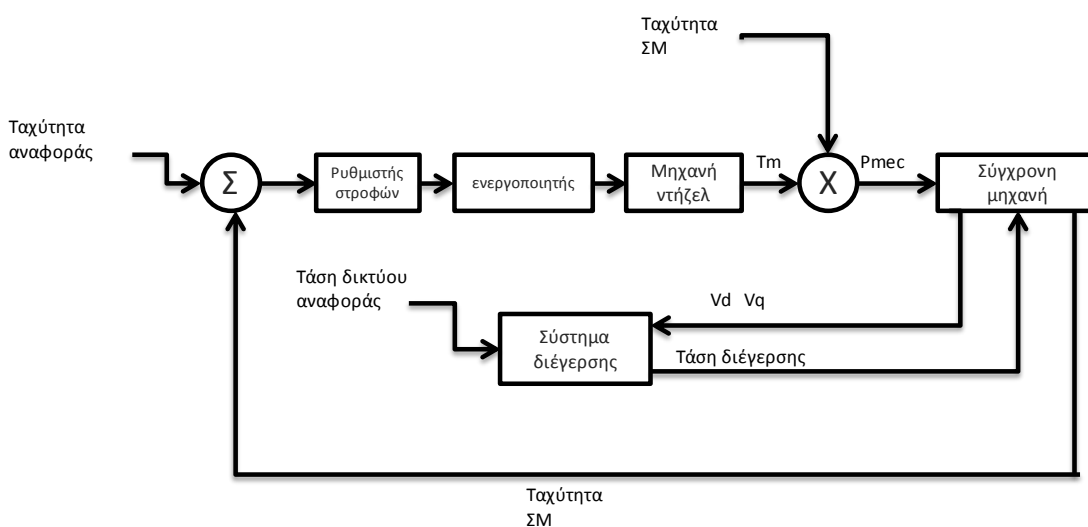
Ο έλεγχος της ταχύτητας των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που οδηγούνται από κινητήριες μηχανές ντίζελ είναι δύσκολος εξαιτίας της ύπαρξης του νεκρού χρόνου αλλά και των μεταβολών στις παραμέτρους, που συμβάλλουν στην αργή δυναμική του σταθμού. Οι αυτορυθμιζόμενοι ελεγκτές που βασίζονται σε έμμεσο υπολογισμό του νεκρού χρόνου οδηγούν σε γρήγορη απόκριση στην έναρξη και ταχεία ανάκαμψη όταν συμβεί κάποια μεταβολή. Με τη χρήση του έμμεσου υπολογισμού λαμβάνεται μια αναδρομική εκτίμηση των παραμέτρων και του νεκρού χρόνου.

Ένα τυπικό μοντέλο μηχανής ντίζελ περιγράφει το ρυθμό κατανάλωσης καυσίμου ως συνάρτηση της ταχύτητας και της μηχανικής ισχύος στην έξοδο της μηχανής. Συνήθως μοντελοποιείται από μια απλή συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης που σχετίζει τη κατανάλωση καυσίμου με την ηλεκτρομηχανική ισχύ[11]. Το καθήκον του ρυθμιστή στροφών (governor) είναι να ρυθμίζει τη ροή καυσίμου και στη συνέχεια την είσοδο στη γεννήτρια ώστε να προσφέρει την απαιτούμενη ισχύ για να καλύψει μεταβολές στο φορτίο. Η παρουσία ωστόσο του νεκρού χρόνου μεταξύ του

ενεργοποιητή έγχυσης καυσίμου και της παραγωγής μηχανικής ροπής καθώς και οι μεταβολές στις παραμέτρους του συστήματος είναι σημαντικά χαρακτηριστικά της μηχανής ντήζελ, τα οποία συντελούν στην υποβάθμιση της λειτουργίας της.

Μια μηχανή ντήζελ είναι λοιπόν ένα μη γραμμικό σύστημα σε συνδυασμό με ένα μη γραμμικό, χρονικά μεταβαλλόμενο νεκρό χρόνο μεταξύ της έγχυσης καυσίμου και της παραγωγής μηχανικής ροπής. Ελέγχεται συνήθως με ένα PI ελεγκτή για την αποφυγή σφάλματος σταθερής κατάστασης στη ταχύτητα.

3.3.2. Μοντέλο μηχανής εσωτερικής καύσης και ρυθμιστή στροφών



Σχήμα 3.6 Μπλοκ διάγραμμα συστήματος γεννήτριας ντήζελ

Το μπλοκ διάγραμμα του ολοκληρωμένου συστήματος γεννήτριας ντήζελ που περιλαμβάνει την μηχανή εσωτερικής καύσης, τον ρυθμιστή στροφών, τον ενεργοποιητή και τη σύγχρονη μηχανή με το σύστημα διέγερσης φαίνεται στο σχήμα 3.6. Η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής ταχύτητας και της σύγχρονης ταχύτητας ή της ταχύτητας της μηχανής παράγει το σήμα έλεγχου το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε μεταβολή της ροπής της κύριας μηχανής. Η μηχανή ντήζελ στη συνέχεια παράγει τη ροπή που οδηγεί τη σύγχρονη μηχανή και δημιουργεί την ηλεκτρική ισχύ εξόδου. Η μηχανική ισχύς που προσφέρει η μηχανή ντήζελ μέσω της ροπής δίνεται από τη παρακάτω εξίσωση

$$P_m = \omega \times T_e \tag{3.11}$$

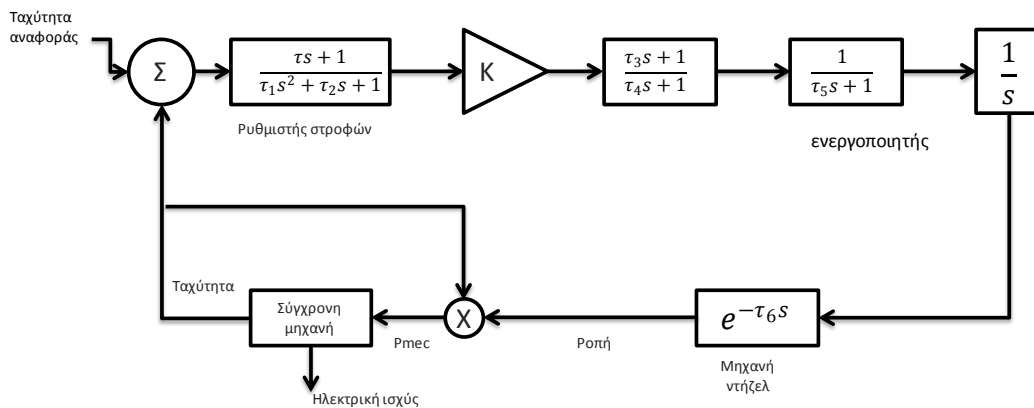
Όπου

P_m η μηχανική ισχύς (ανά μονάδα)

ω_r Η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής (ανά μονάδα)

T_e Η ροπή της μηχανής (ανά μονάδα)

Έπειτα, η μετρούμενη ταχύτητα της σύγχρονης μηχανής παρέχεται για σύγκριση με τη τιμή αναφοράς για τον έλεγχο του ρυθμιστή. Το μοντέλο με βάση το οποίο γίνεται η προσομοίωση της λειτουργίας της μηχανής ντήζελ δίνεται στο σχήμα 3.7 (παράρτημα σχήμα 6).



Σχήμα 3.7 Δυναμικό μοντέλο μηχανής ντήζελ

Οι αριθμητικές τιμές δίνονται παρακάτω.

Οι χρονικές σταθερές του ρυθμιστή στροφών :

$$\begin{aligned} T &= 0.0002 \\ T_1 &= 0.00002 \\ T_2 &= 0.001 \end{aligned}$$

Οι χρονικές σταθερές του ενεργοποιητή :

$$\begin{aligned} T_3 &= 0.25 \\ T_4 &= 0.009 \\ T_5 &= 0.0384 \end{aligned}$$

Η χρονική καθυστέρηση της μηχανής ντήζελ :

$$T_6 = 0.024$$

Το κέρδος :

$$K = 400$$

Η απόκλιση της ταχύτητας που προκύπτει από τη σύγκριση της σύγχρονης ταχύτητας με τη ταχύτητα αναφοράς παράγει το σήμα ελέγχου στο ρυθμιστή στροφών ο οποίος υλοποιείται ως μια συνάρτηση μεταφοράς δεύτερης τάξης. Το σήμα αυτό πολλαπλασιάζεται με ένα σταθερό κέρδος. Ο ενεργοποιητής υλοποιείται με δυο μπλοκ συναρτήσεων μεταφοράς, ενώ η μηχανή παρουσιάζεται ως μια απλή χρονική καθυστέρηση. Ανάμεσα στη καθυστέρηση της μηχανής και τον ενεργοποιητή υπάρχει ένας περιοριστής ροπής, καθώς η μηχανή δεν μπορεί να παράγει ροπή πέρα από μια μέγιστη τιμή. Επομένως η μηχανική ισχύς εξόδου κινείται μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής.

3.4. Γεννήτριες εσωτερικής καύσης

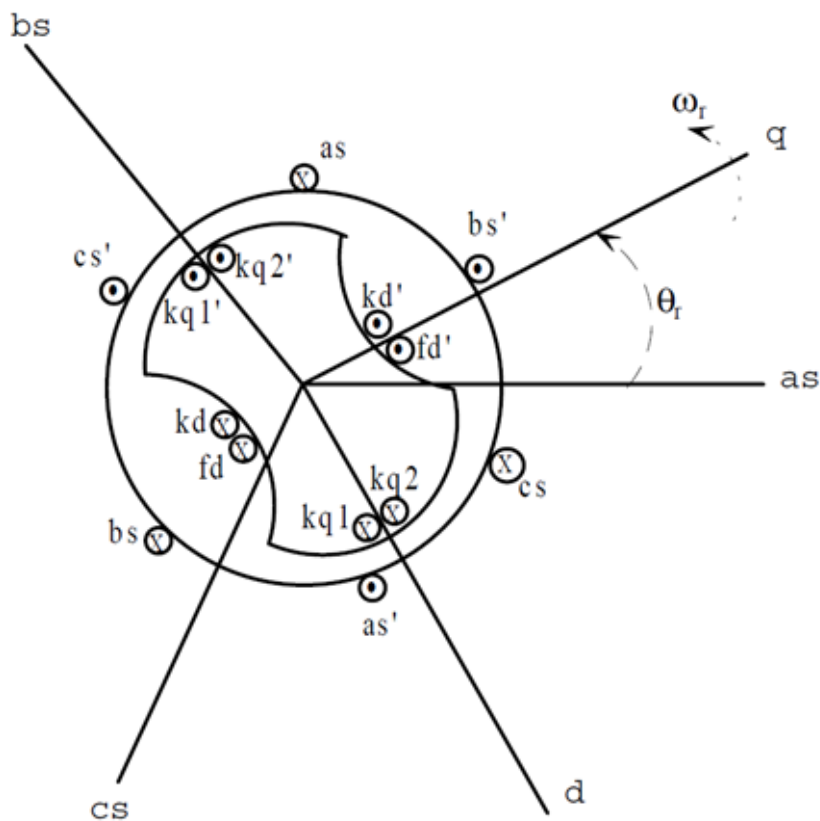
Οι γεννήτριες ντήζελ γνωστές και ως Gensets αποτελούν αξιόπιστη πηγή ισχύος όταν συντηρούνται επαρκώς. Το αρχικό κόστος ενός συνολικού συστήματος γεννητριών ντήζελ είναι επίσης σχετικά χαμηλό. Οι γεννήτριες αυτού του τύπου μπορούν να μεταφέρονται εύκολα και το γεγονός ότι είναι συσκευές χαμηλής τεχνολογίας (low-tech) συμβάλει στην αξιοπιστία τους και εξασφαλίζει την ευκολία χρήσης. Παρόλα αυτά βασικό τους μειονέκτημα είναι το λειτουργικό κόστος και η επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

Συνήθως οι γεννήτριες ντήζελ είναι εφοδιασμένες με σύγχρονες γεννήτριες και λειτουργούν ελεγχόμενα σε σταθερή ταχύτητα ώστε να εξασφαλίζουν σταθερή ηλεκτρική συχνότητα. Εξαιτίας της χαμηλής απόδοσης σε χαμηλό φορτίο, οι περισσότεροι κατασκευαστές προτείνουν οι γεννήτριες να μην λειτουργούν σε κατάσταση φόρτισης χαμηλότερη από 40%, ώστε να επεκταθεί η διάρκεια ζωής τους. Ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα ισχύος αυξάνεται για χαμηλότερα φορτία ενώ η κατανάλωση καυσίμου σε κενό φορτίο παραμένει στη τιμή 15-30% του πλήρους φορτίου. Σε χαμηλά φορτία η ταχύτητα της γεννήτριας μειώνεται εξασφαλίζοντας πως η μηχανή θα λειτουργεί αποδοτικά όσον αφορά την οικονομία καυσίμου.

3.4.1. Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας με τυλιγμένο δρομέα

Το μοντέλο της τριφασικής σύγχρονης μηχανής έκτυπων πόλων, μπορεί να προβλέψει την ηλεκτρική και ηλεκτρομηχανική συμπεριφορά των περισσότερων σύγχρονων μηχανών[12]. Γενικά, ο δρομέας της σύγχρονης μηχανής έχει ένα τύλιγμα πεδίου και ένα ή περισσότερα τυλίγματα απόσβεσης. Επιπροσθέτως, όλα τα τυλίγματα του δρομέα έχουν διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Στο εξεταζόμενο μοντέλο, υπάρχει ένα τύλιγμα πεδίου, ένα τύλιγμα απόσβεσης στον ευθύ άξονα (d) και δύο τυλίγματα απόσβεσης στον εγκάρσιο άξονα (q). Στο μοντέλο επίσης, όλες οι παράμετροι του δρομέα είναι ανηγμένες στην πλευρά του στάτη.

Στο σχήμα 3.8 φαίνεται μια τριφασική, διπολική σύγχρονη μηχανή έκτυπων πόλων σε συνδεσμολογία αστέρα. Καθώς ο δρομέας της σύγχρονης μηχανής έκτυπων πόλων είναι μαγνητικά ασύμμετρος, δεν υπάρχει κανένα όφελος στην εφαρμογή αλλαγής μεταβλητών για τις μεταβλητές του δρομέα όπως στις μηχανές επαγωγής. Παρόλα αυτά, υπάρχει ένα κέρδος στη χρήση αλλαγής μεταβλητών για τις μεταβλητές του στάτη. Στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να εφαρμοστεί το πλαίσιο αναφοράς δυο αξόνων (d-q) του δρομέα στις μεταβλητές του στάτη (παράγραφος 3.1.1.), θεωρώντας πως τα τυλίγματα του στάτη είναι ιδανικά ημιτονοειδώς κατανομημένα τυλίγματα.



Σχήμα 3.8 Διπολική, τριφασική, σύγχρονη μηχανή έκτυπων πόλων

Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια παρουσιάζονται εδώ:

- r_s Η αντίσταση του στάτη
- N_s Οι ισοδύναμες στροφές
- fd Τα πεδιακά τυλίγματα
- $k_d k_q$ Τα τυλίγματα απόσβεσης
- abc Φάση A, φάση B, φάση C
- $qd0$ Άξονες Q, D, 0
- f Ρεύματα, τάσεις και ροές σύζευξης
- s Πλαίσιο αναφοράς στάτη
- $p = \frac{d}{dt}$

Συνήθως, οι εξισώσεις τάσης δίνονται όταν αντιστάσεις και επαγωγές περιλαμβάνονται στα κυκλώματα.

$$v_{abcs} = -r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (3.12)$$

$$v_{qdr} = r_s i_{qdr} + p \lambda_{qdr}$$

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}]$$

$$(f_{qdr})^T = [f_{kq1} \ f_{kq2} \ f_{fd} \ f_{kd}]$$

Όπου

$$r_s = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \quad r_r = \begin{bmatrix} r_{kq1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{kq2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{fd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{kd} \end{bmatrix}$$

Και η σχέση μεταξύ των ρευμάτων και της ροής σύζευξης δίνεται σε μορφή πίνακα ως εξής

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{abcs} \\ i_{qdr} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Για τη διευκόλυνση της μελέτης εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Park με ένα κινούμενο με τη ταχύτητα του δρομέα πλαίσιο αναφοράς. Αν ο μετασχηματισμός Park εφαρμοστεί σε όλες τις εξισώσεις τάσης και ροής, οι χρονικά εξαρτημένες εξισώσεις γίνονται ανεξάρτητες. Έτσι, η επαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων απόσβεσης ή του στάτη και των τυλιγμάτων απόσβεσης είναι ένας σταθερός πίνακας με το μετασχηματισμό στο κινούμενο πλαίσιο αναφοράς. Ο πίνακας του μετασχηματισμού Park δίνεται στη συνέχεια

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Όπου

$$\theta = \int_0^t \omega_r(\xi) d\xi + \theta(0)$$

Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό του Park

$$v_{qd0r} = K_s v_{abcs}$$

Άλλες παράμετροι όπως η επαγωγή, η ροή σύζευξης, η αντίσταση και τα ρεύματα μπορούν επίσης να μετασχηματιστούν. Η εξίσωση του στάτη 3.12 και η εξίσωση 3.13 γίνονται

$$v^r_{qd0s} = -r_s i^r_{qd0s} + \omega_r \lambda^r_{dqs} + p \lambda^r_{qd0s} \quad (3.15)$$

$$v^r_{qdr} = r_r i^r_{qdr} + p \lambda^r_{qdr}$$

Όπου

$$(\lambda^r_{dqs})^T = [\lambda^r_{ds} \quad -\lambda^r_{qs} \quad 0]$$

Ενώ οι εξισώσεις της ροής σύζευξης και των ρευμάτων γίνονται

$$\begin{bmatrix} \lambda^r_{qd0s} \\ \lambda^r_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K^r_s L_s (K^r_s)^T & K^r_s L_{sr} \\ \frac{2}{3} L_{sr} (K^r_s)^{-1} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i^r_{qd0s} \\ i^r_{qdr} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Όπου

$$K^r_s L_s (K^r_s)^T = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_{md} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix}$$

$$K^r_s L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{2}{3}L_{sr}(K^r_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \end{bmatrix}$$

Όπου

$$L_{mq} = \frac{3}{2}(L_A - L_B)$$

$$L_{md} = \frac{3}{2}(L_A + L_B)$$

Είναι βολικό οι εξισώσεις τάσης και ροής σύζευξης να εκφράζονται με όρους αντίστασης αντί επαγωγής. Επομένως όλες οι εξισώσεις διαιρούνται με μια βασική συχνότητα ω_b . Παρακάτω ακολουθούν οι αναλυτικές εξισώσεις στο πλαίσιο αναφοράς. Στις εξισώσεις ροής, το αρνητικό πρόσημο στα ρεύματα του στάτη εμφανίζεται καθώς η κατεύθυνση των ρευμάτων έχει οριστεί για λειτουργία γεννήτριας.

$$v^r_{qs} = -r_s i^r_{qs} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi^r_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \psi^r_{qs}$$

$$v^r_{ds} = -r_s i^r_{ds} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi^r_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \psi^r_{ds}$$

$$v_{0s} = -r_s i^r_{0s} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{0s} \quad (3.17)$$

$$v_{kq1} = r_{kq1} i_{kq1} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kq1}$$

$$v_{kq2} = r_{kq2} i_{kq2} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kq2}$$

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{fd}$$

$$v_{kd} = r_{kd} i_{kd} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kd}$$

Οι ροές σύζευξης ανά δευτερόλεπτο είναι :

$$\psi_{qs}^r = -X_{ls}i_{qs}^r + X_{mq}(-i_{qs}^r + i_{kq1} + i_{kq2})$$

$$\psi_{ds}^r = -X_{ls}i_{ds}^r + X_{md}(-i_{ds}^r + i_{fd} + i_{kd})$$

$$\psi_{0s} = -X_{ls}i_{0s} \tag{3.18}$$

$$\psi_{kq1} = X_{lkq1}i_{kq1} + X_{mq}(-i_{qs}^r + i_{kq1} + i_{kq2})$$

$$\psi_{kq2} = X_{lkq2}i_{kq2} + X_{mq}(-i_{qs}^r + i_{kq1} + i_{kq2})$$

$$\psi_{fd} = X_{lfd}i_{fd} + X_{md}(-i_{ds}^r + i_{fd} + i_{kd})$$

$$\psi_{kd} = X_{lkd}i_{kd} + X_{md}(-i_{ds}^r + i_{fd} + i_{kd})$$

Από τις εξισώσεις 3.17 και 3.18, μπορούν να βρεθούν τα ρεύματα στάτη και οι ροές σύζευξης. Οι εξισώσεις 3.17 θα πρέπει να επαναδιατυπωθούν σε ολοκληρωτική μορφή για τον υπολογισμό των ρευμάτων και των ροών σύζευξης. Η παραδοχή ότι τα τυλίγματα απόσβεσης είναι βραχυκυκλωμένα γίνεται ώστε οι τάσεις σε αυτά να είναι μηδενικές. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση δίνονται στη συνέχεια :

$$\psi_{qs}^r = \omega_b \int \left(v_{qs} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds}^r + \frac{r_s}{X_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs}^r) \right) dt$$

$$\psi_{ds}^r = \omega_b \int \left(v_{ds} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs}^r + \frac{r_s}{X_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds}^r) \right) dt \tag{3.19}$$

$$\psi_{0s} = \omega_b \int \left(v_{0s} - \frac{r_r}{X_{ls}} \psi_{0s} \right) dt$$

Από τις εξισώσεις 3.19, μπορούν να βρεθούν οι ροές σύζευξης στο στάτη. Επιπροσθέτως, οι ροές σύζευξης στο στάτη και οι τάσεις μπορούν να συσχετιστούν με την εξίσωση 3.20. Τα ρεύματα επίσης υπολογίζονται από τις ροές σύζευξης χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.21.

$$\psi_{kq1} = \omega_b \int \left(v_{kq1} + \frac{r_{kq1}}{X_{lkq1}} (\psi_{mq} - \psi_{kq1}) \right) dt$$

$$\psi_{kq2} = \omega_b \int \left(v_{kq2} + \frac{r_{kq2}}{X_{lkq2}} (\psi_{mq} - \psi_{kq2}) \right) dt \quad (3.20)$$

$$\psi_{fd} = \omega_b \int \left(\frac{r_{fd}}{X_{md}} E_{x_{fd}} + \frac{r_{fd}}{X_{lfd}} (\psi_{md} - \psi_{fd}) \right) dt$$

$$\psi_{kd} = \omega_b \int \left(v_{kd} + \frac{r_{kd}}{X_{lkd}} (\psi_{md} - \psi_{kd}) \right) dt$$

$$i^r_{qs} = -\frac{1}{X_{ls}} (\psi^r_{qs} - \psi_{mq})$$

$$i^r_{ds} = -\frac{1}{X_{ls}} (\psi^r_{ds} - \psi_{md})$$

$$i_{0s} = -\frac{1}{X_{ls}} \psi_{0s} \quad (3.21)$$

$$i_{kq1} = -\frac{1}{X_{lkq1}} (\psi_{kq1} - \psi_{mq})$$

$$i_{kq2} = -\frac{1}{X_{lkq2}} (\psi_{kq2} - \psi_{mq})$$

$$i_{fd} = -\frac{1}{X_{lfd}} (\psi_{fd} - \psi_{md})$$

$$i_{kd} = -\frac{1}{X_{lkd}} (\psi_{kd} - \psi_{md})$$

Όπου

$$\psi_{mq} = X_{aq} \left(\frac{\psi_{qs}^r}{X_{ls}} + \frac{\psi_{kq1}}{X_{lkq1}} + \frac{\psi_{kq2}}{X_{lkq2}} \right) \quad (3.22)$$

$$\psi_{md} = X_{ad} \left(\frac{\psi_{ds}^r}{X_{ls}} + \frac{\psi_{fd}}{X_{lfd}} + \frac{\psi_{kd}}{X_{lkd}} \right)$$

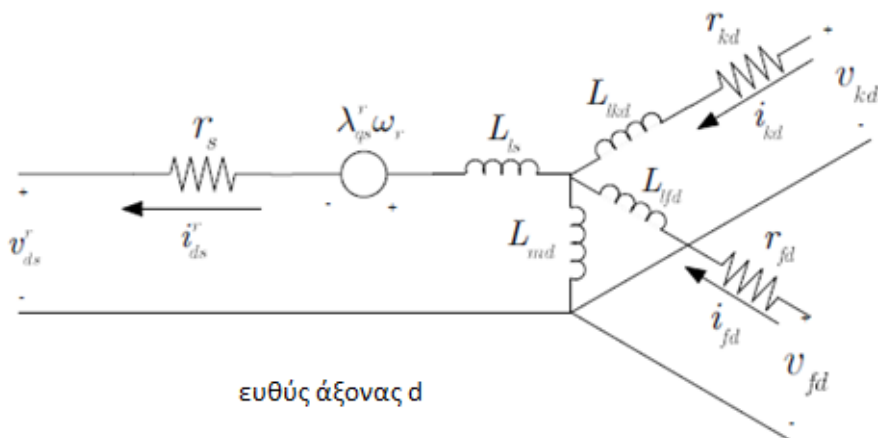
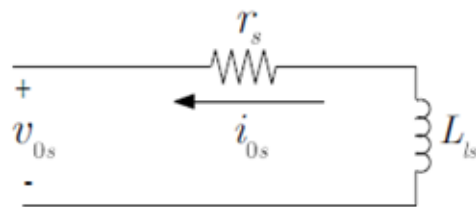
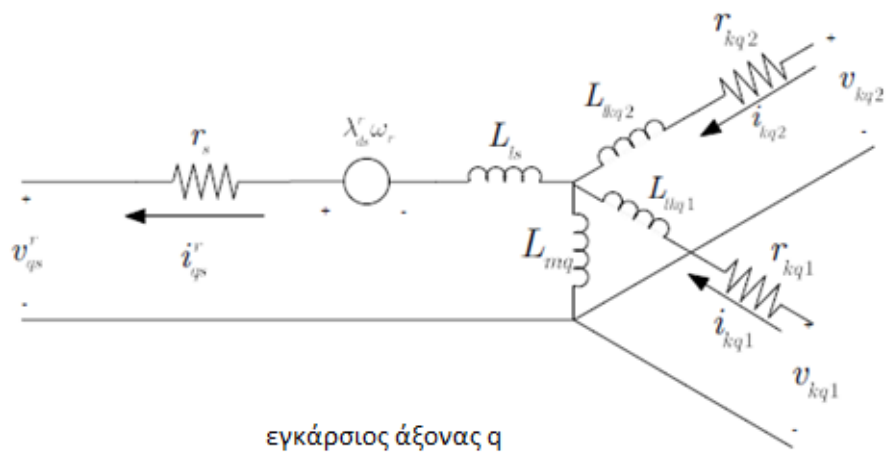
Στη εξίσωση 3.22, η άεργος σταθερά δίνεται από

$$X_{aq} = \left(\frac{1}{X_{mq}} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lkq1}} + \frac{1}{X_{lkq2}} \right)^{-1}$$

$$X_{ad} = \left(\frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lfd}} + \frac{1}{X_{lkd}} \right)^{-1}$$

Τέλος, η ταχύτητα της σύγχρονης μηχανής μπορεί να βρεθεί με τη χρήση της παρακάτω εξίσωσης

$$\omega_r = -\frac{\omega_b}{2H} \int (T_e - T_l) dt \quad (3.23)$$



Σχήμα 3.9 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής

Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου της σύγχρονης μηχανής (παράρτημα σχήμα 3-5) που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις δίνονται στον πίνακα 3.3.

Ονομαστική ισχύς	$P_n(\text{VA})$	2.1e6
Φασική τάση	$V_n(\text{V}_{\text{rms}})$	440
Ονομαστική συχνότητα	$f_n(\text{Hz})$	60
Αντίδραση	$x_d(\text{pu})$	1.227
Αντίδραση	$x_d'(\text{pu})$	0.157
Αντίδραση	$x_d''(\text{pu})$	0.135
Αντίδραση	$x_q(\text{pu})$	0.443
Αντίδραση	$x_q'(\text{pu})$	0.213
Αντίδραση	$x_q''(\text{pu})$	0.14
Χρονική σταθερά	$T_{do}'(\text{s})$	0.407
Χρονική σταθερά	$T_{do}''(\text{s})$	0.036
Χρονική σταθερά	$T_q''(\text{s})$	0.0213
Αντίσταση	$R_s(\text{pu})$	0.102
Αδρανειακή σταθερά	$H(\text{s})$	0.062
Παράγων τριβής	$F(\text{pu})$	0.01
Ζεύγη πόλων	p	5

Πίνακας 3.3 Παράμετροι μοντέλου σύγχρονης γεννήτριας

3.4.2. Μοντέλο του συστήματος διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας

Τα συστήματα διέγερσης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες (IEEE Std.421.5-1992).

1. Τα συστήματα διέγερσης τύπου συνεχούς ρεύματος
Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με ένα μετατροπέα, ως τη πηγή της διέγερσης.
2. Τα συστήματα διέγερσης τύπου εναλλασσόμενου ρεύματος
Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν ένα εναλλάκτη και είτε στατούς είτε περιστρεφόμενους μετατροπείς ώστε να παράγουν το συνεχές ρεύμα το οποίο απαιτείται για το σύγχρονο πεδίο της μηχανής.
3. Τα συστήματα διέγερσης τύπου ST
Στα συστήματα αυτά η ισχύς διέγερσης προέρχεται από μετασχηματιστές ή από βοηθητικά τυλίγματα γεννήτριας και ανορθωτές.

Τα μοντέλα των συστημάτων διέγερσης μπορούν να περιλαμβάνουν ένα τερματικό μετατροπέα τάσης και ένα τοπικό αντισταθμιστή, στοιχεία ελέγχου της διέγερσης και ένα σταθεροποιητή του συστήματος ισχύος.

Στη συνέχεια εξετάζεται ένα απλό σύστημα διέγερσης. Το κύκλωμα ενός απλού συστήματος διέγερσης συνεχούς ρεύματος παρουσιάζεται στο σχήμα 3.11. Μια απλή εξίσωση που προκύπτει είναι η ακόλουθη

$$i = i_0 + f(v_s) = \frac{1}{k} v_s + f(v_s) \quad (3.24)$$

Και η εξίσωση της τάσης

$$v_R = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.25)$$

Όπου λ η συνολική ροή σύζευξης

Από τον συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων, η εξίσωση της τάσης προκύπτει

$$v_R = \frac{R}{k} v_s + Rf(v_s) + \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.26)$$

Όπου

$f(v_s)$ η μη γραμμική συνάρτηση της τάσης

k Η κλίση της γραμμής του κενού αέρος

Καθώς η v_s είναι ανάλογη της ταχύτητας επί της ροής του κενού αέρος, η v_s μπορεί να εκφραστεί με μια σταθερά επί τη ροή σύζευξης, επομένως $v_s = \beta\lambda$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εξίσωση που προκύπτει είναι

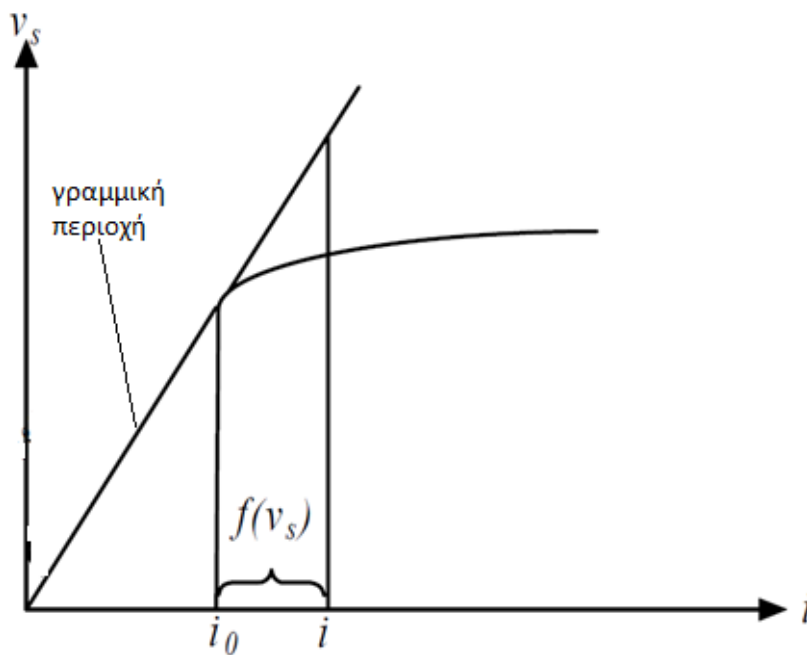
$$v_R = \frac{R}{k} v_s + Rf(v_s) + \frac{1}{\beta} \frac{dv_s}{dt} \quad (3.27)$$

Όπου η νέα συνάρτηση κορεσμού $S(v_s)$ δίνεται από τη σχέση

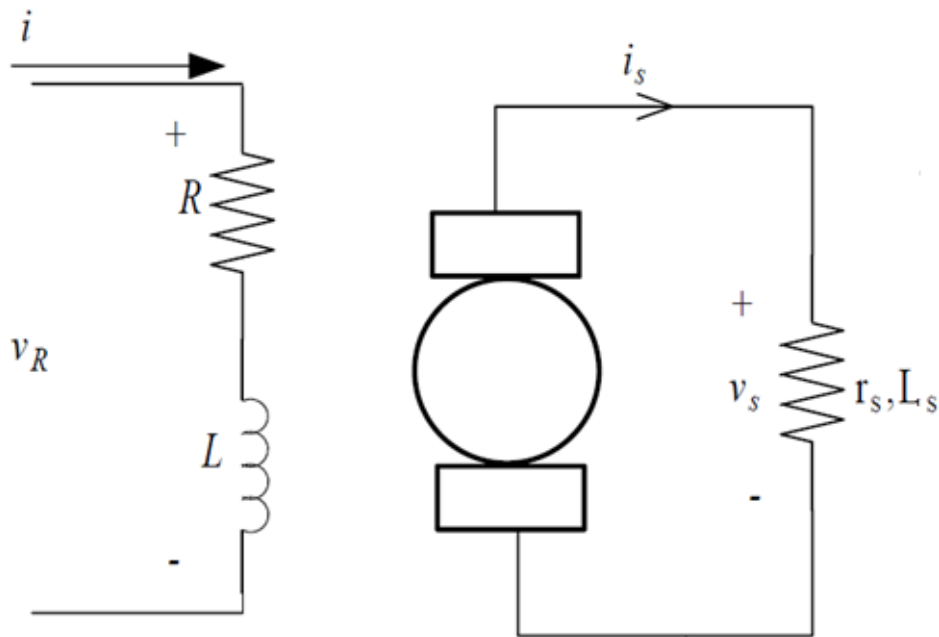
$$S(v_s) = \frac{kf(v_s)}{v_s} \quad (3.28)$$

Η εξίσωση 3.27 γίνεται

$$\frac{k}{R} v_R = v_s + v_s S(v_s) + \frac{k}{\beta R} \frac{dv_s}{dt} \quad (3.29)$$



Σχήμα 3.10 Σχέση ρεύματος - τάσης



Σχήμα 3.11 Απλοποιημένο κύκλωμα διέγερσης

Η εξίσωση 3.29 παρουσιάζεται στο θεμελιώδες σύστημα μονάδων, η μετατροπή στο ανά μονάδα σύστημα γίνεται επιλέγοντας $E_{fd} \triangleq a v_s$, με το a σαν παράγοντα κλίμακας. Επίσης θα πρέπει να οριστούν

$T_E \triangleq \frac{1}{\beta}$ Χρονική σταθερά του διεγέρτη

$K_E \triangleq \frac{R}{k}$ Σταθερά κέρδους

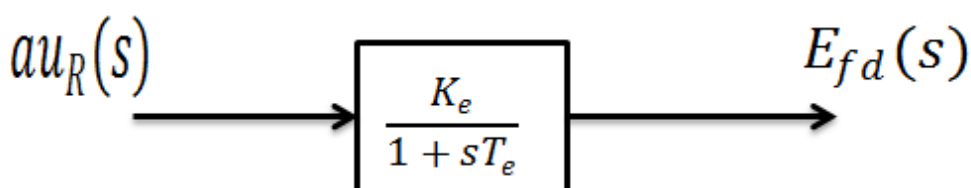
Τελικώς, η πρώτη τάξης διαφορική, μη γραμμική εξίσωση για το σύστημα διέγερσης προκύπτει

$$\frac{a}{K_E} v_R = E_{fd} + E_{fd} S(E_{fd}) + \frac{T_E}{K_E} \frac{d(E_{fd})}{dt} \quad (3.30)$$

Αν παραμεληθεί η συνάρτηση κορεσμού και πάρουμε το μετασχηματισμό Laplace, η εξίσωση αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί στο σχήμα 3.12 από μια πρώτη τάξης γραμμική συνάρτηση με τη χρονική σταθερά T_e και το κέρδος K_e να ορίζονται ως

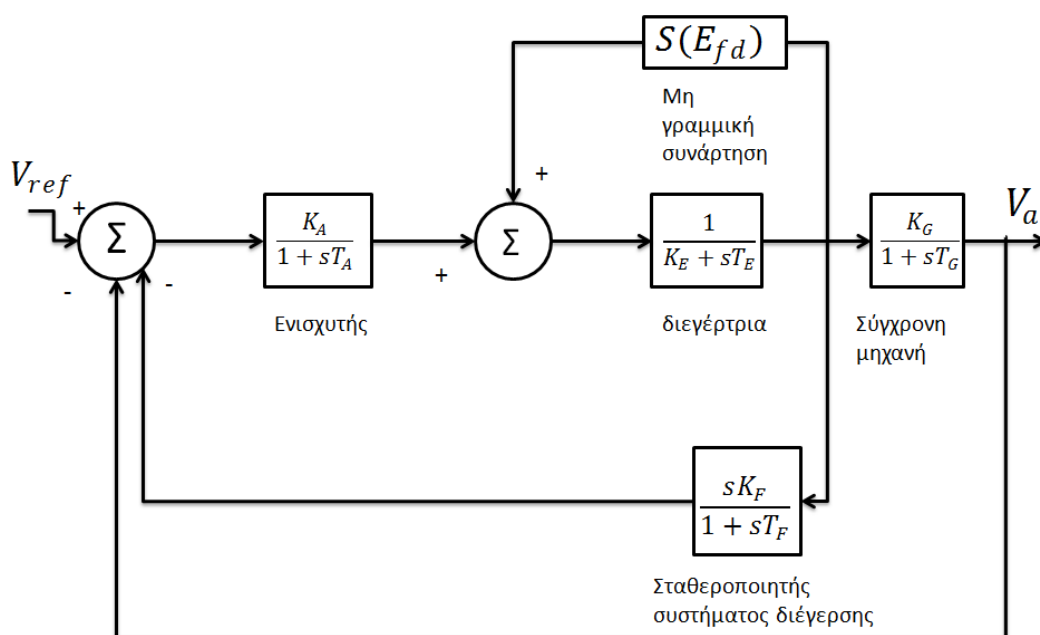
$$T_e \triangleq \frac{T_E}{K_E} \tag{3.31}$$

$$K_e \triangleq \frac{1}{K_E}$$



Σχήμα 3.12 Μπλοκ διάγραμμα διέγερσης

Επομένως, η διεγέρτρια μετατρέπεται σε μια πρώτης τάξης συνάρτηση μεταφοράς με έναν ενισχυτή. Γενικά, το κέρδος του ενισχυτή (K_A) μπορεί να επιλεγεί ώστε να περιορίζει το σφάλμα όσο είναι δυνατόν. Παρόλα αυτά, το K_A μπορεί να επιλεγεί ως μια μεγάλη τιμή, όσο το σύστημα είναι ευσταθές, καθώς η αύξηση του κέρδους του ενισχυτή μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια. Η αστάθεια του συστήματος μπορεί να αποφευχθεί με τη προσθήκη ενός μπλοκ σταθεροποίησης του συστήματος διέγερσης ως μια συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης. Το συνολικό διάγραμμα ενός συστήματος διέγερσης με ένα απλό μοντέλο σύγχρονης μηχανής φαίνεται στο σχήμα 3.13.

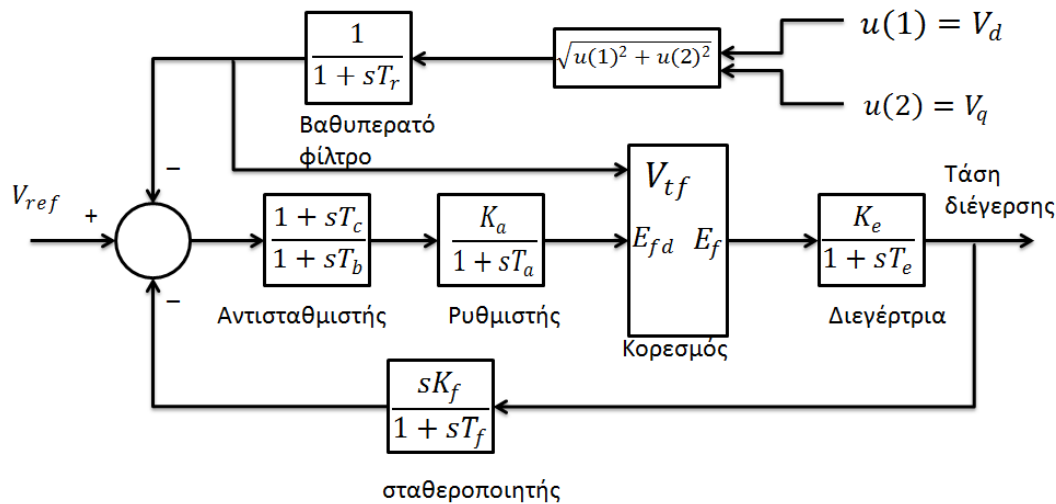


Σχήμα 3.13 Συγκεντρωτικό μπλοκ διάγραμμα συστήματος διέγερσης

Οι χρονικές σταθερές και τα κέρδη μπορούν να οριστούν ως εξής :

- T_A Η χρονική σταθερά του ενισχυτή
- K_A Το κέρδος του ενισχυτή
- K_G Το κέρδος της σύγχρονης μηχανής
- T_G Η χρονική σταθερά της σύγχρονης μηχανής
- K_F Το κέρδος του μπλοκ σταθεροποίησης
- T_F Η χρονική σταθερά του μπλοκ σταθεροποίησης

Το μοντέλο του συστήματος διέγερσης που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική παρουσιάζεται στο σχήμα 3.14 (παράρτημα σχήμα 7). Όλες οι τιμές των κερδών και των χρονικών σταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις δίνονται παρακάτω.



Σχήμα 3.14 Μοντέλο συστήματος διέγερσης

- | | |
|---|---------------|
| Η χρονική σταθερά του βαθυπερατού φίλτρου | $T_r = 20e-3$ |
| Η χρονική σταθερά του αντισταθμιστή | $T_c = 0$ |
| Η χρονική σταθερά του αντισταθμιστή | $T_b = 0$ |
| Το κέρδος του ρυθμιστή | $K_a = 10$ |
| Η χρονική σταθερά του ρυθμιστή | $T_a = 0.001$ |
| Η χρονική σταθερά του διεγέρτη | $T_e = 0$ |
| Το κέρδος του διεγέρτη | $K_e = 1$ |
| Το κέρδος του σταθεροποιητή | $K_f = 0.001$ |
| Η χρονική σταθερά του σταθεροποιητή | $T_f = 0.1$ |

Το μπλοκ διάγραμμα προέρχεται από τη βιβλιοθήκη MATLAB POWER SYSTEM BLOCKSET. Τα νέα μπλοκ τα οποία προστέθηκαν και χρειάζονται επεξήγηση είναι το μπλοκ θετικής συχνότητας, το μπλοκ βαθυπερατού φίλτρου, το μπλοκ του αντισταθμιστή και το μπλοκ του

κορεσμού. Το μπλοκ θετικής συχνότητας και το βαθυπερατό φίλτρο παράγουν την εντολή από τις τάσεις από τους δυο άξονες (d και q) της μηχανής σύμφωνα με το μετασχηματισμό d- q. Το μπλοκ κορεσμού περιορίζει το σήμα σε μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή που εξαρτώνται από τις E_{fd} και V_{if} . Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές προσδιορίζονται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος διέγερσης.

3.5. Μοντελοποίηση των φορτίων του Σ.Η.Ε του πλοίου

Για τη μοντελοποίηση των φορτίων του πλοίου όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.3 χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του τριφασικού παράλληλου ωμικού-επαγωγικού-χωρητικού (RLC) φορτίου (παράρτημα σχήμα 22). Το μοντέλο του τριφασικού παράλληλου RLC φορτίου υλοποιεί ένα τριφασικό φορτίο σαν ένα παράλληλο συνδυασμό ωμικών, επαγωγικών και χωρητικών φορτίων. Στη δεδομένη συχνότητα, το φορτίο παρουσιάζει σταθερή αντίσταση. Η ενεργός και η άεργος ισχύς που απορροφούνται από το φορτίο είναι ανάλογες με το τετράγωνο της εφαρμοζόμενης τάσης. Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν ωμικά και επαγωγικά φορτία. Οι τιμές της ενεργού και της άεργου ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από τον ηλεκτρικό ισολογισμό του πλοίου (παράγραφος 2.5).

Επίσης, στο συγκεκριμένο μοντέλο, με στόχο τη μοντελοποίηση των ωμικών και επαγωγικών αντιστάσεων των γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του τριφασικού RLC κλάδου. Το μοντέλο αυτό υλοποιεί ένα συνδυασμό ωμικών και επαγωγικών στοιχείων σε σειρά. Οι τιμές της αντίστασης και της επαγωγής των γραμμών μεταφοράς του πλοίου δίνονται στον πίνακα 3.4 .

Γραμμή μεταφοράς	R (ohms)	L(H)
Αξονικών γεννητριών	0.5e-4	0.6e-7
Καταναλωτών 440		
Group 4	2.38e-3	3.55e-6
Group 8	3.5e-3	2.15e-6
Group 6	90.65e-3	4.2e-5
Group 10	3.8e-3	2.4e-6
Καταναλωτών μέσω Μ/Σ 1,2,		
Γραμμή πριν τον Μ/Σ		
	7.65e-4	1.33e-6

Γραμμή μετά τον Μ/Σ	4.825e-4	0.69e-6
Καταναλωτών μέσω Μ/Σ 4,5,6		
Γραμμή πριν τον Μ/Σ	7.65e-4	1.33e-6
Γραμμή μετά τον Μ/Σ	4.8e-3	5.8e-6
Καταναλωτών μέσω Μ/Σ 7,8		
Γραμμή πριν τον Μ/Σ	5.36e-4	9.33e-7
Γραμμή μετά τον Μ/Σ	6.3e-3	7.69e-6
Καταναλωτών μέσω Μ/Σ 9,10		
Γραμμή πριν τον Μ/Σ	3.668e-3	1.7e-6
Γραμμή μετά τον Μ/Σ	11.58e-3	1.4e-5
Καταναλωτών μέσω Μ/Σ έκτακτης ανάγκης		
Γραμμή πριν τον Μ/Σ	3.87e-3	2.42 e -6
Γραμμή μετά τον Μ/Σ	1.53e-3	2.29e-6
Γεννητριών ντήζελ	0.5e-4	0.6e-7
Κέντρα ελέγχου κινητήρων (MCCs)	0.48e-4	0.715e-7

Πίνακας 3.4 Παράμετροι γραμμών μεταφοράς

Όπως αναφέρεται στη παράγραφο 2.3, στο δίκτυο του πλοίου υπάρχουν και καταναλωτές χαμηλής τάσης (230 V), οι οποίοι ικανοποιούνται μέσω μετασχηματιστών 440/230 V. Επιπροσθέτως στο πλοίο υπάρχουν και μετασχηματιστές 440/440 V. Για τη μοντελοποίηση των μετασχηματιστών αυτών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του τριφασικού μετασχηματιστή δυο τυλιγμάτων που υπάρχει στη βιβλιοθήκη του Simulink (παράρτημα σχήμα 23). Το μοντέλο αυτό υλοποιεί ένα τριφασικό μετασχηματιστή χρησιμοποιώντας τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές. Τα δυο τυλίγματα του μετασχηματιστή έχουν επιλεγεί να είναι συνδεδεμένα σε συνδεσμολογία τριγώνου.

Παράμετροι	Μ/Σ 1,2,3	Μ/Σ 4	Μ/Σ 5	Μ/Σ 6	Μ/Σ 7,8	Μ/Σ 9,10	Μ/Σ έκτακτης ανάγκης
Ονομαστική ισχύς Pn (VA)	287.5e3	287.5e3	207e3	80.5e3	240e3	60e3	150e3
Συχνότητα f (Hz)	60	60	60	60	60	60	60
Τύλιγμα 1							
Τάση V1 Ph-Ph (Vrms)	440	440	440	440	440	440	440
Αντίσταση R1(ρu)	0.017	0.013	9.36 e-3	3.667 e-3	0.012	0.023	0.0133
Επαγωγή L1(ρu)	0.028	0.027	0.019	7.5 e-3	0.024	0.039	0.027
Τύλιγμα 2							
Τάση V2 Ph-Ph (Vrms)	230	440	440	440	440	230	230
Αντίσταση R2 (ρu)	0.064	0.013	9.36 e-3	3.667 e-3	0.012	0.085	0.0487
Επαγωγή L2 (ρu)	0.1	0.027	0.019	7.5 e-3	0.024	0.142	0.0983

Αντίσταση μαγνήτισης Rm (pu)	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400
Επαγωγή μαγνήτισης Lm (pu)	34017	34017	34017	34017	34017	34017	34017

Πίνακας 3.5 Παράμετροι μετασχηματιστών

Τέλος, για την ένταξη στο δίκτυο των πλευρικών προωστήριων μηχανισμών, οι οποίοι τίθενται σε λειτουργία στη περίπτωση ελιγμών, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του τριφασικού διακόπτη. Το μοντέλο αυτό δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της χρονικής στιγμής κατά την οποία θα ενταχθούν στο δίκτυο οι προωστήριοι μηχανισμοί, σύμφωνα με το εκάστοτε σενάριο λειτουργίας που ακολουθείται στη προσομοίωση.

Κεφάλαιο 4 : Σύστημα ελέγχου αξονικών γεννητριών

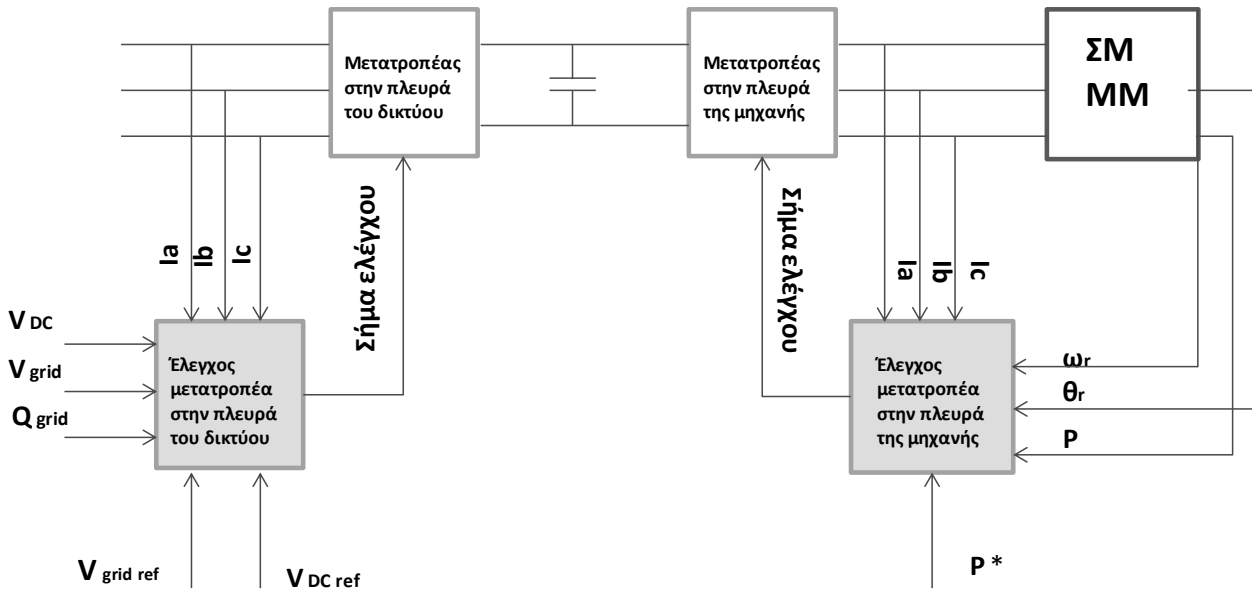
Ο έλεγχος των αξονικών γεννητριών μπορεί να διαιρεθεί σε δυο μέρη, τον μηχανικό και τον ηλεκτρικό έλεγχο. Ο μηχανικός έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω του συστήματος ελέγχου της κλίσης της προπέλας και τον έλεγχο μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων ώστε να διατηρείται σταθερή η ταχύτητα της αξονικής γεννήτριας. Ο ηλεκτρικός έλεγχος αφορά στον έλεγχο της τάσης, της συχνότητας, και της ενεργού ισχύος μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων, και εξαρτάται από το είδος της γεννήτριας.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία έχει επιλεγεί ως αξονική γεννήτρια, η **σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών** η οποία τοποθετείται απευθείας στον άξονα της κύριας μηχανής. Η επιλογή αυτή στηρίζεται στη βελτιωμένη απόδοση της μηχανής μόνιμων μαγνητών αλλά και στο μικρότερο όγκο σε σύγκριση με μια αντίστοιχη σύγχρονη μηχανή με τυλιγμένο δρομέα. Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου αποτελείται από δύο μέρη. Τον έλεγχο του μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής και τον έλεγχο του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.

Ο **μετατροπέας στην πλευρά της μηχανής** αποτελείται από έναν ανορθωτή IGBT/διόδων (ο οποίος χρησιμοποιείται ως αντιστροφέας κατά τη λειτουργία κινητήρα), με τον έλεγχο του οποίου επιτυγχάνεται ο καθορισμός της **ενεργού ισχύος** που παράγει η αξονική γεννήτρια (ή ο έλεγχος της **ταχύτητας της μηχανής** στη λειτουργία κινητήρα).

Ο **μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου** αποτελείται από έναν αντιστροφέα IGBT/διόδων (ο οποίος χρησιμοποιείται ως ανορθωτής κατά τη λειτουργία κινητήρα), με τον έλεγχο του οποίου επιτυγχάνεται αφενός η **διατήρηση της τάσης του συνδέσμου συνεχούς ρεύματος** στην ονομαστική της τιμή, ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή μεταφορά της **ενεργού ισχύος** από τη μηχανή στο δίκτυο και αφετέρου η **διατήρηση της τάσης του δικτύου**, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της **έγχυσης άεργου ισχύος**. Η δυνατότητα του συστήματος ελέγχου να εγχέει άεργο ισχύ στο δίκτυο μπορεί να συμβάλει επίσης στη βελτίωση του συντελεστή ισχύος των γεννητριών ντήζελ, με τις αξονικές γεννήτριες να λειτουργούν ως στρεφόμενος πυκνωτής.

Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου επιτρέπει στη κύρια μηχανή να στρέφεται με μεταβλητές στροφές χωρίς να επηρεάζεται η συχνότητα του δικτύου, δίνοντας τη δυνατότητα στις αξονικές γεννήτριες να λειτουργούν παράλληλα με τις γεννήτριες ντήζελ. Η ευελιξία όμως του νέου συστήματος ελέγχου δεν περιορίζεται στις λειτουργίες αυτές, καθώς η επιλογή των μετατροπέων επιτρέπει την **αντίστροφη ροή ισχύος** από το δίκτυο προς την αξονική μηχανή, ώστε να μπορεί η δεύτερη να χρησιμοποιηθεί ως **κινητήρας** σε περίπτωση βλάβης της κύριας μηχανής του πλοίου.

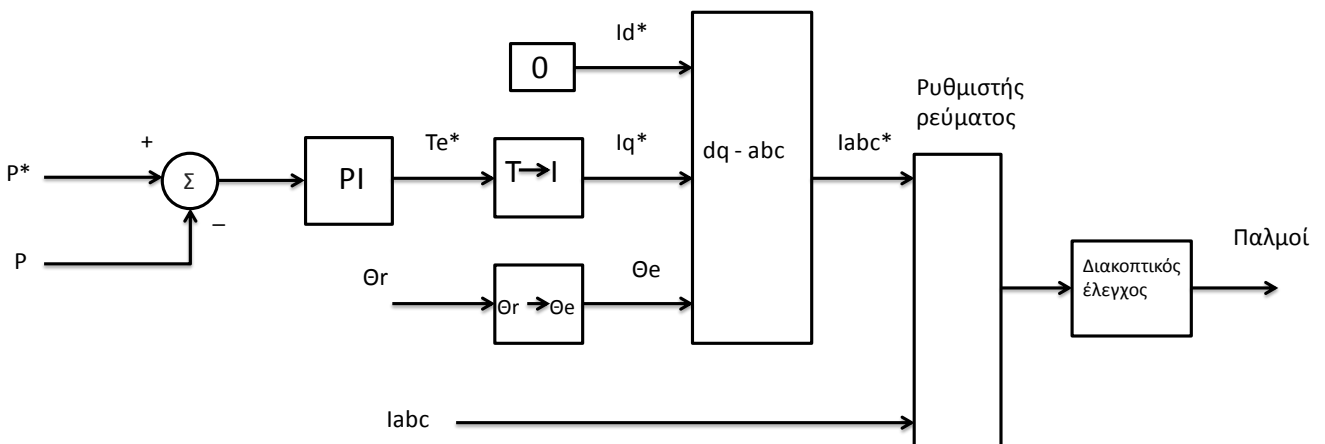


Σχήμα 4.1 Σύστημα ελέγχου αξονικών γεννητριών

4.1. Έλεγχος ανορθωτή στην πλευρά της αξονικής γεννήτριας

4.1.1. Στρατηγική ελέγχου του ανορθωτή στην πλευρά της αξονικής γεννήτριας

Ο έλεγχος του μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής στηρίζεται στη τεχνική του **προσανατολισμένου στο πεδίο ελέγχου (field oriented control)**. Η τεχνική αυτή αποτελεί μια από τις πιο συνήθειες τεχνικές για τον έλεγχο της ροπής μιας μηχανής με μόνιμο μαγνήτη, όπου ο προσανατολισμός γίνεται στη ροή του μόνιμου μαγνήτη[12].



Σχήμα 4.2 Ελεγκτής ανορθωτή στην πλευρά της μηχανής

Στην κατάσταση λειτουργίας κατά την οποία η αξονική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, ο έλεγχος αποσκοπεί στον καθορισμό της **ενεργού ισχύος** που αποδίδει η αξονική γεννήτρια στο σύστημα του πλοίου. Η μετρούμενη τιμή της ενεργού ισχύος (P) που παράγει η αξονική γεννήτρια συγκρίνεται λοιπόν με μια τιμή αναφοράς (P^*), με τη χρήση ενός αναλογικού- ολοκληρωτικού ελεγκτή (PI ελεγκτή). Το σήμα στην έξοδο του ελεγκτή αποτελεί το σήμα αναφοράς για την ηλεκτρομαγνητική ροπή της μηχανής (T_e^*). Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η στρατηγική ελέγχου γνωστή και ως **έλεγχος προσανατολισμένος στο πεδίο**. Η στρατηγική αυτή χρησιμοποιεί το μετασχηματισμό στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς ($d-q$) (παράγραφος 3.1.1.). Η **d συνιστώσα** του ρεύματος του στάτη (i_{sd}) διατηρείται στο **μηδέν** και **το ρεύμα του στάτη ευθυγραμμίζεται** με τον εγκάρσιο **άξονα q** (i_{sq}), προκειμένου να διατηρηθεί η γωνία ροπής ίση με 90 μοίρες. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της σύγχρονης μηχανής με μόνιμο μαγνήτη, σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στη παράγραφο 3.1.1., δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$T_e = -\frac{m_s n_p}{2} ((L_{sq} - L_{sd}) i_{sd} i_{sq} - \psi_{pm} i_{sq}) \quad (3.4)$$

Όπου m_s είναι ο αριθμός των φάσεων, n_p ο αριθμός των ζευγών πόλων και ψ_{pm} , είναι η μαγνητική ροή του μόνιμου μαγνήτη (σταθερή).

Επομένως, μέσω της ευθυγράμμισης του ρεύματος του στάτη στον q άξονα και με το μηδενισμό του ρεύματος στο d άξονα προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$T_e = \frac{m_s n_p}{2} \psi_{pm} i_{sq} \quad (4.1)$$

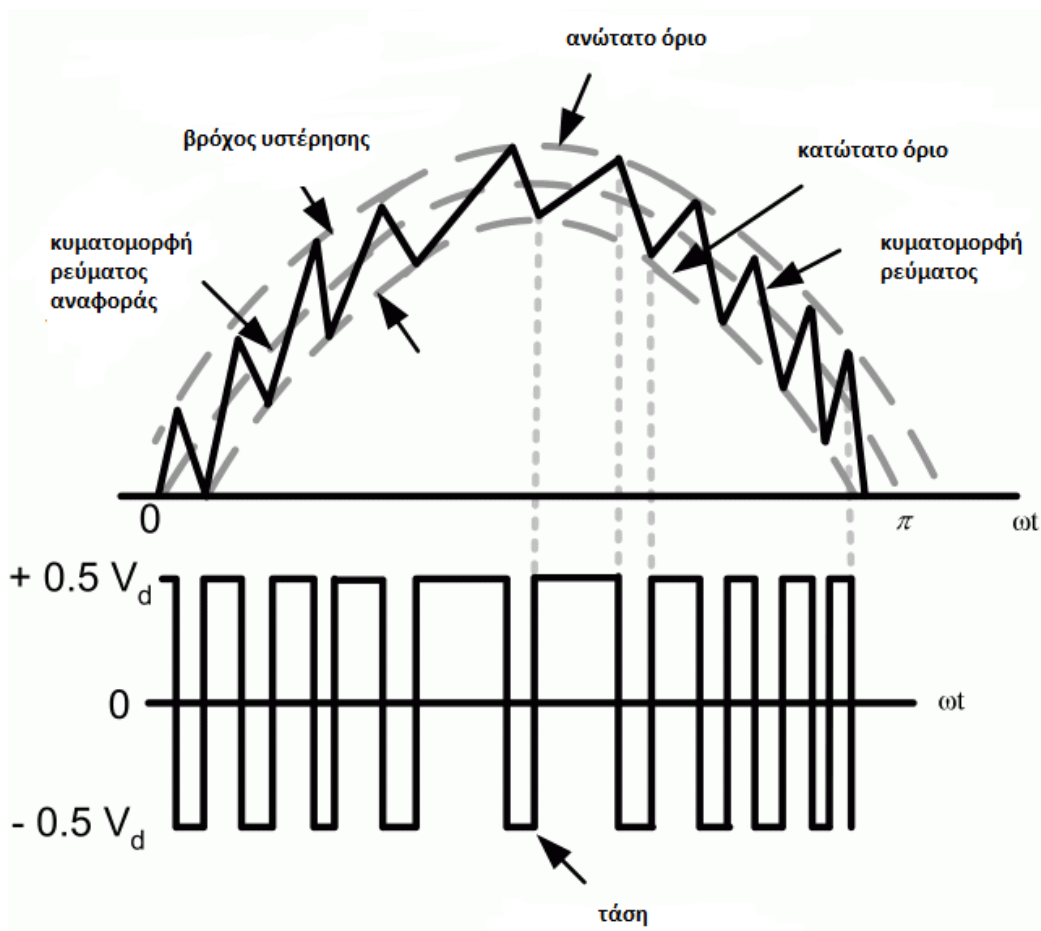
Η εφαρμογή ελέγχου μπορεί να επιτευχθεί εξαιρετικά εύκολα λόγω της γραμμικής σχέσης μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής ροπής (T_e) και του ρεύματος στο q άξονα (i_{sq}).

Η τιμή του ρεύματος i_{sq} που προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης 4.1, σε συνδυασμό με τη μηδενική τιμή του ρεύματος i_{sd} χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον έλεγχο του αντιστροφέα μέσω της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) με βρόχο ελέγχου ρεύματος.

4.1.2. Διαμόρφωση εύρους παλμών με βρόχο ελέγχου ρεύματος

Η τεχνική που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση του ελέγχου του ρεύματος της αξονικής μηχανής είναι γνωστή ως διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) με βρόχο ελέγχου ρεύματος. Η τεχνική αυτή δε χρησιμοποιεί φέρον σήμα για την υλοποίηση του ελέγχου (carrierless PWM) και βασίζεται στον έλεγχο του ρεύματος. Οι τιμές των ρευμάτων του ευθύ (d) και εγκάρσιου (q) άξονα που προέκυψαν από την εφαρμογή του προσανατολισμένου στο πεδίο ελέγχου, σύμφωνα με την παράγραφο 4.1.1.,

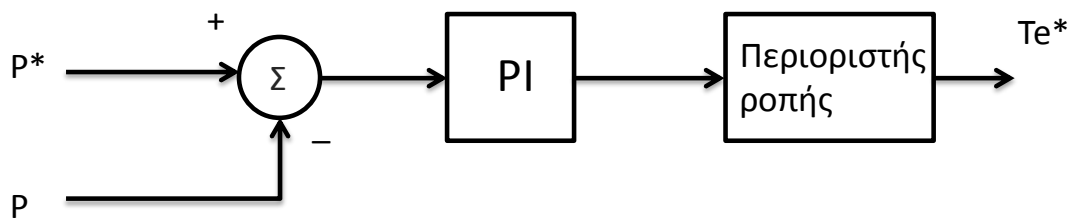
μετασχηματίζονται στο τριφασικό πλαίσιο (abc). Το ημιτονοειδές σήμα αναφοράς κάθε φάσης στη συνέχεια, συγκρίνεται στον ελεγκτή ρεύματος με βρόχο υστέρησης, με την κυματομορφή του πραγματικού ρεύματος της αντίστοιχης φάσης. Σε περίπτωση που το ρεύμα της φάσης υπερβαίνει το μέγιστο όριο του ρεύματος που ορίζει ο βρόχος υστέρησης, σβήνει (OFF) ο ηλεκτρονικός διακόπτης της επάνω ζώνης του ανορθωτή για την αντίστοιχη φάση και ανάβει (ON) ο διακόπτης της κάτω ζώνης. Συνεπώς, η τάση εξόδου μεταβάλλεται από $+V_d / 2$ σε $-V_d / 2$ και το ρεύμα αρχίζει να μειώνεται. Αντιστοίχως, όταν ρεύμα μειωθεί περισσότερο από την κατώτατη τιμή που ορίζει ο βρόχος υστέρησης ανάβει ο διακόπτης της πάνω ζώνης και σβήνει ο διακόπτης της κάτω ζώνης με αποτέλεσμα να αλλάξει η πολικότητα της τάσης εξόδου και το ρεύμα να αρχίζει να αυξάνεται. Καυαυτόν τον τρόπο το ρεύμα κάθε φάσης βρίσκεται πάντοτε μέσα στα όρια της ζώνης ελέγχου που καθορίζεται από τα δύο ημιτονοειδή σήματα τα οποία ορίζουν το ανώτατο και κατώτατο όριο της. Αυτά τα δύο όρια προσδιορίζουν το εύρος του βρόχου υστέρησης.



Σχήμα 4.3 Διαμόρφωση εύρους παλμών με βρόχο ελέγχου ρεύματος

4.1.3. Μοντέλο ελεγκτή του ανορθωτή στην πλευρά της αξονικής γεννήτριας

Η μοντελοποίηση του συστήματος ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής παρουσιάζεται σε δυο βήματα. Αρχικά αναλύεται το μοντέλο του ελεγκτή ισχύος ενώ στη συνέχεια ακολουθεί το μοντέλο μέσω του οποίου υλοποιείται ο προσανατολισμένος στο πεδίο έλεγχος. Το ολοκληρωμένο μοντέλο του ελεγκτή όπως αυτό υλοποιήθηκε στο MATLAB/SIMULINK παρουσιάζεται στο παράρτημα (σχήμα 9, 13-16).



Σχήμα 4.4 Ελεγκτής ισχύος

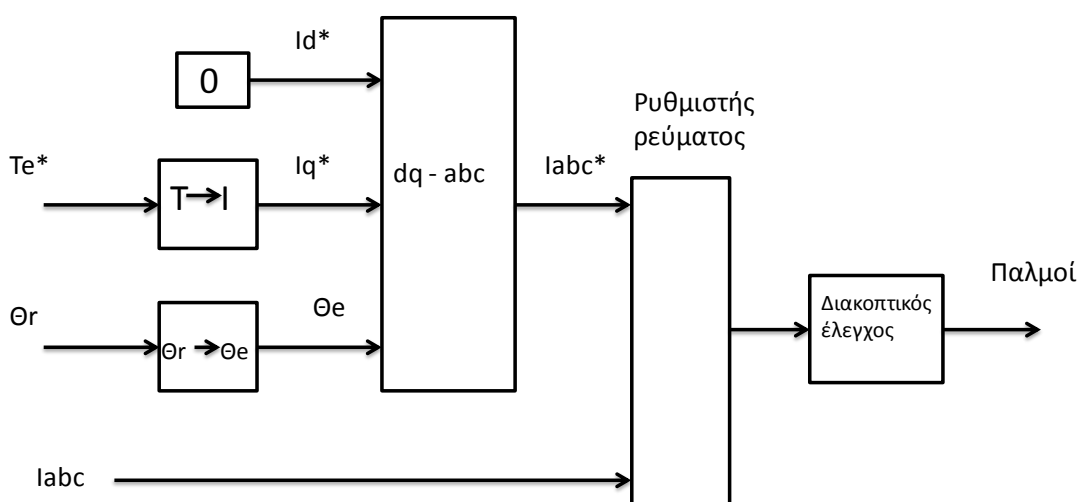
Ο ελεγκτής ισχύος υλοποιείται με έναν **PI ελεγκτή** σε συνεργασία με έναν **περιοριστή ροπής** σύμφωνα με το σχήμα 4.4. Η τιμή αναφοράς της ενεργού ισχύος (P^*), η οποία παρέχεται ως είσοδος, συγκρίνεται με τη μετρούμενη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου της γεννήτριας (P). Η διαφορά οδηγείται στον **PI ελεγκτή** με τον έλεγχο της ισχύος να επιτυγχάνεται μέσω της ρύθμισης των κερδών (αναλογικό και ολοκληρωτικό κέρδος) του ελεγκτή. Στο πρόγραμμα Matlab/Simulink ο **PI ελεγκτής** υλοποιείται μέσω ενός υποσυστήματος όπου με μορφή παραθύρου (Function Block) δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης των κερδών. Αρχικά αυξάνεται το ολοκληρωτικό κέρδος κρατώντας το αναλογικό σε μία σχετικά μικρή τιμή. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η ταχύτητα ανόδου και μεγαλώνει η υπερύψωση. Ως βέλτιστη τιμή για το ολοκληρωτικό κέρδος επιλέγεται η τιμή εκείνη για την οποία επιτυγχάνεται η προσέγγιση της τιμής αναφοράς με ικανοποιητικό χρόνο ανόδου, και διατηρείται σταθερή. Στη συνέχεια αυξάνεται το αναλογικό κέρδος έτσι ώστε να μειωθεί η υπερύψωση μέσα σε αποδεκτά όρια. Έπειτα, η έξοδος του ελεγκτή περνά από έναν περιοριστή ροπής. Ο περιοριστής ροπής επιβάλλει ανώτερο και κατώτερο όριο στη μεταβολή της ροπής της μηχανής με στόχο την αποφυγή προβλημάτων αστάθειας. Το τελικό σήμα που λαμβάνεται στην **έξοδο του ελεγκτή ισχύος** είναι η τιμή αναφοράς της ηλεκτρικής ροπής της μηχανής (T_e^*). Οι τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή ισχύος δίνονται στον πίνακα 4.1.

Αναλογικό κέρδος (Proportional gain)	0.1
Ολοκληρωτικό κέρδος (Integral gain)	500

Περιοριστής ροπής (Controller output torque saturation) (Nm) [κατώτατο όριο, ανώτατο όριο]	[-100000,100000]
Χρόνος δειγματοληψίας ελεγκτή (Controller sampling time) (s)	350e-6

Πίνακας 4.1 Παράμετροι ελεγκτή ισχύος

Ο **προσανατολισμένος στο πεδίο έλεγχος** πραγματοποιείται στο **μπλοκ VECTOR** το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5. Σε αυτό το μπλοκ εισέρχεται η τιμή αναφοράς της ηλεκτρικής ροπής (T_e^*) όπως προκύπτει από τον ελεγκτή ισχύος. Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός των τιμών αναφοράς των d και q συνιστωσών του ρεύματος σύμφωνα με τη θεωρία που παρουσιάστηκε εκτενώς στη παράγραφο 4.1. Οι τιμές αναφοράς I_d^* και I_q^* μετατρέπονται από το σύγχρονο (d-q) στο τριφασικό (abc) πλαίσιο αναφοράς μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού d-q και με τη χρήση της γωνίας του δρομέα (θ_r), η οποία λαμβάνεται ως έξοδος από το μοντέλο της σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών. Στη συνέχεια τα τριφασικά ρεύματα αναφοράς (I_{abc}^*) οδηγούνται στον ελεγκτή ρεύματος όπου και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα ρεύματα που λαμβάνονται από το στάτη της μηχανής (I_{abc}), ώστε να επιτευχθεί ο έλεγχος του αντιστροφέα μέσω της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμών με βρόχο ελέγχου ρεύματος (παράγραφος 4.1.2.). Οι ρυθμίσεις των παραμέτρων του μπλοκ VECTOR παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2.

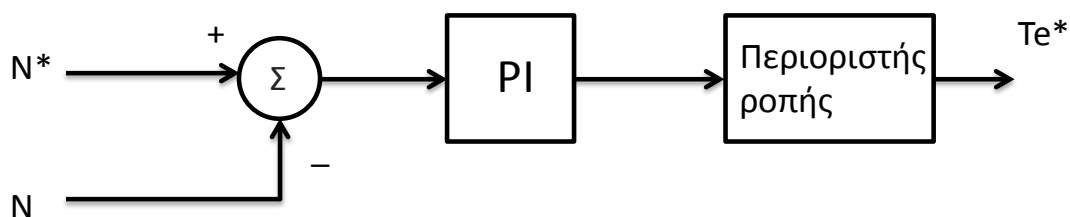


Σχήμα 4.5 Μπλοκ VECTOR - Διανυσματικός έλεγχος

Αριθμός ζευγών πόλων (Motor pairs of poles)	3
Πεπλεγμένη ροή μαγνητών (Flux induced by magnets) (Wb)	0.97462
Μέγιστη διακοπτική συχνότητα (Maximum switching frequency) (Hz)	20e5
Χρόνος δειγματοληψίας (Sampling time) (s)	50e-6
Εύρος βρόχου υστέρησης (Current hysteresis bandwidth) (A)	0.001

Πίνακας 4.2 Παράμετροι Διανυσματικού ελέγχου

Για τη περίπτωση **λειτουργίας** της μηχανής ως **κινητήρα** η μόνη αλλαγή εντοπίζεται στον ελεγκτή ισχύος. Ο ελεγκτής στην περίπτωση αυτή, αντί της ενεργού ισχύος, ρυθμίζει την **ταχύτητα του κινητήρα**, συγκρίνοντας την τιμή αναφοράς της (N^*) με την μετρούμενη ταχύτητα του δρομέα της μηχανής (N), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων του συστήματος δίνονται στον πίνακα 4.3.



Σχήμα 4.6 Ελεγκτής ταχύτητας

Αναλογικό κέρδος (Proportional gain)	1000
Ολοκληρωτικό κέρδος (Integral gain)	50000
Περιοριστής ροπής (Controller output torque saturation) (Nm) [κατώτατο όριο, ανώτατο όριο]	[-100000,100000]
Χρόνος δειγματοληψίας ελεγκτή (Controller sampling time) (s)	350e-6

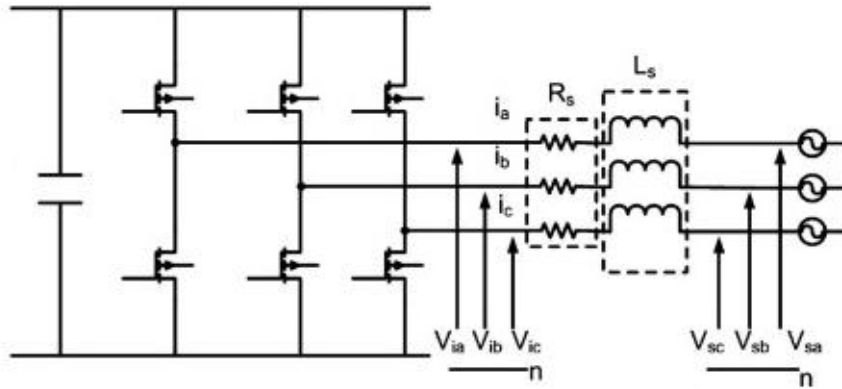
Πίνακας 4.3 Παράμετροι ελεγκτή ταχύτητας

4.2. Έλεγχος αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου

Ο αντιστροφέας στην πλευρά του δικτύου αποτελεί το συνδετικό κρίκο της γεννήτριας με το δίκτυο και ρυθμίζει την ανταλλαγή ενεργού και άεργου ισχύος. Στόχος του ελέγχου του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου είναι αφενός η διατήρηση της τάσης του συνδέσμου συνεχούς τάσης στην ονομαστική της τιμή, ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή μεταφορά της ενεργού ισχύος από τη γεννήτρια στο δίκτυο, και αφετέρου ο έλεγχος της τάσης του δικτύου μέσω της έγχυσης άεργου ισχύος. Ο έλεγχος του αντιστροφέα πραγματοποιείται με την εφαρμογή της τεχνικής γνωστής και ως έλεγχος συνιστωσών δυο αξόνων (d-q), με την οποία επιτυγχάνεται ο ανεξάρτητος έλεγχος της ενεργού και άεργου ισχύος.

4.2.1. Στρατηγική ελέγχου του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου

Το ισοδύναμο κύκλωμα που αναπαριστά το σημείο σύνδεσης του αντιστροφέα με το δίκτυο φαίνεται στο σχήμα 4.7 .



Σχήμα 4.7 Σημείο σύνδεσης αντιστροφέα με το δίκτυο του πλοίου

Οι φασικές τάσεις και τα ρεύματα δίνονται από την εξίσωση 4.3.

$$V_{sabc} = R_s i_{abc} + L_s \frac{di_{abc}}{dt} + v_{i abc} \quad (4.3)$$

Όπου V_{sabc} η τάση του δικτύου, i_{abc} το ρεύμα, $v_{i abc}$ η τάση στην έξοδο του αντιστροφέα και R_s και L_s η αντίσταση και η επαγωγή μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου.

Εκφράζοντας τη 4.3 σε ένα πλαίσιο αναφοράς (d-q) στρεφόμενο με τη συχνότητα του δικτύου προκύπτουν οι σχέσεις:

$$V_{inv_d} = v_d - R_s i_d + v'_d + \omega L_s i_q \quad (4.4)$$

$$V_{inv_q} = v_q - R_s i_q - v'_q - \omega L_s i_d$$

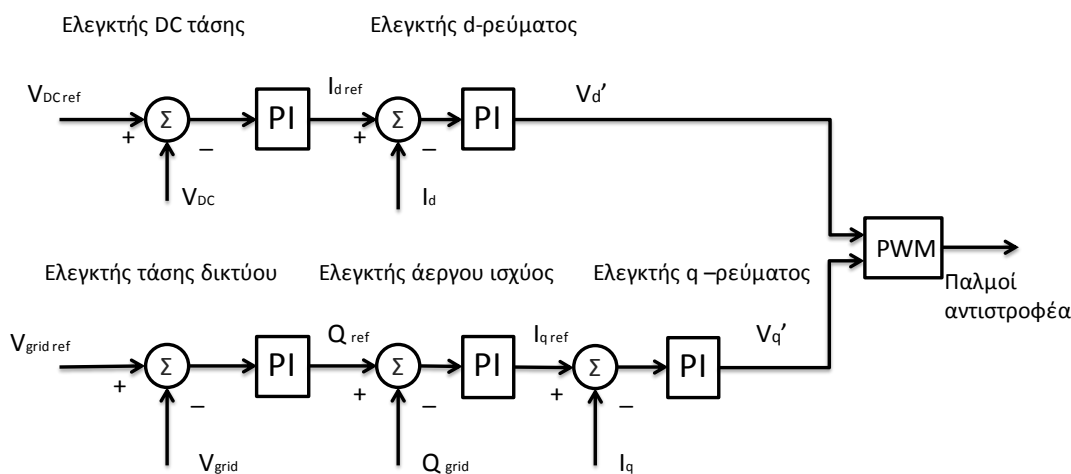
Ο ευθύς άξονας (d) του στρεφόμενου πλαισίου ταυτίζεται με το συνιστάμενο διάνυσμα τάσης έτσι ώστε $V_d = |V|$ και $V_q = 0$. Επομένως, οι εξισώσεις που περιγράφουν την ενεργό και άεργο ισχύ που διακινείται είναι οι εξής :

$$P = \frac{3}{2} |V| I_d$$

(4.5)

$$Q = -\frac{3}{2} |V| I_q$$

Ο έλεγχος λοιπόν της **ενεργού** και της **άεργου ισχύος** ταυτίζεται με τον ανεξάρτητο έλεγχο της **d και q συνιστώσας** του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα. Καταυτό τον τρόπο προκύπτουν δύο ελεγκτές που λειτουργούν παράλληλα.

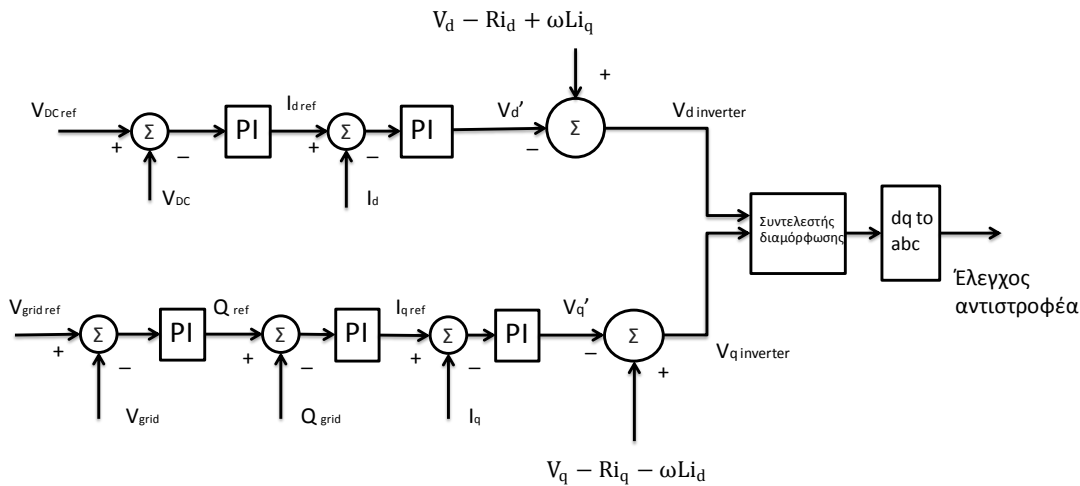


Σχήμα 4.8 Παράλληλοι βρόχοι ελέγχου

- Ο ελεγκτής των **d-συνιστωσών** αποτελείται από **δύο βρόχους ελέγχου**. Ο εξωτερικός βρόχος διατηρεί σταθερή τη **συνεχή τάση** V_{dc} στην ονομαστική της τιμή V_{dc_ref} ($=1000V$) και καθορίζει την τιμή αναφοράς της d-συνιστώσας του ρεύματος i_{d_ref} . Ο ταχύτερος εσωτερικός βρόχος ρυθμίζει το **ρεύμα** i_d και τελικά την **τάση** v_{inv_d} στην έξοδο του αντιστροφέα.
- Ο ελεγκτής των **q-συνιστωσών** αποτελείται από **τρεις βρόχους ελέγχου**. Ο εξωτερικός βρόχος διατηρεί σταθερή την **τάση του δικτύου** v_{grid} στην ονομαστική της τιμή ($440 V$) δίνοντας παράλληλα ως έξοδο την τιμή αναφοράς για την άεργο ισχύ Q_{ref} . Η **άεργος ισχύς** που παρέχει η γεννήτρια στο δίκτυο ρυθμίζεται με τη σειρά της από το δεύτερο βρόχο ελέγχου ο οποίος οδηγεί στην έξοδό του την τιμή i_{q_ref} στον ταχύτερο εσωτερικό ελεγκτή. Ο τρίτος αυτός ελεγκτής, σε αντιστοιχία με τον d ελεγκτή ρυθμίζει το ρεύμα i_q και τελικά την **τάση** v_{inv_q} .

4.2.2. Μοντέλο ελεγκτή του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου

Η διάταξη του ελεγκτή του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου, όπως αυτός περιγράφεται στη παράγραφο 4.3, φαίνεται στο σχήμα 4.10. Το ολοκληρωμένο μοντέλο του ελεγκτή του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου όπως αυτό κατασκευάστηκε σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK δίνεται στο παράρτημα (σχήμα 19-21).



Σχήμα 4.9 Ελεγκτής αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου

Ο ελεγκτής των d συνιστωσών όπως έχει προαναφερθεί αποτελείται από δυο PI ελεγκτές σε σειρά. Στον πρώτο εισάγεται η τιμή αναφοράς $V_{DC\ ref}$ της συνεχούς τάσης του συνδέσμου συνεχούς ρεύματος, η οποία συγκρίνεται με τη μετρούμενη τιμή V_{DC} . Η έξοδος του ελεγκτή δίνει την τιμή αναφοράς του ρεύματος $I_{d\ ref}$ η οποία με τη σειρά της συγκρίνεται με την μετρούμενη τιμή I_d για να οδηγηθεί η διαφορά τους στον εσωτερικό ταχύτερο ελεγκτή. Η έξοδος V_d' αυτού του ελεγκτή αφαιρείται από την παράσταση $v_d - R_s i_d + \omega L_s i_q$ ώστε να προκύψει η τιμή της τάσης $V_{d\ inverter}$ του αντιστροφέα σύμφωνα με τον τύπο 4.4.

Ο ελεγκτής των q συνιστωσών αποτελείται από τρεις σειριακούς PI ελεγκτές. Στον πρώτο εισάγεται η τιμή αναφοράς της τάσης του δικτύου $V_{grid\ ref}$ (ανα μονάδα) η οποία συγκρίνεται με την αντίστοιχη μετρούμενη τιμή V_{grid} . Από την έξοδο του πρώτου ελεγκτή προκύπτει η τιμή αναφοράς της άεργου ισχύος Q_{ref} που προσφέρει η αξονική γεννήτρια στο δίκτυο. Από τη σύγκριση της Q_{ref} με την μετρούμενη τιμή της άεργου ισχύος Q_{grid} προκύπτει το ρεύμα αναφοράς $I_{q\ ref}$ το οποίο οδηγείται στον τρίτο και τελευταίο ελεγκτή, η έξοδος του οποίου δίνει την τάση V_q' . Η τάση V_q' αφαιρείται από την παράσταση $v_q - R_s i_q - \omega L_s i_d$ ώστε να προκύψει αντίστοιχα η τάση $V_{q\ inverter}$ στην έξοδο του αντιστροφέα.

Οι τιμές των κερδών των ελεγκτών δίνονται στον πίνακα 4.4.

PI ελεγκτές	Kp	Ki
Ελεγκτής συνεχούς τάσης DC	1.1	27.5
Ελεγκτής ρεύματος Id	1	50
Ελεγκτής τάσης δικτύου Vgrid	0.7	12
Ελεγκτής άεργου ισχύος Q	-	1
Ελεγκτής ρεύματος Iq	1	50

Πίνακας 4.4 Παράμετροι ελεγκτών PI του συστήματος ελέγχου του ανορθωτή στην πλευρά του δικτύου

Οι παραγόμενες τιμές της τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα $V_{d \text{ inverter}}$ και $V_{q \text{ inverter}}$ οι οποίες προκύπτουν από τον παραπάνω ελεγκτή στη συνέχεια μετασχηματίζονται στις πολικές συντεταγμένες ώστε το μέτρο της τάσης να πολλαπλασιαστεί με τον απαιτούμενο συντελεστή διαμόρφωσης (m). Ο τύπος που δίνει τον συντελεστή διαμόρφωση είναι

$$m = (V_{nom} \times 2 \times \sqrt{(2/3)}) / V_{DC} \quad (4.6)$$

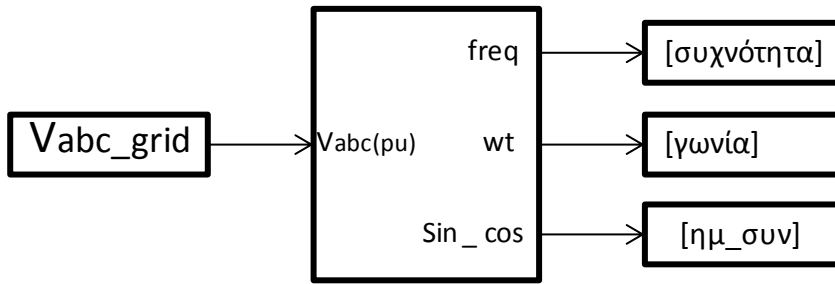
Όπου V_{nom} η ονομαστική πολική τάση του δικτύου (RMS) και V_{DC} η τάση του συνδέσμου συνεχούς ρεύματος.

Το τελικό σήμα, αφού μετασχηματιστεί από πολικές σε καρτεσιανές συντεταγμένες ακολουθεί τον αντίστροφο μετασχηματισμό d-q και στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του αντιστροφέα μέσω της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμών(παράγραφος 3.2.).

4.2.3. Συγχρονισμός στη συχνότητα του δικτύου

Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του σύγχρονου πλαισίου (d-q) πρέπει να είναι ίδια με αυτή της περιστροφής του των διανυσμάτων τάσης του δικτύου. Είναι επομένως απαραίτητος ο συγχρονισμός του αντιστροφέα μέσω ενός συστήματος ανίχνευσης της τρέχουσας συχνότητας του δικτύου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα σύστημα κλειδώματος φάσης (PLL, phase-locked loop) το οποίο δέχεται ως είσοδο το διάνυσμα των τάσεων του δικτύου V_{abc_grid} και δίνει στην

έξοδο την τρέχουσα συχνότητα του δικτύου, τη γωνία ωt του πλαισίου αναφοράς (d-q) καθώς και το ημίτονο και συνημίτονο αυτής.



Σύστημα Κλειδώματος φάσης PLL

Σχήμα 4.10 Σύστημα κλειδώματος φάσης (PLL)

Κεφάλαιο 5 : Προσομοίωση καταστάσεων λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση της λειτουργίας του ολοκληρωμένου μοντέλου του συστήματος ελέγχου των αξονικών γεννητριών, το οποίο αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική, στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του υπό εξέταση πλοίου. Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν αφορούν σε τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας.

- Στην πρώτη αναλύεται η λειτουργία του δικτύου του πλοίου όταν τροφοδοτείται **αποκλειστικά από τις γεννήτριες ντήζελ** ώστε να ελεγχθεί η λειτουργία του **αυτόματου ρυθμιστή τάσης** αλλά και του **ρυθμιστή στροφών** των γεννητριών ντήζελ.
- Στη δεύτερη, εξετάζεται η **παράλληλη λειτουργία των αξονικών γεννητριών με τις γεννήτριες ντήζελ**, με στόχο να παρατηρηθεί η αλληλεπίδραση του συστήματος ελέγχου των αξονικών γεννητριών με τον έλεγχο των γεννητριών ντήζελ.
- Στην τρίτη προσομοίωση εξετάζεται η **απομονωμένη λειτουργία των αξονικών γεννητριών** ώστε να επιβεβαιωθεί η ικανότητα του συστήματος ελέγχου να διατηρεί σταθερή τη συχνότητα και την τάση του δικτύου, μέσω της έγχυσης ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα.
- Τέλος στην τέταρτη, προσομοιώνεται η κατάσταση **έκτακτης ανάγκης** κατά την οποία η **αξονική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας** τροφοδοτούμενος από τις μηχανές ντήζελ, ώστε να επιβεβαιωθεί η ευελιξία του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου.

Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του υπολογιστικού μοντέλου MATLAB/SIMULINK.

5.1. Απομονωμένη λειτουργία γεννητριών εσωτερικής καύσης (ντήζελ)

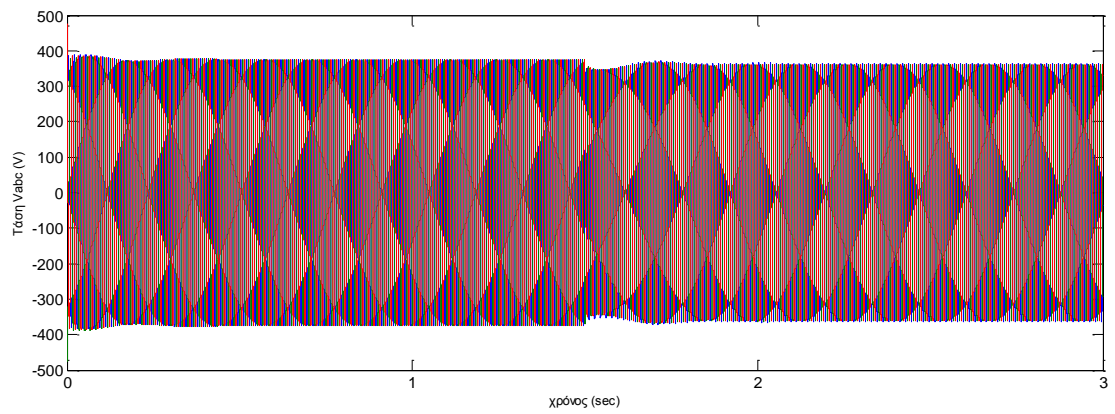
Σε αυτήν την παράγραφο πραγματοποιείται η προσομοίωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου όταν αυτό τροφοδοτείται αποκλειστικά από τις τρεις γεννήτριες ντήζελ. Η προσομοίωση έχει διάρκεια **3 δευτερόλεπτα**. Από **0 έως 1.5 δευτερόλεπτα** προσομοιώνεται η **λειτουργία πλοήγησης στη θάλασσα** ενώ στα **1.5 δευτερόλεπτα** το πλοίο μεταβαίνει στη **λειτουργία ελιγμών** με τη βίαιη είσοδο στο σύστημα ενός φορτίου ωμικού-επαγωγικού το οποίο αντιπροσωπεύει τους πλευρικούς προωστήριους μηχανισμούς. Η ενεργός και άεργος ισχύς των φορτίων του πλοίου προέκυψαν από τον ηλεκτρικό ισολογισμό που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.5. Αξίζει να σημειωθεί ότι το φορτίο των πλευρικών προωστήριων μηχανισμών αντιστοιχεί στο **69%** του φορτίου που εξυπηρετούν οι γεννήτριες κατά τη λειτουργία πλοήγησης στη θάλασσα. Τα στοιχεία των φορτίων του συστήματος του πλοίου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

<i>Καταναλωτές</i>	<i>Ενεργός ισχύς (KW)</i>	<i>Άεργος ισχύς (KVA_r)</i>
<i>Κέντρα ελέγχου κινητήρων (MCCs)</i>	<i>1621</i>	<i>1005</i>
<i>Καταναλωτές συνδεδεμένοι απευθείας στα 440 V</i>	<i>880.3</i>	<i>545.79</i>
<i>Καταναλωτές συνδεδεμένοι με μετασχηματιστές στα 440 ή 230 V</i>	<i>638.8</i>	<i>369.08</i>
<i>Πλευρικοί προωστήριοι μηχανισμοί</i>	<i>2192</i>	<i>1359.04</i>

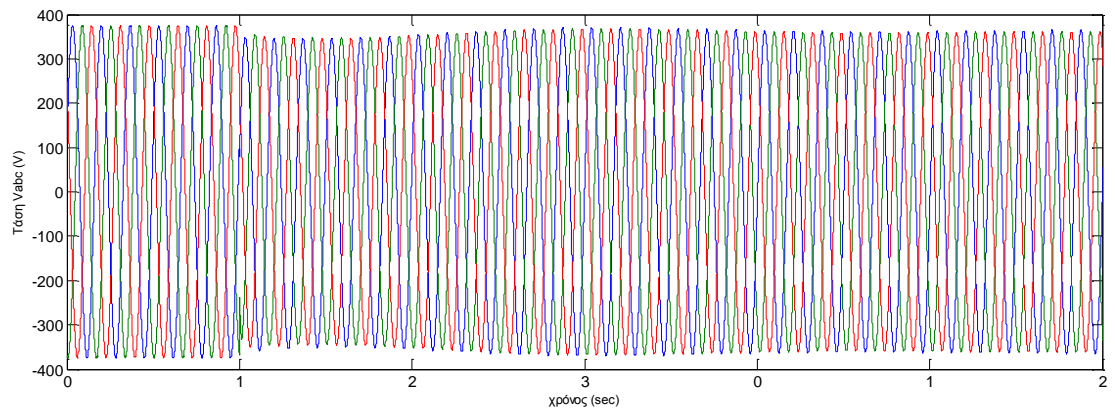
Πίνακας 5.1 Φορτία συστήματος

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ακολουθούν στη συνέχεια.

Στα σχήματα 5.1 και 5.2 απεικονίζονται αντίστοιχα η τάση του κύριου ζυγού του πλοίου και το ρεύμα στην έξοδο των γεννητριών ντήζελ. Η τάση του ζυγού έπειτα από το πέρας του μεταβατικού φαινομένου που συμβαίνει στα 1.5 δευτερόλεπτα με την ένταξη των πλευρικών προωστήριων μηχανισμών, διατηρείται σταθερή χάρη στη συμβολή του αυτόματου ρυθμιστή τάσης των γεννητριών ντήζελ. Η πτώση τάσης δεν ξεπερνά το 8% και η τάση επανέρχεται στο 98% της ονομαστικής τιμής σε χρόνο 0.003 δευτερόλεπτα. Τα αντίστοιχα όρια σύμφωνα με την IEE για τα μεταβατικά φαινόμενα τάσης στα πλοία είναι $\pm 16\%$ για 2 δευτερόλεπτα. Η τιμή του ρεύματος, σύμφωνα με το σχήμα 5.2, παρουσιάζει αύξηση καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις του δικτύου σε ισχύ κατά την πραγματοποίηση των ελιγμών. Από την αρμονική ανάλυση που παρουσιάζεται στα σχήματα 5.3 και 5.4 για τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος παρατηρείται συνολική αρμονική παραμόρφωση 0.02% για την τάση και 0.02% για το ρεύμα. Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά χαμηλότερες από το όριο 5% για τη συνολική αρμονική παραμόρφωση τάσης και ρεύματος σύμφωνα με την IEE 519 [11].



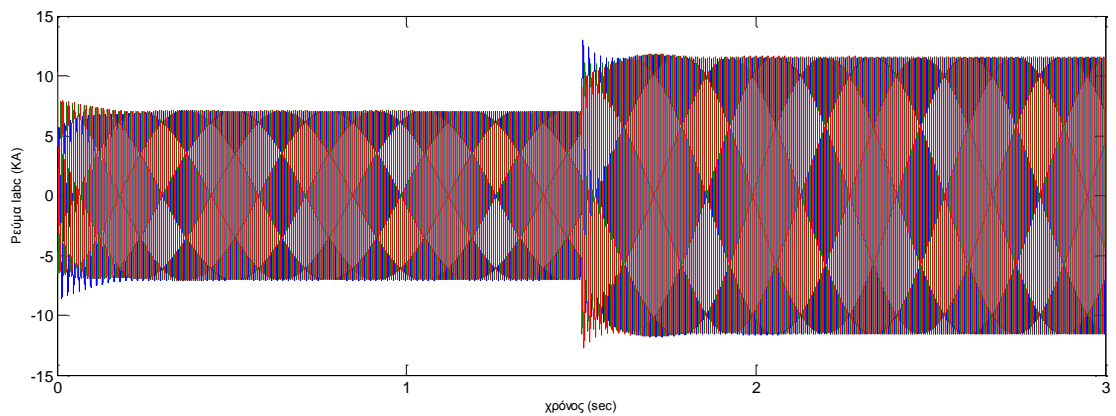
(α)



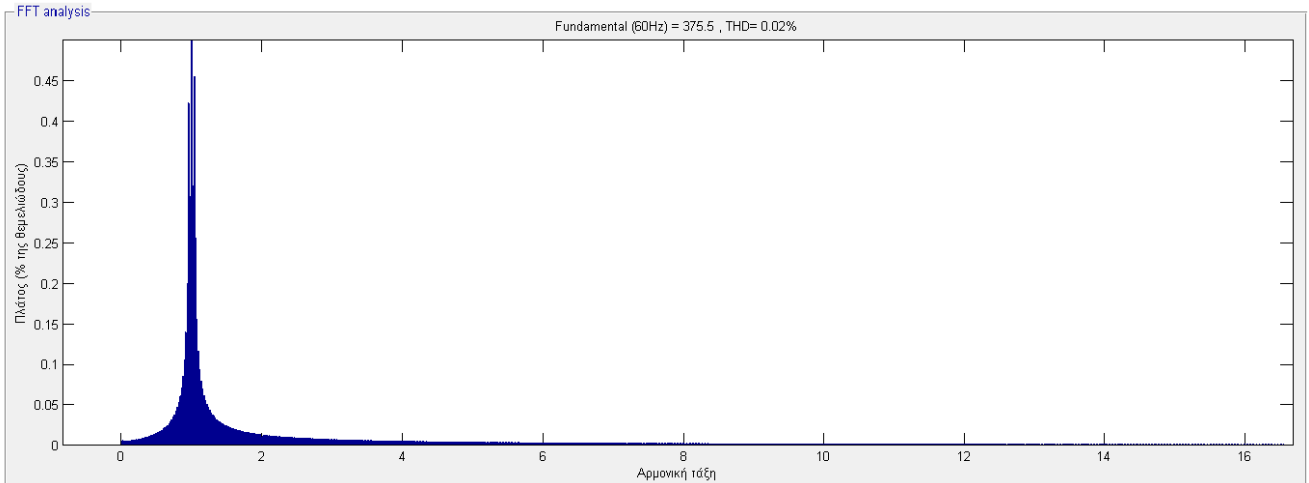
(β)

Σχήμα 5.1 Φασική τάση V_{abc} στην έξοδο της αζονικής γεννήτριας (V)

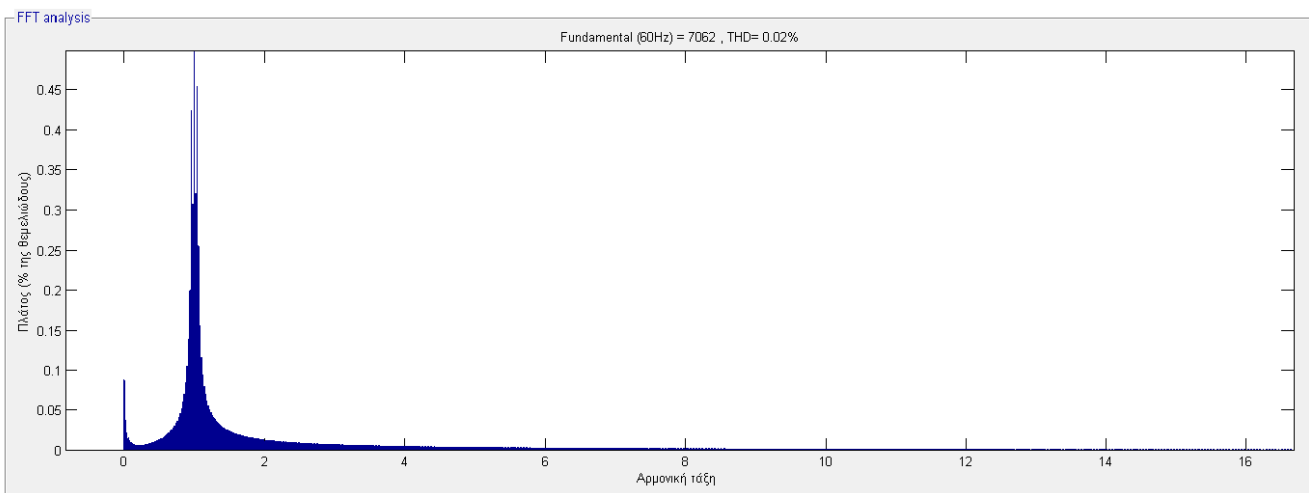
α) 0-3 sec β) 1.4- 2 sec



Σχήμα 5.2 Ρεύμα I_{abc} στην έξοδο της αζονικής γεννήτριας (KA)



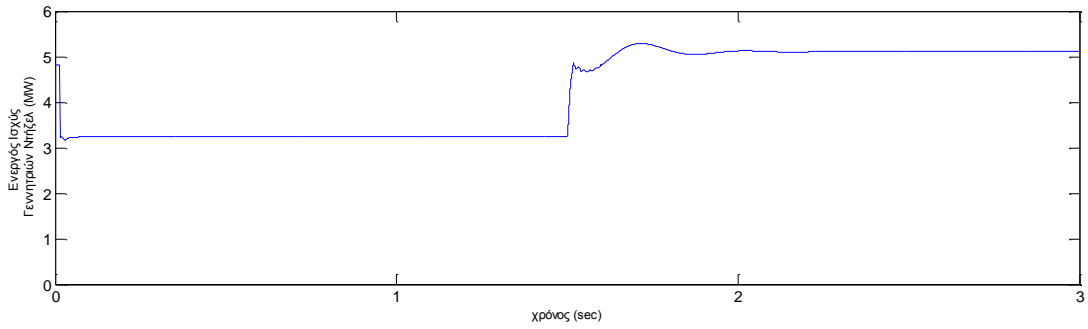
Σχήμα 5.3 Ανάλυση αρμονικών τάσης



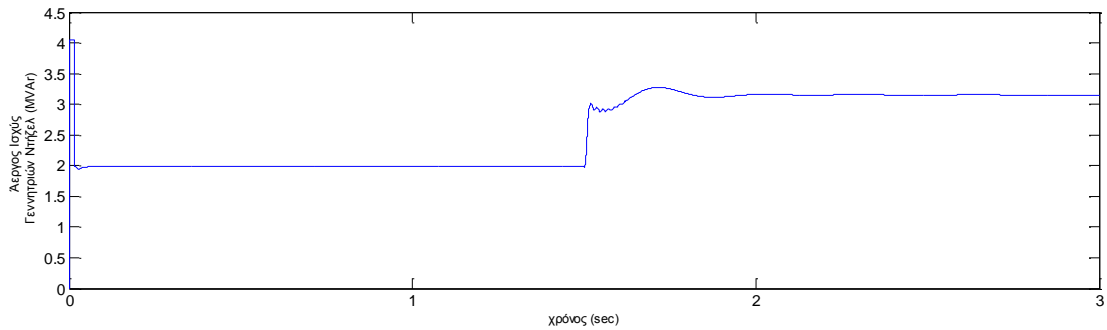
Σχήμα 5.4 Ανάλυση αρμονικών ρεύματος

Αποκρίσεις γεννητριών ντήζελ

Στα σχήματα 5.5 και 5.6 απεικονίζονται η ενεργός και άεργος ισχύς που προσφέρουν οι γεννήτριες ντήζελ στο δίκτυο του πλοίου. Μετά τα 1.5 δευτερόλεπτα όπου και πραγματοποιείται η μετάβαση από τη λειτουργία πλοήγησης στη λειτουργία ελιγμών, παρατηρείται μια αύξηση στην τιμή της ενεργού ισχύος (από 3.2 σε 5.1 MW) και της άεργου ισχύος (από 2 σε 3.2 MVar) οι οποίες ακολουθούν τις αυξημένες απαιτήσεις του δικτύου σε ισχύ. Ο συντελεστής ισχύος στη λειτουργία θάλασσας υπολογίζεται 0.85 , ενώ στη λειτουργία ελιγμών 0.86.

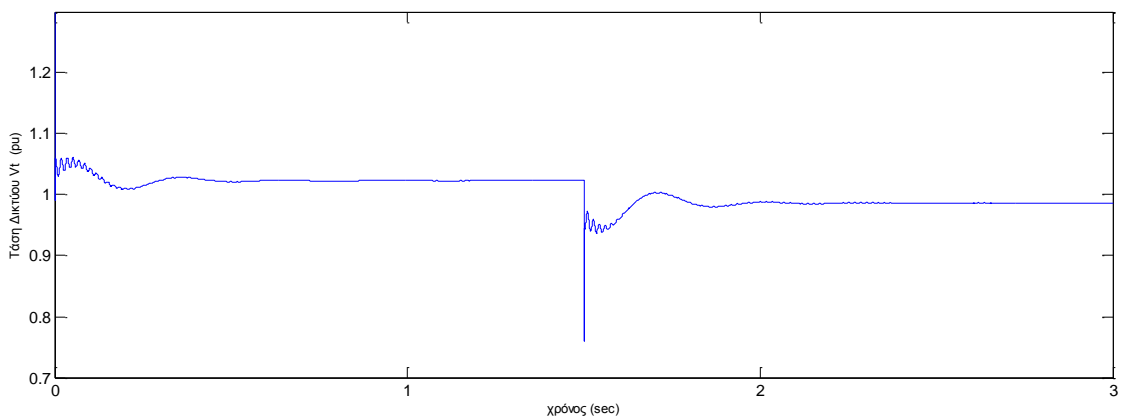


Σχήμα 5.5 Ενεργός ισχύς γεννητριών ντήζελ (MW)

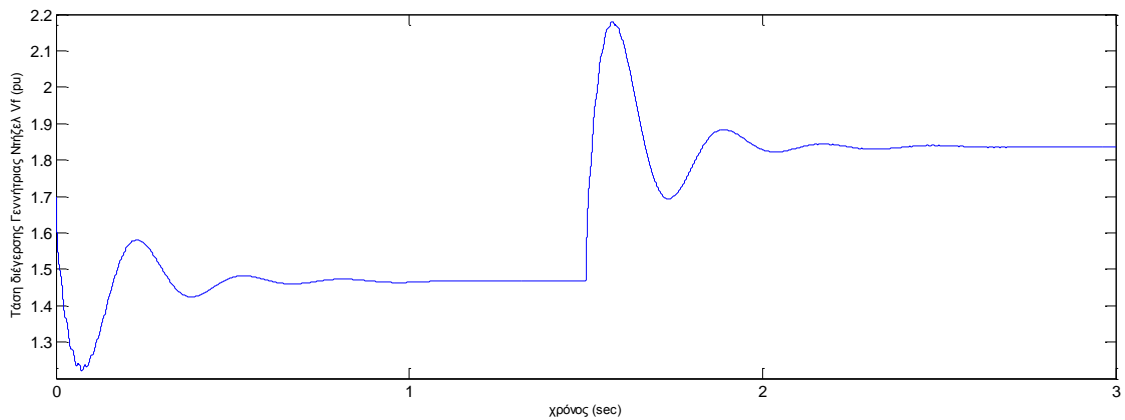


Σχήμα 5.6 Αεργός ισχύς γεννητριών ντήζελ (MVar)

Στο σχήμα 5.7 απεικονίζεται η τάση στην έξοδο των γεννητριών ντήζελ η τιμή της οποίας αποτελεί το σήμα στην είσοδο του αυτόματου ρυθμιστή τάσης. Η διατήρηση της τάσης στην ονομαστική της τιμή επιτυγχάνεται με την αύξηση της τάσης διέγερσης κατά την αύξηση του φορτίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8. Ο χρόνος απόκρισης του ρυθμιστή τάσης υπολογίζεται στα 0.8 δευτερόλεπτα.

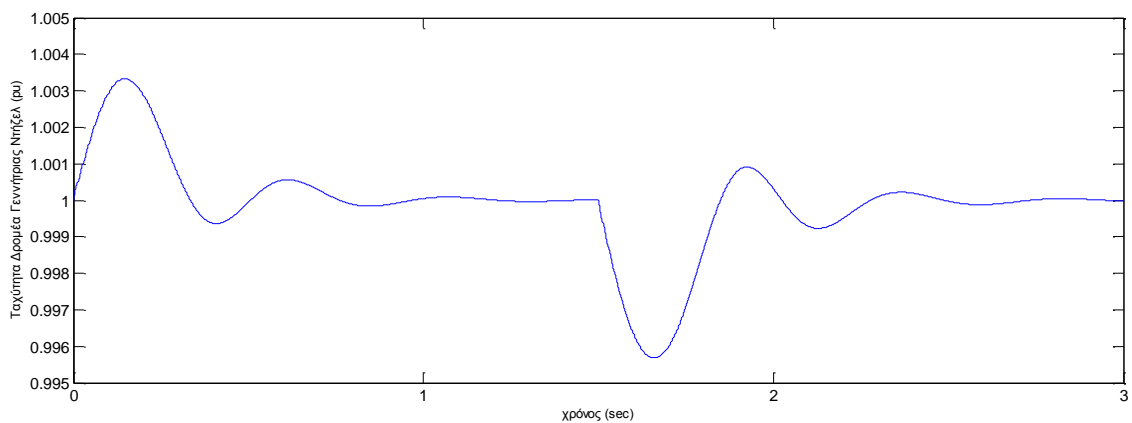


Σχήμα 5.7 Τάση στην έξοδο των γεννητριών ντήζελ – Σήμα εισόδου στον αυτόματο ρυθμιστή τάσης (αμ)

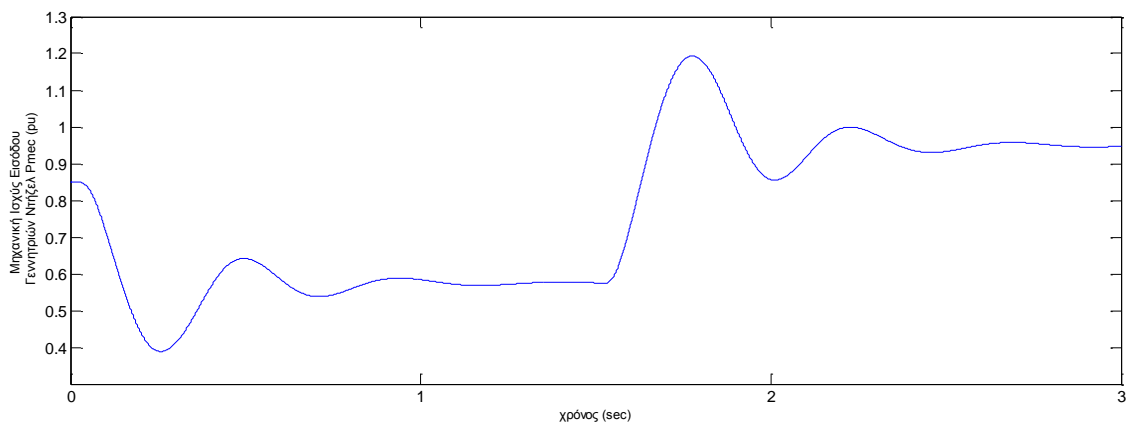


Σχήμα 5.8 Τάση διέγερσης-είσοδος Vf σύγχρονης μηχανής (αμ)

Στο σχήμα 5.9 δίνεται η ταχύτητα του δρομέα της μηχανής ντήζελ. Η ταχύτητα της μηχανής και συνεπώς η συχνότητα του δικτύου, διατηρείται σταθερή με τη χρήση του ρυθμιστή στροφών. Ο ρυθμιστής στροφών αντιλαμβάνεται τις μεταβολές στο φορτίο της μηχανής και καθορίζει την μηχανική ισχύ που εισέρχεται στη μηχανή ντήζελ. Ο χρόνος απόκρισης του ρυθμιστή στροφών υπολογίζεται 1.2 δευτερόλεπτα όπως φαίνεται στο σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.9 Ταχύτητα δρομέα σύγχρονης γεννήτριας – Σήμα εισόδου στο ρυθμιστή στροφών (αμ)



Σχήμα 5.10 Μηχανική ισχύς εξόδου μηχανής ντήζελ- είσοδος P_{mec} σύγχρονης γεννήτριας (αμ)

Σύμφωνα με τα παραπάνω το μοντέλο που αναπτύχθηκε σε συνδυασμό με τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν επιβεβαιώνουν την ικανότητα των γεννητριών ντήζελ να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του δικτύου σε ενεργό και άεργο ισχύ τόσο κατά τη λειτουργία πλοήγησης στη θάλασσα όσο και κατά την πραγματοποίηση ελιγμών. Ο ρυθμιστής στροφών των γεννητριών ντήζελ αναλαμβάνει να αντιμετωπίσει την αύξηση του φορτίου, παρέχοντας την απαιτούμενη μηχανική ισχύ στον άξονα των γεννητριών ώστε να παραμένει σταθερή η συχνότητα, ενώ ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης κατορθώνει να διατηρεί την τάση του δικτύου σταθερή προσφέροντας άεργο ισχύ στο σύστημα. Ο χρόνος απόκρισης του αυτόματου ρυθμιστή τάσης υπολογίστηκε στα 0.8 δευτερόλεπτα ενώ αυτός του ρυθμιστή στροφών στα 1.2 δευτερόλεπτα. Οι μηχανές ντήζελ λειτουργούν με ΣΙ 0.85 επαγωγικό κατά την πλοήγηση στη θάλασσα και 0.86 επαγωγικό κατά την πραγματοποίηση ελιγμών. Παρά την απροβλημάτιστη λειτουργία των γεννητριών ντήζελ, η κατανάλωση τους είναι αυξημένη συγκριτικά με αυτή των κύριων μηχανών του πλοίου. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται η παράλληλη λειτουργία των γεννητριών ντήζελ με τις οικονομικότερες αξονικές γεννήτριες. Οι αξονικές γεννήτριες, οι οποίες τροφοδοτούνται με ισχύ από την κύρια μηχανή του πλοίου, συμμετέχουν στην παραγωγή ενεργού ισχύος για την ικανοποίηση των καταναλωτών του πλοίου ενώ ταυτόχρονα το σύστημα ελέγχου το οποίο αναπτύχθηκε επιτρέπει την έγχυση άεργου ισχύος για τη διατήρηση της τάσης του δικτύου καθώς και για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος των μηχανών ντήζελ. Η παράλληλη λειτουργία των αξονικών γεννητριών με τις γεννήτριες ντήζελ εξετάζεται στη συνέχεια.

5.2. Παράλληλη λειτουργία αξονικών γεννητριών με γεννήτριες εσωτερικής καύσης

5.2.1. Προσομοίωση μεταβατικής συμπεριφοράς συστήματος

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το πραγματικό σενάριο λειτουργίας κατά το οποίο το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου τροφοδοτείται από το συνδυασμό δυο γεννητριών ντήζελ και δυο αξονικών γεννητριών. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιείται προσομοίωση του συστήματος για 4 δευτερόλεπτα κατά την οποία εξετάζεται από 0 έως 1.5 δευτερόλεπτα η συμπεριφορά του συστήματος για λειτουργία πλοήγησης στη θάλασσα ενώ από 1.5 έως 4 δευτερόλεπτα η συμπεριφορά του για τη λειτουργία ελιγμών. Η μετάβαση αυτή από τη λειτουργία πλοήγησης στη λειτουργία ελιγμών πραγματοποιείται με την ένταξη στο σύστημα ενός φορτίου που αντιπροσωπεύει τους πλευρικούς προωστήριους μηχανισμούς, η ενεργός ισχύς του οποίου είναι ίση με το 69% της συνολικής ισχύος του συστήματος που τροφοδοτούν οι γεννήτριες κατά τη λειτουργία πλοήγησης στη θάλασσα. Η ενεργός και άεργος ισχύς των φορτίων του πλοίου παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 5.1 της προηγούμενης παραγράφου. Τα ποσοστά φόρτισης των γεννητριών του πλοίου δίνονται στον πίνακα 5.2.

	<i>Ισχύς (KW)</i>	<i>Λειτουργία πλοήγησης (0-1.5 sec)</i>	<i>Λειτουργία ελιγμών (1.5-4 sec)</i>
<i>Γεννήτριες ντήζελ</i>	1680	18.5%	89%,89%,
<i>Αξονικές γεννήτριες</i>	1920	80%, 80%	54.7%,70.6%

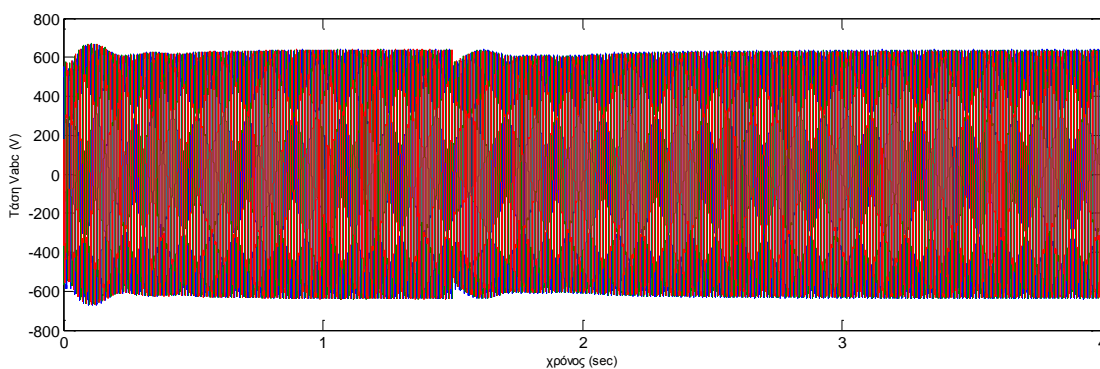
Πίνακας 5.2 Ποσοστά φόρτισης γεννητριών

Οι αποκρίσεις του συστήματος του πλοίου κατά τη διεξαγωγή της προσομοίωσης παρουσιάζονται στη συνέχεια.

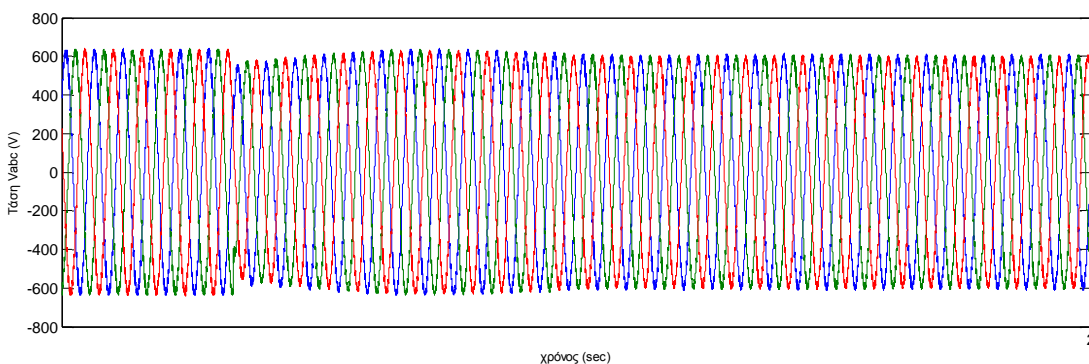
Στο σχήμα 5.11 παρουσιάζεται η τάση του δικτύου. Παρατηρείται πως η τάση του δικτύου διατηρείται στην ονομαστική της τιμή ακόμα και έπειτα από την εισαγωγή στο σύστημα του πρόσθετου φορτίου στα 1.5 δευτερόλεπτα. Η πτώση της τάσης δεν ξεπερνά το 10% της ονομαστικής τιμής ενώ η τάση επανέρχεται σε 0.8 δευτερόλεπτα. Η τιμή αυτή είναι σημαντικά κάτω από το όριο της μεταβολής $\pm 16\%$ για 2 δευτερόλεπτα που ορίζουν οι προδιαγραφές του IEEE για το μεταβατικά φαινόμενα τάσης στα πλοία[11]. Η διατήρηση της τάσης οφείλεται στη συνδυασμένη λειτουργία του αυτόματου ρυθμιστή τάσης των γεννητριών ντήζελ και του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα της αξονικής γεννήτριας. Κατά τη λειτουργία πλοήγησης η απαιτούμενη άεργος ισχύς παρέχεται από τις μηχανές ντήζελ (0.7 MVA_r) και τις αξονικές γεννήτριες (1.2 MVA_r), οι οποίες παρέχουν και το μεγαλύτερο ποσοστό ενεργού ισχύος που καταναλώνουν τα φορτία του πλοίου (2.8 από τα 3.1 MW). Με την πραγματοποίηση των ελιγμών

καθώς αυξάνεται το φορτίο της προπέλας, μειώνεται η ενεργός ισχύς που μπορούν να προσφέρουν οι αξονικές γεννήτριες στο σύστημα (2.2MW). Στην περίπτωση αυτή αναλαμβάνουν οι γεννήτριες ντήζελ να προσφέρουν την επιπλέον ισχύ (3 MW). Παρόλα αυτά, οι αυξημένες απαιτήσεις για ενεργό και άεργο ισχύ από τις γεννήτριες ντήζελ συντελούν στην αδυναμία του αυτόματου ρυθμιστή τάσης να παρέχει την απαιτούμενη άεργο ισχύ ώστε να διατηρηθεί η τάση του δικτύου σταθερή. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνει πλέον το σύστημα των αξονικών γεννητριών χάρη στη δυνατότητα που του προσφέρει το σύστημα ελέγχου της τάσης του δικτύου μέσω έγχυσης άεργου ισχύος. Οι μεταβολές στην ενεργό και άεργο ισχύ των γεννητριών του συστήματος του πλοίου, όπως περιγράφονται παραπάνω, απεικονίζονται στα σχήματα 5.15 έως 5.18. Όπως προκύπτει, η παράλληλη λειτουργία των δυο διαφορετικών ελέγχων δεν δημιουργεί πρόβλημα στη λειτουργία του πλοίου.

Από την ανάλυση των αρμονικών συνιστωσών η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 5.13 και 5.14 για τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα, προκύπτει συνολική αρμονική παραμόρφωση 2.42% για τη τάση και 3.18% για το ρεύμα. Οι τιμές αυτές είναι εντός των επιτρεπτών ορίων σύμφωνα με την IEE 519 [11]. Τα όρια αυτά ορίζουν μέγιστη αρμονική παραμόρφωση 5% τόσο για την τάση όσο και για το ρεύμα. Υπογραμμίζεται τέλος πως και στις δυο περιπτώσεις οι ισχυρότερες αρμονικές είναι οι αρμονικές 5^{ης} και 7^{ης} τάξης.



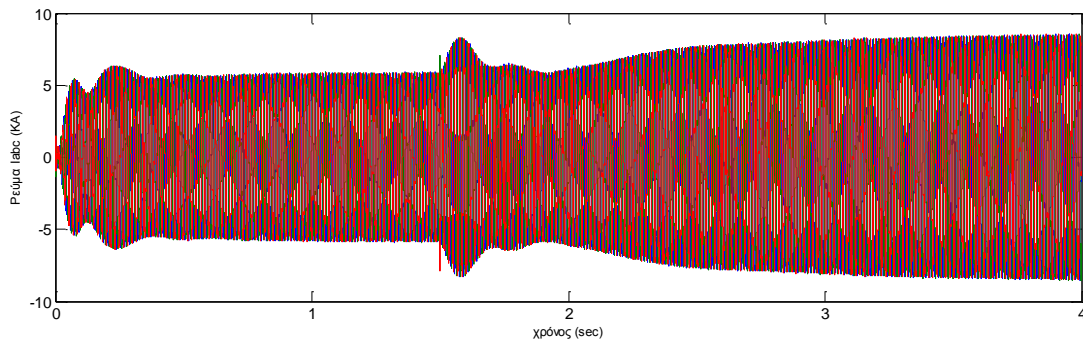
(α)



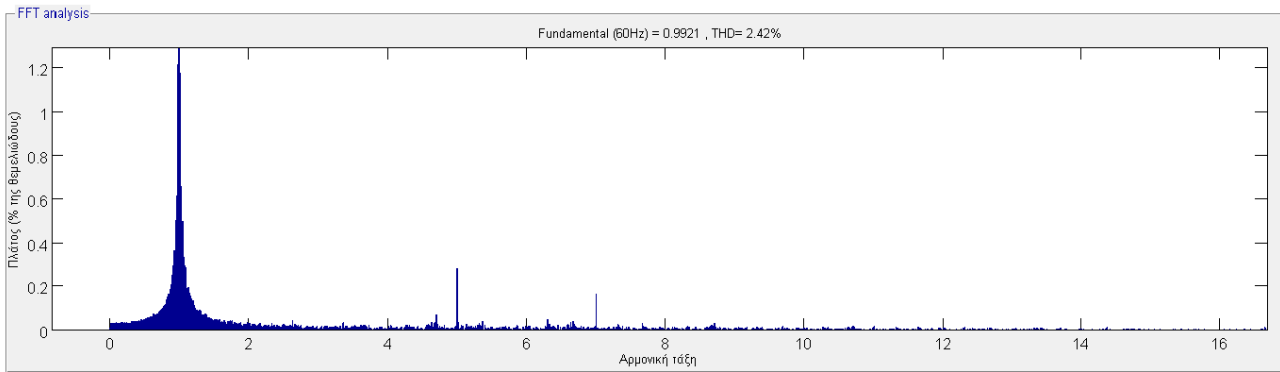
(β)

Σχήμα 5.11 Πολική τάση V_{abc} στην έξοδο της αξονικής γεννήτριας (V)

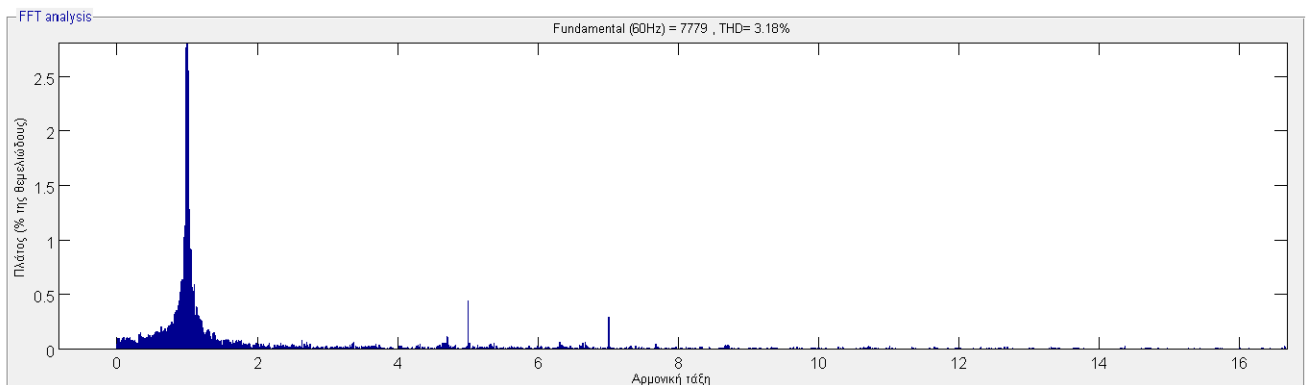
α) 0-4 sec β) 1.4- 2 sec



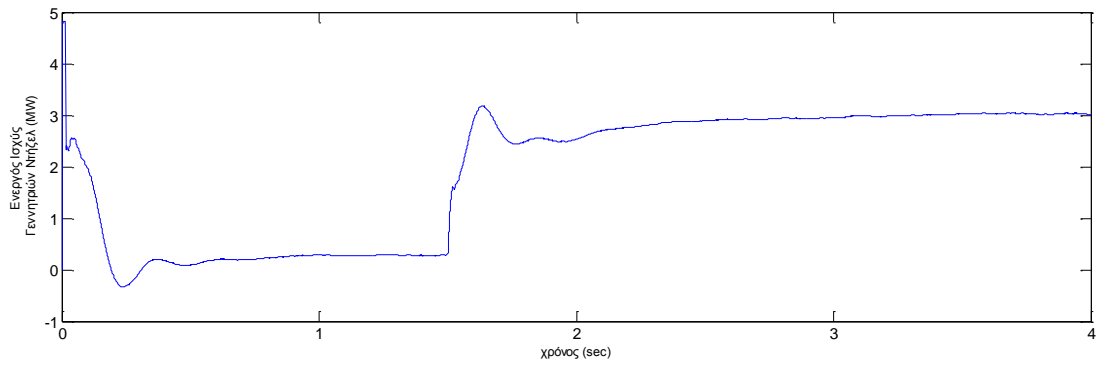
Σχήμα 5.12 Ρεύμα Iabc στην έξοδο της αξονικής γεννήτριας (KA)



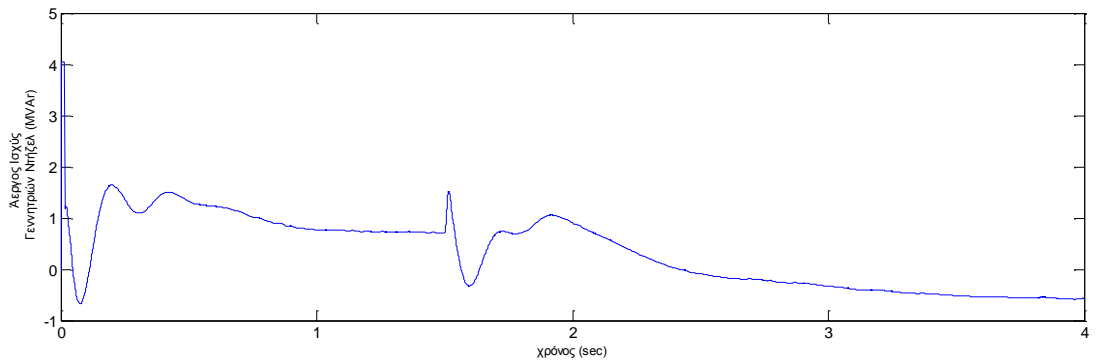
Σχήμα 5.13 Ανάλυση αρμονικών τάσης



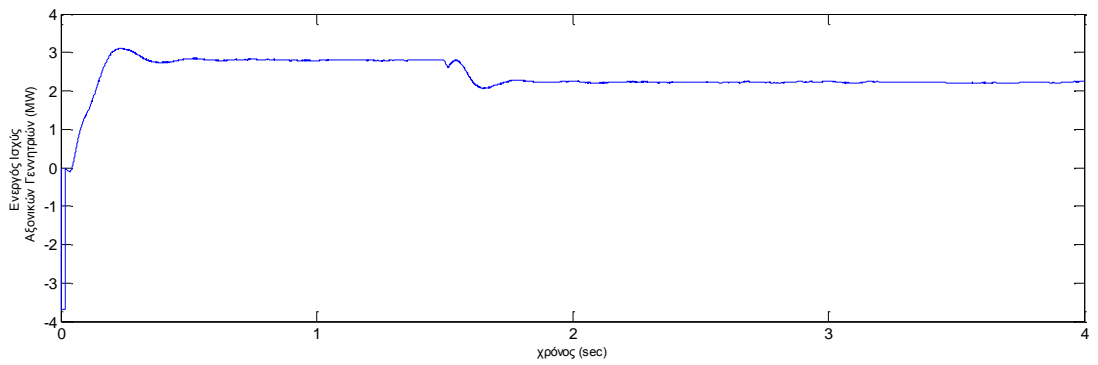
Σχήμα 5.14 Ανάλυση αρμονικών ρεύματος



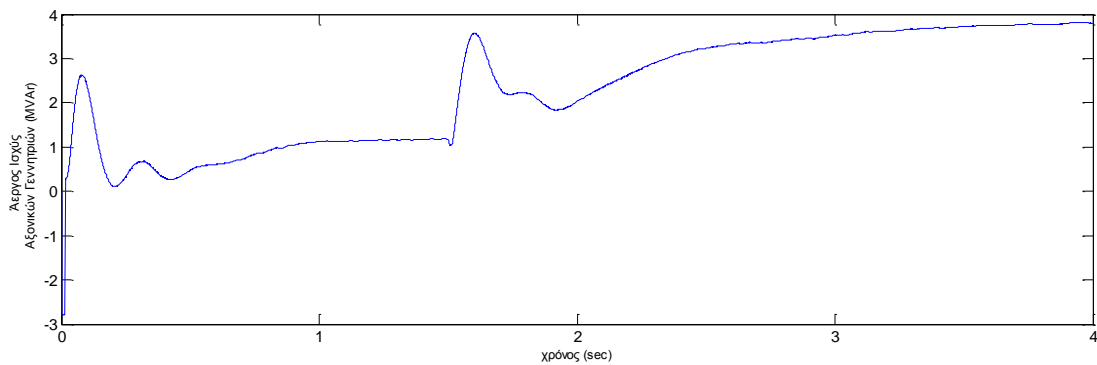
Σχήμα 5.15 Ενεργός ισχύς γεννητριών ντήζελ (MW)



Σχήμα 5.16 Αεργός ισχύς γεννητριών ντήζελ (MVar)



Σχήμα 5.17 Ενεργός ισχύς αξονικής γεννήτριας (MW)

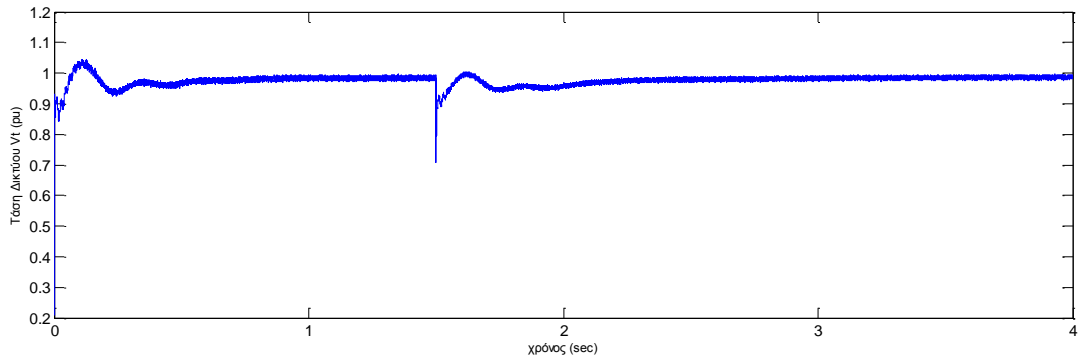


Σχήμα 5.18 Άεργος ισχύς αξονικής γεννήτριας (MVar)

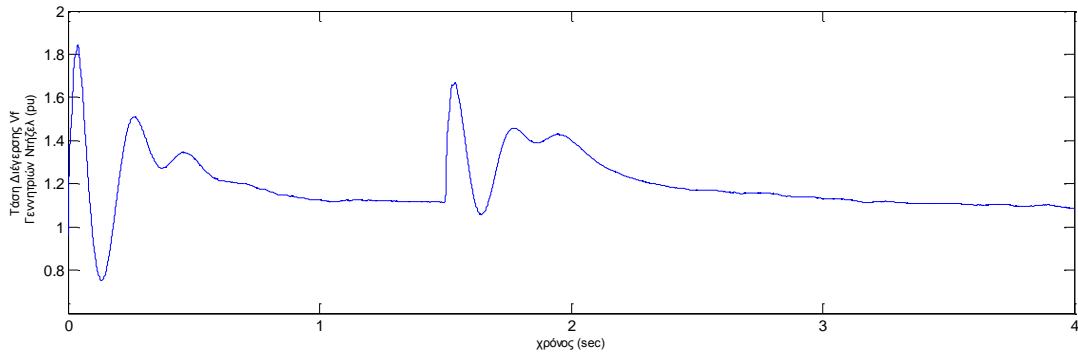
Αποκρίσεις γεννητριών ντήζελ:

Στο σχήμα 5.19 αποτυπώνεται η τιμή της τάσης του δικτύου (αμ) η οποία εισέρχεται ως είσοδος στον έλεγχο της διέγερσης της γεννήτριας ντήζελ, ενώ στο σχήμα 5.20 παρουσιάζεται η τάση διέγερσης της γεννήτριας. Από τα σχήματα 5.19 και 5.20 επιβεβαιώνεται η λειτουργία του αυτόματου ρυθμιστή τάσης και του διεγέρτη. Όπως είναι εμφανές, η τάση διέγερσης αρχίζει να αυξάνεται μετά τα 1.5 δευτερόλεπτα ώστε να εμποδίσει την πτώση τάσης που συμβαίνει κατά την είσοδο του φορτίου στο σύστημα. Παρόλα αυτά, ο έλεγχος των γεννητριών ντήζελ αναλαμβάνει σε αυτή την περίπτωση να προσφέρει την απαιτούμενη άεργο ισχύ στο σύστημα με συνέπεια η τάση διέγερσης να επανέρχεται στην αρχική της τιμή. Ο χρόνος απόκρισης του συστήματος διέγερσης υπολογίζεται στα 0.8 δευτερόλεπτα.

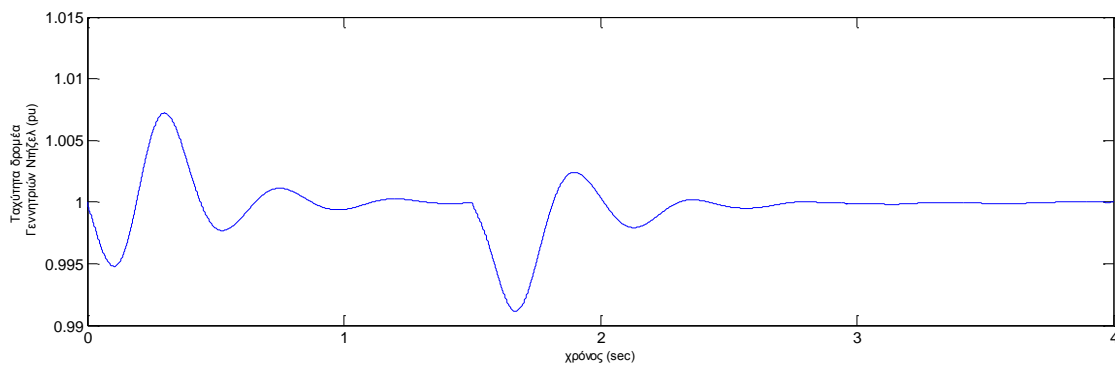
Στα σχήματα 5.21 και 5.22 παρουσιάζονται η ταχύτητα του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας, η οποία αποτελεί το σήμα εισόδου στο ρυθμιστή στροφών καθώς και η μηχανική ισχύς εξόδου της μηχανής ντήζελ η οποία οδηγείται ως είσοδος στη σύγχρονη γεννήτρια ντήζελ. Με βάση τα σχήματα αυτά επαληθεύεται και η απροβλημάτιστη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών καθώς φαίνεται πως αντιμετωπίζει ικανοποιητικά τόσο την αρχική επιτάχυνση της μηχανής όσο και την επιβράδυνση κατά την είσοδο του φορτίου, ρυθμίζοντας κατάλληλα την μηχανική ισχύ εισόδου της σύγχρονης γεννήτριας. Ο χρόνος απόκρισης του ρυθμιστή στροφών υπολογίζεται στα 1.2 δευτερόλεπτα, με τις μεταβολές της ταχύτητας να περιορίζονται στο $\pm 1\%$ της ονομαστικής της τιμής. Καταυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται και η σταθεροποίηση της συχνότητας όπως φαίνεται στο σχήμα 5.23.



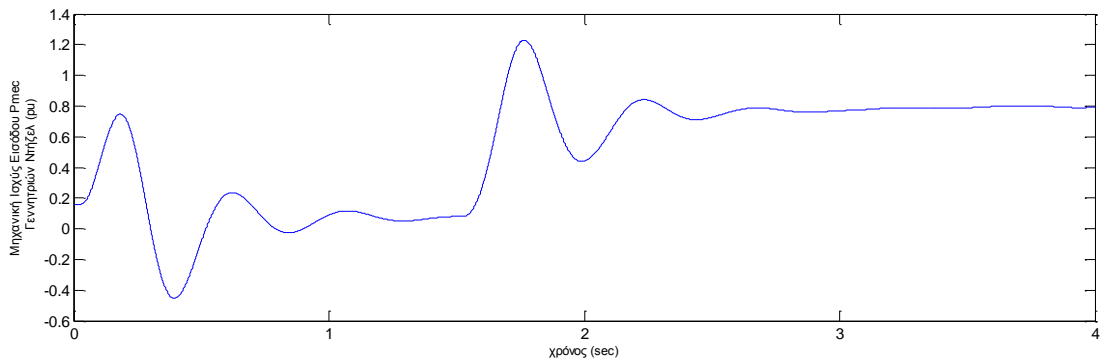
Σχήμα 5.19 Τάση στην έξοδο των γεννητριών ντήζελ – Σήμα εισόδου στον αυτόματο ρυθμιστή τάσης (αμ)



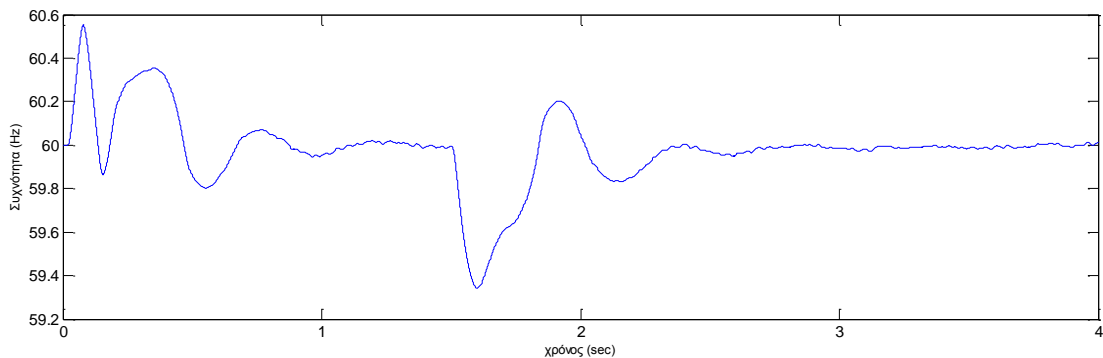
Σχήμα 5.20 Τάση διέγερσης-είσοδος Vf σύγχρονης μηχανής (αμ)



Σχήμα 5.21 Ταχύτητα δρομέα σύγχρονης γεννήτριας – Σήμα εισόδου στο ρυθμιστή στροφών (αμ)



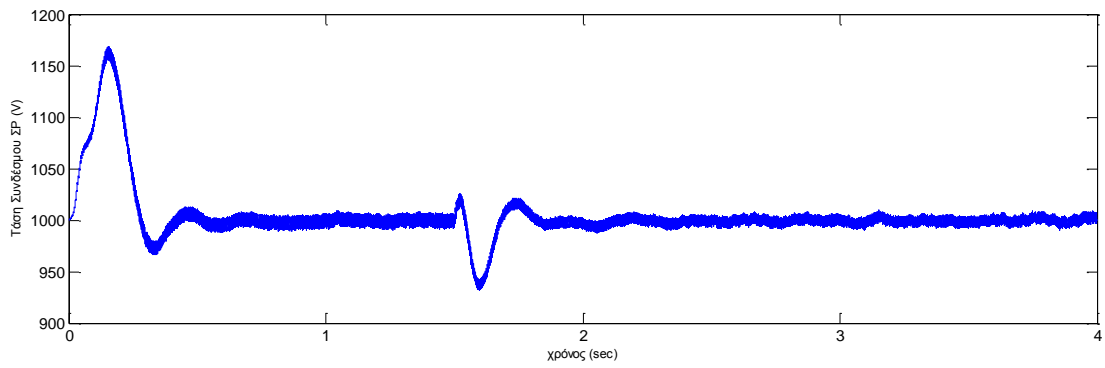
Σχήμα 5.22 Μηχανική ισχύς εξόδου μηχανής ντήζελ- είσοδος P_{mec} σύγχρονης γεννήτριας (αμ)



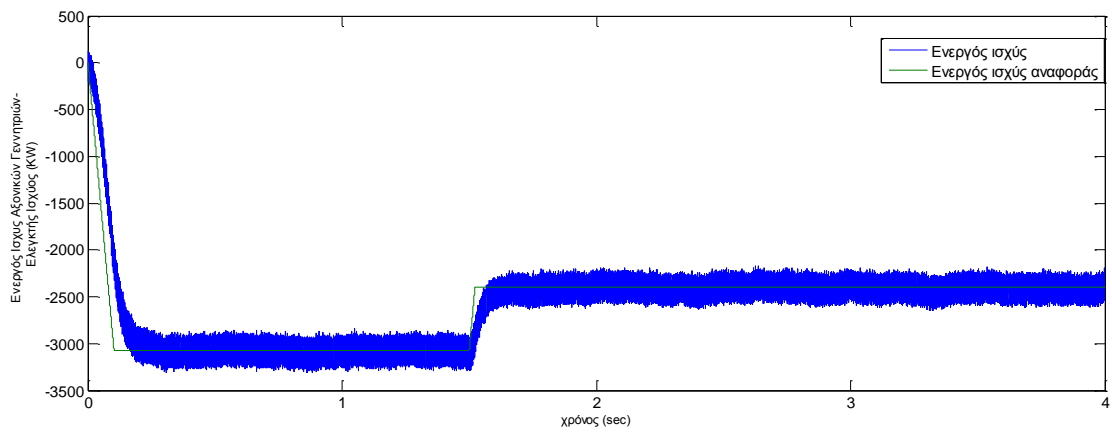
Σχήμα 5.23 Συχνότητα δικτύου πλοίου (Hz)

Αποκρίσεις αξονικών γεννητριών:

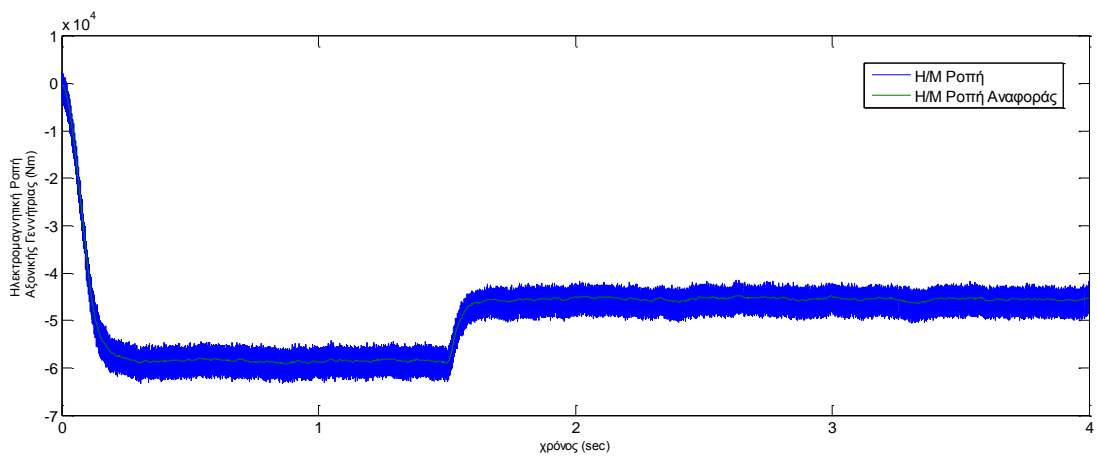
Η αξιοπιστία του ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά της αξονικής γεννήτριας επιβεβαιώνεται από τα σχήματα 5.25 και 5.26 όπου παρουσιάζονται αντίστοιχα η ενεργός ισχύς εξόδου της αξονικής γεννήτριας και η ηλεκτρομαγνητική ροπή αυτής. Τα σχήματα αυτά μαρτυρούν πως οι αποκρίσεις της μηχανής στη παραγωγή ισχύος και ροπής είναι σύμφωνες με τα σήματα που εισάγονται στο μοντέλο της μηχανής ως σήματα αναφοράς. Ο χρόνος απόκρισης του ελεγκτή ισχύος υπολογίζεται στα 0.2 δευτερόλεπτα και η διακύμανση της ισχύος στα $\pm 160 \text{ KW}$. Η διατήρηση της τάσης στην ονομαστική της τιμή (1000 V) έπειτα από την φυσιολογική αύξηση (16% της ονομαστικής τιμής) λόγω αύξησης του φορτίου κατά την έναρξη της προσομοίωσης, αλλά και την πτώση τάσης (6% της ονομαστικής τιμής) κατά την αντίστοιχη μείωση του φορτίου της αξονικής στα 1.5 δευτερόλεπτα, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.14, οφείλεται στην ορθή λειτουργία του ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Έπειτα από τις μεταβολές αυτές, η τάση επανέρχεται στα φυσιολογικά επίπεδα σε χρόνο 0.2 δευτερόλεπτα. Σε φυσιολογικές συνθήκες η διακύμανση της τάσης περιορίζεται στο $\pm 1\%$. Ο έλεγχος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου ρυθμίζει επίσης και την άεργο ισχύ που απαιτείται για τη διατήρηση της τάσης του δικτύου όπως παρουσιάστηκε παραπάνω.



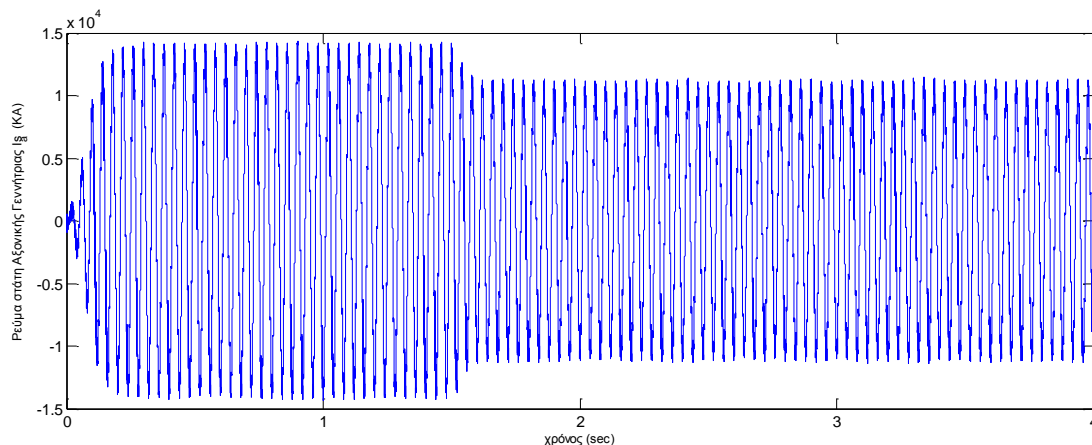
Σχήμα 5.24 Τάση συνδέσμου συνεχούς ρεύματος (V)



Σχήμα 5.25 Ενεργός ισχύς αξονικής γεννήτριας (KW)



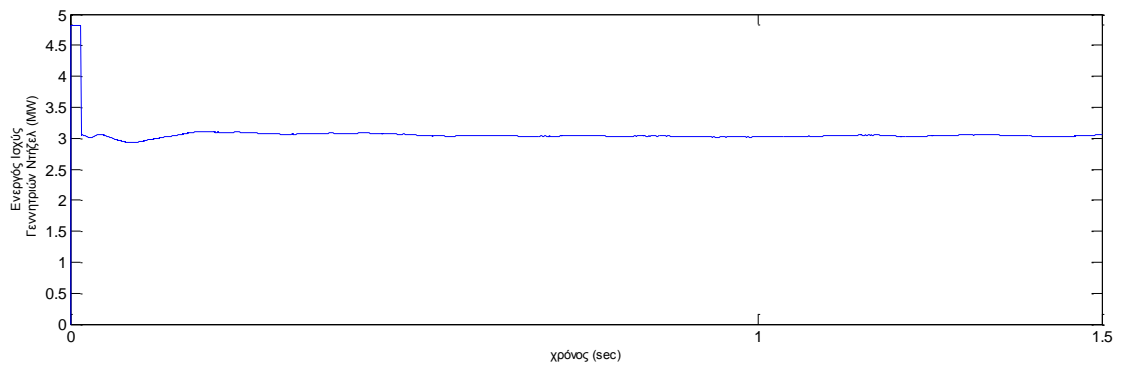
Σχήμα 5.26 Ηλεκτρομαγνητική ροπή αξονικής γεννήτριας (Nm)



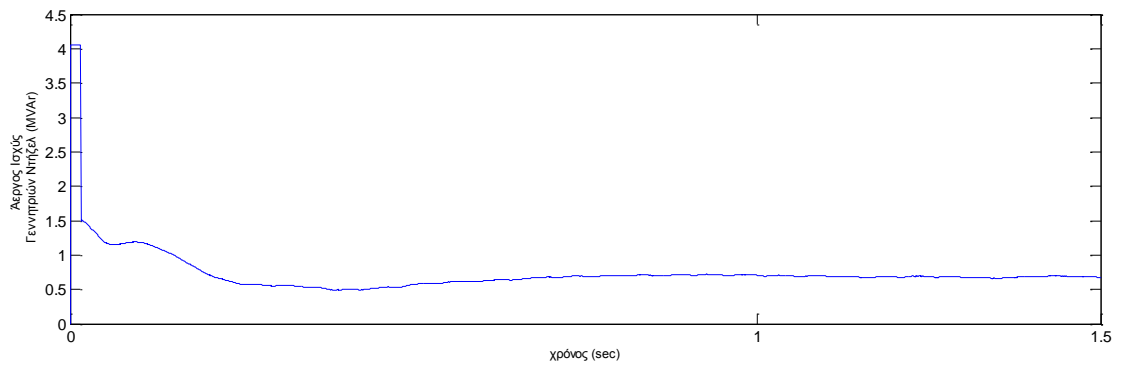
Σχήμα 5.27 Ρεύμα στάτη αξονικής γεννήτριας, φάση *a* (A)

5.2.2. Προσομοίωση μόνιμης κατάστασης – Λειτουργία αξονικών γεννητριών ως σύγχρονοι πυκνωτές

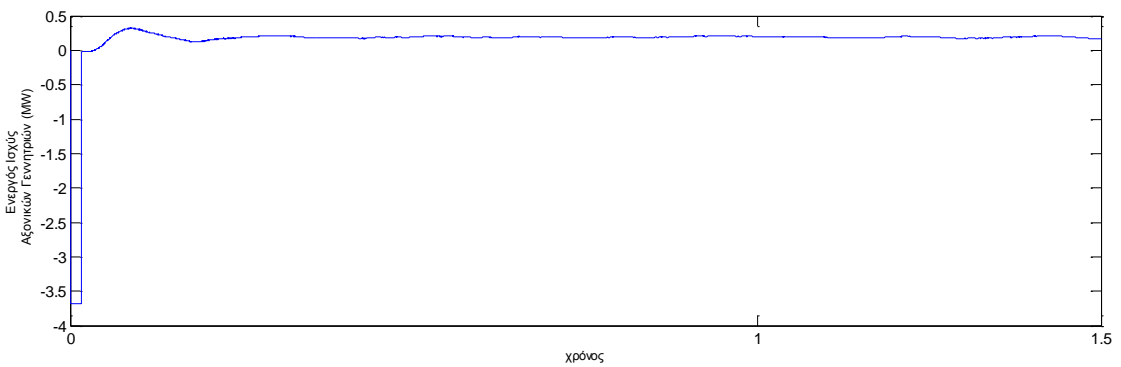
Η παράλληλη λειτουργία των γεννητριών ντήζελ με τις αξονικές γεννήτριες αποτελεί την συνηθέστερη κατάσταση λειτουργίας, δεδομένης της μειωμένης κατανάλωσης των αξονικών γεννητριών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων, το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου διευκολύνει την παράλληλη λειτουργία των γεννητριών καθώς πέρα από την ενεργό ισχύ με την οποία τροφοδοτεί το δίκτυο, είναι ικανό να συμβάλει στη διατήρηση της τάσης προσφέροντας άεργο ισχύ, χωρίς να απαιτείται η χρήση στρεφόμενου πυκνωτή. Η δυνατότητα αυτή του συστήματος ελέγχου μπορεί να αξιοποιηθεί και για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος των γεννητριών ντήζελ. Κατά την απομονωμένη λειτουργία των γεννητριών ντήζελ, η οποία προσομοιώθηκε στην παράγραφο 5.1, υπολογίστηκε πως κατά τη λειτουργία πλοήγησης στη θάλασσα, οι γεννήτριες ντήζελ λειτουργούν με συντελεστή ισχύος 0.85 επαγωγικό. Η συγκεκριμένη προσομοίωση επαναλήφθηκε με την εισαγωγή των αξονικών γεννητριών στο δίκτυο. Οι αξονικές γεννήτριες ρυθμίστηκαν ώστε να προσφέρουν ένα μικρό ποσοστό ενεργού ισχύος (0.2 MW από τα 3.2 MW) ενώ παρέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό άεργου ισχύος που απαιτείται από το δίκτυο του πλοίου (1.29 MVA_r από τα 2 MVA_r). Το αποτέλεσμα είναι οι γεννήτριες ντήζελ στην περίπτωση αυτή να λειτουργούν με συντελεστή ισχύος 0.97 επαγωγικό, βελτιωμένο κατά 14%. Η ενεργός και άεργος ισχύς που προσφέρουν οι γεννήτριες ντήζελ και οι αξονικές γεννήτριες παρουσιάζονται στα σχήματα 5.28 έως 5.31.



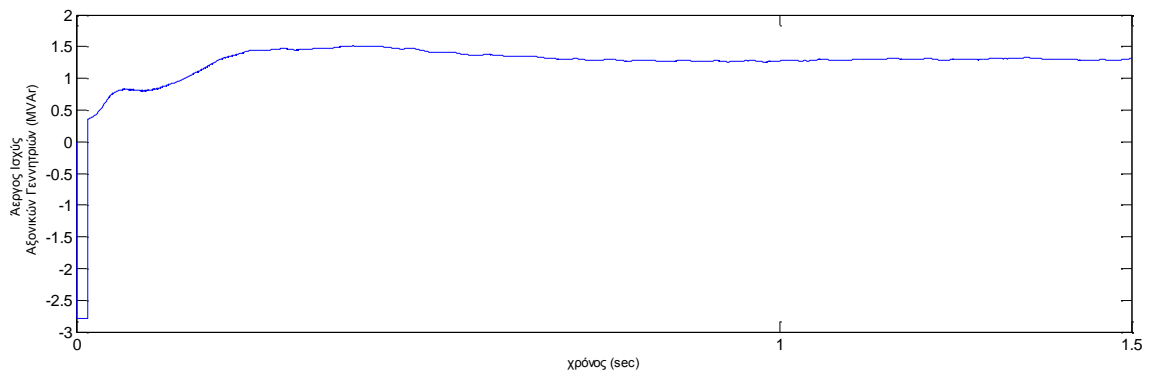
Σχήμα 5.28 Ενεργός ισχύς γεννητριών νηζέλ (MW)



Σχήμα 5.29 Αεργός ισχύς γεννητριών νηζέλ (MVar)



Σχήμα 5.30 Ενεργός ισχύς αξονικής γεννήτριας (MW)



Σχήμα 5.31 Άεργος ισχύς αξονικής γεννήτριας (MVar)

5.3 Κατάσταση έκτακτης ανάγκης – απομονωμένη λειτουργία αξονικών γεννητριών

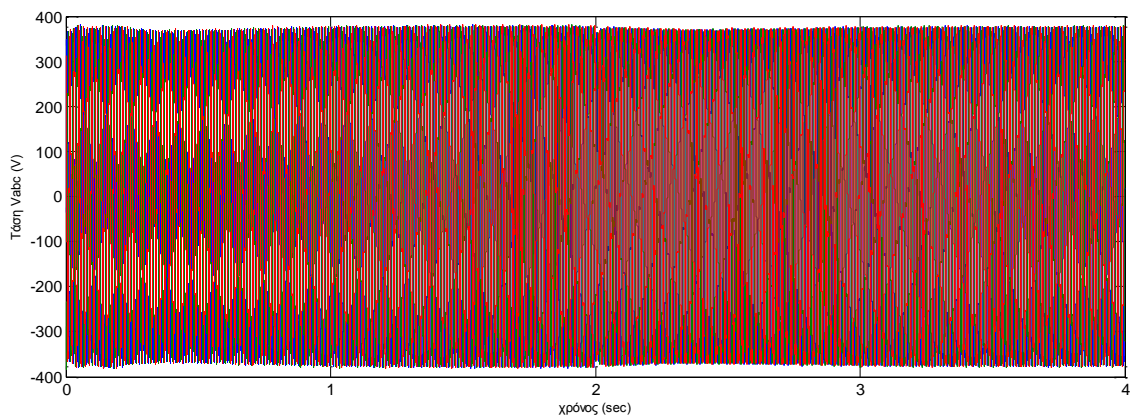
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που αφορούν στο **σενάριο έκτακτης ανάγκης** κατά το οποίο ως πηγή ισχύος χρησιμοποιούνται αποκλειστικά οι αξονικές γεννήτριες. Η συγκεκριμένη προσομοίωση έχει **διάρκεια 4 δευτερόλεπτα** με την είσοδο στο σύστημα του φορτίου των προπελών για τη **πραγματοποίηση ελιγμών στα 2 δευτερόλεπτα**. Το φορτίο αυτό αντιστοιχεί στο **32%** του φορτίου που εξυπηρετούν οι αξονικές γεννήτριες έως τα 2 δευτερόλεπτα. Επίσης στα **3 δευτερόλεπτα** πραγματοποιείται **αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των αξονικών γεννητριών κατά 10%**. Η ενεργός και άεργος ισχύς των φορτίων του συστήματος του πλοίου σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης προέρχονται από τα δεδομένα του ισολογισμού του πλοίου και δίνονται αναλυτικά στον πίνακα 5.3.

Καταναλωτές	Ενεργός ισχύς (KW)	Άεργος ισχύς (KVar)
Κέντρα ελέγχου κινητήρων (MCCs)	587.4	364.188
Καταναλωτές συνδεδεμένοι απευθείας στα 440 V	195.7	121.33
Καταναλωτές συνδεδεμένοι με μετασχηματιστές στα 440 ή 230 V	68.9	36.84
Πλευρικοί προωστήριοι μηχανισμοί	275.9	171.058

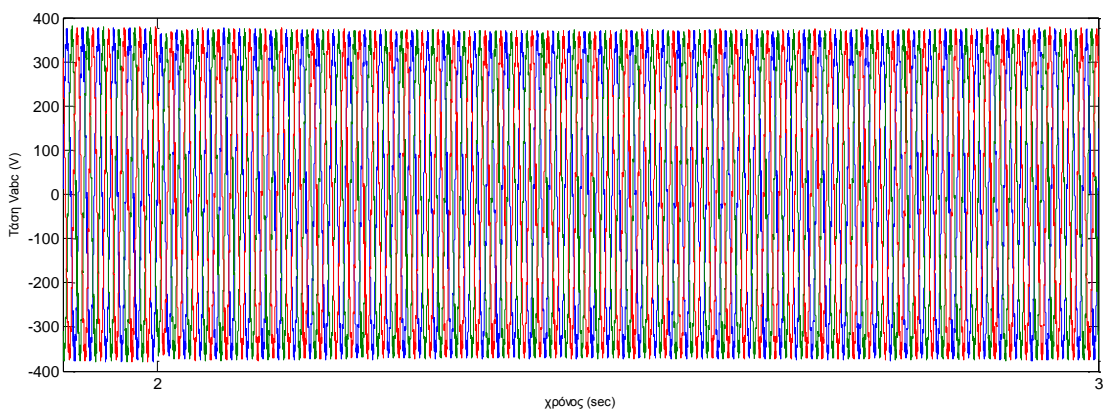
Πίνακας 5.3 Φορτία συστήματος

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ακολουθούν στη συνέχεια.

Στο σχήμα 5.32 παρουσιάζεται η τάση του δικτύου και στο σχήμα 5.33 το ρεύμα στην έξοδο της αξονικής γεννήτριας. Από το σχήμα 5.32 φαίνεται πως η πτώση της τάσης είναι της τάξης του 2% με την τάση να σταθεροποιείται στην ονομαστική της τιμή σε χρόνο ενός δευτερολέπτου, με τα όρια αυτά να είναι αρκετά χαμηλότερα από τις προδιαγραφές ($\pm 16\%$, 2 δευτερόλεπτα) [11]. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία του ελέγχου της αξονικής γεννήτριας καθώς δεδομένης της απουσίας των γεννητριών ντήζελ και των αυτόματων ρυθμιστών τάσης, το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου είναι ο μοναδικός υπεύθυνος για τη διατήρηση της τάσης στην ονομαστικής της τιμή, μέσω της έγχυσης άεργου ισχύος στο δίκτυο. Από τα σχήματα 5.34 και 5.35, στα οποία απεικονίζεται η αρμονική ανάλυση των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος, προκύπτει συνολική αρμονική παραμόρφωση για τη τάση 2.74% και για το ρεύμα 2.46%. Και στις δυο περιπτώσεις η παραμόρφωση είναι μικρότερη από το όριο 5% [11]. Στο σχήμα 5.36 απεικονίζεται η συχνότητα του δικτύου. Κατά την εκκίνηση, η συχνότητα παρουσιάζει μέγιστη διακύμανση 1.1% ενώ σταθεροποιείται στην ονομαστική της τιμή σε 0.35 δευτερόλεπτα. Η εμφάνιση του μεταβατικού φαινομένου επηρεάζει ελάχιστα τη συχνότητα η μεταβολή της οποίας περιορίζεται στο -0.2% για να σταθεροποιηθεί σε 0.18 δευτερόλεπτα. Επιβεβαιώνεται έτσι η λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου όσον αφορά τη διατήρηση της τάσης και της συχνότητας του δικτύου στις ονομαστικές τους τιμές.



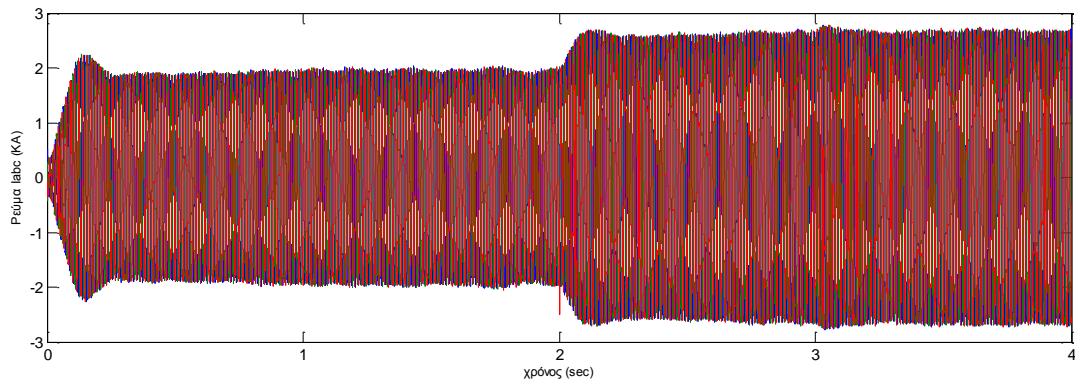
(α)



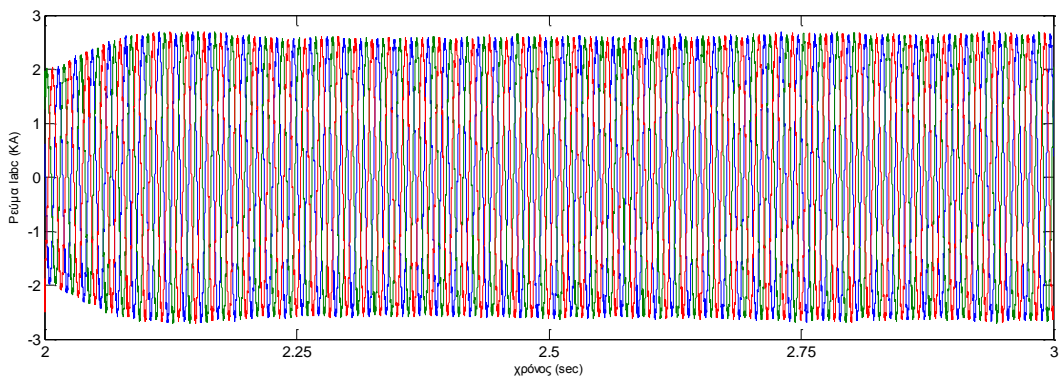
(β)

Σχήμα 5.32 Φασική τάση V_{abc} στην έξοδο της αξονικής γεννήτριας (V)

α) 0-4 sec β) 1.9 - 3 sec



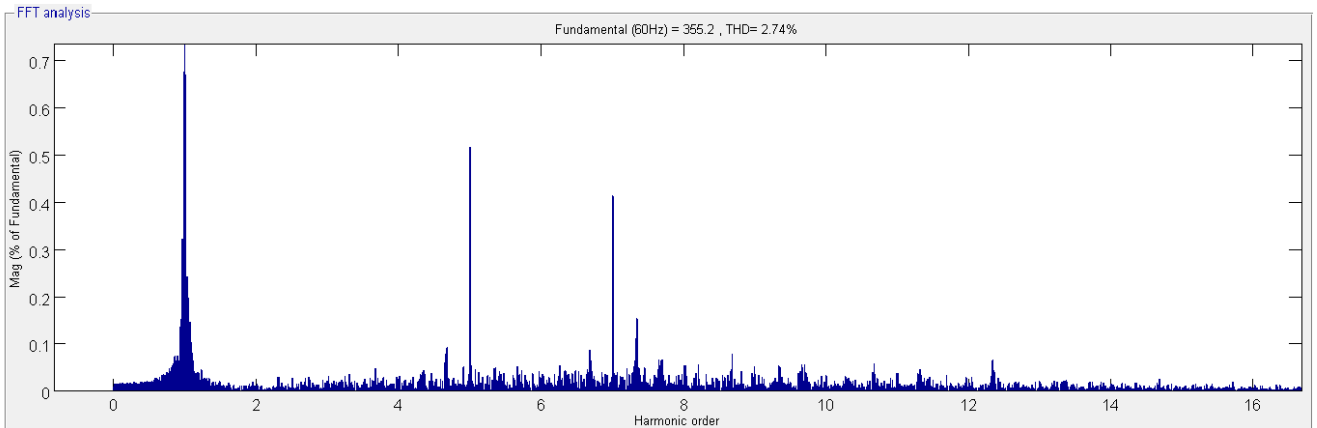
(α)



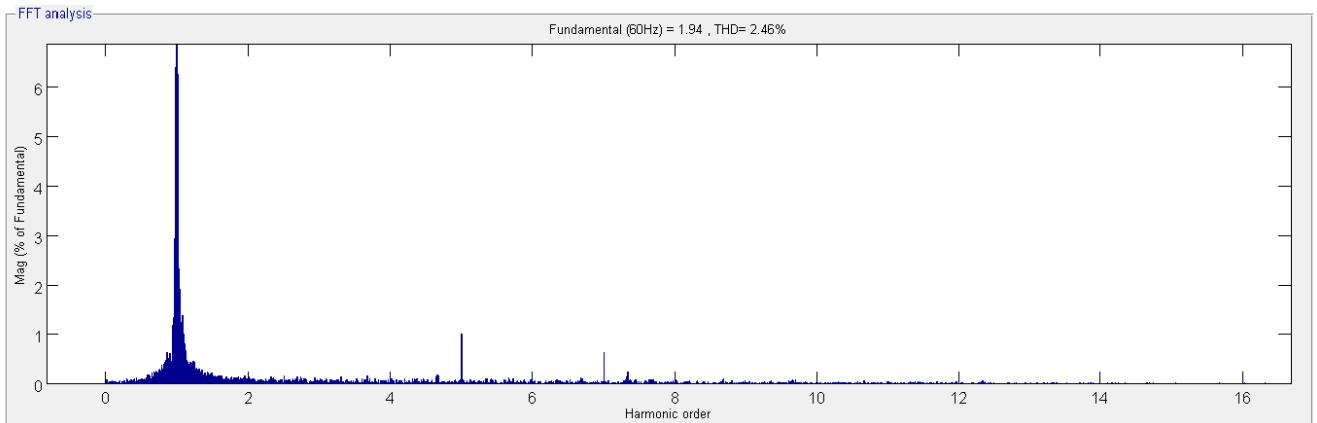
(β)

Σχήμα 5.33 Ρεύμα I_{abc} στην έξοδο της αξονικής γεννήτριας (kA)

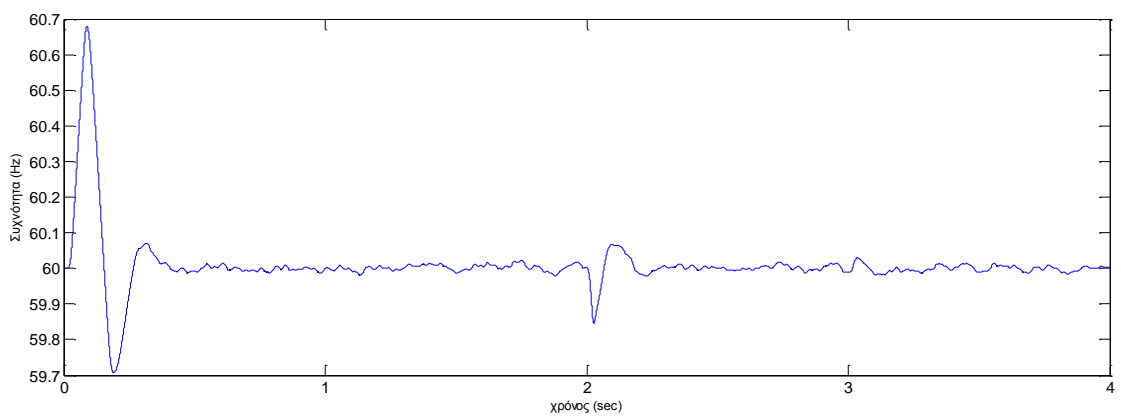
α) 0-4 sec β) 2- 3 sec



Σχήμα 5.34 Ανάλυση αρμονικών τάσης



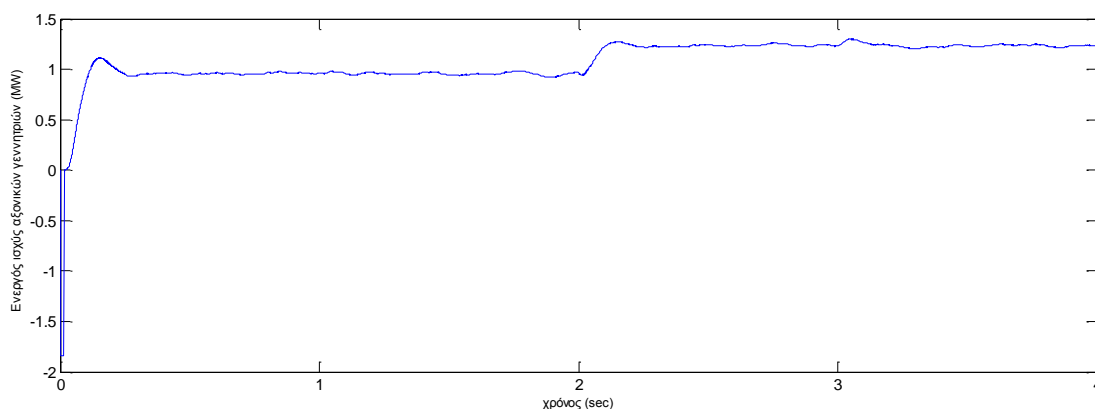
Σχήμα 5.35 Ανάλυση αρμονικών ρεύματος



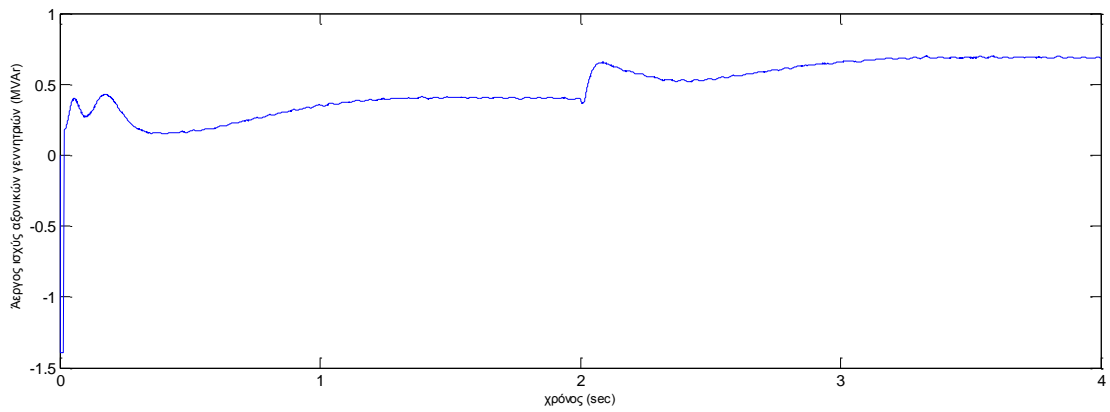
Σχήμα 5.36 Συχνότητα δικτύου πλοίου (Hz)

Αποκρίσεις αξονικών γεννητριών:

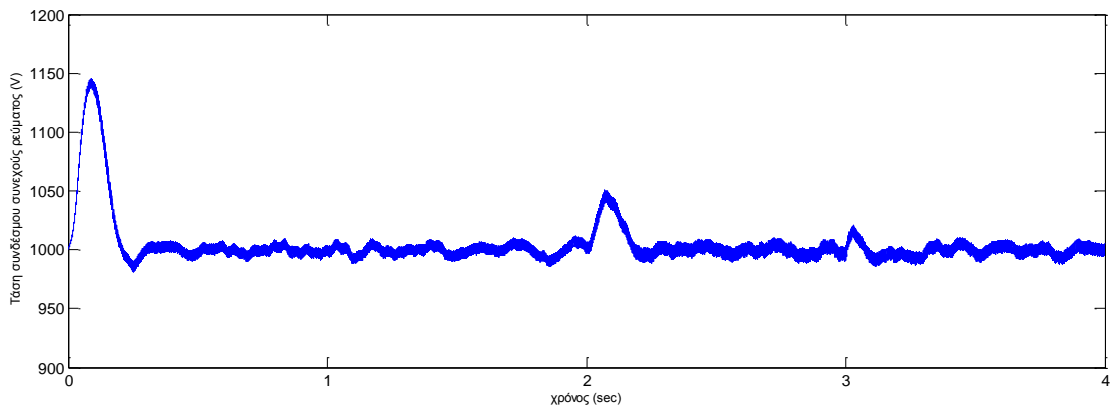
Οι μετρήσεις της ενεργού και άεργου ισχύος στην έξοδο της αξονικής γεννήτριας παρουσιάζονται στα σχήματα 5.37 και 5.38. Η ενεργός ισχύς με την οποία τροφοδοτεί η αξονική γεννήτρια το δίκτυο του πλοίου είναι σύμφωνη με τις τιμές αναφοράς που έχουν δοθεί ως είσοδοι στο μοντέλο, ώστε η παραγωγή ενεργού ισχύος να ακολουθεί την αντίστοιχη αύξηση του φορτίου του πλοίου. Η ορθή λειτουργία του ελεγκτή ισχύος φαίνεται επίσης στα σχήματα 5.41 και 5.42 όπου αποτυπώνονται οι μετρούμενες τιμές της ενεργού ισχύος και της ηλεκτρικής ροπής των αξονικών γεννητριών, οι οποίες ακολουθούν πιστά τις αντίστοιχες τιμές αναφοράς. Να σημειωθεί ότι η απόκριση του ελεγκτή ισχύος κατά την αύξηση της ταχύτητας της μηχανής στα 3 δευτερόλεπτα είναι άμεση καθώς ο ελεγκτής επαναφέρει την ισχύ στην τιμή αναφοράς σε 0.03 δευτερόλεπτα. Όσον αφορά τον έλεγχο του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου, με βάση το σχήμα 5.39, επιβεβαιώνεται ο έλεγχος της συνεχούς τάσης η οποία διατηρείται στη ονομαστική της τιμή. Οι μόνες μεταβολές παρατηρούνται κατά την εκκίνηση(+ 14%) και κατά το μεταβατικό(+5%) , με την τάση να επανέρχεται σε 0.2 δευτερόλεπτα. Όπως έχει προαναφερθεί, η διατήρηση της τάσης του δικτύου αποτελεί επίσης ένδειξη της σωστής λειτουργίας του ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από το σχήμα 5.38 στο οποίο φαίνεται πως το σύστημα των αξονικών γεννητριών, κατά την απουσία των γεννητριών ντήζελ, προσφέρει την απαιτούμενη από το δίκτυο άεργο ισχύ για τη διατήρηση της τάσης στην ονομαστική της τιμή με χρόνο απόκρισης 0.9 δευτερόλεπτα.



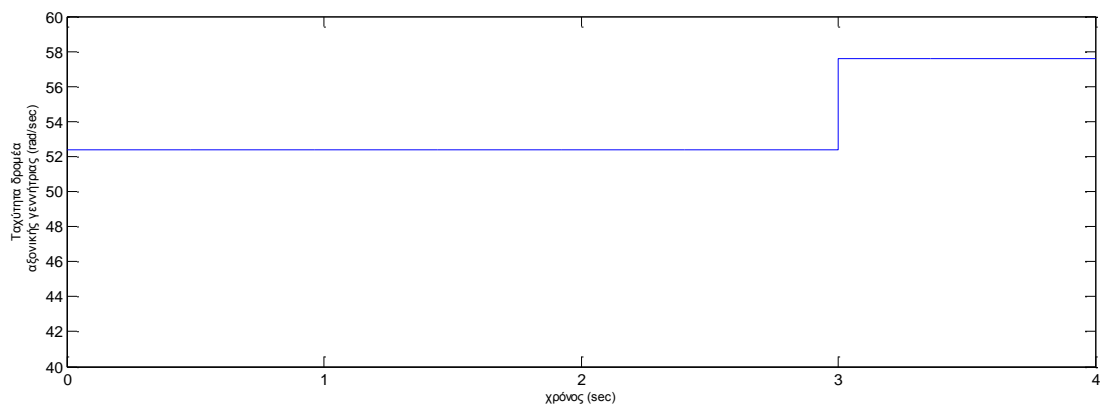
Σχήμα 5.37 Ενεργός ισχύς αξονικής γεννήτριας (MW)



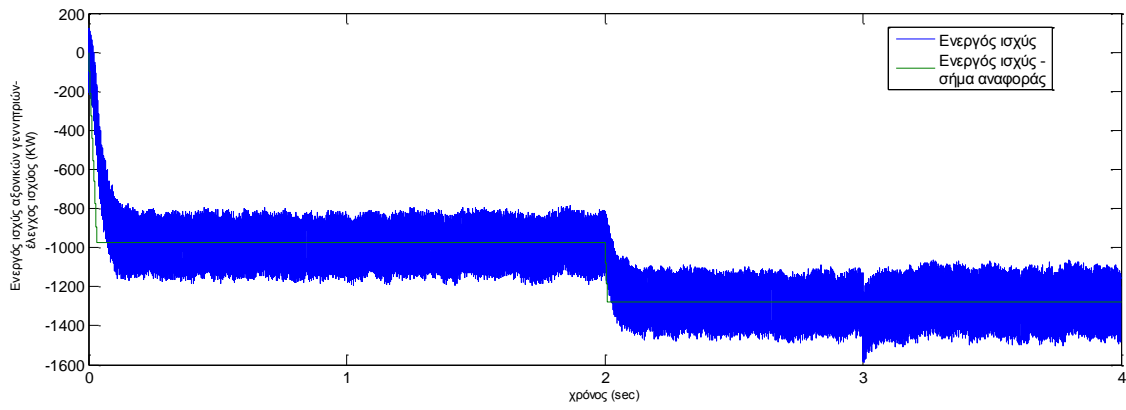
Σχήμα 5.38 Άεργος ισχύς αξονικής γεννήτριας (MVar)



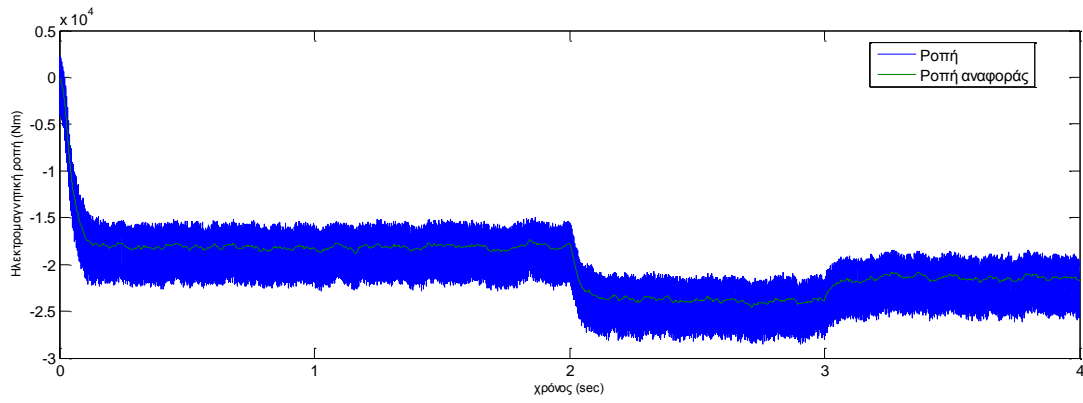
Σχήμα 5.39 Τάση συνδέσμου συνεχούς τάσης (V)



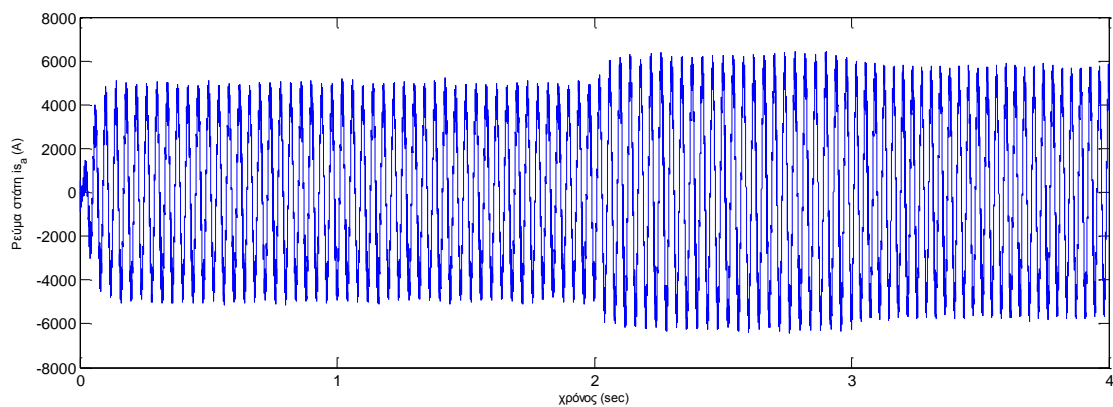
Σχήμα 5.40 Ταχύτητα άξονα-δρομέα αξονικής γεννήτριας (rad/sec)



Σχήμα 5.41 Ενεργός ισχύς αξονικής γεννήτριας (KW)



Σχήμα 5.42 Ηλεκτρομαγνητική ροπή αξονικής γεννήτριας (Nm)



Σχήμα 5.43 Ρεύμα στάτη αξονικής γεννήτριας, φάση a (A)

5.4. Κατάσταση έκτακτης ανάγκης – χρήση αξονικής γεννήτριας ως κινητήρα

Στην παράγραφο αυτή επιχειρείται η μελέτη του συστήματος του πλοίου σε περίπτωση **έκτακτης ανάγκης** κατά την οποία εξαιτίας βλάβης της κύριας μηχανής γίνεται **χρήση της αξονικής γεννήτριας ως κινητήρα**, μια ενέργεια που είναι απόλυτα επιτρεπτή σύμφωνα με το νέο ευέλικτο σύστημα ελέγχου που αναπτύχθηκε στην εργασία αυτή και παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4. Στην παρούσα κατάσταση λειτουργίας ισχύουν τα δεδομένα σχετικά με τις τιμές ενεργού και άεργου ισχύος για τη λειτουργία έκτακτης ανάγκης, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.2. Παρόλα αυτά ως πηγή ισχύος τώρα χρησιμοποιούνται οι γεννήτριες ντήζελ ενώ η αξονική γεννήτρια, η οποία πλέον χρησιμοποιείται ως κινητήρας, αποτελεί ένα επιπλέον φορτίο. Η ταχύτητα του κινητήρα καθώς και οι τιμές ροπής που εφαρμόζονται στον άξονα του παρουσιάζονται στο πίνακα 5.4. Οι μεταβολές στις τιμές της ροπής προσομοιώθηκαν με βάση δεδομένα που χρησιμοποιούνται από τη σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών για τη πραγματοποίηση σχετικών πειραμάτων[13]. Η ταχύτητα επιλέχθηκε περίπου στο μισό της ονομαστικής ταχύτητας σε φυσιολογικές συνθήκες (500 ΣΑΛ), δεδομένου ότι η ισχύς της αξονικής μηχανής αντιστοιχεί στο 8 % της ονομαστικής ισχύος των κύριων μηχανών που είναι υπεύθυνες για την κίνηση του πλοίου.

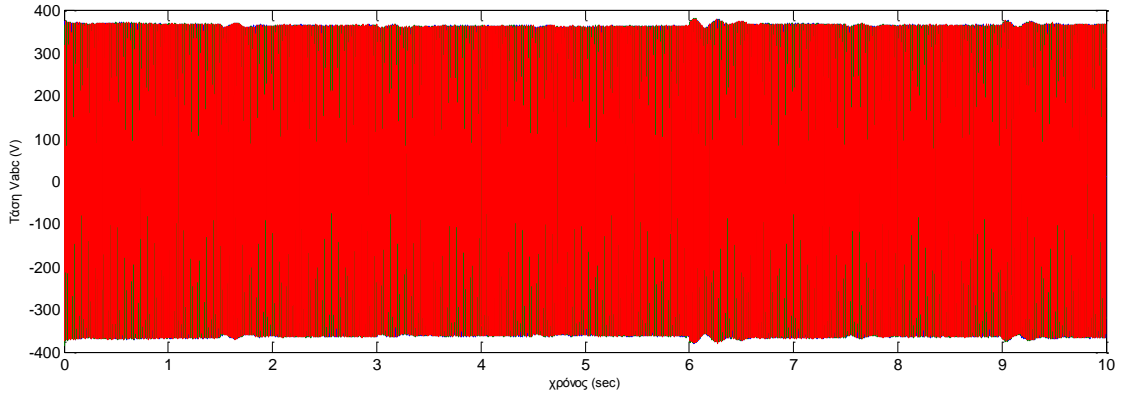
Χρόνος (sec)	0-1.5	1.5-3	3-4.5	4.5-6	6-7.5	7.5-9	9-10
Ροπή άξονα (Nm)	0.1*85000	0.5*85000	0.75*85000	0.9*85000	0.25*85000	0.5*85000	0
Ταχύτητα άξονα(RPM)	215	215	215	215	215	215	215

Πίνακας 5.4 Ροπή άξονα - Ταχύτητα άξονα

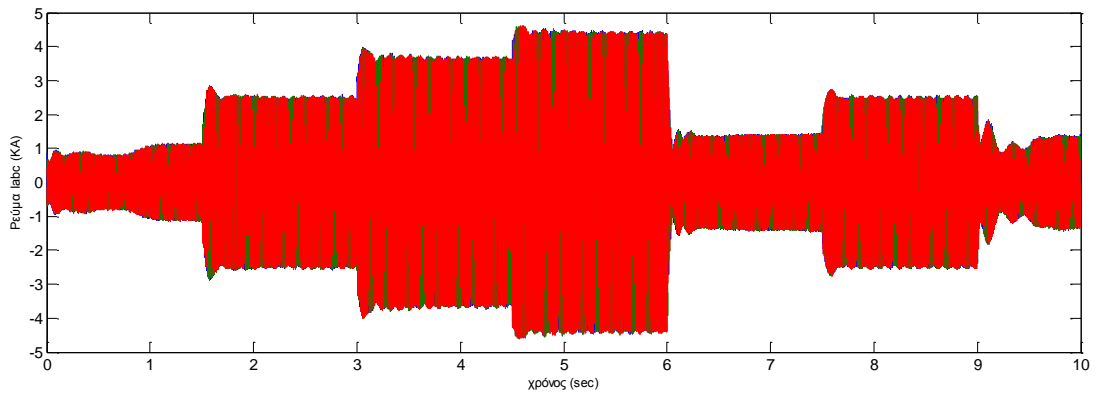
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν.

Στα σχήματα 5.44 και 5.45 απεικονίζονται η τάση του δικτύου και το ρεύμα στην έξοδο του αξονικού κινητήρα. Σύμφωνα με το σχήμα 5.44 η τάση διατηρείται σταθερή και στη περίπτωση αυτή παρά τις μεταβολές στο φορτίο της αξονικής μηχανής, με την πτώση τάσης να περιορίζεται στο 1.8% της ονομαστικής τιμής. Η συνύπαρξη επομένως του έλεγχου του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου με τον έλεγχο των αυτόματων ρυθμιστών τάσης δεν παρουσιάζει κάποιο πρόβλημα όσον αφορά το αποτέλεσμα που είναι η διατήρηση της τάσης του δικτύου στα επιθυμητά επίπεδα. Το ρεύμα, όπως προκύπτει από το σχήμα 5.45, μεταβάλλεται σύμφωνα με τις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις του κινητήρα σε ισχύ. Η συνολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης

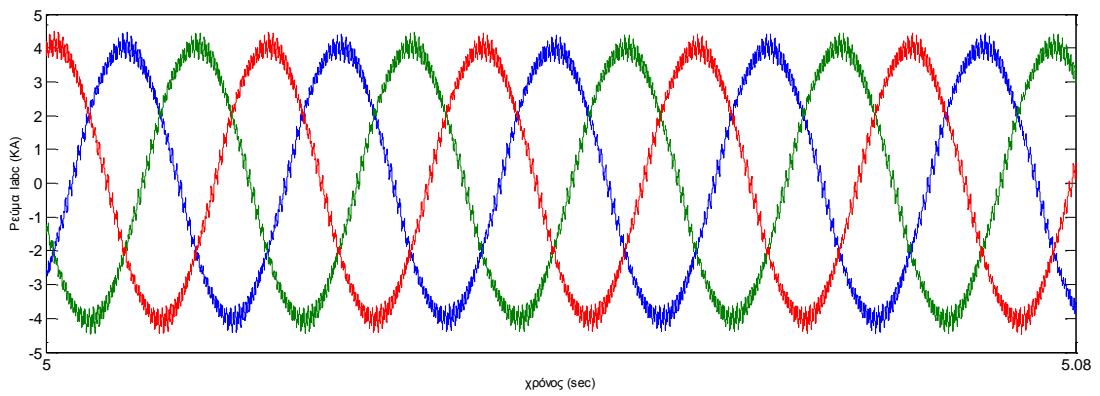
υπολογίζεται 0.97% ενώ του ρεύματος 5.43% παρουσιάζοντας αύξηση, η οποία ξεπερνά το όριο του 5% (σχήμα 5.33, 5.34).



Σχήμα 5.44 Φασική τάση V_{abc} στην είσοδο του κινητήρα (V)



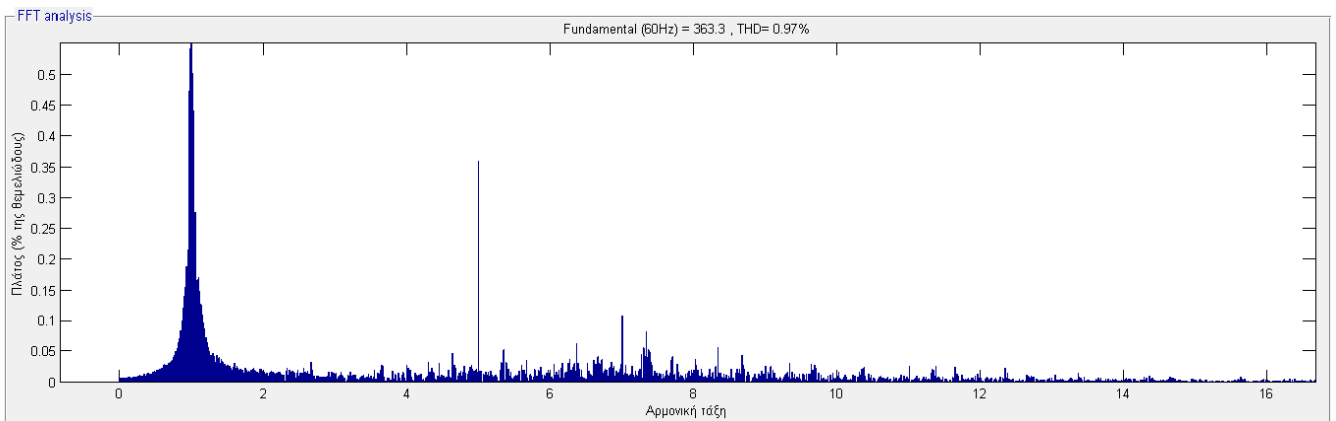
(α)



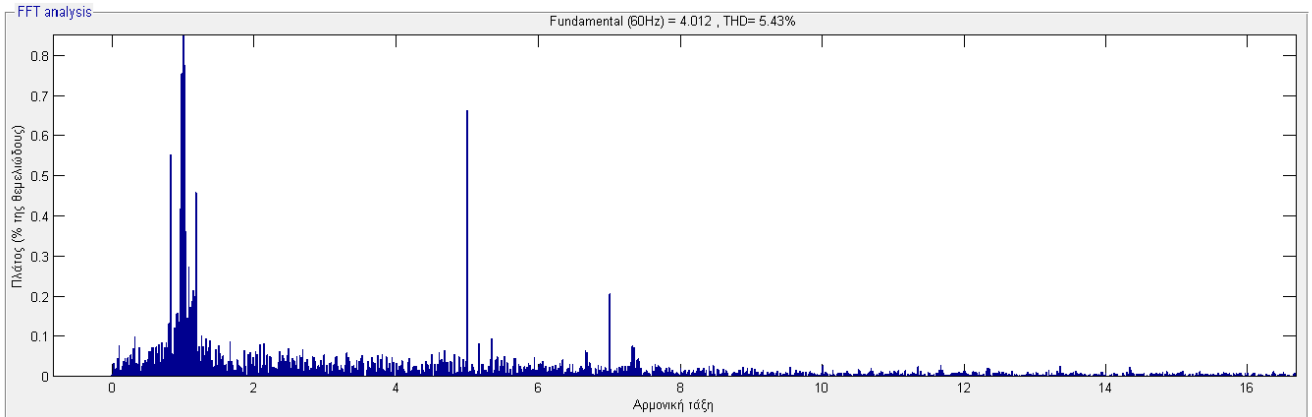
(β)

Σχήμα 5.45 Ρεύμα I_{abc} στην είσοδο του κινητήρα (KA)

α) 0-4 sec β) 5- 5.08 sec



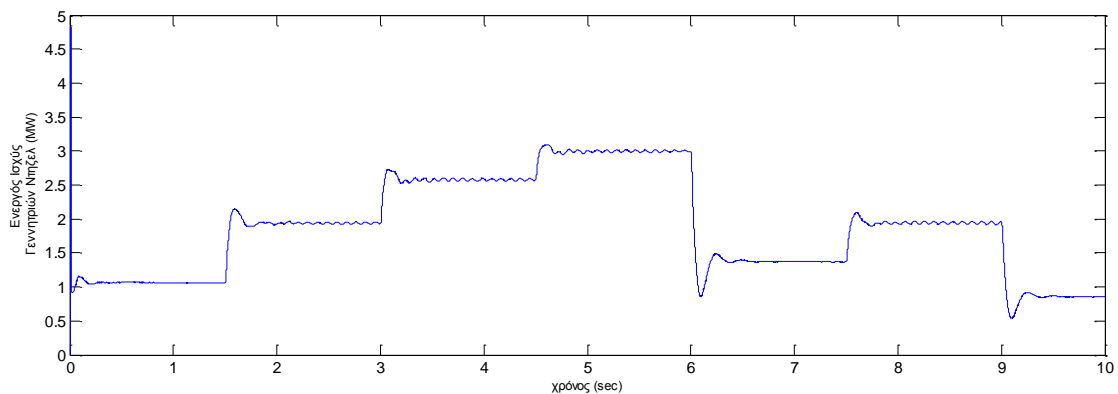
Σχήμα 5.46 Ανάλυση αρμονικών τάσης



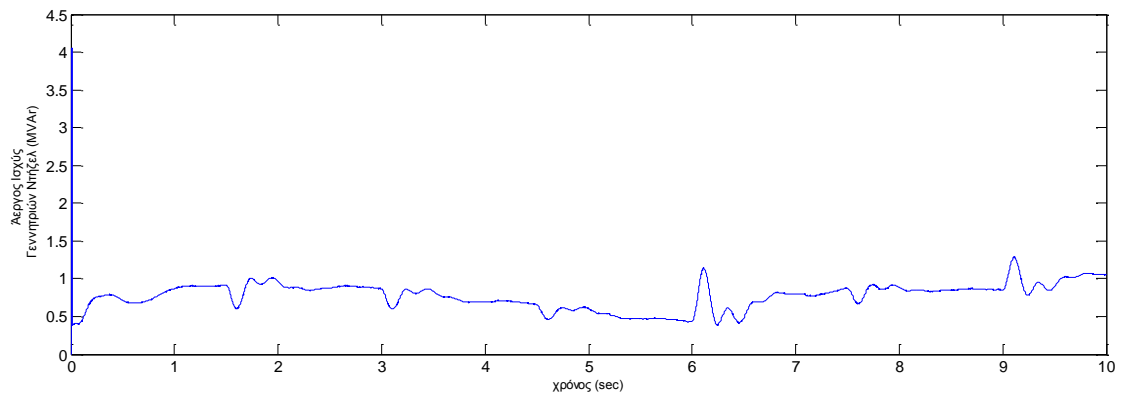
Σχήμα 5.47 Ανάλυση αρμονικών ρεύματος

Αποκρίσεις γεννητριών ντήζελ:

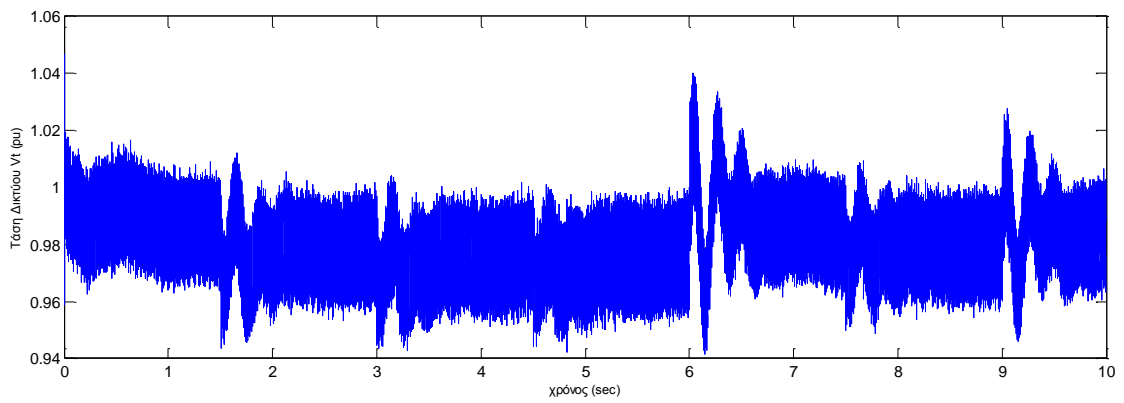
Οι αποκρίσεις των γεννητριών ντήζελ ως προς τις απαιτήσεις του συστήματος σε ισχύ δίνονται στα σχήματα 5.48 και 5.49 όπου παρουσιάζεται η μεταβαλλόμενη ενεργός και άεργος ισχύς που προσφέρουν οι γεννήτριες στο δίκτυο. Η λειτουργία του αυτόματου ρυθμιστή τάσης επιβεβαιώνεται στα σχήματα 5.50 και 5.51, με τον χρόνο απόκρισης να υπολογίζεται 0.8 δευτερόλεπτα. Ο έλεγχος του ρυθμιστή στροφών ο οποίος εξετάζεται στα σχήματα 5.52 και 5.53 επιτυγχάνει τη σταθεροποίηση της ταχύτητας με χρόνο απόκρισης 1.2 δευτερόλεπτα. Συνεπώς και η συχνότητα του δικτύου (σχήμα 5.54) ελέγχεται αποτελεσματικά καθώς η μέγιστη παρατηρούμενη μεταβολή είναι της τάξης του 0.6%.



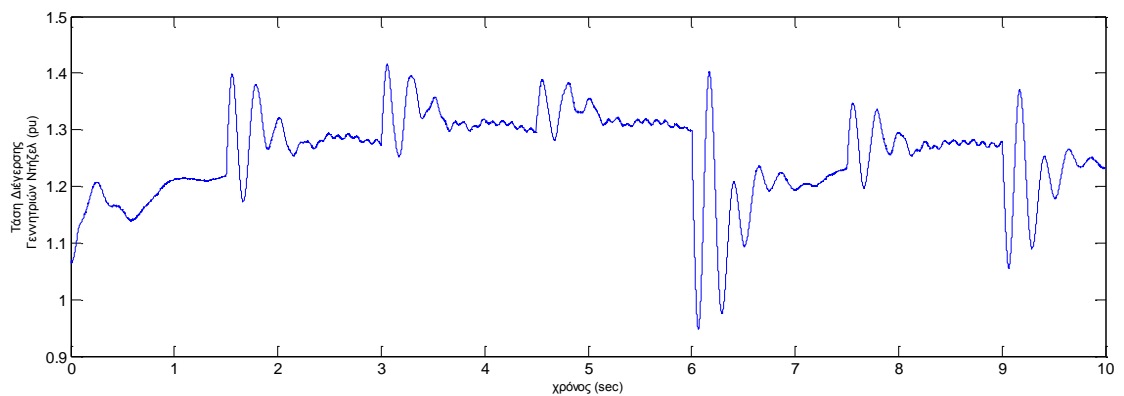
Σχήμα 5.48 Ενεργός ισχύς γεννητριών ντήζελ (MW)



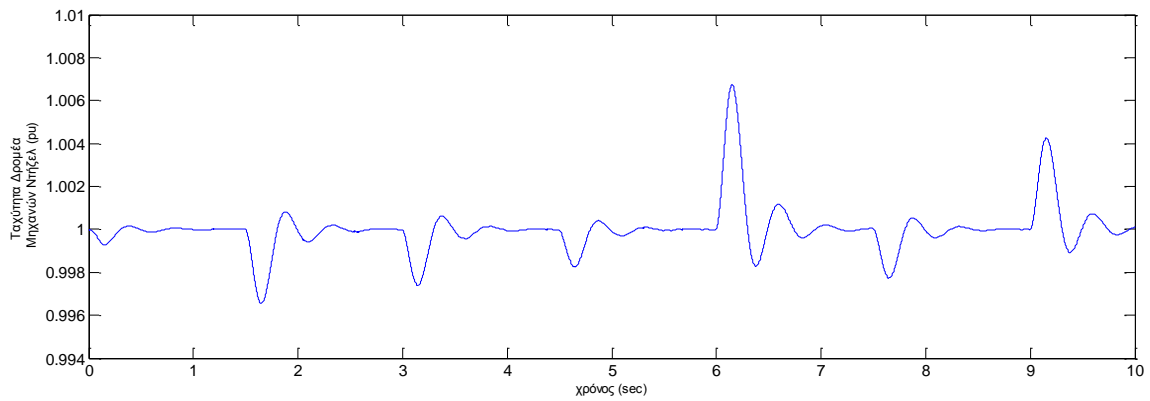
Σχήμα 5.49 Άεργος ισχύς γεννητριών ντήζελ (MVA)



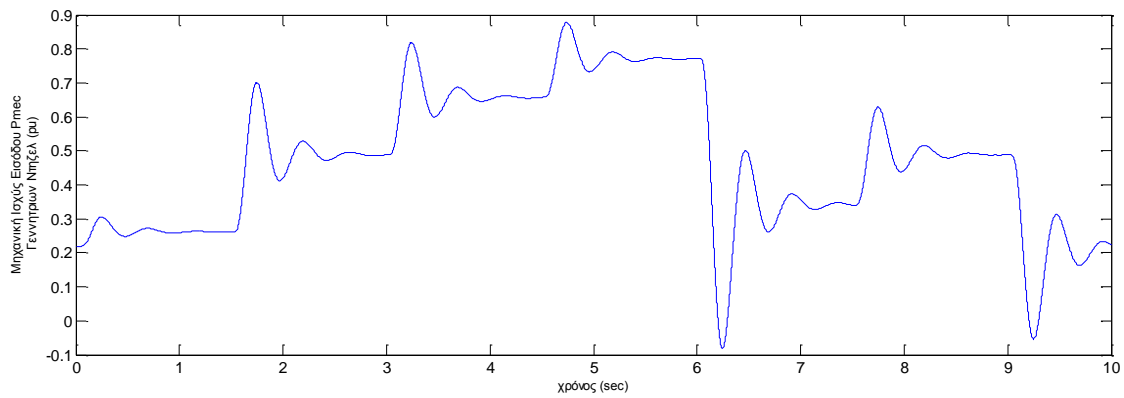
Σχήμα 5.50 Τάση στην έξοδο των γεννητριών ντήζελ – Σήμα εισόδου στον αυτόματο ρυθμιστή τάσης (αμ)



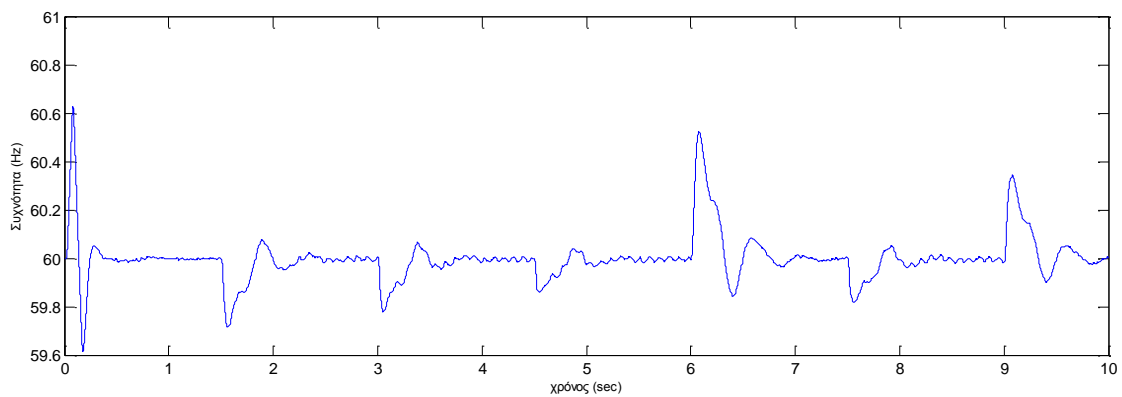
Σχήμα 5.51 Τάση διέγερσης-είσοδος Vf σύγχρονης μηχανής (αμ)



Σχήμα 5.52 Ταχύτητα δρομίδα σύγχρονης γεννήτριας – Σήμα εισόδου στο ρυθμιστή στροφών (αμ)



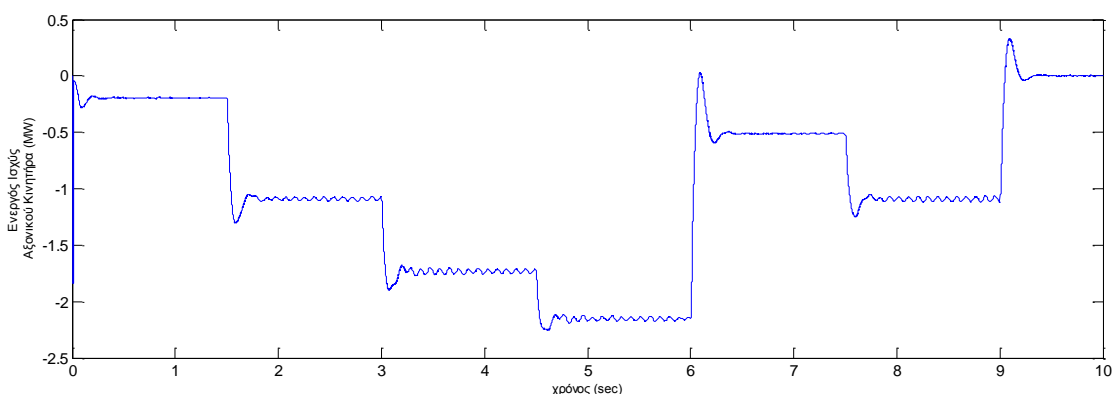
Σχήμα 5.53 Μηχανική ισχύς εξόδου μηχανής ντιζελ- είσοδος P_{mec} σύγχρονης γεννήτριας (αμ)



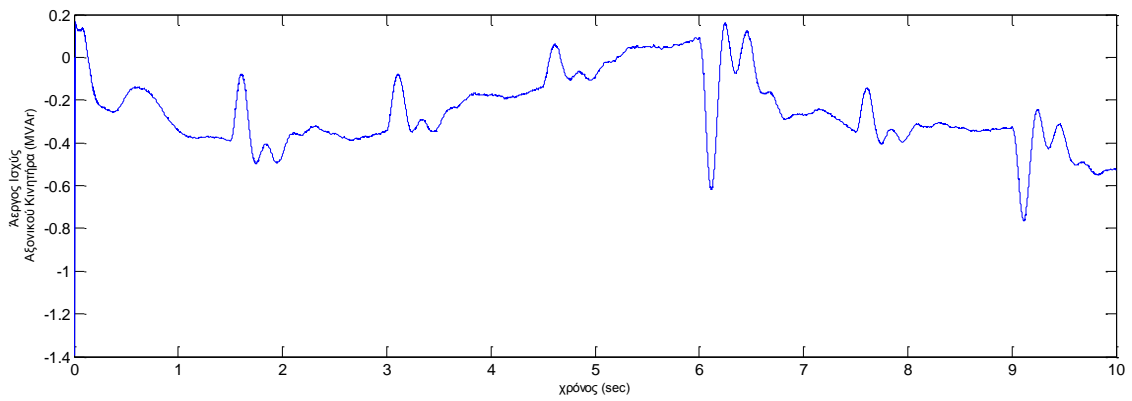
Σχήμα 5.54 Συχνότητα δικτύου πλοίου (Hz)

Αποκρίσεις αξονικού κινητήρα:

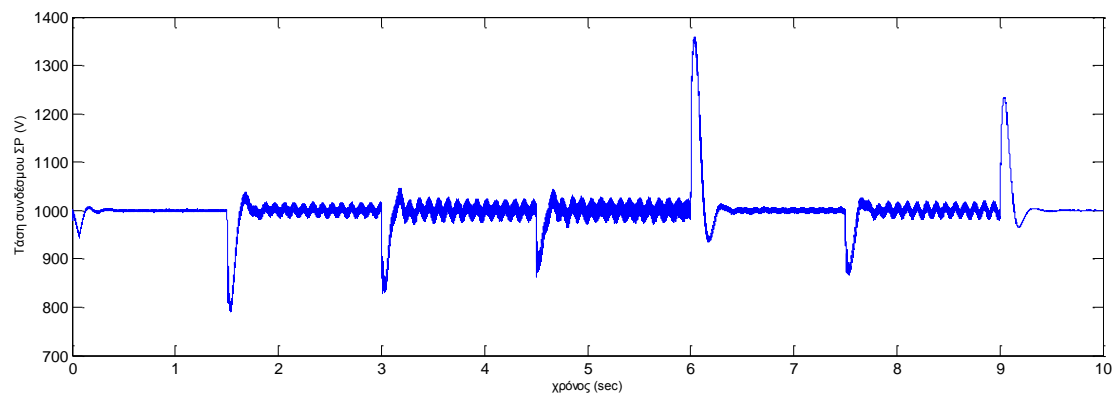
Οι απαιτήσεις του αξονικού κινητήρα σε ισχύ, ενεργό και άεργο παρουσιάζονται στο σχήμα 5.55 και 5.56. Όσον αφορά στον έλεγχο του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου αξίζει να σημειωθεί ότι παρά την αντίστροφη ροή ισχύος, εξακολουθεί να διατηρεί την συνεχή τάση σταθερή (μέγιστη διακύμανση 2.5% σε σταθερή λειτουργία, 36% μέγιστη ανύψωση τάσης με διάρκεια 0.25 δευτερόλεπτα στη μεταβατική κατάσταση) σύμφωνα με το σχήμα 5.57, ενώ η ροή άεργου ισχύος μεταβάλλεται συνεχώς εξαιτίας της μεταβολής του φορτίου ώστε το σύστημα ελέγχου σε συνδυασμό με το σύστημα διέγερσης των γεννητριών ντήζελ να καταφέρνουν να διατηρούν σταθερή τη τάση του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί πως κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ο αξονικός κινητήρας λειτουργεί κατά κύριο λόγο με επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Κατά το χρονικό διάστημα από 4.5 έως 6 δευτερόλεπτα μεγιστοποιούνται οι απαιτήσεις ισχύος του κινητήρα που ικανοποιούν οι γεννήτριες ντήζελ με αποτέλεσμα την αδυναμία των γεννητριών να αναλάβουν εξολοκλήρου την διατήρηση της τάσης μέσω έγχυσης άεργου ισχύος. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα ελέγχου των αξονικών κινητήρων προσφέρει την επιπλέον άεργο ισχύ στο δίκτυο. Τέλος, όσον αφορά στον έλεγχο στην πλευρά της μηχανής, να σημειωθεί ότι και έπειτα από την τροποποίηση του ελεγκτή ισχύος και τη μετατροπή του σε ελεγκτή ταχύτητας, αυτός λειτουργεί απροβλημάτιστα. Σύμφωνα με το σχήμα 5.59 η ταχύτητα ακολουθεί τη σταθερή τιμή αναφοράς (215 RPM) και σταθεροποιείται σε αυτή έπειτα από τις φυσιολογικές επιβραδύνσεις ή επιταχύνσεις κατά την αντίστοιχη αύξηση ή μείωση της επιβαλλόμενης στον άξονα ροπής (σχήμα 5.58). Η μέγιστη επιβράδυνση υπολογίζεται στις 50 ΣΑΛ με την ταχύτητα να επανέρχεται σε 0.04 δευτερόλεπτα, ενώ η μέγιστη επιτάχυνση στις 81 ΣΑΛ με την ταχύτητα να επανέρχεται σε 0.06 δευτερόλεπτα.



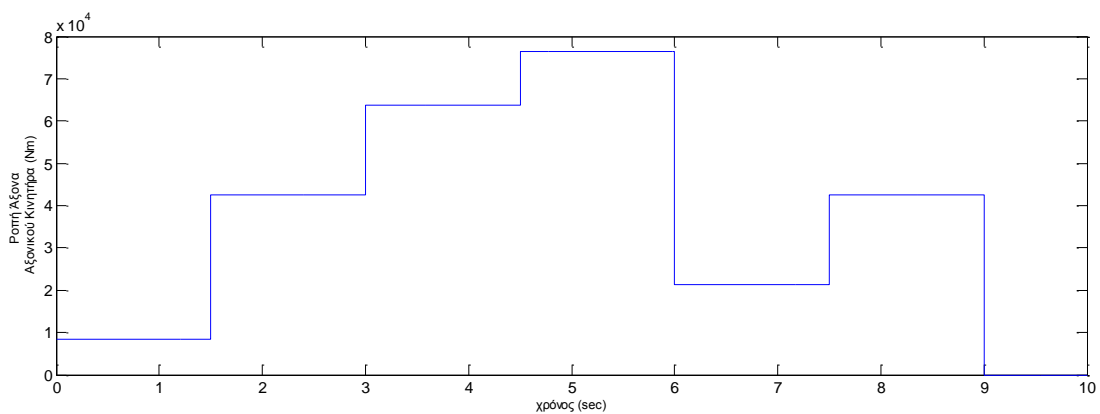
Σχήμα 5.55 Ενεργός ισχύς αξονικού κινητήρα (MW)



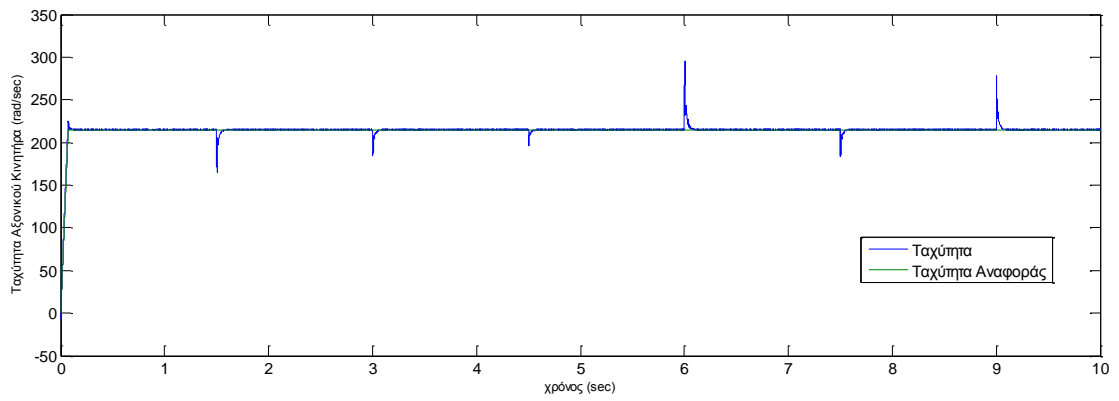
Σχήμα 5.56 Αεργός ισχύς αξονικού κινητήρα (MVAr)



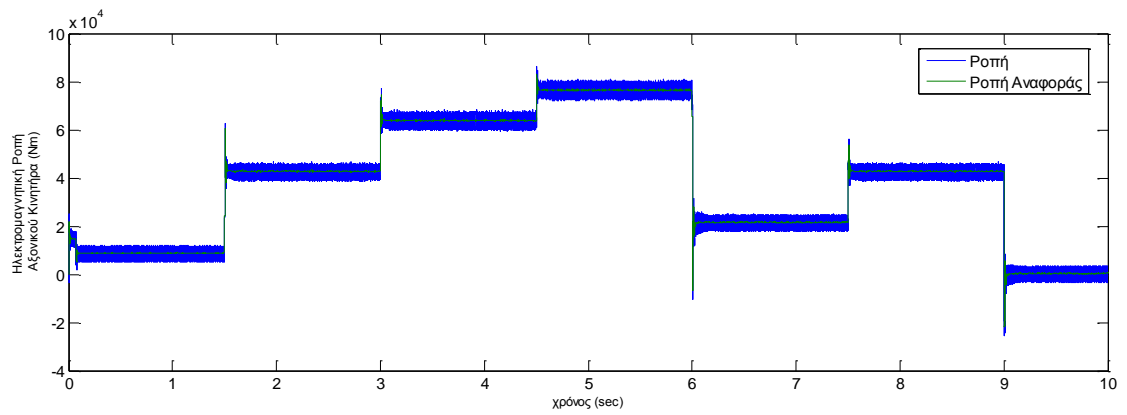
Σχήμα 5.57 Τάση συνδέσμου συνεχούς τάσης (V)



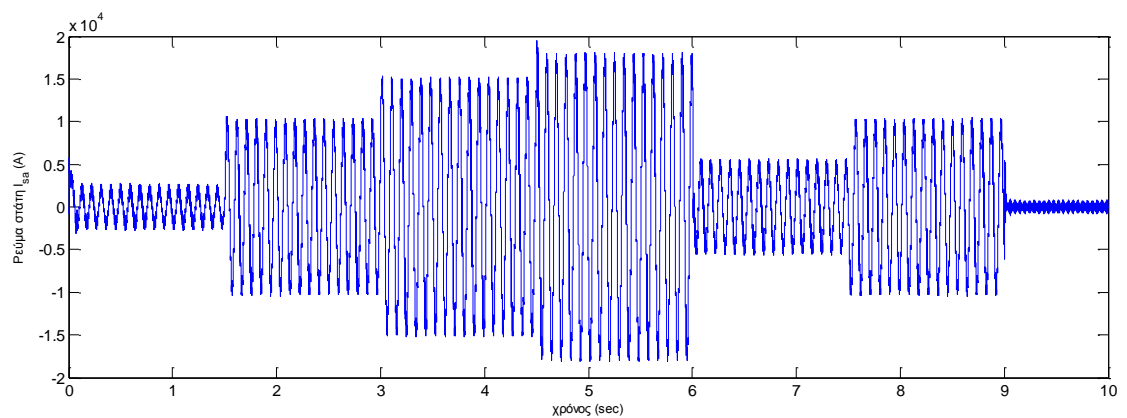
Σχήμα 5.58 Ροπή στον άξονα- δρομέα αξονικού κινητήρα (Nm)



Σχήμα 5.59 Ταχύτητα δρομέα αξονικού κινητήρα (RPM)



Σχήμα 5.60 Ηλεκτρομαγνητική ροπή αξονικού κινητήρα (Nm)



Σχήμα 5.61 Ρεύμα στάτη αξονικού κινητήρα, φάση a (A)

Κεφάλαιο 6 : Αποτίμηση ωφελειών λειτουργίας της αξονικής γεννήτριας με το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου

Η λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου αξονικών γεννητριών που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4, επιβεβαιώθηκε μέσω των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο κεφάλαιο 5. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαίωσαν την ικανότητα του συστήματος να ελέγχει την τάση και τη συχνότητα του δικτύου αλλά και την ποσότητα ενεργού ισχύος που παρέχει η αξονική γεννήτρια στο δίκτυο ή την ταχύτητα με την οποία κινείται όταν λειτουργεί ως κινητήρας. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι ωφέλειες της εφαρμογής του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου της αξονικής γεννήτριας όσον αφορά στη κατανάλωση καυσίμου. Αρχικά παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της κατανάλωσης καυσίμου των μηχανών του πλοίου. Στη συνέχεια υπολογίζεται η κατανάλωση του μηχανών, στο πλαίσιο ενός τυπικού ταξιδιού, σύμφωνα με τα δεδομένα που προκύπτουν από τις μετρήσεις της πραγματικής λειτουργίας του πλοίου τα οποία παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 2. Ακολούθως, υπολογίζεται η ελάχιστη κατανάλωση που προκύπτει από την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου, καταλήγοντας στην αποτίμηση των ωφελειών για το προτεινόμενο σενάριο λειτουργίας σε σύγκριση με το πραγματικό σενάριο.

6.1. Υπολογισμός της κατανάλωσης των μηχανών του πλοίου

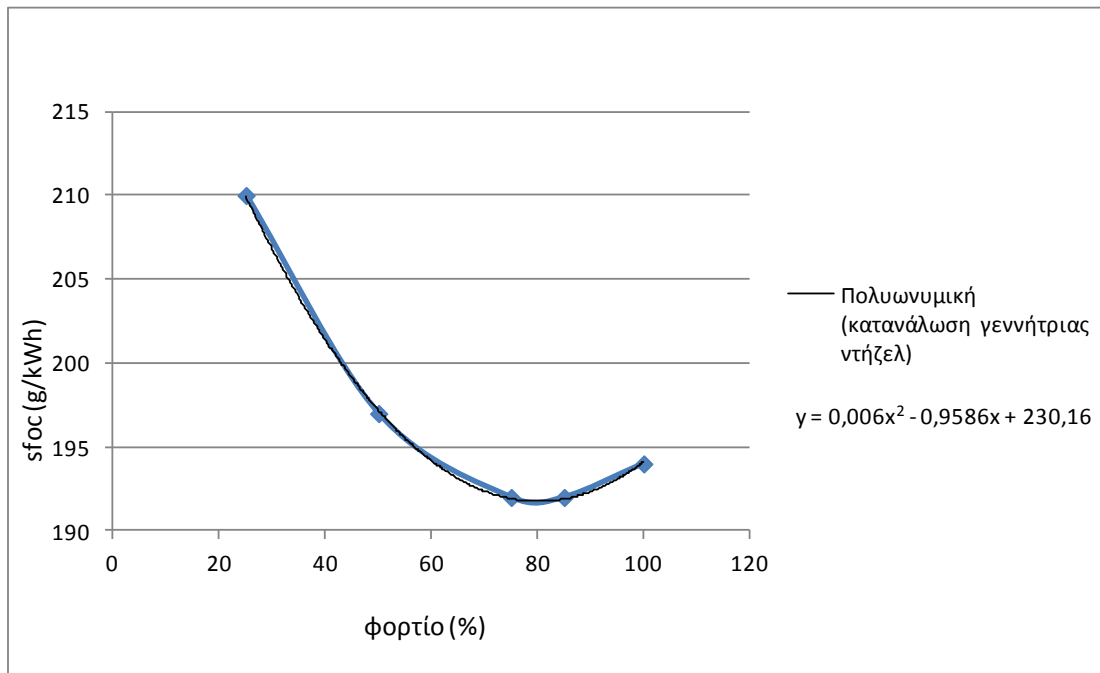
Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 2, το πλοίο διαθέτει συνολικά τέσσερις μηχανές ντήζελ της εταιρείας Wartsila (τύπου 12V46), οι οποίες συνδέονται ανά δύο με το αντίστοιχο γρανάζι στο μειωτήρα στροφών της εταιρείας Schelde. Η τροφοδοσία του πλοίου με ηλεκτρική ενέργεια γίνεται με τη βοήθεια τριών γεννητριών ντήζελ του οίκου MAN-BW (τύπου L28/32), ονομαστικής ισχύος 2100 kVA, ενώ υπάρχουν διαθέσιμες και δυο αξονικές γεννήτριες του οίκου ABB ονομαστικής ισχύος 2400 kVA και τέλος μια γεννήτρια ντήζελ εκτάκτου ανάγκης του οίκου CATERPILLAR ονομαστικής ισχύος 1125 kVA[5].

Από τα αντίστοιχα φυλλάδια των εταιριών βρέθηκαν οι τιμές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFOC g/kW) για διάφορες περιπτώσεις φόρτισης των μηχανών. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στο πίνακα που ακολουθεί:

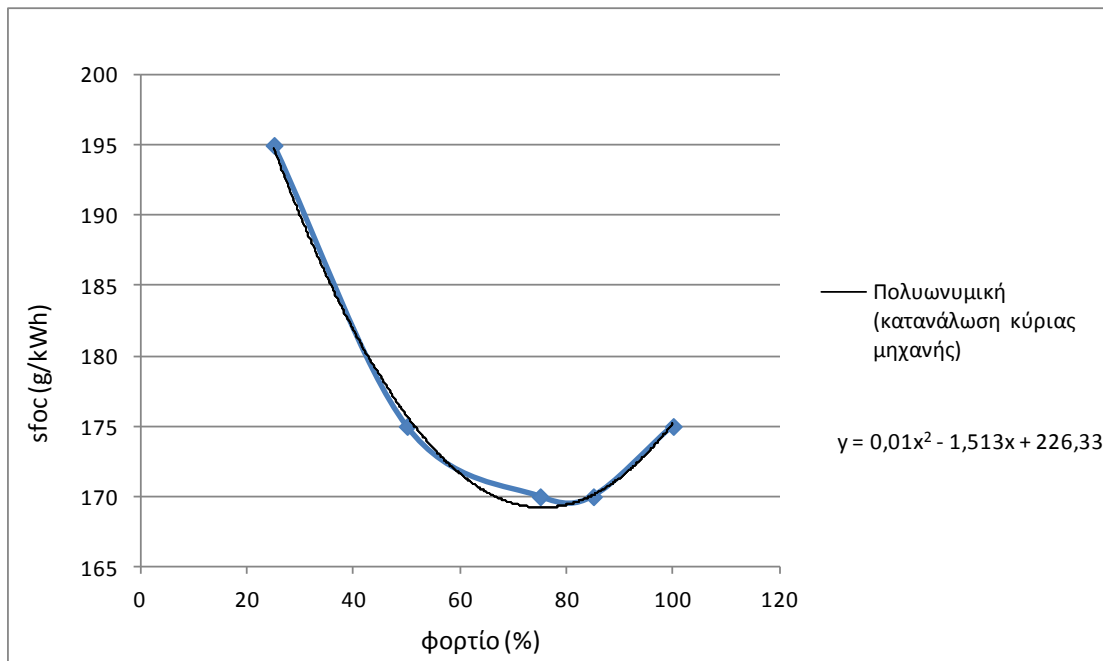
φορτίο μηχανής	Sfoc DG	Sfoc ME
%	g/kWh	g/kWh
100	194	175
85	192	170
75	192	170
50	197	175
25	210	195

Πίνακας 6.1 Ειδικές καταναλώσεις καυσίμου

Από τον παραπάνω πίνακα και με τη χρήση του excel προκύπτουν οι καμπύλες κατανάλωσης των μηχανών που παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα :



Σχήμα 6.1 Καμπύλη κατανάλωσης γεννήτριας ντήζελ.



Σχήμα 6.2 Καμπύλη κατανάλωσης κύριας μηχανής

Οι αντίστοιχες συναρτήσεις που δίνουν την κατανάλωση ανά φορτίο είναι

Για τις μηχανές ντήζελ : $y = 0.006x^2 - 0.9586x + 230.16$

Για τις κύριες μηχανές : $y = 0.01x^2 - 1.513x + 226.33$

Όπου y – η ειδική κατανάλωση καυσίμου σε g/kWh
 x – το φορτίο της μηχανής σε ποσοστό %.

6.2. Οικονομική αποτίμηση υπάρχοντος σεναρίου λειτουργίας

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στο πλοίο (παράγραφος 2.7), υπολογίστηκε ο μέσος όρος φόρτισης των γεννητριών για το υπάρχον σενάριο λειτουργίας :

- Λειτουργία πλοήγησης στη θάλασσα με 1 αξονική -1 ντήζελ (Γ3)

SG	DG
66,86%	73.25%

- Λειτουργία ελιγμών με 2 αξονικές – 3 ντήζελ (B2)

SG1	SG2	DG1	DG2	DG3
4.9%	8.3%	50%	50%	51%

Με στόχο τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου πρέπει να εκτιμηθεί το ποσοστό φόρτισης των κύριων μηχανών οι οποίες τροφοδοτούν τις αξονικές γεννήτριες.

Για τη λειτουργία πορείας στη θάλασσα υπολογίζεται πως οι κύριες μηχανές έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να λειτουργούν στο 90% της ονομαστικής τους ισχύς για το μέγιστο φορτίο που μπορεί να δεχτεί η προπέλα στη λειτουργία αυτή. Επιπροσθέτως, το φορτίο των αξονικών γεννητριών αντιστοιχεί στο 8% του φορτίου των κυρίων μηχανών, επομένως είναι ασφαλές να υποτεθεί πως στη λειτουργία πορείας στη θάλασσα οι κύριες μηχανές μπορούν να υποστηρίξουν τις αξονικές χωρίς πρόβλημα.

Όσον αφορά τη λειτουργία ελιγμών, σύμφωνα με τον ηλεκτρικό ισολογισμό του πλοίου, οι αξονικές γεννήτριες προσφέρουν στο δίκτυο ισχύ που αντιστοιχεί στο 5% της ισχύος των κύριων μηχανών (2400 kW)[5]. Επομένως, οι κύριες μηχανές μπορούν να προσφέρουν το παραπάνω φορτίο στις αξονικές για αυτή τη κατάσταση λειτουργίας. Συνεπώς για το υπάρχον σενάριο λειτουργίας η φόρτιση των κύριων μηχανών παρουσιάζεται στη συνέχεια

Σενάριο 1: Πραγματική κατάσταση λειτουργίας

- Λειτουργία πλοήγησης στη θάλασσα (Γ3)

	SG	DG	ME
Φορτίο %	66.86	73.25	95.6
Sfoc g/kWh		192.14	173.08

- Λειτουργία ελιγμών (B2)

	SG1	SG2	DG1	DG2	DG3	ME1	ME2
Φορτίο %	4.9	8.3	50	50	51	95.4	95.7
Sfoc g/kWh			197.23	197.23	196.88	173	173.12

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως ο υπολογισμός της κατανάλωσης των μηχανών του πλοίου υπολογίζεται για ένα τυπικό ταξίδι διάρκειας **7 ωρών**. Στο πλαίσιο αυτό θεωρείται πως το πλοίο βρίσκεται στη κατάσταση **Γ3** για **6 ώρες** ενώ για **1ώρα** βρίσκεται στη κατάσταση λειτουργίας **B2**, καθώς υποτίθεται ότι επισκέπτεται τρία λιμάνια, με τη διαδικασία ελιγμών κατά την είσοδο ή την έξοδο από αυτά να διαρκεί 10 λεπτά. Στον υπολογισμό της κατανάλωσης, η

απόδοση της διάταξης των αξονικών γεννητριών που χρησιμοποιείται προκύπτει **88.3%**, για απόδοση της σύγχρονης μηχανής 99%, του συστήματος διέγερσης 97% και του κιβωτίου ταχυτήτων 92%.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα η κατανάλωση καυσίμου υπολογίστηκε στα 3478118 γραμμάρια ή 3.478 τόνοι καυσίμου

6.3. Οικονομική αποτίμηση προτεινόμενου σεναρίου λειτουργίας

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης κατανάλωσης αρχικά θεωρείται πως στο υπάρχον σενάριο λειτουργούν δύο αξονικές γεννήτριες σε συνδυασμό με μια γεννήτρια ντήζελ. Επομένως, η ισχύς που ικανοποιούν δίνεται από τον τύπο :

$$P = 1680 \cdot \frac{x}{100} + 1920 \cdot 2 \cdot 0,92 \cdot \frac{y}{100} \quad (6.1)$$

Όπου

x-το φορτίο % της γεννήτριας ντήζελ

y-το φορτίο % της αξονικής γεννήτριας

Ο συντελεστής **0.92** αποτελεί την **απόδοση του συστήματος** της μηχανής και του μετατροπέα όπως υπολογίστηκε από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Η κατανάλωση καυσίμου σε g/h δίνεται από τον τύπο:

- Για τη λειτουργία πλοήγησης στη θάλασσα:

$$C = 1680 \cdot \frac{x}{100} \cdot f(x) + 48000 \cdot (w) \cdot g(90 + w) \quad (6.2)$$

Όπου

x- το φορτίο % της γεννήτριας ντήζελ

w-το φορτίο % της κύριας μηχανής που αντιστοιχεί στις αξονικές γεννήτριες.

Ισχύει $w = 1920 \cdot y / 24000$ (6.3)

f(x) – η ειδική κατανάλωση καυσίμου για x φορτίο % της γεννήτριας ντήζελ

g(w)- η ειδική κατανάλωση καυσίμου για w φορτίο % της κύριας μηχανής.

- Για τη λειτουργία ελιγμών:

$$C = 1680 \cdot \frac{x}{100} \cdot f(x) + 48000 \cdot (w) \cdot g(95 + w) \quad (6.4)$$

Λύνοντας τη σχέση 6.1 ως προς x όπως φαίνεται παρακάτω

$$x = (P - 2 \cdot 19.20 \cdot 0.92 \cdot y) / 16.80 \quad (6.5)$$

με την εφαρμογή των σχέσεων 6.3 και 6.5 στη σχέση 6.2 προκύπτει η σχέση

$$C = 16.80 \cdot \frac{P - 2 \cdot 0.92 \cdot 19.2 \cdot y}{16.8} \cdot f\left(\frac{P - 2 \cdot 0.92 \cdot 19.2 \cdot y}{16.8}\right) + 480 \cdot (0.08 \cdot y) \cdot g(90 + 0.08 \cdot y) \quad (6.6)$$

Με τη χρήση της παραπάνω σχέσης (6.6) υπολογίζεται η ποσότητα καυσίμου συναρτήσει της φόρτισης των αξονικών γεννητριών. Επίσης με τη βοήθεια της ίδιας σχέσης υπολογίζεται η ελάχιστη κατανάλωση καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά φόρτισης των μηχανών. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας παρουσιάζονται παρακάτω.

Σενάριο 2: Εφαρμογή του προτεινόμενου ελέγχου των αξονικών γεννητριών

- Λειτουργία πλοήγησης στη θάλασσα (Γ3)

	SG1	SG2	ME1	ME2
Φορτίο %	71.33	71.33	95.71	95.71
Sfoc g/kWh			173.12	173.12

- Λειτουργία ελιγμών (B2)

	SG1	SG2	DG1	ME1	ME2
Φορτίο %	40	40	81.36	98.2	98.2
Sfoc g/kWh			191.89	174.19	174.19

Η κατανάλωση καυσίμου στη περίπτωση αυτή υπολογίζεται στα 3375092 γραμμάρια ή 3.375 τόνοι καυσίμου.

Για το σενάριο αυτό παρατηρείται **μείωση της κατανάλωσης** σε ποσοστό **3%** σε σχέση με το υπάρχον σενάριο λειτουργίας των μηχανών του πλοίου.

6.4. Οικονομικά συμπεράσματα εφαρμογής του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου

Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζονται συγκεντρωμένες οι καταναλώσεις καυσίμου των κύριων μηχανών και των γεννητριών ντήζελ του πλοίου που υπολογίστηκαν για ένα τυπικό ταξίδι διάρκειας επτά ωρών. Στο πρώτο σενάριο οι υπολογισμοί έγιναν με βάση την υπάρχουσα διάταξη των αξονικών γεννητριών του πλοίου, για τις εφαρμοζόμενες καταστάσεις λειτουργίας που παρουσιάστηκαν στις παραγράφους 2.6 και 2.7. Αξίζει να αναφερθεί ότι η κατάσταση Γ3 κατά την οποία το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου χωρίζεται σε δυο τμήματα και τροφοδοτείται από το συνδυασμό των αξονικών γεννητριών και γεννητριών ντήζελ, εφαρμόζεται χειροκίνητα από το προσωπικό του πλοίου εξαιτίας των περιορισμών που εισάγει η υπάρχουσα διάταξη αξονικών γεννητριών αναφορικά με την παράλληλη λειτουργία των αξονικών γεννητριών με τις γεννήτριες ντήζελ. Οι περιορισμοί αυτοί καταργούνται με την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου των αξονικών γεννητριών, το οποίο χάρη στην ευελιξία που προσφέρει στην επιλογή των καταστάσεων λειτουργίας, επιτρέπει στις αξονικές γεννήτριες να προσφέρουν τη μέγιστη ισχύ στο σύστημα του πλοίου, περιορίζοντας στο ελάχιστο τη λειτουργία των λιγότερο οικονομικών γεννητριών ντήζελ. Η περίπτωση αυτή εξετάζεται στο δεύτερο σενάριο το οποίο μάλιστα παρουσίασε χαμηλότερη κατανάλωση συνολικά αλλά και στις επιμέρους λειτουργίες πλοήγησης και ελιγμών. Η συνολική μείωση της κατανάλωσης είναι της τάξης του 3% και σε συνδυασμό με την ικανότητα του νέου συστήματος ελέγχου να επιτρέπει τη χρήση της αξονικής μηχανής ως κινητήρα, πιστοποιεί τη συνολική ανωτερότητα του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου αξονικών γεννητριών που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

	Σενάριο 1		Σενάριο 2	
Γ3	2928435	gr	2845258	gr
B2	549683.4	gr	529833.2	gr
Συνολικά gr	3478118		3375092	

Πίνακας 6.2 Καταναλώσεις καυσίμου ανά σενάριο λειτουργίας

Κεφάλαιο 7 : Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα

7.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ενός σύγχρονου πλοίου. Το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου τροφοδοτείται από ένα συνδυασμό γεννητριών ντήζελ και αξονικών γεννητριών. Οι αξονικές γεννήτριες του πλοίου λειτουργούν με σύστημα ανάληψης ισχύος με σταθερό λόγο στροφών (PTO/GCR), συνεπώς για να εξασφαλιστεί η παροχή ισχύος σταθερής συχνότητας οι κύριες μηχανές θα πρέπει να λειτουργούν σε σταθερές στροφές ενώ απαγορεύεται η παράλληλη λειτουργία των αξονικών γεννητριών με τις γεννήτριες ντήζελ.

Με στόχο την αντιμετώπιση των ανωτέρω περιορισμών αναπτύχθηκε ένα νέο ευέλικτο σύστημα ελέγχου για τις αξονικές γεννήτριες του πλοίου. Αρχικά αντικαταστάθηκαν οι σύγχρονες γεννήτριες με τυλιγμένο δρομέα με **σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών** οι οποίες τοποθετούνται απευθείας στον άξονα των κύριων μηχανών, χωρίς τη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων, συμβάλλοντας στη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας του συστήματος. Για τον έλεγχο των αξονικών γεννητριών χρησιμοποιήθηκε ένας **μετατροπέας τεσσάρων τεταρτημορίων**, αποτελούμενος από δυο γέφυρες IGBT/Διόδων οι οποίες συνδέονται στο σύνδεσμο συνεχούς ρεύματος μέσω ενός πυκνωτή. Ο **έλεγχος του μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής** επιτρέπει τον έλεγχο της **ενεργού ισχύος** που μεταφέρει η αξονική γεννήτρια στο δίκτυο του πλοίου, ενώ ο **έλεγχος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου διατηρεί σταθερή τη τάση του συνδέσμου συνεχούς ρεύματος**, εξασφαλίζοντας την ομαλή μεταφορά της ενεργού ισχύος στο δίκτυο, ενώ παράλληλα ρυθμίζει την **άεργο ισχύ** που απαιτείται για τη **διατήρηση της τάσης του δικτύου** στην ονομαστική της τιμή. Η χρήση του μετατροπέα τεσσάρων τεταρτημορίων επιτρέπει επίσης την **αντίστροφη ροή ισχύος** δίνοντας στη μηχανή τη δυνατότητα να λειτουργεί ως κινητήρας σε περίπτωση βλάβης της κύριας μηχανής του πλοίου αλλά και επικουρικά λειτουργώντας παράλληλα με αυτή.

Για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του νέου συστήματος ελέγχου στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μοντελοποιήθηκε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του εξεταζόμενου πλοίου με την εφαρμογή του νέου συστήματος αξονικών γεννητριών. Το μοντέλο αυτό στηρίχθηκε σε δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον ηλεκτρικό ισολογισμό του πλοίου και από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό κατά το έτος 2011, ενώ αναπτύχθηκαν προσομοιώσεις σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαίωσαν την ομαλή λειτουργία του συστήματος κατά την απομονωμένη λειτουργία των γεννητριών ντήζελ, την παράλληλη λειτουργία των αξονικών γεννητριών με τις γεννήτριες ντήζελ, την απομονωμένη λειτουργία των αξονικών γεννητριών αλλά και τη χρήση της αξονικής γεννήτριας ως κινητήρα τροφοδοτούμενο από τις μηχανές ντήζελ. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις προσομοιώσεις εξετάστηκε η συμπεριφορά του συστήματος κατά την ομαλή λειτουργία πλοήγησης αλλά και κατά την εμφάνιση του μεταβατικού φαινομένου που συμβαίνει με την είσοδο στο σύστημα του φορτίου των πλευρικών προωστήριων μηχανισμών κατά την πραγματοποίηση ελιγμών. Τα κυριότερα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν με την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Για την παράλληλη λειτουργία των αξονικών γεννητριών με τις γεννήτριες ντήζελ
 - **Πτώση τάσης 10%** κατά την ένταξη φορτίου που αντιστοιχεί στο **69%** της εγκατεστημένης ισχύος στο σύστημα του πλοίου. Η τάση επανέρχεται στο **98%** της

- ονομαστικής της τιμής σε χρόνο **0.8 δευτερόλεπτα**. Οι προδιαγραφές θέτουν το όριο της **βύθισης τάσης στο 16%** της ονομαστικής τιμής για **20 δευτερόλεπτα**.
- Συνολική **αρμονική παραμόρφωση τάσης 2.42 %** και **ρεύματος 3.18 %**. Οι προδιαγραφές ορίζουν μέγιστη τιμή **5%** για τη συνολική αρμονική παραμόρφωση των κυματομορφών τάσης και ρεύματος.
 - Χρόνος απόκρισης **αυτόματου ρυθμιστή τάσης 0.8 δευτερόλεπτα**.
 - Χρόνος απόκρισης **ρυθμιστή στροφών μηχανών ντήζελ 1.2 δευτερόλεπτα** και **διακύμανση της ταχύτητας** της μηχανής $\pm 1\%$.
 - Χρόνος απόκρισης **ελεγκτή ισχύος** αξονικής γεννήτριας **0.2 δευτερόλεπτα** και **διακύμανση** ενεργού ισχύος ± 160 kW.
 - Χρόνος απόκρισης **ελεγκτή τάσης συνδέσμου συνεχούς ρεύματος 0.2 δευτερόλεπτα** με **μέγιστη ανύψωση τάσης 16%** κατά την εκκίνηση.
 - Δυνατότητα βελτίωσης του **συντελεστή ισχύος** των γεννητριών ντήζελ. Βελτίωση κατά **14%** από 0.85 σε 0.97.
- Για την απομονωμένη λειτουργία των αξονικών γεννητριών
 - **Πτώση τάσης 2%** για χρόνο **1 δευτερόλεπτο**, κατά την ένταξη φορτίου που αντιστοιχεί στο **32%** της εγκατεστημένης ισχύος στο σύστημα του πλοίου.
 - Συνολική **αρμονική παραμόρφωση τάσης 2.74%** και **ρεύματος 2.46%**.
 - Χρόνος απόκρισης **ελεγκτή ισχύος** αξονικής γεννήτριας **0.03 δευτερόλεπτα**, για **10%** αύξηση στην ταχύτητα του άξονα.
 - Χρόνος απόκρισης **ελεγκτή τάσης συνδέσμου συνεχούς ρεύματος 0.2 δευτερόλεπτα** με **μέγιστη ανύψωση τάσης 14%** κατά την εκκίνηση.
 - Χρόνος απόκρισης **ελεγκτή άεργου ισχύος 0.9 δευτερόλεπτα**.
 - Για την χρήση της αξονικής μηχανής ως κινητήρα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης
 - **Πτώση τάσης** μικρότερη του **1.8%** της ονομαστικής τιμής.
 - Διακυμάνσεις στη **συχνότητα** μικρότερες του **0.6%** της ονομαστικής τιμής.
 - Χρόνος απόκρισης του **ελεγκτή ταχύτητας** του αξονικού κινητήρα **0.04 δευτερόλεπτα** και **23%** μέγιστη επιβράδυνση του κινητήρα (στις 165 ΣΑΛ) για **400%** αύξηση της ροπή στον άξονα.
 - Χρόνος απόκρισης του **ελεγκτή ταχύτητας** του αξονικού κινητήρα **0.06 δευτερόλεπτα** και **38%** μέγιστη επιτάχυνση του κινητήρα (στις 330 ΣΑΛ) για **72%** μείωση της ροπή στον άξονα.

Τέλος, η ευελιξία που προσφέρει το νέο σύστημα ελέγχου αξονικών γεννητριών εξετάστηκε από τη σκοπιά της κατανάλωσης καυσίμου. Και εδώ τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά καθώς η χρήση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου διευκολύνει την πλήρη αξιοποίηση των αξονικών γεννητριών ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνει τον περιορισμό της χρήσης των γεννητριών ντήζελ, οι οποίες χαρακτηρίζονται από σημαντικά μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου. Καταυτό τον τρόπο υπολογίστηκε πως η κατανάλωση καυσίμου μπορεί να μειωθεί έως και **3%**, με βάση υπολογισμούς που έγιναν για ένα τυπικό ταξίδι, γεγονός που αποτελεί ενθαρρυντικό παράγοντα για την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου αξονικών γεννητριών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου.

7.2. Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Στο πλαίσιο της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκαν τα παρακάτω σημεία συνεισφοράς στην επιστήμη:

- Ανάπτυξη ολοκληρωμένου μοντέλου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου.
- Σχεδίαση συστήματος ελέγχου αξονικής γεννήτριας πλοίου με δυνατότητα αμφίδρομης μεταφοράς ισχύος μέσω ενός μετατροπέα τεσσάρων τεταρτημορίων με τον οποίο επιτυγχάνεται
 - Έλεγχος της ενεργού ισχύος που παρέχεται στο δίκτυο κατά τη λειτουργία γεννήτριας
 - Έλεγχος της ταχύτητας της μηχανής κατά τη λειτουργία κινητήρα
 - Έλεγχος της τάσης του συνδέσμου συνεχούς τάσης για την ομαλή μεταφορά ενεργού ισχύος
 - Έλεγχος άεργου ισχύος με στόχο τη διατήρηση της τάσης του δικτύου στην ονομαστική της τιμή
 - Διατήρηση σταθερής συχνότητας για μεταβλητή ταχύτητα της κύριας μηχανής
- Αποτίμηση ωφελειών της εφαρμογής της προτεινόμενης διάταξης συγκρινόμενη με την υπάρχουσα διάταξη αξονικών γεννητριών στο εξεταζόμενο σύστημα πλοίου, με γνώμονα τεχνικά κριτήρια αλλά και την κατανάλωση καυσίμου.

7.3. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχθηκαν τα ακόλουθα σημεία που χρίζουν περαιτέρω διερεύνησης :

- Υλοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου ελέγχου αξονικών γεννητριών.
- Διεξαγωγή μετρήσεων για τον υπολογισμό της απόδοσης του συστήματος του μετατροπέα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.
- Εφαρμογή του προτεινόμενου σεναρίου λειτουργίας σε πραγματικές συνθήκες ταξιδιού και υπολογισμός της κατανάλωσης καυσίμου.
- Λήψη μετρήσεων χρονοσειρών ροπής που δέχεται η προπέλα του πλοίου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ώστε να εξεταστεί η απόκριση της αξονικής μηχανής σε λειτουργία κινητήρα υπό τις συνθήκες αυτές.

Βιβλιογραφία

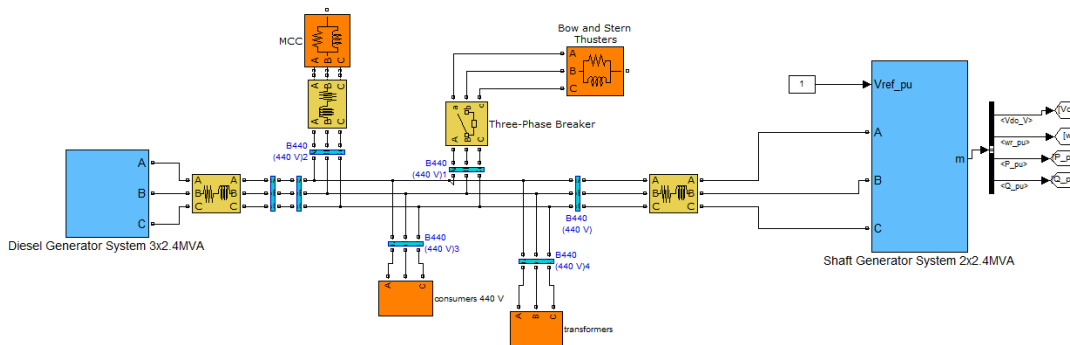
- [1] MAN B&W, “Shaft generators for the MC and ME engine”, http://www.mandieselturbo.com/files/news/files5478/Shaft_generators.pdf
- [2] MAN B&W, “Shaft generators power take off from the main engine”, <http://www.mandieselturbo.com/files/news/files780/Shaft%20generators.pdf>
- [3] Ι.Παύλου, “Μελέτη συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου με αξονική γεννήτρια”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004
- [4] Α. Sarigiannidis, C. Patsios, P. Kakosimos, A. Kladas, “Control design and performance analysis of shaft generators in ship power systems”, 1st International MARINELIVE Conference on “All Electric Ship” June 3-5, 2012, Athens, Greece
- [5] Γ. Παλουμπής, “Μελέτη μεταβατικών καταστάσεων λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011
- [6] Χρήστος Αθ. Φραγκόπουλος, Ιωάννης Προυσαλίδης, “Ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις Πλοίου Τεύχος Α”, εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005
- [7] J. Prousalidis, “The necessity of reactive power balance in ship electric energy systems”, Journal of Marine Engineering and Technology, Volume 10 Issue 1, January 2011
- [8] J. G. Sloopweg, H. Polinder, W. L. Kling, “Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no.4, pp. 516–524, 2003
- [9] Jacek F. Gieras, Mitchel Wing, “Permanent magnet motor technology design”, Marcel Dekker, 2002
- [10] S. Roy, P. Malik and G. S. Hope, “Adaptive control of speed and equivalence ratio dynamics of a diesel driven power-plant”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No.1, March 1993
- [11] G. S. Stavrakakis, G. N. Kariniotakis, “A general simulation algorithm for the accurate assessment of isolated diesel-wind turbines system interaction”, IEEE transactions on Energy Conversion, Vol.10, sep(1995) pp.577-583
- [12] M. S. Merzoug, and F. Naceri, “Comparison of field-oriented control and direct torque control for permanent magnet synchronous motor (PMSM)”, World Academy of Science, Engineering and Technology 21 2008
- [13] Π. Μπουσούνης, “Ένσωμάτωση φορητού συστήματος μέτρησης πίεσης κυλίνδρων στο σύστημα μέτρησης αερίων ρύπων και ισχύος ναυτικών κινητήρων του ENM”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011

[14] Ι.Μ.Προυσαλίδης, Ι.Κ.Χατζηλάου, Ε.Στυβακτάκης, Φ.Κανέλλος, Ν.Χατζηαργυρίου, Χ.Φραγκόπουλος, Η.Σόφρας, “Ηλεκτροπρόωση πλοίων και πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο: Προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος” , Ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς στην Ελλάδα – Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές, ΤΕΕ, Αθήνα, 12-13 Ιαν., 2006

Παράρτημα

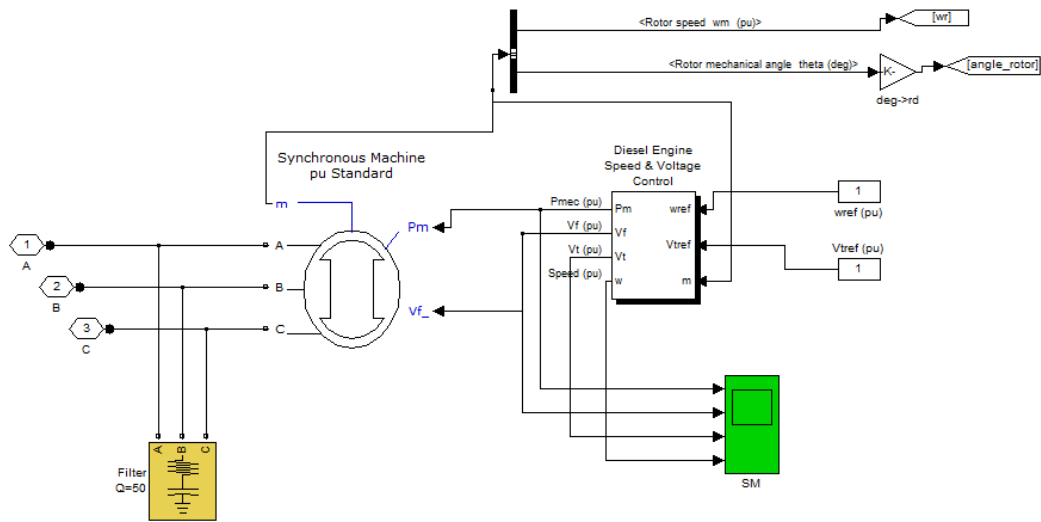
Το ολοκληρωμένο μοντέλο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του υπό μελέτη πλοίου παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Το μοντέλο κατασκευάστηκε σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK και αποτελείται από:

- Το σύστημα των γεννητριών ντήζελ (Diesel Generator System)
- Το σύστημα των αξονικών γεννητριών (Shaft Generator System)
- Τους καταναλωτές που συνδέονται απευθείας στο δίκτυο 440 V (consumers 440 V)
- Τους καταναλωτές που συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετασχηματιστών 440/230 V 440/440 V (transformers)
- Τα κέντρα ελέγχου κινητήρων (MCCs)
- Τους πλευρικούς προωστήριους μηχανισμούς (Bow and Stern Thrusters)



Σχήμα 1: Ολοκληρωμένο μοντέλο συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου

Παράρτημα Α: Μοντελοποίηση συστήματος γεννητριών εσωτερικής καύσης

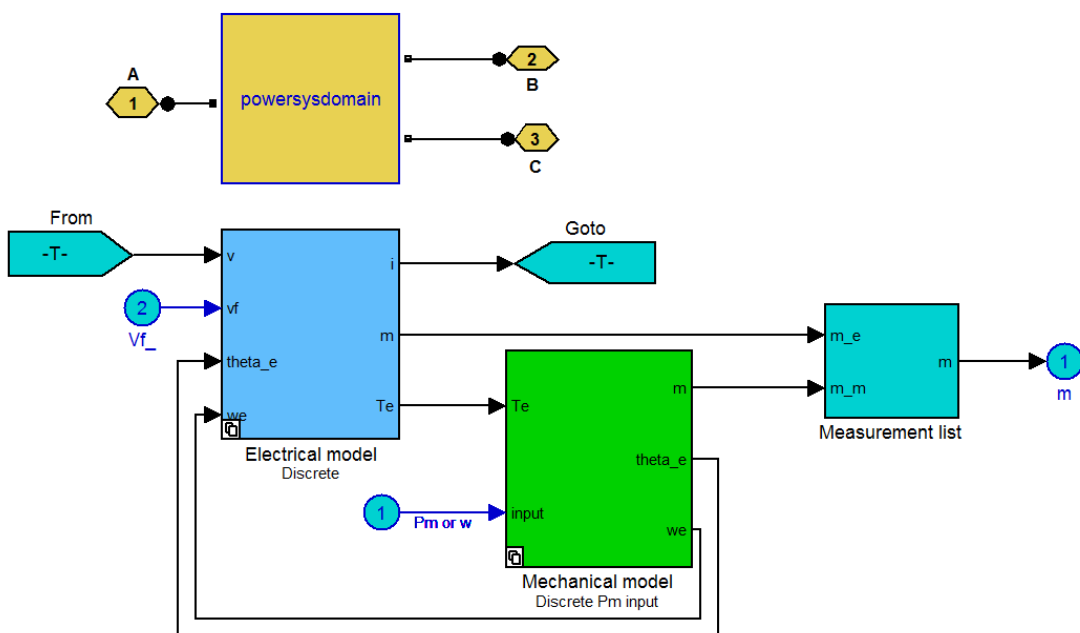


Σχήμα 2 : Σύστημα γεννητριών ντήζελ

Το σύστημα των γεννητριών ντήζελ όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2 αποτελείται από τη σύγχρονη γεννήτρια και το μπλοκ που προσομοιώνει τη μηχανή ντήζελ και τον έλεγχο της ταχύτητας και της τάσης.

A1:Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας με τυλιγμένο δρομέα

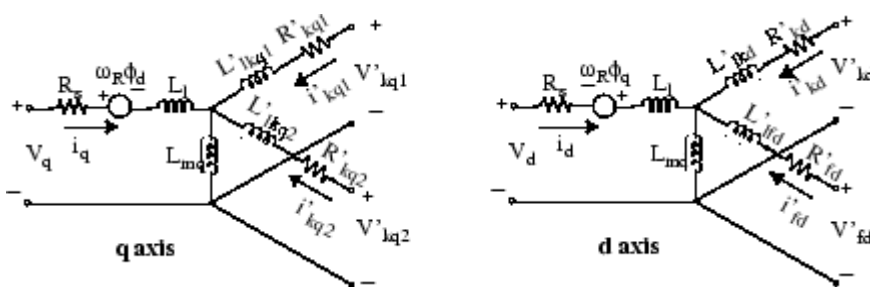
Για τη μοντελοποίηση της σύγχρονης γεννήτριας χρησιμοποιείται το μπλοκ της σύγχρονης μηχανής (Synchronous Machine block) το οποίο προσομοιώνει τη λειτουργία της γεννήτριας ή του κινητήρα ανάλογα με το πρόσημο της μηχανικής ισχύος εισόδου (θετικό για λειτουργία γεννήτριας, αρνητικό για λειτουργία κινητήρα).



Όνομαστική ισχύς	$P_n(\text{VA})$	2.1e6
Φασική τάση	$V_n(V_{\text{rms}})$	440
Όνομαστική συχνότητα	$f_n(\text{Hz})$	60
Αντίδραση	$x_d(\text{pu})$	1.227
Αντίδραση	$x_d'(\text{pu})$	0.157
Αντίδραση	$x_d''(\text{pu})$	0.135
Αντίδραση	$x_q(\text{pu})$	0.443
Αντίδραση	$x_q'(\text{pu})$	0.213
Αντίδραση	$x_q''(\text{pu})$	0.14
Χρονική σταθερά	$T_{do}'(\text{s})$	0.407
Χρονική σταθερά	$T_{do}''(\text{s})$	0.036
Χρονική σταθερά	$T_q''(\text{s})$	0.0213
Αντίσταση	$R_s(\text{pu})$	0.102
Αδρανειακή σταθερά	$H(\text{s})$	0.062
Παράγων τριβής	$F(\text{pu})$	0.01
Ζεύγη πόλων	p	5

Σχήμα 3 : Μοντέλο 'Synchronous Machine pu Standard'

Το μοντέλο της μηχανής αποτελείται από δυο επιμέρους μοντέλα, το ηλεκτρικό και το μηχανικό. Το ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου αναπαρίσταται στο σύγχρονο με την ταχύτητα του δρομέα πλαίσιο αναφοράς (d-q). Οι παράμετροι του δρομέα είναι ανηγμένες στο στάτη.



Οι εξισώσεις που περιγράφουν το ηλεκτρικό μοντέλο της μηχανής είναι οι παρακάτω (παράγραφος 3.4.1.) :

$$v^r_{qs} = -r_s i^r_{qs} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi^r_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \psi^r_{qs}$$

$$v^r_{ds} = -r_s i^r_{ds} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi^r_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \psi^r_{ds}$$

$$v_{0s} = -r_s i^r_{0s} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{0s} \quad (3.17)$$

$$v_{kq1} = r_{kq1} i_{kq1} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kq1}$$

$$v_{kq2} = r_{kq2} i_{kq2} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kq2}$$

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{fd}$$

$$v_{kd} = r_{kd} i_{kd} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kd}$$

$$\psi^r_{qs} = -X_{ls} i^r_{qs} + X_{mq} (-i^r_{qs} + i_{kq1} + i_{kq2})$$

$$\psi^r_{ds} = -X_{ls} i^r_{ds} + X_{md} (-i^r_{ds} + i_{fd} + i_{kd})$$

$$\psi_{0s} = -X_{ls} i_{0s} \quad (3.18)$$

$$\psi_{kq1} = X_{lkq1} i_{kq1} + X_{mq} (-i^r_{qs} + i_{kq1} + i_{kq2})$$

$$\psi_{kq2} = X_{lkq2}i_{kq2} + X_{mq}(-i^r_{qs} + i_{kq1} + i_{kq2})$$

$$\psi_{fd} = X_{lfd}i_{fd} + X_{md}(-i^r_{ds} + i_{fd} + i_{kd})$$

$$\psi_{kd} = X_{lkd}i_{kd} + X_{md}(-i^r_{ds} + i_{fd} + i_{kd})$$

Οι δείκτες υποδηλώνουν τα εξής:

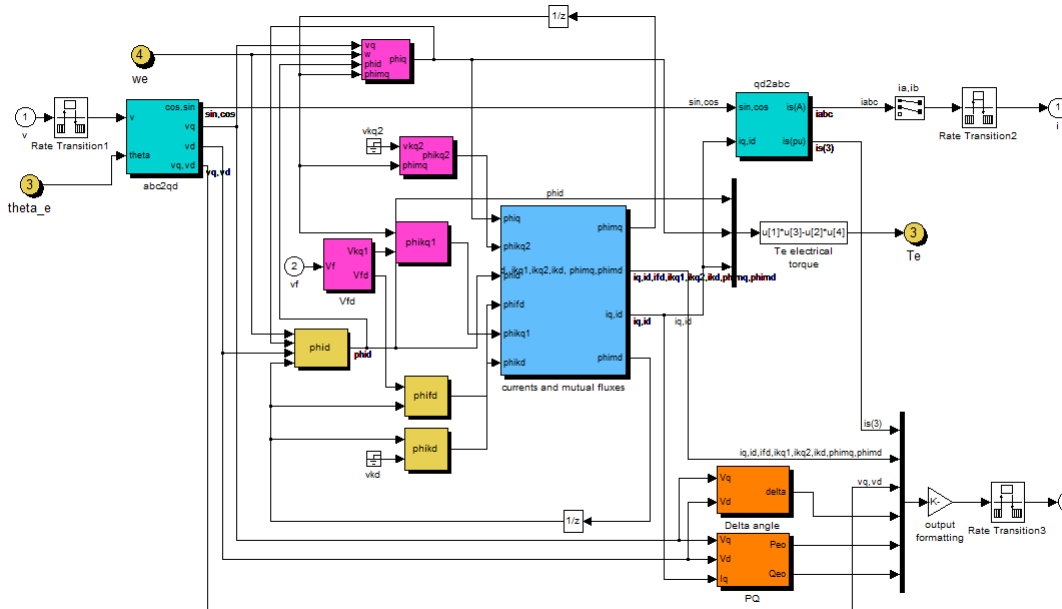
d,q: μέγεθος d, q άξονα

R,s: μέγεθος δρομέα, στάτη

l,m: επαγωγή διαρροής, μαγνήτισης

f,k : μέγεθος τυλίγματος πεδίου , απόσβεσης

Στο μοντέλο αυτό γίνεται η παραδοχή πως τα ρεύματα ρέουν προς τα τυλίγματα του δρομέα. Τα μετρούμενα ρεύματα του στάτη (Ia, Ib, Ic) που επιστρέφει το μοντέλο της σύγχρονης μηχανής είναι τα ρεύματα που ρέουν έξω από τη μηχανή.



Σχήμα 4 : Ηλεκτρικό μοντέλο ‘Synchronous Machine pu Standard’

Το μηχανικό μοντέλο της σύγχρονης μηχανής είναι το ίδιο με το απλοποιημένο μοντέλο σύγχρονης μηχανής (Simplified Synchronous Machine block). Το μηχανικό σύστημα περιγράφεται από τις εξισώσεις :

$$\Delta\omega(t) = \frac{1}{2H} \int (T_m - T_e) dt - K_d \Delta\omega(t)$$

$$\omega(t) = \Delta\omega(t) + \omega_0$$

Όπου

$\Delta\omega$ = η μεταβολή της ταχύτητας σε σχέση με την ταχύτητα λειτουργίας

H = η σταθερά αδρανείας

T_m = η μηχανική ροπή

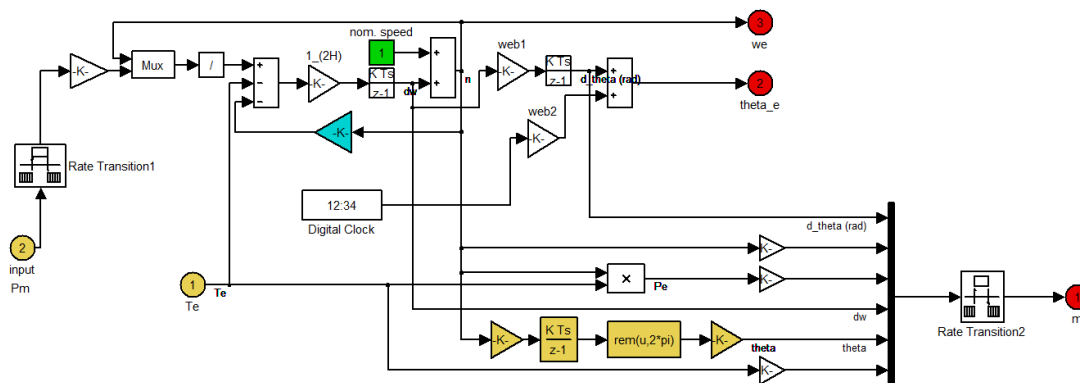
= η ηλεκτρομαγνητική ροπή

K_d = ο παράγων απόσβεσης

$\omega(t)$ = η μηχανική ταχύτητα του δρομέα

ω_0 = η ταχύτητα λειτουργίας (1 p.u.)

T_e



Σχήμα 5 : Μηχανικό μοντέλο ‘Synchronous Machine pu Standard’

A2: Μοντελοποίηση μηχανής εσωτερικής καύσης και ρυθμιστή στροφών

Η λειτουργία της μηχανής ντήζελ και του αντίστοιχου ρυθμιστή στροφών προσομοιώνεται με το μπλοκ ‘Diesel machine and governor’ που υπάρχει στη βιβλιοθήκη του Simulink. Το μοντέλο αυτό δέχεται ως είσοδο την ταχύτητα της σύγχρονης μηχανής και την ταχύτητα αναφοράς. Από τη σύγκριση των δύο ταχυτήτων προκύπτει η τιμή της ροπής της μηχανής ντήζελ και από τον τύπο

$$P_m = \omega \times T_e \quad (3.11)$$

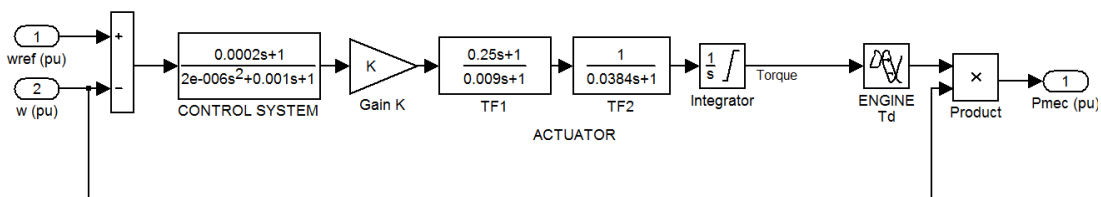
Όπου

P_m η μηχανική ισχύς (ανά μονάδα)

ω_r Η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής (ανά μονάδα)

T_e Η ροπή της μηχανής (ανά μονάδα)

προκύπτει τελικά η μηχανική ισχύς που δέχεται ως είσοδο το μοντέλο της σύγχρονης μηχανής. Ο ρυθμιστής στροφών υλοποιείται ως μια συνάρτηση μεταφοράς δεύτερης τάξης και ο ενεργοποιητής με δυο μπλοκ συναρτήσεων μεταφοράς. Η μηχανή ντήζελ παρουσιάζεται ως μια απλή χρονική καθυστέρηση. Μεταξύ του ενεργοποιητή και της μηχανής ντήζελ παρεμβάλλεται ένας περιοριστής ροπής. Οι τιμές των χρονικών σταθερών των επιμέρους συναρτήσεων μεταφοράς δίνονται στη συνέχεια.



	Ρυθμιστής στροφών	Ενεργοποιητής	Μηχανή ντήζελ.
Συνάρτηση μεταφοράς	$K \frac{\tau s + 1}{\tau_1 s^2 + \tau_2 s + 1}$	$\frac{\tau_3 s + 1}{\tau_4 s + 1} \frac{1}{\tau_5 s + 1} \frac{1}{s}$	$e^{-\tau_6 s}$
Αριθμητικές τιμές	$\tau = 0.0002$ $\tau_1 = 0.00002$ $\tau_2 = 0.001$ $K = 400$	$\tau_3 = 0.25$ $\tau_4 = 0.009$ $\tau_5 = 0.0384$	$\tau_6 = 0.024$

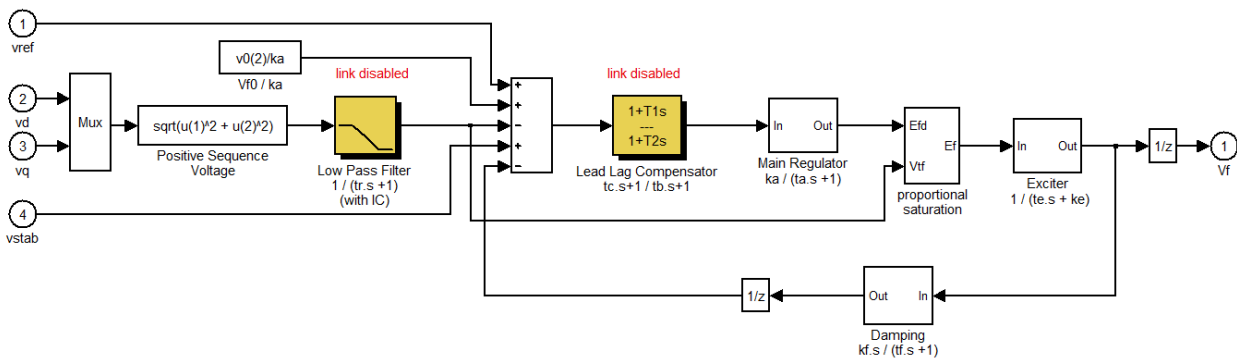
Σχήμα 6: Μοντέλο 'Diesel machine and governor'

A3: Μοντελοποίηση συστήματος διέγερσης σύγχρονης μηχανής

Το σύστημα διέγερσης μοντελοποιείται με τη χρήση του μπλοκ ‘Excitation System’ που υπάρχει στη βιβλιοθήκη του Simulink. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει τη λειτουργία ενός συστήματος διέγερσης συνεχούς ρεύματος χωρίς τη συνάρτηση κορεσμού της διέγερσης. Η διεγέρτρια προσομοιώνεται με τη συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ της τάσης διέγερσης (Vfd) και της εξόδου του ρυθμιστή τάσης (ef) :

$$\frac{V_{fd}}{ef} = \frac{1}{K_e + sT_e}$$

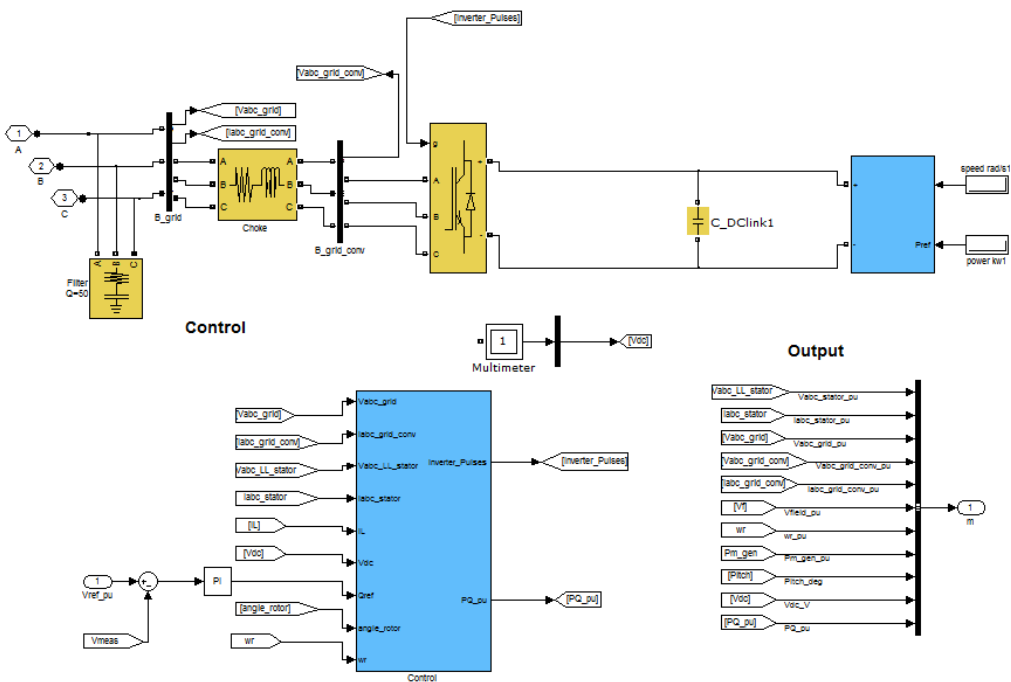
Το μοντέλο του συστήματος διέγερσης αποτελείται από ένα μπλοκ τάσης θετικής συχνότητας (Positive Sequence Voltage) και ένα βαθυπερατό φίλτρο από τα οποία προκύπτει το σήμα της τάσης στην έξοδο της μηχανής, το οποίο λαμβάνεται στο σύγχρονο πλαίσιο δυο αξόνων (d-q). Στη συνέχεια το σήμα εισέρχεται στον αντισταθμιστή (Lead Lag Compensator) και τον ρυθμιστή (Main Regulator), για να καταλήξει στη διεγέρτρια (Exciter). Να σημειωθεί ότι μεταξύ της διεγέρτριας και του ρυθμιστή παρεμβάλλεται το μπλοκ του κορεσμού (proportional saturation) για τον περιορισμό του σήματος σε μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή που εξαρτώνται από τις Efd και Vtf. Τέλος, να σημειωθεί ότι για την αποφυγή αστάθειας του συστήματος χρησιμοποιείται το μπλοκ σταθεροποίησης (Damping) το οποίο υλοποιείται από μια συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης. Οι τιμές των χρονικών σταθερών των επιμέρους συναρτήσεων μεταφοράς δίνονται παρακάτω.



	Βαθυπερατό φίλτρο	Αντισταθμιστής	Ρυθμιστής	Διεγέρτρια	σταθεροποιητής
Συνάρτηση μεταφοράς	$\frac{1}{1 + sT_r}$	$\frac{1+sT_c}{1+sT_b}$	$\frac{K_a}{1+sT_a}$	$\frac{K_e}{1 + sT_e}$	$\frac{sK_f}{1 + sT_f}$
Αριθμητικές τιμές	$T_r = 0.02$	$T_c = 0$ $T_b = 0$	$T_a = 0.001$ $K_a = 10$	$T_e = 0$ $K_e = 1$	$T_f = 0.1$ $K_f = 0.001$

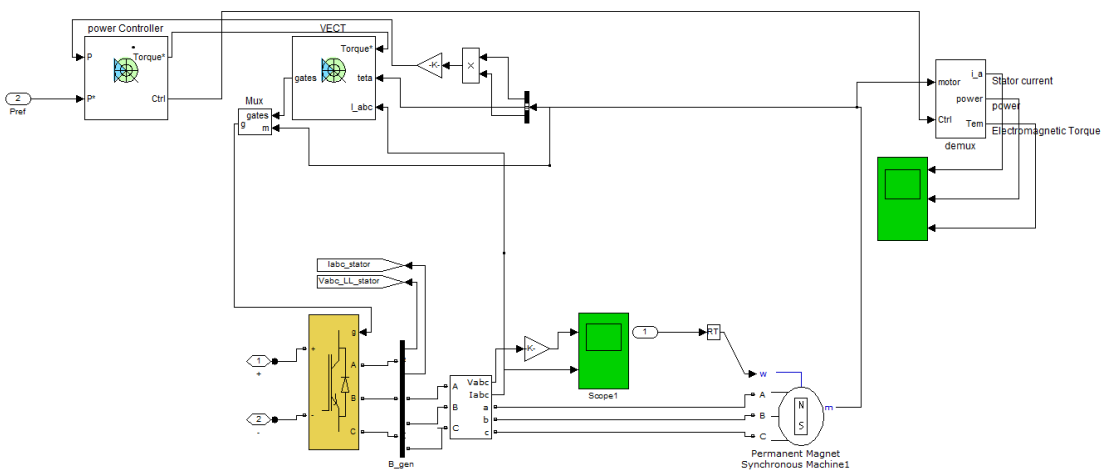
Σχήμα 7 : Μοντέλο ‘Excitation system’

Παράρτημα Β : Μοντελοποίηση συστήματος αξονικών γεννητριών



Σχήμα 8 : Μοντέλο συστήματος αξονικών γεννητριών

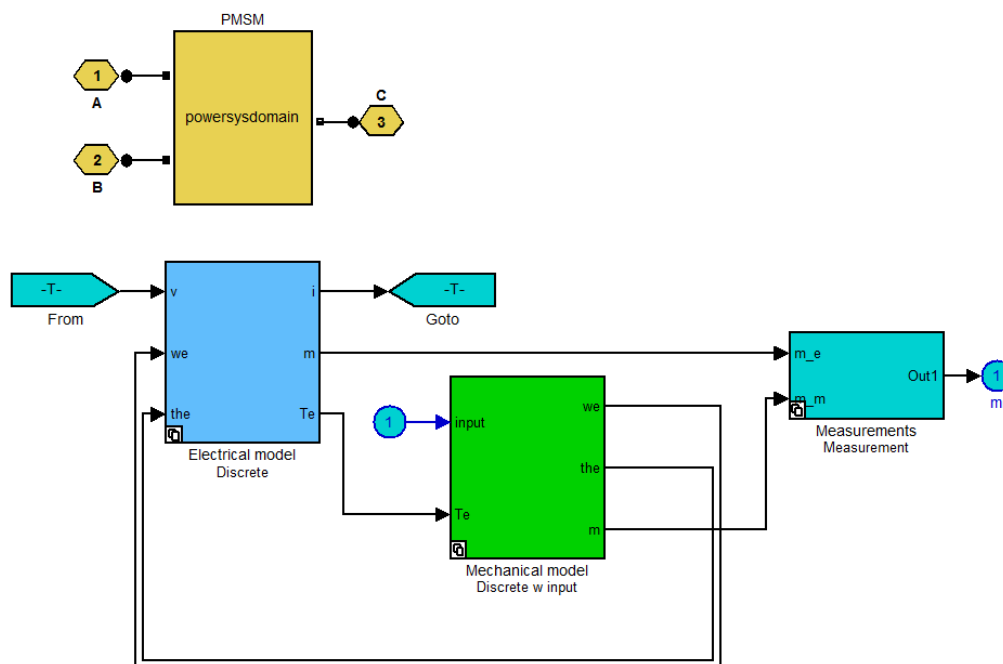
Το μοντέλο του συστήματος των αξονικών γεννητριών περιλαμβάνει τους μετατροπείς στην πλευρά της μηχανής και του δικτύου, τα αντίστοιχα συστήματα ελέγχου και τη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών.



Σχήμα 9 : Μοντέλο συστήματος ελέγχου μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής

B1: Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών

Η σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών μοντελοποιείται με τη βοήθεια του αντίστοιχου μοντέλου της βιβλιοθήκης του Simulink (Permanent magnet Synchronous Machine). Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει τη λειτουργία της μηχανής ως γεννήτρια ή κινητήρα ανάλογα με το πρόσημο της μηχανικής ισχύς που δέχεται στην είσοδο του (θετική ροπή για λειτουργία κινητήρα, αρνητική για λειτουργία γεννήτριας).



Αντίσταση στάτη	Rs (ohm)	9.2840e-4
Επαγωγές	[Ld(H),Lq(H)]	[1.8621e-4,8.3822e-5]
Ροή σύζευξης	(Vs)	0.97462
Σταθερά τάσης		530.3295
(V_peak L-L/krpm)		
Σταθερά ροπής	(Nm/A_peak)	4.3858
Ζεύγη πόλων	p	3

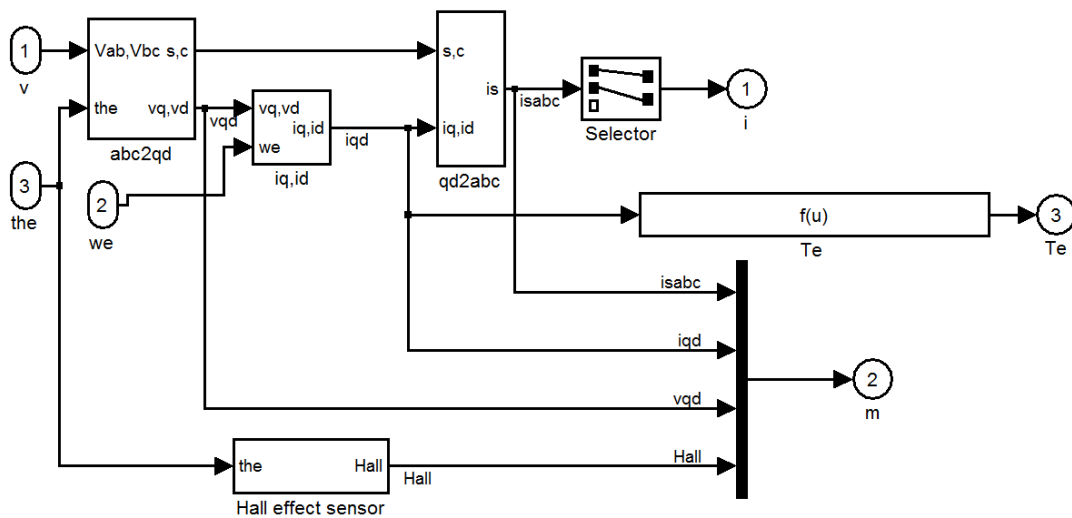
Σχήμα 10 : Μοντέλο Permanent Magnet Synchronous Machine

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το ηλεκτρικό μοντέλο της μηχανής, εκφράζονται σε σύγχρονο με την ταχύτητα του δρομέα πλαίσιο αναφοράς (dq) και είναι ανηγμένες στο στάτη της μηχανής (παράγραφος 3.1.1.)

$$i_{sd} = \frac{V_{sd} + \omega_r L_s i_{sq}}{L_s s + R_s}$$

$$i_{sq} = \frac{V_{sq} - \omega_r L_s i_{sd} - \omega_r \Psi_{PM}}{L_s s + R_s} \quad (3.6)$$

$$T_e = -\frac{m_s n_p}{2} ((L_{sq} - L_{sd}) i_{sd} i_{sq} - \Psi_{pm} i_{sq})$$

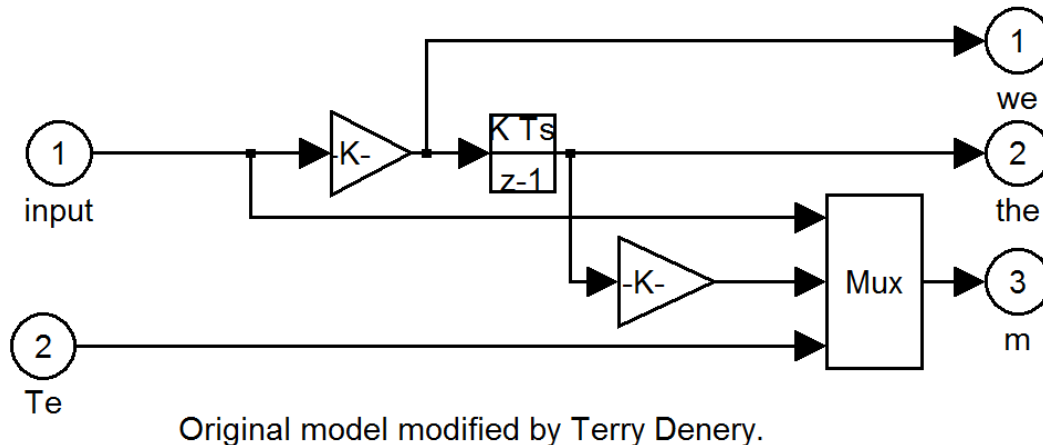


Σχήμα 11 : Ηλεκτρικό μοντέλο Permanent Magnet Synchronous Machine

Και οι εξισώσεις του μηχανικού μοντέλου της μηχανής

$$\omega_r = \frac{n_p}{J_s + B} (T_T - T_e)$$

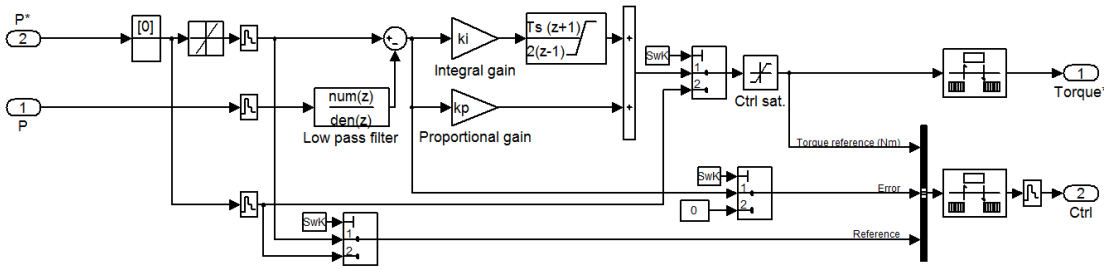
$$\theta_r = \frac{\omega_s}{s}$$



Σχήμα 12 : Μηχανικό μοντέλο Permanent Magnet Synchronous Machine

B2: Μοντελοποίηση συστήματος ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής-Έλεγχος προσανατολισμένος στο πεδίο

Ο έλεγχος του μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής γίνεται με τη χρήση των μπλοκ του ελεγκτή ισχύος (power controller) και του διανυσματικού ελέγχου (VECT) (σχήμα 9). Το εσωτερικό του μπλοκ του ελεγκτή ισχύος απεικονίζεται στο σχήμα 13. Ο ελεγκτής ισχύος δέχεται ως είσοδο το σήμα αναφοράς της ενεργού ισχύος και την μετρούμενη ενεργό ισχύ εξόδου της αξονικής γεννήτριας. Τα σήματα αυτά συγκρίνονται με τη βοήθεια ενός αναλογικού ολοκληρωτικού ελεγκτή (PI) από την έξοδο του οποίου προκύπτει η τιμή αναφοράς της ηλεκτρομαγνητικής ροπής (Torque*). Η τιμή αυτή διατηρείται εντός των ορίων που επιβάλλει ο περιοριστής ροπής (Ctrl sat).



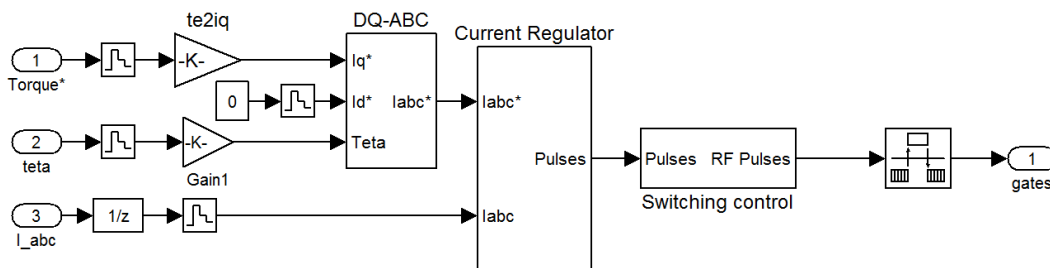
Αναλογικό κέρδος (Proportional gain)	0.1
Ολοκληρωτικό κέρδος (Integral gain)	500
Περιοριστής ροπής (Controller output torque saturation) (Nm) [κατώτατο όριο, ανώτατο όριο]	[-100000,100000]
Χρόνος δειγματοληψίας ελεγκτή (Controller sampling time) (s)	350e-6

Σχήμα 13 : Μοντέλο ελεγκτή ισχύος αξονικής γεννήτριας

Στο εσωτερικό του μπλοκ VECTOR πραγματοποιείται ο προσανατολισμένος στο πεδίο έλεγχος (field oriented control). Όπως ορίζει ο έλεγχος αυτός, η τιμή του ρεύματος αναφοράς του ευθύ άξονα διατηρείται στο μηδέν ($I_d^*=0$) ώστε η τιμή του ρεύματος αναφοράς του εγκάρσιου άξονα (I_q^*) να προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης

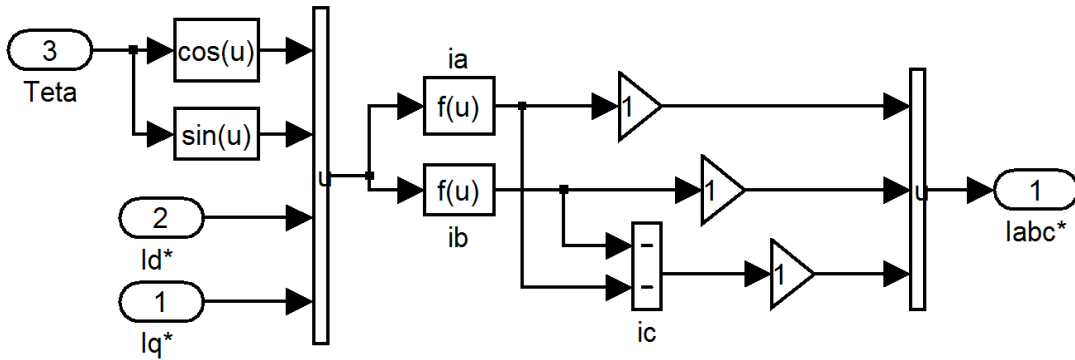
$$T_e = \frac{m_s n_p}{2} \psi_{pm} i_{sq} \quad (4.1)$$

Όπου m_s είναι ο αριθμός των φάσεων, n_p ο αριθμός των ζευγών πόλων, Ψ_{pm} είναι η μαγνητική ροή του μόνιμου μαγνήτη (σταθερή) και T_e η ροπή αναφοράς η οποία προκύπτει ως έξοδος από τον ελεγκτή ισχύος. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συνιστώσες του ρεύματος αναφοράς στο τριφασικό σύστημα abc μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού d-q(σχήμα 15). Για τον αντίστροφο μετασχηματισμό απαιτείται ο υπολογισμός της ταχύτητας με την οποία στρέφεται το πεδίο του δρομέα, η οποία προκύπτει από το σύστημα κλειδώματος φάσης (PLL, σχήμα 18) Οι συνιστώσες του ρεύματος αναφοράς εισέρχονται στον ελεγκτή υστέρησης (Current Regulator) όπου συγκρίνονται με τις μετρούμενες τιμές του ρεύματος στην έξοδο της μηχανής(σχήμα 16), ώστε να προκύψουν οι παλμοί για τον έλεγχο του μετατροπέα.

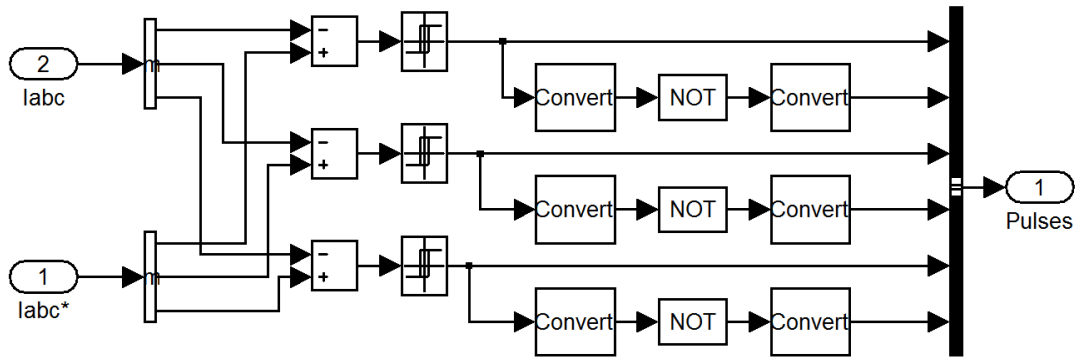


Αριθμός ζευγών πόλων (Motor pairs of poles)	3
Πεπλεγμένη ροή μαγνητών (Flux induced by magnets) (Wb)	0.97462
Μέγιστη διακοπτική συχνότητα (Maximum switching frequency) (Hz)	20e5
Χρόνος δειγματοληψίας (Sampling time) (s)	50e-6
Εύρος βρόχου υστέρησης (Current hysteresis bandwidth) (A)	0.001

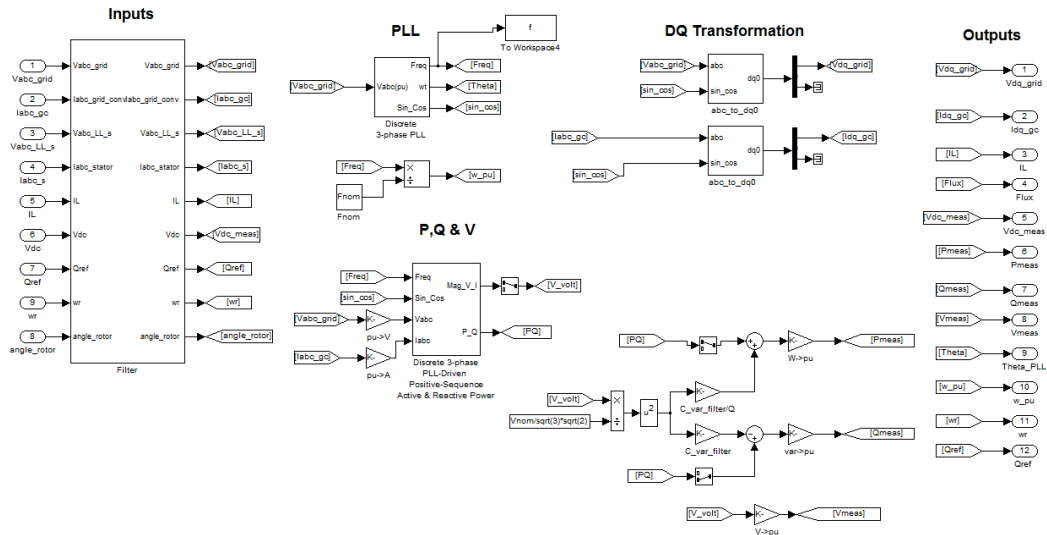
Σχήμα 14 : Μοντέλο διανυσματικού ελέγχου VECT



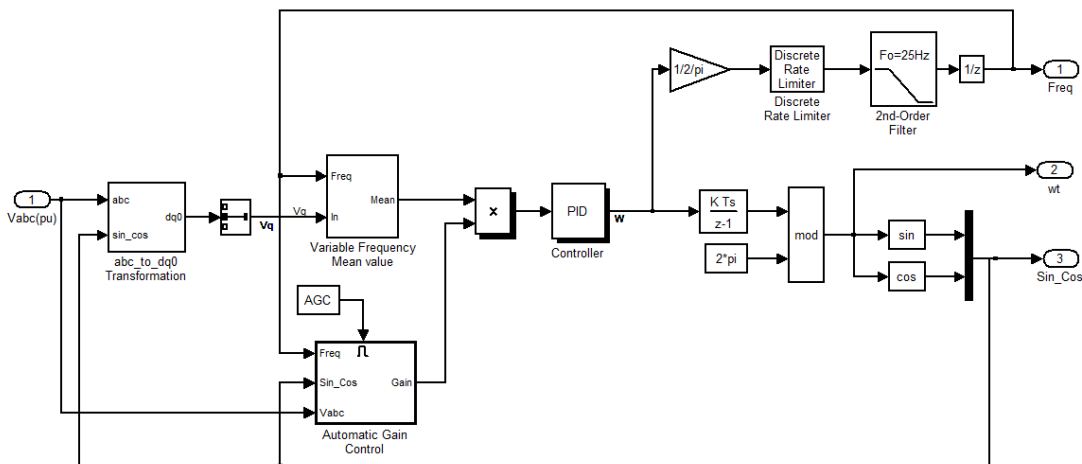
Σχήμα 15 : Μοντέλο μετασχηματισμού dq-abc



Σχήμα 16 : Μοντέλο ρυθμιστή ρεύματος με βρόχο υστέρησης



Σχήμα 17 : Μετρήσεις και υπολογισμός P, Q



Σχήμα 18 : Μοντέλο PLL

B3: Μοντελοποίηση συστήματος ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου-Έλεγχος συνιστωσών δυο αξόνων (d-q)

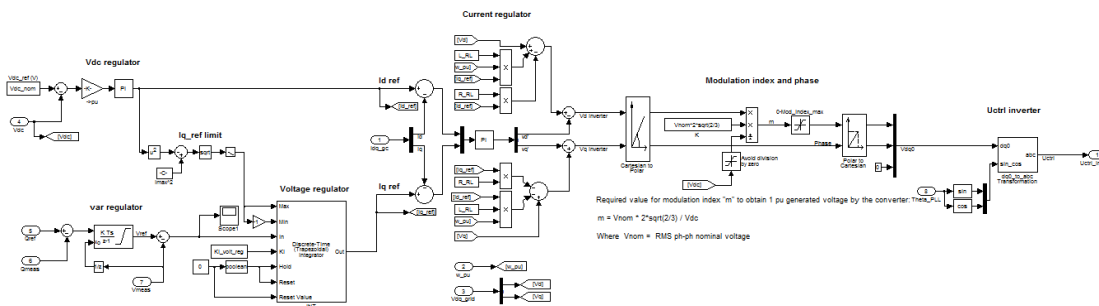
Για τον έλεγχο του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου χρησιμοποιείται η στρατηγική έλεγχου των συνιστωσών ευθύ και εγκάρσιου άξονα (d-q). Ο έλεγχος λοιπόν πραγματοποιείται σε ένα πλαίσιο αναφοράς που στρέφεται με τη συχνότητα του δικτύου. Ο d άξονας του στρεφόμενου

πλαίσιου ταυτίζεται με το συνιστάμενο διάνυσμα τάσης έτσι ώστε $V_d = |V|$ και $V_q = 0$. Επομένως, οι εξισώσεις που περιγράφουν την ενεργό και άεργο ισχύ που διακινείται είναι οι εξής :

$$P = \frac{3}{2} |V| I_d \quad (4.5)$$

$$Q = -\frac{3}{2} |V| I_q$$

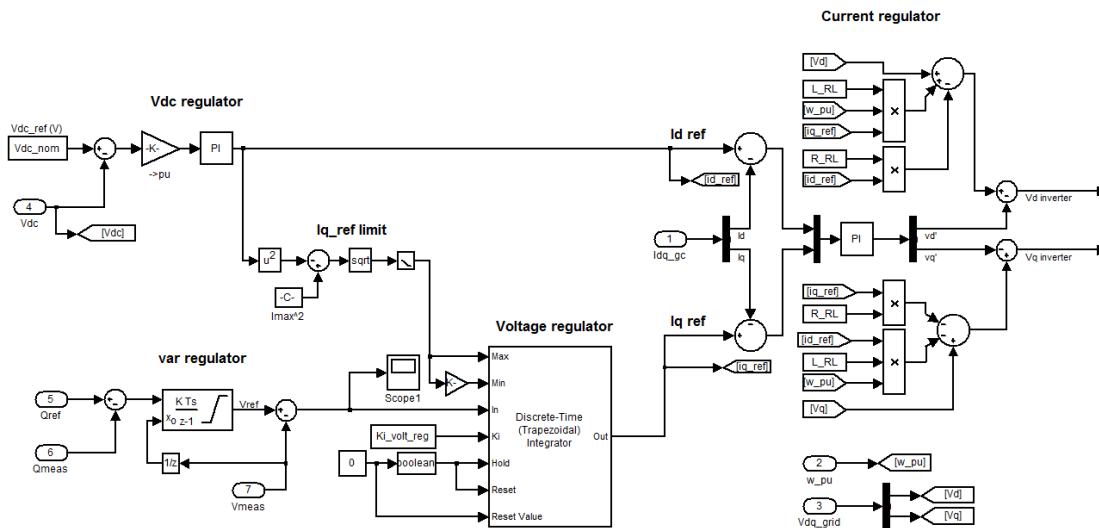
Ο έλεγχος της ενεργού και άεργου ισχύος, καταυτόν τον τρόπο, ταυτίζεται με τον ανεξάρτητο έλεγχο της d και q συνιστώσας του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα. Προκύπτουν λοιπόν δύο ελεγκτές που λειτουργούν παράλληλα.



Σχήμα 19 : Μοντέλο ελεγκτή μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.

Ο ελεγκτής των d-συνιστωσών αποτελείται από δυο βρόχους ελέγχου. Ο εξωτερικός βρόχος διατηρεί σταθερή τη συνεχή τάση V_{dc} στην ονομαστική της τιμή V_{dc_ref} ($=1000V$) καθορίζοντας την τιμή αναφοράς της d-συνιστώσας του ρεύματος i_{d_ref} , ενώ ο ταχύτερος εσωτερικός βρόχος ρυθμίζει το ρεύμα i_d και τελικά την τάση v_{inv_d} στην έξοδο του αντιστροφέα σύμφωνα με τη σχέση $V_{inv_d} = v_d - R_s i_d + v'_d + \omega L_s i_q$.

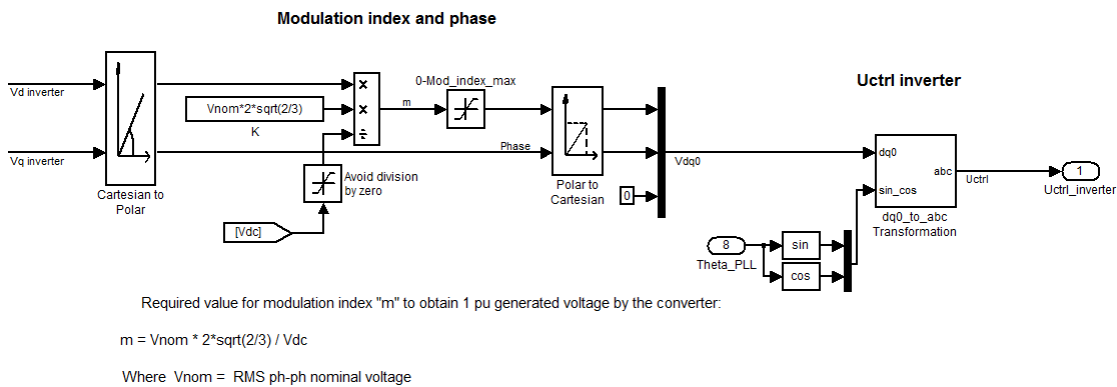
Ο ελεγκτής των q-συνιστωσών αποτελείται από τρεις βρόχους ελέγχου. Ο εξωτερικός βρόχος κρατά σταθερή τη τάση του δικτύου v_{grid} στην ονομαστική της τιμή ($440 V$) ενώ δίνει και την τιμή αναφοράς για την άεργο ισχύ Q_{ref} που παρέχει η γεννήτρια στο δίκτυο. Η άεργος ισχύς ρυθμίζεται από το δεύτερο βρόχο ελέγχου ο οποίος δίνει με τη σειρά του τη τιμή i_{q_ref} στο ταχύτερο εσωτερικό ελεγκτή ο οποίος αντίστοιχα με τον d ελεγκτή ρυθμίζει το ρεύμα i_q και τελικά την τάση v_{inv_q} σύμφωνα με τη σχέση $V_{inv_q} = v_q - R_s i_q - v'_q - \omega L_s i_d$ (σχήμα 20).



PI ελεγκτές	Kp	Ki
Ελεγκτής συνεχούς τάσης DC	1.1	27.5
Ελεγκτής ρεύματος Id	1	50
Ελεγκτής τάσης δικτύου Vgrid	0.7	12
Ελεγκτής άεργου ισχύος Q	-	1
Ελεγκτής ρεύματος Iq	1	50

Σχήμα 20 : Παράλληλος έλεγχος συνιστωσών δυο αξόνων (d-q)

Οι τιμές αναφοράς των συνιστωσών της τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα στη συνέχεια μετατρέπονται από καρτεσιανές σε πολικές συντεταγμένες και πολλαπλασιάζονται με τον κατάλληλο συντελεστή διαμόρφωσης $(m = (V_{nom} \times 2 \times \sqrt{(2/3)}) / V_{DC})$. Τέλος ακολουθούν τον αντίστροφο μετασχηματισμό d-q ώστε να προκύψει το τελικό σήμα ελέγχου του αντιστροφέα.



Σχήμα 21 : Υπολογισμός συντελεστή διαμόρφωσης

Παράρτημα Γ: Μοντελοποίηση φορτίων του πλοίου

Για τη μοντελοποίηση των φορτίων του πλοίου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του τριφασικού παράλληλου ωμικού-επαγωγικού-χωρητικού (RLC) φορτίου. Το μοντέλο του τριφασικού παράλληλου RLC φορτίου υλοποιεί ένα τριφασικό φορτίο σαν ένα παράλληλο συνδυασμό ωμικών, επαγωγικών και χωρητικών φορτίων. Στη δεδομένη συχνότητα, το φορτίο παρουσιάζει σταθερή αντίσταση. Η ενεργός και η άεργος ισχύς που απορροφούνται από το φορτίο είναι ανάλογες με το τετράγωνο της εφαρμοζόμενης τάσης. Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν ωμικά και επαγωγικά φορτία. Οι τιμές της ενεργού και της άεργου ισχύς που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από τον ηλεκτρικό ισολογισμό του πλοίου (παράγραφος 2.5).

Επίσης στο εξεταζόμενο μοντέλο, για τη μοντελοποίηση των ωμικών και επαγωγικών αντιστάσεων των γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του τριφασικού RLC κλάδου, το οποίο υλοποιεί ένα συνδυασμό ωμικών και επαγωγικών στοιχείων σε σειρά. Οι τιμές της αντίστασης και της επαγωγής των γραμμών μεταφοράς του πλοίου ακολουθούν στη συνέχεια.

Γραμμή μεταφοράς	R (ohms)	L(H)
Αξονικών γεννητριών	0.5e-4	0.6e-7
Καταναλωτών 440		
Group 4	2.38e-3	3.55e-6
Group 8	3.5e-3	2.15e-6
Group 6	90.65e-3	4.2e-5
Group 10	3.8e-3	2.4e-6

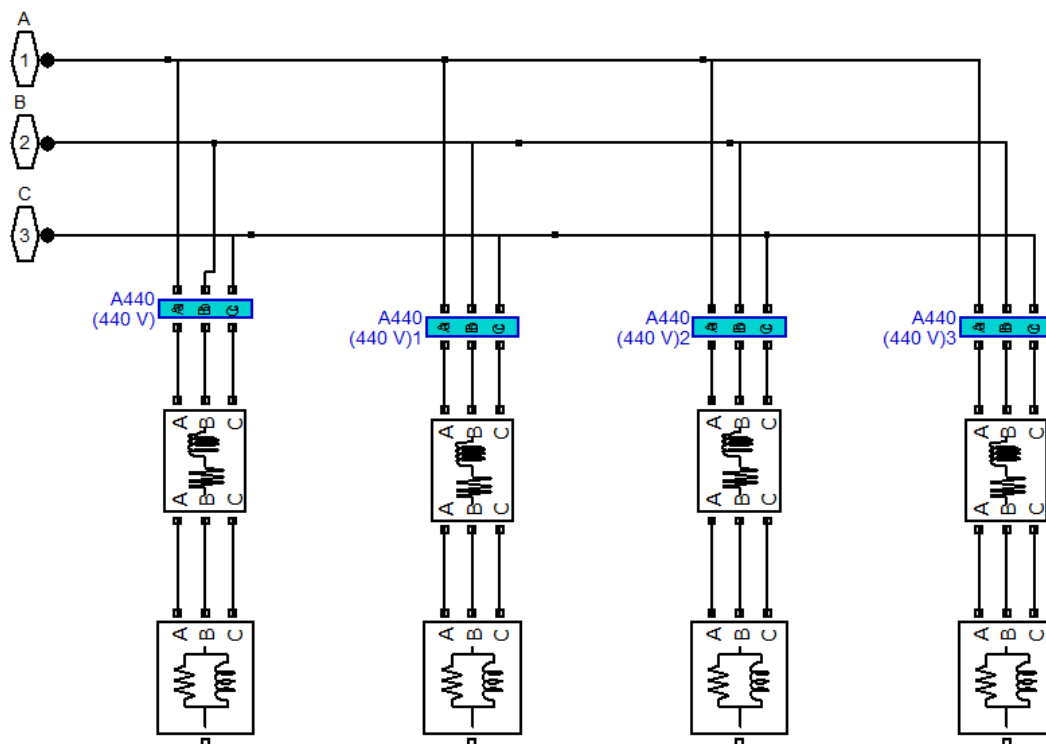
Καταναλωτών μέσω Μ/Σ 1,2, Γραμμή πριν τον Μ/Σ	7.65e-4	1.33e-6
	Γραμμή μετά τον Μ/Σ	4.825e-4
Καταναλωτών μέσω Μ/Σ 4,5,6 Γραμμή πριν τον Μ/Σ	7.65e-4	1.33e-6
	Γραμμή μετά τον Μ/Σ	4.8e-3
Καταναλωτών μέσω Μ/Σ 7,8 Γραμμή πριν τον Μ/Σ	5.36e-4	9.33e-7
	Γραμμή μετά τον Μ/Σ	6.3e-3
Καταναλωτών μέσω Μ/Σ 9,10 Γραμμή πριν τον Μ/Σ	3.668e-3	1.7e-6
	Γραμμή μετά τον Μ/Σ	11.58e-3
Καταναλωτών μέσω Μ/Σ έκτακτης ανάγκης		

Γραμμή πριν τον Μ/Σ	3.87e-3	2.42 e -6
Γραμμή μετά τον Μ/Σ	1.53e-3	2.29e-6
Γεννητριών ντήζελ	0.5e-4	0.6e-7
MCCs	0.48e-4	0.715e-7

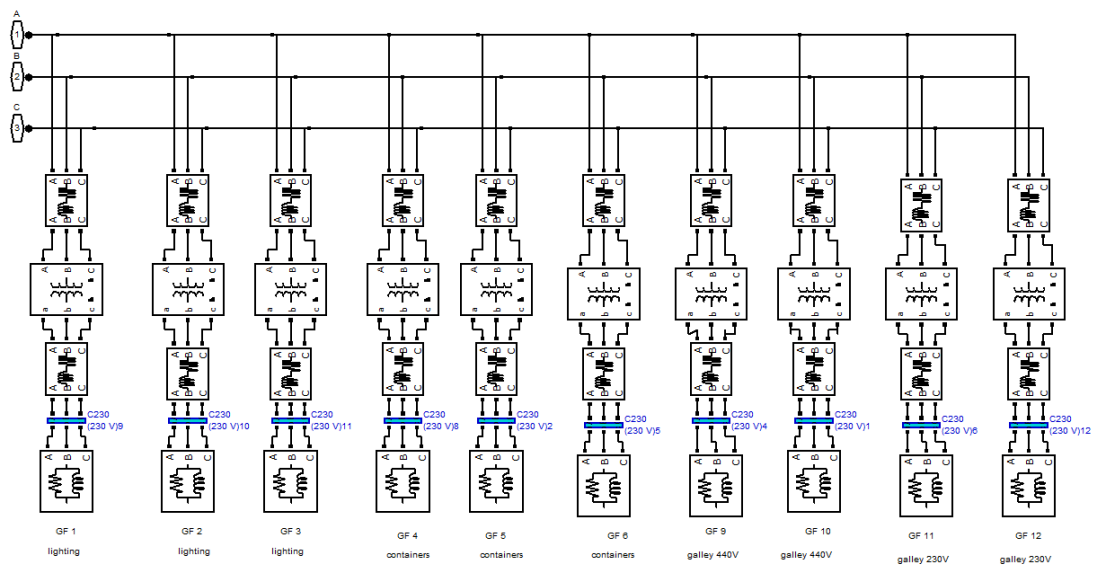
Για την μοντελοποίηση των μετασχηματιστών 440/440 V και 440/230 V του πλοίου, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του τριφασικού μετασχηματιστή δυο τυλιγμάτων που υπάρχει στη βιβλιοθήκη του Simulink. Το μοντέλο αυτό υλοποιεί ένα τριφασικό μετασχηματιστή χρησιμοποιώντας τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές. Τα δυο τυλίγματα του μετασχηματιστή έχουν επιλεγεί να είναι συνδεδεμένα σε συνδεσμολογία τριγώνου. Τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών είναι τα ακόλουθα.

Παράμετροι	Μ/Σ 1,2,3	Μ/Σ 4	Μ/Σ 5	Μ/Σ 6	Μ/Σ 7,8	Μ/Σ 9,10	Μ/Σ έκτακτης ανάγκης
Ονομαστική ισχύς Pn (VA)	287.5e3	287.5e3	207e3	80.5e3	240e3	60e3	150e3
Συχνότητα f (Hz)	60	60	60	60	60	60	60
Τύλιγμα 1							
Τάση V1 Ph-Ph (Vrms)	440	440	440	440	440	440	440
Αντίσταση R1(ρu)	0.017	0.013	9.36 e-3	3.667 e-3	0.012	0.023	0.0133
Επαγωγή L1(ρu)	0.028	0.027	0.019	7.5 e-3	0.024	0.039	0.027

Τόλγμα 2								
Τάση V2 (V _{rms})	Ph-Ph	230	440	440	440	440	230	230
Αντίσταση R2 (pu)		0.064	0.013	9.36 e-3	3.667 e-3	0.012	0.085	0.0487
Επαγωγή L2 (pu)		0.1	0.027	0.019	7.5 e-3	0.024	0.142	0.0983
Αντίσταση μαγνήτισης Rm (pu)		4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400
Επαγωγή μαγνήτισης Lm (pu)		34017	34017	34017	34017	34017	34017	34017



Σχήμα 22 : Μοντέλο καταναλωτών 440 V



Σχήμα 23 : Μοντέλο καταναλωτών μέσω μετασχηματιστών 440/230 V και 440/440 V

