

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΤμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΜΕΛΕΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥ ΚΑΙ ΑΕΡΓΟΥ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΣΜΕΝΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΑΞΟΝΑ»

Του Προπτυχιακού Φοιτητή

Ηλία Γ. Ξανθόπουλου

Επιβλέπων

Ιωάννης Προυσαλίδης, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ναυπηγών Μηχ. Μηχ.

<u>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</u>

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έγινε προσπάθεια να εξετάσουμε από δυναμικής πλευράς, τη συμπεριφορά των συμβατικών αλλά και των αξονικών γεννητριών όταν αυτές λειτουργούν εν παραλλήλω. Ένα σημαντικό βήμα για τη κατανόηση του προβλήματος της ισοκατανομής που προκύπτει στα εν λόγω συστήματα, αποτελεί η μοντελοποίηση ενός πραγματικού και ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής ενέργειας ενός πλοίου.

μοντελοποίηση λοιπόν Για τη αυτού του ολοκληρωμένου δικτύου οποίο *χρησιμοποιήθηκε* το υπολογιστικό πακέτο «MATLAB», με το πραγματοποιήθηκαν οι εν λόγω προσομοιώσεις για διάφορους πιθανούς συνδυασμούς των ανωτέρω γεννητριών. Ειδικότερα μοντελοποιήθηκαν τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη πραγματικού πλοίου του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού, για το οποίο είχαμε όλα τα απαραίτητα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των ηλεκτροπαραγωγών μονάδων καθώς και λεπτομερή καταγραφή των ηλεκτρικών φορτίων ύστερα από τις αναλυτικές μετρήσεις που διεξήχθησαν από επιστημονική ομάδα με επικεφαλής τον κ. Ιωάννη Προυσαλίδη, Επ. Καθηγητή ΕΜΠ. Το πλοίο αυτό παρουσίαζε πρόβλημα στον επιμερισμό ενεργού και άεργου ισχύος μεταξύ των γεννητριών του, πρόβλημα το οποίο όπως είπαμε, καλούμαστε να εξετάσουμε και να προσπαθήσουμε να προσεγγίσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα στην παρούσα διπλωματική.

Τέλος, πρέπει να τονίσουμε, ότι στην παρούσα εργασία, ενεργό ρόλο είχε και ο συμφοιτητής και συνάδελφος στη σχολή Ναυπηγών Μηχ. Μηχ. Κωνσταντίνος Βουτζουλίδης, ο οποίος ανέλαβε εν τέλη την αντιμετώπιση του στατικού προβλήματος (διεξοδική ανάλυση των εξισώσεων επιμερισμού φορτίου και μέθοδοι επίλυσης της λεγόμενης 1ουσας & 2ουσας ρύθμισης συχνότητας και τάσης).

-I-

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

KE Φ. 1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ & ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	1
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.2	ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	2
1.2.1	Κατηγορίες Αξονικών Γεννητριών	2
1.2.2	Πλεονεκτήματα Αξονικών Γεννητριών	4
1.2.3	Μειονεκτήματα Αξονικών Γεννητριών	6
1.3	ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	8
КЕФ. 2.	ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΟΥ & ΑΕΡΓΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	9
2.1	ΑΥΤΟΡΥΘΜΙΣΗ – ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ (1ουσα) ΡΥΘΜΙΣΗ	9
2.2	ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΡΥΘΜΙΣΗ	12
2.3	ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΩΝ	13
КЕФ. 3.	ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΣΩ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ ΜΑΤLAB	14
3.1	ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΗΧΑΝΩΝ	14
3.1.1	Γεννήτριες	14
3.1.2	Κινητήριες Μηχανές	16
3.1.3	Στρεφόμενοι Πυκνωτές (Condensers)	17
3.1.4	Ρυθμιστές Στροφών (Speed Governors)	18
3.1.5	Συστήματα Διεγέρσεως και Ρυθμιστές Τάσεως (AVR's)	20
3.2	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΤΟ MATLAB	27
3.2.1	Μοντέλα Μηχανών & Υποσυστημάτων	28
3.2.1.	1 Γεννήτρια Diesel	28
3.2.1.	2 Αξονική Γεννήτρια με Στρεφόμενο Πυκνωτή	30
3.2.1.	3 Υποσύστημα Ελέγχου Γεννητριών (Speed Governor & AVR)	35
3.2.2	Συνδυασμοί Παραλληλισμένων Γεννητριών (Σενάρια Συστημάτων)	39
3.2.3	Παραδοχές	43
КЕФ. 4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ΜΑΤLAB	44
4.1	APXEIO «promitheas2v1swt5.mdl» - 4 Diesel + 2 Shaft + RL	45

4.2	APXEIO «promitheas2v2mtswB.mdl»	- 4 Diesel + 2 Shaft + RL + Motor	53
4.3	APXEIO «promitheas7ver1B.mdl»	- 2 Diesel + 1 Shaft + RL + Motor	62
4.4	$APXEIO \ {\it wpromitheas} 7v2mtswsB.mdl {\it w}$	- 1 Diesel + 1 Shaft + RL	72
4.5	APXEIO «promitheas7ver2B.mdl»	- 1 Diesel + 1 Shaft + RL + Motor	80

4.6	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	90
4.7	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	92
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	94
	ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	95
	ПАРАРТНМА	

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u> <u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ & ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΕΣ</u> <u>ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ</u>

1.1. <u>EISAF Ω FH</u>

Στις τελευταίες δεκαετίες, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία εκτός από τα συνηθισμένα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη με συμβατικές Diesel γεννήτριες, γίνεται και με τα λεγόμενα αξονικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής, δηλαδή γεννήτριες που στρέφονται από την κύρια προωστήρια μηχανή του πλοίου. Η πρόκληση όμως που ανακύπτει αφορά τα προβλήματα συγχρονισμένης και εν παραλλήλω λειτουργίας αυτών των συστημάτων με τα συμβατικά ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη δυναμική άποψη του προβλήματος επιμερισμού ενεργού και άεργου φορτίσεως μεταξύ των παραλληλισμένων συμβατικών γεννητριών και των γεννητριών άξονα, μέσω του περιβάλλοντος του υπολογιστικού πακέτου MATLAB.

Σημειώνεται ότι σε αυτήν την διπλωματική εργασία, δεν περιλαμβάνεται η διεξοδική ανάλυση των εξισώσεων επιμερισμού φορτίου και οι μέθοδοι επίλυσης της λεγόμενης 1ουσας & 2ουσας ρύθμισης συχνότητας και τάσης, τα οποία και αναφέρονται στην διπλωματική εργασία του συναδέλφου Κωνσταντίνου Βουτζουλίδη.

Τέλος αξίζει να τονιστεί πως η συγκεκριμένη εργασία προέκυψε ύστερα από μελέτη πραγματικού προβλήματος πλοίου του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού, το οποίο και παρουσίαζε πολύ κακό επιμερισμό φορτίσεως μεταξύ των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών.

1.2. <u>ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ</u></u>

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πάνω σε ένα πλοίο, είναι ένα από τα βασικότερα κομμάτια της σωστής λειτουργίας του. Εκτός από σταθερή αλλά και αξιόπιστη, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν και πιο συμφέρουσα. Ο πιο κοινός τρόπος να παράγεις ενέργεια πάνω σε ένα πλοίο είναι οι συμβατικές ντηζελογεννήτριες, οι οποίες όμως χρειάζονται διαφορετικά καύσιμα από την προωστήρια μηχανή, που είναι όμως και πιο ακριβά από το βαρύ

πετρέλαιο.

Ο πιο εξεζητημένος τρόπος είναι οι αξονικές γεννήτριες. Οı αξονικές γεννήτριες βρίσκονται συνδεδεμένες πάνω στον άξονα της έλικας. Εκμεταλλευόμενες την περιστροφή του, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς όμως να καταναλώνουν επιπλέον καύσιμα, βοηθώντας ταυτόχρονα και



στην εξοικονόμηση χρημάτων. Το κυριότερο όμως είναι το γεγονός ότι δημιουργούν εξαιρετικά αποθέματα ενέργειας, κυρίως εν πλω, προκειμένου να λειτουργήσουν μηχανήματα δευτερεύουσας, ακόμα και τριτεύουσας σημασίας.

Έτσι λοιπόν, η χρήση αξονικών γεννητριών σε συνδυασμό με δίχρονες ντηζελογεννήτριες αποτελούν την πιο συμφέρουσα λύση και για αυτό η χρήση τους είναι συνώνυμο της οικονομικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2.1. Κατηγορίες Αξονικών Γεννητριών

Η εταιρεία MAN B&W Diesel κατηγοριοποιεί τις αξονικές γεννήτριες σε 3 βασικές κατηγορίες [11]:

1) PTO/GCR (Power Take Off / Gear Constant Ratio)

Οι γεννήτριες τύπου PTO/GCR είναι οι απλούστερου τύπου αξονικές γεννήτριες, καθώς δεν έχουν κανενός είδους σύστημα ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής των, οπότε και των συχνοτήτων που παράγουν. Στις

περισσότερες των περιπτώσεων οι γεννήτριες αυτές χρησιμοποιούνται όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω, γιατί τότε αν το πλοίο διαθέτει έλικα μεταβλητού βήματος η κύρια μηχανή του δουλεύει σε σταθερές στροφές. Διαφορετικά οι καταναλωτές που είναι ευαίσθητοι σε μεταβαλλόμενες τιμές συχνότητας πρέπει να τροφοδοτούνται είτε μέσω μετατροπέα συχνότητας, είτε μέσω ντηζελογεννητριών. Οι γεννήτριες τύπου PTO/GCR είναι αδύνατο να λειτουργήσουν σε παραλληλία με ντηζελογεννήτριες εξ'αιτίας του μεταβλητού ρυθμού περιστροφής του ελικοφόρου άξονα, ακόμα και στις περιπτώσεις που η έλικα είναι μεταβλητού βήματος. Μπορούν όμως κατά τη διάρκεια των ελιγμών του σκάφους να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδότηση των πρυμναίων βοηθητικών προωστήρων (bow-thrusters) το οποίο έχει τη δυνατότητα να δουλεύει με μεταβαλλόμενη συχνότητα. Τέλος, ο βαθμός απόδοσης των γεννητριών αυτών είναι περίπου 92%.

2) PTO/RCF (Power Take Off / Renk Constant Frequency)

Ένα σύστημα ηλεκτρονικού ελέγχου εξασφαλίζει ότι η συχνότητα του ρεύματος που παράγονται από τις γεννήτριες PTO/RCF είναι ίδια με εκείνη που παράγουν οι ντηζελογεννήτριες και έτσι επιτρέπει στις PTO/RCF να λειτουργούν μόνες τους ή σε παραλληλία με τις ντηζελογεννήτριες. Έτσι λοιπόν, οι γεννήτριες PTO/RCF είναι κατάλληλες για πλοία τα οποία φέρουν έλικες μεταβλητού βήματος. Ο βαθμός απόδοσης των γεννητριών αυτών, κυμαίνεται από 88-91%.

3) <u>PTO/CFE (Power Take Off / Constant Frequency Electrical)</u>

Κύρια χαρακτηριστικά των γεννητριών τύπου PTO/CFE είναι ότι όπως και οι γεννήτριες PTO/RCF παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα σταθερής συχνότητας. Στις γεννήτριες αυτές το εναλλασσόμενο ρεύμα μεταβλητής συχνότητας που παράγεται, διέρχεται από μία συστοιχία από θυρίστορς, μετατρέπεται σε συνεχές ρεύμα σταθεροποιείται η συχνότητά του και στην συνέχεια διέρχεται μέσα από έναν αντιστροφέα όπου και μετατρέπεται πάλι σε εναλλασσόμενο ρεύμα και διοχετεύεται στο δίκτυο του πλοίου. Ο βαθμός απόδοσης των αργόστροφων γεννητριών αυτού του τύπου, κυμαίνεται από 84 έως 88%. Είναι βασικό να τονισθεί, ότι μόνο οι αξονικές γεννήτριες τύπου PTO/RCF και PTO/CFE μπορούν να παρέχουν ρεύμα σταθερής συχνότητας στο πλοίο ανεξαρτήτως των στροφών λειτουργίας τη κύριας μηχανής, σε αντίθεση με τις αξονικές γεννήτριες τύπου PTO/GCR. Τέλος οι αξονικές γεννήτριες και των τριών παραπάνω κατηγοριών μπορούν να εγκατασταθούν πρώραθεν, πρύμνηθεν ή ακόμα και στο πλάι της κύριας μηχανής.

1.2.2. Πλεονεκτήματα Αξονικών Γεννητριών

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα συστήματα αξονικών γεννητριών παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, τα οποία είναι αναλυτικά τα εξής:

1) Καταλαμβάνουν μικρό όγκο στο μηχανοστάσιο

Οι αξονικές γεννήτριες τοποθετούνται κοντά στην κύρια μηχανή ή στον ελικοφόρο άξονα χωρίς να έχουν την απαίτηση ύπαρξης δευτερευόντων μηχανημάτων. Πιο συγκεκριμένα, οι γεννήτριες τύπου PTO BW III και PTO BW IV απαιτούν ελάχιστο χώρο, ενώ οι γεννήτριες τύπου SMG/CFE και DMG/CFE απαιτούν πρόσθετο χώρο στο μηχανοστάσιο για την τοποθέτηση των σύγχρονων μηχανών και των δωματίων ελέγχου.

2) <u>Χαμηλό κόστος επένδυσης (PTO/GCR)</u>

Το κόστος επένδυσης, εξαρτάται από τον τύπο και την ποιότητα κατασκευής της αξονικής γεννήτριας. Για παράδειγμα, οι αξονικές γεννήτριες τύπου PTO/GCR είναι αρκετά φτηνές, ενώ οι αξονικές γεννήτριες με ρυθμιζόμενη συχνότητα τύπου PTO/RCF και PTO/CFE είναι αρκετά ακριβότερες.

3) Χαμηλό κόστος εγκατάστασης

Οι αξονικές γεννήτριες, δεν απαιτούν ιδιαίτερα περίπλοκα συστήματα έδρασης, ούτε συστήματα εξαγωγής καυσαερίων, παρά μόνο μερικές συνδέσειςυποδοχές- για τα διάφορα βοηθητικά μηχανήματα. Ακόμα, ο χρόνος εγκατάστασης μίας αξονικής γεννήτριας είναι αρκετά μικρότερος σε σύγκριση με μία ντηζελογεννήτρια.

4) <u>Υψηλή αξιοπιστία</u>

Οι αξονικές γεννήτριες, λόγω των λίγων απαρτιζόμενων μηχανικών εξαρτημάτων έχουν βαθμό αξιοπιστίας σχεδόν ίδιο με εκείνο των κυρίων μηχανών που τις κινούν.

5) Χαμηλό κόστος συντήρησης

Το κόστος συντήρησης των αξονικών γεννητριών είναι ιδιαίτερα χαμηλό. Ενδεικτικά, αναφέρουμε ότι 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) Χαμηλό κόστος ανταλλακτικών

Η υψηλή αξιοπιστία των αξονικών γεννητριών σε συνάρτηση με τον μικρό αριθμό ανταλλακτικών που η ίδια απαιτεί, συνεπάγονται ιδιαίτερα χαμηλό κόστος συντήρησης.

7) <u>Μεγάλη διάρκεια ζωής</u>

Γενικά, οι αξονικές γεννήτριες δεν υπόκεινται σε μεγάλη φθορά. Άλλα ακόμα και τα μηχανικά εξαρτήματα τα οποία χρήζουν αντικατάστασης όπως για παράδειγμα ρουλεμάν, μηχανοκίνητες αντλίες λαδιού, σύνδεσμοι τριβής, κ.τ.λ. έχουν ιδιαίτερα μεγάλη διάρκεια ζωής.

8) <u>Χαμηλά επίπεδα θορύβου</u>

Τα επίπεδα θορύβου των αξονικών γεννητριών είναι αρκετά χαμηλότερα από εκείνα των υπόλοιπων γεννητριών.

1.2.3. Μειονεκτήματα Αξονικών Γεννητριών

Βεβαίως τα αξονικά συστήματα παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία όμως από μόνα τους δεν είναι ικανά να δημιουργήσουν σημαντικά προβλήματα. Αναλυτικά έχουμε τα εξής:

1) Δεν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια όταν τα πλοία είναι εν όρμω

Στις περιπτώσεις αυτές, τα πλοία καλύπτουν τις απαιτήσεις τους για ηλεκτρική ενέργεια μέσω συμβατικών γεννητριών. Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις για ηλεκτρική ενέργεια είναι ιδιαίτερα μεγάλες –όπως για παράδειγμα στα μεγάλα δεξαμενόπλοια – τότε είναι δυνατή η χρήση της κύριας μηχανής του σκάφους σε συνδυασμό με τη αξονική γεννήτρια για την λειτουργία των αντλιών άντλησης του πετρελαίου του πλοίου από τις δεξαμενές του (έχοντας αποσυμπλέξει την έλικα).

2) Επιπλέον φόρτιση της κύριας μηχανής

Όταν μία αξονική γεννήτρια συνδέεται στο ελικοφόρο άξονα μίας μηχανής, τότε αυξάνεται το φορτίο της και κατ' επέκταση αυξάνεται η κατανάλωση καυσίμου και η κατανάλωση σε λιπαντικό έλαιο.

<u>Μειωμένη απόδοση της κύριας μηχανής και της έλικας του πλοίου για τις</u> <u>αξονικές γεννήτριες τύπου PTO/GCR</u>

Επειδή θέλουμε η παραγόμενη συχνότητα από την αξονική γεννήτρια 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) <u>Αδυναμία παράλληλης σύνδεσης των αξονικών γεννητριών τύπου PTO/GCR με</u> <u>συμβατικές γεννήτριες.</u>

Οι αξονικές γεννήτριες τύπου PTO/GCR, δεν μπορούν να λειτουργήσουν παράλληλα με συμβατικές γεννήτριες. Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο όταν η απαίτηση για φορτίο υπερβαίνει τις δυνατότητες των συμβατικών γεννητριών, οπότε η αξονική γεννήτρια αναλαμβάνει να παράγει το επιπλέον απαιτούμενο φορτίο.

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, κάτι το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας του αξονικού συστήματος.

1.3. ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια, ενώ στο τέλος παρατίθεται και ένα παράρτημα.

Αναλυτικότερα λοιπόν, στο Κεφάλαιο 1, το οποίο είναι και το παρόν κεφάλαιο, γίνεται μια συνοπτική εισαγωγή στο τι θα συναντήσουμε σε αυτήν την εργασία, καθώς και μια σύντομη παρουσίαση των ηλεκτροπαραγωγών συστημάτων αξονικών γεννητριών.

Στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται οι μαθηματικές εξισώσεις επίλυσης της ισοκατανομής φορτίου ενεργού και άεργου φορτίου μεταξύ των γεννητριών τόσο στην πρωτεύουσα (1ουσα) όσο και στην δευτερεύουσα (2ουσα) ρύθμιση, εφαρμόζοντας την μέθοδο Newton-Raphson. Επίσης αναγράφονται και τα κριτήρια επιμερισμού του φορτίου σύμφωνα με τους κανονισμούς των νηογνωμόνων.

Στο Κεφάλαιο 3 αρχικά γίνεται μία παρουσίαση των δυναμικών μοντέλων των μηχανών που εμπλέκονται στην διαδικασία του επιμερισμού, δηλαδή μια σύντομη επεξήγηση των γεννητριών, κινητήριων μηχανών, Condenser, Governor & AVR. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μοντελοποιημένες στο «MATLAB» μηχανές, οι οποίες και βασίζεται στις αντίστοιχες του πλοίου του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού. Βέβαια έχουν γίνει κάποιες παραδοχές, οι οποίες όμως επηρεάζουν σε μικρό βαθμό τα τελικά αποτελέσματα.

Επίσης, στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε στο περιβάλλον του «MATLAB» με μορφή διαγραμμάτων και διατυπώνονται τα συμπεράσματα στα οποία οδηγηθήκαμε.

Τέλος, στο Παράρτημα παρουσιάζονται οι οδηγίες χρήσεως του προγράμματος «MATLAB» καθώς και λεπτομερής περιγραφή των αρχείων που συνοδεύουν αυτή τη διπλωματική εργασία.

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</u> <u>ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΚΑΙ ΑΕΡΓΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΤΑΞΥ</u> <u>ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ</u>

2.1. ΑΥΤΟΡΥΘΜΙΣΗ - ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ (1ουσα) ΡΥΘΜΙΣΗ

Σύμφωνα με τη διπλωματική του συναδέλφου Κωνσταντίνου Βουτζουλίδη [3] και με θέμα τον επιμερισμό σε στατικό επίπεδο ενεργού και άεργου φορτίου μεταξύ γεννητριών, παρουσιάζουμε εδώ την κατάστρωση εξισώσεων της αυτορύθμισης με χρήση της μεθόδου Newton-Raphson [2],[4],[7]:

Εξισώσεις ισοζυγίου ενεργού ισχύος

$$\sum_{k=1}^{M} P_{K} = P_{OA} \tag{2}$$

Οι σχέσεις (1) & (2) συνιστούν γραμμικό σύστημα (M+1)x(M+1) εξισώσεων με αγνώστους: f, P₁, P₂, ..., P_M.

Εξισώσεις για άεργες ισχύες-τάση

$$Q_{OA} = \frac{V(E_1 \cdot \cos \delta_1 - V)}{x_1} + \frac{V(E_2 \cdot \cos \delta_2 - V)}{x_2} + \dots + \frac{V(E_M \cdot \cos \delta_M - V)}{x_M}$$
(3)

$$P_1 = \frac{V \cdot E_1}{x_1} \sin \delta_1$$

$$P_2 = \frac{V \cdot E_2}{x_2} \sin \delta_2$$
(4)

•••

$$P_M = \frac{V \cdot E_M}{x_M} \sin \delta_M$$

Οι σχέσεις (3) & (4) συνιστούν *Μη Γραμμικό σύστημα (M+1)x(M+1) εξισώσεων* με αγνώστους: V, δ₁, δ₂, ..., δ_M

Μόλις οι άγνωστοι προσδιοριστούν τότε οι επιμέρους άεργες φορτίσεις των γεννητριών προκύπτουν ως εξής:

$$Q_1 = \frac{V(E_1 \cdot \cos \delta_1 - V)}{x_1}$$
$$Q_2 = \frac{V(E_2 \cdot \cos \delta_2 - V)}{x_2}$$
...

$$Q_M = \frac{V(E_M \cdot \cos \delta_M - V)}{x_M}$$

Λόγω του μη γραμμικού χαρακτήρα του συστήματος, αυτό λύνεται μέσω της μεθόδου Newton-Raphson, όπως δείχνεται συνοπτικά στη συνέχεια.

Εάν το άγνωστο προς προσδιορισμό διάνυσμα είναι

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} V \\ \delta_1 \\ \dots \\ \delta_M \end{bmatrix}$$

g₁:
$$\frac{V \cdot E_1}{x_1} \sin \delta_1 - P_1 = 0$$

g₂:
$$\frac{V \cdot E_2}{x_2} \sin \delta_2 - P_2 = 0$$

•••

$$g_{\rm M}: \qquad \frac{V \cdot E_M}{x_M} \sin \delta_M - P_M = 0$$

 x_2

$$g_{M+1}: \quad \frac{V(E_1 \cdot \cos \delta_1 - V)}{x_1} + \dots + \frac{V(E_M \cdot \cos \delta_M - V)}{x_M} - Q_{OA} = 0$$

Η αντίστοιχη ιακωβιανή μήτρα είναι $\frac{\partial g}{\partial y}$:

Οπότε η λύση προκύπτει από διαδοχικές επαναληπτικές εφαρμογές του μαθηματικού τύπου:

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_{\mathbf{o}} - \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^{-1}$$

2.2. ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΡΥΘΜΙΣΗ

Στην δευτερεύουσα ρύθμιση τα πράγματα είναι πιο εύκολα καθώς είναι προκαθορισμένες βάσει των κανονισμών των νηογνωμόνων (βλ. Επόμενη ενότητα), οι επιθυμητές παραγωγές-φορτίσεις των γεννητριών P_{K} , Q_{K} και ζητούμενες πλέον είναι οι ρυθμίσεις f_{LK} για τον κανόνα εγχύσεως καυσίμου καθώς και το E_{K} για τη διέγερση της γεννήτριας. [2],[4],[7].

$$f = f_{L_{\kappa}} - x_{P_{\kappa}} \cdot \frac{P_{\kappa}}{P_{N_{\kappa}}} \cdot f_{N_{\kappa}}$$
, κ=1,2,....Μ. Άγνωστοι τα f_{Lk}.

Ενώ:

•
$$\alpha \pi \circ P_k$$
: $E_k \cdot \sin \delta_k = \frac{\overline{P}_k \cdot X_k}{V},$ k=1,2,...,M

•
$$\alpha \pi \circ Q_k$$
: $E_k \cdot \cos \delta_k = \frac{\overline{Q}_k \cdot X_k + V^2}{V}, \quad k=1,2,...,M$

Οπότε:

$$E_{k} = \sqrt{\left(\frac{\overline{P}_{k} \cdot X_{k}}{V}\right)^{2} + \left(\frac{\overline{Q}_{k} \cdot X_{k} + V^{2}}{V}\right)^{2}}$$
$$\tan \delta_{k} = \frac{\overline{P}_{k} \cdot X_{k}}{\overline{Q}_{k} \cdot X_{k} + V^{2}}$$

όπου k=1,2,3,...,M και E_k , δ_k άγνωστοι.

f,V	συχνότητα & τάση λειτουργίας	x _{Pk}	στατισμοί των f-P
f _{Nk}	60Hz/50Hz ονομαστική συχνότητα	P _{Nk}	Ονομαστικές ισχείς ενεργές
X _K	Επαγωγικές αντιδράσεις γεννητριών	E _K	ΗΕΔ γεννητριών
δ_{K}	Γωνίες ισχύος γεννητριών	f _{LK}	Συχνότητες κενού φορτίου γεννητριών

2.3. <u>ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΩΝ</u>

Για τον επιμερισμό ενεργού και άεργου φορτίου μεταξύ γεννητριών σε παραλληλισμό, τα κριτήρια παραλαβής σύμφωνα με τον ιταλικό νηογνώμονα RINA (Registro Italiano Navale) και τους διεθνείς νηογνώμονες, είναι τα παρακάτω [9],[11],[13]:

- Για φορτίο το οποίο βρίσκεται στο διάστημα 0-100% του ονομαστικού, η μεταβολή της συχνότητας δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 5% της ονομαστικής.
- Με σταθερό τον ονομαστικό συντελεστή ισχύος cosφ, η μέγιστη διακύμανση τάσεως για παραλαβή φορτίου μεταξύ 0-100% του ονομαστικού, δεν πρέπει να υπερβαίνει το όριο ± 2,5%. Επιτρέπεται η μεταβατική υπέρταση ±10% για χρονικό διάστημα ίσο με μια θεμελίωση ημιπερίοδο (8,33ms στα 60Hz, 10ms στα 50Hz).
- Το συνολικό φορτίο μεταξύ παραλληλισμένων γεννητριών, πρέπει να κατανέμεται ανάμεσα στις γεννήτριες με τέτοιο τρόπο ώστε το φορτίο κάθε γεννήτριας να μην διαφέρει από το φορτίο αναλογικής κατανομής περισσότερο από το 15% της ονομαστικής ισχύος της μεγαλύτερης γεννήτριας ή το 25% της ονομαστικής ισχύος της συγκεκριμένης γεννήτριας, όποιο είναι μικρότερο.
- Η φαινόμενη ισχύς μεταξύ παραλληλισμένων γεννητριών, πρέπει να κατανέμεται ανάμεσα στις γεννήτριες με τέτοιο τρόπο ώστε η φαινόμενη ισχύς κάθε γεννήτριας να μην διαφέρει από τη φαινόμενη ισχύ αναλογικής κατανομής περισσότερο από το 5% της ονομαστικής φαινόμενης ισχύος της μεγαλύτερης γεννήτριας, όταν αυτή λειτουργεί με συντελεστή ισχύος cosφ=0,8.

Ο μόνος περιορισμός σε χρονική διάρκεια είναι αυτός της μεταβατικής υπερ/υπότασης. Έτσι τονίζεται ότι σε κανένα κανονισμό δεν ορίζεται το χρονικό διάστημα εντός του οποίου πρέπει να επιτευχθεί η ισοκατανομή.

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u> <u>ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΣΩ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ</u> ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ ΜΑΤLAB

3.1. <u>ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΗΧΑΝΩΝ</u>

Μέσα από αυτό το κεφάλαιο θα προσπαθήσουμε να προσεγγίσουμε τα χαρακτηριστικά των μοντέλων μηχανών (γεννήτριες, κύριες μηχανές, στρεφόμενοι πυκνωτές, ρυθμιστές στροφών, ρυθμιστές τάσης) τις οποίες και κατασκευάσαμε στο υπολογιστικό περιβάλλον του MATLAB. Με αυτόν τον τρόπο θα είμαστε σε θέση να κατανοήσουμε τον τρόπο λειτουργίας τους, καθώς και τα κρίσιμα στοιχεία που ορίζουν την συμπεριφορά τους. Έτσι θα μπορούμε να ρυθμίσουμε σωστά στο πρόγραμμα της προσομοίωσής μας την εκάστοτε μηχανή. Αναλυτικά έχουμε τα ακόλουθα μοντέλα μηχανών:

3.1.1. <u>Γεννήτριες</u>

Ηλεκτρική γεννήτρια θεωρείται η συσκευή που μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η πηγή της κινητικής ή καλύτερα της μηχανικής ενέργειας μπορεί να είναι μια παλινδρομική μηχανή (MEK), ένας ατμοστρόβιλος ή ακόμα και ένας υδροστρόβιλος.

Η γεννήτρια αποτελείται από δύο μέρη: το ακίνητο μέρος της που λέγεται στάτορας (στάτης – stator), στο οποίο υπάρχουν μαγνήτες (συγκεκριμένα ηλεκτρομαγνήτες) και το κινητό μέρος της που λέγεται ρότορας (rotor) στο οποίο υπάρχουν πηνία. Έτσι η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, όταν ένα πηνίο (τύλιγμα πεδίου στο δρομέα) στραφεί μέσα σ' ένα Μαγνητικό Πεδίο, τότε στους ακροδέκτες του τυλίγματος του τυμπάνου που βρίσκεται στον στάτη δημιουργείται το ηλεκτρικό ρεύμα. Το τύλιγμα πεδίου (ή διεγέρσεως) που βρίσκεται στον δρομέα, τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα που προσάγεται στο τύλιγμα με ψήκτρες που ολισθαίνουν πάνω σε δακτυλίους [2],[6].

Ένα τυπικό μοντέλο 3-φασικής γεννήτριας η οποία έχει μετασχηματιστεί σε 2-φασικό ισοδύναμο κύκλωμα, φαίνεται στο παρακάτω σύστημα [10]:



Διάγραμμα των 3-φασικών και dq Τυλιγμάτων

Οι εξισώσεις Σύγχρονης Μηχανής, αντίστοιχης του ανωτέρω κυκλώματος, εκφράζονται παρακάτω:

$$V_{q} = r_{s}i_{q} + \frac{d\lambda_{q}}{dt} + \lambda_{d} \frac{d\theta_{r}}{dt} \qquad \qquad \lambda_{q} = L_{q}i_{q} + L_{mq}i_{s}^{'} + L_{mq}i_{kq}^{'}$$

$$V_{d} = r_{s}i_{d} + \frac{d\lambda_{d}}{dt} - \lambda_{q} \frac{d\theta_{r}}{dt} \qquad \qquad \lambda_{d} = L_{d}i_{d} + L_{md}i_{f}^{'} + L_{md}i_{kd}^{'}$$

$$V_{0} = r_{s}i_{0} + \frac{d\lambda_{0}}{dt} \qquad \qquad \lambda_{0} = L_{es}i_{0}$$

$$V'_{f} = r'_{f}\dot{i}'_{f} + \frac{d\lambda'_{f}}{dt}$$

$$\lambda'_{f} = L_{md}\dot{i}_{d} + L_{md}\dot{i}'_{kd} + L'_{ff}\dot{i}'_{f}$$

$$V'_{kd} = r'_{kd}\dot{i}'_{kd} + \frac{d\lambda'_{kd}}{dt}$$

$$\lambda'_{kd} = L_{md}\dot{i}_{d} + L_{md}\dot{i}'_{f} + L'_{kdkd}\dot{i}'_{kd}$$

$$\lambda'_{g} = L_{mq}\dot{i}_{q} + L'_{gg}\dot{i}'_{g} + L_{mq}\dot{i}'_{kq}$$

$$\lambda'_{g} = L_{mq}\dot{i}_{q} + L_{mg}\dot{i}'_{g} + L'_{kqkq}\dot{i}'_{kq}$$

$$\lambda'_{kq} = L_{mq}\dot{i}_{q} + L_{mq}\dot{i}'_{g} + L'_{kqkq}\dot{i}'_{kq}$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d)$$

3.1.2. Κινητήριες Μηγανές

Κινητήρια μηχανή ονομάζεται γενικά κάθε μηχανή που παράγει κινητήριο ωφέλιμο μηχανικό έργο. Η διάταξη της σύγχρονης γενικά μηχανής είναι τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται τελικά η κίνηση του λεγόμενου άξονα της μηχανής από τον οποίο και παραλαμβάνεται το κινητήριο ή ωφέλιμο έργο. Όλες οι κινητήριες μηχανές κατά την λειτουργία τους παραλαμβάνουν κατά κανόνα ενέργεια κάποιας μορφής π.χ. θερμική, ηλεκτρική ή υδραυλική κλπ. και την μετατρέπουν (ορθότερα μέρος αυτής) σε μηχανική ενέργεια ή κινητήριο έργο. Ανάλογα της μορφής της ενέργειας που παραλαμβάνουν οι κινητήριες μηχανές διακρίνονται σε:

- Θερμικές μηχανές ή θερμοκινητήρες: Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι ατμομηχανές, οι ατμοστρόβιλοι, οι αεριοστρόβιλοι, οι βενζινοκινητήρες ή βενζινομηχανές, οι αεριομηχανές, οι πετρελαιομηχανές ή κινητήρες Diesel κ.ά.
- Υδραυλικοί κινητήρες. Στη κατηγορία αυτή οι μηχανές καταναλίσκουν υδραυλική ενέργεια. και
- 3) Ηλεκτρικοί κινητήρες ή ηλεκτροκινητήρες.

Οι ηλεκτρογεννήτριες, όπως προαναφέραμε, ανήκουν στην πρώτη κατηγορία, τις θερμικές μηχανές και μετατρέπουν την θερμική ενέργεια του καυσίμου Diesel σε ηλεκτρική. Την παραγόμενη αυτή ενέργεια, την καταναλώνουν οι ηλεκτρικοί κινητήρες για να την μετατρέψουν σε κινητική.

Τυπικά παραδείγματα ηλεκτροκινητήρων που μπορούμε να συναντήσουμε πάνω σε πλοία και που ασχολούμαστε στην εργασία αυτή, είναι οι διάφορες αντλίες νερού, π.χ. αντλίες πυρόσβεσης, το bow thruster κτλ.

Οι ηλεκτροκινητήρες, και ειδικά οι ηλεκτροκινητήρες με μεγάλη ισχύ, κατά τη διάρκεια της εκκίνησης τους απαιτούν πολύ υψηλά φορτία από τις ηλεκτρογεννήτριες και παρουσιάζεται το φαινόμενο εισροής ρεύματος με αποτέλεσμα την απότομη πτώση τάσεως. Απορροφάται προσωρινά ρεύμα (εισροή) σημαντικά μεγαλύτερο από το ονομαστικό, έχουμε δηλαδή μια στιγμιαία ταλάντωση στο σύστημα μας, συνοδευόμενη με υψηλά ποσά ενεργού και αέργου ισχύος. Μεγαλύτερα προβλήματα μπορούν να δημιουργηθούν όταν ο κινητήρας κινεί υψηλά αδρανειακά φορτία τα οποία απαιτούν σημαντικές τιμές αρχικής ροπής, όπως μπορεί να συμβεί για παράδειγμα στην περίπτωση εκκίνησης του bow thruster.

3.1.3. Στρεφόμενοι Πυκνωτές (Condensers)

Ο στρεφόμενος πυκνωτής (synchronous condenser) είναι ουσιαστικά μία σύγχρονη μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, ο οποίος λειτουργεί σαν ένας κινητήρας, με την διαφορά ότι δεν έχει συνδεδεμένο στον άξονά του κάποιο στρεφόμενο φορτίο. Το πεδίο του στρεφόμενου πυκνωτή ελέγχεται από έναν ρυθμιστή τάσεως (AVR), είτε για να παράγει, είτε για να απορροφήσει άεργη ισχύ, αναλόγως με το τι ακριβώς ζητείται από το σύστημα.

Λειτουργεί με συντελεστή ισχύος ίσο με ένα (1) και εισάγει ουσιαστικά Var's στο δίκτυο όταν ζητείται από αυτό, προκειμένου να υποστηρίξει την τάση του συστήματος. Μάλιστα είναι ικανός να παράγει περιορισμένα ποσά τάσεως κατά την διάρκεια μικρών διακοπών, λόγω της περιστροφικής του αδράνειας.

Επίσης μπορεί να διορθώσει οπότε και να διατηρήσει τον συντελεστή ισχύος του συστήματος σε συγκεκριμένα επίπεδα. Γενικότερα οι στρεφόμενοι πυκνωτές δεν παράγουν μεταβατικές ανωμαλίες ενώ δεν επηρεάζονται και από τις αρμονικές του συστήματος. Μάλιστα μερικές αρμονικές μπορούν να απορροφηθούν από τους condensers, γι αυτό και πλέον χρησιμοποιούνται και ως εναλλακτικοί ή εφεδρικοί πυκνωτές στην περίπτωση της διόρθωσης του συντελεστού ισχύος.

Τέλος είναι ικανοί να προσφέρουν τα απαιτούμενα ποσά άεργης ισχύος στην περίπτωση εκκίνησης μεγάλων μηχανών όπως π.χ. Bow Thruster.

3.1.4. <u>Ρυθμιστές Στροφών (Speed Governor)</u>

Η ρύθμιση της συχνότητας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνιστάται στη συνεχή προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος από τις γεννήτριες προς το φορτίο του συστήματος, ώστε η συχνότητα να διατηρεί συνεχώς την κανονική της τιμή. Αν δεν γινόταν αυτό, οι γεννήτριες δεν θα ήταν σε θέση να παραλάβουν μια αύξηση φορτίου γιατί το άνοιγμα της αντλίας καυσίμου θα έμενε σταθερό και θα επέτρεπε μόνο μία ορισμένη ισχύ εισόδου στη μονάδα. Το αποτέλεσμα θα ήταν επιβράδυνση των μηχανών (για δεδομένη αύξηση φορτίου) και μείωση της συχνότητας του συστήματος [1].

Η αύξηση του φορτίου τροφοδοτείται αρχικά από την κινητική ενέργεια των στρεφομένων γεννητριών. Η μείωση των στροφών των μηχανών αντιστοιχεί στο ρυθμό παροχής της κινητικής ενέργειας προς το φορτίο. Έτσι χωρίς αυτόματη ρύθμιση στροφών το ισοζύγιο παραγωγής-καταναλώσεως θα επιτυγχανόταν σε συχνότητα σημαντικά μικρότερη από την ονομαστική.

Η εξισορρόπηση παραγόμενης ισχύος και φορτίου και η διατήρηση της επιθυμητής συχνότητας σ'ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με τους ρυθμιστές στροφών των γεννητριών, οι οποίοι ελέγχουν τη μηχανική ισχύ που παράγεται από τις κινητήριες μηχανές (στροβίλους). Οι ρυθμιστές στροφών μπορεί να θεωρηθούν σαν μηχανισμοί ελέγχου είτε της συχνότητας, είτε της ισχύος.

Αν μια γεννήτρια τροφοδοτεί ένα απομονωμένο φορτίο, ο ρυθμιστής στροφών λειτουργεί ελέγχοντας τη συχνότητα. Αν η γεννήτρια συνδέεται σ'ένα μεγάλο σύστημα, η ταχύτητα περιστροφής της είναι δεσμευμένη από τη συχνότητα του συστήματος και ο ρυθμιστής στροφών ελέγχει στην ουσία την παραγόμενη ισχύ.

Ο ρυθμιστής στροφών διαθέτει δύο τύπους ρυθμίσεων. Την πρωτεύουσα ρύθμιση και τη δευτερεύουσα.

Πρωτεύουσα ρύθμιση

Μια μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας γίνεται αντιληπτή από το φυγοκεντρικό ρυθμιστή που είναι συνδεδεμένος με τον άξονά της. Η μεταβολή αυτή μετατρέπεται σε σήμα-εντολή για τη μετακίνηση της δικλείδας του ατμοστροβίλου, είτε των ρυθμιστικών πτερυγίων του υδροστροβίλου, ώστε να προσαρμοστεί ανάλογα η μηχανική ισχύς που παράγεται από το στρόβιλο.

Δευτερεύουσα ρύθμιση

Συμπληρωματικά μπορεί να ενεργοποιηθεί (μέσω π.χ. μιας κεντρικής διάταξης ελέγχου σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα) ο μηχανισμός αλλαγής στροφών του ρυθμιστή. Μετριέται δηλαδή το σφάλμα συχνότητας του συστήματος μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση, καθώς και οι τυχόν διάφορές στη διακινούμενη ισχύ των εξωτερικών διασυνδέσεων, και με μια κατάλληλη στρατηγική ελέγχου αποστέλλονται σήματα που αντιστοιχούν σε μια νέα ταχύτητα αναφοράς κάθε γεννήτριας. Σημειώνεται ότι η δευτερεύουσα ρύθμιση μπορεί να γίνει και χειροκίνητα χωρίς κεντρικό έλεγχο.



Ρυθμιστής Στροφών

Λειτουργικό Διάγραμμα Ρυθμιστή Στροφών

Ένα τυπικό μοντέλο ενός prime mover/governor που χρησιμοποιείται συγκεκριμένα σε πολεμικά σκάφη, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Τυπικό μοντέλο Prime mover/Governor που χρησιμοποιείται σε πολεμικά σκάφη

3.1.5. Συστήματα Διεγέρσεως και Ρυθμιστές Τάσεως (AVR's – Automatic Voltage Regulators)

Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσεως μια γεννήτριας αναλαμβάνει να διατηρεί κατά το δυνατόν σταθερή την τάση στους τερματικούς ζυγούς της μεταβάλλοντας κατάλληλα την τάση του πεδίου διεγέρσεως. Η τελευταία τάση παρέχεται στο τύλιγμα πεδίου από το σύστημα διεγέρσεως της σύγχρονης μηχανής [1].

Η τάση είναι μέγεθος πιο ευαίσθητο στις μεταβολές του φορτίου από τη συχνότητα, αλλά και η απόκλιση της από την κανονική τιμή λιγότερο κρίσιμη για τη λειτουργία του συστήματος, από την απόκλιση της συχνότητας. Γι' αυτό, και οι ανοχές στη ρύθμιση, όπως και στη διακύμανση της τάσεως είναι πολύ μεγαλύτερες. Ενώ η συχνότητα ρυθμίζεται με ακρίβεια, π.χ. 0.03%, τα όρια της ακρίβειας για τις

τάσεις των ζυγών είναι της τάξεως του ± 1%. Επίσης, ενώ η συχνότητα επαναφέρεται στην κανονική τιμή της με τη δευτερεύουσα ρύθμιση, στην περίπτωση της τάσεως είναι ανεκτά μόνιμα σφάλματα και συνεπώς δεν απαιτείται δευτερεύουσα ρύθμιση.

Είδη Συστημάτων Διεγέρσεως

Στις σύγχρονες μηχανές το τύλιγμα διεγέρσεως (που λέγεται επίσης τύλιγμα πεδίου ή απλά πεδίο) τοποθετείται, όπως είναι γνωστό, στο δρομέα και τροφοδοτείται με συνεχή τάση. Η τάση αυτή παράγεται από μια ειδική διάταξη που ονομάζεται σύστημα διεγέρσεως της σύγχρονης μηχανής.

Μέγεθος ανάλογο προς το μέτρο της συνεχούς τάσεως, με την οποία τροφοδοτείται το τύλιγμα πεδίου, είναι η τάση διεγέρσεως της σύγχρονης γεννήτριας, δηλαδή η τάση στους ακροδέκτες της εν κενώ. Η τάση αυτή καθορίζει την άεργο ισχύ που παράγει (ή καταναλώνει) η γεννήτρια και ρυθμίζεται συνήθως ώστε να διατηρείται σταθερή η τερματική τάση σε μια επιθυμητή τιμή. Η τάση διεγέρσεως συμβολίζεται με το E_f .

Η ρύθμιση αυτή γίνεται από τον αυτόματο ρυθμιστή τάσεως, ο οποίος συγκρίνει το μέτρο της τερματικής τάσεως με την τάση αναφοράς και αναπροσαρμόζει ανάλογα την τάση διεγέρσεως. Το γενικό διάγραμμα ενός συστήματος διεγέρσεως, το οποίο αποτελείται από τον αυτόματο ρυθμιστή τάσεως και την κύρια διεγέρτρια φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Γενική Διάταξη Συστήματος Διεγέρσεως

Ανάλογα με το είδος της κύριας διεγέρτριας τα συστήματα διεγέρσεως χωρίζονται στις ακόλουθες βασικές κατηγορίες:

Στρεφόμενα συστήματα διεγέρσεως:

- Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος (DC)
- Μηχανές Εναλλασσομένου Ρεύματος (σύγχρονες) με ψήκτρες
- Μηχανές Εναλλασσομένου Ρεύματος (σύγχρονες) με στρεφόμενους ανορθωτές

Στατά συστήματα διεγέρσεως:

• Ανόρθωση με ηλεκτρονικές διατάξεις στερεάς καταστάσεως (Thyristor)

Το κλασικό σύστημα διεγέρσεως, περιλαμβάνει μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (διεγέρτρια), η οποία συνήθως κινείται από τον άξονα της γεννήτριας και τροφοδοτεί το τύλιγμα διεγέρσεως της μηχανής. Το τύλιγμα διεγέρσεως της διεγέρτριας τροφοδοτείται από συσσωρευτή, ή ανορθωτή, συνήθως όμως από βοηθητική γεννήτρια διεγέρσεως. Η διέγερση της διεγέρτριας ρυθμίζεται είτε μέσω ροοστάτη, ή μέσω θυρίστορ, στο οποίο επενεργεί ο ρυθμιστής τάσεως.

Στην περίπτωση διεγέρτριας εναλλασσομένου ρεύματος ο τύπος του συστήματος διεγέρσεως χαρακτηρίζεται από τη χρησιμοποίηση στατών ή στρεφόμενων ανορθωτών, για την ανόρθωση του ρεύματος και την τροφοδότηση του τυλίγματος διεγέρσεως. Η χρήση στρεφόμενων ανορθωτών παρουσιάζει το πλεονέκτημα να μην απαιτεί ψήκτρες για τη διέλευση του συνεχούς ρεύματος προς το τύλιγμα διεγέρσεως. Το μειονέκτημα των στρεφομένων ανορθωτών είναι η δυσκολία στην κατασκευή, δεδομένου ότι η στρεφόμενη διάταξη πρέπει να αντέχει τη φυγόκεντρη καταπόνηση.

Η σχηματική διάταξη μιας διεγέρτριας εναλλασσομένου ρεύματος με στρεφόμενους ανορθωτές φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Διεγέρτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με στρεφόμενους ανορθωτές

Η διεγέρτρια σ' αυτή την περίπτωση είναι μια σύγχρονη μηχανή, το τριφασικό τύμπανο της οποίας βρίσκεται στο δρομέα, ενώ το πεδίο διεγέρσεως (της διεγέρτριας) βρίσκεται στο στάτη και ελέγχεται μέσω στατών ανορθωτών χαμηλής ισχύος. Το εναλλασσόμενο ρεύμα του τύμπανου της διεγέρτριας ανορθώνεται από τη διάταξη των στρεφομένων ανορθωτών και τροφοδοτεί το πεδίο της γεννήτριας χωρίς παρεμβολή ψηκτρών.

Στην περίπτωση των στατών συστημάτων δεν υπάρχει η διεγέρτρια με τη μορφή στρεφόμενης μηχανής. Η τάση διεγέρσεως παρέχεται από την έξοδο της γεννήτριας και για το λόγο αυτό τα συστήματα αυτά λέγονται και «αυτοδιεγειρόμενα». Εναλλασσόμενη τάση μπορεί να παρέχεται επίσης από βοηθητική διεγέρτρια. Για την ανόρθωση και ρύθμιση του ρεύματος διεγέρσεως χρησιμοποιείται γέφυρα θυρίστορ, στην οποία επενεργεί και ο ρυθμιστής τάσεως.

Η τροφοδότηση του τυλίγματος διεγέρσεως από την έξοδο γίνεται μέσω μετασχηματιστή τάσεως και γέφυρας θυρίστορ. Ο ρυθμιστής τάσεως συγκρίνει τη μετρούμενη τάση με την τάση αναφοράς και δίνει σήμα σφάλματος προς τα θυρίστορ, για τη ρύθμιση του ρεύματος διεγέρσεως. Ο ρυθμιστής τροφοδοτείται είτε από μικρή βοηθητική γεννήτρια με μόνιμο μαγνήτη, κινούμενη από τον άξονα της

μηχανής, είτε από άλλη εξωτερική πηγή. Ένα πρωτεύον κύκλωμα επιτρέπει τη διέγερση της γεννήτριας χωρίς παραμένοντα μαγνητισμό, το οποίο τίθεται εκτός όταν η τάση εξόδου φθάσει το 50% ή 60% της κανονικής.



Στατό Σύστημα Διεγέρσεως με βοηθητική διεγέρτρια

Απόκριση συστήματος διεγέρσεως

Το σύστημα διεγέρσεως μιας γεννήτριας χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα αποκρίσεως, το κέρδος μονίμου καταστάσεως και το μεταβατικό κέρδος. Η ταχύτητα αποκρίσεως είναι σημαντική, γιατί μετά από μια μεγάλη διαταραχή (π.χ. ένα βραχυκύκλωμα κοντά στο ζυγό της γεννήτριας), είναι πολλές φορές σωτήριο για το σύστημα να αυξηθεί αμέσως η διέγερση της γεννήτριας. Το κέρδος μονίμου καταστάσεως καθορίζει την ακρίβεια ρυθμίσεως της τάσεως, όπως θα φανεί στη συνέχεια, ενώ το μεταβατικό κέρδος επιδρά στην ευστάθεια του συστήματος. Μέτρο της ταχύτητας αποκρίσεως ενός συστήματος διεγέρσεως αποτελεί συχνά ο λεγόμενος λόγος αποκρίσεως (response ratio).



Βρόχος ρυθμίσεως τάσεως

Ο βρόχος ρυθμίσεως τάσεως με ένα σύστημα διεγέρσεως πρώτης τάξεως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Η γεννήτρια παριστάνεται στο σχήμα αυτό από μια συνάρτηση

μεταφοράς πρώτης τάξεως με χρονική σταθερά T_d , που είναι η χρονική σταθερά του τυλίγματος διεγέρσεως υπό φορτίο (μικρότερη από τη χρονική σταθερά ανοιχτοκυκλώσεως T_{do}), και με ένα κέρδος K_G , που δείχνει πώς αλλάζει η τερματική τάση V_t στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας συναρτήσει της τάσεως διεγέρσεως E_f .

Το κέρδος K_A του συστήματος διεγέρσεως μετριέται ανά μονάδα τερματικής τάσεως. Δηλαδή 1αμ κέρδος διεγέρσεως σημαίνει 1αμ τάση διεγέρσεως για 1αμ σφάλμα τάσεως. Η σημασία του κέρδους μονίμου καταστάσεως φαίνεται αν υπολογιστεί με τη βοήθεια του σχήματος το μόνιμο σφάλμα τάσεως. Πράγματι, όταν s=0, δηλαδή για $t \rightarrow \infty$:

$$e_s = V_r - V_t = \frac{V_t}{K_G K_A}$$

Όσο μεγαλύτερο είναι συνεπώς το κέρδος διεγέρσεως, τόσο μικρότερο είναι το σφάλμα της τάσεως στη μόνιμη κατάσταση, και τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια της ρύθμισης τάσεως.

Επειδή όμως τα μεγάλα κέρδη διεγέρσεως μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητη επίδραση στην ευστάθεια του συστήματος, το κέρδος διεγέρσεως μειώνεται τεχνητά στις μέσες συχνότητες χωρίς να μεταβληθεί το κέρδος μονίμου καταστάσεως. Εμφανίζεται έτσι ένα μεταβατικό κέρδος του συστήματος διεγέρσεως.

Μια τυπική συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος διεγέρσεως με μεταβατική μείωση του κέρδους είναι η ακόλουθη:

$$\frac{E_f}{V_r V_t} = \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} = \frac{K_A}{1 + T_A s}$$

όπου T2 > T1, ούτως ώστε για τις μέσες συχνότητες το μεταβατικό κέρδος ΚΕ, που αντιστοιχεί στη συνάρτηση μεταφοράς, να είναι μικρότερο από το κέρδος μονίμου καταστάσεως ΚΑ:

$$K_E = K_A T_1 / T_2$$

Παράσταση συστημάτων διεγέρσεως και ρυθμίσεως τάσεως

Τα συστήματα διεγέρσεως και ρυθμίσεως της τάσεως μπορούν να παρασταθούν με σημαντική ακρίβεια. Παρακάτω βλέπουμε το μοντέλο συστήματος διεγέρσεως που είναι γνωστό ως Τύπου 1 κατά ΙΕΕΕ. Το σύστημα αυτό είναι αντιπροσωπευτικό των περισσότερων συστημάτων με στρεφόμενη διεγέρτρια.



Σύστημα διεγέρσεως και ρυθμίσεως τάσεως Τύπου 1 κατά ΙΕΕΕ

Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει 2 βρόχους. Έναν εξωτερικό, ρυθμίσεως της τάσεως και έναν εσωτερικό, σταθεροποιήσεως. Υπάρχει ένας ακόμη εσωτερικός βρόχος, ο οποίος παριστάνει τον κορεσμό της διεγέρτριας, όταν αυτή είναι στρεφόμενη. Η τάση εξόδου, ή τάση ζυγού, V, συγκρίνεται στην είσοδο με την τάση αναφοράς V_r .

Στα πολεμικά σκάφη μπορούμε να πούμε, σύμφωνα με τα δεδομένα μας, ότι για τον AVR και το σύστημα διεγέρσεως χρησιμοποιείται συχνότερα το μοντέλο Τύπου 2 κατά ΙΕΕΕ το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σύστημα διεγέρσεως και ρυθμίσεως τάσεως Τύπου 2 κατά IEEE

3.2. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΤΟ ΜΑΤLAB

Στο πλαίσιο μελέτης των δυναμικών φαινομένων σε κατάσταση γεννητριών σε παραλληλισμό, δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον Matlab κάποια συστήματα τα οποία καλύπτουν διάφορους συνδυασμούς γεννητριών εν παραλλήλω και στις οποίες ασκούνται στατικά και δυναμικά φορτία.

Με περισσότερες λεπτομέρειες, μπορούμε να πούμε ότι σε όλα τα αρχεία μας, στο σύστημα ασκείται ένα στατικό φορτίο μέσω RLC Series Load (όπου ουσιαστικά όμως πρόκειται για RL μιας και ισχύει $Q_C=0$ Var), μεγέθους που ορίζεται από τον χρήστη. Επίσης στα αρχεία που στο όνομα τους περιέχεται το «mt», υπάρχει ένας ασύγχρονος κινητήρας μεγάλης ισχύος (π.χ. thruster) ο οποίος σε κάποια δεδομένη χρονική στιγμή (ορισμένη από τον χρήστη) ενεργοποιείται ή είναι ενεργοποιημένος εξ'αρχής και απλά τότε αυξάνεται το φορτίο του. Το «sw» στο όνομα του αρχείου, σημαίνει ότι ο κινητήρας μπαίνει στο κύκλωμα μέσω ενός διακόπτη (switch).

Τα αρχεία στα οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε τα διάφορα συστήματα με την επίδραση των ανωτέρω φορτίων, είναι φτιαγμένα για να λειτουργούν στην έκδοση 7 του Matlab, ενώ για οποιαδήποτε αλλαγή στις γεννήτριες, χρειάζονται επιπλέον κάποια δεδομένα από τη ροή φορτίου (load flow) τα οποία μπορούμε να τα πάρουμε από τα αρχεία που έχουν φτιαχτεί για την έκδοση 6 του Matlab, κάνοντας τις απαραίτητες αλλαγές μας και εκτελώντας το Load Flow.

3.2.1. Μοντέλα Μηγανών και Υποσυστημάτων

Παρουσιάζουμε τα μοντέλα των γεννητριών Diesel και των αξονικών (Shaft) όπως επίσης και τα υποσυστήματα τους, όπως αυτά είναι μοντελοποιημένα στο Matlab [12].

3.2.1.1. Γεννήτρια Diesel

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση μιας γεννήτριας Diesel, όπως αυτή συνδέεται κατευθείαν πάνω στον κοινό ζυγό.



Γενικό Block Diesel Γεννήτριας

Πιο αναλυτικά στο block «subsystem3», βρίσκονται ο ρυθμιστής στροφών (speed governor) καθώς και ο ρυθμιστής τάσης (AVR) της γεννήτριας στους οποίους και θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά παρακάτω.

Το block «Machines Measurement Demux» είναι το μετρητικό block που επιστρέφει τις τιμές εξόδου της γεννήτριας για την τάση V και την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα προς τον Speed Governor και τον AVR προκειμένου να κάνουν τις απαραίτητες ρυθμίσεις. Μπορεί να ρυθμιστεί να έχει περισσότερες εξόδους, τις οποίες βλέπουμε απλά κάνοντας διπλό κλικ πάνω του, και επιλέγοντας όσες επιθυμούμε να εμφανίζονται. Το block «Synchronous Machine 975kVA» είναι η Diesel γεννήτριας μας, η οποία μάλιστα είναι σεταρισμένη σύμφωνα με το πραγματικό manual. Εδώ προσδιορίζονται οι τιμές για την ονομαστική ισχύ, την τάση και την συχνότητα λειτουργίας, τον αριθμό των πόλων, τους στατισμούς, την εσωτερική αντίσταση του στάτη καθώς και τον συντελεστή τριβής. Αναλυτικά το σετάρισμα που ακολουθήσαμε για τις Diesel γεννήτριες μας είναι το ακόλουθο:

nplements a 3-phase synchronou: tator windings are connected in v	a maakina madalla.		
ind outputs description.	vye to an internal n	d in the dq rotor refe eutral point. Press h	rence frame. Telp for inputs
arameters			
Rotor type: Round			•
Nom. power, L-L volt. and freq. [F	n(VA) Vn(Vrms) fr	n(Hz)]:	
[975000, 450, 60]			
Reactances [Xd Xd'Xd"Xq Xq' >	Kq" XI] (pu):		
[2.28, 0.264, 0.201, 1.10, 0.3, 0.1	376, 0.018]		
d axis time constants: Open-circi	uit		<u> </u>
q axis time constant(s): Open-cire	cuit		•
Time constants [Tdo' Tdo" Tqo'	Tqo"] (s):		
[2.47, 0.018, 0.5, 0.009]			
Stator resistance Rs (p.u.):			
0.013			
Coeff. of inertia, friction factor and	pole pairs [H(s) F	(pu) p()]:	
[0.53504]			
nit. cond. [dw(%) th(deg) ia,ib,ic	(pu) pha,phb,phc(i	deg) Vf(pu)]:	
(U -57.7623 0.870663 0.870663 0	1.870633 -23.2429	-143.243 96.7571 2	2.48785]
Simulate saturation			
2	204		

Επίσης όσον αφορά το γενικό block της γεννήτριας έχουμε ακόμα, όπως βλέπουμε και στο αντίστοιχο σχήμα, και ένα τριφασικό RLC φορτίο (3-Phase RLC Series Load), το οποίο όμως στην ουσία είναι μόνο C μιας και μας εξυπηρετεί για να ελέγξουμε τα άεργα φορτία της γεννήτριας μας. Οι παράμετροι που το περιγράφουν παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα:

-phase series RLC load (mask)(lin	k)	10000
This block implements a three-phas with the neutral connected to the g connected between the phase inpu	e series RLC load connected in Y config round. Each phase consist of one series it and the ground.	uration, RLC load
arameters		
Nominal phase-phase voltage (Vrm	s):	
450.		
Nominal frequency (Hz):		
60		
Three-phase active power P (W):		
0.		
Three-phase inductive reactive po	wer QI (var)	
0.		0
Three-phase capacitive reactive p	ower Qc (var) :	
10.		
-		

3.2.1.2. Γεννήτρια Shaft (Αξονική) μαζί με Condenser

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της αξονικής γεννήτριας. Όπως παρατηρούμε στο γενικότερο block, περιλαμβάνεται ο στρεφόμενος πυκνωτής (Synchronous Condenser) καθώς και το DC Link της αξονικής μας, όπως συνδέεται στον κοινό ζυγό. Εκτός όλων των παραπάνω παρατηρούμε πως περιλαμβάνονται και πλήθος άλλων ηλεκτρονικών ισχύος καθώς και μετρητικών εργαλείων.



Γενικό Block Αζονικής Γεννήτριας

Πιο αναλυτικά στα block «subsystem1» & «subsystem2», βρίσκονται οι ρυθμιστές στροφών (speed governor) και οι ρυθμιστές τάσεων (AVR) της γεννήτριας και του condenser αντίστοιχα.

Τα block «Machines Measurement Demux» είναι και εδώ τα μετρητικά εργαλεία που επιστρέφουν τις τιμές εξόδου της γεννήτριας και του condenser προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις από τους αντίστοιχους Speed Governor και AVR. Και εδώ όπως προηγουμένως μπορούν να προστεθούν και άλλες έξοδοι για μετρητικά όργανα.

Το block «Synchronous Machine 1250kVA» είναι η αξονική γεννήτριας, η οποία μάλιστα είναι σεταρισμένη σύμφωνα με το πραγματικό manual. Εδώ προσδιορίζονται οι τιμές για την ονομαστική ισχύ, την τάση και την συχνότητα λειτουργίας, τον αριθμό των πόλων, τους στατισμούς, την εσωτερική αντίσταση του στάτη καθώς και τον συντελεστή τριβής. Αναλυτικά το σετάρισμα που ακολουθήσαμε για τις Shaft γεννήτριες μας είναι το ακόλουθο:

Block Parameters: Synchron	nous Machine	e 1250 kVa #1	? 🛽
Synchronous Machine (mask) (link) —			
Implements a 3-phase synchronous m Stator windings are connected in wye and outputs description.	nachine modelleo e to an internal n	d in the dq rotor refer eutral point. Press he	ence frame. elp for inputs
Parameters			
Rotor type: Round			•
Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn()	VA) Vn(Vrms) fr	n(Hz)]:	
[1250000 450. 60]			
Reactances [XdXd'Xd"XqXq'Xq'	' XI] (pu):		
[2.28, 0.264, 0.201, 1.10, 0.3, 0.376	6, 0.018]		
d axis time constants: Open-circuit			•
q axis time constant(s): Open-circuit	t		•
Time constants [Tdo' Tdo" Tqo' To	qo"] (s):		
[2.47, 0.018, 0.5, 0.009]			
Stator resistance Rs (p.u.):			
0.013			
Coeff. of inertia, friction factor and po	ile pairs [H(s) Fl	(pu) p()]:	
[0.535 0 4]			
Init. cond. [dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc((deg) Vf(pu)]:	
IIU -90.3143 0.787402 0.787402 0.78	87402-90-150.	30 2.79529]	
Simulate saturation			
OK	Cancel	Help	Apply
Όμοια έχουμε και τις αντίστοιχες παραμέτρους για τον condenser μας:

Implements a 3-phase synchronous machine m Stator windings are connected in wye to an int and outputs description. Parameters Rotor type: Round Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn(VA) Vn(V [1270000 450. 60] Reactances [XdXd'Xd"XqXq' Xq"XI] (pu): [2.28, 0.264, 0.201, 1.10, 0.3, 0.376, 0.018] d axis time constants: Open-circuit q axis time constants: Open-circuit Time constants [Tdo' Tdo" Tqo' Tqo"] (s): [2.47, 0.018, 0.5, 0.009] Stator resistance Rs (p.u.): [0.013 Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [[0.535 0 4]	modelled in the dq rotor reference frame. nternal neutral point. Press help for inputs Vrms) fn(Hz)]:]
Parameters Rotor type: Round Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn(VA) Vn(V [1270000 450. 60] Reactances [Xd Xd'Xd"XqXq' Xq"XI](pu): [2.28, 0.264, 0.201, 1.10, 0.3, 0.376, 0.018] d axis time constants: Open-circuit q axis time constants: Open-circuit Time constants [Tdo' Tdo" Tqo' Tqo"](s): [2.47, 0.018, 0.5, 0.009] Stator resistance Rs (p.u.): 0.013 Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [[0.535 0 4]	Vrms) fn(Hz)]:):]
Rotor type: Round Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn(VA) Vn(V [1270000 450. 60] Reactances [XdXd'Xd"XqXq' Xq"X] (pu): [2.28, 0.264, 0.201, 1.10, 0.3, 0.376, 0.018] d axis time constants: Open-circuit q axis time constant(s): Open-circuit Time constants [Tdo' Tdo" Tqo' Tqo"](s): [2.47, 0.018, 0.5, 0.009] Stator resistance Rs (p.u.): 0.013 Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [[0.535 0 4]	Vrms) fn(Hz)):):] • •
Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn(VA) Vn(V [1270000 450. 60] Reactances [XdXd'Xd"XqXq' Xq"XI] (pu): [2.28, 0.264, 0.201, 1.10, 0.3, 0.376, 0.018] d axis time constants: Open-circuit q axis time constant(s): Open-circuit Time constants [Tdo' Tdo" Tqo' Tqo"] (s): [2.47, 0.018, 0.5, 0.009] Stator resistance Rs (p.u.): 0.013 Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [Vrms) fn(Hz)]:):]
[1270000 450. 60] Reactances [XdXd'Xd"XqXq' Xq"Xl] (pu): [2.28, 0.264, 0.201, 1.10, 0.3, 0.376, 0.018] d axis time constants: Open-circuit q axis time constant(s): Open-circuit Time constants [Tdo' Tdo" Tqo' Tqo"] (s): [2.47, 0.018, 0.5, 0.009] Stator resistance Rs (p.u.): [0.013 Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [[0.535 0 4]	ı):]
Reactances [XdXd'Xd"XqXq'Xq"X] (pu): [2.28, 0.264, 0.201, 1.10, 0.3, 0.376, 0.018] d axis time constants: Open-circuit q axis time constant(s): Open-circuit Time constants [Tdo' Tdo" Tqo' Tqo"](s): [2.47, 0.018, 0.5, 0.009] Stator resistance Rs (p.u.): 0.013 Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [[0.535 0 4]	ı):]
[2.28, 0.264, 0.201, 1.10, 0.3, 0.376, 0.018] d axis time constants: Open-circuit q axis time constants[Tdo' Tdo" Tqo' Tqo"] (s): [2.47, 0.018, 0.5, 0.009] Stator resistance Rs (p.u.): 0.013 Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [[0.535 0 4]]
d axis time constants: Open-circuit q axis time constant(s): Open-circuit Time constants [Tdo' Tdo" Tqo' Tqo"] (s): [2.47, 0.018, 0.5, 0.009] Stator resistance Rs (p.u.): 0.013 Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [[0.535 0 4]	•
<pre>q axis time constant(s): Open-circuit Time constants [Tdo' Tdo" Tqo' Tqo"] (s): [2.47, 0.018, 0.5, 0.009] Stator resistance Rs (p.u.): 0.013 Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [[0.535 0 4]</pre>	<u>•</u>
Time constants [Tdo' Tdo" Tqo' Tqo"] (s): [2.47, 0.018, 0.5, 0.009] Stator resistance Rs (p.u.): [0.013 Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [[[0.535.0]4.]	
[2.47, 0.018, 0.5, 0.009] Stator resistance Rs (p.u.): 0.013 Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [[0.535 0 4]	
Stator resistance Rs (p.u.): 0.013 Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [[0.535 0 4]	
0.013 Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [[0.535 0 4]	
Coeff. of inertia, friction factor and pole pairs [[0.535.0_4.]	
[0.53504]	[H(s) F(pu) p()]:
Init, cond. [dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,ph	hb,phc(deg) Vf(pu)]:
JU -38.0144 0.882467 0.882467 0.882467 16	16.9112 -103.089 136.911 1.78143]
I Simulate saturation	
0× 0	and I use I and

Επίσης στη διάταξη της αξονικής μας παρατηρούμε ότι έχουμε εκτός των άλλων και το σύστημα DC Link. Το DC Link, χρησιμεύει προκειμένου να σταθεροποιήσουμε την συχνότητα του ρεύματος που παράγει η αξονική γεννήτρια. Το ρεύμα αυτό είναι πάρα πολύ ασταθές στην συχνότητά του, αφού η τελευταία σχετίζεται άμεσα με την περιστροφή του άξονα της κυρίας μηχανής του πλοίο μας. Έτσι με το σύστημα αυτό, παίρνουμε το μεταβαλλόμενο εναλλασσόμενο ρεύμα, το μετατρέπουμε σε συνεχές και στην συνέχεια το ξαναμετατρέπουμε σε εναλλασσόμενο μέσω ανορθωτών, μόνο που αυτή τη φορά είναι σταθερής συχνότητας. Παρακάτω παρουσιάζεται το σύστημα DC Link μαζί με τα παρεμφερή ηλεκτρονικά ισχύος.



Γενικό Block DC-Link & άλλων ηλεκτρονικών ισχύος

Πρέπει να τονίσουμε ότι το κυρίως σύστημα του DC-Link περιγράφεται από το Subsystem9, το οποίο και μοντελοποιείται ως ακολούθως:



Κυρίως σύστημα DC-Link «subsystem9»

3.2.1.3. Υποσύστημα Ελέγχου Γεννητριών (Speed Governor και AVR)

Προηγουμένως είδαμε ότι τόσο στην αξονική και τον condenser της, όσο και στην diesel γεννήτρια υπάρχουν ρυθμιστές στροφών και ρυθμιστές τάσης. Στο πρόγραμμα μας εμφανίζονται όπως στο διπλανό σχήμα το block



«subsystem3». Οι είσοδοι τους είναι συνδεδεμένες με τα μετρητικά block «Machines Measurement Demux» από όπου και παίρνουνε τις απαραίτητες πληροφορίες για την συχνότητα και τάση προκειμένου να προβούν στις απαραίτητες ρυθμίσεις. Οι έξοδοι τους συνδέονται με τις κύριες

μηχανές των diesel ή των αξονικών γεννητριών, όπου και δίνουν στις τελευταίες τις τιμές για την ισχύ και την τάση στην οποία θα λειτουργήσουν.

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση αυτών των συστημάτων ελέγχου των γεννητριών μας. Πιο συγκεκριμένα το παραπάνω block περιλαμβάνει τον ρυθμιστή στροφών (Speed Governor) καθώς και τον ρυθμιστή τάσεως (AVR) ως ακολούθως:



Block Ελέγχου Γεννητριών

Στο τελευταίο σχήμα διακρίνεται ο ρυθμιστής στροφών στο πάνω μέρος, ενώ ο ρυθμιστής τάσης (ο οποίος είναι και ο μεγαλύτερος) στο κάτω.

Πιο συγκεκριμένα έχουμε το καθένα ξεχωριστά:

Ρυθμιστής Στροφών (Speed Governor)

Ο ρυθμιστής στροφών παρουσιάζεται σχηματικά ως εξής



Στο «speed 1» είναι η είσοδος των δεδομένων της περιστροφής του άξονα της γεννήτριας από τα μετρητικά block «Machines Measurement Demux».Στο «Power 1» είναι η έξοδος των αποτελεσμάτων τα οποία και ρυθμίζουν-διορθώνουν την μηχανή ανάλογα. Αφορούν την ισχύ στην οποία θα ζητηθεί από την γεννήτρια να λειτουργήσει.

Στο ενδιάμεσο, όπου και γίνεται οι επεξεργασία των δεδομένων, υπάρχει ένα υποσύστημα το οποίο παρουσιάζεται σχηματικά έως εξής:



Εδώ είναι και το σημείο που ρυθμίζουμε το κέρδος που θέλουμε να έχουμε μέσω του ρυθμιστή στροφών.

Ρυθμιστής Τάσης (AVR)

Ο ρυθμιστής τάσης παρουσιάζεται σχηματικά ως εξής



Επιπλέον το Excitation System αναλύεται στο παρακάτω block όπου τα κυριότερα μέρη που το σχηματίζουν είναι ο Voltage Regulator και ο Exciter:



Τα «Constant1» & «Constant2» είναι συνδεδεμένα αντίστοιχα με τις τιμές vref και vstab και είναι ρυθμισμένα στη μονάδα. Vref είναι η per unit επιθυμητή τιμή της τάσεως ακροδεκτών του στάτη ενώ η Vstab συνδέεται κανονικά με ένα επιπλέον σύστημα σταθεροποίησης για επιπλέον σταθεροποίηση των όποιων διακυμάνσεων δημιουργούνται στο ενεργειακό μας σύστημα. Το «VS-QD» είναι τα δεδομένα από τα μετρητικά μας εργαλεία.

Επίσης οι παράμετροι για τον διεγέρτη παρουσιάζονται στο παρακάτω

σχήμα:

🖬 Block Parameters: Excitation System1 🛛 😨 🔀
Excitation System (mask) (link)
Implements an IEEE type 1 synchronous machine voltage regulator combined to an exciter. This block uses the dq components of terminal voltage (Synchronous Machine block, measurement ouputs 9 and 10).
1st input: desired stator terminal voltage (p.u.); 2nd input: vd component of the terminal voltage (p.u.); 3rd input: vq component of the terminal voltage (p.u.); 4th input: stabilization voltage from user-supplied power system stabilizer (p.u.);
output: field voltage vfd to be applied to the Synchronous Machine block's 2nd input (p.u.).
Parameters
Low-pass filter time constant Tr(s):
20e-3
Regulator gain and time constant [Ka() Ta(s)]:
[400, 0.05]
Exciter [Ke() Te(s)]:
[1,0.]
Transient gain reduction [Tb(s) Tc(s)]:
[0,0]
Damping filter gain and time constant [Kf() Tf(s)]:
[0.1, 1.0]
Regulator output limits and gain [Efmin, Efmax (p.u.), Kp()]:
[0.0, 5.0, 0]
Initial values of terminal voltage and field voltage [Vt0 (pu) Vf0(pu)]:
[1,3.58698]
<u>OK</u> ancel <u>H</u> elp <u>Apply</u>

3.2.2. Συνδυασμοί Παραλληλισμένων Γεννητριών (Σενάρια Συστημάτων)

Εδώ παρουσιάζουμε τους διάφορους συνδυασμούς γεννητριών σε παραλληλισμό όπως έχουν μοντελοποιηθεί στο Matlab.





<u>4 Diesel + 2 Shaft + Στατικό Φορτίο RL + Ασύγχρονος Κινητήρας</u>



<u>2 Diesel + 1 Shaft + Στατικό Φορτίο RL + Ασύγχρονος Κινητήρας</u>



1 Diesel + 1 Shaft + Στατικό Φορτίο RL + Ασύγχρονος Κινητήρας

3.2.3. Παραδοχές & Τεχνικές Δυσκολίες

Κατά τη διάρκεια μοντελοποίησης του συστήματος μας και των διαφόρων συνδυασμών γεννητριών και φορτίων στο περιβάλλον Matlab αναγκαστήκαμε να κάνουμε κάποιες παραδοχές καθώς αντιμετωπίσαμε κάποιες τεχνικές δυσκολίες. Αυτές οφείλονταν είτε σε ασυμβατότητες μοντέλων και σφάλματα πηγαίου κώδικα, αδυναμίες δηλαδή του περιβάλλοντος Matlab, είτε σε ανωμαλίες που προκαλούνταν κατά την εκτέλεση του προγράμματος.

Για παράδειγμα, στο Matlab, υπάρχει η ανάγκη ορισμού μιας από τις γεννήτριες ως swing bus του συστήματος, ενώ όλες οι υπόλοιπες γεννήτριες πρέπει να είναι ορισμένες ως P & Q Generators. Λόγω δυναμικότητας, λοιπόν, εμείς επιλέγουμε εδώ ως swing bus (ρυθμίζουσα) μία από τις αξονικές γεννήτριες ώστε να είναι ικανή να απορροφήσει τις αλλαγές ομοιόμορφα. Αν ορίζαμε σαν ρυθμίζουσα μια από τις Diesel, τότε θα καταλήγαμε σε άνισες κατανομές.

Επίσης για την επιτυχή εκτέλεση της ροής φορτίου (με σκοπό την εύρεση των αρχικών συνθηκών) αναγκαστήκαμε να παρακάμψουμε κάποια φίλτρα και κυκλώματα αποσβέσεων ώστε να λυθούν κάποια προβλήματα στη διαδοχή των δύο φάσεων στους ζυγούς [12].

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>

<u>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ</u> <u>ΤΟΥ ΜΑΤLAB</u>

Για την πραγματοποίηση των εξομοιώσεων των εκάστοτε συστημάτων, αποφασίστηκε να δουλέψουμε στο περιβάλλον του προγράμματος MATLAB καθώς αυτό θεωρήθηκε το καταλληλότερο. Έτσι επιλέχθηκε η τελευταία του έκδοση. Η έκδοση Matlab version 7 R14. Δυστυχώς όμως ακόμα και αυτή η έκδοση παρουσίασε δυσλειτουργίες ειδικότερα στην ροή φορτίου (Load Flow). Έτσι στραφήκαμε στην προηγούμενη έκδοση Matlab version 6.5 R13, προκειμένου να πάρουμε τα απαραίτητα δεδομένα για την ροή φορτίου και κατόπιν να τρέξουμε τα προγράμματά μας στην έκδοση 7 R14.

Έτσι τα αρχεία με τα οποία πραγματοποιείται η εξομοίωση του εκάστοτε συστήματος, είναι φτιαγμένα για να λειτουργούν στην έκδοση Matlab version 7 R14. Από εκεί και πέρα, για οποιαδήποτε αλλαγή στις γεννήτριες, χρειάζονται επιπλέον δεδομένα για την ροή φορτίου (load flow), τα οποία τα παίρνουμε από την έκδοση Matlab version 6 R13.

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται τα μοντελοποιημένα σενάρια τα οποία εξετάστηκαν στο περιβάλλον του Matlab καθώς και τα αντίστοιχα τους αρχεία εφαρμογής τους. Έτσι έχουμε:

Σενάριο	Αρχείο
4 DG + 2 SG + RL	promitheas2v1swt5RF.mdl
4 DG + 2 SG + RL + Motor	promitheas2v2mtswB.mdl
2 DG + 1 SG + RL + Motor	promitheas7ver1B.mdl
1 DG + 1 SG + RL	promitheas7v2mtswsB.mdl
1 DG + 1 SG + RL + Motor	promitheas7ver2B.mdl

4.1. <u>APXEIO « promitheas2v1swt5RF.mdl »</u>

4 Diesel + 2 Shaft + Στατικό Φορτίο RL

Στο αρχείο « promitheas2v1swt5RF.mdl » παρουσιάζεται το σύστημα στο οποίο είναι συνδεδεμένα, τέσσερις γεννήτριες Diesel (DG1, DG2, DG3 & DG4) ισχύος P=975 kVA η κάθε μία, δύο αξονικές γεννήτριες (SG1 & SG2) ισχύος P=1250kVA με τους condenser τους, τα οποία επιβαρύνονται με στατικό φορτίο RL (3-Phase RLC Series Load με P=5120kW ,Q=3840kVar & $Q_C=0$ Var) διαμέσου ενός κλειστού διακόπτη 3- Phase Breaker (αρχικά ο διακόπτης είναι κλειστός, αλλά ανοίγει στο t=0 sec και κατόπιν ξανακλείνει στο t=5sec).

Τρέχοντας λοιπόν το πρόγραμμά μας (η προκαθορισμένη τιμή της διάρκειας της εξομοίωσης μας, είναι t=10 sec) παίρνουμε τα ακόλουθα διαγράμματα μέσω των αντίστοιχων scope.

Τίτλος Scope	Αποτέλεσμα
Scope1 – wm SG1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της SG1 (Rotor Speed)
Scope2 – Peo SG1	Η ενεργή ισχύς εξόδου της SG1 (Output Active Power)
Scope3 – Qeo SG1	Η άεργη ισχύς εξόδου της SG1 (Output Reactive Power)
Scope4 – Vdc link	Η έξοδος της τάσης από το DC Link της SG1
Scope5 – wm C1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής του condenser C1 της SG1 (Rotor Speed)
Scope6 – Peo C1	Η ενεργή ισχύς εξόδου του Condenser C1 της SG1 (Output Active Power)
Scope7 – Qeo C1	Η άεργη ισχύς εξόδου του Condenser της SG1 (Output Reactive Power)
Scope8 – wm DG1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της DG1 (Rotor Speed)
Scope9 – Peo DG1	Η ενεργή ισχύς εξόδου της DG1 (Output Active Power)
Scope10 – Qeo DG1	Η άεργη ισχύς εξόδου της DG1 (Output Reactive Power)
Scope21 – Vbus	Η τάση στον κοινό ζυγό

Το σύστημα μας, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι μοντελοποιημένο ως εξής:







Scope2 – Peo SG1 - Η ενεργή ισχύς εξόδου της SG1



Scope3 – Qeo SG1 - Η άεργη ισχύς εξόδου της SG1



Scope
4 – Vdc link - Η έξοδος της τάσης από το DC Link της SG1



Scope6 – Peo C1 - Η ενεργή ισχύς εξόδου του Condenser C1



Scope
8 – wm DG1 - Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της DG1



Scope10 – Qeo DG1 - Η άεργη ισχύς εξόδου της DG1



Scope21 - Vbus - Η τάση στον κοινό ζυγό

Όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα, την χρονική στιγμή t=5sec, την στιγμή δηλαδή που ανοίγει ο διακόπτης μας, παρουσιάζεται μια γενικότερη διαταραχή στο σύστημά μας.

Πιο συγκεκριμένα για τις αξονικές αλλά και τις diesel γεννήτριές μας, οι ενεργές και άεργες ισχύες, αφού αρχικά σταθεροποιήσουν τις τιμές τους σχεδόν μέσα στα πρώτα 2 sec, παρατηρούμε ότι τη χρονική στιγμή t=5sec αυξάνουν κατακόρυφα τις τιμές τους και φτάνουν σε ισορροπία ύστερα από 3 sec. O condenser αντίθετα αυξάνει μόνο την άεργη ισχύ του, ενώ η ενεργή του παρότι διαταράσσεται, εν τέλη παραμένει στα ίδια επίπεδα. Όσον αφορά την περιστροφική ταχύτητα, βλέπουμε πως η αξονική δεν διαταράσσεται καθόλου όταν ανοίγει ο διακόπτης, σε αντίθεση με τους condensers και τις diesel γεννήτριες που παρουσιάζουν παρόμοια μεταξύ τους έντονη διαταραχή για περίπου 3 sec. Τέλος η τάση στην έξοδο του DC Link της SG1 αλλά και του κοινού ζυγού, δείχνει να πέφτει από τα περίπου 450V έως και τα 375V την χρονική στιγμή t=5sec, όμως αποκαθίστανται προοδευτικά, μετά από 3 δευτερόλεπτα περίπου, οπότε και απορρίπτεται το RL φορτίο.

4.2. <u>APXEIO « promitheas2v2mtswRF.mdl »</u>

4 Diesel + 2 Shaft + Στατικό Φορτίο RL + Ασύγχρονος Κινητήρας

Στο αρχείο « promitheas2v2mtswRF.mdl » παρουσιάζεται το σύστημα στο οποίο είναι συνδεδεμένα, τέσσερις γεννήτριες Diesel (DG1, DG2, DG3 & DG4) ισχύος P=975 kVA η κάθε μία, δύο αξονικές γεννήτριες (SG1 & SG2) ισχύος P=1250kVA με τους condenser τους, τα οποία επιβαρύνονται με στατικό φορτίο RL (3-Phase RLC Series Load με P=2120kW ,Q=1840kVar & Q_C=0 Var) και ασύγχρονος κινητήρας ισχύος P=1340HP με άεργο φορτίο Q_C=500kVar διαμέσου ενός κλειστού διακόπτη (3- Phase Breaker). Ο κινητήρας είναι ρυθμισμένος να αυξάνει την ροπή του τη χρονική στιγμή t=3 sec από T_m=5319Nm σε T_m=6117Nm.. Η προκαθορισμένη τιμή της διάρκειας της εξομοίωσης μας, είναι t=5 sec. Έχουμε λοιπόν:

Τίτλος Scope	Αποτέλεσμα
Scope1 – wm SG1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της SG1 (Rotor Speed)
Scope2 – Peo SG1	Η ενεργή ισχύς εξόδου της SG1 (Output Active Power)
Scope3 – Qeo SG1	Η άεργη ισχύς εξόδου της SG1 (Output Reactive Power)
Scope4 – Vdc link	Η έξοδος της τάσης από το DC Link της SG1
Scope5 – wm C1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής του condenser C1 της SG1
Scope6 – Peo C1	Η ενεργή ισχύς εξόδου του Condenser C1 της SG1
Scope7 – Qeo C1	Η άεργη ισχύς εξόδου του Condenser της SG1
Scope8 – wm DG1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της DG1 (Rotor Speed)
Scope9 – Peo DG1	Η ενεργή ισχύς εξόδου της DG1 (Output Active Power)
Scope10 – Qeo DG1	Η άεργη ισχύς εξόδου της DG1 (Output Reactive Power)
Scope21 – Vbus	Η τάση στον κοινό ζυγό
Scope22 – wm Motor	Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα
Scope23 – Te Motor	Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ασύγχρονου κινητήρα

Το σύστημα μας, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι μοντελοποιημένο ως εξής:







Scope2 – Peo SG1 - Η ενεργή ισχύς εξόδου της SG1



Scope
4 – Vdc link - Η έξοδος της τάσης από το DC Link της SG1



Scope5 – wm C1 - Η σχετική ταχύτητα περιστροφής του condenser C1



Scope6 – Peo C1 - Η ενεργή ισχύς εξόδου του Condenser C1



Scope8 – wm DG1 - Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της DG1



Scope10 – Qeo DG1 - Η άεργη ισχύς εξόδου της DG1



Scope22 – wm Motor - Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα



Scope23 – Τε Motor - Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ασύγχρονου κινητήρα

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο ασύγχρονος κινητήρας μας είναι ρυθμισμένος να παρουσιάζει αύξηση του φορτίου του τη χρονική στιγμή t=3 sec. Βλέπουμε λοιπόν από τα διαγράμματα πως τότε η τάση και στην αξονική αλλά και στον κοινό ζυγό, παρουσιάζει μια πολύ μικρή πτώση αλλά σταθεροποιείται σχεδόν αμέσως σε λιγότερο από 0,3 sec.

Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι οι στροφές στην αξονική, στον condenser της αλλά και στην diesel, αρχικά σταθεροποιούνται σχεδόν στα 2 sec και δεν δείχνουν να επηρεάζονται παρά ελάχιστα η diesel όταν αυξάνεται το φορτίο του κινητήρα. Επίσης οι ενεργές και άεργες ισχύες δεν παρουσιάζουν καμία σημαντική μεταβολή τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Τέλος όσον αφορά τον κινητήρα, η περιστροφική ταχύτητα του μειώνεται ασήμαντα κατά περίπου 1 RPM, έχοντας σταθεροποιήσει την τιμή του μόλις στα 1,5 sec, ενώ η ηλεκτρομαγνητική ροπή, παρουσιάζεται αύξηση των 1000NM περίπου με σχεδόν άμεση σταθεροποίηση.

4.3. <u>APXEIO «promitheas7ver1RF.mdl »</u>

2 Diesel + 1 Shaft + Στατικό Φορτίο RL + Ασύγχρονος Κινητήρας

Στο αρχείο « promitheas7ver1RF.mdl » παρουσιάζεται το σύστημα στο οποίο είναι συνδεδεμένα, δύο γεννήτριες Diesel (DG1 & DG2) ισχύος P=975 kVA η κάθε μία, μία αξονική γεννήτρια (SG1) ισχύος P=1250kVA με τον condenser της, τα οποία επιβαρύνονται με στατικό φορτίο RL (3-Phase RLC Series Load με P=773kW ,Q=580kVar & $Q_C=0$ var) καθώς και ταυτόχρονα με ένα ασύγχρονο κινητήρα ισχύος P=1340HP με άεργο φορτίο $Q_C=200kVar$, διαμέσου ενός κλειστού διακόπτη (3-Phase Breaker). Επίσης όσον αφορά τον ασύνχρονο κινητήρα (μοτέρ) το ζητούμενο φορτίο του, δεν παραμένει σταθερό αλλά αυξάνεται (step up) ύστερα από δικιά μας απαίτηση τη χρονική στιγμή t=5 sec από $T_m=5319Nm$ σε $T_m=6117Nm$. Η προκαθορισμένη τιμή της διάρκειας της εξομοίωσης μας, είναι t=9 sec. Έχουμε:

Τίτλος Scope	Αποτέλεσμα
Scope1 – wm SG1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της SG1 (Rotor Speed)
Scope2 – Peo SG1	Η ενεργή ισχύς εξόδου της SG1 (Output Active Power)
Scope3 – Qeo SG1	Η άεργη ισχύς εξόδου της SG1 (Output Reactive Power)
Scope4 – Vdc link	Η έξοδος της τάσης από το DC Link της SG1
Scope5 – wm C1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής του condenser C1 της SG1
Scope6 – Peo C1	Η ενεργή ισχύς εξόδου του Condenser C1 της SG1
Scope7 – Qeo C1	Η άεργη ισχύς εξόδου του Condenser της SG1
Scope8 – wm DG1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της DG2 (Rotor Speed)
Scope9 – Peo DG1	Η ενεργή ισχύς εξόδου της DG2 (Output Active Power)
Scope10 – Qeo DG1	Η άεργη ισχύς εξόδου της DG2 (Output Reactive Power)
Scop11 – Vbus	Η τάση του κοινού ζυγού
Scope12 – wm Motor	Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα
Scope13 – Te Motor	Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ασύγχρονου κινητήρα

Το σύστημα μας, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι μοντελοποιημένο ως εξής:



Γενική Διάταξη αρχείου « promitheas7ver1RF.mdl » 2 Diesel + 1 Shaft + Στατικό Φορτίο RL + Ασύγχρονος Κινητήρας



Scope
1 – wm SG1 - Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της SG1



Scope2 – Peo SG1 - Η ενεργή ισχύς εξόδου της SG1







Scope
4 – Vdc link - Η έξοδος της τάσης από το DC Link της SG1



Scope
6 – Peo C1 - Η ενεργή ισχύς εξόδου του Condenser C1



Scope
8 – wm DG1 - Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της DG1



Scope10 – Qeo DG1 - Η άεργη ισχύς εξόδου της DG1


Scope12 – wm Motor - Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα



Scope13 – Te Motor - Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ασύγχρονου κινητήρα

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο ασύγχρονος κινητήρας μας είναι ρυθμισμένος να παρουσιάζει αύξηση του φορτίου του την χρονική στιγμή t=5 sec. Έτσι όπως παρατηρούμε και από τα παραπάνω διαγράμματα, την συγκεκριμένη χρονική στιγμή παρουσιάζεται μια διαταραχή σχεδόν σε όλο το σύστημα.

Πιο αναλυτικά παρατηρούμε ότι οι αρχικές στροφές όλων των μηχανών μας σταθεροποιούνται μέσα στα πρώτα 3 sec. Με την αύξηση του φορτίου, οι στροφές της αξονικής παραμένουν σταθερές, ενώ στον condenser και την diesel παρουσιάζουν μια μικρή διαταραχή για 2 sec. Όσον αφορά την ενεργό ισχύ, παρατηρούμε ότι αυτή της αξονικής παρουσιάζει μια πολύ μικρή αύξηση, του condenser παραμένει αμετάβλητη, ενώ η ενεργή ισχύς εξόδου της diesel αυξάνεται σημαντικά. Για την άεργη βλέπουμε ότι αυτή της αξονικής παραμένει σταθερή, της diesel παρουσιάζει μια ελαφριά πτώση ενώ η άεργη του condenser αυξάνεται σημαντικά. Η τάση στην έξοδο του DC Link της SG1 αλλά και του κοινού ζυγού, δείχνει να παρουσιάζει μια μικρή πτώση από τα περίπου 450V έως και τα 435V την χρονική στιγμή t=5sec, όμως αποκαθίστανται μετά από 2 δευτερόλεπτα περίπου. Τέλος η περιστροφική ταχύτητα του ίδιου του ασύγχρονου κινητήρα μειώνεται σχεδόν κατά 10 rpm αφού από την τιμή των 188 rpm φτάνει μέχρι και τα 179 rpm, και σταθεροποιείται τουλάχιστον μετά από 3 δευτερόλεπτα στα 184rpm, ενώ τέλος η ηλεκτρομαγνητική ροπή του αυξάνεται κατακόρυφα από 400Nm στα 7300 Nm και σταθεροποιείται και ύστερα από 3 δευτερόλεπτα στα 6100Nm.

4.4. <u>APXEIO « promitheas7v2mtswsRF.mdl »</u>

1 Diesel + 1 Shaft + Στατικό Φορτίο RL

Στο αρχείο «promitheas7v2mtswsRF.mdl » παρουσιάζεται το σύστημα στο οποίο είναι συνδεδεμένα, μία γεννήτρια Diesel (DG1) ισχύος P=975 kVA, μία αξονική γεννήτρια (SG1) ισχύος P=1250kVA με τον condenser της, τα οποία επιβαρύνονται με στατικό φορτίο RL (3-Phase RLC Series Load με P=177,3kW ,Q=580kVar & $Q_C=0$ var).

Τρέχοντας λοιπόν το πρόγραμμά μας (η προκαθορισμένη τιμή της διάρκειας της εξομοίωσης μας, είναι t=9 sec) παίρνουμε τα ακόλουθα διαγράμματα μέσω των ακόλουθων scope:

Τίτλος Scope	Αποτέλεσμα
Scope1 – wm SG1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της SG1
Scope2 – Peo SG1	Η ενεργή ισχύς εξόδου της SG1
Scope3 – Qeo SG1	Η άεργη ισχύς εξόδου της SG1
Scope4 – Vdc link	Η έξοδος της τάσης από το DC Link της SG1
Scope5 – wm C1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής του Condenser της SG1
Scope6 – Peo C1	Η ενεργή ισχύς εξόδου του Condenser της SG1
Scope7 – Qeo C1	Η άεργη ισχύς εξόδου του Condenser της SG1
Scope8 – wm DG1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της DG1 (Rotor Speed)
Scope9 – Peo DG1	Η ενεργή ισχύς εξόδου της DG1 (Output Active Power)
Scope10 – Qeo DG1	Η άεργη ισχύς εξόδου της DG1 (Output Reactive Power)
Scope11 - Vbus	Η τάση του κοινού ζυγού

Το σύστημα μας, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι μοντελοποιημένο ως εξής:



Γενική Διάταξη αρχείου «promitheas7v2mtswsRF.mdl »

1 Diesel + 1 Shaft + Στατικό Φορτίο RL



Scope2 – Peo SG1 - Η ενεργή ισχύς εξόδου της SG1



Scope3 – Qeo SG1 - Η άεργη ισχύς εξόδου της SG1



Scope4 – Vdc link - Η έξοδος της τάσης από το DC Link της SG1



Scope5 – wm C1 – Η σχετική ταχύτητα περιστροφής του Condenser της SG1



Scope6 – Peo C1 - Η ενεργή ισχύς εξόδου του Condenser της SG1

0.9L

Time (s)



Scope8 – wm DG1 - Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της DG1

Time (s)







Scope11 – Vbus- Η τάση του κοινού ζυγού

Αναλυτικά παρατηρούμε ότι οι ταχύτητα περιστροφής όλων των μηχανών μας σταθεροποιούνται μέσα στα πρώτα 3 sec της εξομοίωσης. Η τάση στην έξοδο του DC Link της SG1 σταθεροποιείται στην τιμή των περίπου 458V στο δεύτερο δευτερόλεπτο, ενώ αυτή του κοινού ζυγού στα 444V μέσα στο ίδιο χρονικό διάστημα. Για την ενεργή ισχύ, παρατηρούμε ότι σε όλες μας τις μηχανές παραμένει σταθερή, ενώ για την άεργη, βλέπουμε πως στον μεν condenser πέφτει σταδιακά και ομαλά, στη δε diesel αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό.

4.5. <u>APXEIO « promitheas7ver2RF.mdl »</u>

1 Diesel + 1 Shaft + Στατικό Φορτίο RL + Ασύγχρονος Κινητήρας

Στο αρχείο « promitheas7ver2RF.mdl » παρουσιάζεται το σύστημα στο οποίο είναι συνδεδεμένα, μία γεννήτρια Diesel (DG1) ισχύος P=975 kVA, μία αξονική γεννήτρια (SG1) ισχύος P=1250kVA με τον condenser της, τα οποία επιβαρύνονται με στατικό φορτίο RL (3-Phase RLC Series Load με P=773kW ,Q=580kVar & $Q_C=0$ var) καθώς και ταυτόχρονα με ένα ασύγχρονο κινητήρα ισχύος P=1340HP με άεργο φορτίο $Q_C=200kVar$, διαμέσου ενός κλειστού διακόπτη (3- Phase Breaker). Επίσης όσον αφορά τον ασύνχρονο κινητήρα (μοτέρ) το ζητούμενο φορτίο του, δεν παραμένει σταθερό αλλά αυξάνεται (step up) ύστερα από δικιά μας απαίτηση τη χρονική στιγμή t=5 sec από $T_m=319Nm$ σε $T_m=6117Nm.H$ προκαθορισμένη τιμή της διάρκειας της εξομοίωσης μας, είναι t=9 sec. Έχουμε λοιπόν:

Τίτλος Scope	Αποτέλεσμα
Scope1 – wm SG1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της SG1 (Rotor Speed)
Scope2 – Peo SG1	Η ενεργή ισχύς εξόδου της SG1 (Output Active Power)
Scope3 – Qeo SG1	Η άεργη ισχύς εξόδου της SG1 (Output Reactive Power)
Scope4 – Vdc link	Η έξοδος της τάσης από το DC Link της SG1
Scope5 – wm C1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής του condenser C1 της SG1
Scope6 – Peo C1	Η ενεργή ισχύς εξόδου του Condenser C1 της SG1
Scope7 – Qeo C1	Η άεργη ισχύς εξόδου του Condenser της SG1
Scope8 – wm DG1	Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της DG1 (Rotor Speed)
Scope9 – Peo DG1	Η ενεργή ισχύς εξόδου της DG1 (Output Active Power)
Scope10 – Qeo DG1	Η άεργη ισχύς εξόδου της DG1 (Output Reactive Power)
Scope11 – wm Motor	Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα
Scope12 – Te Motor	Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ασύγχρονου κινητήρα

Το σύστημα μας, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι μοντελοποιημένο ως εξής:



Γενική Διάταξη αρχείου « promitheas7ver2RF.mdl »

1 Diesel + 1 Shaft + Στατικό Φορτίο RL + Ασύγχρονος Κινητήρας



Scope2 – Peo SG1 - Η ενεργή ισχύς εξόδου της SG1



Scope4 – Vdc link - Η έξοδος της τάσης από το DC Link της SG1



Scope5 – wm C1 - Η σχετική ταχύτητα περιστροφής του condenser C1



Scope6 – Peo C1 - Η ενεργή ισχύς εξόδου του Condenser C1



Scope8 – wm DG1 - Η σχετική ταχύτητα περιστροφής της DG1



Scope9 – Peo DG1 - Η ενεργή ισχύς εξόδου της DG1



Scope10 – Qeo DG1 - Η άεργη ισχύς εξόδου της DG1



Scope12 – Te Motor - Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του ασύγχρονου κινητήρα



Scope13 – Vbus – Η τάση του κοινού ζυγού

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο ασύγχρονος κινητήρας μας είναι ρυθμισμένος να παρουσιάζει αύξηση του φορτίου του την χρονική στιγμή t=5 sec. Έτσι όπως παρατηρούμε και από τα παραπάνω διαγράμματα, την συγκεκριμένη χρονική στιγμή παρουσιάζεται μια διαταραχή σχεδόν σε όλο το σύστημα.

Πιο αναλυτικά παρατηρούμε ότι οι αρχικές στροφές όλων των μηχανών μας σταθεροποιούνται μέσα στα πρώτα 3 sec. Με την αύξηση του φορτίου, οι στροφές της αξονικής παραμένουν σταθερές, ενώ στον condenser και την diesel παρουσιάζουν μια σημαντική διαταραχή για 2 sec. Όσον αφορά την ενεργό ισχύ, παρατηρούμε ότι αυτή της αξονικής παρουσιάζει μια πολύ μικρή αύξηση, του condenser παραμένει τελικά στην ίδια τιμή, ενώ η ενεργή ισχύς εξόδου της diesel αυξάνεται σημαντικά. Για την άεργη βλέπουμε ότι αυτή της αξονικής παρουσιάζει μια τολύ μικρή παιραμένει σταθερή, της diesel παρουσιάζει μια ελαφριά πτώση ενώ η άεργη του condenser αυξάνεται σημαντικά. Η τάση στην έξοδο του DC Link της SG1 παρουσιάζει πτώση έως τα 415V, ενώ του κοινού ζυγού έως και τα 395V την χρονική στιγμή t=5sec, όμως και οι δύο αποκαθίστανται μετά από 2-2,5 sec περίπου.

Τέλος η περιστροφική ταχύτητα του ίδιου του ασύγχρονου κινητήρα μειώνεται σχεδόν κατά 10 rpm αφού από την τιμή των 188 rpm φτάνει μέχρι και τα 176 rpm, και σταθεροποιείται τουλάχιστον μετά από 3 δευτερόλεπτα στα 184rpm, ενώ τέλος η ηλεκτρομαγνητική ροπή του αυξάνεται κατακόρυφα από 350Nm στα 7450 Nm και σταθεροποιείται και ύστερα από 3 δευτερόλεπτα στα 6100Nm.

4.6. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε μελέτη του προβλήματος επιμερισμού φορτίσεων κατά την παράλληλη λειτουργία των γεννητριών ενός πλοίου. Βασίστηκε σε πραγματικό πρόβλημα που προέκυψε σε πλοίο του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού, και το οποίο παρουσίαζε πολύ κακή κατανομή του φορτίου μεταξύ των diesel και των αξονικών γεννητριών του.

Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται μέσω της εξομοίωσης, η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου, δηλαδή η ταχύτητα απόκρισης των γεννητριών στις μεταβολές του φορτίου, κυρίως όσον αφορά στην πρωτεύουσα (1ουσα) ρύθμιση, όπου επενεργούν μόνες τους οι γεννήτριες, χωρίς την επέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα ή κάποιου υπολογιστικού προγράμματος.

Για τη μοντελοποίηση λοιπόν αυτού του ολοκληρωμένου δικτύου *χρησιμοποιήθηκε* το υπολογιστικό πακέτο «MATLAB», με το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι εν λόγω προσομοιώσεις για διάφορους πιθανούς συνδυασμούς των ανωτέρω γεννητριών, ενώ ταυτόχρονα υπόκεινται στις εξής μεταβολές φορτίσεων:

- Απότομη είσοδος ωμικοεπαγωγικού φορτίου (RL Load) διαμέσου ενός κλειστού διακόπτη 3- Phase Breaker (αρχικά ο διακόπτης είναι κλειστός, αλλά ανοίγει στο t=0 sec και κατόπιν ξανακλείνει στο t=5sec).
- Απότομη αύξηση ροπής φορτίσεως επαγωγικού κινητήρα μεγάλης ισχύος (Bow Thruster)

Ειδικότερα μοντελοποιήθηκαν τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη σύμφωνα με τα manual του πλοίου του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού, για το οποίο είχαμε όλα τα απαραίτητα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των ηλεκτροπαραγωγών μονάδων.

Μελετώντας λοιπόν την πορεία των εξομοιώσεων καθώς και τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων, προκύπτουν ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα:

Κοιτάζοντας τα διαγράμματα στις χρονικές στιγμές πλησίον του μηδέν, παρατηρούμε την έντονη διακύμανση των τιμών. Αυτό οφείλεται στην δυσκολία που αντιμετωπίζει το πρόγραμμα να ξεκινήσει την προσομοίωση και πράγματι επαληθεύεται από την έντονη καθυστέρηση της εξομοίωσης καθώς και από το

90

γεγονός ότι αφιερώνει πολύ χρόνο για το χρονικό διάστημα της εξομοίωσης 10^{-7} έως 10^{-3} sec.

Επίσης όταν σημειώνεται κάποια αλλαγή στην φόρτιση των γεννητριών, παρατηρούνται σε όλες τις περιπτώσεις, μεταβατικά φαινόμενα της τάξης των 2-3 sec στην συχνότητα και την τάση. Τα φαινόμενα αυτά αποκαθίστανται σύμφωνα με τα δυναμικά χαρακτηριστικά των αντίστοιχων ρυθμιστών, δηλαδή των ρυθμιστών στροφών (Speed Governors) και ρυθμιστών τάσης (AVR's). Σημειώνεται πως η διάρκεια της αποκατάστασης της ισορροπίας μπορεί να ρυθμιστεί εάν επέμβουμε στο subsystem που ορίζει το κέρδος των ρυθμιστών.

Ακόμα παρατηρείται πως δεν εφαρμόζεται απόλυτα ο σωστός επιμερισμός του φορτίου μεταξύ των εμπλεκομένων γεννητριών (proportional loading), αλλά υπάρχει μια τάση να επιβαρύνονται περισσότερο οι diesel γεννήτριες. Αυτό βεβαίως συμβαίνει λόγω τεχνικής αδυναμίας του MATLAB όπου πρέπει οπωσδήποτε να ορίσουμε στο σύστημά μας μία τουλάχιστον γεννήτρια ως ρυθμίζουσα (Swing Bus). Επιλέγεται λόγω δυναμικότητας μία εκ των αξονικών γεννητριών., αφού στην περίπτωση μιας diesel γεννήτριας ως ρυθμίζουσα, θα προέκυπταν άνισες κατανομές.

Τέλος αξίζει να τονίσουμε πως η συχνότητα του συστήματος παραμένει μέσα στα επιτρεπτά πλαίσια που ορίζουν οι νηογνώμονες όταν μεταβάλλεται το φορτίο, δηλαδή να μην υπερβαίνει το 5% της ονομαστικής συχνότητας.

4.7. <u>ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ</u>

Λόγω της πολυπλοκότητας ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός πλοίου, κατά τη μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκαν κάποιες παραδοχές. Υπάρχει λοιπόν η δυνατότητα να μοντελοποιηθεί το υπάρχον σύστημα με ακόμα μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

• Βελτιστοποίηση δικτύου

Σε μερικά σενάρια παρατηρήθηκαν εξαιρετικά μεγάλοι χρόνοι προσομοίωσης στο περιβάλλον MATLAB, ακόμα και 4-5 ώρες. Σαν πρώτη λοιπόν πρόταση θα λέγαμε ότι καλό θα ήταν να γίνουν οι απαραίτητες αλλαγές στο πρόγραμμα ώστε να μειωθεί όσον το δυνατό περισσότερο ο υπολογιστικός χρόνος.

Μοντελοποίηση συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος

Μια από τις σημαντικότερες παραδοχές που κάναμε, ήταν ότι κατά την εκτέλεση της ροής φορτίου δίναμε απλοποιημένη διάταξη του μετατροπέα AC-DC στην οποία είχαν παραληφθεί τα φίλτρα εισόδου-εξόδου, τα κυκλώματα αποσβέσεως snubber circuits, ενώ οι ημιαγωγικοί διακόπτες θεωρούνταν ιδανικοί. Ο λόγος είναι ότι καθυστερούσαν σημαντικά την ροή φορτίου αλλά αν λάβουμε υπόψη ότι πλέον όλες οι μηχανές χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος, τότε κατανοούμε την σπουδαιότητά τους και την ανάγκη να τα προσθέσουμε στο μοντελοποιημένο σύστημά μας, προκειμένου να πλησιάσουμε όσο το δυνατό τις πραγματικές συνθήκες.

Διερεύνηση επίδρασης χρονικών σταθερών των ρυθμιστών

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η ταχύτητα σταθεροποίησης των τιμών της συχνότητας και της τάσης εξαρτάται άμεσα από τα δυναμικά χαρακτηριστικά των αντίστοιχων ρυθμιστών. Ενδιαφέρουσα θα ήταν η διερεύνηση της επίδρασης των χρονικών αυτών σταθερών των AVR & Governor, σε συνάρτηση με τη λειτουργία μεγάλων φορτίων, π.χ. αντλιών φορτίου, κινητήρες για bow thrusters, κλπ.

• Αυτοματοποίηση δευτερεύουσας ρύθμισης

Τέλος ενδιαφέρον θα ήταν η δευτερεύουσα ρύθμιση να είναι τελείως αυτοματοποιημένη και έτσι η αναλογική κατανομή του φορτίου να γίνεται χωρίς την επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα, όπως συμβαίνει και στα πραγματικά δίκτυα των πλοίων.

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

- [1] Βουρνά Κ., Παπαδιά Β. (1991), «ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΑΣΗΣ», Εκδόσεις Παπαδάμη
- [2] Βουρνά Κ., Πρωτονάριου Ν. (1993), «ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα
- [3] Βουτζουλίδη Κ. (Σεπτέμβριος 2007), «ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥ & ΑΕΡΓΟΥ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΣΜΕΝΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ & ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΑΞΟΝΑ», Διπλωματική Εργασία
- [4] Κουρτέση Χ. (1998), «ΕΝΕΡΓΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΙΟΥ», Πειραιάς
- [5] Παύλου Ι. (Ιανουάριος 2004), «ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ», Διπλωματική Εργασία
- [6] Προυσαλίδης Ι. (Ιούλιος 2003), «ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑΣ», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
- [7] Προυσαλίδης Ι., Ιωαννίδης Ι. (2003), 3^η Εργαστηριακή Άσκηση 9^{ου} Εξαμήνου, «ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΟΥ ΖΕΥΓΟΥΣ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ».
- [8] Προυσαλίδης Ι. (Ιανουάριος 2006), «ΠΟΡΙΣΜΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΙΣΟΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΕΝΕΡΓΩΝ & ΑΕΡΓΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΤΟΥ ΠΓΥ ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ ΤΟΥ ΠΝ»
- [9] HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES Co. Ltd., «Shaft Generator System, Instruction Manual», FUJI ELECTRIC Co. Ltd.
- [10] HVDC Manitoba Research Center (2006), "PSCAD User's Manual"
- [11] MAN B&W (2004), «Shaft Generators Power Take Off from the Main Engine».
- [12] MATLAB: The Mathworks Inc. Matlab User's Guide, (2004)
- [13] TAIYO ELECTRIC Co. Ltd., «Instruction Manual for Shaft Generator System».

<u>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</u>

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ιωάννη Προυσαλίδη για την υπερπολύτιμη και αδιάκοπη βοήθεια και συμπαράστασή του. Χωρίς αυτόν η παρούσα εργασία δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί.

Επίσης ευχαριστώ θερμά και τον κ. Ιωάννη Δερμετζόγλου για την ενεργή βοήθειά του, σε ότι σχετίζεται με το περιβάλλον MATLAB και τα προγράμματα αυτού.

Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω τον συνάδελφο μου, στη σχολή Ναυπηγών Μηχ. Μηχ., Κωνσταντίνο Βουτζουλίδη για την συνεργασία μας στην αποπεράτωση της παρούσας εργασίας. Η ηθική και υλική συμβολή του ήταν υπερπολύτιμη.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό και τα Ναυπηγεία Ελευσίνας για την ουσιαστική βοήθεια τους. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον κ. Σωτήρη Τσαφώνη από το Ηλεκτρολογικό Τμήμα των Ναυπηγείων Ελευσίνας για την υποστήριξη του και τη βοήθεια που μας παρείχε στην παρούσα εργασία.

95

<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</u> <u>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΧΕΙΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΑΤLAB</u>

Τα αρχεία των μοντελοποιημένων συστημάτων που έχουμε στην διάθεσή μας, έχουν κατασκευαστεί σε 2 διαφορετικές εκδόσεις του προγράμματος MATLAB. Οι εκδόσεις αυτές είναι 6.5. Release 13 καθώς και η έκδοση 7.0 Release 14. Έχουμε λοιπόν αναλυτική περιγραφή του κάθε αρχείου:

1. <u>Αρχεία για MATLAB version 6.5 Release 13</u>

- promitheass2v1.mdl (2 SG + 2 Condenser + 4 DG + RL) Είναι συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, 2 αξονικές γεννήτριες (P=1250 kVA η κάθε μία), 2 στρεφόμενοι πυκνωτές (condenser), 4 diesel γεννήτριες (P=975 kVA) και στατικό φορτίο RL (P=5120kW & Q=3840 kVar)
- promitheass2v1mt.mdl (2 SG + 2 Condenser + 4 DG + RL + Motor) Eívai συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, 2 αξονικές γεννήτριες (P=1250 kVA η κάθε μία), 2 στρεφόμενοι πυκνωτές (condenser), 4 diesel γεννήτριες (P=975 kVA) , στατικό φορτίο RL (P=4620kW & Q=1700kVar) και ασύγχρονος κινητήρας ισχύος P=1340 HP με άεργο φορτίο Q_{C} =200kVAr
- promitheass3v1.mdl
 (2 SG + RL)

 Είναι συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, 2 αξονικές γεννήτριες (P=1250

 kVA η κάθε μία) και στατικό φορτίο RL (P=2000kW & Q=1500kVar)
- promitheass3v1mt.mdl (2 SG + RL + Motor)
 Είναι συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, 2 αξονικές γεννήτριες (P=1250
 kVA η κάθε μία), στατικό φορτίο RL (P=1500kW & Q=1125kVar) και ασύγχρονος κινητήρας ισχύος P=1340 HP με άεργο φορτίο Q_C=200kVar.

- promitheass4v1.mdl (2 Condenser + 4 DG + RL)
 Είναι συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό 2 στρεφόμενοι πυκνωτές (condenser), 4 diesel γεννήτριες (P=975 kVA) και στατικό φορτίο RL (P=3120kW & Q=2340kVar).
- promitheass4v1mt.mdl (2 Condenser + 4 DG + RL + Motor) Eíval συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό 2 στρεφόμενοι πυκνωτές (condenser), 4 diesel γεννήτριες (P=975 kVA), στατικό φορτίο RL (P=2620kW & Q=2340kVar) και ασύγχρονος κινητήρας ισχύος P=1340 HP με άεργο φορτίο Q_C =200kVAr
- promitheass5v1.mdl (4 DG + RL)

Είναι συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό 4 diesel γεννήτριες (P=975 kVA) και στατικό φορτίο RL (P=3120kW & Q=2340kVar)

- promitheass5v1mt.mdl(4 DG + RL + Motor)Είναι συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό 4 diesel γεννήτριες (P=975kVA), στατικό φορτίο RL (P=2620kW & Q=1872kVar) και ασύγχρονοςκινητήρας ισχύος P=1340 HP με άεργο φορτίο Q_C=200kVAr
- promitheass6v1.mdl (1 SG + 1 Condenser + 2 DG + RL) Είναι συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, μία αξονική γεννήτρια (P=1250 kVA η κάθε μία), ένας στρεφόμενος πυκνωτής, 2 diesel γεννήτριες (P=975 kVA) και στατικό φορτίο RL (P=2560kW & Q=1920kVar)
- promitheass6v1mt.mdl (1 SG + 1 Condenser + 2 DG + RL + Motor) Eívai συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, μία αξονική γεννήτρια (P=1250 kVA η κάθε μία), ένας στρεφόμενος πυκνωτής, 2 diesel γεννήτριες (P=975 kVA), στατικό φορτίο RL (P=1553kW & Q=1165kVar) και ασύγχρονος κινητήρας ισχύος P=1340 HP με άεργο φορτίο Q_C =200kVar.

- Promitheass7v1.mdl (1 SG + 1 Condenser + 1 DG + RL)
 Είναι συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, μία αξονική γεννήτρια (P=1250
 kVA η κάθε μία), ένας στρεφόμενος πυκνωτής, μία diesel γεννήτρια
 (P=975 kVA) και στατικό φορτίο RL (P=1780kW & Q=1335kVar)
 Είναι στατικό φορτίο RL (P=178
- Promitheass7v1mt.mdl (1 SG + 1 Condenser + 1 DG + RL + Motor) Eívai suvdedeméva páva stov koivó ζυγό, mía ažoviký γεννήτρια (P=1250 kVA η κάθε mía), ένας στρεφόμενος πυκνωτής, mia diesel γεννήτρια (P=975 kVA), statikó φορτίο RL (P=773kW & Q=580kVar) και ασύγχρονος κινητήρας ισχύος P=1340 HP με άεργο φορτίο Q_C =200kVar.

2. <u>Αρχεία για MATLAB version 7.0 Release 14</u>

- promitheas1s.mdl (2 SG + 4 DG + RL) Είναι συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, 2 αξονικές γεννήτριες (P=1250kVA) με τους condenser τους, 4 Diesel γεννήτριες και στατικό φορτίο R (P=5120kW)
- promitheas2.mdl (2 SG + 4 DG + RL) Eíval συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, 2 αξονικές γεννήτριες (P=1250kVA) με τους condenser τους, 4 Diesel γεννήτριες και στατικό φορτίο RL (P=5120kW & Q=3840kVar)
- promitheas2v1.mdl (2 SG + 4 DG + RL με Breaker) Είναι συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, 2 αξονικές γεννήτριες (P=1250kVA) με τους condenser τους, 4 Diesel γεννήτριες και στατικό φορτίο RL (P=5120kW & Q=3840kVar) με διακόπτη Breaker.

- promitheas2v1sw.mdl (2 SG + 4 DG + RL με Breaker) Είναι συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, 2 αξονικές γεννήτριες (P=1250kVA) με τους condenser τους, 4 Diesel γεννήτριες και στατικό φορτίο RL (P=5120kW & Q=3840kVar) με διακόπτη Breaker που κλείνει όταν t=1sec.
- promitheas2v1swt5.mdl (2 SG + 4 DG + RL με Breaker)
 Ακριβώς το ίδιο αρχείο με το παραπάνω, με την μόνη διαφορά ότι ο διακόπτης Breaker, κλείνει τη χρονική στιγμή t=5sec αντί για τη t=1sec.
- promitheas2v2.mdl (2 SG + 4 DG + RL + Motor $\mu\epsilon$ Breaker) Eíval συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, 2 αξονικές γεννήτριες (P=1250kVA) με τους condenser τους, 4 Diesel γεννήτριες, στατικό φορτίο RL (P=2120kW & Q=1840kVar) και ασύγχρονο κινητήρα ισχύος P=1340HP με άεργο φορτίο Q_C=500kVar με κλειστό διακόπτη Breaker. Ο κινητήρας είναι ρυθμισμένος να αυξάνει την ροπή του τη χρονική στιγμή t=3 sec από T_m=5319Nm σε T_m=6117Nm.
- promitheas2v2mtsw.mdl (2 SG + 4 DG + RL + Motor $\mu\epsilon$ Breaker) Eíval συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, 2 αξονικές γεννήτριες (P=1250kVA) με τους condenser τους, 4 Diesel γεννήτριες, στατικό φορτίο RL (P=2120kW & Q=1840kVar) και ασύγχρονο κινητήρα ισχύος P=1340HP με άεργο φορτίο Q_C=500kVar με κλειστό διακόπτη Breaker. Ο κινητήρας είναι ρυθμισμένος να αυξάνει την ροπή του τη χρονική στιγμή t=3 sec από T_m=5319Nm σε T_m=6117Nm.
- promitheas2v2s.mdl (2 SG + 4 DG + RL + Motor)

Είναι συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, 2 αξονικές γεννήτριες (P=1250kVA) με τους condenser τους, 4 Diesel γεννήτριες, στατικό φορτίο RL (P=2120kW & Q=1840kVar) και ασύγχρονο κινητήρα ισχύος **P=50HP** με άεργο φορτίο Q_C =100Var. Ο κινητήρας είναι ρυθμισμένος να έχει σταθερή ροπή T_m=197Nm.

- Promitheas6v2mtsw.mdl ($1 SG + 2 DG + RL + Motor \mu \varepsilon$ Breaker) Eívai συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, μία αξονική γεννήτρια (P=1250kVA) με τους condenser τους, 2 Diesel γεννήτριες, στατικό φορτίο RL (P=2120kW & Q=1840kVar) και ασύγχρονο κινητήρα ισχύος P=1340HP με άεργο φορτίο Q_C=500kVar με κλειστό διακόπτη Breaker. Ο κινητήρας είναι ρυθμισμένος να αυξάνει την ροπή του τη χρονική στιγμή t=3 sec από T_m=5319Nm σε T_m=6117Nm.
- Promitheas7v2mtsw.mdl (1 SG + 1 DG + RL + Motor $\mu\epsilon$ Breaker) Eíval συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, μία αξονική γεννήτρια (P=1250kVA) με τους condenser τους, μία Diesel γεννήτρια, στατικό φορτίο RL (P=773kW & Q=580kVar) και ασύγχρονο κινητήρα ισχύος P=1340HP με άεργο φορτίο Q_C=200kVar με κλειστό διακόπτη Breaker. Ο κινητήρας είναι ρυθμισμένος να αυξάνει την ροπή του τη χρονική στιγμή t=5 sec από T_m=5319Nm σε T_m=6117Nm.
- Promitheas7v2mtsws.mdl (1 SG + 1 DG + RL)
 Είναι συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, μία αξονική γεννήτρια (P=1250kVA) με τους condenser τους, μία Diesel γεννήτρια και στατικό φορτίο RL (P=773kW & Q=580kVar).
- Promitheas7v2mtswsB.mdl (1 SG + 1 DG + RL)
 Ακριβώς το ίδιο αρχείο με τα παραπάνω με μόνη διαφορά από το προηγούμενο αρχείο είναι ότι έχουν προστεθεί περισσότερα Scopes, προκειμένου να έχουμε πληρέστερη εικόνα της εξομοίωσης.
- Promitheas7ver1.mdl (1 SG + 2 DG + RL + Motor $\mu\epsilon$ Breaker) Eívai συνδεδεμένα πάνω στον κοινό ζυγό, μία αξονική γεννήτρια (P=1250kVA) με τον condenser της, 2 Diesel γεννήτριες, στατικό φορτίο RL (P=773kW & Q=580kVar) και ασύγχρονο κινητήρα ισχύος P=1340HP με άεργο φορτίο Q_C=200kVar με κλειστό διακόπτη Breaker. Ο κινητήρας είναι ρυθμισμένος να αυξάνει την ροπή του τη χρονική στιγμή t=5 sec από T_m=5319Nm σε T_m=6117Nm. Έχει όμως αφαιρεθεί ένα subsystem.

• Promitheas7ver2.mdl (1 SG + 1 DG + RL + Motor $\mu\epsilon$ Breaker) Eívai suvdedemár a adva stov koivó zuyó, mía azoviký yevvýtria (P=1250kVA) me tov condenser tyc, mía Diesel yevvýtria, statikó poptío RL (P=773kW & Q=580kVar) kai asúyzpovo kivytýpa iszúoc P=1340HP me áepyo poptío Q_C=200kVar me kleistó diakónty Breaker. O kivytýpac eívai puθmismévoc va aužávei tyv poný tou ty zpoviký stiymý t=5 sec anó T_m=319Nm se T_m=6117Nm.