



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

**Σχεδίαση Σταθεροποιητή Ταλαντώσεων για τη Διασύνδεση
Ελλάδος-Τουρκίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Ε. Κουβελέτσου

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δρ. Βασίλειος Μ. Νομικός
ΔΕΣΜΗΕ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2008



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

**Σχεδίαση Σταθεροποιητή Ταλαντώσεων για τη Διασύνδεση
Ελλάδος-Τουρκίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Ε. Κουβελέτσου

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δρ. Βασίλειος Μ. Νομικός
ΔΕΣΜΗΕ.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Κ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Κορρές
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Στ. Καβατζά
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2008

.....
Μαρία Ε. Κουβελέτσου

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

Copyright © Μαρία Ε. Κουβελέτσου, 2008

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

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν στόχο την μελέτη του διασυνδεδεμένου ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μετά τη σύνδεσή του με ένα τμήμα του τουρκικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της ανατολικής Θράκης με σκοπό την εισαγωγή ποσού ισχύος (μέχρι 250 MW). Ειδικότερα, εξετάζει την σχεδίαση σταθεροποιητών συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και την εφαρμογή τους στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα με σκοπό την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που εμφανίζονται. Η εργασία προσεγγίζει το εν λόγω ζήτημα τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Μελετώνται δύο πιθανές καταστάσεις του Ελληνικού Συστήματος, τόσο για ισχυρή όσο και για ασθενή διασύνδεση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας των δυο χωρών.

Στο πρακτικό κομμάτι προσομοιώνονται οι δυο καταστάσεις λειτουργίας του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη κατάσταση αφορά την περίπτωση όπου όλες οι γραμμές του συστήματος είναι ενεργοποιημένες και υφίσταται ισχυρή σύνδεση μεταξύ Ελλάδας και Τουρκίας. Η δεύτερη κατάσταση αντιστοιχεί στην περίπτωση που η γραμμή 400kV Θεσσαλονίκης-Φιλίππων είναι εκτός λειτουργίας μετά από βραχυκύκλωμα και η σύνδεση Ελλάδος-Τουρκίας είναι εξασθενημένη. Στόχος και στις δύο περιπτώσεις είναι η ανάλυση των ρυθμών απόκρισης του συστήματος με και χωρίς σταθεροποιητή ώστε να παρατηρηθούν τόσο οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις όσο και η επίδραση που έχει σε αυτές ο σταθεροποιητής. Η προσάρτηση των εκάστοτε σταθεροποιητών γίνεται σε ελληνικές γεννήτριες. Σε κάθε περίπτωση εξετάστηκε με προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου, η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος μετά από μια διαταραχή. Η διαταραχή ήταν ένα τριφασικό σφάλμα στη γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων. Οι προσομοιώσεις γίνονται με τη βοήθεια των λογισμικών πακέτων PSS/E / PTI, του PACDYN / CEPEL καθώς και του WHSSP / MATLAB.

Λέξεις κλειδιά

ηλεκτρομηχανική ταλάντωση, διασυνοριακές ταλαντώσεις, σταθεροποιητής συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, σχεδίαση σταθεροποιητή, ανάλυση ρυθμών ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης, μορφή ρυθμών

Abstract

This thesis aims at as the study of the Greek Interconnected Power System afterwards its radial connection of an isolated Turkish generation island of Eastern Thrace in order to import a limited volume of power (up to 250 MW) from Turkey. More specifically, this thesis studies the design of power system stabilizers with the purpose of adding damping to electromechanical oscillations that appear in the Greek Interconnected System. This thesis deals with the problem in a theoretical as well as in a practical way. Two possible system operation cases are studied: case A for the strong interconnection and case B for a weak interconnection between the two power systems.

For the practical part of this thesis two different operation cases are simulated. The first situation concerns the case where all the lines of the transmission system are activated and it suffers strong connection between Greece and Turkey. The second situation correspond in the case when line 400kV Thessaloniki-Filippi is out of operation after a short-circuit and the connection Greece-Turkey is weak. In both cases the target is the modal analysis of power system with and without the power system stabilizer so as to observe the oscillations as well as the impact that the stabilizer has on them. In both cases, the stabilizer is designed for the poorly damped electromechanical oscillation of the system. The stabilizers are installed in Greek generators. In every case, the dynamic system behavior after a contingency was also studied using time-domain simulation. The contingency was a three-phase fault at the 400 kV line Thesaloniki-Filippi. PSS/E, PACDYN and WHSSP are the software packages that are used for the simulations.

Key words

electromechanical oscillation, inter-area oscillation, power system stabilizer, stabilizer design, modal analysis, mode shape

Πρόλογος

Η εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έγινε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Δ. Βουρνά, καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η άρτια επιστημονική του κατάρτιση, οι πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις του καθώς και η συνεχής επικοινωνία μαζί του συνέβαλλαν τα μέγιστα για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας. Τον ευχαριστώ θερμά για την βοήθειά του.

Επίσης ευχαριστώ τον Δρ. Βασίλειο Μ. Νομικό. Οι γνώσεις, οι συμβουλές και οι υποδείξεις του με βοήθησαν σημαντικά στην εκπόνηση της εργασίας μου.

Επίσης ευχαριστώ την υποψήφια διδάκτωρ της σχολής κα. Αίγλη Μέτσιου για τον χρόνο της και την πολύτιμη συνεισφορά της στην επίλυση των προβλημάτων που ανέκυψαν.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	15
Εισαγωγή	15
1.1 Η Ηλεκτρική Ενέργεια	15
1.2 Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	16
1.3 Η Διασύνδεση των Δικτύων	16
1.4 Ευστάθεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	18
1.5 Οι Ηλεκτρομηχανικές Ταλαντώσεις	19
1.5.1 Η φύση των Ηλεκτρομηχανικών Ταλαντώσεων	20
1.5.2 Ανάλυση των Ηλεκτρομηχανικών Ταλαντώσεων	22
1.5.3 Έλεγχος και Απόσβεση των Ταλαντώσεων	25
1.6 Ο Συντονισμός	27
1.7 Το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα	29
1.8 Το Αντικείμενο της Εργασίας	30
1.9 Τα Χρησιμοποιούμενα Προγράμματα	31
1.10 Η Δομή της Εργασίας	31
Κεφάλαιο 2	35
Μαθηματικές Έννοιες	35
2.1 Γραμμικοποίηση Ενός Συστήματος	35
2.1.1 Ανάλυση Ρυθμών Συστήματος	35
2.1.2 Γραμμικοποίηση Δυναμικών Συστημάτων	36
2.1.3 Περιγραφή και Γραμμικοποίηση Δυναμικού Συστήματος – Ιδιοτιμές	37
2.1.4 Ιδιοδιανύσματα	39
2.1.5 Μετασχηματισμός Ομοιότητας	40
2.1.6 Ρυθμοί Απόκρισης Συστήματος	41
2.2 Έλεγχος Δυναμικών Συστημάτων	44
2.2.1 Ευαισθησία Ιδιοτιμών	44
2.2.2 Οι Συντελεστές Συμμετοχής	45
2.2.3 Ελεγχιμότητα και Παρατηρησιμότητα Ρυθμών Συστήματος	46
2.3 Τα Ολοκληρωτικά Υπόλοιπα	46
2.3.1 Τα Ολοκληρωτικά Υπόλοιπα σαν Ευαισθησίες των Ιδιοτιμών	47

Κεφάλαιο 3	51
Παράσταση Συστήματος	51
3.1 Χρησιμοποιούμενο Λογισμικό	51
3.1.1 Το λογισμικό PSS/E	51
3.1.2 Το λογισμικό PacDyn	52
3.1.3 Το λογισμικό Matlab	53
3.2 Περιγραφή του Συστήματος	53
3.3 Η Σύγχρονη Μηχανή	58
3.3.1 Το μοντέλο μιας σύγχρονης γεννήτριας τέταρτης τάξεως	60
3.3.2 Το γραμματικοποιημένο μοντέλο τρίτης τάξεως μιας σύγχρονης γεννήτριας	61
3.3.3 Το μοντέλο έκτης τάξεως μιας σύγχρονης γεννήτριας	63
3.4 Μοντέλα Διατάξεων Ελέγχου	64
3.4.1 Ρυθμιστής Στροφών	64
3.4.2 Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσεως	65
3.4.3 Σταθεροποιητές Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	66
Κεφάλαιο 4	69
Διασυννοριακές Ταλαντώσεις	69
Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος	69
4.1 Δυναμική Ανάλυση Συστήματος για το Σενάριο Α	69
(Ισχυρή Διασύνδεση)	69
4.1.1 Ανάλυση Ρυθμών Ηλεκτρομηχανικής Ταλάντωσης	69
4.1.2 Μορφή Ρυθμών Ηλεκτρομηχανικής Ταλάντωσης	72
4.1.3 Συντελεστές Συμμετοχής	82
4.1.4 Ολοκληρωτικά Υπόλοιπα	86
4.2 Απόκριση Συστήματος σε βραχυκύκλωμα (Ισχυρή Διασύνδεση) .	90
4.3 Δυναμική Ανάλυση Συστήματος για το σενάριο Β (Εξασθενημένη Διασύνδεση)	94
4.3.1 Ανάλυση Ρυθμών Ηλεκτρομηχανικής Ταλάντωσης	95
4.3.2 Συντονισμός Ρυθμών	97
4.3.3 Μορφή Ρυθμών Ηλεκτρομηχανικής Ταλάντωσης	99
4.3.4 Συντελεστές Συμμετοχής και Ολοκληρωτικά Υπόλοιπα για το ρυθμό χαμηλής απόσβεσης (Σενάριο Β)	109
4.4 Απόκριση Συστήματος σε βραχυκύκλωμα με απώλεια γραμμής (Ασθενής Διασύνδεση)	111

Κεφάλαιο 5.....	117
Σχεδίαση Σταθεροποιητή Συστήματος Ηλεκτρικής	
Ενέργειας.....	117
5.1 Σχεδίαση Σταθεροποιητών.....	117
5.1.1 Προδιαγραφές Σχεδίασης Σταθεροποιητών.....	118
5.1.2 Σχεδίαση Σταθεροποιητών σε Σύστημα γεννήτριας – άπειρου ζυγού.....	120
5.1.3 Σήματα Εισόδου Σταθεροποιητών.....	120
5.2 Παράμετροι Σχεδίασης Σταθεροποιητή.....	121
5.2.1 Επιλογή της θέσης.....	121
5.2.2 Υπολογισμός της γωνίας αντισταθμίσεως με τη μέθοδο των ολοκληρωτικών υπόλοιπων.....	122
5.2.3 Υπολογισμός γωνίας αντισταθμίσεως με τη μέθοδο της συνάρτησης μεταφοράς GEP(s).....	126
5.2.4 Εναλλακτική μέθοδος σχεδίασης.....	127
5.2.5 Υπολογισμός του κέρδους του σταθεροποιητή.....	128
5.3 Σχεδίαση Σταθεροποιητή στο Σύστημα.....	128
5.3.1 Επιλογή του σταθμού και της γεννήτριας.....	128
5.3.2 Υπολογισμός γωνίας αντισταθμίσεως σταθεροποιητή με τη γεννήτρια συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό.....	130
5.3.3 Υπολογισμός φάσης αντιστάθμισης με τη μέθοδο GEP(s) στο Ελληνικό Σύστημα.....	134
Κεφάλαιο 6.....	137
Σχεδίαση Σταθεροποιητή.....	137
Στο Ελληνικό Σύστημα.....	137
6.1 Η μέθοδος Σχεδίασης του Σταθεροποιητή.....	137
6.1.1 Υπολογισμός γωνίας αντισταθμίσεως του σταθεροποιητή.....	137
6.1.2 Επιλογή του κέρδους του σταθεροποιητή K_{PSS}	140
6.2 Ανάλυση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Ισχυρή Διασύνδεση). 140	
6.2.1 Ανάλυση Ιδιοτιμών.....	141
6.2.2 Μορφή Ρυθμών.....	143
6.3 Προσομοίωση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Ισχυρή Διασύνδεση).....	145
6.4 Ανάλυση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Ασθενής Διασύνδεση)	
.....	148
6.4.1 Ανάλυση Ιδιοτιμών.....	148

6.4.2 Μορφή Ρυθμών	150
6.5 Προσομοίωση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Ασθενής Διασύνδεση).....	153
Κεφάλαιο 7	155
Εναλλακτική Σχεδίαση Σταθεροποιητή	155
7.1 Η μέθοδος Σχεδίασης του Σταθεροποιητή	155
7.1.1 Υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς του σταθεροποιητή.....	156
7.1.2 Επιλογή του κέρδους του σταθεροποιητή K_{PSS}	158
7.2 Δυναμική Ανάλυση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Σενάριο Α).....	159
7.2.1 Ανάλυση Ιδιοτιμών	159
7.3 Προσομοίωση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Ισχυρή Διασύνδεση).....	161
7.4 Δυναμική Ανάλυση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Σενάριο Β).....	163
7.4.1 Ανάλυση Ιδιοτιμών	164
7.4.2 Η Μορφή των Ρυθμών του Συστήματος.....	166
7.5 Προσομοίωση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Ασθενής Διασύνδεση).....	168
Κεφάλαιο 8	171
Ανασκόπηση-Συμπεράσματα	171
Βιβλιογραφία	175

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Η Ηλεκτρική Ενέργεια

Μετά την απελευθέρωση της ενεργειακής αγοράς έχει αλλάξει ριζικά το τοπίο στη βιομηχανία και στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ηλεκτρική είναι εκείνη η μορφή ενέργειας η οποία συσχετίζεται με την κίνηση των διαφόρων ηλεκτρικών φορτίων. Βασικό μειονέκτημά της είναι το γεγονός ότι δεν μπορεί να αποθηκευτεί. Για αυτό το λόγο πρέπει να καταναλώνεται τη στιγμή που παράγεται και το αντίστροφο. Αυτή η δυσκολία αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας δημιούργησε την ανάγκη για την κατασκευή εκτεταμένων δικτύων μεταφοράς και διανομής που εξασφαλίζουν την άμεση παροχή του ενεργειακού αγαθού στον τελικό καταναλωτή.

Η κύρια πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μηχανική ενέργεια την οποία και μετατρέπουν σε ηλεκτρική οι διάφορες γεννήτριες συνεχούς ή εναλλασσομένου ρεύματος. Συνήθως χρησιμοποιούνται μηχανές όπως ατμοστρόβιλοι, υδροστρόβιλοι και αεριοστρόβιλοι. Η θέση του κάθε σταθμού στο σύστημα πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα ώστε να διευκολύνεται ο εφοδιασμός του με καύσιμο ή και η παροχή επαρκούς ποσότητας ύδατος για την συμπύκνωση του χρησιμοποιηθέντος ατμού. Στην περίπτωση που ο σταθμός εγκατασταθεί σχετικά κοντά στο φορτίο, το οποίο πρόκειται να τροφοδοτήσει, η απόσταση μεταφοράς θα είναι μικρή και αντίστοιχα το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας θα επιβαρύνεται με μικρές σχετικώς δαπάνες λειτουργίας και επένδυσης, καθώς μειώνονται οι απώλειες. [1]

1.2 Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας στους εκάστοτε καταναλωτές επιτυγχάνεται μέσω του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Ως σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να μπορεί να παρέχει κάθε χρονική στιγμή την ποσότητα της ενέργειας η οποία ζητείται, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα σταθερή συχνότητα και τάση καθώς επίσης και αξιοπιστία τροφοδότησης. Επιπλέον, όλα αυτά θα πρέπει να τα επιτυγχάνει με το μικρότερο δυνατό οικονομικό κόστος ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις όποιες δυσμενείς επιπτώσεις για το περιβάλλον. [2]

Το Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το σύστημα μεταφοράς χρησιμεύει ως το μέσο παραλαβής της ηλεκτρικής ενέργειας από το σταθμό παραγωγής και απόδοσής της στο κέντρο κατανάλωσης. Το σύστημα μεταφοράς θα πρέπει να παρέχει σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) τάση και οι τάσεις των φάσεων να βρίσκονται σε συμμετρία. Η κυματομορφή της τάσεως θα πρέπει να έχει ημιτονοειδή μορφή και η συχνότητα να είναι σταθερή. Η ισχύς η οποία μπορεί να μεταφερθεί από μια γραμμή μεταφοράς είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της τάσεως, επομένως είναι προφανής ο ρόλος των υπερυψηλών τάσεων στην επίτευξη μεγάλων ποσών μεταφερόμενης ισχύος. Επιπλέον, οι μειωμένες απώλειες τις οποίες συνεπάγεται η μεταφορά με υπερύψηλες τάσεις, καθιστούν οικονομικότερη τη λειτουργία με τις τάσεις αυτές. Το κόστος μεταφοράς αποτελεί τη συνισταμένη του κόστους εγκαταστάσεως, του κόστους απωλειών και του κόστους συντήρησης της γραμμής. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση τόσο χαμηλότερο το κόστος μεταφοράς ενέργειας.

1.3 Η Διασύνδεση των Δικτύων

Με τη διασύνδεση των φορτίων οι διάφοροι σταθμοί παράγωγης μπορούν να εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό μικρών φορτίων. Η συνολική ισχύς ενός σύγχρονου σταθμού κυμαίνεται από 600 έως 1600 MW, συνεπώς όταν υφίστανται τόσο μεγάλες συγκεντρώσεις ισχύος καθίσταται όλο και σημαντικότερη η ύπαρξη διασυνδέσεων μεταξύ σταθμών παραγωγής. Έτσι σε περίπτωση ανάγκης, το φορτίο μιας περιοχής θα μπορεί να τροφοδοτηθεί από πολλές γειτονικές περιοχές μαζί, χωρίς να δημιουργηθεί ανωμαλία.

Οι διασυνδεδεμένες γραμμές μεταφορές μπορούν υπό κανονικές συνθήκες να φέρουν ελαφρά ή μέτρια φόρτια αλλά σε έκτακτες περιπτώσεις αποκτούν ζωτική σημασία και μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ισχύος. Παρά την προσεκτική σχεδίαση και κατασκευή, πολλές καταστρεπτικές αιτίες όπως πλημμύρες, σεισμοί, βομβαρδισμοί, πυρκαγιές, ηλεκτρικές ή μηχανικές βλάβες μπορούν να αχρηστεύσουν κάποιο μέρος ή ακόμα και ολόκληρο το σταθμό παράγωγης. Η ύπαρξη επαρκών διασυνδεδεμένων γραμμών με περιοχές οι οποίες δεν θα έχουν επηρεαστεί ταυτόχρονα από την ανωμαλία, αποτελεί εξαιρετική εγγύηση λειτουργίας του συστήματος. Βλάβες μπορούν να υποστούν και οι γραμμές μεταφοράς του συστήματος, όμως κατά κανόνα μπορούν να επισκευαστούν ταχύτερα από ένα σταθμό παραγωγής που υπέστη κάποια βλάβη. Συνεπώς για την καλύτερη προστασία σε κάποιες περιπτώσεις, ίσως είναι προτιμότερη η κατασκευή γραμμών μεταφοράς προς απομακρυσμένες πηγές ενέργειας από εφεδρικούς σταθμούς παραγωγής στην ίδια περιοχή.

Τα βασικά πλεονεκτήματα ενός διασυνδεδεμένου δικτύου μεταφοράς είναι:

- Δυνατότητα ένταξης μεγαλύτερων και οικονομικότερων μονάδων παραγωγής στο σύστημα και μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής προς τα μεγάλα κέντρα καταναλώσεως.
- Μείωση απαιτήσεων εφεδρείας καθεμιάς από τις διασυνδεδεμένες περιοχές ή συστήματα.
- Οικονομία ισχύος με εποχιακές ανταλλαγές ισχύος μεταξύ περιοχών ή συστημάτων, τα οποία έχουν διαφορετικές ανάγκες κατά τις διάφορες εποχές.
- Οικονομία ισχύος λόγω διαφορών στη ζήτηση φορτίου μεταξύ περιοχών ή συστημάτων κατά τη διάρκεια του 24ώρου.
- Δυνατότητα αντιμετώπισης απρόβλεπτων ζητήσεων λόγω εκτάκτου ανάγκης.

Η διαρκής αύξηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά στα αστικά και βιομηχανικά κέντρα, επιβάλλει τη λειτουργία ενός συστήματος ολοένα και πιο κοντά στο όριο της ικανότητας μεταφοράς του ενώ πολλές φορές η μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος γίνεται με ασθενή δίκτυα. [1]

Η δημιουργία μιας ανταγωνιστικής διεθνούς αγοράς ηλεκτρισμού επιβάλλει την διασύνδεση συστημάτων που για δεκαετίες ολόκληρες λειτουργούσαν ανεξάρτητα. Αυτές οι διασυνδέσεις δημιουργούν τεράστια δίκτυα στα οποία, εκτός από σοβαρά προβλήματα λειτουργίας που εμφανίζονται, προστίθεται και η ανάγκη εξασφάλισης των ανταλλαγών ισχύος στις χρονικές στιγμές και στις ποσότητες που καθορίζουν οι παίκτες της αγοράς.

Εκτός όμως από τα προβλήματα ανάπτυξης του ηλεκτρικού δικτύου, η αλλαγή των χαρακτηριστικών του ηλεκτρικού φορτίου δημιουργεί προβλήματα στην ομαλή λειτουργία των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον η ανάλυση της ευστάθειας και ο έλεγχος των συστημάτων ηλεκτρικής

ενέργειας είναι βασικές παράμετροι για την εξασφάλιση της αδιάλειπτης λειτουργίας του συστήματος ενέργειας σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας. [1,5]

1.4 Ευστάθεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να είναι καλή και ασφαλής, έννοιες που χαρακτηρίζουν τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου. Ο όρος καλή λειτουργία αφορά στην αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές και την τήρηση της μεταβολής της τάσεως εντός των επιτρεπτών ορίων. Η ασφαλής λειτουργία αφορά στην αντοχή των εγκαταστάσεων και του εξοπλισμού του συστήματος σε οποιεσδήποτε διηλεκτρικές, θερμικές και δυναμικές καταπονήσεις.

Ευστάθεια είναι η ιδιότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία εξασφαλίζει ότι αυτό θα παραμείνει σε λειτουργική ισορροπία τόσο με κανονικές όσο και με μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Επισημαίνεται εδώ, ότι ο όρος ευστάθεια συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αφορά σε συστήματα με διασυνδεδεμένες σύγχρονες μηχανές.

Η μελέτη της ευστάθειας περιλαμβάνει την απόκριση του συστήματος σε μικρές διαταραχές (ευστάθεια μονίμου καταστάσεως) και την απόκρισή του κατά την διάρκεια των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων μετά από κάποια σοβαρή διαταραχή (μεταβατική ευστάθεια).

Η αστάθεια προκαλείται από κάποιο είδος διαταραχής στο σύστημα. Η διαταραχή μπορεί να είναι πολύ μικρή σε μέγεθος και συνηθισμένη κατά τη λειτουργία, όπως ο αυτόματος χειρισμός ενός ρυθμιστή στροφών για μια μικρή μεταβολή της ταχύτητας, ή ασυνήθιστη και πολύ σοβαρή, όπως ένα σφάλμα δικτύου. Η αστάθεια αυτή επιτείνεται από το γεγονός ότι όταν μια σύγχρονη μηχανή χάσει τον συγχρονισμό της παράγονται ρεύματα πολύ μεγάλης τιμής τα οποία θα μπορούσαν να καταστρέψουν την ίδια την μηχανή ή κάποια άλλη συνιστώσα του συστήματος αν δεν παρενέβαινε το σύστημα προστασίας με το αυτόματο άνοιγμα των διακοπών ισχύος. Το άνοιγμα των διακόπτων οδηγεί στην απώλεια της συνέχειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και κατά συνέπεια μια κατάσταση αστάθειας μπορεί να οδηγήσει στη μερική ή και ολική σβέση του συστήματος (black out).

Η ακριβής ανάλυση της συμπεριφοράς του συστήματος μετά από μια διαταραχή είναι πολύπλοκη και αρκετά χρονοβόρα και λαμβάνοντας υπόψη ότι το κάθε σύστημα αντιδρά διαφορετικά στην κάθε διαταραχή, η μελέτη της ευστάθειας του συστήματος έγκειται στον τρόπο με τον οποίο το σύστημα θα αντιδράσει σε μια διαταραχή. Ο τρόπος αυτός εξαρτάται από τον τύπο της διαταραχής. Όπως αναφέρθηκε και

παραπάνω, διακρίνουμε δύο κατηγορίες ευστάθειας: την ευστάθεια μονίμου καταστάσεως και τη μεταβατική ευστάθεια.

- **Η μεταβατική ευστάθεια** αφορά στις σοβαρές και απότομες διαταραχές, όπως τα βραχυκυκλώματα στο δίκτυο. Υποδεικνύει τη δυνατότητα των σύγχρονων μηχανών να διατηρήσουν το συγχρονισμό τους κατά τη διάρκεια των πρώτων ταλαντώσεων που ακολουθούν τη διαταραχή. Οι δυναμικές ταλαντώσεις εξαιτίας μιας μεγάλης διαταραχής, μπορούν να επεκταθούν σε σημαντικά μεγάλο τμήμα του δικτύου και να προκαλέσουν αποσυγχρονισμούς μηχανών, διακοπή γραμμής και άλλες ανωμαλίες, σε αρκετά μεγάλο χρόνο μετά τη διαταραχή.
- **Η στατική ευστάθεια** ή ευστάθεια μικρών διαταραχών αφορά στις αργές και βαθμιαίες μεταβολές και εξετάζει αν μετά από μια μικρή διαταραχή οι γεννήτριες θα επανέλθουν στο αρχικό σημείο λειτουργίας τους ή θα απομακρυνθούν οριστικά από αυτό. [3]

1.5 Οι Ηλεκτρομηχανικές Ταλαντώσεις

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας περιέχουν πολλούς ρυθμούς ταλαντώσεων λόγω της αλληλεπίδρασης των επιμέρους σύγχρονων μηχανών που τα απαρτίζουν. Οι ταλαντώσεις αυτές ενυπάρχουν σε κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως εξάλλου και σε κάθε δυναμικό σύστημα. Γίνονται όμως ιδιαίτερα έντονες όταν ορισμένες διαταραχές του δικτύου αναστέλλουν τους μηχανισμούς απόσβεσής τους ή φέρνουν το σύστημα πολύ κοντά στα όρια της ευστάθειας μικρών διαταραχών.

Ιδιαίτερο ρόλο έχει η τιμή της αδράνειας του άξονα της γεννήτριας, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων του δρομέα, καθώς και οι διατάξεις ελέγχου των γεννητριών.

Μια μικρή μεταβολή των παραμέτρων του συστήματος (φορτία, κέρδη διατάξεων ελέγχου κλπ) αλλάζει το σημείο λειτουργίας του συστήματος και συνοδεύεται από αντίστοιχες μεταβολές της ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος των σύγχρονων γεννητριών, καθώς αυτές προσπαθούν να προσεγγίσουν σε ένα νέο σημείο ισορροπίας. Κατά τη διάρκεια αυτής της προσέγγισης, ο δρομέας της γεννήτριας εκτελεί μια ταλάντωση ως προς το δρομέα κάθε άλλης γεννήτρια του συστήματος και ταυτόχρονα μια ταλάντωση προς το εξωτερικό σύστημα, στη περίπτωση που το σύστημα είναι διασυνδεδεμένο σε κάποιον άπειρο ζυγό. Έτσι, ένα σύστημα n γεννητριών και ενός άπειρου ζυγού (που συνήθως εκφράζει κάποια εξωτερική διασύνδεση με ένα άλλο σύστημα), εμφανίζει n τέτοιες ταλαντώσεις, ενώ ένα αυτόνομο σύστημα n γεννητριών εμφανίζει $n - 1$ ταλαντώσεις. Από ηλεκτρομαγνητική σκοπιά, η ταλάντωση ανάμεσα στους δρομείς των μηχανών οφείλεται στην

προσπάθεια συγχρονισμού των μαγνητικών πεδίων των γεννητριών. Οι ταλαντώσεις αυτές συνοδεύονται από ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των συγχρόνων μηχανών και ονομάζονται ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις ή ταλαντώσεις ισχύος.

Ένα από τα προβλήματα που δημιουργούν οι ασθενώς αποσβενύμενες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις είναι η εμφάνιση ταλαντώσεων σε πολλές μεταβλητές του συστήματος. Επιπλέον η μη ικανοποιητική απόσβεση των ταλαντώσεων οδηγεί στη φθορά των μηχανικών μερών των γεννητριών, περιορίζει τα θερμικά όρια μεταφερόμενης ισχύος των γραμμών, περιορίζει τα όρια ευστάθειας του συστήματος και προκαλεί σοβαρά προβλήματα ελέγχου. [5]

1.5.1 Η φύση των Ηλεκτρομηχανικών Ταλαντώσεων

Οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις εμφανίζονται σε μια χρονική κλίμακα μερικών δευτερολέπτων μετά από μια διαταραχή του συστήματος και εφόσον οι γεννήτριες έχουν παραμείνει σε συγχρονισμό. Από τη στιγμή που στο σύστημα εκδηλώνονται ασταθείς ταλαντώσεις, το πλάτος τους διαρκώς αυξάνει για ένα χρονικό διάστημα που συχνά εκτείνεται σε διάστημα αρκετών λεπτών και συνοδεύονται από ταλαντώσεις συχνότητας ή τάσεως που μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλες αποκλίσεις από τις ονομαστικές τιμές του συστήματος. Η ταλαντωτική συμπεριφορά των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας για μικρές διαταραχές γύρω από το σημείο λειτουργίας, αναλύεται στο πεδίο της συχνότητας με τη χρήση γραμμικοποιημένων μοντέλων όλων των δυναμικών συνιστωσών ενός συστήματος (γεννήτριες, ρυθμιστές και φορτία) που ενεργοποιούνται στη χρονική κλίμακα των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Η ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών γίνεται με την ανάλυση των ρυθμών του συστήματος, δηλαδή τον υπολογισμό των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων των μεταβλητών κατάστασης που περιγράφουν το σύστημα.

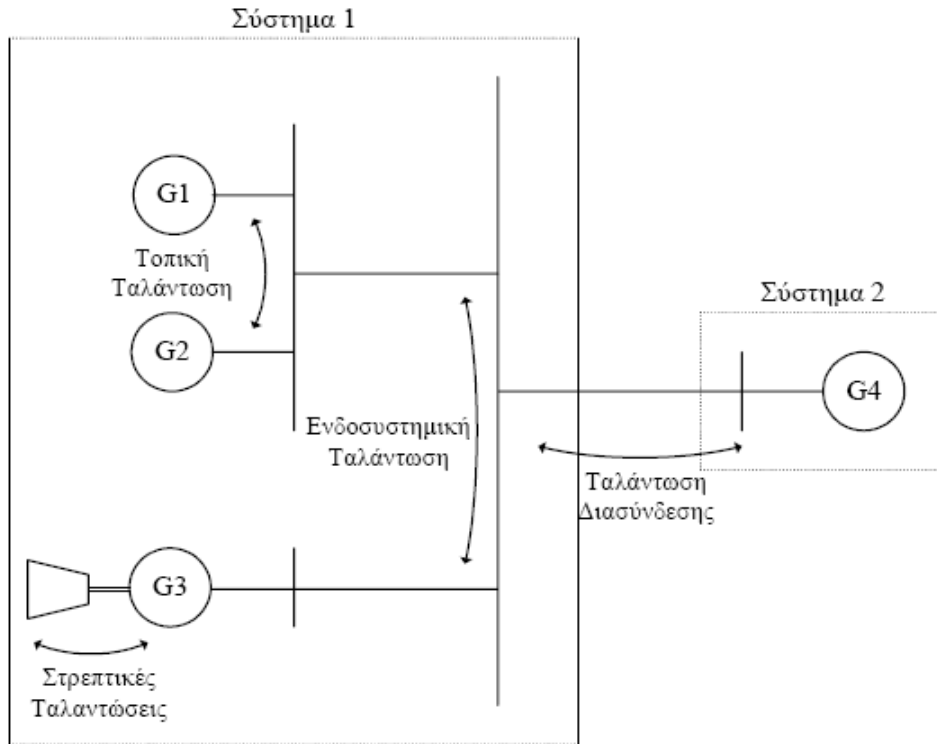
Ασταθείς ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις εμφανίζονται και ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των ρυθμών του συστήματος με τυπικό παράδειγμα τη μετατόπιση των ιδιοτιμών των ηλεκτρομηχανικών ρυθμών προς τα δεξιά όταν ενεργοποιείται ένας αυτόματος ρυθμιστής τάσεως και το κέρδος του αυξάνει σταδιακά. Το ενδεχόμενο εμφάνισης ασταθών ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων λόγω της αλληλεπίδρασης των ρυθμών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα πρόβλημα που προέκυψε σχετικά πρόσφατα. Καθώς το σημείο λειτουργίας του συστήματος μεταβάλλεται, για παράδειγμα λόγω της σταδιακής αύξησης του φορτίου, του κέρδους ενός ρυθμιστή ή κάποιας άλλης παραμέτρου του συστήματος, οι ιδιοτιμές μετατοπίζονται στο μιγαδικό επίπεδο. Επίσης μεταβάλλεται και η συμμετοχή των μεταβλητών κατάστασης στους ρυθμούς με αποτέλεσμα και τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα να αλλάζουν μορφή. Η μετατόπιση μιας ιδιοτιμής στο μιγαδικό ημιεπίπεδο καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη θέση των υπολοίπων

ιδιοτιμών καθώς και από τη θέση των μηδενικών του συστήματος. Έτσι, όταν το σύστημα προσεγγίσει ένα νέο σημείο ισορροπίας, οι νέοι ρυθμοί μπορεί να συνεπάγονται εντελώς διαφορετική απόκριση σε μια διαταραχή από ότι οι προηγούμενοι. Η αλληλεπίδραση των ρυθμών είναι ένα μη γραμμικό φαινόμενο το οποίο αναλύεται με μεθόδους κανονικών μορφών.

Διάφορες είναι οι αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν ασθενώς αποσβενύμενες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ενδεικτικά αναφέρονται: η μεταφορά ενεργού ή αέργου ισχύος σε δίκτυα με ασθενή διασύνδεση, αλλαγές στο φορτίο ή στην τοπολογία του δικτύου λόγω μικρών ή μεγάλων διαταραχών, το μεγάλο κέρδος των ρυθμιστών τάσεως σε συνδυασμό με της πολύ μικρές χρονικές σταθερές τους, η χωρητική λειτουργία των σύγχρονων γεννητριών, η δυναμική και μη γραμμική συμπεριφορά των φορτίων. [5]

Τα κυριότερα είδη των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων (Σχήμα 1.1) είναι:

- **Τοπικές ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις (Local modes).** Είναι οι συνηθέστερες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις, οι οποίες εμφανίζονται σε ένα φάσμα συχνοτήτων 1 ως 3 Hz και περιγράφουν την ταλάντωση των δρομέων των γεννητριών ενός σταθμού παραγωγής μεταξύ τους ή μεταξύ γεννητριών κοντινών σταθμών.
- **Ενδοσυστημικές ή διατοπικές ταλαντώσεις (Intra-area oscillations).** Είναι οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις μεταξύ σταθμών παραγωγής οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές του ίδιου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και συνοδεύονται από ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των σταθμών αυτών.
- **Ταλαντώσεις διασυνδέσεων ή διασυνοριακές ταλαντώσεις (Inter-area oscillations).** Πρόκειται για ταλαντώσεις που εμπλέκουν το σύνολο των συγχρόνων μηχανών ενός συστήματος, με τις μηχανές ενός γειτονικού συστήματος, όταν αυτά συνδέονται μέσω ενός ασθενούς δικτύου μεταφοράς και εμφανίζονται με πολύ χαμηλή συχνότητα.



Σχήμα 1.1 Τα είδη των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων

1.5.2 Ανάλυση των Ηλεκτρομηχανικών Ταλαντώσεων

Θα προχωρήσουμε τώρα σε μια πιο λεπτομερή ανάλυση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων:

Συμβολίζουμε την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα με ω_r (rad/sec) και την σύγχρονη ταχύτητα με ω_0 (rad/sec). Στο ανά μονάδα σύστημα η ταχύτητα του δρομέα σε σχέση με την σύγχρονη ταχύτητα παριστάνεται με ω (α.μ.) όπου:

$$\omega = \frac{\omega_r}{\omega_0} \quad (1.1)$$

Θεωρώντας ότι η γωνιακή ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο άξονας αναφοράς του συστήματος ω_s ισούται με τη σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή $\omega_s = \omega_0$, ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας γίνεται:

$$\dot{\delta} = (\omega - 1)\omega_0 \quad (1.2)$$

Αν επιπλέον θεωρηθεί ότι ο ανά μονάδα συντελεστής μηχανικής αποσβέσεως D ισούται με το μηδέν τότε η εξίσωση η οποία εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας του δρομέα συναρτήσει της μεταβολής της ροπής (α.μ.) είναι:

$$2H \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \quad (1.3)$$

όπου H η ανηγμένη σταθερά αδράνειας (MWs/MVA).

Έστω τώρα ότι στο σύστημα συμβαίνει μια μικρή διαταραχή. Σύμφωνα με τα όσα αναφέραμε και προηγουμένως, κατά τη διάρκεια της διαταραχής το σημείο λειτουργίας της γεννήτριας θα μεταβάλλεται και κατά συνέπεια θα μεταβάλλονται τόσο η γωνία δ όσο και η ταχύτητα ω . Οι μεταβολές αυτές εκφράζονται από τις σχέσεις (1.2) και (1.3), οι οποίες για μια μικρή διαταραχή γίνονται αντίστοιχα:

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \quad (1.4)$$

και

$$2H \Delta \dot{\omega} = \Delta T_m - \Delta T_e \quad (1.5)$$

Μετά από τη μικρή διαταραχή η γεννήτρια προσπαθεί να διατηρήσει το συγχρονισμό της καθώς επίσης και να προσεγγίσει ένα νέο σημείο λειτουργίας. Στον άξονα της μηχανής, τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα αναπτύσσουν μεταβατικές ηλεκτρομαγνητικές ροπές, οι οποίες αναλύονται στις ακόλουθες συνιστώσες :

- Μια συνιστώσα ηλεκτρομαγνητικής ροπής συγχρονισμού η οποία συμβολίζεται με T_s και η οποία είναι ανάλογη της μεταβολής της γωνίας $\Delta \delta$.
- Μια συνιστώσα ηλεκτρομαγνητικής ροπής αποσβέσεως η οποία συμβολίζεται με T_d και η οποία είναι ανάλογη της μεταβολής της ταχύτητας του δρομέα $\Delta \omega$.

Η εξίσωση που περιγράφει τη μεταβολή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής είναι η εξής:

$$\Delta T_e = K_s \Delta \delta + K_d \Delta \omega \quad (1.6)$$

Στην παραπάνω σχέση ο συντελεστής K_s καλείται συντελεστής συγχρονισμού ενώ ο συντελεστής K_d καλείται συντελεστής αποσβέσεως. [4]

Μετά από στοιχειώδεις πράξεις μεταξύ των εξισώσεων (1.4), (1.5) και (1.6) προκύπτει η εξίσωση που εκφράζει την μεταβολή της γωνίας δ του δρομέα. Συγκεκριμένα προκύπτει ότι :

$$\Delta\ddot{\delta} + \frac{K_d}{2H}\Delta\dot{\delta} + \frac{K_s\omega_0}{2H}\Delta\delta = \frac{\omega_0}{2H}\Delta T_m \quad (1.7)$$

η οποία είναι μια γραμμική διαφορική εξίσωση με μιγαδικές ιδιοτιμές.

Στο μεγαλύτερο εύρος συνθηκών λειτουργίας μιας σύγχρονης μηχανής, ισχύει:

$$|K_s| \gg |K_d|$$

Συνεπώς η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$\Delta\ddot{\delta} + \frac{K_s\omega_0}{2H}\Delta\delta = \frac{\omega_0}{2H}\Delta T_m \quad (1.8)$$

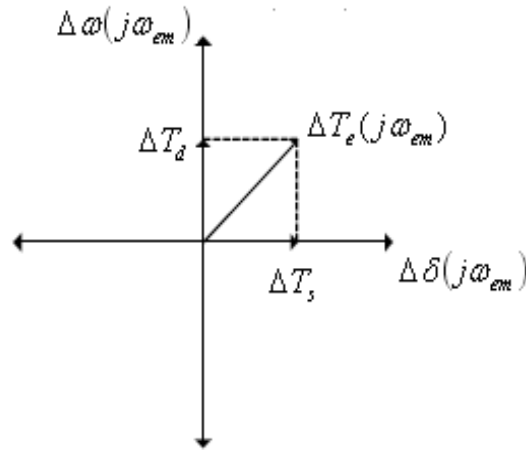
η οποία είναι η εξίσωση ταλάντωσης της σύγχρονης μηχανής με μηδενική απόσβεση.

Η ανάλυση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων έγινε δυνατή με την ανάλυση της μηχανικής και ηλεκτρομαγνητικής ροπής των μηχανών σε μια συνιστώσα ροπής συγχρονισμού, εν φάσει με τη μεταβολή της γωνίας δ της σύγχρονης γεννήτριας και σε μια συνιστώσα ροπής απόσβεσης, εν φάσει με τη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα.

Η ροπή συγχρονισμού είναι η συνιστώσα της ηλεκτρικής ροπής που περιορίζει την απόκλιση των πεδίων των μηχανών και κρατά τις μηχανές σε συγχρονισμό. Έχει συνήθως μεγάλη τιμή και παίζει κυρίαρχο ρόλο στην μεταβατική ευστάθεια γωνίας, αμέσως μετά από μια απότομη μεταβολή στο σύστημα και καθορίζει τη συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης. [6]

Η ροπή απόσβεσης είναι η συνιστώσα της ηλεκτρικής ροπής που περιορίζει την απόκλιση της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας από την ονομαστική της τιμή. Είναι υπεύθυνη για την εξάλειψη των ταλαντώσεων και έχει τον κυρίαρχο ρόλο στην διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος αμέσως μετά από το πέρας της μεταβατικής περιόδου ύστερα από μια μεγάλη μεταβολή, η οποία είναι γνωστή και ως “ευστάθεια πρώτου κύκλου”. Αυτή η συνιστώσα της ηλεκτρικής ροπής, έχει συνήθως μικρή τιμή, επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους και μπορεί να γίνει αρνητική λόγω της δράσεως άλλων διατάξεων ελέγχου που μπορεί να δράσουν ως αρνητικές πηγές απόσβεσης. Κυριότερο παράδειγμα είναι η δράση του αυτόματου ρυθμιστή τάσεως, ειδικά για υψηλές τιμές κέρδους του, αμέσως μετά το πέρας ενός μεταβατικού φαινομένου. Χαμηλή ή αρνητική τιμή της ροπής απόσβεσης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του πλάτους των ταλαντώσεων μέχρι να δράσουν οι διατάξεις προστασίας του συστήματος αποσυνδέοντας τη μονάδα ή η ταλάντωση να πάρει τη μορφή ενός ευσταθούς οριακού κύκλου. [5]

Η ανάλυση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής στις συνιστώσες της (ροπή συγχρονισμού και ροπή αποσβέσεως) μπορεί να παρασταθεί στο πεδίο της συχνότητας των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Η εν λόγω συχνότητα συμβολίζεται με το ω_{em} . Στο Σχήμα 1.2 παραθέτουμε το μιγαδικό επίπεδο $j\omega_{em}$.



Σχήμα 1.2 Ροπή συγχρονισμού και ροπή αποσβέσεως στο πεδίο της συχνότητας των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων

Επιλέγοντας αυθαίρετα ίση με το μηδέν τη φάση της ταλάντωσης της γωνίας του δρομέα, η οποία αναπαρίσταται στο επίπεδο $j\omega_{em}$ από το μιγαδικό αριθμό $\Delta\delta(j\omega_{em})$, ο παραστατικός μιγάδας της ταλάντωσης της ταχύτητας του δρομέα $\Delta\omega(j\omega_{em})$ θα προηγείται κατά 90° λόγω της σχέσης (1.4), η οποία για συχνότητα ταλαντώσεως ω_{em} γράφεται ως εξής:

$$j\omega_{em}\Delta\delta(j\omega_{em}) = \omega_0\Delta\omega(j\omega_{em}) \quad (1.9)$$

Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται επίσης η κατεύθυνση που πρέπει να έχει η ηλεκτρομαγνητική ροπή στη συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης προκειμένου να εξασφαλίζεται η ευστάθεια μικρών διαταραχών της σύγχρονης μηχανής καθώς επίσης και η ανάλυσή της στις δύο της συνιστώσες. [4,7]

1.5.3 Έλεγχος και Απόσβεση των Ταλαντώσεων

Η ευστάθεια των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων των σύγχρονων μηχανών είναι πάντοτε ένα πρόβλημα προς μελέτη και επίλυση από τους ερευνητές. Οι ταλαντώσεις αυτές εμφανίζονται αμέσως μετά από οποιαδήποτε ανωμαλία του συστήματος και χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλή απόσβεση. Ο λόγος απόσβεσης θεωρείται ικανοποιητικός αν κυμαίνεται στο 5% και πάνω.

Η εμφάνιση ταλαντώσεων ισχύος με ασθενή απόσβεση έχει παρατηρηθεί από τη δεκαετία του 1930-40 και αποδόθηκε τότε στην αρνητική ροπή απόσβεσης που εισήγαγε το τύλιγμα του πεδίου, για ορισμένες τιμές της σύνθετης αντίστασης της γραμμής διασύνδεσης. Για την καλύτερη απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων χρησιμοποιούνται τα τυλίγματα αποσβέσεως.

Το πρόβλημα των ταλαντώσεων του δρομέα ξαναεμφανίστηκε εντονότερα στη δεκαετία του 1960-70 μετά την εισαγωγή των πρώτων αυτόματων ρυθμιστών τάσεως και της αύξησης της μεταφερόμενης ισχύος με γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους. [5] Η επίδραση των αυτόματων ρυθμιστών τάσεως στο τύλιγμα πεδίου εισάγει αρνητική ροπή απόσβεσης, η οποία μάλιστα αυξάνει με το κέρδος του αυτόματου ρυθμιστή τάσεως, και μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες από τη θετική ροπή απόσβεσης που εισάγουν τα τυλίγματα απόσβεσης της σύγχρονης γεννήτριας, συνεπώς το φαινόμενο αυτό δεν μπορούσε πλέον να αντιμετωπιστεί με την προσθήκη τυλιγμάτων απόσβεσης λόγω της μεγάλης αύξησης του ρεύματος βραχυκύκλωσης των γεννητριών.

Με την εξέλιξη των συστημάτων ρυθμίσεως τάσεως των γεννητριών, έγινε δυνατή η προσθήκη διατάξεων ελέγχου οι οποίες επιδρούν τοπικά στη διέγερσή τους ώστε αυτή να εισαγάγει θετική ροπή απόσβεσης. Οι διατάξεις αυτές σχεδιάζονται με σκοπό την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων και έγιναν γνωστές ως σταθεροποιητές συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (Power System Stabilizers– PSS). Ενεργούν στη διέγερση μιας γεννήτριας σαν βαθμίδες προπορείας φάσεως και αντισταθμίζουν την υστέρηση φάσεως που εισάγουν ο αυτόματος ρυθμιστής τάσεως και το τύλιγμα του πεδίου. Οι σταθεροποιητές χρησιμοποιούνται με επιτυχία εδώ και πολλά χρόνια και η εφαρμογή τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γενικεύτηκε. Μέχρι και σήμερα, εξακολουθούν να αποτελούν την απλούστερη και πιο οικονομική μέθοδο ελέγχου της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.

Η ανάπτυξη των διασυνδέσεων μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί σήμερα νέα προβλήματα στην απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Οι ταλαντώσεις διασύνδεσης εμπλέκουν πολλές γεννήτριες διαφορετικών συστημάτων και κατά συνέπεια μπορούν να εμφανιστούν σαν αποτέλεσμα της μη εναρμονισμένης λειτουργίας των συστημάτων διέγερσής τους.

Τα τελευταία χρόνια διάφορες διατάξεις, που βασίζονται στα ηλεκτρονικά ισχύος, χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση των ταλαντώσεων διασυνδέσεως. Τέτοιες είναι οι στατοί αντισταθμιστές αέργου ισχύος (SVC) και διάφορες άλλες διατάξεις ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος (FACTS). Οι διατάξεις αυτές ενεργούν στις σύνθετες αντιστάσεις επιλεγμένων γραμμών μεταφοράς ή στις τάσεις των ζυγών διασύνδεσης, με τρόπο τέτοιο ώστε να αυξάνεται η απόσβεση ενός ηλεκτρομηχανικού ρυθμού. [12]

Παρόλα αυτά, και παρά το γεγονός ότι η νέα γενιά ρυθμιστών μπορεί να επιδείξει μια σημαντική βελτίωση σε ότι αφορά τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις σε απλά συστήματα και σε συστήματα μιας μηχανής – άπειρου ζυγού, δεν υπάρχουν ενδείξεις σημαντικής βελτίωσης της απόσβεσης σε σχέση με αυτήν που επιτυγχάνεται με μια σειρά κατάλληλα ρυθμισμένων σταθεροποιητών. Αντίθετα, επειδή οι ρυθμιστές αυτοί χρησιμοποιούνται και σαν μέσα αντιμετώπισης άλλων φαινομένων, όπως είναι η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσεως, μπορεί να εντείνουν την αλληλεπίδραση των ρυθμών του συστήματος αυξάνοντας τον κίνδυνο εμφάνισης συντονισμού. Επιπλέον, το υψηλό τους κόστος και η δυσκολία σχεδίασής και ελέγχου τους καθιστά τη δράση τους συμπληρωματική ως προς τη δράση των σταθεροποιητών για τον έλεγχο της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. [6]

1.6 Ο Συντονισμός

Μια από τις έντονες μορφές αλληλεπίδρασης των ρυθμών είναι η εμφάνιση προσεγγιστικού ισχυρού συντονισμού πρώτης τάξεως δύο ρυθμών. Καθώς το σημείο λειτουργίας του συστήματος μεταβάλλεται και αλλάζουν οι ρυθμοί του συστήματος, είναι δυνατό δύο ιδιοτιμές να έρθουν πολύ κοντά ή ακόμα και να ταυτιστούν. Αν τα δεξιά ιδιοδιανύσματα των δύο ιδιοτιμών ευθυγραμμίζονται, τότε η παραμικρή διαταραχή από αυτό το σημείο λειτουργίας προκαλεί στροφή των δύο ιδιοτιμών προς διαφορετικές κατευθύνσεις και την απότομη απομάκρυνσή τους. [13]

Είναι προφανές ότι ο συντονισμός ενός ηλεκτρομηχανικού ρυθμού, ο οποίος λόγω χαμηλής απόσβεσης βρίσκεται κοντά στον άξονα των φανταστικών αριθμών, με κάποιον άλλο ρυθμό μπορεί να οδηγήσει απότομα το σύστημα σε ταλαντωτική αστάθεια. Αν το σημείο λειτουργίας του συστήματος περάσει κοντά από ένα σημείο ισχυρού συντονισμού, τότε είναι δυνατό κάποιος ηλεκτρομηχανικός ρυθμός να στραφεί προς το δεξιό ημιεπίπεδο και να εμφανιστεί ταλαντωτική αστάθεια. Το φαινόμενο προσέγγισης σε ένα σημείο ισχυρού συντονισμού δεν είναι σπάνιο στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Από τη θεωρία των μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων, ο προσεγγιστικός ισχυρός συντονισμός δύο ρυθμών χαρακτηρίζεται σαν ένα φαινόμενο συνδιάστασης 1, δηλαδή μπορεί να εμφανιστεί με τη μεταβολή μίας και μόνο παραμέτρου του συστήματος. [14]

Συνοπτικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η διερεύνηση του ενδεχομένου εμφάνισης συντονισμού δύο ρυθμών είναι αναγκαία όταν:

- Οι ρυθμοί έχουν συγκρίσιμες συχνότητες. Επειδή οι ρυθμιστές είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε, κατά κανόνα, η αύξηση του κέρδους τους να μεταβάλλει την απόσβεση του ρυθμού πολύ περισσότερο από ότι μεταβάλλει τη συχνότητά του, είναι ενδεχόμενο οι ιδιοτιμές των δύο ρυθμών να μετακινηθούν προς αντίθετες κατευθύνσεις και να πάρουν παραπλήσιες τιμές.

- Οι ευαισθησίες των ιδιοτιμών των δύο ρυθμών ως προς κάποια παράμετρο του συστήματος ή το κέρδος ενός ρυθμιστή είναι αντίθετες. Αυτό είναι ένας δείκτης ότι οι ρυθμοί θα κινηθούν σε αντίθετες κατευθύνσεις σε περίπτωση μεταβολής της παραμέτρου ή του κέρδους του ρυθμιστή.
- Εμφανίζονται απότομες μεταβολές στην κατεύθυνση δύο ή περισσότερων ιδιοτιμών για μια μικρή μεταβολή μιας παραμέτρου.

Στην περίπτωση του συντονισμού δύο ενδεχόμενα υπάρχουν:

- **Τα ιδιοδιανύσματα των ιδιοτιμών ευθυγραμμίζονται.** Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως ισχυρός συντονισμός και οι δύο ιδιοτιμές λέγονται μη γραμμικοί διαιρέτες. Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι δυνατόν οι αντίστοιχοι ρυθμοί να αποζευχθούν. Οι δύο ρυθμοί περιγράφονται από την κοινή τους ιδιοτιμή και από ένα και μόνο δεξιό ιδιοδιάνυσμα. Στην περίπτωση εμφάνισης ισχυρού συντονισμού, οι δύο ιδιοτιμές πλησιάζουν η μία την άλλη και στην τιμή συντονισμού τα ιδιοδιανύσματα ευθυγραμμίζονται με αποτέλεσμα οι δύο ρυθμοί που συντονίζονται να περιγράφονται από ένα και μόνο ιδιοδιάνυσμα.
- **Τα ιδιοδιανύσματα είναι διακριτά.** Η περίπτωση αυτή αναφέρεται ως ασθενής συντονισμός και οι δύο ρυθμοί περιγράφονται από μια κοινή ιδιοτιμή και δύο διαφορετικά δεξιά ιδιοδιανύσματα. [13]

Η ανάπτυξη των διασυνδέσεων μέχρι πρότινος ανεξάρτητων συστημάτων παρόμοιου μεγέθους και ανάλογων χαρακτηριστικών μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση συμμετριών. Με την έννοια αυτή, αν και το φαινόμενο του ακριβούς ισχυρού συντονισμού θα παραμένει σπάνιο, η εμφάνιση φαινομένων προσεγγιστικού ισχυρού συντονισμού είναι αναμενόμενη. Η εφαρμογή τεχνικών βελτιστοποίησης των διαφόρων ρυθμιστών που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της απόσβεσης των ταλαντώσεων, μπορεί να οδηγήσει σε ιδιοτιμές με παραπλήσιες τιμές απόσβεσης και συχνότητας και κατά συνέπεια να προκαλέσει, φαινόμενα προσεγγιστικού ισχυρού συντονισμού.

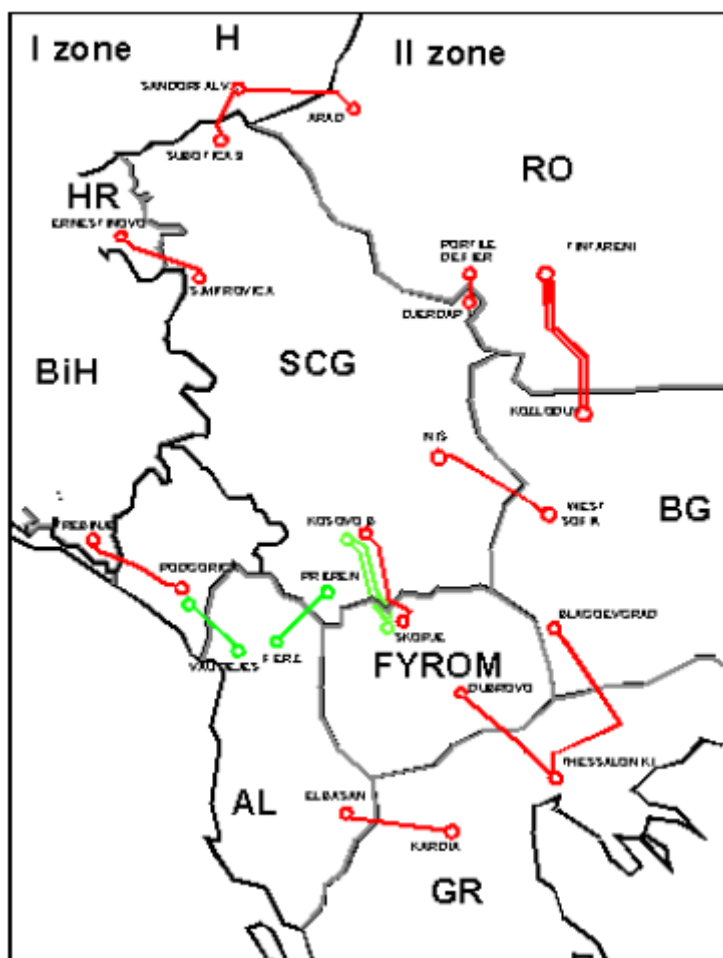
Η έντονη και απότομη μορφή με την οποία εκδηλώνεται το φαινόμενο του συντονισμού καθώς ακόμα και μια απειροστή μεταβολή του κέρδους μιας διάταξης ελέγχου αρκεί για να οδηγήσει έναν ρυθμό σε αστάθεια, κάνει αναγκαία την θεώρηση αυτού του φαινομένου κατά τη συστηματική σχεδίαση ρυθμιστών, ειδικά δε στον υπολογισμό της μέγιστης τιμής του κέρδους τους. Τα παραπάνω ισχύουν ιδιαίτερα για τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις, καθώς εμφανίζονται σε ένα πολύ περιορισμένο εύρος συχνοτήτων, χαρακτηρίζονται από χαμηλή σχετικά απόσβεση, ενώ μπορούν να διεγερθούν από τους πολλούς και διαφορετικούς ρυθμιστές.

1.7 Το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα

Το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα αποτελεί τμήμα του Ευρωπαϊκού διασυνδεδεμένου συστήματος και εκτείνεται στο νότιο-ανατολικό κομμάτι του Βαλκανικού συστήματος. Το ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα περιλαμβάνει την τα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της ηπειρωτικής Ελλάδας και κάποιων κοντινών νήσων. Το κύριο κέντρο παραγωγής βρίσκεται στο βορειοδυτικό κομμάτι της χώρας, κοντά στα ορυχεία λιγνίτη, η οποία είναι η βασική πηγή καυσίμου, ενώ το βασικό κέντρο της κατανάλωσης βρίσκεται στο νότο συμπεριλαμβανομένης του αστικού κέντρου της Αθήνας. Η εγκατεστημένη ισχύς του ελληνικού συστήματος το 2007 έφτασε τα 12332 MW. Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί κυρίως στα επίπεδα 400 kV (EHV) και 150 kV (HV).

Υπάρχουν πέντε γραμμές διασύνδεσης εναλλασσόμενου ρεύματος με τις γειτονικές χώρες στο Βορρά (με συνολική ικανότητα μεταφοράς ισχύος 700 MW) και μια διασύνδεση με την Ιταλία μέσω ενός υποβρύχιου καλωδίου 500kV συνεχούς τάσης με μέγιστη ικανότητα μεταφοράς ισχύος 500 MW. Η σύνδεση της Ελλάδος με τη Βουλγαρία γίνεται μέσω της γραμμής 400kV Θεσσαλονίκη-Blagoevgrad ενώ η διασύνδεση με την Π.Γ.Δ.Μ. γίνεται μέσω της γραμμής 400kV Θεσσαλονίκη-Dubrono και μέσω της γραμμής 150 kV Φλώρινα – Bitola γίνεται. Επίσης, συνδέεται με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Αλβανίας, αν και η Αλβανία δεν είναι επίσημα κομμάτι της UCTE, μέσω της γραμμής Καρδιά-Albasan (Σχήμα 1.3).

Ανάλογα με την τοπολογία, το μοντέλο του συστήματος που χρησιμοποιείται για την ανάλυση ευστάθειας της τάσεως έχει κατά μέσο όρο 900 ζυγούς, 1500 γραμμές και 90 γεννήτριες. Η γεωγραφική δυσαναλογία μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης οδηγεί σε μαζική μεταφορά ισχύος στη κατεύθυνση βορρά-νότου. Αυτή η δυσαναλογία αυξάνεται συνεχώς λόγω υψηλής αύξησης των ετήσιων μέγιστων φορτίων κυρίως στο νότο. Τέτοιες αιχμές εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου και είναι κυρίως λόγω του κλιματισμού. Οι καθυστερήσεις στην εφαρμογή των προγραμματισμένων πλάνων μεταφοράς (κυρίως εξαιτίας της διαμαρτυρίας των πολιτών) έκανε την κατάσταση ακόμα χειρότερη. Έτσι, κατά καιρούς το Ελληνικό Σύστημα έχει αντιμετωπίσει κρίσιμες συνθήκες λειτουργίας σχετικά με την ευστάθεια της τάσης. [11]



Σχήμα 1.3 Οι διασυνδέσεις του Ελληνικού συστήματος [18]

Το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα εμφανίζει δύο ρυθμούς ταλάντωσης. Ο πρώτος αφορά στο ρυθμό ταλάντωσης της UCTE και έχει συχνότητα 0,2 Hz και ο δεύτερος ρυθμός αφορά στο ρυθμό ταλάντωσης του ελληνικού συστήματος ως προς το Βαλκανικό σύστημα με συχνότητα περίπου 0,6 Hz.. Γενικά, οι δυο αυτοί ρυθμοί αποσβένονται ικανοποιητικά και δεν έχουν παρουσιάσει προβλήματα έως τώρα. [9]

1.8 Το Αντικείμενο της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν στόχο την μελέτη της ευστάθειας του Διασυνδεδεμένου Ελληνικού Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μετά τη σύνδεσή του με ένα τμήμα του τουρκικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Ανατολικής Θράκης με σκοπό την ανταλλαγή ισχύος. Ειδικότερα, εξετάζει την σχεδίαση σταθεροποιητών συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και την εφαρμογή τους στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα με σκοπό την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που εμφανίζονται μετά τη διασύνδεση των δυο χωρών. Η εργασία

εξετάζει δύο πιθανές καταστάσεις λειτουργίας του ελληνικού συστήματος, τόσο για ισχυρή όσο και για ασθενή σύνδεση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

1.9 Τα Χρησιμοποιούμενα Προγράμματα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε δυο πακέτα λογισμικού συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, το PSS/E [19] και το PacDyn [20]. Για την εξαγωγή όλων των αποτελεσμάτων, πέραν του προγράμματος PacDyn, χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικές εκδόσεις, οι vers.29 και v30 του λογισμικού PSS/E. Το κάθε πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ρυθμών, τη μελέτη ευστάθειας και τη σχεδίαση σταθεροποιητών για την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.

Το PSS/E είναι κατάλληλο για μελέτες συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει δυο περιβάλλοντα εργασίας, ένα για την δυναμική ανάλυση του συστήματος και ένα για την ανάλυση μόνιμου καταστάσεως. Το PacDyn CEPEL είναι ένα πακέτο προγραμμάτων για την ανάλυση και τον έλεγχο ευστάθειας μικρών διαταραχών σε μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Εμπεριέχει πλήθος αλγορίθμων για τον υπολογισμό ιδιοτιμών, πόλων και μηδενικών της συνάρτησης μεταφοράς, ολοκληρωτικών υπολοίπων και συντελεστών συμμετοχής.

Τέλος, χρησιμοποιήθηκε και το πακέτο WHSSP σε περιβάλλον SIMULINK [8], για την προσομοίωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μιας γεννήτριας συνδεδεμένης σε άπειρο ζυγό.

1.10 Η Δομή της Εργασίας

Στο παρόν Κεφάλαιο δόθηκαν οι βασικές έννοιες που αφορούν την περιγραφή και την ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλύθηκαν οι έννοιες της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης και των ρυθμών της ηλεκτρομηχανικής ροπής και έγινε αναφορά στο φαινόμενο του συντονισμού δύο ρυθμών. Τέλος, περιγράφηκε η δομή του Διασυνδεδεμένου Ελληνικού Συστήματος και τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάστηκαν βασικές θεωρητικές γνώσεις οι οποίες αφορούν την περιγραφή ενός δυναμικού συστήματος καθώς και την γραμμικοποίησή του γύρω από ένα σημείο λειτουργίας του προκειμένου να μελετηθεί η ευστάθεια μόνιμου καταστάσεώς του. Αναλύθηκε η έννοια της ιδιοτιμής, η σημασία του δεξιού και του αριστερού ιδιοδιανύσματος καθώς και η έννοια του ρυθμού απόκρισης. Μετέπειτα παρουσιάστηκαν οι βασικές έννοιες πάνω στις οποίες στηρίζεται ο έλεγχος ενός δυναμικού συστήματος και έγινε αναφορά στους δείκτες ελεγχιμότητας και παρατηρησιμότητας ενός ρυθμού από ένα σύστημα. Αρχικά περιγράφηκε η έννοια

του συντελεστή συμμετοχής μιας μεταβλητής κατάστασης σε ένα ρυθμό και έπειτα αναλύθηκε η έννοια και η σημασία του ολοκληρωτικού υπολοίπου ενός ρυθμού.

Στο Κεφάλαιο 3 αρχικά παρουσιάζονται τα προγραμματιστικά πακέτα με τη βοήθεια των οποίων προσομοιώθηκε και μελετήθηκε το Διασυνδεδεμένο Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας και έπειτα δίνονται τα γενικότερα χαρακτηριστικά του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και της τουρκικής νησίδας της ανατολικής Θράκης που συνδέεται σε αυτό. Στη συνέχεια περιγράφηκαν τα μοντέλα διαφόρων τάξεων για την παράσταση μιας σύγχρονης γεννήτριας. Μετέπειτα παρουσιάστηκαν οι βασικές διατάξεις ελέγχου που προσαρτώνται σε μια γεννήτρια οι οποίες είναι ο ρυθμιστής στροφών, ο αυτόματος ρυθμιστής τάσεως (APT) και ο σταθεροποιητής συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μιας εισόδου-μιας εξόδου. Αναφορικά με τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης, τον ρυθμιστή στροφών και τον σταθεροποιητή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας περιγράφηκαν τα μοντέλα IEEEΤ1, TGOV1 και STAB1 αντίστοιχα.

Στο Κεφάλαιο 4, πραγματοποιούνται οι παρακάτω μελέτες :

- Θεωρείται ότι όλες οι γραμμές μεταφοράς του ελληνικού συστήματος είναι ενεργοποιημένες και η ανταλλαγή ισχύος της Ελλάδος με την Τουρκία γίνεται μέσω ισχυρής διασύνδεσης στα 400kV. Γίνεται ανάλυση των ρυθμών ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης του συστήματος και μελετάται η απόκριση του συστήματος σε μια διαταραχή. (Σενάριο Α, Ισχυρή Διασύνδεση)
- Θεωρείται ότι η γραμμή μεταφοράς 400kV Θεσσαλονίκης-Φιλίππων είναι απενεργοποιημένη και η διασύνδεση του Ελληνικού συστήματος με την Τουρκία είναι ασθενέστερη εξαιτίας της σύνδεσης της Θράκης με το υπόλοιπο Ελληνικό Σύστημα μέσω του δικτύου 150 kV. Γίνεται ανάλυση των ρυθμών ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης του συστήματος και μελετάται η απόκριση του συστήματος σε μια διαταραχή. (Σενάριο Β, Ασθενής Διασύνδεση)

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται μια ανάλυση η οποία αφορά τα γενικότερα χαρακτηριστικά της διάταξης του σταθεροποιητή ΣΗΕ (PSS). Αναφέρονται οι βασικές αρχές πάνω στις οποίες στηρίζεται η σχεδίαση ενός σταθεροποιητή ενώ παρουσιάζονται διαφορετικές μεθοδολογίες για τη σχεδίαση ενός σταθεροποιητή μιας εισόδου μιας εξόδου για την απόσβεση ηλεκτρομηχανικών ρυθμών του ελληνικού συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 6 πραγματοποιείται σχεδίαση ενός σταθεροποιητή με σκοπό την απόσβεση της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης που επικρατεί στο σύστημα. Η σχεδίαση γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της συχνότητας του ρυθμού με το μικρότερο λόγο απόσβεσης. Έπειτα, θεωρείται ότι το σύστημα είναι εφοδιασμένο με αυτούς τους σταθεροποιητές και μελετάται η ευστάθεια του συστήματος στην περίπτωση που:

- Η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων είναι ενεργοποιημένη.
- Η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων είναι αποσυνδεδεμένη

Στο Κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται μια διαφορετική σχεδίαση ενός σταθεροποιητή χρησιμοποιώντας μια εναλλακτική μέθοδο σχεδίασης. Η σχεδίαση γίνεται λαμβάνοντας υψηλή τιμή κεντρικής συχνότητας του σταθεροποιητή. Έπειτα, θεωρείται ότι το σύστημα είναι εφοδιασμένο με αυτούς τους σταθεροποιητές και μελετάται η ευστάθεια του συστήματος στην περίπτωση που:

- Η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων είναι ενεργοποιημένη.
- Η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων είναι αποσυνδεδεμένη.

Στο Κεφάλαιο 8 τέλος γίνεται μια ανασκόπηση της εργασίας, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το πρακτικό κομμάτι της ενώ προτείνονται επιπλέον προοπτικές για μελέτη.

Κεφάλαιο 2

Μαθηματικές Έννοιες

2.1 Γραμμικοποίηση Ενός Συστήματος

Ο πιο ενδεδειγμένος τρόπος για να μελετηθεί συστηματικά η ευστάθεια μονίμου καταστάσεως βασίζεται στη γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από το σημείο λειτουργίας. Η ευστάθεια μικρών διαταραχών δεν επηρεάζεται από το μέγεθος της διαταραχής και συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ότι οι αποκλίσεις των μεταβλητών καταστάσεως από το σημείο λειτουργίας είναι αρκετά μικρές ώστε οι όροι ανώτερης τάξης που εκφράζουν γινόμενα αποκλίσεων να μπορούν να αμεληθούν χωρίς σοβαρό σφάλμα.

2.1.1. Ανάλυση Ρυθμών Συστήματος

Η ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών μπορεί να γίνει τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου γίνεται με την προσομοίωση διαφόρων διαταραχών στο σύστημα, δηλαδή με την αριθμητική επίλυση του συστήματος των αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων που το περιγράφουν. Αντίθετα, η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας γίνεται με τον υπολογισμό των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων ενός γραμμικοποιημένου μοντέλου του συστήματος, σε κάποιο σημείο ισορροπίας. Αν και η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έκανε δυνατή τη δημιουργία ειδικών προγραμμάτων που προσομοιώνουν μέσα σε πολύ λίγο χρόνο τη δυναμική συμπεριφορά συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με χιλιάδες ζυγούς, η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου δεν βοηθά πάντα στην εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων για την αντιμετώπιση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Για παράδειγμα, είναι πολύ δύσκολο από την καμπύλη χρονικής απόκρισης κάποιας μεταβλητής να γίνει αντιληπτό ποιες

παράμετροι του συστήματος συμβάλλουν στην εμφάνιση μιας ασταθούς ταλαντωτικής συμπεριφοράς. Αμέσως μετά τη διαταραχή διεγείρονται όλοι οι ρυθμοί του συστήματος με αποτέλεσμα οι αποκρίσεις των γωνιών να έχουν μια σύνθετη και μη περιοδική μορφή από την οποία δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα για τη φύση του φαινομένου που εμφανίζεται.

Η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας με τη γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από ένα σημείο ισορροπίας επιτρέπει την εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης ευαισθησίας των ιδιοτιμών με τις οποίες εξάγονται ποιοτικά συμπεράσματα για το ποιες μεταβλητές κατάστασης κυριαρχούν σε ένα ρυθμό και ποιες παράμετροι του συστήματος συμβάλλουν στην εμφάνιση αστάθειας. Επιπλέον, στο πεδίο της συχνότητας είναι εύκολη η σχεδίαση διατάξεων ελέγχου της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, όπως είναι οι σταθεροποιητές.

Παρόλα αυτά, ο ισχυρά μη γραμμικός χαρακτήρας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση μη γραμμικών φαινομένων όπως είναι οι οριακοί κύκλοι. Το ενδεχόμενο εμφάνισης τέτοιων φαινομένων επιβάλλει την αποτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος στο οποίο έχουν συμπεριληφθεί διατάξεις αύξησης της απόσβεσης σχεδιασμένες με χρήση γραμμικών μεθόδων, με τη προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου, για ένα μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας και διαταραχών.

2.1.2 Γραμμικοποίηση Δυναμικών Συστημάτων

Θεωρούμε μια μη γραμμική συνάρτηση μιας μεταβλητής, έστω $f(x)$, η οποία είναι συνεχής και πολλαπλά παραγωγίσιμη στο σημείο x_0 . Η γραμμικοποίηση της συνάρτησης αυτής γύρω από το σημείο x_0 στηρίζεται στο ανάπτυγμα κατά Taylor της συνάρτησης αυτής γύρω από το σημείο αυτό.

Το ανάπτυγμα της συνάρτησης κατά Taylor γύρω από το σημείο x_0 δίνει ότι :

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) + \frac{1}{2}(x - x_0)^2 f''(x_0) + \dots \quad (2.1)$$

Παραλείποντας τους όρους δευτέρας και μεγαλύτερης τάξης παίρνουμε την γραμμικοποιημένη μορφή της $f(x)$, ήτοι :

$$\Delta f = f'(x_0)\Delta x \quad (2.2)$$

όπου: $\Delta f = f(x) - f(x_0)$, $\Delta x = x - x_0$

Το πρόθεμα Δ δηλώνει την απόκλιση από την αντίστοιχη τιμή μονίμου καταστάσεως. [4]

2.1.3 Περιγραφή και Γραμμικοποίηση Δυναμικού Συστήματος – Ιδιοτιμές

Για να περιγράψουμε τη δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος απαιτείται ένα σύνολο από ανεξάρτητες μεταξύ τους μεταβλητές, έστω n τον αριθμό, οι οποίες περιγράφουν επαρκώς το σύστημα. Οι μεταβλητές αυτές ονομάζονται μεταβλητές κατάστασης και παριστάνονται μέσω διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης. Ένα δυναμικό σύστημα θεωρείται αυτόνομο αν οι παράγωγοι των μεταβλητών κατάστασης του είναι ανεξάρτητες από τον χρόνο. Για την περιγραφή του συστήματος ενδεχομένως να είναι απαραίτητη η ύπαρξη και κάποιων επιπλέον μεταβλητών, έστω n_a τον αριθμό, οι οποίες ονομάζονται αλγεβρικές μεταβλητές. Η διέγερση του συστήματος περιγράφεται με ένα σύνολο μεταβλητών, έστω n_{in} τον αριθμό, οι οποίες ονομάζονται μεταβλητές εισόδου ενώ η απόκριση του συστήματος περιγράφεται με ένα σύνολο μεταβλητών, έστω n_{out} τον αριθμό, οι οποίες ονομάζονται μεταβλητές εξόδου. Οι μεταβλητές κατάστασης μαζί με τις μεταβλητές εισόδου μπορούν κάθε στιγμή να προσδιορίσουν τη χρονική εξέλιξη του συστήματος. Κάθε άλλη μεταβλητή του συστήματος περιγράφεται συναρτήσει των μεταβλητών κατάστασης και των μεταβλητών εισόδου.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι η επιλογή των μεταβλητών κατάστασης που περιγράφουν ένα σύστημα δεν είναι μοναδική. Η απόκριση του συστήματος είναι κάθε χρονική στιγμή μοναδική αλλά ανεξάρτητη από το σύνολο μεταβλητών κατάστασης που έχει επιλεγθεί.

Θεωρούμε τώρα ένα αυτόνομο δυναμικό σύστημα. Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος περιγράφεται από ένα σύνολο n μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων :

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{d}, \underline{a}, \underline{p}) \quad (2.3)$$

όπου

\underline{x} : το $n \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης

\underline{d} : το $n_{in} \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών εισόδου

\underline{a} : το $n_a \times 1$ διάνυσμα των αλγεβρικών μεταβλητών

\underline{p} : το $n_p \times 1$ διάνυσμα των λοιπών παραμέτρων του συστήματος

\underline{f} : το $n \times 1$ σύνολο των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης

Η έξοδος του συστήματος καθορίζεται από n_{out} αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες σε διανυσματική μορφή γράφονται ως εξής :

$$\underline{y} = \underline{g}(\underline{x}, \underline{d}, \underline{a}, \underline{p}) \quad (2.4)$$

όπου

\underline{y} : το $n_{out} \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών εξόδου

\underline{g} : το $n_{out} \times 1$ σύνολο των εξισώσεων εξόδου

Επιπλέον οι n_a αλγεβρικές εξισώσεις προκύπτουν από τους n_a αλγεβρικούς περιορισμούς του συστήματος, οι οποίες σε διανυσματική μορφή γράφονται ως εξής:

$$\underline{0} = \underline{h}(\underline{x}, \underline{d}, \underline{a}, \underline{p}) \quad (2.5)$$

όπου \underline{h} : το $n_a \times 1$ σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων.

Μια θέση ισορροπίας του δυναμικού συστήματος $(\underline{x}_0, \underline{d}_0, \underline{a}_0)$ θα πρέπει να ικανοποιεί ταυτόχρονα τις εξής σχέσεις :

$$\underline{f}(\underline{x}_0, \underline{d}_0, \underline{a}_0, \underline{p}) = \underline{0} \quad (2.6 \alpha)$$

$$\underline{h}(\underline{x}_0, \underline{d}_0, \underline{a}_0, \underline{p}) = \underline{0} \quad (2.6 \beta)$$

και ονομάζεται θέση μονίμου καταστάσεως.

Επειδή ένα σύστημα κατά την κανονική λειτουργία του βρίσκεται ουσιαστικά σε μια θέση μονίμου καταστάσεως, η θέση αυτή ονομάζεται επιπλέον σημείο λειτουργίας ή σημείο ισορροπίας του συστήματος. [4,5]

Θεωρώντας ότι οι συναρτήσεις $\underline{f}, \underline{g}, \underline{h}$ είναι συνεχείς και παραγωγίσιμες, τις αναπτύσσουμε κατά Taylor και γραμμικοποιούμε το παραπάνω σύστημα. Παραλείποντας τους όρους ανωτέρας τάξεως και θεωρώντας ότι ο Ιακωβιανός πίνακας των αλγεβρικών περιορισμών αντιστρέφεται στο σημείο ισορροπίας, ώστε οι αλγεβρικές μεταβλητές να απαλειφθούν, οι εξισώσεις (2.3) και (2.4) τελικά γραμμικοποιούνται στο παρακάτω σύστημα που υπό μορφή πινάκων γράφεται ως εξής :

$$\Delta \dot{\underline{x}} = \mathbf{A} \Delta \underline{x} + \mathbf{B} \Delta \underline{d} \quad (2.7)$$

$$\Delta \underline{y} = \mathbf{C}^T \Delta \underline{x} + \mathbf{D} \Delta \underline{d} \quad (2.8)$$

όπου

\mathbf{A} : ο $n \times n$ πίνακας κατάστασης

\mathbf{B} : ο $n \times n_{in}$ πίνακας εισόδου

\mathbf{C}^T : ο $n_{out} \times n$ πίνακας εξόδου

\mathbf{D} : ο $n_{out} \times n_{in}$ απευθείας πίνακας

Έτσι, το πρόβλημα της ευστάθειας μονίμου καταστάσεως ενός αυτόνομου μη γραμμικού δυναμικού συστήματος που περιγράφεται από τις εξισώσεις (2.3) και (2.4) σε κάποιο σημείο λειτουργίας, γίνεται πρόβλημα ευστάθειας του γραμμικού συστήματος το οποίο ορίσαμε μέσω των εξισώσεων (2.7) και (2.8). Η ευστάθεια ενός γραμμικού συστήματος καθορίζεται πλήρως από τις ιδιοτιμές του πίνακα \mathbf{A} του συστήματος. Το σύστημα είναι ευσταθές όταν όλες οι ιδιοτιμές του πίνακα \mathbf{A} έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος.

Μετασχηματίζοντας τις εξισώσεις (2.7), (2.8) κατά Laplace προκύπτει ο πίνακας συναρτήσεων μεταφοράς του συστήματος :

$$\Delta \underline{y}(s) = [\mathbf{C}^T (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D}] \Delta \underline{d}(s) \quad (2.9)$$

Υπενθυμίζεται για μια συνάρτηση μεταφοράς, όταν το πολυώνυμο του παρανομαστή τεθεί ίσο με το μηδέν σχηματίζεται η χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος οι ρίζες της οποίας καλούνται πόλοι και καθορίζουν την συμπεριφορά της απόκρισης του συστήματος. Οι πόλοι και οι ιδιοτιμές ενός συστήματος εκφράζουν ουσιαστικά το ίδιο πράγμα. Οι ρίζες του πολυωνύμου του αριθμητή από την πλευρά τους καλούνται μηδενικά.

Ο παρανομαστής της Σχέσης (2.9) είναι το χαρακτηριστικό πολυώνυμο και δίνει τη χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος:

$$\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0 \quad (2.10)$$

Οι λύσεις αυτής της εξίσωσης ονομάζονται ιδιοτιμές του συστήματος (πόλοι της συνάρτησης μεταφοράς) και αναφέρονται στο συγκεκριμένο σημείο ισορροπίας. Οι λύσεις αυτές είναι μοναδικές και ανεξάρτητες του συνόλου μεταβλητών κατάστασης που έχει επιλεγθεί για την περιγραφή του συστήματος.

Οι ιδιοτιμές είναι εν γένει μιγαδικοί αριθμοί και συμβολίζονται ως εξής:

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad i = 1, \dots, n$$

2.1.4 Ιδιοδιανύσματα

Σε κάθε ιδιοτιμή λ_i του συστήματος που πρόεκυψε ως λύση της εξίσωσης :

$$\det(\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0 \quad (2.11)$$

αντιστοιχίζεται ένα μη μηδενικό διάνυσμα \underline{u}_i διαστάσεων $n \times 1$ τέτοιο ώστε:

$$\mathbf{A}\underline{u}_i = \lambda_i \underline{u}_i \quad (2.12)$$

Το διάνυσμα που ικανοποιεί την παραπάνω σχέση ονομάζεται δεξιό ιδιοδιάνυσμα της ιδιοτιμής λ_i . Για ένα σύστημα με διακριτές ιδιοτιμές, το σύνολο των ιδιοδιανυσμάτων αποτελεί τη βάση ενός διανυσματικού χώρου n διαστάσεων. Η ελεύθερη απόκριση του συστήματος χαρακτηρίζεται ουσιαστικά από μια τροχιά που παράγεται μέσα σε αυτόν το διανυσματικό χώρο ο οποίος ονομάζεται και χώρος κατάστασης.

Αντίστοιχα ως αριστερό ιδιοδιάνυσμα της ιδιοτιμής λ_i ορίζεται, το $n \times 1$ διάνυσμα \underline{v}_i που ικανοποιεί τη σχέση:

$$\underline{v}_i^T \mathbf{A} = \lambda_i \underline{v}_i^T \quad (2.13)$$

Επειδή οι πίνακες \mathbf{A} και \mathbf{A}^T έχουν τις ίδιες ιδιοτιμές, το αριστερό ιδιοδιάνυσμα ισοδύναμα ορίζεται και σαν δεξιό ιδιοδιάνυσμα του \mathbf{A}^T , δηλαδή του ανάστροφου πίνακα του \mathbf{A} .

$$\mathbf{A}^T \underline{v}_i = \lambda_i \underline{v}_i \quad (2.14)$$

Εφόσον οι ιδιοτιμές είναι όλες διακριτές, τότε, τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές είναι κάθετα μεταξύ τους. Δηλαδή ισχύει:

$$\underline{v}_j^T \underline{u}_i = 0 \quad i \neq j \quad (2.15)$$

Τα ιδιοδιανύσματα (δεξιό και αριστερό) που αντιστοιχούν στην ίδια ιδιοτιμή λ_i έχουν εσωτερικό γινόμενο διάφορο του μηδενός. Αν κανονικοποιήσουμε τα ιδιοδιανύσματα αυτά, θα ισχύει τελικά:

$$\underline{v}_i^T \underline{u}_i = 1 \quad (2.16)$$

[4,6,7]

2.1.5 Μετασχηματισμός Ομοιότητας

Ορίζονται ο $n \times n$ πίνακας \mathbf{U} που έχει ως στήλες τα δεξιά ιδιοδιανύσματα του πίνακα \mathbf{A} , και ο $n \times n$ πίνακας \mathbf{V}^T που έχει ως γραμμές τα αριστερά ιδιοδιανύσματα του πίνακα \mathbf{A} , δηλαδή: $\mathbf{U} = [\underline{u}_1 \dots \underline{u}_n]$ και $\mathbf{V}^T = [\underline{v}_1^T \dots \underline{v}_n^T]$ αντίστοιχα.

Βάσει των ιδιοτήτων των ιδιοδιανυσμάτων, για τους πίνακες \mathbf{U} και \mathbf{V} θα ισχύει ότι :

$$\mathbf{U}^T \mathbf{V} = \mathbf{V}^T \mathbf{U} = \mathbf{I} \quad (2.17)$$

Δηλαδή οι πίνακες \mathbf{U} και \mathbf{V}^T είναι αντίστροφοι.

Ο διαγώνιος πίνακας είναι η πιο απλή κανονική μορφή που μπορεί να πάρει ο πίνακας κατάστασης. Η ικανή συνθήκη για να είναι ο πίνακας \mathbf{A} διαγωνοποιήσιμος είναι να έχει n διακριτές ιδιοτιμές, καθώς τότε τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα είναι γραμμικά ανεξάρτητα.

Ορίζεται τότε, ο πίνακας $\mathbf{\Lambda}$ ως ο διαγώνιος $n \times n$ πίνακας που έχει ως διαγώνια στοιχεία τις ιδιοτιμές του \mathbf{A} , δηλαδή:

$$\mathbf{\Lambda} = \text{diag}[\lambda_1 \dots \lambda_n]$$

Από τις σχέσεις (2.11), (2.15) προκύπτει:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T \quad (2.18)$$

Με άλλα λόγια, ο πίνακας \mathbf{A} με τη βοήθεια των πινάκων \mathbf{U} και \mathbf{V}^T μετασχηματίζεται και συγκεκριμένα διαγωνοποιείται στον πίνακα $\mathbf{\Lambda}$. Ο μετασχηματισμός αυτός καλείται μετασχηματισμός ομοιότητας.

2.1.6 Ρυθμοί Απόκρισης Συστήματος

Αν θεωρήσουμε ότι $\Delta \underline{d} = 0$ στη σχέση (2.7), έχουμε την ελεύθερη απόκριση του συστήματος:

$$\Delta \underline{\dot{x}} = \mathbf{A} \Delta \underline{x} \quad (2.19)$$

Η ανάλυση ενός δυναμικού συστήματος με τη βοήθεια του μετασχηματισμού των μεταβλητών κατάστασης στους αντίστοιχους ρυθμούς, λέγεται ανάλυση ρυθμών (modal analysis). Με την ανάλυση αυτή, η συμπεριφορά του συστήματος αναλύεται με τη βοήθεια των ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων που αντιστοιχούν στους ρυθμούς και παρέχουν πληροφορίες για τη μορφή τους. Η μορφή του ρυθμού (mode shape) καθορίζεται από το δεξιό ιδιοδιάνυσμα.

Ως ρυθμός απόκρισης z_i ορίζεται ο ακόλουθος μετασχηματισμός των μεταβλητών κατάστασης:

$$z_i(t) = \underline{v}_i^T \Delta \underline{x}(t) \quad (2.20)$$

Λόγω της ορθογωνιότητας των ιδιοδιανυσμάτων η σχέση (2.20) γράφεται ισοδύναμα σε μορφή πινάκων ως εξής:

$$\underline{z}(t) = \mathbf{V}^T \Delta \underline{x}(t) \quad (2.21)$$

Το διάνυσμα αυτό καλείται διάνυσμα ρυθμών.

Από όπου προκύπτει:

$$\Delta \underline{x}(t) = \mathbf{U} \underline{z}(t) \quad (2.22)$$

Η εξίσωση (2.19) μέσω της σχέσης (2.22) γίνεται :

$$\mathbf{U} \dot{\underline{z}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{U} \underline{z}(t) \quad (2.23)$$

Μέσω της σχέσης που εκφράζει τον μετασχηματισμό ομοιότητας και εφαρμόζοντας απλές ιδιότητες πινάκων η (1.31) γίνεται τελικά:

$$\dot{\underline{z}}(t) = \mathbf{\Lambda} \underline{z}(t) \quad (2.24)$$

Επειδή ο πίνακας $\mathbf{\Lambda}$ είναι διαγώνιος, οι n πρωτοβάθμιες διαφορικές εξισώσεις που εκφράζονται μέσω της σχέσης (2.24) μπορούν να λυθούν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η αναλυτική έκφραση καθενός από του n ρυθμούς απόκρισης του συστήματος:

$$z_i = z_{i0} e^{\lambda_i t} \quad i = 1, \dots, n \quad (2.25)$$

η οποία δίνει την ελεύθερη απόκριση του ρυθμού i , όπου με z_{i0} συμβολίζεται η αρχική τιμή του ρυθμού z_i .

Ο καθένας από τους n ρυθμούς απόκρισης προκύπτει μέσω της σχέσης (2.18).

Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης (σχέση 2.20) μπορεί να γραφτεί σαν το άθροισμα των ρυθμών πολλαπλασιασμένο με τα αντίστοιχα δεξιά ιδιοδιανύσματα. Ισχύει δηλαδή η παρακάτω σχέση :

$$\Delta \underline{x}(t) = \sum_{i=1}^n z_i(t) \underline{u}_i \quad (2.26)$$

Με την αντικατάσταση στην παραπάνω σχέση των λύσεων, όπως αυτές εκφράζονται στη (2.23), προκύπτει η ελεύθερη απόκριση του συστήματος συναρτήσει των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα \mathbf{A} καθώς επίσης και των αρχικών συνθηκών.

Συγκεκριμένα προκύπτει ότι :

$$\Delta \underline{x}(t) = \sum_{i=1}^n \underline{u}_i z_{i0} e^{\lambda_i t} = \sum_{i=1}^n \underline{u}_i \underline{v}_i^T \underline{x}_0 e^{\lambda_i t} \quad (2.27)$$

Στην παραπάνω εξίσωση αντικαθιστώνται οι αρχικές τιμές των ρυθμών συναρτήσεων των αρχικών τιμών των μεταβλητών κατάστασης.

Από τις σχέσεις (2.18) και (2.26) γίνεται κατανοητή η φυσική σημασία των δεξιών και των αριστερών ιδιοδιανυσμάτων αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, από την (2.26) φαίνεται ότι τα στοιχεία του δεξιού ιδιοδιανύσματος καθορίζουν πως εμφανίζεται ένας ρυθμός στις μεταβλητές κατάστασης. Αντίστοιχα, από τη σχέση (2.18) φαίνεται ότι τα στοιχεία του αριστερού ιδιοδιανύσματος καθορίζουν την επίδραση που έχουν οι μεταβλητές κατάστασης στη διέγερση ενός ρυθμού.

Βάσει των όσων μέχρι τώρα έχουν αναφερθεί προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ελεύθερη απόκριση του συστήματος είναι ένας γραμμικός συνδυασμός n εκθετικών συναρτήσεων που περιγράφουν τους n ρυθμούς ελεύθερης απόκρισης του συστήματος. Όταν μια ιδιοτιμή είναι πραγματική ο αντίστοιχος ρυθμός είναι μια εκθετική συνάρτηση, αύξουσα ή φθίνουσα ανάλογα με το πρόσημο. Όταν όμως οι ιδιοτιμές εμφανίζονται σε μιγαδικά ζευγάρια ο αντίστοιχος ρυθμός είναι μια αύξουσα ή φθίνουσα ταλάντωση και καλείται ρυθμός ταλάντωσης. [5,7]

Έστω δύο συζυγείς μιγαδικές ιδιοτιμές λ_i και λ_i^* όπου $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$. Το ζεύγος αυτό εισάγει στην απόκριση του συστήματος έναν όρο της μορφής :

$$e^{\sigma_i t} \sin(\omega_i t + \theta)$$

Για τη συχνότητα της ταλάντωσης ισχύει ότι:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$$

Για το λόγο απόσβεσης του ρυθμού, δηλαδή το μέγεθος που καθορίζει την εξασθένιση του πλάτους της ταλάντωσης, ισχύει ότι :

$$\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}}$$

2.2 Έλεγχος Δυναμικών Συστημάτων

Στην ενότητα αυτή, θα ορίσουμε κάποιες έννοιες που σχετίζονται με τον έλεγχο των γραμμικοποιημένων δυναμικών συστημάτων και τη σχεδίαση διατάξεων ελέγχου με τη βοήθεια της μεθόδου ανάλυσης ρυθμών. Στην ανάλυση αυτή, για λόγους απλούστευσης και χωρίς βλάβη της γενικότητας, οι ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης θεωρούνται διακριτές μεταξύ τους.

2.2.1 Ευαισθησία Ιδιοτιμών

Είναι συχνά πολύ σημαντικό και χρήσιμο να μπορεί να καθοριστεί το πως θα μεταβληθούν οι ιδιοτιμές ενός συστήματος καθώς αλλάζει κάποια παράμετρος του πίνακα κατάστασης.

Στην προηγούμενη ενότητα ορίστηκε το δεξιό ιδιοδιάνυσμα \underline{u}_i μιας ιδιοτιμής ως το $n \times 1$ διάνυσμα που ικανοποιεί τη σχέση (2.12).

Παραγωγίζοντας ως προς κάποια παράμετρο a_{rs} του πίνακα κατάστασης προκύπτει ότι :

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{rs}} \underline{u}_i + \mathbf{A} \frac{\partial \underline{u}_i}{\partial a_{rs}} = \lambda_i \frac{\partial \underline{u}_i}{\partial a_{rs}} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rs}} \underline{u}_i \quad (2.28)$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέρη της εξίσωσης με το αριστερό ιδιοδιάνυσμα \underline{v}_i η (1.25) γίνεται :

$$\underline{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{rs}} \underline{u}_i + \underline{v}_i^T (\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I}) \frac{\partial \underline{u}_i}{\partial a_{rs}} = \underline{v}_i^T \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rs}} \underline{u}_i \quad (2.29)$$

Από τον ορισμό του αριστερού ιδιοδιανύσματος προκύπτει ότι ο δεύτερος όρος του αριστερού μέρους της παραπάνω εξίσωσης είναι ίσος με το μηδέν. Συνεπώς η (2.29) μετά από στοιχειώδεις πράξεις, λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (2.16), γίνεται :

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rs}} = \frac{\underline{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{rs}} \underline{u}_i}{\underline{v}_i^T \underline{u}_i} = \underline{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{rs}} \underline{u}_i \quad (2.30)$$

Στην παραπάνω σχέση αν θεωρηθεί ότι η παράμετρος a ως προς την οποία έγινε η παραγωγή βρίσκεται στην r γραμμή και στην r στήλη του πίνακα κατάστασης, ανήκει δηλαδή στη διαγώνιο του πίνακα, προκύπτει ότι :

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rr}} = \underline{y}_i^T(r) \underline{u}_i(r) = p_i(r) \quad (2.31)$$

Το γινόμενο αυτό που εκφράζεται από τη σχέση (2.30), δηλαδή το γινόμενο ανάμεσα στο r στοιχείο του αριστερού και στο r στοιχείο του δεξιού ιδιοδιανύσματος του ρυθμού i , ορίζει το συντελεστή συμμετοχής $p_i(r)$ της μεταβλητής κατάστασης x_r στο ρυθμό i . Αξίζει να σημειωθεί ότι πρόκειται για ένα αδιάστατο μέγεθος εξαιτίας του ορισμού των αριστερών και δεξιών ιδιοδιανυσμάτων. [5,6]

2.2.2 Οι Συντελεστές Συμμετοχής

Ο συντελεστής συμμετοχής μιας μεταβλητής x_r σε ένα ρυθμό i ουσιαστικά αποτελεί μια ένδειξη για το αν η μεταβολή του διαγώνιου στοιχείου που αντιστοιχεί σε αυτή τη μεταβλητή μπορεί να επηρεάζει πως τη μετατόπιση της αντίστοιχης ιδιοτιμής λ_i . Ο συντελεστής συμμετοχής είναι γενικά ένας μιγαδικός αριθμός το μέτρο του οποίου σαν δείκτης ευαισθησίας καθορίζει ποια μεταβλητή κατάστασης επηρεάζει περισσότερο τη μετατόπιση μιας ιδιοτιμής. Μικρή τιμή του μέτρου, ισοδυναμεί με μικρή επίδραση της συγκεκριμένης μεταβλητής κατάστασης στο ρυθμό, δηλαδή η μεταβολή του αντίστοιχου στοιχείου της διαγωνίου στον πίνακα κατάστασης αφήνει το ρυθμό σχετικά ανεπηρέαστο.

Το πρόσημο του πραγματικού μέρους του συντελεστή συμμετοχής, δείχνει το προς τα πού θα μετατοπιστεί η ιδιοτιμή σε μια αλγεβρική μεταβολή του διαγώνιου στοιχείου του πίνακα κατάστασης, που αντιστοιχεί σε αυτή τη μεταβλητή κατάστασης. Μεγάλη αρνητική τιμή του πραγματικού του μέρους του συντελεστή συμμετοχής, συνεπάγεται την μετατόπιση της ιδιοτιμής προς τα αριστερά και κατά συνέπεια την αύξηση της ευστάθειας για μια αλγεβρική αύξηση του a_{rr} . Αντίθετα, μεγάλο θετικό πραγματικό μέρος του συντελεστή συμμετοχής συνεπάγεται μια αναγκαία αλγεβρική μείωση του a_{rr} για να επιτύχουμε αύξηση της ευστάθειας. Τέλος, η τιμή του φανταστικού μέρους δείχνει πόσο θα επηρεαστεί η συχνότητα του ρυθμού, μεγάλο φανταστικό μέρος συνεπάγεται μεγάλη επίδραση στη συχνότητα.

Οι συντελεστές συμμετοχής χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση διατάξεων ελέγχου κυρίως για τον εντοπισμό της μεταβλητής κατάστασης που προκαλεί τη μεγαλύτερη επίδραση σε κάποιο ρυθμό. Επίσης, αυτή η μεταβλητή κατάστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν είσοδος μιας διατάξεως ελέγχου εφόσον ικανοποιεί και κάποια κριτήρια ελεγχσιμότητας και παρατηρησιμότητας, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

2.2.3 Ελεγχιμότητα και Παρατηρησιμότητα Ρυθμών Συστήματος

Για να μπορεί ένα σύστημα ελέγχου να μεταβάλλει ένα ρυθμό ταλάντωσης, θα πρέπει η είσοδος που θα επιλεγεί να μπορεί να διεγείρει το ρυθμό. Επίσης η μεταβολή του ρυθμού θα πρέπει να ανιχνεύεται στην έξοδο του συστήματος και είσοδο του ρυθμιστή. Αν δηλαδή, για το ζεύγος εισόδου – εξόδου, ο ρυθμός είναι και ελέγξιμος και παρατηρήσιμος τότε, η παρεμβολή μια διάταξης ανατροφοδότησης ανάμεσα σε αυτή την έξοδο και είσοδο του συστήματος είναι δυνατό να μεταβάλλει το ρυθμό.

- ✓ Με όρους ανάλυσης ρυθμών ορίζεται ότι : Ο ρυθμός i είναι ελέγξιμος από την είσοδο j του συστήματος εάν το εσωτερικό γινόμενο $\underline{v}_i^T \underline{b}_j$ είναι διάφορο του μηδενός, όπου με \underline{b}_j συμβολίζεται η j στήλη του πίνακα \mathbf{B} . Ως δείκτης ελεγχιμότητας του ρυθμού i από την είσοδο j ορίζεται το μέτρο του παραπάνω γινομένου.
- ✓ Ο ρυθμός i είναι παρατηρήσιμος από την έξοδο j του συστήματος εάν το εσωτερικό γινόμενο $\underline{c}_j^T \underline{u}_i$ είναι διάφορο του μηδενός, όπου με \underline{c}_j^T συμβολίζεται η j γραμμή του πίνακα \mathbf{C} . Το μέτρο του παραπάνω γινομένου ορίζεται ως ο δείκτης παρατηρησιμότητας του ρυθμού i από την έξοδο j .

Σημειώνεται πως αν στη συνάρτηση μεταφοράς που ορίζει η συγκεκριμένη είσοδος και η συγκεκριμένη έξοδος υπάρχουν μηδενικά που γειτνιάζουν με μια ιδιοτιμή τότε αυτό είναι ένα δείγμα χαμηλής ελεγχιμότητας ή παρατηρησιμότητας του ρυθμού που αντιστοιχεί σε αυτή την ιδιοτιμή. [5,6]

2.3 Τα Ολοκληρωτικά Υπόλοιπα

Με την προϋπόθεση ότι οι ιδιοτιμές του συστήματος είναι διακριτές, μπορούμε να αναλύσουμε τον πίνακα των συναρτήσεων μεταφοράς της (1.44), σαν ένα άθροισμα επιμέρους κλασμάτων:

$$\underline{y}(s) = \left[\sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{C}^T \underline{u}_i \underline{v}_i^T \mathbf{B}}{s - \lambda_i} + \mathbf{D} \right] \underline{d}(s) = \left[\sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{R}_i}{s - \lambda_i} + \mathbf{D} \right] \underline{d}(s) \quad (2.32)$$

Ο πίνακας \mathbf{R}_i ονομάζεται πίνακας των ολοκληρωτικών υπολοίπων του ρυθμού i του πίνακα συναρτήσεων μεταφοράς.

Όπως φαίνεται και από την τελευταία σχέση το κάθε στοιχείο (k,l) του πίνακα των ολοκληρωτικών υπολοίπων είναι το γινόμενο της αντίστοιχης παρατηρησιμότητας και ελεγχιμότητας για την k είσοδο και l έξοδο της συνάρτησης μεταφοράς:

$$R_i(k, l) = \underline{c}_k^T \underline{u}_i \underline{v}_i^T \underline{b}_l$$

Συνεπώς, αν ένας ρυθμός δεν είναι ελέγξιμος ή παρατηρήσιμος τότε το αντίστοιχο ολοκληρωτικό υπόλοιπο θα είναι μηδέν για τη συγκεκριμένη συνάρτηση μεταφοράς.

Σε ένα σύστημα μιας εισόδου και μιας εξόδου, ο πίνακας \mathbf{B} γίνεται διάνυσμα, \underline{b} , ο πίνακας \mathbf{C}^T γίνεται επίσης διάνυσμα, \underline{c}^T , ο πίνακας \mathbf{D} γίνεται βαθμωτό μέγεθος, d_0 , ενώ τα διανύσματα των μεταβλητών εισόδου και εξόδου γίνονται επίσης βαθμωτά μεγέθη. Στην περίπτωση αυτή ισχύει :

$$y(s) = \left[\sum_{i=1}^n \frac{\underline{c}^T \underline{u}_i \underline{v}_i^T \underline{b}}{s - \lambda_i} + d_0 \right] d(s) = \left[\sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} + d_0 \right] d(s) \quad (2.33)$$

Το R_i είναι το ολοκληρωτικό υπόλοιπο της συνάρτησης μεταφοράς για το ρυθμό i , και είναι μιγαδικός αριθμός για μια μιγαδική ιδιοτιμή λ_i . [5,6]

2.3.1 Τα Ολοκληρωτικά Υπόλοιπα σαν Ευαισθησίες των Ιδιοτιμών

Έστω ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου μιας εισόδου μιας εξόδου και ένα σύστημα κλειστού βρόχου αυτό του σχήματος, το οποίο προκύπτει από το παραπάνω σύστημα ανοιχτού βρόχου μέσω μιας διάταξης ανατροφοδότησης της εξόδου του στην είσοδό του.

Το ολοκληρωτικό υπόλοιπο R_i ενός ρυθμού i , είναι ίσο με την ευαισθησία της ιδιοτιμής λ_i μιας συνάρτησης μεταφοράς ανοιχτού βρόχου ως προς μια ανατροφοδότηση της εξόδου στην είσοδό της. Ουσιαστικά φανερώνει το μέγεθος της μεταβολής της αντίστοιχης ιδιοτιμής λ_i στην περίπτωση που το σύστημα ανοιχτού βρόχου “κλείσει” με μια ανατροφοδότηση της εξόδου του στην είσοδό του. Τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα υποδεικνύουν τους ρυθμούς του συστήματος που πρόκειται να επηρεαστούν και σε τι βαθμό, στην περίπτωση μιας τέτοιας ανατροφοδότησης. Το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου δηλώνει τη γωνία με την οποία η ιδιοτιμή θα αναχωρήσει από την τιμή ανοικτού βρόχου.

Θεωρούμε ότι η ανατροφοδότηση είναι θετική, η συνάρτηση ανατροφοδότησης $H(s) = \Delta K$ ενώ η είσοδος δεν διεγείρεται, $d = \Delta K y(s)$. Καθώς το κέρδος αυξάνεται από μηδέν σε K η απόκριση του συστήματος κλειστού βρόχου είναι :

$$y(s) = \left[\sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} + d_0 \right] \Delta K y(s) \quad (2.34)$$

Έστω λ_r μια ιδιοτιμή ανοικτού βρόχου. Μεταβάλλοντας την τιμή του κέρδους ανατροφοδότησης από 0 σε ΔK , προκαλείται μια μετατόπιση $\lambda_r + \Delta \lambda_r$ στην ιδιοτιμή λ_r του συστήματος ανοικτού βρόχου. Αντικαθιστώντας το s με $\lambda_r + \Delta \lambda_r$, η (2.34) γράφεται:

$$1 - \left[\sum_{i=1}^n \frac{R_i}{\lambda_r + \Delta \lambda_r - \lambda_i} + d_0 \right] \Delta K = 0 \quad (2.35)$$

Για $\Delta K \rightarrow 0$, κυριαρχεί ο όρος με $\lambda_i = \lambda_r$ (τείνει στο άπειρο) οπότε η (2.35) γίνεται:

$$1 - R_r \frac{\Delta K}{\Delta \lambda_r} \approx 0 \quad (2.36)$$

η οποία ισοδύναμα γράφεται :

$$\frac{\Delta \lambda_r}{\Delta K} \approx R_r \quad (2.37)$$

Αν η συνάρτηση ανατροφοδότησης είναι της μορφής: $H(s) = KT(s)$, η (2.37) γίνεται:

$$\frac{\Delta \lambda_r}{\Delta K} \approx R_r T(\lambda_r) \quad (2.38)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι :

- Το μέτρο του ολοκληρωτικού υπολοίπου R_r καθορίζει το πόσο θα μετατοπιστεί η ιδιοτιμή με το κλείσιμο του βρόχου.
- Το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου του ρυθμού r , $\arg(R_r)$, καθορίζει την κατεύθυνση προς την οποία θα μετακινηθεί η ιδιοτιμή με το κλείσιμο του βρόχου θετικής ανατροφοδότησης για μικρές τιμές κέρδους.

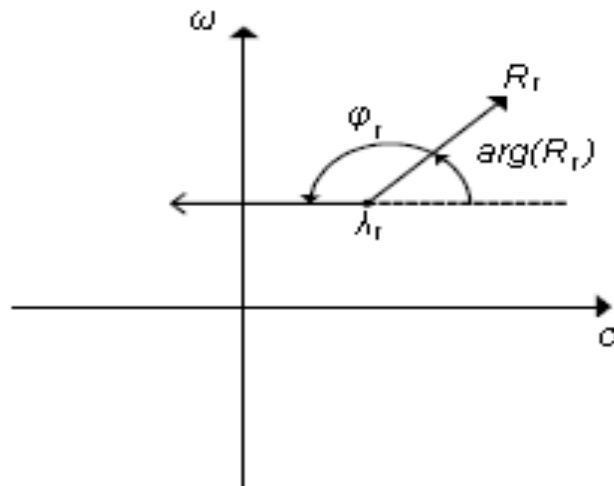
Σκοπός της συνάρτησης μεταφοράς ανατροφοδότησης $T(s)$ είναι να μετακινήσει την ιδιοτιμή λ_r του συστήματος ανοικτού βρόχου προς μια επιθυμητή διεύθυνση, και συγκεκριμένα προς τα αριστερά για να σταθεροποιηθεί ο ρυθμός. Κατά συνέπεια, η συνάρτηση μεταφοράς ανατροφοδότησης $T(s)$ πρέπει στην περιοχή της ιδιοτιμής λ_r , να ορίζει μια προπορεία ή υστέρηση φάσεως φ_r , τέτοια ώστε ανάλογα με την τιμή του ορίσματος του ολοκληρωτικού υπολοίπου να συμβάλλει στην σταθεροποίηση του ρυθμού.

Για να εξασφαλιστεί μια μετατόπιση της ιδιοτιμής προς τα αριστερά θα πρέπει το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου της συνάρτησης μεταφοράς $\arg(R_r)$ και το όρισμα της συνάρτησης μεταφοράς ανατροφοδότησης, $\arg(T(\lambda_r)) = \varphi_r$, να δίνουν άθροισμα ίσο με $\pm 180^\circ$.

Συνεπώς για τη φ_r θα ισχύει ότι :

$$\begin{aligned} \varphi_r &= +180^\circ - \arg(R_r) & \arg(R_r) &\in (0, +180^\circ) \\ \varphi_r &= -180^\circ - \arg(R_r) & \arg(R_r) &\in (-180^\circ, 0) \end{aligned} \quad (2.39)$$

Με άλλα λόγια, η συνάρτηση μεταφοράς ανατροφοδότησης πρέπει να έχει στην περιοχή της ιδιοτιμής λ_r μια προπορεία φάσεως, αν το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου της συνάρτησης μεταφοράς ανοικτού βρόχου $\arg(R_r)$ είναι θετικό, ή μια υστέρηση φάσεως αν το $\arg(R_r)$ είναι αρνητικό, σύμφωνα με την παραπάνω σχέση.



Σχήμα 2.1 Το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου και το όρισμα της συνάρτησης μεταφοράς ανατροφοδότησης

Η ιδιότητα των ολοκληρωτικών υπολοίπων να είναι οι ευαισθησίες των ιδιοτιμών ως προς το κέρδος μιας διάταξης ανατροφοδότησης βρίσκει εφαρμογή στη σχεδίαση διατάξεων αντιστάθμισης φάσεως στο πεδίο της συχνότητας.

Ειδικότερα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γωνίας φάσεως που πρέπει να εισαγάγει στο ανοικτό σύστημα η συνάρτηση μεταφοράς ανατροφοδότησης στη συχνότητα ενός συγκεκριμένου ρυθμού για να αυξήσει την απόσβεσή του. Τυπικές τέτοιες διατάξεις είναι οι σταθεροποιητές για την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.

Πρέπει να επισημανθεί ότι η χρήση των ολοκληρωτικών υπολοίπων στη σχεδίαση διατάξεων αντιστάθμισης πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή καθώς η ισχύς της προσέγγισης της ευαισθησίας της ιδιοτιμής ως προς το κέρδος της ανατροφοδότησης είναι έγκυρη μόνο για χαμηλές τιμές κέρδους και προϋποθέτει ότι οι ιδιοτιμές του ανοικτού συστήματος είναι διακριτές. [5,6]

Κεφάλαιο 3

Παράσταση Συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τα διάφορα προγράμματα λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία καθώς και το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που μελετάται στην παρούσα εργασία. Επίσης, θα αναλύσουμε τα μοντέλα με τα οποία παριστάνονται οι διάφορες διατάξεις ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Εκτός της παράστασης της σύγχρονης μηχανής, θα δείξουμε και τα μοντέλα διαφόρων διατάξεων ελέγχου, όπως ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης, ο ρυθμιστής στροφών και ο σταθεροποιητής συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

3.1 Χρησιμοποιούμενο Λογισμικό

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των προγραμματιστικών πακέτων που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικές εκδόσεις, v29 και v30 του λογισμικού PSS/E και το λογισμικό PacDyn, καθώς και πακέτα σε περιβάλλον MATLAB.

3.1.1 Το λογισμικό PSS/E

Το λογισμικό αυτό είναι κατάλληλο για μελέτες συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, δικτύων μεταφοράς και παραγωγής ενέργειας. Έχει δυο περιβάλλοντα εργασίας, ένα για την δυναμική προσομοίωση του συστήματος και ένα για τη ανάλυση μόνιμου καταστάσεως. Τα δεδομένα δίνονται από δύο ξεχωριστά αρχεία. Το πρώτο αρχείο εισόδου εισάγεται στο υποπρόγραμμα επίλυσης ροής φορτίου και περιέχει τα δεδομένα του δικτύου (τάσεις ζυγών, παραγωγές γεννητριών, φορτία, γραμμές

μεταφοράς, μετασχηματιστές κλπ). Το δεύτερο αρχείο, περιέχει τα δυναμικά στοιχεία των γεννητριών που είναι αναγκαία για την αρχικοποίηση των μεταβλητών κατάστασης των μηχανών.

Το πρόβλημα της ροής φορτίου επιλύεται με την πλήρη μέθοδο Newton–Raphson με την βοήθεια του υποπρογράμματος PowerFlow. Η ανάλυση των ρυθμών του συστήματος γίνεται με το βοηθητικό εργαλείο Isysan που υπάρχει στο πακέτο του PSS/E, το οποίο υπολογίζει τις ιδιοτιμές του συστήματος. Να σημειώσουμε εδώ ότι για την εξαγωγή των ιδιοτιμών του συστήματος απαιτείται διαφορετικό αρχείο εισόδου καθώς δεν λαμβάνουμε υπόψη μας τους διάφορους περιοριστές. Για την χρονική απόκριση του συστήματος μετά την προσομοίωση κάποιων διαταραχών σε σημεία του δικτύου χρησιμοποιήσαμε το υποπρόγραμμα Plot στο οποίο εξάγονται τα αποτελέσματα είτε σε γραφικές παραστάσεις είτε σε αρχεία για περαιτέρω επεξεργασία. [19]

3.1.2 Το λογισμικό PacDyn

Το PacDyn CEPEL είναι ένα πακέτο προγραμμάτων για την ανάλυση και τον έλεγχο ευστάθειας μικρών διαταραχών σε μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Το PacDyn εμπεριέχει πλήθος αλγορίθμων για τον υπολογισμό ιδιοτιμών, πόλων και μηδενικών της συνάρτησης μεταφοράς, ολοκληρωτικών υπολοίπων και συντελεστών συμμετοχής. Σημαντικό πλεονέκτημα του προγράμματος αυτού είναι η ευελιξία ανάγνωσης διαφόρων τύπων αρχείων δεδομένων σαν αρχεία εισόδου, επιτρέποντας έτσι, τον συνδυασμό με άλλα προγράμματα ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Το λογισμικό αυτό εμπεριέχει βιβλιοθήκες με τα διάφορα μοντέλα των διατάξεων ενός δικτύου. Επιπρόσθετα όμως δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να υλοποιήσει μόνος του ένα μοντέλο που δεν εμπεριέχεται στην βιβλιοθήκη χρησιμοποιώντας για την υλοποίηση του απλά στοιχεία και βαθμίδες που εμπεριέχονται στη βιβλιοθήκη.

Το Pacdyn, χρειάζεται κι αυτό δυο αρχεία εισόδου. Ένα αρχείο επίλυσης ροής φορτίου τύπου .raw το οποίο εξάγουμε από το PSS/E σε μορφή v26, για λόγους συμβατότητας και ένα αρχείο με τα δυναμικά στοιχεία του συστήματος το οποίο είναι μορφής .dyn και διαβάζει το αντίστοιχο δυναμικό αρχείο του PSS/E τύπου .dyr. Το PacDyn έχει δυνατότητα ανάλυσης ρυθμών, υπολογισμού πόλων και μηδενικών, συντελεστών συμμετοχής και ολοκληρωτικών υπολοίπων. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα αλλαγής κάποιων παραμέτρων του δικτύου και υπολογισμού γεωμετρικού τόπου των ριζών του συστήματος. Όλα τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε αρχεία τα οποία παρέχονται στο χρήστη για περαιτέρω μελέτη και επεξεργασία μέσω του προγράμματος plotCEPEL του PacDyn.[20]

3.1.3 Το λογισμικό Matlab

Τέλος, χρησιμοποιήσαμε το Matlab και το περιβάλλον του Simulink για την παράσταση συστήματος μιας γεννήτριας συνδεδεμένης σε άπειρο ζυγό. Στην προσομοίωση σε Matlab, η παράσταση του συστήματος έγινε με τα μοντέλα των απαιτούμενων διατάξεων από τη βιβλιοθήκη του πακέτου WHSSP που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο ΣΗΕ. [8]

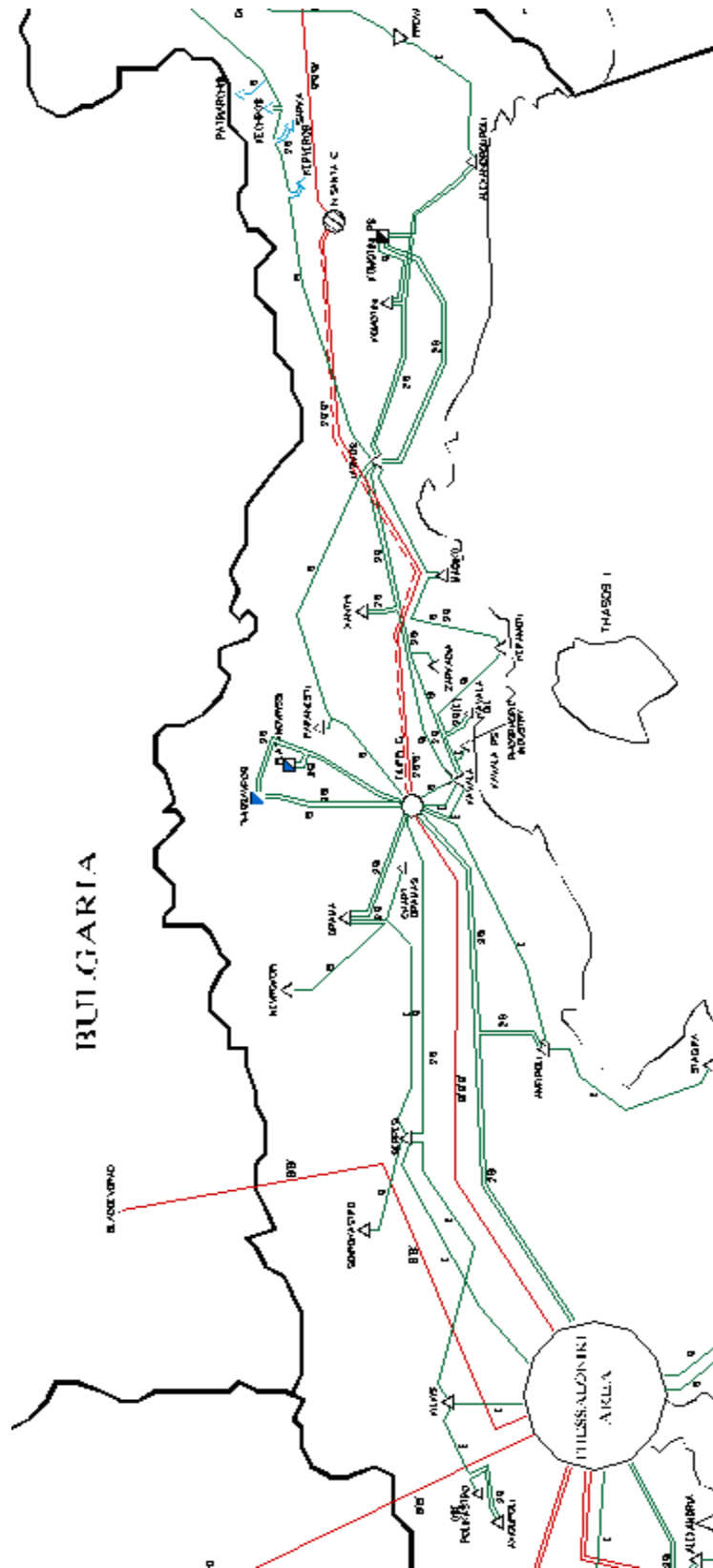
3.2 Περιγραφή του Συστήματος

Το σύστημα που θα εξετάσουμε περιλαμβάνει λεπτομερές μοντέλο του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος και της Βαλκανικής. Έχει συνολικά 1500 ζυγούς και 276 μηχανές από τις οποίες 201 βρίσκονται εν λειτουργία. Το σύστημα αυτό, αντιστοιχεί στη δομή του Βαλκανικού συστήματος μαζί με την Τουρκική νησίδα της Ανατολικής Θράκης, που συνδέεται ακτινικά με το Ελληνικό Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα φορτία του συστήματος θεωρούνται σταθερές αγωγιμότητες. Οι γεννήτριες είναι εφοδιασμένες με αυτόματους ρυθμιστές τάσεως και ρυθμιστές στροφών οι οποίοι παριστάνονται με λεπτομερή μοντέλα από τη βιβλιοθήκη του λογισμικού που χρησιμοποιούμε κάθε φορά.

Στο Ελληνικό Σύστημα δεν υπάρχουν ενεργοποιημένοι σταθεροποιητές. Σε όλο το Βαλκανικό σύστημα υπάρχουν συνολικά 21 σταθεροποιητές, όλοι εγκατεστημένοι σε μονάδες του εξωτερικού. Τέλος, θεωρείται ότι το σύστημα είναι συνδεδεμένο σε έναν άπειρο ζυγό, ο οποίος παριστάνει την υπόλοιπη διασύνδεση UCTE. Έτσι, θεωρούμε ότι το σύστημα λειτουργεί στην ονομαστική συχνότητα.

Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται το βόρειο τμήμα του δικτύου του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και οι διασυνδέσεις του με τις γειτονικές χώρες.

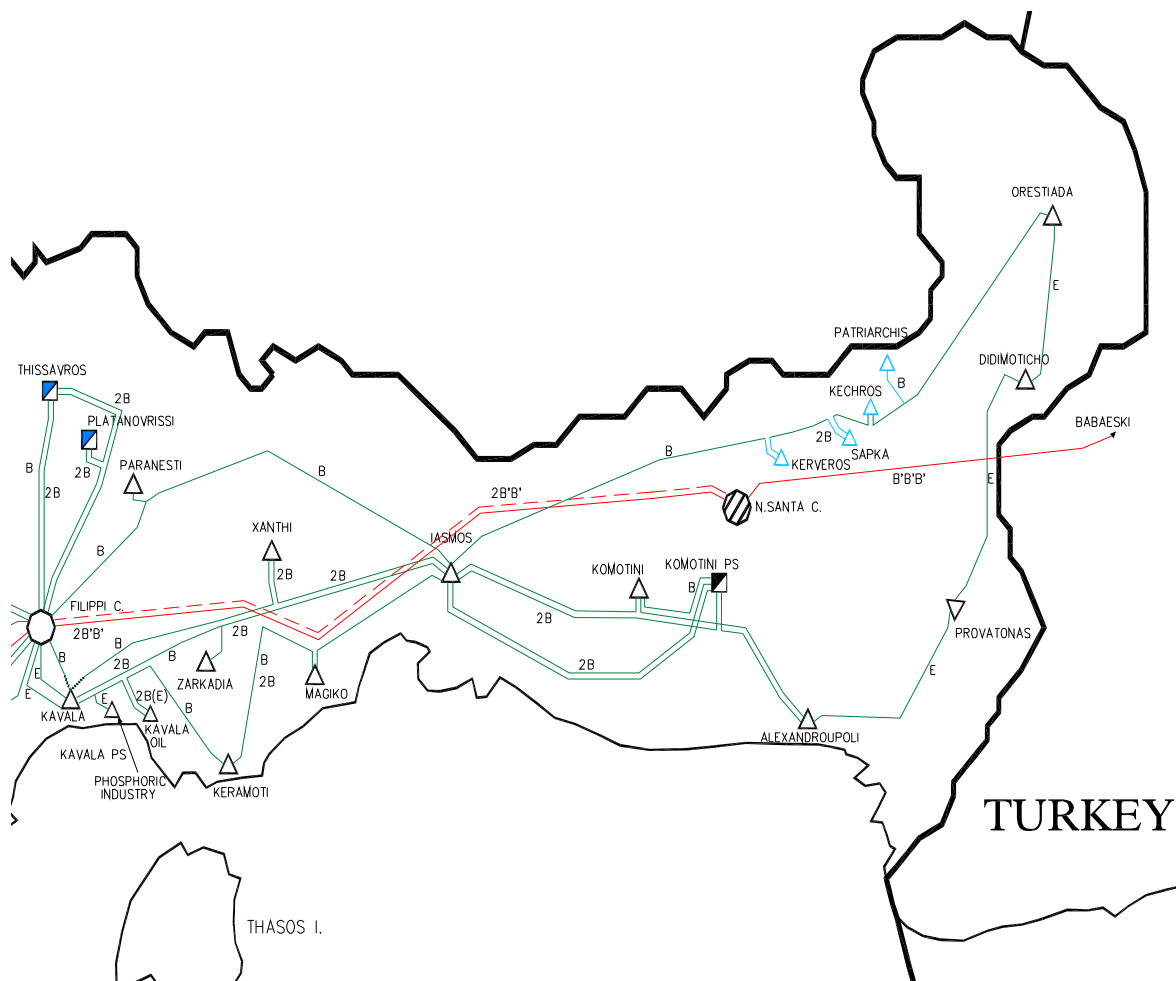


Σχήμα 3.1 Το τμήμα του ελληνικού συστήματος ενέργειας κοντά στα σύνορα της χώρας με την Τουρκία, τη Βουλγαρία και την Π.Γ.Δ.Μ

Το Ελληνικό Σύστημα είναι διασυνδεδεμένο με τις γειτονικές χώρες των Βαλκανίων. Αυτές οι διασυνδέσεις στο σύστημα αναπαριστώνται με τις διασυνοριακές γραμμές. Συγκεκριμένα, η διασύνδεση της Ελλάδος με την Π.Γ.Δ.Μ. γίνεται με τις γραμμές Dubrono-Θεσσαλονίκη και Φλώρινα-Bitola ενώ με τη Βουλγαρία με τη γραμμή Θεσσαλονίκη-Blagoevgrad. Τέλος, πρόσφατα έχει κατασκευασθεί η διασύνδεση της Ελλάδος με την Τουρκία.

Οι τερματικοί υποσταθμοί της διασύνδεσης αυτής με την Τουρκία, είναι η Νέα Σάντα για την Ελλάδα και το Babaeski για την Τουρκία. Το συνολικό μήκος της διασυνδετικής γραμμής είναι 127 χιλιόμετρα ενώ το μήκος της γραμμής 400kV Νέα Σάντα-Φίλιπποι είναι 138 χιλιόμετρα.

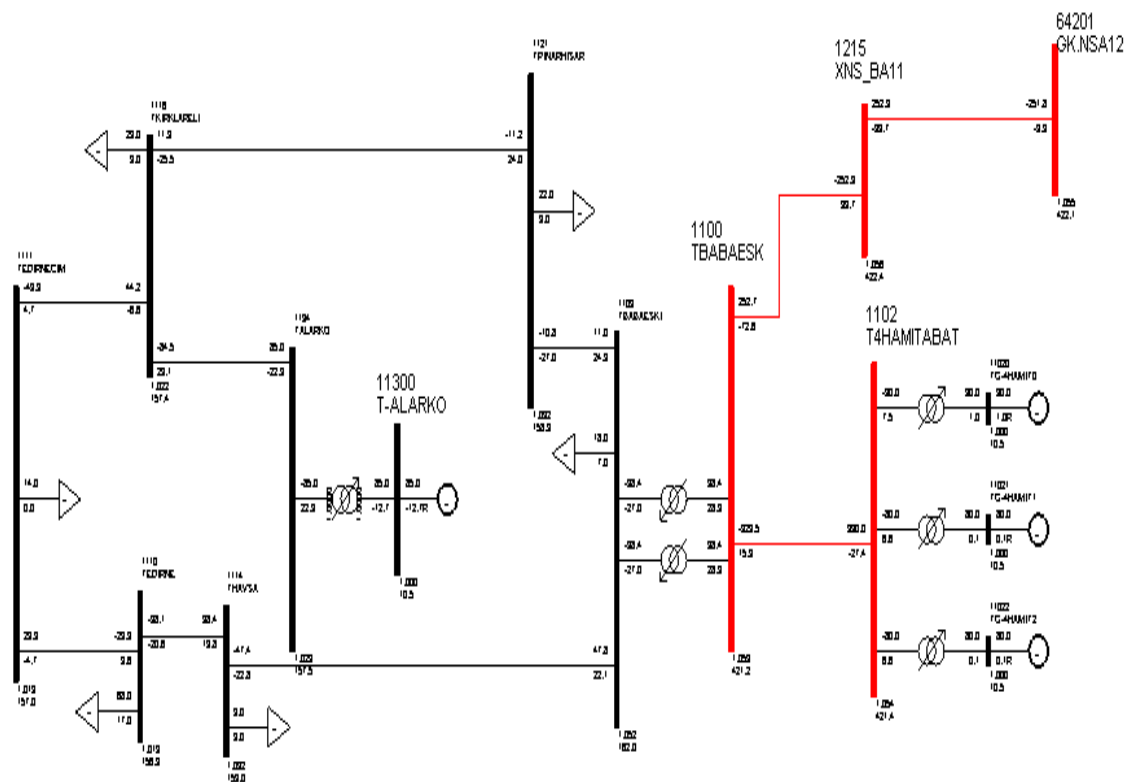
Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η γραμμή διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας των 400kV από το σταθμό των Φιλιππων έως το σταθμό Babaeski στην Τουρκία.[10]



Σχήμα 3.2 Η γραμμή διασύνδεσης των 400 kV Ελλάδος – Τουρκίας

Το Ελληνικό Σύστημα διασυνδέεται με την γειτονική Τουρκία για την δυνατότητα ανταλλαγής ισχύος σε έκτακτες καταστάσεις. Στην παρούσα εργασία, θα εξετάσουμε την περίπτωση μεταφοράς ισχύος μεγέθους 250MW από την Τουρκία στην Ελλάδα σε συνθήκες μεγίστου φορτίου, ισχύς η οποία θα παράγεται από 4 τουρκικές μονάδες, 3 αεριοστρόβιλους εφοδιασμένους με ρυθμιστές τάσης και ρυθμιστές στροφών και μια μονάδα παραγωγής συνδυασμένου κύκλου η οποία έχει μόνο αυτόματο ρυθμιστή τάσης.

Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται αναλυτικά η τουρκική νησίδα της Ανατολικής Θράκης η οποία συνδέεται με το Ελληνικό Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της διασυνδετικής γραμμής Νέα Σάντα – Babaeski (πάνω δεξιά του σχήματος). Στο σχήμα φαίνονται επίσης οι 4 μονάδες που παράγουν την ισχύ που θα εξάγεται στην Ελλάδα.



Σχήμα 3.3 Το τμήμα του τουρκικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέεται ακτινικά με το Ελληνικό Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

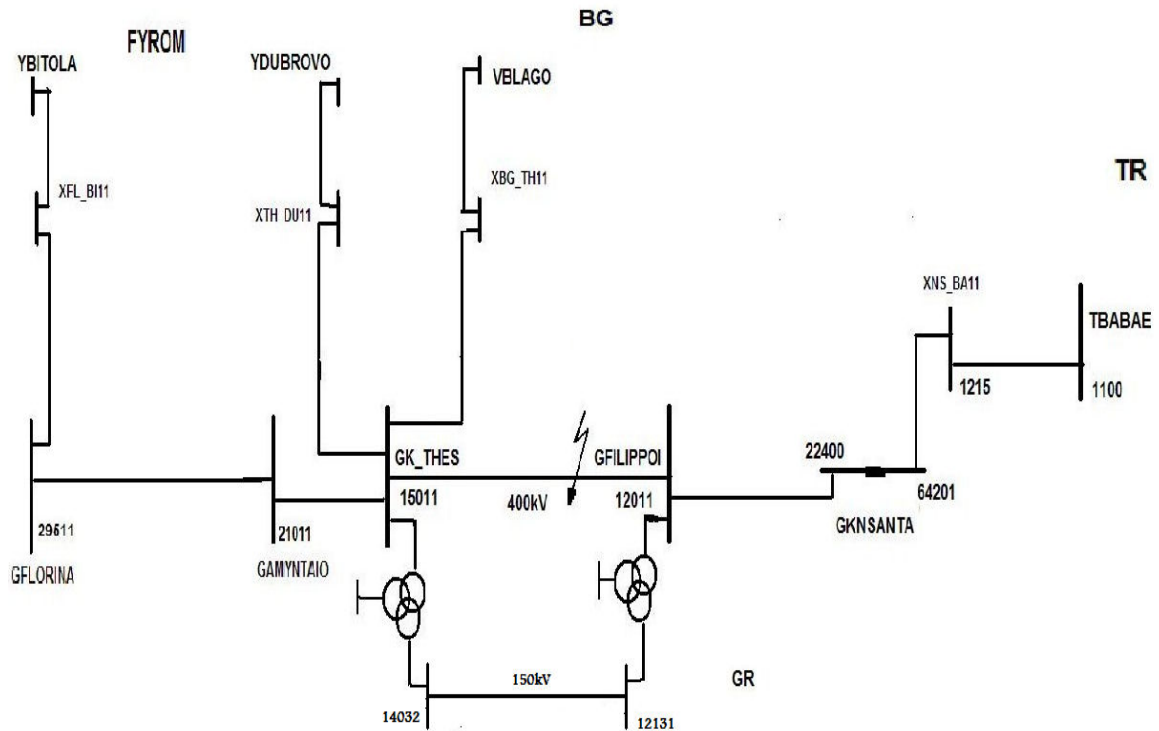
Σε επόμενο κεφάλαιο θα πραγματοποιήσουμε δυναμική προσομοίωση του παραπάνω συστήματος με σκοπό την σχεδίαση σταθεροποιητών για την απόσβεση των ασθενώς αποσβενύμενων ρυθμών. Κατόπιν, θα μελετήσουμε τη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος αφού επιβάλλουμε κάποια διαταραχή στο ελληνικό δίκτυο.

Η διαταραχή που εξετάζεται είναι ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 400kV Φιλίπων-Θεσσαλονίκης. Το σημείο της γραμμής στο οποίο γίνεται το βραχυκύκλωμα είναι η αναχώρηση από το ζυγό 400kV των Φιλίπων. Η διάρκεια του τριφασικού σφάλματος κατά την προσομοίωση είναι 120 msec.

Διακρίνουμε δυο περιπτώσεις για την κατάσταση του δικτύου μετά το βραχυκύκλωμα και την εκκαθάρισή του:

- Η γραμμή Φιλίπων-Θεσσαλονίκης επανασυνδέεται στο δίκτυο μετά τη εκκαθάριση του σφάλματος (μεταβατικό σφάλμα).
- Η γραμμή Φιλίπων-Θεσσαλονίκης παραμένει εκτός λειτουργίας μετά την εκκαθάριση. Στην περίπτωση αυτή, όπου η γραμμή των 400 kV που ενώνει το σταθμό της Θεσσαλονίκης με τους Φιλίπους είναι ανοιχτή, έχουμε διασύνδεση της Θράκης με το υπόλοιπο Ελληνικό Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του δικτύου των 150 kV. Έτσι, η σύνδεση με την Τουρκία είναι ασθενέστερη.

Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται κομμάτι του βόρειου ελληνικού δικτύου και η διασύνδεσή του με την τουρκική νησίδα. Επίσης, δείχνεται το σφάλμα για το οποίο θα εξεταστεί η ευστάθεια του συστήματος.

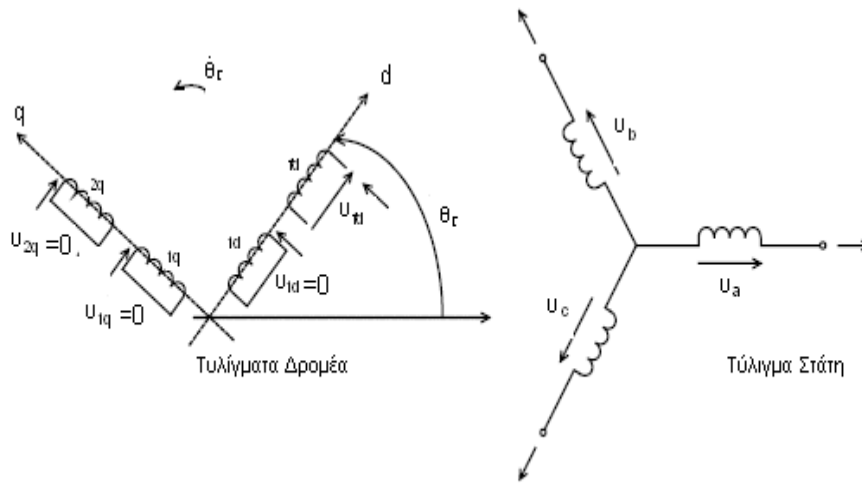


Σχήμα 3.4 Το τμήμα του ελληνικού συστήματος ενέργειας που συνδέεται ακτινικά με τη τουρκική νησίδα της Ανατολικής Θράκης

Συνεπώς, θα εξετάσουμε δυο διαφορετικές καταστάσεις του ίδιου συστήματος. Ορίζουμε σαν σενάριο A, την περίπτωση ισχυρής διασύνδεσης στην οποία η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων παραμένει σε λειτουργία μετά την εκκαθάριση ενός σφάλματος και σενάριο B αντίστοιχα, την περίπτωση ασθενούς διασύνδεσης στην οποία μετά το τέλος της διαταραχής, η γραμμή Θεσσαλονίκης -Φιλίππων τίθεται εκτός λειτουργίας.

3.3 Η Σύγχρονη Μηχανή

Αρχικά θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις που περιγράφουν γενικά μια σύγχρονη γεννήτρια και στην συνέχεια θα παρουσιαστεί το μοντέλο έκτης, τέταρτης και τρίτης τάξεως αντίστοιχα που χρησιμοποιήσαμε για την μελέτη του συστήματος. Ως γνωστόν μια σύγχρονη ηλεκτρική μηχανή αποτελείται από δύο μέρη, ένα σταθερό μέρος που ονομάζεται στάτης και ένα στρεφόμενο που λέγεται δρομέας. Τα δύο αυτά μέρη χωρίζονται από ένα μικρό διάκενο αέρα.



Σχήμα 3.5 Παράσταση τυλιγμάτων σύγχρονης μηχανής

Η κίνηση του δρομέα χαρακτηρίζεται από την ηλεκτρική γωνία θ_r , η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στον ευθύ άξονα (d) και τον άξονα της φάσης a του στάτη, ενώ το πεδίο του δρομέα περιστρέφεται με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_r . Η σχέση που συνδέει τα παραπάνω μεγέθη είναι:

$$\theta_r = \omega_r t + \theta_r(0) \quad (3.1)$$

όπου $\theta_r(0)$ η αρχική τιμή της γωνίας σε (rad).

Η θέση του πεδίου του δρομέα καθορίζεται από την ηλεκτρική γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του δρομέα και ενός άξονα ο οποίος στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα ω_s . Συμβολίζουμε τη γωνία αυτή με το δ (rad). Για τη γωνία αυτή ισχύει ότι :

$$\delta = \theta_r - \omega_s t + \delta_0 \quad (3.2)$$

όπου δ_0 η αρχική τιμή της γωνίας ως προς το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς.

Παραγωγίζοντας την παραπάνω σχέση, με δεδομένο ότι ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας θ_r είναι ίσος με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_r , προκύπτει ότι :

$$\dot{\delta} = \dot{\theta}_r - \omega_s = \omega_r - \omega_s \quad (3.3)$$

Η σχέση αυτή μας δείχνει ότι ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας δ ισούται με τη διαφορά της γωνιακής ταχύτητας του άξονα αναφοράς ω_s από την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω_r .

Η δυναμική εξίσωση η οποία εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας του δρομέα συναρτήσει της μεταβολής της ροπής είναι :

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e - D \left(\frac{\omega_r}{\omega_0} - 1 \right) \quad (3.4)$$

όπου :

H : η ανηγμένη χρονική σταθερά αδράνειας της γεννήτρια (sec)

T_m , T_e : η ανά μονάδα μηχανική και ηλεκτρομαγνητική ροπή αντίστοιχα

D : ο ανά μονάδα συντελεστής απόσβεσης.

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν τις εξισώσεις ταλάντωσης της σύγχρονης μηχανής.

3.3.1 Το μοντέλο μιας σύγχρονης γεννήτριας τέταρτης τάξεως

Στο μοντέλο τέταρτης τάξεως το ηλεκτρικό κύκλωμα του δρομέα παριστάνεται από δύο μόνο τυλίγματα, το τυλίγμα του πεδίου διεγέρσεως και ένα τυλίγμα αποσβέσεως στον εγκάρσιο άξονα q . Τα δύο αυτά τυλίγματα θεωρείται ότι δεν είναι μαγνητικά συζευγμένα μεταξύ τους. Στον Πίνακα 3.1 δίνονται συνοπτικά κάποια από τα χαρακτηριστικά μεγέθη της σύγχρονης μηχανής.

Πίνακας 3.1: Ορισμοί και χαρακτηριστικά μεγέθη της σύγχρονης μηχανής

$E'_q = \frac{X_{md}}{X_{fd}} \psi_{fd}$	μεταβατική ΗΕΔ κατά τον εγκάρσιο άξονα q
$E'_d = -\frac{X_{mq}}{X_{lq}} \psi_{lq}$	μεταβατική ΗΕΔ κατά τον ευθύ άξονα d
$X'_d = X_d - \frac{X_{md}^2}{X_{fd}}$	μεταβατική αντίδραση κατά τον ευθύ άξονα d
$X'_q = X_q - \frac{X_{mq}^2}{X_{lq}}$	μεταβατική αντίδραση κατά τον εγκάρσιο άξονα q
$E_f = \frac{X_{md}}{r_{fd}} \psi_{fd}$	ΗΕΔ διεγέρσεως
$T'_{d0} = \frac{X_{fd}}{\omega_0 r_{fd}}$	μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος ευθέος άξονα
$T'_{q0} = \frac{X_{lq}}{\omega_0 r_{lq}}$	μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτού κυκλώματος εγκάρσιου άξονα

Βάσει των παραπάνω ορισμών οι διαφορικές εξισώσεις για τα δύο τυλίγματα του δρομέα, διεγέρσεως και αποσβέσεως, γίνονται αντίστοιχα :

$$T'_{d0}\dot{E}'_q = E_f - E'_q - (X_d - X'_d)i_d \quad (3.5)$$

$$T'_{q0}\dot{E}'_d = -E'_d + (X_q - X'_q)i_q \quad (3.6)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή δίνεται από τη σχέση :

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (3.7)$$

Η οποία ισοδύναμα γίνεται :

$$T_e = E'_d i_d + E'_q i_q + (X'_q - X'_d) i_d i_q \quad (3.8)$$

Αντικαθιστώντας αυτήν την έκφραση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής στη σχέση (3.4) η εξίσωση η οποία εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητα του δρομέα συναρτήσει της μεταβολής της ροπής γίνεται :

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - E'_d i_d - E'_q i_q - (X'_q - X'_d) i_d i_q - D \left(\frac{\omega_r}{\omega_0} - 1 \right) \quad (3.9)$$

Τέλος, η ενεργός και η άεργος ισχύς εξόδου της γεννήτρια δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις :

$$P_G = v_d i_d + v_q i_q \quad (3.10)$$

$$Q_G = v_q i_d - v_d i_q \quad (3.11)$$

[7,8]

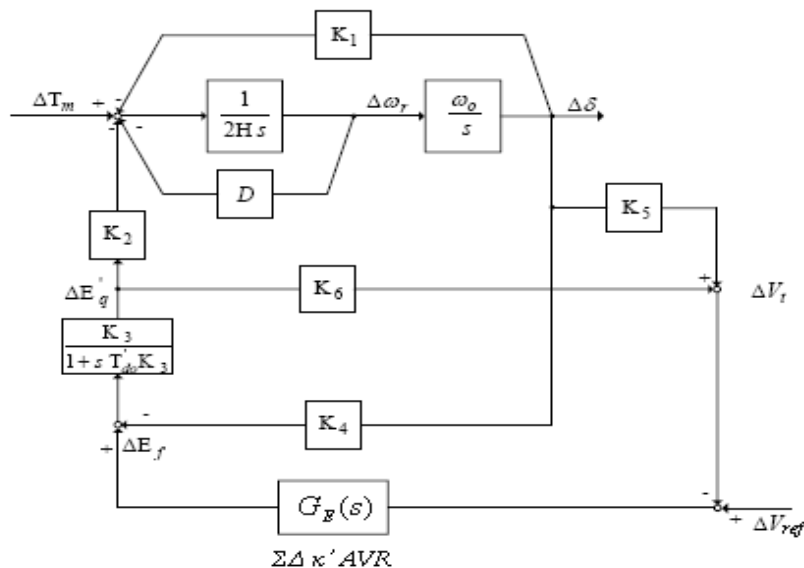
3.3.2 Το γραμματικοποιημένο μοντέλο τρίτης τάξεως μιας σύγχρονης γεννήτριας

Υπενθυμίζεται εδώ, ότι στην ανάλυση που ακολουθεί όλα τα μη γραμμικά φαινόμενα, όπως ο μαγνητικός κορεσμός ή το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης, αμελούνται. Το ηλεκτρικό κύκλωμα του δρομέα αποτελείται από το τύλιγμα του πεδίου διεγέρσεως το οποίο είναι τοποθετημένο κατά μήκος του ευθέως άξονα. Στο μοντέλο αυτό δεν υπάρχει κανένα τύλιγμα αποσβέσεως.

Γίνεται επίσης η παραδοχή ότι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα δεν απομακρύνεται αισθητά από τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Έτσι οι τάσεις είναι αριθμητικά ίσες με τις αντίστοιχες πεπλεγμένες μαγνητικές ροές που τις προκαλούν, όπως και οι ροπές με τις αντίστοιχες ισχύς. Εφαρμόζοντας μια παρόμοια διαδικασία όπως αυτή αναπτύχθηκε για το μοντέλο τέταρτης τάξεως, προκύπτουν οι εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τη δυναμική κατάσταση μιας μηχανής τρίτης τάξεως.

Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να γραμμικοποιηθούν γύρω από ένα σημείο λειτουργίας και στη συνέχεια να παρασταθούν από ένα διάγραμμα βαθμίδων. Το πρώτο γραμμικοποιημένο μοντέλο μιας σύγχρονης μηχανής τρίτης τάξεως αναπτύχθηκε το 1952 από τους Heffron και Phillips για αυτό και συνηθίζεται να αναφέρεται με τα ονόματά τους. Οι μεταβλητές κατάστασης που προκύπτουν μετά τη διαδικασία γραμμικοποίησης είναι η μεταβολή $\Delta\delta$ της γωνίας του δρομέα (σε rad), η μεταβολή $\Delta\omega_r$ της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα (α.μ.) και η μεταβολή της μεταβατικής τάσεως $\Delta E'_q$ που αντιστοιχεί στην πεπλεγμένη ροή του πεδίου διεγέρσεως (α.μ.).

Το διάγραμμα βαθμίδων του μοντέλου των Heffron-Phillips δίνεται στο Σχήμα 3.6:

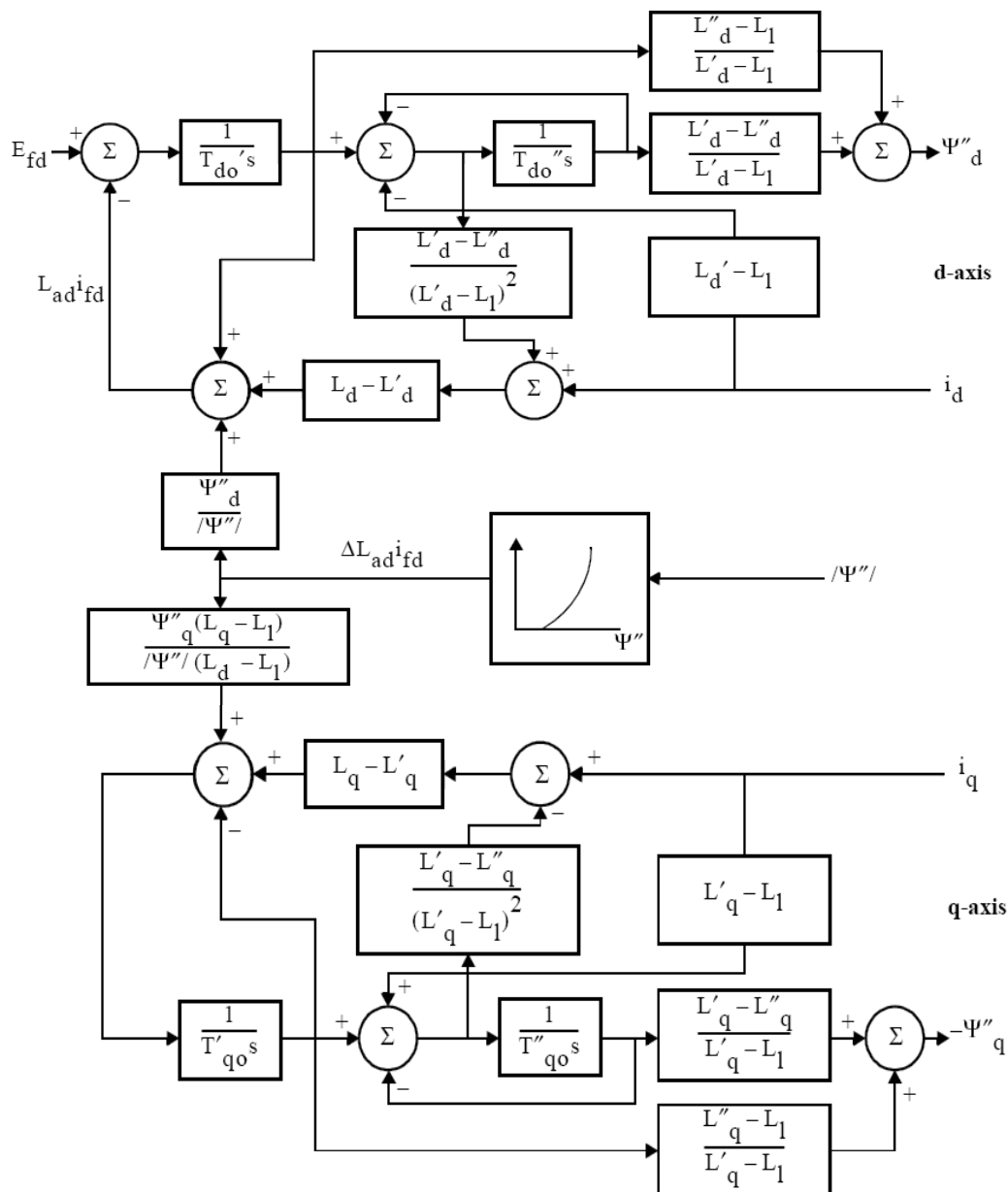


Σχήμα 3.6 Διάγραμμα βαθμίδων του μοντέλου 3ης τάξης των Heffron-Phillips

Η σταθερά γραμμικοποίησης K_1 είναι ο συντελεστής συγχρονισμού. Η σταθερά K_2 δίνει τη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος που θα προκύψει από μια μεταβολή της πεπλεγμένης ροής του πεδίου. Η σταθερά K_4 είναι ο συντελεστής απομαγνητίσεως του πεδίου διεγέρσεως, όταν αυξάνει η φόρτιση της μηχανής. Η σταθερά K_5 εκφράζει τη συμβολή της γωνίας στη διαμόρφωση του μέτρου της τάσης ακροδεκτών. Η σταθερά K_6 εκφράζει τη συμβολή της πεπλεγμένης ροής του πεδίου στη διαμόρφωση του μέτρου της τάσης ακροδεκτών.[4]

3.3.3 Το μοντέλο έκτης τάξεως μιας σύγχρονης γεννήτριας

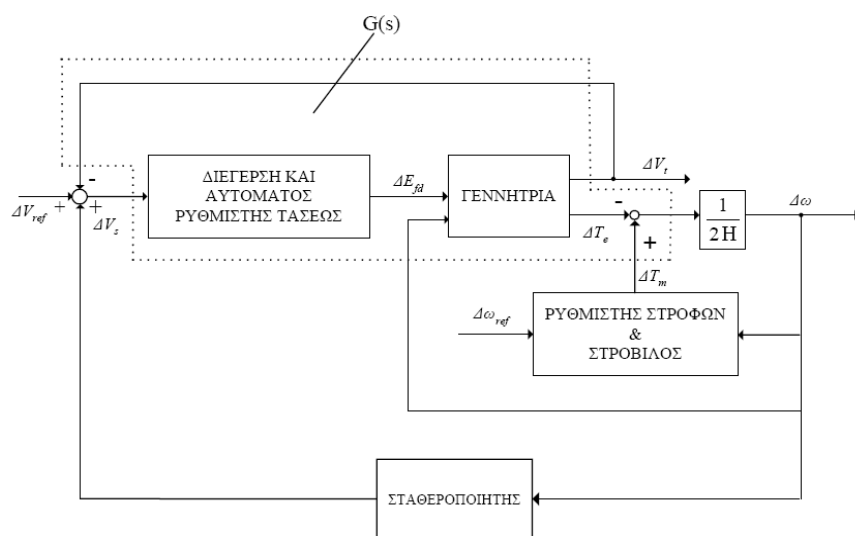
Στην προσομοίωση του PSS/E της Siemens χρησιμοποιήσαμε μοντέλα 6^{ης} τάξης για την παράσταση των σύγχρονων μηχανών. Το μοντέλο που περιέχεται στη βιβλιοθήκη του PSS/E και αντιστοιχεί σε μια μηχανή κυλινδρικού δρομέα ονομάζεται GENROU (αντίστοιχα GENSAL για τη μηχανή έκτυπων πόλων). Στην συνέχεια παρουσιάζεται ενδεικτικά το διάγραμμα βαθμίδων που αντιστοιχεί στο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής κυλινδρικού δρομέα (Σχήμα 3.7). [19]



Σχήμα 3.7 Αναπαράσταση γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα με μοντέλο 6^{ης} τάξης PSS/E

3.4 Μοντέλα Διατάξεων Ελέγχου

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τις συνηθέστερες διατάξεις ελέγχου. Σημειώνεται εδώ ότι το σύστημα που θα μελετήσουμε στην παρούσα εργασία, εξαιτίας του μεγέθους του, αποτελείται από πολλούς διαφορετικούς τύπους ρυθμιστών, όμως χάριν απλούστευσης, θα παρουσιάσουμε ενδεικτικά τα συνηθέστερα μοντέλα αυτών. Οι κύριες διατάξεις ελέγχου, οι οποίες προσαρτώνται σε μια γεννήτρια είναι ο ρυθμιστής στροφών, ο αυτόματος ρυθμιστής τάσεως και ο σταθεροποιητής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8.

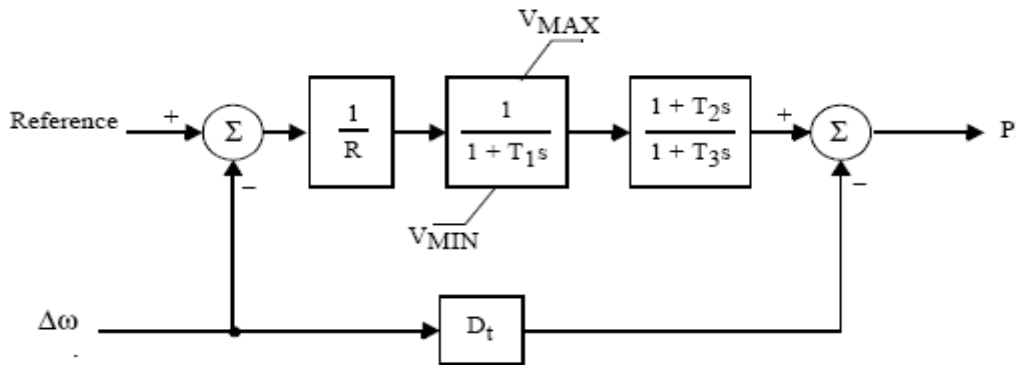


Σχήμα 3.8 Διατάξεις ελέγχου γεννήτριας

3.4.1 Ρυθμιστής Στροφών

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας το ζητούμενο είναι η εξισορρόπηση της παραγόμενης ισχύος με το φορτίο καθώς και η διατήρηση της επιθυμητής συχνότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των ρυθμιστών στροφών των γεννητριών οι οποίοι ελέγχουν την μηχανική ισχύ που παράγεται από τις κινητήριες μηχανές (στροβίλους). Οι ρυθμιστές στροφών μπορούν να θεωρηθούν σαν μηχανισμοί ελέγχου είτε της συχνότητας είτε της ισχύος. Στην περίπτωση που μια γεννήτρια τροφοδοτεί ένα απομονωμένο φορτίο ο ρυθμιστής στροφών ελέγχει τη συχνότητα ενώ στην περίπτωση που η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ένα μεγάλο σύστημα ο ρυθμιστής στροφών ελέγχει την παραγόμενη ισχύ.

Στο Σχήμα 3.9 δίνεται αναλυτικά το διάγραμμα βαθμίδων ενός απλού ρυθμιστή στροφών που εφαρμόζεται σε έναν ατμοστρόβιλο (μοντέλο TGOV1).[19]



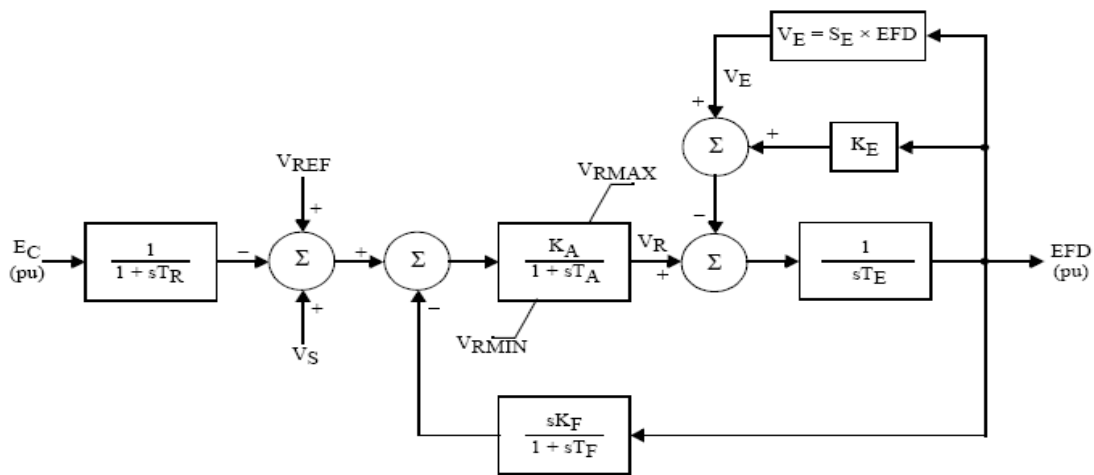
Σχήμα 3.9 Διάγραμμα βαθμίδων του ρυθμιστή στροφών TGOV1 που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη του συστήματος με το PSS/E

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

- Κατά την πρωτεύουσα ρύθμιση μια μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας γίνεται αντιληπτή από το ρυθμιστή και μετατρέπεται σε κατάλληλο σήμα προς το στρόβιλο έτσι ώστε να προσαρμοστεί ανάλογα η μηχανική ισχύς που παράγεται από αυτόν. Η πρωτεύουσα ρύθμιση αφήνει πάντα ένα σφάλμα συχνότητας.
- Κατά τη δευτερεύουσα ρύθμιση ενεργοποιείται ο μηχανισμός αλλαγής στροφών του ρυθμιστή. Καταρχάς μετριέται το σφάλμα συχνότητας το οποίο έχει απομείνει μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση καθώς επίσης και πιθανές διαφορές στην διακινούμενη ισχύ. Οι μετρήσεις αυτές μετατρέπονται σε κατάλληλα σήματα έτσι ώστε να υπάρξει μια νέα ταχύτητα αναφοράς της γεννήτριας.

3.4.2 Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσεως

Σκοπός της κύριας μονάδας του ρυθμιστή τάσεως είναι να ενισχύσει και να διαμορφώσει κατάλληλα το σφάλμα πριν το εισαγάγει στο σύστημα διεγέρσεως της μηχανής. Η διεγέρτρια είναι μια βοηθητική διάταξη η οποία αποδίδει συνεχή τάση στο τύλιγμα του πεδίου της μηχανής. Διακρίνονται δύο τύποι διεγερτριών: οι στρεφόμενες διεγέρτριες και οι διεγέρτριες στατικού τύπου. Στον Α.Ρ.Τ. του Σχ.3.10, φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων ενός ευρέως χρησιμοποιούμενου ρυθμιστή τάσεως (IETT1). Στο μοντέλο αυτό έχουμε στρεφόμενο σύστημα διέγερσης όπου η απαιτούμενη ισχύς παράγεται από βοηθητικές γεννήτριες συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος.



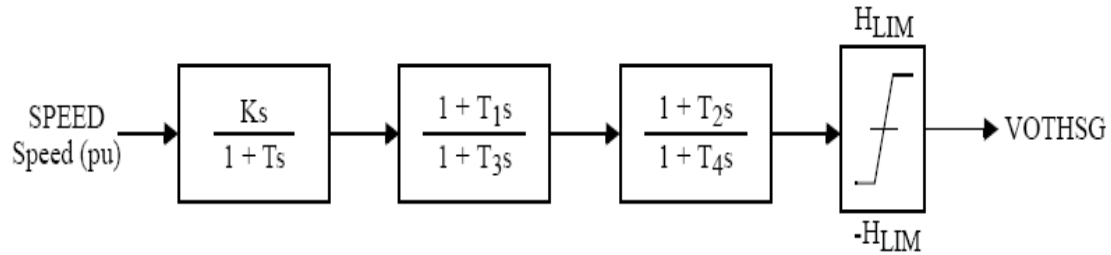
Σχήμα 3.10 Διάγραμμα βαθμίδων του αυτόματου ρυθμιστή τάσεως IEEE1 που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη του συστήματος με το PSS/E.

Ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσεως (APT) είναι μια διάταξη ελέγχου η οποία έχει στόχο να κρατάει σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) την τερματική τάση της γεννήτριας. Αυτό το επιτυγχάνει μεταβάλλοντας κατάλληλα την τάση του πεδίου διεγέρσεως. Η τάση αυτή παρέχεται στο τύλιγμα του πεδίου από το σύστημα διεγέρσεως της σύγχρονης μηχανής. Καταρχάς μετράται το μέτρο της τερματικής τάσης της γεννήτριας, έστω V_t . Η τάση αυτή συγκρίνεται με μια τάση αναφοράς, έστω V_{ref} . Η τελευταία αντιπροσωπεύει το επιθυμητό επίπεδο της τερματικής τάσης ενώ για τον υπολογισμό της λαμβάνεται υπόψη η αρχική κατάσταση λειτουργίας της γεννήτριας (αρχικοποίηση συστήματος).

Στη συνέχεια και αφού υπολογιστεί η ζητούμενη διαφορά $V_{ref} - V_t$ εισάγεται στην κύρια μονάδα του ρυθμιστή η οποία μεταβάλλει ανάλογα την τάση διεγέρσεως της γεννήτριας. Συγκεκριμένα, σε περίπτωση μείωσης της τερματικής τάσης ή αύξησης της τάσης αναφοράς η κύρια μονάδα του ρυθμιστή αυξάνει την τάση διεγέρσεως της γεννήτριας. Σε αντίθετη περίπτωση λειτουργεί αντίστροφα.[4]

3.4.3 Σταθεροποιητές Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι σταθεροποιητές συστήματος ενέργειας (PSS-Power System Stabilizers) είναι διατάξεις, οι οποίες εισάγουν μια προπορεία φάσεως εν σειρά με το σύστημα διέγερσης και η οποία διορθώνει την φασική υστέρηση της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.



Σχήμα 3.11 Διάγραμμα βαθμίδων του σταθεροποιητή που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη του συστήματος με το PSS/E

Η συνάρτηση μεταφοράς του σταθεροποιητή διεγείρεται από ένα σήμα εισόδου που μεταβάλλεται με την ηλεκτρομηχανική ταλάντωση, η ταχύτητα ω για παράδειγμα, και δίνει σαν έξοδο μια τάση V η οποία με τη σειρά της τροφοδοτείται στην είσοδο του αυτόματου ρυθμιστή τάσεως.

Ένας υλοποιήσιμος και πρακτικός σταθεροποιητής συνήθως περιλαμβάνει μια σειρά από βαθμίδες προπορείας φάσεως οι οποίες αντισταθμίζουν τις φασικές αποκλίσεις για κάποιο εύρος συχνοτήτων των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Στην είσοδο του σταθεροποιητή, παρεμβάλλεται ένα υπεραπλοποιημένο φίλτρο ώστε να μηδενίζεται η είσοδος του σταθεροποιητή στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, το φίλτρο αυτό λέγεται βαθμίδα απαλοιφής (washout filter).

Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται ένας τυπικός σταθεροποιητής μίας εισόδου-μίας εξόδου, ο οποίος αποτελείται από δύο βαθμίδες, ένα φίλτρο απαλοιφής, και έναν περιοριστή τάσης. Στη είσοδο του σταθεροποιητή αυτού εφαρμόζεται η μεταβολή της ταχύτητας ω και στην έξοδο λαμβάνεται η τάση που θα εφαρμοστεί στην είσοδο του αυτόματου ρυθμιστή τάσης. [4,17]

Κεφάλαιο 4

Διασυνοριακές Ταλαντώσεις Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος

4.1 Δυναμική Ανάλυση Συστήματος για το Σενάριο Α (Ισχυρή Διασύνδεση)

Στην ενότητα αυτή, θα αναλύσουμε το σύστημα για την περίπτωση όπου η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων είναι ενεργοποιημένη.

Για να μελετηθεί η ευστάθεια μονίμου καταστάσεως του συστήματος, το σύστημα γραμμικοποιείται και στη συνέχεια υπολογίζονται οι ιδιοτιμές του συστήματος. Οι ρυθμοί του συστήματος διατάσσονται σε αύξουσα σειρά απόσβεσης και καθορίζεται ο κρίσιμος ρυθμός του συστήματος. Αν η απόσβεση του ρυθμού αυτού είναι μικρότερη από την επιθυμητή τιμή τότε πραγματοποιείται ανάλυση των ιδιοδιανυσμάτων της ιδιοτιμής του κρίσιμου ρυθμού. Υπολογίζονται οι συντελεστές συμμετοχής των μεταβλητών κατάστασης των γεννητριών και τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα των μηχανών για το ρυθμό αυτό.

4.1.1 Ανάλυση Ρυθμών Ηλεκτρομηχανικής Ταλάντωσης

Οι ιδιοτιμές του συστήματος υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού PSS/E της Siemens/PTI και του Pacdyn/CEPEL. Το σύστημα έχει μιγαδικές και πραγματικές ιδιοτιμές. Σε αυτές τις ιδιοτιμές, θα αναζητήσουμε τις μιγαδικές ιδιοτιμές που εμφανίζουν μικρό αρνητικό πραγματικό μέρος και ισοδύναμα χαμηλό λόγο απόσβεσης στο εύρος εμφάνισης ηλεκτρομηχανικών ρυθμών.

Στον Πίνακα 4.1, δίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δύο εκδόσεις του PSS/E και από το PacDyn για τις ιδιοτιμές που αντιστοιχούν σε ρυθμούς με χαμηλή απόσβεση, μικρότερη του 5% και στους διασυννοριακούς ρυθμούς ταλάντωσης του Ελληνικού και του Ευρωπαϊκού Συστήματος. Το είδος των κρίσιμων ρυθμών του συστήματος αυτού δίνεται συνοπτικά στην τελευταία στήλη του Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Οι ρυθμοί του συστήματος

	PSS/E 30	PSS/E 29	PACDYN	Περιγραφή
1	-0,62592 +j 12,525	-0,62594 +j 12,524	-0,6226 +j 12,518	Τοπικός 1 (Καρδιά)
2	-0,59451 +j 12,212	-0,59473 +j 12,211	-0,5921 +j 12,205	Τοπικός 2 (Αγ.Δημ)
3	-0,39538 +j 9,5409	-0,39557 +j 9,5392	-0,3939 +j 9,5518	Τοπικός 3 (BG)
4	-0,33956 +j 7,2169	-0,33979 +j 7,2162	-0,3381 +j 7,2128	Τοπικός 4 (Καστράκι)
5	-0,24071 +j 5,9546	-0,23059 +j 5,9295	-0,2181 +j 5,9459	Θράκης
6	-0,22756 +j 5,8356	-0,22896 +j 5,8423	-0,2273 +j 5,8355	Νότιος (S-GR)
7	-0,12596 +j 5,1877	-0,11861 +j 5,1702	-0,1171 +j 5,1728	GR – TR
8	-0,46946 +j 3,8828	-0,4780 +j 3,8754	-0,4958 +j 3,8923	Inter-area GR
9	-0,55357 +j 1,4856	-0,53234 +j 1,4938	-0,5439 +j 1,4798	Inter-area UCTE

Στον Πίνακα 4.1 φαίνεται πως το κάθε πακέτο δίνει διαφορετικές τιμές για την κάθε ιδιοτιμή του συστήματος. Παρατηρούμε, ότι στις πρώτες γραμμές του πίνακα, οι ιδιοτιμές που δίνουν οι δύο εκδόσεις του PSS/E αποκλίνουν ελάχιστα, ενώ στις τελευταίες γραμμές το v29 PSS/E είναι πιο κοντά με το PacDyn.

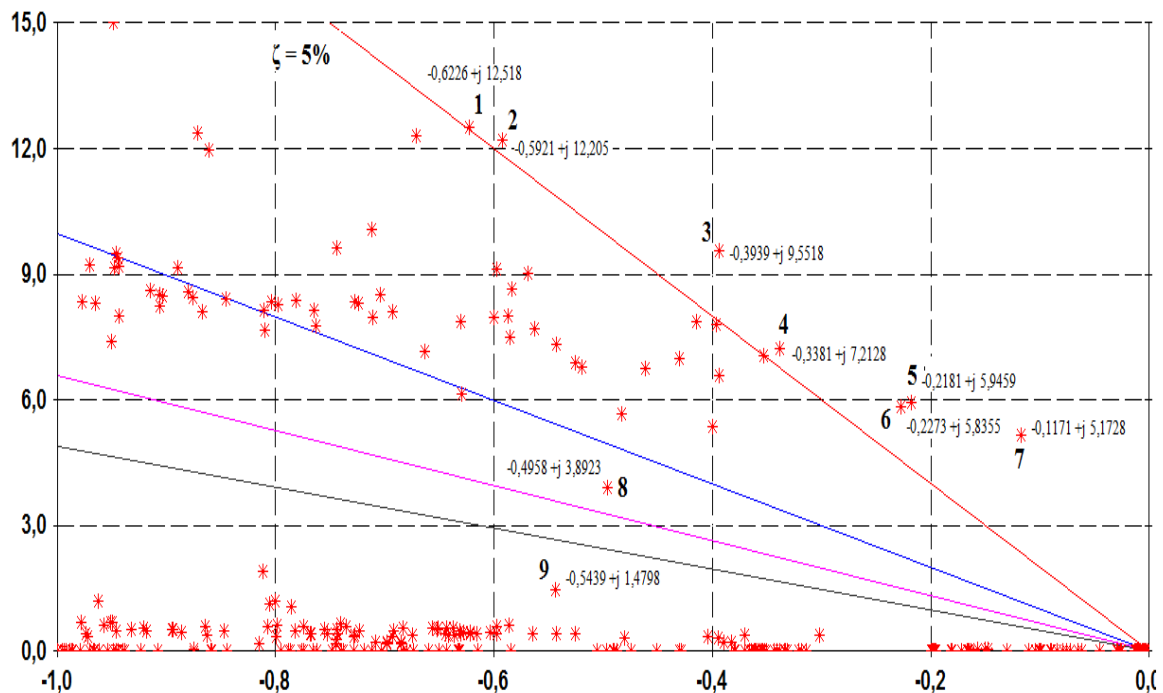
Οι ιδιοτιμές που έχουν υπολογιστεί από το PacDyn παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 στον οποίο δίνεται ο λόγος απόσβεσης και η συχνότητα του κάθε ρυθμού.

Πίνακας 4.2: Οι κυρίαρχοι ρυθμοί του συστήματος (PacDyn)

	λ_i	$\zeta \%$	f (Hz)	Περιγραφή
1	-0,6226 +j 12,518	4,9675	1,9923	Τοπικός 1 (Καρδιά)
2	-0,5921 +j 12,205	4,8460	1,9425	Τοπικός 2 (Αγ.Δημ)
3	-0,3939 +j 9,5518	4,1199	1,5202	Τοπικός 3 (BG)
4	-0,3381 +j 7,2128	4,6830	1,1479	Τοπικός 4 (Καστράκι)
5	-0,2181 +j 5,9459	3,6649	0,9463	Θράκης
6	-0,2273 +j 5,8355	3,8927	0,9288	Νότιος (S-GR)
7	-0,1171 +j 5,1728	2,2626	0,8233	GR – TR
8	-0,4958 +j 3,8923	12,635	0,6195	Inter-area GR
9	-0,5439 +j 1,4798	34,500	0,2355	Inter-area UCTE

Στο Σχήμα 4.1 σημειώνονται οι ιδιοτιμές (πόλοι) του συστήματος, καθώς και ο αριθμός που αντιστοιχεί στον κάθε ρυθμό, όπως υπολογίστηκαν από το πακέτο PacDyn βάσει του Πίνακα 4.2. Όσες ιδιοτιμές είναι δεξιά της κόκκινης γραμμής η

οποία αντιστοιχεί σε λόγο απόσβεσης $\zeta = 5\%$ επηρεάζουν την ευστάθεια του συστήματος.



Σχήμα 4.1 Οι πόλοι του συστήματος (Ισχυρή Διασύνδεση)

Ο ρυθμός 7 (GR-TR), είναι ο ρυθμός ταλάντωσης που εμφανίζει τη χαμηλότερη απόσβεση στο 2,26% και έχει συχνότητα $f=0,82$ Hz. Η ταλάντωση αυτή αναφέρεται στη διασύνδεση του Ελληνικού συστήματος με το σύστημα της Τουρκίας της Ανατολικής Θράκης. Οι ρυθμοί 1,2,3,4 αφορούν τοπικούς ρυθμούς σε αρκετά υψηλότερη συχνότητα από αυτή που μας ενδιαφέρει και έτσι δεν θα τους εξετάσουμε παραπάνω. Αντίθετα, ο ρυθμός 5 της Θράκης όπως και ο νότιος ρυθμός 6 (S-GR) του ελληνικού συστήματος, εμφανίζονται σε συχνότητες παραπλήσιες της ταλάντωσης διασύνδεσης GR-TR. Είναι απαραίτητο λοιπόν, να εξετάσουμε και τους δυο αυτούς ρυθμούς και να μελετήσουμε την επίδραση που θα έχουν στην επιτυχή απόσβεση του ρυθμού που μας ενδιαφέρει μέσω της σχεδίασης σταθεροποιητή.

Στις τελευταίες γραμμές του πίνακα αναφέρονται οι διασυννοριακοί ρυθμοί του ελληνικού συστήματος. Ο διασυννοριακός ρυθμός του Ελληνικού Συστήματος (GR) αναφέρεται στην ταλάντωση όλων των ελληνικών γεννητριών ως προς την εξωτερική διασύνδεση της Βαλκανικής και εμφανίζεται στα 0.62 Hz με λόγο απόσβεσης 12,6%, ενώ ο ρυθμός 9 αφορά το ρυθμό ταλάντωσης της Βαλκανικής ως προς την UCTE στα 0.23 Hz ο οποίος έχει λόγο απόσβεσης 34,5%. Όλα τα παραπάνω θα αναλυθούν με την εξέταση των ιδιοδιανυσμάτων για κάθε ρυθμό σε επόμενη ενότητα.

4.1.2 Μορφή Ρυθμών Ηλεκτρομηχανικής Ταλάντωσης

Θα αναλύσουμε τη μορφή των ρυθμών που επισημάναμε παραπάνω για να δούμε λεπτομερώς ποιες μονάδες συμμετέχουν σε αυτούς και με ποιον τρόπο. Πραγματοποιήσαμε την ίδια ανάλυση με το PSS/E και το PacDyn και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους αντίστοιχους πίνακες. Στον κάθε πίνακα, δίνονται το μέτρο και η φάση των ιδιοδιανυσμάτων που αντιστοιχούν στις μεταβλητές κατάστασης Δδ των μηχανών που συμμετέχουν στον κάθε ρυθμό. Τα στοιχεία των ιδιοδιανυσμάτων κανονικοποιούνται ώστε το μεγαλύτερο στοιχείο να έχει μέτρο 1.

Μετά από κάθε πίνακα, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα γραφήματα για τον συγκεκριμένο ρυθμό. Σε κάθε περίπτωση, το πρώτο σχήμα πρόεκυψε μετά από επεξεργασία των αποτελεσμάτων του PSS/E σε περιβάλλον MATLAB όπου με τη βοήθεια της εντολής `compass(x,y)` σχεδιάστηκε το αντίστοιχο πολικό διάγραμμα. Το δεύτερο σχήμα είναι το γράφημα που παρέχει το PacDyn. Συγκρίνοντας τις τιμές του πίνακα, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των δυο προγραμμάτων είναι ταυτόσημα. Η μόνη διαφορά έγκειται στο διάνυσμα που λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς στα δυο προγράμματα υπολογισμού. Έτσι, για λόγους σύγκρισης, κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, ορίζουμε σαν διάνυσμα αναφοράς για κάθε σχήμα, το ιδιοδιάνυσμα για την Τουρκική μονάδα στο ALARKO, έτσι ώστε να είναι εμφανής η ομοιότητα των γραφημάτων.

Στα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στα σχήματα το GR αντιστοιχεί στις ελληνικές μονάδες, το TR στην Τουρκία, το W (ή το BA) αντιστοιχεί στη Βοσνία-Ερζεγοβίνη, το RO στη Ρουμανία, το BG (ή το V) στη Βουλγαρία, το AL στην Αλβανία, το J (ή το FY) στην Π.Γ.Δ.Μ και το Y στη Σερβία.

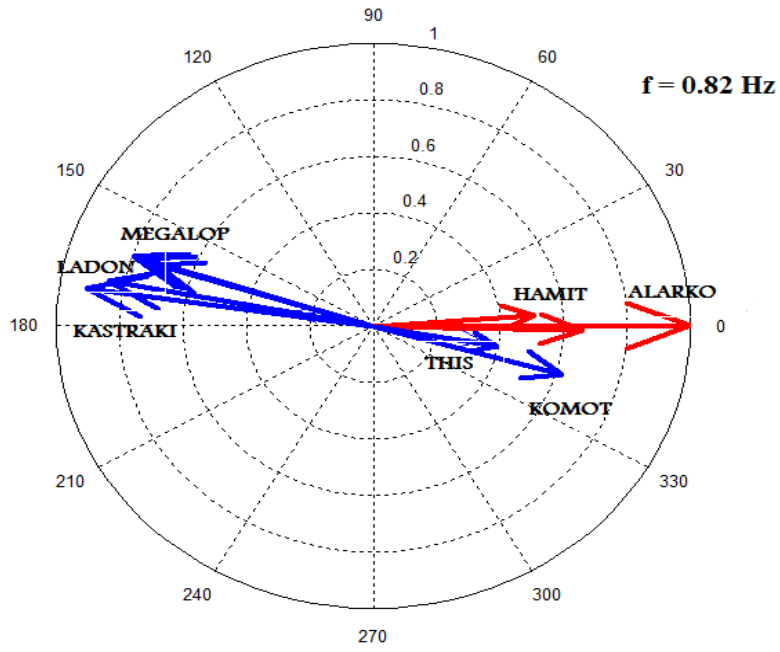
Ρυθμός Διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας (GR-TR)

Στον Πίνακα 4.3, παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία του δεξιού ιδιοδιανύσματος για τις μεταβλητές κατάστασης που αντιστοιχούν στις γωνίες των μηχανών, για το ρυθμό 7 (GR-TR) του Πίνακα 4.1. Στον Πίνακα 4.3 δίνονται τα στοιχεία του ιδιοδιανύσματος με μέτρο μεγαλύτερο από 0.35 όπως υπολογίστηκαν από το v29 PSS/E και το PacDyn. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, παρατηρούμε ότι τα δύο προγράμματα δίνουν ίδια αποτελέσματα για τη φάση (με διαφορετικό σημείο αναφοράς) ενώ τα μέτρα των στοιχείων στο PSS/E έχουν μικρότερες τιμές.

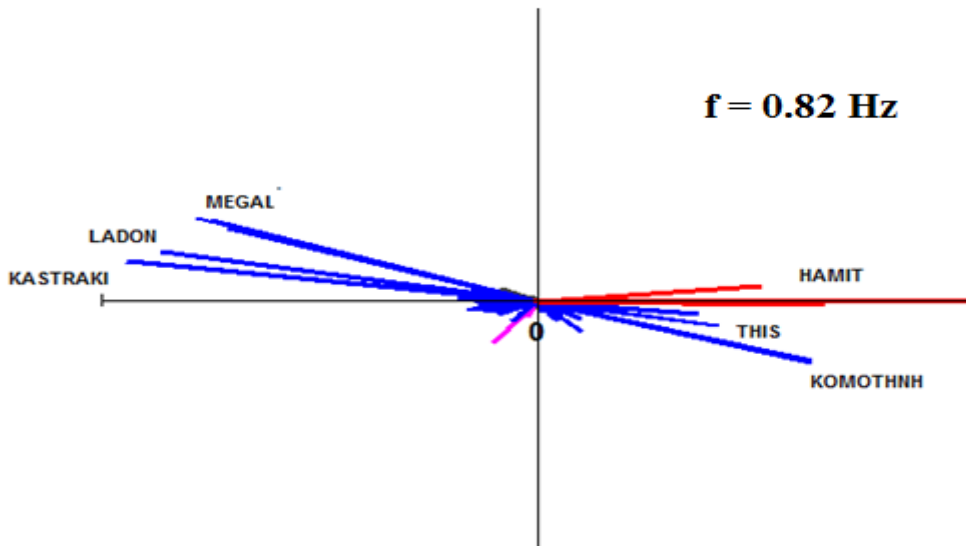
Πίνακας 4.3: Δεξί ιδιοδιάνυσμα για το ρυθμό διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας

Όνομα Μηχανής	PSS/E		PACDYN	
	Μέτρο	Φάση	Μέτρο	Φάση
ALARKO	1,00000	-43,549	1,0000	0
ΚΑΣΤΡΑΚΙ_3	0,91711	128,17	0,9484	173,36
ΚΑΣΤΡΑΚΙ_4	0,91571	128,17	0,9469	173,36
ΚΑΣΤΡΑΚΙ_2	0,91517	128,18	0,9465	173,36
ΛΑΔΩΝΑΣ_1	0,84808	125,78	0,8758	171,02
ΛΑΔΩΝΑΣ_2	0,84690	125,77	0,8746	171,01
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_4	0,79285	118,37	0,8156	163,74
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_3	0,76193	118,27	0,7835	163,67
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_1	0,71390	118,99	0,7356	164,36
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_2	0,71390	118,99	0,7356	164,36
ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_2	0,65869	-44,756	0,6632	-0,9225
ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_1	0,65868	-44,755	0,6632	-0,9225
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_3	0,62346	-59,968	0,6534	-14,782
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_1	0,62164	-59,707	0,6517	-14,444
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_2	0,61982	-59,700	0,6499	-14,445
ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_0	0,50998	-39,323	0,5131	4,5121
ΘΗΣΑΥΡΟΣ_2	0,39699	-53,949	0,4229	-9,0094
ΘΗΣΑΥΡΟΣ_1	0,39698	-53,946	0,4229	-9,0094
ΘΗΣΑΥΡΟΣ_3	0,39698	-53,948	0,4229	-9,0094
ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ_4	0,35024	52,278	0,3733	-5,2043

Στα Σχήματα 4.2 και 4.3 απεικονίζεται η μορφή του ρυθμού GR-TR, όπως πρόεκυψε από τα προγράμματα PSS/E και PacDyn αντίστοιχα, βάσει των μέτρων και των φάσεων των στοιχείων του Πίνακα 4.3. Στο ρυθμό αυτό, ($\lambda = -0,1171 + j5,1728$), έχουμε ταλάντωση των τουρκικών γεννητριών εν φάση με τις ελληνικές μηχανές στην Κομοτηνή, στο Θησαυρό και την Πλατανόβρυση, μονάδες της Θράκης, κοντά δηλαδή στο σημείο διασύνδεσης του ελληνικού συστήματος με την τουρκική νησίδα. Όλες οι υπόλοιπες μονάδες της Ελλάδος με κυρίαρχη συμμετοχή αυτών της Μεγαλόπολης, του Λάδωνα και του Καστρακίου ταλαντώνονται με διαφορά φάσης 180° . Συνεπώς, ο ρυθμός αυτός, εκφράζει την ταλάντωση διασύνδεσης του Ελληνικού συστήματος με το σύστημα της Τουρκίας, όπου οι μονάδες της Θράκης ταλαντώνονται μαζί με τις τουρκικές μονάδες.



Σχήμα 4.2 Μορφή ρυθμού GR-TR (PSS/E)



Σχήμα 4.3 Μορφή ρυθμού GR-TR (PacDyn)

Διασυννοριακός Ρυθμός Ελληνικού Συστήματος (GR)

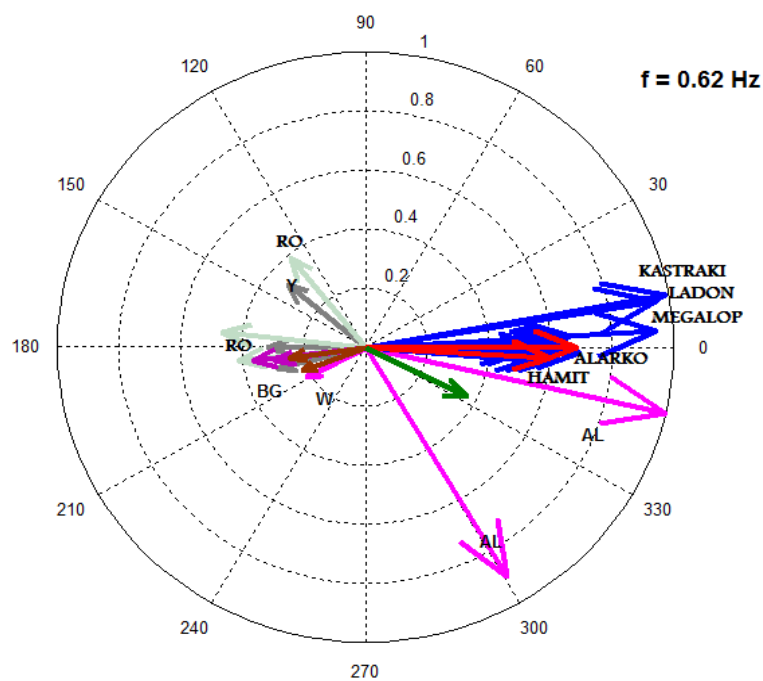
Σε αυτόν το ρυθμό, έχουμε εν φάση ταλάντωση όλων των ελληνικών μονάδων και των τουρκικών μονάδων αντίθετα από τις μονάδες των άλλων χωρών, όπως αυτών της Ρουμανίας, Βουλγαρίας, Βοσνίας-Ερζεγοβίνης κλπ.

Ο Πίνακας 4.4 δίνει τις τιμές των στοιχείων του ιδιοδιανύσματος του ρυθμού αυτού και τα Σχήματα 4.4 και 4.5 την μορφή τους. Στο ρυθμό αυτό όλες οι μονάδες του ελληνικού συστήματος βρίσκονται εν φάση. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζεται ενδεικτικά μία μονάδα για κάθε σταθμό παραγωγής στο Ελληνικό Σύστημα, καθώς οι μονάδες ενός σταθμού παραγωγής ταυτίζονται σε μέτρο και φάση. Για τις υπόλοιπες χώρες, δίνονται ενδεικτικά τα τρία μεγαλύτερα στοιχεία για κάθε χώρα. Όλα τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα έχουν μέτρο μεγαλύτερο του 0,20. Τα δύο προγράμματα εμφανίζουν και σε αυτή την περίπτωση μικρές διαφορές στα αποτελέσματα που δίνουν

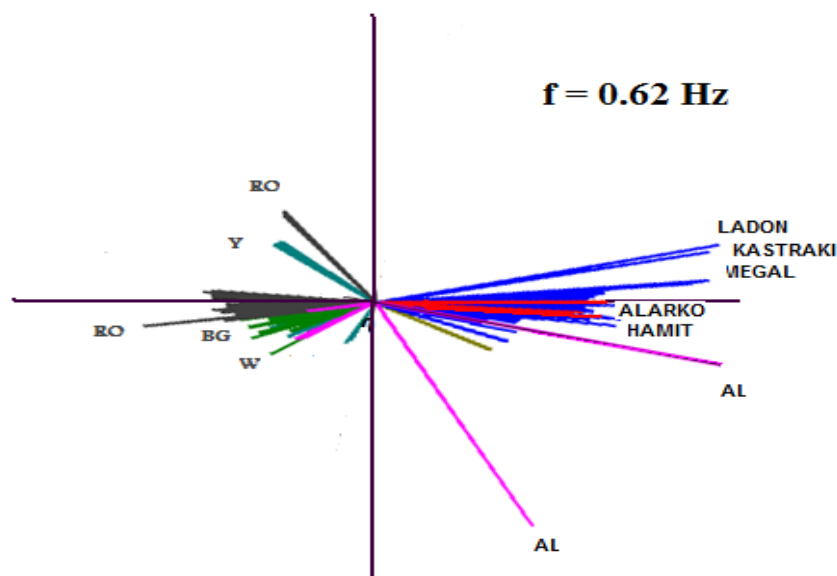
Πίνακας 4.4: Δεξί ιδιοδιάνυσμα για το ρυθμό του Ελληνικού Συστήματος

		PSS/E		PACDYN	
Όνομα Μηχανής	Ζυγός Μηχανής	Μέτρο	Φάση	Μέτρο	Φάση
AFIERZG3	10501	1,00000	-171.51	1,0000	0
GKASTR_G	81387	0,98847	-148.31	0,9909	24,512
GLADON_G	68187	0,95398	-149.22	0,9577	23,502
GMEGAL_G	62177	0,94331	-155.29	0,943	17,404
AKOMANG3	10502	0,90436	142.05	0,9014	-48,002
GAHSAG_G	56187	0,69608	-160.26	0,6896	11,865
T-ALARKO	11300	0,68764	-158.54	0,6696	12,943
GAWOS_G	84687	0,66406	-155.48	0,6595	16,628
GPOURI_G	80287	0,65309	-156.21	0,6484	15,793
GPOLUF_G	26387	0,63749	-159.33	0,6323	12,602
GMPAKO_G	73187	0,62865	-157.28	0,6210	14,672
GALIVE_G	43487	0,62459	-161.96	0,6176	9,9286
GLAVRIOG	59577	0,61190	-161.76	0,6109	10,112
GLOURO_G	84187	0,61123	-157.30	0,6082	14,756
GPLAST_G	35187	0,60769	-158.00	0,5981	13,927
TG-4HAMI	11022	0,60019	-162.09	0,5860	9,3437
TG-4HAMI	11021	0,60019	-162.09	0,5860	9,3437
GHRWN_G	77287	0,59969	-160.59	0,5938	11,278
GGIWNA_G	44197	0,58945	-157.68	0,5829	14,266
GKOMOT_G	12687	0,57499	-162.62	0,5669	9,5384

GAGRAS_G	28187	0,54652	-158.00	0,5391	13,697
GPTOLEMG	25477	0,53304	-163.47	0,5298	8,2613
GTHISA_G	19387	0,49516	-161.22	0,4903	10,867
GPLATA_G	19587	0,46666	-161.74	0,4578	10,879
RBRAILF1	29219	0,46573	15.433	0,4884	-171,59
RLOTRUF1	29232	0,41508	27.578	0,4309	-158,84
RPDFE1F1	29189	0,38837	-29.683	0,4011	142,61
YTBIT2G2	26302	0,37059	174.40	-0,3688	-14,535
YTBIT2G1	26301	0,36878	174.22	0,3628	-14,735
YTBIT2G3	26303	0,36859	174.50	-0,3669	-14,435
VTMI12M1	13700	0,36678	28.613	0,3895	-158,5
VBEL23K1	13201	0,35447	39.365	0,3740	-146,9
JHDJERG3	35003	0,32972	-18.704	0,3519	156,68
JTDRMNG1	35011	0,31463	21.521	0,3299	-165,41
VTVAR4F1	13603	0,29570	30.376	0,3056	-155,85
JHBBASG1	35051	0,29535	35.750	0,3112	-150,3
WHVISEG	14003	0,24776	29.668	0,2627	-156,84
WHTREBG3	14004	0,22044	43.462	0,2360	-143,7
WHTREBG3	14004	0,22041	43.464	0,2380	-143,8
AFIERZG1	10001	0,21530	49.958	0,2390	-136,05



Σχήμα 4.4 Η μορφή του ρυθμού GR (PSS/E)



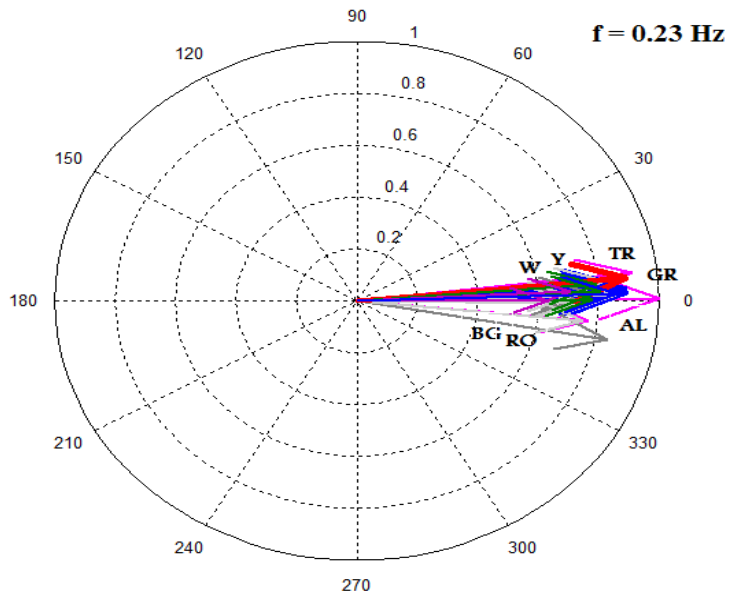
Σχήμα 4.5 Η μορφή του ρυθμού GR (PacDyn)

Ρυθμός Βαλκανικού Συστήματος ως προς UCTE

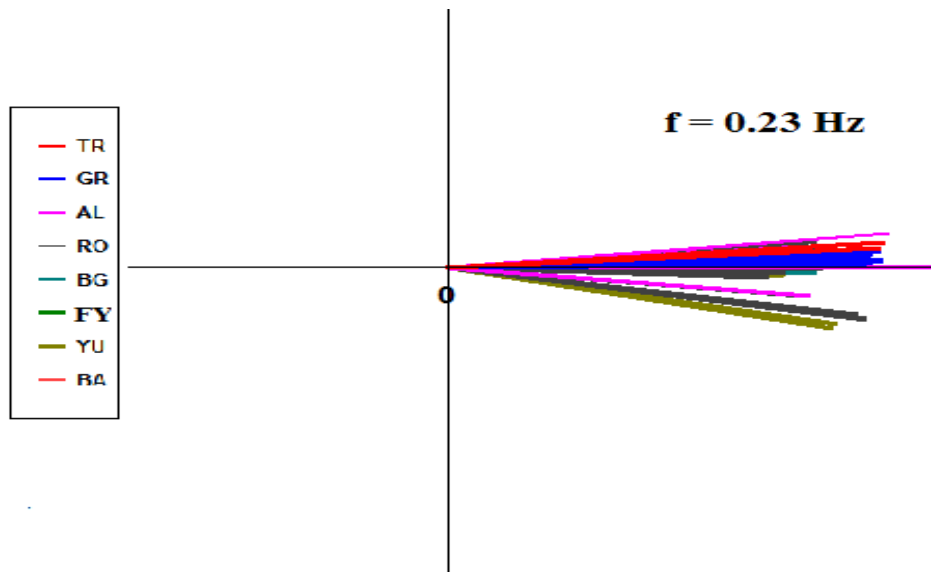
Στο ρυθμό αυτό όλες οι μονάδες του συστήματος, όλων των χωρών, ταλαντώνονται με την ίδια φάση, με συχνότητα $f=0,23$ Hz. Έτσι, στον Πίνακα 4.5 δίνεται ενδεικτικά μόνο το μεγαλύτερο στοιχείο του ιδιοδιάνυσματος για κάθε χώρα του ρυθμού αυτού. Στα Σχήματα 4.6 και 4.7 παρουσιάζεται η μορφή του ρυθμού. Στα σχήματα το σύμβολο GR αντιστοιχεί στις ελληνικές μονάδες, το TR στην Τουρκία, το W (ή το BA) αντιστοιχεί στη Βοσνία-Ερζεγοβίνη, το RO στη Ρουμανία, το BG (ή το V) στη Βουλγαρία, το AL στην Αλβανία, το J (ή το FY) στην Π.Γ.Δ.Μ και το Y στη Σερβία.

Πίνακας 4.5: Δεξί ιδιοδιάνυσμα για το ρυθμό UCTE

		PSS/E		PACDYN	
Όνομα Μηχανής	Ζυγός Μηχανής	Μέτρο	Φάση	Μέτρο	Φάση
AKOMANG3	10502	1,00000	163,61	1,0000	0
T-ALARKO	11300	0,89799	169,10	0,8999	4,8839
GLADON_G	68287	0,89249	166,27	0,89	3,2902
YTBIT2G1	26301	0,85875	164,89	0,8495	1,0999
RBUCSGI5	29136	0,85387	164,53	0,835	2,0972
JHDJERG1	35001	0,84289	152,62	0,8172	-12,027
VHAN_4K1	13804	0,80486	165,59	0,8047	0,7835
WHTREBG3	14004	0,70818	166,07	0,6909	2,2619



Σχήμα 4.6 Η μορφή του ρυθμού UCTE (PSS/E)



Σχήμα 4.7 Η μορφή του ρυθμού UCTE (PacDyn)

Θα δείξουμε τώρα τη μορφή των ρυθμών S-GR και Θράκης του Πίνακα 4.1, οι οποίοι έχουν παραπλήσια συχνότητα και εμπλέκουν τις ίδιες μηχανές του συστήματος με το ρυθμό διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας (GR-TR).

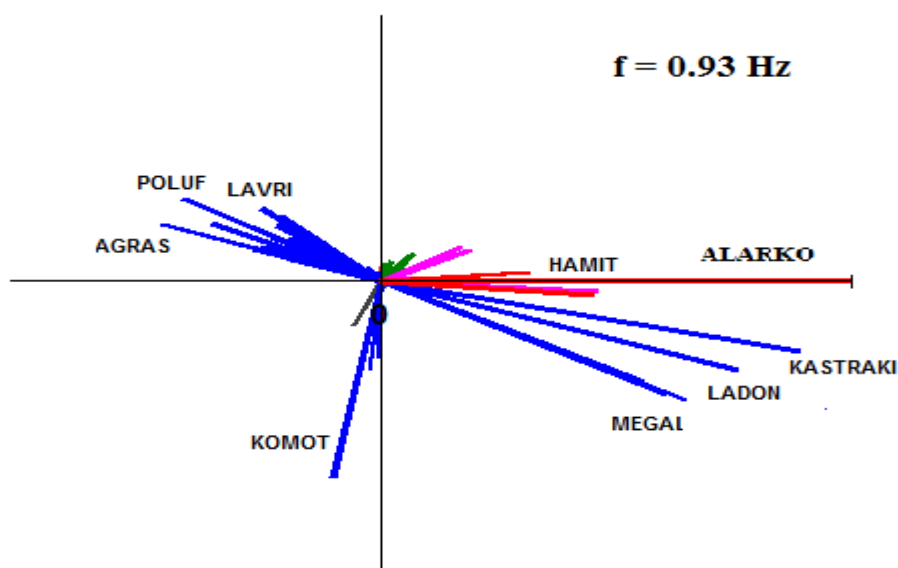
Νότιος Ρυθμός Ελληνικού Συστήματος (S-GR)

Ο ρυθμός αυτός ($\lambda = -0,2273 + j 5,8355$) είναι άλλος ένας ηλεκτρομηχανικός ρυθμός του συστήματος με χαμηλή απόσβεση στο 3,9% με συχνότητα $f = 0,93$ Hz, τιμή κοντά στη συχνότητα του ρυθμού GR-TR. Στο ρυθμό αυτό, εμπλέκονται οι μονάδες του νοτίου ελληνικού συστήματος αλλά και οι μονάδες της Θράκης οι οποίες συμμετέχουν έντονα στο ρυθμό GR-TR. Στον Πίνακα 4.6 δίνονται τα στοιχεία του ιδιοδιανύσματος για το συγκεκριμένο ρυθμό με μέτρο μεγαλύτερο του 0,20.

Πίνακας 4.6: Δεξί ιδιοδιάνυσμα για το ρυθμό S- GR

Όνομα Μηχανής	Ζυγός Μηχανής	PACDYN	
		Μέτρο	Φάση
T-ALARKO	11300	1,0000	0
GKASTR_G	81387	0,9116	-11,014
GLADON_G	68187	0,7945	-16,253
GMEGAL_G	62177	0,7137	-24,67
GKOMOT_G	12487	0,5009	-101,73
GAGRAS_G	28187	0,4899	163,16
GPOLUF_G	26387	0,4699	153,99
AFIERZG3	10501	0,4660	-3,0759
TG-4HAMI	11021	0,4556	-4,3646
GPOLUF_G	26287	0,3905	158,3
GBLAVR_G	59677	0,3157	144,64
TG-4HAMI	11020	0,3156	4,0255
GPOLUF_G	26187	0,2828	163,69
GAWOS_G	84687	0,2717	161,93
GPOUR1_G	80187	0,2621	161,21
GPLAST_G	35287	0,2595	158,17
GPTOLEMG	25477	0,2563	155,06
GMPAKO_G	73187	0,2491	159,95
GSFIKI_G	27387	0,2279	163,28
GTHISA_G	19287	0,2249	-96,718
GSTRAT2G	72397	0,2238	159,36
GLIPTOLG	25687	0,213	155,84

Στο Σχήμα 4.8 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μορφή του ρυθμού αυτού και η συμμετοχή των συγκεκριμένων μονάδων. Στο ρυθμό αυτό, πέραν των μονάδων της Νοτίου Ελλάδος εμπλέκονται και οι μονάδες της Τουρκίας και της Κομοτηνής.



Σχήμα 4.8 Η μορφή του ρυθμού S-GR (PacDyn)

Ρυθμός Θράκης

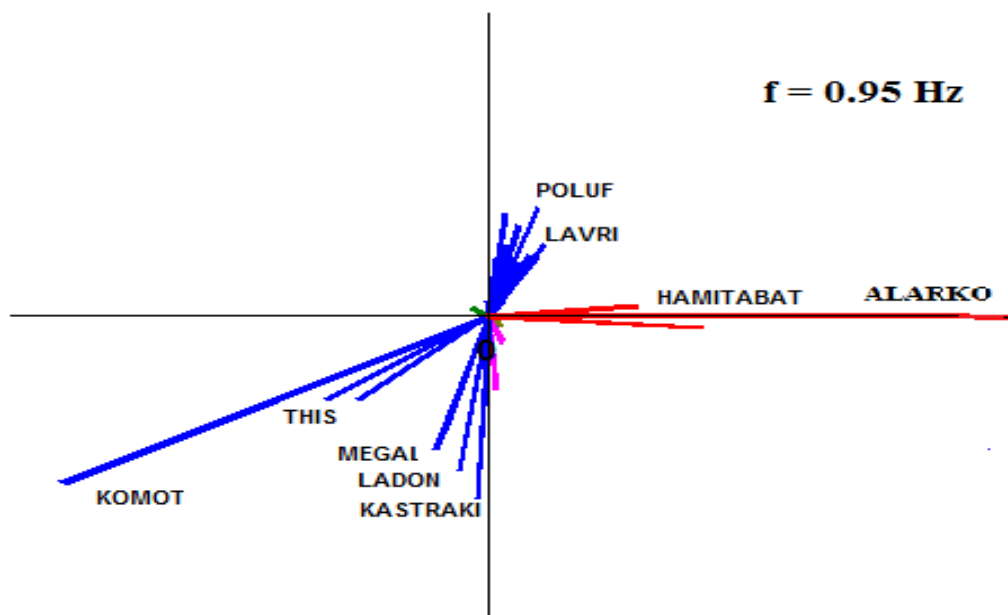
Αυτός ο ρυθμός ($\lambda = -0,2181 + j5,946$) είναι ένας τοπικός ρυθμός ταλάντωσης μεταξύ των ελληνικών μονάδων στη Θράκη και των τουρκικών μονάδων της ανατολικής Θράκης. Ο εν λόγω ρυθμός εμπλέκει κυρίως τις μηχανές της Κομοτηνής και αυτές της Τουρκίας. Εμφανίζει απόσβεση 3,67%, και συχνότητα $f=0,94$ Hz. Στον Πίνακα 4.7 δίνονται τα στοιχεία του ιδιοδιάνυσματος του ρυθμού με μέτρο μεγαλύτερο του 0,20 όπως υπολογίστηκαν από το PacDyn.

Πίνακας 4.7: Δεξί ιδιοδιάνυσμα για το ρυθμό Θράκης

Όνομα Μηχανής	Ζυγός Μηχανής	PACDYN	
		Μέτρο	Φάση
T-ALARKO	11300	1,0000	0
GKOMOT_G	12687	0,9051	-153,57
GKOMOT_G	12487	0,9009	-153,13
GKOMOT_G	12587	0,8971	-153,14
GKASTR_G	81387	0,4459	-92,786
GKASTR_G	81487	0,4448	-92,787
GKASTR_G	81287	0,4445	-92,788
TG-4HAMI	11022	0,4083	-3,9883
TG-4HAMI	11021	0,4083	-3,9883
GLADON_G	68187	0,3813	-98,531

GLADON_G	68287	0,3805	-98,542
GTHISA_G	19387	0,3681	-146,51
GTHISA	19187	0,3681	-146,51
GTHISA_G	19287	0,3681	-146,51
GMEGAL_G	62177	0,3396	-107,04
GPLATA_G	19587	0,3195	-140,92
GPLATA_G	19487	0,3195	-140,92
GMEGAL_G	61377	0,3172	-107,34
GMEGAL_G	61187	0,288	-106,35
TG-4HAMI	11020	0,2814	4,7944
GPOLUF_G	26387	0,2802	70,646
GAGRAS_G	28187	0,2509	82,71
GBLAVR_G	59677	0,206	58,88

Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται καθαρά η ταλάντωση των ελληνικών μονάδων της Θράκης αντίθετα από τις μονάδες της τουρκικής νησίδας της Ανατολικής Θράκης.



Σχήμα 4.9 Η μορφή του τοπικού ρυθμού της Θράκης (PacDyn)

4.1.3 Συντελεστές Συμμετοχής

Ρυθμός TR

Στην παράγραφο αυτή υπολογίζονται οι συντελεστές συμμετοχής των μηχανών του συστήματος για το ρυθμό GR-TR, που αναφέρεται στη διασύνδεση Ελλάδος-Τουρκίας. Ο συγκεκριμένος ρυθμός ταλάντωσης είναι αυτός που μας ενδιαφέρει περισσότερο καθώς εμφανίζει την μικρότερη απόσβεση όλων. Οι συντελεστές συμμετοχής φανερώνουν ποιες μηχανές του συστήματος συμμετέχουν περισσότερο σε ένα ηλεκτρομηχανικό ρυθμό. Η μεγάλη συμμετοχή μιας μηχανής αποτελεί συνήθως ένδειξη έτσι ώστε να επιλεγεί ως μια από τις πιθανές κατάλληλες θέσεις τοποθέτησης ενός σταθεροποιητή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για την απόσβεση του ρυθμού.

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται οι συντελεστές συμμετοχής των μηχανών για τον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό GR-TR που υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος PSS/E και του PacDyn αντίστοιχα:

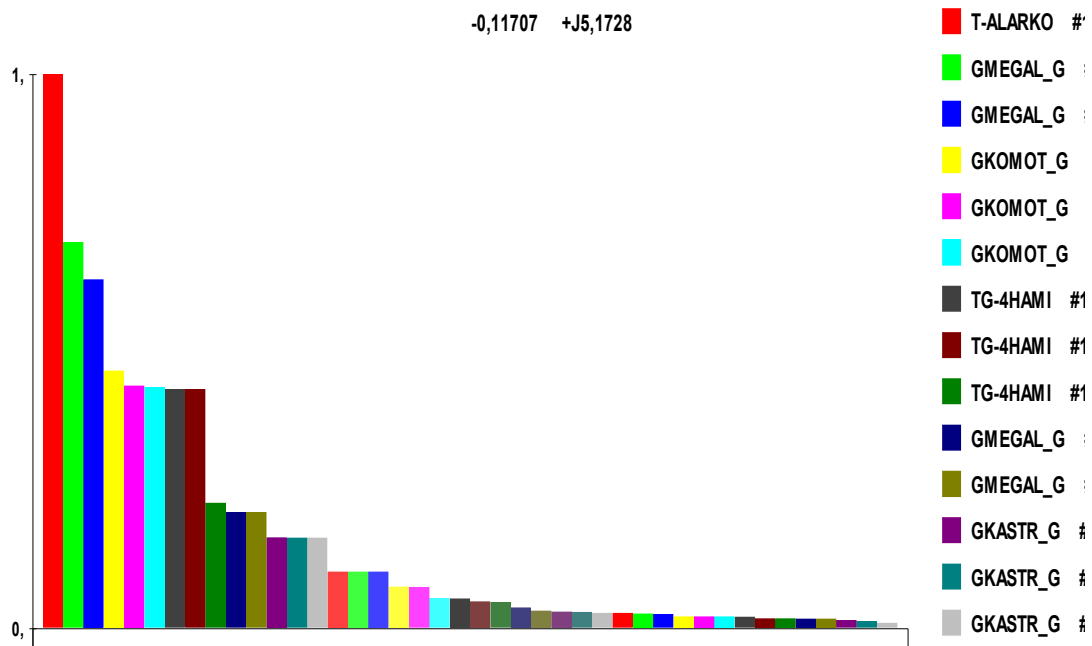
Πίνακας 4.8: Οι μεγαλύτεροι συντελεστές συμμετοχής των μηχανών στο ρυθμό GR-TR

PSS/E		PACDYN	
Όνομα Μηχανής	Συντελεστές Συμμετοχής	Όνομα Μηχανής	Συντελεστές Συμμετοχής
ALARKO	1.00000	ALARKO	1,0000
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_4	0.66379	ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_4	0,6969
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_3	0.59995	ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ3	0,6300
ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_1	0,42554	ΚΟΜΟΤΗΝΗ3	0,4650
ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_2	0.42534	ΚΟΜΟΤΗΝΗ1	0,4383
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_3	0.42154	ΚΟΜΟΤΗΝΗ2	0,4354
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_1	0.39727	ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_1	0,4315
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_2	0.39438	ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_2	0,4315
ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_0	0.22284	ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_0	0,2267
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_1	0.19942	ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_1	0,2102
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_2	0.19934	ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_2	0,2102
ΚΑΣΤΡΑΚΙ_3	0.15308	ΚΑΣΤΡΑΚΙ_3	0,1634
ΚΑΣΤΡΑΚΙ_4	0.15265	ΚΑΣΤΡΑΚΙ_4	0,1627
ΚΑΣΤΡΑΚΙ_2	0.15243	ΚΑΣΤΡΑΚΙ_2	0,1625
ΘΗΣΑΥΡΟΣ_2	0.08880	ΘΗΣΑΥΡΟΣ_2	0,1018
ΘΗΣΑΥΡΟΣ_3	0.08872	ΘΗΣΑΥΡΟΣ_3	0,1018
ΘΗΣΑΥΡΟΣ_2	0.08868	ΘΗΣΑΥΡΟΣ_1	0,1018

Παρατηρούμε ότι και στα δυο προγράμματα, μεγαλύτερο συντελεστή συμμετοχής παρουσιάζει η μονάδα ALARKO της Τουρκίας. Στα αποτελέσματα του PacDyn μετά από τις δυο μονάδες της Μεγαλόπολης, ακολουθούν δυο τουρκικές μονάδες και έπειτα οι μονάδες του ΘΗΣ της Κομοτηνής, ενώ στο PSSE οι μονάδες του ΘΗΣ της Κομοτηνής έχουν μεγαλύτερο συντελεστή συμμετοχής.

Από την πλευρά του ελληνικού συστήματος τώρα, την μεγαλύτερη συμμετοχή στο ρυθμό παρουσιάζουν δυο μονάδες της Μεγαλόπολης, ισχυρές μονάδες που βρίσκονται στο νότιο κομμάτι του ελληνικού συστήματος, μακριά από το σημείο διασύνδεσης του ελληνικού συστήματος. Ακολουθούν οι μονάδες της Κομοτηνής, με συντελεστές συμμετοχής που κυμαίνονται στο 42% περίπου και τέλος με πολύ μικρό συντελεστή συμμετοχής οι μονάδες του Θησαυρού.

Στο Σχήμα 4.10, δίνονται σε γραφική παράσταση μέσω του PacDyn, ταξινομημένοι με φθίνουσα σειρά, οι συντελεστές συμμετοχής των μηχανών, στο ρυθμό διασύνδεσης GR-TR.



Σχήμα 4.10 Ταξινόμηση των μηχανών βάσει των συντελεστών συμμετοχής τους στο ρυθμό διασύνδεσης του Τουρκικού με το Ελληνικό Σύστημα

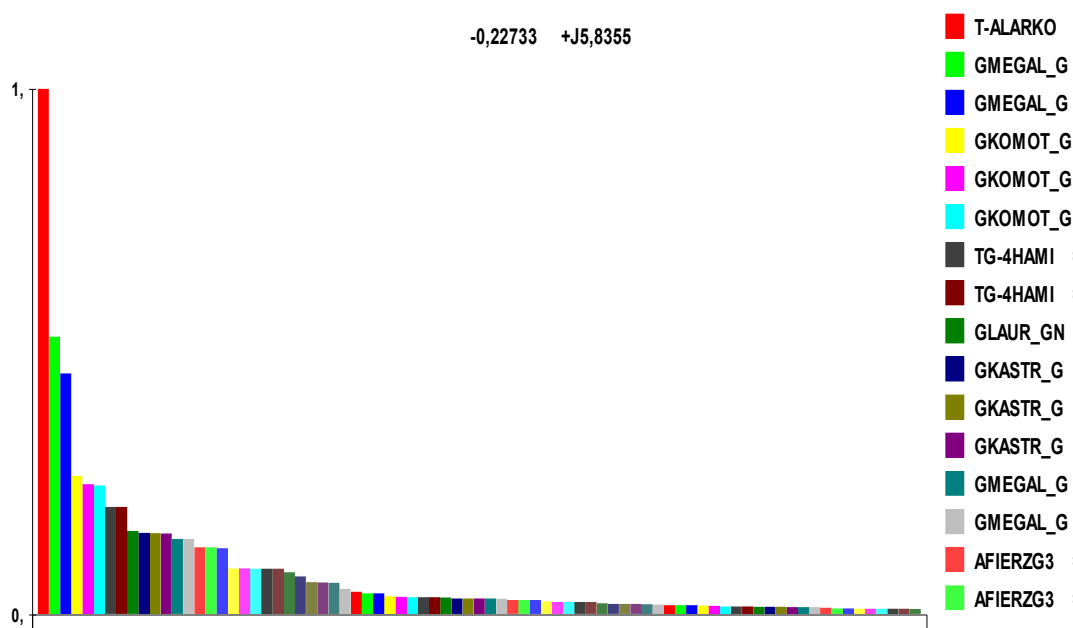
Ρυθμός S-GR

Θα δείξουμε τους συντελεστές συμμετοχής των μηχανών του συστήματος και για το νότιο ρυθμό του ελληνικού συστήματος. Στον Πίνακα 4.9 δίνονται οι μονάδες εκείνες που έχουν συντελεστή συμμετοχής στο ρυθμό αυτό μεγαλύτερο του 0,20.

Πίνακας 4.9: Οι μεγαλύτεροι συντελεστές συμμετοχής των μηχανών στο νότιο ρυθμό

PACDYN	
Όνομα Μηχανής	Συντελεστές Συμμετοχής
ALARKO	1,0000
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_4	0,5288
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_3	0,4583
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_3	0,2639
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_1	0,2476
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_2	0,2454
ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_2	0,2046
ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_1	0,2046

Οι υπολογισμοί των συντελεστών συμμετοχής έγιναν με το πρόγραμμα PacDyn. Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται η συμμετοχή όλων των μηχανών του συστήματος στο συγκεκριμένο ρυθμό. Παρατηρούμε ότι και σε αυτό το ρυθμό, κυριαρχεί η μονάδα της Τουρκίας στο ALARKO. Ακολουθούν οι μονάδες της Μεγαλόπολης, της Κομοτηνής και οι υπόλοιπες μονάδες της Τουρκίας.



Σχήμα 4.11 Ταξινόμηση των μηχανών βάσει των συντελεστών συμμετοχής τους στο νότιο ρυθμό του Ελληνικού συστήματος

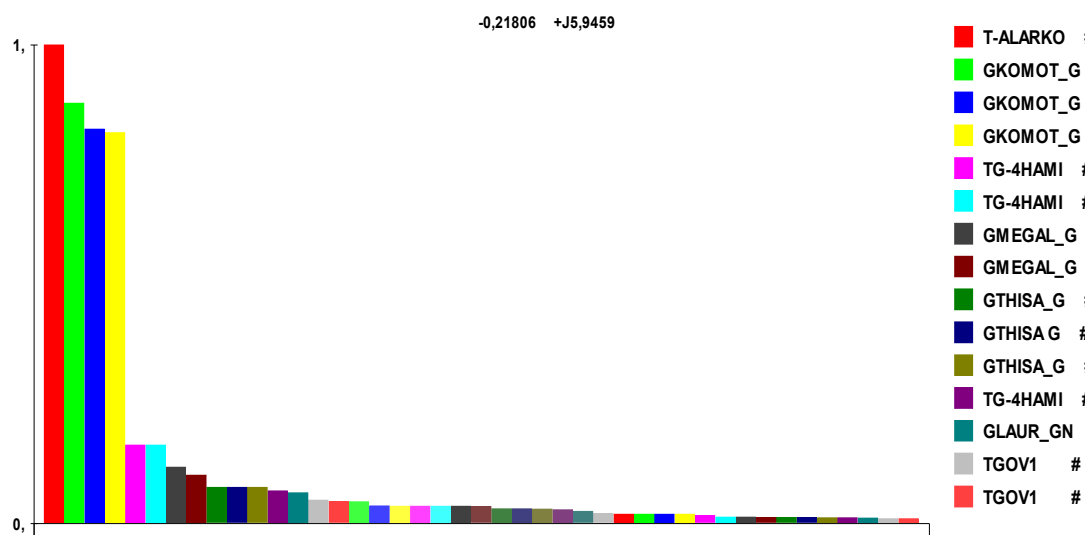
Ρυθμός Θράκης

Ο ρυθμός της Θράκης είναι ένας τοπικός ρυθμός που εμπλέκει τις μονάδες της Θράκης, καθώς αφορά την ταλάντωση των ελληνικών μονάδων της Δυτικής Θράκης αντίθετα των τουρκικών μονάδων της Ανατολικής Θράκης. Στον Πίνακα 4.10 δίνονται οι μονάδες που έχουν συντελεστή συμμετοχής μεγαλύτερο από 0,10 στο ρυθμό αυτό.

Πίνακας 4.10: Οι μεγαλύτεροι συντελεστές συμμετοχής των μηχανών στο τοπικό ρυθμό της Θράκης

PACDYN	
Όνομα Μηχανής	Συντελεστές Συμμετοχής
ALARKO	1,0000
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_3	0,8781
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_1	0,8240
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_2	0,8161
ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_1	0,1640
ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_2	0,1640
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_4	0,1178
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_3	0,1012

Στο Σχήμα 4.12 φαίνεται ότι στο ρυθμό της Θράκης συμμετέχουν κυρίως η μονάδα ALARKO της Τουρκίας και οι 3 μονάδες του ΘΗΣ της Κομοτηνής.



Σχήμα 4.12 Ταξινόμηση των μηχανών βάσει των συντελεστών συμμετοχής τους στο τοπικό ρυθμό της Θράκης

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.2.2 ο συντελεστής συμμετοχής αντιστοιχεί στην ευαισθησία των ιδιοτιμών στην πρόσθεση απόσβεσης (διαγώνιο στοιχείο του πίνακα κατάστασης) σε διάφορες μονάδες. Δεν εκφράζει την δυνατότητα της μονάδας για ρύθμιση. Την πληροφορία αυτή μας την παρέχει το ολοκληρωτικό υπόλοιπο.

4.1.4 Ολοκληρωτικά Υπόλοιπα

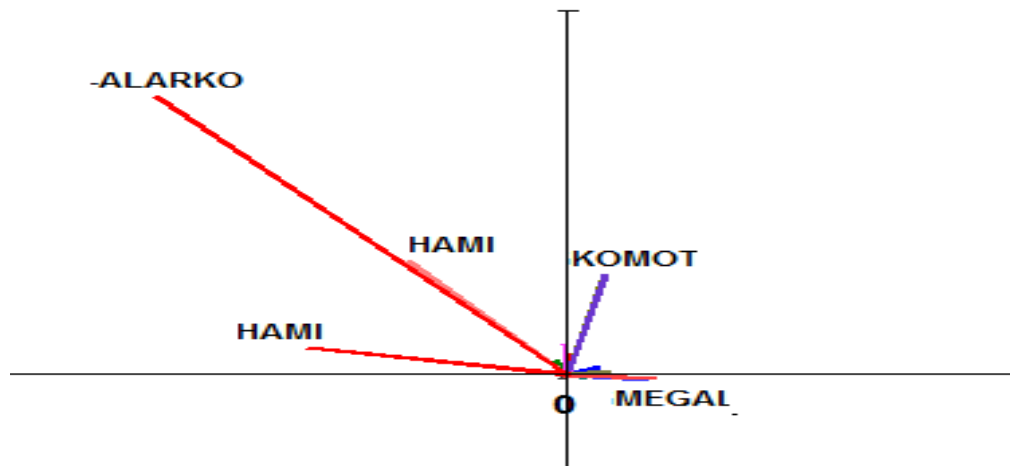
Σε αυτή την ενότητα θα υπολογίσουμε τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα, ένα δείκτη που θα μας δώσει την πληροφορία για τη σχεδίαση σταθεροποιητή με σκοπό την αύξηση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων του συστήματος. Το πρόγραμμα PacDyn μας δίνει την δυνατότητα να ορίσαμε σαν έξοδο την ταχύτητα ω των μηχανών και σαν είσοδο την τάση V_{ref} κατά τον υπολογισμό των ολοκληρωτικών υπολοίπων, χωρίς να χρειάζεται να ορίσουμε μια συγκεκριμένη μονάδα παραγωγής του συστήματος.

Ρυθμός GR-TR

Ο Πίνακας 4.11 δίνει τα μέτρα και τα ορίσματα των ολοκληρωτικών υπολοίπων των μηχανών που συμμετέχουν στο ρυθμό διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας, ταξινομημένα κατά μέτρο. Το Σχήμα 4.13 δίνει τα ίδια αποτελέσματα σε γράφημα.

Πίνακας 4.11: Τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα των μηχανών για το ρυθμό GR-TR

Μέτρο	Φάση	Όνομα Μηχανής
1,00000	130,62	ALARKO
0,41330	169,74	HAMITABAT_0
0,39790	128,95	HAMITABAT_1
0,39790	128,95	HAMITABAT_2
0,27550	77,219	KOMOTHNH_3
0,25980	77,343	KOMOTHNH_1
0,25900	77,381	KOMOTHNH_2
0,14020	-4,1722	MEΓAΛOΠOΛH_4
0,12720	-6,6789	MEΓAΛOΠOΛH_3
0,07572	93,500	ΘΗΣΑΥΡΟΣ_3
0,07572	93,500	ΘΗΣΑΥΡΟΣ_2
0,07572	93,500	ΘΗΣΑΥΡΟΣ_1
0,06614	5,5288	MEΓAΛOΠOΛH_2
0,06614	5,5288	MEΓAΛOΠOΛH_1



Σχήμα 4.13 Απεικόνιση των ολοκληρωτικών υπολοίπων για το ρυθμό GR-TR

Από το Σχήμα 4.13 συμπεραίνουμε ότι καταλληλότερη μονάδα για την προσθήκη σταθεροποιητή είναι μια μονάδα του ΘΗΣ της Κομοτηνής, καθώς εμφανίζει το μεγαλύτερο μέτρο του ολοκληρωτικού υπολοίπου και αυτό ισοδυναμεί με μεγαλύτερη μετατόπιση της ιδιοτιμής του συγκεκριμένου ρυθμού προς τα δεξιά. Το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου δείχνουν την κατεύθυνση προς την οποία θα κινηθεί η ιδιοτιμή. Η τιμή του ορίσματος του ολοκληρωτικού υπολοίπου για τις μονάδες 1 και 2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής είναι 77° .

Όπως εξηγήσαμε και στην ενότητα 4.1.1 αυτού του κεφαλαίου, πέραν του ρυθμού διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας (GR-TR), υπάρχουν άλλοι δυο ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί σε μικρό εύρος συχνοτήτων. Αυτοί οι ρυθμοί, είναι οι ρυθμοί S-GR και Θράκης, για τους οποίους και παραθέτουμε τις τιμές των ολοκληρωτικών υπολοίπων σε μέτρο και όρισμα.

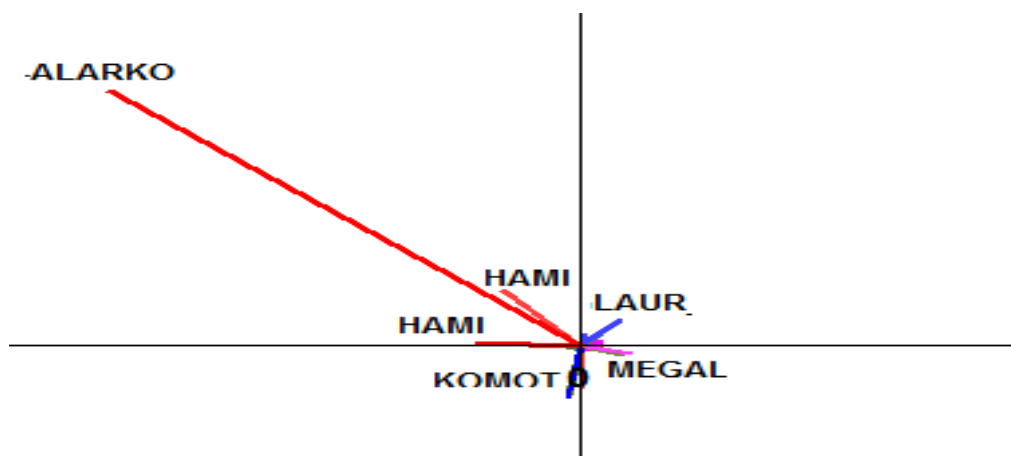
Ρυθμός S-GR

Τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα για το νότιο ρυθμό του Νότιου Συστήματος δίνονται στον Πίνακα 4.12 και στο Σχήμα 4.14. αντίστοιχα.

Πίνακας 4.12: Μέτρα και ορίσματα των ολοκληρωτικών υπολοίπων για το ρυθμό S-GR

Μέτρο	Φάση	Όνομα Μηχανής
1,0000	138,35	ALARKO
0,1862	130,87	HAMITABAT_1
0,1862	130,87	HAMITABAT_2
0,1624	176,81	HAMITABAT_0
0,1346	-99,217	KOMOTHNH_3

0,1271	-98,789	ΚΟΜΟΤΗΝΗ_1
0,1263	-98,767	ΚΟΜΟΤΗΝΗ_2
0,1060	-88,022	RCERNAΑ1
0,0890	46,112	ΛΑΥΡΙΟ_5
0,0325	-4,8227	ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_1
0,0325	-4,8227	ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_2



Σχήμα 4.14 Απεικόνιση των ολοκληρωτικών υπολοίπων των μηχανών για το ρυθμό του νοτίου συστήματος

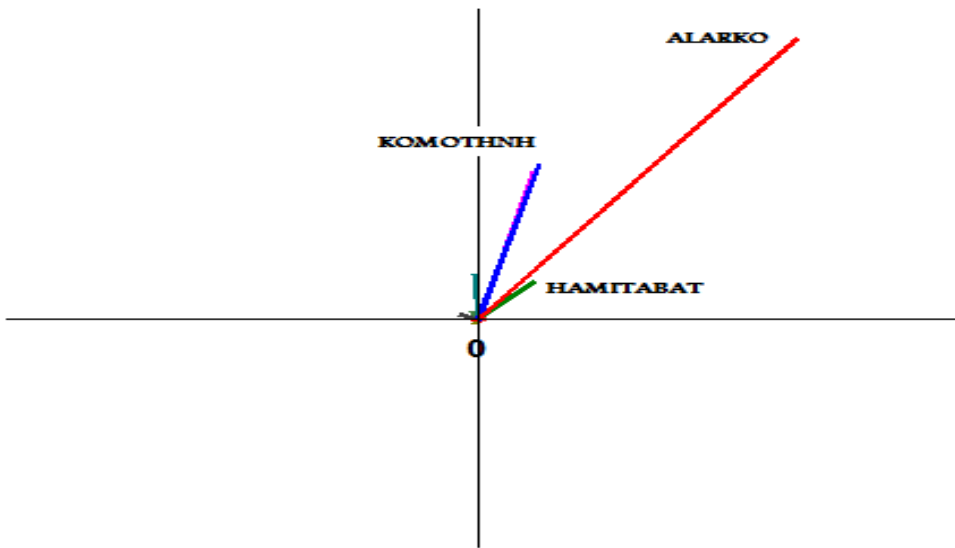
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14, το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου για τις μονάδες 1 και 2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής είναι -99° , αντίθετο με το όρισμα των μονάδων αυτών για το ρυθμό GR-TR.

Ρυθμός Θράκης

Στον Πίνακα 4.13 και στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζονται τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα των μηχανών για τον τοπικό ρυθμό της Θράκης.

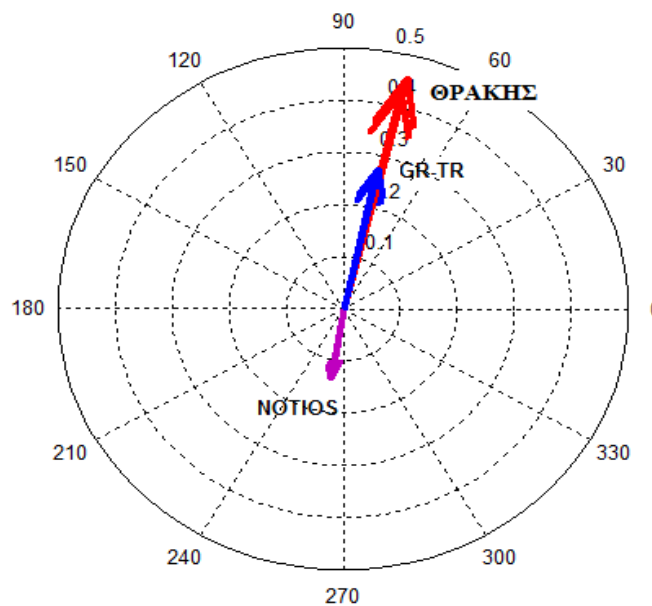
Πίνακας 4.13: Τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα των μηχανών για το ρυθμό Θράκης

Μέτρο	Φάση	Όνομα Μηχανής
1,0000	53,415	ALARKO
0,4554	75,720	ΚΟΜΟΤΗΝΗ_3
0,4299	76,168	ΚΟΜΟΤΗΝΗ_1
0,4269	76,196	ΚΟΜΟΤΗΝΗ_2
0,1482	46,710	ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_2
0,1482	46,710	ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_1
0,1262	93,759	ΗΑΜΙΤΑΒΑΤ_0
0,0430	89,877	ΘΗΣΑΥΡΟΣ_3



Σχήμα 4.15 Μορφή των ολοκληρωτικών υπολοίπων των μηχανών για το τοπικό ρυθμό της Θράκης

Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζουμε συγκεντρωτικά τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα για τη μονάδα 1 του ΘΗΣ της Κομοτηνής:



Σχήμα 4.16 Μορφή των ολοκληρωτικών υπολοίπων τις μονάδες της Κομοτηνής για τους ρυθμούς GR-TR, GR και S-GR

Στο Σχήμα 4.16 παρατηρούμε ότι για τη μονάδα 1 του ΘΗΣ της Κομοτηνής, το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου για το ρυθμό Θράκης είναι στις 77° και

ταυτίζεται με το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου για το ρυθμό GR-TR. Αντίθετα, το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου της μονάδας 1 του ΘΗΣ της Κομοτηνής για το ρυθμό S-GR είναι στις -99° , αντίθετα των άλλων δυο. Τα ίδια αποτελέσματα προκύπτουν και για τη μονάδα 2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής.

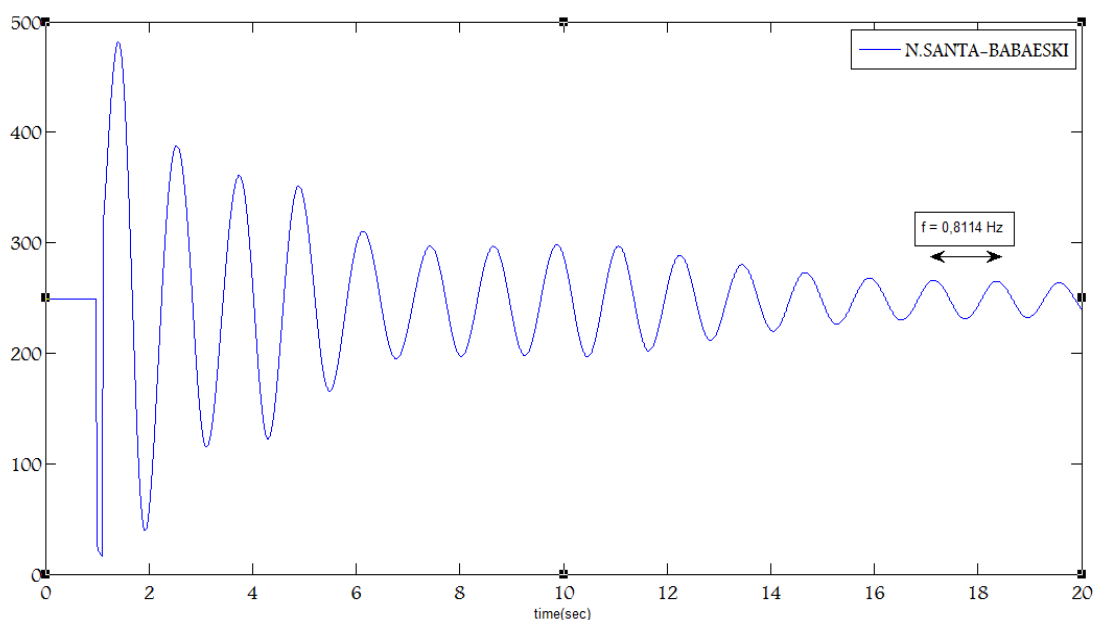
Έτσι, οι ρυθμοί GR-TR και Θράκης θα αποσβένονται μαζί με κατάλληλη γωνία προπορείας, όμως ο ρυθμός S-GR που παρεμβάλλεται, δεν μπορεί να διορθωθεί με την ίδια αντιστάθμιση φάσεως.

4.2 Απόκριση Συστήματος σε βραχυκύκλωμα (Ισχυρή Διασύνδεση)

Προκειμένου να αποτιμηθεί η μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος, εξετάζεται η απόκριση σε ένα τριφασικό αυτοεκαθαριζόμενο βραχυκύκλωμα στη γραμμή 400kV Θεσσαλονίκης-Φιλίππων. Στο Σενάριο Α, το βραχυκύκλωμα θεωρείται ότι εκκαθαρίζεται σε 120msec και όπως και πριν τη διαταραχή, μετά το βραχυκύκλωμα η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων λειτουργεί κανονικά.

Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν με το πρόγραμμα PSS/E Ver.30 της Siemens /PTI. Για τις προσομοιώσεις αυτές και την αρχικοποίηση, χρησιμοποιήθηκε το αρχείο εκείνο, με τα δυναμικά στοιχεία του συστήματος όπου λαμβάνονται υπόψη όλοι οι περιοριστές του συστήματος.

Η ταλάντωση της ροής ενεργού ισχύος στη γραμμή διασύνδεσης του ελληνικού συστήματος με την τουρκική νησίδα φαίνεται στο Σχήμα 4.17:

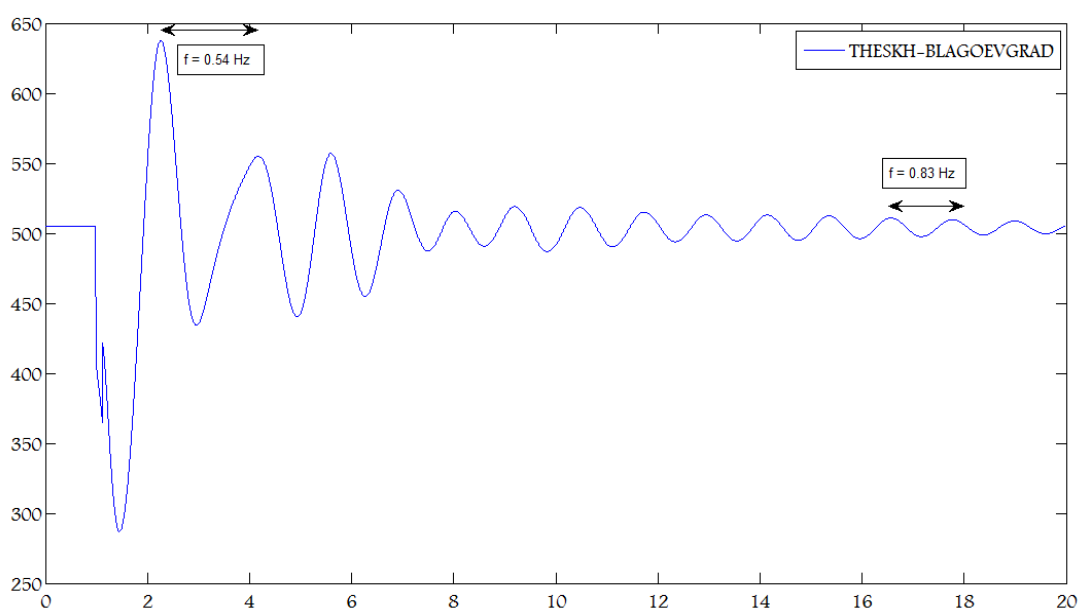


Σχήμα 4.17 Ροή ενεργού ισχύος στη γραμμή Νέα Σάντα-Babaeski, Διασύνδεση της Ελλάδος με την Τουρκία

Όπως υπολογίστηκε από το Σχήμα 4.17, μετρώντας την περίοδο των ταλαντώσεων, η συχνότητα ταλάντωσης που επικρατεί τελικά στη ροή ισχύος στη διασυνδετική γραμμή Ελλάδος –Τουρκίας είναι τα 0,81 Hz. Η τιμή αυτή, είναι ουσιαστικά η συχνότητα του ρυθμού διασύνδεσης GR-TR, που βρέθηκε με την ανάλυση ρυθμών μέσω των ιδιοτιμών στον Πίνακα 4.1. Επαληθεύεται έτσι, η ηλεκτρομηχανική ταλάντωση που υφίσταται μεταξύ των συστημάτων των δυο χωρών. Το ποσό ενεργού ισχύος που ταλαντώνεται φτάνει τα 30 MW.

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκε η συχνότητα ταλαντώσεων στις άλλες διασυνδετικές γραμμές του ελληνικού συστήματος. Όπως σημειώνεται και στα σχήματα, έχουμε περίπου την ίδια τιμή για την συχνότητα ταλαντώσεων σε κάθε περίπτωση. Συνεπώς, μετά τη διαταραχή, τελικά επικρατεί ο ρυθμός ταλάντωσης της διασύνδεσης του ελληνικού συστήματος με το κομμάτι της Τουρκίας, εξαιτίας της χαμηλής απόσβεσης που εμφανίζει.

Η ταλάντωση της ροής ενεργού ισχύος στη γραμμή διασύνδεσης Θεσσαλονίκης-Blagoevgrad φαίνεται στο Σχήμα 4.18:

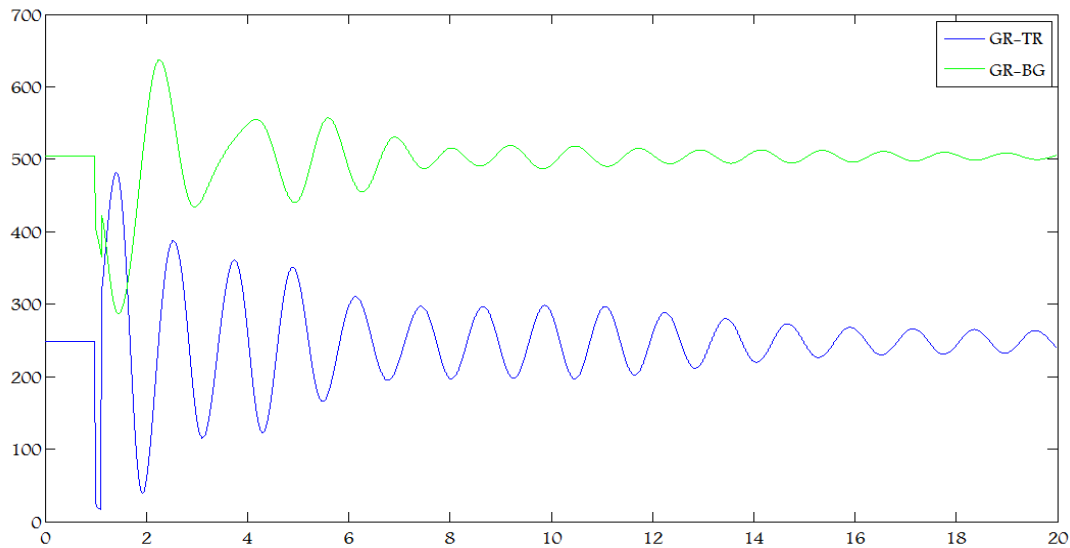


Σχήμα 4.18 Ροή ενεργού ισχύος στη γραμμή Θεσσαλονίκη- Blagoevgrad, Διασύνδεση της Ελλάδος με την Βουλγαρία

Πιο συγκεκριμένα, στη διασύνδεση του ελληνικού συστήματος με την Βουλγαρία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.18, η αρχική ταλάντωση που εμφανίζεται έχει συχνότητα 0,54 Hz, τιμή κοντά στη συχνότητα του διασυννοριακού ρυθμού του ελληνικού συστήματος, τα 0,6 Hz. Αυτή η ταλάντωση αποσβέννεται αμέσως και τελικά επικρατεί ο ρυθμός ταλάντωσης Ελλάδος-Τουρκίας στη συχνότητα κοντά στα 0,8 Hz με πολύ μικρότερη απόσβεση.

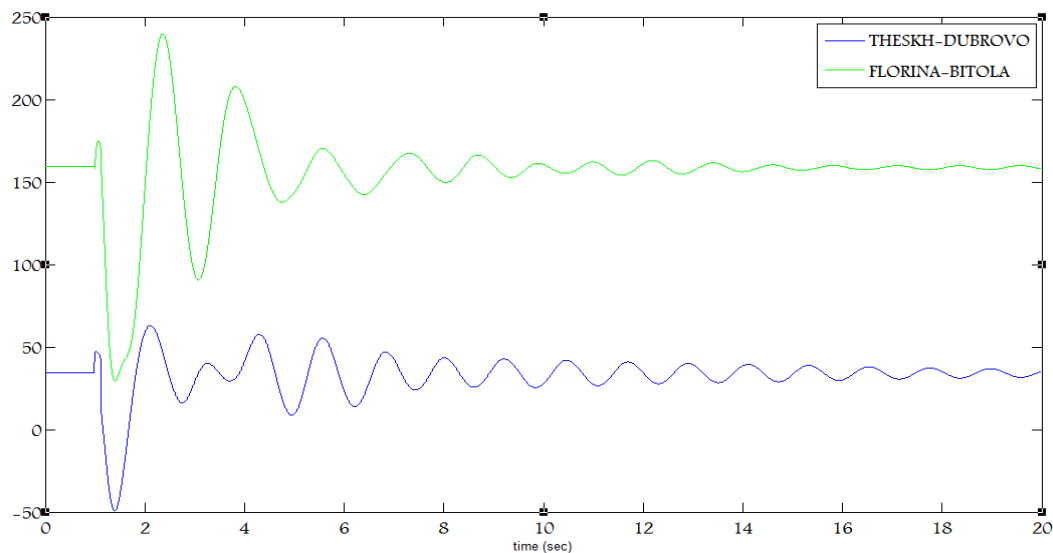
Η ταλάντωση της ενεργού ισχύος στις γραμμές διασύνδεσης του ελληνικού συστήματος με την τουρκική νησίδα και με το δίκτυο της Βουλγαρίας δίνεται στους ίδιους άξονες στο Σχήμα 4.19.

Παρατηρούμε πως στη διάρκεια των ταλαντώσεων, τη χρονική στιγμή που έχουμε εισαγωγή ισχύος από το τουρκικό στο Ελληνικό Σύστημα, έχουμε εξαγωγή ενός ποσού ισχύος στη Βουλγαρία. Αυτό προκύπτει από την αντίθεση φάσης που έχουν στο τέλος της προσομοίωσης οι ταλαντώσεις αυτές, στο Σχήμα 4.19.



Σχήμα 4.19 Σύγκριση των ροών ενεργού ισχύος στις διασυνδέσεις της Ελλάδος με την Τουρκία και την Βουλγαρία

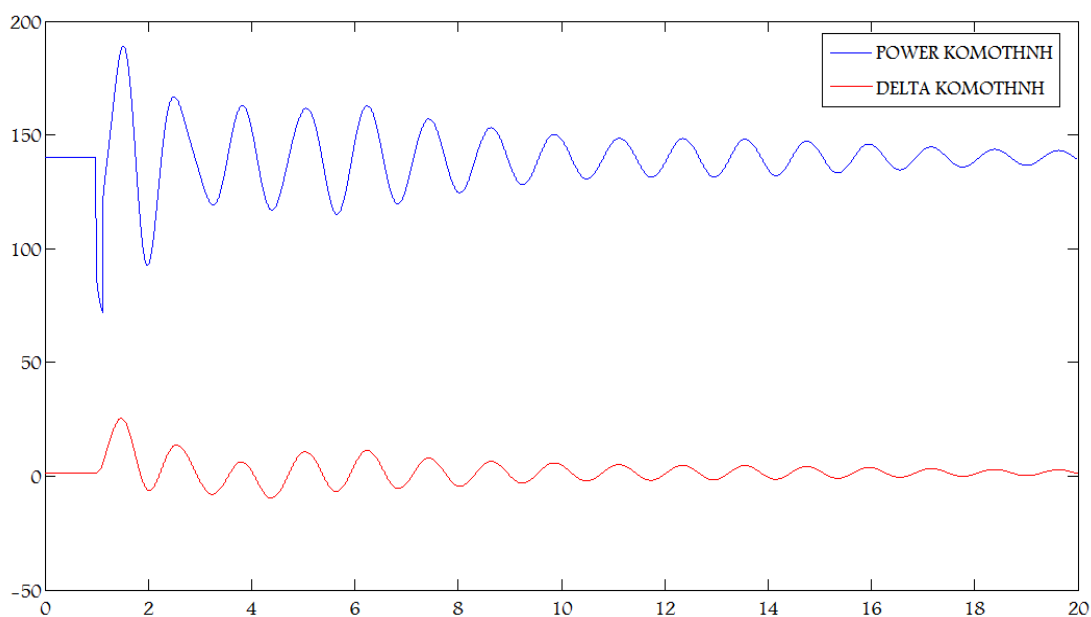
Αντίστοιχα η ταλάντωση της ροής ενεργού ισχύος και για τις δύο γραμμές διασύνδεσης του ελληνικού συστήματος με την Π.Γ.Δ.Μ φαίνεται στο Σχήμα 4.20:



Σχήμα 4.20 Ροή ενεργού ισχύος στις δύο διασυνδετικές γραμμές, Ελλάδα - Π.Γ.Δ.Μ., (Θεσσαλονίκη-Dubrono και Φλώρινα-Bitola)

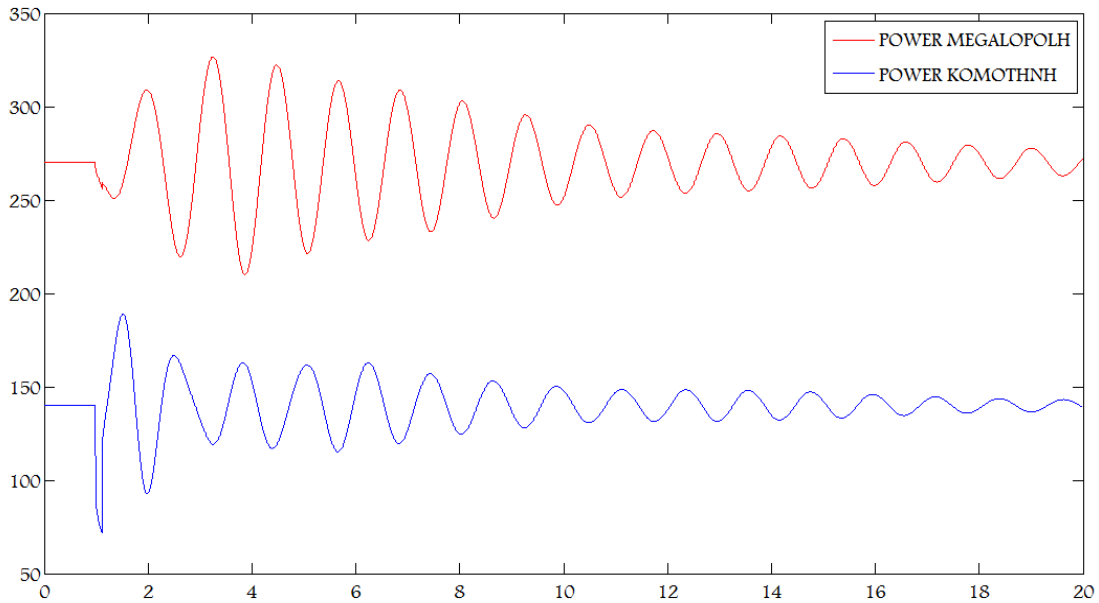
Και σε αυτές τις γραμμές διασύνδεσης, η αρχική ταλάντωση που εμφανίζεται οφείλεται στο ρυθμό του ελληνικού συστήματος, όμως μετά την επιβολή της διαταραχής διεγείρεται ο ρυθμός GR-TR, ο οποίος και επικρατεί τελικά μετά τα 8 sec.

Στο Σχήμα 4.21 παρουσιάζουμε την ταλάντωση που επικρατεί στην παραγωγή ισχύος και στη γωνία δ του δρομέα της μονάδας 1 του ΘΗΣ στην Κομοτηνή, (ζυγός 12487). Από το σχήμα φαίνεται ότι η συχνότητα ταλάντωσης που επικρατεί και στις δύο είναι αυτή του ρυθμού διασύνδεσης GR-TR.



Σχήμα 4.21 Ταλάντωση ισχύος και γωνίας δ του δρομέα της μηχανής στην Κομοτηνή

Στο Σχήμα 4.22 αντίστοιχα, δίνεται η ταλάντωση στην παραγωγή ισχύος μιας μονάδας 4 του σταθμού της Μεγαλόπολης σε σύγκριση με την ταλάντωση που επικρατεί στη μονάδα 1 του ΘΗΣ της Κομοτηνής.



Σχήμα 4.22 Σύγκριση ταλάντωσης ενεργού ισχύος μιας μηχανής στην Μεγαλόπολη και μιας μηχανής στην Κομοτηνή

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.22, η μονάδα του σταθμού της Μεγαλόπολης, συμμετέχει στο ρυθμό διασύνδεσης GR-TR, παρότι βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το σημείο διασύνδεσης. Στην περίπτωση της Μεγαλόπολης έχουμε ταλάντωση μεγαλύτερου ποσού ισχύος.

4.3 Δυναμική Ανάλυση Συστήματος για το σενάριο B (Εξασθενημένη Διασύνδεση)

Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία που ακολουθήσαμε στην ενότητα 4.1 αλλάζοντας μόνο την κατάσταση της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων. Στην ανάλυση που θα πραγματοποιήσουμε στην παρούσα ενότητα, θεωρούμε ότι η γραμμή 400kV Θεσσαλονίκης-Φιλίππων είναι απενεργοποιημένη. Συνεπώς, η σύνδεση της Τουρκίας με το Ελληνικό Σύστημα και η εισαγωγή ισχύος γίνεται ουσιαστικά μέσα από το δίκτυο των 150 kV, με αποτέλεσμα η σύνδεση των δυο συστημάτων να είναι σαφώς ασθενέστερη.

Θα υπολογίσουμε τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης του συστήματος και θα εξετάσουμε την επίδραση της απενεργοποίησης της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων στους ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς του συστήματος. Αφού υπολογιστούν οι ιδιοτιμές του συστήματος, προσδιορίζονται οι κρίσιμοι ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί που εμφανίζονται σε αυτή την περίπτωση λειτουργίας του συστήματος και παρουσιάζεται η μορφή τους. Τέλος, υπολογίζονται οι συντελεστές συμμετοχής και τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα για τους ρυθμούς αυτούς.

4.3.1 Ανάλυση Ρυθμών Ηλεκτρομηχανικής Ταλάντωσης

Υπολογίζουμε τις ιδιοτιμές του συστήματος με τη βοήθεια των πακέτων της Siemens/PTI και του λογισμικού PacDyn/CEPEL. Μας ενδιαφέρουν οι μιγαδικές ιδιοτιμές που εμφανίζουν μικρό αρνητικό πραγματικό μέρος και χαμηλό λόγο απόσβεσης στο εύρος εμφάνισης ηλεκτρομηχανικών ρυθμών.

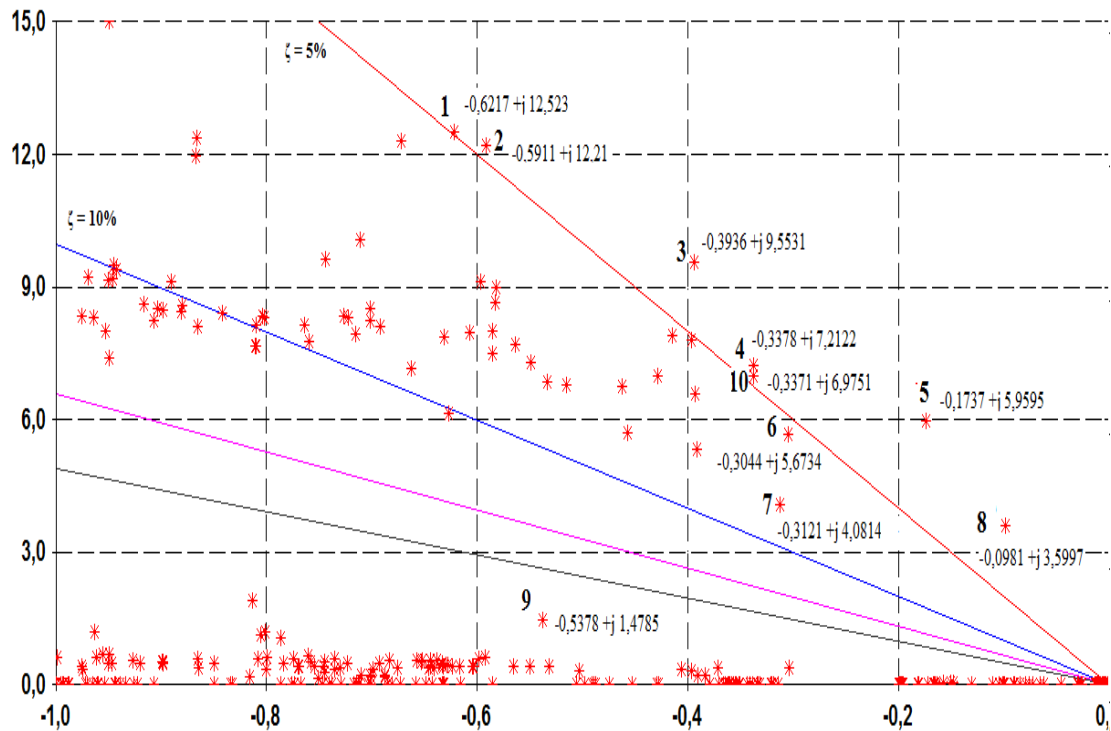
Στον Πίνακα 4.14, δίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δύο εκδόσεις του PSS/E και από το PacDyn για τις ιδιοτιμές οι οποίες αντιστοιχούν σε ρυθμούς με χαμηλή απόσβεση, μικρότερη του 5% και στους διασυνοριακούς ρυθμούς ταλάντωσης του Ελληνικού και του Ευρωπαϊκού Συστήματος.

Πίνακας 4.14: Οι κυρίαρχοι ρυθμοί του συστήματος

	PSS/E 30	PSS/E 29	PACDYN	Περιγραφή
1	-0,62513 +j 12,530	-0,62521 +j 12,530	-0,6217 +j 12,523	Τοπικός 1 (Καρδιά)
2	-0,59312 +j 12,217	-0,59337 +j 12,217	-0,5911 +j 12,21	Τοπικός 2 (Αγ.Δημ)
3	-0,39533 +j 9,5412	-0,39531 +j 9,5413	-0,3936 +j 9,5531	Τοπικός 3 (BG)
4	-0,33909 +j 7,2154	-0,33913 +j 7,2157	-0,3378 +j 7,2122	Τοπικός 4 (Καστράκι)
5	-0,18064 +j 5,9513	-0,18029 +j 5,9509	-0,1737 +j 5,9595	Θράκης
6	-0,43936 +j 5,6723	-0,44056 +j 5,6743	-0,3044 +j 5,6734	Νότιος (S-GR)
7	-0,29998 +j 4,0862	-0,29675 +j 4,0869	-0,3121 +j 4,0814	GR – TR
8	-0,09519 +j 3,5769	-0,09380 +j 3,5738	-0,0981 +j 3,5997	Inter-area GR
9	-0,53357 +j 1,4839	-0,53511 +j 1,4859	-0,5378 +j 1,4785	Inter-area UCTE
10	-0,33588 +j 6,9652	-0,33595 +j 6,9653	-0,3371 +j 6,9751	Τοπικός 5 (TR)

Στον Πίνακα 4.14 φαίνεται πως το κάθε πακέτο δίνει διαφορετικές τιμές για την κάθε ιδιοτιμή. Παρατηρούμε, ότι οι εκδόσεις v29 PSS/E και v30 εμφανίζουν μικρότερες αποκλίσεις στα αποτελέσματά τους.

Στο Σχήμα 4.23 απεικονίζονται οι ιδιοτιμές (πόλοι) του συστήματος όπως υπολογίστηκαν από το PacDyn, και σημειώνονται σε αυτό οι ιδιοτιμές από την αντίστοιχη στήλη του Πίνακα 4.14 καθώς και ο αριθμός που αντιστοιχεί στον κάθε ρυθμό.



Σχήμα 4.23 Οι πόλοι του συστήματος(Σενάριο B)

Οι ιδιοτιμές που έχουν σημειωθεί στο Σχήμα 4.23 έχουν υπολογισθεί μέσω του πακέτου PacDyn και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.15 σημειώνοντας την τιμή του λόγου απόσβεσης και την τιμή της συχνότητας για κάθε ρυθμό.

Πίνακας 4.15: Οι ιδιοτιμές του συστήματος (με απώλεια γραμμής)

	λ_i	$\zeta \%$	f (Hz)	Περιγραφή
1	-0,6217 +j 12,523	4,9586	1,9930	Τοπικός 1 (Καρδιά)
2	-0,5911 +j 12,21	4,8353	1,9432	Τοπικός 2 (Αγ.Δημ)
3	-0,3936 +j 9,5531	4,1172	1,5204	Τοπικός 3 (BG)
4	-0,3378 +j 7,2122	4,6788	1,1479	Τοπικός 4 (Καστράκι)
5	-0,1737 +j 5,9595	2,9132	0,9485	Θράκης
6	-0,3044 +j 5,6734	5,3580	0,9030	Νότιος (S-GR)
7	-0,3121 +j 4,0814	7,6242	0,6496	GR – TR
8	-0,0981 +j 3,5997	2,7251	0,5729	Inter-area GR
9	-0,5378 +j 1,4785	34,183	0,2353	Inter-area UCTE
10	-0,3371 +j 6,9751	4,8277	1,1101	Τοπικός 5 (TR)

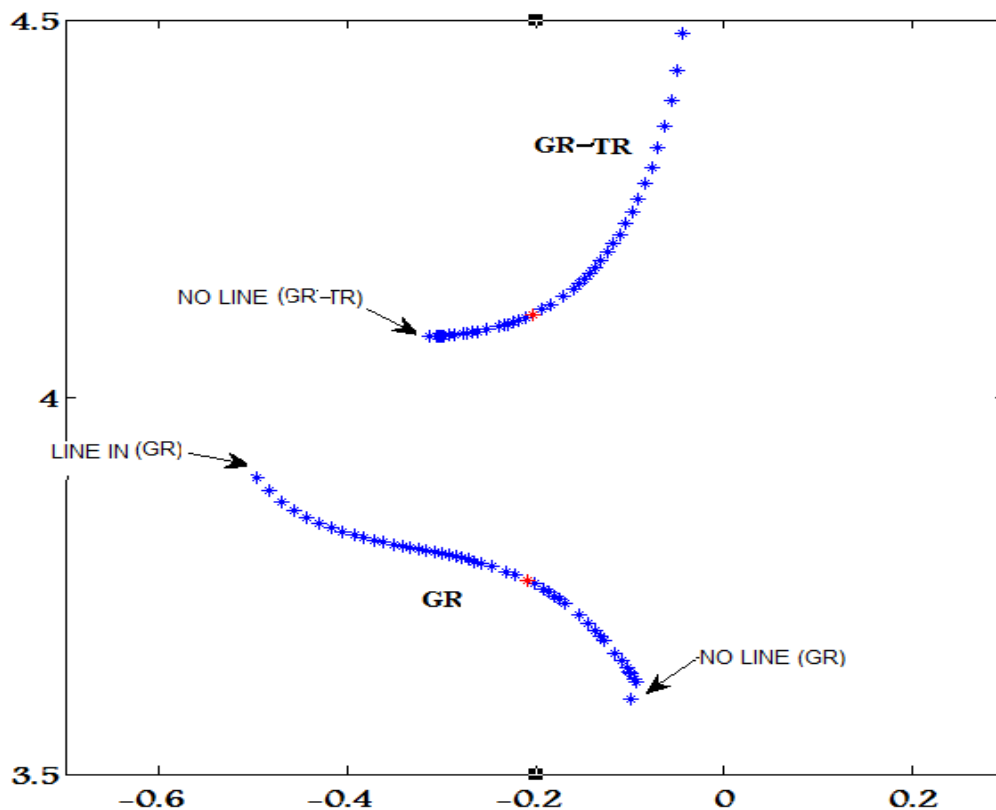
Οι τοπικοί ρυθμοί 1,2,3,4,5 όπως και ο ρυθμός της UCTE υπήρχαν και στο σενάριο A και παρέμειναν ουσιαστικά αμετάβλητοι με το άνοιγμα της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων. Ο τοπικός ρυθμός 10 είναι ένας ηλεκτρομηχανικός ρυθμός που

εμφανίζεται με το άνοιγμα της γραμμής μεταφοράς Θεσσαλονίκης-Φιλίππων με απόσβεση κοντά στο 5% και αφορά τοπική ταλάντωση μεταξύ των μονάδων της Τουρκίας. Ο ρυθμός 6 είναι ο νότιος ρυθμός του ελληνικού συστήματος (S-GR), ο οποίος έχει μεταβληθεί με το άνοιγμα της γραμμής. Από τους ρυθμούς 7 και 8 δεν είναι ευδιάκριτο με την πρώτη ματιά ποιος είναι ο ρυθμός GR-TR και ποιος ο ρυθμός GR, καθώς μετά το άνοιγμα της γραμμής οι ιδιοτιμές πλησιάζουν πολύ μεταξύ τους. Λόγω της αλληλεπίδρασης των δύο ρυθμών και εξαιτίας ισχυρού συντονισμού, όπως θα φανεί και στα σχήματα απεικόνισης των ιδιοδιανυσμάτων των ρυθμών αυτών, η μορφή των δύο ρυθμών είναι παρόμοια και είναι δύσκολο να ξεχωρίσουμε τους δύο ρυθμούς. Όλα τα παραπάνω εξηγούνται λεπτομερώς στην ενότητα 4.3.2 που ακολουθεί.

4.3.2. Συντονισμός Ρυθμών

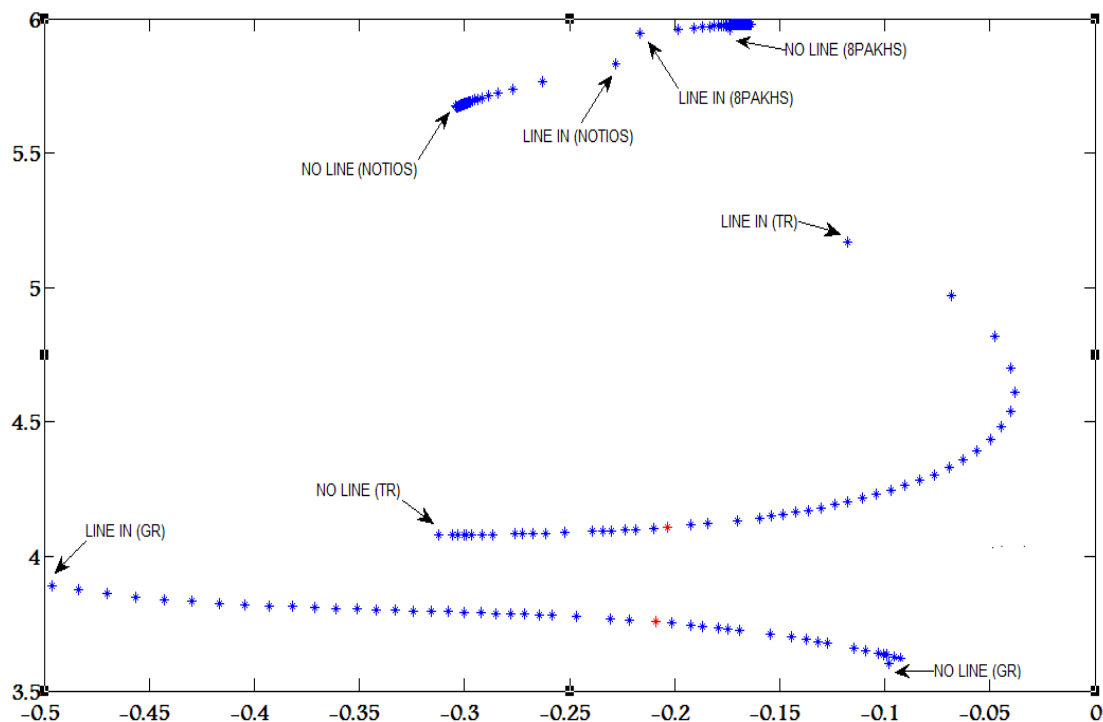
Έως τώρα είδαμε την μεταβολή των ιδιοτιμών του συστήματος για δύο ακραίες καταστάσεις του συστήματος, είτε με τη γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων ενεργοποιημένη είτε με τη γραμμή απενεργοποιημένη. Με αυτή την αλλαγή στην κατάσταση του δικτύου, οι ιδιοτιμές του συστήματος μεταβάλλονται και η σύνδεση γίνεται ασθενέστερη καθώς η εισαγωγή της ισχύος από την Τουρκία γίνεται μέσα από το δίκτυο των 150kV. Από τις τιμές του Πίνακα 4.15 παρατηρούμε ότι οι συχνότητες των ρυθμών GR-TR και GR έχουν πλησιάσει πολύ στην περίπτωση που η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Ο ένας ρυθμός έχει χαμηλή απόσβεση ενώ η απόσβεση του άλλου ρυθμού κρίνεται ικανοποιητική. Για να χαρακτηρίσουμε με σιγουριά τους δύο αυτούς ρυθμούς θα εξετάσουμε τη μετατόπιση των ιδιοτιμών αυτών στη μεταβολή κάποιας παραμέτρου. Η παράμετρος αυτή θα είναι η σύνθετη αντίσταση της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων, μεταβάλλοντας την από την πραγματική της τιμή έως το άπειρο (θεωρητικά).

Έστω K ο συντελεστής πολλαπλασιασμού της σύνθετης αντίστασης Z της γραμμής. Στο Σχήμα 4.24 που ακολουθεί δείχνονται οι ρυθμοί GR και GR-TR του συστήματος και η μεταβολή τους με την αλλαγή της σύνθετης αντίστασης της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων. Παρατηρούμε ότι η μεταβολή της τιμής της σύνθετης αντίστασης της γραμμής προκαλεί στροφή των δύο ιδιοτιμών προς διαφορετικές κατευθύνσεις και την απότομη απομάκρυνσή τους. Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των δύο ρυθμών είναι της τάξης των 90° . Οι ρυθμοί πλησιάζουν πολύ μεταξύ τους, περνούν από ένα σημείο ισχυρού συντονισμού και μετά απομακρύνονται απότομα. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο διασυννοριακός ρυθμός του ελληνικού συστήματος (GR) είναι αυτός που τελικώς μετατοπίζεται προς τα δεξιά με το άνοιγμα της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων. Αντίθετα, ο ρυθμός της διασύνδεσης Ελλάδος –Τουρκίας (GR-TR), μετατοπίζεται προς τα αριστερά με το άνοιγμα της γραμμής και αποκτά ικανοποιητική απόσβεση.



Σχήμα 4.24 Μετατόπιση των ρυθμών χαμηλής απόσβεσης λόγω αύξησης της σύνθετης αντίστασης της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων

Στο Σχήμα 4.25 φαίνεται πιο αναλυτικά η μετατόπιση των ιδιοτιμών του ρυθμού GR και GR-TR. Με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι ιδιοτιμές των δύο ρυθμών για την τιμή της σύνθετης αντίστασης της γραμμής για την οποία οι ιδιοτιμές του συστήματος έχουν την μικρότερη μεταξύ τους απόσταση. Αυτές οι ιδιοτιμές αντιστοιχούν σε σύνθετη αντίσταση της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων 35 φορές μεγαλύτερη της πραγματικής. Να παρατηρήσουμε εδώ, ότι ενώ η ιδιοτιμή του ρυθμού GR-TR με το άνοιγμα της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων μετατοπίζεται προς τα αριστερά, μόλις με την αύξηση της αντίστασης Z της γραμμής στο πενταπλάσιο της πραγματικής της τιμής, η ιδιοτιμή του ρυθμού GR-TR μετατοπίζεται δεξιότερα από την αρχική της τιμή. Στο Σχήμα 4.25 φαίνεται επίσης η αύξηση του λόγου απόσβεσης του ρυθμού S-GR καθώς αυξάνεται η σύνθετη αντίσταση της γραμμής.



Σχήμα 4.25 Μετατόπιση των ρυθμών GR-TR, GR,S-GR λόγω αύξησης της σύνθετης αντίστασης της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων

Η συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης GR-TR από τα 0,82 Hz είναι τώρα $f = 0,65\text{Hz}$, ενώ ο λόγος απόσβεσης από 2,26% είναι 7,62%. Η συχνότητα του ρυθμού GR από $f=0,62$ γίνεται $f=0,57$ Hz, ενώ ο λόγος απόσβεσης ζ του ρυθμού αυτού είναι ο χαμηλότερος στο σύστημα για την περίπτωση που η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων είναι απενεργοποιημένη, με τιμή 2,72%.

4.3.3 Μορφή Ρυθμών Ηλεκτρομηχανικής Ταλάντωσης

Θα αναλύσουμε τη μορφή των ρυθμών που επισημάναμε στον Πίνακα 4.15 και θα δούμε λεπτομερώς τη μορφή των ρυθμών GR-TR και GR οι οποίοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους εξαιτίας του συντονισμού. Ανάλογα με το ποιες μονάδες συμμετέχουν σε κάθε ρυθμό και πως διαμορφώνουν αυτές τη μορφή του ρυθμού θα αποσαφηνιστεί το είδος του κάθε ρυθμού. Γενικά τα χαρακτηριστικά των ρυθμών στην περίπτωση ισχυρού συντονισμού δεν έχει μεγάλη σημασία γιατί οι δύο ρυθμοί βρίσκονται σε στενή εξάρτηση.

Πραγματοποιήσαμε την ίδια ανάλυση με το PSSE και το PacDyn και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους αντίστοιχους πίνακες που ακολουθούν. Στον κάθε πίνακα, δίνονται το μέτρο και η φάση των ιδιοδιανυσμάτων που αντιστοιχούν στις

μεταβλητές κατάστασης Δδ των μηχανών που συμμετέχουν στον κάθε ρυθμό. Τα στοιχεία των ιδιοδιανυσμάτων κανονικοποιούνται ώστε το μεγαλύτερο στοιχείο να έχει μοναδιαίο μέτρο. Μετά από κάθε πίνακα, παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα γραφήματα για τον εν λόγω ρυθμό.

Παρατηρώντας τις τιμές του πίνακα για κάθε ρυθμό, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των δυο προγραμμάτων είναι ταυτόσημα για μέτρο και φάση. Έτσι για λόγους σύγκρισης, ορίζουμε και εδώ, σαν διάνυσμα αναφοράς για κάθε σχήμα, το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στη τουρκική μονάδα στο ALARKO, έτσι ώστε να είναι εμφανής η ομοιότητα των γραφημάτων.

Ρυθμός Διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας (GR-TR)

Θα αναλύσουμε τη μορφή του ρυθμού GR-TR, του οποίου τα στοιχεία του ιδιοδιανύσματος δίνονται στον Πίνακα 4.16 όπως προέκυψαν από το κάθε πρόγραμμα ανάλυσης ρυθμών. Στον Πίνακα 4.16 παρουσιάζεται ενδεικτικά μία μονάδα για κάθε σταθμό παραγωγής στο Ελληνικό Σύστημα, καθώς οι μονάδες ενός σταθμού παραγωγής ταυτίζονται σε μέτρο και φάση. Για τις υπόλοιπες χώρες, δίνονται ενδεικτικά τα δύο μεγαλύτερα στοιχεία για κάθε χώρα. Όλα τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα έχουν μέτρο μεγαλύτερο του 0,20.

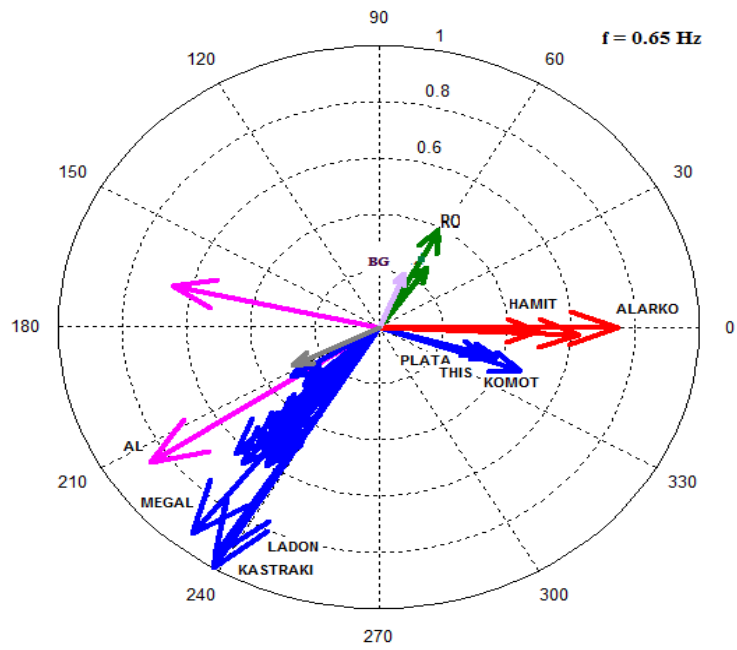
Σε αυτόν το ρυθμό, ($\lambda = -0,30 + j4,08$) έχουμε ταλάντωση των περισσότερων ελληνικών μονάδων εν φάση. Οι ελληνικές και οι τουρκικές μονάδες της Θράκης, ταλαντώνονται με διαφορετική φάση από τις υπόλοιπες μονάδες της Ελλάδος. Συγκεκριμένα οι μονάδες της Κομοτηνής εμφανίζουν μια φασική απόκλιση από τις άλλες ελληνικές μονάδες μεγέθους 120° περίπου. Συνεπώς ο ρυθμός αυτός αφορά την ταλάντωση μεταξύ του ελληνικού συστήματος και των μονάδων της Θράκης.

Πίνακας 4.16: Δεξί ιδιοδιάνυσμα για το ρυθμό GR-TR

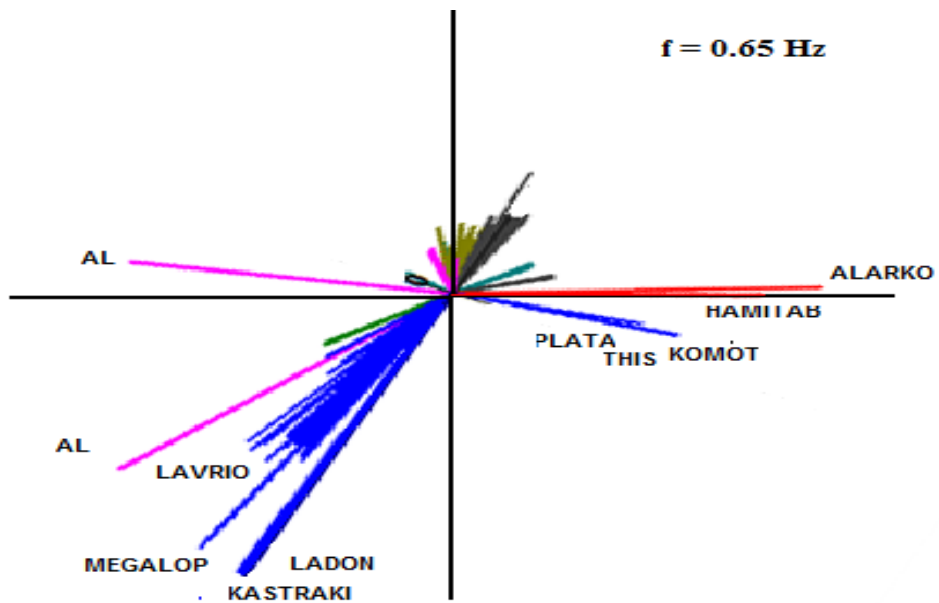
Όνομα Μηχανής	Ζυγός	PSS/E		PACDYN	
		Μέτρο	Φάση	Μέτρο	Φάση
GKASTR_G	81387	1,00000	-138,21	1	0.
GLADON_G	68187	0,96013	-139,18	0,9618	-1,0485
GMEGAL_G	62177	0,93800	-145,35	0,9368	-7,1811
AFIERZG3	10501	0,85872	-162,86	0,8597	-25,254
T-ALARKO	11300	0,74640	-17,331	0,7365	116,93
AKOMANG3	10502	0,66005	150,10	0,6517	-73,017
GAHSAG_G	56187	0,64353	-148,09	0,6374	-10,213
GBLAVR_G	59277	0,63605	-151,59	0,6302	-14,307
TG-4HAMIT	11022	0,62505	-19,578	0,6164	114,77
GAWOS_G	84687	0,60581	-142,57	0,6017	-4,6641
GPOURI_G	80387	0,58811	-143,14	0,5881	-5,4162

GPOLUF_G	26387	0,56728	-146,07	0,5625	-8,3214
GMPAKO_G	73187	0,56378	-143,80	0,5579	-6,0808
GALIVE_G	43487	0,56016	-148,98	0,5557	-11,231
GLOURO_G	84187	0,53433	-143,85	0,5467	-6,0552
GHRWN_G	77387	0,54109	-147,31	0,5378	-9,6522
GSTRAT2G	72397	0,53578	-144,37	0,5348	-6,4752
GPLAST_G	35187	0,53740	-144,30	0,5323	-6,5349
GGIWNA_G	44197	0,52679	-143,92	0,5234	-6,1674
GKOMOT_G	12687	0,46851	-36,202	0,4676	98,89
GPTOLEMG	25187	0,46275	-149,15	0,4595	-11,506
GAGRAS_G	28187	0,45064	-142,94	0,4492	-5,244
GLIPTOLG	25687	0,43977	-149,33	0,4361	-11,385
RCERNAA1	29218	0,39405	43,991	0,4037	-177,22
GTHISA_G	19187	0,38523	-33,367	0,3893	101,47
GASOMA_G	29287	0,35653	-146,62	0,3554	-8,9976
GAGDHM_G	22377	0,32962	-151,70	0,3543	-19,244
GPLATA_G	19587	0,34144	-33,546	0,3452	101,36
GKARD_G	23277	0,34275	-151,06	0,339	-13,571
GFLWRING	29577	0,32570	-163,85	0,3215	-26,571
GELPE_G2	17187	0,31157	-155,58	0,308	-20,196
YTBIT2G2	26302	0,29972	-170,06	0,2985	-32,639
YTBIT2G1	26301	0,29972	-170,06	0,2979	-33,065
GAMUNT_G	21277	0,28803	-154,31	0,2865	-16,841
RCRAIOF2	29219	0,28719	37,340	0,2827	172,92
VTMI12M1	13700	0,20583	49,606	0,2231	-171,69
VTMI12M1	13700	0,20583	49,606	0,2231	-171,69

Στα Σχήματα 4.26 και 4.27 απεικονίζεται η μορφή του ρυθμού, όπως προέκυψε από τα προγράμματα PSS/E και PacDyn αντίστοιχα:



Σχήμα 4.26 Η μορφή του ρυθμού GR-TR (PSS/E).



Σχήμα 4.27 Η μορφή του ρυθμού GR-TR (PacDyn).

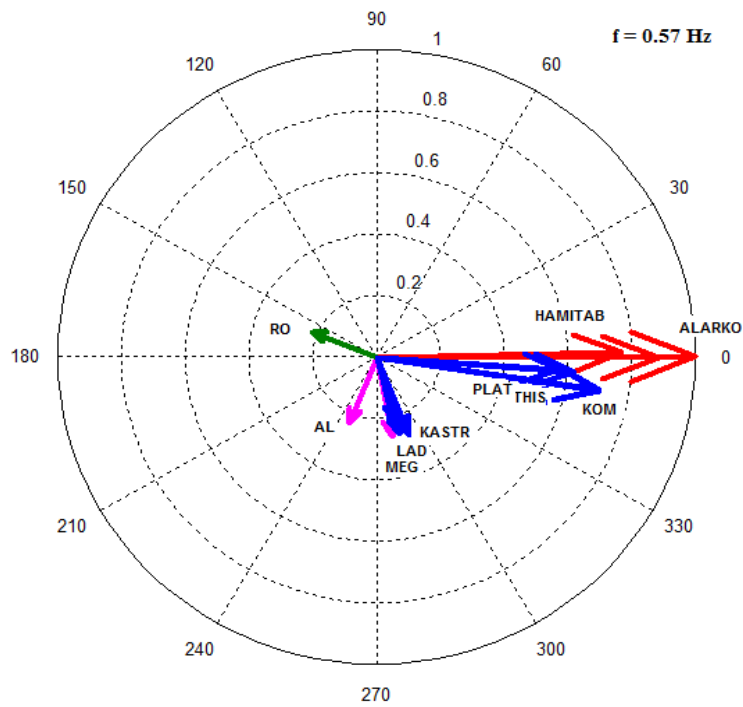
Διασυννοριακός Ρυθμός Ελληνικού Συστήματος (GR)

Στον πίνακα 4.17, παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές των στοιχείων του ιδιοδιανύσματος για τις μεταβλητές κατάστασης που αντιστοιχούν στις γωνίες των μηχανών, για το ρυθμό GR του Πίνακα 4.15, ο οποίος εμφανίζει την χαμηλότερη απόσβεση όλων. Στον Πίνακα παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία του ιδιοδιανύσματος με μέτρο μεγαλύτερο του 0,20. Στα Σχήματα 4.28 και 4.29 απεικονίζεται η μορφή του ρυθμού, όπως πρόεκυψε από τα προγράμματα PSS/E και PacDyn αντίστοιχα, βάσει των μέτρων και των φάσεων των ιδιοδιανυσμάτων του Πίνακα 4.17.

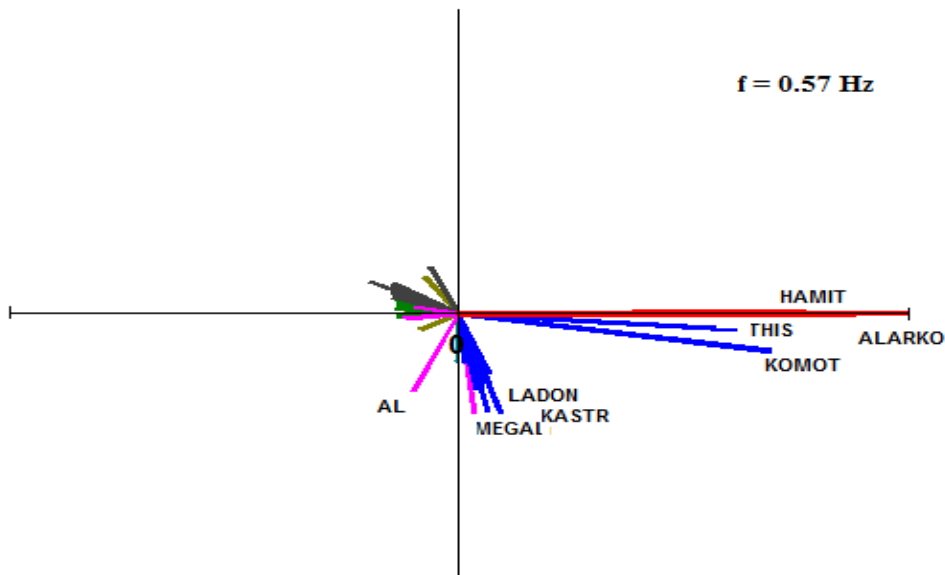
Πίνακας 4.17: Δεξιά ιδιοδιανύσματα για το ρυθμό GR

Όνομα Μηχανής	PSSE		PACDYN	
	Μέτρο	Φάση	Μέτρο	Φάση
ALARKO	1	-54,974	1,0000	0
HAMIT	0,88607	-55,255	0,8847	-0,3058
HAMIT	0,88606	-55,255	0,8847	-0,3058
HAMIT	0,77023	-54,013	0,7700	0,7432
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_3	0,70632	-63,892	0,7057	-8,3312
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_1	0,70550	-63,754	0,7049	-8,1300
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_2	0,70478	-63,743	0,7042	-8,1315
ΘΗΣΑΥΡΟΣ_2	0,62311	-59,642	0,6248	-4,1965
ΘΗΣΑΥΡΟΣ_1	0,62309	-59,641	0,6248	-4,1965
ΘΗΣΑΥΡΟΣ_3	0,62299	-59,639	0,6248	-4,1965
ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ_4	0,57472	-59,324	0,5754	-3,8304
ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ_3	0,57472	-59,324	0,5754	-3,8304
ΚΑΣΤΡΑΚΙ_3	0,27498	-123,02	0,2869	-70,645
ΚΑΣΤΡΑΚΙ_2	0,27458	-123,03	0,2867	-70,648
ΚΑΣΤΡΑΚΙ_4	0,27436	-123,05	0,2866	-70,649
ΛΑΔΩΝΑΣ_2	0,26504	-123,63	0,2771	-71,288
ΛΑΔΩΝΑΣ_1	0,26495	-123,65	0,277	-71,293
AFIERZG3	0,26308	-134,43	0,2727	-82,594
AFIERZG3	0,26308	-134,43	0,2727	-82,594
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_4	0,26052	-128,69	0,2716	-76,302
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_3	0,25744	-128,59	0,2679	-76,263
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_1	0,25035	-128,46	0,2611	-76,084
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_2	0,25035	-128,46	0,2611	-76,084
ΑΚΟΜΑΝG3	0,23006	-166,42	0,2336	-115,59
ΑΚΟΜΑΝG3	0,23006	-166,42	0,2336	-115,59
RCERNA1	0,21650	103,21	0,2161	156,61
ΛΑΥΡΙΟ_2	0,20672	-129,43	0,2118	-77,857

Στα Σχήματα 4.28 και 4.29 απεικονίζεται η μορφή του ρυθμού, όπως προέκυψε από τα προγράμματα PSS/E και PacDyn αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι τα δύο προγράμματα δίνουν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα.



Σχήμα 4.28 Μορφή ρυθμού GR (PSS/E)



Σχήμα 4.29 Μορφή ρυθμού GR (PacDyn).

Στο ρυθμό αυτό, ($\lambda = -0,09 + j 3,57$), έχουμε ταλάντωση των τουρκικών γεννητριών εν φάση με τις ελληνικές μηχανές στη Θράκη. Οι υπόλοιπες μονάδες της Ελλάδος με κυρίαρχη συμμετοχή αυτών της Μεγαλόπολης, του Λάδωνα και του Καστρακίου ταλαντώνονται όλες μαζί, με διαφορά φάσης περίπου 60° από αυτή των μονάδων της Θράκης. Συνεπώς, ο ρυθμός αυτός, εκφράζει τον διασυνοριακό ρυθμό του ελληνικού συστήματος μαζί, αν και η μορφή του σε σχέση με τη μορφή του ρυθμού GR στο σενάριο A έχει αλλάξει εξαιτίας του συντονισμού του ρυθμού με το ρυθμό GR-TR.

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 4.27 και 4.29, παρατηρείται η ομοιότητα των δύο ρυθμών στη μορφή τους, γεγονός που οφείλεται όπως εξηγήσαμε και παραπάνω, στην αλληλεπίδραση των δυο ρυθμών και την εμφάνιση συντονισμού των δύο ρυθμών.

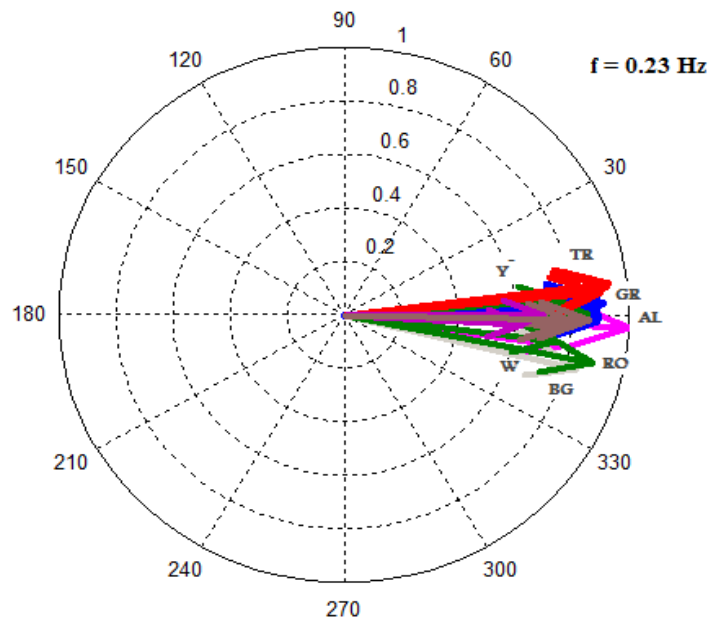
Ρυθμός Βαλκανικού Συστήματος ως προς UCTE

Ο ρυθμός αυτός παραμένει αμετάβλητος, με το άνοιγμα της γραμμής μεταφοράς. Στο ρυθμό αυτό όλες οι μονάδες του συστήματος, όλων των χωρών, ταλαντώνεται με την ίδια φάση, με συχνότητα $f=0,23$ Hz. Ο πίνακας 4.18 παρουσιάζει ενδεικτικά μόνο το μεγαλύτερο στοιχείο του ιδιοδιάνυσματος του ρυθμού αυτού για κάθε χώρα.

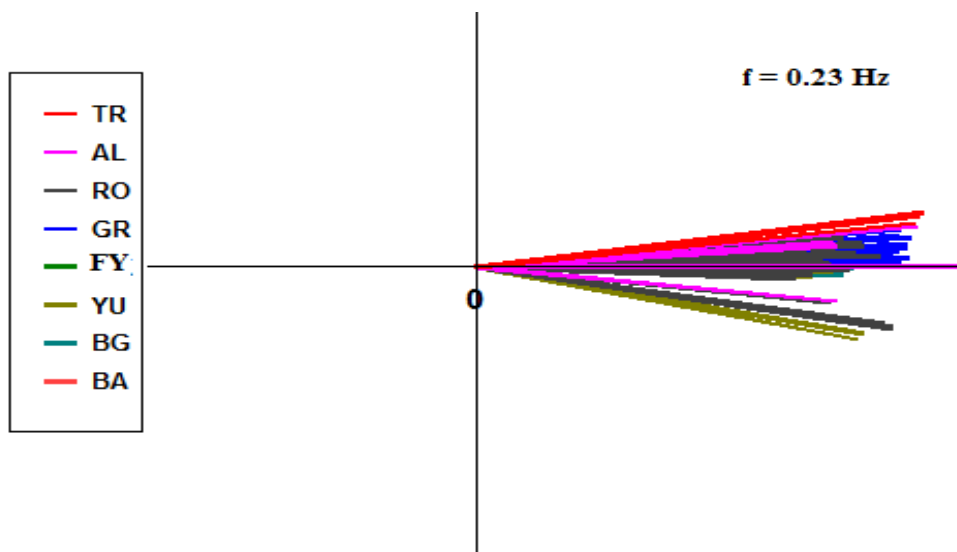
Στα Σχήματα 4.30 και 4.31 παρουσιάζεται η μορφή του ρυθμού. Στα σχήματα το σύμβολο GR αντιστοιχεί στις ελληνικές μονάδες, το TR στην Τουρκία, το W (ή το BA) αντιστοιχεί στη Βοσνία-Ερζεγοβίνη, το RO στη Ρουμανία, το BG (ή το V) στη Βουλγαρία, το AL στην Αλβανία, το J (ή το FY) στην Π.Γ.Δ.Μ και το Y στη Σερβία.

Πίνακας 4.18: Δεξί ιδιοδιάνυσμα για το ρυθμό UCTE

Όνομα Μηχανής	Ζυγός Μηχανής	PSS/E		PACDYN	
		Μέτρο	Φάση	Μέτρο	Φάση
AKOMANG3	10502	1,00000	165,20	1,0000	0
T-ALARKO	11300	0,93845	175,08	0,9354	8,5499
GKOMOT_G	12687	0,91189	170,55	0,9031	4,7621
RPDFE1F4	29191	0,89072	156,27	0,8731	-10,156
YTBIT2G3	26303	0,86003	166,49	0,8492	1,1684
JHDJERG1	35001	0,83711	154,07	0,8171	-12,149
VHTESHK1	13811	0,80289	166,30	0,7813	0,4462
WHTREBG3	14004	0,69990	167,80	0,6917	2,1138



Σχήμα 4.30 Η μορφή του ρυθμού UCTE (PSS/E)



Σχήμα 4.31 Η μορφή του ρυθμού UCTE (PacDyn)

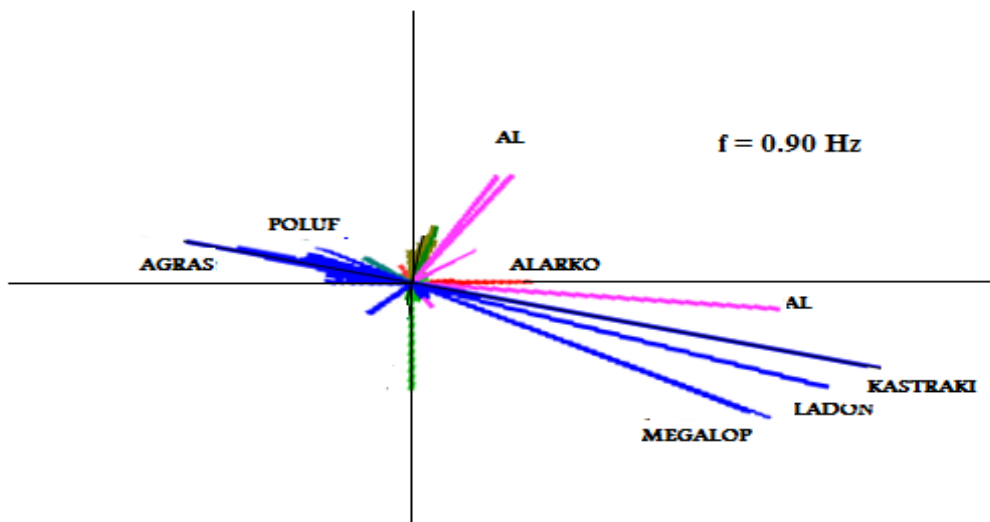
Θα δείξουμε τώρα τη μορφή των ρυθμών S-GR και Θράκης του πίνακα 4.15, οι οποίοι έχουν παραπλήσια συχνότητα, χαμηλή απόσβεση και εμπλέκουν τις ίδιες μηχανές του συστήματος με το ρυθμό διασύνδεσης GR-TR.

Ρυθμός S-GR

Στον Πίνακα 4.19 παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία του ιδιοδιάνυσματος με μέτρο μεγαλύτερο του 0,20, δείχνοντας ενδεικτικά μία μονάδα για κάθε σταθμό παραγωγής στο Ελληνικό Σύστημα, καθώς οι μονάδες ενός σταθμού παραγωγής ταυτίζονται σε μέτρο και φάση. Στο ρυθμό αυτό, η μορφή του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 4.32 εμπλέκονται οι μονάδες του νοτίου ελληνικού συστήματος αλλά και οι μονάδες της Θράκης οι οποίες συμμετέχουν έντονα στο ρυθμό GR-TR.

Πίνακας 4.19: Δεξί ιδιοδιάνυσμα για το ρυθμό S-GR

Όνομα Μηχανής	Ζυγός Μηχανής	PACDYN	
		Μέτρο	Φάση
GKASTR_G	81387	1	0.
GLADON_G	68187	0,8957	-4,9464
GMEGAL_G	62177	0,8152	-13,469
AFIERZG3	10501	0,7681	8,5553
GAGRAS_G	28187	0,475	179,41
AVDEJAG1	10003	0,3802	66,501
GPOLUF_G	26387	0,366	177,71
AFIERZG1	10001	0,3594	70,142
RCERNAA1	29218	0,2993	-79,797
T-ALARKO	11300	0,2557	15,027
GSFIKI_G	27287	0,2373	176,65
GPTOLEMG	25287	0,2257	175,43
GBLAVR_G	59677	0,2142	179,76
GELPE_G2	17187	0,2142	165,55
GASOMA_G	29287	0,2089	177,11



Σχήμα 4.32 Η μορφή του ρυθμού του Νοτίου συστήματος (PacDyn)

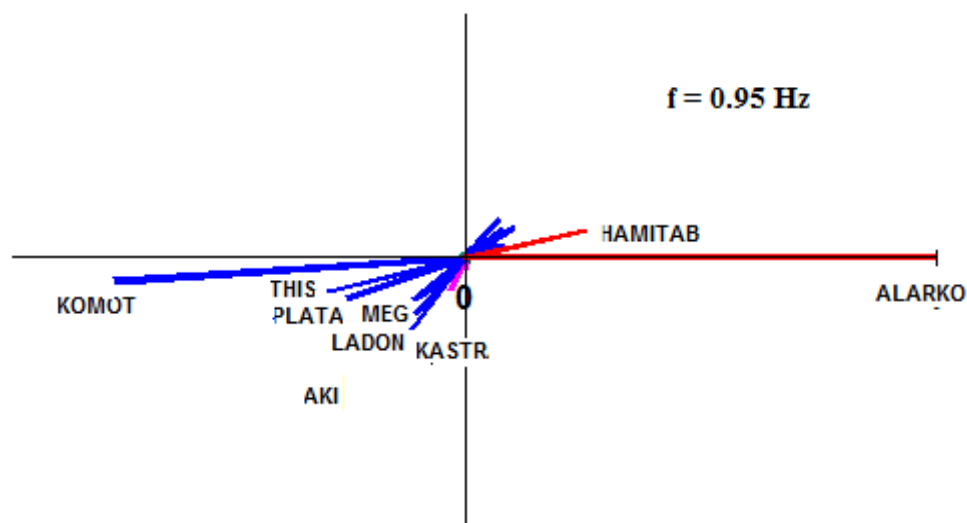
Ρυθμός Θράκης

Αυτός ο ρυθμός είναι ένας τοπικός ρυθμός μεταξύ των τουρκικών και των ελληνικών μονάδων της Θράκης. Η μορφή του ρυθμού είναι ίδια με αυτή της περίπτωσης που η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων είναι συνδεδεμένη. Το μόνο που αλλάζει είναι η απόσβεση του ρυθμού, η οποία μειώνεται στο 2,9% από το 3,7% που είχε στο σενάριο Α. Στον Πίνακα 4.20 παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία του ιδιοδιάνυσματος με μέτρο μεγαλύτερο του 0,20.

Πίνακας 4.20: Δεξί ιδιοδιάνυσμα για το ρυθμό Θράκης

Όνομα Μηχανής	Ζυγός Μηχανής	PACDYN	
		Μέτρο	Φάση
T-ALARKO	11300	1	0.
GKOMOT_3	12687	0,7501	-176,44
GKOMOT_1	12487	0,7465	-176,01
GKOMOT_2	12587	0,7433	-176,01
TG-4HAMI	11022	0,3961	-0,3774
TG-4HAMI	11021	0,3961	-0,3774
GTHISA_1	19187	0,3028	-166,54
GTHISA_3	19387	0,3028	-166,54
GTHISA_2	19287	0,3028	-166,54
GPLATA_2	19587	0,2668	-161,33
GPLATA_1	19487	0,2668	-161,33
TG-4HAMI	11020	0,258	12,496

Στο Σχήμα 4.33 παρουσιάζεται η μορφή του ρυθμού αυτού:



Σχήμα 4.33 Η μορφή του τοπικού ρυθμού της Θράκης (PacDyn)

4.3.4 Συντελεστές Συμμετοχής και Ολοκληρωτικά Υπόλοιπα για το ρυθμό χαμηλής απόσβεσης (Σενάριο Β)

Θα υπολογίσουμε τους συντελεστές συμμετοχής και τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα των μηχανών του συστήματος για το ρυθμό χαμηλής απόσβεσης για λόγους πληρότητας και για το ρυθμό χαμηλής απόσβεσης στην περίπτωση που η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων του ελληνικού συστήματος βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Οι συντελεστές συμμετοχής φανερώνουν ποιες μηχανές του συστήματος συμμετέχουν περισσότερο σε ένα ηλεκτρομηχανικό ρυθμό. Ο υπολογισμός των ολοκληρωτικών υπολοίπων γίνεται με το πρόγραμμα PacDyn ορίζοντας είσοδο την τάση V_{ref} και έξοδο την ταχύτητα ω των μηχανών.

Στον Πίνακα 4.21 δίνονται οι συντελεστές συμμετοχής των μηχανών για τον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό GR χαμηλότερης απόσβεσης 2,62% μέσω του προγράμματος PSS/E με μέτρο μεγαλύτερο του 0,20. Παρατηρούμε ότι και στην περίπτωση της ασθενούς διασύνδεσης των δύο χωρών μεγαλύτερη συμμετοχή στο ρυθμό χαμηλής απόσβεσης εμφανίζουν οι μονάδες της Τουρκίας και οι μονάδες του ΘΗΣ της Κομοτηνής.

Πίνακας 4.21: Οι μεγαλύτεροι συντελεστές συμμετοχής των μηχανών στο ρυθμό χαμηλής απόσβεσης GR

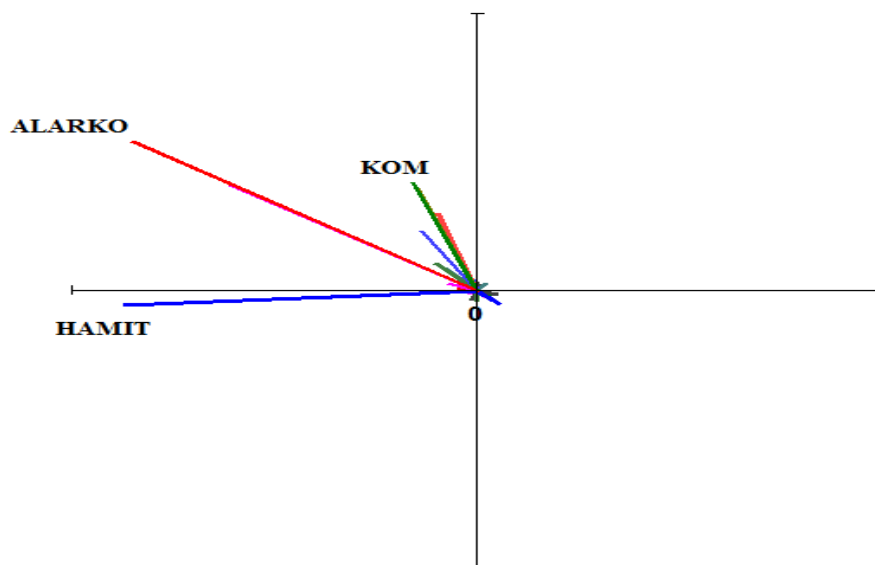
Όνομα Μηχανής	Συντελεστής Συμμετοχής
ALARKO	1,00000
TG-4HAMIT2	0,77232
TG-4HAMIT1	0,77203
GKOMOT_3	0,51589
TG-4HAMIT0	0,50947
GKOMOT_1	0,48836
GKOMOT_2	0,48674
RCERNAA1	0,27638
GTHISA_1	0,21614
GTHISA_2	0,21610
GTHISA_3	0,21610

Ο Πίνακας 4.22 δίνει τα μέτρα και τα ορίσματα των ολοκληρωτικών υπολοίπων των μηχανών που συμμετέχουν στο συγκεκριμένο ρυθμό, ταξινομημένα κατά μέτρο για μέτρο μεγαλύτερο του 0,10. Οι μονάδες 1 και 2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής σύμφωνα με τον Πίνακα 4.22 εμφανίζουν το μεγαλύτερο μέτρο ολοκληρωτικού υπολοίπου από πλευράς ελληνικού συστήματος και όρισμα 112°.

Πίνακας 4.22: Τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα των μηχανών για το ρυθμό GR

Μέτρο	Φάση	Όνομα Μηχανής
1,00000	147,67	ALARKO
0,8657	-176,57	HAMITABAT_0
0,7105	147,97	HAMITABAT_2
0,7105	147,97	HAMITABAT_1
0,4187	111,95	KOMOTHNH_3
0,3930	111,64	KOMOTHNH_2
0,3923	111,64	KOMOTHNH_1
0,2921	-108,88	RCERNAA1
0,2522	122,28	ΘΗΣΑΥΡΟΣ_2
0,2522	122,28	ΘΗΣΑΥΡΟΣ_3
0,2522	122,28	ΘΗΣΑΥΡΟΣ_1
0,1374	136,24	ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ_1
0,1374	136,24	ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ_2

Το Σχήμα 4.34 δίνει τα ίδια αποτελέσματα σε γράφημα:

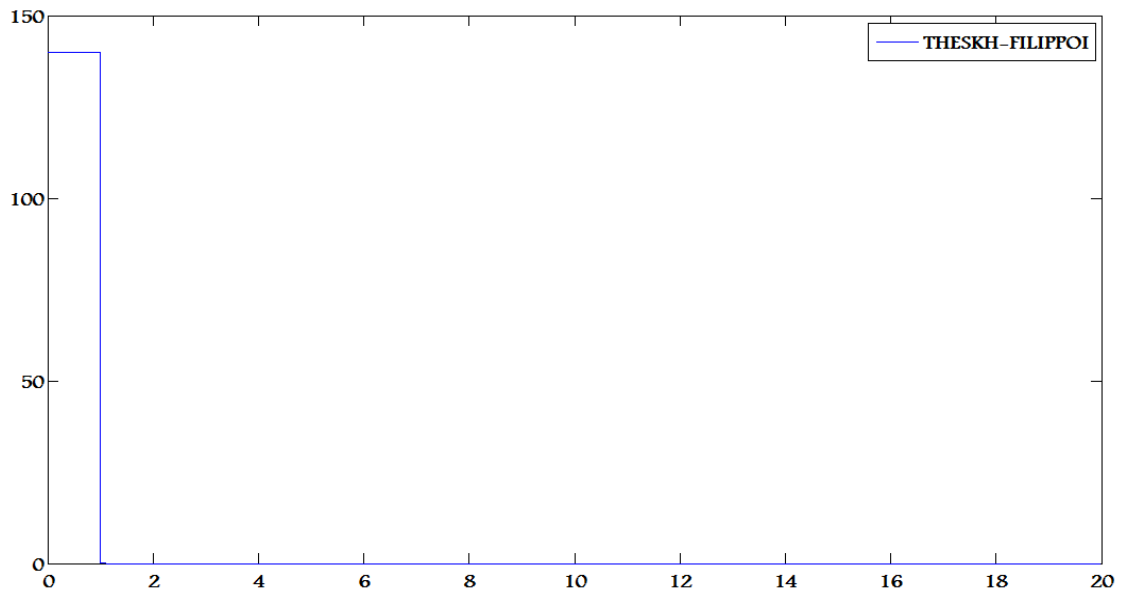


Σχήμα 4.34 Μορφή των ολοκληρωτικών υπολοίπων των μηχανών για το ρυθμό GR

4.4 Απόκριση Συστήματος σε βραχυκύκλωμα με απώλεια γραμμής (Ασθενής Διασύνδεση)

Στο σενάριο λειτουργίας του συστήματος που θα εξετάσουμε στην παρούσα ενότητα, η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων βγαίνει εκτός λειτουργίας μετά την διαταραχή. Η διαταραχή που επιβάλλουμε στο σύστημα και στην παρούσα ενότητα, είναι ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή υπερυψηλής τάσης 400kV που συνδέει το σταθμό της Θεσσαλονίκης με τους Φιλίππους. Η διαταραχή διαρκεί για 120msec και έπειτα η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων αποσυνδέεται από το δίκτυο.

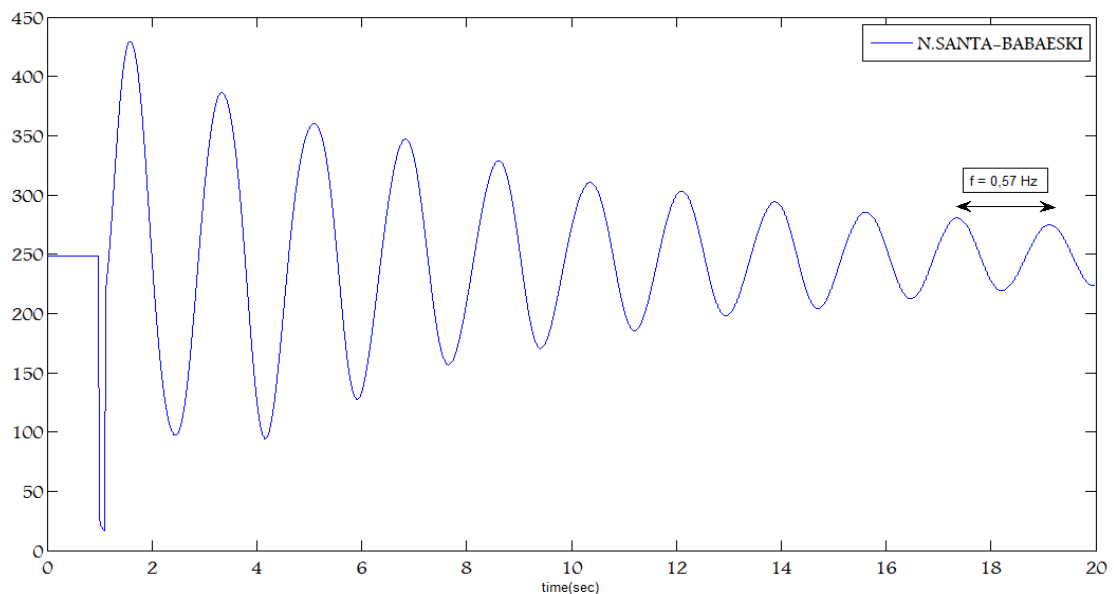
Στο παρακάτω σχήμα δείχνεται η ροή ενεργού ισχύος στην γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων στην οποία γίνεται το σφάλμα. Μετά το βραχυκύκλωμα, δεν υπάρχει μεταφορά ισχύος καθώς η γραμμή βγαίνει εκτός λειτουργίας. Όπως εξηγήσαμε και παραπάνω, μετά τη χρονική στιγμή εκδήλωσης του σφάλματος, η ροή της ισχύος μηδενίζεται στη γραμμή μεταφοράς Θεσσαλονίκης-Φιλίππων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.38:



Σχήμα 4.38 Ροή ενεργού ισχύος στη γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων

Όπως και στο σενάριο Α, όλες οι προσομοιώσεις έγιναν με το πρόγραμμα PSS/E Ver.30. Για τις προσομοιώσεις αυτές και την αρχικοποίηση του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε το αρχείο με τα δυναμικά στοιχεία του συστήματος όπου λαμβάνονται υπόψη όλοι οι περιοριστές του συστήματος.

Η ταλάντωση της ροής ενεργού ισχύος στη γραμμή διασύνδεσης του ελληνικού συστήματος με την τουρκική νησίδα φαίνεται στο σχήμα 4.39:

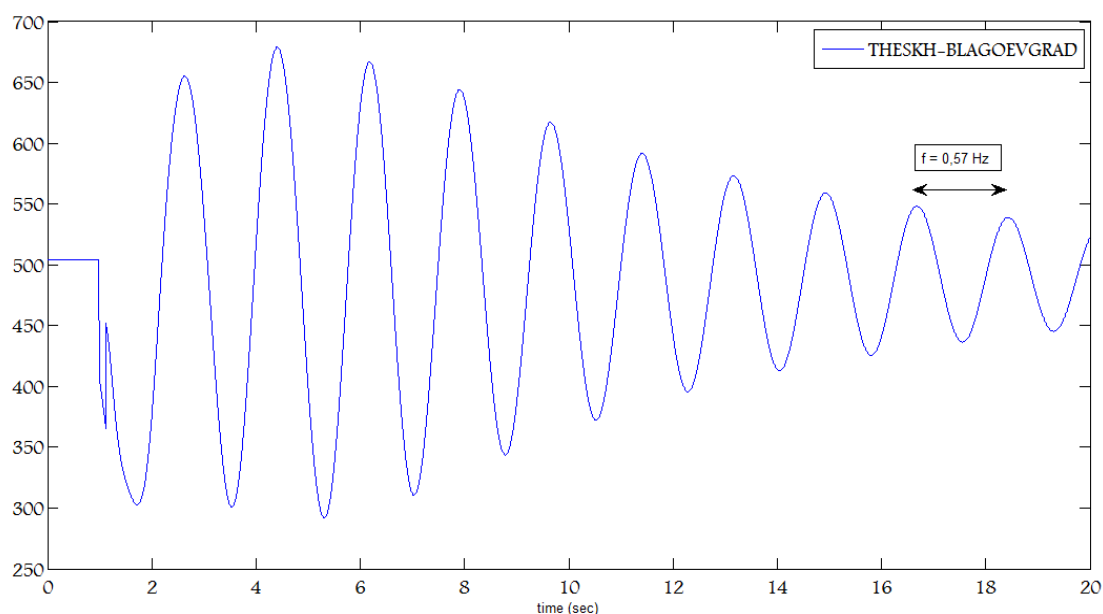


Σχήμα 4.39 Ροή ισχύος στη διασύνδεση της Ελλάδος με την Τουρκία, γραμμή Νέα Σάντα-Babaeski

Όπως υπολογίστηκε από το Σχήμα 4.39, μετρώντας την περίοδο των ταλαντώσεων, η συχνότητα της ταλάντωσης που επικρατεί τελικά στη ροή ισχύος στη διασυνδετική γραμμή Ελλάδας –Τουρκίας είναι τα 0,57 Hz. Η τιμή αυτή, είναι ουσιαστικά η τιμή της συχνότητας του ρυθμού χαμηλής απόσβεσης, δηλαδή του ρυθμού GR όπως δείξαμε με την ανάλυση ρυθμών μέσω των ιδιοτιμών στην ενότητα 4.3.

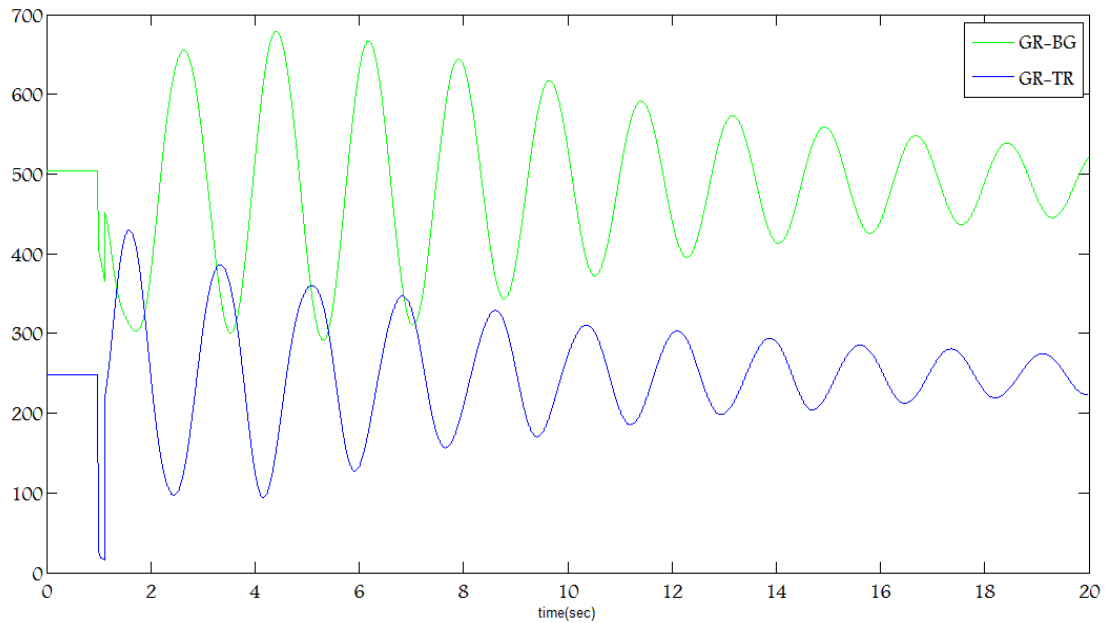
Με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκε η συχνότητα ταλαντώσεων στις άλλες διασυνδετικές γραμμές του ελληνικού συστήματος. Όπως σημειώνεται και πάνω στα σχήματα, έχουμε περίπου την ίδια τιμή για την ταλάντωση που επικρατεί σε κάθε περίπτωση μετά από κάποιο χρονικό διάστημα κάποιων δευτερολέπτων. Συνεπώς, μετά τη διαταραχή, τελικά επικρατεί ο ρυθμός GR, εξαιτίας της χαμηλής απόσβεσης που εμφανίζει. Η τιμή του λόγου απόσβεσης του ρυθμού είναι 2,72%.

Η ταλάντωση της ροής ενεργού ισχύος στη γραμμή διασύνδεσης Θεσσαλονίκης-Blagoevgrad φαίνεται στο Σχήμα 4.40. Και σε αυτή την περίπτωση, η συχνότητα της ταλάντωσης που επικρατεί τελικά στη ροή ισχύος είναι τα 0,57 Hz, η τιμή της συχνότητας του ρυθμού GR όπως εξηγήσαμε παραπάνω.



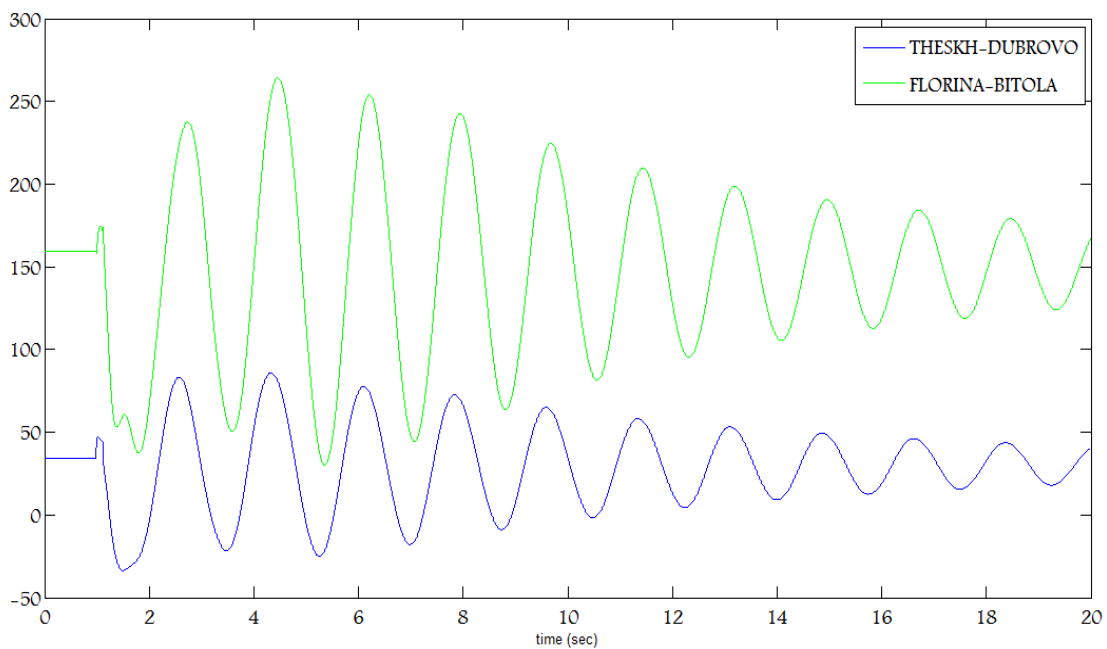
Σχήμα 4.40 Ροή ενεργού ισχύος στη διασύνδεση της Ελλάδος με την Βουλγαρία, γραμμή Θεσσαλονίκη- Blagoevgrad

Η ταλάντωση της ενεργού ισχύος στις γραμμές σύνδεσης του ελληνικού συστήματος με την τουρκική νησίδα και με το δίκτυο της Βουλγαρίας φαίνεται στο Σχήμα 4.41. Παρατηρούμε πως κατά τη διάρκεια των ταλαντώσεων, τη στιγμή που έχουμε εισαγωγή ισχύος από το τουρκικό στο Ελληνικό Σύστημα, έχουμε εξαγωγή ενός ποσού ισχύος στη Βουλγαρία. Αυτό προκύπτει από την αντίθεση φάσης που έχουν στο τέλος της προσομοίωσης οι ταλαντώσεις αυτές, στο Σχήμα 4.41.



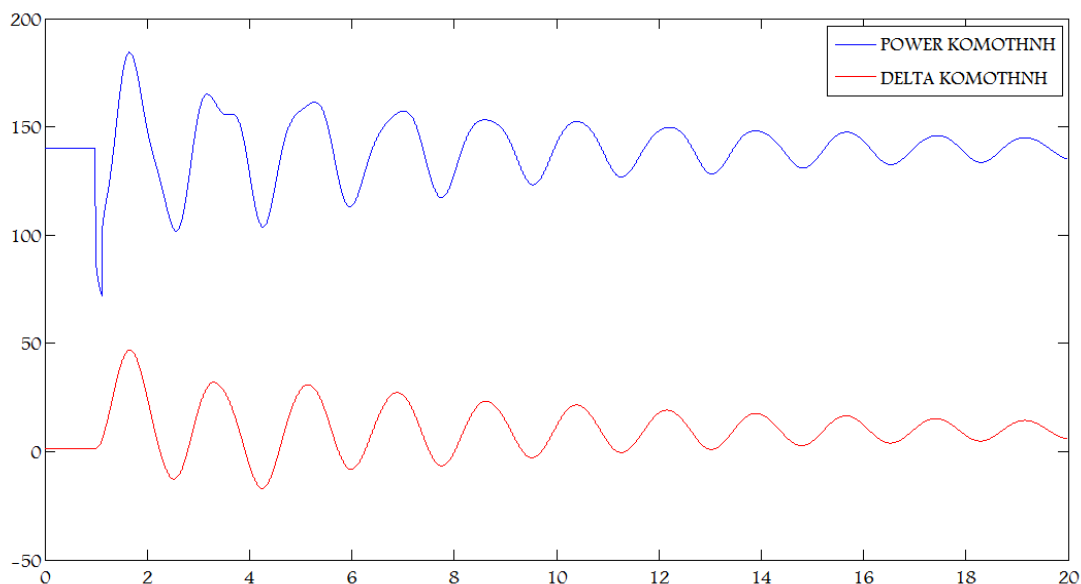
Σχήμα 4.41 Σύγκριση των ροών ενεργού ισχύος στις διασυνδέσεις της Ελλάδος με την Τουρκία και την Βουλγαρία.

Η ταλάντωση της ροής ενεργού ισχύος και για τις δύο γραμμές διασύνδεσης του ελληνικού συστήματος με την Π.Γ.Δ.Μ φαίνεται στο Σχήμα 4.42:



Σχήμα 4.42 Ροή ενεργού ισχύος στις δύο διασυνδετικές γραμμές, Ελλάδος - Π.Γ.Δ.Μ., Θεσσαλονίκη-Dubrovno και Φλώρινα-Bitola.

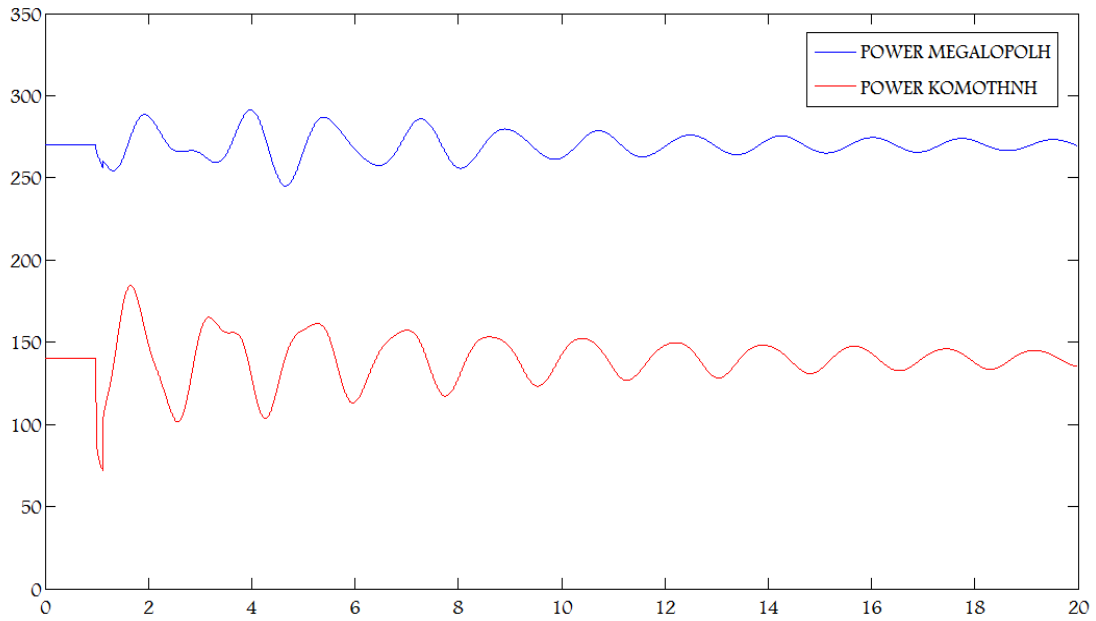
Και σε αυτές τις γραμμές διασύνδεσης του Ελληνικού συστήματος με τη Π.Γ.Δ.Μ., η ταλάντωση αντιστοιχεί στο ρυθμό του ελληνικού συστήματος, ο οποίος επικρατεί εξαιτίας του χαμηλού λόγου απόσβεσης που εμφανίζει με το άνοιγμα της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων.



Σχήμα 4.43 Ταλάντωση ισχύος και γωνίας δ δρομέα της μηχανής στην Κομοτηνή.

Στο Σχήμα 4.43 παρουσιάζουμε την ταλάντωση που επικρατεί στην παραγωγή ενεργού ισχύος και στη γωνία δ του δρομέα της μονάδας 1 του ΘΗΣ στην Κομοτηνή, (ζυγός 12487), μιας από τις μηχανές που συμμετέχουν στο ρυθμό χαμηλής απόσβεσης και στην οποία θα γίνει προσάρτηση σταθεροποιητή. Από το σχήμα φαίνεται ότι η συχνότητα ταλάντωσης των δύο μεγεθών είναι η ίδια, αυτή του ρυθμού GR.

Στο Σχήμα 4.44 αντίστοιχα, δίνεται η ταλάντωση στην παραγωγή ισχύος της μονάδος 4 του σταθμού της Μεγαλόπολης σε σύγκριση με την ταλάντωση που επικρατεί στη μονάδα 1 του ΘΗΣ της Κομοτηνής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.44, ο ρυθμός GR, επικρατεί και στην ταλάντωση της ενεργού ισχύος των μονάδων της Μεγαλόπολης,



Σχήμα 4.44 Σύγκριση ταλάντωσης ενεργού ισχύος μιας μηχανής στην Μεγαλόπολη και μιας μηχανής στην Κομοτηνή

Συνεπώς, μετά το βραχυκύκλωμα στο σύστημα και την εκκαθάρισή του με το άνοιγμα της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων, διεγείρεται ο ρυθμός του ελληνικού συστήματος GR ο οποίος και επικρατεί, εξαιτίας της χαμηλής απόσβεσης που εμφανίζει. Η τιμή του λόγου απόσβεσης του ρυθμού είναι 2,72%.

Κεφάλαιο 5

Σχεδίαση Σταθεροποιητή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι Σταθεροποιητές Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας σχεδιάζονται με σκοπό να προσθέσουν απόσβεση σε ένα ηλεκτρομηχανικό ρυθμό ο οποίος εκδηλώνεται στο σύστημα, αποτρέποντας έτσι τον κίνδυνο εμφάνισης αστάθειας μονίμου καταστάσεως.

Αρχικά, θα αναλύσουμε τα γενικότερα χαρακτηριστικά της διάταξης του Σταθεροποιητή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (PSS) και τις παραμέτρους σχεδίασής του. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται διάφορες μεθοδολογίες σχεδίασης σταθεροποιητών για το Ελληνικό Σύστημα και έπειτα πραγματοποιείται σύγκριση των διαφόρων μεθόδων σχεδίασης σταθεροποιητών.

5.1 Σχεδίαση Σταθεροποιητών

Γενικά, ο έλεγχος της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων γίνεται με διατάξεις που δρουν είτε τοπικά στη διέγερση μιας σύγχρονης μηχανής, είτε σε κάποια άλλη διάταξη του δικτύου (ζυγός φορτίου ή γραμμή μεταφοράς). Στην περίπτωση που τα σήματα μέτρησης και ελέγχου είναι τοπικά και λαμβάνονται απευθείας από την γεννήτρια, η σχεδίαση σταθεροποιητών είναι το πλέον τυπικό παράδειγμα για τον έλεγχο των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.

5.1.1 Προδιαγραφές Σχεδίασης Σταθεροποιητών

Η χρήση διαφόρων ρυθμιστών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, κάνει επιτακτική την ανάγκη μιας πιο συστηματικής προσέγγισης του σχεδιασμού τους για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος και τον περιορισμό της εμφάνισης ενάντιων επιδράσεων στους ρυθμούς του συστήματος. Ειδικότερα για τους σταθεροποιητές, η εναρμόνιση των παραμέτρων έχει μεγάλη σημασία, ιδιαίτερα για τη σχεδίαση σταθεροποιητών που βασίζονται σε ένα μοντέλο γεννήτριας – άπειρου ζυγού.

Εργαλεία σχεδίασης σταθεροποιητών σε μεγάλα συστήματα ενέργειας τα οποία να εξασφαλίζουν την εναρμόνιση των παραμέτρων τους δεν είναι γενικά διαθέσιμα. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι τα γραμμικοποιημένα μοντέλα των συστημάτων ενέργειας οδηγούν σε πίνακες μεταβλητών κατάστασης μεγάλων διαστάσεων οι οποίοι δεν είναι αραιοί. Ο μεγάλος αριθμός των μεταβλητών κατάστασης κάνει δύσκολη την εφαρμογή μεθόδων ελέγχου με ανατροφοδότηση εξόδου ή ανατροφοδότηση των μεταβλητών κατάστασης σε συστήματα με πολλές μηχανές.

Για τις ανάγκες της συστηματικής σχεδίασης σταθεροποιητών σε συστήματα με πολλές μηχανές πρέπει το μοντέλο παράστασης του συστήματος να συμπεριλαμβάνει όλους τους ήδη υπάρχοντες ρυθμιστές. Η σχεδίαση γίνεται ακολουθιακά και οι σταθεροποιητές προστίθενται ο ένας μετά τον άλλο. Με τον τρόπο αυτό εξετάζεται όχι μόνο η ευρωστία του ρυθμιστή αλλά ταυτόχρονα και η αλληλεπίδρασή του με τις άλλες υπάρχουσες διατάξεις ελέγχου καθώς εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος συνολικά, κάθε φορά που κάποιος νέος βρόχος ελέγχου κλείνει. Οι προτεινόμενοι σταθεροποιητές πρέπει να εξασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία του συστήματος για ένα μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας. Η προσομοίωση της απόκρισης κρίσιμων παραμέτρων, είναι γενικά η πιο ασφαλής μέθοδος για τη σωστή αποτίμηση της δράσης των σταθεροποιητών. [5,6]

Προκειμένου να συμβάλλει αποτελεσματικά στην ευστάθεια του συστήματος, η προτεινόμενη σχεδίαση πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω προδιαγραφές :

- **Επιλογή του μοντέλου του συστήματος:** Οι σταθεροποιητές πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να επηρεάζουν τους ρυθμούς απόκρισης του συστήματος σε ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων. Η σχεδίαση των σταθεροποιητών διευκολύνεται με τη χρήση ελαττωμένων μοντέλων παράστασης του συστήματος τα οποία όμως πρέπει να περιγράφουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις και να περιλαμβάνουν τις κύριες δυναμικές και αλγεβρικές παραμέτρους που τις επηρεάζουν. Ο σταθεροποιητής που προτείνεται πρέπει να προσαρμόζεται εύκολα στο μοντέλο

αυτό και η διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων του να μην επιβαρύνει την υπολογιστική διαδικασία.

- **Καθορισμός της απόδοσης του συστήματος:** Λόγω της αλληλεπίδρασης των ρυθμών, είναι πρακτικά αδύνατη η απεριόριστη αύξηση της απόσβεσης μιας ταλάντωσης. Επιπλέον, αν η ενεργοποίηση ενός σταθεροποιητή και η σταδιακή αύξηση του κέρδους του προκαλεί μεγάλη απόκλιση στη συχνότητα ενός ρυθμού, αυτό είναι ενδεικτικό ότι η μορφή του συγκεκριμένου ρυθμού παραμορφώνεται σημαντικά. Περαιτέρω αύξηση του κέρδους του σταθεροποιητή είναι πιθανό να διεγείρει άλλους ρυθμούς, διαφορετικούς από αυτούς που σχεδιάστηκε να αποσβέσει. Συνεπώς, η προτεινόμενη τεχνική σχεδίασης σταθεροποιητών πρέπει να καθορίζει το μέγιστο επιτρεπτό κέρδος του κάθε σταθεροποιητή καθώς και το βήμα με το οποίο θα αυξάνεται το κέρδος του κατά τη σχεδίασή του.
- **Επιλογή σημάτων μέτρησης και ελέγχου:** Η επιλογή των σημάτων αυτών είναι μια κρίσιμη παράμετρος για τη σχεδίαση των σταθεροποιητών. Σε γενικές γραμμές τα σήματα αυτά θα πρέπει να εξασφαλίζουν ότι οι ρυθμοί που πρέπει να αποσβεστούν είναι ελέγξιμοι και παρατηρήσιμοι από τα σήματα εισόδου και εξόδου.
- **Υπολογισμός παραμέτρων των σταθεροποιητών:** Από τη στιγμή που έχουν υπολογιστεί οι ρυθμοί του συστήματος με χαμηλή απόσβεση, υπολογίζονται οι χρονικές σταθερές των συναρτήσεων μεταφοράς των σταθεροποιητών, με τεχνικές σχεδίασης στο πεδίο της συχνότητας. Σε ότι αφορά το κέρδος των σταθεροποιητών, η σχεδίαση έγκειται στην επιλογή του κέρδους τους, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην προκαλούνται ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις ρυθμών.

Επιπλέον, ο προτεινόμενος σταθεροποιητής πρέπει να ικανοποιεί μια σειρά από απαιτήσεις τόσο για τη μεταβατική ευστάθεια όσο και για την ευστάθεια μόνιμης κατάστασης του συστήματος. Έτσι θα πρέπει:

- Να επιτρέπει στο σύστημα να παραμείνει ευσταθές κατά τις πρώτες περιόδους μετά από μια μεγάλη διαταραχή (μεταβατική ευστάθεια γωνίας).
- Να παρέχει επαρκή απόσβεση στη μόνιμη κατάσταση μετά από μια μεγάλη διαταραχή.
- Να ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο αλληλεπιδράσεων με άλλους ρυθμιστές και διατάξεις ελέγχου. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές περιλαμβάνουν τη διέγερση ταλαντώσεων άλλων ρυθμών, συνήθως υψηλότερης συχνότητας καθώς και το ενδεχόμενο συντονισμού μεταξύ των ρυθμών του συστήματος. [6,16]

5.1.2 Σχεδίαση Σταθεροποιητών σε Σύστημα γεννήτριας – άπειρου ζυγού

Η συνάρτηση μεταφοράς του σταθεροποιητή, επιλέγεται ώστε να παρέχει αντιστάθμιση φάσεως στην συνάρτηση μεταφοράς $G(s)$ που ορίζεται με είσοδο την τάση αναφοράς του αυτόματου ρυθμιστή τάσεως και έξοδο την ηλεκτρομαγνητική ροπή που αναπτύσσεται στον άξονα της γεννήτριας. Αν ο σταθεροποιητής είναι πλήρως αντισταθμισμένος και έχει σαν σήμα εισόδου την ταχύτητα της μηχανής, τότε αναπτύσσεται θετική ροπή απόσβεσης. Οι σταθεροποιητές σχεδιάστηκαν αρχικά για την απόσβεση των τοπικών ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που εμφανίζονταν σε ασθενώς συνδεδεμένες γεννήτριες. Στην περίπτωση αυτή, η προσέγγιση του φαινομένου με ένα απλό μοντέλο μηχανής – άπειρου ζυγού ήταν επαρκής.

Η αλληλεπίδραση του ρυθμού διέγερσης και του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού που προκαλεί η ενεργοποίηση ενός σταθεροποιητή σε μια γεννήτρια και η αύξηση του κέρδους, ίσως προκαλέσει μετατόπιση των ρυθμών προς τα δεξιά, με αποτέλεσμα, από κάποια τιμή του κέρδους και μετά ο κρίσιμος ηλεκτρομηχανικός ρυθμός παρουσιάζει μείωση της απόσβεσης του. Ο υπολογισμός του μέγιστου επιτρεπτού κέρδους των σταθεροποιητών αποτελεί ίσως το δυσκολότερο στάδιο στη σχεδίασή τους καθώς πρέπει να εξασφαλίζεται η απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων και να αποφεύγονται ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις με άλλους ρυθμούς.

Όλες οι τεχνικές σχεδίασης που βασίζονται στις έννοιες της ροπής απόσβεσης και συγχρονισμού υπολογίζουν το κέρδος των σταθεροποιητών με δοκιμές. Σε κάποιες τεχνικές, το κέρδος του σταθεροποιητή επιλέγεται ώστε να ικανοποιείται μια τιμή απόσβεσης κοινή σε όλους τους ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς. Στη συνέχεια, με ενεργοποιημένους τους σταθεροποιητές, εξετάζονται οι ρυθμοί του συστήματος και τα κέρδη των σταθεροποιητών τροποποιούνται ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις. Μια διαφορετική μέθοδος είναι η σταδιακή αύξηση του κέρδους ενός σταθεροποιητή μέχρι να γίνει ασταθής κάποιος ρυθμός. Στη συνέχεια, για λόγους ασφαλείας, το κέρδος περιορίζεται στο ένα τρίτο της τιμής η οποία επιφέρει αστάθεια. [5,6]

5.1.3 Σήματα Εισόδου Σταθεροποιητών

Για την αύξηση της απόσβεσης των ταλαντώσεων με τη χρήση σταθεροποιητών, η επιλογή του σήματος εισόδου του σταθεροποιητή έχει σπουδαίο ρόλο καθώς το σήμα αυτό θα πρέπει να περιγράφει με μεγάλη ακρίβεια τη μεταβολή της ροπής απόσβεσης μιας σύγχρονης μηχανής κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής του συστήματος. Εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης των σταθεροποιητών, πολλές και διαφορετικές τεχνικές χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή ενός τέτοιου σήματος. Σχεδόν σε όλες τις

περιπτώσεις, και ανεξάρτητα από το μέγεθος που θα επιλεγεί για μέτρηση, το τελικό σήμα εισόδου στο σταθεροποιητή καταλήγει να είναι ένα μέγεθος το οποίο αντιστοιχεί στη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα της μηχανής.

Σταθεροποιητής με σήμα εισόδου την ταχύτητα του άξονα της μηχανής. Το σήμα αυτό, θα πρέπει να είναι απαλλαγμένο από το θόρυβο που εισάγει η περιστροφή του άξονα, οι πιθανές πλευρικές μετατοπίσεις του άξονα και διάφορες άλλες αιτίες. Ο θόρυβος αυτός εξαρτάται από τη συχνότητα περιστροφής και μπορεί να οδηγήσει σε παραμορφώσεις του σήματος διέγερσης του σταθεροποιητή, δημιουργώντας τον κίνδυνο σημαντικών μεταβολών της τάσεως ακροδεκτών της γεννήτριας λόγω της (παράσιτης) διέγερσης του τυλίγματος πεδίου.

Σταθεροποιητής με σήμα εισόδου την ισχύ επιταχύνσεως της μηχανής. Ο αντικειμενικός σκοπός της τεχνικής αυτής, είναι η εξαγωγή ενός σήματος ισοδύναμου της ταχύτητας, το οποίο όμως δεν θα διεγείρει τις στρεπτικές ταλαντώσεις του άξονα. Η χρήση μιας ταχύτητας ανάλογης της ισχύος επιτάχυνσης της γεννήτριας σαν σήματος εισόδου στο σταθεροποιητή, επιτρέπει μια σχεδίαση ουσιαστικά ίδια με αυτή ενός σταθεροποιητή που χρησιμοποιεί ως σήμα εισόδου απευθείας τη μεταβολή της ταχύτητας του άξονα. Η σχετικά εύκολη υλοποίηση του φίλτρου επιτρέπει την σχεδίαση σταθεροποιητών ανεξάρτητα από τα στρεπτικά χαρακτηριστικά του άξονα των μηχανών.

Σταθεροποιητής με σήμα εισόδου τη μεταβολή της συχνότητας στο ζυγό διασύνδεσης. Η μεταβολή της συχνότητας μετρούμενη στο ζυγό διασύνδεσης έχει χρησιμοποιηθεί σαν ένα απευθείας σήμα εισόδου στον σταθεροποιητή. Το σήμα αυτό παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με την απευθείας χρήση της ταχύτητας του δρομέα σαν σήμα εισόδου. [5]

5.2 Παράμετροι Σχεδίασης Σταθεροποιητή

5.2.1 Επιλογή της θέσης

Πρώτη παράμετρος που εξετάζεται κατά την σχεδίαση ενός σταθεροποιητή, είναι η επιλογή της γεννήτριας, στην οποία θα πρέπει να προσαρτηθεί ο σταθεροποιητής προκειμένου να αποσβεστεί ο εκάστοτε κρίσιμος ηλεκτρομηχανικός ρυθμός. Η επιλογή θέσης μπορεί να γίνει με βάση τους συντελεστές συμμετοχής των μεταβλητών κατάστασης που εκφράζουν τις ταχύτητες των μηχανών του συστήματος ή τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα του κρίσιμου ηλεκτρομηχανικού ρυθμού για κάθε γεννήτρια, τα οποία δίνονται με φθίνουσα σειρά. Επιλέγεται συνήθως η γεννήτρια

που εμφανίζει μεγαλύτερο μέτρο του ολοκληρωτικού υπολοίπου, γιατί αυτό εκφράζει και τη δυνατότητα ρύθμισης της μονάδας.

Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι η επιλογή που βασίζεται στους συντελεστές συμμετοχής ή τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα δεν αποτελεί πανάκεια. [7] Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης των συντελεστών συμμετοχής για τον υπολογισμό της γεννήτριας στην οποία η προσθήκη ενός σταθεροποιητή αυξάνει την απόσβεση ενός ρυθμού, είναι ότι οι συντελεστές συμμετοχής είναι αδιάστατα μεγέθη, ανεξάρτητα από τις μονάδες μέτρησης των ιδιοδιανυσμάτων. Τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα, παρέχουν την επιπλέον πληροφορία της ελεγχιμότητας και παρατηρησιμότητας ενός ρυθμού από τη διέγερση μιας γεννήτριας.

Παρόλα αυτά τόσο οι συντελεστές συμμετοχής όσο και τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα παίρνουν μεγάλες τιμές όταν το σημείο λειτουργίας του συστήματος περνά κοντά από ένα σημείο ισχυρού συντονισμού και τότε δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστοι δείκτες. [5] Επιπλέον θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η σχετική θέση των μηδενικών του συστήματος, αλλά και η μετατόπιση των μηδενικών λόγω της παρουσίας των σταθεροποιητών κι αυτό γιατί αν ένα μηδενικό βρίσκεται κοντά σε έναν πόλο τότε με την παρουσία του σταθεροποιητή ίσως ο πόλος αυτός να μην μπορέσει να μετακινηθεί πέραν του μηδενικού αυτού με αποτέλεσμα να μην αυξηθεί ουσιαστικά η απόσβεση του αντίστοιχου ρυθμού. [5,6]

5.2.2 Υπολογισμός της γωνίας αντισταθμίσεως με τη μέθοδο των ολοκληρωτικών υπόλοιπων

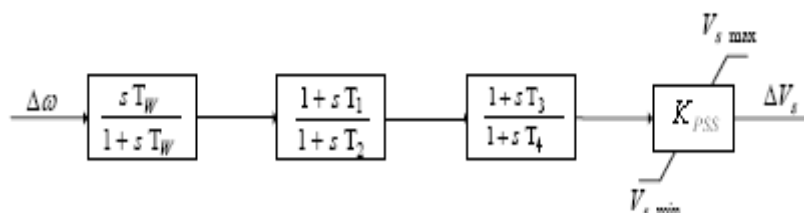
Από τη στιγμή που καθορίζεται η γεννήτρια που επιδρά περισσότερο σε έναν ηλεκτρομηχανικό ρυθμό με ασθενή απόσβεση, υπολογίζεται το ολοκληρωτικό υπόλοιπο της συνάρτησης μεταφοράς ανοικτού βρόχου η οποία έχει σαν είσοδο τη τάση αναφοράς του αυτόματου ρυθμιστή τάσεως και σαν έξοδο την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας, για τον πόλο του ασθενώς αποσβενύμενου ηλεκτρομηχανικού ρυθμού. Το ολοκληρωτικό υπόλοιπο της συνάρτησης μεταφοράς $G(s)$ της μηχανής, για τον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό, δίνει την ακριβή υστέρηση φάσεως που πρέπει να αντισταθμίσει το κύκλωμα ενός σταθεροποιητή. [15]

Με τον τρόπο αυτό ουσιαστικά υπολογίζεται η υστέρηση φάσεως που εισάγει η μηχανή, η οποία οφείλεται τόσο στην ίδια τη μηχανή όσο και στην αλληλεπίδρασή της με τις άλλες μηχανές του συστήματος. Αυτή την υστέρηση φάσης καλείται να αντισταθμίσει ο σταθεροποιητής. Με βάση τη θεωρία των ολοκληρωτικών υπολοίπων, όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2, η γωνία αντιστάθμισης που πρέπει να εισάγει ο σταθεροποιητής προκειμένου η αντίστοιχη ιδιοτιμή του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού να κινηθεί προς τα αριστερά, πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$\varphi = \pm 180^\circ - \arg(R) \quad (5.1)$$

όπου $\arg(R)$ το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου και φ η γωνία αντισταθμίσεως του σταθεροποιητή.

Εφόσον προσδιοριστεί η γωνία αντισταθμίσεως του σταθεροποιητή, θα πρέπει να καθοριστεί η συνάρτηση μεταφοράς του. Το δομικό διάγραμμα μιας τυπικής συνάρτησης μεταφοράς ενός σταθεροποιητή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.1 Λειτουργικό διάγραμμα ενός τυπικού σταθεροποιητή

Η συνάρτηση μεταφοράς του τυπικού αυτού σταθεροποιητή είναι :

$$H_{PSS}(s) = \frac{sT_W}{1 + sT_W} K_{PSS} \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} \quad (5.2)$$

Ο εν λόγω σταθεροποιητής αποτελείται από δύο βαθμίδες της μορφής $\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2}$ οι οποίες είναι βαθμίδες προπορείας φάσεως (lead-lag) πρώτου βαθμού.

Οι χρονικές σταθερές οι οποίες και καθορίζουν την προπορεία φάσεως υπολογίζονται με κατάλληλες μαθηματικές σχέσεις.

Μια συνηθισμένη πρακτική που ακολουθείται είναι ο σταθεροποιητής να αποτελείται από όμοιες βαθμίδες συστημάτων προπορείας φάσεως πρώτου βαθμού. Με αυτό τον τρόπο το διάγραμμα φάσεως του σταθεροποιητή είναι συμμετρικό γύρω από μια κεντρική συχνότητα που ισούται με τη συχνότητα του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού. [13] Η προπορεία φάσεως που εισάγει ο σταθεροποιητής μεγιστοποιείται στη συχνότητα αυτή, στην οποία επιτυγχάνεται πλήρης αντιστάθμιση, ενώ παράλληλα ο σταθεροποιητής μπορεί επιπλέον να προσφέρει μια μερική αντιστάθμιση για ένα εύρος συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού. Σαν αποτέλεσμα όχι μόνο αυξάνεται η απόσβεση του συγκεκριμένου ρυθμού για τον οποίο έχει σχεδιαστεί αλλά και όσων άλλων ρυθμών εμφανίζονται σε παραπλήσιες συχνότητες, με την προϋπόθεση βέβαια ότι η γεννήτρια συμμετέχει σε αυτούς.

Αφού οι δύο βαθμίδες θεωρούνται όμοιες, ισχύει:

$$T_1 = T_3 \quad \text{και} \quad T_2 = T_4 \quad (5.3)$$

Στο διάγραμμα του Σχήματος 5.1 παρατηρείται και ένας όρος της μορφής:

$$\frac{sT_w}{1 + sT_w} \quad (5.4)$$

Ο όρος αυτός εκφράζει ένα υπερατά φίλτρο απαλοιφής (washout). Το φίλτρο αυτό τοποθετείται προκειμένου να εξαλείφει τα αποτελέσματα ενός μονίμου σφάλματος συχνότητας πάνω στην τάση αναφοράς.[4] Η χρονική σταθερά του φίλτρου απαλοιφής επηρεάζει την φάση που εισάγει ο σταθεροποιητής. Μια τυπική τιμή της χρονικής σταθεράς αυτής είναι τα 5 s ώστε να αποφεύγονται αλληλεπιδράσεις του φίλτρου απαλοιφής με τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις.[6] Στην έξοδο του σταθεροποιητή παρεμβάλλεται ένας περιοριστής (limiter) ο οποίος και κρατά το σήμα εξόδου του μέσα σε επιτρεπτά όρια τα οποία ορίζονται κατάλληλα, π.χ. 15%.

Αν θεωρηθεί ότι ο σταθεροποιητής αποτελείται από n όμοιες βαθμίδες, η σχέση (5.2) γίνεται:

$$H_{PSS}(s) = K_{PSS} \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^n \quad (5.5)$$

Στο πεδίο της συχνότητας, αντικαθιστώντας το $s = j\omega$, η (5.5) γίνεται :

$$H_{PSS}(j\omega) = K_{PSS} \left(\frac{1 + j\omega T_1}{1 + j\omega T_2} \right)^n \quad (5.6)$$

Θεωρώντας ότι οι χρονικές σταθερές συνδέονται μέσω της σχέσης :

$$T_1 = kT_2 \quad k > 1 \quad (5.7)$$

και επιπλέον για λόγους απλούστευσης των συμβολισμών θεωρώντας ότι :

$$T_2 = T, \quad T_1 = kT, \quad \omega T = w \quad (5.8)$$

η σχέση (5.6) γίνεται :

$$H_{PSS}(j\omega) = K_{PSS} \left(\frac{1 + jk\omega}{1 + j\omega} \right)^n \quad (5.9)$$

Μετά από στοιχειώδεις πράξεις η σχέση (5.9) γράφεται :

$$H_{PSS}(j\omega) = K_{PSS} \left(\frac{1 + k\omega^2}{1 + \omega^2} + j \frac{(k-1)\omega}{1 + \omega^2} \right)^n \quad (5.10)$$

Από την σχέση (5.10) προκύπτει ότι η προπορεία φάσεως που εισάγει ο σταθεροποιητής είναι :

$$\varphi_{PSS} = n \tan^{-1} \left(\frac{(k-1)\omega}{1 + k\omega^2} \right) \quad (5.11)$$

Η φάση φ_{PSS} που εισάγει ο σταθεροποιητής θα πρέπει να ισούται με το επιθυμητό όρισμα φ όπως αυτό ορίζεται από τη σχέση (5.1). Η φάση φ_{PSS} όμως μεταβάλλεται με τη συχνότητα και επομένως στο εύρος συχνοτήτων των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων θα πρέπει να ισχύει :

$$\varphi_{PSS}(j\omega) \leq \varphi \quad (5.12)$$

Η σχέση (5.12) μέσω της σχέσης (5.11) γράφεται :

$$\tan^{-1} \left(\frac{(k-1)\omega}{1 + k\omega^2} \right) \leq \frac{\varphi}{n} \quad (5.13)$$

Ο σταθεροποιητής σχεδιάζεται έτσι ώστε η φάση που εισάγει να μεγιστοποιείται στη συχνότητα της ιδιοτιμής που αντιστοιχεί στην ηλεκτρομηχανική ταλάντωση.

Η γωνία προπορείας φάσεως του σταθεροποιητή, που δίνεται από τη σχέση (5.11) μεγιστοποιείται όταν :

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{PSS}}{d\omega} = 0 &\Leftrightarrow \\ \frac{(k-1)(1+k\omega^2) - 2k\omega^2(k-1)}{(1+k\omega^2)^2 + (k-1)^2\omega^2} = 0 &\Leftrightarrow \\ (k-1)(1+k\omega^2) - 2k\omega^2(k-1) = 0 \end{aligned} \quad (5.14)$$

Από την (5.14) προκύπτει ότι η γωνία προπορείας φάσεως μεγιστοποιείται όταν:

$$w_{\max \phi} = \frac{1}{\sqrt{k}} \quad (5.15)$$

Συνεπώς η σχέση (5.8) για συχνότητα ίση με τη συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης γίνεται :

$$\omega_{em} = \frac{w_{\max \phi}}{T} = \frac{1}{T\sqrt{k}} = \frac{1}{\sqrt{kTT}} = \frac{1}{\sqrt{T_1 T_2}} \quad (5.16)$$

Η κεντρική συχνότητα δηλαδή είναι ο γεωμετρικός μέσος των συχνοτήτων $\frac{1}{T_1}$ και $\frac{1}{T_2}$ του κυκλώματος προπορείας.

Η φάση που εισάγει ο σταθεροποιητής στη συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης ισούται με το επιθυμητό όρισμα φ_i και είναι :

$$\varphi = n \tan^{-1} \left(\frac{(k-1)w_{\max \phi}}{1 + kw_{\max \phi}^2} \right) = n \tan^{-1} \left(\frac{(k-1)(1/\sqrt{k})}{1 + k(1/\sqrt{k})^2} \right) = n \tan^{-1} \left(\frac{(k-1)}{2\sqrt{k}} \right) \quad (5.17)$$

Μετά από πράξεις οι οποίες βασίζονται σε στοιχειώδεις ιδιότητες των τριγωνομετρικών αριθμών προκύπτει ότι :

$$k = \frac{1 + \sin\left(\frac{\varphi}{n}\right)}{1 - \sin\left(\frac{\varphi}{n}\right)} \quad (5.18)$$

Αφού υπολογιστεί η σταθερά k από τη σχέση (5.18), μετά μέσω των σχέσεων (5.16) και (5.8) υπολογίζονται οι χρονικές σταθερές T_1 και T_2 . [4]

5.2.3 Υπολογισμός γωνίας αντισταθμίσεως με τη μέθοδο της συνάρτησης μεταφοράς GEP(s)

Με την παραπάνω μεθοδολογία μπορεί να σχεδιαστεί ένας σταθεροποιητής n όμοιων βαθμίδων ο οποίος να αποσβένει πλήρως έναν ηλεκτρομηχανικό ρυθμό. Επιπλέον όμως ο σταθεροποιητής μπορεί να προσφέρει μια μερική αντιστάθμιση για ένα εύρος συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα αυτού του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού.

Ένας διαφορετικός τρόπος εύρεσης της γωνίας αντιστάθμισης και της συνάρτησης μεταφοράς του σταθεροποιητή είναι ο υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος έχοντας ανοίξει όλους τους βρόχους γωνίας-ισχύος των μηχανών στο σύστημα. Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι ο υπολογισμός της συνιστώσας ροπής που οφείλεται αποκλειστικά στη δράση του αυτόματου ρυθμιστή τάσεως. Για να επιτευχθεί αυτό, θεωρείται ότι η αδράνεια των μηχανών είναι πολύ μεγάλη ώστε να μην επιδρά ο βρόχος γωνίας στην ηλεκτρομαγνητική ροπή. [17] Έτσι η συνάρτηση μεταφοράς $G(s)$, η οποία λαμβάνει υπόψη και την επίδραση του βρόχου γωνίας-ισχύος στην ηλεκτρομαγνητική ροπή, προσεγγίζεται σε ένα εύρος συχνοτήτων από μια συνάρτηση μεταφοράς $GEP(s)$ που έχει είσοδο την τάση αναφοράς του αυτόματου ρυθμιστή τάσεως και έξοδο την ηλεκτρομαγνητική ροπή της μηχανής αλλά αγνοεί τη επίδραση της μεταβολής των ταχυτήτων.

Η μέθοδος του υπολογισμού της προσεγγιστικής συνάρτησης μεταφοράς $GEP(s)$, είναι λιγότερο ακριβής από τη μέθοδο των ολοκληρωτικών υπολοίπων, αλλά μπορεί να αποσβένει ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις που εμφανίζονται σε ένα μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Η ευρωστία της μεθόδου αυτής ενισχύεται από το γεγονός ότι έχει αποδειχθεί ότι στις περισσότερες εφαρμογές αυτή η συνάρτηση μεταφοράς έχει αναλλοίωτη μορφή για ένα πολύ μεγάλο εύρος σημείων λειτουργίας.

Ο υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς του σταθεροποιητή μπορεί να γίνει με δοκιμές και διορθώσεις (try and error). Η υστέρηση φάσεως της προσεγγιστικής συνάρτησης μεταφοράς συγκρίνεται με την προπορεία φάσεως που εισάγει μια συνάρτηση μεταφοράς του σταθεροποιητή, σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Επειδή ο σταθεροποιητής δεν μπορεί να αντισταθμίσει πλήρως αυτή την υστέρηση φάσεως σε όλο το εύρος των συχνοτήτων, η συνάρτηση μεταφοράς του επιλέγεται ώστε να εξασφαλίζεται μερική (και όχι ακριβής) απόσβεση ορισμένων κρίσιμων ηλεκτρομηχανικών ρυθμών του συστήματος. [5,6]

5.2.4 Εναλλακτική μέθοδος σχεδίασης

Μια εναλλακτική μέθοδος σχεδίασης βασίζεται στην παρατήρηση ότι ο σταθεροποιητής θα πρέπει να εισάγει μεγαλύτερη αντιστάθμιση φάσεως σε συχνότητες μεγαλύτερες από τον εξεταζόμενο κρίσιμο ηλεκτρομηχανικό ρυθμό, ώστε να αποσβένονται επαρκώς οι τοπικοί ρυθμοί που εμφανίζονται μεταξύ μηχανών στον ίδιο σταθμό παραγωγής (intra-plant modes).

Έτσι, επιλέγεται ως κεντρική συχνότητα $\omega_c = \frac{1}{\sqrt{T_1 T_2}}$ μια τιμή που αντιστοιχεί σε συχνότητα 3-4 Hz. Επίσης, η φάση που αντισταθμίζεται επιλέγεται λίγο μικρότερη από τη φ , έτσι ώστε να αυξάνει λίγο η συχνότητα του ρυθμού στο αρχικό σημείο.

Η γωνία αντισταθμίσεως του σταθεροποιητή θα δίνεται από τη σχέση $\varphi_{PSS} = \varphi - \Delta\varphi$, όπου $\Delta\varphi \cong 10^\circ - 30^\circ$. Η μέθοδος αυτή θα χρησιμοποιηθεί επίσης σε επόμενο κεφάλαιο.

5.2.5 Υπολογισμός του κέρδους του σταθεροποιητή

Στις περισσότερες τεχνικές σχεδίασης το κέρδος υπολογίζεται με δοκιμές. Κατά την επιλογή του, θα πρέπει γενικά να λαμβάνεται υπόψη η ενδεχόμενη αλληλεπίδραση με τους άλλους ρυθμούς του συστήματος. Ο υπολογισμός του κέρδους βασίζεται στην αναπαράσταση του γεωμετρικού τόπου των ριζών του συστήματος πάνω στο μιγαδικό επίπεδο καθώς το κέρδος αυξάνεται. Επιλέγεται το κέρδος εκείνο που εξασφαλίζει την καλύτερη δυνατή απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων χωρίς όμως να επηρεάζεται κάποιος από τους άλλους ρυθμούς του συστήματος. [5]

5.3 Σχεδίαση Σταθεροποιητή στο Σύστημα

5.3.1 Επιλογή του σταθμού και της γεννήτριας

Παραθέτουμε εδώ για λόγους συνέχειας κάποια από τα αποτελέσματα που παρουσιάσαμε στο 4^ο κεφάλαιο. Ο ηλεκτρομηχανικός ρυθμός για τον οποίο θα γίνει η σχεδίαση του σταθεροποιητή, είναι ο ρυθμός 7 ($\lambda = -0,1171 + j 5,1728$) του συστήματος του Πίνακα 4.1, ο οποίος εμφανίζει την μικρότερη απόσβεση ($\zeta = 2,26\%$) και οφείλεται στη διασύνδεση ενός τμήματος της Τουρκίας με το Ελληνικό Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η σχεδίαση των σταθεροποιητών θα γίνει για την περίπτωση Α, όπου όλες οι γραμμές του συστήματος είναι ενεργοποιημένες και θα εξεταστεί η αποτελεσματικότητά του για την περίπτωση του σεναρίου Β, όπου η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων βρίσκεται εκτός λειτουργίας.

Τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα και οι συντελεστές συμμετοχής των μηχανών σε αυτόν το ρυθμό, δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.1 στον οποίο δεν συμπεριλαμβάνονται οι τουρκικές μηχανές, καθώς η σχεδίαση θα γίνει για γεννήτριες του ελληνικού συστήματος.

Πίνακας 5.1: Οι συντελεστές συμμετοχής και τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα των ελληνικών μηχανών για το ρυθμό διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας

Όνομα Μηχανής	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ	ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΑ ΥΠΟΛΟΙΠΑ	
		Μέτρο	Φάση
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_3	0,4650	0,2755	77,219
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_1	0,4383	0,2598	77,343
ΚΟΜΟΤΗΝΗ_2	0,4354	0,2598	77,381
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_4	0,6969	0,1402	-4,1722
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_3	0,6300	0,1272	-6,6789
ΘΗΣΑΥΡΟΣ_3	0,1018	0,07572	93,50
ΘΗΣΑΥΡΟΣ_3	0,1018	0,07572	93,50
ΘΗΣΑΥΡΟΣ_3	0,1018	0,07572	93,50
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_2	0,2102	0,06614	5,5288
ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ_1	0,2102	0,06614	5,5288
ΚΑΣΤΡΑΚΙ_3	0,1634	0,05099	20,738

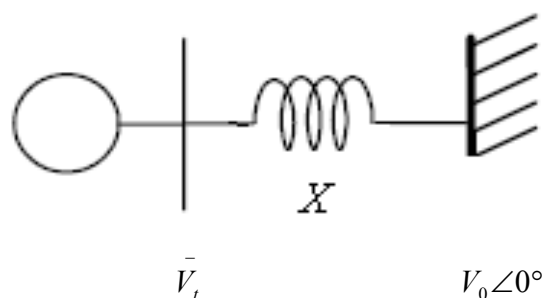
Όπως αναφέρθηκε, οι συντελεστές συμμετοχής δεν είναι πάντοτε ένα αξιόπιστο κριτήριο επιλογής της θέσης του σταθεροποιητή στο σύστημα. Γι' αυτό, πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας κι άλλες παραμέτρους για την επιλογή της θέσης εγκατάστασης σταθεροποιητή. Έτσι, είναι καλύτερο να εξετάζουμε και τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα, τα οποία δείχνουν την ευαισθησία μεταβολής των ιδιοτιμών στην μεταβολή της ανατροφοδότησης σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου. Το ολοκληρωτικό υπόλοιπο περιλαμβάνει και την επίδραση του κέρδους του αυτόματου ρυθμιστή τάσης και της αδράνειας H της μηχανής.

Το μέτρο ενός ολοκληρωτικού υπολοίπου δείχνει το πόσο θα μετατοπιστεί η ιδιοτιμή και το όρισμά του καθορίζει το προς τα πού θα μετακινηθεί η ιδιοτιμή. Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1, μεγαλύτερο συντελεστή συμμετοχής, εμφανίζει η μονάδα 4 στην Μεγαλόπολη. Συγκρίνοντας όμως το ολοκληρωτικό υπόλοιπο για την μονάδα 4 της Μεγαλόπολης και τη μονάδα 1 του ΘΗΣ της Κομοτηνής, παρατηρούμε ότι το ολοκληρωτικό υπόλοιπο της μονάδας της Μεγαλόπολης είναι μικρότερο από αυτό της μονάδας της Κομοτηνής. Αυτό, δικαιολογείται από το γεγονός ότι το κέρδος του αυτόματου ρυθμιστή τάσης στη μονάδα της Κομοτηνής είναι το διπλάσιο από αυτό του αντίστοιχου αυτόματου ρυθμιστή τάσης στη Μεγαλόπολη.

Έτσι, θα επιλέξουμε να τοποθετήσουμε σταθεροποιητή στο ΘΗΣ της Κομοτηνής έτσι ώστε να επιτύχουμε ικανοποιητική απόσβεση του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού εξαιτίας της διασύνδεσης Τουρκίας-Ελλάδος.

5.3.2 Υπολογισμός γωνίας αντισταθμίσεως σταθεροποιητή με τη γεννήτρια συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό

Πριν προχωρήσουμε στη σχεδίαση για το Ελληνικό Σύστημα, θεωρούμε μια σύγχρονη γεννήτρια, συνδεδεμένη σε έναν άπειρο ζυγό μέσω μιας γραμμής μεταφοράς η οποία έχει επαγωγική αντίδραση X και αμελητέα ωμική αντίσταση.



Σχήμα 5. 2 Σύστημα γεννήτριας – άπειρου ζυγού

Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται το σύστημα της γεννήτριας – άπειρου ζυγού. Στην παρούσα ενότητα, η σύγχρονη γεννήτρια παριστάνεται με ένα μοντέλο τρίτης τάξεως. Η προσομοίωση έγινε αρχικά σε περιβάλλον MATLAB και έπειτα στο PSS/E.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τα πραγματικά στοιχεία μιας μηχανής του ελληνικού συστήματος, και συγκεκριμένα μιας αεριοστροβλικής μονάδας, που είναι εγκατεστημένη στην Κομοτηνή. Η γεννήτρια, είναι εφοδιασμένη με ρυθμιστή στροφών και ρυθμιστή τάσεως τα οποία παριστάνουμε με τα αντίστοιχα μοντέλα που υλοποιήσαμε με τη βοήθεια των διατάξεων που περιέχονται στη βιβλιοθήκη του Simulink.

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας παρατίθενται στον Πίνακα 5.2 :

Πίνακας 5.2 : Δυναμικά χαρακτηριστικά της σύγχρονης γεννήτριας

S_{nom} (MVA)	R (α.μ.)	X (α.μ.)	X_d (α.μ.)	X_q (α.μ.)	X'_d (α.μ.)	X'_q (α.μ.)	T'_{d0} (s)	T'_{q0} (s)	H (s)
190	0	0.1	2.0530	1.9720	0.2940	0.3820	6.6	1	4.97

Τα δεδομένα του συστήματος και η ροή φορτίου παρατίθενται στο ανά μονάδα σύστημα στον Πίνακα 5.3. Βασική ισχύς του συστήματος θεωρείται ότι είναι τα 190 MVA ενώ η συχνότητα του συστήματος είναι $f = 50\text{Hz}$.

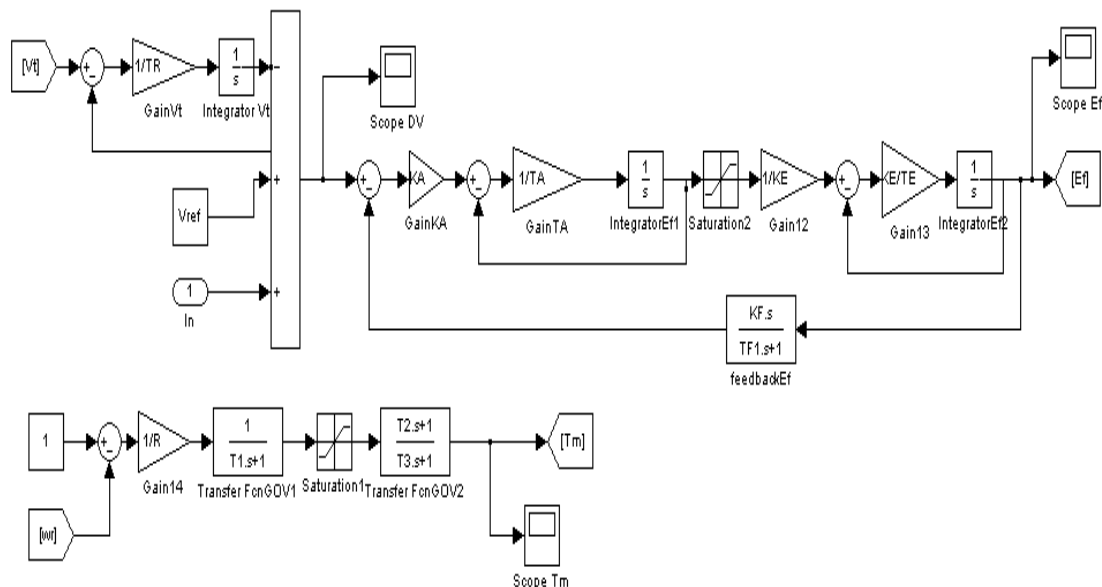
Πίνακας 5.3 : Δεδομένα του συστήματος

V_t	$\angle V_t$	V_0	$\angle V_0$	P_G	Q_G
1.0288	35.12	1.0072	0	140.7	31.5

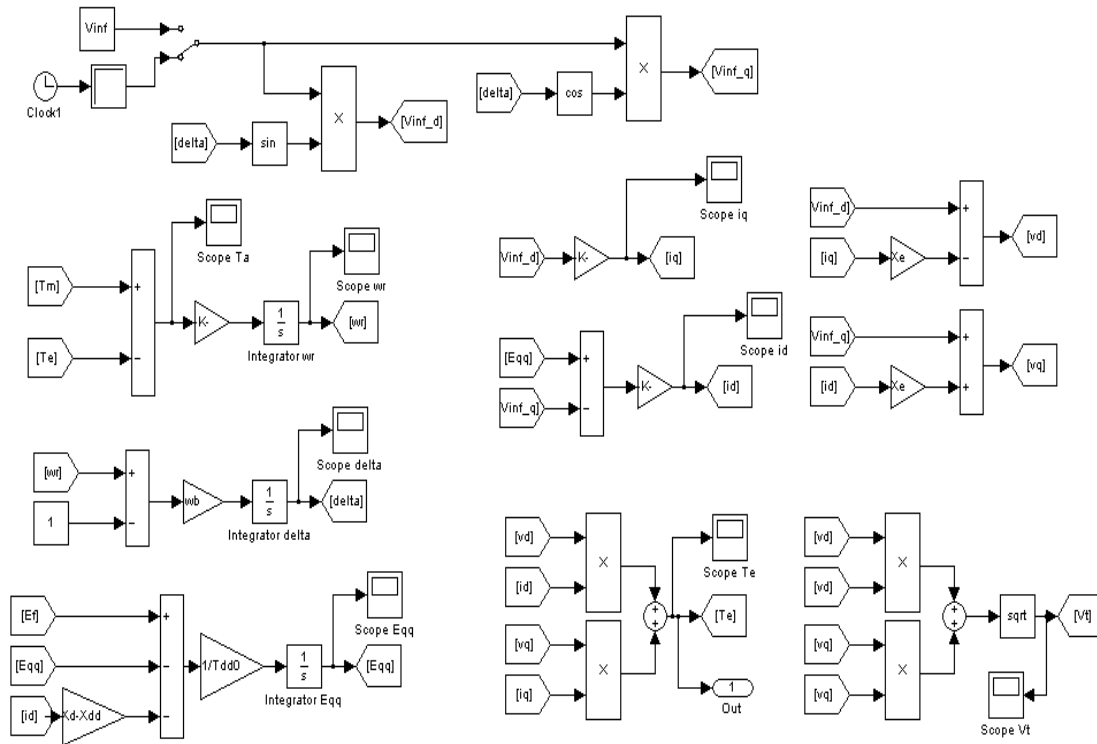
Η επαγωγική αντίδραση X θεωρήθηκε ίση με $X = 0.1$, τιμή που προέκυψε από τη στάθμη βραχυκύκλωσης στο σταθμό Κομοτηνής ($S=400\text{MVA}$). Στην τιμή αυτή προσθέτουμε την επαγωγική αντίδραση X του μετασχηματιστή, ο οποίος συνδέει τη γεννήτρια στον άπειρο ζυγό. $X_{M/\Sigma} = 0,07409$ (α.μ)

Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι ο υπολογισμός της προσεγγιστικής συνάρτησης μεταφοράς $GEP(s)$, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.2.3. Για να επιτευχθεί αυτό, θεωρήσαμε την τιμή της σταθεράς αδράνειας H της μηχανής πολύ μεγάλη ($H=2000$ MWA/s) έτσι ώστε να μην επιδρά ο βρόχος γωνίας-ισχύος στην ηλεκτρομαγνητική ροπή. Έτσι η συνάρτηση μεταφοράς $GEP(s)$ που έχει είσοδο την τάση αναφοράς του αυτόματου ρυθμιστή τάσεως και έξοδο την ηλεκτρομαγνητική ροπή της μηχανής αμελεί την επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας. [15]

Στα Σχήματα 5.3 και 5.4, δίνονται αναλυτικά τα διαγράμματα βαθμίδων των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση και σημειώνονται η είσοδος και η έξοδος του συστήματος για τον υπολογισμό της συνάρτησης μεταφοράς.



Σχήμα 5.3 Παράσταση αυτόματου ρυθμιστή τάσεως IEE1 και ρυθμιστή στροφών TGOV1 στο Simulink



Σχήμα 5.4 Παράσταση σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα με μοντέλο 3^{ης} τάξης στο Simulink

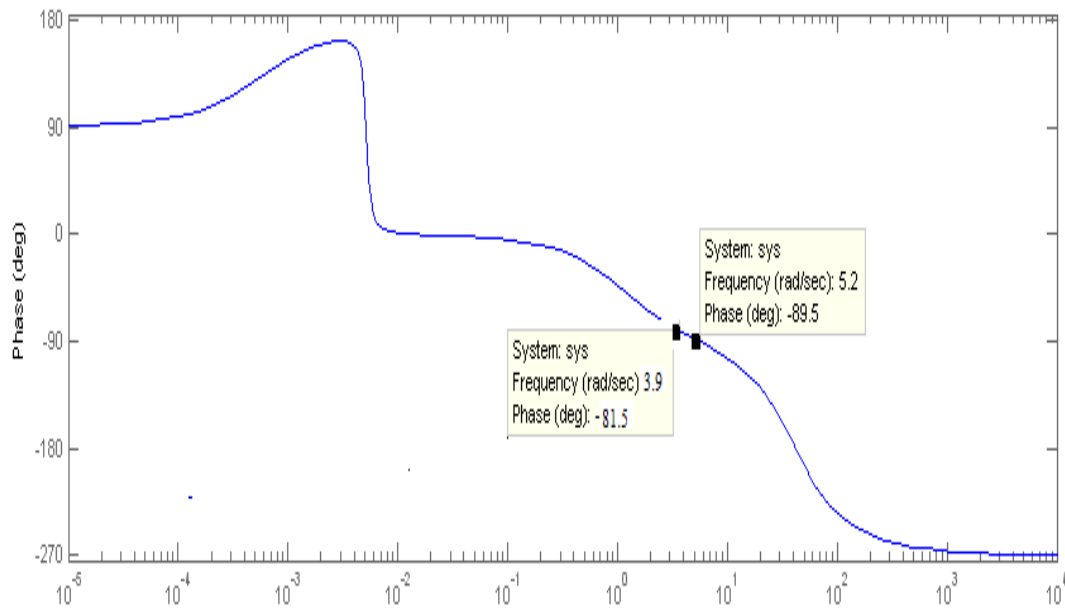
Αρχοκοποιούμε το σύστημα και χρησιμοποιώντας ένα βοηθητικό αρχείο το σύστημα γραμματικοποιείται και υπολογίζονται οι ιδιοτιμές του. Έπειτα σχεδιάζεται το διάγραμμα Bode για την φάση φ_{GEP} της συνάρτησης μεταφοράς στο πεδίο της συχνότητας.

Έχοντας την τιμή της συχνότητας του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού για τον οποίο θα σχεδιάσουμε τον σταθεροποιητή, μπορούμε να υπολογίσουμε προσεγγιστικά την γωνία αντιστάθμισης του σταθεροποιητή. Η συνολική φάση του συστήματος μετά την προσθήκη του σταθεροποιητή θα πρέπει να είναι μηδενική ώστε η ηλεκτρομαγνητική ροπή να βρίσκεται εν φάσει με το σφάλμα συχνότητας. Συνεπώς η γωνία αντιστάθμισης του σταθεροποιητή φ , θα πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση :

$$\varphi_{GEP} + \varphi = 0 \Rightarrow \varphi = -\varphi_{GEP} \quad (5.19)$$

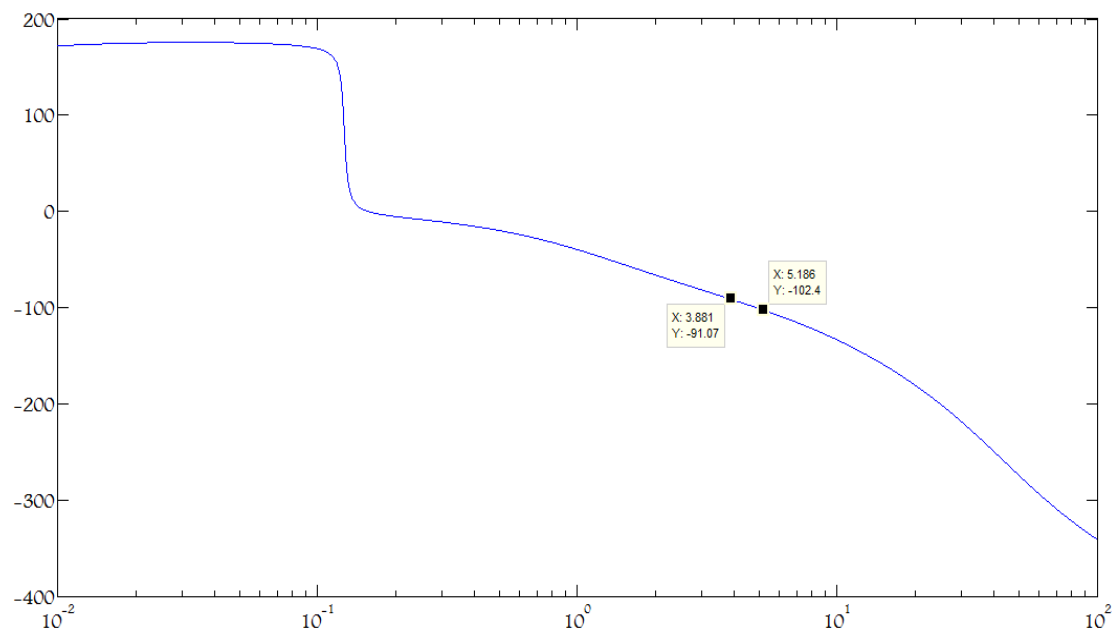
Παρότι το σύστημα του Σχήματος 5.2 εμφανίζει μια δική του συχνότητα ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης, σκοπός μας σε αυτή την ενότητα είναι να υπολογίσουμε προσεγγιστικά τη φάση αντιστάθμισης που χρειάζεται για την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων στο Ελληνικό Σύστημα χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο σύστημα γεννήτριας-άπειρου ζυγού.

Στο Σχήμα 5.5 σημειώνονται τα σημεία που δίνουν τη φάση της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος για συχνότητα ίση με την συχνότητα του ασθενώς αποσβενύμενου ηλεκτρομηχανικού ρυθμού του ελληνικού συστήματος.



Σχήμα 5.5 Διάγραμμα Bode του συστήματος γεννήτριας- άπειρου ζυγού στο MATLAB

Για να ελέγξουμε την ορθότητα των αποτελεσμάτων αυτής της προσομοίωσης, σχεδιάζουμε το ίδιο σύστημα στο πρόγραμμα PSS/E. Το διάγραμμα Bode της φάσης του συστήματος, που πρόεκυψε με την προσομοίωση του συστήματος μηχανής- άπειρου ζυγού φαίνεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα Bode του συστήματος γεννήτριας- άπειρου ζυγού στο PSS/E

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.5 και 5.6 και τις τιμές της φάσης της συνάρτησης μεταφοράς GEP που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση για τη συχνότητα του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού του Ελληνικού Συστήματος, Πίνακας 5.4, παρατηρούμε μια απόκλιση στη γωνία αντιστάθμισης τάξεως 15°. Αυτό είναι ένα λογικό συμπέρασμα, καθώς στη προσομοίωση του PSSE χρησιμοποιήθηκε για την παράσταση της γεννήτριας, μοντέλο 6^{ης} τάξης από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος, ενώ η προσομοίωση του MATLAB υλοποιήθηκε με ένα μοντέλο 3^{ης} τάξης.

Πίνακας 5.4: Γωνία αντισταθμίσεως με τη GEP(s) στο σύστημα γεννήτριας συνδεδεμένης σε άπειρο ζυγό

Συχνότητα ρυθμού	MATLAB	PSS/E
$\omega = 5,18 \text{ r/s}$	89,5°	102,4°

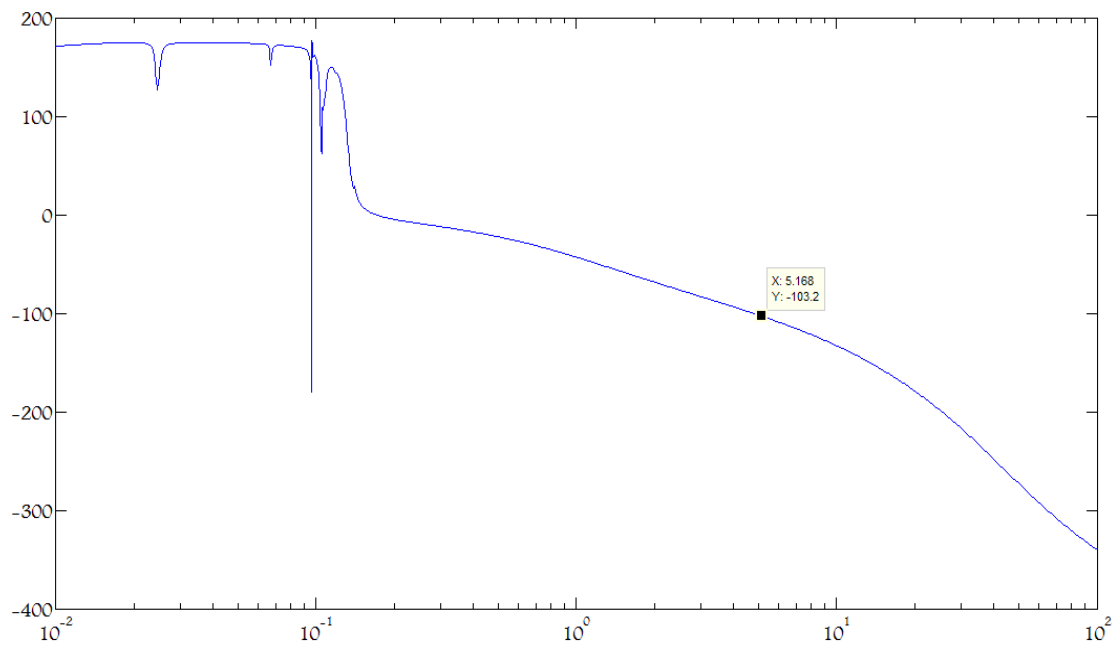
Συνεπώς, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν με το PSSE είναι ακριβέστερα και η απόκλιση των αποτελεσμάτων οφείλεται στην διαφορά της τάξεως του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την παράσταση της γεννήτριας σε κάθε προσομοίωση.

5.3.3 Υπολογισμός φάσης αντιστάθμισης με τη μέθοδο GEP(s) στο Ελληνικό Σύστημα

Για να ελέγξουμε την αποτελεσματικότητα της παραπάνω μεθόδου εύρεσης της γωνίας αντισταθμίσεως του σταθεροποιητή, θα υπολογίσουμε τη συνάρτηση μεταφοράς GEP(s) και για ολόκληρο το σύστημα που μελετούμε στο PSS/E.

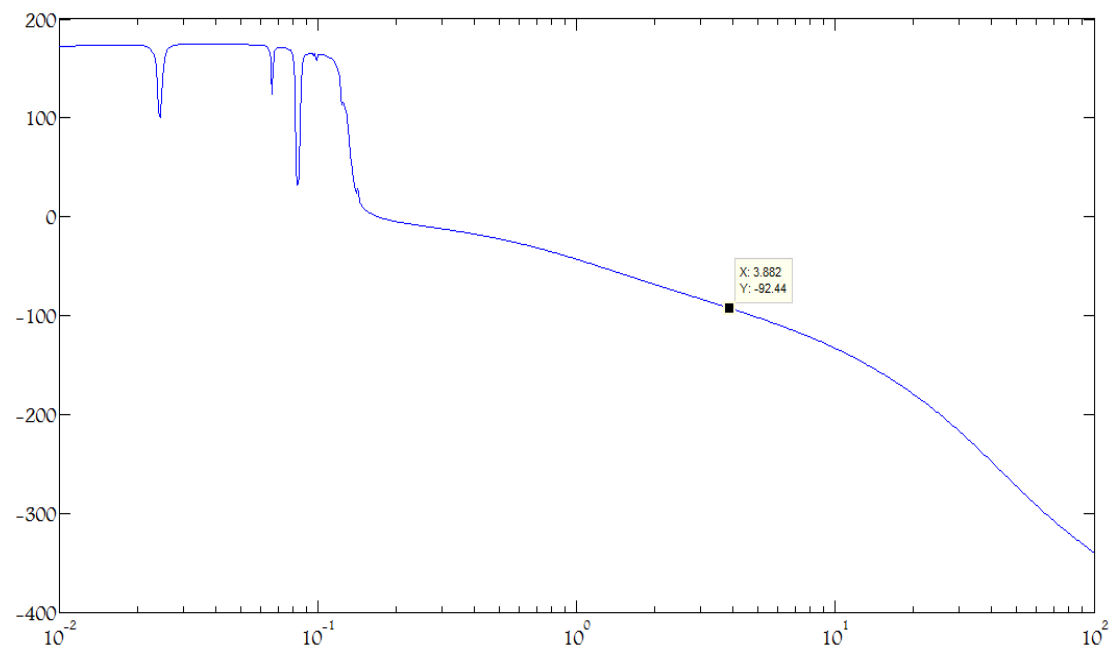
Για να το επιτύχουμε αυτό, ανοίγουμε όλους τους βρόχους γωνίας-ισχύος της μηχανής, θέτοντας μεγάλη τιμή στη σταθερά αδράνειας Η όλων των μηχανών του συστήματος τάξεως 10000MVA/s, και ορίζουμε την είσοδο και την έξοδο του συστήματος στη μηχανή 1 του ΘΗΣ της Κομοτηνής όπως και στην προσομοίωση του συστήματος μηχανής-άπειρου ζυγού.

Στο Σχήμα 5.7 δίνεται το διάγραμμα Bode του συστήματος με όλες τις γραμμές μεταφοράς ενεργοποιημένες. Σημειώνεται η συχνότητα του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού για τον οποίο θέλουμε να σχεδιάσουμε τον σταθεροποιητή και η αντίστοιχη φάση της συνάρτησης μεταφοράς GEP(s) που πρέπει να αντισταθμιστεί από τη συνάρτηση μεταφοράς του σταθεροποιητή.



Σχήμα 5.7 Διάγραμμα Bode της φάσης του συστήματος, με όλες τις γραμμές ενεργοποιημένες

Αντίστοιχα στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η φάση της συνάρτησης GEP(s) του συστήματος για την περίπτωση που η γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων βρίσκεται εκτός λειτουργίας:



Σχήμα 5.8 Διάγραμμα Bode της φάσης του συστήματος με τη γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων απενεργοποιημένη

Στον Πίνακα 5.5 δίνονται οι τιμές που προέκυψαν για την γωνία αντισταθμίσεως του ρυθμού του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού του Ελληνικού Συστήματος. Παρατηρούμε ότι οι τιμές που πρόεκυψαν από τον υπολογισμό της GEP στο Ελληνικό Σύστημα, ταυτίζονται με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος μιας μηχανής συνδεδεμένης σε άπειρο ζυγό στο PSS/E. Αυτό είναι λογικό, καθώς οι δυο προσομοιώσεις έγιναν στο ίδιο περιβάλλον, με τα ίδια μοντέλα διατάξεων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του PSS/E. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η παράσταση γεννήτριας σε άπειρο ζυγό μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα παρότι είναι μια προσεγγιστική μέθοδος.

Πίνακας 5.5: Γωνία αντισταθμίσεως μέσω της GEP(s)

	MATLAB	PSS/E	
Συχνότητα ρυθμού	Σύστημα γεννήτριας-άπειρου ζυγού		Ελληνικό Σύστημα
$\omega = 5,18 \text{ r/s}$	89,5°	102,4°	103,2°
$\omega = 3,89 \text{ r/s}$	81,5°	91°	92,44°

Από τα διαγράμματα Bode που παρουσιάστηκαν στα σχήματα (5.7)-(5.8), παρατηρούμε ότι η συχνότητα που αντιστοιχεί στον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό του συστήματος όταν έχει αποσυνδεθεί η γραμμή μεταφοράς Θεσσαλονίκης-Φιλίππων, χρειάζεται μικρότερη φάση αντιστάθμισης.

Αυτό πιθανότατα συνεπάγεται πως, η σχεδίαση σταθεροποιητή που θα γίνει για το ρυθμό στην πρώτη περίπτωση λειτουργίας του συστήματος με όλες τις γραμμές σε λειτουργία, θα αντισταθμίζει την υστέρηση φάσεως του ρυθμού στην άλλη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, αυξάνοντας την απόσβεσή του.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.5, ο σταθεροποιητής πρέπει να εισάγει προπορεία φάσεως της τάξης των 103,2°. Στον Πίνακα 5.1, το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου είναι 77,3°, συνεπώς η γωνία αντιστάθμισης του σταθεροποιητή πρέπει να είναι 102,7° σύμφωνα με την σχέση (5.1). Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η μέθοδος υπολογισμού της γωνίας της αντιστάθμισης του σταθεροποιητή μέσω του υπολογισμού της προσεγγιστικής συνάρτησης μεταφοράς GEP(s) είναι ακριβής για το σενάριο A, για το ρυθμό του οποίου θα γίνει η σχεδίαση.

Για το σενάριο B, το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου για τις μονάδες 1 και 2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής είναι 112° (Πίνακας 4.22), Συνεπώς χρειάζεται αντιστάθμιση φάσεως 68°, ενώ με τη μέθοδο της GEP(s), σύμφωνα με τον Πίνακα 5.5 απαιτείται γωνία 89°. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι στην περίπτωση ασθενούς διασύνδεσης (Σενάριο B) εξαιτίας συντονισμού δύο ρυθμών του συστήματος, η μέθοδος υπολογισμού της προσεγγιστικής συνάρτησης μεταφοράς GEP(s) αποκλίνει αισθητά από την τιμή φάσης που δίνει η μέθοδος των ολοκληρωτικών υπολοίπων.

Κεφάλαιο 6

Σχεδίαση Σταθεροποιητή Στο Ελληνικό Σύστημα

6.1 Η μέθοδος Σχεδίασης του Σταθεροποιητή

Με την μεθοδολογία που θα χρησιμοποιήσουμε σε αυτό το κεφάλαιο, θα σχεδιαστεί ένας σταθεροποιητής 2 όμοιων βαθμίδων ο οποίος θα αποσβένει πλήρως έναν ηλεκτρομηχανικό ρυθμό. Επιπλέον, ο σταθεροποιητής αυτός θα μπορεί να προσφέρει μια μερική αντιστάθμιση για ένα εύρος συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα αυτού του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού. Η σχεδίαση αυτή θα γίνει χρησιμοποιώντας τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα για τον υπολογισμό της γωνίας αντιστάθμισης του σταθεροποιητή.

6.1.1 Υπολογισμός γωνίας αντισταθμίσεως του σταθεροποιητή

Ο σταθεροποιητής θα σχεδιαστεί για τις αεροστροβλικές μονάδες της Κομοτηνής 1 και 2, με σκοπό την βελτίωση της απόσβεσης του ρυθμού διασύνδεσης της Ελλάδος με την Τουρκία, για την περίπτωση λειτουργίας A του συστήματος, με όλες τις γραμμές ενεργοποιημένες.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2, η τιμή της συχνότητας του ρυθμού αυτού είναι $f = 0,82$ Hz με απόσβεση $\zeta = 2,26\%$. Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1, το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου για τις μονάδες 1,2 της Κομοτηνής είναι $\arg(R_i) = 77,34^\circ$.

Προκειμένου η ιδιοτιμή που σχετίζεται με τον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό να μετατοπιστεί προς τα αριστερά μετά το κλείσιμο του βρόχου από το σταθεροποιητή, η συνάρτηση μεταφοράς του εν λόγω σταθεροποιητή θα πρέπει να έχει στην περιοχή της ιδιοτιμής αυτής μια προπορεία φάσεως.

Η προπορεία φάσεως σύμφωνα με τη σχέση (5.1) πρέπει να είναι :

$$\varphi_i = 180^\circ - 77,6^\circ = 102,66^\circ \quad (6.1)$$

Με τη μέθοδο που περιγράψαμε στην ενότητα 5.1.2, θα σχεδιάσουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του σταθεροποιητή έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η προπορεία φάσεως που εισάγει και να επιτυγχάνεται αντιστάθμιση στη συχνότητα του συγκεκριμένου ηλεκτρομηχανικού ρυθμού.

Ο σταθεροποιητής σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχει 2 όμοιες βαθμίδες αντισταθμίσεως φάσεως, ένα κέρδος K_{PSS} , ένα φίλτρο απαλοιφής καθώς και έναν περιοριστή με όρια $\pm 10\%$, με $V_{s_{max}} = 0.1$ και $V_{s_{min}} = -0.1$.

Το φίλτρο απαλοιφής σχεδιάζεται έτσι ώστε να μην εισάγει σημαντική φάση στο εύρος της συχνότητας της ηλεκτρομηχανικής. Συνήθως δίνουμε μια τυπική τιμή στην χρονική σταθερά T_w του φίλτρου, έστω $T_w = 5 \text{ s}$.

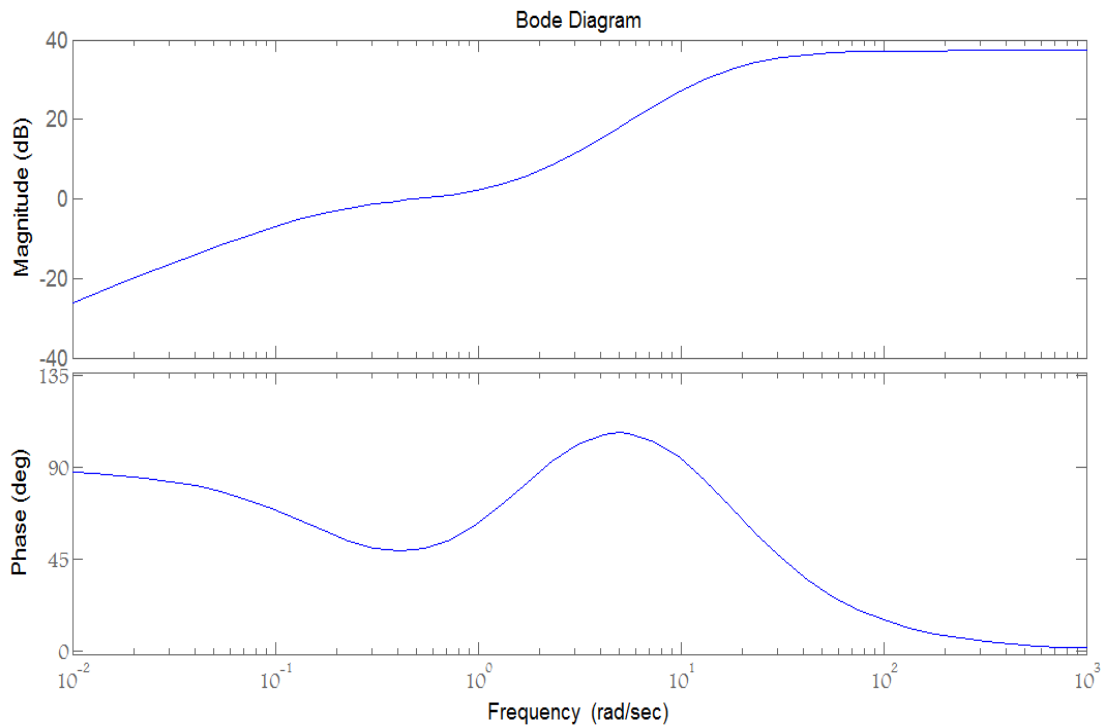
Από τις σχέσεις (5.18), (5.16) και (5.8) υπολογίζονται οι παράμετροι T_1 και T_2 ως :

$$T_1 = 0.56422 \text{ sec} \quad \text{και} \quad T_2 = 0.06586 \text{ sec}.$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του σταθεροποιητή θα είναι :

$$H_{PSS}(s) = \frac{5s}{1+5s} K_{PSS} \frac{1+0.56422s}{1+0.06586s} \frac{1+0.56422s}{1+0.06586s} \quad (6.2)$$

Στο Σχήμα 6.1 δίνεται το διάγραμμα Bode του σταθεροποιητή με τα παραπάνω χαρακτηριστικά:



Σχήμα 6.1 Διάγραμμα Bode του σταθεροποιητή

Στο Σχήμα 6.1 παρατηρούμε ότι το διάγραμμα φάσεως του σταθεροποιητή παρουσιάζει μέγιστο στη συχνότητα του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού ($5.18 \text{ rad/s} \approx 0.82 \text{ Hz}$). Στη συχνότητα αυτή η προπορεία φάσεως που εισάγουν οι δύο βαθμίδες αντισταθμίσεως φάσεως είναι $102,7^\circ$, όση δηλαδή θα έπρεπε να εισάγεται σύμφωνα με τη σχέση (6.1). Στη συχνότητα δηλαδή του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού η προπορεία φάσεως που εισάγεται από τις δύο βαθμίδες αντισταθμίσεως φάσεως του σταθεροποιητή μεγιστοποιείται και η αντιστάθμιση είναι πλήρης. Οι δύο βαθμίδες αντισταθμίσεως φάσεως μπορούν επιπλέον να προσφέρουν μια μερική αντιστάθμιση για ένα εύρος συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα του “κύριου” αυτού ηλεκτρομηχανικού ρυθμού.

Η διαφοροποίηση της συμμετρίας του διαγράμματος Bode του σταθεροποιητή στις χαμηλότερες συχνότητες, οφείλεται στο φίλτρο απαλοιφής του σταθεροποιητή. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το φίλτρο απαλοιφής σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην εισάγει σημαντική φάση. Συγκεκριμένα, η προπορεία φάσεως που εισάγει το φίλτρο απαλοιφής είναι της τάξης των 3° , την οποία μπορούμε να θεωρήσουμε αμελητέα.

6.1.2 Επιλογή του κέρδους του σταθεροποιητή K_{PSS}

Με σταδιακή αύξηση του κέρδους θα επιλέξουμε την κατάλληλη τιμή κέρδους που αντιστοιχεί στη μέγιστη δυνατή απόσβεση του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού. Ο σταθεροποιητής μπορεί να βελτιώσει μέχρι κάποιο βαθμό την απόσβεση ενός ρυθμού, καθώς μετά από κάποια κρίσιμη τιμή του κέρδους του σταθεροποιητή, ορισμένοι ρυθμοί διέγερσης αλληλεπιδρούν με τους ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς και μετατοπίζονται προς τα δεξιά.

Στον Πίνακα 6.1, φαίνεται η μεταβολή της ιδιοτιμής του ρυθμού διασύνδεσης GR-TR, της συχνότητας και του λόγου απόσβεσής του, καθώς αυξάνεται το κέρδος K_{PSS} του σταθεροποιητή:

Πίνακας 6.1: Μεταβολή της ιδιοτιμής του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού με την αύξηση του κέρδους K_{PSS} του σταθεροποιητή

K_{PSS}	λ_i	ζ %	f (Hz)
0	-0,1171 +j 5,1728	2,2626	0,8233
1	-0,1647 +j 5,1761	3,1810	0,8238
2	-0,2065 +j 5,1957	3,9721	0,8269
3	-0,2350 +j 5,2272	4,4914	0,8319
4	-0,2473 +j 5,2609	4,6852	0,8373
5	-0,2482 +j 5,2896	4,6867	0,8419
6	-0,2429 +j 5,3116	4,5685	0,8454
7	-0,2351 +j 5,3273	4,4095	0,8479
8	-0,2271 +j 5,3382	4,2512	0,8496
9	-0,2199 +j 5,3457	4,1104	0,8508
10	-0,2137 +j 5,3512	3,9899	0,8517

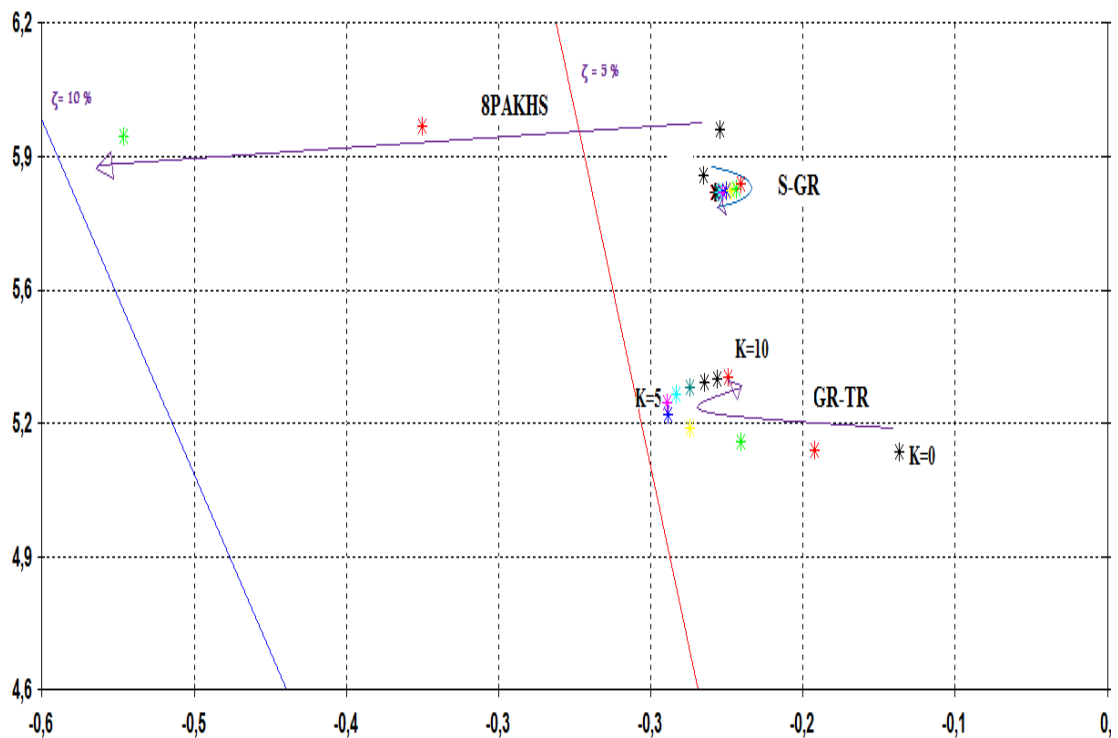
Θα επιλέξουμε λοιπόν για το κέρδος του σταθεροποιητή την τιμή αυτή για την οποία πετυχαίνεται η βέλτιστη απόσβεση του ρυθμού διασύνδεσης. Με αυτή τη σχεδίαση σταθεροποιητή, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.1, πετυχαίνεται μέγιστη απόσβεση 4,7% για κέρδος $K_{PSS}=5$. Παρατηρώντας στον Πίνακα 6.1 την μετατόπιση της ιδιοτιμής με την αύξηση του κέρδους του σταθεροποιητή, μετά την τιμή $K=5$ για το κέρδος η ιδιοτιμή του ρυθμού διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας μετατοπίζεται προς τα δεξιά. Συνεπώς η τιμή $K_{PSS}=5$ είναι η κρίσιμη τιμή του κέρδους του σταθεροποιητή που θα επιλέξουμε.

6.2 Ανάλυση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Ισχυρή Διασύνδεση)

Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε την επίδραση του σταθεροποιητή στο σύστημα και την επίδραση που έχει στους άλλους δύο ασθενώς αποσβενύμενους ρυθμούς του συστήματος με κοντινές συχνότητες με αυτή το ρυθμού διασύνδεσης GR-TR.

6.2.1 Ανάλυση Ιδιοτιμών

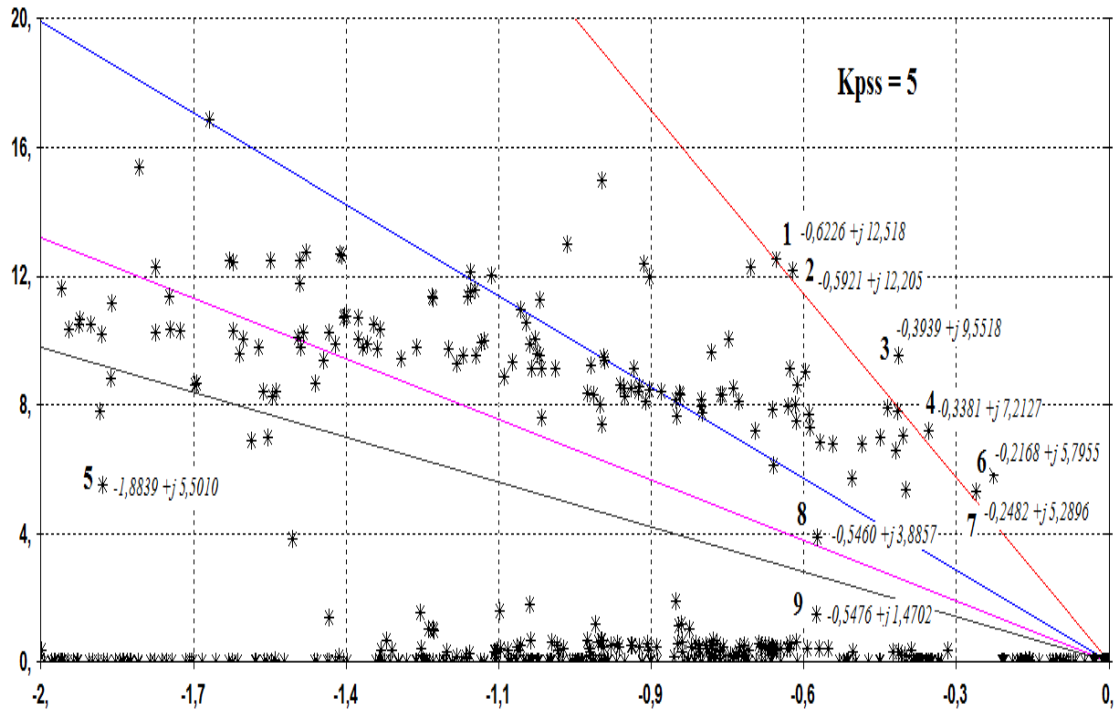
Μεταβάλλοντας λοιπόν, την τιμή του κέρδους του σταθεροποιητή από την τιμή $K=0$ έως την τιμή $K=10$ με βήμα 1, σχεδιάζουμε τον γεωμετρικό τόπο των ριζών του συστήματος. Στο Σχήμα 6.2 φαίνεται η μεταβολή των ιδιοτιμών των ρυθμών που μας ενδιαφέρουν για το σενάριο A της ισχυρής διασύνδεσης, την περίπτωση δηλαδή όπου όλες οι γραμμές του συστήματος είναι εντός λειτουργίας. Με το κάθε βέλος δείχνεται η κατεύθυνση μεταβολής της ιδιοτιμής του ρυθμού διασύνδεσης GR-TR, του νότιου ρυθμού S-GR και του τοπικού ρυθμού Θράκης αντίστοιχα καθώς αυξάνεται το κέρδος του σταθεροποιητή.



Σχήμα 6.2 Μετατόπιση των ιδιοτιμών του ρυθμού GR-TR, του S-GR και του τοπικού ρυθμού της Θράκης λόγω αύξησης του κέρδους του σταθεροποιητή

Με την προσθήκη του σταθεροποιητή στις δυο μηχανές στην Κομοτηνή, αποσβένεται ικανοποιητικά ο τοπικός ρυθμός της Θράκης, ενώ η απόσβεση του S-GR παραμένει ασθενής.

Οι ιδιοτιμές του συστήματος με ενεργοποιημένους τους δύο σταθεροποιητές στις μονάδες 1 και 2 της Κομοτηνής που υπολογίστηκαν από το PacDyn φαίνονται στο Σχήμα 6.3:



Σχήμα 6.3 Οι ιδιοτιμές (πόλοι) του συστήματος με σταθεροποιητή, με $K_{pss}=5$

Στη συνέχεια, παραθέτουμε στον Πίνακα 6.2 για λόγους σύγκρισης, τις ιδιοτιμές του συστήματος χωρίς σταθεροποιητή και τις ιδιοτιμές του συστήματος μετά την προσθήκη σταθεροποιητών με κέρδος $K_{pss} = 5$.

Πίνακας 6.2: Μεταβολή των ιδιοτιμών του συστήματος με την παρουσία σταθεροποιητών στις μονάδες 1,2 στο ΘΗΣ Κομοτηνής

	Χωρίς σταθεροποιητή			Με σταθεροποιητή			Περιγραφή ρυθμού
	Ρυθμοί	$\zeta\%$	f (Hz)	Ρυθμοί	$\zeta\%$	f (Hz)	
1	-0,6226 +j 12,518	4,9675	1,9923	-0,6226 +j 12,518	4,9675	1,9923	Τοπικός 1 (Καρδιά)
2	-0,5921 +j 12,205	4,8460	1,9425	-0,5921 +j 12,205	4,8460	1,9425	Τοπικός 2 (Αγ.Δημ)
3	-0,3939 +j 9,5518	4,1199	1,5202	-0,3939 +j 9,5518	4,1199	1,5202	Τοπικός 3 (BG)
4	-0,3381 +j 7,2128	4,6830	1,1479	-0,3381 +j 7,2127	4,6828	1,1479	Τοπικός 4 (Καστράκι)
5	-0,2181 +j 5,9459	3,6649	0,9463	-1,8839 +j 5,5010	32,399	0,8755	Θράκης

6	$-0,2273 + j 5,8355$	3,8927	0,9288	$-0,2168 + j 5,7955$	3,7376	0,9224	S-GR
7	$-0,1171 + j 5,1728$	2,2626	0,8233	$-0,2482 + j 5,2896$	4,6867	0,8419	GR – TR
8	$-0,4958 + j 3,8923$	12,635	0,6195	$-0,5460 + j 3,8857$	13,915	0,6184	Inter-area GR
9	$-0,5439 + j 1,4798$	34,500	0,2355	$-0,5476 + j 1,4702$	34,904	0,2340	Inter-area UCTE

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.2, με την ενεργοποίηση των σταθεροποιητών παραμένουν αμετάβλητοι οι περισσότεροι τοπικοί ρυθμοί όπως αυτοί του Καστρακίου, του Αγίου Δημητρίου και της Καρδιάς. Οι διασυνοριακοί ρυθμοί του ελληνικού συστήματος και της UCTE δεν μεταβάλλονται εκτός από μικρή αύξηση του λόγου απόσβεσης του διασυνοριακού ρυθμού GR επίσης. Όπως είδαμε, ο ρυθμός του νοτίου συστήματος δεν βελτιώνεται αισθητά ενώ ο τοπικός ρυθμός Θράκης αποσβένεται πλήρως.

Αν δούμε το ολοκληρωτικό υπόλοιπο για το ρυθμό S-GR στον Πίνακα 4.7, παρατηρούμε πως το όρισμα που αντιστοιχεί στις μονάδες 1,2 της Κομοτηνής είναι στις -99° , αντί για 77° που ήταν στο ρυθμό της διασύνδεσης GR-TR. Έτσι, δεν είναι εφικτή η αύξηση της απόσβεσης αυτού του ρυθμού με την παρούσα σχεδίαση του σταθεροποιητή.

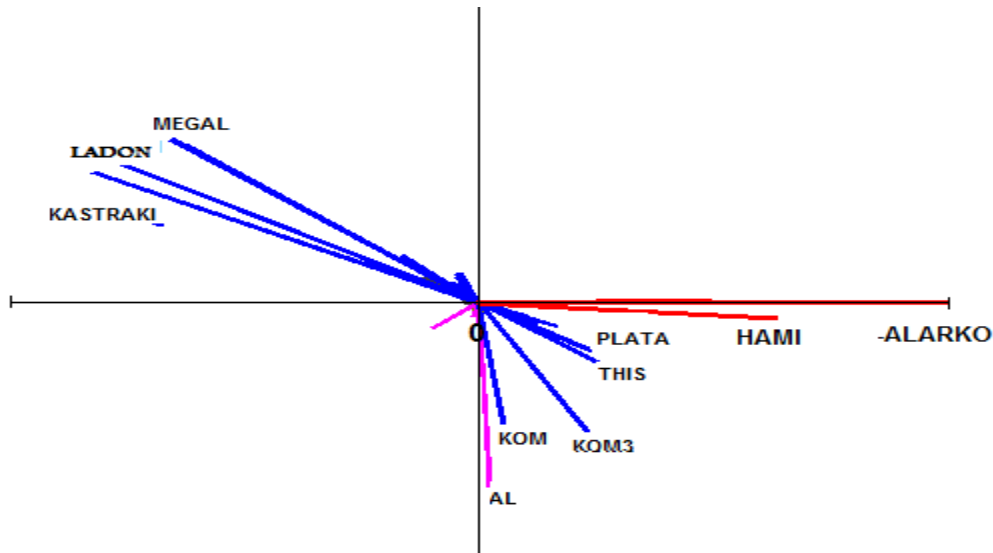
Αντίθετα, αποσβένεται πλήρως ο τοπικός ρυθμός ταλάντωσης της Θράκης Τουρκία, καθώς το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου των μονάδων 1,2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής για αυτόν το ρυθμό είναι σχεδόν το ίδιο με αυτό του ρυθμού διασύνδεσης GR-TR (Πίνακας 4.8).

6.2.2 Μορφή Ρυθμών

Θα δείξουμε τώρα, τη μορφή των ρυθμών ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης του συστήματος έχοντας ενεργοποιήσει τους σταθεροποιητές. Και σε αυτό το κεφάλαιο, για την ανάλυση των ρυθμών, χρησιμοποιείται ως διάνυσμα αναφοράς το διάνυσμα που αντιστοιχεί στη μονάδα ALARKO της Τουρκίας. Στα σχήματα το σύμβολο GR αντιστοιχεί στις ελληνικές μονάδες, το TR στην Τουρκία, το W (ή το BA) αντιστοιχεί στη Βοσνία-Ερζεγοβίνη, το RO στη Ρουμανία, το BG (ή το V) στη Βουλγαρία, το AL στην Αλβανία, το J (ή το FY) στην Π.Γ.Δ.Μ και το Y στη Σερβία.

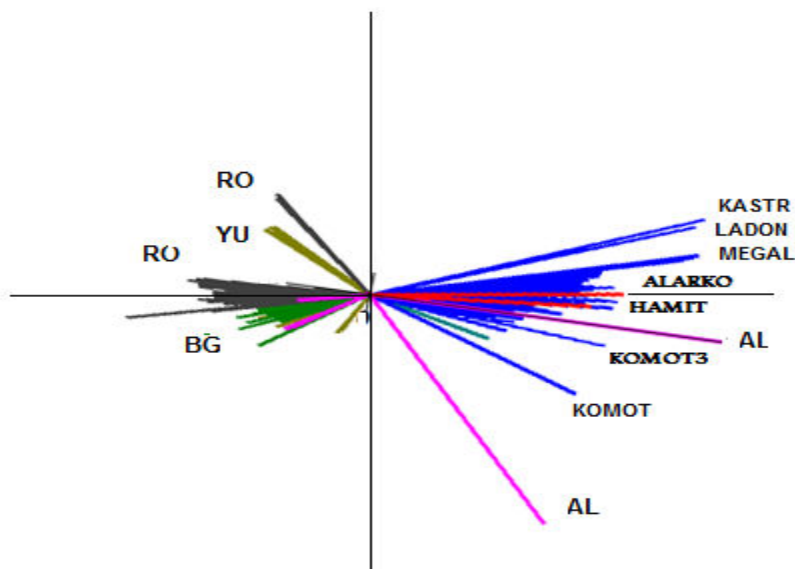
Στο Σχήμα 6.4, απεικονίζεται η μορφή του ρυθμού διασύνδεσης Ελλάδος- Τουρκίας GR-TR, με την παρουσία σταθεροποιητή στο σύστημα. Στο ρυθμό αυτό, οι μονάδες της Θράκης, ταλαντώνονται μαζί με τις τουρκικές μονάδες και αντίθετα από τις υπόλοιπες μονάδες του ελληνικού συστήματος. Η μορφή του ρυθμού δεν έχει

αλλάξει, όμως αξίζει να παρατηρήσουμε στο σχήμα ότι οι μονάδες 1,2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής στις οποίες έχουμε εγκαταστήσει σταθεροποιητές, εμφανίζουν διαφορετική γωνία ταλάντωσης από την μηχανή 3 η οποία δεν είναι εφοδιασμένη με σταθεροποιητή.



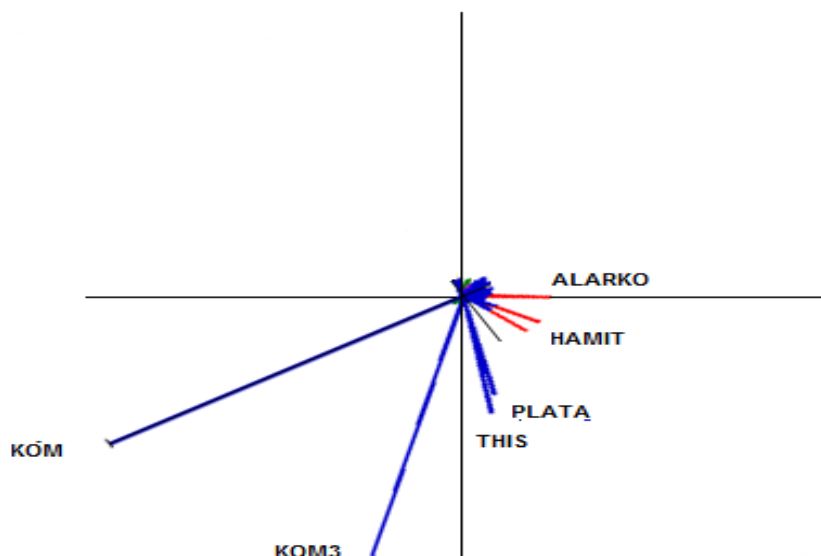
Σχήμα 6.4 Μορφή ρυθμού διασύνδεσης GR-TR με σταθεροποιητή

Στο ρυθμό GR του ελληνικού συστήματος (Σχήμα 6.5), έχουμε εν φάση ταλάντωση όλων των ελληνικών μονάδων και των τουρκικών μονάδων αντίθετα από τις μονάδες των άλλων χωρών, όπως Ρουμανίας, Βουλγαρίας, Βοσνίας-Ερζεγοβίνης κλπ.



Σχήμα 6.5 Η μορφή του ρυθμού GR με σταθεροποιητή

Ο τοπικός ρυθμός της Θράκης μετά την ενεργοποίηση σταθεροποιητών στο σύστημα, αποσβένεται ικανοποιητικά, καθώς με την παρουσία σταθεροποιητή στην Κομοτηνή πετυχαίνεται απόσβεση 32%. Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η μορφή του ρυθμού αυτού, όπου διακρίνεται ξανά ο διαχωρισμός των μονάδων της Κομοτηνής.



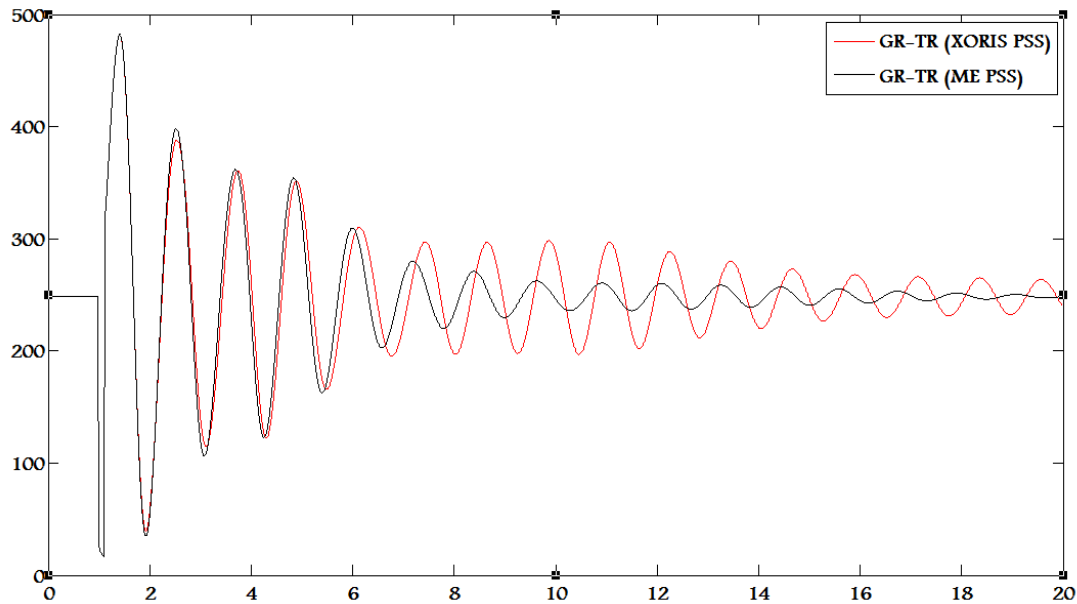
Σχήμα 6.6 Η μορφή του τοπικού ρυθμού της Θράκης με σταθεροποιητή

6.3 Προσομοίωση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Ισχυρή Διασύνδεση)

Προκειμένου να αποτιμηθεί η προτεινόμενη σχεδίαση των σταθεροποιητών, εκτελείται μια προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς του συστήματος σε μια διαταραχή. Η διαταραχή που θα εξετάσουμε, είναι ένα τριφασικό αυτοεκκαθαριζόμενο βραχυκύκλωμα στη γραμμή 400kV Θεσσαλονίκης-Φιλίππων το οποίο θεωρείται ότι εκκαθαρίζεται σε 120msec. Η επιλογή της ίδιας διαταραχής γίνεται με σκοπό τη σύγκριση της απόκρισης του συστήματος με και χωρίς σταθεροποιητές.

Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν με το πρόγραμμα PSS/E Ver.30. Για τις προσομοιώσεις αυτές και την αρχικοποίηση, χρησιμοποιήθηκε ένα αρχείο με τα δυναμικά στοιχεία του συστήματος όπου λαμβάνονται υπόψη οι περιοριστές. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται η απόκριση του συστήματος χωρίς σταθεροποιητές ενώ με μαύρο χρώμα δείχνεται η απόκρισή του παρουσία σταθεροποιητών.

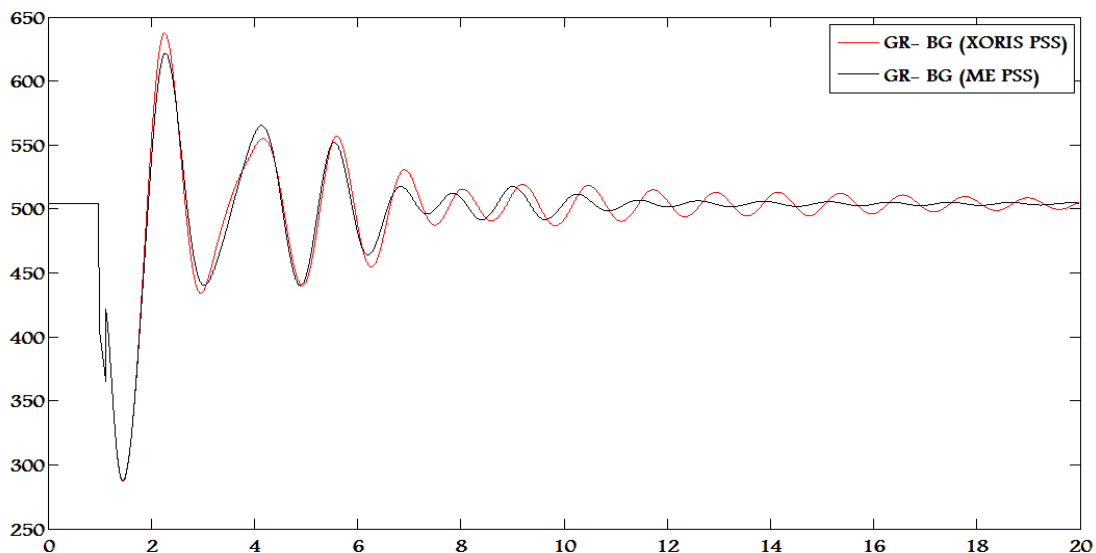
Η μεταβολή στη ταλάντωση της ροής ενεργού ισχύος στη γραμμή διασύνδεσης του ελληνικού συστήματος με την τουρκική νησίδα φαίνεται στο Σχήμα 6.7:



Σχήμα 6.7 Ροή ενεργού ισχύος στη διασύνδεση της Ελλάδος με την Τουρκία

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7 η διαταραχή δεν διεγείρει ιδιαίτερα το ρυθμό ταλάντωσης του Ελληνικού Συστήματος και έτσι η αρχική ταλάντωση είναι παρόμοια με και χωρίς σταθεροποιητή. Ωστόσο μετά τα 6 sec, κυριαρχεί ο ρυθμός GR-TR συχνότητας 0,82 Hz ενώ με τον σταθεροποιητή η απόσβεση είναι ικανοποιητική.

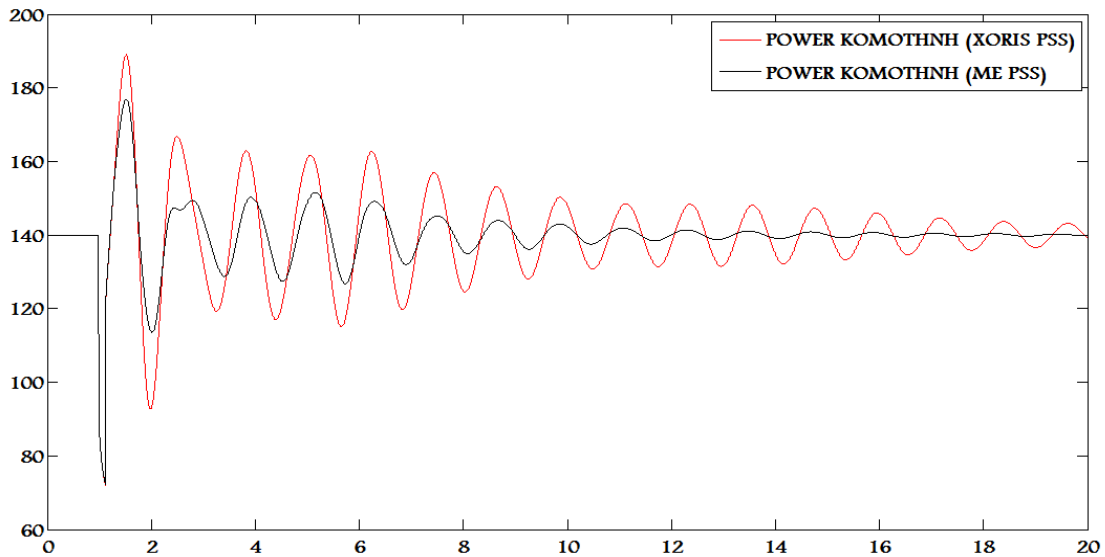
Η ταλάντωση της ροής ενεργού ισχύος στη γραμμή διασύνδεσης Θεσσαλονίκης-Βλαγοενgrad φαίνεται στο Σχήμα 6.8:



Σχήμα 6.8 Ροή ισχύος στη γραμμή διασύνδεση της Ελλάδος με την Βουλγαρία

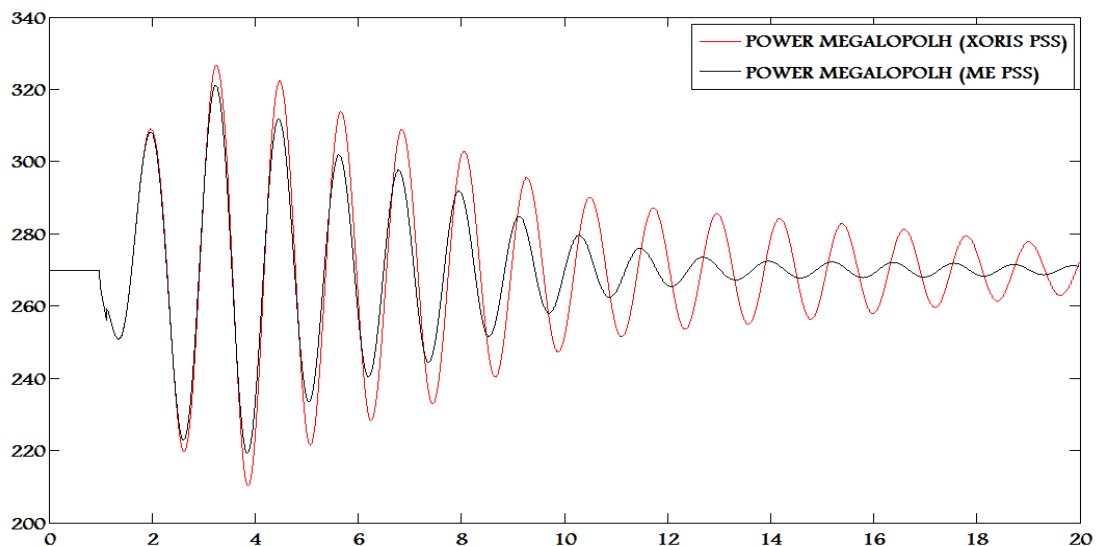
Σύμφωνα με το Σχήμα 6.8, στην περίπτωση της διασυνδετικής γραμμής της Ελλάδος με τη Βουλγαρία, όπως και με την Τουρκία, η αρχική ταλάντωση στη ροή της ενεργού ισχύος είναι σχεδόν ίδια με και χωρίς σταθεροποιητή. Όμως, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα ο ρυθμός που κυριαρχεί στο σύστημα, αποσβένεται ικανοποιητικά με την παρουσία του σταθεροποιητή.

Η ταλάντωση της παραγωγής ισχύος της μονάδος 1 του ΘΗΣ στη Κομοτηνή, φαίνεται στο Σχήμα 6.9. Στο σχήμα αυτό είναι εμφανής η έντονη ταλάντωση που όμως αποσβένεται ικανοποιητικά από το σταθεροποιητή που σχεδιάστηκε.



Σχήμα 6.9 Ταλάντωση ισχύος μονάδος 1 στην Κομοτηνή.

Η ταλάντωση της ισχύος της μηχανής στη μονάδα 4 του σταθμού στη Μεγαλόπολη, φαίνεται στο Σχήμα 6.10.



Σχήμα 6.10 Παραγωγή ισχύος για τη μονάδα 4 στη Μεγαλόπολη.

Η έντονη ταλάντωση που επικρατεί στη ροή ενεργούς ισχύος στη μονάδα της Μεγαλόπολης οφείλεται στο ρυθμό διασύνδεσης GR-TR και έχει συχνότητα 0,82 Hz. Με την προσθήκη σταθεροποιητών στις μονάδες 1,2 της Κομοτηνής η ταλάντωση αυτή αποσβένεται ικανοποιητικά μετά από λίγα δευτερόλεπτα.

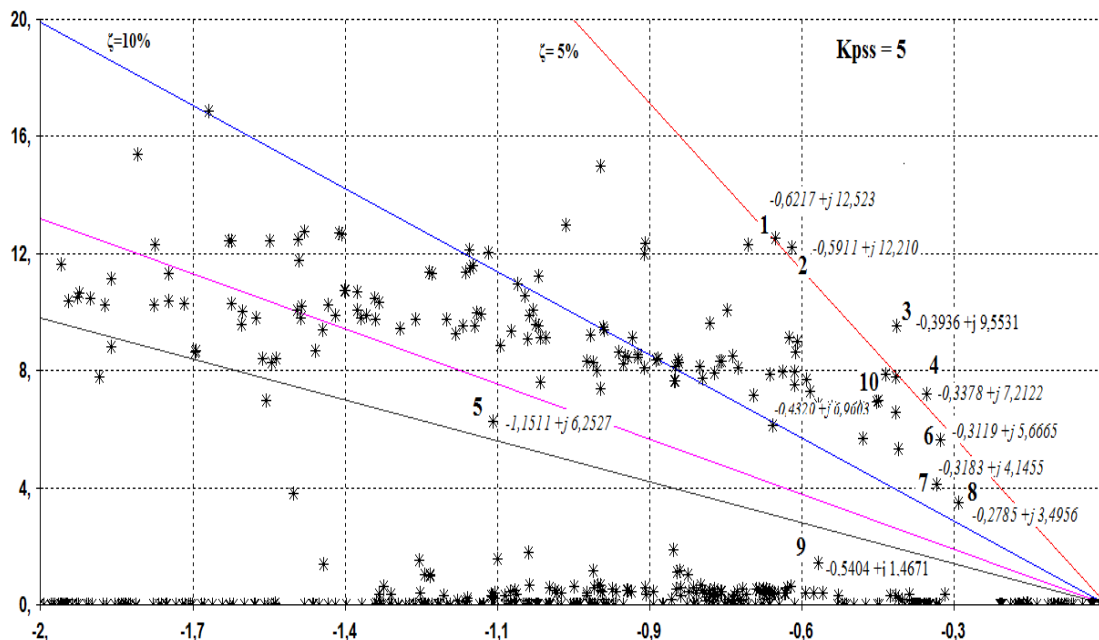
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 6.7-6.10, ο σταθεροποιητής που σχεδιάστηκε αποσβένει ικανοποιητικά την ταλάντωση που κυριαρχούσε στο σύστημα μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Συνεπώς, η σχεδίαση αυτή και η επιλογή του κέρδους του σταθεροποιητή επιλύει ικανοποιητικά το πρόβλημα της διασυννοριακής ταλάντωσης στην περίπτωση που το σύστημα έχει όλες τις γραμμές ενεργοποιημένες.

6.4 Ανάλυση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Ασθενής Διασύνδεση)

Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε την επίδραση του σταθεροποιητή που σχεδιάστηκε στο σύστημα, όταν λειτουργεί χωρίς τη γραμμή 400kV Θεσσαλονίκης–Φιλίππων. Υπενθυμίζεται ότι η σχεδίαση του σταθεροποιητή έγινε για το ρυθμό διασύνδεσης GR-TR στο σενάριο A, όπου όλες οι γραμμές είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο.

6.4.1 Ανάλυση Ιδιοτιμών

Στο Σχήμα 6.11 φαίνονται οι ιδιοτιμές του συστήματος χωρίς τη γραμμή με ενεργοποιημένους τους σταθεροποιητές στις μονάδες 1,2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής.

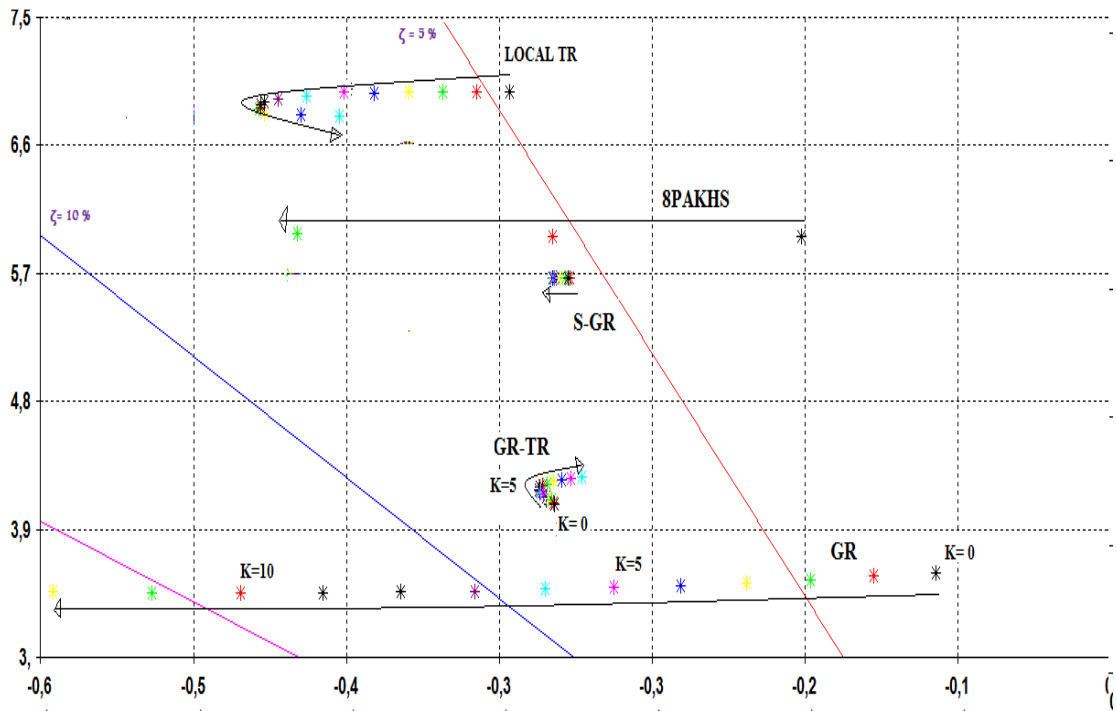


Σχήμα 6.11 Οι ιδιοτιμές του συστήματος με σταθεροποιητή(Σενάριο B), με $K_{pss}=5$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11, με την προσθήκη σταθεροποιητή στο σύστημα, κάποιος από τους ρυθμούς του συστήματος έχουν μετατοπιστεί προς τα αριστερά και κάποιος έχουν μείνει αμετάβλητοι. Οι ρυθμοί που εξακολουθούν να εμφανίζουν απόσβεση κάτω του 5% είναι οι τοπικοί ρυθμοί Καστρακίου, Καρδιάς, Αγ. Δημητρίου και Βουλγαρίας οι οποία παρέμειναν ανεπηρέαστοι από το συγκεκριμένο σταθεροποιητή.

Για να χαρακτηρίσουμε τους υπόλοιπους ρυθμούς του συστήματος στην περίπτωση της ασθενούς διασύνδεσης είναι απαραίτητο να δούμε τη μετατόπιση των ιδιοτιμών με την αύξηση του κέρδους του σταθεροποιητή διότι εξαιτίας του συντονισμού δεν είναι ευδιάκριτο πως θα μετατοπιστεί η κάθε ιδιοτιμή.

Στο Σχήμα 6.12 φαίνεται η μετατόπιση των ιδιοτιμών των ρυθμών GR-TR, GR,Θράκης, S-GR καθώς και του τοπικού ρυθμού μεταξύ των τουρκικών μονάδων που εμφανίζεται μόνο στο Σενάριο Β με χαμηλή απόσβεση.



Σχήμα 6.12 Μετατόπιση των ιδιοτιμών του ρυθμού GR, GR-TR, του S-GR και του τοπικού ρυθμού της Θράκης λόγω αύξησης του κέρδους του σταθεροποιητή

Στη συνέχεια, παραθέτουμε στον Πίνακα 6.3, τις ιδιοτιμές του συστήματος χωρίς σταθεροποιητή και τις ιδιοτιμές του συστήματος με τους σταθεροποιητές που σχεδιάστηκαν, όπως υπολογίστηκαν από το PacDyn. Στον Πίνακα 6.3 φαίνεται και η μεταβολή της απόσβεσης των κρίσιμων ρυθμών του συστήματος.

Πίνακας 6.3: Μεταβολή των ιδιοτιμών του συστήματος με την παρουσία σταθεροποιητών στην Κομοτηνή

	Χωρίς σταθεροποιητή			Με σταθεροποιητή			Περιγραφή
	Ρυθμοί	ζ%	f (Hz)	Ρυθμοί	ζ%	f (Hz)	
1	-0,6217 +j 12,523	4,9586	1,9930	-0,6217 +j 12,523	4,9586	1,9930	Τοπικός 1 (Καρδιά)
2	-0,5911 +j 12,21	4,8353	1,9432	-0,5911 +j 12,210	4,8353	1,9432	Τοπικός 2 (Αγ. Δημ)
3	-0,3936 +j 9,5531	4,1172	1,5204	-0,3936 +j 9,5531	4,1172	1,5204	Τοπικός 3 (BG)
4	-0,3378 +j 7,2122	4,6788	1,1479	-0,3378 +j 7,2122	4,6787	1,1479	Τοπικός 4 (Καστράκι)
5	-0,1737 +j 5,9595	2,9132	0,9485	-1,1511 +j 6,2527	18,106	0,9952	Θράκης
6	-0,3044 +j 5,6734	5,3580	0,9030	-0,3119 +j 5,6665	5,4953	0,9018	S-GR
7	-0,3121 +j 4,0814	7,6242	0,6496	-0,3183 +j 4,1455	7,6563	0,6598	GR – TR
8	-0,0981 +j 3,5997	2,7251	0,5729	-0,2785 +j 3,4956	7,9431	0,5563	Inter-area GR
9	-0,5378 +j 1,4785	34,183	0,2353	-0,5404 +j 1,4671	34,565	0,2335	Inter-area UCTE
10	-0,3371 +j 6,9751	4,8277	1,1101	-0,4320 +j 6,9603	6,1951	1,1078	Τοπικός 5 (TR)

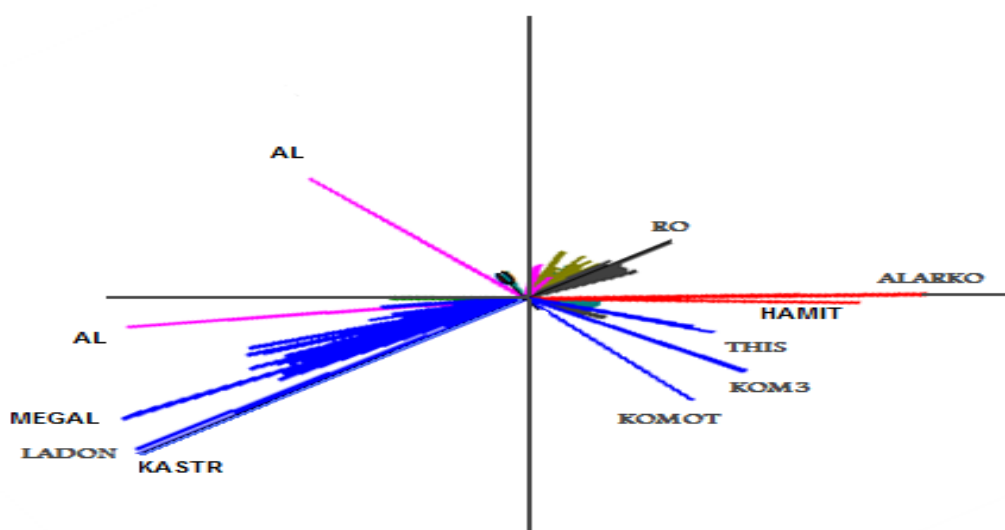
Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.3 με την ενεργοποίηση των σταθεροποιητών παραμένουν αμετάβλητοι οι τοπικοί ρυθμοί του Καστρακίου, του Αγίου Δημητρίου και της Καρδιάς, οι οποίοι εμφανίζονται με απόσβεση χαμηλότερη του 5%. Ο σταθεροποιητής βελτιώνει την απόσβεση του τοπικών ρυθμών της Τουρκίας και της Θράκης. Ο ρυθμός διασύνδεσης GR-TR, ο νότιος ρυθμός S-GR και ο ρυθμός της UCTE δεν επηρεάζονται ουσιαστικά από την παρουσία του σταθεροποιητή. Η ιδιοτιμή του διασυννοριακού ρυθμού GR του ελληνικού συστήματος μετατοπίζεται αριστερά με την ενεργοποίηση του σταθεροποιητή και η απόσβεση του ρυθμού από 2,7% φτάνει το 8% περίπου.

6.4.2 Μορφή Ρυθμών

Θα δείξουμε τώρα, τη μορφή των κρίσιμων ρυθμών του συστήματος έχοντας ενεργοποιήσει τους σταθεροποιητές στις μονάδες 1 και 2 του ΘΗΣ στην Κομοτηνή.

Στο ρυθμό GR-TR, έχουμε ταλάντωση των περισσότερων ελληνικών μονάδων και αντίθετα από τις μονάδες των άλλων βαλκανικών. Σύμφωνα με το Σχήμα 6.13, οι μονάδες της Θράκης όμως, ταλαντώνονται με διαφορετική φάση από τις υπόλοιπες μονάδες της Ελλάδος. Συγκεκριμένα οι μονάδες της Κομοτηνής εμφανίζουν μια φασική απόκλιση από τις άλλες ελληνικές μονάδες μεγέθους 120° περίπου.

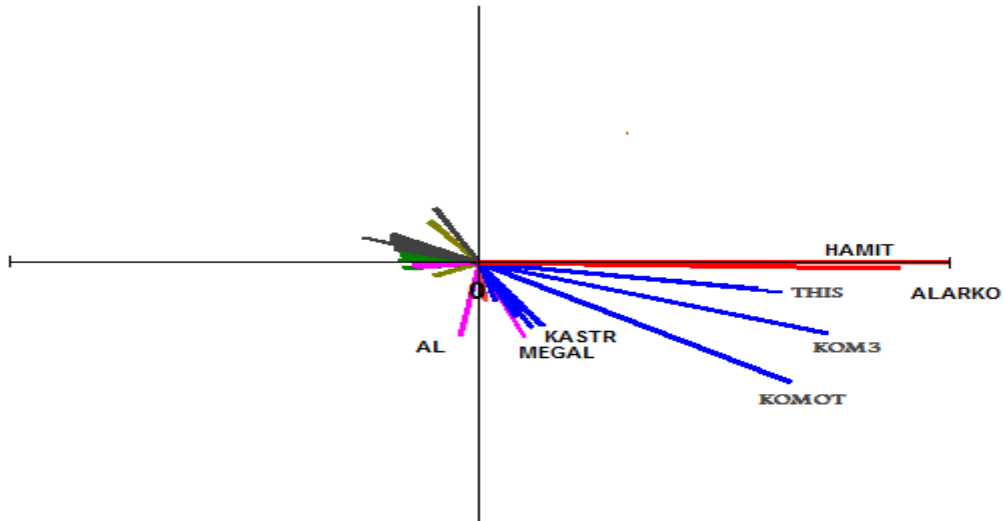
Η μορφή του ρυθμού δεν έχει αλλάξει με την προσθήκη του σταθεροποιητή, όμως αξίζει να παρατηρήσουμε στο σχήμα ότι οι μονάδες 1 και 2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής στις οποίες έχουμε εγκαταστήσει σταθεροποιητές, εμφανίζουν διαφορετική γωνία ταλάντωσης από την μηχανή 3 η οποία δεν είναι εφοδιασμένη με σταθεροποιητή.



Σχήμα 6.13 Μορφή ρυθμού διασύνδεσης GR-TR

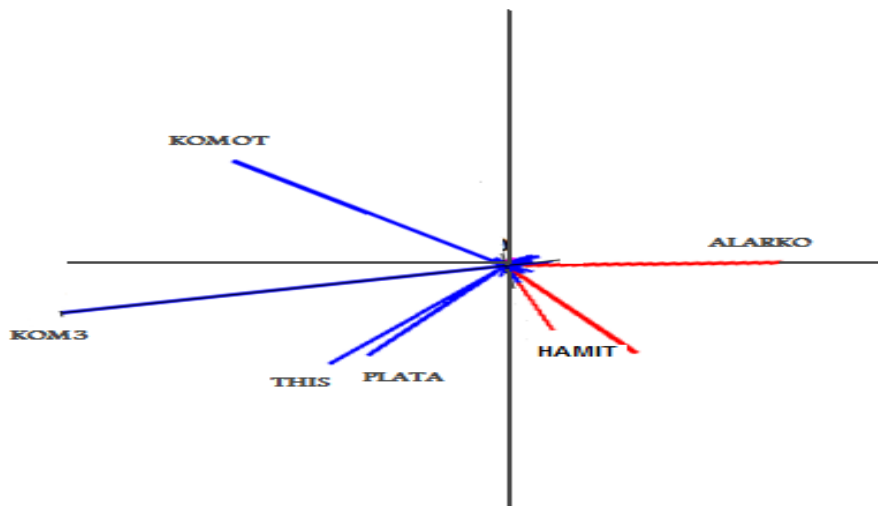
Στο Σχήμα 6.14, απεικονίζεται η μορφή του διασυννοριακού ρυθμού GR του ελληνικού συστήματος, με την παρουσία σταθεροποιητών στο σύστημα. Στο ρυθμό αυτό, οι τουρκικές μονάδες βρίσκονται εν φάση με τις ελληνικές μηχανές στην Κομοτηνή, στο Θησαυρό και την Πλατανόβρυση. Οι υπόλοιπες μονάδες της Ελλάδος με κυρίαρχες αυτές της Μεγαλόπολης, του Λάδωνα και του Καστρακίου ταλαντώνονται όλες μαζί, με διαφορά φάσης 60° από τις τουρκικές μονάδες.

Η μορφή των ρυθμών GR-TR και GR δεν έχει αλλάξει σημαντικά με την παρουσία των σταθεροποιητών, όμως έχει αλλοιωθεί η μορφή τους σε σχέση με τη μορφή τους στο Σενάριο A, λόγω του φαινομένου του συντονισμού και της αλληλεπίδρασης των δύο ρυθμών.



Σχήμα 6.14 Η μορφή του ρυθμού GR με σταθεροποιητή

Στο Σχήμα 6.15, απεικονίζεται η μορφή του τοπικού ρυθμού Θράκης, με την παρουσία σταθεροποιητή στο σύστημα. Στο ρυθμό αυτό, εμπλέκονται κυρίως οι μηχανές της Κομοτηνής και της Τουρκίας. Η μορφή του ρυθμού μετά την προσθήκη σταθεροποιητή παραμένει ίδια όμως, οι μονάδες 1 και 2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής στις οποίες έχουμε εγκαταστήσει σταθεροποιητές, εμφανίζουν διαφορετική γωνία ταλάντωσης από την μηχανή 3 η οποία δεν είναι εφοδιασμένη με σταθεροποιητή.



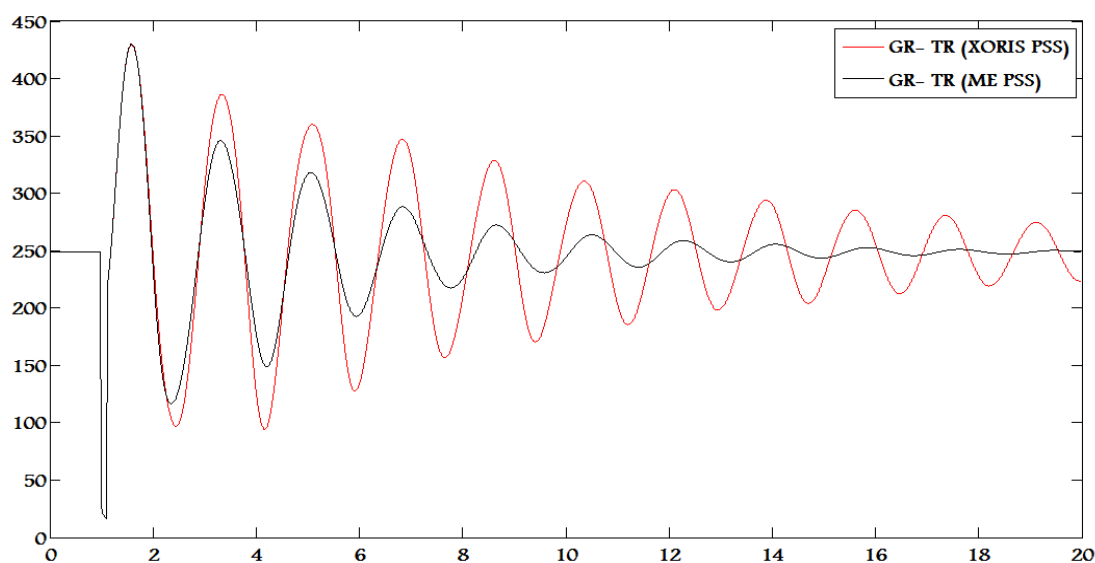
Σχήμα 6.15 Η μορφή του τοπικού ρυθμού της Θράκης

6.5 Προσομοίωση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Ασθενής Διασύνδεση)

Προκειμένου να αποτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της σχεδίασης του σταθεροποιητή στην περίπτωση ασθενούς διασύνδεσης, εκτελείται μια προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς του συστήματος σε ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 400kV Θεσσαλονίκης-Φιλίππων το οποίο θεωρείται ότι εκκαθαρίζεται σε 120msec με άνοιγμα της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων.

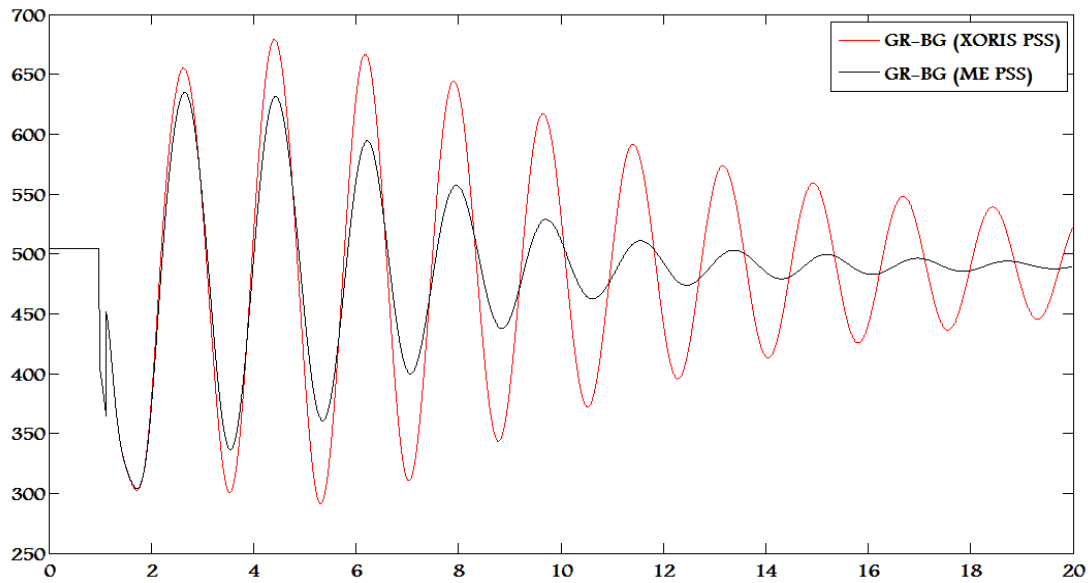
Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν με το πρόγραμμα v30 PSS/E. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται η απόκριση του συστήματος χωρίς σταθεροποιητές ενώ με μαύρο χρώμα δείχνεται η απόκρισή του συστήματος με σταθεροποιητές.

Η ταλάντωση της ροής ισχύος στη γραμμή διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας με και χωρίς σταθεροποιητή φαίνεται στο Σχήμα 6.16. Στην περίπτωση λειτουργίας του συστήματος χωρίς τη γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων, ο ρυθμός χαμηλής απόσβεσης εμφανίζεται αμέσως όταν δεν υπάρχει σταθεροποιητής, ενώ έχει ικανοποιητική απόσβεση με το σταθεροποιητή που σχεδιάστηκε.



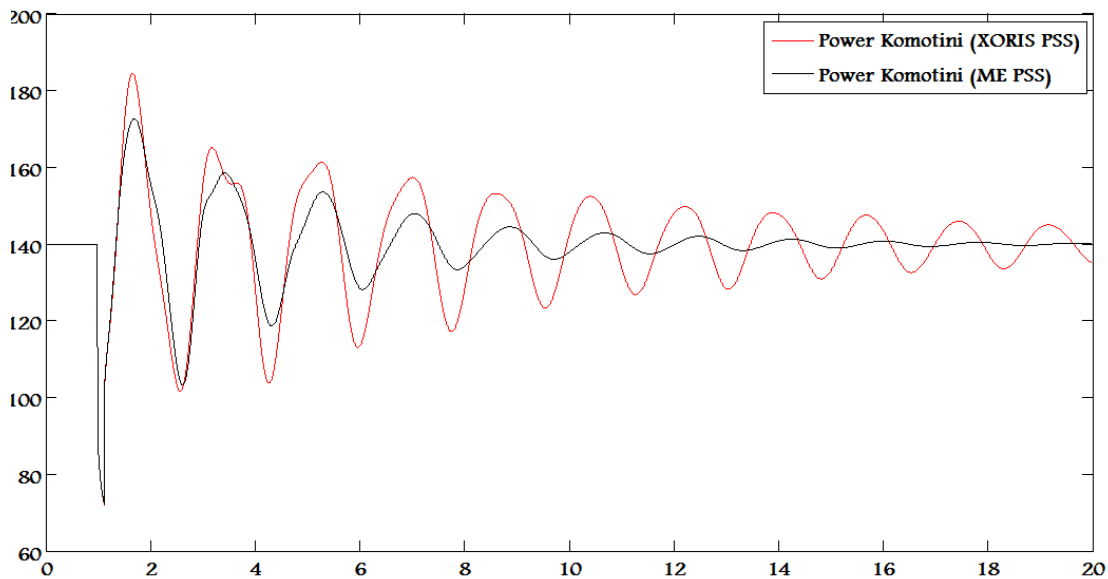
Σχήμα 6.16 Ροή ισχύος στη διασύνδεση της Ελλάδος με την Τουρκία ,
γραμμή Νέα Σάντα-Babaeski

Η ταλάντωση της ροής ενεργού ισχύος στη γραμμή διασύνδεσης Θεσσαλονίκης-Blagoevgrad φαίνεται στο Σχήμα 6.17. Και σε αυτή την περίπτωση, ο ρυθμός χαμηλής απόσβεσης εμφανίζεται πιο έντονα στη περίπτωση λειτουργίας του συστήματος χωρίς σταθεροποιητή. Οι σταθεροποιητές αποσβένουν ικανοποιητικά το ρυθμό που επικρατεί στο σύστημα με συχνότητα 0,57 Hz αρκετά γρήγορα.



Σχήμα 6.17 Ροή ισχύος στη γραμμή Θεσσαλονίκη- Blagoevgrad, Διασύνδεση της Ελλάδος με την Βουλγαρία

Η ταλάντωση της παραγωγής ενεργού ισχύος της μονάδος 1 του ΘΗΣ στη Κομοτηνή, φαίνεται στο Σχήμα 6.18:



Σχήμα 6.18 Ταλάντωση ενεργού ισχύος μιας μηχανής στην Κομοτηνή

Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 6.18 η ταλάντωση που επικρατεί στη παραγωγή ενεργού ισχύος της μονάδας 1 του ΘΗΣ της Κομοτηνής στην οποία προσαρτήθηκε ο σταθεροποιητής αποσβένεται ικανοποιητικά σε μικρό χρονικό διάστημα.

Κεφάλαιο 7

Εναλλακτική Σχεδίαση Σταθεροποιητή

7.1 Η μέθοδος Σχεδίασης του Σταθεροποιητή

Σε προηγούμενο κεφάλαιο η σχεδίαση του σταθεροποιητή έγινε λαμβάνοντας υπόψη αποκλειστικά την συχνότητα του ρυθμού που θέλαμε να ενισχύσουμε την απόσβεση. Με βάση την τιμή του ορίσματος του ολοκληρωτικού υπολοίπου για αυτό το ρυθμό, υπολογίστηκε η γωνία αντιστάθμισης του σταθεροποιητή και η συνάρτηση μεταφοράς του. Έτσι, ο σταθεροποιητής του κεφαλαίου 6, προσέφερε ολική αντιστάθμιση του συστήματος στη συχνότητα του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού διασύνδεσης του ελληνικού συστήματος με την τουρκική νησίδα και μερική αντιστάθμιση για ένα εύρος συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα αυτού του ρυθμού.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα πραγματοποιήσουμε μια διαφορετική σχεδίαση σταθεροποιητή για το σύστημα, στις μονάδες της Κομοτηνής. Η σχεδίαση που θα δοκιμάσουμε σε αυτό το κεφάλαιο, θα πραγματοποιηθεί θεωρώντας σαν κεντρική συχνότητα του σταθεροποιητή μια πολύ υψηλότερη συχνότητα από αυτή της διασυννοριακής ταλάντωσης. Με αυτό τον τρόπο, η αναγκαία αντιστάθμιση σε αυτή τη συχνότητα θα δίνεται σαν μερική αντιστάθμιση από τις δυο βαθμίδες του σταθεροποιητή.

7.1.1 Υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς του σταθεροποιητή

Η σχεδίαση γίνεται πάλι για την ισχυρή διασύνδεση (Σενάριο Α). Ο σταθεροποιητής θα σχεδιαστεί για τις αεριοστροβιλικές μονάδες 1 και 2 της Κομοτηνής, με σκοπό την βελτίωση του ρυθμού διασύνδεσης Ελλάδος - Τουρκίας. Η τιμή της συχνότητας του ρυθμού είναι $f = 0,82$ Hz με απόσβεση $\zeta = 2,26\%$.

Ο σταθεροποιητής σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχει 2 όμοιες βαθμίδες αντισταθμίσεως φάσεως, ένα κέρδος K_{PSS} , ένα φίλτρο απαλοιφής καθώς και έναν περιοριστή τάσης (Σχήμα 5.1).

Δίνουμε μια τυπική τιμή στην χρονική σταθερά T_w του φίλτρου, έστω $T_w = 5$ s, έτσι ώστε η βαθμίδα αυτή να μην εισάγει σημαντική φάση στο εύρος της συχνότητας της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης.

Θέτουμε τα όρια του περιοριστή στο 10%, έστω $V_{S_{max}} = 0.1$ και $V_{S_{min}} = -0.1$.

Επιλέγουμε τις χρονικές σταθερές του σταθεροποιητή ως:

$$T_1 = 0.2 \text{ sec} \quad \text{και} \quad T_2 = 0.01 \text{ sec}.$$

Έτσι, η κεντρική συχνότητα του σταθεροποιητή θα είναι:

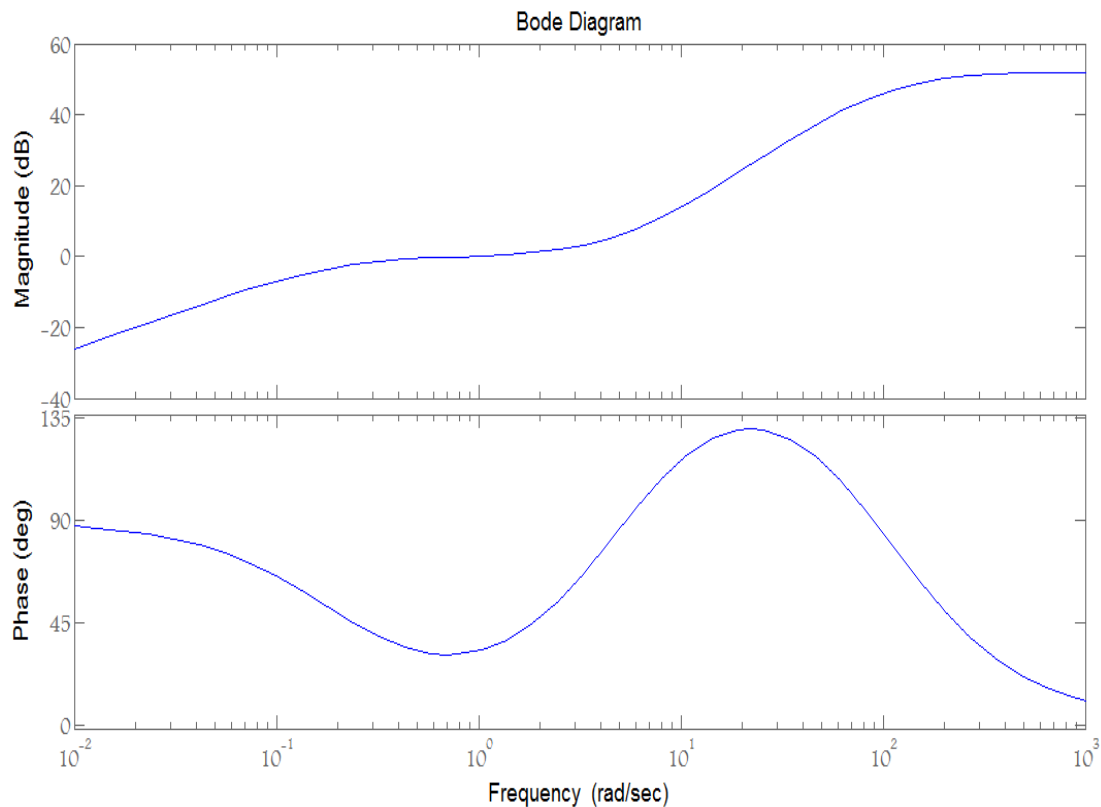
$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{T_1 T_2}} = 22,4 \text{ r/s} \quad \text{ή} \quad 3,56 \text{ Hz} \quad \text{σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράψαμε στην ενότητα 5.2.4.}$$

Η φάση αντισταθμίσεως για $\omega = 5,18$ r/s (ή $f = 0,82$ Hz) θα είναι περίπου 90° .

Η μορφή της συνάρτησης μεταφοράς του σταθεροποιητή είναι :

$$H_{PSS}(s) = \frac{5s}{1+5s} K_{PSS} \frac{1+0.2s}{1+0.01s} \frac{1+0.2s}{1+0.01s} \quad (7.1)$$

Στο Σχήμα 7.1 δίνεται το διάγραμμα Bode του σταθεροποιητή με τα παραπάνω χαρακτηριστικά:



Σχήμα 7.1 Διάγραμμα Bode του σταθεροποιητή

Από το σχήμα παρατηρούμε ότι το διάγραμμα φάσεως των δύο βαθμίδων αντιστάθμισης του σταθεροποιητή έχει μέγιστο στην επιθυμητή συχνότητα των $22.36 \text{ r/s} \approx 3.56 \text{ Hz}$. Στη συχνότητα αυτή η προπορεία φάσεως που εισάγουν οι δύο βαθμίδες αντισταθμίσεως φάσεως είναι της τάξης των 130° . Στη συχνότητα του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού ($5.18 \text{ rad/s} \approx 0.82 \text{ Hz}$) η προπορεία φάσεως που εισάγεται από τις δύο βαθμίδες αντισταθμίσεως φάσεως του σταθεροποιητή αυτού είναι $88,2^\circ$. Συνεπώς, οι δύο βαθμίδες αντισταθμίσεως φάσεως προσφέρουν μια μερική αντιστάθμιση της φάσης που απαιτείται ($102,7^\circ$, ενότητα 6.1.1) για το ρυθμό διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας, ο οποίος έχει μικρότερη τιμή της κεντρικής συχνότητας.

Στις χαμηλές συχνότητες, φαίνεται η διαφοροποίηση της συμμετρίας του διαγράμματος Bode του σταθεροποιητή, που οφείλεται στο φίλτρο απαλοιφής του σταθεροποιητή.

7.1.2 Επιλογή του κέρδους του σταθεροποιητή K_{PSS}

Με σταδιακή αύξηση του κέρδους θα επιλέξουμε την κατάλληλη τιμή για την μέγιστη δυνατή απόσβεση του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού που εξετάζουμε. Η τιμή του κέρδους που θα επιλέξουμε πρέπει να δίνει τη βέλτιστη δυνατή απόσβεση του ρυθμού, χωρίς μεγάλη μεταβολή της συχνότητάς του.

Στον Πίνακα 7.1, φαίνεται η μεταβολή της ιδιοτιμής της ρυθμού διασύνδεσης και της απόσβεσης του, καθώς αυξάνεται το κέρδος K_{PSS} του σταθεροποιητή:

Πίνακας 7.1: Μεταβολή της ιδιοτιμής του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού με την αύξηση του κέρδους K_{PSS} του σταθεροποιητή

K_{PSS}	λ_i	$\zeta \%$	f (Hz)
0	-0,1171 +j 5,1728	2,2626	0,8233
1	-0,1279 +j 5,1757	2,4712	0,8237
2	-0,1382 +j 5,1794	2,6666	0,8243
3	-0,1477 +j 5,1837	2,8485	0,825
4	-0,1566 +j 5,1885	3,0163	0,8258
5	-0,1647 +j 5,1937	3,1698	0,8266
6	-0,1721 +j 5,1993	3,309	0,8275
7	-0,1788 +j 5,2052	3,4339	0,8284
8	-0,1848 +j 5,2113	3,5447	0,8294
9	-0,1901 +j 5,2175	3,6419	0,8304
10	-0,1948 +j 5,2238	3,7262	0,8314
11	-0,1988 +j 5,2300	3,7982	0,8324
12	-0,2022 +j 5,2362	3,8588	0,8334
13	-0,2051 +j 5,2423	3,9090	0,8343
14	-0,2074 +j 5,2482	3,9497	0,8353
15	-0,2094 +j 5,2539	3,9819	0,8362
16	-0,2109 +j 5,2594	4,0065	0,8371
17	-0,212 +j 5,2647	4,0245	0,8379
18	-0,2129 +j 5,2697	4,0366	0,8387
19	-0,2135 +j 5,2746	4,0436	0,8395
20	-0,2138 +j 5,2792	4,0462	0,8402
22	-0,2138 +j 5,2881	4,0399	0,8416
25	-0,2126 +j 5,2996	4,0092	0,8435
30	-0,2094 +j 5,3133	3,9374	0,8456

Παρατηρώντας την μετατόπιση της ιδιοτιμής, στον παραπάνω πίνακα προκύπτει πως, μετά την τιμή $K=20$ για το κέρδος η ιδιοτιμή του ρυθμού διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας μετατοπίζεται προς τα δεξιά ενώ και η συχνότητα μεταβάλλεται πάνω από

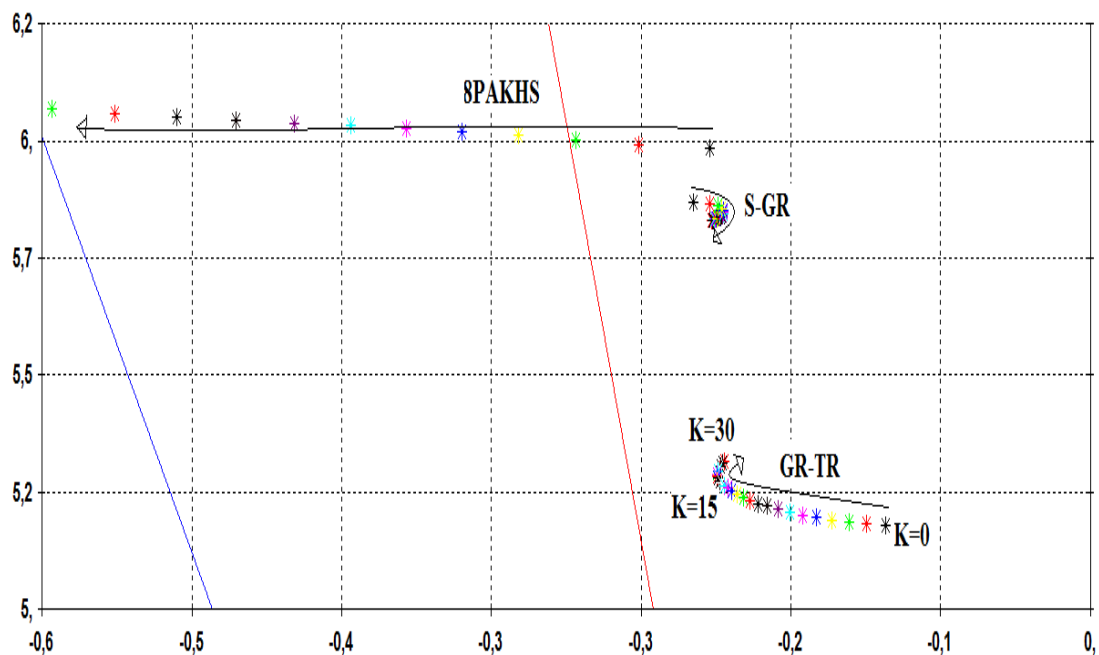
2%.. Θα επιλέξουμε λοιπόν για το κέρδος του σταθεροποιητή την τιμή $K_{PSS}=15$, για την οποία πετυχαίνεται περίπου 4% απόσβεση του ρυθμού διασύνδεσης και η τιμή της συχνότητας μεταβάλλεται πολύ λίγο.

7.2 Δυναμική Ανάλυση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Σενάριο Α)

7.2.1 Ανάλυση Ιδιοτιμών

Για να δούμε την επίδραση που έχει η παρουσία των σταθεροποιητών στις αεροστροβλικές μονάδες 1 και 2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής στους ασθενώς αποσβενόμενους ρυθμούς του σχεδιάζουμε το γεωμετρικό τόπο των ριζών για αυτούς τους ρυθμούς μεταβάλλοντας την τιμή του κέρδους του σταθεροποιητή από $K=0$ έως την τιμή $K=30$ με βήμα 1.

Με το κάθε βέλος δείχνεται η κατεύθυνση μεταβολής της ιδιοτιμής του ρυθμού διασύνδεσης GR-TR, του νότιου ρυθμού S-GR και του τοπικού ρυθμού Θράκης αντίστοιχα καθώς αυξάνεται το κέρδος του σταθεροποιητή.

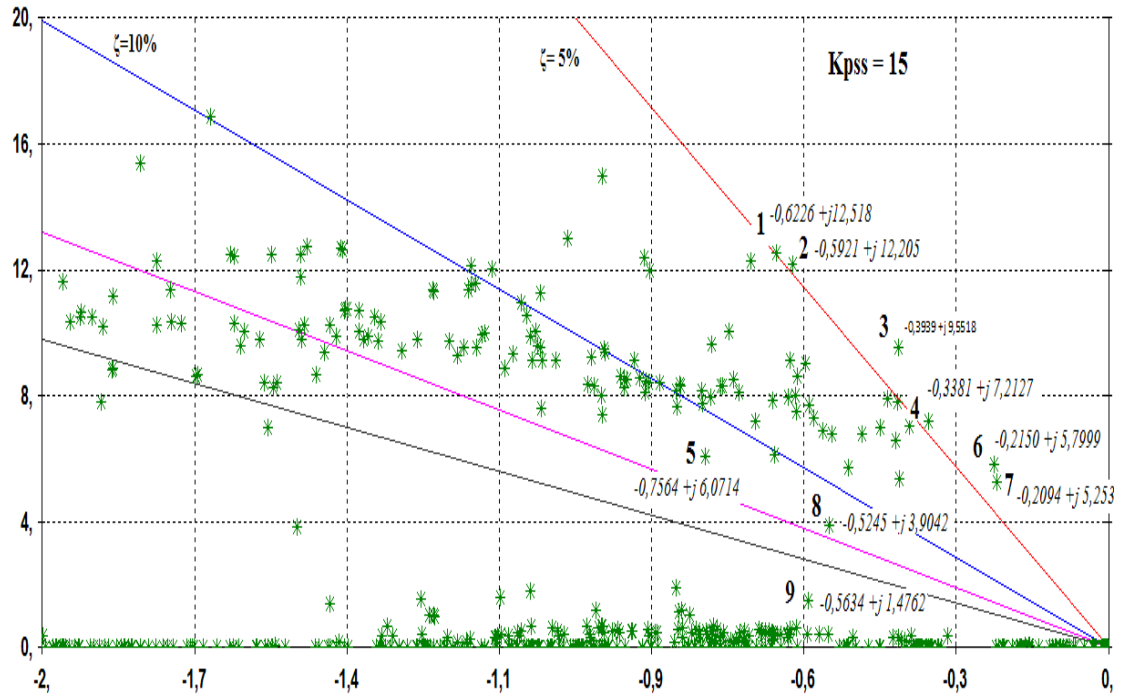


Σχήμα 7.2 Μετατόπιση των ιδιοτιμών του ρυθμού GR-TR, του S-GR και του τοπικού ρυθμού της Θράκης λόγω αύξησης του κέρδους του σταθεροποιητή

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2 με την προσθήκη του σταθεροποιητή στις μονάδες 1,2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής, αποσβένεται ικανοποιητικά ο τοπικός ρυθμός της Θράκης, ενώ η απόσβεση του νότιου ρυθμού παραμένει ασθενής και μετά την προσθήκη του

σταθεροποιητή χωρίς όμως να αλλάζει σημαντικά. Η ιδιοτιμή του ρυθμού διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας, μετατοπίζεται προς τα δεξιά για μεγάλες τιμές του κέρδους.

Στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές του συστήματος με ενεργοποιημένους τους δύο σταθεροποιητές στις μονάδες 1,2 της Κομοτηνής:



Σχήμα 7.3 Ιδιοτιμές συστήματος (ισχυρή διασύνδεση) με σταθεροποιητή, $K_{pss}=15$

Στη συνέχεια, παραθέτουμε στον Πίνακα 7.2, τις ιδιοτιμές του συστήματος χωρίς σταθεροποιητή και τις ιδιοτιμές του συστήματος μετά την προσθήκη σταθεροποιητών με κέρδος $K_{pss}=15$ στις μονάδες 1,2 του ΘΗΣ Κομοτηνής.

Πίνακας 7.2: Μεταβολή των ιδιοτιμών του συστήματος με την παρουσία σταθεροποιητών στην Κομοτηνή

	Χωρίς σταθεροποιητή			Με σταθεροποιητή			Περιγραφή ρυθμού
	Ρυθμοί	$\zeta\%$	f	Ρυθμοί	$\zeta\%$	f	
1	-0,6226 + j 12,518	4,9675	1,9923	-0,6226 + j12,518	4,9675	1,9923	Τοπικός 1 (Καρδιά)
2	-0,5921 + j 12,205	4,8460	1,9425	-0,5921 + j 12,205	4,8460	1,9425	Τοπικός 2 (Αγ.Δημ)
3	-0,3939 + j 9,5518	4,1199	1,5202	-0,3939 + j 9,5518	4,1199	1,5202	Τοπικός 3 (BG)
4	-0,3381 + j 7,2128	4,6830	1,1479	-0,3381 + j 7,2127	4,6829	1,1479	Τοπικός 4 (Καστράκι)

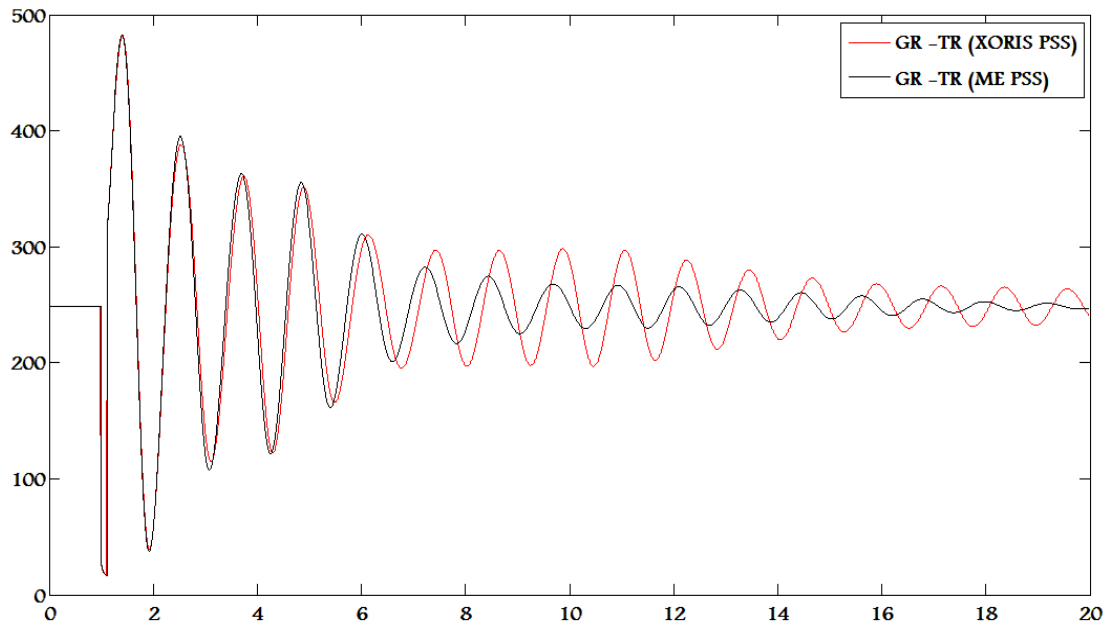
5	$-0,2181 + j 5,9459$	3,6649	0,9463	$-0,7564 + j 6,0714$	12,362	0,9663	Θράκης
6	$-0,2273 + j 5,8355$	3,8927	0,9288	$-0,2150 + j 5,7999$	3,7048	0,9231	S-GR
7	$-0,1171 + j 5,1728$	2,2626	0,8233	$-0,2094 + j 5,2539$	3,9819	0,8362	GR – TR
8	$-0,4958 + j 3,8923$	12,635	0,6195	$-0,5245 + j 3,9042$	13,314	0,6214	Inter-area GR
9	$-0,5439 + j 1,4798$	34,500	0,2355	$-0,5634 + j 1,4762$	35,658	0,2349	Inter-area UCTE

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.2, με την ενεργοποίηση των σταθεροποιητών παραμένουν αμετάβλητοι κάποιοι τοπικοί ρυθμοί, όπως αυτοί του Καστρακίου, του Αγίου Δημητρίου και της Καρδιάς. Ουσιαστικά δεν επηρεάζονται ούτε οι διασυννοριακοί ρυθμοί του ελληνικού συστήματος και της UCTE. Ο τοπικός ρυθμός της Θράκης αποσβένεται αποτελεσματικά, ενώ ο ρυθμός του νοτίου συστήματος παραμένει με χαμηλή απόσβεση και μετά την προσθήκη σταθεροποιητών στις μονάδες 1,2 της Κομοτηνής. Ο ρυθμός διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας, για τον οποίο σχεδιάσαμε τον σταθεροποιητή, αποσβένεται με λόγο απόσβεσης 4%. Η μορφή των ρυθμών για το σενάριο A, για το σύστημα με σταθεροποιητές είναι ίδια με αυτή που αναλύσαμε στην ενότητα 6.2.2.

7.3 Προσομοίωση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Ισχυρή Διασύνδεση)

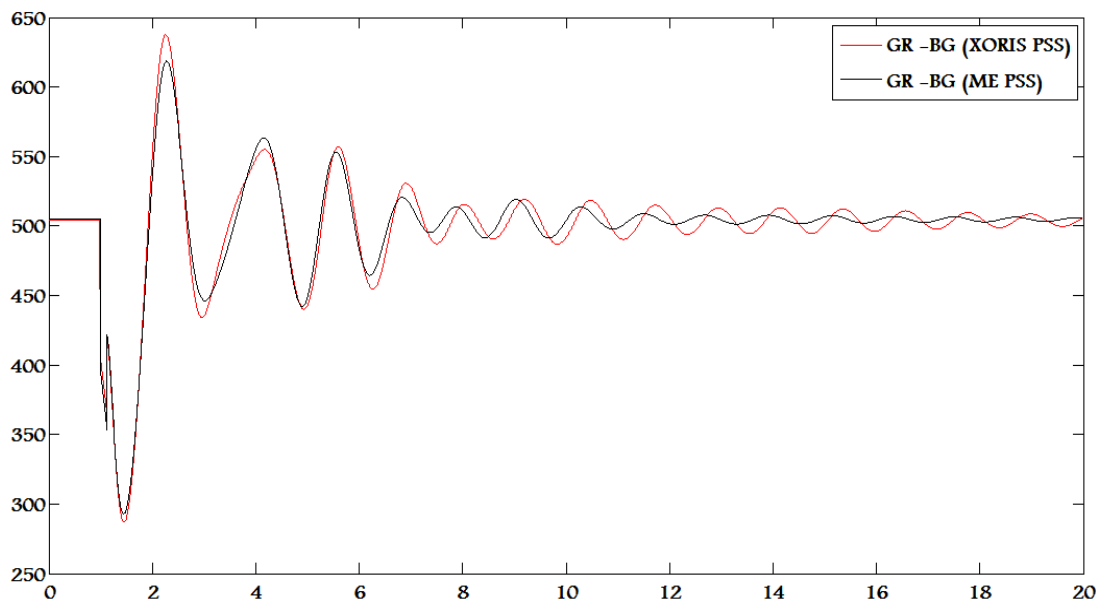
Προκειμένου να αποτιμηθεί η σχεδίαση σταθεροποιητή που πραγματοποιήσαμε σε αυτό το κεφάλαιο, θα εκτελέσουμε μια προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς του συστήματος για την περίπτωση της ισχυρής διασύνδεσης. Η διαταραχή είναι ένα τριφασικό αυτοεκκαθαριζόμενο βραχυκύκλωμα στη γραμμή 400kV Θεσσαλονίκης-Φιλίππων το οποίο θεωρείται ότι εκκαθαρίζεται σε 120msec. Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν με το πρόγραμμα v30 PSS/E. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται η απόκριση του συστήματος χωρίς σταθεροποιητές ενώ με μαύρο χρώμα δείχνεται η απόκρισή του παρουσία σταθεροποιητών.

Στο Σχήμα 7.4 φαίνεται η μεταβολή της ροής ισχύος στη γραμμή διασύνδεσης του ελληνικού συστήματος με την τουρκική νησίδα. Είναι φανερό ότι η αρχική ταλάντωση στο ρυθμό του ελληνικού συστήματος είναι παρόμοια χωρίς με και χωρίς σταθεροποιητή, καθώς η διαταραχή δεν διεγείρει ιδιαίτερα αυτό το ρυθμό ταλάντωσης. Ωστόσο μετά τα 6 sec, κυριαρχεί ο ρυθμός χαμηλής απόσβεσης GR-TR συχνότητας 0,82 Hz ενώ με τον σταθεροποιητή η απόσβεση είναι ικανοποιητική.



Σχήμα 7.4 Ροή ισχύος στη διασύνδεση της Ελλάδος με την Τουρκία , γραμμή Νέα Σάντα-Babaeski

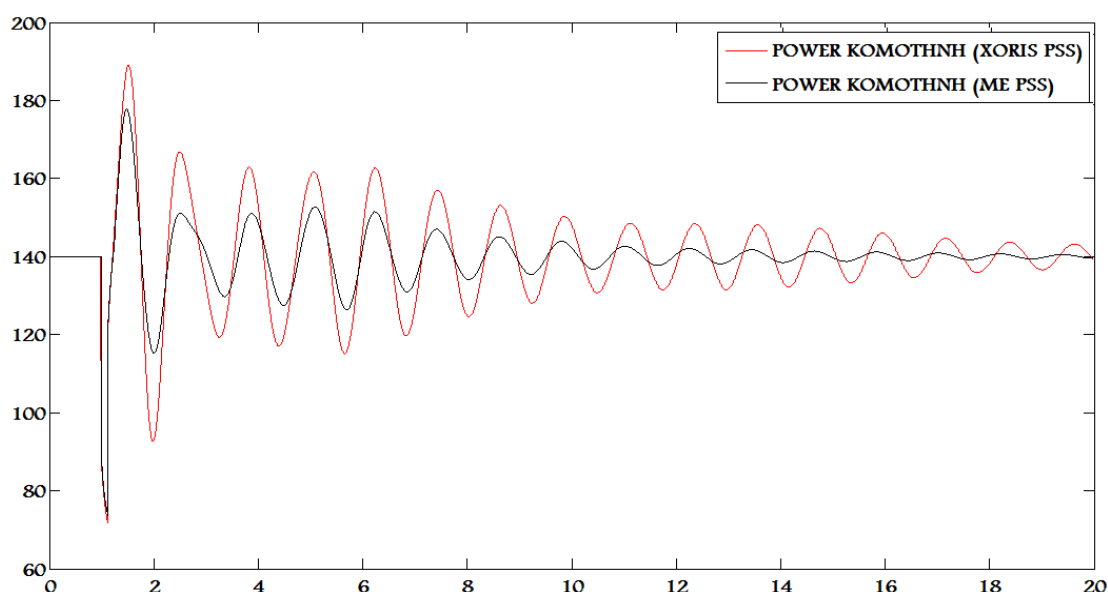
Η ταλάντωση της ροής ενεργού ισχύος στη γραμμή διασύνδεσης Θεσσαλονίκης-Blagoevgrad με και χωρίς σταθεροποιητή φαίνεται στο Σχήμα 7.5:



Σχήμα 7.5 Ροή ενεργού ισχύος στη γραμμή Θεσσαλονίκη- Blagoevgrad, Διασύνδεση της Ελλάδος με την Βουλγαρία

Στη διασυνδεδετική γραμμή της Ελλάδος με τη Βουλγαρία, όπως και στη διασυνδεδετική γραμμή Ελλάδος-Τουρκίας, η αρχική ταλάντωση στη ροή της ενεργού ισχύος στα 0,57 Hz είναι σχεδόν ίδια με και χωρίς σταθεροποιητή. Όμως, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα ο ρυθμός GR-TR που κυριαρχεί στο σύστημα, αποσβένεται ικανοποιητικά με την παρουσία του σταθεροποιητή.

Η ταλάντωση στην παραγωγή ενεργού ισχύος της μηχανής 1 στη Κομοτηνή, με και χωρίς σταθεροποιητή φαίνεται στο Σχήμα 7.6:



Σχήμα 7.6 Παραγωγή ισχύος της μηχανής στην Κομοτηνή

Σύμφωνα με το Σχήμα 7.6, οι σταθεροποιητές που σχεδιάστηκαν για τις μονάδες 1 και 2 της Κομοτηνής αποσβένουν ικανοποιητικά την έντονη ταλάντωση που κυριαρχεί χωρίς σταθεροποιητή.

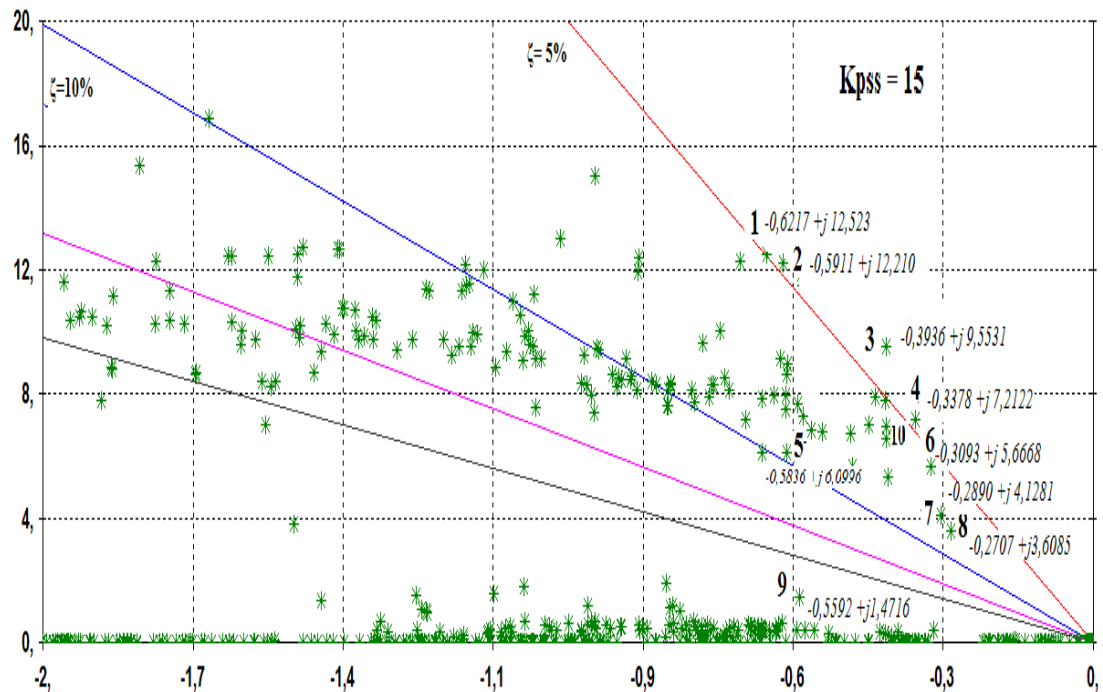
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.4-7.6, ο σταθεροποιητής που σχεδιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό, αποσβένει ικανοποιητικά την ταλάντωση που κυριαρχούσε εξαιτίας της διασύνδεσης. Συνεπώς, η σχεδίαση αυτή και η επιλογή του κέρδους του σταθεροποιητή επιλύει αρκετά καλά το πρόβλημα της διασυννοριακής ταλάντωσης στην περίπτωση που το σύστημα έχει όλες τις γραμμές ενεργοποιημένες.

7.4 Δυναμική Ανάλυση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Σενάριο Β)

Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε την επίδραση του σταθεροποιητή που σχεδιάστηκε για το σενάριο Α, στην περίπτωση που το σύστημα λειτουργεί χωρίς την γραμμή 400kV Θεσσαλονίκης –Φιλίππων.

7.4.1 Ανάλυση Ιδιοτιμών

Οι ιδιοτιμές του συστήματος με ενεργοποιημένους τους δύο σταθεροποιητές στις μονάδες 1,2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής για το σενάριο Β φαίνονται στο Σχήμα 7.7.

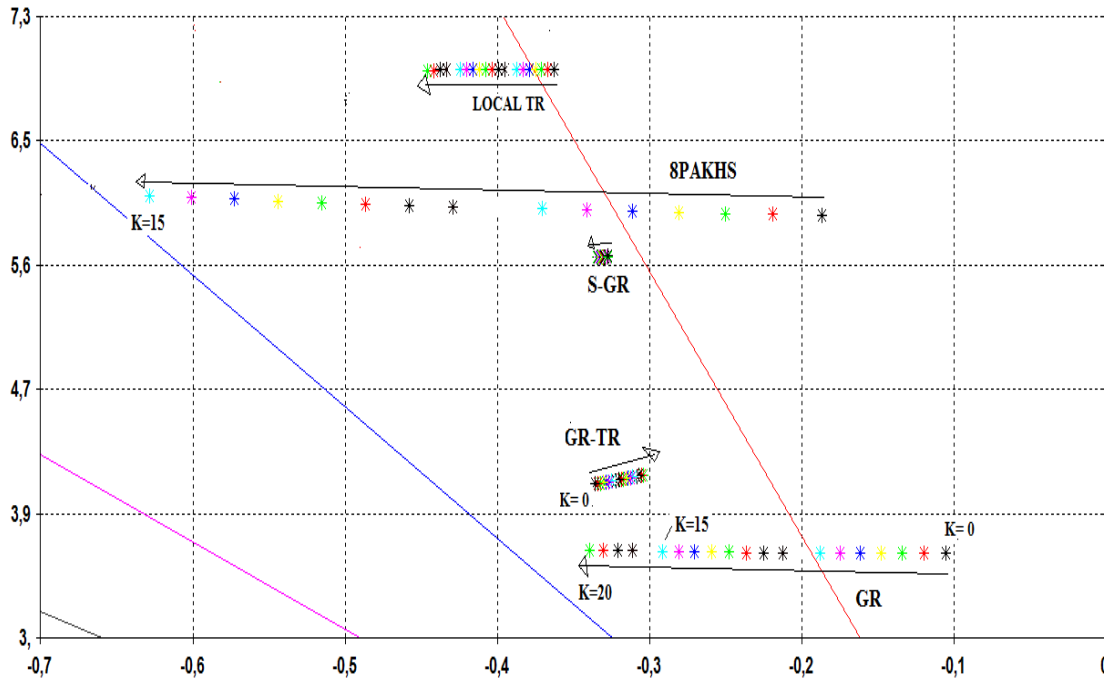


Σχήμα 7.7 Οι ιδιοτιμές (πόλοι) του συστήματος με σταθεροποιητή, με $K_{pss}=15$

Όπως ήταν αναμενόμενο, με την προσθήκη σταθεροποιητή στο σύστημα, κάποιοι από τους ρυθμούς του συστήματος έχουν μετατοπιστεί προς τα αριστερά και κάποιοι έχουν μείνει αμετάβλητοι. Οι ρυθμοί που εμφανίζουν απόσβεση κάτω του 5% είναι οι τοπικοί ρυθμοί Καστρακίου, Καρδιάς, Αγ. Δημητρίου και Βουλγαρίας οι οποία παραμένουν ανεπηρέαστοι στην παρουσία σταθεροποιητή.

Για να χαρακτηρίσουμε τους υπόλοιπους ρυθμούς του συστήματος στην περίπτωση της ασθενούς διασύνδεσης είναι απαραίτητο να δούμε τη μετατόπιση των ιδιοτιμών με την αύξηση του κέρδους του σταθεροποιητή διότι εξαιτίας του συντονισμού δεν είναι ευδιάκριτο πως θα μετατοπιστεί η κάθε ιδιοτιμή.

Στο Σχήμα 7.8 φαίνεται η μετατόπιση των ιδιοτιμών των ρυθμών GR-TR, GR,Θράκης, S-GR καθώς και του τοπικού ρυθμού μεταξύ των τουρκικών μονάδων που εμφανίζεται μόνο στο Σενάριο Β με χαμηλή απόσβεση.



Σχήμα 7.8 Μετατόπιση των ιδιοτιμών του ρυθμού GR, GR-TR, του S-GR και του τοπικού ρυθμού της Θράκης λόγω αύξησης του κέρδους του σταθεροποιητή

Στον Πίνακα 7.3, παρουσιάζονται συγκριτικά οι ιδιοτιμές του συστήματος χωρίς σταθεροποιητή και οι ιδιοτιμές του συστήματος παρουσία σταθεροποιητών που σχεδιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο για τις μονάδες 1 και 2 της Κομοτηνής.

Πίνακας 7.3: Μεταβολή των ιδιοτιμών του συστήματος με την παρουσία σταθεροποιητών στην Κομοτηνή

	Χωρίς σταθεροποιητή			Με σταθεροποιητή			Περιγραφή
	Ρυθμοί	ζ%	f (Hz)	Ρυθμοί	ζ%	f (Hz)	
1	-0,6217 +j 12,523	4,9586	1,9930	-0,6217 +j 12,523	4,9586	1,9930	Τοπικός 1 (Καρδιά)
2	-0,5911 +j 12,21	4,8353	1,9432	-0,5911 +j 12,210	4,8353	1,9432	Τοπικός 2 (Αγ. Δημ)
3	-0,3936 +j 9,5531	4,1172	1,5204	-0,3936 +j 9,5531	4,1172	1,5204	Τοπικός 3 (BG)
4	-0,3378 +j 7,2122	4,6788	1,1479	-0,3378 +j 7,2122	4,6787	1,1479	Τοπικός 4 (Καστράκι)

5	$-0,1737 + j 5,9595$	2,9132	0,9485	$-0,5836 + j 6,0996$	9,5237	0,9708	Θράκης
6	$-0,3044 + j 5,6734$	5,3580	0,9030	$-0,3093 + j 5,6668$	5,4494	0,9019	S-GR
7	$-0,3121 + j 4,0814$	7,6242	0,6496	$-0,2890 + j 4,1281$	6,9842	0,6570	GR – TR
8	$-0,0981 + j 3,5997$	2,7251	0,5729	$-0,2707 + j 3,6085$	7,4798	0,5743	Inter-area GR
9	$-0,5378 + j 1,4785$	34,183	0,2353	$-0,5592 + j 1,4716$	35,522	0,2342	Inter-area UCTE
10	$-0,3371 + j 6,9751$	4,8277	1,1101	$-0,3945 + j 6,9767$	5,6453	1,1104	Τοπικός 5 (TR)

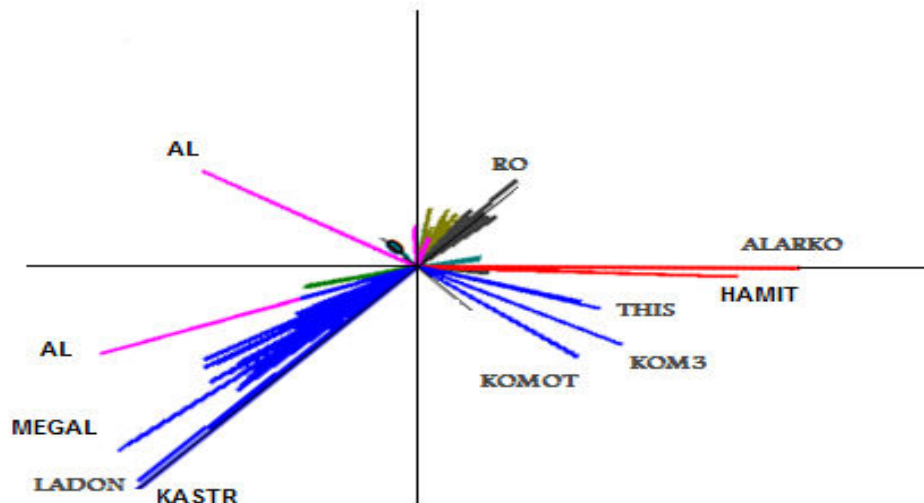
Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.3 με την ενεργοποίηση των σταθεροποιητών παραμένουν αμετάβλητοι οι τοπικοί ρυθμοί του Καστρακίου, του Αγίου Δημητρίου και της Καρδιάς, οι οποίοι εμφανίζονται με απόσβεση χαμηλότερη του 5%. Ο σταθεροποιητής βελτιώνει την απόσβεση του τοπικών ρυθμών της Τουρκίας και της Θράκης. Ο ρυθμός διασύνδεσης GR-TR μετατοπίζεται λίγο δεξιά και μειώνεται ο λόγος απόσβεσής του, ενώ ο νότιος ρυθμός S-GR και ο ρυθμός της UCTE δεν επηρεάζονται ουσιαστικά από την παρουσία του σταθεροποιητή. Η ιδιοτιμή του διασυννοριακού ρυθμού GR του ελληνικού συστήματος μετατοπίζεται αριστερά με την ενεργοποίηση του σταθεροποιητή και η απόσβεση του ρυθμού από 2,7% φτάνει το 7,5% περίπου.

7.4.2 Η Μορφή των Ρυθμών του Συστήματος

Στην ενότητα αυτή, θα δείξουμε τη μορφή των ρυθμών του συστήματος έχοντας ενεργοποιήσει τους σταθεροποιητές. Και σε αυτό το κεφάλαιο, για την ανάλυση των ρυθμών, χρησιμοποιείται ως διάνυσμα αναφοράς το διάνυσμα που αντιστοιχεί στη μονάδα ALARKO της Τουρκίας. Ακόμη, διατηρείται ο χρωματικός διαχωρισμός των χωρών, με το μπλε χρώμα να αντιστοιχεί πάντοτε στην Ελλάδα και το κόκκινο χρώμα στην Τουρκία.

Στο Σχήμα 7.9, απεικονίζεται η μορφή του ρυθμού διασύνδεσης Ελλάδος- Τουρκίας, με την παρουσία σταθεροποιητών στις αεριοστροβλικές μονάδες 1 και 2 της Κομοτηνής. Στο ρυθμό αυτό, οι τουρκικές μονάδες βρίσκονται εν φάση με τις ελληνικές μηχανές στην Κομοτηνή, στο Θησαυρό και την Πλατανόβρυση. Οι υπόλοιπες μονάδες της Ελλάδος με κυρίαρχες αυτές της Μεγαλόπολης, του Λάδωνα και του Καστρακίου ταλαντώνονται όλες μαζί, με διαφορά φάσης 120° από τις τουρκικές μονάδες. Η μορφή του ρυθμού δεν έχει αλλάξει, όμως αξίζει να παρατηρήσουμε στο σχήμα ότι οι μονάδες 1 και 2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής στις

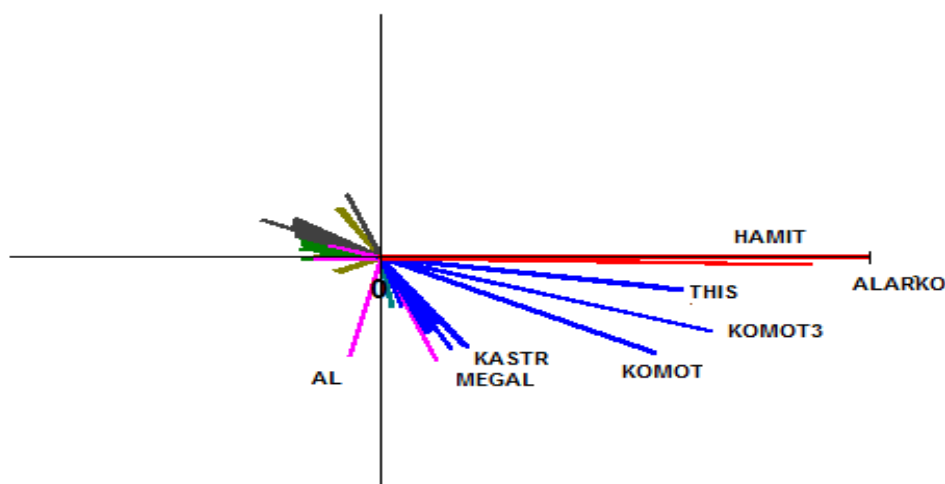
οποίες έχουμε εγκαταστήσει σταθεροποιητές, εμφανίζουν διαφορετική γωνία ταλάντωσης από την μηχανή 3 η οποία δεν είναι εφοδιασμένη με σταθεροποιητή.



Σχήμα 7.9 Μορφή ρυθμού διασύνδεσης GR-TR.

Στο Σχήμα 7.10 παρουσιάζεται η μορφή του GR, καθώς έχουμε ταλάντωση των περισσότερων ελληνικών μονάδων αντίθετα από τις μονάδες των άλλων βαλκανικών. Οι μονάδες της Θράκης όμως, ταλαντώνονται με διαφορετική φάση από τις υπόλοιπες μονάδες της Ελλάδος. Συγκεκριμένα οι μονάδες της Κομοτηνής εμφανίζουν μια φασική απόκλιση από τις άλλες ελληνικές μονάδες μεγέθους 60° περίπου.

Η μορφή του ρυθμού δεν έχει αλλάξει με την προσθήκη του σταθεροποιητή, όμως αξίζει να παρατηρήσουμε στο σχήμα ότι οι μονάδες 1,2 της Κομοτηνής στις οποίες έχουμε εγκαταστήσει σταθεροποιητές, εμφανίζουν διαφορετική γωνία ταλάντωσης από την μηχανή 3 η οποία δεν είναι εφοδιασμένη με σταθεροποιητή.



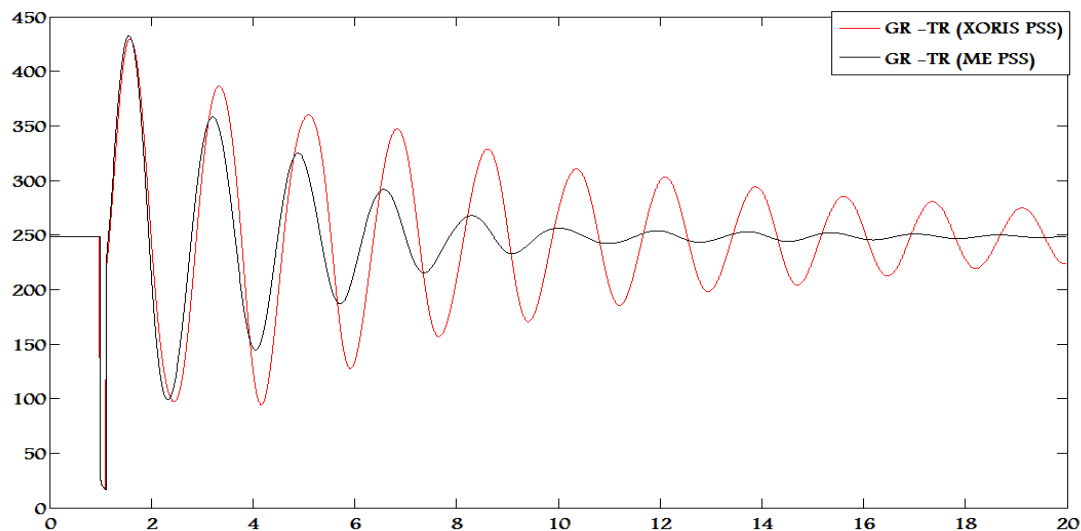
Σχήμα 7.10 Η μορφή του ρυθμού GR με σταθεροποιητή.

Όπως εξηγήσαμε και στο κεφάλαιο 6, στην περίπτωση της ασθενούς διασύνδεσης, υφίσταται κάποια αλλαγή της μορφής των ρυθμών GR-TR και GR, εξαιτίας του συντονισμού και της αλληλεπίδρασης των δύο ρυθμών καθώς πλησιάζουν μεταξύ τους. Έτσι, όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.9-7.10 όταν το σύστημα λειτουργεί με τους σταθεροποιητές στις μονάδες 1 και 2 του ΘΗΣ της Κομοτηνής, εμφανίζεται το πρόβλημα του συντονισμού όπως και χωρίς σταθεροποιητές.

7.5 Προσομοίωση Συστήματος με Σταθεροποιητή (Ασθενής Διασύνδεση)

Προκειμένου να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της σχεδίασης του σταθεροποιητή για την περίπτωση ασθενούς διασύνδεσης, εκτελείται μια προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς του συστήματος σε ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 400kV Θεσσαλονίκης-Φιλίππων το οποίο θεωρείται ότι εκκαθαρίζεται σε 120msec με άνοιγμα της γραμμής. Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν με το πρόγραμμα v30 PSS/E. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται η απόκριση του συστήματος χωρίς σταθεροποιητές ενώ με μαύρο χρώμα δείχνεται η απόκρισή του παρουσία σταθεροποιητών.

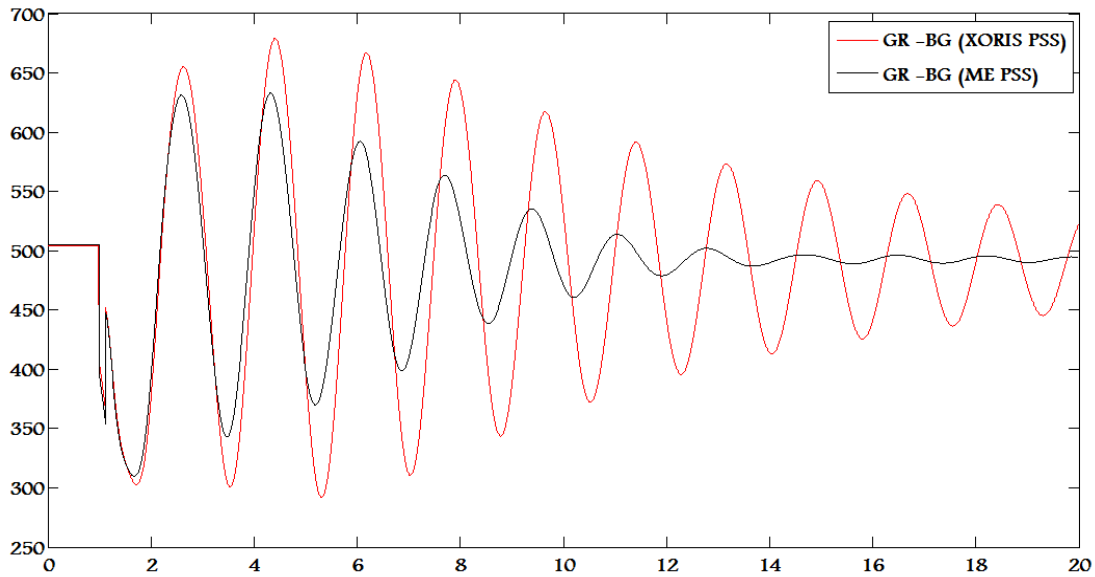
Η ταλάντωση στη ροή ενεργού ισχύος στη γραμμή διασύνδεσης του ελληνικού συστήματος με την τουρκική νησίδα με και χωρίς σταθεροποιητή στις μονάδες της Κομοτηνής φαίνεται στο Σχήμα 7.11:



Σχήμα 7.11 Ροή ισχύος στη διασύνδεση της Ελλάδος με την Τουρκία, γραμμή Νέα Σάντα-Babaeski

Στην περίπτωση λειτουργίας του συστήματος χωρίς τη γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων, ο ρυθμός χαμηλής απόσβεσης εμφανίζεται αμέσως όταν δεν υπάρχει σταθεροποιητής, ενώ έχει ικανοποιητική απόσβεση με την προσθήκη του σταθεροποιητή που σχεδιάστηκε στις μονάδες 1 και 2 της Κομοτηνής.

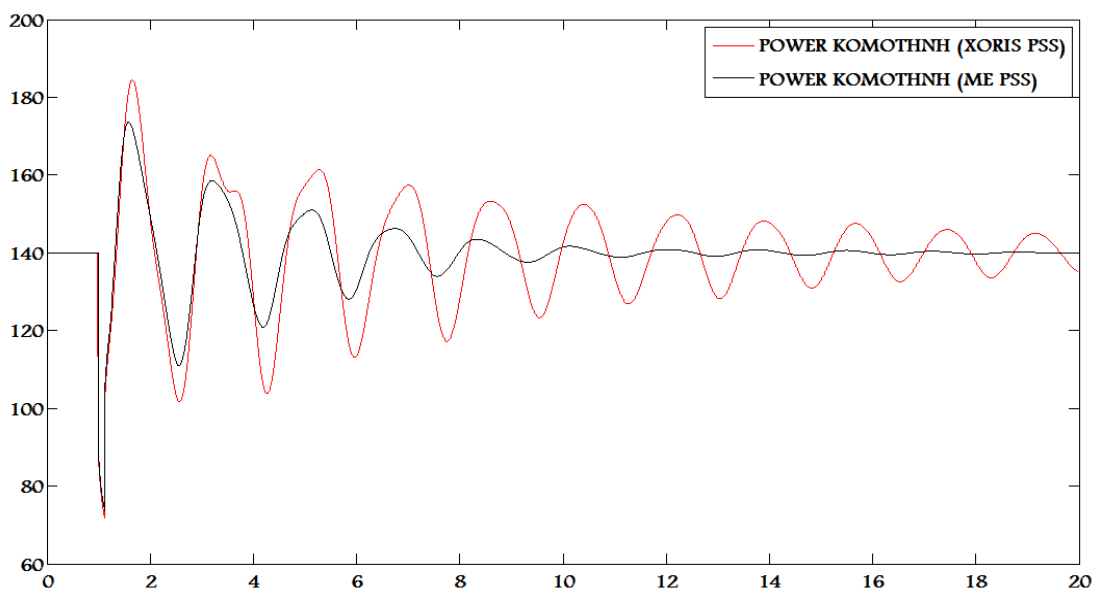
Η ταλάντωση της ροής ενεργού ισχύος στη γραμμή διασύνδεσης Θεσσαλονίκης-Blagoevgrad με και χωρίς σταθεροποιητή φαίνεται στο Σχήμα 7.12:



Σχήμα 7.12 Ροή ισχύος στη γραμμή Θεσσαλονίκη- Blagoevgrad, Διασύνδεση της Ελλάδος με την Βουλγαρία

Και σε αυτή την περίπτωση, ο ρυθμός χαμηλής απόσβεσης εμφανίζεται πιο έντονα στη περίπτωση λειτουργίας του συστήματος χωρίς σταθεροποιητή. Οι σταθεροποιητές αποσβένουν ικανοποιητικά το ρυθμό που επικρατεί στο σύστημα με συχνότητα 0,57 Hz αρκετά γρήγορα.

Η ταλάντωση της παραγωγής ενεργού ισχύος της μονάδος 1 του ΘΗΣ στη Κομοτηνή με και χωρίς σταθεροποιητή, φαίνεται στο Σχήμα 7.13:



Σχήμα 7.13 Διάγραμμα ισχύος της μηχανής στην Κομοτηνή.

Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 7.13 η ταλάντωση που επικρατεί στη παραγωγή ενεργού ισχύος της μονάδας 1 της Κομοτηνής στην οποία προσαρτήθηκε ο σταθεροποιητής αποσβένεται ικανοποιητικά σε μικρό χρονικό διάστημα. Η συχνότητα ταλάντωσης για την λειτουργία του συστήματος χωρίς σταθεροποιητή είναι 0.57 f=Hz , αυτή του ρυθμού GR χαμηλής απόσβεσης.

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.11-7.13, ο σταθεροποιητής που σχεδιάστηκε σε αυτό το κεφάλαιο, αποσβένει ικανοποιητικά την ταλάντωση που κυριαρχούσε στο σύστημα και είχε την συχνότητα της διασυννοριακής ταλάντωσης του ελληνικού συστήματος. Συνεπώς, η σχεδίαση αυτή και η επιλογή του κέρδους του σταθεροποιητή επίλυσε αρκετά ικανοποιητικά το πρόβλημα της διασυννοριακής ταλάντωσης και στην περίπτωση που η εισαγωγή της ισχύος από την τουρκική νησίδα στο Ελληνικό Σύστημα γίνεται μέσω του δικτύου των 150kV.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα-Προοπτικές

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε σαν στόχο την μελέτη του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος και τη σχεδίαση σταθεροποιητών συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που εμφανίζονται στο σύστημα μετά τη διασύνδεση του Ελληνικού συστήματος με ένα τμήμα του τουρκικού συστήματος της Ανατολικής Θράκης με σκοπό την εισαγωγή ποσού ισχύος (μέχρι 250 MW).

Συγκεκριμένα διαπιστώθηκε ότι:

Η διασύνδεση του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος με την Τουρκική νησίδα εισάγει στο σύστημα κάποιους νέους ρυθμούς ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων και επηρεάζει κάποιους ήδη υπάρχοντες ρυθμούς.

Πιο συγκεκριμένα, ο σημαντικότερος ρυθμός που εμφανίζεται στο σύστημα μετά τη διασύνδεση των δύο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας έχει συχνότητα περί τα 0,82 Hz και λόγο απόσβεσης 2,26%. Στο ρυθμό αυτό ταλαντώνονται οι ελληνικές μονάδες της Κομοτηνής, του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης, μονάδες που βρίσκονται στη Θράκη, μαζί με τις τουρκικές μονάδες της Ανατολικής Θράκης, ως προς τις υπόλοιπες γεννήτριες του Ελληνικού Συστήματος. Ο ρυθμός αυτός χαρακτηρίστηκε ρυθμός διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας και κυριαρχεί στο σύστημα λόγω της χαμηλής απόσβεσης. Επίσης, εμφανίζεται και ένας ρυθμός που αφορά την ταλάντωση των μονάδων της Θράκης ως προς τις τουρκικές μονάδες της Ανατολικής Θράκης στα 0,95 Hz με απόσβεση μικρότερη του 5%.

Καταρχάς, η διασύνδεση Ελλάδος-Τουρκίας επηρεάζει το ρυθμό του Ελληνικού Συστήματος, αυξάνοντας λίγο την συχνότητά του διατηρώντας όμως την ικανοποιητική απόσβεση του ρυθμού. Οι τουρκικές μονάδες της Ανατολικής Θράκης ταλαντώνονται μαζί με τις μονάδες του Ελληνικού Συστήματος ως προς το Βαλκανικό Σύστημα. Επίσης, επηρεάζεται ο ρυθμός του νοτίου συστήματος καθώς μετά τη διασύνδεση Ελλάδος-Τουρκίας, συμμετέχουν και οι μονάδες του ΘΗΣ της Κομοτηνής σε αυτό το ρυθμό. Ο ρυθμός αυτός έχει παραπλήσια συχνότητα με το ρυθμό διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας και λόγο απόσβεσης μικρότερο του 5%.

Ακόμη, μελετήθηκε το ενδεχόμενο απώλειας της γραμμής 400kV Θεσσαλονίκης-Φιλίππων και προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Η σύνδεση της Θράκης με το υπόλοιπο Ελληνικό Σύστημα σε αυτή την περίπτωση γίνεται μέσω του δικτύου 150kV, συνεπώς η διασύνδεση των δύο χωρών είναι εξασθενημένη. Εξαιτίας αυτής της αλλαγής στις συνθήκες λειτουργίας του δικτύου, οι ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί του συστήματος μεταβάλλονται και συγκεκριμένα:

Εμφανίζεται ένας νέος τοπικός ρυθμός μεταξύ των τουρκικών μονάδων με λόγο απόσβεσης μικρότερο του 5%. Ακόμη στην περίπτωση της ασθενούς διασύνδεσης διαπιστώθηκε ότι εμφανίζεται το φαινόμενο του συντονισμού των ρυθμών ταλάντωσης του Ελληνικού Συστήματος και του ρυθμού της διασυνοριακής ταλάντωσης Ελλάδος-Τουρκίας. Η μορφή των ρυθμών αυτών γίνεται παρόμοια και οι ρυθμοί αποκτούν πολύ κοντινές συχνότητες. Παρατηρήθηκε ότι, με την απώλεια της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων, η χαμηλή απόσβεση περνά στο ρυθμό ταλάντωσης του Ελληνικού Συστήματος ο οποίος στην περίπτωση ισχυρής διασύνδεσης είχε ικανοποιητική απόσβεση. Αντίθετα, ο ρυθμός που εμφανίζει τώρα ικανοποιητική απόσβεση είναι ο ρυθμός ταλάντωσης της διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας.

Για τη σχεδίαση σταθεροποιητή για τον χαμηλής απόσβεσης ηλεκτρομηχανικό ρυθμό διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας χρησιμοποιήθηκαν 3 μέθοδοι σχεδίασης:

- Σχεδίαση σταθεροποιητή με χρήση ολοκληρωτικών υπολοίπων για πλήρη αντιστάθμιση φάσης στη συχνότητα του ρυθμού χαμηλής απόσβεσης.
- Σχεδίαση σταθεροποιητή με υπολογισμό της συνάρτησης μεταφοράς GEP(s) στο Ελληνικό Σύστημα ανοίγοντας τους βρόχους γωνίας-ισχύος όλων των μηχανών του συστήματος θέτοντας πολύ μεγάλη τιμή στη σταθερά αδρανείας H και σχεδίαση σταθεροποιητή σε προσεγγιστικό σύστημα μιας γεννήτριας του ΘΗΣ της Κομοτηνής στην οποία θα εγκατασταθεί ο σταθεροποιητής, συνδεδεμένης σε άπειρο ζυγό.

- Εναλλακτική σχεδίαση σταθεροποιητή με υψηλότερη κεντρική συχνότητα σταθεροποιητή ο οποίος θα δίνει μερική αντιστάθμιση φάσεως στο συγκεκριμένο ρυθμό όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 5.2.4.

Η σχεδίαση του σταθεροποιητή σε κάθε περίπτωση έγινε για 2 αεριοστροβιλικές μονάδες του ΘΗΣ της Κομοτηνής.

Συγκρίνοντας τις διάφορες μεθόδους σχεδίασης παρατηρήθηκαν τα εξής:

Η συνάρτηση μεταφοράς GEP(s) του Ελληνικού Συστήματος δίνει ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα με την συνάρτηση μεταφοράς GEP(s) του προσεγγιστικού συστήματος γεννήτριας-άπειρου ζυγού αν χρησιμοποιηθούν μοντέλα της ίδιας τάξης για την παράσταση της γεννήτριας. Η συνάρτηση μεταφοράς GEP(s) του συστήματος γεννήτριας-άπειρου ζυγού με 3^{ης} τάξης μοντέλο γεννήτριας μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα καθώς δίνει μικρό σφάλμα, περίπου 15°, στην γωνία αντισταθμίσεως.

Η μέθοδος υπολογισμού της προσεγγιστικής συνάρτησης μεταφοράς GEP(s) στο Ελληνικό Σύστημα δίνει τα ίδια αποτελέσματα με τη μέθοδο υπολογισμού της γωνίας αντιστάθμισης με χρήση των ολοκληρωτικών υπολοίπων. Διευκρινίζεται, ότι η ταύτιση της υπολογισμένης γωνίας αντιστάθμισης με τη συνάρτηση μεταφοράς GEP(s) και τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα δεν είναι απαραίτητο να ισχύει σε όλα τα συστήματα και σε όλα τα σημεία λειτουργίας (π.χ. συντονισμός ρυθμών)

Η επιλογή του κέρδους του σταθεροποιητή έγινε με το σχεδιασμό του γεωμετρικού τόπο των ριζών του συστήματος, στον οποίο φαίνεται η μεταβολή των ιδιοτιμών του συστήματος, καθώς αυξάναμε την τιμή του κέρδους του σταθεροποιητή. Επιλέχθηκε η τιμή του κέρδους η οποία έδινε τη μέγιστη δυνατή απόσβεση του ρυθμού χωρίς σημαντική μεταβολή της συχνότητάς του.

Μετά τη σχεδίαση των σταθεροποιητών με τις παραπάνω μεθόδους, έγινε έλεγχος της κάθε σχεδίασης θεωρώντας ότι το σύστημα είναι εφοδιασμένο με αυτούς τους σταθεροποιητές και προσομοιώνοντας:

- Ένα τριφασικό αυτοεκκαθαριζόμενο σφάλμα στη γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων.
- Ένα τριφασικό σφάλμα στη γραμμή Θεσσαλονίκης-Φιλίππων με απώλεια της γραμμής.

Από τις προσομοιώσεις διαπιστώθηκε ότι:

Η σχεδίαση του σταθεροποιητή επιλύει ικανοποιητικά το πρόβλημα του ρυθμού του Ελληνικού συστήματος στην περίπτωση που το σύστημα έχει όλες τις γραμμές

ενεργοποιημένες, ενώ επιλύει αρκετά καλά το πρόβλημα της απόσβεσης του ρυθμού διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας.

Στην περίπτωση απώλειας της γραμμής Θεσσαλονίκης-Φιλίππων του Ελληνικού Συστήματος, ο σταθεροποιητής αποσβένει ικανοποιητικά σε κάθε περίπτωση σχεδίασης, το ρυθμό διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας και το ρυθμό του Ελληνικού Συστήματος ο οποίος εμφανίζει χαμηλή απόσβεση σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας του συστήματος.

Όμως, με τη σχεδίαση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η απόσβεση του ρυθμού του νοτίου Ελληνικού Συστήματος παρέμεινε ασθενής. Το πρόβλημα αυτό, υποδεικνύει την μελέτη και σχεδίαση ενός σταθεροποιητή ο οποίος θα προσαρτηθεί σε μια μονάδα του νοτίου Ελληνικού Συστήματος για την απόσβεση αυτού του ρυθμού, όπως για παράδειγμα στη μονάδα 5 του σταθμού του Λαυρίου ή σε μια μονάδα της Μεγαλόπολης.

Έκτός αυτού, ήταν αδύνατη η αύξηση της απόσβεσης του ρυθμού διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας πάνω από 4,7% τιμή οριακά ικανοποιητική η οποία αντιστοιχεί στη σχεδίαση του σταθεροποιητή με τη μέθοδο των ολοκληρωτικών υπολοίπων για μέγιστη αντιστάθμιση στη συχνότητα του ρυθμού αυτού. Στην περίπτωση σχεδίασης σταθεροποιητή με υψηλότερη κεντρική συχνότητα και μερική αντιστάθμιση φάσεως στο συγκεκριμένο ρυθμό, η μέγιστη τιμή του λόγου απόσβεσης ήταν 4%, λιγότερο ικανοποιητική. Συνεπώς, η αδυναμία ικανοποιητικής αντιστάθμισης του ρυθμού διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας ενδεχομένως να οφείλεται στην ύπαρξη κάποιου μηδενικού κοντά στη θέση του πόλου στο μιγαδικό επίπεδο.

Όλα τα παραπάνω οδηγούν στην ανάγκη περαιτέρω μελέτης της διασύνδεσης του Ελληνικού Συστήματος με το κομμάτι της Ευρωπαϊκής Τουρκίας σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου. Ακόμη, για την επίλυση των προβλημάτων που ανέκυψαν, θα μπορούσε να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα σχεδίασης ενός σταθεροποιητή με διαφορετικό σήμα εισόδου.

Όλα τα αποτελέσματα αντιστοιχούν στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν ενεργοποιημένοι σταθεροποιητές στις μονάδες της Ευρωπαϊκής Τουρκίας. Είναι προφανές πως η εγκατάσταση σταθεροποιητή σε κάποια τουρκική μονάδα θα έλυne το πρόβλημα της απόσβεσης του ρυθμού διασύνδεσης Ελλάδος-Τουρκίας με επιτυχία. Όμως, στην παρούσα εργασία εξετάστηκε το σενάριο λειτουργίας του συστήματος χωρίς σταθεροποιητές και αναζητήθηκαν λύσεις στο πρόβλημα των ταλαντώσεων για τη διασύνδεση Ελλάδος-Τουρκίας με τη σχεδίαση σταθεροποιητών στο Ελληνικό Σύστημα.

Βιβλιογραφία

- [1] Β. Κ. Παπαδιά, “Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας”, Εκδόσεις Συμμετρία 1999
- [2] Κ. Βουρνά, Γ. Κονταξή, “Εισαγωγή στα ΣΗΕ”, Αθήνα 2001
- [3] Β. Κ. Παπαδιά, “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος ΙΙ, Ασύμμετρες και Μεταβατικές Καταστάσεις”, Αθήνα 1993
- [4] Κ. Βουρνά, “Ευστάθεια Μονίμου Καταστάσεως”, Αθήνα 2004
- [5] Β. Νομικός, “Συστηματική Σχεδίαση Σταθεροποιητών σε Συστήματα με Σύγχρονες και Ασύγχρονες Μηχανές”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2005
- [6] G. Rogers, “Power System Oscillations”, Kluwer Academic Publishers, 2000
- [7] Δ.Α. Παπανδρέου, “Σταθεροποιητές Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2008
- [8] Ε. Ποταμιανάκης, “Προσομοίωση και Γραμμικοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας για την Ανάλυση Βραχυπρόθεσμης Ευστάθειας Τάσης”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2006
- [9] B. M. Nomikos, M. A. Kotlida, and C. D. Vournas, “Interarea Oscillations and Tie-line Transients in the Hellenic Interconnected System”, IEEE/PES Power Tech Conference, Lausanne, July 2007
- [10] A.Koronides, I.Kabouris, A.Neris, V.Nomikos, F.Kanelos, “Technical Studies for the Temporary Radial Connection Of an Isolated Generation Island in Turkey to the Greek Interconnected System”, HTSO, May 2008, Athens, Greece
- [11] V. C. Nikolaidis, C. D. Vournas, G. A. Fotopoulos, G. P. Christoforidis, E. Kalfaoglou and A. Koronides, “Automatic Load Shedding Schemes against Voltage Instability in the Hellenic System”, IEEE/PES General Meeting, Tampa FL, June 2007
- [12] N. Martins (Convener), CIGRE Task Force 38.02.16, “Impact of the Interaction Among Power System Controls”, June 1999

- [13] I. Dobson, J. Zhang, S. Greene, H. Engdahl, P. W. Sauer, “Is strong modal resonance a precursor to power system oscillations?”, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, vol. 48, March 2001, pp. 340 – 349, March 2001
- [14] S. Wiggins, “Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos. New York: Springer-Verlag”, 1990
- [15] M. Gibbard, D. Vowles, “Reconciliation of Methods of Compensation for PSSs in Multimachine Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, February 2004, pp. 463-472.
- [16] P. Kundur, M. Klein, G.J. Rogers, M.S. Zywno, “Application of Power System Stabilizer for Enhancement of Overall System Stability”, IEEE Trans, PWRS-4, May 1989, pp. 614- 624.
- [17] K. Ogata, “Modern Control Engineering”, Prentice – Hall, 1970.
- [18] P.Miksa, S.Mijailovic, Z.Vujasinovic, J.Kabouris, C.Vournas, “Evaluation of Transfer Capabilities in the 2nd UCTE Zone”, IEEE MELECON, May 2004
- [19] Siemens Power Transmission & Distribution, Inc. Power Technologies International , PSS/E 30.2 November 2005, Online Documentation
- [20] PACDYN CEPEL, Online Documentation