



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

**Απλοποίηση Μοντέλων ΣΗΕ για την Ανάλυση  
Ταλαντώσεων Ισχύος σε Μεγάλες Διασυνδέσεις και  
Σχεδίαση Σταθεροποιητών**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιωάννης Κ. Μάντζαρης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2013





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

**Απλοποίηση Μοντέλων ΣΗΕ για την Ανάλυση  
Ταλαντώσεων Ισχύος σε Μεγάλες Διασυνδέσεις και  
Σχεδίαση Σταθεροποιητών**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Ιωάννης Κ. Μάντζαρης

**Συμβουλευτική Επιτροπή : Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς**

Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου

Σταυρούλα Καβατζά

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 8<sup>η</sup> Φεβρουαρίου 2013.

Κ. Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ν. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. Καβατζά  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Γ. Κορρές  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ν. Μαράτος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Π. Γεωργιάκης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Α. Αλεξανδρίδης  
Καθηγητής Παν. Πατρών

Αθήνα, Ιανουάριος 2013

.....  
Ιωάννης Κ. Μάντζαρης

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

Copyright © Ιωάννης Κ. Μάντζαρης  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

# Περίληψη

Στην παρούσα διατριβή, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην μελέτη των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων οι οποίες ανήκουν στις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις και εμφανίζονται συνήθως λόγω των ασθενών διασυνδέσεων μεταξύ ηλεκτρικών συστημάτων. Η διαρκής λειτουργία των ΣΗΕ κοντά στα όριά τους σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι ταλαντώσεις αυτές διαμορφώνονται από την δυναμική πολλών γεννητριών αναδεικνύει το πρόβλημα της ικανοποιητικής απόσβεσής τους σε ένα από τα σημαντικά προβλήματα ευστάθειας των σύγχρονων ΣΗΕ.

Αντικείμενο της διατριβής είναι η ανάπτυξη μιας νέας προσέγγισης για την μελέτη των ταλαντώσεων αυτών. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην θεωρία της οιονεί στατικής μεταβολής και καταλήγει στην ανάπτυξη ενός απλοποιημένου μοντέλου ΣΗΕ στο οποίο απαλείφονται οι τοπικές και οι ενδοσυστημικές ταλαντώσεις, καθώς επίσης και μικρές χρονικές σταθερές από τις διατάξεις των ΣΗΕ. Παρά την απλοποίηση και αντίθετα με άλλες μεθόδους, η δομή του συστήματος, οι σταθμοί παραγωγής και τα φορτία διατηρούνται ως ανεξάρτητα τμήματα, όπως και οι διατάξεις ελέγχου τους, επιτρέποντας την μελέτη περισσότερων φαινομένων σε σχέση με τεχνικές απλοποίησης που θεωρούν ισοδύναμα υποσυστήματα.

Η προσέγγιση που αναπτύσσεται στην διατριβή γεφυρώνει το κενό μεταξύ ευστάθειας μικρών διαταραχών βραχυπρόθεσμης χρονικής κλίμακας και ανάλυσης ευστάθειας μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας (π.χ. ευστάθεια συχνότητας), παρέχει ένα πλαίσιο που επιτρέπει την εξειδικευμένη μελέτη των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων χωρίς να αλλοιώνει την δομή του συστήματος, καθώς και επιτρέπει την μελέτη φαινομένων που σχετίζονται με τις διατάξεις ελέγχου. Τέλος η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη για την σχεδίαση σταθεροποιητών ισχύος.

Για την μελέτη και την εκτίμηση της ακρίβειας της προτεινόμενης μεθόδου αναπτύχθηκε το λογισμικό πακέτο ROM-E/Sim (Reduced Order Model Eigenvalues & Simulation), στο οποίο πέραν των απλοποιήσεων που αναφέρθηκαν, ενσωματώθηκαν τεχνικές για την επίλυση συστημάτων διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων μεγάλων διαστάσεων. Πιο συγκεκριμένα ενσωματώθηκε η τεχνική αραιών πινάκων, η διαδικασία ταυτόχρονης επίλυσης διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων, καθώς και η τεχνική επιλεκτικού υπολογισμού ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων. Το λογισμικό πακέτο πραγματοποιεί τόσο προσομοίωση διαταραχών, χρησιμοποιώντας την τραπεζοειδή μέθοδο ολοκλήρωσης, όσο και ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών.

Η εκτίμηση της ακρίβειας της προτεινόμενης προσέγγισης έγινε χρησιμοποιώντας δύο εμπορικά πακέτα λογισμικού (PSS/E, PacDyn) με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο έλεγχος αυτός υλοποιήθηκε τόσο σε ένα μικρό σύστημα τεσσάρων γεννητριών – έντεκα ζυγών, όσο και στο σύστημα της νοτιοανατολικής Ευρώπης σε δύο σενάρια λειτουργίας. Στα πλαίσια αυτά ελέγχθηκε η ανάλυση μικρών διαταραχών, η απόκριση σε διαταραχές, καθώς και η δυνατότητα σχεδίασης σταθεροποιητών ισχύος.

Επίσης πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας των διασυνδεδετικών ρυθμών αναδεικνύοντας τις κρίσιμες παραμέτρους που συμβάλουν στην μείωση της απόσβεσης των ρυθμών αυτών. Μελετήθηκε το στιγμιότυπο της 1-5-2005 όπου μια μη αποσβενόμενη ταλάντωση χαμηλής συχνότητας εμφανίστηκε στο Ευρωπαϊκό σύστημα. Τέλος μελετήθηκε η συμβολή των ρυθμιστών στροφών στην ευστάθεια των διασυνδεδετικών ρυθμών και πιο συγκεκριμένα η συμβολή των διατάξεων ελέγχου νεκρής ζώνης των ρυθμιστών στροφών των θερμικών μονάδων.

# Λέξεις κλειδιά

Ευστάθεια ΣΗΕ, Έλεγχος ΣΗΕ, Διασυνδεδετικές Ταλαντώσεις, Οιονεί Στατική Μεταβολή, Βαλκανικό Σύστημα, Σταθεροποιητές Ισχύος, Μοντέλα Μειωμένης Τάξης, Επίδραση Ρυθμιστών Στροφών

# Abstract

This PhD thesis focuses on the study of interarea oscillations which are subsumed in electromechanical oscillations and arise due to weak connections between power systems. Operation of power system close to their technical limits, combined with the complexity of these oscillations (numerous generators contribute), makes the problem of adequate damping one of the most significant stability problems of contemporary power systems.

Scope of the PhD thesis is the development of a new approach for the study of these oscillations. This approach is based on quasi steady state approximation and results in a reduced order power system model in which all local and intra-area oscillations are neglected, along with some small time constants of power system devices. Despite this reduction process, the structure of the system, individual power plants and loads are maintained as well as their control devices, allowing the study of more dynamic phenomena than with reduction methods using generator equivalents.

The approach developed in the PhD thesis bridges the gap between short-term small-signal stability and long term (e.g. frequency) stability analysis. In addition it provides a framework that allows focusing on interarea oscillations while maintaining individual unit controllers. Last but not least is that it allows studying unit governor effects and also, design PSSs for interarea modes

For the study and the estimation of proposed method accuracy, a new software is developed called ROM-E/Sim (Reduced Order Model Eigenvalues & Simulation). In this software, apart from simplifications described above, techniques for resolving DAE system of numerous equations have been incorporated. In particular, sparse matrix techniques, technique for simultaneous solution of DAE system, and selective eigenvalue-eigenvector calculation have been incorporated.

Accuracy of the proposed method is estimated by comparing with two commercial softwares (PSS/E, PacDyn) with satisfying results. These tests have been applied in a test system (11 buses-4 generators) as well as in the system of South Eastern Europe in two case studies. In these tests small signal stability study, simulation after major disturbances and PSS design was performed.

Furthermore, in this PhD Thesis, sensitivity analysis of the interarea modes is performed showing the critical parameters which affect damping of these modes. In addition, the incident of 1<sup>st</sup> May of 2005 when a low frequency undamped oscillation occurred in the European System was studied. Last but not least is the study of governor effects on interarea modes. More specifically, in this thesis, the contribution of deadband controllers of thermal plant speed governors is investigated.

# Key words

Power System Stability, Power System Control, Interarea Oscillations, Quasi Steady State, South-Eastern European Power System, Power System Stabilizer, Reduced Order Models, Speed Governor Effects



# Πρόλογος

Μέσα στις λίγες γραμμές ενός προλόγου ο οποίος αποτελεί την τελευταία διαδικασία στην συγγραφή του κειμένου της διατριβής είναι πραγματικά δύσκολο να συμπυκνωθούν όλα εκείνα τα στοιχεία που απουσιάζουν από τις επόμενες σελίδες, όμως πάντοτε συνοδεύουν την επιστημονική έρευνα. Η παρούσα διατριβή είναι το αποτέλεσμα έξι ετών σκληρής και επίπονης δουλειάς η οποία ακόμα και στις πιο άχαρες εκδοχές της δεν έχανε το ενδιαφέρον που συνοδεύει μια ερευνητική και μαθησιακή ταυτόχρονα διαδικασία. Βασική συμβολή στον χαρακτήρα αυτό αλλά και το αποτέλεσμα που θα παρουσιαστεί στην συνέχεια ανήκει στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βουρνά, ο οποίος όλα αυτά τα χρόνια αφιέρωσε όχι μονάχα χρόνο, αλλά κυρίως υπομονή και όρεξη στην προσπάθεια αυτή. Για την στάση αυτή και την συμβολή του τον ευχαριστώ θερμά.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Α. Μέτσιου για την συνεργασία μας και την βοήθεια στην εκπόνηση των αποτελεσμάτων του 7<sup>ου</sup> κεφαλαίου, τον Δρ. Ιωάννη Καμπούρη, Διευθυντή Ανάπτυξης Δικτύου του Α.Δ.Μ.Η.Ε. για την βοήθειά του στην διαμόρφωση των σεναρίων του 7<sup>ου</sup> κεφαλαίου και την παροχή στοιχείων σχετικά με το στιγμιότυπο της 1-5-05, όπως και τους διδάκτορες μηχανικούς Ν. Σακελλαρίδη, Μ. Καρυσιανό για την πολύπλευρή βοήθεια τους.

Θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου η οποία όλα τα χρόνια των σπουδών μου με στήριξε αταλάντευτα στην προσπάθεια αυτή υλικά και ψυχικά. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την Β. Νητσοπούλου καθώς και όλους μου τους φίλους οι οποίοι με συντροφεύουν όλα αυτά τα χρόνια για την αγάπη, την υπομονή και την ανοχή που επέδειξαν κυρίως τελευταίο χρόνο της συγγραφής.

Αν και η τεχνική φύση του κειμένου απαγορεύει οποιαδήποτε περαιτέρω προβολή, πιστεύω ότι το γεγονός ότι η διατριβή αυτή παρήχθη στα πλαίσια ενός ανοιχτού και δημόσιου εκπαιδευτικού ιδρύματος επέδρασε ουσιαστικά στην μορφή και τον προσανατολισμό της έρευνας. Με αυτή την έννοια, και σε καιρούς όπου τα πάντα υποτάσσονται στην αγοραία λογική, θέλω να σημειώσω την συμβολή όλων εκείνων που όλα αυτά τα χρόνια αγωνίζονται για το δημόσιο πανεπιστήμιο.

Γ.Μ.



# Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	1
1.2. Ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις.....	2
1.3. Κατηγοριοποίηση ευστάθειας.....	4
1.3.1. Ευστάθεια γωνίας.....	5
1.3.2. Ευστάθεια τάσης.....	6
1.3.3. Ευστάθεια συχνότητας.....	6
1.4. Συστήματα πολλαπλών χρονικών κλιμάκων και οιονεί στατική προσέγγιση.....	7
1.5. Διασυνδεδετικές ταλαντώσεις- Χωρισμός περιοχών.....	9
1.6. Μαθηματικό υπόβαθρο.....	10
1.6.1. Παράσταση συστήματος στο χώρο κατάστασης.....	10
1.6.2. Γραμμικοποίηση.....	11
1.6.3. Πίνακας κατάστασης συστήματος αλγεβρικών-διαφορικών εξισώσεων.....	12
1.6.4. Ιδιοτιμές -Ιδιοδιανύσματα.....	12
1.6.5. Ευαισθησία Ιδιοτιμών – Συντελεστές συμμετοχής.....	14
1.6.6. Ολοκληρωτικά υπόλοιπα.....	15
1.7. Αριθμητικές μέθοδοι.....	17
1.7.1. Αριθμητική ολοκλήρωση.....	17
1.7.2. Τραπεζοειδής μέθοδος.....	19
1.7.3. Επίλυση μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων με την μέθοδο Newton-Raphson.....	20
1.8. Επισκόπηση βιβλιογραφίας.....	23
1.8.1. Διασυνδεδετικές ταλαντώσεις.....	23
1.8.2. Ανάλυση ιδιαιτέρων διαταραχών - Οιονεί στατική μεταβολή.....	25
1.8.3. Δυναμικό Ισοδύναμο - Συνεκτικές περιοχές.....	25
1.8.4. Σχεδίαση Σταθεροποιητών.....	26
1.8.5. Μοντέλα διατάξεων ΣΗΕ.....	29
1.9. Αντικείμενο και δομή της εργασίας.....	30
2. Αριθμητικές τεχνικές.....	33
2.1. Αραιοί πίνακες.....	33
2.2. Επίλυση γραμμικού συστήματος με χρήση της τριγωνικής παραγοντοποίησης.....	35
2.3. Αναδιάταξη πίνακα.....	37
2.4. Επιλεκτικός υπολογισμός ιδιοτιμής σε μεγάλα συστήματα.....	39

2.4.1.	Μέθοδοι υπολογισμού ιδιοτιμών .....	39
2.4.2.	Μέθοδος των δυνάμεων (Power Method).....	39
2.4.3.	Μέθοδος αντιστρόφων δυνάμεων (Inverse Power Method) .....	41
2.4.4.	Μετάθεση (Shifting) στο μιγαδικό επίπεδο .....	42
2.5.	Επιλεκτικός υπολογισμός πολλαπλών ιδιοτιμών .....	43
2.5.1.	Αλγόριθμος ταυτόχρονου υπολογισμού μέγιστων ιδιοτιμών .....	43
2.5.2.	Αλγόριθμος ταυτόχρονου υπολογισμού ελάχιστων ιδιοτιμών.....	45
2.5.3.	Επίλυση συστήματος γραμμικών εξισώσεων με μιγαδικούς αριθμούς .....	46
2.6.	Εφαρμογή των μεθόδων επιλεκτικού υπολογισμού ιδιοτιμών για σύστημα διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς. ....	47
2.6.1.	Χωρίς εφαρμογή μετάθεσης .....	47
2.6.2.	Με την εφαρμογή μετάθεσης.....	48
2.6.3.	Αναδιατύπωση εξισώσεων στην περίπτωση όπου αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις δεν είναι διαχωρισμένες .....	49
2.6.4.	Μέθοδος με διανύσματα προστασίας.....	50
3.	Παράσταση διατάξεων συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας .....	52
3.1.	Παράσταση Σύγχρονων Γεννητριών .....	52
3.1.1.	Γενικά.....	52
3.1.2.	Περιγραφή σύγχρονης μηχανής με τις εξισώσεις του Park .....	54
3.1.3.	Εξισώσεις κίνησης δρομέα .....	56
3.1.4.	Μοντέλο τέταρτης τάξεως σύγχρονης γεννήτριας.....	57
3.1.5.	Μοντέλο τρίτης τάξεως σύγχρονης γεννήτριας .....	60
3.1.6.	Κλασικό μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας.....	62
3.2.	Αυτόματοι Ρυθμιστές Τάσης (APT) .....	63
3.2.1.	Συστήματα διέγερσης.....	63
3.2.2.	Γενικό μοντέλο APT (SEXS).....	65
3.2.3.	Μοντέλο APT με στρεφόμενα συστήματα συνεχούς ρεύματος (IEEE T1).....	65
3.2.4.	Μοντέλο APT εναλλασσόμενου ρεύματος I (ESAC1A/AC1A).....	66
3.2.5.	Μοντέλο APT εναλλασσόμενου ρεύματος II (ESAC4A/AC4A) .....	67
3.2.6.	Μοντέλο APT με στατό σύστημα διέγερσης (EXST1/AC4A) .....	67
3.3.	Ρυθμιστές στροφών – Μονάδες παραγωγής.....	68
3.3.1.	Γενικά στοιχεία για τους ρυθμιστές στροφών.....	68
3.3.2.	Στατισμός.....	69
3.3.3.	Ατμοστροβιλικές μονάδες.....	70
3.3.4.	Μοντέλο ατμοστροβιλικής μονάδας πολλαπλών επιπέδων (IEEE G1).....	72

3.3.5.	Γενικό μοντέλο ρυθμιστή στροφών (TGOV1).....	73
3.3.6.	Υδροηλεκτρικοί σταθμοί .....	73
3.3.7.	Μη γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου (HYGOV).....	77
3.3.8.	Γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου (IEEEG3).....	78
3.4.	Σταθεροποιητές ισχύος .....	79
3.4.1.	Γενικά.....	79
3.4.2.	Τύποι σταθεροποιητών ισχύος.....	80
3.5.	Τεχνικές σχεδίασης σταθεροποιητών ισχύος.....	83
3.5.1.	Ολοκληρωτικά υπόλοιπα και ρύθμιση παραμέτρων σταθεροποιητή για ένα σημείο λειτουργίας.....	83
3.5.2.	Σχεδίαση σταθεροποιητή για πολλαπλά σημεία λειτουργίας .....	85
3.5.3.	Σχεδίαση σταθεροποιητή τοπικών και διασυνδεδετικών ταλαντώσεων .....	86
3.5.4.	Σχεδίαση σταθεροποιητή τοπικών και διασυνδεδετικών ταλαντώσεων με βελτιστοποίηση (PSS2).....	87
4.	Ελλατωμένο μοντέλο ΣΗΕ για μεγάλες διασυνδέσεις.....	90
4.1.	Οιονεί στατική παράσταση με κοινή συχνότητα συστήματος.....	90
4.1.1.	Η παραδοχή κοινής συχνότητας.....	90
4.1.2.	Παράσταση γεννητριών στην μόνιμο κατάσταση και εξισώσεις δικτύου .....	92
4.1.3.	Μεταβλητές και εξισώσεις συστήματος .....	92
4.2.	Οιονεί στατική παράσταση διασυνδεδετικών ταλαντώσεων .....	94
4.2.1.	Χρονική κλίμακα διασυνδεδετικών ταλαντώσεων.....	94
4.2.2.	Παράσταση συνεκτικών περιοχών.....	95
4.3.	Γενική δομή και μεταβλητές του συστήματος.....	97
4.3.1.	Αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις .....	97
4.3.2.	Συνάρθρωση των εξισώσεων και Ιακωβιανός πίνακας.....	100
4.4.	Εξισώσεις συστήματος η περιοχών για το δίκτυο μεταφοράς και την έγχυση ισχύος των γεννητριών .....	103
4.4.1.	Κατάσρωση εξισώσεων ροής φορτίου .....	103
4.4.2.	Κατάσρωση εξισώσεων ηλεκτρικής ισχύος γεννητριών .....	104
4.4.3.	Κατάσρωση εξισώσεων απόκλισης ενεργού ισχύος κάθε περιοχής.....	106
4.4.4.	Εξισώσεις γωνιών αναφοράς .....	107
4.5.	Συχνότητα περιοχής.....	108
4.6.	Σχετική μεταβολή εσωτερικής γωνίας αναφοράς περιοχής.....	109
4.7.	Διαφορικές εξισώσεις γεννητριών .....	109
4.8.	Παράσταση απλοποιημένων μοντέλων APT .....	110
4.8.1.	Μοντέλο APT τύπου IEEE1 .....	110

4.8.2.	Μοντέλο APT τύπου ESAC1A/AC1A .....	112
4.8.3.	Μοντέλο APT τύπου ESAC4A/AC4A .....	115
4.8.4.	Μοντέλο APT EXST1/ST1 .....	117
4.9.	Παράσταση απλοποιημένων μοντέλων Ρυθμιστών στροφών – Στροβίλων .....	120
4.9.1.	Ατμοστρόβιλος τριών βαθμίδων (IEEEG1) .....	120
4.9.2.	Γενικό μοντέλο ρυθμιστή στροφών-στροβίλου TGOV1 .....	123
4.9.3.	Μη γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου (HYGOV) .....	124
4.9.4.	Γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου (IEEEG3) .....	126
4.10.	Παράσταση σταθεροποιητών ισχύος .....	129
4.10.1.	Μοντέλο σταθεροποιητή STAB1/STAB1* .....	129
4.10.2.	Σταθεροποιητής Ισχύος PSS2/PSS2* .....	131
5.	Λογισμικό πακέτο για την μελέτη μεγάλων διασυνδέσεων .....	135
5.1.	Γενικά .....	135
5.2.	Αρχικό τμήμα.....	137
5.2.1.	Αρχική ροή φορτίου.....	137
5.2.2.	Δομή Ιακωβιανού πίνακα.....	139
5.3.	Προσομοίωση .....	142
5.3.1.	Ο Ιακωβιανός πίνακας .....	144
5.3.2.	Βήμα ολοκλήρωσης .....	145
5.3.3.	Δυνατότητες προσομοίωσης .....	147
5.4.	Ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών .....	148
5.4.1.	Υπολογισμός ιδιοτιμών-ιδιοδιανυσμάτων για μικρά συστήματα .....	148
5.4.2.	Επιλεκτικός υπολογισμός ιδιοτιμών-δεξιών ιδιοδιανυσμάτων .....	149
5.4.3.	Επιλεκτικός υπολογισμός αριστερών ιδιοδιανυσμάτων .....	153
5.4.4.	Υπολογισμός ολοκληρωτικών υπολοίπων για την σχεδίαση σταθεροποιητών ... .....	154
5.4.5.	Ανάλυση ευαισθησίας ως προς το κέρδος του ρυθμιστή στροφών .....	156
5.4.6.	Σχεδίαση σταθεροποιητή ισχύος.....	157
6.	Εφαρμογή σε σύστημα δύο περιοχών .....	158
6.1.	Περιγραφή δοκιμαστικού συστήματος .....	158
6.2.	Επίδραση παράστασης σύγχρονων γεννητριών στην ευστάθεια ταλαντώσεων .....	161
6.2.1.	APT με διαφορετική ανατροφοδότηση .....	162
6.2.2.	APT με υψηλό κέρδος (ασταθής περίπτωση) .....	164
6.2.3.	APT με διαφορετική ανατροφοδότηση για ισχυρή διασύνδεση .....	165
6.2.4.	APT υψηλού κέρδους για ισχυρή διασύνδεση (ασταθής περίπτωση) .....	168

6.2.5.	Συμπεράσματα .....	169
6.3.	Χωρισμός περιοχών (απαλοιφή τοπικών ρυθμών) .....	170
6.3.1.	Αυτόματος ρυθμιστής τάσης με διαφορική ανατροφοδότηση.....	170
6.3.2.	Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης με αυξημένο κέρδος (ασταθής περίπτωση).....	172
6.4.	Ελαττωμένα μοντέλα βρόχων ελέγχου (APT και αμμοστροβιλικής μονάδας).....	173
6.4.1.	Ελαττωμένα μοντέλα APT .....	173
6.4.2.	Ελαττωμένα μοντέλα αμμοστροβιλικών μονάδων .....	178
6.4.3.	Συμπεράσματα .....	181
6.5.	Σχεδίαση σταθεροποιητών για ένα σημείο λειτουργίας .....	182
6.5.1.	Ανασκόπηση μοντέλων συστήματος .....	182
6.5.2.	Σχεδίαση σταθεροποιητή με APT υψηλού κέρδους. ....	183
6.5.3.	Σχεδίαση σταθεροποιητή με APT με διαφορική ανατροφοδότηση .....	189
6.6.	Σχεδίαση σταθεροποιητή για πολλαπλά σημεία λειτουργίας .....	192
6.6.1.	Περιγραφή των σημείων λειτουργίας .....	192
6.6.2.	Μοντέλα συστήματος.....	193
6.6.3.	Σχεδίαση σταθεροποιητή με το απλοποιημένο μοντέλο .....	194
6.6.4.	Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	197
6.6.5.	Πλεονεκτήματα σχεδίασης σταθεροποιητών για πολλαπλά σημείων λειτουργίας.....	199
7.	Εφαρμογή στο Βαλκανικό σύστημα.....	201
7.1.	Περιγραφή συστήματος .....	201
7.1.1.	Πρώην ζώνη II της UCTE.....	201
7.1.2.	Διασύνδεση με την πρώην ζώνη I UCTE .....	202
7.1.3.	Η διέγερση του διασυνδεδετικού ρυθμού την 1-5-2005.....	203
7.2.	Σενάριο Balkans 2012 (BL12).....	206
7.2.1.	Περιγραφή ροών ισχύος σεναρίου BL12 .....	206
7.2.2.	Απλοποίηση ΣΗΕ και χωρισμός περιοχών .....	207
7.2.3.	Ακρίβεια υπολογισμού ιδιοτιμών με εμπορικά λογισμικά πακέτα .....	208
7.2.4.	Σύγκριση απλοποιημένου μοντέλου ROM-E/Sim με το PacDyn και το PSS/E ..	210
7.3.	Ανάλυση ευαισθησίας ευρωπαϊκού διασυνδεδετικού ρυθμού (σενάριο BL12).....	211
7.3.1.	Αλλαγή ροής διασύνδεσης.....	211
7.3.2.	Αλλαγή φορτίου με σταθερή ροή διασύνδεσης .....	213
7.3.3.	Μεταβολές στο δίκτυο μεταφοράς.....	215
7.4.	Σχεδίαση σταθεροποιητή για τον ρυθμό Ελλάδα-Αλβανία (Σενάριο BL12).....	218

7.5.	Αναπαράσταση σεναρίου 1-5-2005 (BL05)	222
7.5.1.	Περιγραφή σεναρίου	222
7.5.2.	Απλοποίηση συστήματος και χωρισμός περιοχών	223
7.5.3.	Σύγκριση υπολογισμού ιδιοτιμών με εμπορικά λογισμικά πακέτα	225
7.5.4.	Σύγκριση ιδιοτιμών απλοποιημένου και λεπτομερούς μοντέλου	227
7.5.5.	Ανάλυση ευαισθησίας διασυνδεδεικτών ρυθμών ως προς τη ροή ισχύος στην διασύνδεση	228
7.6.	Επίδραση των ρυθμιστών στροφών και των στροβίλων στις διασυνδεδεικτές ταλαντώσεις	229
7.6.1.	Μεταβολή ιδιοτιμής ευρωπαϊκού ρυθμού	229
7.6.2.	Προσομοίωση μεταβατικής μεταβολής φορτίου	232
7.6.3.	Μεταβατική μεταβολή φορτίου στον ζυγό του ευρωπαϊκού συστήματος	234
7.6.4.	Προσομοίωση λειτουργίας με νεκρή ζώνη ρυθμιστών στροφών σε μεταβατική διαταραχή φορτίου	235
7.6.5.	Σταθεροποίηση με τροποποίηση της νεκρής ζώνης	238
7.6.6.	Προσομοίωση βραχυκυκλώματος κοντά στην διασύνδεση	239
7.6.7.	Προσομοίωση λειτουργίας Βαλκανικού συστήματος σε αύξηση φορτίου 200MW στην διασύνδεση Βοσνίας-Μαυροβουνίου	241
7.6.8.	Αναπαραγωγή διαταραχής 1-5-05	243
7.7.	Σχεδίαση σταθεροποιητών ισχύος για τον ευρωπαϊκό ρυθμό στο ελληνικό σύστημα	245
7.7.1.	Απόκριση μετά την τοποθέτηση σταθεροποιητή για αύξηση του φορτίου	258
7.8.	Απώλεια σημείου ισορροπίας λόγω νεκρής ζώνης	260
7.9.	Σχεδίαση σταθεροποιητών με βελτιστοποίηση	263
8.	Συμβολή – Συμπεράσματα – Προοπτικές της διατριβής	272
8.1.	Συμβολή	272
8.2.	Συμπεράσματα	273
8.3.	Προοπτικές	277
	Βιβλιογραφία	278
	Δημοσιεύσεις του συγγραφέα	287
	Δημοσιεύσεις σε περιοδικά	287
	Ανακοινώσεις σε συνέδρια	287
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	288
	Παράρτημα Α	288
	Παράρτημα Β	290



# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αναγνωρίζεται ως ένα σημαντικό ζήτημα για την ασφαλή τους λειτουργία ήδη από το 1920. Η εμφάνιση αρκετών συμβάντων ολικής σβέσης των συστημάτων τα τελευταία χρόνια αντανακλά την σημασία του προβλήματος. Ιστορικά, η μεταβατική ευστάθεια αποτελούσε το κυρίαρχο πρόβλημα ευστάθειας στα περισσότερα συστήματα. Ωστόσο, η εξέλιξη των συστημάτων, μέσω της συνεχούς ανάπτυξης των διασυνδέσεων και την χρήση νέων διατάξεων ελέγχου, καθώς και η λειτουργία κάτω από δυσμενείς συνθήκες αναδεικνύουν την ύπαρξη πολλαπλών μηχανισμών αστάθειας.

Η ευστάθεια ΣΗΕ ορίζεται παρόμοια με την ευστάθεια οποιουδήποτε άλλου δυναμικού συστήματος, με το αντίστοιχο μαθηματικό υπόβαθρο και μεθοδολογία. Με φυσικούς όρους στην εργασία [ΚΡΑ04] ως ευστάθεια ΣΗΕ ορίζεται «η ικανότητα ενός ηλεκτρικού συστήματος, για ένα δεδομένο αρχικό σημείο λειτουργίας, να επανέρχεται σε ένα σημείο λειτουργίας (το οποίο είναι και σημείο ισορροπίας) μετά από μια διαταραχή, ώστε το συνολικό σύστημα να παραμένει πρακτικά αμετάβλητο». Ο ορισμός αυτός εφαρμόζεται σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα ως σύνολο. Ωστόσο συχνά ενδιαφέρει η ευστάθεια μιας γεννήτριας ή μιας ομάδας γεννητριών. Μια απομακρυσμένη γεννήτρια μπορεί να απολέσει τον συγχρονισμό χωρίς να προκαλέσει αστάθεια συνολικά για το σύστημα μετά την αποσύνδεσή της. Αντίστοιχα το ίδιο μπορεί να ισχύει και για τις μηχανές.

Τα ΣΗΕ είναι συστήματα εξόχως μη γραμμικά και λειτουργούν σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον (συνεχείς μεταβολές φορτίων, παραμέτρων κ.α.). Όταν τέτοια συστήματα υφίστανται μια διαταραχή, η ευστάθεια του συστήματος εξαρτάται τόσο από το αρχικό σημείο λειτουργίας όσο και από την φύση της διαταραχής. Τα ΣΗΕ υφίστανται κατά την λειτουργία τους, πολλών ειδών διαταραχές. Αυτό μπορεί να αφορά μικρές διαταραχές των οποίων το πιο τυπικό παράδειγμα είναι οι μεταβολές στο φορτίο, οι οποίες συμβαίνουν διαρκώς. Το σύστημα θα πρέπει να μπορεί να προσαρμόζεται σε αυτές τις διαρκείς μεταβολές και να λειτουργεί ικανοποιητικά. Μια δεύτερη κατηγορία διαταραχών είναι οι διαταραχές μεγάλης κλίμακας, στις οποίες περιλαμβάνονται βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς ή υποσταθμούς, απώλειες μονάδων παραγωγής ή φορτίων. Οι διαταραχές μεγάλης κλίμακας συνήθως οδηγούν σε δομικές αλλαγές του συστήματος λόγω της απομόνωσης των στοιχείων στα οποία παρουσιάστηκε το σφάλμα.

Στα μη γραμμικά συστήματα (όπως είναι τα ΣΗΕ) η ευστάθεια δεν ορίζεται ανεξάρτητα από την διαταραχή. Σε ένα σημείο ισορροπίας ένα ΣΗΕ μπορεί να είναι ευσταθές για κάποιες διαταραχές και ασταθές για κάποιες άλλες. Ο σχεδιασμός και τα κριτήρια ασφαλούς λειτουργίας τίθενται με βάση τα συμβάντα που παρουσιάζουν αυξημένη πιθανότητα. Έτσι, ένα ευσταθές σημείο ισορροπίας έχει μια ορισμένη περιοχή έλξης. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η περιοχή, τόσο πιο ικανοποιητικά αποκρίνεται το σύστημα σε μεγάλες διαταραχές. Η περιοχή αυτή δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται ανάλογα και με το σημείο λειτουργίας του συστήματος.

Όπως προαναφέρθηκε, οι μηχανισμοί της αστάθειας ενός ΣΗΕ είναι πολλαπλοί και εξαρτώνται τόσο από το σύστημα, όσο και από την κατάσταση λειτουργίας. Παραδοσιακά το πρόβλημα της ευστάθειας ήταν η διατήρηση της σύγχρονης λειτουργίας. Η παραγωγή ηλεκτρικής

ενέργειας γίνεται κυρίαρχα από σύγχρονες γεννήτριες, συνεπώς απαραίτητη προϋπόθεση για την ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος είναι η διατήρηση του συγχρονισμού μεταξύ τους. Ένας δεύτερος μηχανισμός αστάθειας είναι η κατάρρευση της τάσης, στην οποία δεν εμπλέκεται ο συγχρονισμός των μηχανών.

## 1.2. Ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζουν διαφόρων ειδών ρυθμούς ταλάντωσης λόγω της αλληλεπίδρασης των επιμέρους δυναμικών συστημάτων που τα απαρτίζουν. Οι πιο συνηθισμένες από τις ταλαντώσεις αυτές, αφορούν την ταλάντωση των στρεφόμενων μαζών των δρομέων των σύγχρονων μηχανών μεταξύ τους ή ως προς κάποιο σταθερά στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (άπειρος ζυγός). Μια 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 ένα νέο σημείο ισορροπίας. Σαν αποτέλεσμα, η ταχύτητα περιστροφής τους αποκλίνει ελαφρά από τη σύγχρονη ταχύτητα και προκαλεί την ανταλλαγή μηχανικής (κινητικής) και ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των γεννητριών. Εφόσον μια γεννήτρια παραμείνει σε συγχρονισμό μετά τη διαταραχή, προσεγγίζει ταλαντωτικά ένα νέο σημείο ισορροπίας στο οποίο η μηχανή επανέρχεται στη σύγχρονη ταχύτητα.

Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ο δρομέας της γεννήτριας εκτελεί μια ταλάντωση ως προς το δρομέα κάθε άλλης γεννήτριας του συστήματος και ταυτόχρονα μια ταλάντωση προς το εξωτερικό σύστημα, στη περίπτωση που το σύστημα είναι διασυνδεδεμένο σε κάποιον άπειρο ζυγό. Έτσι, ένα σύστημα  $m$  γεννητριών και ενός άπειρου ζυγού (που συνήθως εκφράζει κάποια εξωτερική διασύνδεση με ένα άλλο σύστημα), εμφανίζει  $m$  τέτοιες ταλαντώσεις, ενώ ένα αυτόνομο σύστημα  $m$  γεννητριών εμφανίζει  $m-1$  ηλεκτρομηχανικές 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.

Η κατανόηση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων έγινε δυνατή με την ανάλυση της μηχανικής και ηλεκτρομαγνητικής ροπής των μηχανών σε μια συνιστώσα ροπής συγχρονισμού, εν φάση με τη μεταβολή της γωνίας  $\delta$  του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας και σε μια συνιστώσα ροπής απόσβεσης, εν φάση με τη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα [KUN94], [ROG00], [BN05].

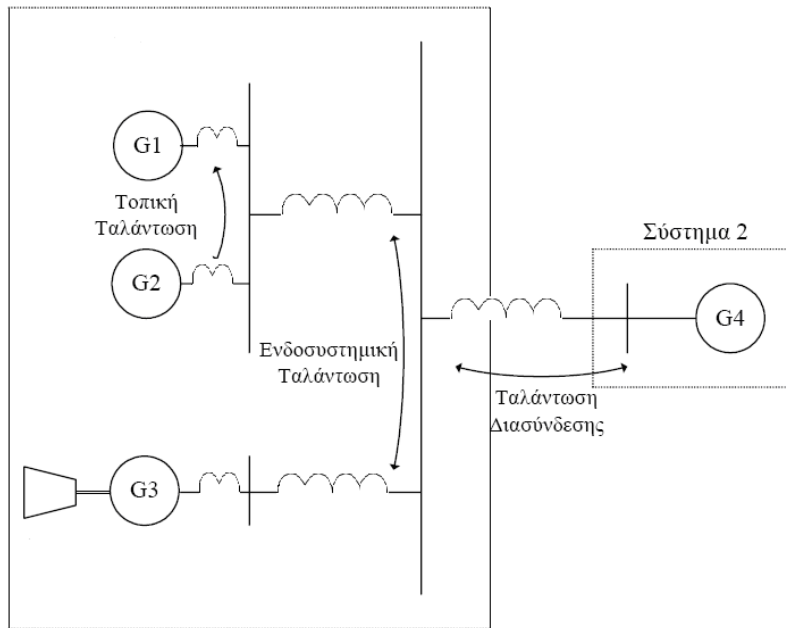
Η ροπή συγχρονισμού είναι η συνιστώσα της ηλεκτρικής ροπής που περιορίζει την απόκλιση των πεδίων των μηχανών και κρατά τις μηχανές σε συγχρονισμό. Έχει συνήθως μεγάλη τιμή, παίζει κυρίαρχο ρόλο στην μεταβατική ευστάθεια γωνίας αμέσως μετά από μια απότομη μεταβολή στο σύστημα και καθορίζει τη συχνότητα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

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 απόσβεση 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. 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.

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 εισάγει θετική ροπή απόσβεσης. Οι διατάξεις αυτές, ονομάζονται σταθεροποιητές ισχύος (Power System Stabilizers), ενεργούν σαν βαθμίδες προπορείας φάσεως οι οποίες αντισταθμίζουν την υστέρηση φάσεως που εισάγουν ο αυτόματος ρυθμιστής τάσεως και το τύλιγμα του πεδίου διεγέρσεως της γεννήτριας.

Οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής (Σχήμα 1.1):

1. Τοπικές ταλαντώσεις (Local modes). Είναι οι πλέον συνήθεις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις και περιγράφουν την ταλάντωση των δρομέων των γεννητριών ενός σταθμού παραγωγής μεταξύ τους ή μεταξύ γεννητριών κοντινών σταθμών. Πρόβλημα ευστάθειας δημιουργείται συνήθως από την δράση αυτόματων ρυθμιστών τάσεως ταχείας απόκρισης όταν αυτοί λειτουργούν με μεγάλη τιμή κέρδους (για να αυξήσουν τη μεταβατική ευστάθεια του συστήματος), ενώ η γεννήτρια τροφοδοτεί ένα σχετικά ασθενές δίκτυο μεταφοράς. Οι ταλαντώσεις αυτές, που εμφανίζονται συνήθως σε ένα φάσμα συχνοτήτων 1 ως 3 Hz, και είναι ιστορικά οι πρώτες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις που εμφανίστηκαν [KUN94].
2. Ενδοσυστημικές 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. Οι ταλαντώσεις αυτές οφείλονται στη δομή του ηλεκτρικού δικτύου, όταν υπάρχει ασθενής διασύνδεση ανάμεσα σε περιοχές του συστήματος όπου υπάρχει μεγάλη ηλεκτροπαραγωγή και εμφανίζονται με συχνότητα 0.6-1 Hz.
3. Ταλαντώσεις διασυνδέσεων ή διασυνδεδετικές ταλαντώσεις (Interarea Oscillations). Πρόκειται για ταλαντώσεις που εμπλέκουν το σύνολο των συγχρόνων μηχανών ενός συστήματος, με τις μηχανές ενός γειτονικού συστήματος (ή γειτονικών συστημάτων), όταν αυτά συνδέονται μέσω ενός ασθενούς δικτύου μεταφοράς. Οι ταλαντώσεις αυτές εμφανίζονται με πολύ χαμηλή συχνότητα, 0.1 ως 0.6 Hz και, όπως προαναφέρθηκε, ο έλεγχος της απόσβεσής τους είναι δύσκολος καθώς απαιτεί σωστή σχεδίαση των διατάξεων απόσβεσης σε ένα μεγάλο αριθμό μηχανών.



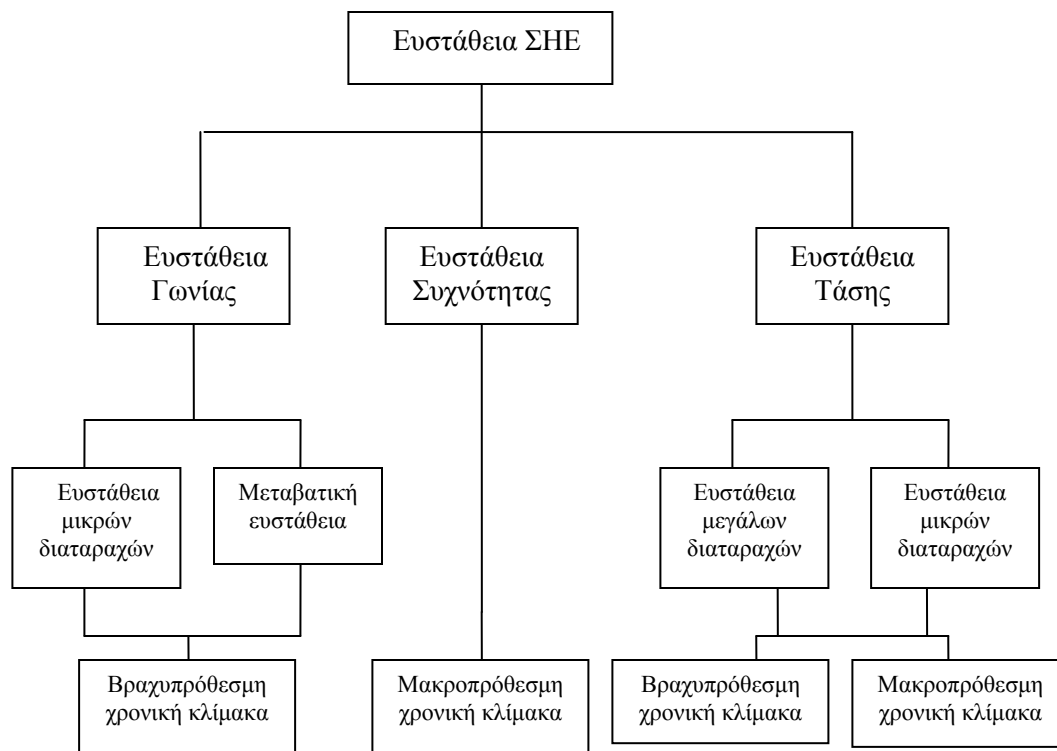
Σχήμα 1.1: Κατηγορίες ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων

### 1.3. Κατηγοριοποίηση ευστάθειας

Η ευστάθεια των ΣΗΕ αποτελεί στην πραγματικότητα ένα ενιαίο πρόβλημα. Ωστόσο η πολλαπλότητα των μηχανισμών αστάθειας δεν επιτρέπει την εύκολη κατανόηση και την μελέτη του προβλήματος αν αντιμετωπιστεί ως ενιαίο. Λόγω της πολυπλοκότητας και της αυξημένης διάστασης του προβλήματος αυτού, βοηθά η θεώρηση κάποιων παραδοχών που το απλοποιούν, έτσι ώστε να αναλύονται συγκεκριμένοι τύποι ευστάθειας με χρήση του ανάλογου επιπέδου λεπτομέρειας στην μοντελοποίηση των διατάξεων του ΣΗΕ. Η κατηγοριοποίηση των τύπων ευστάθειας βασίζεται στα παρακάτω κριτήρια [ΚΡΑ04]:

- Την φύση του ρυθμού αστάθειας που υποδεικνύεται από τις επικρατούσες μεταβλητές του συστήματος στις αποκρίσεις των οποίων παρατηρείται η εμφανιζόμενη αστάθεια.
- Το μέγεθος της εξεταζόμενης διαταραχής, το οποίο επηρεάζει την μεθοδολογία για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη της αστάθειας.
- Τις διατάξεις, τις διαδικασίες και τη χρονική κλίμακα που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν για την εκτίμηση της ευστάθειας.

Η κατηγοριοποίηση αυτή [ΚΡΑ04] παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2



Σχήμα 1.2: Ταξινόμηση ευστάθειας ΣΗΕ

### 1.3.1. Ευστάθεια γωνίας

Η ευστάθεια γωνίας αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου συστήματος να παραμένουν σε συγχρονισμό μετά από κάποια διαταραχή. Η ευστάθεια αυτού του είδους εξαρτάται από την ικανότητα αποκατάστασης ισορροπίας μεταξύ της αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της μηχανικής ροπής.

Το πρόβλημα της ευστάθειας γωνίας προϋποθέτει την μελέτη των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Οι ταλαντώσεις αυτές συνδέονται με τον τρόπο που μεταβάλλεται η έγχυση ηλεκτρικής ισχύος από την γεννήτρια σε σχέση με την γωνία του δρομέα της. Σε συνθήκες ισορροπίας, η ηλεκτρική και μηχανική ροπή της γεννήτριας είναι ίσες, συνεπώς η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή. Στην περίπτωση όμως μιας διαταραχής, προκαλείται ανισορροπία μεταξύ των δύο ροπών με αποτέλεσμα ο δρομέας να επιταχύνεται ή να επιβραδύνεται. Η μεταβολή αυτή στην ταχύτητα, άρα και στην σχετική ταχύτητα μεταξύ των γεννητριών οδηγεί στην μεταβολή της σχετικής γωνίας. Τελικά η μεταβολή αυτή οδηγεί στην μεταβολή της έγχυσης ισχύος, ή με άλλα λόγια στην μεταφορά μέρους του φορτίου από την μία γεννήτρια στην άλλη. Η σχέση γωνίας-ισχύος είναι μη γραμμική. Πέραν ενός ορίου, η αύξηση της σχετικής γωνίας μεταξύ των γεννητριών δεν λειτουργεί όπως προαναφέρθηκε, αλλά οδηγεί σε μείωση της μεταφοράς ισχύος και σε περαιτέρω αύξηση της σχετικής γωνίας.

Η ευστάθεια γωνίας διαχωρίζεται, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2 ανάλογα με το είδος των διαταραχών που μελετώνται:

- **Ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών**, η οποία σχετίζεται με την δυνατότητα του ΣΗΕ να διατηρεί τον συγχρονισμό των γεννητριών μετά από μικρές διαταραχές. Οι διαταραχές αυτές θεωρούνται τόσο μικρές ώστε να είναι δυνατή η μελέτη μέσω της γραμμικοποίησης του συστήματος. Η αστάθεια καταρχήν σχετίζεται με το σημείο

λειτουργίας και μπορεί να εμφανιστεί με δύο μορφές. Η πρώτη είναι η αύξηση της γωνίας μέσω ενός απεριοδικού ρυθμού λόγω έλλειψης ροπής συγχρονισμού, και η δεύτερη είναι η αυξανόμενου πλάτους ταλάντωση των δρομέων των γεννητριών λόγω έλλειψης ροπής απόσβεσης.

Στα σύγχρονα ΣΗΕ η αστάθεια μικρών διαταραχών σχετίζεται με την ανεπαρκή απόσβεση των ταλαντώσεων. Η απεριοδική αστάθεια αντιμετωπίζεται με την χρήση Αυτόματων Ρυθμιστών Τάσης (APT), όμως το πρόβλημα παραμένει όταν γεννήτριες λειτουργούν με σταθερή διέγερση λόγω της επίδρασης των περιοριστών υπερδιεγέρσεως.

- **Ευστάθεια γωνίας για διαταραχές μεγάλης κλίμακας.** Η αστάθεια συνήθως εμφανίζεται ως απεριοδική απομάκρυνση των γωνιών των γεννητριών λόγω ανεπαρκούς ροπής συγχρονισμού, ενώ χαρακτηρίζεται και ως ευστάθεια πρώτης ταλάντωσης. Ωστόσο στα μεγάλα ΣΗΕ η μεταβατική αστάθεια δεν εμφανίζεται πάντα ως ευστάθεια πρώτης ταλάντωσης, αλλά μπορεί να εκδηλωθεί ως αποτέλεσμα της επαλληλίας μιας αργής διασυνδεδετικής ταλάντωσης και μιας τοπικής. Επιπρόσθετα η μεταβατική αστάθεια μπορεί να προκληθεί από την επίδραση μη γραμμικών φαινομένων σε έναν απλό ρυθμό πέραν του χρονικού εύρους της πρώτης ταλάντωσης.

Γενικά, το χρονικό διάστημα για μελέτες ευστάθειας γωνίας είναι συνήθως της τάξης κάποιων δευτερολέπτων. Στην περίπτωση μεγάλων ΣΗΕ, όπου επικρατούν οι διασυνδεδετικές ταλαντώσεις, το εύρος αυτό μπορεί να επεκταθεί σε λίγες δεκάδες δευτερολέπτων.

### 1.3.2. Ευστάθεια τάσης

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος να διατηρεί σταθερές τάσεις σε όλους του ζυγούς, μετά από μια διαταραχή. Ο εν λόγω μηχανισμός σχετίζεται με την ικανότητα διατήρησης σημείου ισορροπίας μεταξύ της ζήτησης του φορτίου και της παροχής από την πλευρά του δικτύου. Η αστάθεια παρουσιάζεται σαν μια σταδιακή κατάρρευση της τάσης σε κάποιους ζυγούς του συστήματος. Ένα από τα πιθανά αποτελέσματα μιας τέτοιας διαδικασίας είναι η αποσύνδεση κάποιων γραμμών μεταφοράς και άλλων στοιχείων, λόγω της λειτουργίας των προστασιών, και η διαδοχική αποσύνδεση και άλλων στοιχείων του δικτύου σε δεύτερο χρόνο.

Όπως και στην περίπτωση της ευστάθειας γωνίας, έτσι και στην ευστάθεια τάσης, υλοποιείται ένας διαχωρισμός ανάλογα με τις διαταραχές οι οποίες μελετώνται.

**Ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών,** η οποία σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί σταθερές τάσεις, όταν υφίσταται μικρές διαταραχές, όπως μικρές μεταβολές στο φορτίο. Το είδος αυτό της ευστάθειας επηρεάζεται από τις χαρακτηριστικές των φορτίων και τις διατάξεις ελέγχου.

**Ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών,** η οποία αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί σταθερές τις τιμές των τάσεων, έπειτα από διαταραχές όπως απώλεια γραμμών και μονάδων παραγωγής. Για τον καθορισμό της ευστάθειας τάσης μεγάλων διαταραχών είναι απαραίτητη η εξέταση της μη γραμμικής απόκρισης του ΣΗΕ σε μια χρονική περίοδο, αρκετή για να συμπεριλάβει την απόδοση και την αλληλεπίδραση διατάξεων όπως μηχανές, συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ), περιοριστές διέγερσης σύγχρονων γεννητριών.

### 1.3.3. Ευστάθεια συχνότητας

Η ευστάθεια συχνότητας σχετίζεται με την ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί σταθερή συχνότητα μετά από μια μεγάλη διαταραχή, η οποία προκαλεί σημαντική ανισορροπία μεταξύ

παραγωγής και φορτίου. Εξαρτάται δηλαδή από την ικανότητά του να διατηρεί ή να επαναφέρει σε σημείο ισορροπίας την παραγωγή και το φορτίο, χωρίς σημαντικές αποκοπές φορτίου.

Μεγάλες μεταβολές φορτίου ή παραγωγής οδηγούν σε μεγάλες διαταραχές της συχνότητας, των ροών ισχύος και των τάσεων και άλλων παραμέτρων οι οποίες μπορεί να ενεργοποιούν την λειτουργία διατάξεων ελέγχου και προστασιών. Οι διαδικασίες αυτές μπορεί να είναι αργές, όπως για παράδειγμα η δυναμική απόκριση των ατμοπαραγωγών, είτε γρήγορες όπως η ενεργοποίηση προστασιών. Σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα, τέτοιες καταστάσεις συνήθως σχετίζονται με τις συνθήκες που ακολουθούν τον διαχωρισμό των συστημάτων σε νησιδοποιημένα υποσυστήματα. Η ευστάθεια στην περίπτωση αυτή εξαρτάται από το εάν και κατά πόσον, κάθε νησιδοποιημένο σύστημα θα φτάσει στο σημείο ισορροπίας με τις ελάχιστες δυνατές αποκοπές φορτίου. Γενικότερα, τα προβλήματα ευστάθειας συχνότητας σχετίζονται με κακή συνεργασία διατάξεων ελέγχου και προστασίας, και με ανεπαρκή στρεφόμενη εφεδρεία.

Οι μεταβολές της παραγωγής ισχύος (πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας) ενεργοποιείται σε διάστημα δευτερολέπτων και η δευτερεύουσα ρύθμιση διαρκεί για κάποια λεπτά. Γενικότερα η ευστάθεια συχνότητας προσδιορίζεται περισσότερο από την συνολική απόκριση της μέσης συχνότητας, παρά από την σχετική κίνηση των στρεφόμενων μηχανών, συνεπώς η ευστάθεια συχνότητας αναφέρεται στην χρονική κλίμακα μετά την επίτευξη ισορροπίας των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων και των άλλων βραχυπρόθεσμων φαινομένων.

## 1.4. Συστήματα πολλαπλών χρονικών κλιμάκων και οιονεί στατική προσέγγιση

Στην γενική περίπτωση ένα δυναμικό σύστημα περιγράφεται από ένα σύνολο αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να ομαδοποιηθούν στις εξισώσεις (1.1)

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, y) \\ 0 &= g(x, y)\end{aligned}\tag{1.1}$$

όπου  $f$   $n$  το πλήθος συναρτήσεων, και  $g$   $m$  το πλήθος συναρτήσεων. Αντίστοιχα τα διανύσματα των μεταβλητών  $x, y$  έχουν διαστάσεις  $n \times 1$  και  $m \times 1$ . Οι συναρτήσεις  $f, g$  θεωρούνται συνεχείς και διαφορίσιμες.

Οι συναρτήσεις  $f$  αναφέρονται στις διαφορικές εξισώσεις του συστήματος, ενώ οι εξισώσεις  $g$  στις αλγεβρικές. Αντίστοιχα οι μεταβλητές  $x$  αποτελούν τις μεταβλητές κατάστασης, ενώ οι μεταβλητές  $y$  αλγεβρικές μεταβλητές. Μια πλήρης μοντελοποίηση του μελετούμενου συστήματος θα περιελάμβανε την επίλυση του προβλήματος (1.1). Ωστόσο οι μεταβλητές που περιγράφονται από το διάνυσμα μεταβλητών  $x$ , στην γενική περίπτωση δεν εξελίσσονται όλες στην ίδια χρονική κλίμακα. Με άλλα λόγια οι χρονικές σταθερές που αντιστοιχούν στις διαφορικές εξισώσεις διαφέρουν κατά τάξη μεγέθους.

Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι τα υπομεταβατικά φαινόμενα εξελίσσονται σε κλάσματα του δευτερολέπτου (βραχυκυκλώματα, ταχεία μεταβατικά), τα μεταβατικά φαινόμενα σε δευτερόλεπτα (ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις), ενώ υπάρχουν και φαινόμενα μακράς χρονικής κλίμακας που μπορεί να διαρκούν κάποια λεπτά (λειτουργία Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο-ΣΑΤΥΦ) [VCV98].

Αναλόγως με τη μελέτη που υλοποιείται, οι παραπάνω εξισώσεις (1.1) μπορεί να τροποποιηθούν. Για παράδειγμα, όταν μελετώνται βραχυκυκλώματα σε ένα σύστημα, η μηχανική ροπή των στροβίλων θεωρείται σταθερή, ενώ στην πραγματικότητα αποτελεί μεταβλητή κατάσταση. Θεωρείται δηλαδή ότι στο χρονικό διάστημα που μελετάται (τάξης ms) οι

ρυθμιστές στροφών δεν προλαβαίνουν να αντιδράσουν. Με άλλα λόγια όταν μελετώνται τα ταχέως εξελισσόμενα φαινόμενα ενός συστήματος θεωρείται ότι οι αργές μεταβλητές κατάστασης διατηρούν μια σταθερή τιμή. Αντίστροφα, όταν μελετώνται οι αργές δυναμικές (στο βαθμό που οι γρήγορες διαφορικές εξισώσεις εμφανίζουν ικανοποιητική απόκριση) μπορεί να θεωρηθεί ότι τα ταχέα μεταβατικά φαινόμενα έχουν τον χρόνο να φτάσουν σε σημείο ισορροπίας. Αυτή είναι η βασική ιδέα του διαχωρισμού των μεταβλητών σε χρονικές κλίμακες. Η ιδέα του διαχωρισμού των χρονικών κλιμάκων και της οιονεί στατικής προσέγγισης για την διαμόρφωση μοντέλων μειωμένης τάξης βασίζεται στην ανάλυση ιδιαζουσών διαταραχών [KOS76], [KKO86].

Έτσι, οι εξισώσεις και οι μεταβλητές στην (1.1) τροποποιούνται στην περίπτωση που θεωρούνται δύο χρονικές κλίμακες. Στην οιονεί στατική προσέγγιση θεωρείται ότι σε οι μεταβλητές κατάστασης που έχουν οριστεί ως γρήγορες βρίσκονται σε ισορροπία. Η σχέση (1.1) ξαναγράφεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= f_1(x_s, x_f, y) \\ \varepsilon \dot{x}_f &= f_2(x_s, x_f, y) \\ 0 &= g(x_s, x_f, y) \end{aligned} \quad (1.2)$$

όπου  $x_s$  το διάνυσμα των αργών (διάστασης  $1 \times n_1$ ) και  $x_f$  των γρήγορων μεταβλητών κατάστασης (διάστασης  $1 \times n_2$ ) και οι  $f_1, f_2$  (διάστασης  $n_1, n_2$  αντίστοιχα) οι αντίστοιχες συναρτήσεις για τις παραγώγους των μεταβλητών αυτών, και  $\varepsilon$  μικρή χρονική σταθερά.

Η διαφορά που εισάγει το  $\varepsilon$ , είναι ουσιαστικά η διαφορά τάξης μεγέθους μεταξύ των παραγώγων των μεταβλητών  $x_s$  και  $x_f$ . Υποδηλώνει δηλαδή ότι η παράγωγος του  $x_f$  είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από το  $x_s$ , συνεπώς οι μεταβολές των μεταβλητών που εμφανίζονται στις μεταβλητές  $x_f$ , εξελίσσονται πιο γρήγορα από ότι αυτές των μεταβλητών  $x_s$ . Στην βάση αυτή γίνεται η διάκριση των χρονικών κλιμάκων. Θεωρείται δηλαδή ότι η διαφορά στις χρονικές κλίμακες οδηγεί στην διαίρεση του συστήματος σε ένα αργό και ένα γρήγορο υποσύστημα.

Ο διαχωρισμός χρονικών κλιμάκων διαμορφώνει δυο υποσυστήματα μειωμένης τάξης. Το ένα μοντελοποιεί τα φαινόμενα τα οποία εξελίσσονται στην αργή χρονική κλίμακα, που θα ονομάζεται στην συνέχεια μακροπρόθεσμη, ενώ το δεύτερο τα φαινόμενα τα οποία εξελίσσονται στην γρήγορη χρονική κλίμακα, που θα ονομάζεται βραχυπρόθεσμη. Η παράμετρος  $\varepsilon$  της (1.2) θεωρείται ότι έχει μια αρκετά μικρή τιμή, έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι τείνει στο μηδέν. Η παραδοχή  $\varepsilon=0$  τροποποιεί το σύστημα εξισώσεων (1.2) ως εξής:

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= f_1(x_s, x_f, y) \\ 0 &= f_2(x_s, x_f, y) \\ 0 &= g(x_s, x_f, y) \end{aligned} \quad (1.3)$$

Για το σύστημα (1.3), μέσω του θεωρήματος της πεπλεγμένης συνάρτησης [ΑΡΟ81], εξασφαλίζεται ότι υπάρχει στη γενική περίπτωση συνεχής και διαφορίσιμη συνάρτηση  $f_{1s}$ , τέτοια ώστε η απόκριση του συστήματος (1.3) να δίνεται από τις παρακάτω συνήθειες διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{x}_s = f_{1s}(x_s) \quad (1.4)$$

Η οιονεί στατική προσέγγιση αποτελεί μια μέθοδο η οποία συχνά εφαρμόζεται στις μελέτες ευστάθειας τάσης. Ως αργή δυναμική θεωρείται π.χ. η λειτουργία των συστημάτων αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ). Αντίθετα, τα δυναμικά φαινόμενα των γεννητριών, οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις, και οι μεταβολές της συχνότητας θεωρούνται βραχυπρόθεσμες



μεταβλητές κατάστασης, και οι αντίστοιχες μεταβλητές κατάστασης μετατρέπονται σε αλγεβρικές μεταβλητές.

## 1.5. Διασυνδεδετικές ταλαντώσεις- Χωρισμός περιοχών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω (ενότητα 1.2) διασυνδεδετικές ονομάζονται οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις στις οποίες ασθενώς διασυνδεδεμένες περιοχές ανταλλάσσουν ισχύ μεταξύ τους. Οι ταλαντώσεις αυτές εμφανίζουν χαμηλή συχνότητα και μπορεί να εμφανίζουν ενίοτε και χαμηλή απόσβεση. Σημαντικό ρόλο στις ταλαντώσεις αυτές παίζουν τόσο τα συστήματα διέγερσης των σύγχρονων γεννητριών όσο και η δυναμική των κινητήριων μηχανών (στροβίλων). Οι περιοχές που εμφανίζουν διασυνδεδετικές ταλαντώσεις ορίζονται ως συνεκτικές περιοχές και αποτελούνται από γεννήτριες που ταλαντώνονται λίγο πολύ εν φάσει στα πλαίσια των διασυνδεδετικών ρυθμών. Η μελέτη των ταλαντώσεων αυτών προϋποθέτει την κατάλληλη μοντελοποίηση των ΣΗΕ.

Ωστόσο, η μοντελοποίηση μεγάλων ΣΗΕ με πολλά διασυνδεδεμένα συστήματα, εμπεριέχει μεγάλο πλήθος αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων, καθώς και την ανάγκη για ελάττωση και συγχώνευση τμημάτων του, διαδικασία η οποία αναγνωρίζεται ως σημαντική ήδη από αρκετά νωρίς [GMK89]. Οι σύγχρονοι υπολογιστές διευκολύνουν την επίλυση μεγάλων συστημάτων, ωστόσο το ζήτημα της κατασκευής απλοποιημένων μοντέλων για την μελέτη διασυνδεδετικών ταλαντώσεων παραμένει.

Για την μελέτη των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων (ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων χαμηλής συχνότητας) χρησιμοποιείται στην βιβλιογραφία η έννοια της συνεκτικότητας η οποία αναφέρεται στις δυναμικές που εξελίσσονται στην αργή χρονική κλίμακα (*slow coherency*). Στην βάση της ανάλυσης ιδιαιζουσών διαταραχών και τον χωρισμό χρονικών κλιμάκων αναπτύχθηκε και η τεχνική χωρισμού των ΣΗΕ σε συνεκτικές ομάδες γεννητριών (*coherent groups*). Ο χωρισμός αυτός αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη ισοδυνάμων συστημάτων για μελέτες μεταβατικής ευστάθειας. Με τον χωρισμό αυτόν διατηρούνται οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας και η μελέτη επικεντρώνεται στις διασυνδεδετικές ταλαντώσεις. Η διαίρεση αυτή του συστήματος βασίζεται σε δύο παραδοχές, ως προς τις ομάδες των γεννητριών. Θεωρείται ότι οι συνεκτικές ομάδες:

- Είναι ανεξάρτητες του μεγέθους της διαταραχής
- Είναι ανεξάρτητες από το επίπεδο λεπτομέρειας που χρησιμοποιείται για την μελέτη της μονάδας παραγωγής.

Η θεώρηση των ομάδων συνεκτικών γεννητριών είναι μια εφαρμογή διάκρισης χρονικών κλιμάκων που περιγράφηκε παραπάνω. Η ιδέα των συνεκτικών περιοχών βασίζεται στην παρατήρηση ότι στα μεταβατικά φαινόμενα που εμφανίζονται μετά από ένα σφάλμα, οι γεννήτριες αποκρίνονται αρχικά με γρήγορες ταλαντώσεις, ενώ στη συνέχεια ταλαντώνονται σε κάθε επιμέρους περιοχή εν φάσει μεταξύ τους δίνοντας τους αργούς διασυνδεδετικούς ρυθμούς. Αν θεωρήσουμε τους  $r$  πιο αργούς ρυθμούς ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων του συστήματος, δύο μηχανές ανήκουν στην ίδια συνεκτική περιοχή αν η διαφορά της απόκρισης των εσωτερικών γωνιών τους σε μια διαταραχή δεν περιλαμβάνει κανέναν από τους  $r$  ρυθμούς. Η διαμόρφωση ομάδων γεννητριών βασίζεται στο γραμμικοποιημένο σύστημα και γίνεται στην βιβλιογραφία κυρίως με δύο προσεγγίσεις:

- Η πρώτη πραγματοποιείται μέσω της ανάλυσης των αποτελεσμάτων μιας διαταραχής. Βάση του θεωρήματος που αναφέρεται στα [AKW80], [CAP81], αν η διαφορά μεταξύ της απόκρισης των εσωτερικών γωνιών δύο γεννητριών δεν περιλαμβάνει κανέναν από τους αργούς ρυθμούς, τότε οι δύο γεννήτριες ανήκουν στην ίδια περιοχή.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν το παραπάνω θεώρημα, ο χωρισμός των περιοχών προκύπτει από την επεξεργασία των παρατηρούμενων καμπυλών μετά από την εφαρμογή μιας διαταραχής στο σύστημα.

- Η δεύτερη μέθοδος, η οποία αναφέρεται σε περισσότερες εργασίες βασίζεται στην ανάλυση των ιδιοδιανυσμάτων και των ιδιοτιμών, βασίζεται δηλαδή στις τεχνικές ανάλυσης μικρών διαταραχών [KAC82].

Ο χωρισμός του συστήματος σε συνεκτικές περιοχές ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας διατριβής. Στην εργασία αυτή θεωρείται δεδομένος και για τον λόγο αυτό στην συγκεκριμένη ενότητα περιγράφεται επιγραμματικά η μεθοδολογία χωρισμού σε περιοχές. Για την μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον χωρισμό των περιοχών αναφέρονται οι εργασίες [WCBA81], [AKWC80], ενώ περισσότερες εργασίες αναφέρονται στην επισκόπηση της βιβλιογραφίας.

Θεωρητικά, -όπως περιγράφεται στην εργασία [WCBA81]- στόχος της διαδικασίας είναι η διαίρεση του συστήματος σε υποσυστήματα αποξευγμένα μεταξύ τους. Ωστόσο σε πραγματικά συστήματα μια τέτοια συνθήκη μπορεί να ικανοποιείται μόνο προσεγγιστικά. Δύο μηχανές θεωρούνται συνεκτικές ή σχεδόν συνεκτικές όταν η συμβολή της διαφοράς των γωνιών στους αργούς ρυθμούς είναι μικρή με μια προκαθορισμένη έννοια. Στην περίπτωση αυτή, μια κατά προσέγγιση συνεκτική περιοχή, είναι η περιοχή που αποτελείται από κατά προσέγγιση συνεκτικές γεννήτριες. Με βάση την προσέγγιση που αναφέρθηκε προηγουμένως για τον χωρισμό των περιοχών απαιτείται κατά αρχήν η επιλογή των μηχανών αναφοράς. Για σχεδόν συνεκτικές περιοχές, τα ιδιοδιανύσματα τα οποία αντιστοιχούν στο αργό υποσύστημα για τις διάφορες μηχανές δεν είναι πανομοιότυπα. Ωστόσο είναι παραπλήσια με την έννοια ότι έχουν περίπου το ίδιο μέτρο και εντάσσονται σε ένα στενό κώνο. Στο αργό υποσύστημα υπάρχουν  $r$  τέτοιου κώνου που δεν επικαλύπτονται μεταξύ τους, ένας για κάθε περιοχή.

Για την αναγνώριση των περιοχών επιλέγονται τα  $r$  πιο γραμμικώς ανεξάρτητα τέτοια ιδιοδιανύσματα, ένα για κάθε κώνο και χρησιμοποιούνται ως διανύσματα αναφοράς. Με βάση αυτόν τον χωρισμό εντάσσονται οι υπόλοιπες γεννήτριες στις συνεκτικές περιοχές με κριτήριο τα αντίστοιχα στοιχεία των ιδιοδιανυσμάτων που αντιστοιχούν στους  $r$  αργούς ρυθμούς.

## 1.6. Μαθηματικό υπόβαθρο

### 1.6.1. Παράσταση συστήματος στο χώρο κατάστασης

Η απόκριση ενός δυναμικού συστήματος μπορεί να περιγραφεί με ένα σύνολο  $n$  διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης της παρακάτω μορφής:

$$\dot{x} = f(x, d, t) \quad (1.5)$$

όπου  $x$ ,  $d$  διανύσματα με διαστάσεις  $n \times 1$ ,  $r \times 1$  αντίστοιχα, και  $f$ ,  $n$  τον αριθμό συνεχείς και παραγωγίσιμες συναρτήσεις  $f_1, \dots, f_n$ .

Το διάνυσμα  $x$  αναφέρεται ως το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης, ενώ το  $d$  είναι το διάνυσμα των μεταβλητών εισόδου του συστήματος. Στην περίπτωση όπου οι παράγωγοι των μεταβλητών κατάστασης (οι συναρτήσεις  $f$ ) δεν εξαρτώνται από τον χρόνο, το σύστημα ονομάζεται αυτόνομο, και οι εξισώσεις μετασχηματίζονται ως εξής:

$$\dot{x} = f(x, d) \quad (1.6)$$

Η κατάσταση ενός συστήματος εκφράζει το ελάχιστο απαραίτητο σύνολο πληροφορίας για ένα σύστημα σε μια χρονική στιγμή  $t_0$  προκειμένου να οριστεί η μελλοντική συμπεριφορά του χωρίς αναφορά στις μεταβλητές εισόδου πριν αυτή την χρονική στιγμή [KUN94].

Οποιοδήποτε σύνολο  $n$  γραμμικώς ανεξάρτητων μεταβλητών του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της κατάστασής του. Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται ως μεταβλητές κατάστασης, και διαμορφώνουν ένα ελάχιστο σύνολο από δυναμικές μεταβλητές, οι οποίες μαζί με τις εισόδους του συστήματος παρέχουν μια πλήρη περιγραφή της συμπεριφοράς του. Η επιλογή των μεταβλητών κατάστασης δεν είναι μοναδική, ωστόσο ο αριθμός τους σε κάθε σύστημα είναι δεδομένος. Αν οριστούν περισσότερες μεταβλητές ως μεταβλητές κατάστασης παραβιάζεται το κριτήριο της γραμμικής ανεξαρτησίας. Μολονότι όμως, η περιγραφή του συστήματος μπορεί να γίνει με διαφορετική επιλογή μεταβλητών κατάστασης, αυτό δεν αναιρεί ότι η κατάσταση του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή είναι μοναδική. Αυτό που μπορεί να τροποποιείται είναι η περιγραφή της.

Στην περίπτωση όπου ένα σύστημα δεν βρίσκεται σε σημείο ισορροπίας, η κατάστασή του, θα μεταβάλλεται με το χρόνο. Το σύνολο των σημείων από τα οποία διέρχεται το σύστημα στον χώρο κατάστασης ονομάζεται τροχιά κατάστασης (*state trajectory*).

Ως σημεία ισορροπίας ορίζονται τα σημεία στα οποία οι παράγωγοι των μεταβλητών κατάστασης μηδενίζονται ταυτόχρονα:

$$\dot{x} = f(x_0) = 0 \quad (1.7)$$

### 1.6.2. Γραμμικοποίηση

Ο συστηματικός τρόπος για την ανάλυση της ευστάθειας μονίμου καταστάσεως στηρίζεται στην γραμμικοποίηση του συστήματος. Η γραμμικοποίηση, είναι μια τεχνική, με βάση την οποία τροποποιείται ένα μη γραμμικό σύστημα σε γραμμικό, για μια περιοχή κοντά σε ένα σημείο ισορροπίας  $x_0$  (λειτουργίας), προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της ευστάθειάς του τα εργαλεία των γραμμικών συστημάτων (ιδιοτιμές, ιδιοδιανύσματα κλπ). Απαραίτητη προϋπόθεση είναι οι συναρτήσεις  $f$  να είναι παραγωγίσιμες στο σημείο  $x_0$ .

Η γραμμικοποίηση στηρίζεται στο ανάπτυγμα Taylor μιας συνάρτησης γύρω από ένα σημείο. Η συνάρτηση  $f$  μετασχηματίζεται:

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) + \frac{1}{2}(x - x_0)^2 f''(x_0) + \dots \quad (1.8)$$

Η ευστάθεια μονίμου καταστάσεως δεν εξαρτάται από το μέγεθος της διαταραχής, οπότε θεωρείται μια διαταραχή ώστε οι όροι που εκφράζουν τα γινόμενα των αποκλίσεων να μπορούν να αγνοηθούν. Η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\Delta f \approx f'(x_0)\Delta x \quad (1.9)$$

Στην γενίκευσή της, η διαδικασία αυτή, για το σύστημα που περιγράφηκε στην (1.6) οδηγεί στο παρακάτω σύστημα, που γράφεται υπό την μορφή πινάκων.

$$\Delta \dot{x} = \mathbf{A}\Delta x + \mathbf{B}\Delta d \quad (1.10)$$

Όπου:

$$a_{ij} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right|_{x=x_0} \quad b_{ij} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial d_j} \right|_{x=x_0} \quad (1.11)$$

Ο πίνακας  $\mathbf{A}$  ορίζεται ως ο πίνακας κατάστασης του γραμμικοποιημένου συστήματος. Το πρόβλημα της ευστάθειας μονίμου καταστάσεως του μη γραμμικού συστήματος (1.6) ανάγεται

στο πρόβλημα ευστάθειας του γραμμικού συστήματος. Η ευστάθεια του τελευταίου δεν εξαρτάται από την διαταραχή και ορίζεται πλήρως από τις ιδιοτιμές του πίνακα καταστάσεως  $\mathbf{A}$ .

Σε πολλές περιπτώσεις μας ενδιαφέρει η παρατήρηση μεταβλητών εξόδου  $z$  που δίνονται από την σχέση:

$$z = h(x, d) \quad (1.12)$$

Η γραμμικοποίηση της (1.12), αντίστοιχα με τα παραπάνω δίνει:

$$\Delta z = \mathbf{C}\Delta x + \mathbf{D}\Delta d \quad (1.13)$$

όπου:

$$C_{ij} = \left. \frac{\partial h_i}{\partial x_j} \right|_{x=x_0} \quad D_{ij} = \left. \frac{\partial h_i}{\partial d_j} \right|_{x=x_0} \quad (1.14)$$

### 1.6.3. Πίνακας κατάστασης συστήματος αλγεβρικών-διαφορικών εξισώσεων

Στην γενική περίπτωση, ένα σύστημα, περιλαμβάνει διαφορικές εξισώσεις και αλγεβρικούς περιορισμούς. Θεωρούμε το σύστημα (1.1), όπως περιγράφηκε στην ενότητα 1.4.

Η γραμμικοποίηση γύρω από ένα σημείο ισορροπίας δίνει:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_x f & D_y f \\ D_x g & D_y g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

όπου  $\mathbf{J}$  είναι ο μη ελαττωμένος Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος των διαφορικών - αλγεβρικών εξισώσεων και  $\mathbf{f}_x, \mathbf{f}_y, \mathbf{g}_x, \mathbf{g}_y$  οι Ιακωβιανοί πίνακες των συναρτήσεων  $f$  και  $g$  ως προς τις μεταβλητές κατάστασης και τις αλγεβρικές μεταβλητές.

Όταν η ορίζουσα του πίνακα  $\mathbf{g}_y$  είναι διάφορη του μηδενός ( $\det(\mathbf{g}_y) \neq 0$ ), το διάνυσμα  $\Delta y$  μπορεί να απαλειφθεί από την (1.15) και το σύστημα γράφεται στη μορφή:

$$\Delta \dot{x} = \mathbf{A}\Delta x \quad (1.16)$$

όπου  $\mathbf{A}$  είναι ο ελαττωμένος Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης του γραμμικοποιημένου συστήματος:

$$\mathbf{A} = \mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x \quad (1.17)$$

Η ευστάθεια των σημείων ισορροπίας ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς προσδιορίζεται από τις ιδιοτιμές του πίνακα  $\mathbf{A}$ , όταν το πραγματικό τους μέρος είναι διάφορο του μηδενός.

### 1.6.4. Ιδιοτιμές -Ιδιοδιανύσματα

Οι ιδιοτιμές  $\lambda$  ενός πίνακα καταστάσεως  $\mathbf{A}$  διάστασης  $n \times n$ , προκύπτουν ως οι μη τετριμμένες λύσεις της εξίσωσης:

$$\mathbf{A}u = \lambda u \quad (1.18)$$

όπου  $u$  διάνυσμα διάστασης  $1 \times n$ .

Για την εύρεση των ιδιοτιμών η εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I})\mathbf{u} = 0 \quad (1.19)$$

Για κάθε μη τετριμμένη λύση ισχύει:

$$\det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) = 0 \quad (1.20)$$

Οι λύσεις αυτής της εξίσωσης ονομάζονται ιδιοτιμές 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:

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (1.21)$$

Οι ιδιοτιμές που προκύπτουν είναι  $n$  το πλήθος, όσο και η διάσταση του πίνακα καταστάσεως. Στην περίπτωση όπου ο πίνακας κατάστασης αποτελείται από πραγματικούς αριθμούς οι ιδιοτιμές που προκύπτουν είναι είτε πραγματικές είτε μιγαδικές σε συζυγή ζεύγη.

Το γραμμικό σύστημα είναι ευσταθές αν και μόνο αν όλες οι ιδιοτιμές του πίνακα  $\mathbf{A}$  έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος. Σε κάθε ιδιοτιμή  $\lambda_i$  του συστήματος που προέκυψε ως λύση της εξίσωσης (1.20) αντιστοιχίζεται ένα μη μηδενικό διάνυσμα  $\mathbf{u}_i$  διαστάσεων  $n \times 1$  τέτοιο ώστε:

$$\mathbf{A}\mathbf{u}_i = \lambda_i \mathbf{u}_i \quad (1.22)$$

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

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

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{A} = \lambda_i \mathbf{v}_i^T \quad (1.23)$$

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  $\mathbf{A}$ .

$$\mathbf{A}^T \mathbf{v}_i = \lambda_i \mathbf{v}_i \quad (1.24)$$

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

$$\mathbf{v}_j^T \mathbf{u}_i = 0, \quad i \neq j \quad (1.25)$$

Τα ιδιοδιανύσματα (δεξιό και αριστερό) που αντιστοιχούν στην ίδια ιδιοτιμή  $\lambda_i$  έχουν εσωτερικό γινόμενο διάφορο του μηδενός. Δεδομένου ότι τα στοιχεία των ιδιοδιανυσμάτων μπορούν να πολλαπλασιαστούν με οποιαδήποτε αριθμό, χωρίς να μεταβληθεί η κατεύθυνση που αυτά εκφράζουν, είναι δυνατή η κανονικοποίησή τους έτσι ώστε να ισχύει:

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{u}_i = 1 \quad (1.26)$$

Τα δεξιά ιδιοδιανύσματα εκφράζουν τον βαθμό εμφάνισης του ρυθμού στον οποίο αντιστοιχούν σε κάθε μεταβλητή κατάστασης. Το στοιχείο  $i$  του δεξιού ιδιοδιανύσματος εκφράζει τον βαθμό εμφάνισης του αντίστοιχου ρυθμού στην μεταβλητή κατάσταση  $x_i$ .

Τα αριστερά ιδιοδιανύσματα, αντίστροφα, εκφράζουν την συμβολή της μεταβλητής κατάστασης σε κάθε ρυθμό. Το στοιχείο  $i$  δηλαδή, εκφράζει την επιρροή της μεταβλητής κατάστασης  $x_i$  στον ρυθμό που αντιστοιχεί το ιδιοδιάνυσμα [KB04].

### 1.6.5. Ευαισθησία Ιδιοτιμών – Συντελεστές συμμετοχής

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 παράγραφο ορίστηκε το δεξιό ιδιοδιάνυσμα  $u_i$  μιας ιδιοτιμής ως το  $n \times 1$  διάνυσμα που ικανοποιεί τη σχέση (1.22). Παραγωγίζοντας ως προς κάποιο στοιχείο  $a_{rs}$  του πίνακα κατάστασης προκύπτει ότι :

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{rs}} u_i + \mathbf{A} \frac{\partial u_i}{\partial a_{rs}} = \lambda_i \frac{\partial u_i}{\partial a_{rs}} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rs}} u_i \quad (1.27)$$

Πολλαπλασιάζοντας από τα αριστερά και τα δύο μέρη της εξίσωσης με το αριστερό ιδιοδιάνυσμα  $v_i^T$  η (1.27) γίνεται :

$$v_i^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{rs}} u_i + v_i^T (\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I}) \frac{\partial u_i}{\partial a_{rs}} = v_i^T \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rs}} u_i \quad (1.28)$$

Από τον ορισμό του αριστερού ιδιοδιανύσματος προκύπτει ότι ο δεύτερος όρος του αριστερού μέρους της παραπάνω εξίσωσης είναι ίσος με το μηδέν. Συνεπώς η (1.28) με χρήση της (1.23), γίνεται :

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rs}} = \frac{v_i^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{rs}} u_i}{v_i^T u_i} = v_i^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{rs}} u_i = v_i(r) u_i(s) \quad (1.29)$$

Στην παραπάνω σχέση αν θεωρηθεί ότι η παράμετρος  $a_{rs}$  ως προς την οποία έγινε η παραγωγή είναι το  $r$  στοιχείο της διαγωνίου του πίνακα  $\mathbf{A}$ , προκύπτει ότι :

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rr}} = v_i(r) u_i(r) = p_i(r) \quad (1.30)$$

Το γινόμενο αυτό που εκφράζεται από τη σχέση (1.30), 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  $i$ .

Ο συντελεστής συμμετοχής μιας μεταβλητής κατάστασης  $x_r$  σε ένα ρυθμό  $i$  αποτελεί δείκτη ευαισθησίας της ιδιοτιμής  $\lambda_i$  ως προς την μεταβολή του διαγώνιου στοιχείου του πίνακα κατάστασης που αντιστοιχεί σε αυτή τη μεταβλητή. Ο συντελεστής συμμετοχής είναι γενικά ένας μιγαδικός αριθμός το μέτρο του οποίου καθορίζει πόσο συνδέεται κάθε μεταβλητή κατάσταση με ένα συγκεκριμένο ρυθμό. Μικρή τιμή του μέτρου, αντιστοιχεί με μικρή επίδραση της συγκεκριμένης μεταβλητής κατάστασης στο ρυθμό, δηλαδή η μεταβολή του αντίστοιχου στοιχείου της διαγωνίου στον πίνακα κατάστασης αφήνει την ιδιοτιμή σχετικά ανεπηρέαστη.

Το πρόσημο του πραγματικού μέρους του συντελεστή συμμετοχής, δείχνει την κατεύθυνση μετατόπισης της αντίστοιχης ιδιοτιμής σε μια αλγεβρική μεταβολή του διαγώνιου στοιχείου του πίνακα κατάστασης, που αντιστοιχεί σε αυτή τη μεταβλητή κατάσταση. Μεγάλη αρνητική τιμή του πραγματικού μέρους του συντελεστή συμμετοχής, συνεπάγεται την μετατόπιση της ιδιοτιμής προς τα αριστερά και κατά συνέπεια την αύξηση της ευστάθειας για μια αλγεβρική αύξηση του  $a_{rr}$ . Τα αντίθετα ισχύουν στην περίπτωση θετικής τιμής του πραγματικού μέρους του συντελεστή

συμμετοχής. 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. Τα αντίστοιχα ισχύουν και για την υπολογιζόμενη ευαισθησία της εξίσωσης (1.29).

Στην περίπτωση όπου υπολογίζεται η ευαισθησία μιας ιδιοτιμής ως προς μια παράμετρο  $K$ , η διαδικασία δεν τροποποιείται και καταλήγει στην εξίσωση (1.31):

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{rs}} = v_i^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial K} u_i \quad (1.31)$$

### 1.6.6. Ολοκληρωτικά υπόλοιπα

Με την προϋπόθεση ότι οι ιδιοτιμές του γραμμικού συστήματος είναι διακριτές, μπορούμε να αναλύσουμε τον πίνακα με τις συναρτήσεις μεταφοράς του συστήματος (1.10), (1.13) σαν ένα άθροισμα επιμέρους κλασμάτων [LAR02]:

$$z(s) = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{R}_i}{s - \lambda_i} + \mathbf{D} \right] d(s) \quad (1.32)$$

όπου  $\mathbf{R}_i$  είναι ο πίνακας των ολοκληρωτικών υπολοίπων του ρυθμού  $i$  του πίνακα συναρτήσεων μεταφοράς.

Το ολοκληρωτικό υπόλοιπο που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή  $i$  και την συνάρτηση μεταφοράς με σήμα εξόδου το  $k$  στοιχείο του διανύσματος εξόδου  $z$  ( $z_k$ ) και σήμα εισόδου το  $\ell$  στοιχείο του διανύσματος εισόδου  $d$  ( $d_\ell$ ) ορίζεται ως:

$$\mathbf{R}_i^{\ell k} = \mathbf{c}_k^T u_i v_i^T \mathbf{b}_\ell \quad (1.33)$$

όπου  $u_i$ ,  $v_i$  τα δεξιά και αριστερά ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στην ιδιοτιμή  $i$ , ενώ  $\mathbf{c}_k$  είναι η  $k$  γραμμή του πίνακα  $\mathbf{C}$ , και  $\mathbf{b}_\ell$  είναι η  $\ell$  στήλη του πίνακα  $\mathbf{B}$ .

Το ολοκληρωτικό υπόλοιπο  $\mathbf{R}_i^{\ell k}$  ενός ρυθμού  $i$ , εκφράζει την ευαισθησία της ιδιοτιμής  $\lambda_i$  μιας συνάρτησης μεταφοράς ανοιχτού βρόχου ως προς μια ανατροφοδότηση της εξόδου  $z_k$  στην είσοδο  $d_\ell$ . Ουσιαστικά φανερώνει το μέγεθος της μεταβολής της αντίστοιχης ιδιοτιμής  $\lambda_i$  στην περίπτωση που το σύστημα ανοιχτού βρόχου κλείσει με μια θετική ανατροφοδότηση της εξόδου στην είσοδο. Τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα υποδεικνύουν σε ποιο βαθμό θα επηρεαστεί ένας ρυθμός του συστήματος, για κάθε τέτοια ανατροφοδότηση. Το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου δηλώνει τη γωνία με την οποία η ιδιοτιμή θα αναχωρήσει από την τιμή ανοικτού βρόχου.

Θεωρούμε σύστημα μιας εισόδου και εξόδου, όπου η ανατροφοδότηση είναι θετική και η συνάρτηση ανατροφοδότησης είναι ένα απλό κέρδος  $\Delta K$ , ενώ η είσοδος γίνεται  $d = z \Delta K$ . Καθώς το κέρδος αυξάνεται από μηδέν σε  $\Delta K$  η απόκριση του συστήματος κλειστού βρόχου είναι :

$$z(s) = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{R}_i^{\ell k}}{s - \lambda_i} + d_{\ell k} \right] z(s) \Delta K \quad (1.34)$$

Έστω  $\lambda_r$  μια ιδιοτιμή στο σύστημα όπου ο βρόχος είναι ανοιχτός. Μεταβάλλοντας την τιμή του κέρδους ανατροφοδότησης από 0 σε  $\Delta K$ , προκαλείται μια μετατόπιση  $\lambda_r + \Delta\lambda_r$  στην ιδιοτιμή  $\lambda_r$  του συστήματος κλειστού βρόχου. Αντικαθιστώντας το  $s$  με  $\lambda_r + \Delta\lambda_r$ , η χαρακτηριστική εξίσωση του κλειστού συστήματος γράφεται:

$$1 - \left[ \sum_{i=1}^n \frac{R_i^{lk}}{\lambda_r + \Delta\lambda_r - \lambda_i} + d_{lk} \right] \Delta K = 0 \quad (1.35)$$

Για  $\Delta K \rightarrow 0$ , κυριαρχεί ο όρος με  $\lambda_i = \lambda_r$  (τείνει στο άπειρο) οπότε η (1.35) γίνεται:

$$1 - R_r^{lk} \frac{\Delta K}{\Delta\lambda_r} \approx 0 \quad (1.36)$$

η οποία ισοδύναμα γράφεται :

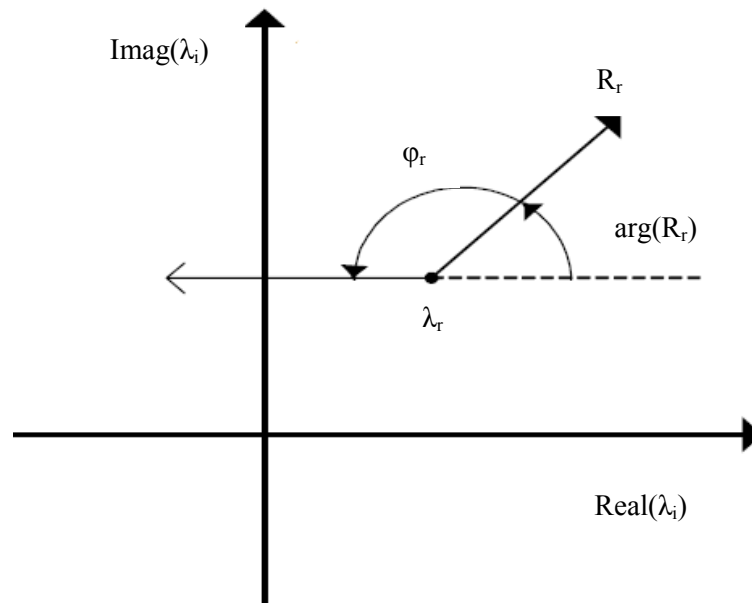
$$\frac{\Delta\lambda_r}{\Delta K} \approx R_r^{lk} \quad (1.37)$$

Αν η συνάρτηση ανατροφοδότησης είναι της μορφής:  $H(s) = KT(s)$ , η (1.37) γίνεται:

$$\frac{\Delta\lambda_r}{\Delta K} \approx R_r^{lk} T(\lambda_r) \quad (1.38)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι :

Το μέτρο του ολοκληρωτικού υπολοίπου  $R_r^{lk}$  καθορίζει το πόσο θα μετατοπιστεί η ιδιοτιμή με το κλείσιμο του βρόχου. Όπως αναφέρθηκε, το όρισμα του ολοκληρωτικού υπολοίπου του ρυθμού  $\lambda_r$ , καθορίζει την κατεύθυνση προς την οποία θα μετακινηθεί η ιδιοτιμή με το κλείσιμο του βρόχου θετικής ανατροφοδότησης για μικρές τιμές κέρδους (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3: Ολοκληρωτικό υπόλοιπο ιδιοτιμής



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. Πιο συγκεκριμένα απαιτείται φάση  $\phi_r$  για να έχουμε προς τα αριστερά κίνηση της ιδιοτιμής (Σχήμα 1.3). Τυπικές τέτοιες διατάξεις είναι οι σταθεροποιητές ισχύος 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.

## 1.7. Αριθμητικές μέθοδοι

### 1.7.1. Αριθμητική ολοκλήρωση

Γενικά, οι προσεγγιστικοί τύποι ολοκλήρωσης, χρησιμοποιούνται για την λύση συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Για την διαδικασία αυτή, στην βιβλιογραφία αναφέρεται σειρά προσεγγίσεων, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς την πολυπλοκότητα των υπολογισμών που απαιτούν, το σφάλμα και την ταχύτητα υπολογισμού [ΜΠΧ99], [COC72]. Στην συνέχεια αναφέρονται οι βασικές τεχνικές αριθμητικής ολοκλήρωσης, καθώς και οι σχέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται.

Θεωρούμε το πρόβλημα αρχικών συνθηκών διαφορικής εξίσωσης πρώτης τάξης:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(x), x(t_0) = x_0 \quad (1.39)$$

Η συνάρτηση  $f$  είναι βαθμωτή και στην γενική περίπτωση μη γραμμική, παραγωγίσιμη ως προς  $x$ . Είναι γνωστό ότι η (1.39) έχει μια μοναδική λύση αν η παράγωγός  $\partial f / \partial x$  είναι συνεχής στο διάστημα ολοκλήρωσης [COC72].

Η απλούστερη μέθοδος αριθμητικής ολοκλήρωσης είναι η μέθοδος του Euler. Βασιζόμενη στο ανάπτυγμα Taylor της (1.39) προκύπτει:

$$x(t) = x_0 + h \dot{x}(t)|_{t=t_0} + \frac{h^2}{2!} \ddot{x}(t)|_{t=t_0} + \dots \quad (1.40)$$

Όπου  $h$  η μεταβολή του  $t$  στο συγκεκριμένο βήμα,  $h=t-t_0$ .

Η εκτίμηση για την τιμή του  $x$  την χρονική στιγμή  $t=t_0+h$  προκύπτει με βάση την μέθοδο του Euler:

$$x(t) = x_0 + hf(x_0) + E \quad (1.41)$$

όπου  $E$  το σφάλμα της αριθμητικής μεθόδου.

Γενικότερα η μέθοδος του Euler δεν είναι πολύ χρήσιμη σε πρακτικά προβλήματα διότι απαιτεί πολύ μικρό βήμα ολοκλήρωσης προκειμένου να διατηρηθεί ικανοποιητική ακρίβεια.

Μια άλλη μέθοδος είναι η τραπεζοειδής. Η μέθοδος αυτή είναι δεύτερης τάξης και προκύπτει και αυτή από το ανάπτυγμα Taylor:

$$x(t) = x_0 + h \dot{x}(t)|_{t=t_0} + \frac{h^2}{2!} \ddot{x}(t)|_{t=t_0} + \frac{h^3}{3!} \ddot{\ddot{x}}(t)|_{t=t_0} + \dots \quad (1.42)$$

ή με βάση την (1.39):

$$x(t) = x_0 + hf(x_0) + \frac{h^2}{2} f'(x)|_{x=x_0} + E \quad (1.43)$$

Για την πρώτη παράγωγο του  $x$  ισχύει:

$$\dot{x}(t) = \dot{x}_0 + h f'(x)|_{x=x_0} + E_1 \quad (1.44)$$

όπου  $E_1$  το σφάλμα της αριθμητικής μεθόδου.

Η εξίσωση (1.44) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$f'(x)|_{x=x_0} \approx \frac{f(x) - f(x_0)}{h} \quad (1.45)$$

Αντικαθιστώντας την (1.45) στην (1.43) προκύπτει

$$x(t) \approx x_0 + hf(x_0) + \frac{h}{2} (f(x) - f(x_0)) \quad (1.46)$$

και τελικά προκύπτει η σχέση που δίνει την τιμή του  $x$  την χρονική στιγμή  $t$ :

$$x(t) \approx x_0 + \frac{h}{2} (f(x) + f(x_0)) \quad (1.47)$$

Στην συνέχεια περιγράφεται συνοπτικά η μέθοδος Runge-Kutta, η οποία έχει διάφορες παραλλαγές. Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ακρίβεια από την μέθοδο του Euler, αποφεύγοντας την ανάγκη για υπολογισμό παραγώγων μεγάλης τάξης. Η βασική σχέση είναι η εξής:

$$x(t) = x_0 + ak_1 + bk_2 \quad (1.48)$$

όπου  $k_1, k_2$ :

$$\begin{aligned} k_1 &= hf(x_0) \\ k_2 &= hf(x_0 + \beta k_1) \end{aligned} \quad (1.49)$$

Η επιλογή των  $a, b, \beta$  καθορίζει και την υποπερίπτωση της συγκεκριμένης μεθόδου. Η απλούστερη εκδοχή είναι θέτοντας  $a=b=0.5$  και  $\beta=1$  όπου προκύπτει:

$$x(t) = x_0 + \frac{1}{2}(k_1 + k_2) \quad (1.50)$$

Η οποία μετασχηματίζεται στην σχέση που δίνει την τιμή του  $x$  την χρονική στιγμή  $t$ :

$$x(t) = x_0 + \frac{h}{2} (f(x_0) + f(x_0 + hf(x_0))) \quad (1.51)$$

### 1.7.2. Τραπεζοειδής μέθοδος

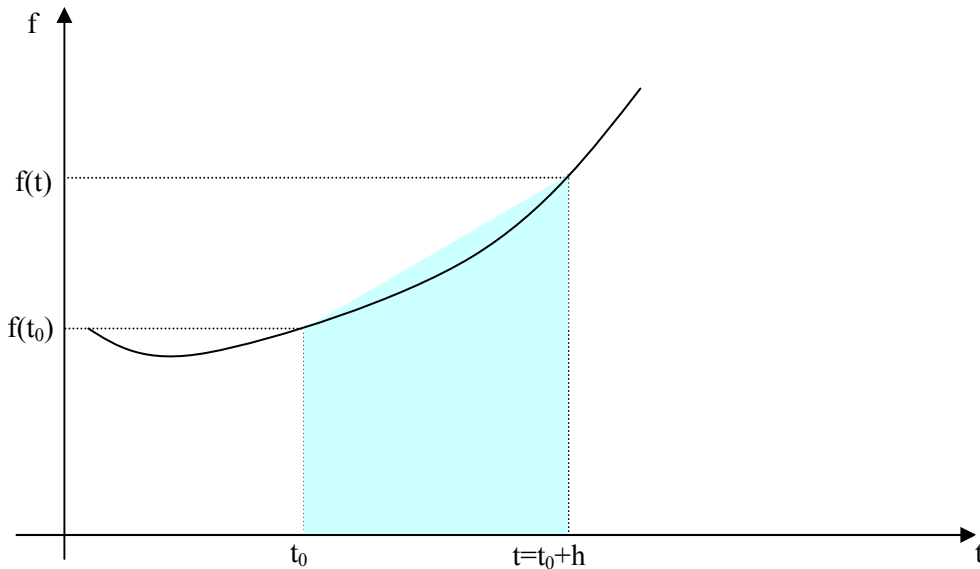
Η προσομοίωση διαταραχών για το απλοποιημένο μοντέλο ΣΗΕ που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής πραγματοποιείται με αριθμητική ολοκλήρωση με την τραπεζοειδή μέθοδο. Η μέθοδος αυτή προσεγγίζει το εμβαδόν μιας καμπύλης ως το τραπέζιο που ορίζεται από τις τιμές των μεταβλητών και της συνάρτησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Δεδομένης της (1.39), για το ολοκλήρωμα της συνάρτησης  $f$  στο διάστημα  $(t_0, t)$  ισχύει:

$$\int_{t_0}^t f(x)dt = \int_{t_0}^{t_0+h} \dot{x}dt = x(t) - x(t_0) \quad (1.52)$$

όπου  $h=\Delta t$ .

Με βάση τον κανόνα του τραpezίου (1.47) ισχύει:

$$\int_{t_0}^{t_0+h} f(t)dt \approx h \frac{f(t_0) + f(t_0 + h)}{2} \quad (1.53)$$



Σχήμα 1.4: Αριθμητική ολοκλήρωση με την μέθοδο τραpezίου.

Μικρά βήματα ολοκλήρωσης εξασφαλίζουν καλή προσέγγιση. Με βάση την (1.47) προκύπτει η μορφή για το νέο σημείο της συνάρτησης  $f$ :

$$f(t_0 + h) \approx -f(t_0) + \frac{2}{h}(x(t) - x(t_0)) \quad (1.54)$$

Συνεπώς με βάση την τραπεζοειδή μέθοδο, η διαφορική εξίσωση (1.39) μετατρέπεται στην παρακάτω αλγεβρική εξίσωση:

$$\frac{2}{h}(x_0 - x) + f(x_0) + f(x) = 0 \quad (1.55)$$

Έχοντας συνεπώς δεδομένο το αρχικό σημείο  $x_0$ , και με αντικατάσταση της συνάρτησης  $f(x)$  υπολογίζεται η τιμή του  $x$  στο επόμενο βήμα της ολοκλήρωσης, και στην συνέχεια και η νέα τιμή για την παράγωγό του, την συνάρτηση  $f(x)$ .

Στην περίπτωση ενός συστήματος το οποίο περιγράφεται από περισσότερες της μιας διαφορικές εξισώσεις η ολοκλήρωση γίνεται σε κάθε διαφορική εξίσωση. Έστω:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} = f(x), \quad x(t_0) = x_0 \quad (1.56)$$

Για την βαθμωτή συνάρτηση  $f_i$  ισχύει η σχέση (1.55), με την διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή η συνάρτηση  $f_i$  είναι συνάρτηση πολλών μεταβλητών. Συνεπώς η εξίσωση (1.55) τροποποιείται ως εξής:

$$\frac{2}{h}(x_{i,0} - x_i) + f_i(x_0) + f_i(x) = 0 \quad (1.57)$$

όπου  $x$ , όπως φαίνεται και στην (1.56) δεν είναι βαθμωτό μέγεθος, αλλά διάνυσμα  $n$  μεταβλητών, όσες και οι διαφορικές εξισώσεις και οι μεταβλητές κατάστασης.

Με την εφαρμογή της μεθόδου τραπεζοειδούς ολοκλήρωσης, και πιο συγκεκριμένα της εξίσωσης (1.57) για κάθε διαφορική εξίσωση, γίνεται η προσομοίωση διαταραχών στο λογισμικό πακέτο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής.

### 1.7.3. Επίλυση μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων με την μέθοδο Newton-Raphson

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η μοντελοποίηση των ΣΗΕ, όπως και των περισσότερων δυναμικών συστημάτων καταλήγει σε ένα πρόβλημα αλγεβρικών-διαφορικών εξισώσεων (1.1). Στην παράγραφο 1.7.1 αναλύθηκαν οι τεχνικές αριθμητικής ολοκλήρωσης στις οποίες η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων ανάγεται στην επίλυση αλγεβρικών. Με άλλα λόγια, το πρόβλημα επίλυσης διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων (1.1) μπορεί να μετατραπεί σε ένα πρόβλημα επίλυσης μη γραμμικών εξισώσεων.

Έστω η παρακάτω εξίσωση:

$$g(x) = 0 \quad (1.58)$$

Όπου η συνάρτηση  $g(x)$  είναι μη γραμμική και μπορεί να δίνεται σε αναλυτική μορφή (*explicitly*) ή να είναι γνωστή μόνο ως πεπλεγμένη συνάρτηση (*implicitly*) και η αναλυτική μορφή να είναι άγνωστη.

Παρότι σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί κανείς να υπολογίσει τις ακριβείς λύσεις της  $g(x)$ , στην γενική περίπτωση αυτές υπολογίζονται προσεγγιστικά. Η προσεγγιστική αυτή λύση είναι η τιμή  $x^*$  για την οποία ισχύει ότι το  $|g(x^*)|$  είναι αρκετά μικρό, να είναι δηλαδή ένα σημείο το οποίο βρίσκεται αρκετά κοντά στην λύση της (1.58). Για τον σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί σειρά τεχνικών η οποίες αναλύονται διεξοδικά στην βιβλιογραφία [COC72], [DBA74].

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Newton-Raphson για την επίλυση των μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Η μέθοδος αυτή, εξασφαλίζει συνήθως τετραγωνική σύγκλιση [COC72], απαιτεί δηλαδή αρκετά μειωμένο αριθμό επαναλήψεων για την εύρεση της λύσης σχετικά με άλλους αλγορίθμους, ωστόσο έχει δύο μειονεκτήματα. Το πρώτο είναι ότι απαιτεί αρκετά καλή προσέγγιση της λύσης από το αρχικό σημείο προκειμένου να συγκλίνει, ενώ

το δεύτερο είναι ότι απαιτείται ο υπολογισμός της παραγώγου της  $g(x)$  το οποίο σημαίνει ότι η  $g'(x)$  θα πρέπει να ορίζεται στην αναλυτική της μορφή (*explicitly*).

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα προσομοίωσης του ΣΗΕ, τα δύο μειονεκτήματα της λύσης μπορούν να ξεπεραστούν. Το πρώτο διότι, όπως θα φανεί και στο επόμενο κεφάλαιο, το αρχικό σημείο της επίλυσης είναι αρκετά κοντά στην λύση. Το δεύτερο εξασφαλίζεται λόγω του τύπου των εξισώσεων που εμπλέκονται στην περιγραφή ενός ΣΗΕ, στις οποίες οι συναρτήσεις των παράγωγων είναι γνωστές.

Η διαδικασία επίλυσης μη γραμμικών εξισώσεων με την μέθοδο Newton-Raphson συνοψίζεται στα εξής:

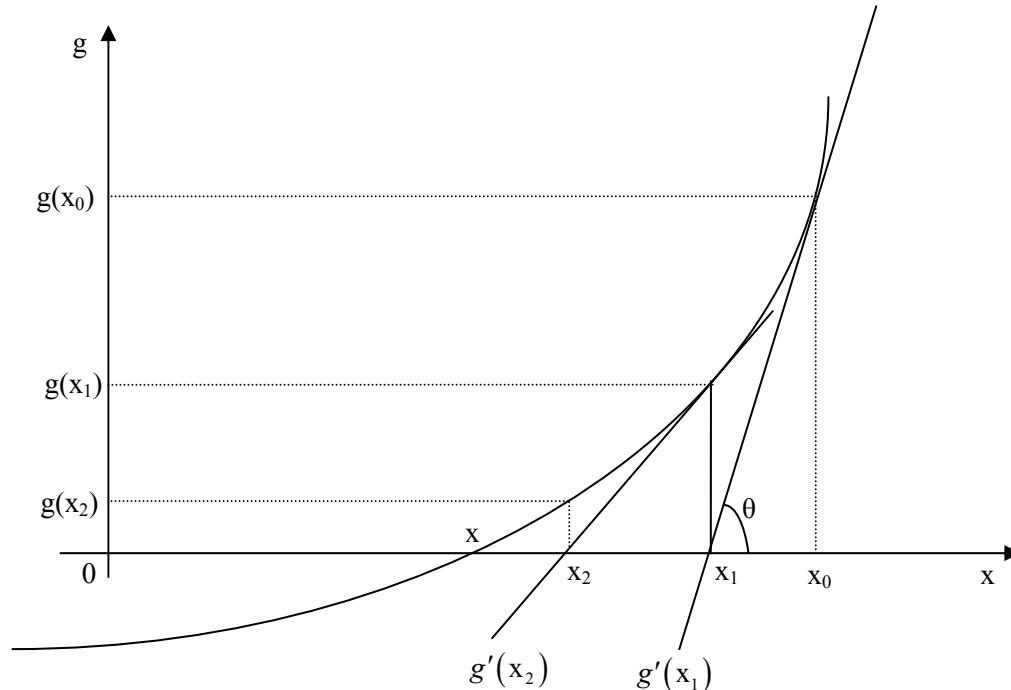
Έστω ότι στην περιοχή μιας λύσης  $\rho$  της συνάρτησης  $g(x)$ , θεωρώντας ότι η  $g'(x)$  και η  $g''(x)$  είναι συνεχείς. Έστω ένα σημείο  $x_0$ , το οποίο θεωρούμε ως την πρώτη προσέγγιση στη λύση. Η τομή της εφαπτομένης της καμπύλης στο σημείο  $(x_0, g(x_0))$  και του άξονα  $x$  ορίζει ένα νέο σημείο  $x_1$ . Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 1.5 ισχύει:

$$g'(x)|_{x=x_0} = \tan \theta = \frac{g(x_0)}{x_1 - x_0} \Leftrightarrow x_1 = x_0 - \frac{g(x_0)}{g'(x)|_{x=x_0}} \quad (1.59)$$

Στην γενική περίπτωση, δεδομένης μιας συνεχούς και παραγωγίσιμης συνάρτησης  $g(x)$  και ενός αρχικού σημείου  $x_0$  ο αλγόριθμος Newton-Raphson δίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{g(x_n)}{g'(x)|_{x=x_n}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.60)$$

Γραφικά η μέθοδος Newton-Raphson παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5:



Σχήμα 1.5: Επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson για την επίλυση μιας εξίσωσης μιας μεταβλητής.

Για το σφάλμα της μεθόδου, ισχύει θεωρώντας  $\rho$  την λύση της εξίσωσης (1.58):

$$\rho = x_n + \varepsilon_n \quad (1.61)$$

όπου  $\varepsilon_n$  θεωρείται το σφάλμα στην  $n$ -οστή επανάληψη.

Με βάση το ανάπτυγμα Taylor της  $g$  ισχύει:

$$0 = g(\rho) = g(x_n + \varepsilon_n) = g(x_n) + \varepsilon_n g'(x)|_{x=x_n} + \frac{\varepsilon_n^2}{2} g''(x)|_{x=x_n} + \dots \quad (1.62)$$

διαιρώντας με την πρώτη παράγωγο της συνάρτησης  $g$  στο σημείο  $x_n$  προκύπτει:

$$\frac{g(x_n)}{g'(x)|_{x=x_n}} + \varepsilon_n = -\frac{\varepsilon_n^2}{2} \frac{g''(x)|_{x=x_n}}{g'(x)|_{x=x_n}} - \dots \quad (1.63)$$

με αντικατάσταση της (1.60) στην (1.63) προκύπτει:

$$x_n - x_{n+1} + \varepsilon_n = -\frac{\varepsilon_n^2}{2} \frac{g''(x)|_{x=x_n}}{g'(x)|_{x=x_n}} - \dots \quad (1.64)$$

από όπου προκύπτει με αντικατάσταση της (1.61) ότι το νέο σφάλμα θα είναι περίπου ίσο με:

$$\varepsilon_{n+1} \cong -\frac{\varepsilon_n^2}{2} \frac{g''(x)|_{x=x_n}}{g'(x)|_{x=x_n}} \quad (1.65)$$

εκφρασμένο σε απόλυτα μεγέθη:

$$|\varepsilon_{n+1}| \cong \frac{|g''(x)|_{x=x_n}|}{2|g'(x)|_{x=x_n}} \varepsilon_n^2 \quad (1.66)$$

Η εξίσωση (1.66) δείχνει τον ρυθμό σύγκλισης της μεθόδου, ο οποίος είναι τετραγωνικός αν πληρούνται τα παρακάτω κριτήρια:

1. Αν η πρώτη παράγωγος της  $g$  είναι διάφορη του μηδενός  $\forall x \in I$ , όπου  $I$  το διάστημα  $[\rho - r, \rho + r]$ , όπου  $r \geq |\rho - x_0|$
2. Αν η δεύτερη παράγωγος της  $g$  ορίζεται στο  $I$
3. Το  $x_0$  είναι αρκετά κοντά στο  $\rho$ .

Στην περίπτωση όπου η επίλυση αφορά περισσότερες της μίας εξίσωσης η (1.58) τροποποιείται:

$$g(x) = \begin{bmatrix} g_1(x_1, \dots, x_m) \\ \vdots \\ g_m(x_1, \dots, x_m) \end{bmatrix} = 0 \quad (1.67)$$

όπου  $g$  είναι  $m$  συναρτήσεις  $g_1, \dots, g_m$  και οι μεταβλητές  $x$  διάνυσμα διάστασης  $m \times 1$ .

Η (1.60) τροποποιείται αντίστοιχα με βάση το ανάπτυγμα Taylor για συναρτήσεις πολλών μεταβλητών:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g}_1^{(n+1)} \\ \vdots \\ \mathbf{g}_m^{(n+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1^{(n)} \\ \vdots \\ \mathbf{g}_m^{(n)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \nabla \mathbf{g}_1(x_1^{(n)}, \dots, x_m^{(n)}) \\ \vdots \\ \nabla \mathbf{g}_m(x_1^{(n)}, \dots, x_m^{(n)}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1(x_1^{(n)}, \dots, x_m^{(n)}) \\ \vdots \\ \mathbf{g}_m(x_1^{(n)}, \dots, x_m^{(n)}) \end{bmatrix}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.68)$$

Ο πίνακας με τις μερικές παραγώγους πρώτης τάξης των συναρτήσεων  $g$  ονομάζεται Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος.

$$\mathbf{J} = D_x \mathbf{g} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{g}_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \mathbf{g}_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \mathbf{g}_1}{\partial x_m} \\ \frac{\partial \mathbf{g}_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \mathbf{g}_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \mathbf{g}_2}{\partial x_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \mathbf{g}_m}{\partial x_1} & \frac{\partial \mathbf{g}_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \mathbf{g}_m}{\partial x_m} \end{bmatrix} = \mathbf{g}_x \quad (1.69)$$

Στην περίπτωση  $m$  εξισώσεων και αγνώστων, σε κάθε βήμα του αλγορίθμου θα πρέπει να υπολογίζονται  $m^2$  μερικές παράγωγοι (εκτός αν ο πίνακας είναι αραιός) και  $m$  αποτελέσματα συναρτήσεων  $g_i$ .

## 1.8. Επισκόπηση βιβλιογραφίας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται επισκόπηση της βιβλιογραφίας που σχετίζεται με τις ιδέες και μεθοδολογίες που αναπτύσσονται στην παρούσα διατριβή. Συγκεκριμένα, οι σημαντικότερες αναφορές στις οποίες βασίστηκε και από τις οποίες επηρεάστηκε η παρούσα διατριβή αφορούν τα ακόλουθα πεδία:

1. Διασυνδεδετικές ταλαντώσεις.
2. Ανάλυση ιδιαιζουσών διαταραχών και η προσέγγιση οιονεί στατικής μεταβολής ως μεθοδολογία για την απλοποίηση συστημάτων.
3. Δυναμικά ισοδύναμα-Συνεκτικές περιοχές.
4. Σχεδίαση σταθεροποιητών ισχύος.
5. Μοντέλα διατάξεων ΣΗΕ.

### 1.8.1. Διασυνδεδετικές ταλαντώσεις

Οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις εμφανίστηκαν από τις αρχές της λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων, από τότε δηλαδή που οι γεννήτριες ξεκίνησαν να λειτουργούν παράλληλα. Ωστόσο το πρόβλημα των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων με χαμηλή απόσβεση εμφανίστηκε έντονα, στο τέλος της δεκαετίας του 1950 και τις αρχές του 1960. Αυτό συνέβη διότι, κατά τις δεκαετίες αυτές αυξάνονταν σε πλήθος και ικανότητα μεταφοράς οι διασυνδέσεις των συστημάτων και εξελίσσονταν οι διατάξεις αυτομάτου ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, καθώς αποχτούσε διαρκώς μεγαλύτερη σημασία η μεταβατική ευστάθεια των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας-ΣΗΕ (π.χ. σχετικά με την ικανότητα επαναφοράς μετά από κάποιο σφάλμα), εγκαθίσταντο διατάξεις Αυτόματων Ρυθμιστών Τάσης (APT) υψηλού κέρδους, οι οποίες όμως σε ορισμένες περιπτώσεις τείνουν να μειώσουν την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων [LAS81]. Η αλληλεπίδραση αυτή επισημαίνεται ήδη από την εργασία [MEC69]. Επιπλέον

παράγοντας που συνέβαλε και συμβάλει αρνητικά, μειώνοντας την απόσβεση των διασυνδεδειγμένων ταλαντώσεων είναι η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ισχύος σε μεγάλου μήκους γραμμές μεταφοράς [PGP03]. Με άλλα λόγια, η διαδικασία της συνεχούς διασύνδεσης μεταξύ των συστημάτων, της εγκατάστασης γρήγορων βρόχων ελέγχου και της αυξανόμενης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συνέβαλαν στην εμφάνιση ασταθών ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.

Γενικά, οι ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί διαιρούνται σε τρεις κατηγορίες, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.2, τους τοπικούς τους ενδοσυστημικούς και τους διασυνδεδειγμένους. Οι τοπικές και ενδοσυστημικές ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις αντιμετωπίστηκαν ικανοποιητικά αρκετά νωρίς, είτε με την προσθήκη τυλιγμάτων απόσβεσης στις γεννήτριες, είτε με την τοποθέτηση σταθεροποιητών ισχύος. Σε αυτή την κατηγορία των ταλαντώσεων, οι παράμετροι που εμπλέκονται στην εμφάνισή τους είναι λίγες γεγονός που καθιστά σχετικά εύκολη την κατανόηση και την αντιμετώπισή τους. Η σταθεροποίηση των ρυθμών αυτών γίνεται κατά κύριο λόγο με την χρήση των σταθεροποιητών ισχύος, καθώς και άλλων διατάξεων όπως είναι η εγκατάσταση ελεγκτών στις διατάξεις αέργου αντισταθμίσεως (TCSC, SVC, FACTS) [CIG96]. Η επισκόπηση της βιβλιογραφίας για το τμήμα της σταθεροποίησης των ρυθμών αυτών γίνεται παρακάτω.

Ωστόσο στην βιβλιογραφία εμφανίζεται αρκετό ενδιαφέρον για τις διασυνδεδειγμένες ταλαντώσεις. Σχετικά με την μελέτη των διασυνδεδειγμένων ταλαντώσεων σημειώνονται τα συγγράμματα [ROG00], [PSK06]. Οι ταλαντώσεις αυτές προκαλούνται από την ασθενή σύνδεση μεταξύ δύο ή περισσότερων συνεκτικών ομάδων, εμπλέκουν πολλές γεννήτριες και επηρεάζονται από μια σειρά παραμέτρων του συστήματος. Ενδεικτικά αναφέρεται:

- η ροή της διασύνδεσης
- οι διατάξεις ελέγχου των γεννητριών (APT, Ρυθμιστές Στροφών)
- τα επίπεδα των φορτίων

Σχετικά με το ενδεχόμενο αλληλεπίδρασης μεταξύ διασυνδεδειγμένων ρυθμών σημειώνεται η εργασία [NKV009] όπου μελετάται η αλληλεπίδραση της διασύνδεσης του ελληνικού συστήματος με την Τουρκία. Στην εργασία αυτή φαίνεται ότι η αλληλεπίδραση δυο ηλεκτρομηχανικών ρυθμών μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ευστάθεια του συστήματος. Συνολικά για τις διασυνδεδειγμένες ταλαντώσεις σημειώνεται η αναφορά [CIG96] στην οποία αναλύεται εκτενώς το θέμα, καθώς και οι τεχνικές σταθεροποίησής τους. Η εργασία [LIM07] επισημαίνει την κρισιμότητα της μοντελοποίησης και το σφάλμα που αυτή μπορεί να εισάγει στην εκτίμηση των ηλεκτρομηχανικών και ειδικότερα των διασυνδεδειγμένων ταλαντώσεων.

Οι αναφορές για την εμφάνιση ταλαντώσεων χαμηλής συχνότητας στα συστήματα είναι αρκετές κατά τις τελευταίες δεκαετίες, και ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι φαίνεται να διεγείρονται όχι από ένα τύπο διαταραχών αλλά για διαφορετικούς λόγους σε κάθε σύστημα, ενώ αντίστοιχα η αντιμετώπισή τους δεν ήταν πανομοιότυπη σε όλες τις περιπτώσεις. Για την μελέτη των περιπτώσεων αυτών σε πραγματικά συστήματα μέχρι το 1996 σημειώνεται το κείμενο της CIGRE [CIG96], ενώ μεταγενέστερα αναφέρονται το blackout στα σύνορα ΗΠΑ-Καναδά το 1996 [VEL04], καθώς και μια σειρά συμβάντων σχετιζόμενων με ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας που περιγράφονται στην εργασία [PMT09]. Τέλος σημειώνεται και η ταλάντωση που εμφανίστηκε την 1-5-2005 στο ευρωπαϊκό σύστημα [VMN09], η οποία αποτελεί και ένα γεγονός το οποίο μελετάται και αναλύεται στην παρούσα διατριβή.

Η ολοένα και διευρυνόμενη διασύνδεση των συστημάτων έχει αυξήσει το ενδιαφέρον σχετικά με τις διασυνδεδειγμένες ταλαντώσεις. Ενδεικτικά αναφέρονται οι παρακάτω εργασίες στις οποίες αναλύονται οι διασυνδεδειγμένοι ρυθμοί σε μεγάλα συστήματα [BWD00] για το Ευρωπαϊκό σύστημα [VMN09], [KUW05] για το Νότιο-Ανατολικό τμήμα του UCTE, [LXH04] για την νότια Κίνα. Η



μελέτη αλλά και η σταθεροποίησή των διασυνδεδεικτών ρυθμών εξακολουθεί να αποτελεί ένα ανοιχτό πρόβλημα.

### **1.8.2. Ανάλυση ιδιαιζουσών διαταραχών - Οιονεί στατική μεταβολή**

Στην παρούσα διατριβή, η μελέτη και σταθεροποίηση των διασυνδεδεικτών ταλαντώσεων γίνεται με το απλοποιημένο μοντέλο που αναπτύσσεται και θα περιγραφεί στα επόμενα κεφάλαια. Η απλοποίηση αυτή βασίζεται στην προσέγγιση της οιονεί στατικής μεταβολής και στην ανάλυση ιδιαιζουσών διαταραχών.

Η προσέγγιση της ανάλυσης ιδιαιζουσών διαταραχών καθώς και οι τεχνικές διαχωρισμού χρονικών κλιμάκων εισήχθησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και από τότε έχει διευρυνθεί η χρήση τους για την μοντελοποίηση, ανάλυση και σχεδιασμό των διατάξεων ελέγχου [OM74]. Στην βιβλιογραφία του ελέγχου, η προσέγγιση της ανάλυσης ιδιαιζουσών διαταραχών [TIK52] εφαρμόστηκε πρώτα στο πεδίο του βέλτιστου έλεγχου [KOS68]. Επίσης εφαρμόστηκε [KEE70] για την βελτιστοποίηση της διαδρομής ενός ιπτάμενου οχήματος. Για την μελέτη της ανάλυσης ιδιαιζουσών διαταραχών σημειώνεται το σύγγραμμα [KKO86], καθώς και τα άρθρα [KOS68], σχετικά με τον χωρισμό χρονικών κλιμάκων [WCA80], [KAW80], σχετικά με την μοντελοποίηση των γεννητριών και των διατάξεων ελέγχου [XMI98].

Ο χωρισμός χρονικών κλιμάκων εξάγει απλοποιημένες περιγραφές για το σύστημα. Η προσέγγιση της οιονεί στατικής μεταβολής συνίσταται στην αντικατάσταση των διαφορικών εξισώσεων που αντιστοιχούν σε φαινόμενα ταχέως εξελισσόμενα, από αλγεβρικές εξισώσεις [VVC97].

Στην περίοδο της τελευταίας δεκαετίας, η έμφαση του ερευνητικού ενδιαφέροντος επικεντρώθηκε ως ένα βαθμό σε εφαρμογές σχετιζόμενες με θέματα ευστάθειας τάσης. Ενδεικτικά αναφέρονται δύο εργασίες, η πρώτη σχετικά με την εφαρμογή της οιονεί στατικής μεταβολής στο ελληνικό σύστημα [CKC05], ενώ η δεύτερη σχετικά με την εφαρμογή στα συστήματα της Νέας Αγγλίας και της Κορέας [KM09]. Επίσης υπήρξαν δημοσιεύσεις οι οποίες διαπραγματεύονταν την ακρίβεια της προσομοίωσης με την χρήση απλοποιημένων μοντέλων και την κατά περίπτωση καταλληλότητα λεπτομερούς ή απλοποιημένης προσέγγισης. Στις εργασίες [RBFV12], [CGL05] προτείνεται μια μεικτή προσέγγιση για την προσομοίωση των ηλεκτρικών συστημάτων. Προτείνεται δηλαδή η μοντελοποίηση όλων των χρονικών κλιμάκων για ένα χρονικό διάστημα μετά την διαταραχή και οιονεί στατική μεταβολή στο χρονικό διάστημα στο οποίο επικρατούν οι αργές δυναμικές. Επίσης αναπτύχθηκαν εργαλεία λογισμικού βασισμένα στην οιονεί στατική μεταβολή [CHM05], [BCF03].

Η μέθοδος της οιονεί στατικής μεταβολής επεκτάθηκε [GLC05] ενσωματώνοντας την δυναμική της συχνότητας, καθιστώντας την προσέγγιση αυτή κατάλληλη για μελέτες ευστάθειας συχνότητας σε αυτόνομα συστήματα.

### **1.8.3. Δυναμικό Ισοδύναμο - Συνεκτικές περιοχές**

Η ανάλυση του χωρισμού των περιοχών καταλήγει, όπως αναφέρεται και προηγουμένως, στον καθορισμό ομάδων συνεκτικών γεννητριών προκειμένου να δημιουργηθούν απλοποιημένα δυναμικά ισοδύναμα του μελετούμενου συστήματος. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την θεώρηση ισοδύναμης γεννήτριας για κάθε συνεκτική ομάδα, καθώς και με την απλοποίηση του δικτύου στο εσωτερικό της κάθε συνεκτικής περιοχής. Για την μελέτη αυτής της διαδικασίας αναφέρονται οι εργασίες [CAP95], [WKY97], [ODD03]. Για τις συνεκτικές περιοχές επίσης σημειώνεται το σύγγραμμα [MBB08]. Σημειώνονται επίσης οι εργασίες [CAP82a], [CAP82b] στις οποίες περιγράφεται αρκετά αναλυτικά η θεωρία και εφαρμογή της κατασκευής δυναμικών ισοδυνάμων για συστήματα πολλών μηχανών.

Εκτός των σύγχρονων εργασιών οι οποίες έχουν αναφερθεί και εντάσσονται στην εφαρμογή της θεωρίας των συνεκτικών περιοχών για την κατασκευή απλοποιημένων μοντέλων, η προσέγγιση αυτή έχει χρησιμοποιηθεί την τελευταία δεκαετία και για άλλες εφαρμογές. Σημειώνονται οι [YVW04], [YVH06], [WAV04] στις οποίες εφαρμόζεται η θεωρία των συνεκτικών περιοχών για τον διαχωρισμό ενός συστήματος σε νησίδες μετά από μια σοβαρή διαταραχή.

Τέλος αναφέρονται, στα πλαίσια της επισκόπησης της βιβλιογραφίας για τα δυναμικά ισοδύναμα δύο ακόμα εργασίες. Η πρώτη αποτελεί μια παραλλαγή της προηγούμενης προσέγγισης, όπου με την θεώρηση των ισοδύναμων γεννητριών απλοποιείται κάθε άλλη συνεκτική περιοχή εκτός της περιοχής στην οποία επικεντρώνεται η μελέτη. Με τον τρόπο αυτό στην περιοχή που μελετάται, το σύστημα παραμένει αναλλοίωτο (δίκτυο, γεννήτριες, διατάξεις ελέγχου) ενώ παράλληλα απλοποιείται το «εξωτερικό» τμήμα του [RRF96]. Η δεύτερη εργασία είναι μια διαδικασία μείωσης της τάξης του συστήματος χρησιμοποιώντας μεθόδους υποχώρων Krylov [CHP05].

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί και το ζήτημα του υπολογισμού ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων σε μεγάλα συστήματα. Για τον υπολογισμό αυτό, σχηματικά μπορούμε να διακρίνουμε δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη περιλαμβάνει τις κλασικές τεχνικές επίλυσης των εξισώσεων. Εναλλακτικά διακρίνεται η εφαρμογή αλγορίθμων όπως οι AESOPS/PEALS [SRP91], ή άλλων τεχνικών επιλεκτικού υπολογισμού ιδιοτιμών [STJ81], [MPA11]. Τέλος, σχετικά με τον υπολογισμό ιδιοτιμών αναφέρεται η εργασία [RMF10], στην οποία προτείνεται αλγόριθμος για επιλεκτικό υπολογισμό των δεξιότερων ιδιοτιμών σε μεγάλα συστήματα.

#### **1.8.4. Σχεδίαση Σταθεροποιητών**

Αρχικά οι σταθεροποιητές ισχύος χρησιμοποιήθηκαν για τις τοπικές ταλαντώσεις οι οποίες αποσταθεροποιούνταν κυρίως λόγω της εγκατάστασης APT υψηλού κέρδους [ROG00], [CIG00]. Οι διατάξεις αυτές εισάγουν την κατάλληλη φάση προκειμένου να εισάγουν θετική ροπή απόσβεσης και συνεπώς να αυξήσουν την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Συνήθεις είσοδοι είναι η ταχύτητα περιστροφής του άξονα της γεννήτριας, η ηλεκτρική ισχύς ή η επιτάχυνση του άξονα της γεννήτριας καθώς και η συχνότητα της τάσης του τερματικού ζυγού.

Όπως αναφέρθηκε, οι ρυθμοί στους οποίους επιδρά ο σταθεροποιητής είναι είτε τοπικοί είτε διασυνδεδετικοί. Επειδή το εύρος των συχνοτήτων εμφάνισης των τοπικών ταλαντώσεων μπορεί να προσδιοριστεί, είναι δυνατόν να σχεδιαστεί ένας αρκετά εύρωστος σταθεροποιητής ισχύος ο οποίος προσθέτει απόσβεση για μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας [LSW81].

Οι βασικές αρχές σχεδίασης σταθεροποιητών ισχύος παρουσιάστηκαν πριν σαράντα περίπου χρόνια [MEC69]. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Hefron-Phillips (γραμμικοποιημένο μοντέλο γεννήτριας-άπειρου ζυγού) για την παράσταση των σύγχρονων γεννητριών, ενώ επίσης εισήχθησαν οι έννοιες της ροπής απόσβεσης και συγχρονισμού. Ωστόσο η αρχική προσέγγιση περιγράφει έναν και μόνο ρυθμό ταλάντωσης του δρομέα, ενώ στην πραγματικότητα η γεννήτρια μπορεί να συμμετέχει σε περισσότερους του ενός ρυθμούς (διασυνδεδετικούς και τοπικούς).

Η εργασία [LAS81] έθεσε το θέμα της αλληλεπίδρασης των ρυθμών. Ειδικότερα, σημειώνεται η αλληλεπίδραση του ρυθμού διέγερσης και του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού, που προκαλεί η ενεργοποίηση ενός σταθεροποιητή σε μια γεννήτρια. Σε ένα σύστημα πολλών μηχανών, είναι δυνατόν η αύξηση του κέρδους ενός σταθεροποιητή, να μειώνει την απόσβεση ορισμένων ρυθμών διέγερσης.

Βασικό τμήμα της διαδικασίας σχεδίασης του σταθεροποιητή είναι η επιλογή της κατάλληλης γεννήτριας στην οποία θα τοποθετηθεί, προκειμένου να επηρεάσει τον ασταθή (ή ανεπαρκώς

αποσβεννόμενο ρυθμό). Βασικό εργαλείο είναι η ανάλυση της ευαισθησίας του ρυθμού [ROG00], [KKR89], [PPV89], [MAL90] η οποία βασίζεται στην ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών, χρησιμοποιώντας τα ιδιοδιανύσματα και τους συντελεστές συμμετοχής ή τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα. Οι συντελεστές συμμετοχής υποδηλώνουν την ευαισθησία ενός ρυθμού στην αύξηση της απόσβεσης στον άξονα της γεννήτριας, ενώ τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα υποδηλώνουν την ευαισθησία του αντίστοιχου ρυθμού σε θετική ανατροφοδότηση της εισόδου της συνάρτησης μεταφοράς από την έξοδο. Η είσοδος και η έξοδος της συνάρτησης μεταφοράς είναι τα σημεία στα οποία θα συνδεθεί η έξοδος και η είσοδος αντίστοιχα του σταθεροποιητή ισχύος [ROG00]. Σχετικά με το πρόσημο της ανατροφοδότησης της διάταξης απόσβεσης αναφέρεται η εργασία [ROP01].

Έπειτα από την επιλογή της κατάλληλης γεννήτριας πραγματοποιείται η σχεδίαση του σταθεροποιητή. Στην βιβλιογραφία οι εργασίες είναι αρκετές, ειδικά τα τελευταία χρόνια. Τα προβλήματα τα οποία πραγματεύονται οι εργασίες αυτές μπορούν να συμπεκνωθούν σε δύο θεματικές ενότητες. Ο τρόπος που αρχικά σχεδιάζοταν ένας σταθεροποιητής ισχύος αναφερόταν σε ένα σημείο λειτουργίας και γινόταν η παραδοχή ότι η απαραίτητη αντιστάθμιση φάσης δεν τροποποιείται σημαντικά για τα διάφορα σενάρια λειτουργίας [PPV89], [TT93]. Συνεπώς το πρώτο πρόβλημα είναι η διαμόρφωση μιας κατά το δυνατόν εύρωστης διαδικασίας σχεδίασης σταθεροποιητή προκειμένου αυτός να λειτουργεί ικανοποιητικά σε όλα τα δυνατά σημεία λειτουργίας του συστήματος. Το δεύτερο πρόβλημα σχετίζεται με την αλληλεπίδραση των ρυθμών, αλλά και την επίδραση του σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή σε άλλους ρυθμούς τους συστήματος. Δηλαδή το πως μπορεί να διασφαλιστεί ότι η τοποθέτηση του σταθεροποιητή παρότι θα σταθεροποιήσει τον ρυθμό για τον οποίο σχεδιάστηκε, δεν θα επιδράσει αρνητικά στους υπόλοιπους ρυθμούς. Στην βιβλιογραφία αναφέρονται παραδείγματα [CIG96] πραγματικών συστημάτων όπου η αλλαγή σημείου λειτουργίας, η αλληλεπίδραση με άλλους σταθεροποιητές ισχύος ή APT ή ρυθμιστές στροφών (ΡΣ), ή οι μεταβολές στο ίδιο το σύστημα μπορούν να καταστήσουν ένα σταθεροποιητή ισχύος (για χαμηλής συχνότητας ταλαντώσεις) αναποτελεσματικό αν δεν έχει σχεδιαστεί ικανοποιητικά.

Στα πλαίσια των θεμάτων που περιγράφησαν παραπάνω, και στο ανοιχτό ακόμα πρόβλημα της σχεδίασης σταθεροποιητών για ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας, έχουν συγγραφεί αρκετές εργασίες οι οποίες προσεγγίζουν το θέμα με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, χρησιμοποιώντας μια σειρά εργαλείων και θεωριών. Οι εργασίες αυτές είναι πολυάριθμες, και στα πλαίσια της παρούσας διατριβής θα γίνει εκτενής αλλά όχι πλήρης αναφορά τους. Το κέντρο των εργασιών αυτών είναι η αντιμετώπιση των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων. Αυτό διότι, η ολοένα μεγαλύτερη χρήση διασυνδέσεων έχει φέρει στο προσκήνιο τους ρυθμούς αυτούς, οι οποίοι αποτελούν περιοριστικό παράγοντα στην μεταφορά ισχύος μεταξύ περιοχών. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την σταθεροποίηση των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων έχει ως βάση την ανάλυση των ιδιοτιμών μέσω της γραμμικοποίησης του συστήματος.

Καταρχήν, η δυνατότητα χρήσης απομακρυσμένων σημάτων (*wide area measurements, global signals*), για την απόσβεση των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων, βελτιώνει σημαντικά την λειτουργία των σταθεροποιητών ισχύος και ενισχύει σημαντικά τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ανάλυσης ιδιοτιμών. Με βάση την δυνατότητα αυτή επιλέγονται σήματα με μεγάλη παρατηρησιμότητα των διασυνδεδετικών ρυθμών και γεννήτριες με την μεγαλύτερη ελεγχιμότητα των ρυθμών αυτών. Μία πρώτη εργασία που θέτει το θέμα σχεδίασης διάταξης σταθεροποίησης με ελεγκτή πολλαπλών εισόδων και εξόδων για την αύξηση της απόσβεσης διασυνδεδετικών ταλαντώσεων είναι η [GMK89]. Αν και δεν εντάσσεται αυστηρά στην κατηγορία των σταθεροποιητών ισχύος με απομακρυσμένα σήματα, η βασική ιδέα που περιγράφεται είναι αυτή της επιλογής και η χρήσης διαφόρων σημάτων ως εισόδους και εξόδους της διάταξης σταθεροποίησης με βάση την ελεγχιμότητα και την παρατηρησιμότητα. Μία από τις πρώτες εργασίες που έθεσε το θέμα της χρήσης των απομακρυσμένων μετρήσεων (μονάδες μέτρησης

φασιθετών) για την βελτίωση της ευστάθειας των συστημάτων μεταφοράς είναι η [KGH01]. Στην εργασία αυτή γίνεται εφαρμογή της χρήσης των σημάτων αυτών στο ηλεκτρικό σύστημα του Κεμπέκ (Καναδάς). Όσον αφορά τις εργασίες που δημοσιεύτηκαν τα τελευταία χρόνια, στην εργασία [ZAB08] αναπτύσσεται μια συστηματική διαδικασία σχεδίασης διάταξης απόσβεσης για διασυνδεδετικές ταλαντώσεις, με έμφαση στην επιλογή του σήματος εισόδου. Για την επιλογή αυτή χρησιμοποιείται η γεωμετρική τεχνική μέτρησης ελεγχιμότητας και παρατηρησιμότητας η οποία εισήχθη στην εργασία [HAE88]. Στην εργασία [HEK08] πραγματοποιείται σύγκριση της γεωμετρικής μεθόδου, με την μέθοδο των ολοκληρωτικών υπολοίπων για την επιλογή απομακρυσμένων σημάτων για την σταθεροποίηση των ρυθμών. Στην εργασία [PAMM11] παρουσιάζεται μια συμπληρωματική διάταξη απόσβεσης ταλαντώσεων ισχύος βασισμένη στα απομακρυσμένα σήματα για δίκτυα στα οποία εμπεριέχονται και γραμμές συνεχούς ρεύματος. Στα πλαίσια αυτά μελετά εκτενώς τον ρόλο και την κρισιμότητα της χρονικής υστέρησης ή και της απώλειας των απομακρυσμένων σημάτων σε σχέση με την ευστάθεια του συστήματος και την καλή λειτουργία του σταθεροποιητή.

Εκτός της χρήσης των απομακρυσμένων μετρήσεων, έχουν συγγραφεί εργασίες που διαπραγματεύονται την χρήση προσαρμοστικών (*adaptive*) σταθεροποιητών [YKK02], [SYI06]. Στην προσέγγιση αυτή ανά μικρά χρονικά διαστήματα, υπολογίζονται οι ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου συστήματος, καθώς και η ευαισθησία του πίνακα κατάστασης ως προς το κέρδος του σταθεροποιητή και επαναπροσδιορίζονται οι παράμετροι του προσαρμοστικού σταθεροποιητή.

Τρίτη μεγάλη κατηγορία τεχνικών σχεδίασης είναι αυτές που χρησιμοποιούν τεχνικές βελτιστοποίησης. Στην εργασία [YOU99] υλοποιείται μέθοδος σχεδίασης σταθεροποιητή με διπλή είσοδο (ισχύς και συχνότητα), ο οποίος ρυθμίζεται βάση της ευαισθησίας του πίνακα κατάστασης του γραμμικοποιημένου μοντέλου. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε πολλαπλά σημεία λειτουργίας τα οποία σταθμίζονται με έναν πίνακα βαρών, βάση της απόσβεσης του προς σταθεροποίηση ρυθμού. Επίσης, στην εργασία [ERB04] η σχεδίαση βασίζεται στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης η οποία ενσωματώνει στοιχεία του συστήματος για πολλαπλά σημεία λειτουργίας. Ο σχεδιαζόμενος σταθεροποιητής ισχύος αποσβένει τοπικές και διασυνδεδετικές ταλαντώσεις.

Εκτός των παραπάνω εργασιών, τα τελευταία χρόνια ερευνήθηκε τόσο το ζήτημα της διαδικασίας σχεδίασης όσο και η ίδια η δομή του σταθεροποιητή. Στην [KGT05] προτείνεται ένας νέος σταθεροποιητής πολλαπλών εισόδων σαν επέκταση του σταθεροποιητή PSS2B της βιβλιοθήκης του λογισμικού πακέτου PSS/E. Με τον σταθεροποιητή που προτείνεται στην [KGT05] είναι δυνατός ο καθορισμός διαφορετικών κερδών και φάσεων αντιστάθμισης, για διαφορετικές περιοχές συχνότητας, βελτιώνοντας την λειτουργία του και την απόσβεση που εισάγει στους ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς. Ωστόσο η ρύθμιση του κέρδους και της φάσης αντιστάθμισης περιλαμβάνει συμβιβασμούς μεταξύ διαφορετικών ρυθμών.

Στην εργασία [ZCH12] προτείνεται η εισαγωγή ενός επιπλέον φίλτρου στον σταθεροποιητή προκειμένου να διαμορφωθεί ένα σήμα το οποίο σχετίζεται αποκλειστικά με τον προς σταθεροποίηση ρυθμό. Η σχεδίαση ενός τέτοιου σταθεροποιητή εξασφαλίζει ότι με κατάλληλη ρύθμιση των φίλτρων, οι υπόλοιποι ρυθμοί δεν θα επηρεάζονται, και συνεπώς απαλείφεται το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε στο μοντέλο του ηλεκτρικού συστήματος της Κίνας με θετικά αποτελέσματα.

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των βρόχων ελέγχου σημειώνονται και στην εργασία [DLO10] η οποία επικεντρώνει στην αλληλεπίδραση μεταξύ APT και σταθεροποιητών, προτείνοντας μια διαδικασία συνδυασμένης σχεδίασης των δύο αυτών βρόχων. Στην εργασία αυτή σημειώνεται ότι η τοποθέτηση σταθεροποιητή μπορεί να επηρεάσει την μεταβατική ευστάθεια και την λειτουργία του APT. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στο μοντέλο του Νότιου συστήματος της Βραζιλίας και

στα αποτελέσματα φαίνεται ότι βελτιώνεται τόσο η ταλαντωτική όσο και η μεταβατική ευστάθεια του συστήματος. Ειδικότερα για την αλληλεπίδραση του βρόχου διέγερσης και του σταθεροποιητή σημειώνονται η εργασία [NOV01] και η διατριβή [NOM05]. Τέλος, γενικότερα σε σχέση με την αλληλεπίδραση των διατάξεων ελέγχου των ΣΗΕ σημειώνεται η έκθεση [CIG00].

Στην εργασία [JPM10] παρουσιάζεται μια μέθοδος για την σχεδίαση εύρωστου σταθεροποιητή βασισμένη στον κωνικό προγραμματισμό. Η μέθοδος αυτή θεωρεί μια σειρά σεναρίων λειτουργίας του συστήματος και βασίζεται στον γεωμετρικό τόπο ριζών. Οι ασταθείς ή ασθενώς αποσβενόμενοι ρυθμοί μετακινούνται σε μια κωνική περιοχή του μιγαδικού επιπέδου, εξασφαλίζοντας ουσιαστικά μια ελάχιστη απόσβεση.

Στην εργασία [GUS10] προτείνεται μια αποκεντρωμένη μέθοδος σχεδίασης σταθεροποιητή. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στο μοντέλο Heffron-Phillips, με την διαφορά ότι σαν αναφορά θεωρείται η δευτερεύουσα (υψηλή) τάση του Μ/Σ ανύψωσης της γεννήτριας αντί για τον άπειρο ζυγό. Αποτέλεσμα είναι η αντίδραση του Μ/Σ να αποκτά το ρόλο της ισοδύναμης αντίδρασης με βάση την οποία διασυνδέεται η γεννήτρια με το εξωτερικό σύστημα και τελικά οι παράμετροι του ισοδύναμου μοντέλου πάνω στο οποίο θα σχεδιαστεί ο σταθεροποιητής να είναι ανεξάρτητες του εξωτερικού συστήματος. Στην βάση του συστήματος γεννήτριας-άπειρου ζυγού στηρίζεται και η εργασία [LYK04]. Στην εργασία αυτή προτείνεται μια μέθοδος βασισμένη σε δύο μοντέλα γεννήτριας άπειρου ζυγού, τα οποία προκύπτουν μέσω της θεώρησης ισοδύναμων συνεκτικών περιοχών ενός ΣΗΕ πολλαπλών γεννητριών.

Στην εργασία [CKW03] προτείνεται μια συστηματική μέθοδος για την σχεδίαση σταθεροποιητών χρησιμοποιώντας την διαδικασία της  $H_\infty$ . Η δομή της ανατροφοδότησης περιγράφεται από την διαδικασία αυτή και δημιουργούνται κατάλληλες διατάξεις ανατροφοδότησης για την αύξηση της απόσβεσης των ταλαντώσεων.

Στις εργασίες [BWC00], [GIV04] πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μεθόδων σχεδίασης σταθεροποιητών.

Ένα επιπλέον στοιχείο των σύγχρονων ΣΗΕ το οποίο επηρεάζει τις τεχνικές αντιμετώπισης των διασυνδετικών ταλαντώσεων είναι η εγκατάσταση διασυνδέσεων συνεχούς ρεύματος. Οι μετατροπείς που βρίσκονται στα άκρα της διασύνδεσης συνεχούς ρεύματος, μπορούν με κατάλληλους ελεγκτές να συμβάλουν στην απόσβεση των ρυθμών αυτών. Η εργασία [PMAM11] -η οποία αναφέρθηκε και παραπάνω- μελετά την σχεδίαση σταθεροποιητών ισχύος με την χρήση των μετατροπέων για σταθεροποίηση. Επίσης στην εργασία [MAK06] έχει μελετηθεί η χρήση των FACTS (Flexible AC Transmission Systems) για την απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος. Τέλος στην [CHP04] προτείνεται μια μέθοδος πολυμεταβλητού ελέγχου (*multivariable control*) για την σχεδίαση σταθεροποιητών για τις διασυνδετικές ταλαντώσεις χρησιμοποιώντας τόσο τοπικά όσο και απομακρυσμένα σήματα. Η σχεδιαζόμενη αυτή διάταξη προσαρμόζεται σε διατάξεις TCSC (Thyristor-controlled series capacitor).

Στα πλαίσια καινοτόμων τεχνικών σχεδίασης σταθεροποιητών οι οποίες ξεφεύγουν από τα κλασσικά πεδία των μαθηματικών με τα οποία αντιμετωπίζονται οι διασυνδετικές ταλαντώσεις αναφέρεται η εργασία [HAF02] στην οποία γίνεται χρήση γενετικών αλγορίθμων, η [CWT03] στην οποία γίνεται χρήση πιθανοτικής ανάλυσης, και η [KHG07] στην οποία εφαρμόζεται η ασαφής λογική.

### 1.8.5. Μοντέλα διατάξεων ΣΗΕ

Τέλος στα πλαίσια της επισκόπησης της βιβλιογραφίας αναφέρονται εργασίες σχετικά με την μοντελοποίηση των διατάξεων των ΣΗΕ. Η επιστημονική έρευνα στον τομέα αυτό έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μοντέλων που προσομοιώνουν ικανοποιητικά τις διατάξεις αυτές. Το περαιτέρω

ερευνητικό ενδιαφέρον σχετίζεται με την απλοποίησή τους και την χρήση των απλοποιημένων μοντέλων σε μελέτες ευστάθειας.

Σημειώνονται για την μοντελοποίηση των θερμικών σταθμών παραγωγής και αυτόματων ρυθμιστών τάσεως η εργασία [FCDS08], τα βιβλία [KUN94], [BΠ11], και το εγχειρίδιο του προγράμματος PSS/E [PSS-M]. Ειδικότερα σε σχέση με τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς σημειώνονται επιπλέον τα εξής άρθρα [JJM94], [LZZ06], [FCDS08]. Τέλος σε σχέση με τις γεννήτριες σημειώνεται το σύγγραμμα [KRA95].

## 1.9. Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας καταρχήν είναι η ανάλυση των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων και η ανάπτυξη απλοποιημένων μοντέλων για τη μελέτη των ταλαντώσεων αυτών. Οι ταλαντώσεις αυτές αποχτούν ιδιαίτερη σημασία ειδικότερα τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της ολοένα και διευρυνόμενης διασύνδεσης μεταξύ των ηλεκτρικών συστημάτων αλλά και λόγω της ανάπτυξης του εμπορίου ηλεκτρικής ενέργειας σε διακρατικό επίπεδο, γεγονός που αυξάνει τις διασυννοριακές ανταλλαγές ενέργειας. Η πραγματικότητα αυτή σε συνδυασμό με την δυσκολία υλοποίησης νέων έργων μεταφοράς τόσο λόγω κόστους όσο και λόγω περιβαλλοντικών περιορισμών οδηγεί τους διαχειριστές των συστημάτων μεταφοράς στην λειτουργία των δικτύων στα όρια ασφαλείας. Η μελέτη των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων αποκτά μεγάλη σημασία τόσο για την διασφάλιση της ευσταθούς λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων, όσο και διότι αποτελεί έναν από τους παράγοντες που περιορίζουν τις διασυννοριακές συναλλαγές ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, βασικό αντικείμενο της διατριβής αυτής είναι η ανάπτυξη απλοποιημένων μοντέλων ΣΗΕ για την μελέτη των ταλαντώσεων αυτών και την σχεδίαση σταθεροποιητών ισχύος. Η μελέτη τέτοιων φαινομένων, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως γίνεται με δύο βασικές προσεγγίσεις.

Η πρώτη, η οποία κατά βάση χρησιμοποιείται και αποτελεί την πιο εξελιγμένη τεχνική περιλαμβάνει την λεπτομερή παράσταση του συστήματος. Η μέθοδος αυτή αναπαριστά πλήρως όλα τα δυναμικά φαινόμενα του ΣΗΕ δίνοντας ακριβείς εκτιμήσεις σχετικά με την ευστάθεια και τις αποκρίσεις σε διαταραχές. Ωστόσο τα λεπτομερή μοντέλα μειονεκτούν λόγω της μεγάλης τάξης τους και συνεκδοχικά των υπολογισμών που απαιτούν. Επιπλέον τέτοια μοντέλα απαιτούν πολλά δεδομένα σχετικά με τις διατάξεις των ΣΗΕ τα οποία ενδεχομένως να μην είναι διαθέσιμα. Τέλος, είναι δυνατόν, λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων που απαιτούνται, να εμφανιστούν τοπικά προβλήματα λόγω κακής ρύθμισης των παραμέτρων μιας διάταξης, τα οποία είναι δύσκολο να εντοπιστούν.

Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει την εφαρμογή της θεωρίας των συνεκτικών περιοχών, την συγχώνευση των γεννητριών και την αντικατάστασή τους με ισοδύναμες σύγχρονες γεννήτριες με ισοδύναμες διατάξεις ελέγχου. Η μέθοδος αυτή μειώνει σημαντικά την τάξη μεγέθους του προβλήματος. Ωστόσο μειονεκτεί διότι η θεώρηση ισοδύναμων γεννητριών απλοποιεί σημαντικά το δίκτυο μεταφοράς και αγνοεί τα δυναμικά φαινόμενα που προκαλούνται από τις διατάξεις των ΣΗΕ (ρυθμιστές στροφών, APT, γεννήτριες) τα οποία μπορεί να συμβάλουν σημαντικά στην διαμόρφωση των διασυνδεδετικών ρυθμών.

Βασικό αντικείμενο της διατριβής είναι η διαμόρφωση μιας νέας προσέγγισης για την μελέτη των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων με την επέκταση της προσέγγισης της οιονεί στατικής μεταβολής. Στα πλαίσια αυτά απαλείφονται οι τοπικές ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις με την χρήση της θεωρίας συνεκτικών περιοχών, καθώς και απλοποιούνται τα μοντέλα των διατάξεων των ΣΗΕ. Στην προσέγγιση αυτή θα πρέπει να διατηρείται τόσο η δομή του συστήματος μεταφοράς όσο και η ανεξάρτητη δομή των διατάξεων των ΣΗΕ έτσι ώστε παράλληλα με την μείωση της τάξης μεγέθους του προβλήματος να επιτυγχάνεται ακριβέστερη προσέγγιση των

διασυνδετικών ρυθμών. Στα πλαίσια αυτά αναπτύχθηκε το λογισμικό πακέτο ROM-E/Sim το οποίο υλοποιεί την προτεινόμενη προσέγγιση.

Σε ένα δεύτερο επίπεδο, αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη της συμβολής των ρυθμιστών στροφών στις διασυνδετικές ταλαντώσεις. Παρότι στην μελέτη των τοπικών ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων οι διατάξεις αυτές μπορεί να αγνοηθούν, η επίδρασή τους στις διασυνδετικές ταλαντώσεις μπορεί να είναι σημαντική και συνεπώς να μην είναι δυνατή η απαλοιφή τους. Έμφαση δίνεται στην επίδραση των ελεγκτών νεκρής ζώνης οι οποίοι υπάρχουν στους ρυθμιστές στροφών των ατμοστροβιλικών μονάδων.

Τέλος, αντικείμενο της διατριβής είναι η μελέτη του συστήματος της Νοτιο-Ανατολικής Ευρώπης (πρώην ζώνη II της UCTE) και πιο συγκεκριμένα του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού που εμφανίζεται μεταξύ της περιοχής αυτής και του υπόλοιπου ευρωπαϊκού συστήματος. Ειδικότερα, μελετάται το στιγμιότυπο της 1-5-2005 όπου ο ρυθμός αυτός διεγέρθηκε προκαλώντας παρατεταμένες ταλαντώσεις ισχύος. Στα πλαίσια αυτά, αντικείμενο της διατριβής είναι επίσης η σχεδίαση σταθεροποιητών ισχύος για τις γεννήτριες του ελληνικού συστήματος, για την αύξηση της απόσβεσης του ρυθμού αυτού.

Η παρούσα διατριβή αυτή αποτελείται από οκτώ κεφάλαια και διαρθρώνεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται οι αριθμητικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στην διατριβή και ενσωματώθηκαν στο λογισμικό που αναπτύχθηκε. Στην πρώτη ενότητα αναλύεται η τεχνική παράστασης αραιών πινάκων. Στην δεύτερη η χρήση της τριγωνικής (LU) παραγοντοποίησης για την επίλυση γραμμικών συστημάτων. Στην τρίτη ενότητα περιγράφεται η τεχνική αναδιάταξης των γραμμών και στηλών του πίνακα για την ελαχιστοποίηση των μη μηδενικών στοιχείων των ψευδοδιαγώνιων πινάκων L, U. Στην συνέχεια περιγράφονται οι τεχνικές επιλεκτικού υπολογισμού ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων ενός γραμμικού συστήματος, ενώ στην πέμπτη ενότητα περιγράφονται οι τεχνικές επιλεκτικού υπολογισμού πολλαπλών ιδιοτιμών καθώς και η τεχνική του ταυτόχρονου υπολογισμού μέγιστων και ελάχιστων ιδιοτιμών. Τέλος, στην έκτη ενότητα περιγράφεται η εφαρμογή μεθόδων επιλεκτικού υπολογισμού ιδιοτιμών σε σύστημα αλγεβρικών-διαφορικών εξισώσεων.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι βασικότερες διατάξεις που αποτελούν ένα ΣΗΕ. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται οι τεχνικές περιγραφής των σύγχρονων γεννητριών. Για τον σκοπό αυτό στην πρώτη ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις και τρία μοντέλα γεννητριών. Το κλασικό μοντέλο που περιέχει δύο διαφορικές εξισώσεις (εσωτερικής γωνίας δρομέα και συχνότητα), το μοντέλο στο οποίο ενσωματώνεται και η δυναμική του πεδίου διέγερσης, ενώ τέλος το μοντέλο στο οποίο εκτός όλων των παραπάνω θεωρείται και τύλιγμα απόσβεσης στον δρομέα. Στην δεύτερη ενότητα αναλύονται τα συστήματα διέγερσης και περιγράφονται οι διάφοροι τύποι διατάξεων ρύθμισης τάσης. Πιο συγκεκριμένα περιγράφεται ένας τύπος ρυθμιστή τάσης με στρεφόμενο σύστημα συνεχούς ρεύματος και τρεις με εναλλασσόμενο. Στην τρίτη ενότητα περιγράφονται οι διατάξεις ρυθμιστών στροφών-στροβίλων για ατμοστροβιλικούς σταθμούς μιας και πολλαπλών βαθμίδων καθώς και υδροηλεκτρικών σταθμών. Στην τέταρτη ενότητα αναλύονται οι σταθεροποιητές ισχύος. Στην ενότητα αυτή περιγράφονται δύο βασικοί τύποι σταθεροποιητών και δύο παραλλαγές τους. Ο ένας τύπος σταθεροποιητή που προτείνεται για την σταθεροποίηση διασυνδετικών ταλαντώσεων αποτελεί ένα συνδυασμένο σταθεροποιητή δύο κλάδων. Στην πέμπτη ενότητα αναλύονται τέσσερις τεχνικές σχεδίασης σταθεροποιητών που χρησιμοποιούνται στην διατριβή. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από μια τετριμμένη μέθοδο, προτείνονται νέες μέθοδοι σχεδίασης βασισμένες στα ολοκληρωτικά υπόλοιπα. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν σχεδίαση σταθεροποιητή για πολλαπλά σημεία λειτουργίας, σχεδίαση συνδυασμένου σταθεροποιητή για τοπικούς και διασυνδετικούς ρυθμούς και σχεδίαση σταθεροποιητή με βελτιστοποίηση αντικειμενικής συνάρτησης ως προς προδιαγραφές δοσμένες από τον σχεδιαστή.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται τα απλοποιημένα μοντέλα ΣΗΕ που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή. Καταρχήν στην πρώτη ενότητα γίνεται περιγραφή της οιονεί στατικής προσέγγισης για μελέτες ευστάθειας συχνότητας. Στην δεύτερη ενότητα γίνεται περιγραφή της επέκτασης της οιονεί στατικής προσέγγισης για τις διασυνδεδετικές ταλαντώσεις. Στην τρίτη ενότητα περιγράφεται η γενική δομή και οι μεταβλητές του συστήματος, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα του κεφαλαίου αναλύονται οι εξισώσεις του συστήματος. Στην τέταρτη ενότητα παρουσιάζονται οι εξισώσεις συστήματος η συνεκτικών περιοχών για το δίκτυο μεταφοράς και την έγχυση ισχύος των γεννητριών. Στην συνέχεια (πέμπτη ενότητα) διαμορφώνονται οι εξισώσεις για την συχνότητα της συνεκτικής περιοχής, στην έκτη ενότητα οι εξισώσεις μεταβολής της γωνίας αναφοράς κάθε συνεκτικής περιοχής, ενώ στην έβδομη παρουσιάζονται οι διαφορικές εξισώσεις για τις γεννήτριες. Τέλος στις ενότητες 4.8 έως 4.10 αναλύονται τα απλοποιημένα μοντέλα των ρυθμιστών τάσης, ρυθμιστών στροφών-στροβίλων που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3, καθώς και τα μοντέλα για τους σταθεροποιητές ισχύος.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται το λογισμικό πακέτο που αναπτύχθηκε για την μελέτη των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων. Καταρχήν παρατίθεται η βασική δομή των συναρτήσεων και των λειτουργιών του λογισμικού. Περιγράφεται η διαδικασία αρχικοποίησης του προβλήματος (δεύτερη ενότητα), ενώ στην συνέχεια η προσομοίωση διαταραχών (τρίτη ενότητα). Στην τέταρτη ενότητα περιγράφεται η γραμμικοποίηση του συστήματος και οι ρουτίνες για την πραγματοποίηση της ανάλυσης μικρών διαταραχών.

Στο Κεφάλαιο 6, έχοντας περιγράψει τόσο την προσέγγιση, όσο και το λογισμικό που αναπτύχθηκε για την μελέτη των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων παρατίθενται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προσέγγισης σε ένα δοκιμαστικό σύστημα. Στην πρώτη ενότητα περιγράφεται το δοκιμαστικό σύστημα. Στην δεύτερη ενότητα διερευνάται η επίδραση της παράστασης σύγχρονων γεννητριών στην ευστάθεια ταλαντώσεων. Στην τρίτη ενότητα υπολογίζεται το σφάλμα που εισάγεται στον υπολογισμό των ηλεκτρομηχανικών ρυθμών χαμηλής συχνότητας από την απαλοιφή των τοπικών ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Στην τέταρτη ενότητα διερευνάται το σφάλμα που εισάγεται από την απλοποίηση των APT και των ρυθμιστών στροφών-στροβίλων. Στις δύο τελευταίες ενότητες πραγματοποιείται σχεδίαση σταθεροποιητή για τον διασυνδεδετικό ρυθμό (για ένα και για πολλαπλά σημεία λειτουργίας) και ελέγχεται η ακρίβεια της διαδικασίας σχεδίασης.

Στο Κεφάλαιο 7 εφαρμόζεται η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στην διατριβή στο ηλεκτρικό σύστημα της Νότιο-Ανατολικής Ευρώπης (πρώην ζώνη II της UCTE). Στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου περιγράφεται το σύστημα αυτό. Στην δεύτερη ενότητα περιγράφεται το μελετούμενο σενάριο Balkans 2012, και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της απλοποιημένης και λεπτομερούς προσέγγισης. Στην τρίτη ενότητα γίνεται ανάλυση της ευαισθησίας του ευρωπαϊκού ρυθμού, ενώ στην τέταρτη ενότητα γίνεται σχεδίαση σταθεροποιητή για τον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό μεταξύ του ελληνικού και του αλβανικού συστήματος. Στην πέμπτη ενότητα περιγράφεται το μελετούμενο σενάριο Balkans 2005 το οποίο αποτελεί προσέγγιση του σημείου λειτουργίας της 1-5-2005, και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της απλοποιημένης και λεπτομερούς προσέγγισης. Στην έκτη ενότητα ελέγχεται η επίδραση του ελεγκτή νεκρής ζώνης των ρυθμιστών στροφών στον ευρωπαϊκό ρυθμό και αναπαράγεται η διαταραχή που εμφανίστηκε την 1-5-2005. Στην έβδομη ενότητα γίνεται σχεδίαση σταθεροποιητών για τις γεννήτριες του ελληνικού συστήματος. Στην όγδοη ενότητα αναλύεται μια διαταραχή στην οποία λόγω της λειτουργίας της νεκρής ζώνης χάνεται το σημείο ισορροπίας του συστήματος. Τέλος στην ένατη ενότητα υλοποιείται μια επιπλέον σχεδίαση σταθεροποιητών για τις γεννήτριες του ελληνικού συστήματος με βελτιστοποίηση.

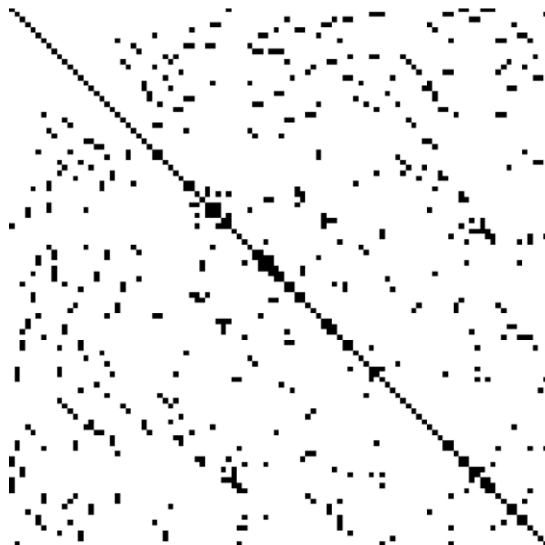
Στο Κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα συμπεράσματα και οι προοπτικές της εργασίας.



## 2. Αριθμητικές τεχνικές

### 2.1. Αραιοί πίνακες

Αραιοί πίνακες ονομάζονται οι πίνακες των οποίων τα μηδενικά στοιχεία κυριαρχούν σε σχέση με το σύνολο των στοιχείων του πίνακα [STB02]. Για παράδειγμα, μια σειρά σφαιρών που συνδέονται σειριακά ανά δύο με ελατήρια, καταλήγει σε έναν αραιό πίνακα κατάστασης. Αντίθετα αν κάθε σφαίρα συνδεόταν με τις περισσότερες υπόλοιπες σφαίρες, ο πίνακας κατάστασης θα προέκυπτε πυκνός. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται ένα παράδειγμα ενός αραιού πίνακα όπου με μαύρα στίγματα σημαίνονται τα μη μηδενικά στοιχεία.



Σχήμα 2.1: Μη μηδενικά στοιχεία αραιού πίνακα

Σε προβλήματα μεγάλων διαστάσεων συχνά απαντώνται αραιοί πίνακες. Ο πίνακας αγωγιμοτήτων του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα τυπικό τέτοιο παράδειγμα. Οι αραιοί πίνακες αποθηκεύονται και χρησιμοποιούνται από τα προγράμματα Η/Υ με ιδιαίτερες τεχνικές. Αυτό διότι η αποθήκευση τους με την μορφή πλήρων πινάκων απαιτεί πολλαπλάσια μνήμη και υπολογιστική ισχύ, γεγονός που αποκτά μεγαλύτερη σημασία όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις του προβλήματος. Οι τεχνικές αποθήκευσης αραιών πινάκων εξοικονομούν μνήμη, αλλά επίσης απλοποιούν την πολυπλοκότητα των πράξεων. Ειδικότερα, σε προβλήματα πολύ μεγάλων διαστάσεων, η επίλυση μπορεί να είναι πρακτικά αδύνατη αν οι υπολογισμοί επιχειρηθεί να γίνουν με την χρήση αλγορίθμων για πυκνούς πίνακες.

Δεν υπάρχει μια μοναδική τεχνική για την αποθήκευση των αραιών πινάκων. Στην βιβλιογραφία αναπτύσσονται διάφορες προσεγγίσεις, οι οποίες ωστόσο συνεχονται από μια ενιαία λογική. Η ενιαία αυτή λογική είναι η αποθήκευση της θέσης των μη μηδενικών στοιχείων του πίνακα και η χωριστή αποθήκευση της τιμής που αντιστοιχεί στην κάθε μη μηδενική εγγραφή. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε η τεχνική αποθήκευσης που περιγράφεται στην εργασία [KRYG82] η οποία αναφέρεται σε τετραγωνικούς πίνακες.

Για την αποθήκευση χρησιμοποιούνται τέσσερις πίνακες γραμμής. Ο αραιός πίνακας  $\mathbf{A}$  έχει διαστάσεις  $n \times n$  και  $k$  μη μηδενικά στοιχεία.

Ο πρώτος πίνακας αποθηκεύει την τιμή των διαγώνιων στοιχείων του  $\mathbf{A}$  σε ένα διάνυσμα διάστασης  $n \times 1$ .

$$\mathbf{A}_d = \left[ \underbrace{a_{11} \quad a_{22} \quad \dots \quad a_{nn}}_n \right]^T \quad (2.1)$$

Οι επόμενοι δύο πίνακες γραμμής αποθηκεύουν την θέση των μη μηδενικών-μη διαγώνιων στοιχείων. Η λογική είναι ότι σαρώνοντας σειριακά κάθε γραμμή του  $\mathbf{A}$ , κάθε μη μηδενικό-μη διαγώνιο στοιχείο αποκτά έναν αύξοντα αριθμό, με το τελευταίο στοιχείο να έχει αριθμό  $k$ . Στην παρακάτω εξίσωση φαίνεται ένα παράδειγμα ενός αραιού πίνακα διάστασης  $5 \times 5$  όπου με  $x$  συμβολίζονται τα μη μηδενικά-μη διαγώνια στοιχεία, ενώ ως δείκτης μπαίνει ο αύξων αριθμός του κάθε στοιχείου.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & x_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & x_2 \\ x_3 & 0 & a_{33} & x_4 & 0 \\ 0 & x_5 & 0 & a_{44} & 0 \\ x_6 & 0 & x_7 & 0 & a_{55} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Οι θέσεις των μη μηδενικών στοιχείων προσδιορίζονται με τον εξής τρόπο. Στον πίνακα γραμμής  $I_{ik}$ , διάστασης  $1 \times (n+1)$  σημειώνεται ο αύξων αριθμός του πρώτου μη μηδενικού, μη διαγώνιου στοιχείου της κάθε γραμμής. Το πρώτο στοιχείο έχει εξ' ορισμού τιμή μονάδα, ενώ το  $n+1$  στοιχείο, έχει τιμή  $k+1$ .

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα της (2.2) προκύπτει:

$$I_{ik} = \left[ \underbrace{1 \quad 2 \quad 3 \quad 5 \quad 6 \quad 8}_{n+1} \right]^T \quad (2.3)$$

Ο δεύτερος πίνακας ( $I_{im}$ ), διάστασης  $1 \times k$  δίνει την στήλη του  $i$ -οστού μη μηδενικού-μη διαγώνιου στοιχείου. Η διάστασή του είναι  $k$ , όσα και τα μη μηδενικά - μη διαγώνια στοιχεία του  $\mathbf{A}$ .

$$I_{im} = \left[ \underbrace{\begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 \\ 3 & 5 & 1 & 4 & 2 & 1 & 3 \end{matrix}}_k \right]^T \quad (2.4)$$

Με το ζεύγος των δύο αυτών πινάκων προσδιορίζεται μονοσήμαντα η θέση του κάθε μη μηδενικού μη διαγώνιου στοιχείου. Κάθε τέτοιο στοιχείο, βρίσκεται σε συγκεκριμένη στήλη βάση του  $I_{im}$ . Η γραμμή στην οποία ανήκει βρίσκεται εύκολα με τον  $I_{ik}$ , ο οποίος ουσιαστικά ορίζει ποια στοιχεία βρίσκονται σε κάθε γραμμή.

Τέλος, η τιμή κάθε μη μηδενικού-μη διαγώνιου στοιχείου του  $\mathbf{A}$  δίνεται με το διάνυσμα  $\mathbf{A}_{od}$  (διάστασης  $1 \times k$ ), στον οποίο η αντιστοιχία των στοιχείων είναι ίδια με αυτή που υπάρχει στον πίνακα  $I_{im}$ .

$$\mathbf{A}_{\text{od}} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 \\ \underbrace{a_{13} & a_{25} & a_{31} & a_{34} & a_{42} & a_{51} & a_{53}}_k \end{bmatrix}^T \quad (2.5)$$

## 2.2. Επίλυση γραμμικού συστήματος με χρήση της τριγωνικής παραγοντοποίησης (LU)

Η επίλυση ενός γραμμικού συστήματος αποτελεί ένα σχετικά απλό πρόβλημα, το οποίο στο βαθμό που ο πίνακας  $\mathbf{A}$  αντιστρέφεται, έχει μια και μοναδική λύση. Η γενική διατύπωση του προβλήματος φαίνεται στην εξίσωση:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (2.6)$$

και η λύση είναι:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b} \quad (2.7)$$

Ωστόσο στην διαδικασία επίλυσης του συστήματος υιοθετούνται διάφορες προσεγγίσεις οι οποίες διαφέρουν ως προς την υπολογιστική ισχύ που απαιτούν για την επίλυση του προβλήματος. Η λύση μέσω της (2.7), δηλαδή μέσω του υπολογισμού του αντίστροφου πίνακα  $\mathbf{A}$  αντιστοιχεί σε προβλήματα μικρών διαστάσεων, όπου η αντιστροφή είναι μια σχετικά απλή διαδικασία. Σε προβλήματα περισσότερων μεταβλητών και εξισώσεων δεν είναι απαραίτητο να υπολογίζεται ο αντίστροφος πίνακας. Στην παρούσα διατριβή, για την επίλυση των συστημάτων γραμμικών εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε η τριγωνική παραγοντοποίηση [GMW91].

Η τεχνική αυτή συνίσταται στην αντικατάσταση του πίνακα  $\mathbf{A}$  από τους πίνακες  $\mathbf{L}, \mathbf{U}$  οι οποίοι είναι κάτω και άνω τριγωνικοί πίνακες αντίστοιχα, για τους οποίους ισχύει ότι

$$\mathbf{A} = \mathbf{LU} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \ell_{21} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \ell_{31} & \ell_{32} & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \ell_{n1} & \ell_{n2} & \ell_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & \dots & u_{1n} \\ 0 & u_{22} & u_{23} & \dots & u_{2n} \\ 0 & 0 & u_{33} & \dots & u_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & u_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

ή ισοδύναμα

$$a_{ij} = \sum_{k=1, \min(i,j)} \ell_{ik} u_{kj} \quad (2.10)$$

Για τον υπολογισμό των στοιχείων των πινάκων  $\mathbf{L}, \mathbf{U}$  η διαδικασία ξεκινά από την πρώτη γραμμή των παραμέτρων των πινάκων αυτών και συνεχίζει για τα στοιχεία των επόμενων γραμμών:

Για την πρώτη γραμμή του πίνακα  $\mathbf{A}$  προκύπτουν  $n$  γραμμικές εξισώσεις με  $n$  αγνώστους, (την πρώτη γραμμή του πίνακα  $\mathbf{U}$ ).

$$u_{1k} = a_{1k} \quad k=1, n \quad (2.11)$$

Δεδομένων των υπολογισμών της πρώτης γραμμής, για τον υπολογισμό της δεύτερης, προκύπτει ένας άγνωστος του πίνακα  $\mathbf{L}$  και  $n-1$  του πίνακα  $\mathbf{U}$ . Οι εξισώσεις που προκύπτουν

δίνουν λύση -στον βαθμό που το διαγώνιο στοιχείο του πίνακα  $\mathbf{U}$  είναι μη μηδενικό-, καθώς αποτελούν (με την εξαίρεση του πρώτου στοιχείου), έναν γραμμικό συνδυασμό των γνωστών μεταβλητών:

$$\begin{bmatrix} a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ \dots \\ a_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{21}u_{11} \\ l_{21}u_{12} + u_{22} \\ l_{21}u_{13} + u_{23} \\ \dots \\ l_{21}u_{1n} + u_{2n} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} l_{21} \\ u_{22} \\ u_{23} \\ \dots \\ u_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{21}/u_{11} \\ a_{22} - l_{21}u_{12} \\ a_{23} - l_{21}u_{13} \\ \dots \\ a_{2n} - l_{21}u_{1n} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Με την ίδια λογική, στην  $i$ -οστή γραμμή προστίθενται  $i-1$  άγνωστοι του πίνακα  $\mathbf{L}$ , και  $n+1-i$  άγνωστοι του πίνακα  $\mathbf{U}$ . Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εξίσωση οι πίνακες  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{U}$  ορίζονται μονοσήμαντα.

Για τον υπολογισμό των στοιχείων των πινάκων  $\mathbf{L}, \mathbf{U}$  με βάση την (2.9), για την  $i$ -οστή γραμμή προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} a_{i1} \\ \dots \\ a_{ij} \Big|_{j < i} \\ \dots \\ a_{ii} \\ \dots \\ a_{ij} \Big|_{j > i} \\ \dots \\ a_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{i1}u_{11} \\ \dots \\ \sum_{k=1, j} l_{ik}u_{kj} \\ \dots \\ u_{ii} + \sum_{k=1, i-1} l_{ik}u_{kj} \\ \dots \\ u_{ij} + \sum_{k=1, i-1} l_{ik}u_{kj} \\ \dots \\ u_{in} + \sum_{k=1, i-1} l_{ik}u_{kj} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} l_{i1} \\ \dots \\ l_{ij} \Big|_{j < i} \\ \dots \\ u_{ii} \\ \dots \\ u_{ij} \Big|_{j > i} \\ \dots \\ u_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{i1}/u_{11} \\ \dots \\ \left( a_{ij} - \sum_{k=1, j-1} l_{ik}u_{kj} \right) / u_{jj} \\ \dots \\ a_{ii} - \sum_{k=1, i-1} l_{ik}u_{kj} \\ \dots \\ a_{ij} - \sum_{k=1, i-1} l_{ik}u_{kj} \\ \dots \\ a_{in} - \sum_{k=1, i-1} l_{ik}u_{kj} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Ο μετασχηματισμός του πίνακα  $\mathbf{A}$  σε γινόμενο τριγωνικών πινάκων αποτελεί μέσω για την επίλυση του αρχικού προβλήματος (2.6). Το αρχικό πρόβλημα μπορεί να αναδιατυπωθεί:

$$\mathbf{L}\mathbf{U}\mathbf{x} = \mathbf{b} \Rightarrow \mathbf{L}(\mathbf{U}\mathbf{x}) = \mathbf{b} \Rightarrow \mathbf{L}\mathbf{y} = \mathbf{b} \quad (2.14)$$

Ουσιαστικά δηλαδή το πρόβλημα (2.6) μετασχηματίζεται σε δύο συστήματα εξισώσεων με τριγωνικούς πίνακες:

$$\mathbf{L}\mathbf{y} = \mathbf{b} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{U}\mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (2.16)$$

Η λύση της (2.15) είναι απλή διότι ο  $\mathbf{L}$  είναι κάτω τριγωνικός πίνακας (ευθεία αντικατάσταση).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ l_{21} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ l_{31} & l_{32} & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{n1} & l_{n2} & l_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 - l_{21}y_1 \\ b_3 - l_{31}y_1 - l_{32}y_2 \\ \dots \\ b_n - \sum_{i=1, n-1} l_{ni} y_i \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Δεδομένων των  $y$ , η λύση της (2.16) είναι επίσης απλή διότι ο  $U$  είναι άνω τριγωνικός πίνακας (αντίστροφη αντικατάσταση):

$$\begin{bmatrix} u_{1,1} & \dots & u_{1,n-2} & u_{1,n-1} & u_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & u_{n-2,n-2} & u_{n-2,n-1} & u_{n-2,n} \\ 0 & \dots & 0 & u_{n-1,n-1} & u_{n-1,n} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & u_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_{n-2} \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_{n-2} \\ y_{n-1} \\ y_n \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_{n-2} \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( y_1 - \sum_{i=2,n} u_{1,i} x_i \right) / u_{1,1} \\ \dots \\ \left( y_{n-2} - u_{n-2,n-1} x_{n-1} - u_{n-2,n} x_n \right) / u_{n-2,n-2} \\ \left( y_{n-1} - u_{n-1,n} x_n \right) / u_{n-1,n-1} \\ y_n / u_{n,n} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Οι σχέσεις (2.17)-(2.18) αποτελούν την λύση του γραμμικού συστήματος με ευθεία και αντίστροφη αντικατάσταση, χωρίς τον υπολογισμό του αντίστροφου πίνακα  $A$ .

### 2.3. Αναδιάταξη πίνακα

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η υλοποιούμενη διαδικασία αναδιάταξης (*pivoting*) του πίνακα του γραμμικού προβλήματος της παραγράφου 2.2. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται συχνά προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απαραίτητοι υπολογισμοί, χωρίς ωστόσο να αναφέρεται αποκλειστικά σε μια τεχνική [DBA74].

Στην παρούσα διατριβή υιοθετήθηκε η τεχνική η οποία αναλύεται στην συνέχεια. Αν στην πρώτη γραμμή του πίνακα  $A$  υπάρχουν  $m_1$  μη μηδενικά στοιχεία, είναι προφανές ότι από την (2.11) θα προκύψουν  $m_1$  μη μηδενικά στοιχεία για την πρώτη γραμμή του πίνακα  $U$ . Αυτά τα στοιχεία εισέρχονται στην (2.12), όπου μαζί με τα μη μηδενικά στοιχεία ( $m_2$ ) της δεύτερης γραμμής του  $A$ , προκύπτουν στην γενική περίπτωση (αγνοώντας την περίπτωση η αφαίρεση να δίνει μηδενικό αποτέλεσμα) περισσότερα μη μηδενικά στοιχεία για την δεύτερη γραμμή των  $L$ ,  $U$ . Ο αριθμός αυτών των μη μηδενικών στοιχείων είναι  $m_1+m_2$  μείον τις περιπτώσεις όπου και οι δύο όροι της διαφοράς στην (2.12) είναι μη μηδενικοί.

Η διαδικασία αυτή είναι σωρευτική, δηλαδή όσο μεγαλώνει ο αύξων αριθμός της υπολογιζόμενης γραμμής, τόσο αυξάνονται σε πλήθος οι μη μηδενικοί όροι των αθροισμάτων της (2.13) διότι «κληρονομούνται» και τα μη μηδενικά στοιχεία των προηγούμενων γραμμών.





$$|\lambda_1| > |\lambda_2| > \dots > |\lambda_n| \quad (2.24)$$

Εφόσον τα ιδιοδιάνυσματα ορίζουν έναν διανυσματικό χώρο (στην περίπτωση των διακριτών ιδιοτιμών) κάθε διάνυσμα – άρα και η αρχική εκτίμηση για το ζητούμενο ιδιοδιάνυσμα - μπορεί να γραφεί όπως στην παρακάτω εξίσωση:

$$\mathbf{u}^{(0)} = c_1 \mathbf{q}_1 + c_2 \mathbf{q}_2 + \dots + c_n \mathbf{q}_n \quad (2.25)$$

όπου  $\mathbf{q}_i$  το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή  $i$

$c_i$  βαθμωτοί συντελεστές

$\mathbf{u}^{(0)}$  τυχαίο διάνυσμα-αρχική εκτίμηση για το ζητούμενο ιδιοδιάνυσμα

Αν το διάνυσμα αυτό πολλαπλασιαστεί με τον πίνακα κατάστασης  $\mathbf{A}$  του συστήματος, τότε προκύπτει με βάση και την σχέση (2.22):

$$\mathbf{u}^{(1)} = \mathbf{A}\mathbf{u}^{(0)} = \sum_{i=1,n} c_i \mathbf{A}\mathbf{q}_i = \sum_{i=1,n} c_i \lambda_i \mathbf{q}_i \quad (2.26)$$

Αντίστοιχα ισχύει:

$$\mathbf{u}^{(2)} = \mathbf{A}\mathbf{u}^{(1)} = \sum_{i=1,n} c_i \lambda_i^2 \mathbf{q}_i \quad (2.27)$$

Έπειτα από  $k$  επαναλήψεις και βάση της (2.26), για μεγάλες τιμές του  $k$ , προκύπτει ότι:

$$\mathbf{u}^{(k)} = \mathbf{A}\mathbf{u}^{(k-1)} = \sum_{i=1,n} c_i \lambda_i^k \mathbf{q}_i \approx c_1 \lambda_1^k \mathbf{q}_1 \quad (2.28)$$

δεδομένου ότι η  $\lambda_1$  είναι η μεγαλύτερη κατά μέτρο ιδιοτιμή

Αποδεικνύεται δηλαδή ότι η επαναληπτική αυτή διαδικασία, καταλήγει στον υπολογισμό ενός διανύσματος, το οποίο είναι ανάλογο του ιδιοδιανύσματος που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή με το μεγαλύτερο μέτρο. Με την κατάλληλη βαθμονόμηση της προσέγγισης του ιδιοδιανύσματος σε κάθε επαναληπτική διαδικασία, προκύπτει η ιδιοτιμή και το ιδιοδιάνυσμα. Ένας αλγόριθμος που υλοποιεί αυτή την διαδικασία είναι ο εξής:

1. Αρχική προσέγγιση  $\mathbf{u}^{(0)}$
2. Υπολογισμός  $\mathbf{v}^{(k)} = \mathbf{A}\mathbf{u}^{(k-1)}$
3.  $\mathbf{u}^{(k)}$ , το διάνυσμα που προκύπτει από την κανονικοποίηση του  $\mathbf{v}^{(k)}$ .

$$\mathbf{u}^{(k)} = \frac{\mathbf{v}^{(k)}}{\max[\mathbf{v}^{(k)}]} \quad (2.29)$$

4. Έλεγχος σφάλματος μεταξύ  $\mathbf{u}^{(k)}$ ,  $\mathbf{u}^{(k-1)}$ .
5. Αν δεν πληρούνται τα κριτήρια σύγκλισης επιστροφή στο βήμα 2.
6. Όταν τα δύο διανύσματα  $\mathbf{u}^{(k)}$ ,  $\mathbf{u}^{(k-1)}$  είναι ίσα ισχύει:

$$\max[\mathbf{v}^{(k)}] \mathbf{u}^{(k)} = \mathbf{v}^{(k)} = \mathbf{A}\mathbf{u}^{(k-1)} \quad (2.30)$$

Δηλαδή από την (2.22) ισχύει ότι το στοιχείο  $\max[\mathbf{v}^{(k)}]$  είναι ίσο με την ιδιοτιμή  $\lambda_1$  και  $\mathbf{u}^{(k)}$  το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα.



Στην περίπτωση όπου μια προσέγγιση του υπολογιζόμενου ιδιοδιανύσματος είναι διαθέσιμη, τότε αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αρχικό διάνυσμα για την επαναληπτική μέθοδο προκειμένου να συγκλίνει ο αλγόριθμος ταχύτερα. Στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμες τέτοιες πληροφορίες το αρχικό διάνυσμα επιλέγεται με έναν τυχαίο τρόπο. Ωστόσο είναι σημαντικό να τονιστεί ότι αν η τιμή του  $c_i$  είναι μηδενική, το αρχικό διάνυσμα είναι γραμμικά ανεξάρτητο του προς υπολογισμό ιδιοδιανύσματος, δηλαδή είναι ένα από τα άλλα ιδιοδιανύσματα. Αν η τιμή του  $c_i$  είναι πολύ μικρή, θα αυξηθεί αρκετά ο αριθμός των ανακυκλώσεων, και η προσέγγιση δεν θα είναι ικανοποιητική λόγω των σφαλμάτων που θα εισάγονται στην προσέγγιση του ιδιοδιανύσματος κατά τις ανακυκλώσεις [JEN77]

### 2.4.3. Μέθοδος αντιστρόφων δυνάμεων (Inverse Power Method)

Μια άλλη μέθοδος που βασίζεται στην μέθοδο των δυνάμεων είναι η μέθοδος των αντιστρόφων δυνάμεων. Με την μέθοδο αυτή υπολογίζεται η ιδιοτιμή με το μικρότερο μέτρο. Έστω ότι ισχύει για τις ιδιοτιμές του συστήματος:

$$|\lambda_1| < |\lambda_2| < \dots < |\lambda_n| \Leftrightarrow \left| \frac{1}{\lambda_1} \right| > \left| \frac{1}{\lambda_2} \right| > \dots > \left| \frac{1}{\lambda_n} \right| \quad (2.31)$$

Στο ίδιο σύστημα που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.4.2 η μέθοδος των αντιστρόφων δυνάμεων έχει ως εξής:

Ξεκινάμε πάλι από την (2.25) αλλά πολλαπλασιάζουμε με τον αντίστροφο πίνακα  $\mathbf{A}$ .

$$\mathbf{u}^{(1)} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{u}^{(0)} = \sum_{i=1,n} c_i \mathbf{A}^{-1}\mathbf{q}_i \quad (2.32)$$

Με βάση τις σχέσεις (2.22) προκύπτει ότι η ακόλουθη εξίσωση:

$$\mathbf{A}\mathbf{q}_i = \lambda_i \mathbf{q}_i \quad (2.33)$$

μετασχηματίζεται στην εξής μορφή:

$$\mathbf{q}_i = \lambda_i \mathbf{A}^{-1}\mathbf{q}_i \quad (2.34)$$

και συνεπώς ισχύει:

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{q}_i = \frac{1}{\lambda_i} \mathbf{q}_i \quad (2.35)$$

Άρα  $\mathbf{q}_i$  είναι το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή  $1/\lambda_i$  του πίνακα  $\mathbf{A}^{-1}$ .

Συνεπώς η εξίσωση (2.32) τροποποιείται:

$$\mathbf{u}^{(1)} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{u}^{(0)} = \sum_{i=1,n} c_i \frac{1}{\lambda_i} \mathbf{q}_i \quad (2.36)$$

Στην δεύτερη επανάληψη:

$$\mathbf{u}^{(2)} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{u}^{(1)} = \sum_{i=1,n} c_i \frac{1}{\lambda_i^2} \mathbf{q}_i \quad (2.37)$$

και τελικά στην  $k$ -ιοστή επανάληψη:

$$\mathbf{u}^{(k)} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{u}^{(k-1)} = \sum_{i=1,n} \mathbf{c}_i \frac{1}{\lambda_i^k} \mathbf{q}_i \approx \mathbf{c}_n \frac{1}{\lambda_n^k} \mathbf{q}_n \quad (2.38)$$

Πολλαπλασιάζοντας με τον αντίστροφο του πίνακα καταστάσεως το ιδιοδιάνυσμα που προκύπτει είναι αυτό της ιδιοτιμής με μικρότερο μέτρο κατά απόλυτο τιμή. Στον αλγόριθμο που υλοποιεί η μέθοδος των αντιστρόφων δυνάμεων δεν είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του αντιστρόφου πίνακα καταστάσεως. Με χρήση της τριγωνικής παραγοντοποίησης τροποποιείται ο αλγόριθμος που περιγράφηκε στην εξίσωση (2.32).

1. Αρχική προσέγγιση  $\mathbf{u}^{(0)}$
2. Επίλυση της  $\mathbf{A}\mathbf{v}^{(k)} = \mathbf{u}^{(k-1)}$  με τριγωνική παραγοντοποίηση
3.  $\mathbf{u}^{(k)}$ , το διάνυσμα που προκύπτει από την κανονικοποίηση του  $\mathbf{v}^{(k)}$

$$\mathbf{u}^{(k)} = \frac{\mathbf{v}^{(k)}}{\max[\mathbf{v}^{(k)}]} \quad (2.39)$$

4. Έλεγχος σφάλματος μεταξύ  $\mathbf{u}^{(k)}$ ,  $\mathbf{u}^{(k-1)}$
5. Αν δεν πληρούνται τα κριτήρια σύγκλισης επιστροφή στο βήμα 2.
6. Όταν τα δύο διανύσματα  $\mathbf{u}^{(k)}$ ,  $\mathbf{u}^{(k-1)}$  είναι ίσα ισχύει

$$\max[\mathbf{v}^{(k)}]\mathbf{u}^{(k)} = \mathbf{v}^{(k)} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{u}^{(k-1)} \quad (2.40)$$

Δηλαδή από την (2.35) ισχύει ότι το στοιχείο  $\max[\mathbf{v}^{(k)}]$  είναι ίσο με το αντίστροφο της ιδιοτιμής  $\lambda_1$  και  $\mathbf{u}^{(k)}$  το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα.

Στο δεύτερο βήμα διατυπώνεται το γραμμικό πρόβλημα:

$$\mathbf{A}\mathbf{v}^{(k)} = \mathbf{L}_A \mathbf{U}_A \mathbf{v}^{(k)} = \mathbf{u}^{(k-1)} \quad (2.41)$$

Όπως περιγράφηκε και στην ενότητα 2.2 ορίζεται μια ενδιάμεση μεταβλητή  $\mathbf{x}^{(k)}$  και προκύπτει:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}\mathbf{v}^{(k)} &= \mathbf{x}^{(k)} \\ \mathbf{L}\mathbf{x}^{(k)} &= \mathbf{u}^{(k)} \end{aligned} \quad (2.42)$$

Οι εξισώσεις (2.42) λύνονται με ευθεία και αντίστροφη αντικατάσταση.

#### 2.4.4. Μετάθεση (Shifting) στο μιγαδικό επίπεδο

Οι μέθοδοι που περιγράφηκαν υπολογίζουν τις ακραίες ως προς το μέτρο ιδιοτιμές ενός συστήματος αξιοποιώντας τις ιδιότητες που περιγράφηκαν. Ωστόσο η μελέτη ενός συστήματος μπορεί να εστιάζει σε κάποια ειδικά χαρακτηριστικά απόκρισης και ρυθμούς οι οποίοι να μην ταυτίζονται απαραίτητα με τις ακραίες ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα. Η μετάθεση αποτελεί μια τεχνική, η οποία παραλλάσσει τις προηγούμενες μεθόδους προκειμένου να υπολογιστούν συγκεκριμένες ιδιοτιμές οι οποίες βρίσκονται σε μια γνωστή περιοχή του μιγαδικού επιπέδου.

Η εξίσωση (2.22), μπορεί να τροποποιηθεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{q} - \mu\mathbf{I}\mathbf{q} &= \lambda\mathbf{q} - \mu\mathbf{q} \Rightarrow \\ (\mathbf{A} - \mu\mathbf{I})\mathbf{q} &= (\lambda - \mu)\mathbf{q} \Rightarrow \\ \bar{\mathbf{A}}\mathbf{q} &= (\lambda - \mu)\mathbf{q} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Η τροποποίηση αυτή σημαίνει ότι σε έναν νέο πίνακα, τον  $\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mu \mathbf{I}$  οι ιδιοτιμές είναι οι ίδιες με του πίνακα  $\mathbf{A}$ , απλά μετατοπισμένες κατά  $\mu$ . Τα ιδιοδιανύσματα δεν τροποποιούνται με την μετάθεση των ιδιοτιμών. Οι πίνακες  $\mathbf{A}$ ,  $\bar{\mathbf{A}}$  έχουν τα ίδια ιδιοδιανύσματα για τις αντίστοιχες ιδιοτιμές, αφού οι σχέσεις (2.22), (2.43) είναι ισοδύναμες.

$$\bar{\mathbf{A}}\mathbf{q}_i = (\mathbf{A} - \mu \cdot \mathbf{I})\mathbf{q}_i = (\lambda_i - \mu)\mathbf{q}_i \Leftrightarrow \mathbf{A}\mathbf{q}_i = \lambda_i\mathbf{q}_i \quad (2.44)$$

Η τροποποίηση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, γιατί ανάλογα με το που τίθεται το  $\mu$ , υπολογίζονται διαφορετικές ιδιοτιμές του συστήματος με την χρήση των μεθόδων των δυνάμεων που προαναφέρθηκαν. Με την τροποποίηση της μετάθεσης μπορεί να υπολογιστεί οποιαδήποτε ιδιοτιμή του συστήματος (με κριτήριο την "απόστασή" της από το  $\mu$ ), αρκεί να υπάρχει μία αρχική προσέγγιση. Με άλλα λόγια η διαδικασία αυτή είναι η μετάθεση του πραγματικού και φανταστικού άξονα στο μιγαδικό επίπεδο, έτσι ώστε η προς υπολογισμό ιδιοτιμή να γίνει ακραία και να υπολογιστεί με τις μεθόδους που αναλύθηκαν προηγουμένως.

## 2.5. Επιλεκτικός υπολογισμός πολλαπλών ιδιοτιμών

Επεκτείνοντας τις μεθόδους που περιγράφησαν στην ενότητα 2.4 προκύπτουν οι μέθοδοι επιλεκτικού ταυτόχρονου υπολογισμού ιδιοτιμών.

### 2.5.1. Αλγόριθμος ταυτόχρονου υπολογισμού μέγιστων ιδιοτιμών

Ο αλγόριθμος ταυτόχρονου υπολογισμού [STJ81], [VVC98] είναι επέκταση της μεθόδου των δυνάμεων, στην οποία μια σειρά από δοκιμαστικά διανύσματα συγκλίνουν σε αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα του πίνακα κατάστασης  $\mathbf{A}$ . Όπως και πριν, θεωρούμε ότι οι ιδιοτιμές του πίνακα  $\mathbf{A}$  ικανοποιούν την σχέση (2.24) και είναι διακριτές:

Έστω ο διαγώνιος πίνακας  $\mathbf{\Lambda}$ , με τις ιδιοτιμές σε φθίνουσα σειρά βάση του μέτρου τους και αντίστοιχα  $\mathbf{Q}$  ο πίνακας με τα αντίστοιχα δεξιά ιδιοδιανύσματα:

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Lambda}_A & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{\Lambda}_B \end{bmatrix} = \text{diag}(\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \dots \quad \lambda_m \quad | \quad \lambda_{m+1} \quad \dots \quad \lambda_n) \quad (2.45)$$

όπου  $n$  το πλήθος των μεταβλητών κατάστασης (και συνεπώς ο πίνακας  $\mathbf{A}$  έχει διαστάσεις  $n \times n$ )

όπου  $m$  το πλήθος των προς υπολογισμό μέγιστων ιδιοτιμών. Συνεπώς ο πίνακας  $\mathbf{\Lambda}_A$  είναι διαστάσεως  $m \times m$ , και ο πίνακας  $\mathbf{\Lambda}_B$   $(n-m) \times (n-m)$ .

$$\mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_A \quad | \quad \mathbf{Q}_B] = [\mathbf{q}_1 \quad \mathbf{q}_2 \quad \dots \quad \mathbf{q}_m \quad | \quad \mathbf{q}_{m+1} \quad \dots \quad \mathbf{q}_n] \quad (2.46)$$

ο πίνακας  $\mathbf{Q}_A$  είναι διαστάσεως  $n \times m$  και ο πίνακας  $\mathbf{Q}_B$  διαστάσεως  $n \times (n-m)$ .

Ισχύει γενικά με βάση τον ορισμό για τα δεξιά ιδιοδιανύσματα ότι:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{Q}_A &= \mathbf{Q}_A\mathbf{\Lambda}_A \\ \mathbf{A}\mathbf{Q}_B &= \mathbf{Q}_B\mathbf{\Lambda}_B \end{aligned} \quad (2.47)$$

Συνεπώς σε σχέση με την απλή μέθοδο των δυνάμεων, το αρχικό διάνυσμα, τροποποιείται και περιέχει  $m$  αρχικά γραμμικώς ανεξάρτητα διανύσματα, όσα και αυτά που θα υπολογιστούν με βάση τον αλγόριθμο. Έστω η εκτίμηση των  $m$  ιδιοδιανυσμάτων στο  $k$  βήμα:

$$\mathbf{U}^{(k)} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1^{(k)} & \mathbf{u}_2^{(k)} & \dots & \mathbf{u}_m^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Ο πίνακας  $\mathbf{U}^{(k)}$  είναι διάστασης  $n \times m$ .

Ο αντίστοιχος επαυξημένος πίνακας  $\mathbf{V}$  που περιγράφεται στην μέθοδο των δυνάμεων υπολογίζεται ως:

$$\mathbf{V}^{(k)} = \mathbf{A}\mathbf{U}^{(k-1)} \quad (2.49)$$

ο πίνακας  $\mathbf{V}^{(k)}$  είναι διάστασης  $n \times m$ .

Ο πίνακας των διανυσμάτων  $\mathbf{U}$  μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\mathbf{U}^{(k)} = \sum_{j=1}^n c_{ji} \mathbf{q}_j = \sum_{j=1}^m c_{ji} \mathbf{q}_j + \sum_{j=m+1}^n c_{ji} \mathbf{q}_j \quad (2.50)$$

Η εναλλακτικά, οι πίνακες των ιδιοδιανυσμάτων και των συντελεστών  $c$  μπορούν να χωριστούν ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_1^{(k)} & \mathbf{u}_2^{(k)} & \dots & \mathbf{u}_m^{(k)} \end{bmatrix} = [\mathbf{Q}_A \mid \mathbf{Q}_B] \begin{bmatrix} \mathbf{C}_A \\ - \\ \mathbf{C}_B \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

ο πίνακας  $\mathbf{C}_A$  είναι διαστάσεως  $m \times n$  και ο πίνακας  $\mathbf{C}_B$  διαστάσεως  $(n-m) \times n$ .

Συνεπώς η εξίσωση (2.51) τροποποιείται:

$$\mathbf{U}^{(k)} = \mathbf{Q}_A \mathbf{C}_A^{(k)} + \mathbf{Q}_B \mathbf{C}_B^{(k)} \quad (2.52)$$

Με βάση την (2.47), και πολλαπλασιάζοντας την (2.52) με τον πίνακα κατάστασης  $\mathbf{A}$ , προκύπτει:

$$\mathbf{V}^{(k)} = \mathbf{A}\mathbf{U}^{(k-1)} = \mathbf{Q}_A \mathbf{\Lambda}_A \mathbf{C}_A^{(k-1)} + \mathbf{Q}_B \mathbf{\Lambda}_B \mathbf{C}_B^{(k-1)} = \mathbf{Q}_A \mathbf{C}_A^{(k)} + \mathbf{Q}_B \mathbf{C}_B^{(k)} \quad (2.53)$$

Το δεύτερο βήμα περιλαμβάνει τον υπολογισμό του πίνακα  $\mathbf{B}$ , ο οποίος ικανοποιεί την παρακάτω εξίσωση:

$$\mathbf{G}^{(k)} \mathbf{B}^{(k)} = \mathbf{H}_A^{(k)} \quad (2.54)$$

όπου,

$$\mathbf{G}^{(k)} = [\mathbf{U}^{(k-1)}]^{-T} \mathbf{U}^{(k-1)}, \mathbf{H}^{(k)} = [\mathbf{U}^{(k-1)}]^{-T} \mathbf{V}^{(k)} \quad (2.55)$$

Ο πίνακας  $\mathbf{B}$  στην γενική περίπτωση έχει μιγαδικά στοιχεία. Στον επαναληπτικό υπολογισμό της μεθόδου των δυνάμεων οι συντελεστές  $\mathbf{C}_B$  θα γίνονται διαρκώς μικρότεροι σε σχέση με τους κυρίαρχους συντελεστές  $\mathbf{C}_A$  καθώς το  $k$  αυξάνεται. Συνεπώς η (2.52)–(2.53) θα τροποποιηθούν :

$$\mathbf{U}^{(k)} \cong \mathbf{Q}_A \mathbf{C}_A^{(k)} \quad (2.56)$$

$$\mathbf{V}^{(k)} \cong \mathbf{Q}_A \mathbf{\Lambda}_A \mathbf{C}_A^{(k-1)} \quad (2.57)$$

Με αντικατάσταση των εξισώσεων (2.55)–(2.57) στην (2.54) προκύπτει:

$$[\mathbf{U}^{(k-1)}]^{-T} \mathbf{Q}_A \mathbf{C}_A^{(k-1)} \mathbf{B}^{(k)} = [\mathbf{U}^{(k-1)}]^{-T} \mathbf{Q}_A \mathbf{\Lambda}_A \mathbf{C}_A^{(k-1)} \quad (2.58)$$

Με τις κατάλληλες αντικαταστάσεις, και υποθέτοντας ότι ο αντίστροφος του  $\mathbf{C}_A$  υφίσταται, η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\mathbf{B}^{(k)} \mathbf{C}_A^{-1 (k-1)} \cong \mathbf{C}_A^{-1 (k-1)} \mathbf{\Lambda}_A \quad (2.59)$$

Συνεπώς, οι ιδιοτιμές του πίνακα  $\mathbf{B}$  είναι προσεγγίσεις των  $m$  μεγαλύτερων ιδιοτιμών του πίνακα  $\mathbf{A}$ . Ο πίνακας των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων, του πίνακα  $\mathbf{B}$  προσεγγίζεται από τον  $\mathbf{C}_A^{-1}$ . Αν  $\mathbf{P}$  είναι ο πίνακας των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων του  $\mathbf{B}$ , τότε με βάση την (2.57) ισχύει:

$$\mathbf{W}^{(k)} = \mathbf{V}^{(k)} \mathbf{P}^{(k)} \cong \mathbf{Q}_A \mathbf{\Lambda}_A \quad (2.60)$$

Δηλαδή, τα διανύσματα που περιλαμβάνονται στον πίνακα  $\mathbf{W}$  αποτελούν προσεγγίσεις των  $m$  κυρίαρχων ιδιοδιανυσμάτων  $\mathbf{Q}_A$  του πίνακα κατάστασης  $\mathbf{A}$ .

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας, το οποίο περιλαμβάνει τον υπολογισμό της επόμενης  $(k+1)$  ομάδας διανυσμάτων ( $\mathbf{U}^{(k+1)}$ ). Αυτό προκύπτει από την εξίσωσή του με το  $\mathbf{W}$  μετά την κανονικοποίηση κάθε διανύσματος με το μέγιστο στοιχείο του:

$$\mathbf{U}^{(k+1)} = \frac{\mathbf{W}^{(k)}}{\max(\mathbf{W}^{(k)})} \quad (2.61)$$

Με την μέθοδο αυτή ανάγεται ο υπολογισμός κάποιων ιδιοτιμών ενός συστήματος, στον υπολογισμό των ιδιοτιμών του πίνακα  $\mathbf{B}$ . Δεδομένου ότι το σύστημα μπορεί να εμπλέκει απεριόριστο πλήθος μεταβλητών κατάστασης, η αναγωγή αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη ως προς την απλοποίηση του υπολογιστικού φόρτου που απαιτείται για τον υπολογισμό των ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα  $\mathbf{A}$ .

### 2.5.2. Αλγόριθμος ταυτόχρονου υπολογισμού ελάχιστων ιδιοτιμών

Η τεχνική αυτή είναι -όπως και αυτή της προηγούμενης παραγράφου- επέκταση της απλής μεθόδου των αντίστροφων δυνάμεων. Θεωρώντας ότι:

$$|\lambda_1| < |\lambda_2| < \dots < |\lambda_n| \Leftrightarrow \left| \frac{1}{\lambda_1} \right| > \left| \frac{1}{\lambda_2} \right| > \dots > \left| \frac{1}{\lambda_n} \right| \quad (2.62)$$

Επίσης θεωρώντας τις εξισώσεις (2.45)-(2.48), (2.52) και τις αντίστοιχες παραδοχές της παραγράφου 2.5.1 ισχύει με βάση την (2.35):

$$\mathbf{V}^{(k)} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{U}^{(k-1)} = \mathbf{Q}_A \mathbf{\Lambda}_A^{-1} \mathbf{C}_A^{(k-1)} + \mathbf{Q}_B \mathbf{\Lambda}_B^{-1} \mathbf{C}_B^{(k-1)} = \mathbf{Q}_A \mathbf{C}_A^{(k)} + \mathbf{Q}_B \mathbf{C}_B^{(k)} \quad (2.63)$$

όπου

$$\mathbf{\Lambda}_A^{-1} = \text{diag} \left( \frac{1}{\lambda_1}, \dots, \frac{1}{\lambda_m} \right) \quad (2.64)$$

$$\mathbf{\Lambda}_B^{-1} = \text{diag} \left( \frac{1}{\lambda_{m+1}}, \dots, \frac{1}{\lambda_n} \right)$$

Στον επαναληπτικό υπολογισμό της μεθόδου των αντίστροφων δυνάμεων οι συντελεστές  $C_B$  θα γίνονται διαρκώς μικρότεροι σε σχέση με τους κυρίαρχους συντελεστές  $C_A$  καθώς το  $k$  αυξάνεται. Συνεπώς η (2.52)-(2.53) θα τροποποιηθούν :

$$\mathbf{U}^{(k)} \cong \mathbf{Q}_A \mathbf{C}_A^{(k)} \quad (2.65)$$

$$\mathbf{V}^{(k)} \cong \mathbf{Q}_A \mathbf{\Lambda}_A^{-1} \mathbf{C}_A^{(k-1)} \quad (2.66)$$

Ορίζοντας τον πίνακα  $\mathbf{B}$  όπως στην προηγούμενη παράγραφο, ισχύουν οι εξισώσεις (2.54), (2.55). Με τις αντικαταστάσεις των (2.65), (2.66), (2.55), στην (2.54) προκύπτει ότι:

$$\mathbf{B}^{(k)} \mathbf{C}_A^{-1 (k-1)} \cong \mathbf{C}_A^{-1 (k-1)} \mathbf{\Lambda}_A^{-1} \quad (2.67)$$

Συνεπώς, οι ιδιοτιμές του πίνακα  $\mathbf{B}$  είναι προσεγγίσεις των αντιστρώφων των  $m$  μικρότερων σε μέτρο ιδιοτιμών του πίνακα  $\mathbf{A}$ . Ο πίνακας των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων, του πίνακα  $\mathbf{B}$  προσεγγίζεται από τον  $\mathbf{C}_A^{-1}$ . Αν  $\mathbf{P}$  είναι ο πίνακας των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων του  $\mathbf{B}$ , τότε με βάση την (2.66) ισχύει:

$$\mathbf{W}^{(k)} = \mathbf{V}^{(k)} \mathbf{P}^{(k)} \cong \mathbf{Q}_A \mathbf{\Lambda}_A^{-1} \quad (2.68)$$

Τα διανύσματα που περιλαμβάνονται στον πίνακα  $\mathbf{W}$  αποτελούν προσεγγίσεις των  $m$  ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα κατάστασης  $\mathbf{A}$  που αντιστοιχούν στις ιδιοτιμές με το μικρότερο κατά απόλυτο μέτρο. Στο επόμενο βήμα της επανάληψης, μέχρι την σύγκλιση η κανονικοποίηση γίνεται με την εξίσωση (2.61).

Ως καταλληλότερη μέθοδος για τον υπολογισμό επιλεγμένων ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων τα οποία ενδιαφέρουν ως προς την ευστάθεια του μελετούμενου συστήματος επιλέχθηκε η μέθοδος του ταυτόχρονου υπολογισμού ελάχιστων ιδιοτιμών ή ταυτόχρονης αντίστροφης ολοκλήρωσης (*simultaneous inverse iteration*). Στην παρούσα διατριβή ενδιαφέρουν ιδιαίτερα οι ιδιοτιμές που αναφέρονται στις διασυνδεδετικές ταλαντώσεις. Συνεπώς επιλέχθηκε η αντίστροφη μέθοδος, προκειμένου να υπολογιστούν οι ιδιοτιμές που βρίσκονται σε μια περιοχή του μιγαδικού επιπέδου με την χρήση της μετάθεσης. Η επιλογή της παράλληλης εύρεσης ιδιοτιμών είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς στην περίπτωση όπου πολλές ιδιοτιμές έχουν παραπλήσιες τιμές, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, εξασφαλίζει την εύρεση όλων των γειτονικών ιδιοτιμών, σε αντίθεση με τον αλγόριθμο της απλής αντίστροφης ολοκλήρωσης (*inverse iteration*) ο οποίος μπορεί να μην συγκλίνει, αφού η λύση θα ταλαντώνεται ανάμεσα σε αυτές.

### 2.5.3. Επίλυση συστήματος γραμμικών εξισώσεων με μιγαδικούς αριθμούς

Στους αλγόριθμους που περιγράφησαν στις παραγράφους 2.5.1-2.5.2 απαιτείται η επίλυση συστήματος γραμμικών εξισώσεων με μιγαδικούς αριθμούς (βλ. εξισώσεις (2.54), (2.63)). Η επίλυση του συστήματος αυτού μπορεί να γίνει μέσω της αναγωγής του σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων με πραγματικούς αριθμούς, μέσω του αναπτύγματος των πινάκων  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{b}$ , διαδικασία η οποία αναλύεται στην παρούσα παράγραφο.

Έστω ένα σύστημα, όπου τα  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{b}$  (όπως στην ενότητα 2.2) είναι πίνακες και διανύσματα (διαστάσεων  $n \times n, n \times 1, n \times 1$  αντίστοιχα) που περιέχουν μιγαδικούς αριθμούς:

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (2.69)$$

Η ανάλυση της εξίσωσης σε πραγματικό και φανταστικό μέρος δίνει:

$$\begin{aligned} [\operatorname{Re}(\mathbf{A}) + j \operatorname{Im}(\mathbf{A})][\operatorname{Re}(\mathbf{x}) + j \operatorname{Im}(\mathbf{x})] &= [\operatorname{Re}(\mathbf{b}) + j \operatorname{Im}(\mathbf{b})] \\ [\operatorname{Re}(\mathbf{A}) \operatorname{Re}(\mathbf{x}) - \operatorname{Im}(\mathbf{A}) \operatorname{Im}(\mathbf{x}) + j(\operatorname{Im}(\mathbf{A}) \operatorname{Re}(\mathbf{x}) + \operatorname{Re}(\mathbf{A}) \operatorname{Im}(\mathbf{x}))] &= \\ &= [\operatorname{Re}(\mathbf{b}) + j \operatorname{Im}(\mathbf{b})] \end{aligned} \quad (2.70)$$

Με βάση τα παραπάνω δημιουργείται ένα νέο γραμμικό σύστημα με  $2n$  εξισώσεις:

$$\begin{bmatrix} \operatorname{Re}(\mathbf{A}) & -\operatorname{Im}(\mathbf{A}) \\ \operatorname{Im}(\mathbf{A}) & \operatorname{Re}(\mathbf{A}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \operatorname{Re}(\mathbf{x}) \\ \operatorname{Im}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{Re}(\mathbf{b}) \\ \operatorname{Im}(\mathbf{b}) \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Το νέο σύστημα μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας μεθόδους είτε τριγωνικής παραγοντοποίησης και ευθείας και αντίστροφης αντικατάστασης, είτε (στον βαθμό που οι διαστάσεις δεν είναι απαγορευτικές) με αντιστροφή του επαυξημένου πίνακα. Επειδή στην μέθοδο υπολογισμού ελάχιστων ιδιοτιμών η διάσταση του συστήματος (2.63) είναι μεγάλη, το σύστημα επιλύεται με τριγωνική παραγοντοποίηση και χρήση αραιών πινάκων.

## 2.6. Εφαρμογή των μεθόδων επιλεκτικού υπολογισμού ιδιοτιμών για σύστημα διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς.

### 2.6.1. Χωρίς εφαρμογή μετάθεσης

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1, τα ΣΗΕ μοντελοποιούνται ως συστήματα αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y) \\ 0 &= g(x, y) \end{aligned} \quad (2.72)$$

Επίσης το γραμμικοποιημένο σύστημα γύρω από ένα σημείο λειτουργίας είναι με βάση την (1.15):

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_x f & D_y f \\ D_x g & D_y g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

όπου  $\mathbf{J}$  είναι ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος των διαφορικών - αλγεβρικών εξισώσεων και  $\mathbf{f}_x, \mathbf{f}_y, \mathbf{g}_x, \mathbf{g}_y$  οι Ιακωβιανοί πίνακες των συναρτήσεων  $f$  και  $g$  ως προς τις μεταβλητές κατάστασης και τις αλγεβρικές μεταβλητές.

Με τις κατάλληλες αντικαταστάσεις, για ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς (όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 1.6.3, ο πίνακας κατάστασης ορίζεται από την (2.74) για το γραμμικοποιημένο σύστημα:

$$\mathbf{A} = \mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x \quad (2.74)$$

Συνεπώς η σχέση της μεθόδου των δυνάμεων (2.28) τροποποιείται ως εξής:

$$\mathbf{v}^{(k)} = \mathbf{A} \mathbf{u}^{(k-1)} \Rightarrow \mathbf{v}^{(k)} = (\mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x) \mathbf{u}^{(k-1)} \quad (2.75)$$

Η οποία είναι δυνατόν να γραφτεί ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}^{(k)} \\ \mathbf{w}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}^{(k-1)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.76)$$

Συνεπώς ο υπολογισμός (σε κάθε βήμα της διαδικασίας) του διανύσματος  $\mathbf{v}^k$  ανάγεται στην σχέση (2.76), ή με αντίστοιχη λογική στην επίλυση του συστήματος (2.77) για την μέθοδο των αντιστρόφων δυνάμεων:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}^{(k)} \\ \mathbf{w}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}^{(k-1)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

Αν το σύστημα αποτελείται από  $n$  διαφορικές και  $s$  αλγεβρικές εξισώσεις οι πίνακες  $v^k, u^{k-1}$  είναι διαστάσεως  $n \times 1$ , ο πίνακας  $w^k$  είναι διαστάσεως  $s \times 1$ .

Τα διανύσματα  $u^k, v^k$  αντικαθίστανται από τα εκτεταμένα  $u^k, v^k$  τα οποία ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \bar{v}^{(k)} &= \begin{bmatrix} v^{(k)} \\ w^{(k)} \end{bmatrix} \\ \bar{u}^{(k)} &= \begin{bmatrix} u^{(k)} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.78)$$

όπου τα εκτεταμένα διανύσματα  $\bar{v}^{(k)}, \bar{u}^{(k)}$  διαστάσεων  $1 \times (n+s)$ .

Στην αρχική προσέγγιση του  $\bar{u}^{(0)}$  τίθενται μηδενικές οι τιμές που αντιστοιχούν στις γραμμές των αλγεβρικών εξισώσεων. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου υπολογίζεται το διάνυσμα  $\bar{u}^{(k+1)}$  βάση της (2.39), με την κανονικοποίηση αφού πρώτα μηδενιστούν όλα τα στοιχεία που αντιστοιχούν στις αλγεβρικές εξισώσεις.

### 2.6.2. Με την εφαρμογή μετάθεσης

Αν στην διαδικασία αυτή συμπεριληφθεί και η τεχνική της μετάθεσης στο μιγαδικό επίπεδο (κατά  $\mu$ ), όπως αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 2.4.4 ο πίνακας κατάστασης τροποποιείται βάση της (2.44) ως εξής:

$$\bar{A} = \mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x - \mu \mathbf{I} \quad (2.79)$$

Συνεπώς η σχέση της μεθόδου των δυνάμεων (2.28) τροποποιείται ως εξής:

$$v^{(k)} = \bar{A} u^{(k-1)} \Rightarrow v^{(k)} = (\mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x - \mu \mathbf{I}) u^{(k-1)} \quad (2.80)$$

Η οποία είναι δυνατόν να γραφτεί ως εξής:

$$\begin{bmatrix} v^{(k)} \\ w^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_x - \mu \mathbf{I} & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^{(k-1)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

Συνεπώς ο υπολογισμός (σε κάθε βήμα της διαδικασίας) του διανύσματος  $v^k$  ανάγεται στην σχέση (2.81), ή με αντίστοιχη λογική στην επίλυση του συστήματος (2.82) για την μέθοδο των αντιστρόφων δυνάμεων:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_x - \mu \mathbf{I} & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^{(k)} \\ w^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^{(k-1)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

Συνεπώς από τον Ιακωβιανό πίνακα αφαιρείται ποσότητα  $\mu$  από τα διαγώνια στοιχεία που αντιστοιχούν στις διαφορικές εξισώσεις.

Τα ιδιοδιανύσματα που θα υπολογιστούν με τον τρόπο που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.6.1 θα είναι τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα κατάστασης  $\mathbf{A}$  βάση της (2.44). Η ιδιοτιμή  $\lambda$  που θα υπολογιστεί για τον πίνακα  $\bar{\mathbf{A}}$  θα είναι η μετοπισμένη ιδιοτιμή του πίνακα  $\mathbf{A}$  κατά ποσότητα  $\mu$ .

$$\lambda_1 = \lambda + \mu \quad (2.83)$$



### 2.6.3. Αναδιατύπωση εξισώσεων στην περίπτωση όπου αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις δεν είναι διαχωρισμένες

Στην παράγραφο 2.6.2 περιγράφηκαν οι εξισώσεις επιλεκτικού υπολογισμού με την χρήση της μετάθεσης για σύστημα εξισώσεων της μορφής (2.72). Ωστόσο η μορφή ενός συστήματος αλγεβρικών διαφορικών εξισώσεων είναι δυνατόν να μην έχει διαχωρισμένες τις αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις κατά αυτό τον τρόπο. Στην περίπτωση αυτή, προκειμένου να αποφευχθεί η διαδικασία αναδιάταξης των εξισώσεων του προβλήματος με την μέθοδο που περιγράφηκε στην ενότητα 2.3 (για να καταλήξει το σύστημα στην μορφή (2.72)) είναι δυνατή η τροποποίηση των εξισώσεων.

Έστω λοιπόν το σύστημα (2.72) αναδιατυπωμένο ως εξής:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, y_1, x_2, y_2) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, y_1, x_2, y_2) \\ 0 &= g_1(x_1, y_1, x_2, y_2) \\ 0 &= g_2(x_1, y_1, x_2, y_2) \end{aligned} \quad (2.84)$$

Συνεπώς η (2.76) αποκτά την μορφή:

$$\begin{bmatrix} u_1^{(k-1)} \\ u_2^{(k-1)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{1,x1} & \mathbf{f}_{1,x2} & \mathbf{f}_{1,y1} & \mathbf{f}_{1,y2} \\ \mathbf{f}_{2,x1} & \mathbf{f}_{2,x2} & \mathbf{f}_{2,y1} & \mathbf{f}_{2,y2} \\ \mathbf{g}_{1,x1} & \mathbf{g}_{1,x2} & \mathbf{g}_{1,y1} & \mathbf{g}_{1,y2} \\ \mathbf{g}_{2,x1} & \mathbf{g}_{2,x2} & \mathbf{g}_{2,y1} & \mathbf{g}_{2,y2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^{(k)} \\ v_2^{(k)} \\ w_1^{(k)} \\ w_2^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

Με αντιμετάθεση των ομάδων εξισώσεων  $f_2, g_1$  βάση των εξισώσεων (2.19), (2.20) που περιγράφηκε στην ενότητα 2.3 η (2.85) παίρνει την μορφή:

$$\begin{bmatrix} u_1^{(k-1)} \\ 0 \\ u_2^{(k-1)} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{1,x1} & \mathbf{f}_{1,y1} & \mathbf{f}_{1,x2} & \mathbf{f}_{1,y2} \\ \mathbf{g}_{1,x1} & \mathbf{g}_{1,y1} & \mathbf{g}_{1,x2} & \mathbf{g}_{1,y2} \\ \mathbf{f}_{2,x1} & \mathbf{f}_{2,y1} & \mathbf{f}_{2,x2} & \mathbf{f}_{2,y2} \\ \mathbf{g}_{2,x1} & \mathbf{g}_{2,y1} & \mathbf{g}_{2,x2} & \mathbf{g}_{2,y2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^{(k)} \\ w_1^{(k)} \\ v_2^{(k)} \\ w_2^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

Με βάση την (2.86) προκύπτει ότι τα μηδενικά που εμφανίζονται στον εκτεταμένο πίνακα  $U$  του δεξιού μέλους της σχέσης (2.76), υπάρχουν ανεξαρτήτως αν οι αλγεβρικές και οι διαφορικές εξισώσεις είναι ομαδοποιημένες και κατανέμονται στις γραμμές στις οποίες αντιστοιχούν οι αλγεβρικές εξισώσεις. Συνεπώς, για τον επιλεκτικό υπολογισμό ιδιοτιμών αντί της (2.81), όπου μηδενίζονται τα τελευταία στοιχεία της προσέγγισης του ιδιοδιανύσματος που αντιστοιχούν στις αλγεβρικές εξισώσεις (προκειμένου να ξεκινήσει η επόμενη επανάληψη του αλγορίθμου), στην περίπτωση αυτή αρκεί ο μηδενισμός των στοιχείων εκείνων της προσέγγισης του ιδιοδιανύσματος που αντιστοιχούν σε αλγεβρικές εξισώσεις ανεξαρτήτως της θέσης που έχουν στο σύνολο των εξισώσεων.

Τέλος σημειώνεται ότι για την μέθοδο των δυνάμεων, ισχύουν οι ίδιες σχέσεις, έχοντας ωστόσο πάντα υπ' όψιν ότι η εξίσωση της επαναληπτικής μεθόδου (2.30) τροποποιείται ως εξής:

$$v^{(k)} = Au^{(k-1)} \quad (2.87)$$

$$\begin{bmatrix} V_1^{(k)} \\ W_1^{(k)} \\ V_2^{(k)} \\ W_2^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{1,x1} & \mathbf{f}_{1,y1} & \mathbf{f}_{1,x2} & \mathbf{f}_{1,y2} \\ \mathbf{g}_{1,x1} & \mathbf{g}_{1,y1} & \mathbf{g}_{1,x2} & \mathbf{g}_{1,y2} \\ \mathbf{f}_{2,x1} & \mathbf{f}_{2,y1} & \mathbf{f}_{2,x2} & \mathbf{f}_{2,y2} \\ \mathbf{g}_{2,x1} & \mathbf{g}_{2,y1} & \mathbf{g}_{2,x2} & \mathbf{g}_{2,y2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^{(k-1)} \\ 0 \\ u_2^{(k-1)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

#### 2.6.4. Μέθοδος με διανύσματα προστασίας

Όπως φαίνεται στις παραγράφους 2.5.1, 2.5.2, στις τεχνικές ταυτόχρονης εύρεσης ιδιοτιμών, η λύση συγκλίνει σε κάποια ιδιοδιανύσματα γρηγορότερα από κάποια άλλα. Οι εξισώσεις και οι αλγόριθμοι των τεχνικών αυτών ουσιαστικά προϋποθέτουν τον κατάλληλο διαχωρισμό του αρχικού συστήματος σε υποσυστήματα προκειμένου να εξασφαλιστεί η σύγκλιση του αλγορίθμου. Απαιτεί δηλαδή οι  $m$  επικρατούσες ιδιοτιμές (με βάση τον εκάστοτε αλγόριθμο) που θα υπολογιστούν όντως να είναι διακριτές ως προς τις υπόλοιπες  $n-m$  προκειμένου να αποτελέσουν τους όρους που θα κυριαρχήσουν μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων στις σχέσεις (2.52), (2.63). Αυτό όμως δεν μπορεί να είναι εκ των προτέρων γνωστό ή δεδομένο.

Είναι δυνατόν συνεπώς σε ένα σύστημα να επιλεγθεί (με την μέθοδο υπολογισμού ελάχιστων ιδιοτιμών για παράδειγμα), ο υπολογισμός  $m$  ιδιοτιμών ενώ ταυτόχρονα ισχύει:

$$|\lambda_1| < |\lambda_2| < \dots < |\lambda_m| \cong |\lambda_{m+1}| \quad (2.89)$$

Στην περίπτωση αυτή δεν θα ισχύει η παραδοχή της εξίσωσης (2.65), διότι ενώ οι  $m-1$  στήλες του συντελεστή  $C_A$  (που θα συγκλίνουν στα  $m-1$  ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις αντίστοιχες ιδιοτιμές με το μικρότερο μέτρο) θα αυξάνονται γρηγορότερα από αυτές του  $C_B$ , αυτό δεν θα ισχύει για την στήλη των  $C_A, C_B$  που αντιστοιχεί στις ιδιοτιμές  $\lambda_m, \lambda_{m+1}$ , αφού οι αντίστοιχοι συντελεστές θα αυξάνονται με τον ίδιο ρυθμό. Αποτέλεσμα αυτού θα είναι η  $m$ -οστή ιδιοτιμή και το υπολογιζόμενο διάνυσμα να ταλαντώνεται μεταξύ των δυο ιδιοδιανυσμάτων και να παρουσιάζονται προβλήματα σύγκλισης. Με άλλα λόγια, το  $u_m$  διάνυσμα θα δεν προσεγγίζει σε κάθε επανάληψη το ίδιο ιδιοδιάνυσμα.

Για τον λόγο αυτόν εισάγονται τα διανύσματα προστασίας (guard vectors). Πλέον για το τερματισμό της επαναληπτικής διαδικασίας που περιγράφηκε στις παραγράφους 2.5.1, 2.5.2 δεν είναι απαραίτητη η σύγκλιση όλων των αρχικών διανυσμάτων, αλλά αρκεί μόνο η σύγκλιση και η εύρεση των  $m$  ιδιοδιανυσμάτων που αντιστοιχούν στις  $m$  ιδιοτιμές με το μεγαλύτερο ή μικρότερο μέτρο αντίστοιχα. Τα ιδιοδιανύσματα προστασίας, ακριβώς επειδή ο αλγόριθμος δεν απαιτεί να συγκλίνουν για να τερματίσει τις επαναλήψεις του, επί της ουσίας δίνουν την δυνατότητα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος να υπολογιστεί ένας υποχώρος του χώρου κατάστασης που χωρίζεται από το υπόλοιπο σύστημα όχι με ένα αυθαίρετο τρόπο (με κριτήριο τον αριθμό των προς υπολογισμό ιδιοτιμών), αλλά με έναν τρόπο που αντιστοιχεί στα χαρακτηριστικά του συστήματος.

Αν στο προηγούμενο παράδειγμα ισχυε:

$$|\lambda_1| < |\lambda_2| < \dots < |\lambda_m| \cong |\lambda_{m+1}| < |\lambda_{m+2}| < \dots < |\lambda_n| \quad (2.90)$$

Η προσθήκη ενός διανύσματος προστασίας (για τον υπολογισμό των ελάχιστων ιδιοτιμών) θα οδηγούσε στον υπολογισμό των  $m+1$  ιδιοδιανυσμάτων που αντιστοιχούν στις  $m+1$  ιδιοτιμές με το μικρότερο μέτρο, με την έννοια ότι οι ιδιοτιμές  $\lambda_m, \lambda_{m+1}$  θα συνέκλιναν ταυτόχρονα παρότι για τον τερματισμό του αλγορίθμου θα απαιτούταν ο υπολογισμός  $m$  ιδιοτιμών. Επί της ουσίας ο αλγόριθμος στην περίπτωση αυτή υπολογίζει τις ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα του υποχώρου

των  $m+1$  ιδιοτιμών με μικρότερο μέτρο, ο οποίος όντως είναι διακριτός, σε αντίθεση με τον υπολογισμό για τον υποχώρο  $m$  διαστάσεως, στην περίπτωση όπου δεν υπήρχε διάνυσμα προστασίας.

Αν αντίθετα ισχύει στο σύστημα, η παρακάτω συνθήκη:

$$|\lambda_1| < |\lambda_2| < \dots < |\lambda_m| < |\lambda_{m+1}| \cong |\lambda_{m+2}| < \dots < |\lambda_n| \quad (2.91)$$

το διάνυσμα προστασίας δεν θα συγκλίνει σε ιδιοδιάνυσμα, λόγω του γεγονότος ότι οι  $\lambda_{m+1}$ ,  $\lambda_{m+2}$  θα συγκλίνουν ταυτόχρονα. Ωστόσο ο αλγόριθμος θα τερματιστεί καθώς θα συγκλίνουν τα υπόλοιπα  $m$  ιδιοδιανύσματα τα οποία συγκροτούν έναν διακριτό υποχώρο του πλήρους συστήματος, τα χαρακτηριστικά του οποίου θα υπολογιστούν από τον αλγόριθμο.

Αν τέλος όλες οι ιδιοτιμές είναι διακριτές:

$$|\lambda_1| < |\lambda_2| < \dots < |\lambda_m| < |\lambda_{m+1}| < \dots < |\lambda_n| \quad (2.92)$$

το διάνυσμα προστασίας δεν θα προλάβει να συγκλίνει στο ιδιοδιάνυσμα της ιδιοτιμής  $\lambda_{m+1}$  καθώς ο αλγόριθμος θα τερματιστεί όταν συγκλίνουν τα  $m$  μικρότερα ιδιοδιανύσματα και ιδιοτιμές.

Συμπερασματικά, στην περίπτωση που επιδιώκεται ο υπολογισμός των  $m$  επικρατουσών ιδιοτιμών, και των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων ενός πίνακα, μπορεί να διαμορφώνεται ένα μεγαλύτερο σύνολο από  $m+r$  αρχικά ιδιοδιανύσματα προς υπολογισμό. Αυτά τα  $r$  επιπλέον διανύσματα είναι τα διανύσματα προστασίας τα οποία αυξάνουν τον υποχώρο  $A$  (που φαίνεται στην σχέση (2.45)) με σκοπό την βελτίωση της σύγκλισης και όχι την αύξηση του αριθμού των υπολογιζόμενων ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων [ANS96], [WAS89]. Η πιθανότητα προβλημάτων σύγκλισης του αλγορίθμου μειώνεται δραστικά καθώς τα διανύσματα προστασίας αυξάνονται. Παράλληλα όμως αυξάνονται και οι διαστάσεις του προβλήματος. Στην ουσία, για την εισαγωγή των διανυσμάτων προστασίας τροποποιείται το κριτήριο σύγκλισης έτσι ώστε να αφορά τα  $m$  πρώτα διανύσματα που θα συγκλίνουν, και όχι το σύνολο των  $r+m$  διανυσμάτων που ορίζονται αρχικά.

## 3. Παράσταση διατάξεων συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η παράσταση των βασικών διατάξεων των ΣΗΕ στην κατεύθυνση της ανάπτυξης μοντέλων για την μελέτη των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων. Πιο συγκεκριμένα στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί η μοντελοποίηση των γεννητριών, των στροβίλων και των ρυθμιστών στροφών, καθώς και των αυτόματων ρυθμιστών τάσης (APT). Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται μια σύγχρονη γεννήτρια με την διεγέρτριά της. Στην κατεύθυνση ανάπτυξης του μοντέλου του ΣΗΕ χρησιμοποιούνται από την βιβλιογραφία μοντέλα για τις διατάξεις αυτές [KUN94], [KWS95], [VVC98], [GM98], [VPM04], [ΕΠ06].



Σχήμα 3.1: Σύγχρονη γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος

### 3.1. Παράσταση Σύγχρονων Γεννητριών

#### 3.1.1. Γενικά

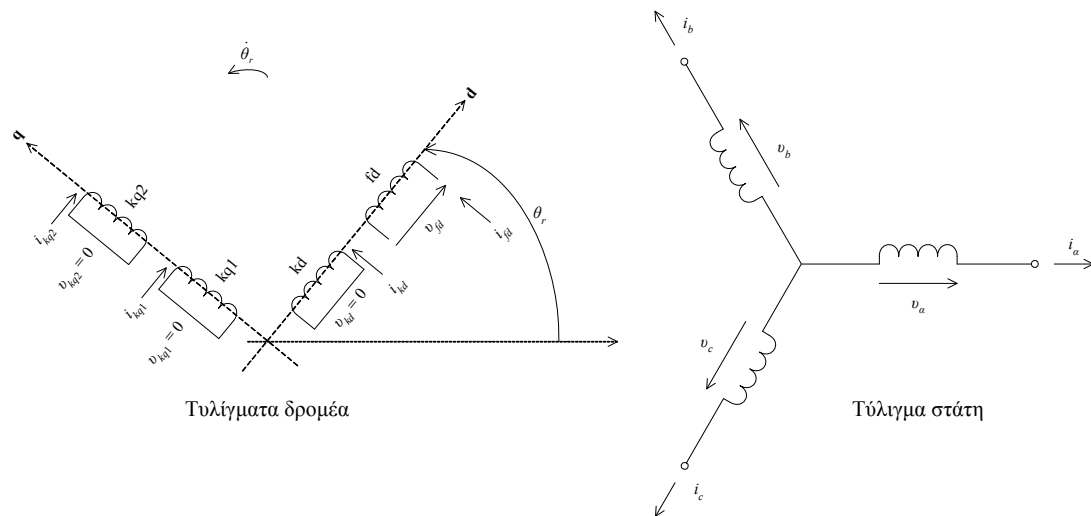
Στην ενότητα αυτή θα αναλυθούν τρία βασικά μοντέλα σύγχρονων γεννητριών για την μελέτη των διασυνδεδετικών ρυθμών. Παρουσιάζονται οι βασικές διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν μία συμμετρική τριφασική σύγχρονη γεννήτρια, καθώς επίσης και οι αναγκαίες παραδοχές και απλοποιήσεις που οδηγούν στα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή.

Για την εξαγωγή των εξισώσεων του εξεταζόμενου μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές [KUN94]:

1. Τα τυλίγματα του στάτη έχουν ημιτονοειδή κατανομή κατά μήκος του διακένου.
2. Οι αύλακες του στάτη δεν προκαλούν σημαντική μεταβολή των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών λόγω της θέσης του δρομέα.
3. Το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης αμελείται.
4. Η συνεισφορά του μαγνητικού κορεσμού αμελείται.

Οι παραδοχές 1, 2 και 3 εισάγουν αμελητέο σφάλμα όσον αφορά τη λειτουργία της πραγματικής μηχανής, όπως έχει αποδειχθεί από μετρήσεις. Η παραδοχή 4 οδηγεί στην ύπαρξη μόνο γραμμικά συζευγμένων μαγνητικών κυκλωμάτων, γεγονός το οποίο εξυπηρετεί την ευκολία της ανάλυσης.

Στο Σχήμα 3.2 παριστάνεται μία τριφασική σύγχρονη μηχανή.



Σχήμα 3.2: Κυκλωματική παράσταση σύγχρονης μηχανής

Το κύκλωμα του στάτη αποτελείται από τα τριφασικά τυλίγματα του τυμπάνου με στιγμιαίες τάσεις  $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$  και στιγμιαία ρεύματα  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  αντίστοιχα. Επειδή στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι σύγχρονες μηχανές λειτουργούν ως γεννήτριες, θεωρείται ότι τα ρεύματα του στάτη έχουν θετικό πρόσημο όταν εξέρχονται από τους ακροδέκτες της μηχανής.

Το κύκλωμα του δρομέα περιλαμβάνει το τύλιγμα του πεδίου διέγερσης, καθώς επίσης και τα τυλίγματα αποσβέσεως. Τα τυλίγματα αυτά είναι τοποθετημένα κατά μήκος του ευθέος ( $d$ ) και του εγκάρσιου μαγνητικού ( $q$ ) άξονα. Ο ευθύς άξονας συμπίπτει με τον μαγνητικό άξονα του τυλίγματος διεγέρσεως, ενώ ο εγκάρσιος άξονας προπορεύεται κατά  $90^\circ$ . Τα τυλίγματα  $k_d$ ,  $k_{q1}$  και  $k_{q2}$  είναι τυλίγματα αποσβέσεως, τα οποία παριστάνουν την επίδραση των δινορρευμάτων στις μηχανές με συμπαγή δρομέα. Στο τύλιγμα του πεδίου διεγέρσεως επιβάλλεται συνεχής τάση ( $v_{fd}$ ), ενώ τα τυλίγματα αποσβέσεως θεωρούνται βραχυκυκλωμένα.

Η κίνηση του δρομέα χαρακτηρίζεται από την ηλεκτρική γωνία  $\theta_r$  ανάμεσα στον ευθύ άξονα του δρομέα και τον άξονα της φάσης  $a$  του στάτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Αν το πεδίο του δρομέα της μηχανής περιστρέφεται με ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα  $\omega_r$  (σε ηλεκτρικά  $r/s$ ), τότε η γωνία  $\theta_r$  (σε ηλεκτρικά  $rad$ ) δίνεται από τη σχέση:

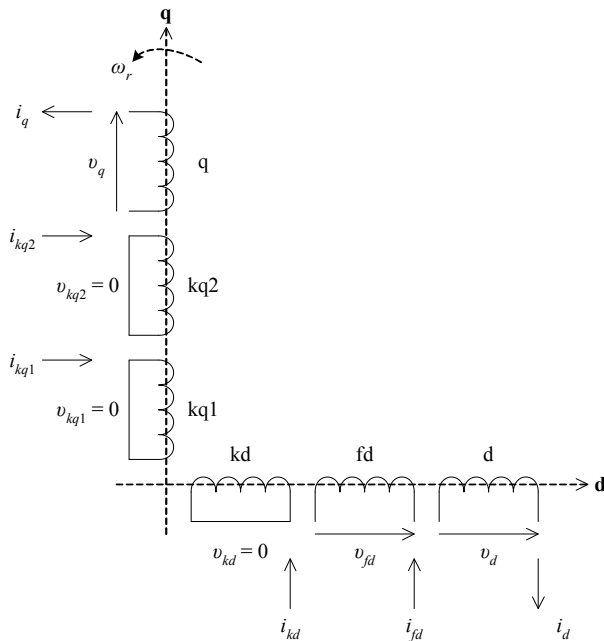
$$\theta_r = \omega_r t + \theta_{r0} \quad (3.1)$$

όπου  $\theta_{r0}$  είναι μία αυθαίρετη αρχική γωνία (σε ηλεκτρικά rad). Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας  $\theta_r$  ισούται με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα  $\omega_r$ , δηλαδή:

$$\dot{\theta}_r = \omega_r \quad (3.2)$$

### 3.1.2. Περιγραφή σύγχρονης μηχανής με τις εξισώσεις του Park

Ο μετασχηματισμός του Park [KWS95] αποτελεί το μαθηματικό εργαλείο για την ανάλυση των σύγχρονων μηχανών. Ο μετασχηματισμός αυτός συνίσταται στην αντικατάσταση των τριών τυλίγμάτων  $a$ ,  $b$ ,  $c$  του στάτη από τρία υποθετικά (ισοδύναμα) τυλίγματα  $d$ ,  $q$ ,  $0$ . Τα τυλίγματα  $d$ ,  $q$  του στάτη περιστρέφονται μαζί με το δρομέα της μηχανής και βρίσκονται στους ίδιους άξονες με τα αντίστοιχα τυλίγματα του δρομέα (τύλιγμα διεγέρσεως και τυλίγματα αποσβέσεως). Το τρίτο τυίλιγμα  $0$  δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δύο νέα τυλίγματα του στάτη και παίζει ρόλο μόνο σε συνθήκες ασύμμετρης φόρτισης της μηχανής. Επειδή στην παρούσα ανάλυση θα ασχοληθούμε μόνο με συμμετρικές συνθήκες φόρτισης, το τυίλιγμα  $0$  παραλείπεται στην συνέχεια. Η σχηματική παράσταση των τυλιγμάτων μίας σύγχρονης μηχανής μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού του Park φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Παράσταση τυλιγμάτων σύγχρονης μηχανής μετά το μετασχηματισμό του Park

Το κύριο πλεονέκτημα του μετασχηματισμού του Park είναι η απαλοιφή της χρονικής εξάρτησης των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών από τις εξισώσεις τάσεως της μηχανής [KUN94], [KWS95].

Οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα  $d$ ,  $q$  του στάτη στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα γράφονται ως εξής:

$$v_d = -r_s i_d - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_d \quad (3.3)$$

$$v_q = -r_s i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_d + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_q \quad (3.4)$$

όπου:

$v_d, v_q$  είναι οι τάσεις των τυλιγμάτων  $d, q$  του στάτη αντίστοιχα.

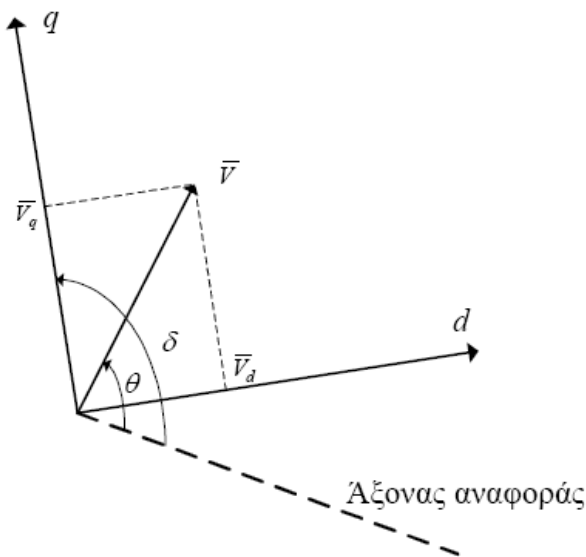
$i_d, i_q$  είναι τα ρεύματα των τυλιγμάτων  $d, q$  του στάτη αντίστοιχα.

$\psi_d, \psi_q$  είναι οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων  $d, q$  του στάτη αντίστοιχα.

$\omega_b$  είναι η βασική κυκλική συχνότητα (σε ηλεκτρικά r/s) του συστήματος.

$r_s$  είναι η ωμική αντίσταση του στάτη.

Το διανυσματικό διάγραμμα των τάσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4:



Σχήμα 3.4: Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων σύγχρονης μηχανής

Οι όροι  $(\omega_r/\omega_b)\psi_d$  και  $(\omega_r/\omega_b)\psi_q$  των παραπάνω σχέσεων (3.3)-(3.4), οι οποίοι είναι ανάλογοι της γωνιακής ταχύτητας του διανύσματος της τερματικής τάσης, προκύπτουν από το στρεφόμενο πεδίο και γι' αυτό το λόγο ονομάζονται τάσεις ταχύτητας. Οι όροι  $(1/\omega_b)\dot{\psi}_d$  και  $(1/\omega_b)\dot{\psi}_q$ , οι οποίοι είναι ίσοι με το ρυθμό μεταβολής της πεπλεγμένης ροής ανά δευτερόλεπτο, ονομάζονται τάσεις μετασχηματιστού.

Οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα του δρομέα του Σχήματος 3.3 γράφονται ως εξής:

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{fd} \quad (3.5)$$

$$0 = r_{kd} i_{kd} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{kd} \quad (3.6)$$

$$0 = r_{kq1} i_{kq1} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{kq1} \quad (3.7)$$

$$0 = r_{kq2} i_{kq2} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{kq2} \quad (3.8)$$

όπου  $v_{fd}$  είναι η συνεχής τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του τυλίγματος διεγέρσεως,  $r_{fd}$  είναι η αντίστασή του τυλίγματος πεδίου,  $\psi_{fd}$  η πεπλεγμένη ροή του τυλίγματος πεδίου ανά δευτερόλεπτο και  $i_{fd}$  το ρεύμα του πεδίου διεγέρσεως. Οι αντίστοιχοι συμβολισμοί των (3.6)-(3.8) αναφέρονται στα υπόλοιπα τυλίγματα του δρομέα.

Σημειώνεται ότι οι (3.3)-(3.4) είναι διατυπωμένες στο ανά μονάδα σύστημα του στάτη, τα βασικά μεγέθη του οποίου είναι η ονομαστική τριφασική ισχύς και η τερματική τάση της μηχανής.

Όσον αφορά τη δυναμική τους συμπεριφορά, οι σύγχρονες μηχανές χαρακτηρίζονται από [KUN94]:

**Τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα των τυλιγμάτων του στάτη**, τα οποία σχετίζονται με τις τάσεις μετασχηματιστού. Συγκεκριμένα, μετά από μία διαταραχή οι τάσεις μετασχηματιστού αποσβένονται μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου, αφήνοντας τις τάσεις ταχύτητας να διαδραματίσουν πρωταρχικό ρόλο στην απόκριση του συστήματος. Για παράδειγμα, μετά από ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα, οι τάσεις μετασχηματιστού είναι υπεύθυνες για την εμφάνιση της συνεχούς συνιστώσας στα ρεύματα του στάτη, η οποία μηδενίζεται σε χρονικό διάστημα μερικών δέκατων του δευτερολέπτου. Το χρονικό αυτό διάστημα θεωρείται πολύ μικρό σε σχέση με το διάστημα ενδιαφέροντος σε μελέτες ευστάθειας. Επομένως, τα εξεταζόμενα φαινόμενα συνήθως αμελούνται σε παρόμοιες μελέτες.

**Τα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα των τυλιγμάτων του δρομέα**. Τα φαινόμενα αυτά σχετίζονται με τις παραγωγούς των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο ( $\dot{\psi}_{fd}$ ,  $\dot{\psi}_{kq1}$  κλπ.) των ηλεκτρικών εξισώσεων του δρομέα και μπορούν να διαχωριστούν σε δύο επιμέρους κατηγορίες:

**Τα υπομεταβατικά**, τα οποία σχετίζονται με τα τυλίγματα αποσβέσεως και τα δινορρέυματα. Τα φαινόμενα αυτά εξελίσσονται αρκετά γρήγορα.

**Τα μεταβατικά φαινόμενα**, η δυναμική των οποίων καθορίζεται από το τυλίγμα του πεδίου διεγέρσεως και διαρκούν μερικά δευτερόλεπτα.

#### **Τη μηχανική συμπεριφορά του δρομέα.**

Αμελώντας τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του στάτη, οι τάσεις και τα ρεύματα του στάτη περιέχουν μόνο όρους θεμελιώδους συχνότητας και επομένως οι διαφορικές εξισώσεις (3.3) και (3.4) μετατρέπονται σε αλγεβρικές (οιονεί ημιτονοειδής μόνιμη κατάσταση).

Επίσης, τα ταχεία ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα του δικτύου λαμβάνουν χώρα στην ίδια χρονική κλίμακα με τα μεταβατικά φαινόμενα του στάτη μίας σύγχρονης μηχανής. Τα μεταβατικά φαινόμενα του δικτύου παίζουν μικρό ρόλο σε μελέτες ευστάθειας συχνότητας και συνεπώς αμελούνται μαζί με τα μεταβατικά φαινόμενα του στάτη.

### **3.1.3. Εξισώσεις κίνησης δρομέα**

Σε μελέτες ευστάθειας συνήθίζεται να αναφέρεται η θέση του πεδίου του δρομέα ως προς έναν άξονα αναφοράς που στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα (σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς). Για το λόγο αυτό, ορίζεται η γωνία  $\delta$  του δρομέα της σύγχρονης μηχανής ως η ηλεκτρική γωνία (σε ηλεκτρικά rad) μεταξύ του εγκάρσιου μαγνητικού άξονα της μηχανής και ενός στρεφόμενου άξονα αναφοράς, δηλαδή:

$$\delta = \theta_r - \omega_b t + \delta_0 \quad (3.9)$$



όπου  $\delta_0$  είναι η αρχική τιμή της γωνίας  $\delta$ , ενώ  $\omega_b$  είναι η γωνιακή ταχύτητα του άξονα αναφοράς (σε ηλεκτρικά rad/s). Παραγωγίζοντας και τα δύο μέλη της (3.9), προκύπτει η παρακάτω διαφορική σχέση:

$$\dot{\delta} = \dot{\theta}_r - \omega_b \quad (3.10)$$

η οποία λόγω της (3.2), γίνεται:

$$\dot{\delta} = \omega_r - \omega_b \quad (3.11)$$

Η διαφορική εξίσωση επιταχύνσεως του δρομέα της μηχανής δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$2H \frac{\dot{\omega}_r}{\omega_b} = T_m - T_e - D \left( \frac{\omega_r}{\omega_b} - 1 \right) \quad (3.12)$$

όπου:

$H$  είναι η ανηγμένη σταθερά αδράνειας σε MWs/MVA.

$\omega_r$  είναι η γωνιακή ταχύτητα του πεδίου του δρομέα σε ηλεκτρικά rad/s.

$T_m$  είναι η ανά μονάδα παραγόμενη από το στρόβιλο μηχανική ροπή.

$T_e$  είναι η ανά μονάδα ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας.

$D$  είναι ο ανά μονάδα συντελεστής απόσβεσης.

Οι διαφορικές εξισώσεις (3.11) και (3.12) είναι γνωστές σαν εξισώσεις ταλάντωσης της μηχανής και συνιστούν την απλούστερη παράσταση της σύγχρονης μηχανής.

#### 3.1.4. Μοντέλο τέταρτης τάξεως σύγχρονης γεννήτριας

Το μοντέλο τέταρτης τάξεως, στηρίζεται στις ακόλουθες παραδοχές [KUN94]:

(α) Οι τάσεις μετασχηματιστού  $(1/\omega_b)\dot{\psi}_d$  και  $(1/\omega_b)\dot{\psi}_q$  αμελούνται για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

(β) Στον δρομέα παριστάνονται δύο μόνο τυλίγματα, το τύλιγμα του πεδίου διεγέρσεως και ένα τύλιγμα αποσβέσεως στον εγκάρσιο μαγνητικό άξονα. Τα δύο αυτά τυλίγματα θεωρείται ότι δεν είναι μαγνητικά συζευγμένα μεταξύ τους.

(γ) Η επίδραση του μαγνητικού κορεσμού αμελείται.

(δ) Η δυναμική της κίνησης του δρομέα περιγράφεται από τις εξισώσεις ταλάντωσης της μηχανής.

Οι εξισώσεις (3.3)-(3.4) απλοποιούνται ως εξής:

$$v_d = -r_s i_d - \lambda_\omega \psi_q \quad (3.13)$$

$$v_q = -r_s i_q + \lambda_\omega \psi_d \quad (3.14)$$

όπου  $\lambda_\omega$  είναι ο λόγος των γωνιακών ταχυτήτων  $\omega_r$  προς  $\omega_b$ . Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι επειδή οι σύγχρονες μηχανές λειτουργούν συνήθως πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα (απόκλιση  $\pm 1\%$ ), ο λόγος  $\lambda_\omega$  είναι πρακτικά ίσος με τη μονάδα και για πρακτικούς λόγους αμελείται.

Οι εξισώσεις του δρομέα μετασχηματίζονται ως εξής:

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{fd} \quad (3.15)$$

$$0 = r_{kq} i_{kq} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{kq} \quad (3.16)$$

Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο ικανοποιούν τις παρακάτω σχέσεις δεδομένων τεσσάρων τυλιγμάτων:

$$\psi_d = -X_d i_d + X_{afd} i_{fd} \quad (3.17)$$

$$\psi_q = -X_q i_q + X_{akq} i_{kq} \quad (3.18)$$

$$\psi_{fd} = -X_{afd} i_d + X_{ffd} i_{fd} \quad (3.19)$$

$$\psi_{kq} = -X_{akq} i_q + X_{kkq} i_{kq} \quad (3.20)$$

Προκειμένου να απαλειφθούν οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο  $\psi_d$  και  $\psi_q$  από τις αλγεβρικές εξισώσεις (3.17)-(3.20) και τις εξισώσεις του στάτη (3.13)-(3.14), εκφράζονται καταρχήν τα ρεύματα του πεδίου διεγέρσεως  $i_{fd}$  και του τυλίγματος απόσβεσης  $i_{kq}$  συναρτήσει των όρων  $\psi_{fd}$ ,  $i_d$  και  $\psi_{kq}$ ,  $i_{kq}$  αντίστοιχα από τις (3.19)-(3.20), δηλαδή:

$$i_{fd} = \frac{1}{X_{ffd}} (\psi_{fd} + X_{afd} i_d) \quad (3.21)$$

$$i_{kq} = \frac{1}{X_{kkq}} (\psi_{kq} + X_{akq} i_q) \quad (3.22)$$

Αντικαθιστώντας την (3.21) στην (3.17) προκύπτει:

$$\psi_d = - \left( X_d - \frac{X_{afd}^2}{X_{ffd}} \right) i_d + \frac{X_{afd}}{X_{ffd}} \psi_{fd} \quad (3.23)$$

Αντικαθιστώντας την (3.22) στην (3.18) προκύπτει:

$$\psi_q = - \left( X_q - \frac{X_{akq}^2}{X_{kkq}} \right) i_q + \frac{X_{akq}}{X_{kkq}} \psi_{kq} \quad (3.24)$$

Ορίζεται η μεταβατική αντίδραση της γεννήτριας κατά τον ευθύ και εγκάρσιο άξονα:

$$X'_d = X_d - \frac{X_{afd}^2}{X_{ffd}} \quad (3.25)$$

$$X'_q = X_q - \frac{X_{akq}^2}{X_{kkq}} \quad (3.26)$$

Επίσης ορίζονται η ηλεκτρεγερτική δύναμη (HEΔ) και οι μεταβατικές HEΔ κατά τον ευθύ και εγκάρσιο άξονα:

$$E'_q = \frac{X_{afd}}{X_{ffd}} \psi_{fd} \quad (3.27)$$

$$E'_d = -\frac{X_{akkq}}{X_{kkq}} \psi_{kq} \quad (3.28)$$

$$E_f = \frac{X_{afd}}{r_{fd}} v_{fd} \quad (3.29)$$

Αντικαθιστώντας τις (3.25)-(3.28) στις (3.23)-(3.24) προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$\psi_d = -X'_d i_d + E'_q \quad (3.30)$$

$$\psi_q = -X'_q i_q - E'_d \quad (3.31)$$

Αντικαθιστώντας τις (3.30)-(3.31) στις (3.13)-(3.14) προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s & X'_q \\ -X'_d & -r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{r_s^2 + X'_q X'_d} \begin{bmatrix} -r_s & -X'_q \\ X'_d & -r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d - E'_d \\ v_q - E'_q \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Βάση του διανυσματικού διαγράμματος των τάσεων (Σχήμα 2.3) ισχύει:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_t \sin(\delta - \theta) \\ V_t \cos(\delta - \theta) \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Στην περίπτωση όπου  $r_s=0$  οι εξισώσεις γίνονται:

$$i_d = \frac{E'_q - v_q}{X'_d} \quad (3.35)$$

$$i_q = \frac{-E'_d + v_d}{X'_q} \quad (3.36)$$

Ορίζονται οι μεταβατικές χρονικές σταθερές ευθέως και εγκάρσιου άξονα

$$T'_d = \frac{X_{ffd}}{\omega_b r_{fd}} \quad (3.37)$$

$$T'_q = \frac{X_{kkq}}{\omega_b r_{kq}} \quad (3.38)$$

Οι εξισώσεις του δρομέα (3.15)-(3.16) με την αντικατάσταση των (3.21)-(3.22) και των (3.37)-(3.38) γίνονται:

$$v_{fd} = \frac{r_{fd}}{X_{ffd}} (\psi_{fd} + X_{afd} i_d) + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{fd} \quad (3.39)$$

$$\dot{E}'_d T'_d = E_f - E'_q - (X_d - X'_d) i_d \quad (3.40)$$

$$0 = r_{kq} i_{kq} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{kq} \quad (3.41)$$

$$\dot{E}'_q T'_q = -E'_d + (X_q - X'_q) i_q \quad (3.42)$$

Για την ροή ισχύος προκύπτει:

$$P = v_d i_d + v_q i_q \quad (3.43)$$

$$Q = v_q i_d - v_d i_q \quad (3.44)$$

$$P_G = \frac{E'_q V_t \sin(\delta - \theta)}{X'_d} - \frac{E'_d V_t \cos(\delta - \theta)}{X'_q} + \frac{V_t^2}{2} \left( \frac{1}{X'_q} - \frac{1}{X'_d} \right) \sin(2(\delta - \theta)) \quad (3.45)$$

$$Q_G = \frac{E'_q V_t \cos(\delta - \theta)}{X'_d} + \frac{E'_d V_t \sin(\delta - \theta)}{X'_q} - V_t^2 \left( \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X'_d} + \frac{\sin^2(\delta - \theta)}{X'_q} \right) \quad (3.46)$$

### 3.1.5. Μοντέλο τρίτης τάξεως σύγχρονης γεννήτριας

Αγνοώντας τις τάσεις μετασχηματισμού του στάτη και το τύλιγμα απόσβεσης του προηγούμενου μοντέλου, οι εξισώσεις (3.13)-(3.14) απλοποιούνται ως εξής:

$$v_d = -r_s i_d - \psi_q \quad (3.47)$$

$$v_q = -r_s i_q + \psi_d \quad (3.48)$$

Οι εξισώσεις του δρομέα μετασχηματίζονται:

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{fd} \quad (3.49)$$

Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο ικανοποιούν τις παρακάτω σχέσεις δεδομένων τριών τυλιγμάτων:

$$\psi_d = -X_d i_d + X_{md} i_{fd} \quad (3.50)$$

$$\psi_q = -X_q i_q \quad (3.51)$$

$$\psi_{fd} = -X_{md} i_d + X_{fd} i_{fd} \quad (3.52)$$

Προκειμένου να απαλειφθούν οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο  $\psi_d$  και  $\psi_q$  από τις αλγεβρικές εξισώσεις και του στάτη αντίστοιχα, εκφράζεται καταρχήν το ρεύμα του πεδίου διεγέρσεως  $i_{fd}$  συναρτήσει των όρων  $\psi_{fd}$  και  $i_d$  από την (3.52), δηλαδή:

$$i_{fd} = \frac{1}{X_{fd}} (\psi_{fd} + X_{md} i_d) \quad (3.53)$$

Στη συνέχεια, με βάση την (3.53) αντικαθιστάται το ρεύμα πεδίου διεγέρσεως στις (3.50)-(3.51) των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο  $\psi_d$  και  $\psi_q$  του στάτη αντίστοιχα, οπότε προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\psi_d = -\left(X_d - \frac{X_{md}^2}{X_d}\right)i_d + \frac{X_{md}}{X_{fd}}\psi_{fd} \quad (3.54)$$

$$\psi_q = -X_q i_q \quad (3.55)$$

Οπότε οι εξισώσεις (3.54), (3.55) βάση των εξισώσεων (3.25), (3.27) μετασχηματίζονται ως εξής:

$$\psi_d = -X'_d i_d + E'_q \quad (3.56)$$

$$\psi_q = -X_q i_q \quad (3.57)$$

Αντικαθιστώντας τις (3.56)-(3.57) στις (3.47),(3.48) των τάσεων των τυλίγματος του στάτη αντίστοιχα, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$v_d = -r_s i_d + X_q i_q \quad (3.58)$$

$$v_q = -r_s i_q - X'_d i_d + E'_q \quad (3.59)$$

Ακολουθώντας, το ρεύμα του τυλίγματος του δρομέα, το οποίο υπολογίζεται στην εξίσωση (3.53) αντικαθίσταται στην εξίσωση (3.49) και προκύπτει:

$$v_{fd} = \frac{r_{fd}}{X_{fd}}\psi_{fd} + \frac{r_{fd}X_{md}}{X_{fd}}i_d + \frac{1}{\omega_b}\dot{\psi}_{fd} \quad (3.60)$$

Αναδιαμορφώνοντας την εξίσωση προκύπτει:

$$\left(\frac{X_{fd}}{\omega_b r_{fd}}\right)\left(\frac{X_{md}}{X_{fd}}\dot{\psi}_{fd}\right) = \frac{X_{md}}{r_{fd}}v_{fd} - \frac{X_{md}}{X_{fd}}\psi_{fd} - \frac{(X_{md})^2}{X_{fd}}i_d \quad (3.61)$$

Η οποία με αντικατάσταση βάση των εξισώσεων (3.25), (3.27), (3.37) καθώς και της επόμενης εξίσωσης για την ΗΕΔ  $E_q$

$$E_q = E'_q + (X_d - X'_d)i_d \quad (3.62)$$

προκύπτει:

$$T'_{d0}\dot{E}'_q = E_f - E'_q - (X_d - X'_d)i_d \quad (3.63)$$

Αναφορικά με την ενεργό ισχύ εξόδου της γεννήτριας  $P_G$ , υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_G = v_d i_d + v_q i_q \quad (3.64)$$

ενώ η παραγόμενη άεργος ισχύς  $Q_G$  προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_G = v_q i_d - v_d i_q \quad (3.65)$$

Στις παραπάνω σχέσεις αντικαθίστανται τα ρεύματα βάση των εξισώσεων (3.58)-(3.59):

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s & X_q \\ -X_d' & -r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E_q' \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{r_s^2 + X_q X_d'} \begin{bmatrix} -r_s & -X_q \\ X_d' & -r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q - E_q' \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Βάση του διανυσματικού διαγράμματος των τάσεων ισχύει:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_t \sin(\delta - \theta) \\ V_t \cos(\delta - \theta) \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

Οπότε οι (3.64), (3.65) γίνονται:

$$P_G = c_{G3} \left( -r_s V_t + X_q E_q' \sin(\delta - \theta) + r_s E_q' \cos(\delta - \theta) + \frac{V_t}{2} (X_d' - X_q) \sin(2(\delta - \theta)) \right) \quad (3.69)$$

$$Q_G = c_{G3} \left( X_q E_q' \cos(\delta - \theta) - r_s E_q' \sin(\delta - \theta) - X_q V_t \cos^2(\delta - \theta) - X_d' V_t \sin^2(\delta - \theta) \right) \quad (3.70)$$

όπου

$$c_{G3} = \frac{V_t}{r_s^2 + X_d' X_q} \quad (3.71)$$

Οι οποίες στην περίπτωση όπου ο στάτης έχει αμελητέα ωμική αντίσταση μετασχηματίζονται στις εξής εξισώσεις:

$$P_G = \frac{V_t E_q' \sin(\delta - \theta)}{X_d'} + \frac{V_t^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d'} \right) \sin(2(\delta - \theta)) \quad (3.72)$$

$$Q_G = \frac{V_t E_q' \cos(\delta - \theta)}{X_d'} - V_t^2 \left( \frac{\sin^2(\delta - \theta)}{X_q} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d'} \right) \quad (3.73)$$

### 3.1.6. Κλασικό μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας

Στην περίπτωση αυτή, αγνοείται επιπλέον η δυναμική του πεδίου διεγέρσεως της γεννήτριας. Συνεπώς εκτός της δυναμικής του άξονά της (η οποία διατηρείται), η γεννήτρια θεωρείται ότι φτάνει ακαριαία σε κατάσταση ισορροπίας. Συνεπώς, οι εξισώσεις (3.47)-(3.51) τροποποιούνται ως εξής:

$$v_d = -r_s i_d - \psi_q \quad (3.74)$$

$$v_q = -r_s i_q + \psi_d \quad (3.75)$$

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} \quad (3.76)$$

$$\psi_d = -X_d i_d + X_{afd} i_{fd} \quad (3.77)$$

$$\psi_q = -X_q i_q \quad (3.78)$$

Απαλείφοντας τα  $\psi_d, \psi_q$  προκύπτει:

$$v_d = -r_s i_d + X_q i_q \quad (3.79)$$

$$v_q = -r_s i_q - X_d i_d - X_{afd} \frac{v_{fd}}{r_{fd}} \quad (3.80)$$

Βάση της (3.29) προκύπτει

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s & X_q \\ -X_d & -r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E_f \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

Για την ισχύ της γεννήτριας, ισχύει:

$$P_G = c_G \left( -r_s V_t + X_q E_f \sin(\delta - \theta) + r_s E_f \cos(\delta - \theta) + \frac{V_t}{2} (X_d - X_q) \sin(2(\delta - \theta)) \right) \quad (3.82)$$

$$Q_G = c_G \left( X_q E_f \cos(\delta - \theta) - r_s E_f \sin(\delta - \theta) - X_q V_t \cos^2(\delta - \theta) - X_d V_t \sin^2(\delta - \theta) \right) \quad (3.83)$$

όπου

$$c_G = \frac{V_t}{r_s^2 + X_d X_q} \quad (3.84)$$

Οι οποίες στην περίπτωση όπου ο στάτης έχει αμελητέα ωμική αντίσταση μετασχηματίζονται στις εξής εξισώσεις:

$$P_G = \frac{V_t E_f \sin(\delta - \theta)}{X_d} + \frac{V_t^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2(\delta - \theta)) \quad (3.85)$$

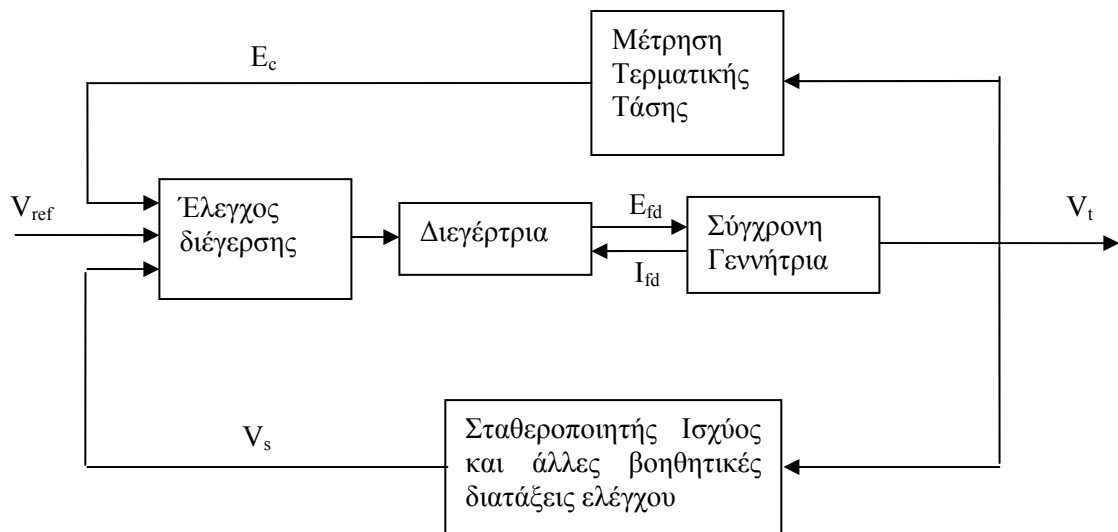
$$Q_G = \frac{V_t E_f \cos(\delta - \theta)}{X_d} - V_t^2 \left( \frac{\sin^2(\delta - \theta)}{X_q} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) \quad (3.86)$$

## 3.2. Αυτόματοι Ρυθμιστές Τάσης (APT)

### 3.2.1. Συστήματα διέγερσης

Τα συστήματα διέγερσης παρέχουν συνεχές ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας. Διαμέσου του ελέγχου του ρεύματος διέγερσης οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης (APT) ελέγχουν την τερματική τάση της γεννήτριας, την παραγωγή αέργου ισχύος, και ενδεχομένως την ευστάθεια του συστήματος. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι διαφορετικοί τύποι APT οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή. Το θέμα αυτό έχει αναλυθεί στις αναφορές της IEEE [IEEE06], καθώς και στα βιβλία [KUN94], [PAD08], [AF77].

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται σε μπλοκ διάγραμμα μια διάταξη γεννήτριας, με τον βρόχο ελέγχου της τάσης.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα βαθμίδων διατάξεων ελέγχου τάσεως σύγχρονης γεννήτριας

Σύμφωνα με τη διάταξη του Σχήματος 3.5 η τερματική τάση της γεννήτριας μετράται διαμέσου ενός μετασχηματιστή τάσης και κατόπιν ανορθώνεται προκειμένου να παραχθεί ένα συνεχές (DC) σήμα ( $E_c$ ) ανάλογο με την ενεργό τιμή της τερματικής τάσης. Το συνεχές αυτό σήμα συγκρίνεται με ένα σήμα αναφοράς  $V_{ref}$  και η διαφορά τους εισάγεται στην κύρια μονάδα του APT, της οποίας ο ρόλος είναι να αυξήσει την τάση διέγερσης της γεννήτριας σε περίπτωση που μειωθεί η τερματική της τάση  $V_t$  ή αν αυξηθεί η τάση αναφοράς  $V_{ref}$  και αντιστρόφως. Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη ελέγχου του ρυθμιστή ενισχύει το σφάλμα  $V_{ref} - V_t$  και το φέρνει σε κατάλληλη μορφή για να εισαχθεί στο σύστημα διέγερσης. Η διεγέρτρια είναι μια μηχανή η οποία αποδίδει συνεχή τάση στο τυλίγμα πεδίου της μηχανής.

Στην διαμόρφωση του σήματος εισόδου του APT συμβάλει και το σήμα εξόδου του σταθεροποιητή ισχύος (*Power System Stabilizer*), ο οποίος είναι μια διάταξη που παρέχει πρόσθετη ροπή απόσβεσης διαμέσου της διέγερσης. Ο σταθεροποιητής ισχύος λειτουργεί σταθεροποιητικά για τη γεννήτρια στη μεταβατική κατάσταση, αφήνοντας ανεπηρέαστη την τερματική τάση της γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση και θα εξεταστεί στην ενότητα 3.4.

Τα συστήματα διέγερσης διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες, βάση των διαφορετικών μεθόδων υλοποίησης της διάταξης.

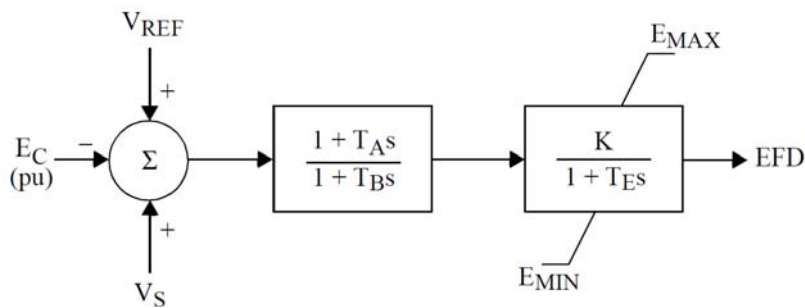
1. **Στρεφόμενες διεγέρτριες συνεχούς ρεύματος (DC)**, οι οποίες χρησιμοποιούν μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος μαζί με έναν συλλέκτη [*commutator*] ο οποίος χρησιμοποιείται ως πηγή της ισχύς που απαιτείται για την διαμόρφωση της τάσης διέγερσης. Τα συστήματα διέγερσης συνεχούς ρεύματος αποτελούν τα πρώτα που χρησιμοποιήθηκαν διευρυμένα (δεκαετίες 1920 με 1960). Έπειτα, άρχισε η σταδιακή υποκατάσταση των διεγερτριών συνεχούς με διεγέρτριες εναλλασσόμενου ρεύματος.
2. **Στρεφόμενα συστήματα διέγερσης εναλλασσόμενου ρεύματος (AC)**. Χρησιμοποιούν σύγχρονη γεννήτρια EP ως διεγέρτρια και ανορθωτές, στατούς ή στρεφόμενους, στην έξοδο της για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές και την τροφοδότηση του τυλίγματος διέγερσης.



3. **Στατά συστήματα διέγερσης.** Στα συστήματα αυτά η τάση διέγερσης διαμορφώνεται από μετασχηματιστές ή βοηθητικά τυλίγματα των γεννητριών και ανορθωτές.

### 3.2.2. Γενικό μοντέλο APT (SEXS)

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα βαθμίδων ενός απλού APT υψηλού κέρδους. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η είσοδος του ρυθμιστή είναι το σήμα που διαμορφώνεται ως η διαφορά της τάσεως αναφοράς και του σήματος ελέγχου από την τερματική τάση της γεννήτριας. Στο εσωτερικό του ρυθμιστή, το σήμα αυτό ενισχύεται με ένα κέρδος και διαμέσου της συνάρτησης μεταφοράς του ρυθμιστή, διαμορφώνοντας τη συνεχή τάση που θα εφαρμοστεί στο τυλίγμα διέγερσης. Το μοντέλο αυτό είναι ένα γενικό απλοποιημένο μοντέλο APT [PML10] και αντιστοιχεί στο μοντέλο SEXS [PSS-M]. Τέλος στα σήματα εισόδου διακρίνεται το σήμα  $V_S$ , το οποίο είναι το σήμα εξόδου του σταθεροποιητή ισχύος της γεννήτριας αν υπάρχει.



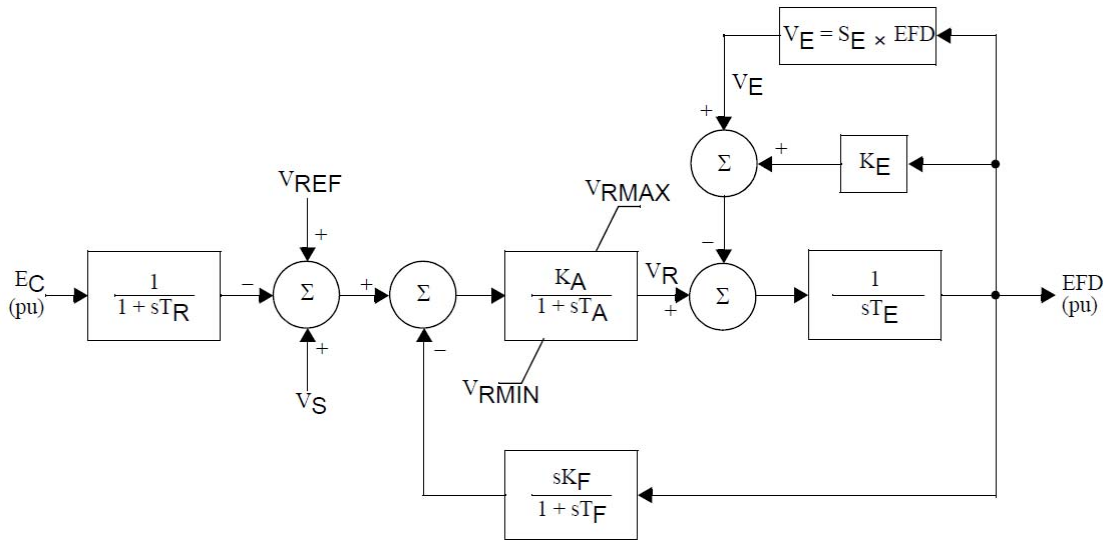
Σχήμα 3.6: Διάγραμμα βαθμίδων διατάξεων SEXS

### 3.2.3. Μοντέλο APT με στρεφόμενα συστήματα συνεχούς ρεύματος (IEEE T1)

Ο ρυθμιστής του Σχήματος 3.7 ανήκει στην πρώτη κατηγορία από αυτές που περιγράφησαν στην παράγραφο 3.2.1. Αρκετά τέτοια συστήματα βρίσκονται σε λειτουργία στα ΣΗΕ. Παράλληλα συνηθίζεται να χρησιμοποιείται το μοντέλο αυτό για την παράσταση άλλων τύπων συστημάτων διέγερσης, όταν λεπτομερή δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα ή όταν απαιτούνται απλοποιημένα μοντέλα. Το μοντέλο αυτό αντιστοιχεί στο μοντέλο IEEE T1 [PSS-M].

Η βασική είσοδος του APT είναι η τερματική τάση ( $E_C$ ). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα βαθμίδων του Σχήματος 3.7, η μετρούμενη τερματική τάση αφαιρείται από την τάση αναφοράς ( $V_{REF}$ ) προκειμένου να προκύψει το σφάλμα της τάσης. Στην συνέχεια προστίθεται το σήμα σταθεροποίησης από πιθανό σταθεροποιητή ( $V_S$ ) και αφαιρείται το σήμα ανατροφοδότησης. Σε μόνιμο κατάσταση τα σήματα  $V_S$  και το σήμα της ανατροφοδότησης είναι μηδενικά. Το σήμα που προκύπτει ενισχύεται στον ρυθμιστή. Η βασική χρονική σταθερά του ρυθμιστή τάσης είναι  $T_A$ , και το κέρδος  $K_A$ . Τα όρια (μέγιστα και ελάχιστα), σχετίζονται με περιορισμούς κορεσμού ή με περιορισμούς ισχύος της διάταξης ενίσχυσης. Οι APT τύπου 1 χρησιμοποιούν πηγές ισχύος που είναι ανεπηρέαστες από απότομα μεταβατικά των σύγχρονων μηχανών ή των βοηθητικών ζυγών.

Η έξοδος του APT χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της διεγέρτριας συνεχούς ρεύματος η οποία μπορεί είτε να διεγείρεται μέσω χωριστής διάταξης ή να αυτοδιεγείρεται, με την τελευταία περίπτωση να είναι πιο συνήθης. Η μοναδιαία τιμή για το  $K_E$  χρησιμοποιείται για να μοντελοποιηθεί ξεχωριστή διέγερση για την διεγέρτρια. Ο όρος  $S_E(E_{FD})$  είναι μια μη γραμμική συνάρτηση. Η έξοδος αυτού του μπλοκ που σχετίζεται με τον κορεσμό πολλαπλασιάζεται με την τιμή της τάσης διέγερσης διαμορφώνοντας σήμα ανατροφοδότησης. Αντίστοιχα το σήμα της τάσης διέγερσης χρησιμοποιείται ως σήμα σταθεροποίησης, μέσω του αντίστοιχου κλάδου ανατροφοδότησης που φαίνεται στο διάγραμμα με παραμέτρους  $K_F$ ,  $T_F$ .

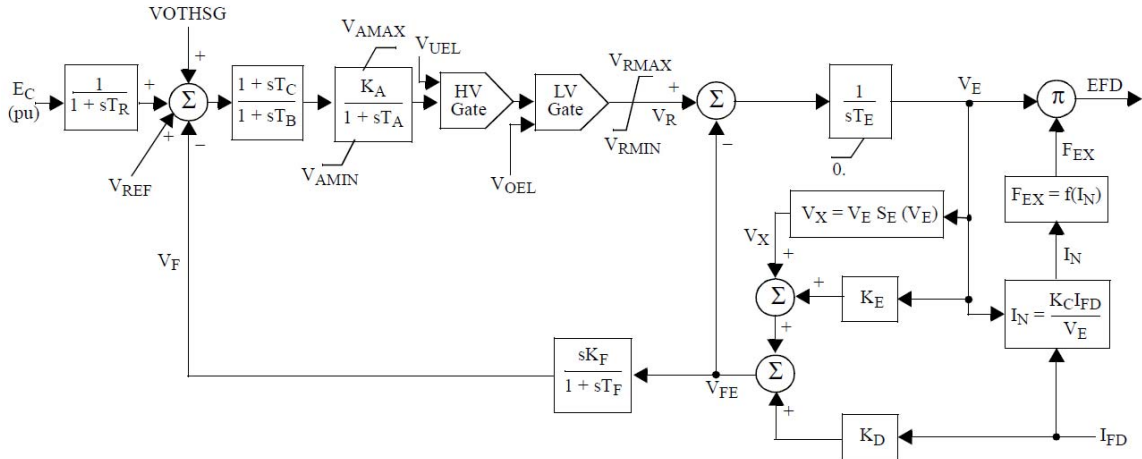


Σχήμα 3.7: Διάγραμμα βαθμίδων διατάξεων APT IEEE1

### 3.2.4. Μοντέλο APT εναλλασσόμενου ρεύματος I (ESAC1A/AC1A)

Αυτός ο τύπος APT ανήκει στην δεύτερη κατηγορία που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2.1. Αυτά τα συστήματα διέγερσης αποτελούνται από μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος ως κύρια διέγερση μαζί με μη ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις για την μετατροπή του εναλλασσόμενου σε συνεχές ρεύμα. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση η ισχύς διέγερσης δεν προκύπτει από πηγή που επηρεάζεται από εξωτερικά μεταβατικά φαινόμενα. Η χαρακτηριστική της διόδου στην έξοδο της διεγέρτριας εισάγει ένα ελάχιστο όριο στην τάση εξόδου. Για μεγάλα συστήματα η διάταξη διέγερσης παριστάνεται με το μοντέλο AC1A (Σχήμα 3.8) και αντιστοιχεί στο μοντέλο ESAC1A [PSS-M].

Ειδικότερα, η απομαγνητίζουσα δύναμη του ρεύματος διέγερσης ( $I_{FD}$ ) στην έξοδο της γεννήτριας διέγερσης ( $V_E$ ) λογίζεται στην ανατροφοδότηση που περιλαμβάνει την σταθερά  $K_D$ . Η πτώση τάσης διέγερσης λόγω του ανορθωτή προσομοιώνεται με την σταθερά  $K_C$  και την συνάρτηση του ανορθωτή ( $F_{EX}$ ). Στο μοντέλο αυτό, το σήμα  $V_{FE}$ , το οποίο είναι ανάλογο με το ρεύμα πεδίου, προκύπτει από την άθροιση σημάτων από την έξοδο της διεγέρτριας ( $V_E$ ). Το σήμα αυτό πολλαπλασιάζεται με  $K_E + S_E(V_E)$  (όπου η συνάρτηση  $S_E(V_E)$  παριστάνει τον κορεσμό) και προστίθεται το  $I_{FD}$  πολλαπλασιαζόμενο με τον όρο απομαγνήτισης  $K_D$ . Τέλος, στο διάγραμμα φαίνονται και τα όρια που εισάγονται από τις διατάξεις προστασίας υπερ/υπο διέγερσης ( $V_{UEL}$ ,  $V_{OEL}$ ) [IEEE06].

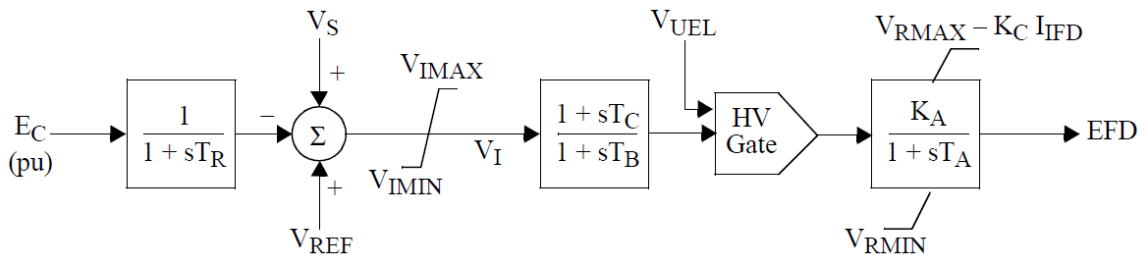


Σχήμα 3.8: Διάγραμμα βαθμίδων διατάξεων APT ESAC1A

### 3.2.5. Μοντέλο APT εναλλασσόμενου ρεύματος II (ESAC4A/AC4A)

Οι APT αυτού του τύπου έχουν διατάξεις ελέγχου στον ανορθωτή και είναι αρκετά διαφορετικές από άλλους αντίστοιχους APT εναλλασσόμενου ρεύματος. Χρησιμοποιούν μια πλήρη γέφυρα ανόρθωσης με θυρίστορ και αποκρίνονται αρκετά γρήγορα μετά από μια διαταραχή. Το μοντέλο αυτό αντιστοιχεί στο μοντέλο AC4A [IEEE06] ή ESAC4A [PSS-M].

Στην διάταξη αυτή (Σχήμα 3.9) ελέγχεται η πυροδότηση των θυρίστορ. Η γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος για την παροχή της ισχύος διέγερσης χρησιμοποιεί έναν εξωτερικό ρυθμιστή τάσης για να ελέγχεται η τάση εξόδου της. Τα χαρακτηριστικά αυτά δεν μοντελοποιούνται, ωστόσο τα μεταβατικά φαινόμενα φόρτισης διεγέρτριας περιλαμβάνονται στο μοντέλο. Η σταθεροποίηση συστημάτων με θυρίστορ γίνεται συχνότερα με μπλοκ υστέρησης-προήγησης φάσης παρά με διατάξεις ανατροφοδότησης. Οι χρονικές σταθερές  $T_B$ ,  $T_C$  επιτρέπουν την παράσταση αυτών των δυναμικών. Το συνολικό ισοδύναμο κέρδος και η χρονική σταθερά που αντιστοιχεί στον ρυθμιστή και/ή στην πυροδότηση των θυρίστορ μοντελοποιούνται με τις σταθερές  $K_A$ ,  $T_A$  αντίστοιχα. Τέλος, στο διάγραμμα φαίνονται και τα σήματα που εισάγονται από τις διατάξεις προστασίας υποδιέγερσης ( $V_{UEL}$ ) [IEEE06].



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα βαθμίδων διατάξεων APT ESAC4A

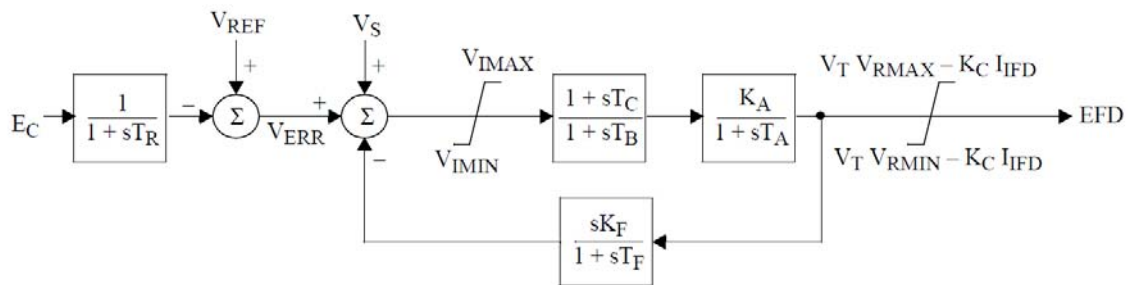
### 3.2.6. Μοντέλο APT με στατό σύστημα διέγερσης (EXST1/AC4A)

Ο συγκεκριμένος τύπος APT (Σχήμα 3.10) αντιστοιχεί σε APT με στατό σύστημα διέγερσης, και αντιστοιχεί στο μοντέλο EXST1 (ST1) [PSS-M]. Το μοντέλο EXST1 προσομοιώνει την λειτουργία μιας διάταξης στην οποία η ισχύς διέγερσης παρέχεται μέσω ενός μετασχηματιστή από τον τερματικό ζυγό της γεννήτριας (ή τον βοηθητικό ζυγό της μονάδας) και ρυθμίζεται μέσω

ενός ελεγχόμενου ανορθωτή. Η μέγιστη τάση διέγερσης σχετίζεται συνεπώς άμεσα με την τερματική τάση της γεννήτριας.

Σε τέτοιου τύπου συστήματα, οι εσωτερικές χρονικές σταθερές είναι πολύ μικρές και η σταθεροποίηση της διεγέρτριας μπορεί να μην απαιτείται. Από την άλλη πλευρά μπορεί να είναι επιθυμητή η μείωση του μεταβατικού κέρδους. Το μοντέλο αυτό είναι αρκετά ευέλικτο και περιλαμβάνει την μείωση του μεταβατικού κέρδους είτε μέσω των χρονικών σταθερών  $T_B$ ,  $T_C$  (σε αυτήν την περίπτωση το κέρδος ανατροφοδότησης  $K_F$  θα είναι μηδενικό), είτε μέσω της κατάλληλης επιλογής των παραμέτρων ανατροφοδότησης  $K_F$ ,  $T_F$ . Το κέρδος και η χρονική σταθερά της διεγέρτριας είναι  $K_A$ ,  $T_A$  αντίστοιχα.

Ο τρόπος με τον οποίο πυροδοτούνται οι δίοδοι στον ανορθωτή επηρεάζει την συνάρτηση μεταφοράς. Θεωρείται ότι η σχέση είναι γραμμική και ενσωματώνεται στον υπολογισμό του  $K_A$ .



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα βαθμίδων διατάξεων APT EXSTI

### 3.3. Ρυθμιστές στροφών – Μονάδες παραγωγής

#### 3.3.1. Γενικά στοιχεία για τους ρυθμιστές στροφών

Οι ρυθμιστές στροφών αποτελούν τις διατάξεις εκείνες οι οποίες ελέγχουν την ισχύ εξόδου κάθε γεννήτριας καθώς και την συχνότητα του συστήματος. Αποτελεί τμήμα της συνολικής διάταξης της κινητήριας μηχανής η οποία είναι το σύστημα που μετατρέπει την πρωτογενή πηγή ενέργειας (ορυκτά καύσιμα, ενέργεια νερού κ.α.) σε μηχανική ισχύ (ροπή) στον άξονα της γεννήτριας. Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται τόσο οι μηχανικές διατάξεις της μονάδας παραγωγής όσο και οι διατάξεις που ελέγχουν την λειτουργία της. Αυτές μπορεί να αποτελούν συστήματα προστασίας της μονάδας (όπως π.χ. προστασίες υπερθέρμανσης, ανώτατα και κατώτατα όρια τροφοδοσίας καυσίμου κ.α.) είτε ρυθμιστές στροφών οι οποίοι είναι οι ελεγκτές που πραγματοποιούν την ρύθμιση φορτίου συχνότητας. Η ρύθμιση αυτή συνίσταται στην μεταβολή της παραγόμενης μηχανικής ισχύος της μονάδας για να αντισταθμιστεί η μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας. Παρότι η συμβολή των διατάξεων αυτών στις διασυνδεδεμένες ταλαντώσεις δεν είναι τόσο σημαντική όσο αυτή των αυτόματων ρυθμιστών τάσεως, δεν μπορούν να αγνοηθούν διότι επηρεάζουν τις ταλαντώσεις αυτές. Η μοντελοποίηση τροποποιείται ανάλογα με τον τύπο της μονάδας. Στην συγκεκριμένη διατριβή χρησιμοποιούνται μοντέλα για

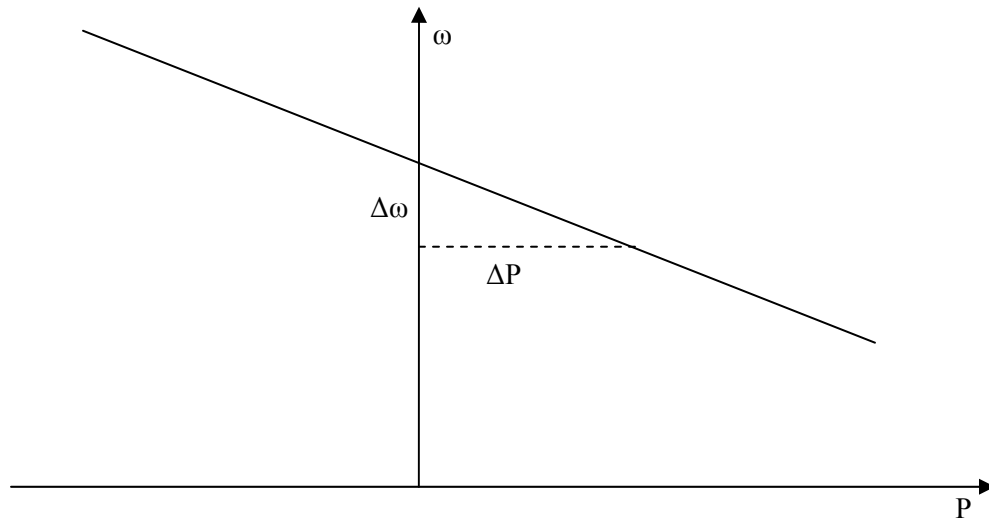
- Ατμοστροβλικές μονάδες (ορυκτά καύσιμα)
- Υδροηλεκτρικές μονάδες

### 3.3.2. Στατισμός

Κοινό στοιχείο των ρυθμιστών στροφών των μονάδων είναι ο στατισμός ( $R$ ) ο οποίος εκφράζει την μόνιμη μεταβολή της συχνότητας του άξονα της γεννήτριας ( $\Delta\omega$ ) μετά από μια μεταβολή του φορτίου ( $\Delta P$ ) της γεννήτριας ως αποτέλεσμα της δράσης της πρωτεύουσας ρύθμισης. Ο στατισμός δίνεται από την σχέση:

$$R = -\frac{\Delta\omega}{\Delta P} \quad (3.87)$$

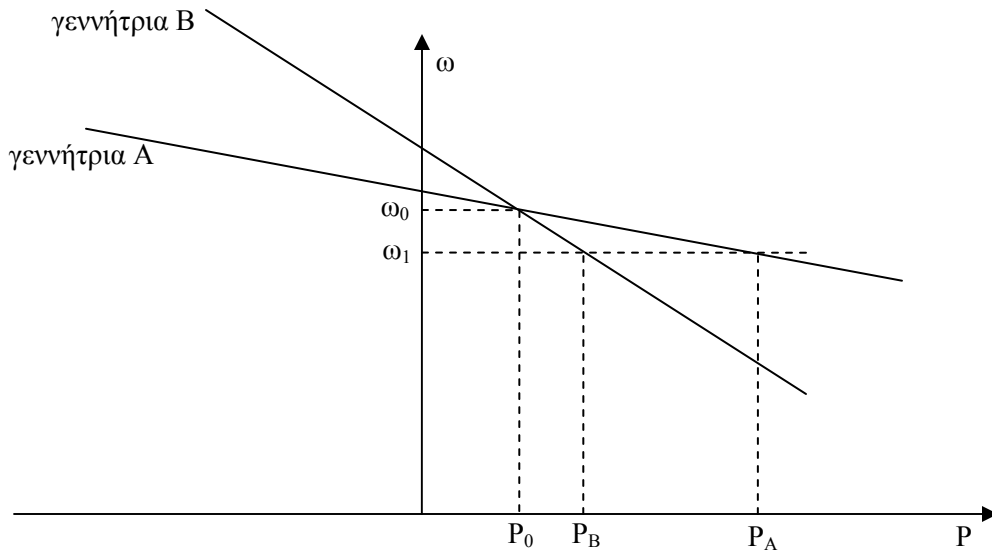
και αποτελεί την κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης φορτίου-συχνότητας η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας

Ο στατισμός αποτελεί την αντίστροφη ποσότητα του κέρδους του ρυθμιστή στροφών για κάθε μονάδα, καθορίζει την ευαισθησία της στις μεταβολές του φορτίου και διακρίνει τις μονάδες ενός συστήματος σε κατηγορίες με βάση την ευαισθησία αυτή. Αν μια μονάδα έχει μικρό στατισμό, τότε για σχετικά μικρή μεταβολή της συχνότητας θα μεταβάλει σημαντικά την παραγωγή της. Μια τέτοια μονάδα λέγεται ρυθμίζουσα διότι συμβάλει καθοριστικά με την μεταβολή της παραγωγής της στην ρύθμιση της συχνότητας. Αν αντίθετα μια μονάδα έχει μεγάλο στατισμό, τότε μεταβάλει ελάχιστα την παραγωγή της όταν αλλάζει η συχνότητα, και λέγεται μονάδα βάσεως [ΒΠ11].

Σε ένα σύστημα δύο γεννητριών, όπου η μία γεννήτρια (Α) έχει μικρό στατισμό και η δεύτερη γεννήτρια (Β) έχει μεγαλύτερο, οι χαρακτηριστικές φορτίου-συχνότητας δίνονται στο Σχήμα 3.12. Αν στο σύστημα πραγματοποιηθεί μια μεταβολή του φορτίου  $\Delta P$  οι δύο γεννήτριες θα μεταβάλουν την παραγωγή τους και το σύστημα θα εμφανίσει τελικά ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας.



Σχήμα 3.12: Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας για σύστημα δύο γεννητριών

Αν στο αρχικό σημείο λειτουργίας η συχνότητα έχει ονομαστική τιμή  $\omega_0$ , μετά την αύξηση του φορτίου το σύστημα θα ισορροπήσει σε συχνότητα μικρότερη (έστω  $\omega_1$ ). Οι νέες παραγωγές για τις γεννήτριες A, B θα είναι αντίστοιχα  $P_A$ ,  $P_B$ . Για την μεταβολή  $\Delta P$  ισχύει:

$$\Delta P = (P_A - P_0) + (P_B - P_0) = \frac{1}{R_A}(\omega_0 - \omega_1) + \frac{1}{R_B}(\omega_0 - \omega_1) \quad (3.88)$$

Φαίνεται δηλαδή ότι η μεταβολή του φορτίου σε κάθε γεννήτρια καθορίζεται από την τιμή του στατισμού.

Συμπερασματικά, ο στατισμός επιτελεί δύο λειτουργίες σε ένα ΣΗΕ:

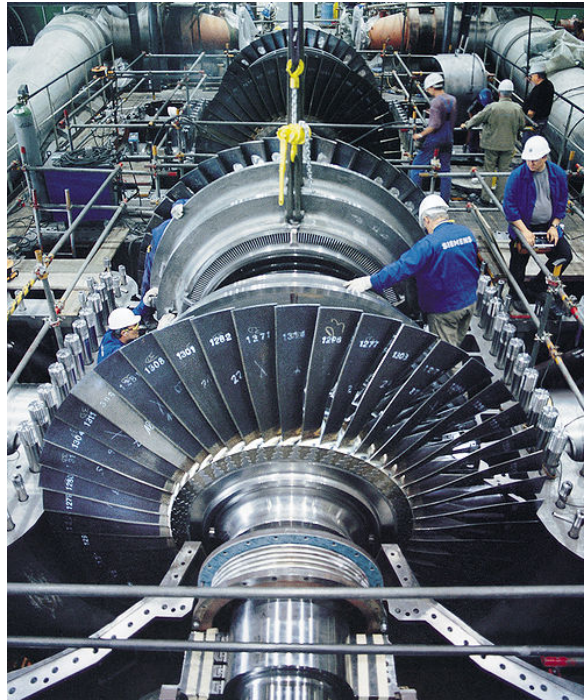
1. Διαφοροποιεί τον ρόλο που παίζει κάθε μονάδα σε ένα σύστημα. Σε μια δεδομένη μεταβολή του φορτίου, καθορίζει την κατανομή της μεταβολής αυτής ανάμεσα στις μονάδες του συστήματος. Εκφράζει δηλαδή, με βάση τον σχεδιασμό του συστήματος μια εκ των προτέρων καθορισμένη υποχρέωση κάθε μονάδας να καλύψει ένα ποσοστό της μεταβολής του φορτίου με αντίστοιχη μεταβολή της δικής της παραγωγής.
2. Καθορίζει, το μόνιμο σφάλμα συχνότητας μετά την διαταραχή, την συχνότητα δηλαδή στην οποία το σύστημα θα ισορροπήσει μετά από μια μόνιμη μεταβολή του φορτίου (πριν την λειτουργία της δευτερεύουσας ρύθμισης φορτίου-συχνότητας).

### 3.3.3. Ατμοστροβιλικές μονάδες

Οι ατμοστροβιλικές μονάδες μετατρέπουν την αποθηκευμένη ενέργεια του ατμού υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης σε στρεφόμενη ενέργεια στον άξονα του στροβίλου και τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της γεννήτριας. Οι μονάδες αυτές χρησιμοποιούν θερμική ενέργεια που παράγεται κυρίως μέσω καύσης (πετρέλαιο, λιγνίτης, άνθρακας, βιομάζα), μέσω σχάσης (πυρηνικά) και μέσω ηλιακής ενέργειας (ηλιακοί θερμοηλεκτρικοί σταθμοί).

Οι ατμοστροβιλικές μονάδες υλοποιούνται με μια σειρά τεχνικών. Συνήθως αποτελούνται από δύο ή περισσότερους τομείς (βαθμίδες). Κάθε τομέας του στροβίλου αποτελείται από μια σειρά κινούμενων πτερυγίων προσαρμοσμένων στον δρομέα και μια ομάδα σταθερών ελασμάτων τα

οποία λειτουργούν ως ακροφύσια, στα οποία ο ατμός επιταχύνεται σε υψηλή ταχύτητα. Η κινητική ενέργεια λόγω αυτής της ταχύτητας μετατρέπεται σε ροπή στον άξονα μέσω των πτερυγίων.



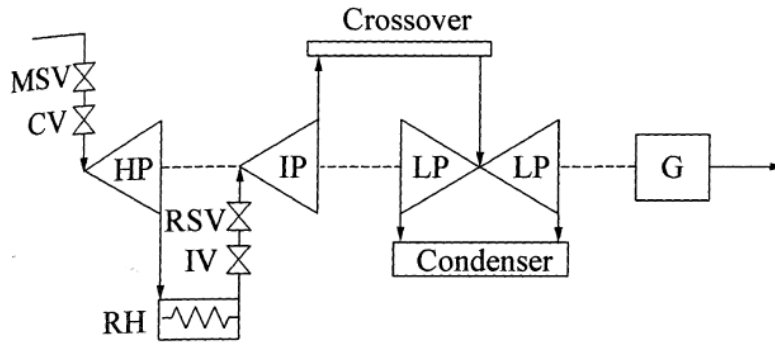
Σχήμα 3.13: Ατμοστρόβιλος

Ένας στρόβιλος πολλαπλών τομέων μπορεί να είναι είτε σειριακά συντεθειμένος (*tandem compound*) είτε σταυροειδώς συντεθειμένος (*cross compound*). Στην πρώτη περίπτωση όλα τα τμήματα των πτερυγώσεων και ακροφυσίων που περιγράφησαν παραπάνω είναι προσαρμοσμένα σε έναν κοινό άξονα. Στην δεύτερη περίπτωση υπάρχουν δύο άξονες, με τον καθένα να κινείται από ένα ή περισσότερα τμήματα του στρόβιλου, ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε διαφορετική γεννήτρια, ωστόσο σχεδιάζεται λειτουργεί και ελέγχεται σαν μια μονάδα. Η σταυροειδής σύνθεση της μονάδας είναι ακριβότερη, ωστόσο δίνει μεγαλύτερη απόδοση και ισχύ. Στις νέες μονάδες συνήθως χρησιμοποιείται η σειριακή διαμόρφωση.

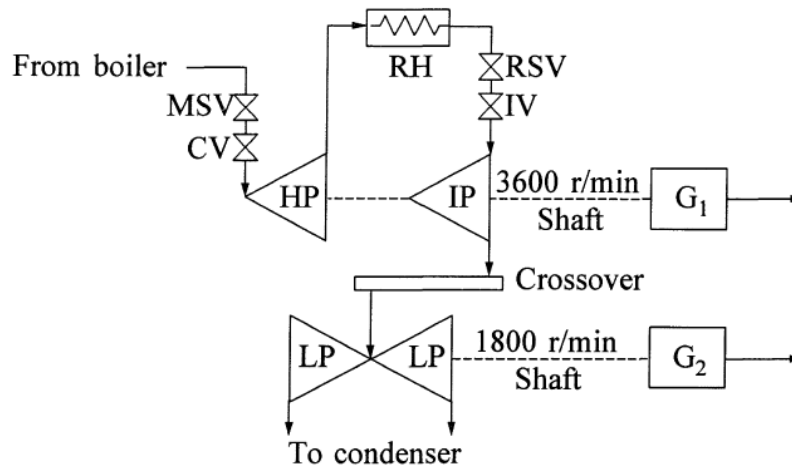
Ένα ακόμα σημείο σχετικά με τις ατμοστροβιλικές μονάδες (το οποίο διαφοροποιεί μεταξύ τους, τους τομείς που περιγράφησαν παραπάνω) είναι τα διαφορετικά επίπεδα πίεσης στα οποία εκτονώνεται ο παραγόμενος ατμός. Για παράδειγμα, ανάλογα με τον τύπο του στρόβιλου, οι μονάδες ορυκτών καυσίμων αποτελούνται από βαθμίδες (στάδια) υψηλής μέσης και χαμηλής πίεσης του ατμού. Ανάμεσα στα διαφορετικά αυτά επίπεδα μπορεί να υπάρχει αναθέρμανση του ατμού, δηλαδή μια περαιτέρω αύξηση της ενθαλπίας του προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση της μονάδας.

Στα Σχήματα 3.14-3.15 παρουσιάζονται δυο διαφορετικοί τύποι ατμοστροβιλικών μονάδων με βάση την σειριακή (Σχήμα 3.14) ή σταυροειδή διαμόρφωση (Σχήμα 3.15). Και στις δύο αυτές μονάδες ο ατμός εκτονώνεται στο τμήμα υψηλής πίεσης, στην συνέχεια επαναθερμαίνεται και εκτονώνεται στο τμήμα μέσης και χαμηλής πίεσης.





Σχήμα 3.14: Διάγραμμα βαθμίδων Ατμοστροβλικής μονάδας με σειριακή διαμόρφωση



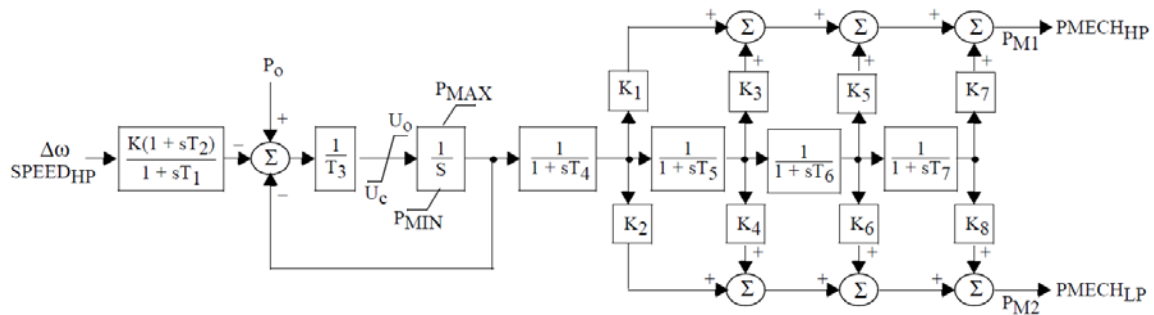
Σχήμα 3.15: Διάγραμμα βαθμίδων Ατμοστροβλικής μονάδας με σταυροειδή διαμόρφωση

Για την παράσταση των ατμοστροβλικών μονάδων χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα.

### 3.3.4. Μοντέλο ατμοστροβλικής μονάδας πολλαπλών επιπέδων (IEEEG1)

Το μοντέλο του Σχήματος 3.16 περιγράφει με έναν λεπτομερή και αρκετά γενικό τρόπο τις ατμοστροβλικές μονάδες και αντιστοιχεί στο IEEEG1 (Type 1 Speed Governing Model) [PSS-M]. Το πρώτο μπλοκ αναφέρεται στον ρυθμιστή στροφών της μονάδας. Ο ρυθμιστής στροφών μπορεί να είναι είτε μηχανικός είτε ηλεκτρικός-υδραυλικός [KUN94] ωστόσο για την βασική περιγραφή της λειτουργίας του αρκεί το μπλοκ το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3.16, και περιλαμβάνει το κέρδος του ρυθμιστή στροφών ( $K$ ) που είναι το αντίστροφο του στατισμού της μονάδας. Επίσης το μοντέλο του Σχήματος 3.16 περιλαμβάνει τις χρονικές σταθερές  $T_1$ ,  $T_2$ . Στο δεύτερο τμήμα του μοντέλου μοντελοποιείται η βαλβίδα ελέγχου του ατμού στην είσοδο του στροβίλου (CV) – (χρονική σταθερά  $T_3$ ). Οι υπόλοιπες χρονικές σταθερές, όπως και οι παράμετροι  $K_i$ , αντιπροσωπεύουν τις χρονικές σταθερές για την αναθέρμανση του ατμού, καθώς και την κατανομή της αποδιδόμενης ισχύος σε κάθε επίπεδο πίεσης του ατμού και σε κάθε μία ενήτρια (στην περίπτωση που ο ατμοστρόβιλος είναι σταυροειδώς συντεθειμένος).

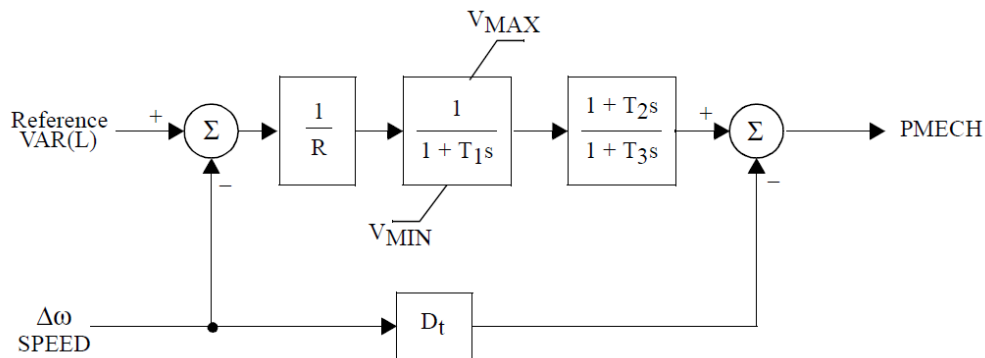




Σχήμα 3.16: Μοντέλο ατμοστροβιλικής μονάδας IEEE1

### 3.3.5. Γενικό μοντέλο ρυθμιστή στροφών (TGOV1)

Το μοντέλο αυτό παριστάνει με απλοποιημένο τρόπο μια μονάδα ατμοστροβιλική και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.17 και αντιστοιχεί στο TGOV1 (Steam Turbine Governor) [PSS-M]. Η απόκλιση της ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας, από την ονομαστική της τιμή ενισχύεται κατά  $1/R$  (όπου  $R$  ο στατισμός της μονάδας). Η χρονική σταθερά  $T_1$  εκφράζει την χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών. Η τιμή του λόγου  $T_2/T_3$  εκφράζει το τμήμα παραγωγής μηχανικής ισχύος από τον ατμό υψηλής πίεσης, ενώ η χρονική σταθερά  $T_3$  εκφράζει την χρονική σταθερά της αναθέρμανσης του ατμού. Η παράμετρος  $D_t$  εκφράζει μια συνιστώσα απόσβεσης την οποία εισάγει το σύνολο ρυθμιστή στροφών – μονάδας παραγωγής.



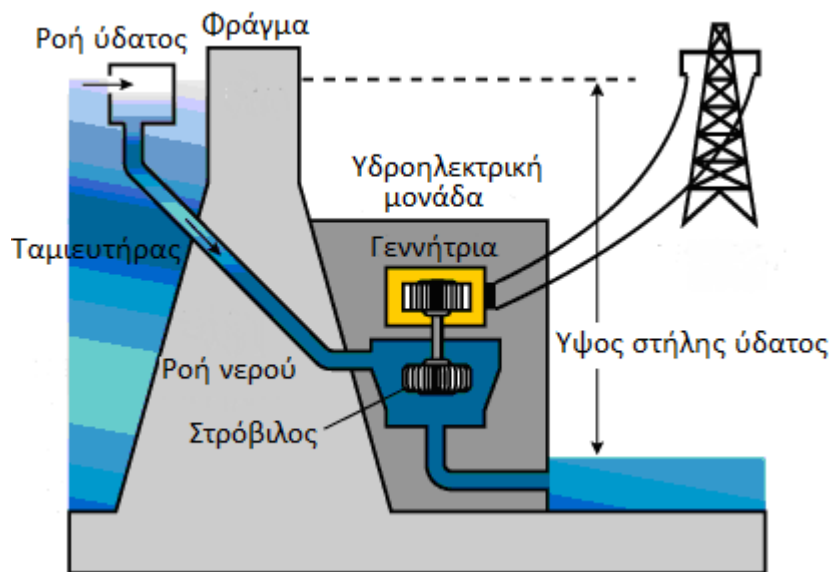
Σχήμα 3.17: Απλοποιημένο μοντέλο ατμοστροβιλικής μονάδας TGOV1

### 3.3.6. Υδροηλεκτρικοί σταθμοί

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με τους θερμικούς. Στους θερμικούς σταθμούς κυρίαρχο ρόλο έχει η ενθαλπία και η εντροπία του εργαζόμενου μέσου πριν και μετά την εκτόνωση. Αντίθετα στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, η μελέτη έχει να κάνει με την δυναμική των ρευστών. Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν οι βασικές εξισώσεις που διέπουν την λειτουργία των υδροηλεκτρικών σταθμών, και στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα μοντέλα που υλοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή.

Η απόδοση και η απόκριση μιας υδροστροβιλικής μονάδας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της στήλης του νερού και την τροφοδοσία του στροβίλου. Η αδράνεια του νερού προκαλεί υστέρηση στην τροποποίηση της ροής του στροβίλου σε σχέση με το άνοιγμα της θύρας ελέγχου. Στα Σχήματα 3.18-3.19 φαίνονται τα βασικά στοιχεία που συγκροτούν μια υδροηλεκτρική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

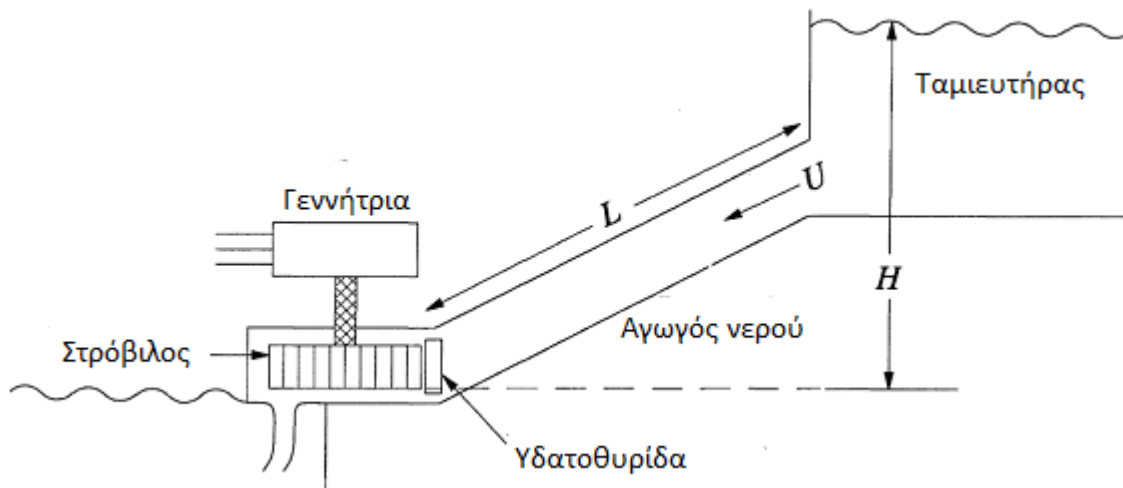
Η μοντελοποίηση των υδροστροβίλων στην παρούσα διατριβή βασίστηκε στα βιβλία [ΒΠ11], [ΚΥΝ94] και την εργασία [JΜV94]. Μια γενικότερη επισκόπηση των υδραυλικών φαινομένων σε συστήματα ηλεκτρικής ισχύος δίνεται στο [CΗΑ79].



Σχήμα 3.18: Στοιχεία υδροηλεκτρικής μονάδας

Η παράσταση των υδροστροβίλων και της στήλης του νερού σε μελέτες ευστάθειας βασίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

1. Ο αγωγός είναι μη ελαστικός και το νερό είναι ασυμπίεστο.
2. Η ταχύτητα του νερού εξαρτάται από το άνοιγμα της θύρας και την τετραγωνική ρίζα του ύψους της στήλης του ύδατος (πίεσης).
3. Η παραγωγή του υδροστροβίλου είναι ανάλογη του γινομένου του ύψους της στήλης του ύδατος της παροχής.



Σχήμα 3.19: Διάγραμμα υδροηλεκτρικής μονάδας

Οι χαρακτηριστικές του υδροστροβίλου και του αγωγού προσαγωγής καθορίζονται από τρεις βασικές εξισώσεις, οι οποίες αναφέρονται:

1. Στην ισχύ του υδροστροβίλου
2. Στην ταχύτητα του νερού στον αγωγό προσαγωγής
3. Στην επιτάχυνση της υδάτινης στήλης

Η ενέργεια του νερού ή οποία τελικά θα αποδοθεί στον στρόβιλο για την μετατροπή της σε ηλεκτρική, είναι η δυναμική ενέργεια την οποία έχει το νερό στην ανάντι πλευρά του φράγματος πολλαπλασιασμένη επί τον βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου ( $\eta$ ). Για την ενέργεια του νερού ισχύει:

$$E = mgH\eta = V\rho gH\eta \Rightarrow E = \gamma VH\eta \quad (3.89)$$

δηλαδή

$$E = \gamma VH\eta \quad (3.90)$$

Στην παραπάνω εξίσωση αλλά και στις υπόλοιπες εξισώσεις της παρούσας παραγράφου θεωρούνται:

E	η ενέργεια του νερού
V	ο όγκος
$\rho$	πυκνότητα
$\gamma$	το ειδικό βάρος του νερού
g	η επιτάχυνση της βαρύτητας
$\eta$	ο συνολικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου
L	το μήκος του αγωγού
A	η διατομή του αγωγού
H	το ωφέλιμο ύψος της στήλης ύδατος
P	η ισχύς του στροβίλου
G	το άνοιγμα της θύρας
U	η ταχύτητα του ύδατος
Q	η παροχή σε $m^3/s$

Ειδικότερα για τις τελευταίες πέντε μεταβλητές (H, P, G, U, Q) οι ποσότητες σε ανά μονάδα μεγέθη συμβολίζονται με τα αντίστοιχα μικρά γράμματα (h, p, g, u, q).

Στην περίπτωση όπου υπάρχει μια σταθερή ροή νερού Q η εξίσωση (3.89) τροποποιείται ως εξής:

$$E = \gamma(Q\Delta t)H\eta \Rightarrow P = \frac{E}{\Delta t} = \gamma QH\eta \quad (3.91)$$

Οπότε προκύπτει η σχέση με την οποία υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς της μονάδας. Δεδομένου ότι η παροχή Q είναι το γινόμενο της διατομής (A) επί την ταχύτητα του νερού (U) η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$P = \gamma AUH\eta \quad (3.92)$$

Η οποία, αν γραμμικοποιηθεί γύρω από ένα σημείο λειτουργίας προκύπτει:

$$\Delta P = \gamma A \eta (U_0 \Delta H + H_0 \Delta U) \quad (3.93)$$

Όπου η μεταβολή  $\Delta H$  δεν υποδηλώνει μεταβολή της στάθμης του ταμιευτήρα, αλλά μεταβολή της πίεσης στον στρόβιλο (μετρούμενης σε μέτρα στήλης ύδατος) [BΠ11].

Αν αγνοηθούν οι τριβές στο εσωτερικό του αγωγού, θα ισχύει για την ταχύτητα του νερού στο σημείο της εκροής του αγωγού:

$$mgH = \frac{1}{2} mU^2 \Rightarrow U_\sigma = \sqrt{2gH} \quad (3.94)$$

Θεωρώντας  $G$  το άνοιγμα των υδατοθυρίδων, η ελεύθερη επιφάνεια εκροής είναι:

$$A_\sigma = KG \quad (3.95)$$

Επιπλέον ισχύει η συνέχεια, για την παροχή και την εκροή νερού στον στρόβιλο. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση της συνέχειας την (3.94) προκύπτει:

$$AU = A_\sigma U_\sigma \Rightarrow U = \frac{KG}{A} \sqrt{2gH} \Rightarrow U = K_1 G \sqrt{H} \quad (3.96)$$

όπου  $A$ ,  $U$  μεταβλητές στην ανάντι πλευρά της υδατοθυρίδας και  $A_\sigma$ ,  $U_\sigma$  στην κατάντι

Από τις (3.94), (3.96) προκύπτει για την ροή του νερού στον αγωγό:

$$Q = AU = KG \sqrt{2gH} \quad (3.97)$$

Όπου έπειτα από την κανονικοποίηση προκύπτει:

$$q = g\sqrt{h} \quad (3.98)$$

Η επιτάχυνση της υδάτινης στήλης σε μία μεταβολή της πίεσης στην είσοδο του στρόβιλου, χαρακτηρίζεται από τον 2ο νόμο του Νεύτωνα, και εκφράζεται ως:

$$\rho AL \frac{dU}{dt} = -A \rho g_a \Delta H \quad (3.99)$$

Διαιρώντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης με  $A \rho g_a H_0 U_0$  προκύπτει:

$$\frac{LU_0}{g_a H_0} \frac{d}{dt} \left( \frac{\Delta U}{U_0} \right) = - \frac{\Delta H}{H_0} \quad (3.100)$$

ή (σε κανονικοποιημένη μορφή)

$$T_w \frac{d\Delta u}{dt} = -\Delta h \quad (3.101)$$

δηλαδή

$$\Delta u = - \frac{1}{T_w s} \Delta h \quad (3.102)$$

όπου:

$$T_w = \frac{LU_0}{g_a H_0} \quad (3.103)$$

Η χρονική σταθερά  $T_w$  αναφέρεται ως χρονική σταθερά αδράνειας του νερού ή ως χρόνος εκκίνησης ύδατος (water starting time). Εκφράζει τη διάρκεια επιτάχυνσης της μάζας του νερού στον αγωγό προσαγωγής από μηδενική παροχή μέχρι την ονομαστική παροχή, υπό πίεση  $H_0$  (υδραυλικό ύψος).

Λόγω των υδραυλικών απωλειών, η πίεση του στροβίλου στο σημείο ονομαστικής λειτουργίας τροποποιείται ως εξής:

$$H_0 = H_N - kQ_N^2 \quad (3.104)$$

Συνεπώς για την ονομαστική ισχύ της μονάδας με βάση την (3.91) ισχύει:

$$P_N = \gamma Q_N H_0 \eta \quad (3.105)$$

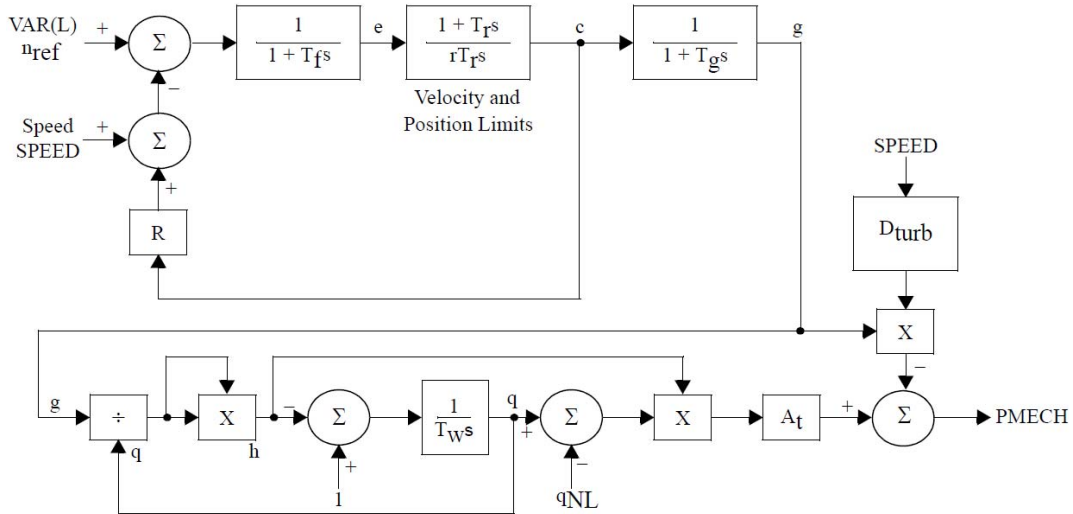
Η οποία αν χρησιμοποιηθεί για την κανονικοποίηση της (3.91) προκύπτει:

$$p = qh \quad (3.106)$$

### 3.3.7. Μη γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου (HYGOV)

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν ένα μη γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου (Σχήμα 3.20). Στο μοντέλο του υδροστροβίλου, ο ρυθμιστής στροφών μεταβάλλει το άνοιγμα της θύρας  $G$  μεταβάλλοντας τελικά την μηχανική ισχύ της μονάδας.

Στο Σχήμα 3.20, παρουσιάζεται το μοντέλο για τις υδροηλεκτρικές μονάδες το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή. Αντιστοιχεί στο μοντέλο HYGOV από την βιβλιοθήκη του PSS/E [PSS-M].



Σχήμα 3.20: Μοντέλο υδροηλεκτρικής μονάδας (HYGOV)

Στο πρώτο τμήμα φαίνονται οι διατάξεις ελέγχου της υδροηλεκτρικής μονάδας (ρυθμιστής στροφών). Καταρχήν περιλαμβάνεται το φίλτρο της μέτρησης της ταχύτητας (χρονική σταθερά  $T_f$ ), ο σερβομηχανισμός ανοίγματος της θύρας (χρονική σταθερά  $T_g$ ), ο μόνιμος στατισμός ( $R$ ) και ο μεταβατικός στατισμός ( $r$ ).

Στο δεύτερο επίπεδο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.20 υλοποιείται η (3.98) η οποία καθορίζει την πίεση  $h$  με βάση την παροχή του ύδατος και το άνοιγμα της θύρας. Η ταχύτητα του νερού και η παροχή του είναι ποσά ανάλογα δεδομένου ότι η διατομή του αγωγού δεν μεταβάλλεται. Συνεπώς, σε ανά μονάδα τιμές είναι ίσες και για τον λόγο αυτό η (3.101) μετατρέπεται στην παρακάτω μορφή:

$$\Delta q = -\frac{1}{T_w s} \Delta h \quad (3.107)$$

Τέλος υλοποιούνται οι εξισώσεις που καθορίζουν την ροή του ύδατος και την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, (3.106). Όσον αφορά τις υδραυλικές απώλειες, αυτές θεωρούνται σταθερές ανεξάρτητες από την ροή. Οι απώλειες αυτές αντιστοιχούν στην ροή ύδατος στον αγωγό όταν αυτή λειτουργεί σε κενό φορτίο ( $Q_{NL}$ ).

Συνεπώς η (3.106) τροποποιείται:

$$P = QH - Q_{NL}H = (Q - Q_{NL})H \quad (3.108)$$

Για το ονομαστικό επίπεδο λειτουργίας ισχύει:

$$P_N = (Q_N - Q_{NL})H_N \quad (3.109)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις (3.108), (3.109) προκύπτει η σχέση για την μηχανική ισχύ του στροβίλου ανηγμένη στην ονομαστική ισχύ του.

$$p_m = \frac{1}{1 - \frac{Q_{NL}}{Q_N}} (q - q_{NL})h = A_t (q - q_{NL})h \quad (3.110)$$

Τέλος από την μηχανική ισχύ της μονάδας αφαιρείται μια συνιστώσα απόσβεσης η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα του δρομέα και το άνοιγμα της θύρας.

### 3.3.8. Γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου (IEEEG3)

Το γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου αποτελεί μια απλοποιημένη προσέγγιση σε σχέση με το μη γραμμικό. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.21 διαιρείται σε δύο βασικά μέρη. Το πρώτο είναι το τμήμα όπου μοντελοποιείται το τμήμα διατάξεων ελέγχου. Καταρχήν περιλαμβάνει το ρυθμιστή στροφών στον οποίο θεωρείται μόνιμος ( $\sigma$ ) και μεταβατικός στατισμός ( $\delta$ ). Κατά δεύτερον μοντελοποιούνται τα μηχανικά τμήματα ελέγχου της μονάδας όπως η οδηγός βαλβίδα (χρονική σταθερά  $T_p$ ) η οποία οδηγεί το υδραυλικό σύστημα του σερβομηχανισμό ανοίγματος της θύρας, καθώς και ο ίδιος ο σερβομηχανισμός (χρονική σταθερά  $T_G$ ). Τελικά, στο πρώτο τμήμα του ρυθμιστή ορίζεται το άνοιγμα της θύρας. Το δεύτερο τμήμα περιγράφονται γραμμικά οι εξισώσεις που αναλύθηκαν στην παράγραφο 3.3.6 σε σχέση με την δυναμική συμπεριφορά του νερού (ταχύτητα, αποδιδόμενη ισχύς) ως προς το άνοιγμα των θυρών.

Η συνάρτηση μεταφοράς για έναν μη ιδανικό υδροστρόβιλο προκύπτει με την παρακάτω γενική θεώρηση σχετικά με την ταχύτητα του νερού, και την ισχύ που αποδίδεται στον στρόβιλο (σχέσεις (3.98), (3.110)):

$$\Delta v = a_{11} \Delta h + a_{12} \Delta \omega + a_{13} \Delta g \quad (3.111)$$

$$\Delta p = a_{21} \Delta h + a_{22} \Delta \omega + a_{23} \Delta g \quad (3.112)$$

Η ποσότητα  $\Delta\omega$  εκφράζει την απόκλιση της ταχύτητας του δρομέα από την ονομαστική τιμή. Οι αποκλίσεις αυτές είναι μικρές, ειδικά όταν ο στρόβιλος συνδέεται σε μεγάλα συστήματα. Συνεπώς οι αντίστοιχοι όροι μπορεί και να απαλειφθούν:

$$\Delta v = a_{11}\Delta h + a_{13}\Delta g \quad (3.113)$$

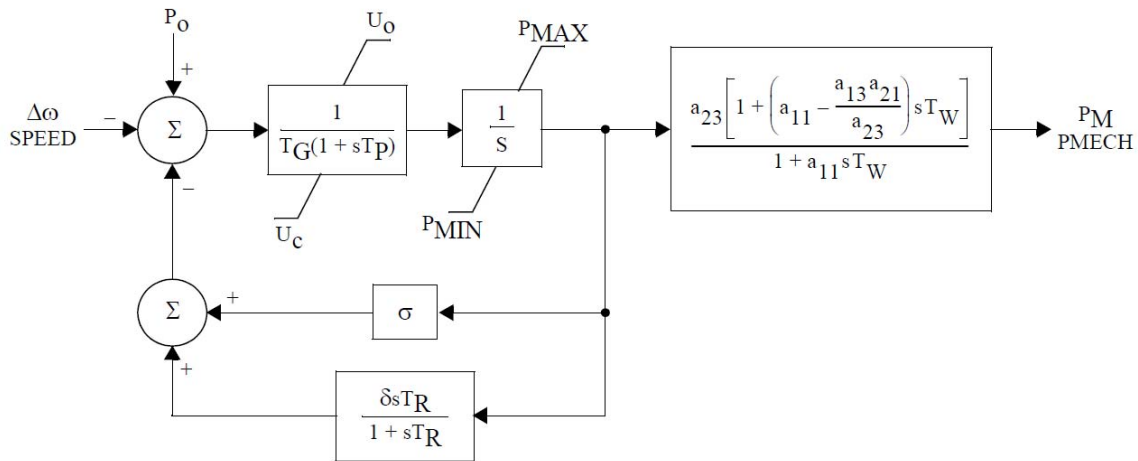
$$\Delta p = a_{21}\Delta h + a_{23}\Delta g \quad (3.114)$$

Οι συντελεστές  $a_{11}$ ,  $a_{13}$  είναι οι μερικές παράγωγοι της ροής ως προς το υδραυλικό ύψος και το άνοιγμα της θύρας αντίστοιχα και οι συντελεστές  $a_{21}$ ,  $a_{23}$  είναι οι μερικές παράγωγοι της ισχύος εξόδου του υδροστροβίλου ως προς το υδραυλικό ύψος και το άνοιγμα της θύρας αντίστοιχα [KUN94].

Με αντικατάσταση στις εξισώσεις (3.101), (3.113), (3.114) προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{\Delta p}{\Delta g} = a_{23} \frac{1 + \left( a_{11} - \frac{a_{13}a_{21}}{a_{23}} \right) T_w s}{1 + a_{11} T_w s} \quad (3.115)$$

Το μπλοκ διάγραμμα του γραμμικού μοντέλου υδροστροβίλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.21, το οποίο αντιστοιχεί με το μοντέλο IEEE3 [PSS-M].



Σχήμα 3.21: Γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου (IEEE3)

## 3.4. Σταθεροποιητές ισχύος

### 3.4.1. Γενικά

Οι σταθεροποιητές ισχύος αποτελούν διατάξεις ελέγχου οι οποίες χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα σύγχρονα ΣΗΕ εγκαθίστανται συστήματα διέγερσης γρήγορης απόκρισης προκειμένου να διασφαλιστεί η καλή λειτουργία του συστήματος στην μόνιμο κατάσταση, η μεταβατική ευστάθεια των σύγχρονων γεννητριών, αλλά και για τον γρήγορο έλεγχο της τερματικής τάσης. Οι ρυθμιστές αυτοί χαρακτηρίζονται από μεγάλα κέρδη. Οι γρήγορες διατάξεις διέγερσης μπορεί

να συμβάλλουν στην ταλαντωτική αστάθεια των ΣΗΕ θέτοντας σε κίνδυνο την ασφάλεια του συστήματος, καθώς και να περιορίσουν τα όρια μεταφερόμενης ισχύος [PAD08].

Μια οικονομικά συμφέρουσα και αποτελεσματική λύση για να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα της ταλαντωτικής αστάθειας είναι η προσθήκη μιας συνιστώσας απόσβεσης στον άξονα της γεννήτριας. Αυτό γίνεται μέσω των σταθεροποιητών ισχύος που αποτελεί συμπληρωματική διάταξη ελέγχου στο σύστημα διέγερσης.

Η χρήση των σταθεροποιητών ισχύος στα ΣΗΕ είναι αρκετά διαδεδομένη. Σε πολλές περιπτώσεις η ανάγκη για σταθεροποιητές ισχύος προκύπτει όταν η ηλεκτρική ισχύς θα πρέπει να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις διαμέσου ασθενών γραμμών μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος. Μολονότι σε πολλές περιπτώσεις η χρήση σταθεροποιητών ισχύος δεν απαιτείται για τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας, μπορεί να συμβάλουν σημαντικά διασφαλίζοντας την ευσταθή λειτουργία σε έκτακτες συνθήκες. Ο σταθεροποιητής ισχύος αποτελεί μια αρκετά συνήθη επιλογή μαζί με τα σύγχρονα στατά συστήματα διέγερσης

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, οι διάφοροι ρυθμοί ταλάντωσης ομαδοποιούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες [LAS81]:

- Τοπικοί ρυθμοί, οι οποίοι εμπλέκουν κάποιες γεννήτριες μιας περιοχής (*local modes*), συχνότητας 1-3Hz.
- Ταλαντώσεις μεταξύ των σταθμών παραγωγής (*intra-area modes*) οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές του ίδιου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, συχνότητας 0.6-1Hz.
- Διασυνδετικοί ρυθμοί (*interarea modes*) στους οποίους συμμετέχουν γεννήτριες από διαφορετικές περιοχές του συστήματος. Η συχνότητα των ρυθμών αυτών είναι μικρή, μεταξύ 0.1 και 0.6Hz.

Εκτός της σταθεροποίησης των ηλεκτρομηχανικών ρυθμών, ο σταθεροποιητής θα πρέπει να μην προκαλεί ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις με άλλους ρυθμούς.

Ως εισόδους, οι σταθεροποιητές ισχύος μπορεί να έχουν διάφορα σήματα. Το πιο σύνηθες είναι η ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας. Ωστόσο για πρακτικούς λόγους υλοποίησης χρησιμοποιούνται επιπλέον και άλλα σήματα, όπως η συχνότητα του τερματικού ζυγού, η ηλεκτρική ισχύς και η ισχύς επιτάχυνσης, [PAD08], [DME94]. Τα κριτήρια με βάση τα οποία επιλέγεται ο ένας ή ο άλλος τύπος σταθεροποιητή σχετίζονται με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του συστήματος, αλλά και του προς σταθεροποίηση ρυθμού. Για παράδειγμα η συχνότητα, ως σήμα εισόδου είναι αναισθητή σε ταλαντώσεις μεταξύ των γεννητριών μιας μονάδας παραγωγής, και επίσης είναι λιγότερο ευαίσθητη σε ταλαντώσεις του άξονα της γεννήτριας. Από την άλλη πλευρά, η χρήση της ισχύος επιτάχυνσης ως σήματος εισόδου οδηγεί σε μειωμένες απαιτήσεις αντιστάθμισης φάσεως.

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιούνται δύο τύποι σταθεροποιητών ισχύος και δύο παραλλαγές τους, οι οποίες θα αναφερθούν στην επόμενη παράγραφο. Το σήμα εισόδου του σταθεροποιητή είναι η συχνότητα του άξονα της γεννήτριας.

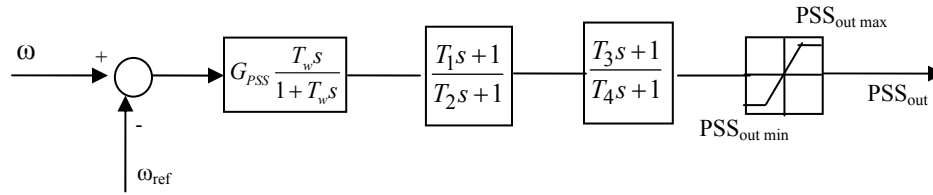
### 3.4.2. Τύποι σταθεροποιητών ισχύος

#### Σταθεροποιητής ισχύος STAB1

Η απλούστερη δομή ενός σταθεροποιητή ισχύος είναι αυτή του Σχήματος 3.22. Ο σταθεροποιητής είναι πανομοιότυπος με το μοντέλο STAB1 της βιβλιοθήκης του PSS/E [PSS-M] και αποτελείται από ένα υψιπερατό φίλτρο στην είσοδό του, το οποίο χρησιμοποιείται για να

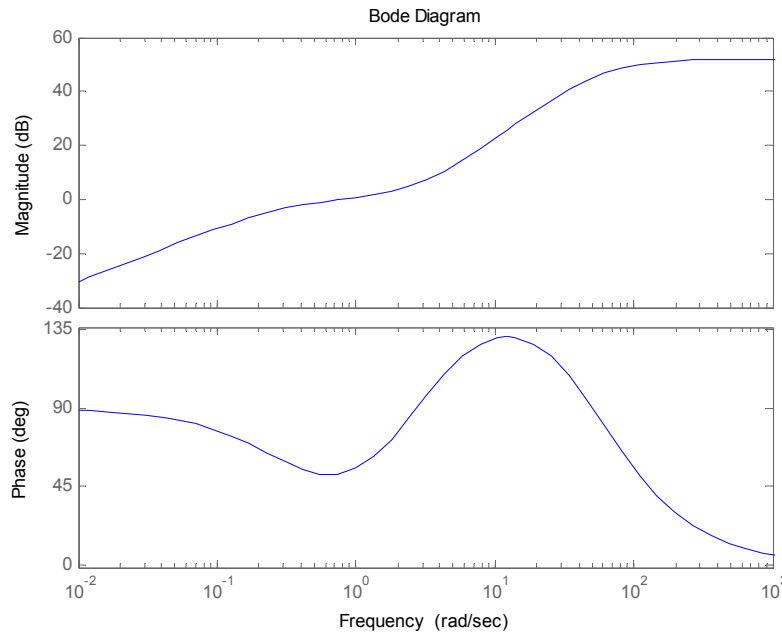


απαλείφει τα μόνιμα σφάλματα στο σήμα της συχνότητας, καθώς και από δύο βαθμίδες υστέρησης – προήγησης φάσης.



Σχήμα 3.22: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου STAB1

Ένα ενδεικτικό διάγραμμα Bode για τυπικές τιμές του σταθεροποιητή ισχύος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.23.

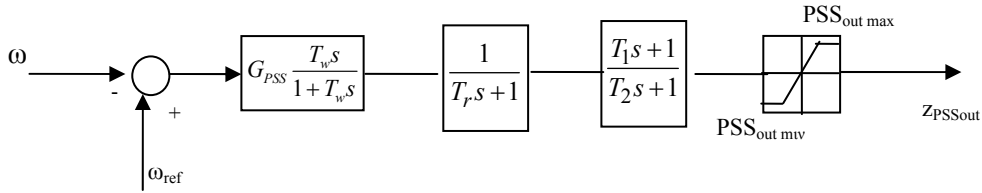


Σχήμα 3.23: Bode διάγραμμα σταθεροποιητή STAB1

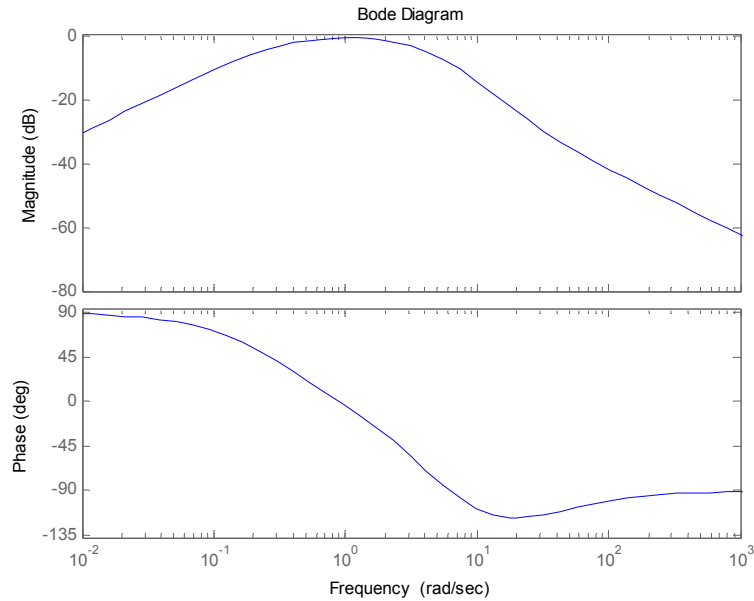
### Σταθεροποιητής ισχύος STAB1\*

Ο δεύτερος τύπος σταθεροποιητή που χρησιμοποιείται είναι μια παραλλαγή του σταθεροποιητή ισχύος της προηγούμενης υποπαραγράφου. Για την παράστασή του χρησιμοποιείται (με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων του) το μοντέλο STAB1 και θα αναφέρεται ως STAB1\*.

Ο σταθεροποιητής ισχύος STAB1\* περιλαμβάνει ένα μπλοκ προήγησης υστέρησης φάσης, το υπερβατό και ένα βαθυπερατό φίλτρο. Ο λόγος για την χρησιμοποίηση του βαθυπερατού φίλτρου είναι ότι (όπως θα αναλυθεί και στην συνέχεια) θα πρέπει ο σταθεροποιητής που σχεδιάζεται για τις διασυνδεδεμένες ταλαντώσεις, να μην επηρεάζει τις ταλαντώσεις σε υψηλότερες συχνότητες. Με την τοποθέτηση του βαθυπερατού φίλτρου, το κέρδος στις υψηλές συχνότητες μειώνεται, και συνεπώς είναι μειωμένη και η επίδραση του σταθεροποιητή στους αντίστοιχους ρυθμούς. Στο Σχήμα 3.24 φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα του σταθεροποιητή ισχύος STAB1\*, ενώ στο Σχήμα 3.25 φαίνεται το διάγραμμα Bode για τυπικές τιμές.



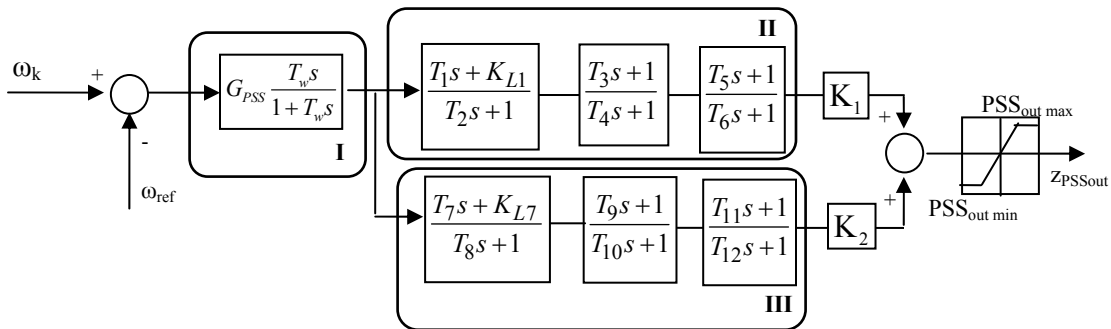
Σχήμα 3.24: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου σταθεροποιητή STAB1\*



Σχήμα 3.25: Bode διάγραμμα σταθεροποιητή τύπου STAB1\*

### Σταθεροποιητής Ισχύος PSS2

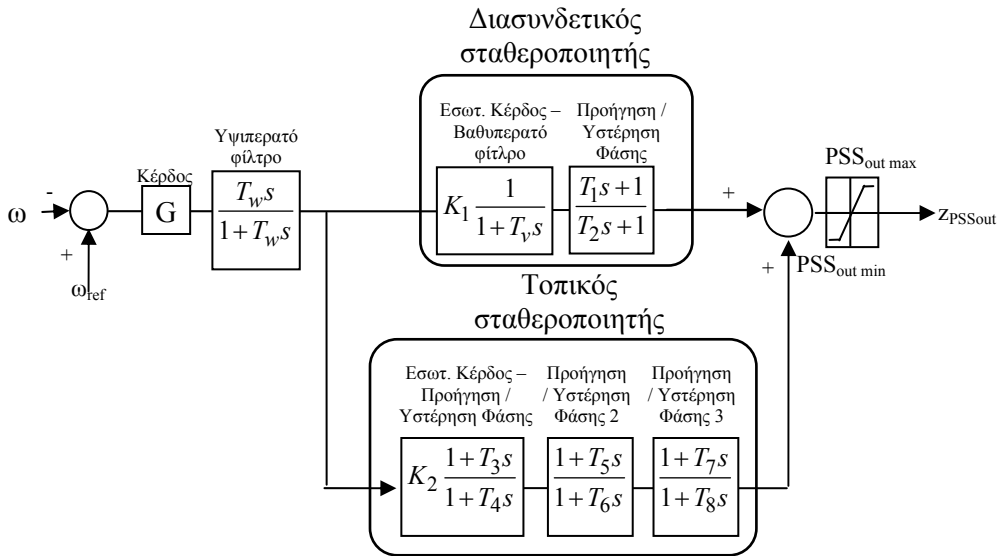
Ο σταθεροποιητής ισχύος αυτός αποτελεί στην ουσία ένα συνδυασμό δύο σταθεροποιητών (ένας σε κάθε κλάδο του Σχήματος 3.26). Κάθε επιμέρους σταθεροποιητής έχει ένα εσωτερικό κέρδος ( $K_1$ ,  $K_2$ ) και τρία μπλοκ υστέρησης/προώγησης φάσης. Επίσης στην είσοδο του σταθεροποιητή ισχύος PSS2 υπάρχει υπερβατό φίλτρο για να απαλείφεται το μόνιμο σφάλμα της συχνότητας. Το διάγραμμα βαθμίδων του σταθεροποιητή ισχύος φαίνεται στο Σχήμα 3.26.



Σχήμα 3.26: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου σταθεροποιητή PSS2.

### Σταθεροποιητής ισχύος PSS2\*

Ο σταθεροποιητής ισχύος PSS2 μπορεί να τροποποιηθεί με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων στον σταθεροποιητή ισχύος του Σχήματος 3.27, ο οποίος θα αναφέρεται ως PSS2\*. Στον σταθεροποιητή αυτόν χρησιμοποιείται ο ένας κλάδος ως σταθεροποιητής ισχύος για τις διασυνδεδετικές ταλαντώσεις, ενώ ο άλλος ως σταθεροποιητής ισχύος για τοπικές ταλαντώσεις. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.27 ο διασυνδεδετικός σταθεροποιητής ισχύος περιλαμβάνει δύο από τις τρεις βαθμίδες του πρώτου κλάδου του Σχήματος 3.26 ( $T_5=T_6$ ). Η μια από τις υπόλοιπες δύο βαθμίδες υστέρησης-προήγησης φάσης έχει μετατραπεί (όπως και στην περίπτωση του σταθεροποιητή ισχύος STAB1\* σε βαθυπερατό φίλτρο προκειμένου να μην επηρεάζει ο κλάδος αυτός συχνότητες υψηλότερες αυτών για τις οποίες έχει σχεδιαστεί.



Σχήμα 3.27: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου τοπικού και διασυνδεδετικού σταθεροποιητή ισχύος (PSS2\*).

Αντίθετα στον δεύτερο κλάδο, ο οποίος παίζει τον ρόλο του τοπικού σταθεροποιητή ισχύος διατηρούνται και τα τρία μπλοκ υστέρησης προήγησης φάσης διότι στις τοπικές ταλαντώσεις είναι δυνατόν να απαιτούνται μεγάλες γωνίες αντιστάθμισης.

Ο σταθεροποιητής PSS2\* θα χρησιμοποιηθεί στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο για την σταθεροποίηση του ευρωπαϊκού ρυθμού στο σύστημα της Νότιο-Ανατολικής Ευρώπης.

## 3.5. Τεχνικές σχεδίασης σταθεροποιητών ισχύος

### 3.5.1. Ολοκληρωτικά υπόλοιπα και ρύθμιση παραμέτρων σταθεροποιητή για ένα σημείο λειτουργίας

Η διαδικασία σχεδίασης σταθεροποιητή που υλοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή βασίζονται στα ολοκληρωτικά υπόλοιπα [ROG00], [PPV89] της κατάλληλης συνάρτησης μεταφοράς που προκύπτει από την γραμμικοποίηση του απλοποιημένου μοντέλου ΣΗΕ.

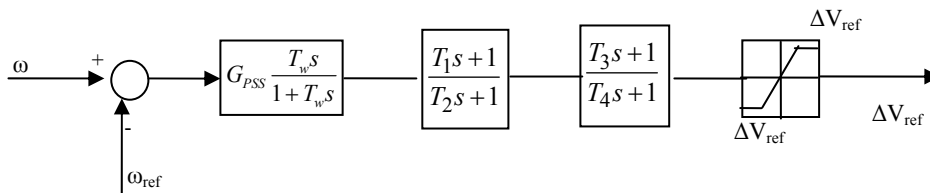
#### Επιλογή γεννήτριας

Η επιλογή της κατάλληλης γεννήτριας για την προσθήκη ενός σταθεροποιητή γίνεται με μεθόδους ανάλυσης της ευαισθησίας των ιδιοτιμών. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.6.6, τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα μιας ιδιοτιμής εκφράζουν την ευαισθησία της ιδιοτιμής ως

προς το κέρδος μιας θετικής ανατροφοδότησης. Μεγάλη τιμή του μέτρου του ολοκληρωτικού υπολοίπου ενός ρυθμού συνεπάγεται ότι το κλείσιμο του βρόχου ανατροφοδότησης μετατοπίζει σημαντικά την αντίστοιχη ιδιοτιμή. Αντίθετα, μικρή τιμή του μέτρου του ολοκληρωτικού υπολοίπου σημαίνει ότι η ιδιοτιμή του ρυθμού δεν επηρεάζεται σημαντικά από μια τέτοια ανατροφοδότηση. Συγκρίνοντας τα μέτρα των ολοκληρωτικών υπολοίπων προκύπτουν οι γεννήτριες οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τον προς σταθεροποίηση ρυθμό και επιλέγονται για την τοποθέτηση σταθεροποιητών ισχύος.

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 μέσω της ανατροφοδότησης (στο ανοικτό σύστημα), η συνάρτηση μεταφοράς στη συχνότητα ενός συγκεκριμένου ρυθμού για να αυξήσει την απόσβεσή του. Πρέπει να επισημανθεί ότι η ισχύς της προσέγγισης της ευαισθησίας της ιδιοτιμής ως προς το κέρδος της ανατροφοδότησης είναι έγκυρη μόνο για χαμηλές τιμές κέρδους και προϋποθέτει οι ιδιοτιμές του ανοικτού συστήματος να είναι διακριτές.

Στο Σχήμα 3.28 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων του σταθεροποιητή ισχύος τύπου STAB1.



Σχήμα 3.28: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου STAB1

### Υψιπερατό φίλτρο (washout filter)

Το πρώτο τμήμα του σταθεροποιητή ισχύος περιλαμβάνει ένα υψιπερατό φίλτρο προκειμένου να απομονώνονται τα σφάλματα μονίμου καταστάσεως και να μην τροποποιούν την τερματική τάση της γεννήτριας. Ο σταθεροποιητής ισχύος θα πρέπει να ενεργοποιείται σε μεταβατικές μεταβολές του σήματος εισόδου. Αυτό γίνεται απαλείφοντας τις συνιστώσες χαμηλών συχνοτήτων. Η επιλογή της παραμέτρου  $T_w$ , εξαρτάται αποκλειστικά από το εύρος των συχνοτήτων οι οποίες επιθυμεί ο σχεδιαστής να μην αποκόπτονται από το φίλτρο. Αυτή η περιοχή συχνοτήτων τροποποιείται ανάλογα με την συχνότητα του προς σταθεροποίηση ρυθμού.

### Δυναμική αντιστάθμιση

Το τμήμα της δυναμικής αντιστάθμισης του σταθεροποιητή ισχύος αποτελείται από βαθμίδες υστέρησης-προήγησης φάσης. Ο σταθεροποιητής ισχύος STAB1 διαθέτει δύο τέτοιες βαθμίδες. Επιλέγεται μια κεντρική συχνότητα, του μπλοκ υστέρησης-προήγησης φάσης στην οποία παρέχεται η μέγιστη αντιστάθμιση φάσης. Η συχνότητα αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη της συχνότητας του προς σταθεροποίηση ρυθμού (στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο διασυνδετικός) προκειμένου να διασφαλιστεί ότι θα παρέχεται αυξημένη γωνία αντιστάθμισης στους τοπικούς ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς, οι οποίοι εμφανίζουν μεγαλύτερη συχνότητα από τους διασυνδετικούς. Η κεντρική συχνότητα επιλέγεται στα 1.6Hz (10r/s).

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{T_1 T_2}} \quad (3.116)$$

Στην πράξη η μέγιστη προπορεία φάσεως που μπορεί να παρέχει η κάθε βαθμίδα αντιστάθμισης δεν ξεπερνά τις 45° λόγω δυσκολιών υλοποίησης της συνάρτησης προπορείας φάσεως από συστήματα πρώτης τάξεως: ο λόγος των χρονικών σταθερών στον αριθμητή και τον παρονομαστή μιας τέτοιας βαθμίδας περιορίζεται πρακτικά σε τιμές με λόγο 10:1 [CIG00], [ROG00].

Ο σταθεροποιητής ισχύος θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε η προς σταθεροποίηση ιδιοτιμή ( $\lambda_i$ ) να μετακινηθεί στο μιγαδικό επίπεδο προς τα αριστερά χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η συχνότητα της, διότι υπάρχει η πιθανότητα αλληλεπίδρασης με άλλους ρυθμούς [NOM05].

Συνεπώς η φάση του ολοκληρωτικού υπολοίπου  $R_i$  αθροιζόμενη με την αντιστάθμιση που παρέχει ο σταθεροποιητής ισχύος θα πρέπει να ισούται με 180°:

$$\varphi_r + \arg(R_i) = 180^\circ \quad (3.117)$$

όπου  $\varphi_r$ :

$$\varphi_r = \arg\left(\frac{T_w \omega_i j}{1 + T_w \omega_i j}\right) + \arg\left(\frac{1 + T_1 \omega_i j}{1 + T_2 \omega_i j}\right) + \arg\left(\frac{1 + T_3 \omega_i j}{1 + T_4 \omega_i j}\right) \quad (3.118)$$

Θεωρώντας πανομοιότυπα τα δύο μπλοκ προήγησης-υστέρησης φάσης, οι εξισώσεις (3.116)-(3.118) καταλήγουν στον υπολογισμό των χρονικών σταθερών.

### Κέρδος Σταθεροποιητή

Ο υπολογισμός του μέγιστου επιτρεπτού κέρδους των σταθεροποιητών αποτελεί ίσως το δυσκολότερο στάδιο στη σχεδιάσή τους καθώς πρέπει να εξασφαλίζεται η απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων και να αποφεύγονται ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις με άλλους ρυθμούς. Στις περισσότερες τεχνικές σχεδίασης το κέρδος του σταθεροποιητή υπολογίζεται με δοκιμές. Εξετάζεται δηλαδή η μεταβολή των ρυθμών του συστήματος για διάφορες τιμές κέρδους των σταθεροποιητών ώστε η συνολική απόσβεση των ρυθμών να αυξάνεται [NOM05], [CIG96].

Καθώς το κέρδος ενός σταθεροποιητή αυξάνεται, η αλληλεπίδραση των ηλεκτρομηχανικών ρυθμών με τους άλλους ρυθμούς του συστήματος εκδηλώνεται συνήθως με την μεγάλη απόκλιση της συχνότητάς τους από την τιμή που αυτή είχε πριν την ενεργοποίηση του σταθεροποιητή. Η θεώρηση μέγιστων ορίων απόκλισης στη συχνότητα ενός ηλεκτρομηχανικού ρυθμού ( $\pm \Delta\omega_{lim}\%$  της τιμής χωρίς σταθεροποιητή) και ο καθορισμός του μέγιστου επιτρεπτού κέρδους των σταθεροποιητών ( $G_{PSS\ max}$ ) είναι πρακτικοί κανόνες που ακολουθούνται για τον υπολογισμό του κέρδους των σταθεροποιητών.

### 3.5.2. Σχεδίαση σταθεροποιητή για πολλαπλά σημεία λειτουργίας

Μεθοδολογικά, η διαδικασία σχεδίασης σταθεροποιητή ισχύος, που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπο λειτουργίας. Με άλλα λόγια εξασφαλίζει την βέλτιστη ρύθμιση του σταθεροποιητή για το συγκεκριμένο και μόνο σημείο, χωρίς να εγγυάται καλή λειτουργία σε όλα τα πιθανά σημεία λειτουργίας.

Από την άλλη πλευρά, η διαδικασία σχεδίασης του σταθεροποιητή θα πρέπει να διασφαλίζει την παροχή ικανοποιητικής απόσβεσης σε όλους τους κρίσιμους ρυθμούς σε μια σειρά συνθηκών προκειμένου να εξασφαλιστεί η καλή λειτουργία του συστήματος. Για τον λόγο αυτό, στην εργασία [VOM10] επεκτείναμε την παραπάνω μέθοδο για πολλαπλά σημεία λειτουργίας.

Στην μέθοδο αυτή, υπολογίζεται για κάθε σημείο λειτουργίας το ολοκληρωτικό υπόλοιπο και ο προς σταθεροποίηση ρυθμός. Με βάση την (3.117) υπολογίζεται η απαιτούμενη αντιστάθμιση φάσης για κάθε μελετούμενο σημείο λειτουργίας και ορίζεται η παρακάτω αντικειμενική συνάρτηση:

$$L = \sum_{i=1}^{o_p} (k_i f_i(\omega_{\lambda_i}))^2, \quad k_i = \begin{cases} 1 & f_i \geq 0 \\ 2 & f_i < 0 \end{cases} \quad (3.119)$$

όπου  $o_p$  το πλήθος των σημείων λειτουργίας,

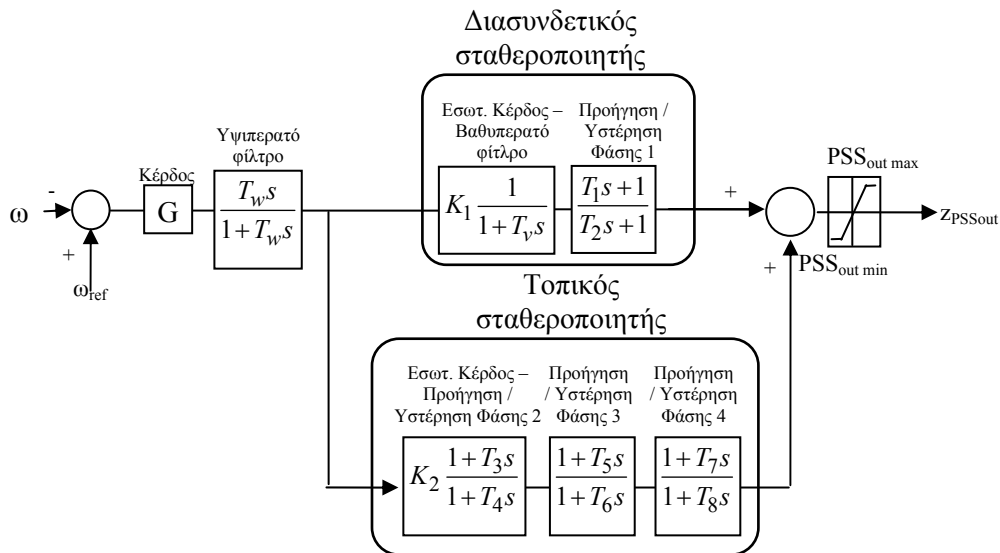
$\omega_{\lambda_i}$  η κυκλική συχνότητα της προς σταθεροποίησης ιδιοτιμής  $\lambda$  για το σημείο λειτουργίας  $i$  και  $f_i$  η απόκλιση της παρεχόμενης αντιστάθμισης  $\varphi_r$  από την βέλτιστη.

$$f_i = 180^\circ - \varphi_r - \arg(R_i) \quad (3.120)$$

Η συνάρτηση  $L$ , είναι μια συνάρτηση ελαχίστων τετραγώνων, στην οποία έχουν εισαχθεί κάποιοι συντελεστές ποινών. Η ελαχιστοποίηση της (3.119) ουσιαστικά ελαχιστοποιεί (αν αγνοηθούν οι συντελεστές  $k_i$ ) την απόκλιση από την βέλτιστη αντιστάθμιση για τα εξεταζόμενα σημεία λειτουργίας. Οι συντελεστές ποινών  $k_i$  υποδηλώνουν μια μεγαλύτερη ανοχή σε μια κατάσταση υποαντιστάθμισης, όπου το άθροισμα της γωνίας του ολοκληρωτικού υπολοίπου και της αντιστάθμισης γωνίας του σταθεροποιητή ισχύος είναι μικρότερο από  $180^\circ$  (δηλαδή αυξάνει την συχνότητα του προς σταθεροποίηση ρυθμού) σε σχέση με την περίπτωση όπου παρουσιάζεται υπεραντιστάθμιση (δηλαδή μειώνεται η συχνότητα του προς σταθεροποίηση ρυθμού). Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο θα γίνει χρήση της μεθόδου αυτής για την σχεδίαση σταθεροποιητή ισχύος για το δοκιμαστικό σύστημα 11 ζυγών – 4 γεννητριών.

### 3.5.3. Σχεδίαση σταθεροποιητή τοπικών και διασυνδεδετικών ταλαντώσεων

Στην παράγραφο 3.4.2 περιγράφηκε ο τύπος του σταθεροποιητή ισχύος για τοπικές και διασυνδεδετικές ταλαντώσεις (PSS2\*). Ο σταθεροποιητής ισχύος φαίνεται στο Σχήμα 3.29.



Σχήμα 3.29: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου τοπικού και διασυνδεδετικού σταθεροποιητή ισχύος.

Για την σχεδίαση, οι παράμετροι κάθε σταθεροποιητή ισχύος (τοπικού και διασυνδεδετικού) ρυθμίζονται ξεχωριστά. Ο τοπικός σταθεροποιητής ρυθμίζεται με την θεώρηση γεννήτριας-

άπειρου ζυγού. Καθορίζεται η φάση του ολοκληρωτικού υπολοίπου που αντιστοιχεί στον τοπικό ηλεκτρομηχανικό ρυθμό και οι χρονικές σταθερές ρυθμίζονται κατάλληλα προκειμένου να αντισταθμιστεί η φάση αυτή.

Η σχεδίαση του διασυνδεδετικού σταθεροποιητή ισχύος γίνεται όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.5.1 με την διαφορά ότι όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.29 απαιτείται η ρύθμιση μιας βαθμίδας υστέρησης-προήγησης φάσης. Επίσης απαιτείται ο ορισμός της χρονικής σταθεράς του βαθυπερατού φίλτρου, ο οποίος γίνεται με κριτήριο τις συχνότητες, των οποίων η αποκοπή είναι επιθυμητή από το διασυνδεδετικό σταθεροποιητή ισχύος. Με βάση τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα που αντιστοιχούν στον διασυνδεδετικό ρυθμό, και την επιλεγόμενη κεντρική συχνότητα για τον διασυνδεδετικό σταθεροποιητή ισχύος ρυθμίζονται οι χρονικές σταθερές προκειμένου να παρέχεται η απαραίτητη αντιστάθμιση φάσης στην συχνότητα του ρυθμού (σχέση (3.117)):

$$\varphi_i = \arg(PSS_{int}(j\omega_i)) = \pi - \arg(R_i) \quad (3.121)$$

όπου  $\varphi_i$  η αντιστάθμιση φάσης που εισάγει ο σταθεροποιητής στην συχνότητα  $\omega_i$  (η οποία αντιστοιχεί στην προς σταθεροποίηση ιδιοτιμή  $\lambda_i$ ), και  $PSS_{int}$  η συνάρτηση μεταφοράς του διασυνδεδετικού σταθεροποιητή ισχύος:

$$PSS_{int}(s) = K_1 \frac{T_w(s)}{1+T_w(s)} \frac{1}{1+T_v s} \frac{1+T_1 s}{1+T_2 s} \quad (3.122)$$

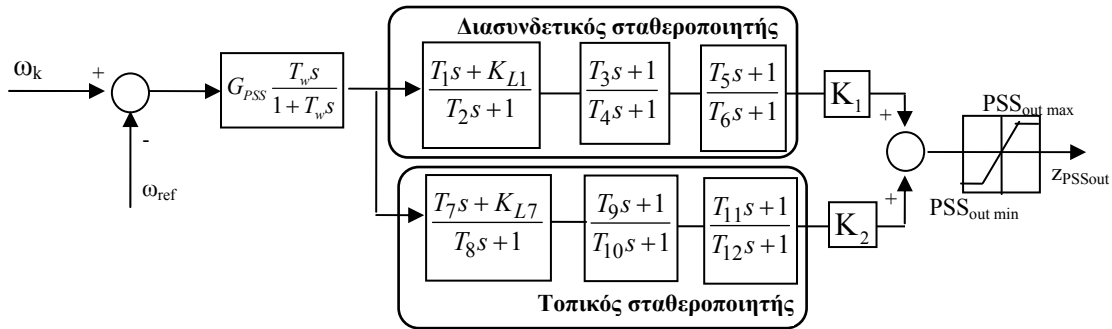
Για την κεντρική συχνότητα σημειώνεται ότι σε αντίθεση με την προσέγγιση που υλοποιήθηκε στην τεχνική σχεδίασης στην παράγραφο 3.5.1, στην περίπτωση αυτή ορίζεται ως κεντρική συχνότητα η συχνότητα του ασταθούς (ή κακώς αποσβενόμενου) ρυθμού. Στην προηγούμενη τεχνική θεωρήσαμε έναν απλό σταθεροποιητή ισχύος, και προκειμένου να εισαχθεί μεγαλύτερη φάση σε μεγαλύτερες συχνότητες επιλέχθηκε η κεντρική συχνότητα να έχει τιμή μεγαλύτερη της συχνότητας της προς σταθεροποίηση ιδιοτιμής. Αντίθετα, στην περίπτωση αυτή, την απαιτούμενη φάση σε υψηλότερες συχνότητες θα την εισάγει ο τοπικός σταθεροποιητής ισχύος, συνεπώς ως κεντρική συχνότητα του διασυνδεδετικού σταθεροποιητή μπορεί να θεωρηθεί η συχνότητα του διασυνδεδετικού ρυθμού. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα ότι το κέρδος του μπλοκ υστέρησης-προήγησης φάσης του διασυνδεδετικού σταθεροποιητή σταματά την αύξησή του σε χαμηλότερες συχνότητες, σε σχέση με την περίπτωση της τεχνικής σχεδίασης που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.5.1 όπου η κεντρική συχνότητα ήταν 10r/s. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι το βαθυπερατό φίλτρο θα αποκόψει τους υψίσυχνους ρυθμούς. Τελικά, στην συχνότητα των τοπικών ρυθμών το κέρδος του διασυνδεδετικού σταθεροποιητή είναι τόσο μικρό, που ο όρος που συνεισφέρει ο τοπικός σταθεροποιητής ισχύος κυριαρχεί και συνεπώς θα εισάγεται η επιθυμητή φάση.

Τα εσωτερικά κέρδη των επιμέρους κλάδων ρυθμίζονται έτσι ώστε ο κάθε κλάδος να έχει μοναδιαίο κέρδος σε μια συγκεκριμένη συχνότητα (συχνότητα διασυνδεδετικού ρυθμού για διασυνδεδετικό σταθεροποιητή, και συχνότητα τοπικού ρυθμού για τοπικό σταθεροποιητή). Η συνθήκη αυτή εξασφαλίζει μια εσωτερική κανονικοποίηση των κερδών που εμφανίζουν οι δύο κλάδοι του συνδυασμένου σταθεροποιητή ισχύος προκειμένου να είναι δυνατός σε ένα δεύτερο επίπεδο ο διαχωρισμός των περιοχών συχνοτήτων που επιδρά ο κάθε επιμέρους σταθεροποιητής ισχύος (διασυνδεδετικός ή τοπικός). Για παράδειγμα, ο διασυνδεδετικός σταθεροποιητής λόγω της κοινής στάθμισης που γίνεται με τα εσωτερικά κέρδη και του βαθυπερατού φίλτρου δεν θα επιδρά σημαντικά στην περιοχή συχνοτήτων του τοπικού ρυθμού. Αν η στάθμιση δεν ήταν κοινή δεν θα ήταν εξασφαλισμένη η λειτουργία του με αυτό τον τρόπο. Τέλος το κέρδος του σταθεροποιητή ισχύος καθορίζεται με βάση δοκιμές, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.5.1.

#### 3.5.4. Σχεδίαση σταθεροποιητή τοπικών και διασυνδεδετικών ταλαντώσεων με βελτιστοποίηση (PSS2)

Στην σχεδίαση της προηγούμενης παραγράφου δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η συμβολή του τοπικού σταθεροποιητή ισχύος στην τελική φάση που θα εισάγει ο συνδυασμένος σταθεροποιητής ισχύος. Για τον λόγο αυτό περιγράφεται μια επιπλέον εναλλακτική τεχνική σχεδίασης στην οποία γίνεται ενιαία σχεδίαση λαμβάνοντας υπ' όψιν και την συμβολή του τοπικού σταθεροποιητή.

Για την σχεδίαση του σταθεροποιητή ισχύος του Σχήματος 3.30 επιλέγεται καταρχήν η χρονική σταθερά του υπερβατικού φίλτρου. Οι παράμετροί του τοπικού σταθεροποιητή ισχύος PSS2 ( $K_2$ ,  $K_{L7}$ ,  $T_7$ -  $T_{12}$ ) θεωρούνται δεδομένες και καθορίζονται από την σχεδίαση με το μοντέλο μηχανής-άπειρου ζυγού (όπως και στην τεχνική της παραγράφου 3.5.3). Συνεπώς η σχεδίαση περιλαμβάνει τον υπολογισμό των παραμέτρων  $T_1$ -  $T_6$ ,  $K_{L1}$ , καθώς και τα κέρδη  $G_{PSS}$ ,  $K_1$ .



Σχήμα 3.30: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου σταθεροποιητή PSS2.

Ο υπολογισμός των μεταβλητών αυτών γίνεται με βελτιστοποίηση. Η συνάρτηση βελτιστοποίησης είναι (όπως και στην παράγραφο 3.5.2) συνάρτηση ελαχίστων τετραγώνων. Τα ελάχιστα τετράγωνα αναφέρονται στην απόσταση των χαρακτηριστικών της συνάρτησης μεταφοράς σε συγκεκριμένη συχνότητα από προκαθορισμένες από τον σχεδιαστή τιμές. Καταρχήν ορίζονται οι προκαθορισμένες τιμές ( $p$ ) – προδιαγραφές σχεδίασης, οι οποίες μπορεί να αφορούν είτε το κέρδος είτε την φάση του διασυνδεδετικού ή του συνδυασμένου σταθεροποιητή ισχύος (π.χ. μοναδιαίο κέρδος στα 6r/s, φάση 30° στα 5r/s). Συνολικά υπάρχουν τέσσερις τύποι προκαθορισμένων σημείων-προδιαγραφών, η περιγραφή των οποίων γίνεται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Τύποι προκαθορισμένων σημείων για την σχεδίαση του σταθεροποιητή ισχύος

Τύπος προδιαγραφής		Προκαθορισμένη τιμή	Συνάρτηση ( $f_i$ )
Φάση	Συνολικά	$p_{a,t}$	$p_{a,t} - \text{angle}(\text{PSS}(\omega_i j)) / 45$
	Διασυνδεδετικός σταθεροποιητής	$p_{a,i}$	$p_{a,i} - \text{angle}(\text{PSS}_{\text{int}}(\omega_i j)) / 45$
Κέρδος	Συνολικά	$p_{g,t}$	$p_{g,t} - \text{abs}(\text{PSS}(\omega_i j))$
	Διασυνδεδετικός σταθεροποιητής	$p_{g,i}$	$p_{g,i} - \text{abs}(\text{PSS}_{\text{int}}(\omega_i j))$



όπου:

$$\begin{aligned}
 PSS_{int}(s) &= K_1 \frac{T_w(s)}{1+T_w(s)} \frac{K_{L1} + T_1s}{1+T_2s} \frac{1+T_3s}{1+T_4s} \frac{1+T_5s}{1+T_6s} \\
 PSS_{loc}(s) &= K_2 \frac{T_w(s)}{1+T_w(s)} \frac{K_{L7} + T_7s}{1+T_8s} \frac{1+T_9s}{1+T_{10}s} \frac{1+T_{11}s}{1+T_{12}s} \\
 PSS(s) &= (PSS_{int}(s) + PSS_{loc}(s)) G_{PSS}
 \end{aligned} \tag{3.123}$$

Κατά την διαδικασία δηλαδή της σχεδίασης ορίζονται τόσο προδιαγραφές ως προς το κέρδος ή την φάση για τον διασυνδεδετικό ή τον συνδυασμένο σταθεροποιητή ισχύος. Επειδή το κέρδος και η φάση είναι διαφορετικά μεγέθη, οι υπολογιζόμενες αποστάσεις μέσω της  $f$  κανονικοποιούνται. Η απόκλιση από την επιθυμητή φάση διαιρείται με 45 (το οποίο θεωρείται μια μέση αντιστάθμιση φάσης για διασυνδεδετικούς ρυθμούς, ενώ το κέρδος με την κατάλληλη στάθμιση των εσωτερικών κερδών θεωρείται ότι θα έχει τιμή τάξης μεγέθους 1 στην περιοχή συχνοτήτων που μελετάται. Για την ευέλικτη ρύθμιση της αντικειμενικής συνάρτησης ορίζονται και συντελεστές βαρύτητας που εκφράζουν την αυξημένη σημασία μιας προδιαγραφής έναντι μιας άλλης. Η αντικειμενική συνάρτηση καταstrώνεται ως εξής:

$$L = \sum_{\forall i} (k_i f_i(\omega_\lambda))^2 \tag{3.124}$$

όπου  $f_i$  η κανονικοποιημένη απόσταση από τις προκαθορισμένες τιμές της προδιαγραφής  $i$ .

$\omega_\lambda$  η κυκλική συχνότητα της προς σταθεροποίησης ιδιοτιμής

$k_i$  η βαρύτητα της προδιαγραφής  $i$ .

Με βάση την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης  $L$  υπολογίζονται οι παράμετροι  $T_1$ -  $T_6$ ,  $K_{L1}$ ,  $K_1$  ενώ το κέρδος του σταθεροποιητή ισχύος  $G_{PSS}$  καθορίζεται με δοκιμές.

## 4. Ελαττωμένο μοντέλο ΣΗΕ για μεγάλες διασυνδέσεις

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται και περιγράφεται η επέκταση της οιονεί στατικής προσέγγισης για διασυνδετικές ταλαντώσεις, τεχνική με βάση την οποία γίνεται η ανάπτυξη των απλοποιημένων μοντέλων ΣΗΕ στην διατριβή. Η προσέγγιση αυτή, όπως έχει αναφερθεί, αποτελεί επέκταση της οιονεί στατικής μεταβολής για μελέτες ευστάθειας συχνότητας [GLC05], η οποία παρουσιάζεται συνοπτικά στην πρώτη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής και οι εξισώσεις που περιγράφουν το απλοποιημένο σύστημα. Τέλος, στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται η απλοποίηση των διατάξεων ΣΗΕ (γεννήτριες, αυτόματοι ρυθμιστές τάσης, οι σταθεροποιητές ισχύος και οι κινητήριες μηχανές).

### 4.1. Οιονεί στατική παράσταση με κοινή συχνότητα συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, ένα ΣΗΕ μπορεί να περιγραφεί με ένα σύνολο αλγεβρικών (g) και διαφορικών (f) εξισώσεων:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y) \\ 0 &= g(x, y) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Με βάση αυτόν τον χωρισμό στην συνέχεια του κεφαλαίου θα περιγραφούν οι εξισώσεις και η μεθοδολογία επίλυσης.

#### 4.1.1. Η παραδοχή κοινής συχνότητας

Όπως αναφέρθηκε, η προσέγγιση που αναπτύσσεται στην διατριβή βασίζεται στην επέκταση της οιονεί στατικής προσέγγισης για μελέτες ευστάθειας συχνότητας [GLC05], η οποία και θα αναλυθεί σε αυτή την ενότητα. Στην προσέγγιση αυτή, η μηχανική ισχύς που αποδίδεται στους δρομείς των γεννητριών, θεωρείται αργή μεταβλητή κατάστασης. Τροποποιείται δηλαδή η παραδοχή που αναφέρθηκε στην ενότητα 1.4, η οποία γίνεται στην οιονεί στατική προσέγγιση των ηλεκτρικών συστημάτων όπου η ηλεκτρική ισχύς (ισχύς που απορροφά το δίκτυο από την γεννήτρια) και η μηχανική ισχύς (ισχύς που αποδίδεται από τον στρόβιλο στον άξονα της γεννήτριας) θεωρούνται σε κάθε χρονική στιγμή ίσες. Βάση των εξισώσεων της παραγράφου 3.1 η ηλεκτρική ισχύς κάθε γεννήτριας είναι μια αλγεβρική μεταβλητή, η οποία υπολογίζεται παράλληλα με τις εξισώσεις του δικτύου, ενώ αντίθετα η μηχανική ισχύς είναι μια μεταβλητή κατάστασης όπως προκύπτει από τις εξισώσεις της ενότητας 3.3. Προκύπτει λοιπόν στην γενική περίπτωση, η συνολική απόκλιση ισχύος (μεταξύ μηχανικής-παραγόμενης, και ηλεκτρικής-καταναλισκόμενης), η οποία συμβολίζεται με το σύμβολο  $\eta$ .

$$\eta = \sum_{vi} (P_{mi} - P_{Gi}) \quad (4.2)$$

όπου  $P_{mi}$ ,  $P_{Gi}$  η μηχανική και ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας  $i$ .

Η επιπλέον μεταβλητή  $\eta$  που προστίθεται στο σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων του προβλήματος προϋποθέτει και άλλη μια εξίσωση, η οποία είναι αυτή του ορισμού μιας γωνίας

αναφοράς. Για τον σκοπό αυτό, θεωρείται ως γωνία αναφοράς η εσωτερική γωνία του δρομέα μιας από τις γεννήτριες. Η θεώρηση αυτή είναι παρόμοια με την θεώρηση ενός ζυγού ταλάντωσης. Η διαφορά έγκειται ότι στην προκειμένη περίπτωση δεν υπάρχει ένας ζυγός ταλάντωσης, αλλά η κατανομή της απόκλισης ενεργού ισχύος γίνεται σε όλες τις γεννήτριες με βάση την αδράνειά τους. Έτσι, για κάθε γεννήτρια  $i$  ισχύει:

$$\gamma_{g,i} = P_{m,i} - P_{G,i} = \frac{H_i}{\sum_{\forall i} H_i} \eta \quad (4.3)$$

όπου  $H_i$  η αδράνεια της γεννήτριας  $i$ .

Η απόκλιση  $\eta$  προκαλεί μεταβολές στην συχνότητα του συστήματος βάση της παρακάτω διαφορικής εξίσωσης, η οποία βασίζεται στην εξίσωση κίνησης του άξονα των γεννητριών (3.12)

$$\dot{\omega}_r = \frac{\sum (T_{m,i} - T_{G,i})}{\sum H_i} \cong \frac{\eta}{\sum H_i} \quad (4.4)$$

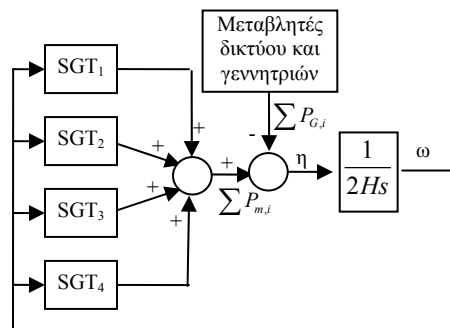
Η απλοποίηση σε αυτήν την προσέγγιση βασίζεται στην διαφορική εξίσωση που ορίζει την εσωτερική γωνία  $\delta$  των γεννητριών. Η εξίσωση αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 3.1.3 και επαναλαμβάνεται στην εξίσωση (4.5):

$$\varepsilon \dot{\delta}_i = \frac{1}{\omega_0} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_r \quad (4.5)$$

όπου  $\omega_0$  είναι η σύγχρονη κυκλική συχνότητα σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο και  $\omega_r$  είναι η ανά μονάδα ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας αναφοράς ( $r$ ). Είναι φανερό ότι το  $\omega_0$  έχει μια αρκετά μεγάλη τιμή, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι το  $1/\omega_0 \rightarrow 0$ . Με άλλα λόγια μπορεί να θεωρηθεί ότι οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις αντιστοιχούν σε γρήγορα δυναμικά φαινόμενα. Οπότε, η προσέγγιση καταλήγει στο ότι σε κάθε χρονική στιγμή θεωρείται ότι οι δρομείς των γεννητριών περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα συνεπώς οι εσωτερικές γωνίες  $\delta$  των γεννητριών μετατρέπονται σε αλγεβρικές μεταβλητές. Συνεπώς ισχύει:

$$\omega_i = \omega_r \quad (4.6)$$

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα της εν λόγω προσέγγισης για ένα σύστημα τεσσάρων γεννητριών.



Σχήμα. 4.1: Μοντελοποίηση με οιονεί στατική προσέγγιση και την παραδοχή ενιαίας συχνότητας (όπου SGT είναι οι ρυθμιστές στροφών και οι στρόβιλοι)

#### 4.1.2. Παράσταση γεννητριών στην μόνιμο κατάσταση και εξισώσεις δικτύου

Για την μοντελοποίηση του συστήματος και την πλήρη περιγραφή του προβλήματος είναι απαραίτητο να περιγραφούν και οι βασικές εξισώσεις. Για την έγχυση των γεννητριών χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις μόνιμου καταστάσεως για την κάθε γεννήτρια, όπως αυτές αναλύθηκαν στην παράγραφο 3.1.6. Με βάση τις εξισώσεις για την έγχυση ισχύος των γεννητριών, για κάθε γεννήτρια  $i$  ισχύει από τις εξισώσεις (3.85)-(3.86):

$$P_{G,i} = \frac{V_{t,i} E_{f,i} \sin(\delta_i - \theta_i)}{X_{d,i}} + \frac{V_{t,i}^2}{2} \left( \frac{1}{X_{q,i}} - \frac{1}{X_{d,i}} \right) \sin(2(\delta_i - \theta_i)) \quad (4.7)$$

$$Q_{G,i} = \frac{V_{t,i} E_{f,i} \cos(\delta_i - \theta_i)}{X_{d,i}} - V_{t,i}^2 \left( \frac{\sin^2(\delta_i - \theta_i)}{X_{q,i}} + \frac{\cos^2(\delta_i - \theta_i)}{X_{d,i}} \right) \quad (4.8)$$

Η ηλεκτρική ισχύς ενεργός και άεργος, η οποία αποδίδεται στο δίκτυο από κάθε γεννήτρια ( $P_G, Q_G$ ), υπολογίζεται συναρτήσει των μεταβλητών ( $V, \theta, \delta, E_f$ ), όπου  $E_f$  είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη διέγερσης η οποία μπορεί είτε να θεωρείται σταθερή είτε ρυθμιζόμενη από τον APT. Όπου  $V, \theta$  το μέτρο και η γωνία της τάσης και  $\delta$  η εσωτερική γωνία της γεννήτριας.

Οι εγχύσεις ισχύος στον ζυγό  $i$  του συστήματος υπολογίζονται από τις εξισώσεις ροής φορτίου, οι οποίες εμπλέκουν τα διανύσματα των τάσεων ( $V, \theta$ ) όλων των ζυγών (εξισώσεις (4.9)-(4.12)).

$$P_{NET,i}(V, \theta) = V_i^2 g_i - V_k \sum_{m \in B_i} V_m \alpha_{im} \quad (4.9)$$

$$Q_{NET,i}(V, \theta) = -V_i^2 b_i - V_i \sum_{m \in B_i} V_m \beta_{im} \quad (4.10)$$

όπου  $B_i$  είναι το σύνολο των ζυγών που συνδέονται με τον ζυγό  $i$

όπου  $\alpha_{im}, \beta_{im}$  είναι:

$$\alpha_{im} = -g_{im} \cos(\theta_i - \theta_m) - b_{im} \sin(\theta_i - \theta_m) \quad (4.11)$$

$$\beta_{im} = -g_{im} \sin(\theta_i - \theta_m) + b_{im} \cos(\theta_i - \theta_m) \quad (4.12)$$

όπου  $g_{im}, b_{im}$  το πραγματικό και φανταστικό μέρος του πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου μεταφοράς.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.1.1, στην επίλυση των εξισώσεων δικτύου δεν θεωρείται άπειρος ζυγός, αλλά ως γωνία αναφοράς λαμβάνεται η γωνία μιας γεννήτριας. Η απόκλιση ισχύος που θα απορροφούσε ο άπειρος ζυγός κατανέμεται σε όλες τις γεννήτριες βάση της (4.3).

#### 4.1.3. Μεταβλητές και εξισώσεις συστήματος

Πριν την περιγραφή των εξισώσεων θα πρέπει να οριστούν οι μεταβλητές του προβλήματος. Με βάση την παράσταση που φαίνεται στην εξίσωση (4.1) οι μεταβλητές διαιρούνται σε μεταβλητές κατάστασης ( $x$ ) και αλγεβρικές μεταβλητές ( $y$ ). Στις σχέσεις (4.13)-(4.14) φαίνονται οι πίνακες στήλη για τις μεταβλητές αυτές.

$$x = \begin{bmatrix} x_{int}^T & P_m^T & E_f^T & \omega \end{bmatrix}^T \quad (4.13)$$

$$y_t = \begin{bmatrix} V^T & \theta^T & \delta^T & \eta \end{bmatrix}^T \quad (4.14)$$

Η δομή του διανύσματος των μεταβλητών κατάστασης δεν είναι μονοσήμαντη, και ειδικά στην (4.13) είναι αρκετά γενική προκειμένου να παρουσιαστεί η βασική προσέγγιση. Ουσιαστικά, στην παράσταση της σχέσης (4.13), εμφανίζονται χωριστά όλες οι μεταβλητές κατάστασης που εμπλέκονται σε πολλές εξισώσεις ( $P_m, E_f, \omega$ ), ενώ όλες οι υπόλοιπες θεωρούνται εσωτερικές μεταβλητές και ομαδοποιούνται στο διάνυσμα  $x_{int}$ .

Για τις αλγεβρικές μεταβλητές ισχύει ότι τα στοιχεία  $\theta, V$  (γωνία και μέτρο τάσης ζυγών) είναι διανύσματα-στήλη διαστάσεως  $N \times 1$  (όπου  $N$  ο αριθμός των ζυγών). Το στοιχείο  $\delta$  (γωνία γεννήτριας) είναι διάνυσμα-στήλη διάστασης  $G_e \times 1$  (όπου  $G_e$  ο αριθμός γεννητριών), ενώ τέλος το στοιχείο  $\eta$  όπως αναφέρθηκε παραπάνω αποτελεί βαθμωτό μέγεθος.

Σε αυτή την ενότητα δεν θα γίνει ανάλυση των διαφορικών εξισώσεων, αλλά κυρίως θα γίνει μια περιγραφή των αλγεβρικών εξισώσεων τόσο όσον αφορά την παράστασή τους όσο και την μεθοδολογία επίλυσης.

Οι αλγεβρικές εξισώσεις συνοψίζονται στην (4.15). Οι τρεις πρώτες εξισώσεις ( $G_p, G_Q, F_G$ ) εκφράζουν το ισοζύγιο ισχύος στους ζυγούς και τις γεννήτριες. Η τέταρτη εξίσωση η οποία είναι βαθμωτή εκφράζει την γωνία αναφοράς, όπως περιγράφηκε παραπάνω.

$$g_t(x, y_t) = \begin{bmatrix} G_p \\ G_Q \\ F_G \\ G_{sys} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_m - P_{NET}(V, \theta) - P_L - \gamma_{ge} \\ Q_G(V, \theta, \delta, E_f) - Q_{NET}(V, \theta) - Q_L \\ P_m - P_G(V, \theta, \delta, E_f) - P_L - \gamma_g \\ \delta_r \end{bmatrix} = 0 \quad (4.15)$$

όπου  $G_p, G_Q$  είναι  $N$  το πλήθος εξισώσεις, όπως και οι ζυγοί του συστήματος, ενώ οι συναρτήσεις  $F_G$  αναφέρονται στις γεννήτριες και το πλήθος τους είναι  $G_e$  όσες και οι γεννήτριες. Τέλος η συνάρτηση  $G_{sys}$  είναι βαθμωτή. Σχετικά με τις μεταβλητές που εμφανίζονται στην (4.15) τα διανύσματα στήλη  $P_{NET}, Q_{NET}$  είναι διαστάσεως  $N \times 1$ , όπως επίσης και τα  $P_m, P_G, Q_G$ . Ωστόσο, η δεύτερη ομάδα επειδή αναφέρεται σε ισχύ γεννητριών συμπληρώνεται με μηδενικά στα στοιχεία που αντιστοιχούν σε ζυγούς χωρίς γεννήτρια. Το στοιχείο  $\gamma_g$  προκύπτει από την (4.3) και είναι διάστασης  $G_e \times 1$ . Ο πίνακας  $\gamma_{ge}$  είναι ο εκτεταμένο διάνυσμα στήλη διάστασης  $N \times 1$ , όπου στα στοιχεία που αντιστοιχούν σε ζυγούς όπου δεν υπάρχει γεννήτρια η τιμή είναι μηδενική.

όπου  $P_L, Q_L$  είναι ο διάνυσμα στήλη διάστασης  $N \times 1$  και περιλαμβάνει τις τιμές για τα φορτία σταθερής ισχύος.

Το σύστημα των εξισώσεων λύνεται μέσω της επαναληπτικής μεθόδου Newton-Raphson ως εξής:

Αρχικά υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας  $J_t$  του οποίου η διάσταση όπως προκύπτει από τα παραπάνω είναι:  $(2N+G_e+n) \times (2N+G_e+n)$ .

$$J_t = D_{y_t} g_t(x, y_t) \quad (4.16)$$

Οι μεταβλητές  $P_m$  είναι μεταβλητές κατάστασης οι οποίες προκύπτουν από τις συναρτήσεις μεταφοράς των ρυθμιστών στροφών. Συνεπώς η παραγωγή των μεταβλητών αυτών ως προς το διάνυσμα  $y_t$  δίνει μηδενικές τιμές. Επίσης τα φορτία  $P_L, Q_L$  θεωρούνται σταθερής ισχύος, ανεξάρτητα δηλαδή από το σημείο λειτουργίας του μελετούμενου συστήματος. Η εξίσωση (4.16) απλοποιείται, και για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα προκύπτει η εξής εξίσωση:

$$\mathbf{J}_t = \begin{bmatrix} -D_\theta P_{NET} & -D_V P_{NET} & 0 & -D_\eta \gamma_{ge} \\ D_\theta Q_G - D_\theta Q_{NET} & D_V Q_G - D_V Q_{NET} & D_\delta Q_G & 0 \\ -D_\theta P_G & -D_V P_G & -D_\delta P_G & -D_\eta \gamma_g \\ 0 & 0 & e_r & 0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

όπου  $e_r$  είναι ένα διάνυσμα γραμμή, του οποίου το μόνο μη μηδενικό στοιχείο ισούται με τη μονάδα και αντιστοιχεί στην γωνία αναφοράς.

Η διόρθωση των αλγεβρικών μεταβλητών στην ανακύκλωση  $k$  της μεθόδου Newton-Raphson δίνει:

$$\begin{bmatrix} \theta^{(k+1)} \\ \mathbf{V}^{(k+1)} \\ \delta^{(k+1)} \\ \eta^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^{(k)} \\ \mathbf{V}^{(k)} \\ \delta^{(k)} \\ \eta^{(k)} \end{bmatrix} - \mathbf{J}_t^{-1} \begin{bmatrix} G_p^{(k)} \\ G_Q^{(k)} \\ F_G^{(k)} \\ G_{sys}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Διαμορφώνονται λοιπόν δύο εξισώσεις με τις οποίες υπολογίζεται η λύση για το διάνυσμα των αλγεβρικών μεταβλητών ( $y_i$ ). Η πρώτη είναι η επαναληπτική εξίσωση (4.18) με βάση την οποία υπολογίζεται επαναληπτικά το διάνυσμα των αγνώστων μεταβλητών, ενώ η δεύτερη είναι η εξίσωση του σφάλματος (4.15) σε κάθε βήμα της επανάληψης.

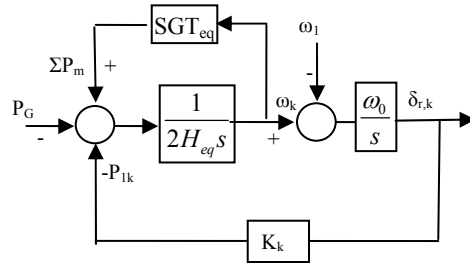
## 4.2. Οιονεί στατική παράσταση διασυνδεδετικών ταλαντώσεων

### 4.2.1. Χρονική κλίμακα διασυνδεδετικών ταλαντώσεων

Όπως αναφέρθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο, στόχος της διατριβής είναι η ανάπτυξη μιας απλοποιημένης προσέγγισης βασισμένης στην οιονεί στατική μεταβολή για την μελέτη διασυνδεδετικών ταλαντώσεων. Η παραδοχή της ενιαίας συχνότητας ισχύει όταν όλες οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις βρίσκονται στην ίδια περιοχή συχνοτήτων, όταν δηλαδή οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις εξελίσσονται σε κοινή χρονική κλίμακα.

Ωστόσο, είναι γνωστό από την εμπειρία λειτουργίας των ΣΗΕ ότι ανάμεσα σε μεγάλες ομάδες γεννητριών μπορεί να αναπτύσσονται ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας λόγω της ασθενούς μεταξύ τους διασύνδεσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι διασυνδέσεις ηλεκτρικών συστημάτων, στις οποίες παρουσιάζονται συχνά τέτοιου τύπου ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις. Με αυτή την έννοια, η παραδοχή της εξίσωσης (4.6) πρέπει να τροποποιηθεί για να συμπεριληφθούν οι διασυνδεδετικές ταλαντώσεις.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα μιας συνεκτικής περιοχής ενός ηλεκτρικού συστήματος όπου  $P_{ik}$  είναι η ροή ενεργού ισχύος διαμέσου της διασύνδεσης με το εξωτερικό σύστημα (έστω περιοχή 1) και  $K_k$  η ευαισθησία της ροής ενεργού ισχύος στην διασύνδεση σε σχέση με τη γωνία των γεννητριών της ομάδας γεννητριών  $k$  ως προς την 1.



Σχήμα 4.2: Απλοποιημένο διάγραμμα περιοχής ισοδύναμου συστήματος

Στο Σχήμα 4.2 επίσης φαίνεται η διαφορική εξίσωση του ισοδύναμου δρομέα των γεννητριών της περιοχής  $k$  βάση της οποίας προκύπτει η συχνότητα καθώς και ο ισοδύναμος ρυθμιστής στροφών μαζί με τον στρόβιλο ( $SGT_{eq}$ ), ο οποίος καθορίζει την μηχανική ισχύ που αποδίδεται.  $H_{eq}$  είναι η ισοδύναμη αδράνεια της ομάδας των γεννητριών.

Στο σύστημα που φαίνεται στο Σχήμα 4.2 παράγεται μια ταλάντωση, της οποίας η συχνότητα υπολογίζεται βάση της παρακάτω εξίσωσης:

$$f_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_k \omega_0}{2H_{eq}}} \quad (4.19)$$

Η παραπάνω εξίσωση τροποποιεί την παραδοχή (4.6). Σε μια μεγάλη ομάδα γεννητριών, η ισοδύναμη αδράνεια είναι μεγάλη. Επίσης σε συστήματα τα οποία έχουν ασθενή διασύνδεση, ή λειτουργούν στα τεχνικά τους όρια, η μεταβλητή  $K_k$  έχει μικρή τιμή. Έτσι αντισταθμίζεται η μεγάλη τιμή του  $\omega_0$  στον αριθμητή και η συχνότητα της ταλάντωσης γίνεται χαμηλή. Με άλλα λόγια, σε τέτοιες περιπτώσεις συστημάτων, ο βρόχος ανατροφοδότησης του Σχήματος 4.2 γίνεται βραδύς, οδηγεί δηλαδή σε μια αργή μεταβολή της εσωτερικής γωνίας των γεννητριών. Σε αντίθεση λοιπόν με την ενότητα 4.1, όπου οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις είναι ταχύτερες από τον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας, στην περίπτωση που περιγράφηκε παραπάνω, εμφανίζονται διασυνδεδετικές ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις, οι οποίες είναι αργές, και συγκρίσιμες με τις αργές μεταβλητές κατάσταση.

Το γεγονός αυτό οδηγεί στον διαχωρισμό των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων σε δύο κατηγορίες, οι οποίες αντιστοιχούν σε δύο χρονικές κλίμακες. Η μέθοδος χωρισμού περιοχών γίνεται βάση της τεχνικής των ιδιοδιανυσμάτων που περιγράφηκε στην ενότητα 1.5. Η πρώτη χρονική κλίμακα περιλαμβάνει τους τοπικούς ρυθμούς, τις ταλαντώσεις δηλαδή μεταξύ γεννητριών που ανήκουν στην ίδια περιοχή, για τις οποίες ισχύει η παραδοχή της ενότητας 4.1. Οι ταλαντώσεις αυτές θεωρείται ότι είναι ευσταθείς, αποσβένονται γρήγορα και εμφανίζουν συχνότητα της τάξης του 1Hz. Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας (0.1-0.6Hz) που συμπεριλαμβάνονται στα αργά μεταβατικά φαινόμενα.

#### 4.2.2. Παράσταση συνεκτικών περιοχών

Η διακύμανση της εσωτερικής γωνίας κάθε γεννήτριας  $i$  περιγράφεται βάση της εξίσωσης (4.5):

$$e\dot{\delta}_i = \frac{1}{\omega_0} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_r \quad (4.20)$$

Με βάση την παράγραφο 4.2.1 προκύπτει ότι το πρώτο μέλος της εξίσωσης θεωρείται ότι έχει μικρή τιμή (κοντά στην μηδενική) εάν η γεννήτρια  $i$  ανήκει στην ίδια περιοχή με την γεννήτρια  $r$

(γεννήτρια αναφοράς), οπότε η εξίσωση μετατρέπεται σε αλγεβρική. Συνεπώς απαλείφονται όλες οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις στο εσωτερικό κάθε συνεκτικής περιοχής. Η συχνότητα θεωρείται κοινή στο εσωτερικό κάθε περιοχής και η γωνία  $\delta$  μετατρέπεται σε αλγεβρική μεταβλητή. Ωστόσο επειδή, όπως αναφέρθηκε η απλοποίηση αυτή δεν μπορεί να γίνει για διασυνδεδεμένες ταλαντώσεις, -λόγω της χαμηλής τους συχνότητας-, μία γωνία  $\delta$  μιας γεννήτριας για κάθε περιοχή, επιλέγεται ως γωνία αναφοράς της περιοχής και παραμένει μεταβλητή κατάσταση. Στο εξής θα αναφέρουμε την γωνία αναφοράς της περιοχής  $k$  ως  $\delta_{r,k}$ , μεταβλητή η οποία ισούται με την εσωτερική γωνία της γεννήτριας αναφοράς της περιοχής αυτής.

Επιπλέον μία γωνία επιλέγεται ως γωνία αναφοράς του συστήματος. Χωρίς βλάβη της γενικότητας θεωρούμε ότι η γωνία αυτή είναι η γωνία της γεννήτριας αναφοράς στην περιοχή 1 και όλες οι γωνίες αναφοράς ορίζονται ως προς αυτή την γωνία.

$$\delta_{r,1} = 0 \quad (4.21)$$

Συνεπώς, αν  $n$  το πλήθος των περιοχών ισχύει:

$$\dot{\delta}_{r,k} = \omega_0 (\omega_k - \omega_1) \quad \forall k = 1, n \quad (4.22)$$

Η συχνότητα της περιοχής  $k$  είναι:

$$\dot{\omega}_k = \frac{\eta_k}{2 \sum_{\forall i \in A_k} H_i} \quad (4.23)$$

όπου  $\eta_k$  η απόκλιση μεταξύ μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος που περιγράφηκε στην ενότητα 3.1 υπολογίζεται ξεχωριστά σε κάθε περιοχή βάση της παρακάτω εξίσωσης:

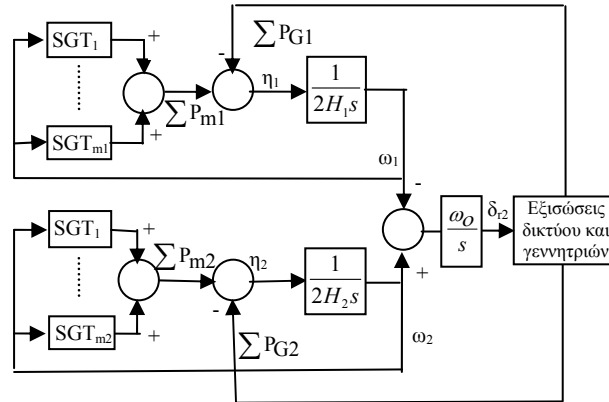
$$\eta_k = \sum_{\forall i \in A_k} P_{m,i} - \sum_{\forall i \in A_k} P_{G,i} \quad (4.24)$$

όπου  $A_k$  είναι το σύνολο των γεννητριών που ανήκουν στην περιοχή  $k$ .

Συνοψίζοντας, στην προτεινόμενη προσέγγιση το σύστημα χωρίζεται σε περιοχές, και οι ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί διαιρούνται σε ρυθμούς εσωτερικούς σε κάθε περιοχή, και σε ρυθμούς οι οποίοι εμφανίζονται μεταξύ δύο περιοχών. Οι πρώτοι απαλείφονται ενώ οι δεύτεροι διατηρούνται. Ουσιαστικά, η παραδοχή της ενιαίας συχνότητας, η οποία έγινε στην περίπτωση της οιονεί στατικής μεταβολής για μελέτες ευστάθειας συχνότητας, εφαρμόζεται ξεχωριστά σε κάθε υποσύστημα.

Η μηχανική ισχύς κάθε γεννήτριας είναι επίσης μεταβλητή κατάσταση και υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης μεταφοράς του αντίστοιχου ρυθμιστή στροφών-στροβίλου. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ενός συστήματος δύο περιοχών (παραλείποντας για λόγους ευληπτότητας τους APT). Στην πρώτη περιοχή περιλαμβάνονται  $m_1$ , ενώ στην δεύτερη  $m_2$  γεννήτριες.





Σχήμα 4.3: Διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος δύο περιοχών με την επέκταση της οιονεί στατικής μεταβολής για διασυνδεδετικές ταλαντώσεις (SGT είναι οι ρυθμιστές στροφών και οι στρόβιλοι)

Στην περίπτωση της θεώρησης πολλαπλών περιοχών οι αλγεβρικές εξισώσεις (4.15), (4.17) τροποποιούνται. Η μεταβλητή  $\eta$ , μετατρέπεται σε διάνυσμα διάστασης  $n$ , όπου  $n$  είναι ο αριθμός των θεωρούμενων περιοχών. Αντίστοιχα η εξίσωση (4.17) η οποία ορίζει τον Ιακωβιανό πίνακα τροποποιείται. Προστίθενται  $n-1$  στήλες στην δεξιά πλευρά του πίνακα, αφού το  $D_{\eta\gamma_g}$  αποτελείται από  $n$  στήλες. Επιπλέον προστίθενται  $n-1$  γραμμές στο κάτω μέρος του Ιακωβιανού πίνακα, αντίστοιχα με την τελευταία γραμμή του πίνακα στην εξίσωση (4.17). Κάθε γραμμή του πίνακα  $e_r$  (ο οποίος πλέον είναι διαστάσεων  $n \times G_e$ ) αντιστοιχεί σε μια περιοχή του συστήματος και έχει ένα μη μηδενικό στοιχείο ίσο με την μονάδα. Το στοιχείο αυτό ορίζει την γωνία αναφοράς κάθε περιοχής.

### 4.3. Γενική δομή και μεταβλητές του συστήματος

#### 4.3.1. Αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις

Εφαρμόζοντας την προσέγγιση που περιγράφηκε στην ενότητα 4.2 για σύστημα  $n$  περιοχών, η παράσταση του προβλήματος γίνεται πιο πολύπλοκη. Για τον λόγο αυτό, η παρουσίαση των εξισώσεων που θα πραγματοποιηθεί στην παρούσα ενότητα δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματική υλοποίηση αλλά γίνεται με κριτήριο την ευληπτότητα της διαχείρισης των εξισώσεων για κάθε κατηγορία.

Οι εξισώσεις που ορίζουν το μελετούμενο πρόβλημα διαίρονται σε δύο κατηγορίες.

- Η πρώτη σχετίζεται με τις μεταβλητές των διατάξεων των ΣΗΕ (γεννητριών, ρυθμιστών στροφών, μονάδων παραγωγής, αυτόματων ρυθμιστών τάσεων και τους σταθεροποιητές ισχύος). Το σύνολο των εξισώσεων αυτών περιλαμβάνει τόσο αλγεβρικές όσο και διαφορικές εξισώσεις.
- Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων που σχετίζονται με το δίκτυο μεταφοράς και την έγχυση ισχύος των γεννητριών, τις εξισώσεις δηλαδή που περιγράφησαν στην επέκταση της οιονεί στατικής προσέγγισης για μελέτες ευστάθειας συχνότητας (ενότητα 4.1-εξίσωση (4.15)) τροποποιημένες κατά το τρόπο που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.2.

### Εξισώσεις διατάξεων ΣΗΕ

Όπως αναφέρθηκε, το σύνολο των εξισώσεων που περιγράφουν τις διατάξεις ΣΗΕ περιλαμβάνει διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις. Συνεπώς στην γενική περίπτωση, για μια διάταξη  $d$ , οι μεταβλητές θα είναι της μορφής:

$$z_d = \begin{bmatrix} x_d^T & y_d^T \end{bmatrix}^T \quad (4.25)$$

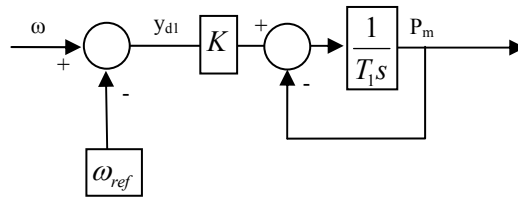
όπου  $x_d$  οι μεταβλητές κατάστασης,  $y_d$  οι αλγεβρικές μεταβλητές, ενώ με  $f_d$ ,  $g_d$  συμβολίζονται αντίστοιχα οι διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις.

Οι μεταβλητές που εμπλέκουν οι εξισώσεις αυτές, όπως φαίνεται στην (4.26) είναι στην γενική περίπτωση το σύνολο των μεταβλητών του προβλήματος. Αυτό θεωρείται, παρότι ως επί το πλείστον οι μεταβλητές κάθε τέτοιας διάταξης είναι κυρίως εσωτερικές μεταβλητές (με τις μεταβλητές εισόδου και εξόδου να διαφοροποιούνται), προκειμένου να γίνει μια γενική διατύπωση των συναρτήσεων και να περιγραφούν όλες οι πιθανές διατάξεις.

$$h_d = \begin{bmatrix} f_d(x, y)^T & g_d(x, y)^T \end{bmatrix}^T \quad (4.26)$$

όπου  $x$  όλες οι μεταβλητές κατάστασης και  $y$  όλες οι αλγεβρικές μεταβλητές του συστήματος

Για παράδειγμα, στην περίπτωση μιας διάταξης απλοποιημένου ρυθμιστή στροφών-στροβίλου του Σχήματος 4.4 ισχύει το εξής:



Σχήμα 4.4: Απλοποιημένη διάταξη ρύθμισης στροφών

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την διάταξη, διατυπώνονται σε αντιστοιχία με τις εξισώσεις (4.25)-(4.26).

$$z_d = \begin{bmatrix} x_d^T & y_d^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_m & | & y_{d1} \end{bmatrix}^T \quad (4.27)$$

$$h_d = \begin{bmatrix} \dot{P}_m \\ - \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} (K y_{d1} - P_m) \\ \omega - \omega_{ref} - y_{d1} \end{bmatrix}^T \quad (4.28)$$

Με άλλα λόγια στον βαθμό που μια εξίσωση της διάταξης είναι διαφορική (γεγονός που είναι εκ των προτέρων γνωστό), η σχέση (4.26) παίρνει την μορφή:

$$\dot{x}_{d,i} = f_{d,i}(x, y) \quad (4.29)$$

ενώ στην περίπτωση όπου είναι αλγεβρική παίρνει την μορφή:

$$0 = g_{d,i}(x, y) \quad (4.30)$$

Όλες οι διατάξεις που περιλαμβάνονται στο μελετούμενο ΣΗΕ περιγράφονται κατά αυτόν τον τρόπο διαμορφώνοντας μια αλληλουχία διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων. Στο τέλος της διαδικασίας αυτής δημιουργείται το σύνολο των εξισώσεων  $h_d$  οι οποίες περιγράφουν την λειτουργία των ΑΡΤ, των Ρυθμιστών στροφών-στροβίλων, την δυναμική των γεννητριών, τους σταθεροποιητές ισχύος και γενικότερα όλες τις διατάξεις του ΣΗΕ.

Τέλος, στο σύνολο των συναρτήσεων  $h_d$  περιλαμβάνονται και οι διαφορικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της συχνότητας και της γωνίας αναφοράς των συνεκτικών περιοχών όπως αυτές ορίστηκαν στις σχέσεις (4.22)-(4.23):

### Εξισώσεις δικτύου μεταφοράς και έγχυσης γεννητριών

Το δεύτερο τμήμα των εξισώσεων που περιγράφουν το μοντέλο που αναπτύσσεται στα πλαίσια της διατριβής, περιλαμβάνει τις εξισώσεις του δικτύου μεταφοράς και τις εξισώσεις που υπολογίζουν την έγχυση των γεννητριών. Οι εξισώσεις αυτές είναι αλγεβρικές και περιγράφονται στην ενότητα 4.1 (εξίσωση (4.15)) ενσωματώνοντας την τροποποίηση που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.2 για την θεώρηση συνεκτικών περιοχών.

Οι εξισώσεις που αναφέρονται στην έγχυση των γεννητριών προκύπτουν από αυτές που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.1 (ανάλογα με το μοντέλο γεννήτριας που θεωρείται).

Το διάνυσμα στήλη των μεταβλητών που περιγράφουν το δίκτυο μεταφοράς και την έγχυση ισχύος των γεννητριών φαίνεται στην εξίσωση (4.31)

$$y_t = \begin{bmatrix} V^T & \theta^T & \delta^T & \eta^T \end{bmatrix}^T \quad (4.31)$$

Κάθε στοιχείο του διανύσματος στήλη της (4.31) είναι επίσης ένα διάνυσμα στήλη. Οι πίνακες  $V$ ,  $\theta$  έχουν διάσταση  $N \times 1$ , όπου  $N$  οι ζυγοί του συστήματος. Ο πίνακας  $\delta$  έχει διαστάσεις  $G_e \times 1$  όσες και οι γεννήτριες του συστήματος και ο πίνακας  $\eta$  έχει διαστάσεις  $n \times 1$  όσες και οι θεωρούμενες περιοχές.

Βάση της (4.15) προκύπτει:

$$g_t(x, y) = \begin{bmatrix} G_P \\ G_Q \\ F_G \\ G_{sys} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_m - P_{NET}(V, \theta) - P_L - \gamma_{ge} \\ Q_G - Q_{NET}(V, \theta) - Q_L \\ P_m - P_G - P_L - \gamma_g \\ [\delta_{r(1)} \quad \dots \quad \delta_{r(n)}]^T - [\delta_{r,1} \quad \dots \quad \delta_{r,n}]^T \end{bmatrix} = 0 \quad (4.32)$$

Η εξίσωση (4.32) χρησιμοποιεί ίδιους συμβολισμούς με την (4.15) της παραγράφου 4.1.3. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.1.3,  $G_P$ ,  $G_Q$  είναι  $N$  το πλήθος εξισώσεις (όπου  $N$  οι ζυγοί του συστήματος) και εκφράζουν το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς. Οι συναρτήσεις  $F_G$  αναφέρονται στις γεννήτριες (το πλήθος τους είναι  $G_e$ ) και εκφράζουν το ισοζύγιο ισχύος στους ζυγούς παραγωγής. Η συνάρτηση  $G_{sys}$  έχει διάσταση  $n$  όσες και οι συνεκτικές περιοχές. Σχετικά με τις μεταβλητές που εμφανίζονται στην (4.32) τα διανύσματα  $P_{NET}$ ,  $Q_{NET}$  είναι διαστάσεως  $N \times 1$ , όπως επίσης και τα  $P_m$ ,  $P_G$ ,  $Q_G$  (συμπληρωμένα με μηδενικά στα στοιχεία που αντιστοιχούν σε ζυγούς χωρίς γεννήτρια). Τέλος,  $P_L$ ,  $Q_L$  είναι τα διανύσματα στήλη διάστασης  $N \times 1$  και περιλαμβάνουν τις τιμές για τα φορτία σταθερής ισχύος.

Όπως φαίνεται και στην ενότητα 3.1, η εξίσωση της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδει κάθε γεννήτρια στο δίκτυο εξαρτάται από το μοντέλο που θεωρείται κάθε φορά, και για τον λόγο αυτό οι μεταβλητές των ( $P_G$ ,  $Q_G$ ) δεν φαίνονται στις παραπάνω εξισώσεις. Για παράδειγμα, στο κλασικό μοντέλο, για τον υπολογισμό των  $P_G$ ,  $Q_G$  εμπλέκεται η ΗΕΔ διεγέρσεως ( $E_f$ ). Σε

μοντέλα που ενσωματώνουν τα δυναμικά φαινόμενα του τυλίγματος διέγερσης, η ισχύς εξαρτάται από την τιμή της μεταβατικής ΗΕΔ ( $E_q'$ ).

Τέλος με  $r(k)$  συμβολίζεται η γεννήτρια που ορίζει την γωνία αναφοράς στην περιοχή  $k$ .

Τα στοιχεία  $\gamma_g$  (και το εκτεταμένο  $\gamma_{ge}$ ) είναι πίνακες διαστάσεως  $G_{\times n}$  (και  $N_{\times n}$  αντίστοιχα). Ο υπολογισμός των τιμών για τα στοιχεία αυτά είναι η επέκταση της (4.3) με την (4.24).

$$\gamma_{g,i} = \begin{cases} \frac{H_i}{\sum_{j \in A_k} H_j} \eta_k, i \in A_k \\ 0, i \notin A_k \end{cases} \quad (4.33)$$

όπου  $A_k$  είναι το σύνολο των γεννητριών που ανήκουν στην περιοχή  $k$ .

Τέλος, όπως ορίστηκε στην παράγραφο 4.2.2, κάποιες από τις γωνίες  $\delta$  των γεννητριών ( $n$  το πλήθος, όσες και οι συνεκτικές περιοχές) αποτελούν γωνίες αναφοράς των συνεκτικών περιοχών και ισούται με τις αντίστοιχες μεταβλητές κατάστασης  $\delta_r$ , όπως φαίνεται και στην (4.32). Στην ουσία οι γωνίες  $\delta$  των γεννητριών αναφοράς κάθε περιοχής είναι μεταβλητές κατάστασης, και θα μπορούσαν να απαλειφθούν εφόσον η σχέση τους είναι μια απλή ισότητα με τις  $\delta_r$ . Ωστόσο επιλέγεται αυτή η παράσταση διότι δεν αλλάζει την δομή του Ιακωβιανού πίνακα όσον αφορά τις εξισώσεις του δικτύου και της έγχυσης των γεννητριών (επέκταση των (4.15), (4.17) για συνεκτικές περιοχές-εξίσωση (4.32)).

Με άλλα λόγια, εισάγεται μια επιπλέον μεταβλητή κατάστασης η οποία στην (4.32) εξισώνεται με την γωνία  $\delta$  κάθε γεννήτριας που θεωρείται γεννήτρια αναφοράς μιας περιοχής. Ενώ λοιπόν οι μεταβλητές  $\delta$  παραμένουν στο σύνολό τους αλγεβρικές, και η διατύπωση των εξισώσεων δικτύου μεταφοράς και έγχυσης γεννητριών δεν τροποποιείται, στην ουσία οι γωνίες αναφοράς γίνονται μεταβλητές κατάστασης.

Υπενθυμίζεται ότι η γωνία της γεννήτριας αναφοράς της περιοχής 1 θεωρείται γωνία αναφοράς του συστήματος και έχει σταθερή τιμή.

#### 4.3.2. Συνάρθρωση των εξισώσεων και Ιακωβιανός πίνακας

Οι εξισώσεις που περιγράφησαν στην παράγραφο 4.3.1 μπορούν να ενοποιηθούν σε ένα ενιαίο σύνολο εξισώσεων, με ενιαίο σύνολο μεταβλητών. Το ενοποιημένο σύστημα των εξισώσεων αν θεωρήσουμε  $m$  διατάξεις και  $g_i$  τις εξισώσεις δικτύου μεταφοράς και έγχυσης γεννητριών όπως συμπυκνώθηκαν στην (4.32) προκύπτει ως εξής:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_{d1} \\ h_{d2} \\ \vdots \\ h_{dm} \\ h_{\omega} \\ h_{\delta_r} \\ \mathbf{g}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{d1} \\ \mathbf{g}_{d1} \\ \mathbf{f}_{d2} \\ \mathbf{g}_{d2} \\ \vdots \\ \mathbf{f}_{dm} \\ \mathbf{g}_{dm} \\ \mathbf{f}_{\omega} \\ \mathbf{f}_{\delta_r} \\ \mathbf{g}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{d1} \\ 0 \\ \dot{x}_{d2} \\ 0 \\ \vdots \\ \dot{x}_{dm} \\ 0 \\ \dot{\omega} \\ \dot{\delta}_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Αντίστοιχα οι μεταβλητές είναι:

$$\mathbf{z} = \left[ \left[ \mathbf{x}_{d1}^T \quad \mathbf{y}_{d1}^T \right] \left[ \mathbf{x}_{d2}^T \quad \mathbf{y}_{d2}^T \right] \dots \left[ \mathbf{x}_{dm}^T \quad \mathbf{y}_{dm}^T \right] \quad \omega^T \quad \delta_r^T \quad \mathbf{y}_t^T \right]^T \quad (4.35)$$

όπου  $\mathbf{y}_t$  οι μεταβλητές που φαίνονται στην (4.31). Επίσης, για την καλύτερη παρουσίαση των εξισώσεων του συστήματος, η (4.35) συμπύσσεται. Οι μεταβλητές που αναφέρονται στις διατάξεις του συστήματος ομαδοποιούνται στο διάνυσμα μεταβλητών  $\mathbf{z}_d$ .

$$\mathbf{z}^T = \left[ \mathbf{z}_{d1}^T \quad \mathbf{z}_{d2}^T \quad \dots \quad \mathbf{z}_{dm}^T \quad | \quad \mathbf{y}_t^T \right] = \left[ \mathbf{z}_d^T \quad | \quad \mathbf{y}_t^T \right] \quad (4.36)$$

Αντίστοιχα οι συναρτήσεις ομαδοποιούνται ως εξής:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_{d1} \\ h_{d2} \\ \dots \\ h_{dm} \\ h_{\omega} \\ h_{\delta_r} \\ \dots \\ \mathbf{g}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_d \\ - \\ \mathbf{g}_t \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Ο Ιακωβιανός πίνακας  $\mathbf{J}$  που προκύπτει με βάση τις εξισώσεις του προβλήματος διαιρείται σε τέσσερις βασικούς υποπίνακες.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{z_d} \mathbf{h}_d & \mathbf{D}_{y_t} \mathbf{h}_d \\ \mathbf{D}_{z_d} \mathbf{g}_t & \mathbf{D}_{y_t} \mathbf{g}_t \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

όπου  $\mathbf{D}_{y_t} \mathbf{g}_t$ :

$$D_{y_i} \mathbf{g}_t = \begin{bmatrix} -D_\theta P_{NET} & -D_V P_{NET} & 0 & -D_\eta \gamma_{ge} \\ D_\theta Q_G - D_\theta Q_{NET} & D_V Q_G - D_V Q_{NET} & D_\delta Q_G & 0 \\ -D_\theta P_G & -D_V P_G & -D_\delta P_G & -D_\eta \gamma_g \\ 0 & 0 & e_r & 0 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Πιο λεπτομερής περιγραφή του Ιακωβιανού πίνακα θα γίνει στο Κεφάλαιο 5 όπου θα έχει περιγραφεί συγκεκριμένα η παράσταση των εξισώσεων στο λογισμικό πακέτο και όπου θα έχουν αναλυθεί οι εξισώσεις της (4.34).

Στις ενότητες που ακολουθούν αναλύονται οι ομάδες εξισώσεων που περιγράφησαν στην παράγραφο 4.3.1. Πιο συγκεκριμένα, στις ενότητες 4.5-4.8 θα αναλυθούν οι συναρτήσεις  $h_d$ , με τις μεταβλητές  $z_d$  όπως περιγράφονται στην (4.35). Οι διατάξεις που μοντελοποιούνται, όπως αναφέρθηκε, θα είναι γεννήτριες (δείκτης  $g$ ), APT (δείκτης  $a$ ), ρυθμιστής στροφών-στρόβιλος (δείκτης  $s$ ), σταθεροποιητής ισχύος (δείκτης  $p$ ). Αυτοί οι δείκτες υποδηλώνουν την διάταξη που μοντελοποιείται στην ομάδα συναρτήσεων  $h_d$ , και θα ακολουθείται και από το ενδεικτικό αριθμό για κάθε μοντέλο. Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται αναλυτικά οι δείκτες που θα χρησιμοποιηθούν στις επόμενες παραγράφους του Κεφαλαίου 4 ανάλογα με το μοντέλο της κάθε διάταξης.

Πίνακας 4.1: Αντιστοίχιση δεικτών στις εξισώσεις για τις διατάξεις ΣΗΕ

Τύπος διάταξης	Μοντέλο διάταξης	Συμβολισμός εξισώσεων	Συμβολισμός μεταβλητών
Γεννήτριες	Με πεδίο διέγερσης	$h_g$	$z_g$ ( $[x_g]$ )
Αυτόματοι ρυθμιστές τάσης	IEEET1	$h_{a1}$	$z_{a1}$ ( $[x_{a1} y_{a1}]$ )
	ESAC1A	$h_{a2}$	$z_{a2}$ ( $[x_{a2} y_{a2}]$ )
	ESAC4A	$h_{a3}$	$z_{a3}$ ( $[x_{a3} y_{a3}]$ )
	EXST1	$h_{a4}$	$z_{a4}$ ( $[x_{a4} y_{a4}]$ )
Ρυθμιστές στροφών - στρόβιλοι	IEEEG1	$h_{s1}$	$z_{s1}$ ( $[x_{s1} y_{s1}]$ )
	HYGOV	$h_{s2}$	$z_{s2}$ ( $[x_{s2} y_{s2}]$ )
	TGOV1	$h_{s3}$	$z_{s3}$ ( $[x_{s3} y_{s3}]$ )
	IEEEG3	$h_{s4}$	$z_{s4}$ ( $[x_{s4} y_{s4}]$ )
Σταθεροποιητές ισχύος	STAB1	$h_{p1}$	$z_{p1}$ ( $[x_{p1} y_{p1}]$ )
	PSS2	$h_{p2}$	$z_{p2}$ ( $[x_{p2} y_{p2}]$ )

Τα υπόλοιπα στοιχεία των (4.34)-(4.35), τα οποία είναι οι μεταβλητές  $y_i$  και οι συναρτήσεις  $g_i$ , αναλύονται στην ενότητα 4.4, που ακολουθεί.

Όπως θα περιγραφεί και στο επόμενο κεφάλαιο, η επίλυση των εξισώσεων, αλγεβρικών και διαφορικών που συγκροτούν το πρόβλημα γίνεται με την μέθοδο Newton-Rapson. Για την επίλυση των εξισώσεων απαιτούνται οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων ως προς τις μεταβλητές του προβλήματος. Για τον λόγο αυτό, στο παρόν κεφάλαιο, μαζί με τις εξισώσεις που ορίζουν το πρόβλημα, παρατίθενται και οι μερικές τους παράγωγοι.

## 4.4. Εξισώσεις συστήματος η περιοχών για το δίκτυο μεταφοράς και την έγχυση ισχύος των γεννητριών

Στην παράγραφο 4.3.1 προσδιορίστηκαν οι αλγεβρικές εξισώσεις ( $g_i$ ) οι οποίες εκφράζουν το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς και τις γεννήτριες (εξίσωση (4.32)). Στην ενότητα αυτή οι ενδιάμεσες μεταβλητές των εξισώσεων αυτών θα αναλυθούν περαιτέρω και θα υπολογιστούν οι μερικές παράγωγοί τους προκειμένου να είναι δυνατός ο υπολογισμός του Ιακωβιανού πίνακα. Όπως φαίνεται και στην εξίσωση (4.32) οι ενδιάμεσες μεταβλητές που απαιτούνται για τον υπολογισμό των συναρτήσεων αυτών ομαδοποιούνται σε τέσσερις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι η έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς ( $P_{NET}$ ,  $Q_{NET}$ ), η δεύτερη είναι η έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος των γεννητριών ( $P_G$ ,  $Q_G$ ), η τρίτη είναι ο υπολογισμός της απόκλισης ισχύος ( $\eta$ ) για κάθε περιοχή και η τέταρτη ο ορισμός των γωνιών αναφοράς κάθε περιοχής ( $\delta_r$ ).

### 4.4.1. Κατάσρωση εξισώσεων ροής φορτίου

Οι εξισώσεις που υπολογίζουν την έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς του συστήματος ορίστηκαν με τις σχέσεις (4.9)-(4.12):

$$P_{NET,i}(V, \theta) = V_i^2 g_i - V_k \sum_{m \in B_i} V_m \alpha_{im} \quad (4.40)$$

$$Q_{NET,i}(V, \theta) = -V_i^2 b_i - V_i \sum_{m \in B_i} V_m \beta_{im} \quad (4.41)$$

Η παραγωγή των εξισώσεων αυτών ως προς τις μεταβλητές  $V$ ,  $\theta$  που εμπλέκονται στις σχέσεις δίνει έναν πίνακα διάστασης  $2N \times 2N$ . Θεωρώντας  $B_i$  το σύνολο των ζυγών που συνδέονται με τον ζυγό  $i$ , και τα  $\alpha$ ,  $\beta$  τα οποία ορίζονται από τις (4.11)-(4.12) με βάση τις αγωγιμότητες το δικτύου, υπολογίζονται τα στοιχεία του πίνακα  $D_{y_i} ([P_{NET}^T \quad Q_{NET}^T]^T)$  για τον ζυγό  $i$  με βάση τις σχέσεις του Πίνακα 4.2:

Πίνακας 4.2: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων ροής φορτίου

Τιμή	Διάσταση πίνακα	Συμβολισμός
$\frac{\partial P_{NET,i}}{\partial \theta_i} = V_i \sum_{m \in B_i} V_m \beta_{im}$	$N \times N$	$D_\theta P_{NET}$
$\frac{\partial P_{NET,i}}{\partial \theta_m} = -V_i V_m \beta_{im}$		
$\frac{\partial Q_{NET,i}}{\partial \theta_i} = -V_i \sum_{m \in B_i} V_m \alpha_{im}$	$N \times N$	$D_\theta Q_{NET}$
$\frac{\partial Q_{NET,i}}{\partial \theta_m} = V_i V_m \alpha_{im}$		

Πίνακας 4.2: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων ροής φορτίου (συνέχεια)

Τιμή	Διάσταση πίνακα	Συμβολισμός
$\frac{\partial P_{NET,i}}{\partial V_i} = 2V_i g_i - \sum_{m \in B_i} V_m a_{im}$	N × N	$D_V P_{NET}$
$\frac{\partial P_{NET,i}}{\partial V_m} = -V_i a_{im}$		
$\frac{\partial Q_{NET,i}}{\partial V_i} = -2V_i b_i - \sum_{m \in B_i} V_m \beta_{im}$	N × N	$D_V Q_{NET}$
$\frac{\partial Q_{NET,i}}{\partial V_m} = -V_i \beta_{im}$		

#### 4.4.2. Κατάστρωση εξισώσεων ηλεκτρικής ισχύος γεννητριών

Για την παράσταση της γεννήτριας χρησιμοποιούνται τρία μοντέλα γεννητριών, τα οποία περιγράφησαν στην ενότητα 3.1. Το πρώτο είναι το κλασικό μοντέλο γεννήτριας. Στο δεύτερο μοντέλο περιλαμβάνεται το τύλιγμα διέγερσης της γεννήτριας το οποίο τροφοδοτείται με συνεχή τάση ελεγχόμενη από τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης. Στο τρίτο μοντέλο θεωρείται εκτός του τυλίγματος διέγερσης, ένα τύλιγμα απόσβεσης. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί ότι στα συγκεκριμένα μοντέλα δεν περιλαμβάνεται η δυναμική του δρομέα της γεννήτριας, αφού αυτή θεωρείται ενιαία για κάθε περιοχή, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.2. Ωστόσο στο λογισμικό πακέτο που αναπτύχθηκε ενσωματώθηκε μόνο το μοντέλο γεννήτριας που περιλαμβάνει την παράσταση του τυλίγματος διέγερσης του οποίου οι εξισώσεις και οι μερικές παράγωγοί τους περιγράφονται στην παράγραφο αυτή. Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται αποτελέσματα με όλα τα μοντέλα γεννητριών. Τα μοντέλα αυτά υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον Simulink βάση της περιγραφής που έγινε στις αντίστοιχες παραγράφους της ενότητας 3.1. Στην συνέχεια επαναλαμβάνονται οι εξισώσεις που υπολογίζουν την έγχυση ισχύος της γεννήτριας με παράσταση του πεδίου διέγερσης, όπως αναλύθηκαν στην παράγραφο 3.1.5.

Η έγχυση ισχύος από την πλευρά της γεννήτριας στο δίκτυο υπολογίζεται βάση των εξισώσεων (3.69)-(3.70) οι οποίες στην περίπτωση που αγνοείται η ωμική αντίσταση του στάση απλοποιούνται στις εξισώσεις (3.72)-(3.73):

$$P_{G,i} = \frac{E'_{q,i} V_i}{X'_{d,i}} \sin(\delta_i - \theta_i) + \frac{V_i^2}{2} \left( \frac{1}{X_{q,i}} - \frac{1}{X'_{d,i}} \right) \sin[2(\delta_i - \theta_i)] \quad (4.42)$$

$$Q_{G,i} = \frac{E'_{q,i} V_i}{X'_{d,i}} \cos(\delta_i - \theta_i) - V_i^2 \left( \frac{\sin^2(\delta_i - \theta_i)}{X_{q,i}} + \frac{\cos^2(\delta_i - \theta_i)}{X'_{d,i}} \right) \quad (4.43)$$

Η τάση διέγερσης  $E_f$  (HEΔ διεγέρσεως) αποτελεί μια μεταβλητή κατάστασης η οποία υπολογίζεται βάση της συνάρτησης μεταφοράς του APT, η οποία έχει ως είσοδο την απόκλιση της τερματικής τάσης της γεννήτριας από την τάση αναφοράς. Επίσης, η μεταβλητή  $E'_q$ , αποτελεί μεταβλητή κατάστασης. Οι δύο αυτές μεταβλητές, συνδέονται με τις ακόλουθες εξισώσεις και όπως θα αναφερθεί και στην συνέχεια, ανήκουν στις συναρτήσεις  $h_g$  του Πίνακα 4.1.



$$E_{q,i} = E'_{q,i} + \frac{X_{d,i} - X'_{d,i}}{X'_{d,i}} (E'_{q,i} - V_i \cos(\delta_i - \theta_i)) \quad (4.44)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T_{d0,i}} (-E_{q,i} + E_{f,i}) \quad (4.45)$$

Οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων (4.42)-(4.43) βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.3:

Πίνακας 4.3: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων μοντέλου γεννήτριας με πεδίο διέγερσης

Τιμή	Διάσταση πίνακα	Συμβολισμός
$\frac{\partial P_{G,i}}{\partial V_i} = \frac{E'_{q,i} \sin(\delta_i - \theta_i)}{X'_{d,i}} + V_i \left( \frac{1}{X_{q,i}} - \frac{1}{X'_{d,i}} \right) \sin[2(\delta_i - \theta_i)]$	$G_e \times N$	$D_V P_G$
$\frac{\partial P_{G,i}}{\partial V_m} = 0$		
$\frac{\partial Q_{G,i}}{\partial V_i} = \frac{E'_{q,i} \cos(\delta_i - \theta_i)}{X'_{d,i}} - 2V_i \left( \frac{\sin^2(\delta_i - \theta_i)}{X_{q,i}} + \frac{\cos^2(\delta_i - \theta_i)}{X'_{d,i}} \right)$	$G_e \times N$	$D_V Q_G$
$\frac{\partial Q_{G,i}}{\partial V_m} = 0$		
$\frac{\partial P_{G,i}}{\partial \theta_i} = -\frac{E'_{q,i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i)}{X'_{d,i}} - V_i^2 \left( \frac{1}{X_{q,i}} - \frac{1}{X'_{d,i}} \right) \cos[2(\delta_i - \theta_i)]$	$G_e \times N$	$D_\theta P_G$
$\frac{\partial P_{G,i}}{\partial \theta_m} = 0$		
$\frac{\partial Q_{G,i}}{\partial \theta_i} = \frac{E'_{q,i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i)}{X'_{d,i}} + V_i^2 \left( \frac{2 \sin(\delta_i - \theta_i) \cos(\delta_i - \theta_i)}{X_{q,i}} - \frac{2 \cos(\delta_i - \theta_i) \sin(\delta_i - \theta_i)}{X'_{d,i}} \right)$	$G_e \times N$	$D_\theta Q_G$
$\frac{\partial Q_{G,i}}{\partial \theta_m} = 0$		

Πίνακας 4.3: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων μοντέλου γεννήτριας με πεδίο διέγερσης (συνέχεια)

Τιμή	Διάσταση πίνακα	Συμβολισμός
$\frac{\partial P_{G,i}}{\partial \delta_i} = \frac{E'_{q,i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i)}{X'_{d,i}} + V_i^2 \left( \frac{1}{X_{q,i}} - \frac{1}{X'_{d,i}} \right) \cos[2(\delta_i - \theta_i)]$	$G_e \times G_e$	$D_{\delta} P_G$
$\frac{\partial P_{G,i}}{\partial \delta_m} = 0$		
$\frac{\partial Q_{G,i}}{\partial \delta_i} = -\frac{E'_{q,i} V_k \sin(\delta_i - \theta_i)}{X'_{d,i}} - V_i^2 \left( \frac{2 \sin(\delta_i - \theta_i) \cos(\delta_i - \theta_i)}{X_{q,i}} - \frac{2 \cos(\delta_i - \theta_i) \sin(\delta_i - \theta_i)}{X'_{d,i}} \right)$	$G_e \times G_e$	$D_{\delta} Q_G$
$\frac{\partial Q_{G,i}}{\partial \delta_m} = 0$		
$\frac{\partial P_{G,i}}{\partial E'_{q,i}} = \frac{V_i}{X'_{d,i}} \sin(\delta_i - \theta_i)$	$G_e \times G_e$	$D_{E'_q} P_G$
$\frac{\partial P_{G,i}}{\partial E'_{q,m}} = 0$		
$\frac{\partial Q_{G,i}}{\partial E'_{q,i}} = \frac{E'_{q,i} V_i}{X'_{d,i}} \cos(\delta_i - \theta_i)$	$G_e \times G_e$	$D_{E'_q} Q_G$
$\frac{\partial Q_{G,i}}{\partial E'_{q,m}} = 0$		

#### 4.4.3. Κατάσρωση εξισώσεων απόκλισης ενεργού ισχύος κάθε περιοχής

Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, η απόκλιση (σφάλμα) ενεργού ισχύος υπολογίζεται ξεχωριστά σε κάθε περιοχή του συστήματος και κατανέμεται στις γεννήτριες της κάθε περιοχής, βάση της αδράνειας κάθε γεννήτριας. Η απόκλιση που κατανέμεται στην γεννήτρια  $i$ , η οποία έστω ότι ανήκει στην περιοχή  $k$  είναι:

$$\gamma_{g,i} = \frac{H_i}{\sum_{\forall j \in A_k} H_j} \eta_k = \frac{H_i}{\sum_{\forall j \in A_k} H_j} \sum_{\forall j \in A_k} (P_{mj} - P_{Gj}) \quad (4.46)$$

Τα στοιχεία της μερικής παράγωγου της εξίσωσης (4.46) περιλαμβάνουν δύο περιπτώσεις. Η πρώτη, την παραγωγή της απόκλισης ισχύος γεννήτριας ως προς την απόκλιση ισχύος της περιοχής που ανήκει (γεννήτρια ανήκει στο σύνολο  $A_k$ ), και η δεύτερη την παραγωγή ως προς

την απόκλιση ισχύος άλλης περιοχής (γεννήτρια δεν ανήκει στο σύνολο  $A_k$ ). Οι μερικές παράγωγοι βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.4:

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.3.1 το εκτεταμένο διάνυσμα  $\gamma_{ge}$  διαστάσεως  $N \times 1$  είναι το διάνυσμα  $\gamma_g$  συμπληρωμένο με μηδενικά για τους ζυγούς όπου δεν υπάρχουν γεννήτριες. Συνεπώς οι μερικές παράγωγοι του  $\gamma_{ge}$  υπολογίζονται με βάση τις μερικές παραγώγους του  $\gamma_g$ . Για τις γραμμές που αντιστοιχούν σε ζυγούς που υπάρχουν γεννήτριες ο εκτεταμένος πίνακας  $D_{\eta}\gamma_{ge}$  ισούται με τα στοιχεία του  $D_{\eta}\gamma_g$ . Για τις γραμμές που αντιστοιχούν σε ζυγούς όπου δεν υπάρχουν γεννήτριες τα στοιχεία του πίνακα  $D_{\eta}\gamma_{ge}$  είναι μηδενικά.

Πίνακας 4.4: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων απόκλισης ενεργού ισχύος

Τιμή	Διάσταση πίνακα	Συμβολισμός
$\frac{\partial \gamma_{g,i}}{\partial \eta_k} = \frac{H_i}{\sum_{j \in A_k} H_j}, i \in A_k$	$G_e \times k$	$D_{\eta}\gamma_g$
$\frac{\partial \gamma_{g,i}}{\partial \eta_k} = 0, i \notin A_k$		

#### 4.4.4. Εξισώσεις γωνιών αναφοράς

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.3.1 παρότι από τις εσωτερικές γωνίες  $\delta$  των γεννητριών κάποιες είναι μεταβλητές κατάστασης, για την διευκόλυνση των υπολογισμών εισάγονται οι ενδιάμεσες μεταβλητές  $\delta_r$ . Οι γωνίες  $\delta$  των γεννητριών θεωρούνται αλγεβρικές μεταβλητές, ενώ οι  $\delta_r$  μεταβλητές κατάστασης. Συνεπώς οι εξισώσεις  $G_{sys}$  της (4.32) έχουν την μορφή:

$$\begin{aligned} G_{sys,1} &= \delta_{r,k} = 0, k = 1 \\ G_{sys,k} &= \delta_i - \delta_{r,k}, k = 2, n \end{aligned} \quad (4.47)$$

όπου  $i$  η γεννήτρια αναφοράς της περιοχής  $k$ .

Ο πίνακας  $e_r$  της (4.39) είναι ένας πίνακας διαστάσεων  $n \times G_e$  (όπου  $n$  ο αριθμός των περιοχών,  $G_e$  ο αριθμός των γεννητριών). Ο πίνακας αυτός έχει όλα τα στοιχεία του μηδενικά εκτός από  $n$  στοιχεία (ένα σε κάθε γραμμή) τα οποία τίθενται ίσα με την μονάδα. Κάθε γραμμή του πίνακα  $e_r$  αντιστοιχεί σε μία περιοχή και το ένα μη μηδενικό στοιχείο σε κάθε γραμμή ορίζει την γεννήτρια αναφοράς. Σημειώνεται ότι η γωνία αναφοράς της περιοχής 1 θεωρείται γωνία αναφοράς του συστήματος και ορίζεται μηδενική.

Οι μερικές παράγωγοι βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.5: Αν η γεννήτρια  $i$  είναι η γεννήτρια αναφοράς της περιοχής  $k$  τότε η αντίστοιχη μερική παράγωγος της  $G_{sys}$  είναι ίση με την μονάδα. Σε διαφορετική περίπτωση είναι μηδενική. Επίσης η μερική παράγωγος της συνάρτησης  $G_{sys}$  ως προς την αντίστοιχη γωνία αναφοράς  $\delta_r$  ισούται με  $-1$ , ενώ είναι μηδενική για την περιοχή 1 που είναι η αναφορά του συστήματος.

Πίνακας 4.5: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων απόκλισης ενεργού ισχύος

Τιμή	Διάσταση πίνακα	Συμβολισμός
$\frac{\partial G_{\text{sys},k}}{\partial \delta_i} = 1, \delta_{r,k} \equiv \delta_i$	$n \times G_e$	$e_r$
$\frac{\partial G_{\text{sys},k}}{\partial \delta_{r,k}} = -1$	$n \times n$	$D_{\delta_r} G_{\text{sys}}$
$\frac{\partial G_{\text{sys},l}}{\partial \delta_{r,l}} = 0$		

## 4.5. Συχνότητα περιοχής

Από την ενότητα αυτή και μέχρι την ενότητα 4.10 περιγράφονται οι εξισώσεις των διατάξεων ΣΗΕ με τον τρόπο που περιγράφησαν στην πρώτη υποπαράγραφο της παραγράφου 4.3.1 καθώς και στην 4.3.2.

Για την συχνότητα κάθε περιοχής  $k$  ισχύει η σχέση (4.23):

$$f_{\omega,k} = \dot{\omega}_k = \frac{\eta_k}{2 \sum_{\forall i \in A_k} H_i} \quad (4.48)$$

Οι μερικές παράγωγοι βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.6:

Πίνακας 4.6: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων συχνότητας περιοχής

Τιμή	Διάσταση πίνακα	Συμβολισμός
$\frac{\partial f_{\omega,k}}{\partial \eta_k} = \frac{1}{2 \sum_{\forall i \in A_k} H_i}$	$n \times n$	$D_{\eta} f_{\omega}$
$\frac{\partial f_{\omega,k}}{\partial \eta_l} = 0, l \neq k$		

Στην περίπτωση όπου θεωρείται συνιστώσα απόσβεσης στις γεννήτριες  $\eta$  (4.48) τροποποιείται ως εξής, βάση της (3.12):

$$\begin{aligned}
f_{\omega,k} = \dot{\omega}_k &= \frac{1}{2 \sum_{\forall i \in A_k} H_i} \sum_{\forall i \in A_k} (T_{m,i} - T_{e,i} - D_i(\omega_k - 1)) = \\
&= \frac{1}{2\omega_k \sum_{\forall i \in A_k} H_i} \left( \eta_k - (\omega_k - 1) \sum_{\forall i \in A_k} D_i \right)
\end{aligned} \tag{4.49}$$

όπου  $D_i$  η συνιστώσα απόσβεσης της γεννήτριας  $i$ .

#### 4.6. Σχετική μεταβολή εσωτερικής γωνίας αναφοράς περιοχής

Για την γωνία αναφοράς της περιοχής  $k$  (θεωρώντας την γωνία αναφοράς της περιοχής 1 σαν γωνία αναφοράς του συστήματος) ισχύει η σχέση:

$$f_{\delta_{r,k}} = \dot{\delta}_{r,k} = \omega_0 (\omega_k - \omega_1), \quad k = 2, n \tag{4.50}$$

Τα μη μηδενικά στοιχεία της μερικής παραγώγου είναι αυτά ως προς την συχνότητα της αντίστοιχης περιοχής και την περιοχή αναφοράς τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων γωνιών αναφοράς περιοχής

Τιμή	Διάσταση πίνακα	Συμβολισμός
$\frac{\partial f_{\delta_{r,k}}}{\partial \omega_1} = -\omega_0$	$(n-1) \times n$	$D_{\eta} f_{\delta_r}$
$\frac{\partial f_{\delta_{r,k}}}{\partial \omega_k} = \omega_0$		

#### 4.7. Διαφορικές εξισώσεις γεννητριών

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στο λογισμικό πακέτο που αναπτύχθηκε ενσωματώθηκε μοντέλο γεννήτριας που περιλαμβάνει την δυναμική του πεδίου διεγέρσεως. Η δυναμική αυτή περιγράφεται από τις εξισώσεις (4.44), (4.45) οι οποίες αναλύονται στην παράγραφο 3.1.5. Αντικαθιστώντας την (4.44) στην (4.45) προκύπτει:

$$h_{g,i} = \dot{E}'_{q,i} = \frac{1}{T_{d0,i}} \left( -E'_{q,i} \frac{X_{d,i}}{X'_{d,i}} + \frac{X_{d,i} - X'_{d,i}}{X'_{d,i}} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + E_{f,i} \right) \tag{4.51}$$

Τα μη μηδενικά στοιχεία των παραγώγων βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.8:

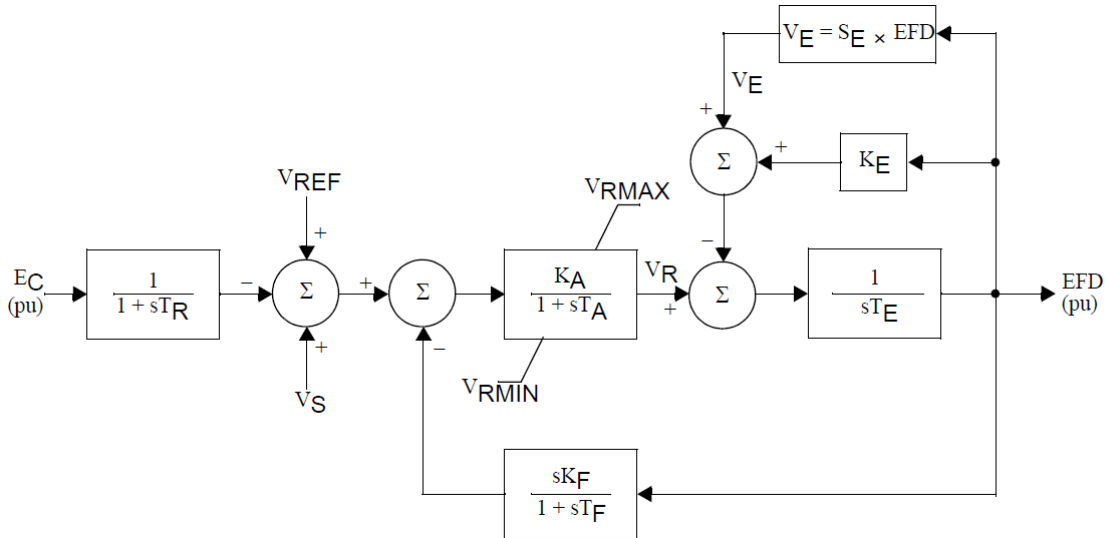
Πίνακας 4.8: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων APT IEEEGI

$\frac{\partial h_{g,i}}{\partial E'_{q,i}} = -\frac{X_{d,i}}{T_{d0,i} X'_{d,i}}$	$\frac{\partial h_{g,i}}{\partial \theta_i} = \frac{1}{T_{d0,i}} \frac{X_{d,i} - X'_{d,i}}{X'_{d,i}} V_i \sin(\delta_i - \theta_i)$
$\frac{\partial h_{g,i}}{\partial V_i} = \frac{1}{T_{d0,i}} \frac{X_{d,i} - X'_{d,i}}{X'_{d,i}} \cos(\delta_i - \theta_i)$	$\frac{\partial h_{g,i}}{\partial E'_{f,i}} = \frac{1}{T_{d0,i}}$
$\frac{\partial h_{g,i}}{\partial \delta_i} = -\frac{1}{T_{d0,i}} \frac{X_{d,i} - X'_{d,i}}{X'_{d,i}} V_i \sin(\delta_i - \theta_i)$	

## 4.8. Παράσταση απλοποιημένων μοντέλων APT

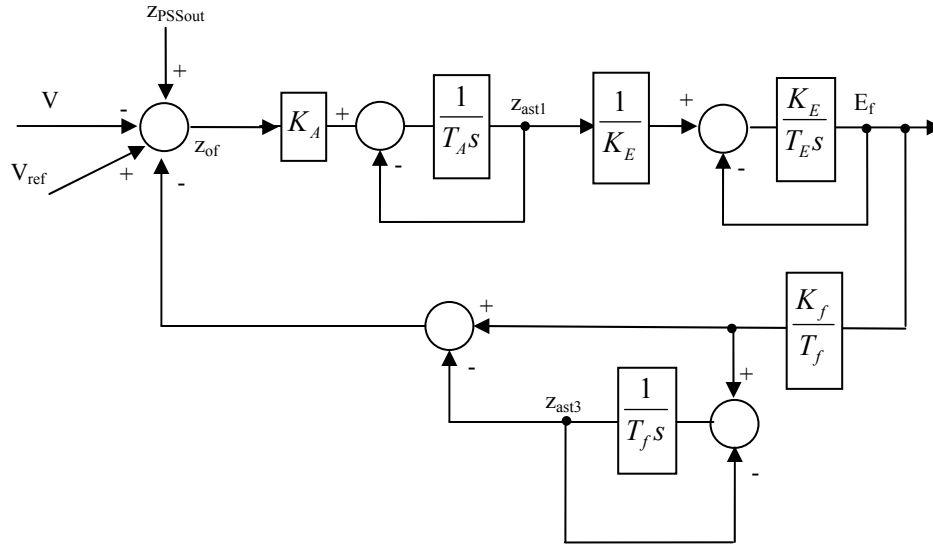
### 4.8.1. Μοντέλο APT τύπου IEEE1

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται ο APT τύπου IEEE1 ο οποίος περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 3.2.3. Στη απλοποιημένη παράστασή του δεν συμπεριλήφθηκε ο κορεσμός της διεγέρτριας. Επίσης η χρονική σταθερά του φίλτρου του APT είναι κατά πολύ μικρότερη από τις υπόλοιπες χρονικές σταθερές και συνεπώς μπορεί και να απαλειφθεί χωρίς να επηρεάζει την προσέγγιση για ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας.

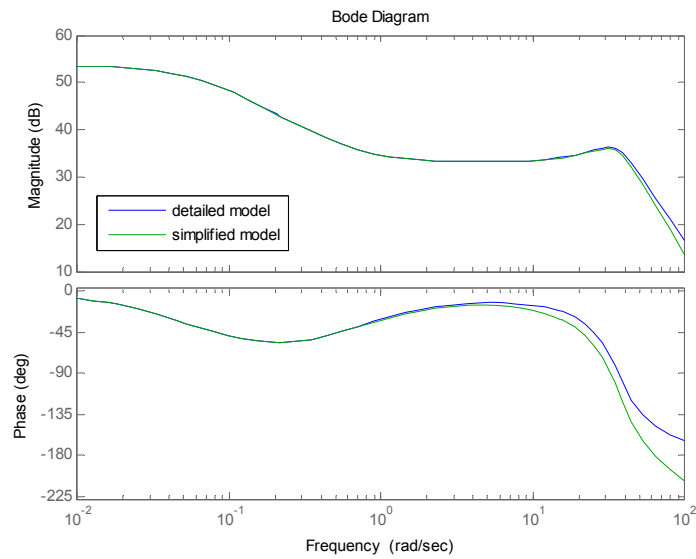


Σχήμα 4.5: Διάγραμμα βαθμίδων APT IEEE1

Το απλοποιημένο μοντέλο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6, ενώ στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα Bode της λεπτομερούς και απλοποιημένης παράστασης του APT IEEE1. Όπως φαίνεται, η προτεινόμενη απλοποίηση δεν εισάγει σημαντικό σφάλμα στην περιοχή των συχνοτήτων των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων ( $\omega < 6\pi/s$ ).



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα βαθμίδων απλοποιημένου APT IEEET1



Σχήμα 4.7: Bode διάγραμμα λεπτομερούς και απλοποιημένου μοντέλου APT IEEET1 (τυπικές τιμές)

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την λειτουργία του APT είναι οι ακόλουθες:

$$\mathbf{h}_{a1,i} = \begin{bmatrix} h_{a11,i} \\ h_{a12,i} \\ h_{a13,i} \\ h_{a14,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_{f,i} \\ 0 \\ \dot{z}_{ast1} \\ \dot{z}_{ast3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{z_{ast1,i}}{T_{E,i}} - \frac{K_{E,i} E_{f,i}}{T_{E,i}} \\ z_{PSSout} + V_{ref} - V - \left( E_{f,i} \frac{K_{f,i}}{T_{f,i}} - z_{ast3,i} \right) - z_{of,i} \\ K_A \frac{z_{of,i}}{T_{A,i}} - \frac{z_{ast1,i}}{T_{A,i}} \\ K_{f,i} \frac{E_{f,i}}{T_{f,i}^2} - \frac{z_{ast3,i}}{T_{f,i}} \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

Το τμήμα των μεταβλητών που αντιστοιχούν στον ΑΡΤ είναι οι ακόλουθες:

$$\mathbf{z} = [\dots \quad E_{f,i} \quad z_{of,i} \quad z_{ast1,i} \quad z_{ast3,i} \quad \dots] \quad (4.53)$$

$$\mathbf{z}_{a1} = [E_f \quad z_{of} \quad z_{ast1} \quad z_{ast3}]$$

Οι μερικές παράγωγοι βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.9:

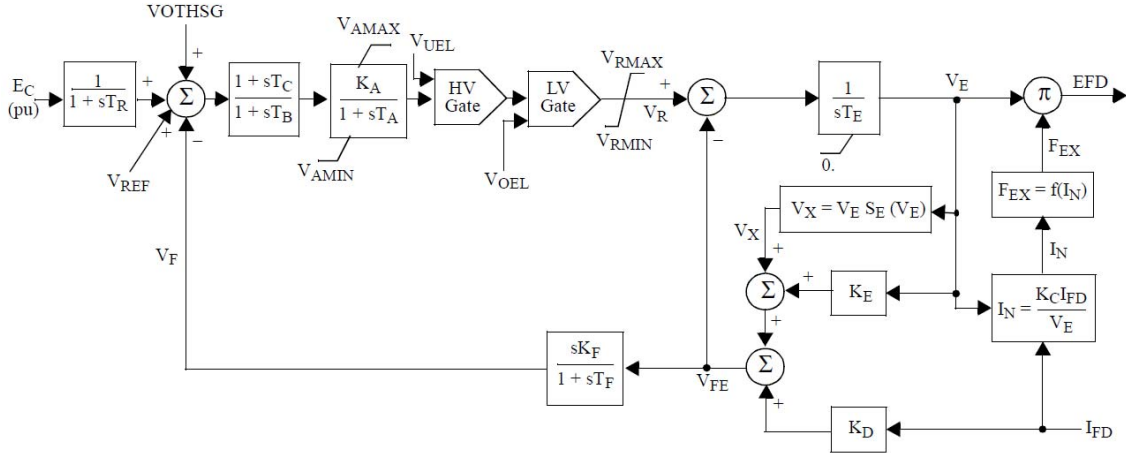
Πίνακας 4.9: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων ΑΡΤ IEEEGI

$\frac{\partial h_{a11,i}}{\partial E_{f,i}} = -\frac{K_{E,i}}{T_{E,i}}$	$\frac{\partial h_{a12,i}}{\partial z_{ast3,i}} = 1$
$\frac{\partial h_{a11,i}}{\partial z_{ast1,i}} = \frac{1}{T_{E,i}}$	$\frac{\partial h_{a13,i}}{\partial z_{ast1,i}} = -\frac{1}{T_{A,i}}$
$\frac{\partial h_{a12,i}}{\partial V_i} = -1$	$\frac{\partial h_{a13,i}}{\partial z_{of,i}} = \frac{K_{A,i}}{T_{A,i}}$
$\frac{\partial h_{a12,i}}{\partial z_{PSSout,i}} = 1$	$\frac{\partial h_{a14,i}}{\partial z_{ast3}} = -\frac{1}{T_{f,i}}$
$\frac{\partial h_{a12,i}}{\partial E_{f,i}} = -\frac{K_{f,i}}{T_{f,i}}$	$\frac{\partial h_{a14,i}}{\partial E_{f,i}} = \frac{K_{f,i}}{T_{f,i}^2}$
$\frac{\partial h_{a12,i}}{\partial z_{of,i}} = -1$	

#### 4.8.2. Μοντέλο ΑΡΤ τύπου ESAC1A/AC1A

Στο Σχήμα 4.8 φαίνεται ο ΑΡΤ τύπου ESAC1A ο οποίος περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 3.2.4.



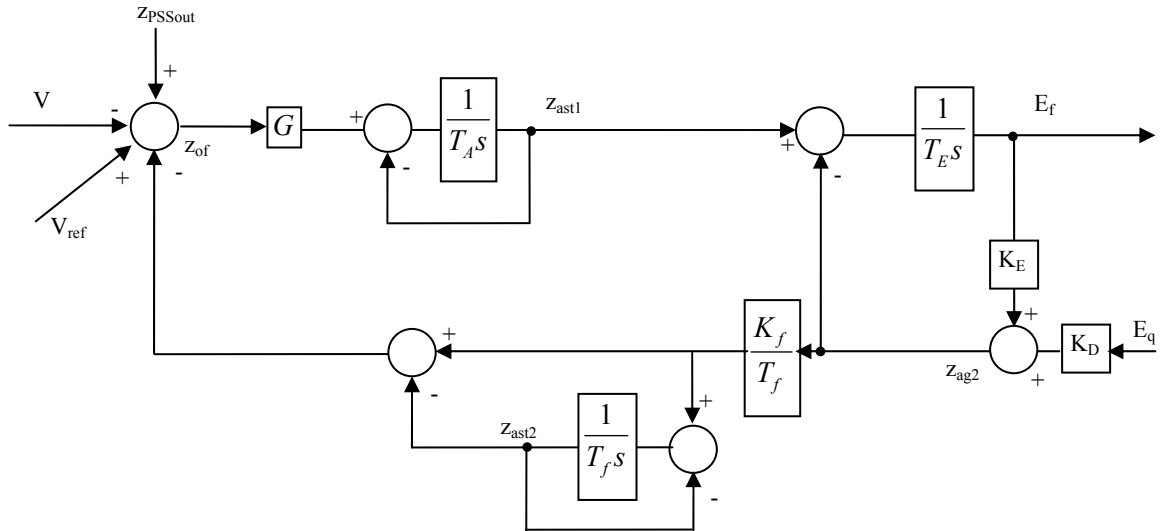


Σχήμα 4.8: Διάγραμμα βαθμίδων διατάξεων APT ESAC1A

Η μεταβλητή  $F_{EX}$  υπολογίζεται ως εξής:

$$F_{EX} = \begin{cases} 1, I_N = 0 \\ 1 - 0.577I_N, I_N \leq 0.433 \\ \sqrt{0.75 - I_N^2}, 0.433 \leq I_N \leq 0.75 \\ 1.732(1 - I_N), I_N \geq 0.75 \\ 0, I_N \geq 1 \end{cases} \quad (4.54)$$

Το τμήμα της ανατροφοδότησης με την συνάρτηση μεταφοράς  $S_E$  σχετίζεται με φαινόμενα κορεσμού το οποίο αγνοείται στην παρούσα μελέτη. Επίσης αγνοούνται οι επιλογείς ελάχιστης και μέγιστης τιμής οι οποίοι σχετίζονται με το όριο υπέρ-υποδιέγερσης ( $V_{UEL}$ ,  $V_{OEL}$ ). Ο κλάδος που εμπλέκει την παράμετρο  $K_c$  σχετίζεται με την αλληλεπίδραση των τυλιγμάτων της γεννήτριας. Στο απλοποιημένο μοντέλο αμελείται ο κλάδος αυτός, λόγω της μικρής τιμής του  $K_C$ . Το απλοποιημένο μοντέλο του APT ESAC1A παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα βαθμίδων απλοποιημένου APT ESAC1A

Ο απλοποιημένος αυτόματος ρυθμιστής τάσης τύπου ESAC1A αναλύεται σε πέντε εξισώσεις:

$$\mathbf{h}_{a2,i} = \begin{bmatrix} h_{a21,i} \\ h_{a22,i} \\ h_{a23,i} \\ h_{a24,i} \\ h_{a25,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_{f,i} \\ \dot{z}_{ast1,i} \\ \dot{z}_{ast2,i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{E,i}}(z_{ast1,i} - z_{ag2,i}) \\ -\frac{z_{ast1,i}}{T_{A,i}} + \frac{z_{of,i}}{T_{A,i}}G_i \\ \frac{1}{T_{f,i}}\left(\frac{K_{f,i}}{T_{f,i}}z_{ag2,i} - z_{ast2,i}\right) \\ z_{PSSout,i} + V_{ref,i} - V_i - \left(z_{ag2,i}\frac{K_{f,i}}{T_{f,i}} - z_{ast2,i}\right) - z_{of,i} \\ K_{E,i}E_{f,i} + K_{D,i}E_{q,i} - z_{ag2,i} \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

Το τμήμα των μεταβλητών που αντιστοιχούν στον APT είναι οι ακόλουθες:

$$\mathbf{z} = [\dots \ E_{f,i} \ z_{ast1,i} \ z_{ast2,i} \ z_{of,i} \ z_{ag2,i} \ \dots] \quad (4.56)$$

$$\mathbf{z}_{a2} = [E_f \ z_{ast1} \ z_{ast2} \ z_{of} \ z_{ag2}]$$

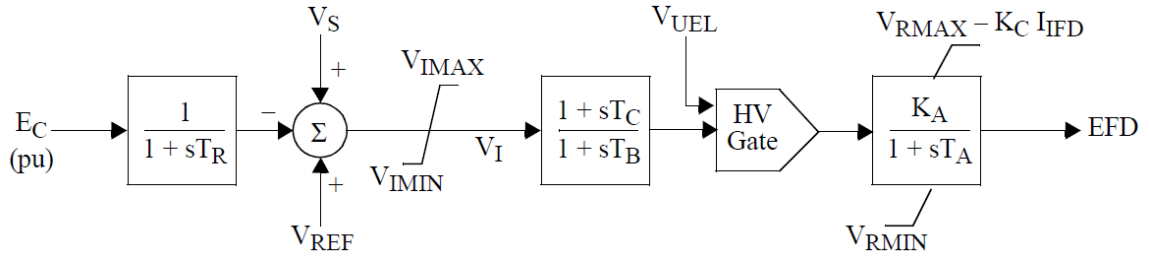
Οι μερικές παράγωγοι βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.10:

Πίνακας 4.10: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων APT ESAC1A

$\frac{\partial h_{a21,i}}{\partial z_{ast1,i}} = \frac{1}{T_{E,i}}$	$\frac{\partial h_{a23,i}}{\partial z_{ag2,i}} = \frac{K_{f,i}}{T_{f,i}^2}$
$\frac{\partial h_{a21,i}}{\partial z_{ag2,i}} = -\frac{1}{T_{E,i}}$	$\frac{\partial h_{a24,i}}{\partial z_{ag2,i}} = -\frac{K_{f,i}}{T_{f,i}}$
$\frac{\partial h_{a24,i}}{\partial V_i} = -1$	$\frac{\partial h_{a24,i}}{\partial z_{ast2,i}} = 1$
$\frac{\partial h_{a24,i}}{\partial z_{PSSout,i}} = 1$	$\frac{\partial h_{a24,i}}{\partial z_{of,i}} = -1$
$\frac{\partial h_{a22,i}}{\partial z_{ast1,i}} = -\frac{1}{T_{A,i}}$	$\frac{\partial h_{a25,i}}{\partial E_{f,i}} = K_{E,i}$
$\frac{\partial h_{a22,i}}{\partial z_{of,i}} = \frac{G_i}{T_{A,i}}$	$\frac{\partial h_{a25,i}}{\partial E_{q,i}} = K_{D,i}$
$\frac{\partial h_{a23,i}}{\partial z_{ast2,i}} = -\frac{1}{T_{f,i}}$	$\frac{\partial h_{a25,i}}{\partial z_{ag2,i}} = -1$

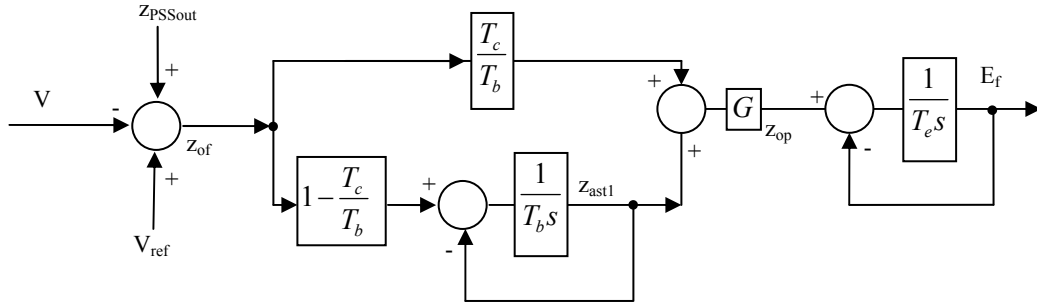
### 4.8.3. Μοντέλο APT τύπου ESAC4A/AC4A

Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται ο APT τύπου ESAC4A, ο οποίος περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 3.2.5.



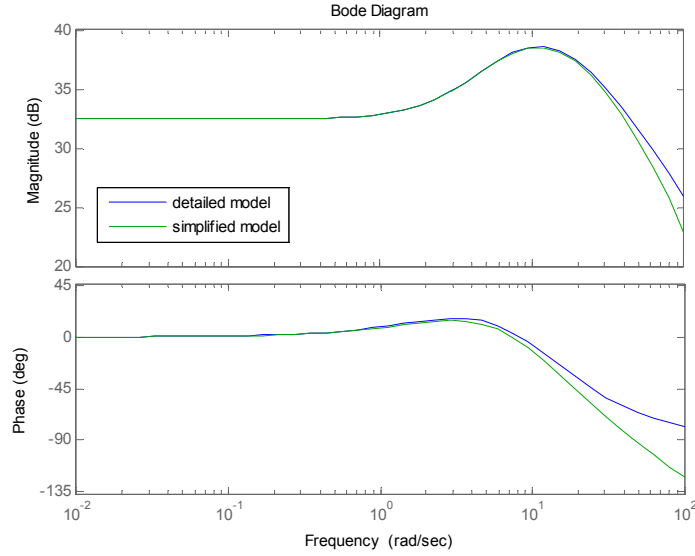
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα βαθμίδων APT ESAC4A

Η απλοποίησή του παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11. Στο απλοποιημένο μοντέλο δεν θεωρήσαμε διατάξεις προστασίας υπερδιέγερσης οπότε και απαλείφεται η πύλη μεγίστου (HV Gate). Επίσης η χρονική σταθερά του φίλτρου του APT είναι κατά πολύ μικρότερη από τις υπόλοιπες χρονικές σταθερές και συνεπώς μπορεί και να απαλειφθεί χωρίς να επηρεάζει την προσέγγιση για ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας. Το απλοποιημένο μοντέλο που διαμορφώνεται, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11, και είναι πανομοιότυπο με το μοντέλο APT SEXS που αναλύεται στην παράγραφο 3.2.2. Συνεπώς και για τους δύο τύπους APT (ESAC4A και SEXS) το απλοποιημένο μοντέλο είναι κοινό.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα βαθμίδων απλοποιημένου APT ESAC4A

Θεωρώντας τυπικά δεδομένα για τον εν λόγω ρυθμιστή, στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα Bode για το πλήρες και το απλοποιημένο μοντέλο. Όπως φαίνεται, δεν εισάγεται σφάλμα για την μελετούμενη περιοχή συχνοτήτων ( $\omega < 6\text{r/s}$ ).



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα Bode λεπτομερούς και απλοποιημένου μοντέλου APT ESAC4A (τυπικές τιμές)

Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης αυτού του τύπου αναλύεται σε τέσσερις εξισώσεις:

$$\mathbf{h}_{a3,i} = \begin{bmatrix} h_{a31,i} \\ h_{a32,i} \\ h_{a33,i} \\ h_{a34,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_{f,i} \\ 0 \\ \dot{z}_{ast1,i} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{z_{op,i}}{T_{e,i}} - \frac{E_{f,i}}{T_{e,i}} \\ z_{PSSout,i} + V_{ref,i} - V_i - z_{of,i} \\ -\frac{z_{ast1,i}}{T_{b,i}} + \frac{z_{of,i}}{T_{b,i}} \left( 1 - \frac{T_{c,i}}{T_{b,i}} \right) \\ G_i \left( z_{of,i} \frac{T_{c,i}}{T_{b,i}} + z_{ast1,i} \right) - z_{op,i} \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

Το τμήμα των μεταβλητών που αντιστοιχούν στον APT είναι οι ακόλουθες:

$$\mathbf{z} = \left[ \dots \quad E_{f,i} \quad z_{of,i} \quad z_{ast1,i} \quad z_{op,i} \quad \dots \right] \quad (4.58)$$

$$\mathbf{z}_{a3,i} = \left[ E_f \quad z_{of} \quad z_{ast1} \quad z_{op} \right]$$

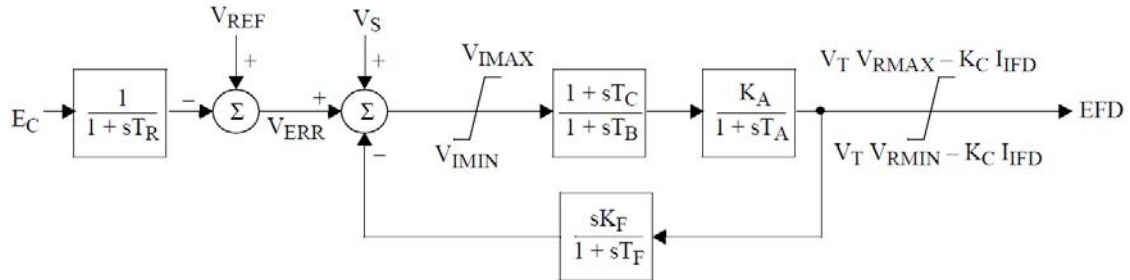
Οι μερικές παράγωγοι βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.11:

Πίνακας 4.11: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων APT ESAC4A

$\frac{\partial h_{a31,i}}{\partial E_{f,i}} = -\frac{1}{T_{e,i}}$	$\frac{\partial h_{a33,i}}{\partial z_{ast1,i}} = -\frac{1}{T_{b,i}}$
$\frac{\partial h_{a31,i}}{\partial z_{op,i}} = \frac{1}{T_{e,i}}$	$\frac{\partial h_{a33,i}}{\partial z_{of,i}} = \frac{T_{b,i} - T_{c,i}}{T_{b,i}^2}$
$\frac{\partial h_{a32,i}}{\partial V_i} = -1$	$\frac{\partial h_{a34,i}}{\partial z_{ast1,i}} = G_i$
$\frac{\partial h_{a32,i}}{\partial z_{PSSout,i}} = 1$	$\frac{\partial h_{a34,i}}{\partial z_{of,i}} = G_i \frac{T_{c,i}}{T_{b,i}}$
$\frac{\partial h_{a32,i}}{\partial z_{of,i}} = -1$	$\frac{\partial h_{a34,i}}{\partial z_{op,i}} = -1$

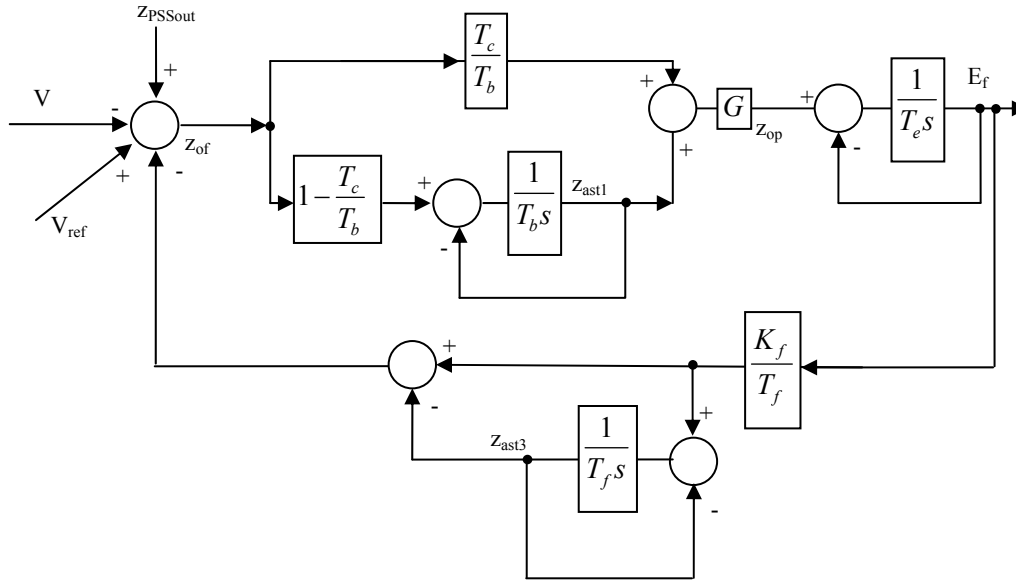
#### 4.8.4. Μοντέλο APT EXST1/ST1

Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται ο APT τύπου EXST1, ο οποίος περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 3.2.6.

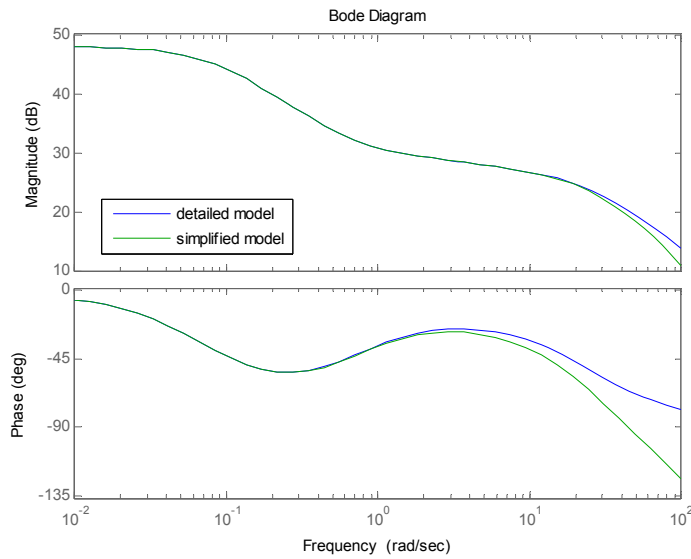


Σχήμα 4.13: Διάγραμμα βαθμίδων διατάξεων APT EXST1

Το απλοποιημένο μοντέλο (απαλείφοντας την χρονική σταθερά του φίλτρου  $T_R$ ) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14, ενώ στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζεται το διάγραμμα Bode της λεπτομερούς και απλοποιημένης παράστασης του APT EXST1. Όπως φαίνεται, η προτεινόμενη απλοποίηση δεν εισάγει σημαντικό σφάλμα στην περιοχή των συχνοτήτων των διασυνδετικών ταλαντώσεων.



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα βαθμίδων απλοποιημένου APT EXST1



Σχήμα 4.15: Bode διάγραμμα λεπτομερούς και απλοποιημένου μοντέλου APT EXST1 (τυπικές τιμές)

Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος με στατό σύστημα διέγερσης (EXST1) αναλύεται σε πέντε εξισώσεις:

$$\mathbf{h}_{a4,i} = \begin{bmatrix} h_{a41,i} \\ h_{a42,i} \\ h_{a43,i} \\ h_{a44,i} \\ h_{a45,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_{f,i} \\ 0 \\ \dot{z}_{ast1,i} \\ 0 \\ \dot{z}_{ast3,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{z_{op,i}}{T_{e,i}} - \frac{E_{f,i}}{T_{e,i}} \\ z_{PSSout,i} + V_{ref,i} - V_i - \left( E_{f,i} \frac{K_{f,i}}{T_{f,i}} - z_{ast3,i} \right) - z_{of,i} \\ -\frac{z_{ast1,i}}{T_{b,i}} + \frac{z_{of,i}}{T_{b,i}} \left( 1 - \frac{T_{c,i}}{T_{b,i}} \right) \\ G_i \left( z_{of,i} \frac{T_{c,i}}{T_{b,i}} + z_{ast1,i} \right) - z_{op,i} \\ \frac{1}{T_{f,i}} \left( E_{f,i} \frac{K_{f,i}}{T_{f,i}} - z_{ast3,i} \right) \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

Το τμήμα των μεταβλητών που αντιστοιχούν στον APT είναι οι ακόλουθες:

$$\mathbf{z} = \left[ \dots \quad E_{f,i} \quad z_{of,i} \quad z_{ast1,i} \quad z_{op,i} \quad z_{ast3,i} \quad \dots \right] \quad (4.60)$$

$$\mathbf{z}_{a4,i} = \left[ E_f \quad z_{of} \quad z_{ast1} \quad z_{op} \quad z_{ast3} \right]$$

Οι μερικές παράγωγοι βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.12:

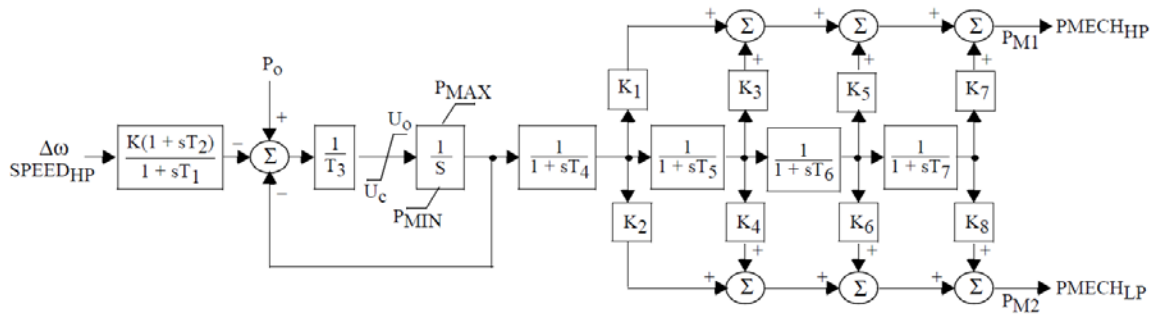
Πίνακας 4.12: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων APT EXSTI

$\frac{\partial h_{a41,i}}{\partial E_{f,i}} = -\frac{1}{T_{e,i}}$	$\frac{\partial h_{a43,i}}{\partial z_{ast1,i}} = -\frac{1}{T_{b,i}}$
$\frac{\partial h_{a41,i}}{\partial z_{op,i}} = \frac{1}{T_{e,i}}$	$\frac{\partial h_{a43,i}}{\partial z_{of,i}} = \frac{T_{b,i} - T_{c,i}}{T_{b,i}^2}$
$\frac{\partial h_{a42,i}}{\partial V_i} = -1$	$\frac{\partial h_{a44,i}}{\partial z_{ast1,i}} = G_i$
$\frac{\partial h_{a42,i}}{\partial z_{PSSout,i}} = 1$	$\frac{\partial h_{a44,i}}{\partial z_{of,i}} = G_i \frac{T_{c,i}}{T_{b,i}}$
$\frac{\partial h_{a42,i}}{\partial E_{f,i}} = -\frac{K_{f,i}}{T_{f,i}}$	$\frac{\partial h_{a44,i}}{\partial z_{op,i}} = -1$
$\frac{\partial h_{a42,i}}{\partial z_{ast3,i}} = 1$	$\frac{\partial h_{a45,i}}{\partial z_{ast3,i}} = -\frac{1}{T_{f,i}}$
$\frac{\partial h_{a42,i}}{\partial z_{of,i}} = -1$	$\frac{\partial h_{a45,i}}{\partial E_{f,i}} = \frac{K_{f,i}}{T_{f,i}^2}$

## 4.9. Παράσταση απλοποιημένων μοντέλων Ρυθμιστών στροφών – Στροβίλων

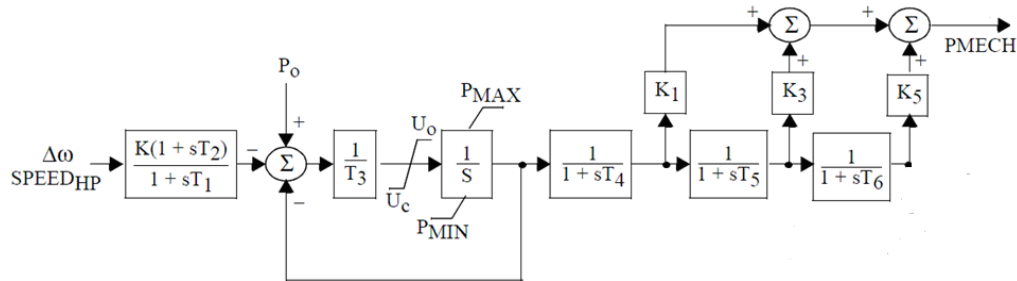
### 4.9.1. Ατμοστροβίλος τριών βαθμίδων (IEEEG1)

Στην παράγραφο 3.3.3 περιγράφηκε αναλυτικά το γενικό μοντέλο ατμοστροβιλικής μονάδας παραγωγής πολλαπλών βαθμίδων (Σχήμα 4.16). Στην παρούσα εργασία θεωρείται ατμοστροβιλική μονάδα παραγωγής τριών βαθμίδων. Για την παράσταση αυτή τροποποιείται κατάλληλα το γενικό μοντέλο IEEEG1 με τον μηδενισμό των αντίστοιχων παραμέτρων ( $K_7, K_2, K_4, K_6, K_8$ ).



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα βαθμίδων γενικού μοντέλου ατμοστροβιλικής μονάδας IEEEG1

Οπότε με βάση το αρχικό γενικό μοντέλο προκύπτει το μοντέλο ατμοστροβιλικής μονάδας τριών βαθμίδων, με αναθέρμανση το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.17: Διάγραμμα βαθμίδων ατμοστροβιλικής μονάδας τριών επιπέδων με αναθέρμανση

Η χρονική σταθερά αναθέρμανσης ( $T_5$ ) έχει αρκετά μεγάλη τιμή. Συνεπώς η χρονική σταθερά του στροβίλου χαμηλής πίεσης ( $T_6$ ) μπορεί να παραληφθεί χωρίς να τροποποιείται σημαντικά η απόκριση της συνάρτησης μεταφοράς.

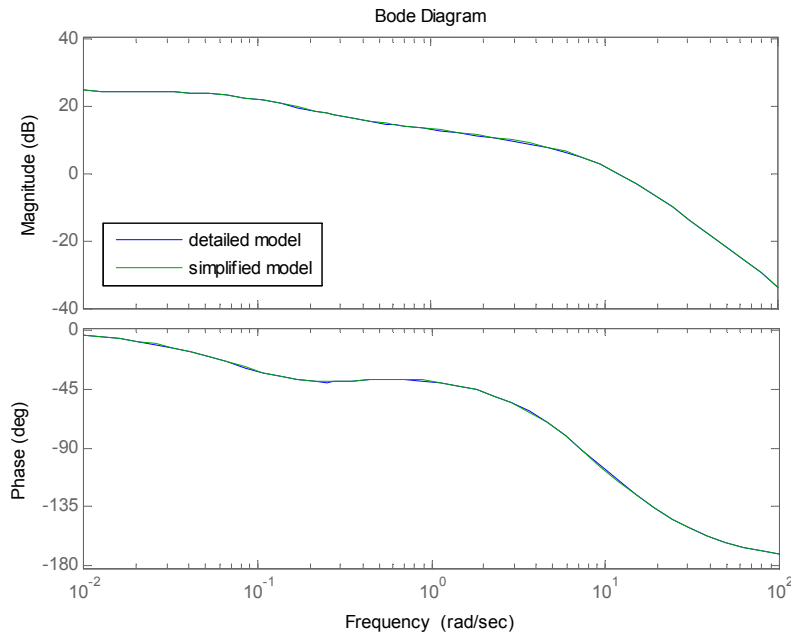
$$\frac{\Delta P_m}{\Delta \omega} = K \frac{1+T_2s}{1+T_1s} \frac{1}{1+T_3s} \frac{1}{1+T_4s} \left( K_1 + K_3 \frac{1}{(1+T_5s)} + K_5 \frac{1}{(1+T_5s)(1+T_6s)} \right) \quad (4.61)$$

Θεωρώντας  $T_5 \gg T_6$  προκύπτει:



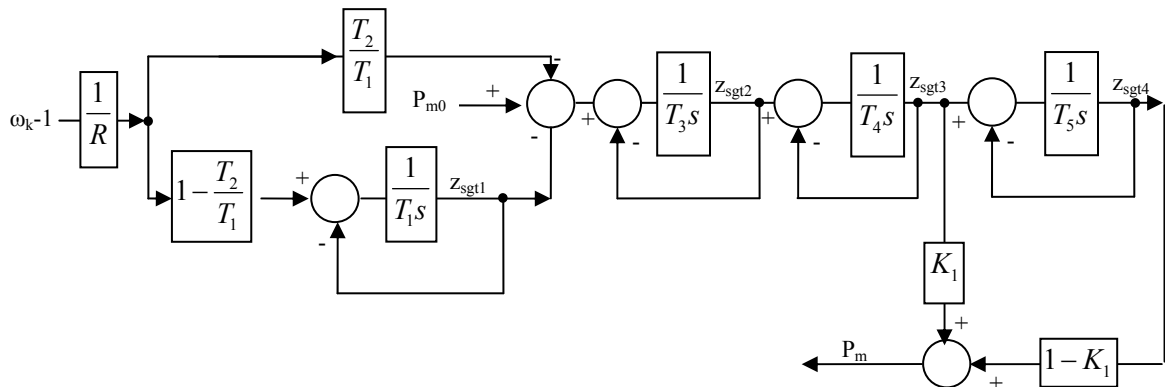
$$\frac{\Delta P_m}{\Delta \omega} \approx K \frac{1+T_2s}{1+T_1s} \frac{1}{1+T_3s} \frac{1}{1+T_4s} \left( K_1 + K_3 \frac{1}{(1+T_5s)} + K_5 \frac{1}{(1+T_5s)} \right) \quad (4.62)$$

Στο Σχήμα 4.18 παρουσιάζεται το διάγραμμα Bode του απλοποιημένου και λεπτομερούς μοντέλου αμοστροβλικής μονάδας για τυπικές τιμές, και επιβεβαιώνεται ότι δεν εισάγεται σημαντικό σφάλμα με την προτεινόμενη απλοποίηση για την μελετούμενη περιοχή συχνότητας ( $\omega < 6\text{r/s}$ ).



Σχήμα 4.18: Bode διάγραμμα λεπτομερούς και απλοποιημένου μοντέλου αμοστροβλικής μονάδας τριών βαθμίδων (τυπικές τιμές)

Τελικά διαμορφώνεται το απλοποιημένο μοντέλο αμοστροβλικής μονάδας τριών βαθμίδων, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στο απλοποιημένο μοντέλο και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.19:



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα βαθμίδων απλοποιημένου μοντέλου αμοστροβλικής μονάδας τριών βαθμίδων

Το απλοποιημένο μοντέλο ατμοστροβλικής μονάδας αναλύεται σε πέντε εξισώσεις:

$$\mathbf{h}_{s1,i} = \begin{bmatrix} h_{s11,i} \\ h_{s12,i} \\ h_{s13,i} \\ h_{s14,i} \\ h_{s15,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}_{sgt1,i} \\ \dot{z}_{sgt2,i} \\ \dot{z}_{sgt3,i} \\ \dot{z}_{sgt4,i} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{1,i}} \left( \frac{\omega_k - 1}{R_i} \frac{T_{1,i} - T_{2,i}}{T_{1,i}} - z_{sgt1,i} \right) \\ \frac{1}{T_{3,i}} \left( -\frac{\omega_k - 1}{R_i} \frac{T_{2,i}}{T_{1,i}} + P_{m0,i} - z_{sgt1,i} - z_{sgt2,i} \right) \\ \frac{1}{T_{4,i}} (z_{sgt2,i} - z_{sgt3,i}) \\ \frac{1}{T_{5,i}} (z_{sgt3,i} - z_{sgt4,i}) \\ K_{1,i} z_{sgt3,i} + (1 - K_{1,i}) z_{sgt4,i} - P_{m,i} \end{bmatrix} \quad (4.63)$$

όπου  $\omega_k$  η μεταβλητή της συχνότητας της περιοχής  $k$  στην οποία ανήκει η γεννήτρια  $i$ .

Οι μεταβλητές κατάστασης καθώς και η αλγεβρική μεταβλητή εξόδου, που αντιστοιχούν στο απλοποιημένο μοντέλο ατμοστροβλικής μονάδας είναι οι ακόλουθες:

$$\mathbf{z} = [\dots \quad z_{sgt1,i} \quad z_{sgt2,i} \quad z_{sgt3,i} \quad z_{sgt4,i} \quad P_{m,i} \quad \dots] \quad (4.64)$$

$$\mathbf{z}_{s1} = [z_{sgt1,i} \quad z_{sgt2,i} \quad z_{sgt3,i} \quad z_{sgt4,i} \quad P_m]$$

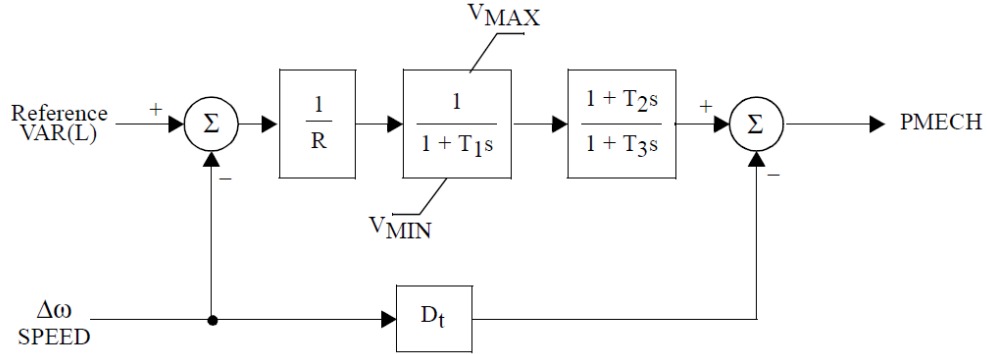
Οι μερικές παράγωγοι βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.13:

Πίνακας 4.13: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων απλοποιημένου μοντέλου ατμοστροβλικής μονάδας τριών βαθμίδων

$\frac{\partial h_{s11,i}}{\partial z_{sgt1,i}} = -\frac{1}{T_{1,i}}$	$\frac{\partial h_{s13,i}}{\partial z_{sgt3,i}} = -\frac{1}{T_{4,i}}$
$\frac{\partial h_{s11,i}}{\partial \omega_k} = \frac{T_{1,i} - T_{2,i}}{R_i T_{1,i}^2}$	$\frac{\partial h_{s14,i}}{\partial z_{sgt3,i}} = \frac{1}{T_{5,i}}$
$\frac{\partial h_{s12,i}}{\partial z_{sgt1,i}} = -\frac{1}{T_{3,i}}$	$\frac{\partial h_{s14,i}}{\partial z_{sgt4,i}} = -\frac{1}{T_{5,i}}$
$\frac{\partial h_{s12,i}}{\partial z_{sgt2,i}} = -\frac{1}{T_{3,i}}$	$\frac{\partial h_{s15,i}}{\partial z_{sgt3,i}} = K_{1,i}$
$\frac{\partial h_{s12,i}}{\partial \omega_k} = -\frac{T_{2,i}}{R_i T_{1,i} T_{3,i}}$	$\frac{\partial h_{s15,i}}{\partial z_{sgt4,i}} = 1 - K_{1,i}$
$\frac{\partial h_{s13,i}}{\partial z_{sgt2,i}} = \frac{1}{T_{4,i}}$	$\frac{\partial h_{s15,i}}{\partial P_{m,i}} = -1$

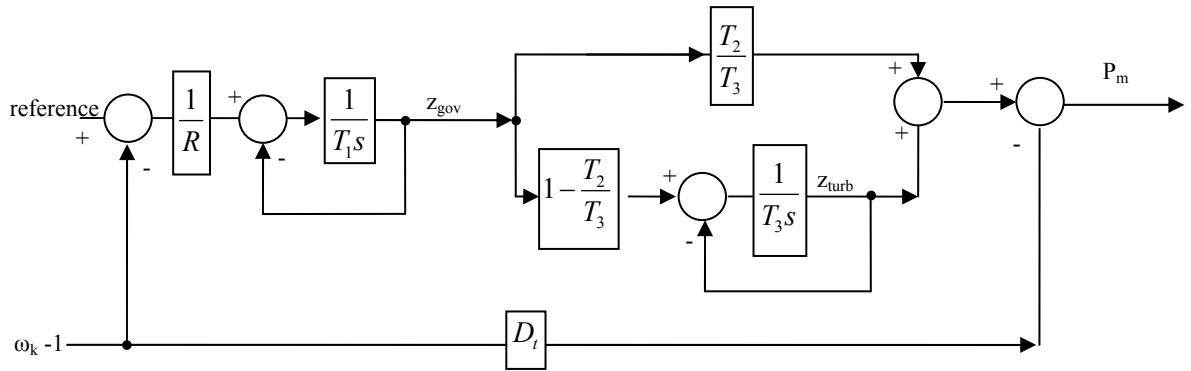
#### 4.9.2. Γενικό μοντέλο ρυθμιστή στροφών-στροβίλου TGOV1

Για γενικό μοντέλο ρυθμιστή στροφών (Σχήμα 4.20-παράγραφος 3.3.5) θεωρήθηκε ότι είναι ήδη απλοποιημένο, συνεπώς δεν πραγματοποιήθηκε κάποια περαιτέρω ελάττωση.



Σχήμα 4.20: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου TGOV1

Η υλοποίησή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.21:



Σχήμα 4.21: Διάγραμμα βαθμίδων υλοποίησης απλοποιημένου μοντέλου TGOV1

Οι εξισώσεις που αντιστοιχούν στο μοντέλο TGOV1 είναι:

$$\mathbf{h}_{s2,i} = \begin{bmatrix} h_{s21,i} \\ h_{s22,i} \\ h_{s23,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}_{gov,i} \\ \dot{z}_{turb,i} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{1,i}} \left( \frac{1}{R_i} (n_{ref,i} - \omega_k + 1) - z_{gov,i} \right) \\ \frac{1}{T_{3,i}} \left( z_{gov,i} \left( 1 - \frac{T_{2,i}}{T_{3,i}} \right) - z_{turb,i} \right) \\ z_{turb,i} + \frac{T_{2,i}}{T_{3,i}} z_{gov,i} - D_{t,i} (\omega_k - 1) - P_{m,i} \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

όπου  $\omega_k$  η μεταβλητή της συχνότητας της περιοχής  $k$  στην οποία ανήκει η γεννήτρια  $i$ .

Οι μεταβλητές κατάστασης καθώς και η αλγεβρική μεταβλητή εξόδου, που αντιστοιχούν στο απλοποιημένο μοντέλο ρυθμιστή στροφών-στροβίλου TGOV1 είναι οι ακόλουθες:

$$z = \left[ \dots \quad z_{\text{gov},i} \quad z_{\text{turb},i} \quad P_{m,i} \quad \dots \right] \quad (4.66)$$

$$z_{s2} = \left[ z_{\text{gov}} \quad z_{\text{turb}} \quad P_m \right]$$

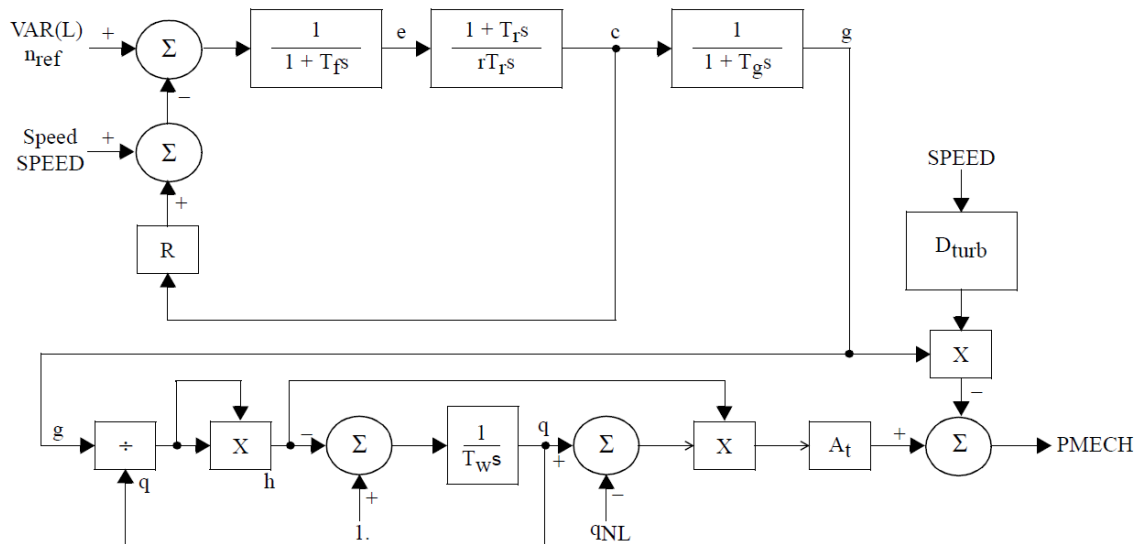
Οι μερικές παράγωγοι βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.14:

Πίνακας 4.14: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων μοντέλου ρυθμιστή στροφών-στροβίλου TGOVI

$\frac{\partial h_{s21,i}}{\partial z_{\text{gov},i}} = -\frac{1}{T_{1,i}}$	$\frac{\partial h_{s23,i}}{\partial z_{\text{gov},i}} = \frac{T_{2,i}}{T_{3,i}}$
$\frac{\partial h_{s21,i}}{\partial \omega_k} = -\frac{1}{T_{1,i} R_i}$	$\frac{\partial h_{s23,i}}{\partial z_{\text{turb},i}} = 1$
$\frac{\partial h_{s22,i}}{\partial z_{\text{gov},i}} = \frac{T_{3,i} - T_{2,i}}{T_{3,i}^2}$	$\frac{\partial h_{s23,i}}{\partial \omega_k} = -D_{t,i}$
$\frac{\partial h_{s22,i}}{\partial z_{\text{turb},i}} = -\frac{1}{T_{3,i}}$	$\frac{\partial h_{s23,i}}{\partial P_{m,i}} = -1$

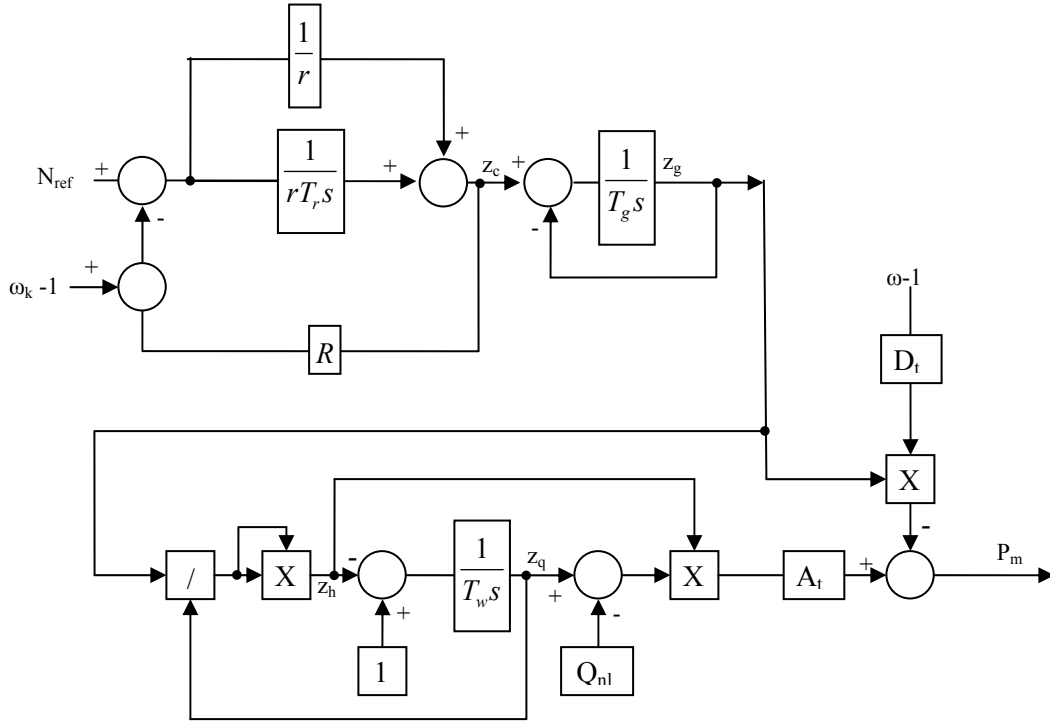
### 4.9.3. Μη γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου (HYGOV)

Το μοντέλο HYGOV αναφέρεται σε υδροστροβιλικές μονάδες. Οι βασικές αρχές λειτουργίας αλλά και μοντελοποίησης τέτοιων μονάδων αναλύθηκαν στην παράγραφο 3.3.6. Μέσα από αυτή την ανάλυση προέκυψαν και οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν την λειτουργία τέτοιων μονάδων. Το συγκεκριμένο είναι ένα μη γραμμικό μοντέλο το οποίο βασίζεται στην ανάλυση που έγινε στην παράγραφο 3.3.7. Το Σχήμα 4.22 δίνει το διάγραμμα βαθμίδων.



Σχήμα 4.22: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου υδροστροβιλικής μονάδας (HYGOV)

Η χρονική σταθερά  $T_f$ , έχει αρκετά μικρή τιμή, και χωρίς να εισάγεται σημαντικό σφάλμα μπορεί να αμεληθεί. Το αρχικό μοντέλο υδροστροβιλικής μονάδας απλοποιείται διαμορφώνεται το μοντέλο του Σχήματος 4.23.



Σχήμα 4.23: Διάγραμμα βαθμίδων υλοποίησης απλοποιημένου μοντέλου HYG0V

Το τμήμα των εξισώσεων που αντιστοιχούν στο απλοποιημένο μοντέλο HYG0V είναι:

$$\mathbf{h}_{s3,i} = \begin{bmatrix} h_{s31,i} \\ h_{s32,i} \\ h_{s33,i} \\ h_{s34,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}_{c,i} \\ \dot{z}_{g,i} \\ \dot{z}_{q,i} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{r,i}(r_i + R_i)} \left( N_{ref,i} + 1 - R_i z_{c,i} - \omega_k - T_{r,i} \frac{\eta_i}{2H_{eq,k}} \right) \\ \frac{1}{T_{g,i}} (z_{c,i} - z_{g,i}) \\ \frac{1}{T_{w,i}} \left( 1 - \frac{z_{q,i}^2}{z_{g,i}^2} \right) \\ A_{t,i} \frac{z_{q,i}^2}{z_{g,i}^2} (z_{q,i} - Q_{NL,i}) + z_{g,i} D_{turb,i} (1 - \omega_k) - P_{m,i} \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

όπου  $\omega_k$  η μεταβλητή της συχνότητας της περιοχής  $k$  στην οποία ανήκει η γεννήτρια  $i$ .

όπου  $H_{eq,k}$  είναι η συνολική αδράνεια της περιοχής  $k$

Οι μεταβλητές κατάστασης καθώς και η αλγεβρική μεταβλητή εξόδου, που αντιστοιχούν στο απλοποιημένο μοντέλο υδροστροβιλική μονάδας HYG0V1 είναι οι ακόλουθες:

$$z = \left[ \dots \quad z_{c,i} \quad z_{g,i} \quad z_{q,i} \quad P_{m,i} \quad \dots \right] \quad (4.68)$$

$$z_{s3} = \left[ z_c \quad z_g \quad z_q \quad P_m \right]$$

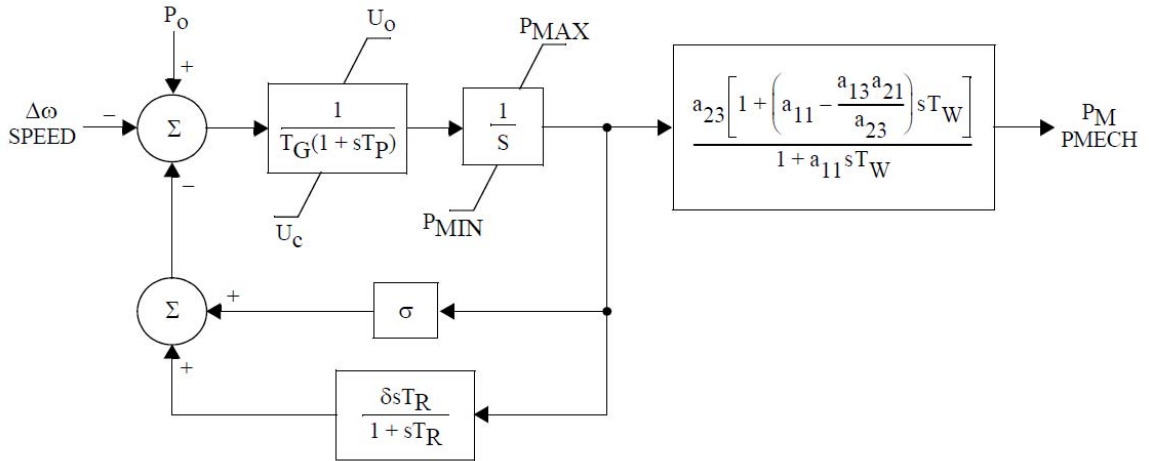
Οι μερικές παράγωγοι βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.15:

Πίνακας 4.15: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων απλοποιημένου μοντέλου HYGOV

$\frac{\partial h_{s31,i}}{\partial z_{c,i}} = \frac{-R_i}{T_{r,i}(r_i + R_i)}$	$\frac{\partial h_{s33,i}}{\partial z_{q,i}} = -\frac{1}{T_{w,i}} \frac{2z_{q,i}}{z_{g,i}^2}$
$\frac{\partial h_{s31,i}}{\partial \omega_k} = -\frac{1}{T_{r,i}(r_i + R_i)}$	$\frac{\partial h_{s34,i}}{\partial z_{g,i}} = -\frac{2A_{t,i}z_{q,i}^2}{z_{g,i}^3} (z_{q,i} - Q_{NL,i}) + D_{turb,i} (1 - \omega_k)$
$\frac{\partial h_{s31,i}}{\partial \eta_i} = -\frac{1}{2(r_i + R_i)H_{eq,k}}$	$\frac{\partial h_{s34,i}}{\partial z_{q,i}} = \frac{3A_{t,i}z_{q,i}^2}{z_{g,i}^2} - \frac{2A_{t,i}z_{q,i}}{z_{g,i}^2} Q_{NL,i}$
$\frac{\partial h_{s32,i}}{\partial z_{c,i}} = \frac{1}{T_{g,i}}$	$\frac{\partial h_{s34,i}}{\partial \omega_k} = -z_{g,i} D_{turb,i}$
$\frac{\partial h_{s32,i}}{\partial z_{g,i}} = -\frac{1}{T_{g,i}}$	$\frac{\partial h_{s34,i}}{\partial P_{m,i}} = -1$
$\frac{\partial h_{s33,i}}{\partial z_{g,i}} = \frac{1}{T_{w,i}} \frac{2z_{q,i}^2}{z_{g,i}^3}$	

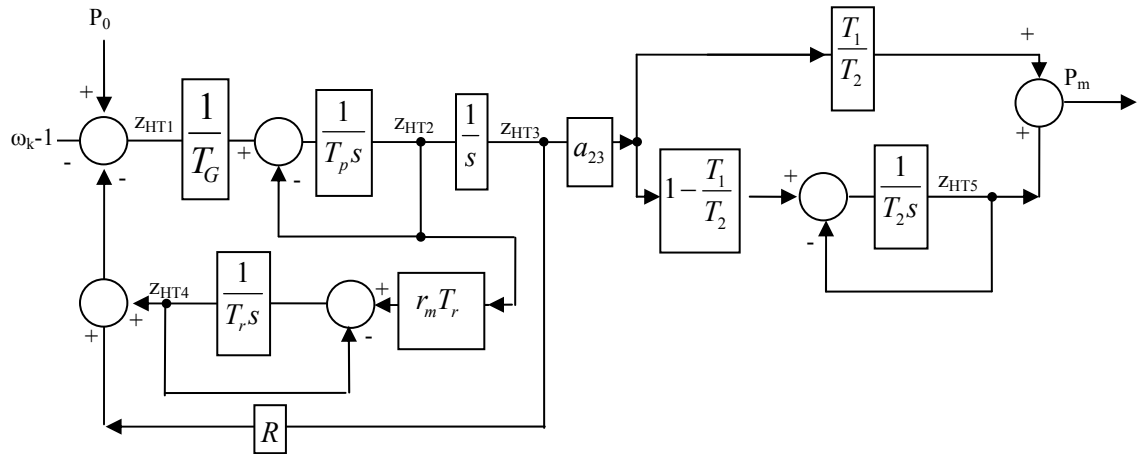
#### 4.9.4. Γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου (IEEEG3)

Μία δεύτερη προσέγγιση για τις υδροστροβιλικές μονάδες είναι το μοντέλο IEEE3 (Σχήμα 4.24-παράγραφος 3.3.8). Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι απλοποιημένο σε σχέση με το HYGOV. Ενώ φαίνονται οι χρονικές σταθερές του ανοίγματος της θύρας, ο μεταβατικός και μόνιμος στατισμός, καθώς και η χρονική σταθερά  $T_w$  με αρκετά παρόμοιο τρόπο σε σχέση με το HYGOV, είναι σαφές ότι στο τμήμα που αναφέρεται στην ροή του νερού στον αγωγό και τις πιέσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του, η προσέγγιση είναι γραμμικοποιημένη. Για το γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου θεωρήθηκε ότι είναι ήδη απλοποιημένο, συνεπώς δεν πραγματοποιήθηκε κάποια περαιτέρω ελάττωση.



Σχήμα 4.24: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου IEEE3

Στο Σχήμα 4.25 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων του μοντέλου IEEE3 φαίνεται στο Σχήμα 4.25 και οι παράμετροι  $T_1$ ,  $T_2$  υπολογίζονται με βάση τις εξισώσεις (4.69).



Σχήμα 4.25: Διάγραμμα βαθμίδων υλοποίησης απλοποιημένου μοντέλου IEEE3

$$T_1 = \left( a_{11} - \frac{a_{13}a_{21}}{a_{23}} \right) T_w \quad (4.69)$$

$$T_2 = a_{11} T_w$$

Οι εξισώσεις για το γραμμικό μοντέλο υδροστροβίλου είναι:

$$\mathbf{h}_{s4,i} = \begin{bmatrix} h_{s41,i} \\ h_{s42,i} \\ h_{s43,i} \\ h_{s44,i} \\ h_{s45,i} \\ h_{s46,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{z}_{HT2,i} \\ \dot{z}_{HT3,i} \\ \dot{z}_{HT4,i} \\ \dot{z}_{HT5,i} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - \omega_k) + P_{0,i} - z_{HT3,i} R_i - z_{HT4,i} - z_{HT1,i} \\ \frac{1}{T_{P,i}} \left( \frac{z_{HT1,i}}{T_{G,i}} - z_{HT2,i} \right) \\ z_{HT2,i} \\ \frac{1}{T_{r,i}} (r_{m,i} T_{r,i} z_{HT2,i} - z_{HT4,i}) \\ \frac{1}{T_{2,i}} \left( \left( 1 - \frac{T_{1,i}}{T_{2,i}} \right) a_{23,i} z_{HT3,i} - z_{HT5,i} \right) \\ z_{HT5,i} + a_{23,i} \frac{T_{1,i}}{T_{2,i}} z_{HT3,i} - P_{m,i} \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

όπου  $\omega_k$  η μεταβλητή της συχνότητας της περιοχής  $k$  στην οποία ανήκει η γεννήτρια  $i$ .

Οι μεταβλητές, που αντιστοιχούν στο απλοποιημένο μοντέλο υδροστροβιλική μονάδας IEEE3 είναι οι ακόλουθες:

$$\mathbf{z} = [\dots \ z_{HT1,i} \ z_{HT2,i} \ z_{HT3,i} \ z_{HT4,i} \ z_{HT5,i} \ P_{m,i} \ \dots] \quad (4.71)$$

$$\mathbf{z}_{s4} = [z_{HT1} \ z_{HT2} \ z_{HT3} \ z_{HT4} \ z_{HT5} \ P_m]$$

Οι μερικές παράγωγοι βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.16:

Πίνακας 4.16: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων απλοποιημένου μοντέλου IEEE3

$\frac{\partial h_{s41,i}}{\partial z_{HT3,i}} = -R_i$	$\frac{\partial h_{s42,i}}{\partial z_{HT2,i}} = -\frac{1}{T_{P,i}}$	$\frac{\partial h_{s45,i}}{\partial z_{HT5,i}} = -\frac{1}{T_{2,i}}$
$\frac{\partial h_{s41,i}}{\partial z_{HT4,i}} = -1$	$\frac{\partial h_{s43,i}}{\partial z_{HT2,i}} = 1$	$\frac{\partial h_{s46,i}}{\partial z_{HT3,i}} = a_{23,i} \frac{T_{1,i}}{T_{2,i}}$
$\frac{\partial h_{s41,i}}{\partial \omega_k} = -1$	$\frac{\partial h_{s44,i}}{\partial z_{HT2,i}} = r_{m,i}$	$\frac{\partial h_{s46,i}}{\partial z_{HT5,i}} = 1$
$\frac{\partial h_{s41,i}}{\partial z_{HT1,i}} = -1$	$\frac{\partial h_{s44,i}}{\partial z_{HT4,i}} = -\frac{1}{T_{r,i}}$	$\frac{\partial h_{s46,i}}{\partial P_{m,i}} = -1$
$\frac{\partial h_{s42,i}}{\partial z_{HT1,i}} = \frac{1}{T_{P,i} T_{G,i}}$	$\frac{\partial h_{s45,i}}{\partial z_{HT3,i}} = \frac{1}{T_{2,i}} \left( 1 - \frac{T_{1,i}}{T_{2,i}} \right) a_{23,i}$	

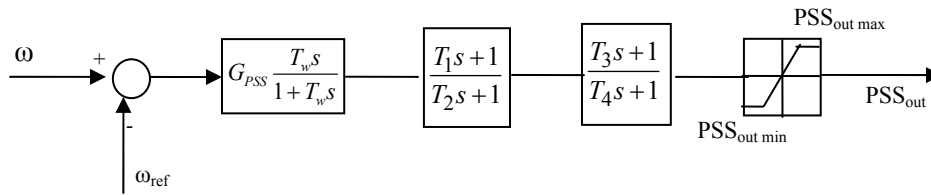


## 4.10. Παράσταση σταθεροποιητών ισχύος

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.4.2 χρησιμοποιούνται δύο βασικά μοντέλα σταθεροποιητών ισχύος και δύο παραλλαγές τους. Στην ενότητα αυτή αναλύονται οι εξισώσεις καθώς και υπολογίζονται οι μερικές παράγωγοι για τον Ιακωβιανό πίνακα.

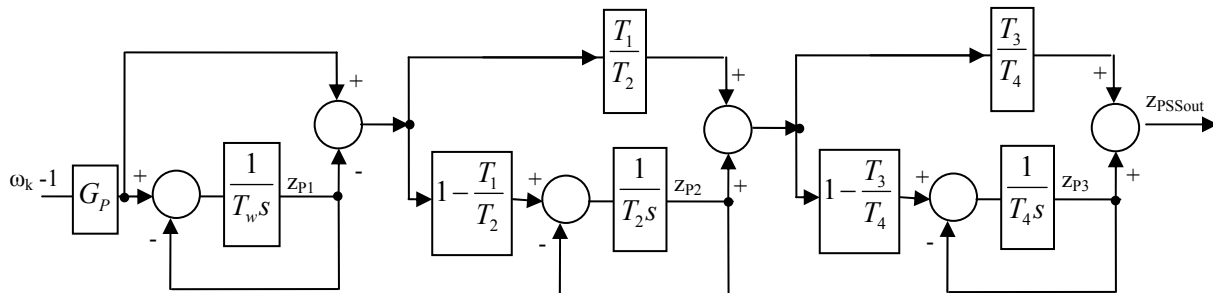
### 4.10.1. Μοντέλο σταθεροποιητή STAB1/STAB1\*

Η υλοποίηση για τους δύο αυτούς σταθεροποιητές ισχύος είναι κοινή, αφού, ο σταθεροποιητής ισχύος STAB1\* προκύπτει με την κατάλληλη ρύθμιση των χρονικών σταθερών του πρώτου μπλοκ υστέρησης/προήγησης φάσης του STAB1. Στο Σχήμα 4.26 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων για τον σταθεροποιητή STAB1.



Σχήμα 4.26: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου STAB1

Η υλοποίηση του σταθεροποιητή STAB1 γίνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.27.



Σχήμα 4.27: Διάγραμμα βαθμίδων υλοποίησης σταθεροποιητή STAB1

Οι εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τον σταθεροποιητή τύπου STAB1:

$$\mathbf{h}_{p1,i} = \begin{bmatrix} h_{p11,i} \\ h_{p12,i} \\ h_{p13,i} \\ h_{p14,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}_{p1,i} \\ \dot{z}_{p2,i} \\ \dot{z}_{p3,i} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\omega_k - 1) \frac{G_{p,i}}{T_{w,i}} - \frac{z_{p1,i}}{T_{w,i}} \\ ((\omega_k - 1)G_{p,i} - z_{p1,i}) \frac{1}{T_{2,i}} \frac{T_{2,i} - T_{1,i}}{T_{2,i}} - \frac{z_{p2,i}}{T_{2,i}} \\ \left( ((\omega_k - 1)G_{p,i} - z_{p1,i}) \frac{T_{1,i}}{T_{2,i}} + z_{p2,i} \right) \frac{T_{4,i} - T_{3,i}}{(T_{4,i})^2} - \frac{z_{p3,i}}{T_{4,i}} \\ \left( ((\omega_k - 1)G_{p,i} - z_{p1,i}) \frac{T_{1,i}}{T_{2,i}} + z_{p2,i} \right) \frac{T_{3,i}}{T_{4,i}} + z_{p3,i} - z_{PSSout,i} \end{bmatrix} \quad (4.72)$$

όπου  $\omega_k$  η μεταβλητή της συχνότητας της περιοχής  $k$  στην οποία ανήκει η γεννήτρια  $i$ .

Η υλοποίηση και για τους δύο τύπους σταθεροποιητών ισχύος είναι κοινή. Οι μεταβλητές που αντιστοιχούν στον σταθεροποιητή ισχύος STAB1 φαίνονται στην παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \dots & z_{p1,i} & z_{p2,i} & z_{p3,i} & z_{PSSout,i} & \dots \end{bmatrix} \quad (4.73)$$

$$\mathbf{z}_{p1} = \begin{bmatrix} z_{p1} & z_{p2} & z_{p3} & z_{PSSout} \end{bmatrix}$$

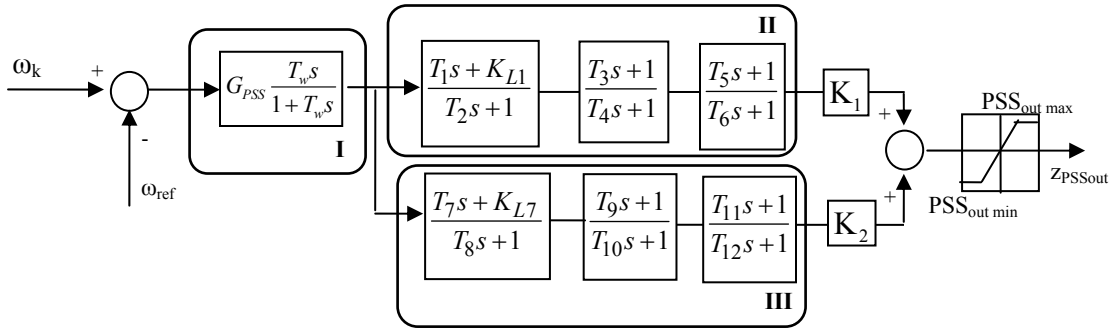
Οι μερικές παράγωγοι βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.17:

Πίνακας 4.17: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων μοντέλου STAB1

$\frac{\partial h_{p11,i}}{\partial \omega_k} = \frac{G_{p,i}}{T_{w,i}}$	$\frac{\partial h_{p13,i}}{\partial z_{p2,i}} = \frac{T_{4,i} - T_{3,i}}{T_{4,i}^2}$
$\frac{\partial h_{p11,i}}{\partial z_{p1,i}} = -\frac{1}{T_{w,i}}$	$\frac{\partial h_{p13,i}}{\partial z_{p3,i}} = -\frac{1}{T_{4,i}}$
$\frac{\partial h_{p12,i}}{\partial \omega_k} = G_{p,i} \frac{T_{2,i} - T_{1,i}}{T_{2,i}^2}$	$\frac{\partial h_{p14,i}}{\partial \omega_k} = G_{p,i} \frac{T_{3,i}}{T_{4,i}} \frac{T_{1,i}}{T_{2,i}}$
$\frac{\partial h_{p12,i}}{\partial z_{p1,i}} = -\frac{T_{2,i} - T_{1,i}}{T_{2,i}^2}$	$\frac{\partial h_{p14,i}}{\partial z_{p1,i}} = -\frac{T_{3,i}}{T_{4,i}} \frac{T_{1,i}}{T_{2,i}}$
$\frac{\partial h_{p12,i}}{\partial z_{p2,i}} = -\frac{1}{T_{2,i}}$	$\frac{\partial h_{p14,i}}{\partial z_{p2,i}} = \frac{T_{3,i}}{T_{4,i}}$
$\frac{\partial h_{p13,i}}{\partial \omega_k} = G_{p,i} \frac{T_{1,i}}{T_{2,i}} \frac{T_{4,i} - T_{3,i}}{T_{4,i}^2}$	$\frac{\partial h_{p14,i}}{\partial z_{p3,i}} = 1$
$\frac{\partial h_{p13,i}}{\partial z_{p1,i}} = -\frac{T_{1,i}}{T_{2,i}} \frac{T_{4,i} - T_{3,i}}{T_{4,i}^2}$	$\frac{\partial h_{p14,i}}{\partial z_{PSSout,i}} = -1$

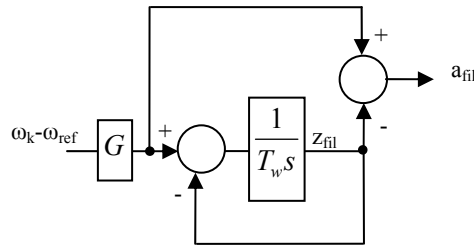
#### 4.10.2. Σταθεροποιητής Ισχύος PSS2/PSS2\*

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.4.2, ο σταθεροποιητής ισχύος αυτός αποτελεί στην ουσία ένα συνδυασμό δύο σταθεροποιητών. Όπως και προηγουμένως ο σταθεροποιητής PSS2\* αποτελεί μια παραλλαγή του PSS2 η οποία προκύπτει με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων. Συνεπώς η υλοποίηση είναι κοινή για τους δύο τύπους σταθεροποιητή ισχύος. Κάθε επιμέρους σταθεροποιητής έχει ένα εσωτερικό κέρδος ( $K_1, K_2$ ) και τρία μπλοκ υστέρησης προήγησης φάσης. Επίσης στην είσοδο του σταθεροποιητή υπάρχει υψιπερατό φίλτρο για να απαλείφεται το μόνιμο σφάλμα της τιμής της συχνότητας. Το διάγραμμα βαθμίδων του σταθεροποιητή φαίνεται στο Σχήμα 4.28.

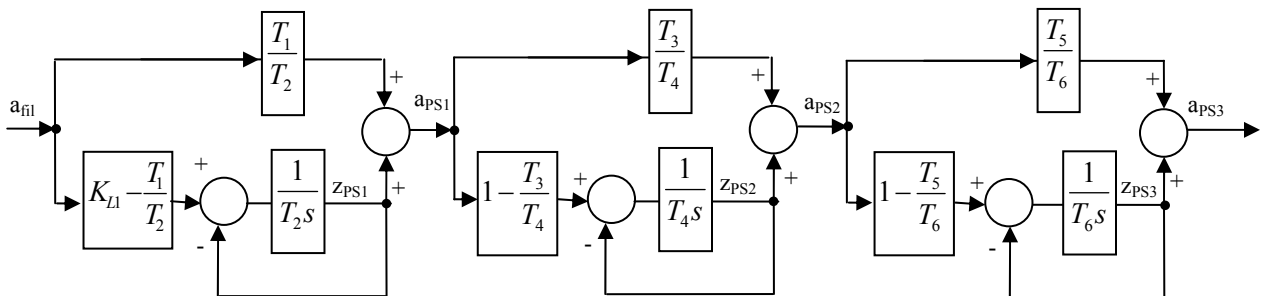


Σχήμα 4.28: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου σταθεροποιητή PSS2.

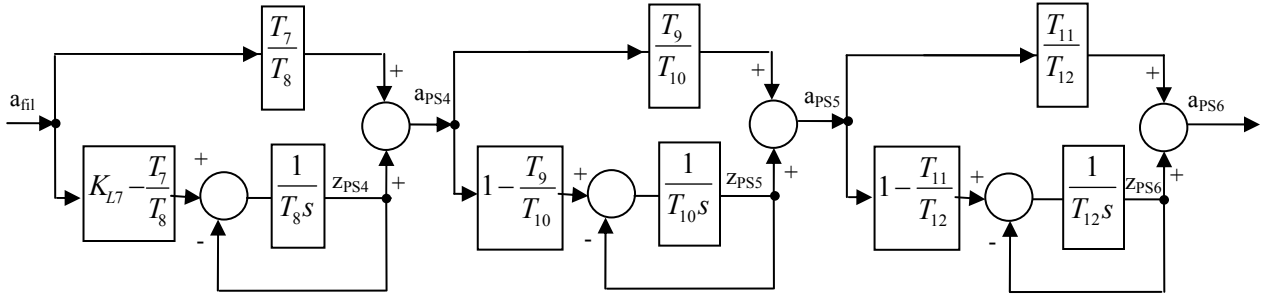
Για την καλύτερη παράσταση της υλοποίησης και παρουσίαση των ενδιάμεσων μεταβλητών, ο σταθεροποιητής αναλύεται σε τρία υποσυστήματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.28. Τα επιμέρους διαγράμματα με τις ενδιάμεσες μεταβλητές φαίνονται στα Σχήματα 4.29-4.31.



Σχήμα 4.29: Διάγραμμα βαθμίδων υλοποίησης σταθεροποιητή ισχύος PSS2 (Τμήμα I)



Σχήμα 4.30: Διάγραμμα βαθμίδων υλοποίησης σταθεροποιητή ισχύος PSS2 (Τμήμα II)



Σχήμα 4.31: Διάγραμμα βαθμίδων υλοποίησης σταθεροποιητή ισχύος PSS2 (Τμήμα ΙΙΙ)

Οι εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τον σταθεροποιητή ισχύος PSS2 είναι 15 και για τον λόγο αυτό θα παρουσιαστούν τμηματικά, με τρόπο που αντιστοιχεί στον χωρισμό του Σχήματος 4.28. Οι σχέσεις αυτές είναι (4.74)-(4.77):

Για το τμήμα Ι:

$$h_{p2,I,i} = \begin{bmatrix} h_{p21,i} \\ h_{p22,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}_{fil,i} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_i \frac{\omega_k - \omega_{ref}}{T_{w,i}} - \frac{z_{fil,i}}{T_{w,i}} \\ G_i (\omega_k - \omega_{ref}) - z_{fil,i} - a_{fil,i} \end{bmatrix} \quad (4.74)$$

όπου  $\omega_k$  η μεταβλητή της συχνότητας της περιοχής  $k$  στην οποία ανήκει η γεννήτρια  $i$ .

Για το τμήμα ΙΙ:

$$h_{p2,II,i} = \begin{bmatrix} h_{p23,i} \\ h_{p24,i} \\ h_{p25,i} \\ h_{p26,i} \\ h_{p27,i} \\ h_{p28,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}_{PS1,i} \\ 0 \\ \dot{z}_{PS2,i} \\ 0 \\ \dot{z}_{PS3,i} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{2,i}} \left( \left( K_{L1,i} - \frac{T_{1,i}}{T_{2,i}} \right) a_{fil,i} - z_{PS1,i} \right) \\ \frac{T_{1,i}}{T_{2,i}} a_{fil,i} + z_{PS1,i} - a_{PS1,i} \\ \frac{1}{T_{4,i}} \left( \left( 1 - \frac{T_{3,i}}{T_{4,i}} \right) a_{PS1,i} - z_{PS2,i} \right) \\ \frac{T_{3,i}}{T_{4,i}} a_{PS1,i} + z_{PS2,i} - a_{PS2,i} \\ \frac{1}{T_{6,i}} \left( \left( 1 - \frac{T_{5,i}}{T_{6,i}} \right) a_{PS2,i} - z_{PS3,i} \right) \\ \frac{T_{5,i}}{T_{6,i}} a_{PS2,i} + z_{PS3,i} - a_{PS3,i} \end{bmatrix} \quad (4.75)$$

Για το τμήμα III:

$$\mathbf{h}_{p2,III,i} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{p29,i} \\ \mathbf{h}_{p210,i} \\ \mathbf{h}_{p211,i} \\ \mathbf{h}_{p212,i} \\ \mathbf{h}_{p213,i} \\ \mathbf{h}_{p214,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{z}}_{PS4,i} \\ \mathbf{0} \\ \dot{\mathbf{z}}_{PS5,i} \\ \mathbf{0} \\ \dot{\mathbf{z}}_{PS6,i} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{8,i}} \left( \left( \mathbf{K}_{\ell 7,i} - \frac{T_{7,i}}{T_{8,i}} \right) \mathbf{a}_{fil,i} - \mathbf{z}_{PS4,i} \right) \\ \frac{T_{7,i}}{T_{8,i}} \mathbf{a}_{fil,i} + \mathbf{z}_{PS4,i} - \mathbf{a}_{PS4,i} \\ \frac{1}{T_{10,i}} \left( \left( 1 - \frac{T_{9,i}}{T_{10,i}} \right) \mathbf{a}_{PS4,i} - \mathbf{z}_{PS5,i} \right) \\ \frac{T_{9,i}}{T_{10,i}} \mathbf{a}_{PS4,i} + \mathbf{z}_{PS5,i} - \mathbf{a}_{PS5,i} \\ \frac{1}{T_{12,i}} \left( \left( 1 - \frac{T_{11,i}}{T_{12,i}} \right) \mathbf{a}_{PS5,i} - \mathbf{z}_{PS6,i} \right) \\ \frac{T_{11,i}}{T_{12,i}} \mathbf{a}_{PS5,i} + \mathbf{z}_{PS6,i} - \mathbf{a}_{PS6,i} \end{bmatrix} \quad (4.76)$$

Τέλος είναι η αλγεβρική συνάρτηση στην έξοδο του σταθεροποιητή ισχύος.

$$\mathbf{h}_{p2,IV,i} = \mathbf{h}_{p215,i} = \mathbf{0} = \mathbf{K}_{1,i} \mathbf{a}_{PS3,i} + \mathbf{K}_{2,i} \mathbf{a}_{PS6,i} - \mathbf{z}_{PSS_{out},i} \quad (4.77)$$

Οι μεταβλητές που αντιστοιχούν στον σταθεροποιητή ισχύος PSS2 φαίνονται στην παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \dots & \mathbf{z}_{PS2I,i} & \mathbf{z}_{PS2II,i} & \mathbf{z}_{PS2III,i} & \mathbf{z}_{PSS_{out},i} & \dots \end{bmatrix} \quad (4.78)$$

$$\mathbf{z}_{p1} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{PS2I} & \mathbf{z}_{PS2II} & \mathbf{z}_{PS2III} & \mathbf{z}_{PSS_{out}} \end{bmatrix}$$

όπου οι ενδιαμέσες ομάδες μεταβλητών της (4.78) ορίζονται ως εξής:

$$\mathbf{z}_{PS2I} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{fil} & \mathbf{a}_{fil} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{z}_{PS2II} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{PS1} & \mathbf{a}_{PS1} & \mathbf{z}_{PS2} & \mathbf{a}_{PS2} & \mathbf{z}_{PS3} & \mathbf{a}_{PS3} \end{bmatrix} \quad (4.79)$$

$$\mathbf{z}_{PS2III} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{PS4} & \mathbf{a}_{PS4} & \mathbf{z}_{PS5} & \mathbf{a}_{PS5} & \mathbf{z}_{PS6} & \mathbf{a}_{PS6} \end{bmatrix}$$

Οι μερικές παράγωγοι βάση των οποίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας δίνονται από τις σχέσεις του Πίνακα 4.18:

Πίνακας 4.18: Στοιχεία Ιακωβιανού πίνακα -Μερικές παράγωγοι εξισώσεων μοντέλου σταθεροποιητή ισχύος PSS2

$\frac{\partial h_{p21,i}}{\partial \omega_k} = \frac{G_i}{T_{w,i}}$	$\frac{\partial h_{p26,i}}{\partial z_{PS2,i}} = 1$	$\frac{\partial h_{p211,i}}{\partial z_{PS5,i}} = -\frac{1}{T_{10,i}}$
$\frac{\partial h_{p21,i}}{\partial z_{fil,i}} = -\frac{1}{T_{w,i}}$	$\frac{\partial h_{p26,i}}{\partial a_{PS2,i}} = -1$	$\frac{\partial h_{p211,i}}{\partial a_{PS4,i}} = \frac{T_{9,i}}{T_{10,i}}$
$\frac{\partial h_{p22,i}}{\partial \omega_k} = G_i$	$\frac{\partial h_{p27,i}}{\partial a_{PS2,i}} = \frac{1}{T_{6,i}} \left( 1 - \frac{T_{5,i}}{T_{6,i}} \right)$	$\frac{\partial h_{p211,i}}{\partial z_{PS5,i}} = 1$
$\frac{\partial h_{p22,i}}{\partial z_{fil,i}} = -1$	$\frac{\partial h_{p27,i}}{\partial z_{PS3,i}} = -\frac{1}{T_{6,i}}$	$\frac{\partial h_{p211,i}}{\partial a_{PS5,i}} = -1$
$\frac{\partial h_{p22,i}}{\partial a_{fil,i}} = -1$	$\frac{\partial h_{p28,i}}{\partial a_{PS2,i}} = \frac{T_{5,i}}{T_{6,i}}$	$\frac{\partial h_{p213,i}}{\partial a_{PS5,i}} = \frac{1}{T_{12,i}} \left( 1 - \frac{T_{11,i}}{T_{12,i}} \right)$
$\frac{\partial h_{p23,i}}{\partial a_{fil,i}} = \frac{1}{T_{2,i}} \left( K_{\ell 1,i} - \frac{T_{1,i}}{T_{2,i}} \right)$	$\frac{\partial h_{p28,i}}{\partial z_{PS3,i}} = 1$	$\frac{\partial h_{p213,i}}{\partial z_{PS6,i}} = -\frac{1}{T_{12,i}}$
$\frac{\partial h_{p23,i}}{\partial z_{PS1,i}} = -\frac{1}{T_{2,i}}$	$\frac{\partial h_{p28,i}}{\partial a_{PS3,i}} = -1$	$\frac{\partial h_{p214,i}}{\partial a_{PS5,i}} = \frac{T_{11,i}}{T_{12,i}}$
$\frac{\partial h_{p24,i}}{\partial a_{fil,i}} = \frac{T_{1,i}}{T_{2,i}}$	$\frac{\partial h_{p29,i}}{\partial a_{fil,i}} = \frac{1}{T_{8,i}} \left( K_{\ell 7,i} - \frac{T_{7,i}}{T_{8,i}} \right)$	$\frac{\partial h_{p214,i}}{\partial z_{PS6,i}} = 1$
$\frac{\partial h_{p24,i}}{\partial z_{PS1,i}} = 1$	$\frac{\partial h_{p29,i}}{\partial z_{PS4,i}} = -\frac{1}{T_{8,i}}$	$\frac{\partial h_{p214,i}}{\partial a_{PS6,i}} = -1$
$\frac{\partial h_{p24,i}}{\partial a_{PS1,i}} = -1$	$\frac{\partial h_{p210,i}}{\partial a_{fil,i}} = \frac{T_{7,i}}{T_{8,i}}$	$\frac{\partial h_{p215,i}}{\partial a_{PS3,i}} = K_{1,i}$
$\frac{\partial h_{p25,i}}{\partial a_{PS1,i}} = \frac{1}{T_{4,i}} \left( 1 - \frac{T_{3,i}}{T_{4,i}} \right)$	$\frac{\partial h_{p210,i}}{\partial z_{PS4,i}} = 1$	$\frac{\partial h_{p215,i}}{\partial a_{PS6,i}} = K_{2,i}$
$\frac{\partial h_{p25,i}}{\partial z_{PS2,i}} = -\frac{1}{T_{4,i}}$	$\frac{\partial h_{p210,i}}{\partial a_{PS4,i}} = -1$	$\frac{\partial h_{p215,i}}{\partial z_{PSS_{out},i}} = -1$
$\frac{\partial h_{p26,i}}{\partial a_{PS1,i}} = \frac{T_{3,i}}{T_{4,i}}$	$\frac{\partial h_{p211,i}}{\partial a_{PS4,i}} = \frac{1}{T_{10,i}} \left( 1 - \frac{T_{9,i}}{T_{10,i}} \right)$	

# 5. Λογισμικό πακέτο για την μελέτη μεγάλων διασυνδέσεων

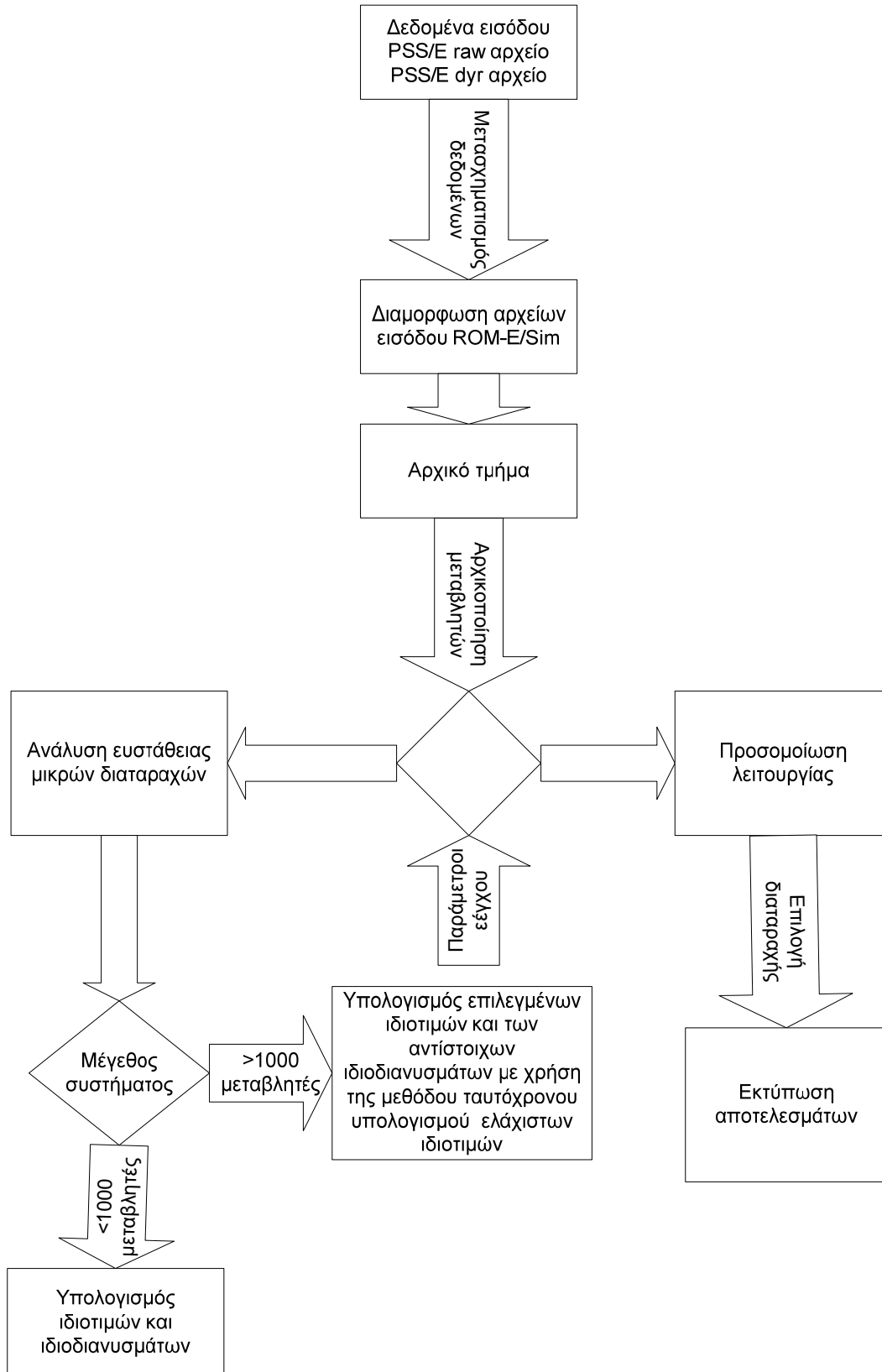
## 5.1. Γενικά

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου που αναλύεται στην παρούσα διατριβή αρχικά αναπτύχθηκε ένα μοντέλο σε περιβάλλον Matlab/Simulink (εργασία με 4 γεννήτριες / 11 ζυγούς –Κεφάλαιο 6). Ενώ η υλοποίηση ήταν ικανοποιητική για μικρά συστήματα, ήταν οριοθετημένη ως προς το μέγεθος του συστήματος το οποίο μπορούσε να προσομοιώσει. Η αύξηση των μεταβλητών κατάστασης, καθώς και γενικότερα των εξισώσεων του συστήματος, απαιτεί άλλες τεχνικές επίλυσης (οι οποίες περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2), και για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε το λογισμικό πακέτο ROM-E/Sim (Reduced Order Model–Eigenvalues/Simulation) σε γλώσσα FORTRAN ικανό να προσομοιώσει μεγάλα συστήματα.

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψει η δομή του λογισμικού πακέτου, η αλληλουχία των συναρτήσεων, καθώς και οι δυνατότητες και οι λειτουργίες του. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η βασική δομή του προγράμματος ROM-E/Sim.

Τα αρχεία δεδομένων εισόδου, είναι τα δύο βασικά αρχεία εισόδου του PSS/E (πρώην PTI). Το πρώτο, είναι αρχείο τύπου raw, δηλαδή το αρχείο που έχει τα δεδομένα του πραγματικού συστήματος σχετικά με την αρχική του κατάσταση. Περιλαμβάνει δεδομένα σχετικά με τις γραμμές μεταφοράς, τους μετασχηματιστές και εν γένει το δίκτυο μεταφοράς, τα φορτία στους αντίστοιχους υποσταθμούς και τις γεννήτριες. Το δεύτερο αρχείο (αρχείο τύπου dgr), περιλαμβάνει τα δεδομένα για τη δυναμική προσομοίωση. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν στοιχεία των γεννητριών, στοιχεία των αυτόματων ρυθμιστών τάσης, των ρυθμιστών στροφών και των σταθεροποιητών ισχύος.

Τα αρχεία αυτά μετασχηματίζονται σε εσωτερικά αρχεία που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα και τα δεδομένα τους αποθηκεύονται στις εσωτερικές μεταβλητές του. Τα εσωτερικά αρχεία του προγράμματος είναι ένα νέο αρχείο raw μετά από την αναδιάταξη των ζυγών (η οποία θα περιγραφεί στην συνέχεια), και τρία αρχεία που περιλαμβάνουν τα δεδομένα του αρχείου dgr, ένα για τις κινητήριες μηχανές (GST\_DATA.DAT), ένα για τους αυτόματους ρυθμιστές τάσης και τις γεννήτριες (GENER\_DATA.DAT) και ένα για τους σταθεροποιητές ισχύος (PSS.DAT). Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διαιρείται σε συνεκτικές περιοχές, με βάση τον χωρισμό που εξ' αρχής υπάρχει στα δεδομένα των αρχείων εισόδου. Στα πλαίσια των αρχικών λειτουργιών του λογισμικού επιλύεται η ροή φορτίου και γίνεται η αρχικοποίηση του συστήματος. Ο χρήστης επιλέγει είτε να λυθεί η ροή φορτίου χρησιμοποιώντας την αρχική προσέγγιση για την λύση που είναι ενσωματωμένη στο raw αρχείο, είτε να κάνει ενιαία αρχικοποίηση (flat start). Η λύση της αρχικής ροής φορτίου δίνει τις τάσεις και τις γωνίες των τάσεων για κάθε ζυγό και τις εσωτερικές γωνίες των γεννητριών. Με βάση αυτά υπολογίζονται οι αρχικές τιμές όλων των μεταβλητών κατάστασης και των αλγεβρικών μεταβλητών των γεννητριών, των αυτόματων ρυθμιστών τάσης, των κινητήριων μηχανών και των σταθεροποιητών ισχύος.



Σχήμα 5.1: Βασικό διάγραμμα λογισμικού πακέτου ROM/E-Sim.



Στην συνέχεια, επιλέγεται αν θα γίνει ανάλυση μικρών διαταραχών του συστήματος ή θα γίνει δυναμική προσομοίωση. Ο υπολογισμός των ιδιοτιμών γίνεται με δύο διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με το μέγεθος του συστήματος. Στην περίπτωση όπου το σύνολο των μεταβλητών (αλγεβρικές και μεταβλητές κατάστασης) είναι λιγότερες από χίλιες, υπολογίζεται ο πίνακας κατάστασης (παράγραφος 1.6.3) και γίνεται χρήση των έτοιμων συναρτήσεων για τον υπολογισμό ιδιοτιμών, και ιδιοδιανυσμάτων. Σε περίπτωση όπου το σύστημα είναι μεγαλύτερο γίνεται επιλεκτικός υπολογισμός ιδιοτιμών με βάση την τεχνική που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.5.2 (αλγόριθμος ταυτόχρονου υπολογισμού ελάχιστων ιδιοτιμών). Το κριτήριο εμπλέκει το σύνολο των μεταβλητών διότι η πολυπλοκότητα του αλγόριθμου υπολογισμού του πίνακα κατάστασης εξαρτάται τόσο από τις αλγεβρικές όσο και από τις μεταβλητές κατάστασης.

Στην περίπτωση που επιλέγεται η μη γραμμική προσομοίωση μιας διαταραχής, αφού εισαχθούν τα κατάλληλα δεδομένα ως προς το χρόνο, την διάρκεια, την τοποθεσία και τον τύπο της διαταραχής, τα αποτελέσματα καταχωρούνται σε αρχεία ASCII. Στην συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι συνιστώσες του λογισμικού πακέτου ROM-E/Sim.

## 5.2. Αρχικό τμήμα

### 5.2.1. Αρχική ροή φορτίου

Στο πρώτο τμήμα του αλγορίθμου, γίνεται η αρχικοποίηση του συστήματος. Σε πρώτη φάση αλλάζει η αριθμηση των ζυγών για τις ανάγκες του προβλήματος. Κατά αύξοντα αριθμό ζυγού, πρώτα ορίζεται ο ζυγός ταλάντωσης, στην συνέχεια οι ζυγοί παραγωγής, και τέλος οι ζυγοί φορτίου. Η αρχικοποίηση περιλαμβάνει καταρχήν την επίλυση της ροής φορτίου. Δεδομένου του πίνακα αγωγιμοτήτων, των εγχύσεων ισχύος (των γεννητριών, και των φορτίων στους υποσταθμούς) που προκύπτουν από τα αρχεία εισόδου, υπολογίζεται η τάση και η γωνία σε κάθε ζυγό του δικτύου, καθώς και οι εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος σε όλους τους ζυγούς.

Ο υπολογισμός αυτός γίνεται βάση των εξισώσεων (4.40)-(4.41) που ορίζουν το μη γραμμικό πρόβλημα της ροής φορτίου:

$$P_{NET,i}(V, \theta) = V_i^2 g_i - V_k \sum_{m \in B_i} V_m \alpha_{im} \quad (5.1)$$

$$Q_{NET,i}(V, \theta) = -V_i^2 b_i - V_i \sum_{m \in B_i} V_m \beta_{im} \quad (5.2)$$

Το πρόβλημα αυτό λύνεται με την μέθοδο Newton-Rapson (ενότητα 1.7.3). Άγνωστοι θεωρούνται τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων στους ζυγούς. Ισχύει ωστόσο ότι στον ζυγό αναφοράς το μέτρο και η γωνία της τάσεως είναι δεδομένα, ενώ στους ζυγούς παραγωγής το μέτρο της τάσης θεωρείται γνωστή παράμετρος.

Θεωρώντας ότι ο ζυγός 1 είναι ο ζυγός ταλάντωσης, και ζυγοί παραγωγής είναι οι ζυγοί 2 έως  $G_e$  προκύπτει το σύστημα των εξισώσεων:

$$\mathbf{g}_{\text{lf}}(y_{\text{lf}}) = \begin{bmatrix} P_{g,2} - P_{l,2} - P_{\text{net},2} \\ \vdots \\ P_{g,N} - P_{l,N} - P_{\text{net},N} \\ \text{-----} \\ -Q_{l,\text{Ge}+1} - Q_{\text{net},\text{Ge}+1} \\ \vdots \\ -Q_{l,N} - Q_{\text{net},N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{g,2} - P_{l,2} - V_2^2 \mathbf{g}_2 + V_2 \sum_{m \in A_2} V_m \alpha_{2m} \\ \vdots \\ P_{g,N} - P_{l,N} - V_N^2 \mathbf{g}_N + V_N \sum_{m \in A_N} V_m \alpha_{Nm} \\ \text{-----} \\ -Q_{l,\text{Ge}+1} + V_{\text{Ge}+1}^2 \mathbf{b}_{\text{Ge}+1} + V_{\text{Ge}+1} \sum_{m \in A_{\text{Ge}+1}} V_m \beta_{\text{Ge}+1,m} \\ \vdots \\ -Q_{l,N} + V_N^2 \mathbf{b}_N + V_N \sum_{m \in A_N} V_m \beta_{N,m} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

όπου  $V$ ,  $\theta$  το μέτρο και η γωνία της τάσης στον ζυγό,  $P_{\text{net}}$ ,  $Q_{\text{net}}$  η έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος από τον ζυγό. Όπου  $N$  οι ζυγοί του συστήματος και  $G_e$  το πλήθος των γεννητριών.

Οι άγνωστες μεταβλητές του προβλήματος είναι:

$$y_{\text{lf}} = \left[ \underbrace{\vartheta_2 \dots \vartheta_N}_{N-1} \mid \underbrace{V_{\text{Ge}+1} \dots V_N}_{N-\text{Ge}} \right]^T \quad (5.4)$$

Υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας  $\mathbf{J}_{\text{lf}}$ , ο οποίος είναι ο πίνακας με τις μερικές παραγώγους των εξισώσεων (5.3) ως προς τις μεταβλητές του προβλήματος. Ο πίνακας αυτός αποθηκεύεται ως αραιός πίνακας.

$$\mathbf{J}_{\text{lf}} = \mathbf{D}_{y_{\text{lf}}} \mathbf{g}_{\text{lf}} \quad (5.5)$$

Η επίλυση, όπως περιγράφηκε και στην ενότητα 4.1 γίνεται με επαναληπτικό τρόπο βάση δύο εξισώσεων:

$$\begin{aligned} \Delta y_{\text{lf}}^{(k)} &= (\mathbf{J}_{\text{lf}}^{-1}) (\mathbf{g}_{\text{lf}}(y_{\text{lf}}^{(k)})) \\ y_{\text{lf}}^{(k+1)} &= y_{\text{lf}}^{(k)} - \Delta y_{\text{lf}}^{(k)} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Με βάση το αρχικό σημείο της επίλυσης  $y_{\text{lf}}^{(0)}$  (ή στην γενική περίπτωση  $y_{\text{lf}}^{(k)}$ ) υπολογίζεται το σφάλμα των εξισώσεων  $\mathbf{g}_{\text{lf}}(y_{\text{lf}}^{(k)})$  - σχέση (5.3). Το σφάλμα και ο Ιακωβιανός πίνακας δίνουν την νέα προσέγγιση για το διάνυσμα  $y_{\text{lf}}$ , την  $y_{\text{lf}}^{(k+1)}$ . Το σφάλμα ελέγχεται με βάση το κριτήριο της παρακάτω σχέσης:

$$\|\mathbf{g}_{\text{lf}}\|_{\infty} \leq \varepsilon_{\text{lf}} \quad (5.7)$$

όπου  $\varepsilon_{\text{lf}}$  η ανοχή σύγκλισης για την επίλυση της αρχικής ροής φορτίου.

Στον βαθμό που η συνθήκη τερματισμού (5.7) ισχύει, η ρουτίνα υπολογισμού τερματίζεται, διαφορετικά επαναλαμβάνεται η διαδικασία επαναυπολογίζοντας τον Ιακωβιανό πίνακα με βάση την νέα εκτίμηση για τις μεταβλητές του προβλήματος.

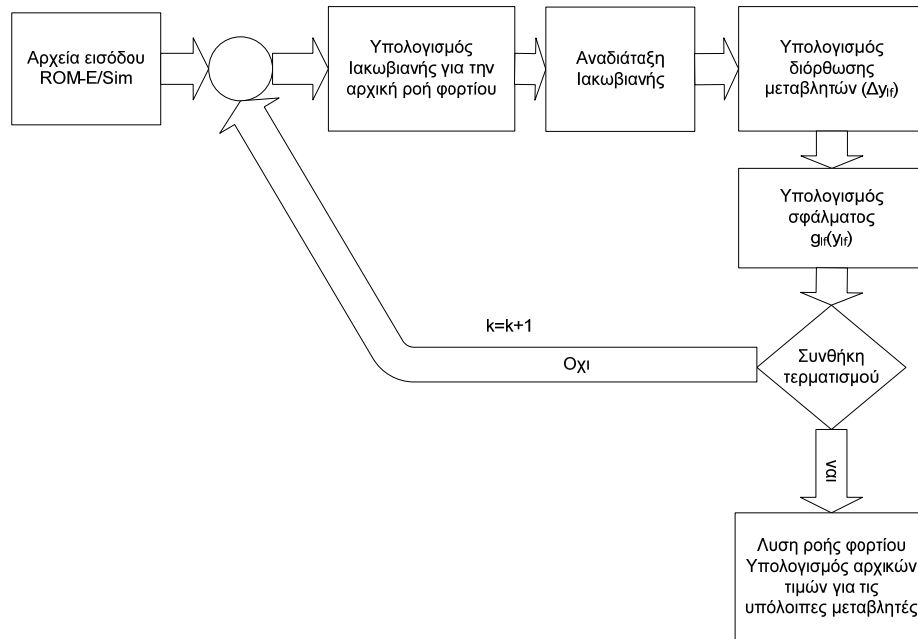
Επειδή ο πίνακας  $\mathbf{J}_{\text{lf}}$  είναι πίνακας μεγάλης διάστασης, η επίλυση της (5.6) γίνεται με τριγωνική παραγοντοποίηση. Ο Ιακωβιανός πίνακας αναδιατάσσεται όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.3, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απαραίτητοι υπολογισμοί για την τριγωνοποίηση. Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.2, υπολογίζονται οι τριγωνικοί πίνακες  $\mathbf{L}_{\text{JR}_{\text{lf}}}$ ,  $\mathbf{U}_{\text{JR}_{\text{lf}}}$ . Τελικά υπολογίζεται το  $\Delta y_{\text{lf}}^{(k)}$ :

$$\mathbf{J}_{\text{lf}} \Delta \mathbf{y}_{\text{lf}}^{(k)} = \mathbf{g}_{\text{lf}}(\mathbf{y}_{\text{lf}}^{(k)}) \Rightarrow \mathbf{L}_{\text{JR}_{\text{lf}}} \mathbf{U}_{\text{JR}_{\text{lf}}} \Delta \mathbf{y}_{\text{lf}}^{(k)} = \mathbf{g}_{\text{lf}}(\mathbf{y}_{\text{lf}}^{(k)}) \quad (5.8)$$

Με το  $\Delta \mathbf{y}_{\text{lf}}^{(k)}$  διορθώνεται το διάνυσμα των μεταβλητών:

$$\mathbf{y}_{\text{lf}}^{(k+1)} = \mathbf{y}_{\text{lf}}^{(k)} + \Delta \mathbf{y}_{\text{lf}}^{(k)} \quad (5.9)$$

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται αναλυτικότερα το διάγραμμα ροής του αρχικού τμήματος του λογισμικού. Με βάση τον υπολογισμό των μέτρων και των γωνιών των τάσεων κάθε ζυγού, και της έγχυσης ενεργού ισχύος των γεννητριών, αρχικοποιούνται οι εσωτερικές μεταβλητές των γεννητριών, των αυτόματων ρυθμιστών τάσης, των μονάδων παραγωγής και των ρυθμιστών στροφών. Διαμορφώνεται συνεπώς ένα αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος, το οποίο αντιστοιχεί σε μόνιμη κατάσταση.



Σχήμα 5.2: Αναλυτικό διάγραμμα ροής αρχικής ροής φορτίου

### 5.2.2. Δομή Ιακωβιανού πίνακα

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.1.3, η τεχνική επίλυσης των εξισώσεων του προβλήματος είναι η Newton-Rapson. Η τεχνική αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 1.7.3. Στο αρχικό τμήμα του λογισμικού πακέτου, διαμορφώνεται και η δομή του Ιακωβιανού πίνακα (ο οποίος είναι απαραίτητος για την επίλυση των εξισώσεων), δομή η οποία είναι αναλλοίωτη για ένα δεδομένο ηλεκτρικό σύστημα.

Όπως έχει αναφερθεί, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται, ο Ιακωβιανός πίνακας αποθηκεύεται ως αραιός πίνακας στην μνήμη του λογισμικού. Η περιγραφή της πληροφορίας για τους αραιούς πίνακες συγκροτείται σε δύο επίπεδα (ενότητα 2.1). Το πρώτο αφορά την θέση των μη μηδενικών στοιχείων του πίνακα και το δεύτερο την τιμή των στοιχείων αυτών.

Έστω το σύστημα εξισώσεων που διαμορφώθηκε στην παράγραφο 4.3.2, (σχέσεις (4.34)-(4.37)):

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_{d1} \\ h_{d2} \\ \vdots \\ h_{dm} \\ h_{\omega} \\ h_{\delta_r} \\ g_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{d1} \\ g_{d1} \\ f_{d2} \\ g_{d2} \\ \vdots \\ f_{dm} \\ g_{dm} \\ f_{\omega} \\ f_{\delta_r} \\ g_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{d1} \\ 0 \\ \dot{x}_{d2} \\ 0 \\ \vdots \\ \dot{x}_{dm} \\ 0 \\ \dot{\omega} \\ \dot{\delta}_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

και αντίστοιχα οι μεταβλητές είναι:

$$\mathbf{z}^T = [\mathbf{z}_d^T \quad \mathbf{y}_t^T] = [\mathbf{z}_{d1}^T \quad \mathbf{z}_{d2}^T \quad \dots \quad \mathbf{z}_{dm}^T \quad | \quad \mathbf{y}_t^T] \quad (5.11)$$

Ο Ιακωβιανός πίνακας ενός συνόλου συναρτήσεων  $\mathbf{h}$ , με μεταβλητές  $\mathbf{z}$  διαστάσεων  $m$ , όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 1.7.3 είναι:

$$\mathbf{J} = \mathbf{D}_z \mathbf{h} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial z_1} & \frac{\partial h_1}{\partial z_2} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial z_m} \\ \frac{\partial h_2}{\partial z_1} & \frac{\partial h_2}{\partial z_2} & \dots & \frac{\partial h_2}{\partial z_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial h_m}{\partial z_1} & \frac{\partial h_m}{\partial z_2} & \dots & \frac{\partial h_m}{\partial z_m} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Είναι προφανές, ότι το αν ένα στοιχείο του πίνακα (το  $i, j$  για παράδειγμα) είναι πάντοτε μηδενικό (ανεξαρτήτως του σημείου λειτουργίας στο οποίο γίνεται η παραγωγή) ή όχι καθορίζεται από το αν η συνάρτηση  $h_i$  επηρεάζεται από την μεταβλητή  $z_j$ . Με βάση το κριτήριο αυτό ορίζονται και τα μη μηδενικά στοιχεία του Ιακωβιανού πίνακα.

Εφόσον καθ' όλη την διάρκεια των υπολογισμών η δομή του συστήματος παραμένει σταθερή, δηλαδή το δίκτυο δεν τροποποιείται και δεν αλλάζει ο τύπος των διατάξεων ελέγχου κάθε γεννήτριας, τα μη μηδενικά στοιχεία του Ιακωβιανού πίνακα (έτσι όπως περιγράφησαν παραπάνω) παραμένουν σταθερά ως προς τα την θέση τους στον πίνακα. Συνεπώς, για την ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού φόρτου, οι πίνακες που ορίζουν την θέση των μη μηδενικών σημείων του Ιακωβιανού πίνακα ορίζονται μια φορά, στην ρουτίνα της αρχικοποίησης.

Τέλος, στο αρχικό τμήμα της εκτέλεσης ορίζεται και το διάνυσμα των μεταβλητών. Οι εξισώσεις και οι μεταβλητές περιγράφησαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Το διάνυσμα των μεταβλητών του προβλήματος (αλγεβρικές και μεταβλητές κατάστασης), με βάση την ονοματολογία που καθορίστηκε στον Πίνακα 4.1 είναι της μορφής.

$$z = \begin{bmatrix} z_d^T & y_t^T \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \underbrace{z_g^T \quad z_a^T \quad z_s^T \quad z_p^T \quad \omega^T \quad \delta_r^T}_{z_d} & \underbrace{\theta^T \quad V^T \quad \delta^T \quad \eta^T}_{y_t} \end{bmatrix}^T \quad (5.13)$$

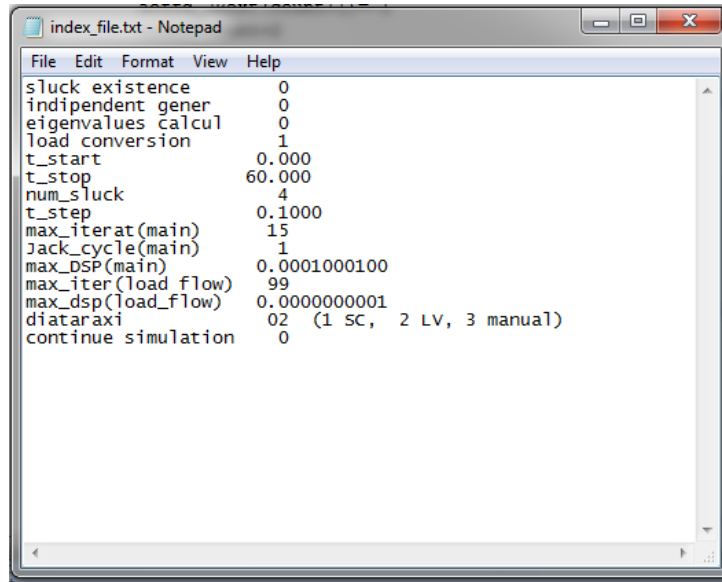
Κάθε στοιχείο στο διάνυσμα των μεταβλητών που φαίνονται στην (5.13), είναι ένα σύνολο μεταβλητών. Για παράδειγμα έστω το  $z_a$  (μεταβλητές APT). Η αναλυτική μορφή του σε αντιστοιχία με τους συμβολισμούς που χρησιμοποιήθηκαν στην ενότητα 4.8 για τους APT θα είναι:

$$z_a = \begin{bmatrix} z_{ao,1}^T & z_{ap,2}^T & \dots & z_{aq,G_e}^T \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \underbrace{z_{ao,1,1} \quad \dots \quad z_{ao,1,k_o}}_{\text{avr gener 1 of type o}} \mid z_{ap,2,1} \quad \dots \quad \dots \mid \underbrace{z_{aq,G_e,1} \quad \dots \quad z_{aq,G_e,k_q}}_{\text{avr gener } G_e \text{ of type q}} \end{bmatrix}^T \quad (5.14)$$

Ο πίνακας των μεταβλητών (5.13) είναι διαστάσεως  $(d+2N+G_e+n) \times 1$ , όπου  $d$  είναι οι μεταβλητές που σχετίζονται με τις διατάξεις ΣΗΕ,  $N$  οι ζυγοί του ΣΗΕ,  $G_e$  το πλήθος των γεννητριών,  $n$  το πλήθος των συνεκτικών περιοχών.

Το βασικό αρχείο παραμέτρων εισόδου φαίνεται στο Σχήμα 5.3: Στο αρχείο αυτό ο χρήστης επιλέγει βασικές λειτουργίες του προγράμματος.

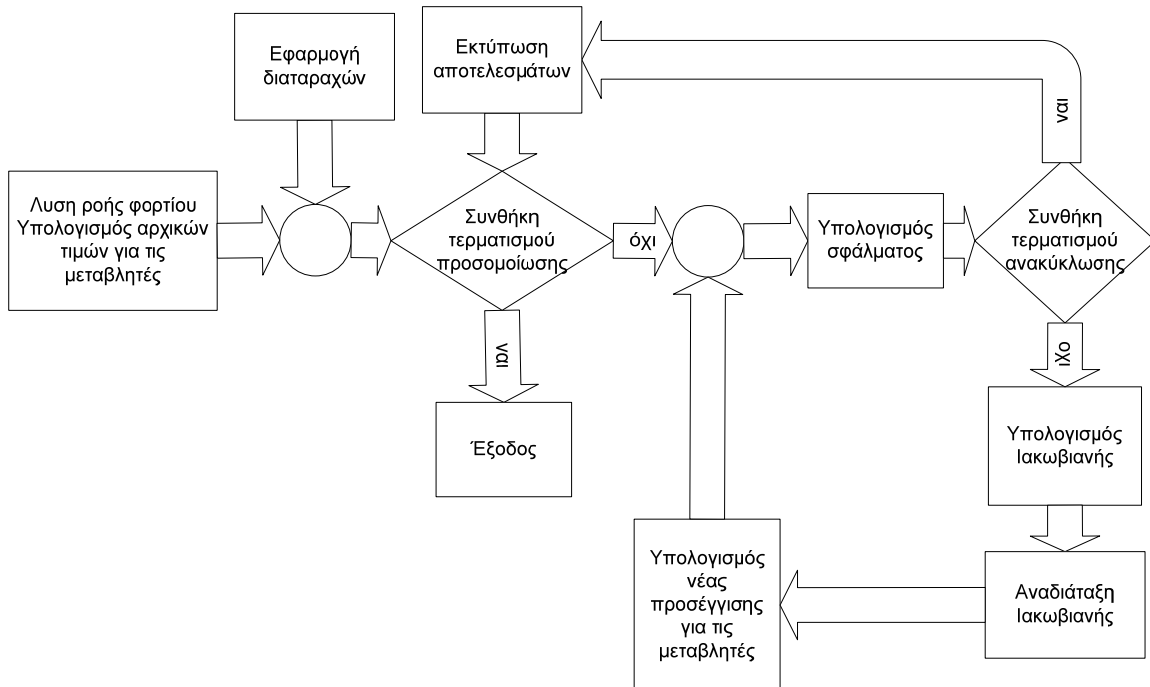
1. Αν υπάρχει άπειρος ζυγός
2. Αν θα θεωρηθούν συνεκτικές περιοχές
3. Αν θα γίνει προσομοίωση λειτουργίας ή υπολογισμός ιδιοτιμών
4. Αν θα γίνει μετατροπή των φορτίων σταθερής ισχύος σε φορτία σταθερής αγωγιμότητας
5. Χρόνος έναρξης και λήξης, προσομοίωσης καθώς και το βήμα της ολοκλήρωσης.
6. Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση του προβλήματος, καθώς και οι ανακυκλώσεις για τις οποίες δεν θα χρειάζεται να γίνεται η τριγωνική παραγοντοποίηση (LU). Επίσης ορίζεται και το μέγιστο αποδεκτό σφάλμα (ανοχή).
7. Ορίζεται το μέγιστο αποδεκτό σφάλμα και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για τον υπολογισμό της ροής φορτίου.
8. Ορίζεται τύπος διαταραχής
9. Επιλογή για συνέχιση προσομοίωσης από προηγούμενο σημείο.



Σχήμα 5.3: Αρχείο παραμέτρων εισόδου

### 5.3. Προσομοίωση

Μετά την εκτέλεση των πρώτων ρουτινών του λογισμικού πακέτου (αρχικό τμήμα), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1, με βάση τις παραμέτρους ελέγχου που εισάγει ο χρήστης, επιλέγεται ο αντίστοιχος κλάδος υπολογισμού. Στην περίπτωση όπου ο χρήστης επιλέξει προσομοίωση διαταραχής επιλέγεται ο δεξιός κλάδος, ενώ στην περίπτωση όπου επιλεχθεί η ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών επιλέγεται ο αριστερός κλάδος. Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του κλάδου της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα ροής κλάδου προσομοίωσης

Για την επίλυση των εξισώσεων και την προσομοίωση της λειτουργίας δημιουργείται ένας ενιαίος πίνακας με βάση τον οποίο προκύπτει η λύση. Ο πίνακας αυτός λύνει ταυτόχρονα τις αλγεβρικές και τις διαφορικές εξισώσεις που έχουν μετατραπεί σε αλγεβρικές με την τραπεζοειδή μέθοδο που έχει περιγραφεί στην παράγραφο 1.7.2. Διαμορφώνεται δηλαδή ένα ενοποιημένο σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων. Έστω οι διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις που περιγράφουν το ΣΗΕ (σχέσεις (4.34)-(4.37), (5.10)). Ισχύει:

$$h_d(z_d, y_t) = \begin{bmatrix} \vdots \\ \dot{z}_{d,i}, i \in I \\ \vdots \\ 0, j \notin I \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

$$0 = g_t(z_d, y_t)$$

όπου  $I$  το σύνολο που περιέχει τις διαφορικές εξισώσεις του συστήματος. Αν η γραμμή  $i$  αναφέρεται σε διαφορική εξίσωση, η τιμή της  $h_{d,i}$  ισούται με την πρώτη παράγωγο της αντίστοιχης μεταβλητής κατάστασης. Σε διαφορετική περίπτωση ισούται με το μηδέν διότι πρόκειται για αλγεβρική εξίσωση.

Η περιγραφή αυτή, σχετίζεται με το γεγονός ότι το σύνολο των εξισώσεων  $h_d$  το αποτελούν τόσο αλγεβρικές όσο και διαφορικές εξισώσεις. Όπως έχει ήδη περιγραφεί στο Κεφάλαιο 4, οι μεταβλητές  $z_d$  και συνολικότερα οι συναρτήσεις  $h_d$  είναι αυτές που περιγράφουν την λειτουργία των γεννητριών, των ρυθμιστών στροφών, των APT, και γενικότερα των διατάξεων που ορίζουν την δυναμική του συστήματος.

Για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων και την προσομοίωση χρησιμοποιείται η τραπεζοειδής μέθοδος [PAGT06], όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 1.7.2. Ισχύει με βάση την (1.55) για την  $i$  διαφορική εξίσωση του συστήματος (5.15):

$$z_{d,i} = z_{d0,i} + \frac{1}{2} (h_{d,i}(z_{d0}, y_{t0}) + h_{d,i}(z_d, y_t)) \Delta t \quad (5.16)$$

όπου  $z_{d,i}$  η τιμή της μεταβλητής στο επόμενο βήμα της ολοκλήρωσης και  $z_{d0,i}$  στο αρχικό βήμα.

Συνεπώς μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το σύστημα των εξισώσεων (5.15) μπορεί να αναχθεί στο παρακάτω σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ h_{d,i}(z_d, y_t) - \frac{2}{\Delta t} z_{d,i} + \frac{2}{\Delta t} z_{d0,i} + h_{d,i}(z_{d0}, y_{t0}), i \in I \\ \vdots \\ h_{d,j}(z_d, y_t), j \notin I \\ \vdots \end{bmatrix} = h_{dm}(z_d, y_t) \quad (5.17)$$

$$0 = g_t(z_d, y_t)$$

όπου  $h_{dm}$  οι αλγεβρικές εξισώσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή της τραπεζοειδούς μεθόδου στις εξισώσεις που αντιστοιχούν στις διατάξεις των ΣΗΕ ( $h_d$ ) ανάλογα με το αν αυτές είναι αλγεβρικές ή διαφορικές εξισώσεις.

### 5.3.1. Ο Ιακωβιανός πίνακας

Το σύστημα αυτών των εξισώσεων επιλύεται όπως και το πρόβλημα της αρχικοποίησης (ενότητα 5.2) με την μέθοδο Newton-Rapson (παράγραφος 1.7.3). Υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας με παραγωγή της (5.17).

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} D_{z_d} \mathbf{h}_{dm} & D_{y_t} \mathbf{h}_{dm} \\ D_{z_d} \mathbf{g}_t & D_{y_t} \mathbf{g}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{dm,z_d} & \mathbf{h}_{dm,y_t} \\ \mathbf{g}_{t,z_d} & \mathbf{g}_{t,y_t} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Όπως προκύπτει από την εξίσωση (5.17) μετά την παραγωγή των συναρτήσεων  $h_{dm}$  ως προς το διάνυσμα των μεταβλητών (σχέση (5.13)) ισχύει:

$$\mathbf{h}_{dm,z_d} = D_{z_d} \mathbf{h}_{dm} = \begin{bmatrix} : \\ D_{z_d} h_{d,i} - \frac{2}{\Delta t} D_{z_d} z_{d,i}, i \in I \\ : \\ D_{z_d} h_{d,j}, j \notin I \\ : \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

$$\mathbf{h}_{dm,y_t} = D_{y_t} \mathbf{h}_{dm} = D_{y_t} \mathbf{h}_d = \mathbf{h}_{d,y_t}$$

Η εξίσωση (5.19) μπορεί να τροποποιηθεί εισάγοντας έναν διαγώνιο πίνακα  $\mathbf{E}$ , στον οποίο το διαγώνιο στοιχείο  $i$  θα έχει μοναδιαία τιμή, αν η αντίστοιχη γραμμή των εξισώσεων  $h_d$  αντιστοιχεί σε διαφορική εξίσωση και μηδενική τιμή αν αυτή αντιστοιχεί σε αλγεβρική. Η διάσταση του πίνακα  $\mathbf{E}$  θα είναι  $dx \times d$ , όσες και οι εξισώσεις που αναφέρονται στις διατάξεις του συστήματος, και η νέα μορφή της (5.19) είναι ως εξής:

$$\mathbf{h}_{dm,z_d} = D_{z_d} \mathbf{h}_{dm} = D_{z_d} \mathbf{h}_d - \frac{2}{\Delta t} \mathbf{E} = \mathbf{h}_{d,z_d} - \frac{2}{\Delta t} \mathbf{E} \quad (5.20)$$

$$\mathbf{h}_{dm,y_t} = D_{y_t} \mathbf{h}_{dm} = D_{y_t} \mathbf{h}_d = \mathbf{h}_{d,y_t}$$

Συνεπώς η παράσταση του Ιακωβιανού πίνακα (5.18) τροποποιείται:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{d,z_d} & \mathbf{h}_{d,y_t} \\ \mathbf{g}_{t,z_d} & \mathbf{g}_{t,y_t} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{2}{\Delta t} \mathbf{E} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

ο πίνακας  $\mathbf{h}_{d,z_d}$  είναι διαστάσεων  $dx \times d$ , ο πίνακας  $\mathbf{h}_{d,y_t}$  διαστάσεων  $dx(2N+G_e+n)$ , ο πίνακας  $\mathbf{g}_{t,z_d}$  διαστάσεων  $(2N+G_e+n) \times d$ , και ο πίνακας  $\mathbf{g}_{t,y_t}$  διαστάσεων  $(2N+G_e+n) \times (2N+G_e+n)$ . Όπως προαναφέρθηκε  $d$  είναι οι μεταβλητές που σχετίζονται με τις διατάξεις ΣΗΕ,  $N$  οι ζυγοί του ΣΗΕ,  $G_e$  το πλήθος των γεννητριών,  $n$  το πλήθος των συνεκτικών περιοχών.

Οι υποπίνακες του Ιακωβιανού πίνακα (5.21) αναλύονται στην συνέχεια. Οι συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται βρίσκονται σε αντιστοιχία με αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 4 (Πίνακας 4.1). Με βάση την ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου μπορούν να αναλυθούν οι υποπίνακες της εξίσωσης (5.21) και να αντιστοιχηθούν τα στοιχεία τους με τις μερικές παραγώγους των εξισώσεων. Υπενθυμίζεται ότι οι συναρτήσεις  $h_d$ ,  $g_t$ ,  $G_p$ ,  $G_Q$ ,  $F_G$ ,  $G_{sys}$  αντιστοιχούν στις εξισώσεις (4.32), (4.34).



$$\mathbf{h}_{d,z_d} = \begin{bmatrix} D_{z_g} h_g & D_{z_a} h_g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_{z_a} h_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{z_s} h_s & 0 & D_{\omega} h_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{z_p} h_p & D_{\omega} h_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{\omega} h_{\omega} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{\omega} h_{\delta_r} & D_{\delta_r} h_{\delta_r} \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

$$\mathbf{h}_{d,y_t} = \begin{bmatrix} D_{\theta} h_g & D_V h_g & D_{\delta} h_g & 0 \\ 0 & D_V h_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{\eta} h_{\omega} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

$$\mathbf{g}_{t,z_d} = \begin{bmatrix} D_{z_g} G_P & 0 & D_{z_s} G_P & 0 & D_{\omega} G_P & 0 \\ D_{z_g} G_Q & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{z_g} F_G & 0 & D_{z_s} F_G & 0 & D_{\omega} F_G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{\delta_r} G_{sys} \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

$$\mathbf{g}_{t,y_t} = \begin{bmatrix} D_{\theta} G_P & D_V G_P & 0 & D_{\eta} G_P \\ D_{\theta} G_Q & D_V G_Q & D_{\delta} G_Q & 0 \\ D_{\theta} F_G & D_V F_G & D_{\delta} F_G & D_{\eta} F_G \\ 0 & 0 & D_{\delta} G_{sys} & 0 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

### 5.3.2. Βήμα ολοκλήρωσης

Έχοντας υπολογίσει το αρχικό σημείο της προσομοίωσης, και τον Ιακωβιανό πίνακα για το σημείο εκείνο, υπολογίζεται το επόμενο βήμα. Σημειώνεται ότι η προσομοίωση γίνεται με σταθερό βήμα ολοκλήρωσης. Όταν υπολογίζεται το πρώτο βήμα της ολοκλήρωσης, αρχικό σημείο είναι η λύση της αρχικοποίησης, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση, αρχικό σημείο είναι το αποτέλεσμα του προηγούμενου βήματος. Τίθεται δηλαδή στην γενική περίπτωση, ως αρχικό σημείο εκτίμησης για την τιμή των μεταβλητών στο βήμα  $t + \Delta t$  ένα προηγούμενο σημείο.

Για τον υπολογισμό  $z_d(t + \Delta t)$ ,  $y_t(t + \Delta t)$  λαμβάνουμε αρχικό σημείο το:

$$\begin{bmatrix} z_d^{(0)} \\ y_t^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_d(t) \\ y_t(t) \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Με βάση αυτό υπολογίζεται το διάνυσμα του σφάλματος. Στην επανάληψη  $k$  το διάνυσμα αυτό είναι:

$$\Delta h^{(k)} = \begin{bmatrix} h_{dm}(z_d^{(k)}, y_t^{(k)}) \\ g_t(z_d^{(k)}, y_t^{(k)}) \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

Επίσης, βάση των (5.22)-(5.25) υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας. Η διόρθωση για τις μεταβλητές του προβλήματος δίνεται από την λύση του συστήματος (5.29). Αρχικά υπολογίζεται το διάνυσμα σφάλματος ( $\Delta h$ ) και στην συνέχεια ελέγχεται αν το σφάλμα ικανοποιεί το κριτήριο της σύγκλισης (5.28):

$$\|\Delta h^{(k)}\|_{\infty} \leq \varepsilon \quad (5.28)$$

όπου  $\varepsilon$  η ανοχή σύγκλισης.

Στον βαθμό που το κριτήριο αυτό δεν πληρείται, υπολογίζεται η νέα προσέγγιση για το διάνυσμα των μεταβλητών  $[z_d \ y_t]$  με την επίλυση της (5.29), η οποία γίνεται με τριγωνική παραγοντοποίηση.

$$\mathbf{LU} \begin{bmatrix} \Delta z_d^{(k)} \\ \Delta y_t^{(k)} \end{bmatrix} = \Delta h^{(k)} \quad (5.29)$$

Με βάση την τροποποιημένη μορφή της (5.29) υπολογίζεται το διάνυσμα με το οποίο διορθώνεται η προσέγγιση των αγνώστων μεταβλητών  $[z_d^T \ y_t^T]$ . Ιδιαίτερη σημασία στην όλη διαδικασία έχει η κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού φόρτου για τους υπολογισμούς αυτούς διότι επαναλαμβάνονται για κάθε βήμα της ολοκλήρωσης. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιείται αναδιάταξη του Ιακωβιανού πίνακα με τον τρόπο που περιγράφηκε στην ενότητα 2.3. Τελικά υπολογίζεται η απαραίτητη μεταβολή των μεταβλητών και διαμορφώνεται η νέα προσέγγιση για την λύση:

$$\begin{bmatrix} z_d^{(k+1)} \\ y_t^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_d^{(k)} \\ y_t^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta z_d^{(k)} \\ \Delta y_t^{(k)} \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

Επαναυπολογίζεται το νέο σφάλμα  $\Delta h$  και επανελέγχεται το κριτήριο σύγκλισης. Στον βαθμό που αυτό δεν ικανοποιείται επαναυπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας για τις νέες τιμές των  $\begin{bmatrix} z_d^{(k+1)} & y_t^{(k+1)} \end{bmatrix}$  και επαναλαμβάνεται η διαδικασία.

Επειδή ο Ιακωβιανός πίνακας δίνει απλώς την κατεύθυνση προς την οποία πρέπει να μετατοπιστεί το διάνυσμα των μεταβλητών και δεν επηρεάζει την ακρίβεια της λύσης, δεν είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της σε κάθε επανάληψη. Για την ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού φόρτου, ο χρήστης μπορεί να ορίσει έναν αριθμό επαναλήψεων, πριν ξαναυπολογιστεί ο Ιακωβιανός.

Όταν ικανοποιηθεί το κριτήριο του σφάλματος, το οποίο φαίνεται στην (5.28) εγγράφεται στο αρχείο των αποτελεσμάτων η τιμή των μεταβλητών που αντιστοιχεί στο χρονικό σημείο  $t+\Delta t$  και ξεκινά ο υπολογισμός των μεταβλητών για το επόμενο βήμα της ολοκλήρωσης.

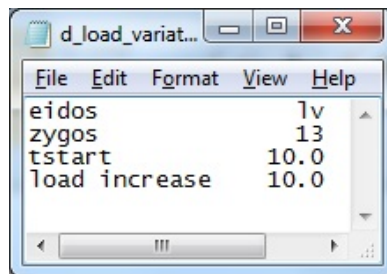
Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή του αρχικού σημείου για τον υπολογισμό του επόμενου χρονικού βήματος προσομοίωσης, τροποποιείται στην περίπτωση τριφασικού

βραχυκυκλώματος. Κατά την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος το σύστημα επαναφέρεται σε μια κατάσταση που προσιδιάζει αρκετά στην αρχική κατάσταση του συστήματος (πριν την εκδήλωση του σφάλματος). Η ομοιότητα αυτή δεν σχετίζεται με την ευστάθεια του συστήματος, όσο με το γεγονός ότι πολλές μεταβλητές επαναφέρονται σε αρκετά κοντινές στις προ του σφάλματος τιμές. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.7.3 η μέθοδος Newton-Raphson απαιτεί το αρχικό σημείο να βρίσκεται κοντά στην λύση του συστήματος. Για τον λόγο αυτό μετά την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος, αρχικό σημείο της επαναληπτικής διαδικασίας θεωρείται η λύση του συστήματος των εξισώσεων την χρονική στιγμή αμέσως πριν την εκδήλωση του σφάλματος.

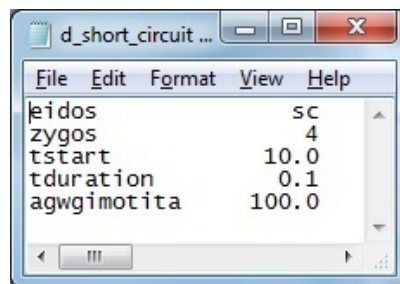
### 5.3.3. Δυνατότητες προσομοίωσης

Η λειτουργία της προσομοίωσης είναι σημαντική διότι σε αντίθεση με την ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών συμπεριλαμβάνει μη γραμμικές δυναμικές. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι οι περιοριστές στις διατάξεις ελέγχου. Με την προσομοίωση επιβεβαιώνεται ή απορρίπτεται η εκτίμηση της ανάλυσης ευστάθειας μικρών διαταραχών.

Ο χρήστης δύναται να επιλέξει μεταξύ δύο τύπων διαταραχών. Η πρώτη είναι μόνιμη μεταβολή φορτίου σε έναν υποσταθμό φορτίου, ενώ η δεύτερη είναι βραχυκύκλωμα σε έναν ζυγό. Οι διαταραχές αυτές ορίζονται μέσω των αρχείων ελέγχου, όπως και οι παράμετροι τους (ζυγός διαταραχής, χρονική στιγμή έναρξης και εκκαθάρισης). Επίσης μέσω των αρχείων αυτών μπορεί ο χρήστης να επιλέξει τις μεταβλητές οι οποίες θα τυπώνονται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης στα αρχεία εξόδου. Στην συνέχεια, στα Σχήματα 5.5-5.7 φαίνονται ενδεικτικά τα αρχεία ορισμού διαταραχών και το αρχείο ορισμού μεταβλητών εξόδου για την διαδικασία της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.5: Αρχείο ορισμού διαταραχής μόνιμης μεταβολής φορτίου



Σχήμα 5.6: Αρχείο ορισμού βραχυκυκλώματος

	1	4	85	84	29119
V-th	1	4	85	84	29119
Pm-Ef	1	35022	18404	23477	29119
w-d	1	2	3	4	5

Σχήμα 5.7: Αρχείο ορισμού μεταβλητών εξόδου

Στα αρχεία αυτά φαίνεται το είδος της διαταραχής (lv-load variation, sc-short circuit), ο ζυγός στον οποίο η μεταβολή αυτή εφαρμόζεται, ο χρόνος επιβολής διαταραχής και εκκαθάρισης σφάλματος. Ειδικότερα για την περίπτωση του βραχυκυκλώματος ορίζεται η διάρκειά του, καθώς και η αγωγιμότητα προς γη. Εκτός τυποποιημένων διαταραχών που αναφέρονται στην παρούσα παράγραφο, είναι σχετικά απλή η εισαγωγή οποιασδήποτε σύνθετης διαταραχής μέσω τροποποιήσεων του πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου σε δεδομένη χρονική στιγμή της προσομοίωσης.

Τέλος σημειώνεται ότι δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα για ορισμό του βήματος εκτύπωσης των αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση (για παράδειγμα) ενός βραχυκυκλώματος, απαιτείται μικρό βήμα προσομοίωσης. Προκειμένου να μην παραχθεί ένα μεγάλο αρχείο αποτελεσμάτων, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει κάθε πόσα βήματα, θα εκτυπώνονται τα αποτελέσματα.

## 5.4. Ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών

Η δεύτερη δυνατότητα του προγράμματος ROM-E/Sim περιλαμβάνει την ανάλυση ευστάθειας μικρών διαταραχών (για το γραμμικοποιημένο σύστημα) σε ένα σημείο λειτουργίας. Θεμελιώδες στοιχείο της ανάλυσης αυτής είναι ο υπολογισμός ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων. Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε. Μετά την αρχικοποίηση του προβλήματος ελέγχεται το πλήθος των μεταβλητών. Αν οι μεταβλητές του συστήματος έχουν πλήθος μικρότερο των χιλίων υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας. Στην συνέχεια υπολογίζεται ο πίνακας κατάστασης (παράγραφος 1.6.3), οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα του. Τα αποτελέσματα τυπώνονται σε αρχεία εξόδου. Αν το πλήθος των μεταβλητών του συστήματος (αλγεβρικών και διαφορικών) είναι μεγαλύτερο των χιλίων καλείται ο αλγόριθμος επιλεκτικού υπολογισμού ιδιοτιμών ιδιοδιανυσμάτων. Τα αποτελέσματα τυπώνονται σε αρχεία εξόδου. Στην περίπτωση που ο χρήστης το επιλέξει μπορούν να τυπωθούν επιλεγμένα ιδιοδιανύσματα (δεξιά και αριστερά) για τον υπολογισμό των ολοκληρωτικών υπολοίπων και των δεικτών ευαισθησίας.

### 5.4.1. Υπολογισμός ιδιοτιμών-ιδιοδιανυσμάτων για μικρά συστήματα

Στην περίπτωση όπου το σύστημα έχει λιγότερες από χίλιες εξισώσεις συνολικά, ο υπολογισμός γίνεται με την χρήση έτοιμης ρουτίνας υπολογισμού όλων των ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων. Όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 4 (ενότητα 4.3.2) οι εξισώσεις του προβλήματος συνοψίζονται στο σύστημα (4.34) το οποίο παρατίθεται και στην συνέχεια:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_{d1} \\ h_{d2} \\ \vdots \\ h_{dm} \\ h_{\omega} \\ h_{\delta_r} \\ g_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{d1} \\ g_{d1} \\ f_{d2} \\ g_{d2} \\ \vdots \\ f_{dm} \\ g_{dm} \\ f_{\omega} \\ f_{\delta_r} \\ g_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{d1} \\ 0 \\ \dot{x}_{d2} \\ 0 \\ \vdots \\ \dot{x}_{dm} \\ 0 \\ \dot{\omega} \\ \dot{\delta}_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

Το πρώτο βήμα είναι η αναδιάταξη των εξισώσεων του προβλήματος προκειμένου να προκύψουν διαχωρισμένες οι διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις. Η εξίσωση (5.31) τροποποιείται με βάση την λογική που περιγράφηκε στην ενότητα 2.3 και καταλήγει σε μια μορφή όπου οι αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις του συστήματος διαχωρίζονται. Το σύστημα αποκτά την μορφή της εξίσωσης (4.1):

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ 0 &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{aligned} \quad (5.32)$$

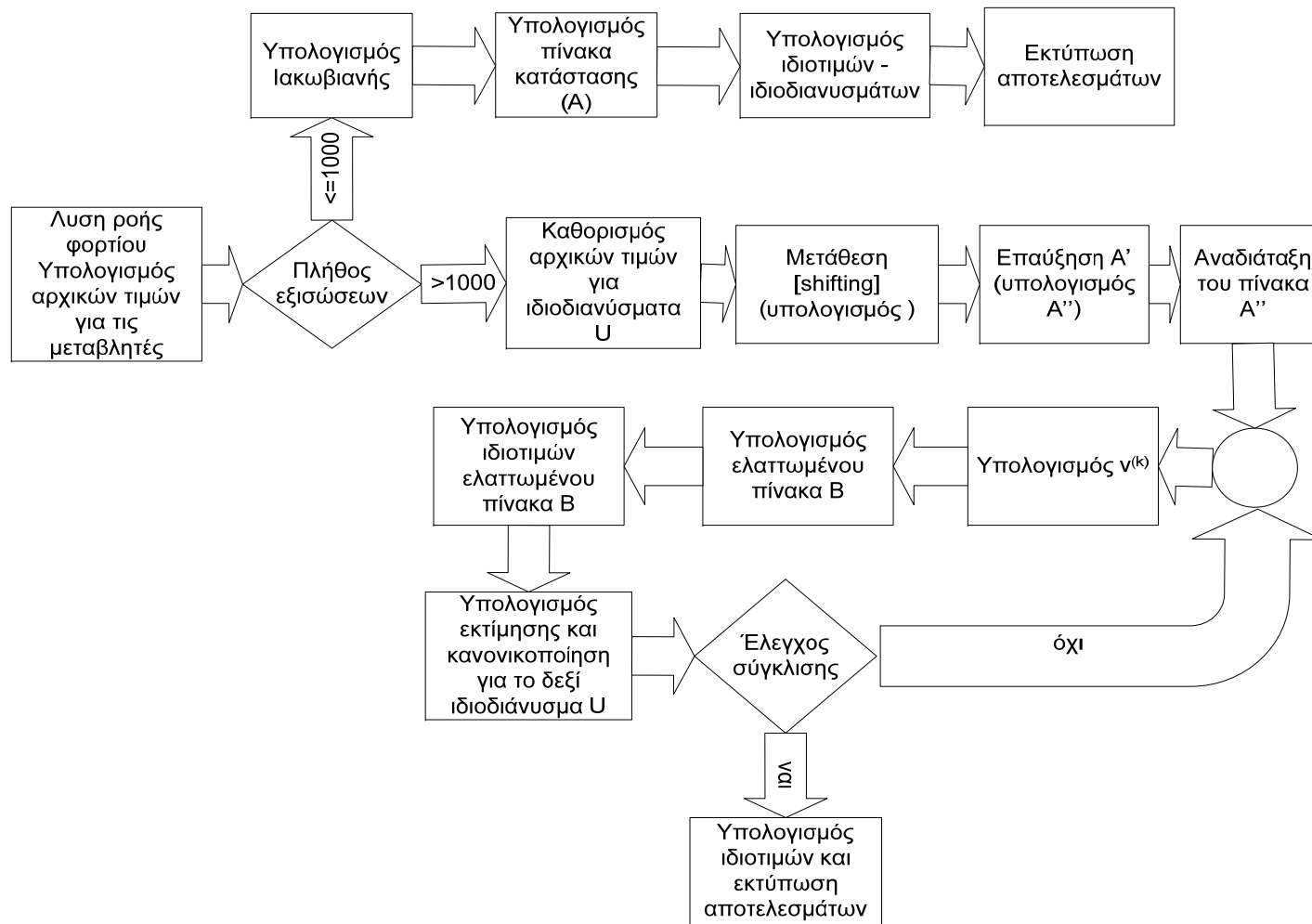
Για το σύστημα αλγεβρικών-διαφορικών εξισώσεων της μορφής (5.32), ο υπολογισμός του πίνακα κατάστασης γίνεται με βάση τις εξισώσεις στην παράγραφο (1.6.3). Με δεδομένο τον πίνακα κατάστασης οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα υπολογίζονται με χρήση έτοιμων συναρτήσεων.

#### 5.4.2. Επιλεκτικός υπολογισμός ιδιοτιμών-δεξιών ιδιοδιανυσμάτων

Στην περίπτωση όπου το σύστημα έχει περισσότερες από χίλιες εξισώσεις, ακολουθείται διαφορετική προσέγγιση. Η προσέγγιση αυτή είναι ο επιλεκτικός υπολογισμός ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων με βάση την τεχνική των ταυτόχρονων αντιστρόφων επαναλήψεων (ταυτόχρονος υπολογισμός ελάχιστων ιδιοτιμών - *simultaneous inverse iteration*) με μετάθεση (*shifting*), όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.5.2. Εδώ παρατίθεται ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε. Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζονται σε διάγραμμα ροής τα βήματα του αλγορίθμου, τα οποία στην συνέχεια αναλύονται σε βήματα:

**Βήμα 1<sup>ο</sup>:** Καθορισμός αριθμού ιδιοτιμών για ταυτόχρονο υπολογισμό:

Για κάθε ιδιοτιμή γίνεται μια αρχική εκτίμηση για το δεξιό ιδιοδιάνυσμα  $\mathbf{u}$ . Επίσης καθορίζεται και η αρχική εκτίμηση για την περιοχή στην οποία βρίσκονται οι προς υπολογισμό ιδιοτιμές ( $\lambda_{sh}$ ).



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα ροής υπολογισμού ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων

**Βήμα 2<sup>ο</sup>:** Προσέγγιση του δεξιού ιδιοδιανύσματος:

Για τον σκοπό αυτό επιλύεται το γραμμικό σύστημα εξισώσεων το οποίο βασίζεται στην εξίσωση (2.82) – (μέθοδος των αντιστρόφων δυνάμεων με μετάθεση για σύστημα αλγεβρικών-διαφορικών εξισώσεων).

$$\mathbf{A}' \mathbf{v}_i^{(k)} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{d,z_d} - \lambda_{sh} \mathbf{E} & \mathbf{h}_{d,y_t} \\ \mathbf{g}_{t,z_d} & \mathbf{g}_{t,y_t} \end{bmatrix} \mathbf{v}_i^{(k)} = \mathbf{u}_i^{(k-1)} \quad (5.33)$$

σημειώνεται ότι στην γενική περίπτωση τα  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{u}$  είναι διανύσματα με μιγαδικούς αριθμούς

όπου  $\mathbf{E}$  ο πίνακας ο οποίος όπως ορίστηκε στην εξίσωση (5.21), είναι ένας διαγώνιος πίνακας για τον οποίο τα μη μηδενικά στοιχεία ισούνται με την μονάδα και αντιστοιχούν στις διαφορικές εξισώσεις του συστήματος. Θεωρώντας  $d$  το πλήθος των μεταβλητών που σχετίζονται με τις διατάξεις ΣΗΕ,  $N$  τους ζυγούς του ΣΗΕ,  $G_e$  το πλήθος των γεννητριών,  $n$  το πλήθος των συνεκτικών περιοχών, οι διαστάσεις των μεταβλητών της σχέσης (5.33) φαίνονται στον Πίνακα 5.1:

Πίνακας 5.1: Διαστάσεις στοιχείων εξίσωσης (5.33)

Στοιχείο	Διαστάσεις
$\mathbf{h}_{d,z}, \mathbf{E}$	$d \times d$
$\mathbf{h}_{d,y_t}$	$d \times (2N + G_e + n)$
$\mathbf{g}_{t,z_d}$	$(2N + G_e + n) \times d$
$\mathbf{g}_{t,y_t}$	$(2N + G_e + n) \times (2N + G_e + n)$
$\mathbf{v}_i^{(k)}, \mathbf{u}_i^{(k-1)}$	$(d + 2N + G_e + n) \times 1$
$\mathbf{A}'$	$(d + 2N + G_e + n) \times (d + 2N + G_e + n)$

Οι μεταβλητές  $z_d$  και οι αντίστοιχες συναρτήσεις  $h_d$  περιγράφουν τις διατάξεις ελέγχου, και το δυναμικό τμήμα του συστήματος. Όμως στην γενική περίπτωση, τα τμήματα αυτά μπορεί να εμπλέκουν και αλγεβρικούς περιορισμούς όπως αναλύθηκε στις ενότητες 4.8-4.10.

Για τον λόγο αυτό τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{E}$  είναι μη μηδενικά στις γραμμές του πίνακα  $\mathbf{h}_{d,z_d}$  που αναφέρονται σε διαφορικές εξισώσεις. Η μέθοδος εφαρμόζεται όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.6.3.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πίνακες θεωρείται ότι έχουν μεγάλες διαστάσεις και συνεπώς καταχωρούνται στην μνήμη ως αραιοί πίνακες. Η επίλυση του συστήματος (5.33) δεν γίνεται με αντιστροφή του πίνακα, αλλά με χρήση της τριγωνικής παραγοντοποίησης σε έναν αυξημένο αραιό πίνακα όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.2

Ο πίνακας  $\mathbf{A}'$  στην γενική περίπτωση είναι μιγαδικός αφού αφαιρείται η μιγαδική ποσότητα  $\lambda_{sh}$  στην εξίσωση (5.33). Η επίλυση της (5.33) για τον υπολογισμό του  $\mathbf{v}_i^{(k)}$  γίνεται με την μέθοδο που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 2.5.3. Ο πίνακας  $\mathbf{A}'$  επαυξάνεται προκειμένου να προκύψει ένας νέος με πραγματικούς αριθμούς, και να επιλυθεί το σύστημα με ευθεία και αντιστροφή αντικατάσταση.

$$\begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{A}') & -\text{Im}(\mathbf{A}') \\ \text{Im}(\mathbf{A}') & \text{Re}(\mathbf{A}') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{v}_i^{(k)}) \\ \text{Im}(\mathbf{v}_i^{(k)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{u}_i^{(k-1)}) \\ \text{Im}(\mathbf{u}_i^{(k-1)}) \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

Προκύπτει ο πίνακας  $\mathbf{A}''$ :

$$\mathbf{A}'' = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{d,z_d} - \text{Re}(\lambda_{sh})\mathbf{E} & \mathbf{h}_{d,y_t} & -\text{Im}(\lambda_{sh})\mathbf{E} & 0 \\ \mathbf{g}_{t,z_d} & \mathbf{g}_{t,y_t} & 0 & 0 \\ \text{Im}(\lambda_{sh})\mathbf{E} & 0 & \mathbf{h}_{d,z_d} - \text{Re}(\lambda_{sh})\mathbf{E} & \mathbf{h}_{d,y_t} \\ 0 & 0 & \mathbf{g}_{t,z_d} & \mathbf{g}_{t,y_t} \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

Η εξίσωση (5.33) παίρνει την μορφή:

$$\mathbf{A}'' \mathbf{v}_{\text{ext},i}^{(k)} = \mathbf{A}'' \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{v}_i^{(k)}) \\ \text{Im}(\mathbf{v}_i^{(k)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{u}_i^{(k-1)}) \\ \text{Im}(\mathbf{u}_i^{(k-1)}) \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

Όπου  $\mathbf{v}_{\text{ext},i}^{(k)}$ :

$$\mathbf{v}_{\text{ext},i}^{(k)} = \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{v}_i^{(k)}) \\ \text{Im}(\mathbf{v}_i^{(k)}) \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

Στην συνέχεια, το ανεπτυγμένο διάνυσμα  $\mathbf{v}_{\text{ext},i}^{(k)}$  που υπολογίζεται επανασυμπιέεται στο διάνυσμα  $\mathbf{v}_i^{(k)}$ :

**Βήμα 3<sup>ο</sup>**: Υπολογισμός του ελαττωμένου πίνακα  $\mathbf{B}$ :

$$\left(\mathbf{U}^{(k-1)}\right)^T \mathbf{U}^{(k-1)} \mathbf{B}^{(k)} = \left(\mathbf{U}^{(k-1)}\right)^T \mathbf{V}^{(k)} \quad (5.38)$$

όπου  $\mathbf{U}^{(k-1)}$ ,  $\mathbf{V}^{(k)}$  αν  $m$  ο αριθμός των ταυτοχρόνως υπολογιζόμενων ιδιοτιμών:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}^{(k-1)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1^{(k-1)} & \dots & \mathbf{u}_m^{(k-1)} \end{bmatrix} \\ \mathbf{V}^{(k)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^{(k)} & \dots & \mathbf{v}_m^{(k)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.39)$$

και οι δύο πίνακες της (5.39) έχουν διάσταση  $(d+2N+G_e+n) \times m$ .

Ο πίνακας  $\mathbf{B}^{(k)}$  διάστασης  $m \times m$  παίρνει την μορφή:

$$\mathbf{B}^{(k)} = \left( \left( \mathbf{U}^{(k-1)} \right)^T \mathbf{U}^{(k-1)} \right)^{-1} \left( \mathbf{U}^{(k-1)} \right)^T \mathbf{V}^{(k)} \quad (5.40)$$

Ο πίνακας  $\mathbf{B}$  δεν έχει μεγάλες διαστάσεις, όπως και οι πίνακες  $\mathbf{U}^{(k-1)}$ ,  $\mathbf{V}^{(k-1)}$ . Συνεπώς οι πράξεις είναι απλές και γίνονται με την χρήση έτοιμων συναρτήσεων πολλαπλασιασμού μιγαδικών πινάκων και αντιστροφής.

**Βήμα 4<sup>ο</sup>**: Υπολογισμός ιδιοτιμών και του δεξιού ιδιοδιανύσματος του πίνακα  $\mathbf{B}$ :

Θεωρείται  $\mathbf{P}$ , ο πίνακας που περιέχει τα δεξιά ιδιοδιανύσματα και  $\lambda_B$  οι ιδιοτιμές του πίνακα  $\mathbf{B}$ .

**Βήμα 5<sup>ο</sup>**: Υπολογίζεται η εκτίμηση για το δεξί ιδιοδιάνυσμα του αρχικού πίνακα:

$$\mathbf{U}^{(k)} = \mathbf{V}^{(k)} \mathbf{P}^{(k)} \quad (5.41)$$

Τα ιδιοδιανύσματα που υπολογίστηκαν κανονικοποιούνται ως εξής:

Σε κάθε ιδιοδιάνυσμα μηδενίζονται τα στοιχεία τα οποία αντιστοιχούν σε αλγεβρικές εξισώσεις. Στα υπόλοιπα μη μηδενικά στοιχεία (τα οποία είναι μιγαδικοί αριθμοί) υπολογίζεται το μέτρο και επιλέγεται το στοιχείο με το μεγαλύτερο μέτρο. Για το στοιχείο αυτό (έστω το  $w$ -ιοστό) για την  $i$ -ιοστή ιδιοτιμή:



$$\begin{aligned} e &= \text{real}(\mathbf{U}^{(k)}(\mathbf{w}, \mathbf{i})) \\ f &= \text{imag}(\mathbf{U}^{(k)}(\mathbf{w}, \mathbf{i})) \end{aligned} \quad (5.42)$$

Με βάση τις παραμέτρους  $e$ ,  $f$  κανονικοποιούνται τα ιδιοδιανύσματα ως εξής (για το  $i$ -στό ιδιοδιάνυσμα και το  $v$ -στό στοιχείο του):

$$\mathbf{R}(\mathbf{v}, \mathbf{i}) = \frac{\text{real}(\mathbf{U}(\mathbf{v}, \mathbf{i}))e + \text{imag}(\mathbf{U}(\mathbf{v}, \mathbf{i}))f}{e^2 + f^2} + j \frac{-\text{real}(\mathbf{U}(\mathbf{v}, \mathbf{i}))f + \text{imag}(\mathbf{U}(\mathbf{v}, \mathbf{i}))e}{e^2 + f^2} = \mathbf{U}^{(k)} \quad (5.43)$$

**Βήμα 6<sup>ο</sup>:** Έλεγχος σύγκλισης:

Στο σημείο αυτό υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ των ιδιοτιμών του πίνακα  $\mathbf{B}$  που υπολογίστηκαν στο τρέχον βήμα, με τις ιδιοτιμές που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο. Αν ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης, τότε θεωρείται ότι ο αλγόριθμος συνέκλινε, διαφορετικά με το νέο πίνακα  $\mathbf{U}^{(k)}$  επιστρέφει ο αλγόριθμος στο Βήμα 2. Με βάση τον πίνακα  $\mathbf{U}^{(k)}$  υπολογίζονται τα  $u_i^{(k)}$ . Το κριτήριο σύγκλισης βασίζεται στις προσεγγίσεις για κάθε ιδιοτιμή:

$$\|\Delta \lambda_{B,i}\|_2 = \|\lambda_{B,i}^{(k)} - \lambda_{B,i}^{(k-1)}\|_2 \leq \varepsilon_\lambda \quad (5.44)$$

όπου  $\lambda_B^{(k)}$  οι ιδιοτιμές του πίνακα  $\mathbf{B}$  που προκύπτουν στην  $k$  επανάληψη. Όταν η μεταβολή μιας ιδιοτιμής ανάμεσα σε δύο επαναλήψεις ικανοποιεί το κριτήριο (5.44), η συγκεκριμένη ιδιοτιμή θεωρείται ότι συνέκλινε. Όταν συγκλίνουν  $m$ - $g_v$  ιδιοτιμές (όπου  $m$  το πλήθος των ταυτοχρόνως υπολογιζόμενων ιδιοτιμών και  $g_v$  το πλήθος των διανυσμάτων προστασίας – παράγραφος 2.6.4) ο αλγόριθμος τερματίζεται.

**Βήμα 7<sup>ο</sup>:** Στην περίπτωση που έχει συγκλίνει ο αλγόριθμος υπολογίζονται οι ιδιοτιμές του αρχικού πίνακα βάση της ακόλουθης σχέσης:

$$\lambda_i = \lambda_{sh} + \frac{1}{\lambda_{B,i}^{(k)}} \quad (5.45)$$

### 5.4.3. Επιλεκτικός υπολογισμός αριστερών ιδιοδιανυσμάτων

Για τον υπολογισμό των αριστερών ιδιοδιανυσμάτων επαναλαμβάνεται ο αλγόριθμος για τον ανάστροφο Ιακωβιανό πίνακα. Βάση της (1.24) προκύπτει ότι το αριστερό ιδιοδιάνυσμα ενός συστήματος είναι ίσο με το δεξί ιδιοδιάνυσμα του ανάστροφου πίνακα κατάστασης:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{v}_i = \lambda_i \mathbf{v}_i \quad (5.46)$$

Συνεπώς, για ένα σύστημα της μορφής (5.32) δεδομένου του πίνακα κατάστασης (σχέση (2.74)):

$$\mathbf{A} = \mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x \quad (5.47)$$

Ο πίνακας των αριστερών ιδιοδιανυσμάτων δίνεται από την σχέση:

$$\left( \mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y (\mathbf{g}_y)^{-1} \mathbf{g}_x \right)^T \underline{\mathbf{v}}_i = \lambda_i \underline{\mathbf{v}}_i \quad (5.48)$$

Το οποίο δύναται να γραφεί με την παρακάτω μορφή:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{v}}_i \\ \mathbf{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{v}}_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.49)$$

Το σύστημα που μελετούμε δεν έχει την συγκεκριμένη μορφή, ωστόσο βάση της (5.49), της (2.76), και των πορισμάτων της παραγράφου 2.6.3 προκύπτει ότι η επανάληψη του αλγορίθμου της παραγράφου 5.4.2 με ανεστραμμένο τον Ιακωβιανό πίνακα, υπολογίζει τα αριστερά ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις ιδιοτιμές που υπολογίστηκαν.

#### 5.4.4. Υπολογισμός ολοκληρωτικών υπολοίπων για την σχεδίαση σταθεροποιητών

Ο υπολογισμός των ολοκληρωτικών υπολοίπων δίνει την ευαισθησία μετατόπισης μιας ιδιοτιμής ως προς το κέρδος του βρόχου ανατροφοδότησης μεταξύ της εισόδου και της εξόδου ενός γραμμικού συστήματος (σχέση (1.37)).

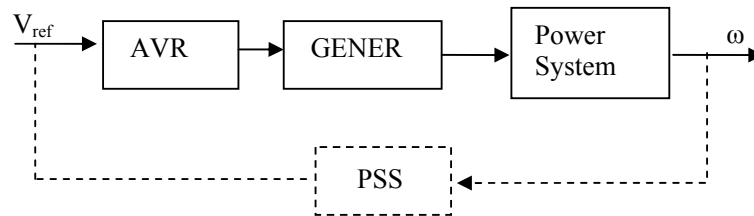
$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}x + \mathbf{B}d_{in} \\ y_{out} &= \mathbf{C}x + \mathbf{D}d_{in} \end{aligned} \quad (5.50)$$

όπου  $d_{in}$  θεωρείται το σήμα εισόδου, και  $y_{out}$  το σήμα εξόδου.

Ισχύει για το ολοκληρωτικό υπόλοιπο μιας ιδιοτιμής [PPV89] (συνάρτηση μεταφοράς με έξοδο την μεταβλητή κατάστασης  $k$  και είσοδο την μεταβλητή κατάστασης  $\ell$ ) από την σχέση (1.33):

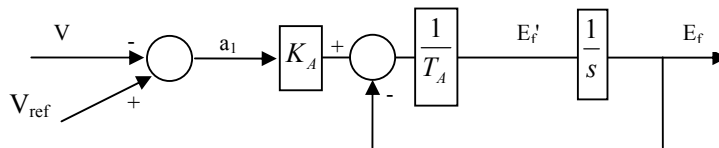
$$R_i = C_k u_i v_i^T B_\ell \quad (5.51)$$

Ως σήμα εισόδου του συστήματος, θεωρείται η παράμετρος  $z_{PSSout}$  και ως έξοδος το σήμα της συχνότητας της περιοχής στην οποία βρίσκεται η γεννήτρια. Η διάταξη αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.9:

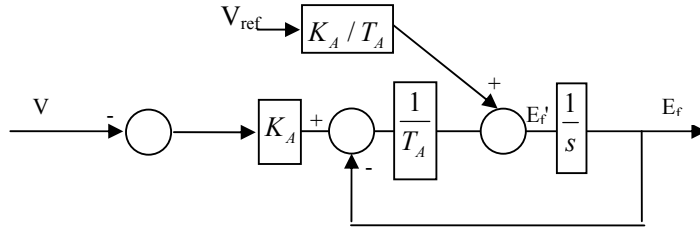


Σχήμα 5.9: Διάγραμμα συστήματος με τοποθέτηση PSS

Εφόσον, ως σήμα εισόδου θεωρείται το  $V_{ref}$ , ο πίνακας  $\mathbf{B}$  θα έπρεπε να είναι ένας μηδενικός πίνακας στήλη, ο οποίος έχει μονάδα στο κελί που αντιστοιχεί στο σήμα εισόδου. Ωστόσο το σήμα  $V_{ref}$  δεν αποτελεί μεταβλητή κατάστασης, και στην σχέση (5.50) έχουν απαλειφθεί όλες οι αλγεβρικές μεταβλητές. Συνεπώς, τα μη μηδενικά κελιά του πίνακα  $\mathbf{B}$  θα είναι οι μεταβλητές κατάστασης οι οποίες εξαρτώνται από την αλγεβρική μεταβλητή  $V_{ref}$ . Η τιμή που θα έχουν τα κελιά αυτά θα είναι η τιμή της παραγωγής ως προς  $V_{ref}$ , της πρώτης παραγωγού της μεταβλητής κατάστασης. Προφανώς αυτό σημαίνει ότι ο πίνακας  $\mathbf{B}$  τροποποιείται ανάλογα με τον τύπο του APT που αντιστοιχεί σε κάθε γεννήτρια (ενότητα 4.8). Για να αποσαφηνισθεί η λογική που περιγράφηκε παραπάνω, στην συνέχεια παρατίθεται ένα παράδειγμα για ένα απλοποιημένο μοντέλο APT.



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα βαθμίδων απλοποιημένου APT



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα βαθμίδων απλοποιημένου APT

Τα μπλοκ διαγράμματα των σχημάτων 5.10-5.11 αντιπροσωπεύουν τον ίδιο APT, και υλοποιούν την ίδια συνάρτηση μεταφοράς. Η πρώτη αντιστοιχεί στην λογική με την οποία περιγράφησαν οι APT στην ενότητα 4.8, όπου χρησιμοποιούνται και ενδιάμεσες αλγεβρικές μεταβλητές ( $a_i$ ) για να καταστρωθούν οι εξισώσεις του μοντέλου, ενώ στην δεύτερη παράσταση έχουν απαλειφθεί οι ενδιάμεσες αλγεβρικές μεταβλητές, και το σήμα εισόδου  $V_{ref}$  αποτελεί συνιστώσα της μεταβλητής κατάστασης  $E_f$ . Ο συντελεστής με τον οποίο πολλαπλασιάζεται το σήμα εισόδου πριν τον αθροιστή στο Σχήμα 5.11, είναι -όπως αναφέρθηκε και παραπάνω- η παράγωγος ως προς  $V_{ref}$  της πρώτης παραγωγού της μεταβλητής κατάστασης. Με αντίστοιχο τρόπο με την παράσταση του Σχήματος 5.11 θα περιγραφεί το σύστημα στην μορφή της (5.50). Με βάση αυτή την λογική, και για τους διαφορετικούς τύπους APT του απλοποιημένου μοντέλου της διατριβής υπολογίστηκαν οι τιμές των μη μηδενικών στοιχείων του πίνακα **B**, οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 5.2

Πίνακας 5.2: Μη μηδενικά στοιχεία του πίνακα **B** για τον υπολογισμό των ολοκληρωτικών υπολοίπων ανάλογα με τον τύπο APT της γεννήτριας

Τύπος APT	Τιμή κελιού $\partial \dot{x} / \partial V_{ref}$	Θέση	Εξισώσεις APT
APT τύπου 1 (IEET1)	$K_A / T_A$	$Z_{avr,st1}$	(4.52)
APT τύπου 2 (ESAC1A)	$G / T_A$	$Z_{avr,st1}$	(4.55)
APT τύπου 3 (ESAC4A)	$(T_b - T_c) / T_b^2$	$Z_{avr,st1}$	(4.57)
	$\frac{GT_c}{T_b T_c}$	$Z_{Ef}$	
APT τύπου 4 (EXST1)	$(T_b - T_c) / T_b^2$	$Z_{avr,st1}$	(4.59)
	$\frac{GT_c}{T_b T_c}$	$Z_{Ef}$	

Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5.2, και δεδομένου του πίνακα **C**, οποίος θα πρέπει να έχει το μοναδικό μη μηδενικό στοιχείο του (ίσο με την μονάδα), στην θέση που αντιστοιχεί στην συχνότητα της συνεκτικής περιοχής στην οποία ανήκει η γεννήτρια, υπολογίζονται τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα. Σημειώνεται ότι με αυτή την διαδικασία απλά τροποποιήθηκε η μελετούμενη συνάρτηση μεταφοράς προκειμένου να έχει ως εισόδους και εξόδους σήματα συνδεδεμένα με μεταβλητές κατάστασης - διότι τα ιδιοδιανύσματα στις θέσεις που αντιστοιχούν σε αλγεβρικές μεταβλητές έχουν μηδενική τιμή.

Ωστόσο ενώ η περιγραφή γίνεται για σύστημα που έχουν απαλειφθεί οι αλγεβρικές εξισώσεις, η προσέγγιση δεν απαιτεί τον υπολογισμό του πίνακα κατάστασης του συστήματος εφόσον ο υπολογισμός γίνεται με την σχέση (5.51). Οι πίνακες **C**, **B** ορίζονται

όπως έχει περιγραφεί, τα δεξιά και αριστερά ιδιοδιανύσματα της ιδιοτιμής, της οποίας θα υπολογιστεί το ολοκληρωτικό υπόλοιπο, υπολογίζονται με βάση τον αλγόριθμο της παραγράφου 5.4.2 και δεν τροποποιούνται αν απαλειφθούν οι αλγεβρικές εξισώσεις. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5.51) και τα στοιχεία του Πίνακα 5.2 είναι δυνατόν ο υπολογισμός των ολοκληρωτικών υπολοίπων χωρίς τον υπολογισμό του πίνακα κατάστασης του συστήματος.

#### 5.4.5. Ανάλυση ευαισθησίας ως προς το κέρδος του ρυθμιστή στροφών

Η ευαισθησία μιας ιδιοτιμής ως προς μια παράμετρο υπολογίζεται διαμέσου των δεξιών και αριστερών ιδιοδιανυσμάτων της ιδιοτιμής και του πίνακα καταστάσεως. Τα ιδιοδιανύσματα θεωρούνται δεδομένα από τον αλγόριθμο της παραγράφου 5.4.2. Επίσης, βάση της (1.31) ισχύει:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial K} = v_i^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial K} u_i \quad (5.52)$$

όπου  $K=1/R$  και  $R$  ο στατισμός της μονάδας.

Στην παράγραφο αυτή αναλύεται η τεχνική υπολογισμού της ευαισθησίας ως προς το αντίστροφο του στατισμού των μονάδων. Λόγω του γεγονότος ότι ο στατισμός αποτελεί μια εσωτερική μεταβλητή της διάταξης ρυθμιστή στροφών-στροβίλου, μπορεί να εμφανιστεί στον Ιακωβιανό πίνακα αποκλειστικά στους υποπίνακες  $D_{z_s} h_s, D_{\omega} h_s$  της (5.22) που αναφέρονται στην αντίστοιχη μονάδα παραγωγής. Συνεπώς δεν είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της παραγώγου όλου του πίνακα  $\mathbf{A}$  ως προς τον στατισμό, αλλά των συγκεκριμένων κελιών στα οποία εμφανίζεται μη μηδενική παράγωγος και στην συνέχεια ο πολλαπλασιασμός με τα αντίστοιχα στοιχεία των ιδιοδιανυσμάτων.

Αντίστοιχα με την λογική του Πίνακα 5.1, στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται ανάλογα με τον τύπο ρυθμιστή στροφών-στροβίλου τα μη μηδενικά στοιχεία της  $\partial \mathbf{A} / \partial K$  καθώς και η θέση τους. Για τον υπολογισμό της ευαισθησίας υπολογίζεται ο πίνακας κατάστασης καθώς και τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα και ιδιοτιμές.

Πίνακας 5.2: Μη μηδενικά στοιχεία της παραγώγου του πίνακα κατάστασης ως προς το κέρδος του ρυθμιστή στροφών-στροβίλου ανάλογα με τον τύπο του

Τύπος ρυθμιστή στροφών-στροβίλου	Τιμή κελιού $\left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial K}\right)$	Θέση	Εξισώσεις
IEEEG1	$(T_1 - T_2) / T_1^2$	$Z_{sgt1}, \omega_k$	(4.63)
	$-\frac{T_2}{T_3 T_1}$	$Z_{sgt2}, \omega_k$	
TGOV1	$-\frac{1}{T_1}$	$Z_{gov}, \omega_k$	(4.65)
HYGOV	$\frac{r}{T_r} \frac{R^2}{(R+r)^2}$	$Z_c, Z_c$	(4.67)
IEEEG3	$\frac{R^2}{T_p T_g}$	$Z_{HT2}, Z_{HT3}$	(4.70)

Δεδομένων των ιδιοδιανυσμάτων αλλά και της θέσης και της τιμής των μη μηδενικών στοιχείων του  $\partial\mathbf{A} / \partial\mathbf{K}$  υπολογίζονται οι ευαισθησίες της ιδιοτιμής ως προς τον στατισμό κάθε μονάδας.

#### **5.4.6. Σχεδίαση σταθεροποιητή ισχύος**

Τέλος, έχοντας υπολογίσει τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα και τις αντίστοιχες ιδιοτιμές, γίνεται η σχεδίαση των σταθεροποιητών ισχύος. Η διαδικασία αυτή γίνεται εξωτερικά του λογισμικού χρησιμοποιώντας συναρτήσεις που υλοποιούν τις τεχνικές σχεδίασης σε Matlab. Η σχεδίαση των σταθεροποιητών χρησιμοποιεί τα μοντέλα που περιγράφησαν στις ενότητες 3.4 και 4.10, και γίνεται με τις τεχνικές σχεδίασης που περιγράφησαν στην ενότητα 3.5.

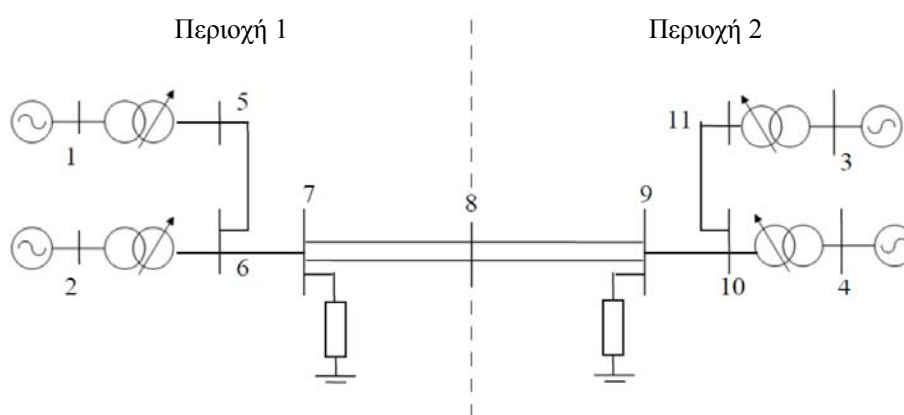
Η διαδικασία σχεδίασης περιλαμβάνει τον καθορισμό της κατάλληλης γεννήτριας για την τοποθέτηση του σταθεροποιητή, τον καθορισμό των χρονικών σταθερών της προκειμένου να εισάγεται η κατάλληλη φάση στις επιθυμητές συχνότητες και να επιτυγχάνεται η αύξηση της απόσβεσης του ρυθμού, και τέλος τον καθορισμό του κέρδους.

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο (σύστημα 11 ζυγών, τεσσάρων γεννητριών) υλοποιούνται οι τεχνικές σχεδίασης σταθεροποιητή ισχύος που περιγράφησαν στις παραγράφους 3.5.1, 3.5.2, ενώ στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο (βαλκανικό σύστημα) υλοποιούνται οι τεχνικές σχεδίασης συνδυασμένου σταθεροποιητή ισχύος που περιγράφηκαν στις παραγράφους 3.5.3, 3.5.4.

## 6. Εφαρμογή σε σύστημα δύο περιοχών

### 6.1. Περιγραφή δοκιμαστικού συστήματος

Τα μοντέλα που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3, καθώς και η προσέγγιση που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4 υλοποιούνται σε ένα σύστημα έντεκα ζυγών και τεσσάρων γεννητριών, το οποίο χρησιμοποιείται συχνά για την μελέτη διασυνδεδετικών ταλαντώσεων [ROG00]. Το σύστημα αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1 και αποτελείται από δύο περιοχές, κάθε μία από τις οποίες περιλαμβάνει δύο γεννήτριες. Οι δύο περιοχές διασυνδέονται διαμέσου της διπλής γραμμής μεταξύ των ζυγών 7 και 9, η οποία έχει μεγάλη σύνθετη αντίσταση και εκφράζει την ασθενή διασύνδεση μεταξύ τους, ενώ τα φορτία θεωρούνται σταθερές αγωγιμότητες. Το σύστημα αυτό στο εξής θα αναφέρεται ως δοκιμαστικό, και θα χρησιμοποιηθεί προκειμένου να εξεταστεί η ακρίβεια της προτεινόμενης προσέγγισης, και η αποτελεσματικότητα της για την σχεδίαση σταθεροποιητών ισχύος.

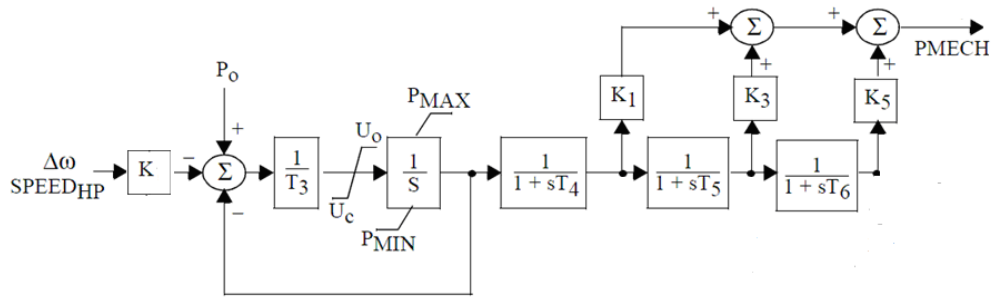


Σχήμα 6.1: Δοκιμαστικό σύστημα τεσσάρων γεννητριών - έντεκα ζυγών

Συγκεκριμένα στόχος της εφαρμογής στο δοκιμαστικό σύστημα είναι:

1. Να εκτιμηθεί το σφάλμα που εισάγεται από τη διαδικασία απλοποίησης.
2. Να επιλεγθούν τα κατάλληλα μοντέλα των διατάξεων ΣΗΕ που θα ενσωματωθούν στο μοντέλο μειωμένης τάξης.
3. Να διερευνηθεί η δυνατότητα περαιτέρω απλοποίησης των διατάξεων ΣΗΕ.
4. Να σχεδιαστούν σταθεροποιητές ισχύος.

Σχετικά με τις διατάξεις του δοκιμαστικού συστήματος θεωρείται ότι οι μονάδες παραγωγής είναι πανομοιότυπες αμοστροβλικές μονάδες τριών βαθμίδων με αναθέρμανση. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για το τμήμα ρυθμιστή στροφών-στροβίλου βασίζεται στο IEEE G1 (παράγραφος 4.9.1), το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Τέλος οι παράμετροι του συγκεκριμένου μοντέλου φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

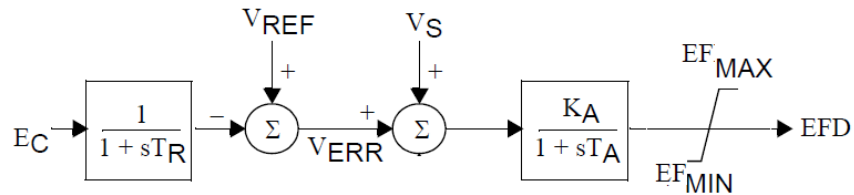


Σχήμα 6.2: Μοντέλο ρυθμιστή στροφών-στροβίλου

Πίνακας 6.1: Παράμετροι ρυθμιστών στροφών-ατμοστροβίλων

Παράμετρος	K	T <sub>3</sub> (s)	T <sub>4</sub> (s)	T <sub>5</sub> (s)	T <sub>6</sub> (s)	K <sub>1</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>5</sub>	U <sub>C</sub>	U <sub>0</sub>	P <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>
Τιμή	25	0.1	0.2	4	0.3	0.4	0.3	0.4	-0.1	0.1	0	1

Για τους αυτόματους ρυθμιστές τάσης θεωρήθηκαν δύο περιπτώσεις προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια της προτεινόμενης προσέγγισης με δύο βασικούς τύπους ΑΡΤ. Ο πρώτος τύπος είναι ο ΑΡΤ υψηλού κέρδους. Το διάγραμμα βαθμίδων φαίνεται στο Σχήμα 6.3.



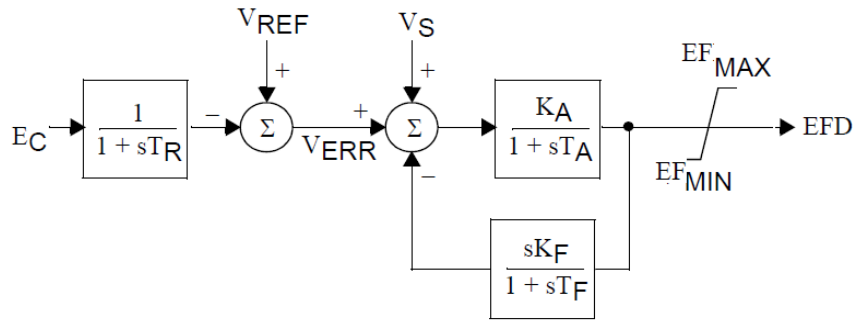
Σχήμα 6.3: Μοντέλο αυτόματου ρυθμιστή τάσης υψηλού κέρδους

Οι παράμετροι του ΑΡΤ υψηλού κέρδους φαίνονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Παράμετροι αυτόματων ρυθμιστών τάσης υψηλού κέρδους

Παράμετρος	T <sub>R</sub> (s)	K <sub>A</sub>	T <sub>A</sub> (s)	E <sub>f min</sub>	E <sub>f max</sub>
Τιμή	0.05	50	0.1	0	6

Ο δεύτερος τύπος ΑΡΤ που θεωρήθηκε για το δοκιμαστικό σύστημα είναι ρυθμιστής με διαφορική ανατροφοδότηση. Το διάγραμμα του ΑΡΤ αυτού του τύπου φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Οι παράμετροι του ΑΡΤ με διαφορική ανατροφοδότηση φαίνονται στον Πίνακα 6.3.



Σχήμα 6.4: Μοντέλο αυτόματου ρυθμιστή τάσης με διαφορική ανατροφοδότηση

Πίνακας 6.3: Παράμετροι αυτόματου ρυθμιστή τάσης με διαφορική ανατροφοδότηση

Παράμετρος	$T_R(s)$	$K_A$	$T_A(s)$	$K_F$	$T_F(s)$	$E_{f\min}$	$E_{f\max}$
Τιμή	0.05	50	0.1	0.4	4	0	6

Οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης είναι πανομοιότυποι σε όλες τις γεννήτριες είτε θεωρείται ο πρώτος είτε ο δεύτερος τύπος.

Στους Πίνακες 6.4-6.6 φαίνονται τα στοιχεία του δικτύου του Σχήματος 6.1, και το αρχικό σημείο λειτουργίας.

Πίνακας 6.4: Στοιχεία δικτύου συστήματος 11 ζυγών (Βάση ισχύος  $S_B=100MVA$ )

	R (p.u.)	X (p.u.)	$B_C$ (p.u.)
Μετασχηματιστές	-	0.0167	0
Γραμμές μεταφοράς 5-6, 10-11	0.0025	0.025	0
Γραμμές μεταφοράς 6-7, 9-10	0.001	0.01	0
Γραμμές μεταφοράς 7-8, 8-9	0.0055	0.055	0

Πίνακας 6.5: Στοιχεία φορτίων συστήματος 11 ζυγών (Βάση ισχύος  $S_B=100MVA$ )

	G	B
Φορτίο σταθερής αγωγιμότητας (ζυγός 7)	10.3777	1.2745
Φορτίο σταθερής αγωγιμότητας (ζυγός 9)	18.5355	2.8237

Τα βασικά αποτελέσματα από την εφαρμογή στο δοκιμαστικό σύστημα περιγράφονται στις εργασίες [VOM09], [VOM10]. Οι προσομοιώσεις και ο υπολογισμός των ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο υλοποιήθηκαν μέσω κατάλληλου λογισμικού το οποίο στηρίχθηκε στο περιβάλλον Matlab και Simulink.



Πίνακας 6.6: Αρχικό σημείο λειτουργίας συστήματος 11 ζυγών

No Ζυγού	P (MW)	Q (MW)	Q <sub>c</sub> (MW)	V (p.u.)	Θ (degrees)
1	700.0	178.9	0	1.03	26.8
2	700.0	220.0	0	1.01	17.1
3	700.0	168.8	0	1.03	0.0
4	718.5	185.0	0	1.01	-10.2
5	0.0	0.0	0	1.007	20.4
6	0.0	0.0	0	0.981	10.3
7	-967	-100	200	0.965	2.0
8	0.0	0.0	0	0.954	-11.8
9	-1767	-100	350	0.976	-25.2
10	0.0	0.0	0	0.986	-16.9
11	0.0	0.0	0	1.01	-6.6

## 6.2. Επίδραση παράστασης σύγχρονων γεννητριών στην ευστάθεια ταλαντώσεων

Έπειτα από την ανάλυση των διαφόρων μοντέλων για τις σύγχρονες γεννήτριες η οποία έγινε στο Κεφάλαιο 3, και των παραδοχών, στις οποίες στηρίζονται, θα πρέπει να γίνει διερεύνηση, έτσι ώστε να καταδειχθεί το απαιτούμενο επίπεδο λεπτομέρειας στην μοντελοποίηση των γεννητριών για την ικανοποιητική προσέγγιση των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων. Με άλλα λόγια θα πρέπει να ελεγχθεί η ακρίβεια με την οποία προσεγγίζονται οι διασυνδεδετικές ταλαντώσεις ως προς το μοντέλο γεννήτριας που χρησιμοποιείται.

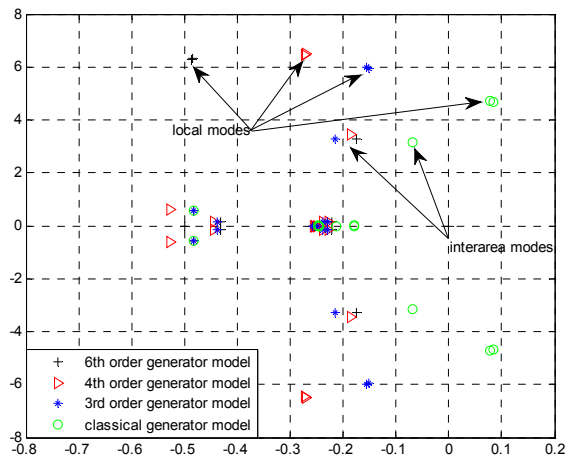
Στην κατεύθυνση αυτή υλοποιήθηκε στο περιβάλλον Simulink το λεπτομερές μοντέλο του δοκιμαστικού συστήματος το οποίο στο εξής θα ονομάζεται σύστημα (ή μοντέλο) αναφοράς και θεωρούμε ότι αποτυπώνει καλύτερα την πραγματική δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Επίσης υλοποιήθηκαν όλα τα μοντέλα γεννητριών που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3.

Θεωρώντας τη λεπτομερή μοντελοποίηση των APT και των ρυθμιστών στροφών-στροβίλων, καθώς επίσης και τις γεννήτριες ανεξάρτητες (δεν θεωρήθηκαν συνεκτικές περιοχές) διαμορφώθηκαν μια σειρά μοντέλων του δοκιμαστικού συστήματος που διαφέρουν μόνο ως προς το μοντέλο της γεννήτριας που χρησιμοποιούν. Στα μοντέλα αυτά μελετήθηκε τόσο η ευστάθεια μικρών διαταραχών, όσο και η απόκριση του συστήματος σε μια διαταραχή αύξησης φορτίου. Τέλος, σχετικά με τα μοντέλα των σύγχρονων γεννητριών, -εκτός αυτών που αναλύθηκαν στην ενότητα 3.1- εξετάζεται μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας έκτης τάξης [VPM04], το οποίο μπορεί να θεωρηθεί μια ασφαλής αναφορά σύγκρισης.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι στο μοντέλο 6ης τάξης θεωρούνται τρία τυλίγματα απόσβεσης στον δρομέα της γεννήτριας [VPM04], στο μοντέλο 4ης τάξης θεωρείται ένα τυλίγμα απόσβεσης και στο μοντέλο 3ης τάξης θεωρείται μόνο η δυναμική του πεδίου διέγερσης της γεννήτριας. Τέλος ως μοντέλο δεύτερης τάξης θεωρείται το κλασικό μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας. Στις επόμενες ενότητες, όπου θα θεωρηθούν συνεκτικές περιοχές τροποποιούνται οι εξισώσεις κίνησης του δρομέα της γεννήτριας, και συνεπώς τα μοντέλα θα αναφέρονται ανάλογα με τα δυναμικά φαινόμενα που αυτά συμπεριλαμβάνουν και όχι με την τάξη τους.

### 6.2.1. APT με διαφορική ανατροφοδότηση

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του δοκιμαστικού συστήματος με APT με διαφορική ανατροφοδότηση (Πίνακας 6.3) για διαφορετικά μοντέλα γεννητριών. Το διάγραμμα ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.5.



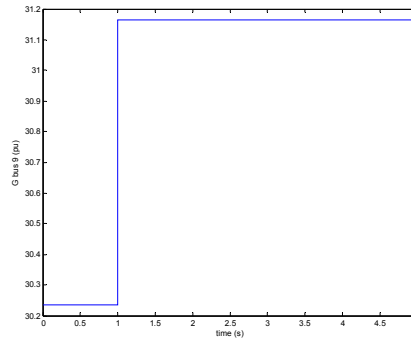
Σχήμα 6.5: Διάγραμμα ιδιοτιμών γραμμικοποιημένου συστήματος για διάφορα μοντέλα γεννητριών.

Η πρώτη και βασικότερη διαπίστωση από αυτή την διερεύνηση, είναι το γεγονός ότι η προσέγγιση με το κλασικό μοντέλο γεννήτριας –classical generator model (πράσινος κύκλος) δεν μπορεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα. Ο υπολογισμός της απόσβεσης των τοπικών και διασυνδεδειγμένων ταλαντώσεων απέχει σημαντικά από αυτή της λεπτομερούς προσέγγισης – 6<sup>th</sup> order generator model (μαύρος σταυρός). Για τον λόγο αυτό στα επόμενα διαγράμματα 6.6-6.9 δεν συμπεριλαμβάνεται η περίπτωση αυτή. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί, ότι στην εν λόγω μοντελοποίηση, ο APT θεωρείται ότι είναι αλγεβρικός. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρήση του κλασικού μοντέλου προϋποθέτει την παραδοχή ότι ο βρόχος διέγερσης της γεννήτριας φτάνει ακαριαία σε ισορροπία, λόγω της γρήγορης λειτουργίας του αυτόματου ρυθμιστή τάσης.

Σχετικά με τα υπόλοιπα τρία μοντέλα γεννητριών (στο Σχήμα 6.5) οι τοπικές ταλαντώσεις, αυξάνουν την απόσβεσή τους, όσο αυξάνει ο αριθμός των τυλίγματος απόσβεσης που θεωρούνται. Με άλλα λόγια, το μοντέλο με τα τρία τυλίγματα απόσβεσης (μαύρος σταυρός) υπολογίζει πιο αριστερά την ιδιοτιμή της τοπικής ταλάντωσης σε σχέση με τα υπόλοιπα δύο μοντέλα (τα οποία θεωρούν ένα – ή κανένα τύλιγμα απόσβεσης). Πιο συγκεκριμένα με κόκκινο τρίγωνο παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές της προσέγγισης με μοντέλο γεννήτριας τέταρτης τάξης – 4<sup>th</sup> order generator model, ενώ με μπλε αστέρι με μοντέλο γεννήτριας τρίτης τάξης – 3<sup>rd</sup> order generator model. Η διαπίστωση σχετικά με τον τοπικό ηλεκτρομηχανικό ρυθμό (local mode), αν και μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενη, δεν επαληθεύεται όμως στην περίπτωση του διασυνδεδειγμένου ρυθμού (interarea mode). Η μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην μοντελοποίηση των γεννητριών, με περισσότερα τυλίγματα απόσβεσης οδηγεί σε μειωμένη απόσβεση του διασυνδεδειγμένου ρυθμού. Εμφανίζεται λοιπόν το παράδοξο, τα τυλίγματα απόσβεσης στις γεννήτριες να εισάγουν ελαφρά αρνητική απόσβεση στον διασυνδεδειγμένο ρυθμό. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται ότι μπορεί να αποδοθεί σε αλληλεπίδραση μεταξύ των περιοχών και θα εξεταστεί περαιτέρω στην συνέχεια προκειμένου να διερευνηθούν οι παράγοντες που το επηρεάζουν.

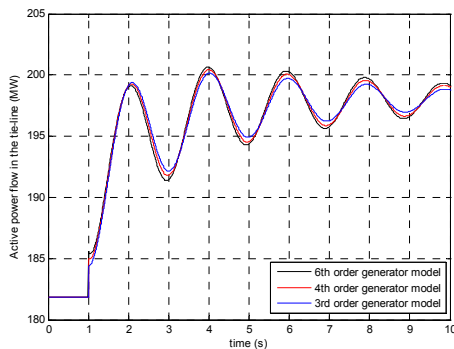
Στην συνέχεια, στα Σχήματα 6.7-6.8 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις του δοκιμαστικού συστήματος σε διαταραχή αύξησης του φορτίου στον ζυγό 9 κατά 5%, η οποία διεγείρει τον

διασυνδεδετικό ρυθμό. Ο παλμός αύξησης της εγκάρσιας αγωγιμότητας στον ζυγό 9 φαίνεται στο Σχήμα 6.6

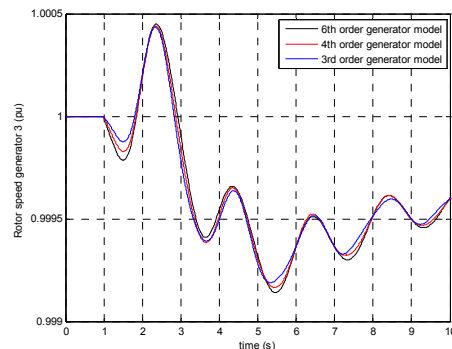


Σχήμα 6.6: Εφαρμοζόμενος παλμός αύξησης φορτίου κατά 5% στον ζυγό 9.

Τα αποτελέσματα επαληθεύουν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των ιδιοτιμών. Διεγείρεται ο διασυνδεδετικός ρυθμός, για τον οποίο και οι τρεις προσεγγίσεις εκτιμούν σωστά την συχνότητα, διαφοροποιούνται όμως ως προς την απόσβεση. Επαληθεύεται ότι το μοντέλο έκτης τάξης δείχνει ελαφρά μικρότερη απόσβεση σχετικά με το μοντέλο τέταρτης και τρίτης τάξης.

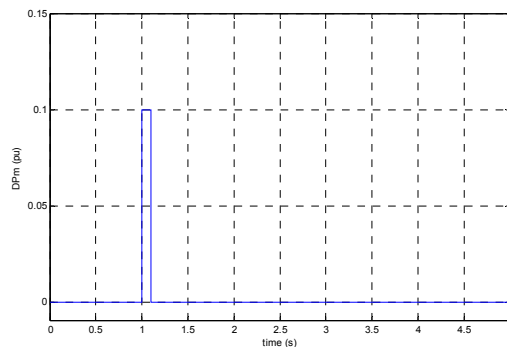


Σχήμα 6.7: Ροή ενεργού ισχύος στην διασυνδεδετική γραμμή



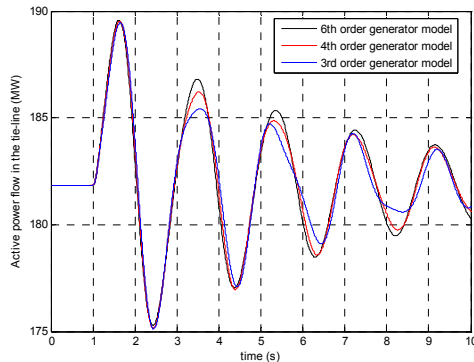
Σχήμα 6.8: Ταχύτητα δρομέα γεννήτριας 3

Η δεύτερη διαταραχή είναι η εφαρμογή ενός παλμού στην μηχανική ισχύ της γεννήτριας 1 ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 6.9.

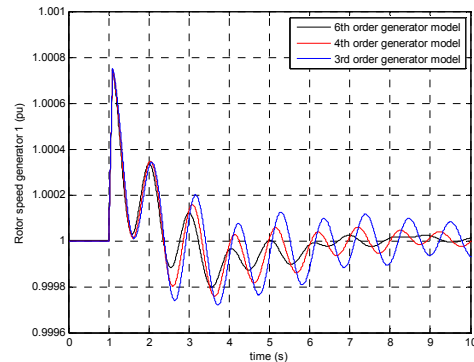


Σχήμα 6.9: Εφαρμοζόμενος παλμός στην μηχανική ισχύ της γεννήτριας 1.

Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται στα Σχήματα 6.10-6.11 οι αποκρίσεις διαφοροποιούνται. Η διαταραχή αυτή διεγείρει και τους τοπικούς ρυθμούς. Όπως φαίνεται και από τις ιδιοτιμές οι τοπικοί ρυθμοί παρουσιάζουν ελαφρά διαφορετική συχνότητα και σημαντικά διαφορετική απόσβεση ανάλογα με το μοντέλο των γεννητριών που χρησιμοποιείται. Η διαφορά αυτές είναι εμφανείς στο Σχήμα 6.11 όπου φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας 1. Η μπλε γραμμή (μοντέλο γεννήτριας 3ης τάξης) παρουσιάζει την μικρότερη απόσβεση (Σχήμα 6.11) και αντίστοιχα η μαύρη γραμμή (μοντέλο γεννήτριας 6ης τάξης) τη μεγαλύτερη απόσβεση.



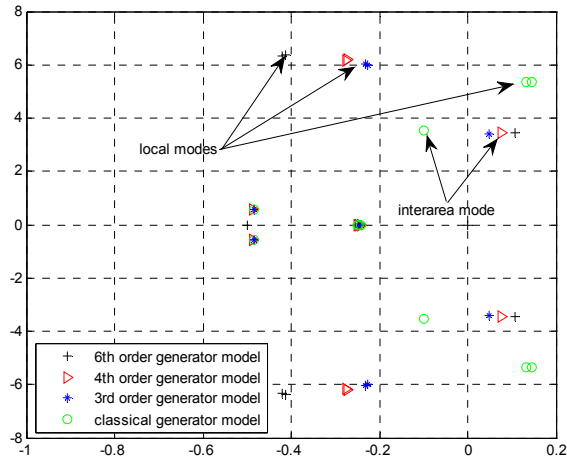
Σχήμα 6.10: Ροή ενεργού ισχύος στην διασυνδετική γραμμή



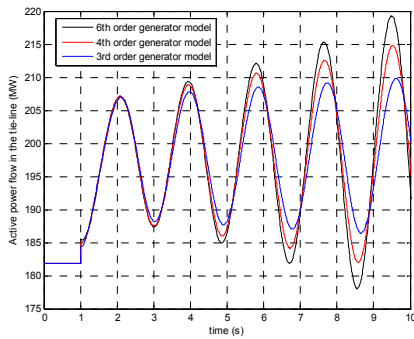
Σχήμα 6.11: Ταχύτητα δρομέα γεννήτριας 1

## 6.2.2. APT με υψηλό κέρδος (ασταθής περίπτωση)

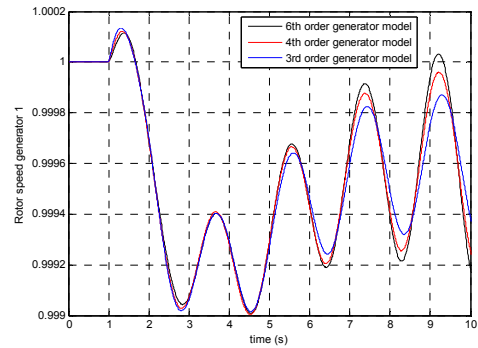
Στην περίπτωση όπου θεωρείται υψηλό το κέρδος των αυτόματων ρυθμιστών τάσης (Πίνακας 6.2), η απόκριση παρουσιάζεται ασταθής. Σημειώνεται ότι όλοι ο APT καθώς και οι ρυθμιστές στροφών θεωρούνται πανομοιότυποι. Τα αποτελέσματα ακολουθούν την συμπεριφορά που αναλύθηκε προηγουμένως. Η θεώρηση τυλιγμάτων απόσβεσης αυξάνει την απόσβεση των τοπικών ρυθμών ενώ παράλληλα μειώνει την απόσβεση του διασυνδετικού ρυθμού. Επίσης, όπως επισημάνθηκε και στην παράγραφο 6.2.1, και στην περίπτωση αυτή σημειώνεται μεγάλο σφάλμα όταν χρησιμοποιείται το κλασικό μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας. Άλλωστε, εφόσον αγνοείται η δυναμική συμπεριφορά του APT, ο υπολογισμός των ιδιοτιμών είναι ίδιος με αυτόν που έγινε στην παράγραφο 6.2.1. Στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα με τις ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου συστήματος, ενώ στα Σχήματα 6.13-6.14 η απόκριση σε διαταραχή μόνιμης αύξησης του φορτίου στον ζυγό 9 κατά 5%.



Σχήμα 6.12: Επικρατούσες ιδιοτιμές γραμμικοποιημένου συστήματος με APT αυξημένου κέρδους



Σχήμα 6.13: Ροή ενεργού ισχύος στην διασυνδετική γραμμή



Σχήμα 6.14: Ταχύτητα δρομέα γεννήτριας 1

### 6.2.3. APT με διαφορετική ανατροφοδότηση για ισχυρή διασύνδεση

Το παράδοξο που εντοπίστηκε στις Παραγράφους 6.2.1-6.2.2 όπου η θεώρηση τυλιγμάτων απόσβεσης στις σύγχρονες γεννήτριες μετατοπίζει την ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στον διασυνδετικό ρυθμό προς τα δεξιά διερευνάται περαιτέρω. Στην παρούσα και την επόμενη παράγραφο το δοκιμαστικό σύστημα τροποποιείται και οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται. Η τροποποίηση έγκειται στην θεώρηση ισχυρότερης διασύνδεσης (δύο επιπλέον διπλές γραμμές πανομοιότυπες και παράλληλα συνδεδεμένες με την υφιστάμενη διπλή γραμμή διασύνδεσης μεταξύ των ζυγών 7 και 9). Στους Πίνακες 6.7-6.8 φαίνονται τα νέα στοιχεία για το δίκτυο των 11 ζυγών και το αρχικό σημείο λειτουργίας, στην περίπτωση της ισχυρής διασύνδεσης.

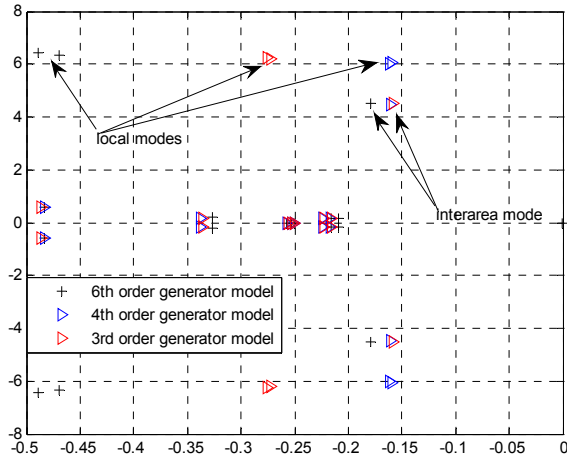
Πίνακας 6.7: Στοιχεία δικτύου συστήματος 11 ζυγών με ισχυρή διασύνδεση (Βάση ισχύος  $S_B=100MVA$ )

	R (p.u.)	X (p.u.)
Μετασχηματιστές	-	0.0167
Γραμμές μεταφοράς 5-6, 10-11	0.0025	0.025
Γραμμές μεταφοράς 6-7, 9-10	0.001	0.01
Γραμμές μεταφοράς 7-8, 8-9	0.0018	0.0183
	G	B
Φορτίο σταθερής αντίστασης (ζυγός 7)	10.3777	1.2745
Φορτίο σταθερής αντίστασης (ζυγός 9)	18.5355	2.8237

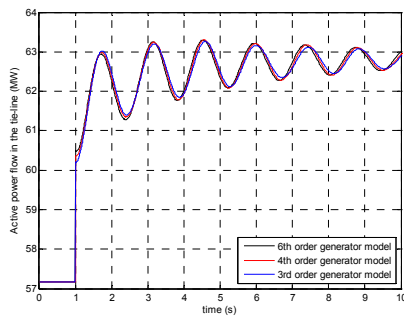
Πίνακας 6.8: Αρχικό σημείο λειτουργίας συστήματος 11 ζυγών με ισχυρή διασύνδεση

No Ζυγού	P (MW)	Q (MW)	Q <sub>c</sub> (MW)	V (p.u.)	Θ (degrees)
1	684.4	143.4	0	1.030	0.00
2	700.0	142.8	0	1.010	-9.29
3	718.5	144.1	0	1.030	-7.42
4	700.0	125.6	0	1.010	-17.51
5	0.0	0.0	0	1.013	-6.28
6	0.0	0.0	0	0.993	-15.97
7	-967	-100	200	0.988	-24.00
8	0.0	0.0	0	0.992	-28.21
9	-1767	-100	350	0.994	-32.34
10	0.0	0.0	0	0.996	-24.17
11	0.0	0.0	0	1.013	-14.01

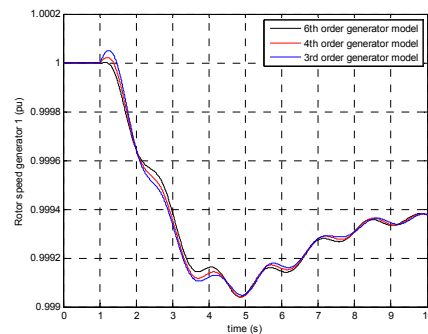
Στα Σχήματα 6.15-6.18 παρουσιάζονται οι επικρατούσες ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου συστήματος και η απόκριση στην περίπτωση αύξησης του φορτίου του ζυγού 9 όταν θεωρούνται APT με διαφορετική ανατροφοδότηση. Στα σχήματα αυτά, το παράδοξο της συνεισφοράς των τυλιγμάτων απόσβεσης των γεννητριών στον διασυνδεδετικό ρυθμό δεν εμφανίζεται. Συνεπώς, το φαινόμενο που επισημάνθηκε στις Παραγράφους 6.2.1-6.2.2 σχετίζεται έντονα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος και την αλληλεπίδραση των τυλιγμάτων απόσβεσης. Τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο της διασύνδεσης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η λεπτομερής προσέγγιση (μαύρος σταυρός) εκτιμά αυξημένη απόσβεση τόσο για τον διασυνδεδετικό όσο και για τον τοπικό ρυθμό. Επιπλέον η διαφορά μεταξύ των μοντέλων των γεννητριών τρίτης (3<sup>rd</sup> order generator model) και τέταρτης τάξης (4<sup>th</sup> order generator model) είναι οριακή όσον αφορά τον διασυνδεδετικό ρυθμό, ενώ το επιπλέον τύλιγμα απόσβεσης, εισάγει θετική απόσβεση στον τοπικό ηλεκτρομηχανικό ρυθμό. Οι αποκρίσεις σε διαταραχή αύξησης του φορτίου στον ζυγό 9 (Σχήματα 6.16.18) αντιστοιχούν στην ανάλυση ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος.



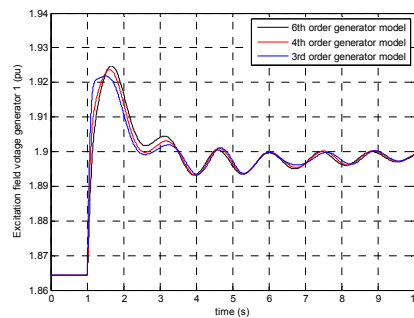
Σχήμα 6.15: Επικρατούσες ιδιοτιμές γραμμικοποιημένου συστήματος 4 γεννητριών (APT υψηλού κέρδους)



Σχήμα 6.16: Ροή ενεργού ισχύος στην διασυνδετική γραμμή



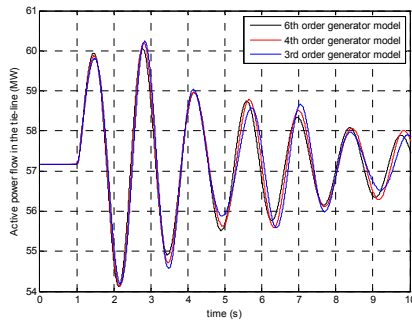
Σχήμα 6.17: Ταχύτητα δρομέα γεννήτριας 1



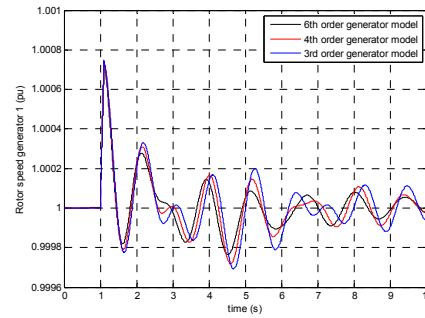
Σχήμα 6.18: ΗΕΔ διέγερσης γεννήτριας 1

Στα Σχήματα 6.19-6.20 παρουσιάζεται η απόκριση του συστήματος για εφαρμογή παλμού 10% διάρκειας 100ms στην μηχανική ισχύ της γεννήτριας 1. Στην περίπτωση αυτή διεγείρεται και ο τοπικός ηλεκτρομηχανικός ρυθμός. Όπως φαίνεται και από τις ιδιοτιμές οι τοπικοί ρυθμοί δεν διαφοροποιούνται τόσο στην συχνότητα (όπως στο βασικό σενάριο της παραγράφου 6.2.1) όσο κυρίως στην απόσβεση. Η διαφορές αυτές είναι εμφανείς στα διαγράμματα των αποκρίσεων των Σχημάτων 6.19-6.20. Η μπλε γραμμή (μοντέλο γεννήτριας

3ης τάξης) παρουσιάζει την μικρότερη απόσβεση και αντίστοιχα η μαύρη γραμμή (μοντέλο γεννήτριας 6ης τάξης) την μεγαλύτερη απόσβεση.



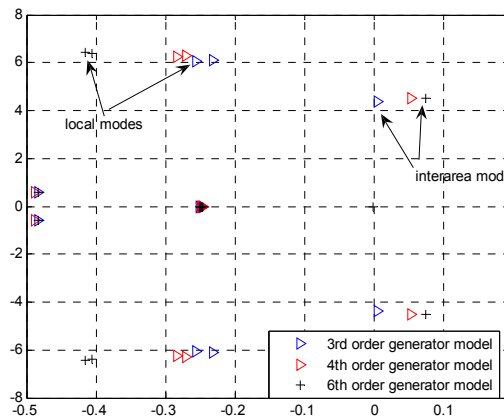
Σχήμα 6.19: Ροή ενεργού ισχύος στην διασυνδετική γραμμή



Σχήμα 6.20: Ταχύτητα δρομέα γεννήτριας 1

#### 6.2.4. APT υψηλού κέρδους για ισχυρή διασύνδεση (ασταθής περίπτωση)

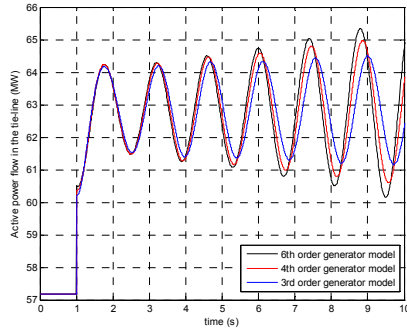
Στην περίπτωση του δοκιμαστικού συστήματος με ισχυρή διασύνδεση με APT υψηλού κέρδους (Πίνακας 6.2), η ακρίβεια στην μοντελοποίηση των γεννητριών έχει τις επιπτώσεις που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 6.2.2. Οι τοπικοί ρυθμοί (όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.21) αυξάνουν την απόσβεσή τους όσο αυξάνει η λεπτομέρεια στην μοντελοποίηση των γεννητριών (αριθμός τυλιγμάτων απόσβεσης), ενώ αντίθετα στην διασυνδετική ιδιοτιμή η μετατόπιση είναι προς τα δεξιά. Με άλλα λόγια, η αλλαγή των χαρακτηριστικών της διασύνδεσης δεν αναιρεί απαραίτητα το παράδοξο που παρατηρήθηκε στις παραγράφους 6.2.1–6.2.2. Στην περίπτωση APT με διαφορική ανατροφοδότηση (παράγραφος 6.2.3), η μοντελοποίηση τυλιγμάτων απόσβεσης αύξανε την αναμενόμενη απόσβεση του διασυνδετικού ρυθμού, κάτι που δεν εμφανίζεται στην συγκεκριμένη περίπτωση.



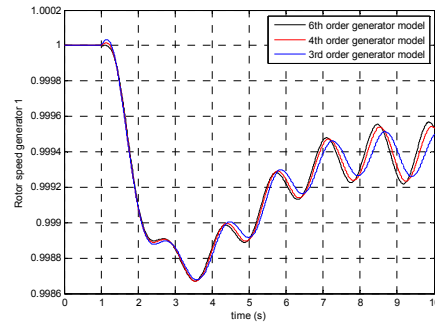
Σχήμα 6.21: Επικρατούσες ιδιοτιμές γραμμικοποιημένου συστήματος 4 γεννητριών (ενίσχυση διασύνδεσης- APT υψηλού κέρδους)

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, οι αποκρίσεις στην διαταραχή αύξησης του φορτίου στον ζυγό 9 κατά 5%, ακολουθούν τα συμπεράσματα της ανάλυσης των ιδιοτιμών (Σχήματα 6.22-6.24).

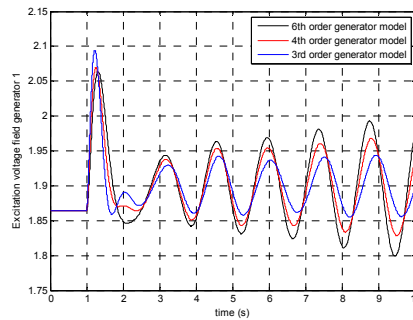




Σχήμα 6.22: Ροή ενεργού ισχύος στην διασυνδετική γραμμή



Σχήμα 6.23: Ταχύτητα δρομέα γεννήτριας 1



Σχήμα 6.24: Πεδίο διέγερσης γεννήτριας 1

### 6.2.5. Συμπεράσματα

Με βάση τόσο την ανάλυση των ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος, όσο και των αποκρίσεων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους για διάφορα επίπεδα απλοποίησης των μοντέλων των σύγχρονων γεννητριών προκύπτει ότι η μοντελοποίηση της γεννήτριας με το μοντέλο τέταρτης τάξης, το οποίο περιλαμβάνει στον δρομέα το τύλιγμα διέγερσης και ένα τύλιγμα απόσβεσης στον άξονα  $q$  μπορεί να θεωρηθεί παραπλήσιο με το μοντέλο 6ης τάξης και συνεπώς προσεγγίζει ικανοποιητικά την λεπτομερή περιγραφή του συστήματος. Στις επόμενες παραγράφους το μοντέλο γεννήτριας 4<sup>ης</sup> τάξης και τα αποτελέσματά που δίνει θα αποτελούν την αναφορά για σύγκριση με τις απλοποιήσεις που θα διερευνηθούν στην συνέχεια.

Επιπλέον, ένα βασικό συμπέρασμα είναι το γεγονός ότι η απλοποίηση των γεννητριών, μέσω της απαλοιφής των τυλιγμάτων απόσβεσης επιδρά στην εκτίμηση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ρυθμών. Για παράδειγμα, στην πρώτη περίπτωση (παράγραφος 6.2.1) οδηγεί σε υπερεκτίμηση της απόσβεσης της διασυνδετικής ιδιοτιμής, γεγονός που καταδεικνύει ότι η απλοποίηση των μοντέλων των γεννητριών είναι αρκετά σύνθετη διαδικασία, αφού οι γεννήτρες συμβάλουν σημαντικά στην διαμόρφωση του διασυνδετικού ρυθμού.

Γενικά οι τοπικοί ρυθμοί αυξάνουν την απόσβεση τους όταν περισσότερα τυλίγματα διέγερσης περιλαμβάνονται στο μοντέλο των γεννητριών. Ωστόσο, το ίδιο συμπέρασμα δεν ισχύει για την ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στον διασυνδετικό ρυθμό. Σε κάποιες περιπτώσεις, η απλοποίηση των τυλιγμάτων απόσβεσης οδηγεί σε υπερεκτίμηση της απόσβεσης της διασυνδετικής ταλάντωσης. Παρατηρήθηκε ότι η ενίσχυση της διασύνδεσης για APT με διαφορική ανατροφοδότηση (παράγραφος 6.2.3) αναιρεί το εντοπιζόμενο παράδοξο, ενώ η αλλαγή της διασύνδεσης, για APT υψηλού κέρδους (παράγραφος 6.2.4) την επιβεβαιώνει. Συμπερασματικά η χαλαρή διασύνδεση των δύο συνεκτικών περιοχών καθώς και το υψηλό

κέρδος των αυτόματων ρυθμιστών τάσης αποτελούν δύο παράγοντες που συμβάλλουν στην εμφάνιση του παραδόξου αυτού. Έτσι η απλοποίηση των τυλίγμάτων απόσβεσης των γεννητριών δεν οδηγεί απαραίτητα σε συμπεράσματα, τα οποία βρίσκονται στην ασφαλή πλευρά.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί, ότι η μοντελοποίηση με βάση το κλασικό μοντέλο οδηγεί σε εσφαλμένους υπολογισμούς. Η επίδραση του βρόχου διέγερσης στην διαμόρφωση του διασυνδεδετικού ρυθμού είναι σημαντική και για τον λόγο αυτό, δεν μπορεί να αγνοηθεί. Συνεπώς στην μοντελοποίηση των γεννητριών είναι απαραίτητη η θεώρηση της δυναμικής του τυλίγματος διέγερσης.

### **6.3. Χωρισμός περιοχών (απαλοιφή τοπικών ρυθμών)**

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 6.1, το δοκιμαστικό σύστημα διαιρείται σε δύο προφανείς συνεκτικές περιοχές. Οι περιοχές αποτελούν τμήματα του συστήματος τα οποία είναι ασθενώς διασυνδεδεμένα μεταξύ τους. Αποτέλεσμα αυτού είναι, να παρουσιάζονται ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας μεταξύ των περιοχών. Με άλλα λόγια οι δρομείς των γεννητριών κάθε περιοχής ταλαντώνονται εν φάση μεταξύ τους, ως προς τις γεννήτριες που ανήκουν στην άλλη συνεκτική περιοχή. Ο χωρισμός του δοκιμαστικού συστήματος σε δύο συνεκτικές περιοχές θα θεωρηθεί δεδομένος και ομαδοποιεί τις γεννήτριες ως εξής:

Περιοχή 1 – γεννήτριες 1, 2

Περιοχή 2 – γεννήτριες 3, 4

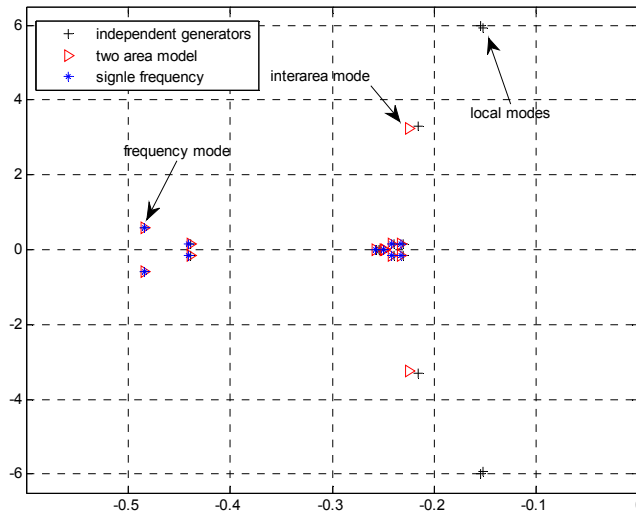
Στην παράγραφο αυτή θα διερευνηθεί η συμβολή των τοπικών ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων στην διαμόρφωση του διασυνδεδετικού ρυθμού. Με άλλα λόγια θα διερευνηθεί το σφάλμα που εισάγεται στην εκτίμηση του εν λόγω ρυθμού από την απαλοιφή των τοπικών ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων σύμφωνα με την μέθοδο που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4 στην ενότητα 4.2.

Για την διερεύνηση του σφάλματος αυτού, το σύστημα μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας πλήρη μοντέλα για τους APT και τις ατμοστροβιλικές μονάδες, ενώ για τις γεννήτριες αγνοούνται τα τυλίγματα απόσβεσης και συμπεριλαμβάνεται το τυλίγμα διεγέρσεως. Άρα στην περίπτωση του μοντέλου αναφοράς η γεννήτρια παριστάνεται με μοντέλο 3ης τάξης, ενώ στις απλοποιημένες εκδοχές με το μοντέλο της ενότητας 4.7 στο οποίο περιλαμβάνεται η δυναμική του πεδίου διεγέρσεως, απαλείφονται όμως οι διαφορικές εξισώσεις της συχνότητας και της γωνίας του δρομέα της γεννήτριας. Με άλλα λόγια, προκειμένου να διερευνηθεί αποκλειστικά η συνεισφορά της θεώρησης των περιοχών στο σφάλμα της προσέγγισης, και στις τρεις περιπτώσεις που παρουσιάζονται στην συνέχεια, οι διατάξεις του συστήματος είναι πανομοιότυπες και τα μοντέλα διαφέρουν μόνο ως προς την θεώρηση των συνεκτικών περιοχών.

#### **6.3.1. Αυτόματος ρυθμιστής τάσης με διαφορική ανατροφοδότηση**

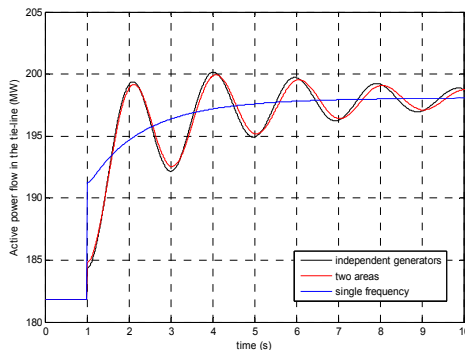
Η πρώτη περίπτωση που διερευνάται, περιλαμβάνει APT με διαφορική ανατροφοδότηση. Όπως είναι αναμενόμενο, στην περίπτωση που θεωρούνται ανεξάρτητες γεννήτριες (independent generators), εμφανίζονται οι τοπικές (local) και διασυνδεδετικές (interarea) ταλαντώσεις, στην περίπτωση που θεωρούνται δύο συνεκτικές περιοχές εμφανίζεται η διασυνδεδετική ταλάντωση, ενώ στην περίπτωση της ενιαίας συχνότητας όλου του συστήματος (μια περιοχή-single frequency) εμφανίζεται αποκλειστικά ο ρυθμός της συχνότητας. Στο Σχήμα 6.25 φαίνονται οι επικρατούσες ιδιοτιμές των τριών παραλλαγών παράστασης του συστήματος. Όπως φαίνεται, η παραδοχή των δύο συνεκτικών περιοχών (two area model) οδηγεί σε μια μικρή υπερεκτίμηση της απόσβεσης του διασυνδεδετικού ρυθμού, ενώ η συχνότητα της διασυνδεδετικής ταλάντωσης υπολογίζεται με ακρίβεια. Όσον αφορά το ρυθμό

της συχνότητας, η απλοποίηση που διερευνάται δεν επηρεάζει την ακρίβεια στην εκτίμησή του.

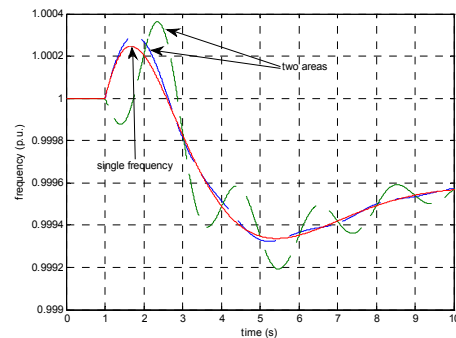


Σχήμα 6.25: Επικρατούσες ιδιοτιμές γραμμικοποιημένου συστήματος (ανεξάρτητες γεννήτριες - μοντέλο δύο περιοχών – μοντέλο ενιαίας συχνότητας)

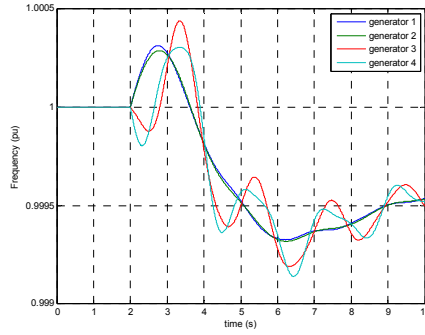
Στα Σχήματα 6.26-6.28 παρουσιάζεται η απόκριση του δοκιμαστικού συστήματος για διαταραχή αύξησης φορτίου στον ζυγό 9. Τα αποτελέσματα επαληθεύουν την ανάλυση των ιδιοτιμών. Επειδή στην συγκεκριμένη διαταραχή δεν διεγείρονται οι τοπικοί ρυθμοί, η απόκριση στην περίπτωση που οι γεννήτριες θεωρούνται ανεξάρτητες, και στην παραδοχή δύο συνεκτικών περιοχών είναι παραπλήσιες. Αντίθετα στην θεώρηση ενιαίας συχνότητας όπως ήταν αναμενόμενο δεν εμφανίζεται ηλεκτρομηχανική ταλάντωση. Ωστόσο είναι εμφανές και στις τρεις περιπτώσεις ότι η προσέγγιση του ρυθμού της συχνότητας είναι ακριβής.



Σχήμα 6.26: Ροή ενεργού ισχύος στην διασυνδετική γραμμή



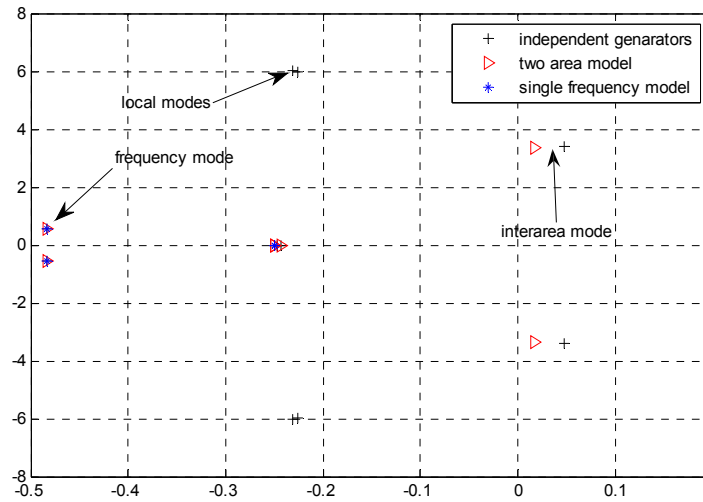
Σχήμα 6.27: Ταχύτητες δρομέων γεννητριών (δύο περιοχές - διακεκομμένη γραμμή, θεώρηση κοινής συχνότητας-συνεχής γραμμή)



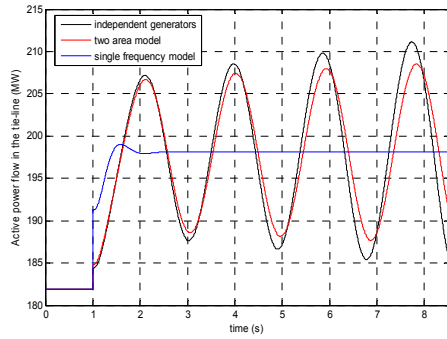
Σχήμα 6.28: Ταχύτητες δρομέων γεννητριών (ανεξάρτητες γεννήτριες)

### 6.3.2. Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης με αυξημένο κέρδος (ασταθής περίπτωση)

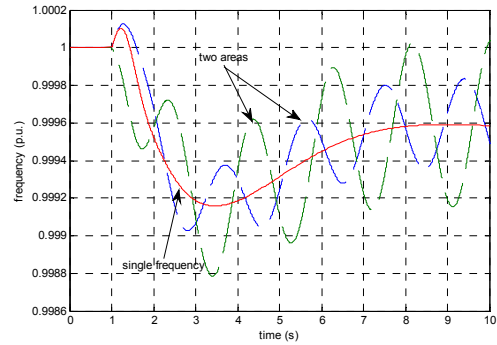
Τα στοιχεία που παρατηρήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο εμφανίζονται πιο έντονα στην ασταθή περίπτωση. Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 6.29-6.32, επειδή η αστάθεια προκαλείται από τον διασυνδεδετικό ρυθμό, το μοντέλο που θεωρεί ενιαία συχνότητα, δεν περιγράφει την αστάθεια. Το μοντέλο της ενιαίας συχνότητας εκτιμά σωστά τον ρυθμό της συχνότητας, ωστόσο δίνει ευσταθή απόκριση η οποία είναι λανθασμένη. Αντίθετα το μοντέλο δύο συνεκτικών περιοχών που αναπτύχθηκε στις ενότητες 4.2-4.3 περιγράφει το φαινόμενο, αν και με σχετικά αισιόδοξη εκτίμηση για την απόσβεση.



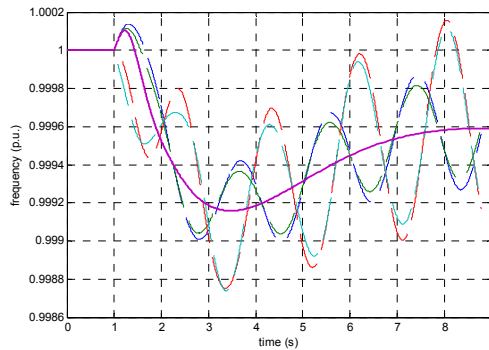
Σχήμα 6.29: Επικρατούσες ιδιοτιμές γραμμικοποιημένου συστήματος 4 γεννητριών (ανεξάρτητες γεννήτριες, μοντέλο δύο περιοχών, μοντέλο ενιαίας συχνότητας)



Σχήμα 6.30: Ροή ενεργού ισχύος στην διασυνδετική γραμμή



Σχήμα 6.31: Ταχύτητες δρομέων γεννητριών (μοντέλο δύο περιοχών -διακεκομμένη γραμμή, μοντέλο ενιαίας συχνότητας-συνεχής γραμμή)



Σχήμα 6.32: Ταχύτητες δρομέων γεννητριών (ανεξάρτητες γεννήτριες-διακεκομμένη γραμμή, μοντέλο ενιαίας συχνότητας-συνεχής γραμμή)

Συμπερασματικά και οι δύο προσεγγίσεις (ενιαίας συχνότητας, δύο συνεκτικών περιοχών) παρουσιάζουν καλή εκτίμηση του ρυθμού της συχνότητας. Το μοντέλο δύο συνεκτικών περιοχών εισάγει μικρό σφάλμα στην εκτίμηση της απόσβεσης του διασυνδετικού ρυθμού.

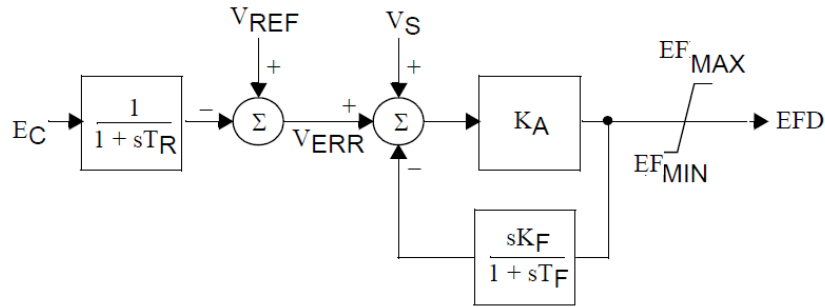
## 6.4. Ελαττωμένα μοντέλα βρόχων ελέγχου (APT και ατμοστροβιλικής μονάδας)

### 6.4.1. Ελαττωμένα μοντέλα APT

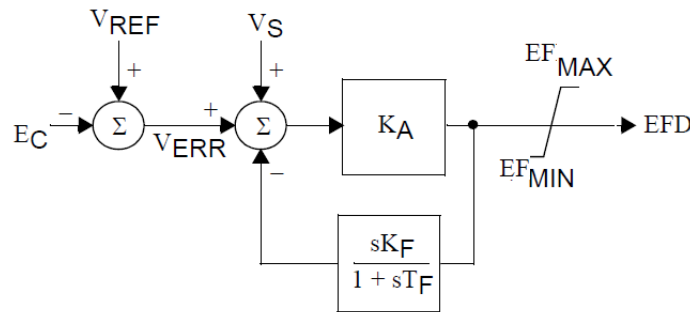
Στην παράγραφο αυτή ελέγχεται η ακρίβεια του απλοποιημένου μοντέλου σε σχέση με τον βαθμό απλοποίησης των αυτόματων ρυθμιστών τάσης. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφηκε η προτεινόμενη απλοποίηση για τον APT τύπου EXST1, ωστόσο στην παρούσα ενότητα διερευνάται το σφάλμα το οποίο εισάγει η απλοποίηση, μέσα από την εφαρμογή των μοντέλων αυτών στο δοκιμαστικό σύστημα, και εξετάζεται αν είναι δυνατή μια περαιτέρω απλοποίηση της διάταξης αυτής.

#### Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης με διαφορική ανατροφοδότηση

Για την απλοποίηση APT με διαφορική ανατροφοδότηση θα εξεταστούν δύο περιπτώσεις. Η πρώτη (απλοποίηση 1) είναι η απαλοιφή της χρονικής σταθεράς του ρυθμιστή τάσης (Σχήμα 6.33) και η δεύτερη (απλοποίηση 2) εκτός από την χρονική σταθερά του ρυθμιστή, την απαλοιφή της χρονικής σταθεράς του φίλτρου (Σχήμα 6.34).



Σχήμα 6.33: Διάγραμμα βαθμίδων απλοποιημένου APT 1



Σχήμα 6.34: Διάγραμμα βαθμίδων απλοποιημένου APT 2

Οι δύο αυτές δυνατές απλοποιήσεις ελέγχονται για το σφάλμα που εισάγουν στην εκτίμηση του διασυνδεδετικού ρυθμού, τόσο μέσω του υπολογισμού των ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος, όσο και μέσω της προσομοίωσης των αποκρίσεων σε διαταραχή.

Στα Σχήματα 6.35-6.38 εκτός των αποτελεσμάτων του απλοποιημένου μοντέλου του δοκιμαστικού συστήματος που χρησιμοποιεί τις δύο απλοποιήσεις για τον APT, περιλαμβάνονται τόσο τα αποτελέσματα του μοντέλου αναφοράς, όσο και τα αποτελέσματα του απλοποιημένου μοντέλου της Παραγράφου 6.3.1 προκειμένου να είναι ευκολότερη η σύγκριση και ο εντοπισμός του σφάλματος που εισάγει το κάθε βήμα της απλοποίησης.

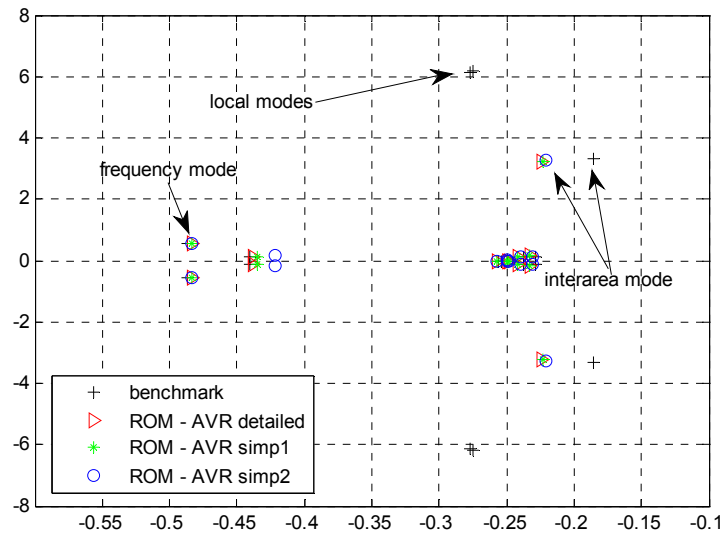
Στο Σχήμα 6.35 εκτός του μοντέλου αναφοράς (benchmark), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ιδιοτιμών για τρεις εκδοχές για το εν λόγω σύστημα θεωρώντας τη λεπτομερή παράσταση για τους ρυθμιστών στροφών.

- πλήρεις APT με διαφορεική ανατροφοδότηση (ROM AVR detailed)
- απλοποίηση 1 (ROM AVR simp1)
- απλοποίηση 2 (ROM AVR simp2)

Με την ένδειξη ROM (reduced order model) σημειώνεται στα σχήματα η απλοποιημένη παράσταση του συστήματος.

Η πρώτη παράσταση του συστήματος (Σχήμα 6.35-μαύρος σταυρός) αποτελεί το σενάριο αναφοράς, όπου οι γεννήτριες μοντελοποιούνται λεπτομερώς με το μοντέλο 4ης τάξης, με ανεξάρτητες γεννήτριες και οι APT και Ρυθμιστές Στροφών παριστάνονται επίσης λεπτομερώς. Με κόκκινο τρίγωνο παριστάνονται οι ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου συστήματος θεωρώντας δύο συνεκτικές περιοχές, και γεννήτριες στις οποίες συμπεριλαμβάνεται μόνο η δυναμική του πεδίου διέγερσης, και λεπτομερής μοντελοποίηση των APT. Με πράσινο αστέρι παριστάνονται οι ιδιοτιμές που προκύπτουν με την χρήση του

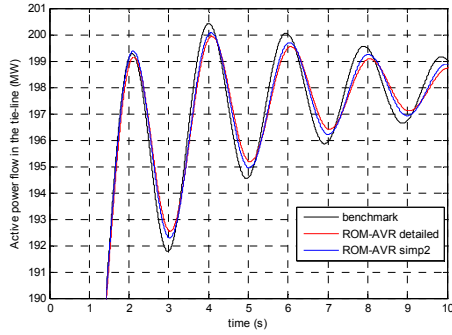
το απλοποιημένου μοντέλου 1 για τους APT, ενώ με μπλε κύκλο του απλοποιημένου μοντέλου 2.



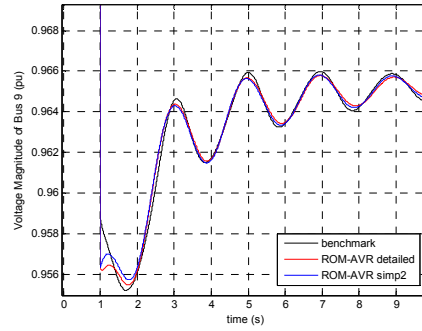
Σχήμα 6.35: Διάγραμμα ιδιοτιμών για πλήρεις και απλοποιημένες εκφράσεις του γραμμικοποιημένου συστήματος (APT με διαφορική ανατροφοδότηση)

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.35 η απλοποίηση του APT στην περίπτωση που υπάρχει διαφορική ανατροφοδότηση, δεν επηρεάζει σημαντικά τις ιδιοτιμές του συστήματος. Όπως έχει αναφερθεί, η θεώρηση των περιοχών και η χρήση απλοποιημένων μοντέλων γεννητριών εισάγει σφάλμα στον υπολογισμό της απόσβεσης της διασυνδεδετικής ταλάντωσης η οποία δεν επιτεύχεται από την διαδικασία απλοποίησης του APT. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απλοποίηση της χρονικής σταθεράς  $T_R$  του APT τείνει να μετατοπίσει την διασυνδεδετική ιδιοτιμή δεξιότερα, δηλαδή να περιορίσει την υπερεκτίμηση της απόσβεσης του διασυνδεδετικού ρυθμού.

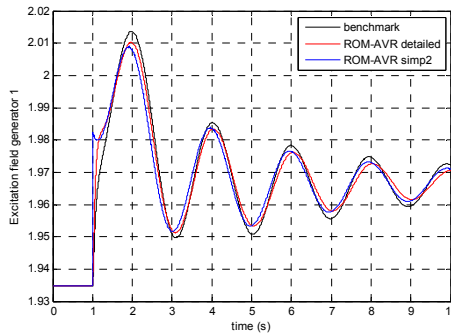
Οι αποκρίσεις του δοκιμαστικού συστήματος στην διαταραχή αύξησης του φορτίου επιβεβαιώνουν τα πορίσματα της ανάλυσης ιδιοτιμών. Λόγω του γεγονότος ότι στις δύο περιπτώσεις απλοποίησης του APT οι αντίστοιχες ιδιοτιμές δεν διαφοροποιούνται σημαντικά, και για λόγους ευκρίνειας, στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η μια εκδοχή των δύο απλοποιήσεων, αυτή στην οποία αμελείται και η χρονική σταθερά του φίλτρου (απλοποίηση 2). Οι τρεις αποκρίσεις που παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.36-6.38 επιβεβαιώνουν τα πορίσματα της ανάλυσης των ιδιοτιμών. Η απόσβεση του διασυνδεδετικού ρυθμού υπερεκτιμάται από όλα τα απλοποιημένα μοντέλα δύο συνεκτικών περιοχών. Ωστόσο, στο γεγονός αυτό δεν συμβάλει η απλοποίηση του APT, αλλά η απαλοιφή των τοπικών ταλαντώσεων και του τυλίγματος αποσβέσεως της γεννήτριας. Η κόκκινη γραμμή στις αποκρίσεις αντιπροσωπεύει το μοντέλο που μελετάται με πλήρη APT, ενώ η μπλε την ελαττωμένη παράστασή του η οποία είναι κατάτι πλησιέστερη προς την απόκριση του μοντέλου αναφοράς.



Σχήμα 6.36: Απόκριση στην διασυνδετική ροή ισχύος



Σχήμα 6.37: Μέτρο τάσης στον ζυγό 9



Σχήμα 6.38: HEA διέγερσης στην γεννήτρια 1

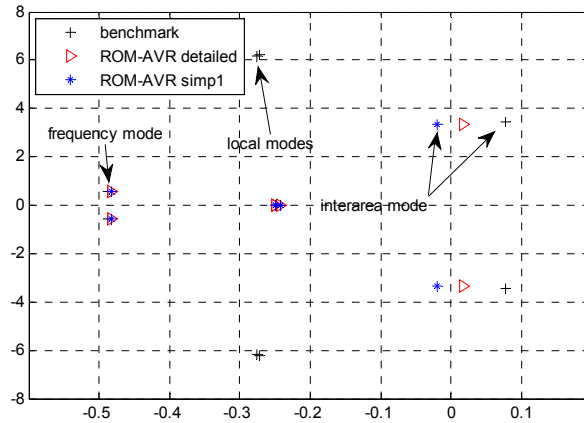
Και στις δύο προτεινόμενες απλοποιήσεις του APT επιτυγχάνονται ικανοποιητικές προσεγγίσεις. Η υπερεκτίμηση της απόσβεσης είναι παρόμοια με αυτή του μοντέλου δύο συνεκτικών περιοχών χωρίς απλοποιημένα μοντέλα APT, ενώ, η προσέγγιση της συχνότητας της διασυνδετικής ιδιοτιμής είναι ικανοποιητική. Συνεπώς η δεύτερη απλοποίηση, όπως αυτή περιγράφηκε στην αρχή της ενότητας 6.4.1 παρουσιάζει αποδεκτά επίπεδα ακρίβειας στο δοκιμαστικό σύστημα.

### Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης υψηλού κέρδους

Για τους APT υψηλού κέρδους εξετάζεται η απλοποίηση της χρονικής σταθεράς του φίλτρου, η οποία έχει και την μικρότερη τιμή. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζονται όπως και στα προηγούμενα, οι ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου συστήματος, καθώς και οι αποκρίσεις σε διαταραχές.

Στο Σχήμα 6.39 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογισμού ιδιοτιμών για το σενάριο αναφοράς και δύο απλοποιημένα μοντέλα. Το πρώτο απλοποιημένο μοντέλο είναι αυτό της Παραγράφου 6.3.2 όπου θεωρείται πλήρης ο APT ενώ στο δεύτερο συμπεριλαμβάνεται η απλοποιημένη μοντελοποίηση του APT υψηλού κέρδους. Πιο συγκεκριμένα, με μαύρο σταυρό σημαίνονται οι ιδιοτιμές του σεναρίου αναφοράς (benchmark), όπου οι γεννήτριες μοντελοποιούνται λεπτομερώς, χωρίς θεώρηση συνεκτικών περιοχών και οι APT και οι Ρυθμιστές Στροφών θεωρούνται πλήρεις. Με κόκκινο τρίγωνο εμφανίζονται οι ιδιοτιμές για την περίπτωση όπου θεωρούνται δύο συνεκτικές περιοχές, μοντέλο γεννήτριας που περιλαμβάνει το πεδίο διέγερσης και πλήρη τα μοντέλα των APT και των ρυθμιστών στροφών-στροβίλων (ROM-AVR detailed). Τέλος, με μπλε αστέρι σημειώνονται οι ιδιοτιμές του απλοποιημένου μοντέλου όπου επιπλέον των άλλων απλοποιήσεων παραλείπεται και η χρονική σταθερά του φίλτρου του APT (ROM-AVR simp1).



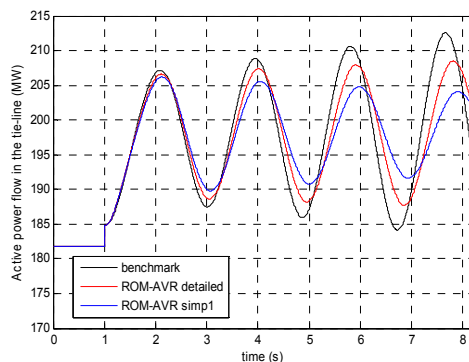


Σχήμα 6.39: Διάγραμμα ιδιοτιμών για πλήρεις και απλοποιημένες εκφράσεις του συστήματος

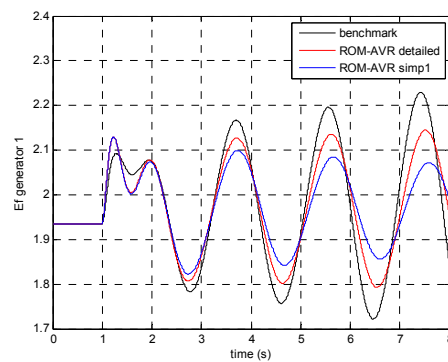
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.39, και όπως έχει αναλυθεί και στις προηγούμενες ενότητες για το δοκιμαστικό σύστημα, η απαλοιφή των τοπικών ταλαντώσεων και του τυλίγματος απόσβεσης των γεννητριών οδηγεί σε υπερεκτίμηση της απόσβεσης της διασυνδετικής ιδιοτιμής. Η περαιτέρω απλοποίηση, με την απαλοιφή της χρονικής σταθεράς του φίλτρου του APT, οδηγεί σε περαιτέρω υπερεκτίμηση της απόσβεσης. Το σφάλμα στην απόσβεση του διασυνδετικού ρυθμού στην περίπτωση αυτή είναι σημαντικό, οπότε η απλοποίηση της χρονικής σταθεράς του φίλτρου δεν είναι αποδεκτή για τον APT με υψηλό κέρδος. Συνεπώς στον συγκεκριμένο τύπο APT (υψηλό κέρδος) δεν μπορεί να απλοποιηθεί καμία χρονική σταθερά έστω και αν αυτή είναι αρκετά μικρή (όπως αυτή του φίλτρου), αφού συμβάλει σημαντικά στην συνολική απόκριση του συστήματος.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η απόκριση των διαφορετικών μοντέλων του συστήματος σε διαταραχή αύξησης της αγωγιμότητας του φορτίου στον ζυγό 9 κατά 5%.

Στα Σχήματα 6.40-6.41, επιβεβαιώνονται τα πορίσματα από την ανάλυση ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος. Η απαλοιφή του φίλτρου, μολονότι έχει μια μικρή χρονική σταθερά επιδρά στην ακρίβεια του μοντέλου διαμορφώνοντας οριακά θετική απόσβεση για τον διασυνδετικό ρυθμό. Αντίθετα στην περίπτωση του πλήρους μοντέλου APT η προσέγγιση θεωρείται ικανοποιητική.



Σχήμα 6.40: Απόκριση στην διασυνδετική ροή ισχύος



Σχήμα 6.41: ΗΕΔ διέγερσης στην γεννήτρια 1

Συμπερασματικά μόνο στην περίπτωση του λεπτομερούς μοντέλου του APT υψηλός κέρδους επιτυγχάνεται ικανοποιητική προσέγγιση. Η απαλοιφή έστω και της μικρής χρονικής σταθεράς του φίλτρου επιδρά σημαντικά στην απόσβεση του διασυνδετικού ρυθμού. Επίσης αξίζει να σχολιαστεί ότι η μικρή διαφοροποίηση στην συχνότητα βρίσκεται σε αντιστοιχία με

το γεγονός ότι η διασυνδετική ιδιοτιμή των απλοποιημένων μοντέλων έχει ελαφρώς μικρότερο φανταστικό μέρος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.39. Ωστόσο θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε περιπτώσεις APT μεγαλύτερης τάξης (με περισσότερες χρονικές σταθερές) η απλοποίηση της χρονικής σταθεράς του φίλτρου μπορεί να είναι αποδεκτή όπως φαίνεται και στην ενότητα 4.8.

#### 6.4.2. Ελαττωμένα μοντέλα αμμοστροβιλικών μονάδων

Στην ενότητα 6.1 αναλύθηκε το μοντέλο ρυθμιστή στροφών-στροβίλου αμμοστροβιλικής μονάδας (Σχήμα 6.2). Η συνάρτηση μεταφοράς της διάταξης αυτής είναι η ακόλουθη:

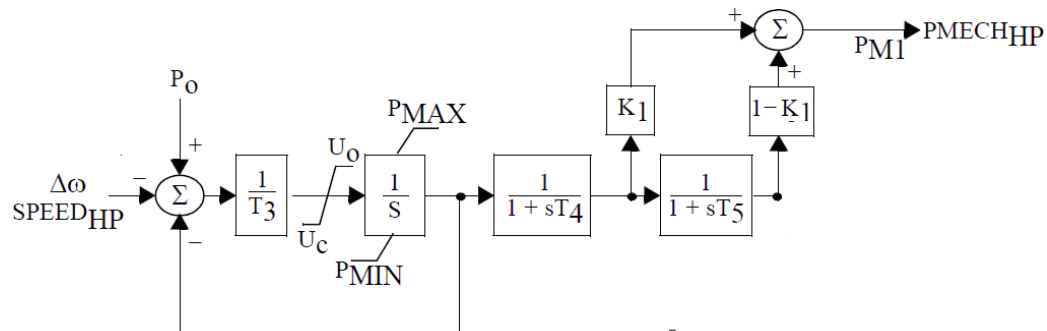
$$\frac{\Delta P_m}{\Delta \omega} = K \frac{1}{1+T_3s} \frac{1}{1+T_4s} \left( K_1 + K_3 \frac{1}{(1+T_5s)} + K_5 \frac{1}{(1+T_5s)(1+T_6s)} \right) \quad (6.1)$$

Για την περίπτωση των αμμοστροβιλικών μονάδων εξετάζονται δύο σενάρια απλοποίησης. Στο πρώτο (απλοποίηση 1, Σχήμα 6.42), απαλείφεται η χρονική σταθερά του στροβίλου χαμηλής πίεσης ( $T_6$  - Σχήμα 6.2). Η δεύτερη απλοποίηση (απλοποίηση 2, Σχήμα 6.43) περιλαμβάνει επιπλέον της απλοιοφής της χρονικής σταθεράς  $T_6$ , την απλοιοφή της χρονικής σταθεράς του ρυθμιστή στροφών ( $T_3$ ). Στον Πίνακα 6.9 φαίνονται οι πόλοι και τα μηδενικά της συνάρτησης μεταφοράς της αμμοστροβιλικής μονάδας για τις τιμές του Πίνακα 6.1 για την πλήρη παράσταση και τις δύο εξεταζόμενες απλοποιήσεις.

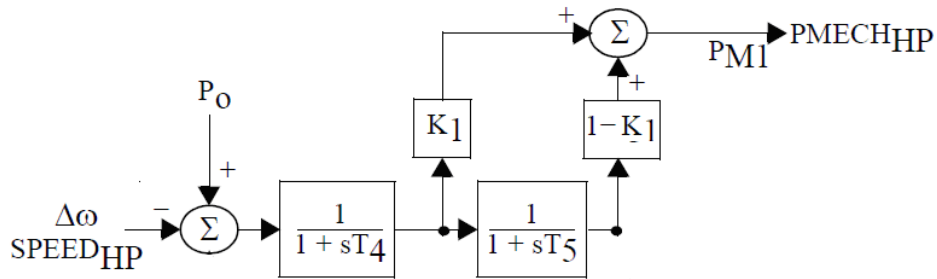
Πίνακας 6.9: Πόλοι και μηδενικά απλοποιημένων μοντέλων αμμοστροβιλικής μονάδας

	Πλήρες	Απλοποίηση 1	Απλοποίηση 2
Πόλοι	-0.25	-0.25	-0.25
	-3.33	-5	-5
	-5	-10	
	-10		
Μηδενικά	-0.7615	-0.688	-0.688
	-3.009		

Μολονότι η χρονική σταθερά που απαλείφεται στην απλοποίηση 1 δεν είναι αυτή με την μικρότερη τιμή, η προτεινόμενη απλοποίηση εισάγει το μικρότερο σφάλμα, καθώς το ζεύγος πόλου-μηδενικού που απαλείφεται έχει παρόμοιες τιμές.



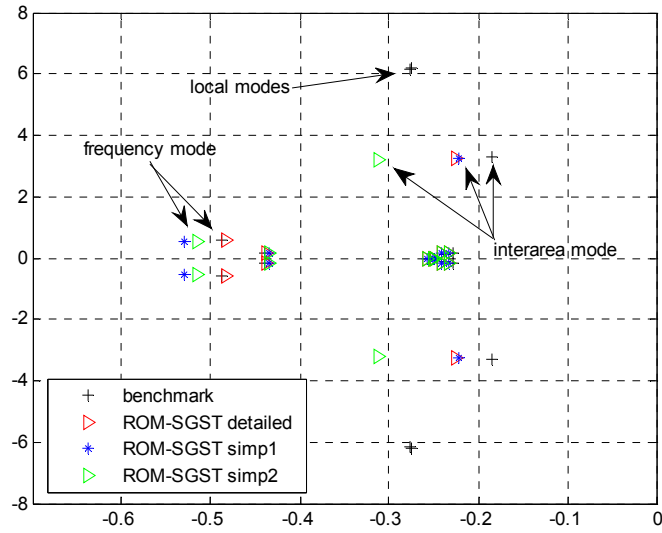
Σχήμα 6.42: Απλοποιημένο μοντέλο 1 ρυθμιστή στροφών-στροβίλου αμμοστροβιλικής μονάδας



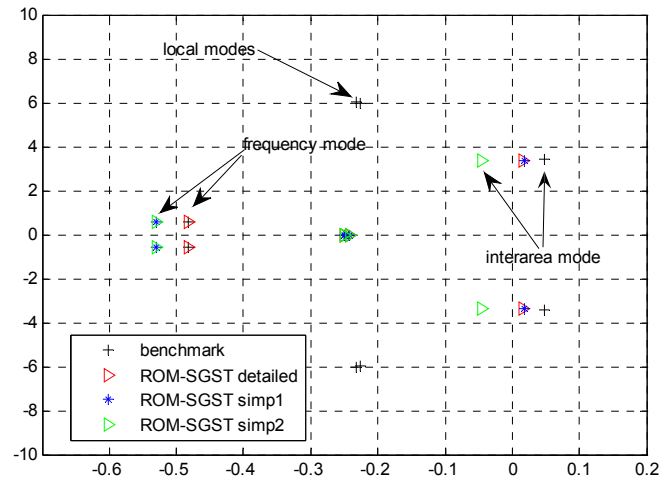
Σχήμα 6.43: Απλοποιημένο μοντέλο 2 ρυθμιστή στροφών-στροβίλου ατμοστροβλικής μονάδας

Στην παράγραφο αυτή, τα δυο σενάρια απλοποίησης, εφαρμόζονται στο δοκιμαστικό σύστημα, προκειμένου να διερευνηθεί το σφάλμα που εισάγεται στην απόκριση του διασυνδεδετικού ρυθμού. Στα παρακάτω Σχήματα (6.44-6.45) παρουσιάζονται τα διαγράμματα ιδιοτιμών του δοκιμαστικού συστήματος για τις διάφορες εξεταζόμενες απλοποιήσεις του μοντέλου της ατμοστροβλικής μονάδας, για τις δύο παραλλαγές του APT (με και χωρίς διαφορική ανατροφοδότηση, θεωρώντας τα πλήρη μοντέλα). Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, στο σενάριο αναφοράς οι γεννήτριες θεωρούνται ανεξάρτητες και το μοντέλο των σύγχρονων γεννητριών συμπεριλαμβάνει το τύλιγμα διέγερσης και ένα τύλιγμα απόσβεσης. Αντίθετα στην απλοποιημένη προσέγγιση θεωρούνται δύο συνεκτικές περιοχές, και τα μοντέλα των γεννητριών συμπεριλαμβάνουν μόνο το τύλιγμα διέγερσης στον δρομέα.

Τα απλοποιημένα μοντέλα ελέγχονται στις δυο παραλλαγές του δοκιμαστικού συστήματος με βάση τον τύπο του APT (με διαφορική ανατροφοδότηση ή υψηλό κέρδος). Τα αποτελέσματα στις δύο αυτές περιπτώσεις είναι παραπλήσια. Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 6.44-6.45, η πρώτη απλοποίηση (ROM-SGST simp1-μπλε αστέρι) εισάγει αμελητέο σφάλμα στην ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στον διασυνδεδετικό ρυθμό σε σχέση με το μοντέλο όπου θεωρούνται δύο συνεκτικές περιοχές, απλοποιημένο μοντέλο γεννήτριας και πλήρους μοντελοποίηση για APT και ρυθμιστές στροφών (ROM-SGST detailed-κόκκινο τρίγωνο). Το σφάλμα που φαίνεται ότι εισάγεται σε σχέση με το πλήρες μοντέλο (benchmark-μαύρος σταυρός), οφείλεται κυρίως στην απαλοιφή των τοπικών ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων και στα απλοποιημένα μοντέλα γεννητριών που χρησιμοποιούνται (βλ. ενότητες 6.2-6.3). Η δεύτερη απλοποίηση (ROM-SGST simp2-πράσινο τρίγωνο), οδηγεί σε υπερεκτίμηση της απόσβεσης του διασυνδεδετικού ρυθμού, η οποία αθροισόμενη με το σφάλμα των προηγούμενων απλοποιήσεων, παύει να αποτελεί μια ικανοποιητική προσέγγιση για την λειτουργία της ατμοστροβλικής μονάδας.

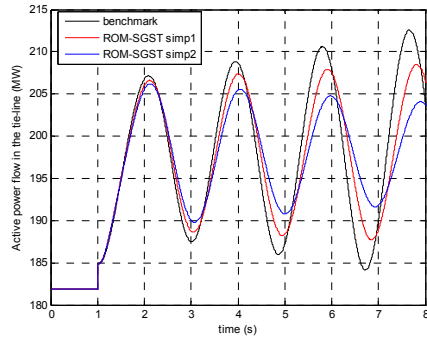


Σχήμα 6.44: Διάγραμμα ιδιοτιμών για πλήρη και απλοποιημένα μοντέλα αεροστροβίλων θεωρώντας πλήρεις APT με διαφορεική ανατροφοδότηση

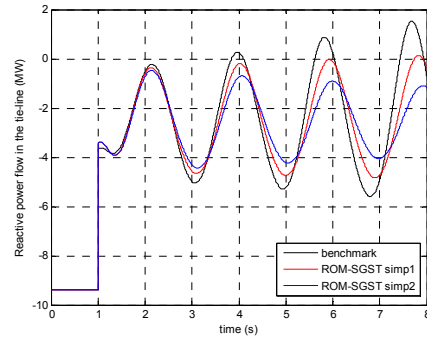


Σχήμα 6.45: Διάγραμμα ιδιοτιμών για πλήρεις και απλοποιημένες εκφράσεις του γραμμικοποιημένου συστήματος θεωρώντας πλήρες APT υψηλού κέρδους

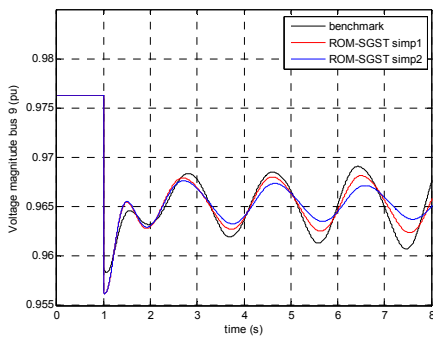
Για να επιβεβαιωθούν τα πορίσματα της ανάλυσης των ιδιοτιμών πραγματοποιήθηκαν και οι προσομοιώσεις στην περίπτωση αύξησης του φορτίου στον ζυγό 9 και για τις δύο παραλλαγές του APT. Στα Σχήματα 6.46-6.48 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις για APT υψηλού κέρδους, ενώ στα 6.49-6.51 για APT με διαφορεική ανατροφοδότηση. Οι αποκρίσεις αντιστοιχούν στις ιδιοτιμές που υπολογίστηκαν για τα γραμμικοποιημένα συστήματα και επαληθεύουν τα πορίσματα της ανάλυσης των ιδιοτιμών.



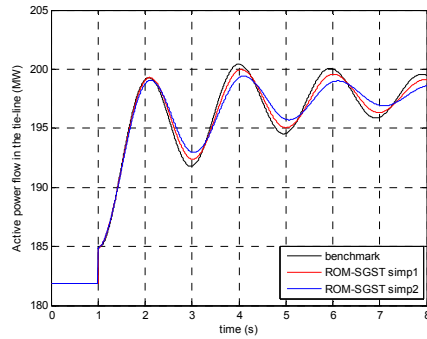
Σχήμα 6.46: Ενεργός ισχύς στη διασυνδετική γραμμή (APT υψηλού κέρδους)



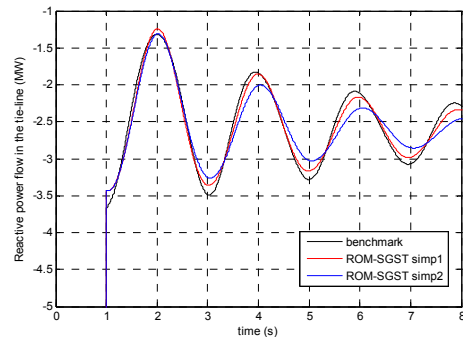
Σχήμα 6.47: Άεργος ισχύς στην διασυνδετική γραμμή (APT υψηλού κέρδους)



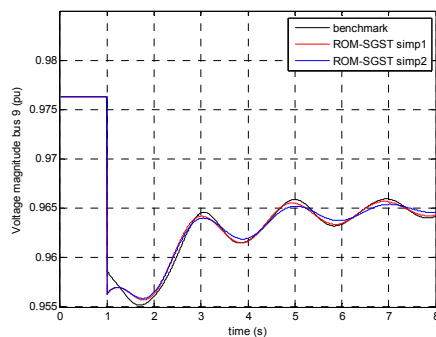
Σχήμα 6.48: Μέτρο τάσης στον ζυγό 9 (APT υψηλού κέρδους)



Σχήμα 6.49: Ενεργός ισχύς στην διασυνδετική γραμμή (APT με διαφορική ανατροφοδότηση)



Σχήμα 6.50: Άεργος ισχύς στην διασυνδετική γραμμή (APT με διαφορική ανατροφοδότηση)



Σχήμα 6.51: Μέτρο τάσης στον ζυγό 9 (APT με διαφορική ανατροφοδότηση)

### 6.4.3. Συμπεράσματα

Από την παράγραφο 6.4.1 συμπεραίνεται ότι η αποδεκτή απλοποίηση του APT εξαρτάται από τον τύπο του. Σε APT υψηλού κέρδους με μια μόνο σταθερά χρόνου, δεν είναι αποδεκτή η απλοποίηση της χρονικής σταθεράς του φίλτρου μέτρησης τάσης. Αντίθετα, σε περιπτώσεις APT με διαφορική ανατροφοδότηση, είναι δυνατή η απλοποίηση του φίλτρου και της χρονικής σταθεράς της διεγέρτριας.

Βασικό συμπέρασμα μέχρι στιγμής, είναι το εξής: Επειδή η απόσβεση των διασυνδετικών ταλαντώσεων οφείλεται σε ένα μεγάλο βαθμό στην δυναμική του βρόχου διεγερσης, είναι απαραίτητο να συμπεριληφθεί η δυναμική του πεδίου διεγέρσεως της γεννήτριας στην

μοντελοποίηση. Η προσέγγιση του προβλήματος αυτού με το κλασικό μοντέλο γεννήτριας όπως φάνηκε και στα Σχήματα 6.5, 6.12 οδηγεί σε λάθος αποτελέσματα. Συμπερασματικά το μοντέλο της γεννήτριας που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει την δυναμική του πεδίου διέγερσης.

Τέλος, όσον αφορά τους ρυθμιστές στροφών, η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι παρότι η χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών έχει μικρή τιμή, δεν μπορεί να απλοποιηθεί, καθώς συμβάλει σημαντικά στην διαμόρφωση της απόσβεσης του διασυνδεδετικού ρυθμού. Η χρονική σταθερά του στροβίλου χαμηλής πίεσης ( $T_6$ ) παρότι έχει μεγαλύτερη τιμή από αυτή του ρυθμιστή στροφών, απαλείφεται χωρίς να επηρεάζει την απόκριση, καθώς απαλείφει έναν πόλο και ένα μηδενικό τα οποία έχουν παραπλήσιες τιμές.

## 6.5. Σχεδίαση σταθεροποιητών για ένα σημείο λειτουργίας

### 6.5.1. Ανασκόπηση μοντέλων συστήματος

Μετά την ανάλυση η οποία πραγματοποιήθηκε στις παραγράφους 6.1 έως 6.4 και τις διερευνησείς διαφορών βαθμών απλοποίησης για τις διατάξεις του δοκιμαστικού συστήματος, διαμορφώνεται το απλοποιημένο μοντέλο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων και την σχεδίαση των σταθεροποιητών ισχύος. Στον Πίνακα 6.10 παρουσιάζονται τα μοντέλα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην ενότητα αυτή. Στο μοντέλο αναφοράς (A) ή λεπτομερές μοντέλο, περιλαμβάνεται γεννήτριας 4<sup>ης</sup> τάξης (ένα τύλιγμα απόσβεσης), πλήρη τα μοντέλα αυτόματων ρυθμιστών τάσης και ρυθμιστών στροφών-στροβίλων. Το δεύτερο μοντέλο (B), είναι το απλοποιημένο μοντέλο δύο περιοχών, το οποίο χρησιμοποιεί

- Μοντέλο γεννήτριας με την δυναμική του πεδίου διεγέρσεως.
- Πλήρες μοντέλο APT αν αυτός είναι υψηλού κέρδους, και απλοποιημένο μοντέλο 2 APT αν υπάρχει διαφορική ανατροφοδότηση.
- Απλοποιημένο μοντέλο 1 για τους ρυθμιστές στροφών και τους στροβίλους των αμμοστροβλικών μονάδων παραγωγής.

Το μοντέλο B αποτελεί στην ουσία το απλοποιημένο μοντέλο το οποίο βασίζεται στην επέκταση της μεθόδου της οιονεί στατικής μεταβολής για την μελέτη διασυνδεδετικών ταλαντώσεων. Το τρίτο μοντέλο (Γ), είναι το μοντέλο ενιαίας συχνότητας όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.1 με τις ίδιες απλοποιήσεις με το B για τους αυτόματους ρυθμιστές τάσης και τους ρυθμιστές στροφών και στροβίλους.

Το μοντέλο αναφοράς αποτελεί το μέτρο σύγκρισης των αποτελεσμάτων για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα απλοποιημένα μοντέλα.

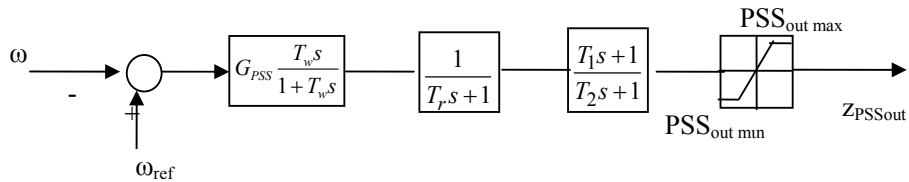
Πίνακας 6.10 Μοντέλα δοκιμαστικού συστήματος

Τύπος	Περιγραφή	Ταλαντωτικοί ρυθμοί	Μοντέλα APT-ΡΣ	Μοντέλο Γεννήτριας
A	Αναφοράς	Συχνότητας, Διασυνδεδετικός, Τοπικός	Πλήρη	4 <sup>ης</sup> Τάξης
B	Δύο Περιοχών	Συχνότητας, Διασυνδεδετικός	Απλοποιημένα	Τύλιγμα διέγερσης (1 <sup>ης</sup> τάξης)
Γ	Ενιαίας Συχνότητας	Συχνότητας		

### 6.5.2. Σχεδίαση σταθεροποιητή με APT υψηλού κέρδους.

Στην παράγραφο αυτή θα σχεδιαστούν σταθεροποιητές ισχύος με την χρήση του απλοποιημένου μοντέλου (B) για το δοκιμαστικό σύστημα, στην περίπτωση όπου οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης είναι υψηλού κέρδους. Η μεθοδολογία στηρίζεται στα ολοκληρωτικά υπόλοιπα, των οποίων το μέτρο ορίζει τις γεννήτριες στις οποίες θα τοποθετηθούν οι σταθεροποιητές ισχύος, ενώ η φάση τους ορίζει την απαιτούμενη φάση που θα πρέπει να εισάγει ο σταθεροποιητής ισχύος στην συχνότητα του προς σταθεροποίηση ρυθμού. Τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα προκύπτουν από την συνάρτηση μεταφοράς όπου είσοδος είναι η τάση αναφοράς του APT μιας γεννήτριας και έξοδος η συχνότητα του δρομέα της (ή της συνεκτικής περιοχής στο μοντέλο που θεωρούνται συνεκτικές περιοχές). Η μεθοδολογία αυτή περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 3.5.1.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.52 ο σταθεροποιητής ισχύος αποτελείται από τρεις βαθμίδες. Η πρώτη βαθμίδα είναι το υπιπερατό φίλτρο, το οποίο τοποθετείται για να αποκόπτει τα μόνιμα σφάλματα συχνότητας που προκύπτουν μετά από μεταβολές του φορτίου. Η δεύτερη και η τρίτη βαθμίδα είναι βαθμίδες προήγησης/υστέρησης φάσης. Τέλος υπάρχει ένας περιοριστής για το σήμα εξόδου του σταθεροποιητή ισχύος.



Σχήμα 6.52: Διάγραμμα βαθμίδων σταθεροποιητή ισχύος

#### Σχεδίαση πρώτου σταθεροποιητή ισχύος.

Το πρώτο βήμα για την σχεδίαση του πρώτου σταθεροποιητή ισχύος ( $\Sigma I_1$ ), είναι η επιλογή της γεννήτριας στην οποία θα τοποθετηθεί ο σταθεροποιητής. Για τον σκοπό αυτό υπολογίζονται (με το μοντέλο B) τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα της συνάρτησης μεταφοράς της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα κάθε γεννήτριας, ως προς τάση αναφοράς του APT. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.11.

Πίνακας 6.11: Ολοκληρωτικά Υπόλοιπα που αντιστοιχούν στην διασυνδετική ιδιοτιμή (Μοντέλο B)

Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο διασυνδετικής ιδιοτιμής	Μέτρο	Φάση (μοίρες)
1	-0.0010 + 0.0148j	0.0148	93.7049
2	-0.0045 + 0.0070j	0.0084	122.6738
<b>3</b>	<b>-0.0206 + 0.0155j</b>	<b>0.0258</b>	<b>143.0837</b>
4	-0.0145 + 0.0022j	0.0147	171.4352

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.11, η διασυνδετική ιδιοτιμή παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στην περίπτωση όπου κλείσει ο βρόχος ανατροφοδότησης της συνάρτησης μεταφοράς στην γεννήτρια 3, και για τον λόγο αυτό θα τοποθετηθεί ο πρώτος σταθεροποιητής ισχύος στην εν λόγω γεννήτρια. Η σχεδίαση του σταθεροποιητή ισχύος καθώς και ο υπολογισμός των ολοκληρωτικών υπολοίπων του Πίνακα 6.11 γίνεται με βάση το απλοποιημένο μοντέλο που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.

Καταρχήν, για την χρονική σταθερά του υπιπερατού φίλτρου ( $T_w$ ) επιλέγεται μια τυπική τιμή ίση με 5 δευτερόλεπτα. Στην συνέχεια ορίζεται η κεντρική συχνότητα ( $\omega_c$ ), η οποία είναι

η συχνότητα στην οποία ο σταθεροποιητής ισχύος δίνει την μέγιστη αντιστάθμιση φάσης. Η τιμή της ορίζεται στο 1.5Hz διότι θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η εισαγωγή του σταθεροποιητή ισχύος θα εισάγει επαρκή προπορεία φάσης όχι μόνο στον διασυνδεδετικό (0.53Hz) αλλά και στους τοπικούς ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς (οι οποίοι έχουν απαλειφθεί). Για τον λόγο αυτό επιλέγεται η συγκεκριμένη τιμή για την κεντρική συχνότητα.

Η αντιστάθμιση φάσης που απαιτείται στη συχνότητα της διασυνδεδετικής ταλάντωσης είναι  $36.9^\circ$  η οποία καταμερίζεται εξίσου στις δύο βαθμίδες προήγησης-υστέρησης φάσης του σταθεροποιητή ισχύος (Πίνακας 6.12).

Πίνακας 6.12: Αντιστάθμιση φάσης  $\Sigma I_1$  στην συχνότητα του διασυνδεδετικού ρυθμού

	Αντιστάθμιση φάσης στην συχνότητα του διασυνδεδετικού ρυθμού (μοίρες)
Φίλτρο	3.4
Βαθμίδα 1	16.5
Βαθμίδα 2	16.5

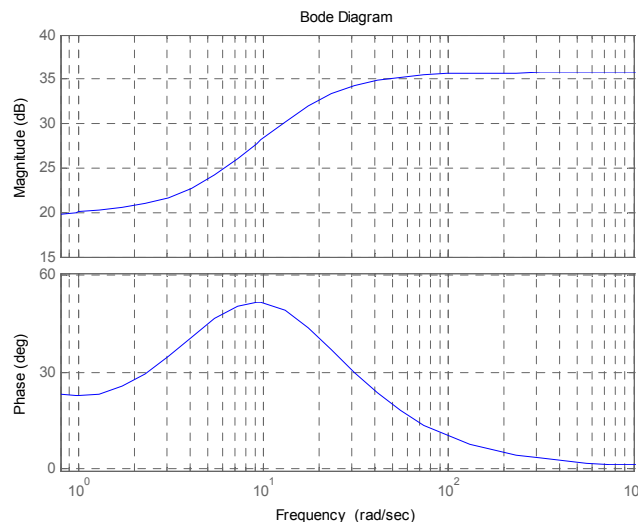
Οι χρονικές σταθερές των δύο βαθμίδων θεωρούνται κοινές, οπότε η συνάρτηση μεταφοράς των σταθεροποιητών γίνεται:

$$G_{PSS}(s) = G \frac{T_w s}{1 + T_w s} \left( \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \right)^2 \quad (6.2)$$

Στον Πίνακα 6.13 παρουσιάζονται οι τιμές που επιλέχθηκαν για τις παραμέτρους του σταθεροποιητή ισχύος, ενώ στο Σχήμα 6.53 το διάγραμμα Bode του σταθεροποιητή ισχύος.

Πίνακας 6.13: Παράμετροι σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή ισχύος

	$T_1$	$T_2$	$T_w$	Κέρδος
$\Sigma I_1$	0.1670	0.0674	5	5

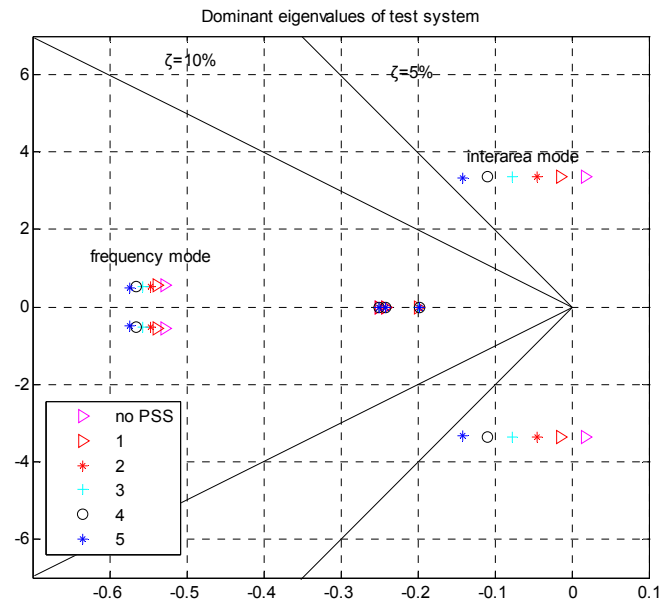


Σχήμα 6.53: Διάγραμμα Bode για τον σχεδιαζόμενο σταθεροποιητή ισχύος (γεννήτρια 3)

Η επιλογή του κέρδους του σταθεροποιητή γίνεται με δοκιμές. Κριτήριο είναι ότι δεν θα πρέπει να μεταβάλλεται σημαντικά το φανταστικό μέρος της ιδιοτιμής και γενικότερα να μην



εμφανίζεται αλληλεπίδραση με άλλους ρυθμούς. Στο Σχήμα 6.54 παρουσιάζεται το διάγραμμα με τις επικρατούσες ιδιοτιμές του απλοποιημένου συστήματος, πριν και μετά την εισαγωγή του σταθεροποιητή ισχύος για διάφορες τιμές του κέρδους.



Σχήμα 6.54: Επικρατούσες ιδιοτιμές απλοποιημένου συστήματος μετά την εισαγωγή του σταθεροποιητή ισχύος (γεννήτρια 3)

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.54, οι διάφορες τιμές του κέρδους του σταθεροποιητή ισχύος δεν επηρεάζουν την συχνότητα της διασυνδεδειγμένης ταλάντωσης. Επίσης δεν παρατηρείται κάποια έντονη αλληλεπίδραση με άλλους ρυθμούς. Τέλος παρατηρείται, ότι η επίδραση του σταθεροποιητή ισχύος στον ρυθμό της συχνότητας, είναι στην κατεύθυνση αύξησης της απόσβεσης. Συνεπώς, θεωρώντας ως όριο για το κέρδους του σταθεροποιητή την τιμή 5, επιλέγεται αυτή η τιμή, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.13. Σημειώνεται ότι η μέγιστη τιμή που ελεγχόταν για το κέρδος του σταθεροποιητή ισχύος είναι σχετικά μικρή, αλλά προτιμάται για να αναδειχθεί η ακολουθιακή διαδικασία σχεδίασης.

### Σχεδίαση δεύτερου σταθεροποιητή ισχύος

Μετά την σχεδίαση και εγκατάσταση του  $\Sigma I_1$  παρατηρείται ότι η εκτιμώμενη απόσβεση του διασυνδεδειγμένου ρυθμού, βάση των ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος παραμένει μικρότερη του 5%. Συνεπώς απαιτείται η σχεδίαση και η εισαγωγή ενός δεύτερου σταθεροποιητή ισχύος προκειμένου να σταθεροποιηθεί ικανοποιητικά ο διασυνδεδειγμένος ρυθμός. Η ανάλυση των νέων ολοκληρωτικών υπολοίπων παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.14. Αξίζει να αναφερθεί ότι η εισαγωγή του πρώτου σταθεροποιητή ισχύος τροποποιεί τις ιδιοτιμές και τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα, τα οποία δεν ταυτίζονται με αυτά που υπολογίστηκαν στον Πίνακα 6.11.

Πίνακας 6.14: Ολοκληρωτικά υπόλοιπα διασυνδεδειγμένου ρυθμού μετά την εισαγωγή του  $\Sigma I_1$  (Μοντέλο Β)

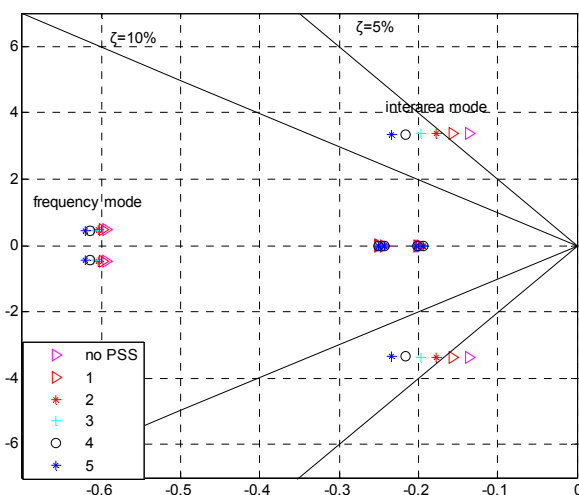
Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο διασυνδεδειγμένης ιδιοτιμής	Μέτρο	Φάση (μοίρες)
1	$0.0001 + 0.0171j$	0.0171	89.5542
2	$-0.0039 + 0.0084j$	0.0093	114.8458
4	$-0.0166 - 0.0001j$	0.0166	-179.7108

Ο δεύτερος σταθεροποιητής ισχύος ( $\Sigma I_2$ ) θα πρέπει να τοποθετηθεί σύμφωνα με τον Πίνακα 6.14 στην γεννήτρια 1 που έχει το μεγαλύτερο μέτρο του ολοκληρωτικού υπολοίπου. Η κεντρική συχνότητα επιλέγεται ίση με αυτή του πρώτου σταθεροποιητή ισχύος (1.5Hz). Η απαιτούμενη αντιστάθμιση είναι ίση με  $90.5^\circ$  η οποία επίσης κατανέμεται εξίσου στις δύο βαθμίδες προήγησης-υστέρησης φάσης του σταθεροποιητή ισχύος (Πίνακας 6.15).

Πίνακας 6.15: Αντιστάθμιση φάσης  $\Sigma I_2$  στην συχνότητα του διασυνδεδετικού ρυθμού

	Αντιστάθμιση φάσης στην συχνότητα του διασυνδεδετικού ρυθμού (μοίρες)
Φίλτρο	3.4
Βαθμίδα 1	43.2
Βαθμίδα 2	43.2

Το κέρδος του σταθεροποιητή ορίζεται με δοκιμές, όπως προηγούμενα. Υπολογίζονται οι επικρατούσες ιδιοτιμές του απλοποιημένου συστήματος για διάφορες τιμές κέρδους του σταθεροποιητή ισχύος οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 6.55. Η αύξηση του κέρδους του  $\Sigma I_2$  βελτιώνει την απόσβεση τόσο του διασυνδεδετικού ρυθμού, όσο και του ρυθμού της συχνότητας. Στον βαθμό που δεν παρατηρείται κάποια αλληλεπίδραση μεταξύ των ρυθμών, επιλέγεται όπως και παραπάνω η τιμή 5 για το κέρδος του  $\Sigma I_2$ . Προκύπτουν λοιπόν οι παράμετροι του  $\Sigma I_2$  οι οποίοι φαίνονται στον Πίνακα 6.16.



Σχήμα 6.55: Επικρατούσες ιδιοτιμές απλοποιημένου συστήματος μετά την εισαγωγή του δεύτερου σταθεροποιητή ισχύος (γεννήτρια 1)

Πίνακας 6.16: Παράμετροι σταθεροποιητή ισχύος Γεννήτριας 1

	$T_1$	$T_2$	$T_w$	Κέρδος
$\Sigma I_2$	0.348	0.0324	5	5

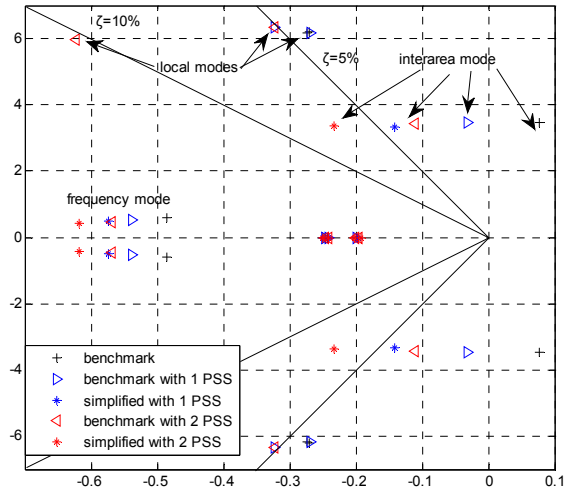
### Σύγκριση με το μοντέλο αναφοράς

Στην παράγραφο αυτή συγκρίνονται οι υπολογιζόμενες ιδιοτιμές και η εκτιμώμενη απόκριση με βάση την απλοποιημένη προσέγγιση (B) σε σχέση με αυτήν που προκύπτει από το σύστημα αναφοράς (A). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ιδιοτιμών (Πίνακας 6.17, Σχήμα 6.56), στην απλοποιημένη προσέγγιση (simplified-αστέρι) υπερεκτιμάται η απόσβεση του διασυνδετικού ρυθμού. Με τρίγωνο παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου συστήματος με το λεπτομερές μοντέλο (benchmark-A). Με μπλε χρώμα σημειώνονται οι ιδιοτιμές που αντιστοιχούν στο γραμμικοποιημένο σύστημα με τον  $\Sigma_{I_1}$ , ενώ με κόκκινο στο σύστημα με τους σταθεροποιητές  $\Sigma_{I_1}$ ,  $\Sigma_{I_2}$ . Το σφάλμα που εμφανίζεται οφείλεται κυρίως στην απαλοιφή χρονικών σταθερών, την απαλοιφή των τοπικών ταλαντώσεων και το απλοποιημένο μοντέλο γεννήτριας που χρησιμοποιείται στο μοντέλο B..

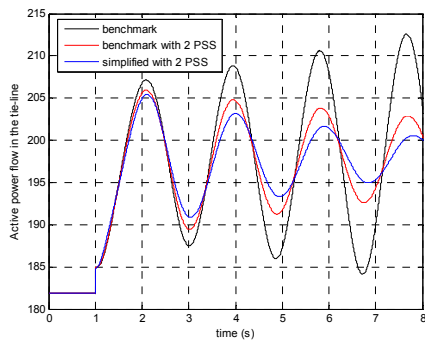
Ωστόσο το σφάλμα της εκτιμώμενης απόσβεσης θεωρείται αποδεκτό, ενώ παράλληλα φαίνεται ότι με την παρούσα σχεδίαση το σύστημα σταθεροποιείται και επιτυγχάνεται μια σχετικά ικανοποιητική απόσβεση (λόγος απόσβεσης 0.032 ή 3.2%). Τέλος η μετατόπιση των τοπικών ρυθμών γίνεται προς την ευσταθή πλευρά, γεγονός που σχετίζεται με την επιλογή της κεντρικής συχνότητας σε τιμή μεγαλύτερη προκειμένου να παρέχεται στους τοπικούς ρυθμούς αυξημένη αντιστάθμιση φάσης. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης μιας διαταραχής αύξησης φορτίου, τα οποία επιβεβαιώνουν τα πορίσματα της ανάλυσης ιδιοτιμών (Σχήματα 6.57-6.60).

Πίνακας 6.17: Ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί μετά την εγκατάσταση των σταθεροποιητών ισχύος στο δοκιμαστικό σύστημα

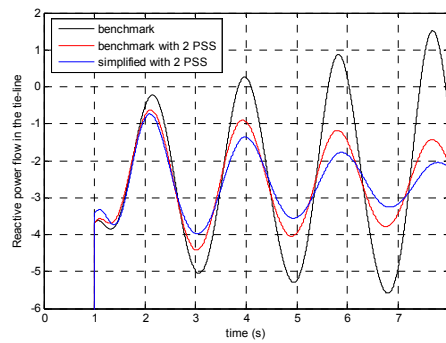
Σενάριο	Ρυθμός	Τιμή	Συχνότητα (Hz)	Λόγος Απόσβεσης (%)
Αναφοράς με $\Sigma_{I_1}$	Τοπικοί	-0.323±6.33j	1.00	5.10
		-0.270±6.18j	0.98	4.37
	Διασυνδετικός	-0.030±3.46j	0.55	0.87
	Συχνότητας	-0.540±0.53j	0.08	71.70
Αναφοράς με $\Sigma_{I_{1,2}}$	Τοπικοί	-0.323±6.33j	1.01	5.10
		-0.625±5.98j	0.95	10.40
	Διασυνδετικός	-0.110±3.44j	0.55	3.20
	Συχνότητας	-0.570±0.47j	0.07	77.15
Απλοποιημένο με $\Sigma_{I_1}$	Διασυνδετικός	-0.140±3.34j	0.53	4.19
	Συχνότητας	-0.575±0.50j	0.08	75.46
Απλοποιημένο με $\Sigma_{I_{1,2}}$	Διασυνδετικός	-0.234±3.35j	0.53	6.97
	Συχνότητας	-0.620±0.43j	0.07	82.17



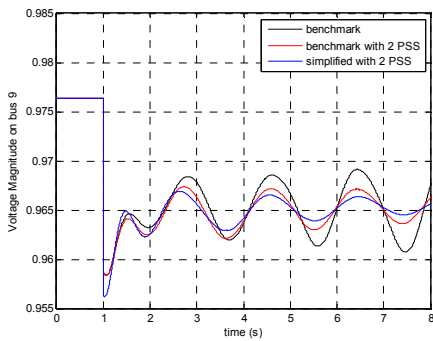
Σχήμα 6.56: Επικρατούσες ιδιοτιμές πλήρους και απλοποιημένου συστήματος θεωρώντας έναν ή δύο σταθεροποιητές ισχύος



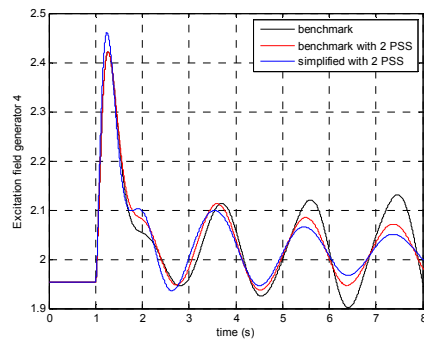
Σχήμα 6.57: Ροή ενεργού ισχύος στην διασύνδεση



Σχήμα 6.58: Ροή αέργου ισχύος στην διασύνδεση



Σχήμα 6.59: Μέτρο τάσης στον ζυγό 9



Σχήμα 6.60: ΗΕΔ διεγέρσεως γεννήτριας 4

### 6.5.3. Σχεδίαση σταθεροποιητή με APT με διαφορική ανατροφοδότηση

Όταν οι APT όλων των γεννητριών έχουν διαφορική ανατροφοδότηση, η απόκριση του συστήματος (η οποία έχει περιγραφεί στην ενότητα 6.2.1) είναι ευσταθής. Ωστόσο η απόσβεση του διασυνδεδετικού ηλεκτρομηχανικού ρυθμού δεν είναι ικανοποιητική. Στην συνέχεια σχεδιάζεται σταθεροποιητής ισχύος, προκειμένου να βελτιωθεί η απόσβεση.

#### Σχεδίαση σταθεροποιητή ισχύος

Με παρόμοιο τρόπο, όπως αναλύθηκε και προηγουμένως σχεδιάζεται ο σταθεροποιητής ισχύος για την εξεταζόμενη περίπτωση. Τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα για την ιδιοτιμή του διασυνδεδετικού ρυθμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.18:

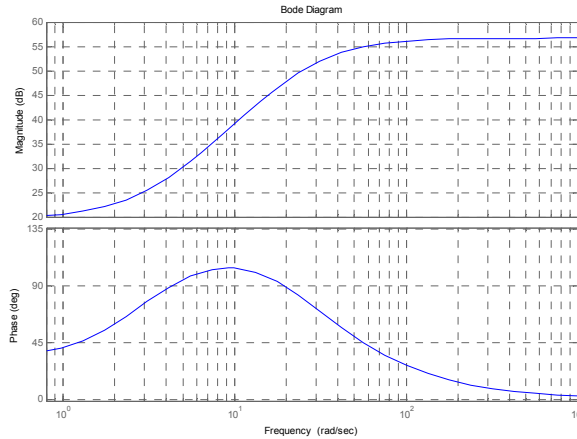
Πίνακας 6.18: Ολοκληρωτικά υπόλοιπα διασυνδεδετικού ρυθμού (Μοντέλο Β)

Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο διασυνδεδετικής ιδιοτιμής	Μέτρο	Φάση
1	0.0007+0.0005j	0.0009	37.8
2	0.0004+0.0003j	0.0005	41.3
<b>3</b>	<b>-0.0014 + 0.0079j</b>	<b>0.0080</b>	<b>100.1</b>
4	-0.0011 + 0.0043j	0.0044	103.8

Βάση των ολοκληρωτικών υπολοίπων του Πίνακα 6.18, προκύπτει η γεννήτρια στην οποία θα τοποθετηθεί ο σχεδιαζόμενος σταθεροποιητής ισχύος (γεννήτρια 3). Με παρόμοιο τρόπο με την παράγραφο 6.5.2, επιλέγεται κεντρική συχνότητα το 1.5Hz και επιλέγονται οι χρονικές σταθερές  $T_1$ ,  $T_2$  έτσι ώστε στην συχνότητα της διασυνδεδετικής ταλάντωσης να παρέχουν την κατάλληλη αντιστάθμιση φάσης, η οποία προκύπτει από την φάση του ολοκληρωτικού υπολοίπου. Στον Πίνακα 6.19 παρουσιάζεται η εισαγόμενη αντιστάθμιση φάσης από τον σταθεροποιητή ισχύος ανά βαθμίδα, ενώ το διάγραμμα Bode του σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή ισχύος φαίνεται στο Σχήμα 6.61.

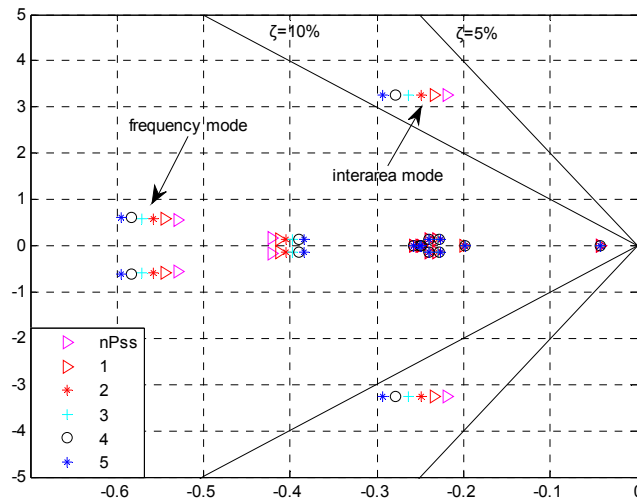
Πίνακας 6.19: Αντιστάθμιση φάσης σταθεροποιητή ισχύος στην συχνότητα του διασυνδεδετικού ρυθμού (γεννήτρια 3)

	Αντιστάθμιση φάσης στην συχνότητα του διασυνδεδετικού ρυθμού (μοίρες)
Φίλτρο	3.4
Βαθμίδα 1	38.2
Βαθμίδα 2	38.2



Σχήμα 6.61: Διαγράμματα Bode για τον σχεδιαζόμενο σταθεροποιητή ισχύος

Η επιλογή για την τιμή του κέρδους του σταθεροποιητή ισχύος γίνεται μέσα από δοκιμές στο απλοποιημένο σύστημα. Στο βαθμό που δεν εμφανίζεται αλληλεπίδραση μεταξύ των ρυθμών, όταν δηλαδή η απόσβεση του διασυνδεδετικού ρυθμού αυξάνει χωρίς να επηρεάζεται η συχνότητά του, επιλέγεται η μέγιστη δυνατή τιμή για το κέρδος του σταθεροποιητή ισχύος. Στο Σχήμα 6.62 φαίνεται η εκτίμηση για τις επικρατούσες ιδιοτιμές του συστήματος για διάφορες τιμές του κέρδους του σταθεροποιητή ισχύος, ενώ στην συνέχεια οι παράμετροι του σταθεροποιητή ισχύος (Πίνακας 6.20). Σημειώνεται ότι με βάση το Σχήμα 6.62, η τοποθέτηση του σταθεροποιητή βελτιώνει και την απόσβεση του ρυθμού της συχνότητας.



Σχήμα 6.62: Επικρατούσες ιδιοτιμές απλοποιημένου συστήματος μετά την εισαγωγή σταθεροποιητή ισχύος

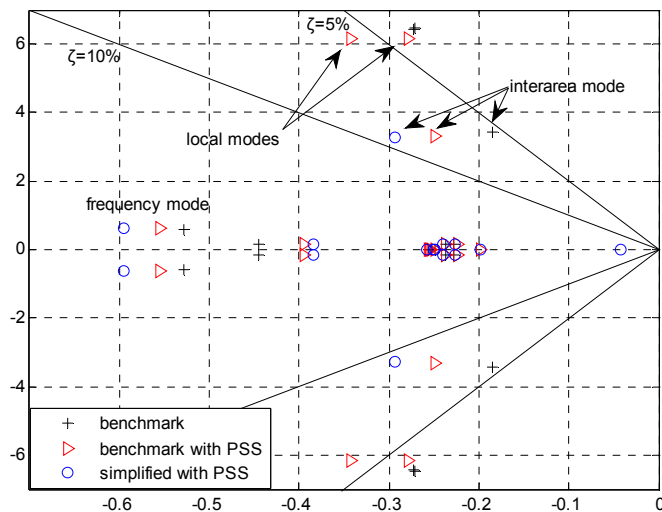
Πίνακας 6.20: Παράμετροι σταθεροποιητή ισχύος (γεννήτρια 3)

Παράμετρος	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$T_w$ (s)	Κέρδος
Τιμή	0.3050	0.0369	5	5

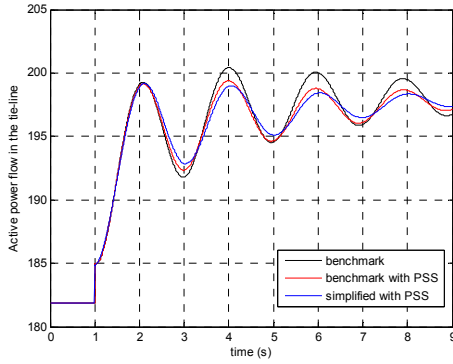
### Σύγκριση με μοντέλο αναφοράς

Στην παράγραφο αυτή (και σε αντιστοιχία με τους υπολογισμούς στην περίπτωση του συστήματος με APT υψηλού κέρδους), πραγματοποιούνται υπολογισμοί στο λεπτομερές σύστημα (A), προκειμένου να εκτιμηθεί το σφάλμα που εισάγει η απλοποίηση αλλά και γενικότερα να εξεταστεί αν και κατά πόσον η απλοποιημένη μοντελοποίηση προσεγγίζει τις αποκρίσεις του συστήματος αναφοράς. Στο Σχήμα 6.63 παρουσιάζονται οι επικρατούσες ιδιοτιμές για το σύστημα αναφοράς (A), πριν (benchmark) και μετά την εισαγωγή του σταθεροποιητή ισχύος (benchmark with PSS) και αντίστοιχα για την απλοποιημένη προσέγγιση (B-simplified with PSS). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.63 η εισαγωγή του σταθεροποιητή ισχύος αυξάνει την απόσβεση του διασυνδεδετικού ρυθμού. Μολονότι η εκτίμηση στην οποία οδηγούμαστε μέσω του απλοποιημένου μοντέλου είναι αισιόδοξη σχετικά με την απόσβεση, και εμπεριέχει σφάλμα σε σχέση με αυτή που προκύπτει στο μοντέλο αναφοράς, διατηρείται εντός των αποδεκτών ορίων. Η συχνότητα του διασυνδεδετικού ρυθμού δεν τροποποιείται σημαντικά με την εισαγωγή του σταθεροποιητή ισχύος, ενώ οι τοπικοί ρυθμοί τείνουν να αυξηθούν την απόσβεσή τους.

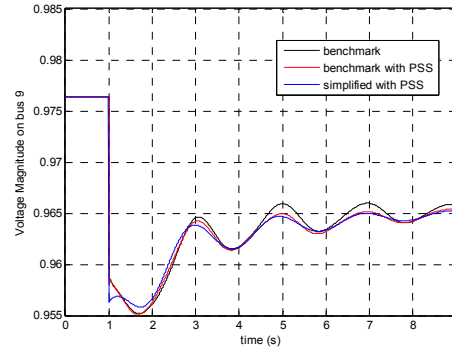
Η προσομοίωση της διαταραχής αύξησης φορτίου, που πραγματοποιήθηκε και παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.64-6.67, επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν βάση του υπολογισμού των ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος. Οι ταλαντώσεις τάσης και ισχύος στην διασυνδεδετική γραμμή αποσβένονται γρηγορότερα στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται ο σταθεροποιητής ισχύος. Η απλοποιημένη προσέγγιση υπερεκτιμά την απόσβεση, χωρίς ωστόσο να οδηγείται σε σφάλματα που να μην είναι αποδεκτά. Τέλος στα Σχήματα 6.66-6.67, είναι φανερός (στο πρώτο δευτερόλεπτο μετά την διαταραχή), οι διαφορές που προκύπτουν λόγω της διαφορετικής μοντελοποίησης των γεννητριών.



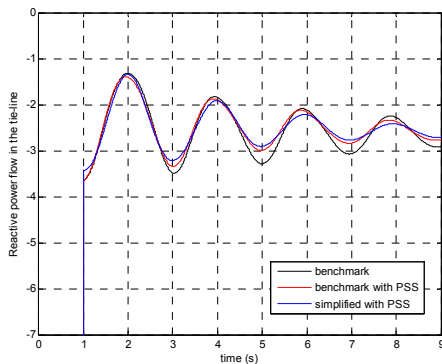
Σχήμα 6.63: Επικρατούσες ιδιοτιμές πλήρους και απλοποιημένου συστήματος



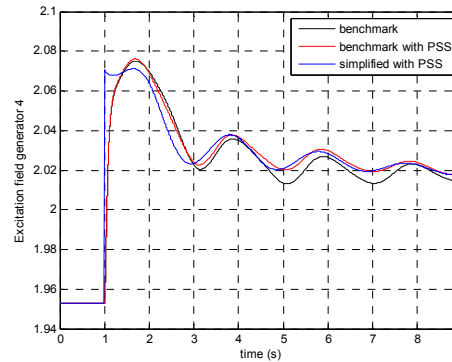
Σχήμα 6.64: Ροή ενεργού ισχύος στην διασύνδεση



Σχήμα 6.66: Μέτρο τάσης στον ζυγό 9



Σχήμα 6.65: Ροή αέργου ισχύος στην διασύνδεση



Σχήμα 6.67: HEΔ διεγέρσεως γεννήτριας 4

## 6.6. Σχεδίαση σταθεροποιητή για πολλαπλά σημεία λειτουργίας

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε ενδεικτική σχεδίαση σταθεροποιητών, ώστε να φανεί η αποτελεσματικότητα των ελαττωμένων μοντέλων για το σκοπό αυτό. Στην παρούσα ενότητα εφαρμόζεται μια μέθοδος σχεδίασης σταθεροποιητή για πολλαπλά σημεία λειτουργίας, όπως αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 3.5.2. Με την μέθοδο αυτή σχεδιάζεται ο σταθεροποιητής ισχύος για μια σειρά διαφορετικών σημείων λειτουργίας σε αντίθεση με την μέθοδο που εφαρμόστηκε στις παραγράφους 6.5.2-6.5.3, όπου η σχεδίαση γίνεται για ένα και μόνο σημείο λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η καλή λειτουργία του σταθεροποιητή ισχύος σε μια σειρά διαφορετικών συνθηκών, μειώνοντας τις πιθανότητες να παρουσιαστούν σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας μη επιθυμητές επιδράσεις σε ρυθμούς του συστήματος.

### 6.6.1. Περιγραφή των σημείων λειτουργίας

Το πρώτο βήμα της διαδικασίας σχεδίασης περιλαμβάνει τον καθορισμό των σημείων λειτουργίας με βάση τα οποία θα σχεδιαστεί ο σταθεροποιητής ισχύος. Τα σημεία αυτά περιγράφονται στον Πίνακα 6.21. Στα σημεία λειτουργίας 3-5, 7-9 το φορτίο είναι μεγαλύτερο στην περιοχή 2. Αντίθετα στα σημεία 1-2, 6, 10-14 το φορτίο είναι ισορροπημένο μεταξύ των δύο περιοχών. Σε όλες τις περιπτώσεις εξετάζονται διαφορετικά σχήματα παραγωγής τα οποία οδηγούν σε διαφορετικές ροές ισχύος στην διασύνδεση. Στις περισσότερες περιπτώσεις η περιοχή 1 εξάγει (θεωρούμε ότι στην περιοχή 2 η παραγωγή είναι ακριβότερη), λόγω όμως της συμμετρίας του συστήματος δεν βλέπεται η γενικότητα των συμπερασμάτων. Σημειώνεται ότι τα φορτία είναι σταθερές αγωγιμότητες. Η ισχύς που αναφέρεται στον Πίνακα 6.21 αντιστοιχεί στην ισχύ των φορτίων σε κάθε σημείο λειτουργίας.



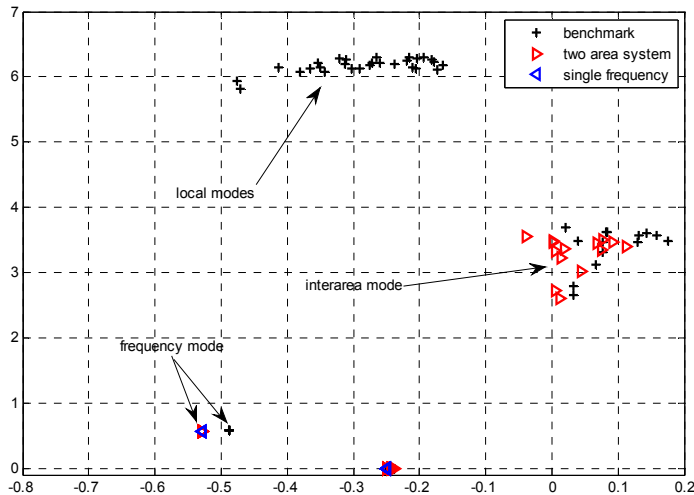
Πίνακας 6.21 Σημεία λειτουργίας δοκιμαστικού συστήματος

Σημείο λειτουργίας	Παραγωγή (MW)		Φορτίο (MW)		Διακινούμενη ισχύς μεταξύ περιοχών 1 και 2 (MW)	Ιδιοτιμή διασυνδεδετικού ρυθμού (Μοντέλο Α)
	Περιοχή 1	Περιοχή 2	Ζυγός 7	Ζυγός 9		
1	1130	1668.4	967	1767	146	0.081± j3.62
2	1182	1618.5	967	1767	195	0.083± j3.62
3	1400	1418.5	967	1767	400	0.077±j3.46
4	1480.6	1348.5	967	1767	478	0.076± j3.31
5	1613.9	1248.5	967	1767	598	0.032± j2.80
6	1322.2	1268.5	1167	1367	125	0.130± j3.46
7	1537.7	1068.5	1167	1367	328	0.132± j3.57
8	1687.3	938.5	1167	1367	470	0.143± j3.61
9	1574.5	908.5	900	1467	631	0.021± j3.70
10	1676	1200	1400	1400	229	0.039± j3.48
11	1569	1300	1400	1400	128	0.066± j3.12
12	1447	1420	1400	1400	12	0.033± j2.66
13	1308	1560	1400	1400	-119	0.159± j3.58
14	1214	1660	1400	1400	-210	0.175± j3.49

### 6.6.2. Μοντέλα συστήματος

Το Σχήμα 6.68 δείχνει το διάγραμμα των ιδιοτιμών των ηλεκτρομηχανικών ρυθμών για τα τρία αυτά μοντέλα του δοκιμαστικού συστήματος για τα 14 μελετούμενα σημεία λειτουργίας. Με μαύρο σταυρό σημαίνονται οι ιδιοτιμές του μοντέλου αναφοράς (A-benchmark), με κόκκινο τρίγωνο του απλοποιημένου μοντέλου δύο περιοχών (B-two area system) και με μπλε τρίγωνο οι ιδιοτιμές του μοντέλου ενιαίας συχνότητας (Γ-single frequency). Όπως παρατηρείται, η τιμή της ιδιοτιμής της συχνότητας είναι πανομοιότυπη για τα δύο απλοποιημένα μοντέλα, και ελαφρώς διαφορετική από την τιμή που προκύπτει από το μοντέλο αναφοράς (A). Ο ρυθμός αυτός δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τα διαφορετικά σημεία λειτουργίας.

Όσον αφορά στον διασυνδεδετικό ρυθμό, παρατηρείται ότι η συχνότητά του εκτιμάται με ακρίβεια από το απλοποιημένο μοντέλο των δύο περιοχών, ωστόσο υπάρχει πάλι μια υπερεκτίμηση της απόσβεσης. Οι επικρατούσες ιδιοτιμές για τα 14 σημεία λειτουργίας φαίνονται στο Σχήμα 6.68. Παρότι το απλοποιημένο μοντέλο δύο περιοχών παρουσιάζει ένα σφάλμα στην εκτίμηση της απόσβεσης του διασυνδεδετικού ρυθμού, η συνολική του ακρίβεια θεωρείται ικανοποιητική. Στον Πίνακα 6.22 παρουσιάζονται αναλυτικά οι ιδιοτιμές για τους ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς και το ρυθμό της συχνότητας όπως υπολογίζονται με τα τρία διαφορετικά μοντέλα για το σημείο λειτουργίας 14.



Σχήμα 6.68: Ιδιοτιμές μοντέλου αναφοράς και απλοποιημένων μοντέλων

Πίνακας 6.22 Επικρατούσες ιδιοτιμές πλήρους και απλοποιημένων μοντέλων για το σημείο λειτουργίας 14

Μοντέλο	Ρυθμός	Ιδιοτιμή	Συχνότητα (Hz)	Απόσβεση ζ (%)	
Αναφοράς (Α)	Τοπικοί	$-0.182 \pm j6.27$	1.00	0.029	
		$-0.350 \pm j6.14$	0.98	0.057	
	Διασυνδεδετικός	$0.175 \pm j3.49$	0.56	-0.050	
	Συχνότητας	$-0.487 \pm j0.58$	0.09	0.645	
	Ατμοστρόβιλοι		-0.244	-	-
			-0.247	-	-
		-0.247	-	-	
Δύο Περιοχών (Β)	Διασυνδεδετικός	$0.113 \pm j3.39$	0.54	-0.033	
	Συχνότητας	$-0.530 \pm j0.56$	0.09	0.686	
	Ατμοστρόβιλοι		-0.250	-	-
			-0.250	-	-
			-0.243	-	-
Ενιαίας Συχνότητας (Γ)	Συχνότητας	$-0.530 \pm j0.56$	0.09	0.686	
	Ατμοστρόβιλοι		-0.250	-	-
			-0.250	-	-
			-0.250	-	-

### 6.6.3. Σχεδίαση σταθεροποιητή με το απλοποιημένο μοντέλο

Ο σταθεροποιητής ισχύος, όπως και στην προηγούμενη διαδικασία σχεδίασης αποτελείται από δύο πανομοιότυπα μπλοκ προήγησης-υστέρησης φάσης καθώς και από το υπερβατό φίλτρο (βλ. Σχήμα 6.52)

Για τα σημεία λειτουργίας 1-14, η συχνότητα του διασυνδεδετικού ρυθμού, και τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα που αντιστοιχούν στον ρυθμό αυτό υπολογίζονται με το απλοποιημένο μοντέλο των δύο περιοχών (B). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.23.

Πίνακας 6.23: Τιμές ολοκληρωτικών υπολοίπων διασυνδεδετικού ρυθμού (Μοντέλο B)

Σημεία λειτουργίας	Συχνότητα (Hz)	Γεννήτρια με το μέγιστο σε μέτρο ολοκληρωτικό υπόλοιπο	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο διασυνδεδετικού ρυθμού (γεννήτρια 3)	
			Μέτρο	Φάση (μοίρες)
1	0.55	3	0.0220	122.85
2	0.56	3	0.0228	127.42
3	0.54	3	0.0258	143.08
4	0.51	3	0.0280	149.50
5	0.44	3	0.0317	163.20
6	0.53	3	0.0218	139.30
7	0.55	3	0.0206	132.17
8	0.56	3	0.0191	122.39
9	0.57	3	0.0209	128.14
10	0.53	3	0.0222	141.29
11	0.48	3	0.0229	151.03
12	0.42	3	0.0257	162.84
13	0.55	1	0.0179	108.71
14	0.54	1	0.0177	97.98

Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιούνται για την σχεδίαση του σταθεροποιητή ελαχιστοποιώντας την παρακάτω αντικειμενική συνάρτηση:

$$L = \sum_{i=1}^{14} (k_i \varphi_i)^2, \quad k_i = \begin{cases} 1 & \text{if } \varphi_i \geq 0 \\ 2 & \text{if } \varphi_i < 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

όπου  $k_i$  ο συντελεστής βαρύτητας,  $\varphi_i$  η ζητούμενη γωνία αντιστάθμισης για το σημείο λειτουργίας  $i$ .

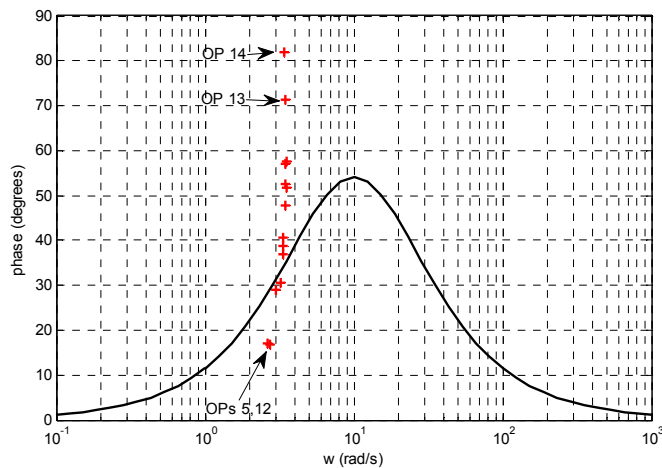
Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.5.2, η αντικειμενική συνάρτηση  $L$  είναι άθροισμα ελαχίστων τετραγώνων, με συντελεστή βαρύτητας (ποινής) για την περίπτωση όπου ο μελετούμενος ρυθμός υπερανισταθμίζεται. Αυτό γίνεται για να αποφευχθεί η μείωση της συχνότητας του ρυθμού. Η συνάρτηση (6.3) ελαχιστοποιείται ρυθμίζοντας τις παραμέτρους  $T_1, T_2$  του σταθεροποιητή. Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, οι χρονικές σταθερές δεν είναι ανεξάρτητες διότι σχετίζονται καθορίζοντας την κεντρική συχνότητα.

Το κέρδος του σταθεροποιητή ορίζεται προκειμένου να εξασφαλιστεί ρυθμός απόσβεσης  $\zeta > 0.07$  για όλα τα σημεία λειτουργίας αν αυτό είναι δυνατόν. Ωστόσο το κέρδος περιορίζεται στην τιμή 8 α.μ. για να αποφευχθούν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ρυθμών και μη γραμμικά φαινόμενα λόγω του περιοριστή στην έξοδο του σταθεροποιητή.

Σημειώνεται ότι σε δύο σημεία λειτουργίας (13 και 14) η γεννήτρια 1 έχει μεγαλύτερο μέτρο ολοκληρωτικού υπολοίπου (Πίνακας 6.23). Ωστόσο η σχεδίαση γίνεται για την γεννήτρια 3 δεδομένου ότι αυτή κυριαρχεί στα 12 από τα 14 σημεία λειτουργίας.

Στο Σχήμα 6.69 φαίνεται το διάγραμμα Bode του σταθεροποιητή της γεννήτριας 3 (μόνο η φάση). Οι κόκκινοι σταυροί υποδεικνύουν την φάση αντιστάθμισης που απαιτείται για κάθε σημείο

λειτουργίας. Όπως φαίνεται, λόγω της ποιής που υπάρχει στην αντικειμενική συνάρτηση, η υπεραντιστάθμιση είναι αρκετά μικρή (περίπου  $10^\circ$ ) και συμβαίνει μόνο για τα σημεία λειτουργίας 5 και 12. Από την άλλη πλευρά, τα σημεία λειτουργίας 13 και 14 είναι τα πιο υποαντισταθμισμένα.



Σχήμα 6.69: Διάγραμμα φάσης του  $\Sigma I_1$  και απαιτούμενη φάση αντιστάθμισης για τα σημεία λειτουργίας

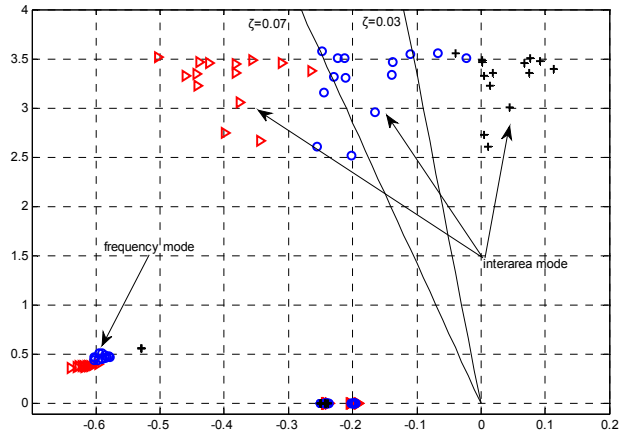
Στο Σχήμα 6.70 φαίνονται οι επικρατούσες ιδιοτιμές που υπολογίστηκαν με το απλοποιημένο μοντέλο πριν (μαύροι σταυροί) και μετά (μπλε κύκλοι) την εγκατάσταση του  $\Sigma I_1$  (απλοποιημένο μοντέλο B). Όπως φαίνεται ο  $\Sigma I_1$  βελτιώνει την ευστάθεια του διασυνδεδετικού ρυθμού για όλα τα σημεία λειτουργίας χωρίς να επηρεάζει την συχνότητά του. Επιπλέον η απόσβεση του ρυθμού της συχνότητας βελτιώνεται. Εφόσον η απόσβεση του διασυνδεδετικού ρυθμού δεν φτάνει την τιμή που ορίστηκε ( $\zeta=0.07$ ), και δεν εμφανίζεται αλλαγή της συχνότητας του ρυθμού με την προσθήκη του σταθεροποιητή ισχύος, επιλέγεται το μέγιστο κέρδος για τον  $\Sigma I_1$ .

Εφόσον η απόσβεση εξακολουθεί να είναι μη αποδεκτή για τα περισσότερα σημεία λειτουργίας, θα σχεδιαστεί και ένας δεύτερος σταθεροποιητής ισχύος. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία συμπεριλαμβάνοντας τον  $\Sigma I_1$  για τον υπολογισμό των νέων ολοκληρωτικών υπολοίπων. Το μέγιστο κατά μέτρο ολοκληρωτικό υπόλοιπο προκύπτει στην γεννήτρια 1 για τα περισσότερα σημεία λειτουργίας. Στον Πίνακα 6.24 δίνονται οι παράμετροι των δύο σταθεροποιητών ισχύος που σχεδιάστηκαν.

Πίνακας 6.24 Παράμετροι των σχεδιαζόμενων σταθεροποιητών ισχύος

	Γεννήτρια	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	Κέρδος (p.u.)	$T_w$ (s)
$\Sigma I_1$	3	0.1633	0.0612	8	5
$\Sigma I_2$	1	0.2637	0.0379	7	

Η εγκατάσταση του  $\Sigma I_2$  βελτιώνει περαιτέρω την ευστάθεια του συστήματος. Στο Σχήμα 6.70 τα κόκκινα τρίγωνα σηματοδοτούν τις επικρατούσες ιδιοτιμές μετά την εγκατάσταση των σταθεροποιητών στις γεννήτριες 1 και 3 υπολογισμένες με το απλοποιημένο μοντέλο (B).



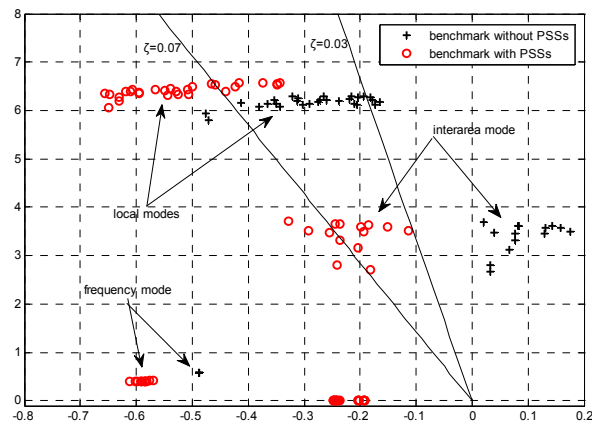
Σχήμα 6.70: Επικρατούσες ιδιοτιμές του απλοποιημένου μοντέλου (B) χωρίς σταθεροποιητή (μαύροι σταυροί), με τον  $\Sigma I_1$  (μπλε κύκλοι) και με τους  $\Sigma I_1, \Sigma I_2$  (κόκκινα τρίγωνα)

Όπως φαίνεται, δεν παρουσιάζεται κάποια αλληλεπίδραση μεταξύ των ρυθμών, και ο διασυνδεδετικός ρυθμός μετατοπίζεται αριστερά. Προκειμένου να ικανοποιηθεί το κριτήριο της απόσβεσης, επιλέγεται κέρδος 7α.μ. για τον  $\Sigma I_2$ .

#### 6.6.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Προκειμένου να διερευνηθεί η ορθότητα της σχεδίασης σταθεροποιητή με το απλοποιημένο μοντέλο, οι δύο σταθεροποιητές εισάγονται στο μοντέλο αναφοράς (A). Υπολογίζονται οι επικρατούσες ιδιοτιμές και η απόκριση σε μια διαταραχή.

Στο Σχήμα 6.71 φαίνονται οι επικρατούσες ιδιοτιμές του μοντέλου αναφοράς. Οι μαύροι σταυροί αντιστοιχούν στο μοντέλο αναφοράς χωρίς σταθεροποιητή, οι κόκκινοι κύκλοι στο μοντέλο αναφοράς με τους  $\Sigma I_1, \Sigma I_2$  σε λειτουργία.



Σχήμα 6.71: Επικρατούσες ιδιοτιμές μοντέλου αναφοράς, πριν και μετά την εγκατάσταση των  $\Sigma I_1, \Sigma I_2$

Η ιδιοτιμές που αντιστοιχούν στους ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς υπολογισμένους με το μοντέλο αναφοράς (A) και το απλοποιημένο μοντέλο (B) για το λιγότερο ευσταθές σημείο λειτουργίας (14) φαίνονται στον Πίνακα 6.25.

Πίνακας 6.25: Ιδιοτιμές ηλεκτρομηχανικών ρυθμών υπολογισμένων για το σημείο λειτουργίας 14 με το μοντέλο αναφοράς (A) και το απλοποιημένο μοντέλο (B), μετά την τοποθέτηση σταθεροποιητών

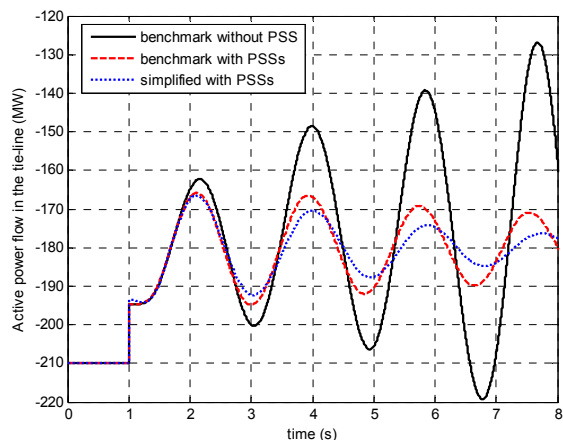
Μοντέλο	Ρυθμοί	Τιμή	Συχνότητα (Hz)	Ρυθμός απόσβεσης ζ
Αναφοράς (A) με ΣI <sub>1</sub>	Τοπικοί	-0.346 ± j6.14	0.98	0.056
		-0.348 ± j6.55	1.04	0.053
	Διασυνδετικός	0.065 ± j3.57	0.57	-0.018
	Συχνότητας	-0.556 ± j0.47	0.07	0.765
Αναφοράς (A) με ΣI <sub>1,2</sub>	Τοπικοί	-0.348 ± j6.55	1.04	0.053
		-0.657 ± j6.35	1.01	0.103
	Διασυνδετικός	-0.114 ± j3.52	0.56	0.032
	Συχνότητας	-0.589 ± j0.40	0.06	0.827
Απλοποιημένο (B) με ΣI <sub>1</sub>	Διασυνδετικός	-0.022 ± j3.50	0.56	0.006
	Συχνότητας	-0.597 ± j0.44	0.07	0.803
Απλοποιημένο (B) με ΣI <sub>1,2</sub>	Διασυνδετικός	-0.264 ± j3.38	0.54	0.078
	Συχνότητας	-0.619 ± j0.37	0.06	0.856

Όπως φαίνεται και με το λεπτομερές μοντέλο, οι σχεδιαζόμενοι σταθεροποιητές ισχύος παρέχουν θετική απόσβεση, χωρίς να επηρεάζουν σημαντικά την συχνότητα της ταλάντωσης. Αυτό αποδεικνύει ότι η φάση που εκτιμήθηκε για την σχεδίαση του σταθεροποιητή, μέσω του απλοποιημένου μοντέλου είναι αποδεκτή για την σχεδίαση των σταθεροποιητών ισχύος.

Επίσης, η απόσβεση των τοπικών ρυθμών αυξάνεται με την εγκατάσταση των σταθεροποιητών ισχύος, λόγω της αυξημένης φάσης αντιστάθμισης σε μεγαλύτερες συχνότητες. Τέλος, η απόσβεση του ρυθμού της συχνότητας επίσης αυξάνεται.

Συνολικά, το σύστημα σταθεροποιείται και παρότι ο λόγος απόσβεσης του διασυνδετικού ρυθμού υπερεκτιμάται από το απλοποιημένο μοντέλο, παραμένει μεγαλύτερος του 0.03 στο μοντέλο αναφοράς για όλα τα σημεία λειτουργίας που μελετήθηκαν.

Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται από την προσομοίωση της απόκρισης της ροής ισχύος στην διασυνδετική γραμμή, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 6.72. Η διαταραχή εφαρμόστηκε στο λιγότερο ευσταθές σημείο λειτουργίας (ΣΛ14) και είναι μια βηματική αύξηση 5% του φορτίου στον ζυγό 9. Παρότι το απλοποιημένο μοντέλο των δύο περιοχών υπερεκτιμά την απόσβεση του διασυνδετικού ρυθμού (μπλε διάστικτη γραμμή), οι σταθεροποιητές ισχύος σταθεροποιούν το σύστημα όπως φαίνεται στην απόκριση του μοντέλου αναφοράς (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή). Η απόσβεση του ρυθμού είναι ικανοποιητική, όταν συγκρίνεται με αυτή του συστήματος χωρίς σταθεροποιητές (λεπτομερές μοντέλο), η οποία φαίνεται με την μαύρη γραμμή στο Σχήμα 6.72.



Σχήμα 6.72: Ροή ισχύος στην διασύνδεση με και χωρίς σταθεροποιητή (μοντέλο αναφοράς) και με σταθεροποιητή (απλοποιημένο μοντέλο) για το σημείο λειτουργίας 14.

Τελικά, η εφαρμογή της τεχνικής σχεδίασης σταθεροποιητή για πολλαπλά σημεία λειτουργίας με χρήση αντικειμενικής συνάρτησης για τον καθορισμό των παραμέτρων του σταθεροποιητή ισχύος στο απλοποιημένο μοντέλο, επιτυγχάνει την σταθεροποίηση του ασταθούς διασυνδεδετικού ρυθμού, πετυχαίνοντας παράλληλα την αύξηση της απόσβεσης τόσο των τοπικών ρυθμών, όσο και του ρυθμού της συχνότητας.

#### 6.6.5. Πλεονεκτήματα σχεδίασης σταθεροποιητών για πολλαπλά σημείων λειτουργίας

Στην παράγραφο αυτή στόχος είναι να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα της σχεδίασης σταθεροποιητή για πολλαπλά σημεία λειτουργίας. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.23 η φάση των ολοκληρωτικών υπολοίπων ποικίλει για τα διάφορα σημεία λειτουργίας σε εύρος της τάξης των  $70^\circ$ . Στην συγκεκριμένη περίπτωση πραγματοποιείται σχεδίαση σταθεροποιητή με την μέθοδο που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.5.1 και εφαρμόστηκε στην παράγραφο 6.5.2 για το σημείο λειτουργίας 12. Προκειμένου να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα της μεθόδου σχεδίασης πολλαπλών σημείων λειτουργίας και να μην εμπλέκονται τα σφάλματα της απλοποίησης, χρησιμοποιείται το πλήρες μοντέλο. Οι APT είναι υψηλού κέρδους. Στον Πίνακα 6.26 φαίνεται το ολοκληρωτικό υπόλοιπο που αντιστοιχεί στον διασυνδεδετικό ρυθμό και η συχνότητά του.

Πίνακας 6.28: Ολοκληρωτικό υπόλοιπο διασυνδεδετικής ιδιοτιμής και συχνότητα της ιδιοτιμής για το σημείο λειτουργίας 12 (πλήρες μοντέλο)

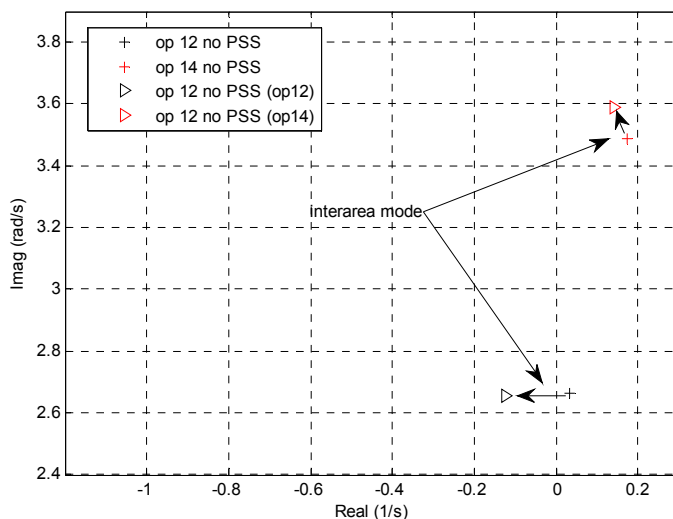
Σημείο λειτουργίας	Συχνότητα διασυνδεδετικού ρυθμού (Hz)	Γεννήτρια με το μέγιστο σε μέτρο ολοκληρωτικό υπόλοιπο	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο διασυνδεδετικού ρυθμού (γεννήτρια 3)	
			Μέτρο	Φάση (μοίρες)
12	0.4237	3	0.0257	177.9

Με την τεχνική σχεδίασης της παραγράφου 6.5.2 προκύπτει ο σταθεροποιητής ισχύος για την γεννήτρια 3 με παραμέτρους που φαίνονται στον Πίνακα 6.29.

Πίνακας 6.29: Σταθεροποιητής ισχύος για την γεννήτρια 3

	Γεννήτρια	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	Κέρδος (p.u.)	$T_w$ (s)
$\Sigma I_1$	3	0.0950	0.1053	8	5

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.73 στο σημείο λειτουργίας 12, ο διασυνδετικός ρυθμός πηγαίνει προς τα αριστερά χωρίς να μεταβάλλει την συχνότητά του. Ωστόσο για το σημείο λειτουργίας 14 δεν συμβαίνει το ίδιο. Ο διασυνδετικός ρυθμός αυξάνει την συχνότητά του και πολύ λιγότερο την απόσβεσή του. Στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας, η φάση του αντίστοιχου ολοκληρωτικού υπολοίπου είναι αρκετά διαφορετική από την φάση στο σημείο 12, με αποτέλεσμα ο σταθεροποιητής να μην εμφανίζει την επιθυμητή επίδραση στον ρυθμό.



Σχήμα 6.73: Ροή ισχύος στην διασύνδεση με και χωρίς σταθεροποιητή (μοντέλο αναφοράς) για τα σημεία λειτουργίας 12 και 14.

Φαίνεται δηλαδή ότι η σχεδίαση για ένα σημείο λειτουργίας είναι δυνατόν να εμφανίζει αδυναμίες, καθώς δεν εγγυάται την καλή λειτουργία του σταθεροποιητή σε άλλα σημεία πέραν αυτών για τα οποία έχει σχεδιαστεί. Αντίθετα η σχεδίαση με πολλαπλά σημεία ισορροπίας μπορεί να διασφαλίσει έναν συμβιβασμό μεταξύ των διαφορετικών φάσεων των ολοκληρωτικών υπολοίπων σε διάφορα σημεία λειτουργίας και εγγυάται την ικανοποιητική λειτουργία του σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας (εφ' όσον αυτές έχουν περιληφθεί στην διαδικασία της σχεδίασης).



# 7. Εφαρμογή στο Βαλκανικό σύστημα

## 7.1. Περιγραφή συστήματος

### 7.1.1. Πρώην ζώνη II της UCTE

Στο κεφάλαιο αυτό, το απλοποιημένο μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4, χρησιμοποιείται για την ανάλυση του ηλεκτρικού συστήματος της Νότιο-Ανατολικής Ευρώπης. Η εφαρμογή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι αναφέρεται σε ένα πραγματικό σύστημα όπου πιστοποιείται η χρησιμότητα της μεθόδου που αναπτύχθηκε, ενώ παράλληλα δοκιμάζεται ο αλγόριθμος σε ένα σύστημα πολλών εξισώσεων (το σύστημα περιλαμβάνει 2000 ζυγούς και 130 γεννήτριες συνεπώς οι εξισώσεις που λύνονται σε κάθε βήμα του αλγορίθμου είναι της τάξης των 5000). Το τμήμα αυτό του ευρωπαϊκού συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει το σύνολο των Βαλκανίων οριοθετείται στα βόρεια από την Μολδαβία, Ουκρανία, Ουγγαρία και την Κροατία. Επίσης δεν περιλαμβάνεται η διασύνδεση με την Τουρκία (γραμμή Ν.Σάντα-Babaeski). Στον χάρτη του Σχήματος 7.1 παρουσιάζεται το μελετούμενο σύστημα με τις βασικές διασυνδέσεις μεταξύ των επιμέρους ηλεκτρικών συστημάτων των κρατών. Το σύστημα αυτό έχει κατ' επανάληψη μελετηθεί από το Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ [MMVK04], [NKV07], [VMN09], [MK08] και στο παρελθόν αναφερόταν ως "Ζώνη II της UCTE".



Σχήμα 7.1: Το βαλκανικό σύστημα και οι βασικές εξωτερικές και εσωτερικές διασυνδέσεις του

Στο σύστημα της Νοτιο-Ανατολικής Ευρώπης παρουσιάζονται μια σειρά ταλαντωτικοί ρυθμοί, οι οποίοι περιστασιακά εμφανίζουν χαμηλή απόσβεση. Ο διασυνδεδετικός ρυθμός με την χαμηλότερη συχνότητα (χωρίς τη σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο της Τουρκίας), είναι περίπου 0.2Hz. Την 1η Μαΐου του 2005 στο σύστημα αυτό παρουσιάστηκε πρόβλημα ευστάθειας του διασυνδεδετικού ρυθμού. Ο ρυθμός αυτός εμφανίστηκε χωρίς απόσβεση για κάποια λεπτά και καταγράφηκε στα PMU (Phasor Measurement Units) όλης της Ευρώπης χωρίς να μπορεί να αποσαφηνιστεί η αιτία της διέγερσης. Κατά την διάρκεια του συμβάντος αυτού εμφανίστηκαν μη αποσβενύμενες ταλαντώσεις και στο ελληνικό σύστημα το οποίο αποτελεί το νότιο-ανατολικό άκρο του Ευρωπαϊκού διασυνδεδεμένου συστήματος.

Στο παρόν κεφάλαιο, αναλύεται το ηλεκτρικό σύστημα της Νότιο-Ανατολικής Ευρώπης με το πρόγραμμα ROM-E/Sim και στην συνέχεια πραγματοποιείται μια εκτίμηση της ακρίβειας της μεθόδου που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή μέσω της σύγκρισης με τα αποτελέσματα εμπορικών πακέτων λογισμικού που μοντελοποιούν λεπτομερώς το σύστημα. Τα πακέτα αυτά είναι το PacDyn του CEPEL [MGQ02] το οποίο είναι ένα πρόγραμμα για την ανάλυση μικρών διαταραχών μεγάλων ηλεκτρικών συστημάτων, καθώς και το PSS/E το οποίο είναι ένα λογισμικό πακέτο για την προσομοίωση και την ανάλυση μικρών διαταραχών ηλεκτρικών συστημάτων το οποίο χρησιμοποιείται διευρυμένα από τους διαχειριστές των συστημάτων [PML10]. Τέλος πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας των βασικών ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων με την χρήση του απλοποιημένου μοντέλου. Για τον σκοπό αυτό διαμορφώνονται δύο μελετούμενα σενάρια, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω, με την ονομασία Balkans 2012, και Balkans 2005.

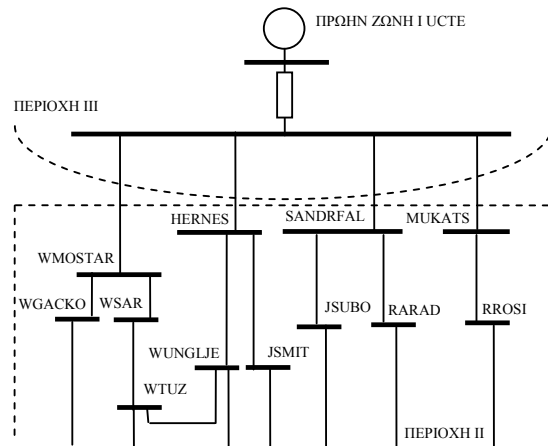
### 7.1.2. Διασύνδεση με την πρώην ζώνη I UCTE

Κατά την διάρκεια των τελευταίων ετών, το εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ έχει αναπτύξει μαζί με τον διαχειριστή του ελληνικού συστήματος μεταφοράς (πρώην Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.) ένα λεπτομερές μοντέλο του Βαλκανικού συστήματος το οποίο προέρχεται από το μοντέλο της πρώην Ζώνης II της UCTE. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε αρχικά σε συνεργασία με το ΕΚC (Electricity Coordinating Center) της Σερβίας [MMVK04], και αναβαθμίστηκε σημαντικά συμπεριλαμβάνοντας την επανασύνδεση των δύο ζωνών της UCTE το 2004. Για την πρώην Ζώνη I της UCTE θεωρήθηκε ένα προσεγγιστικό μοντέλο ενώ επίσης ενσωματώθηκαν οι σημαντικότερες αναβαθμίσεις στο ελληνικό σύστημα, καθώς και στα συστήματα των κρατών της νότιο-ανατολικής Ευρώπης [NKV07]. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει το δίκτυο μεταφοράς υψηλής και υπερύψηλης τάσης της Ελλάδας, καθώς και το δίκτυο υπερύψηλης τάσης των υπολοίπων κρατών της νότιο-ανατολικής Ευρώπης. Οι γεννήτριες μοντελοποιούνται λεπτομερώς, περιλαμβάνοντας τους ρυθμιστές στροφών, τις διατάξεις διέγερσης και τους σταθεροποιητές ισχύος.

Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 7.1-7.2, θεωρείται ότι η διασύνδεση του βαλκανικού συστήματος με την υπόλοιπη Ευρώπη γίνεται με τις παρακάτω γραμμές μεταφοράς:

- Μουκάτσεβο (Ουκρανία) – Ροσιόρι (Ρουμανία)
- Σαντορφάλβα (Ουγγαρία) – Αράντ (Ρουμανία)
- Σαντορφάλβα (Ουγγαρία) – Σουμπότιτσα (Σερβία)
- Ερνεστίνοβο (Κροατία) – Μιτρόβιτσα (Σερβία)
- Ερνεστίνοβο (Κροατία) – Ουγκλεβιτς (Βοσνία)
- Ορλόβακ (Κροατία) - Μοστάρ (Βοσνία)

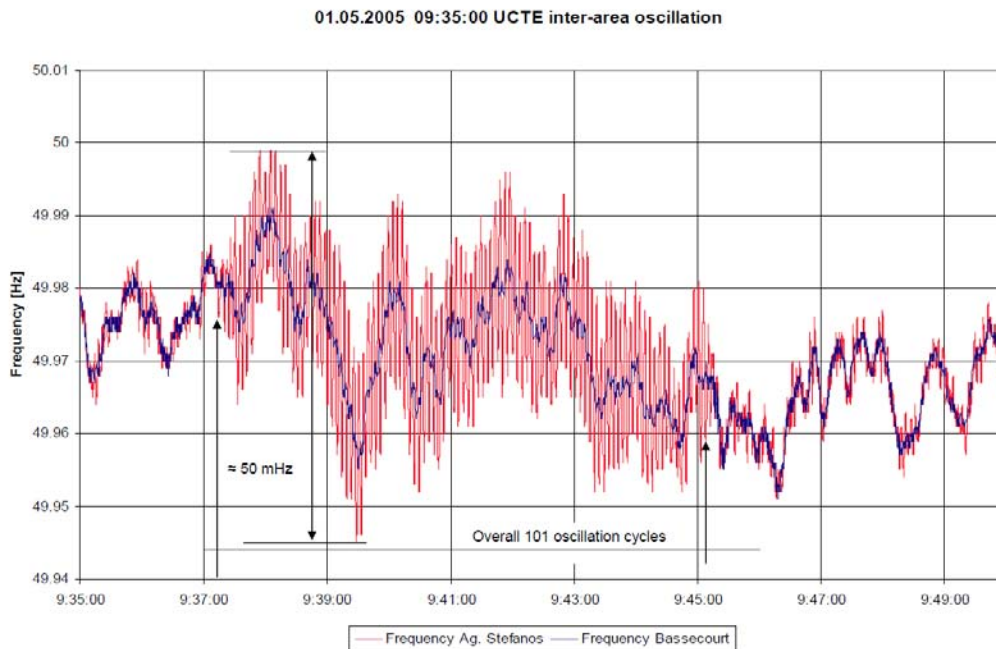
Για το υπόλοιπο ευρωπαϊκό σύστημα έχουν υλοποιηθεί δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη θεωρεί το ευρωπαϊκό σύστημα ως έναν άπειρο ζυγό. Η παραδοχή αυτή σημαίνει ότι θεωρείται μια γεννήτρια με άπειρη αδράνεια, της οποίας η συχνότητα και η τάση είναι πάντοτε στην ονομαστική τιμή. Στην δεύτερη θεωρούμε το ευρωπαϊκό σύστημα ως μια μεγάλη –αλλά πεπερασμένη- γεννήτρια και ένα ισοδύναμο φορτίο.



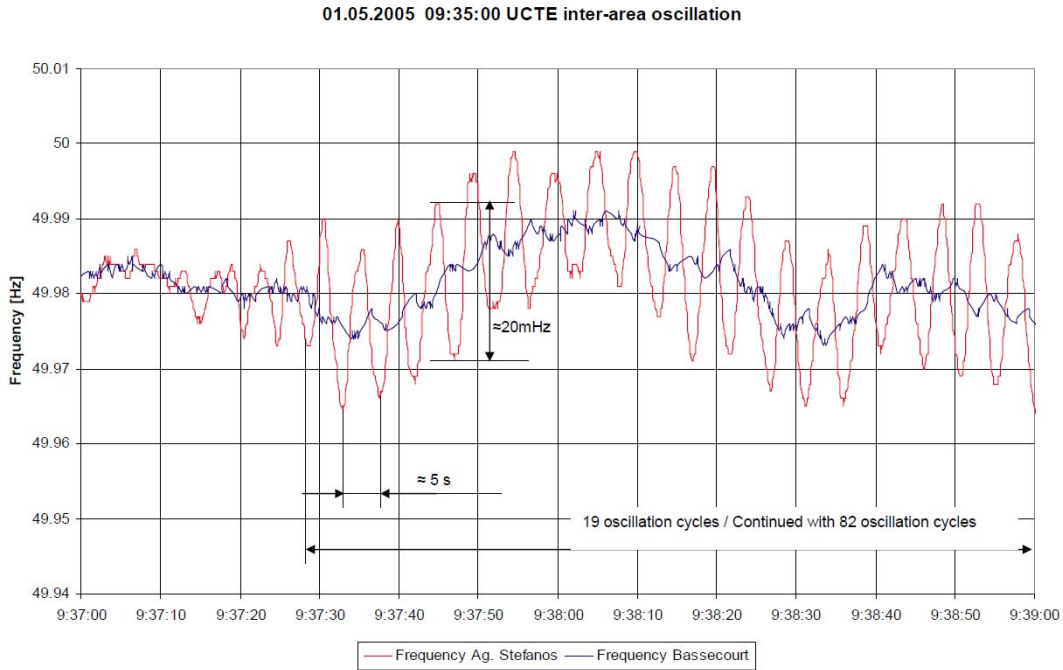
Σχήμα 7.2: Η εξωτερική διασύνδεση του βαλκανικού συστήματος με το υπόλοιπο ευρωπαϊκό σύστημα

### 7.1.3. Η διέγερση του διασυνδεδετικού ρυθμού την 1-5-2005

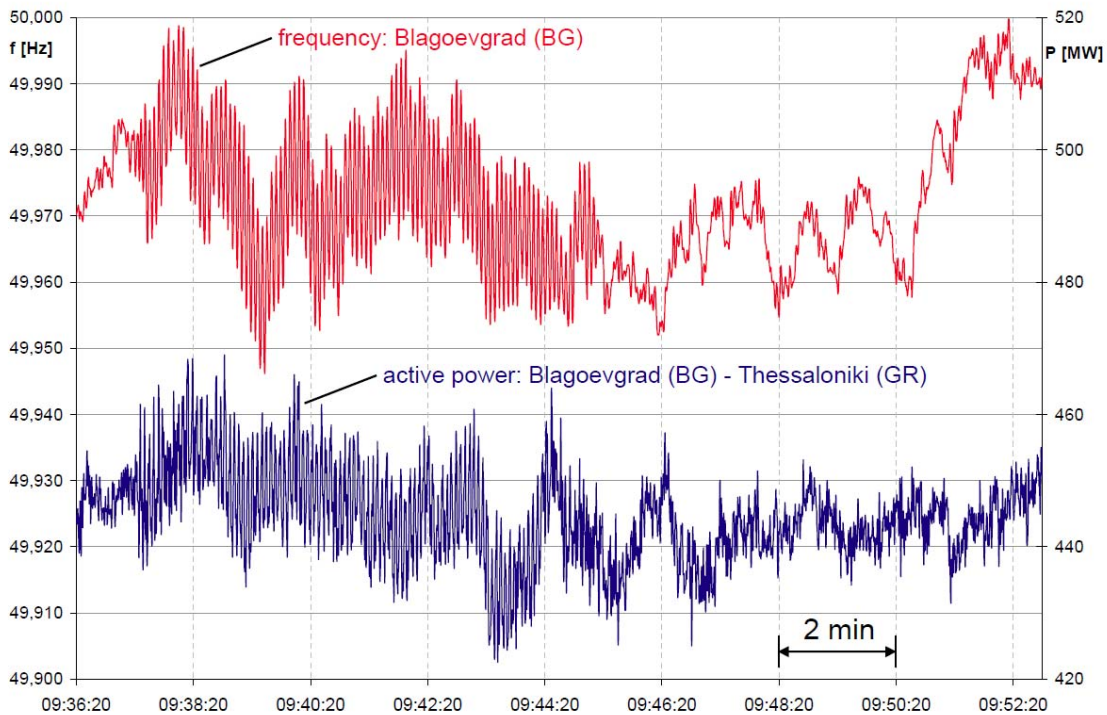
Την 1η Μαΐου 2005 παρουσιάστηκε μια μη αποσβενύμενη ταλάντωση σχετιζόμενη με τον διασυνδεδετικό ρυθμό μεταξύ Νότιο-Ανατολικής Ευρώπης και του υπόλοιπου ευρωπαϊκού συστήματος. Η ημέρα αυτή, όπως θα αναφερθεί και στην συνέχεια ήταν αργία (μέρα Ορθόδοξου Πάσχα και 1η Μάη) συνεπώς εμφανίστηκαν χαμηλά φορτία. Πολλές μονάδες ήταν εκτός λειτουργίας, ενώ και κάποιες γραμμές μεταφοράς είχαν τεθεί εκτός λειτουργίας. Στις 9.35 π.μ. της ημέρας εκείνης εμφανίστηκε μια ταλάντωση ισχύος η οποία κράτησε 8 λεπτά, χωρίς να είναι δυνατόν για τους διαχειριστές να καθορίσουν την αιτία. Στα Σχήματα 7.3-7.7 εμφανίζονται τα δεδομένα των μετρήσεων έτσι όπως κατεγράφησαν στα διάφορα σημεία του συστήματος. Τα διαγράμματα αυτά έχουν ληφθεί από την εσωτερική αναφορά του ΔΕΣΜΗΕ για το συμβάν [JKA05].



Σχήμα 7.3: Ταλαντώσεις της συχνότητας μεταξύ ελληνικού και ευρωπαϊκού συστήματος την 1<sup>η</sup> Μαΐου 2005

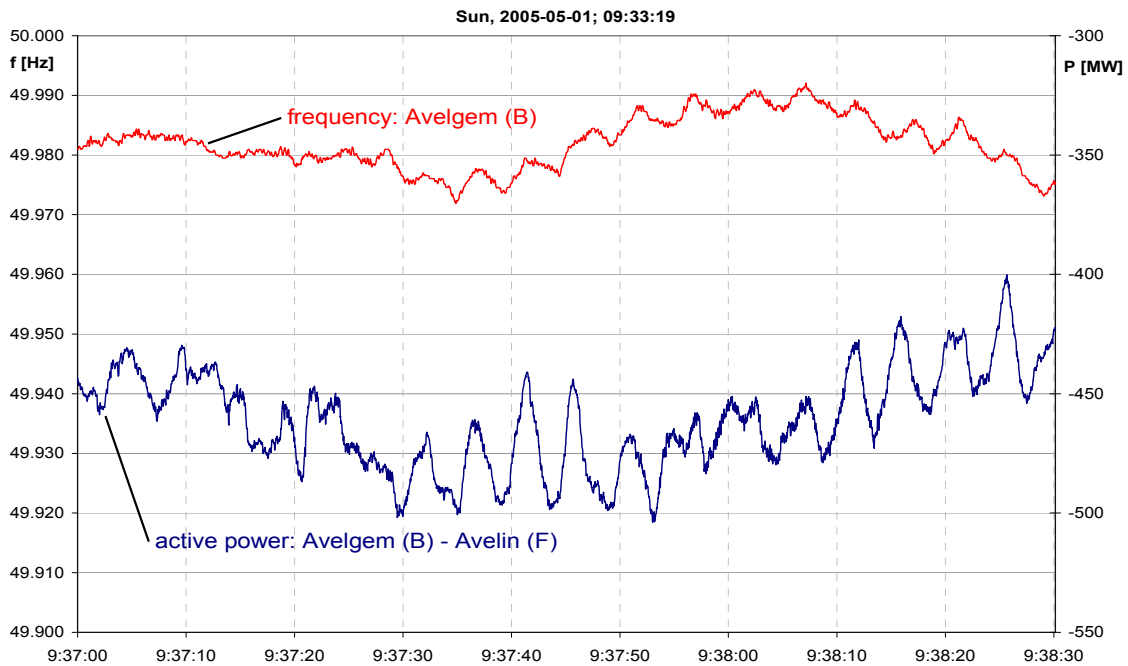


Σχήμα 7.4: Ταλαντώσεις της συχνότητας μεταξύ ελληνικού και ευρωπαϊκού συστήματος την 1<sup>η</sup> Μαΐου 2005 (λεπτομέρεια)

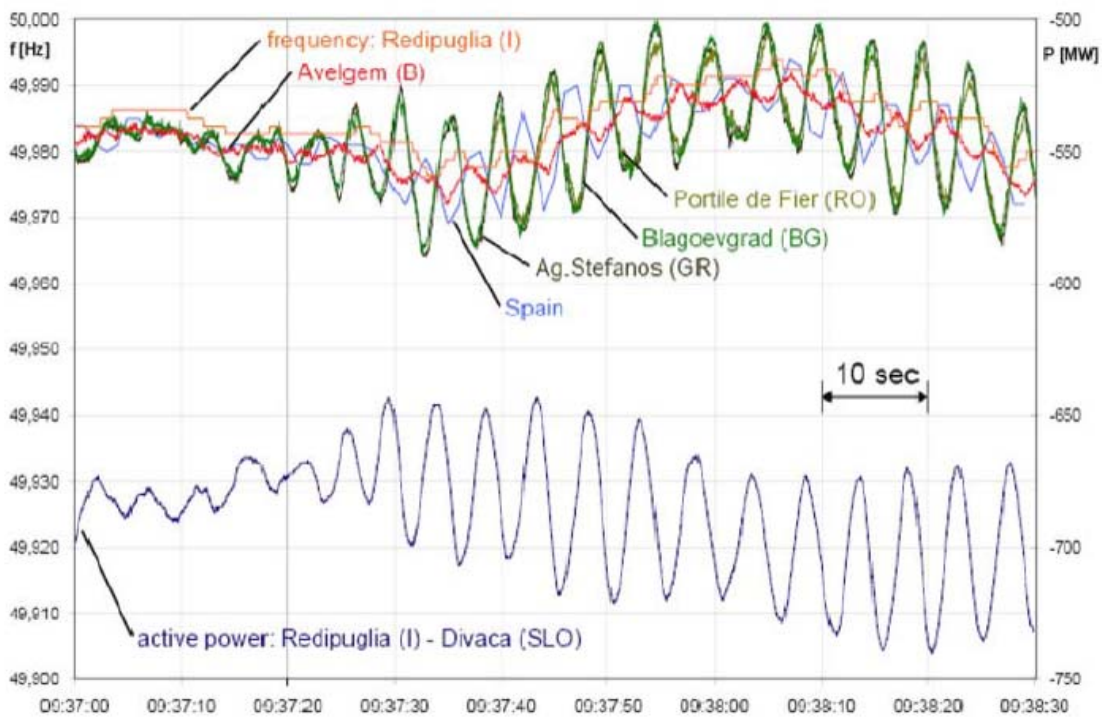


Σχήμα 7.5: Ταλαντώσεις της συχνότητας και ισχύος στην διασύνδεση Ελλάδα – Βουλγαρία την 1<sup>η</sup> Μαΐου 2005





Σχήμα 7.6: Ταλαντώσεις της συχνότητας και ισχύος στην διασύνδεση Βελγίου – Γαλλίας την 1<sup>η</sup> Μαΐου 2005



Σχήμα 7.7: Ταλαντώσεις της συχνότητας και ισχύος στην διασύνδεση σε διάφορα σημεία του ευρωπαϊκού συστήματος την 1<sup>η</sup> Μαΐου 2005

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.3-7.7 προκλήθηκαν ταλαντώσεις στην συχνότητα, την τάση αλλά και τις ροές ισχύος σε όλο το ευρωπαϊκό ηλεκτρικό σύστημα. Όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 7.3-7.4 είναι προφανής η διέγερση του διασυνδεδετικού ρυθμού του βαλκανικού συστήματος ως προς το

εξωτερικό σύστημα. Η περίοδος του διεγερόμενου ρυθμού είναι περίπου 5 δευτερόλεπτα, και η συχνότητά του 0.2Hz [SBR98], [ANW11].

## 7.2. Σενάριο Balkans 2012 (BL12)

Για την μελέτη του συστήματος της νότιο-ανατολικής Ευρώπης και την διερεύνηση της ακρίβειας του απλοποιημένου μοντέλου (που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4 της διατριβής), επιλέχθηκαν δύο σενάρια. Το πρώτο σενάριο περιγράφεται στην παρούσα ενότητα και αναφέρεται στις προβλέψεις για το έτος 2012 παραλείποντας την διασύνδεση με το τούρκικο ηλεκτρικό σύστημα (BL12). Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζεται η βασική εκδοχή αυτού του σεναρίου. Στην συνέχεια εξετάζονται διάφορες παραλλαγές της βασικής αυτής εκδοχής προκειμένου να μελετηθεί η ευαισθησία του διασυνδεδετικού ρυθμού ως προς μια σειρά παραμέτρων.

### 7.2.1. Περιγραφή ροών ισχύος σεναρίου BL12

Το μελετούμενο σενάριο (BL12), σε αδρές γραμμές περιγράφεται από τους Πίνακες 7.1-7.2. Πρόκειται για σενάριο χαμηλού φορτίου για τα συστήματα των Βαλκανίων, όπου εξάγονται περίπου 920MW προς το υπόλοιπο ευρωπαϊκό σύστημα. Στο σενάριο αυτό κυρίως εξάγει η Βουλγαρία, και δευτερευόντως η Βοσνία, Σερβία, Αλβανία. Ειδικότερα για το σύστημα της Αλβανίας ισχύει ότι δύο γεννήτριες (AKOMANG3, AFIERZ3) είναι ακτινικά συνδεδεμένες με το ελληνικό σύστημα ενώ το υπόλοιπο Αλβανικό σύστημα είναι διασυνδεδεμένο με τα συστήματα που βρίσκονται στον Βορά (Κόσοβο, Μαυροβούνιο). Αποτέλεσμα είναι να υφίστανται στην ουσία δύο διαφορετικά υποσυστήματα στο ηλεκτρικό σύστημα της Αλβανίας με διακριτές διασυνδέσεις.

Πίνακας 7.1: Παραγωγή και φορτίο ανά περιοχή Βαλκανικού συστήματος

	Εγχώρια	
	Παραγωγή (MW)	Φορτίο (MW)
Αλβανία (AL)	655	509
Ελλάδα (GR)	4969	4806
Βουλγαρία (BG)	3362	2307
Ρουμανία (RO)	6977	7360
ΠΓΔ Μακεδον. (MK)	0	302
Σερβία+Μαυροβούνιο (ME+RS)	4271	3989
Βοσνία (BA)	456	103
<b>Σύνολο</b>	<b>20690</b>	<b>19376</b>

Πίνακας 7.2: Εισαγωγές και εξαγωγές ενέργειας ανά περιοχή Βαλκανικού συστήματος

Εισαγωγές \ Εξαγωγές									
	Αλβ. (GR)	Αλβ. (ME+RS)	Ελλάδα	Βουλγ.	Ρουμ.	ΠΓΔΜ	Σερβία+Μαυροβούνιο	Βοσνία	Υπόλ. Ευρώπη
Αλβανία (GR)			53						
Αλβανία (ME+RS)							-184		
Ελλάδα	-53			114		-133			
Βουλγαρία			-114		-538		-358		
Ρουμανία				538			23		6
ΠΓΔ Μακεδον.			133				170		
Σερβία+Μαυροβούνιο		184		358	-23	-170		392	-950
Βοσνία							-392		42
Υπόλοιπη Ευρώπη					-6		950	-42	
<b>Σύνολο</b>	<b>-53</b>	<b>184</b>	<b>72</b>	<b>1010</b>	<b>-567</b>	<b>-303</b>	<b>209</b>	<b>350</b>	<b>-902</b>

### 7.2.2. Απλοποίηση ΣΗΕ και χωρισμός περιοχών

Η εφαρμογή των απλοποιημένων μοντέλων και της επέκτασης της οιονεί στατικής προσέγγισης για διασυνδεδετικές ταλαντώσεις που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας διατριβής μειώνει σημαντικά τις μεταβλητές κατάστασης (Πίνακας 7.3).

Πίνακας 7.3: Μεταβλητές κατάστασης με λεπτομερές μοντέλο και προσέγγιση μειωμένης τάξης (4 περιοχών)

Διάταξη	Τύπος	Αριθμός μεταβλητών κατάστασης	
		Λεπτομερές μοντέλο	Μοντέλο μειωμένης τάξης
Γεννήτριες	GENCLS	1•2=2	109+5
	GENROU	67•6=402	
	GENSAL	42•5=210	
Αυτόματοι Ρυθμιστές Τάσης	EXST1	15•4=60	15•3=45
	ESAC4A	25•3=75	25•2=50
	IEEET1	47•4=188	47•3=141
	ESAC1A	22•5=110	22•3=66
Ρυθμιστές Στροφών – Στρόβιλοι	HYGOV	12•4=48	12•3=36
	TGOV1	52•2=104	52•2=104
	IEEEG3	18•4=72	18•4=72
	IEEEG1	27•6=162	27•4=108
Σταθεροποιητές Ισχύος	STAB1	10•3=30	10•3=30
Σύνολο		1463	766

Η μείωση αυτή κατά κύριο λόγο προκύπτει από την απλοποίηση των γεννητριών και δευτερευόντως από την απλοποίηση των λοιπών διατάξεων του ΣΗΕ. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.3 η χρήση του προτεινόμενου μοντέλου μειώνει τις μεταβλητές κατάστασης κατά 53%.

Ο χωρισμός των συνεκτικών περιοχών γίνεται βάση της μεθόδου που περιγράφηκε στην ενότητα 1.4 και καταλήγει στην διαμόρφωση των τεσσάρων περιοχών που φαίνονται στο Σχήμα 7.8. Η πρώτη αποτελείται από δύο γεννήτριες της Αλβανίας οι οποίες συνδέονται ακτινικά στο ελληνικό σύστημα μέσω της διασύνδεσης Ελμπασάν-Καρδιάς (περιοχή Α). Η δεύτερη (περιοχή Γ) περιλαμβάνει το σύνολο των γεννητριών στο ελληνικό σύστημα, ενώ η τρίτη περιλαμβάνει τις υπόλοιπες γεννήτριες του βαλκανικού συστήματος (περιοχή Β). Το υπόλοιπο ευρωπαϊκό σύστημα μοντελοποιείται ως μια άπειρη γεννήτρια (περιοχή Ε).



Σχήμα 7.8: Χάρτης ΝΑ Ευρώπης με τον χωρισμό των τεσσάρων περιοχών (Σενάριο BL12)

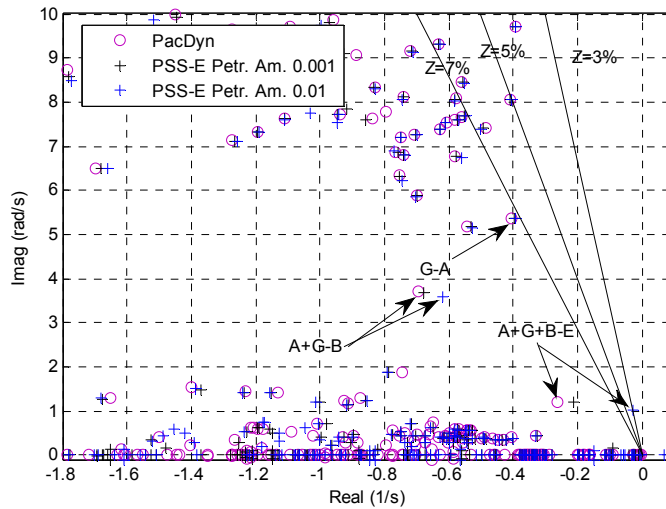
### 7.2.3. Ακρίβεια υπολογισμού ιδιοτιμών με εμπορικά λογισμικά πακέτα

Ο έλεγχος της ακρίβειας της απλοποιημένης προσέγγισης προϋποθέτει τον ακριβή υπολογισμό των ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος με το λεπτομερές μοντέλο. Για τον λόγο αυτό, πριν προχωρήσουμε στην εφαρμογή της απλοποιημένης προσέγγισης στο συγκεκριμένο σενάριο, υπολογίστηκαν οι ιδιοτιμές με δύο εμπορικά πακέτα λογισμικού. Στο Σχήμα 7.9 φαίνεται το διάγραμμα ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος υπολογισμένο με το λογισμικό PSS/E και PacDyn. Αντίστοιχα οι ιδιοτιμές των διασυνδεδετικών ρυθμών για το σενάριο αυτό δίνονται στον Πίνακα 7.4



Πίνακας 7.4. Σύγκριση ιδιοτιμών διασυνδεδειγμένων ρυθμών για σενάριο BL12

Ρυθμός	ROM-E/Sim			PacDyn			PSS/E		
	Ιδιοτιμή	$\zeta(\%)$	Συχνότη. (Hz)	Ιδιοτιμή	$\zeta(\%)$	Συχνότη. (Hz)	Ιδιοτιμή	$\zeta(\%)$	Συχνότη. (Hz)
A-G	-0.0790 +5.217j	1.5	0.83	-0.4041 +5.354j	7.5	0.85	-0.3971 +5.362j	7.4	0.85
A+G-B	-0.2819 +3.961j	7.1	0.63	-0.6905 +3.709j	18.3	0.59	-0.6763 +3.696j	18	0.59
A+G+B-E	-0.2435 +1.131j	21.0	0.18	-0.262 +1.115j	22.8	0.18	-0.2394 +1.119j	20.9	0.18

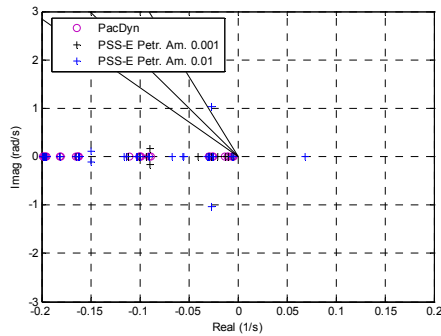


Σχήμα 7.9: Επικρατούσες ιδιοτιμές υπολογισμένες με PSS/E και PacDyn

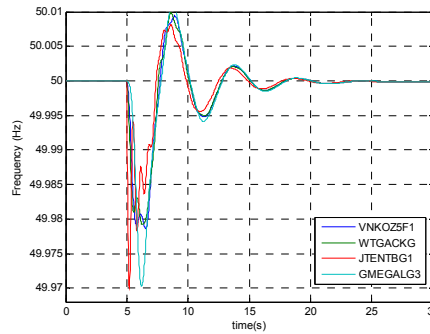
Στην περίπτωση του PSS/E πραγματοποιήθηκαν δύο υπολογισμοί με αλλαγή της παραμέτρου διαταραχής ( $\Delta x$ ) που εισάγεται για τον υπολογισμό του πίνακα κατάστασης (Perturbation amount). Γενικώς ο υπολογισμός των ιδιοτιμών είναι αρκετά παραπλήσιος σχεδόν σε όλες τις ιδιοτιμές με μερικές όμως εξαιρέσεις. Η ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στον ρυθμό G+A-B και πολύ περισσότερο η ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στον ηλεκτρομηχανικό ρυθμό της ευρωπαϊκής διασύνδεσης επηρεάζονται στην περίπτωση του PSS/E από την παράμετρο διαταραχής ( $\Delta x$ ) που εισάγεται για τον υπολογισμό του πίνακα κατάστασης [PSR03]. Ειδικότερα στην περίπτωση της ιδιοτιμής της ευρωπαϊκής διασύνδεσης (A+G+B-E) η απόκλιση είναι πολύ σημαντική μεταξύ των δύο υπολογιζόμενων ιδιοτιμών. Στο Σχήμα 7.9 με κύκλους παριστάνονται οι ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου συστήματος που υπολογίζονται με το PacDyn. Με σταυρούς (μπλε και μαύρο) τα αποτελέσματα του PSS/E (με μέγεθος διαταραχής  $\Delta x=0.01$  και  $\Delta x=0.001$  αντίστοιχα).

Επίσης στον υπολογισμό των ιδιοτιμών μέσω του PSS/E (μέγεθος διαταραχής  $\Delta x=0.01$ ) προκύπτει μία θετική πραγματική ιδιοτιμή (Σχήμα 7.10), η οποία ωστόσο δεν αντανακλά την πραγματική δυναμική του συστήματος. Αντίστοιχη ιδιοτιμή δεν εμφανίζεται στα αποτελέσματα του PacDyn, και δεν εμφανίζεται αστάθεια στην προσομοίωση των διαταραχών με το πρόγραμμα PSS/E. Στο Σχήμα 7.11 φαίνεται η προσομοίωση μιας αύξησης του φορτίου κατά 200MW στον ζυγό JSUBO31(Subotica) κοντά στην εξωτερική διασύνδεση, όπου το σύστημα φαίνεται ευσταθές. Ο

υπολογισμός των θετικών ιδιοτιμών προκύπτει λοιπόν εμφανώς λόγω σφάλματος στον αλγόριθμο υπολογισμού ιδιοτιμών και όχι λόγω πραγματικής αστάθειας:



Σχήμα 7.10: Επικρατούσες ιδιοτιμές υπολογισμένες με PSS/E και PacDyn (λεπτομέρεια)

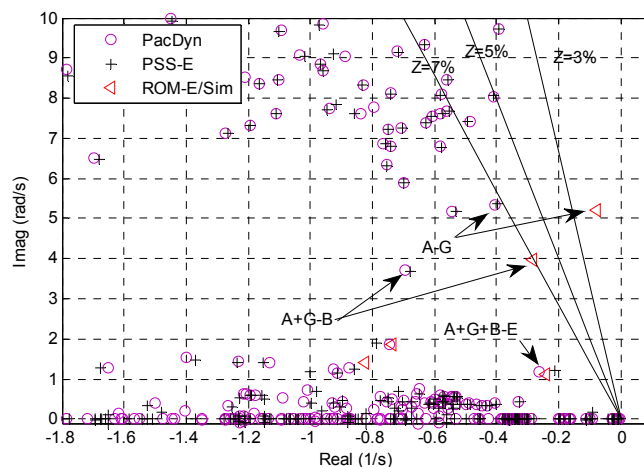


Σχήμα 7.11: Απόκριση σε διαταραχή αύξησης φορτίου 200MW στον ζυγό JSUBO31

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, ως αναφορά θα θεωρούνται τα αποτελέσματα του PacDyn, ενώ οι οποίες ιδιοτιμές υπολογιστούν με το PSS/E θα πρέπει να θέτουν την παράμετρο διαταραχής ( $\Delta x$ ) ίση με 0.001 και όχι μεγαλύτερη.

#### 7.2.4. Σύγκριση απλοποιημένου μοντέλου ROM-E/Sim με το PacDyn και το PSS/E

Προκειμένου να διερευνηθεί το σφάλμα το οποίο εισάγει η απλοποίηση στην εκτίμηση των ηλεκτρομηχανικών ρυθμών πραγματοποιήθηκε σύγκριση των ιδιοτιμών που υπολογίζονται με το λεπτομερές και το απλοποιημένο μοντέλο. Στο Σχήμα 7.12 παρουσιάζονται οι επικρατούσες ιδιοτιμές του βαλκανικού συστήματος που αντιστοιχούν στο σενάριο BL12. Οι ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου συστήματος υπολογίζονται τόσο με το μοντέλο μειωμένης τάξης όσο και με δύο εμπορικά λογισμικά το PacDyn και το PSS/E. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.12 οι ιδιοτιμές που υπολογίζονται με τα δύο αυτά λογισμικά πακέτα είναι σχεδόν ταυτόσημες. Ο υπολογισμός των ιδιοτιμών του απλοποιημένου συστήματος γίνεται με την μέθοδο ταυτόχρονου υπολογισμού ελαχίστων ιδιοτιμών (παράγραφος 5.4.2). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.12, προκειμένου να υπολογιστούν οι τρεις ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί υπολογίστηκαν ακριβώς πέντε ιδιοτιμές (χρήση δύο διανυσμάτων ασφαλείας).



Σχήμα 7.12: Επικρατούσες ιδιοτιμές Βαλκανικού συστήματος υπολογισμένες με τα λογισμικά πακέτα PSS/E, PacDyn και το ROM-E/Sim

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.4, για τις ιδιοτιμές που αντιστοιχούν στους τρεις διασυνδεδετικούς ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς των τεσσάρων περιοχών υπάρχει ικανοποιητική προσέγγιση της

συχνότητας ενώ παράλληλα εμφανίζεται σφάλμα στην εκτιμώμενη απόσβεση. Οι ιδιοτιμές που αντιστοιχούν στους ρυθμούς A-G, A+G-B εμφανίζουν μεγαλύτερο σφάλμα, λόγω του γεγονότος ότι είναι σχετικά υψηλότερης συχνότητας ρυθμοί, ενώ αντίθετα στην ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στην ευρωπαϊκή διασύνδεση που κυρίως ενδιαφέρει, το σφάλμα είναι μικρό.

### 7.3. Ανάλυση ευαισθησίας ευρωπαϊκού διασυνδεδετικού ρυθμού (σενάριο BL12)

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται μια ανάλυση ευαισθησίας του ευρωπαϊκού ρυθμού διασύνδεσης. Μεταβάλλοντας μια σειρά παραμέτρων του σεναρίου παρατηρείται η επίδραση στον διασυνδεδετικό ρυθμό. Στόχος είναι να φανούν πιθανές συνθήκες όπου ο ρυθμός αυτός είναι δυνατόν να εμφανίσει χαμηλή απόσβεση όπως π.χ. στο στιγμιότυπο της 1-5-2005.

#### 7.3.1. Αλλαγή ροής διασύνδεσης

Μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι ο ευρωπαϊκός διασυνδεδετικός ρυθμός φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από το επίπεδο των εξαγωγών (ή εισαγωγών) προς (ή από) το υπόλοιπο ευρωπαϊκό σύστημα. Αντίθετα οι υπόλοιποι δύο διασυνδεδετικοί ρυθμοί δεν φαίνεται να επηρεάζονται σημαντικά από αυτές τις μεταβολές. Μέσα από τα αποτελέσματα που φαίνονται στους Πίνακες 7.5-7.7 καθώς και στο Σχήμα 7.13 φαίνεται ότι οι αυξημένες εξαγωγές τείνουν να μειώσουν την απόσβεση του ευρωπαϊκού ρυθμού. Ωστόσο για λογικές εξαγωγές η απόσβεση παραμένει πάντα ικανοποιητική. Αντίθετα η μείωση του επιπέδου των εξαγωγών ή ακόμα και η αντιστροφή της ροής ισχύος στην διασύνδεση (έτσι ώστε το βαλκανικό σύστημα να εισάγει) τείνει να αυξήσει την απόσβεσή του. Στο Σχήμα 7.14 φαίνεται η μεταβολή της απόσβεσης συσχετισμένη με τα επίπεδα των εξαγωγών προς το υπόλοιπο ευρωπαϊκό σύστημα. Τέλος σημειώνεται ότι η συχνότητα των μελετούμενων ρυθμών δεν μεταβάλλεται σημαντικά.

Η μεταβολή της ροής της διασύνδεσης στα σενάρια BL12-2 έως BL12-8 γίνεται με την μείωση της παραγωγής κάποιων γεννητριών. Στα συγκεκριμένα σενάρια η μείωση γίνεται τόσο σε γεωγραφικά απομακρυσμένες από την διασύνδεση γεννήτριες (Kozlodui – Βουλγαρία, μονάδες λιγνιτικού κέντρου Πτολεμαΐδας, Κοζάνης –Ελλάδα) όσο και σε μονάδες πλησίον της διασύνδεσης (Tent –Σερβία). Δεν φαίνεται για τα μελετούμενα σημεία λειτουργίας κάποια εξάρτηση της μεταβολής του ευρωπαϊκού διασυνδεδετικού ρυθμού από το αν οι γεννήτριες που τροποποιούν την παραγωγή τους είναι απομακρυσμένες από την διασύνδεση ή όχι. Η μεταβολή του ρυθμού δείχνει μια ισχυρή εξάρτηση από τα επίπεδα των εξαγωγών ανεξάρτητα από το που παράγεται το πλεόνασμα ισχύος.

Πίνακας 7.5. Ευαισθησία του ευρωπαϊκού διασυνδεδετικού ηλεκτρομηχανικού ρυθμού ως προς την ισχύ που εξάγεται από τα Βαλκάνια

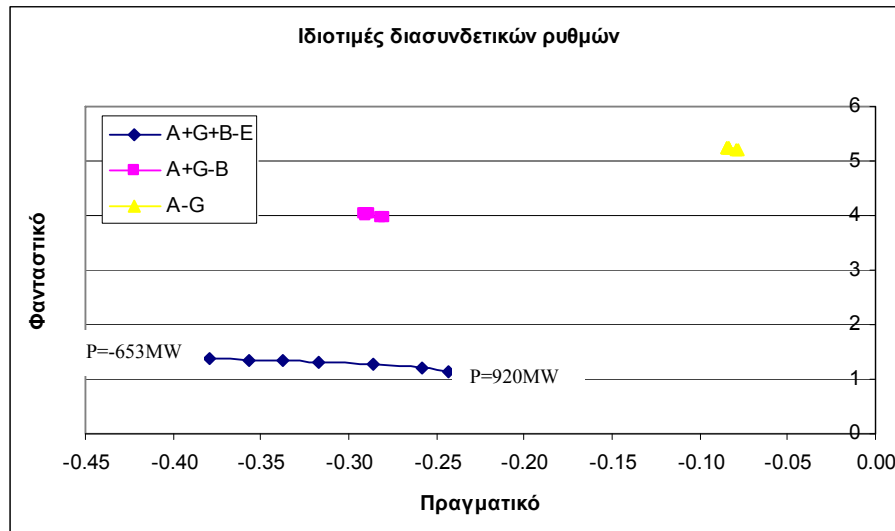
Σενάριο	Ροή διασύνδεσης (MW)	Ιδιοτιμή ευρωπαϊκού ρυθμού (A+G+B-E)			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα (Hz)
BL12	920	-0.244	1.131	21.1%	0.18
BL12-2	741	-0.258	1.201	21.0%	0.19
BL12-3	521	-0.287	1.268	22.0%	0.20
BL12-4	160	-0.317	1.320	23.4%	0.21
BL12-5	-30	-0.337	1.342	24.4%	0.21
BL12-6	-231	-0.357	1.359	25.4%	0.22
BL12-7	-448	-0.379	1.370	26.7%	0.22
BL12-8	-653	-0.408	1.366	28.6%	0.22

Πίνακας 7.6. Ευαισθησία του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού A+G-B των Βαλκανίων προς το ελληνικό σύστημα

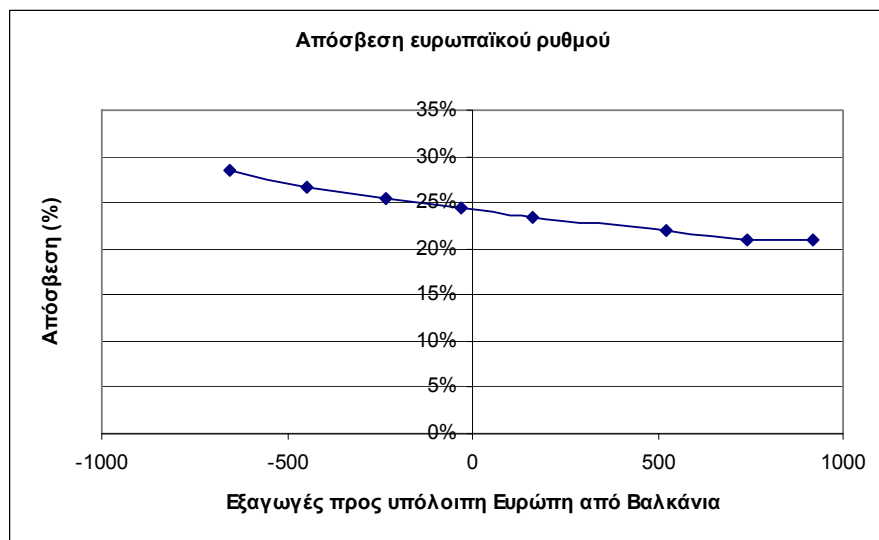
Σενάριο	Ροή διασύνδεσης (MW)	Ιδιοτιμή διασυνδετικού ρυθμού (A+G-B)			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα (Hz)
BL12	920	-0.282	3.961	7.1%	0.63
BL12-2	741	-0.280	3.969	7.0%	0.63
BL12-3	521	-0.290	4.016	7.2%	0.64
BL12-4	160	-0.292	4.031	7.2%	0.64
BL12-5	-30	-0.290	4.032	7.2%	0.64
BL12-6	-231	-0.289	4.032	7.1%	0.64
BL12-7	-448	-0.288	4.029	7.1%	0.64
BL12-8	-653	-0.290	4.032	7.2%	0.64

Πίνακας 7.7. Ευαισθησία του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού G-A του ελληνικού συστήματος με τις γεννήτριες της Αλβανίας που συνδέονται με το ελληνικό σύστημα

Σενάριο	Ροή διασύνδεσης (MW)	Ιδιοτιμή διασυνδετικού ρυθμού (A-G)			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα (Hz)
BL12	920	-0.079	5.217	1.5%	0.83
BL12-2	741	-0.079	5.216	1.5%	0.83
BL12-3	521	-0.084	5.231	1.6%	0.83
BL12-4	160	-0.084	5.233	1.6%	0.83
BL12-5	-30	-0.084	5.231	1.6%	0.83
BL12-6	-231	-0.084	5.230	1.6%	0.83
BL12-7	-448	-0.083	5.228	1.6%	0.83
BL12-8	-653	-0.084	5.230	1.6%	0.83



Σχήμα 7.13: Ευαισθησία διασυνδεδειγμένων ηλεκτρομηχανικών ρυθμών ως προς την μεταβολή της ροής της εξωτερικής διασύνδεσης (ROM-E/Sim)



Σχήμα 7.14: Απόσβεση διασυνδεδειγμένου ηλεκτρομηχανικού ρυθμού ως προς την μεταβολή της ροής της εξωτερικής διασύνδεσης (ROM-E/Sim)

### 7.3.2. Αλλαγή φορτίου με σταθερή ροή διασύνδεσης

Η δεύτερη παράμετρος που εξετάζουμε είναι η αλλαγή του συνολικού φορτίου σε απόλυτες τιμές με παράλληλη μείωση της παραγωγής ούτως ώστε οι εξαγωγές να παραμένουν σταθερές στα αρχικά επίπεδα. Η μείωση του συνολικού φορτίου γίνεται μειώνοντας όλα τα επιμέρους φορτία του συστήματος, ενώ προκειμένου να παραμείνει σταθερή η ροή στην διασύνδεση μειώνεται και η παραγωγή κάποιων γεννητριών. Στα BL12-9 έως BL12-11 μειώνεται η παραγωγή στο Kozlodui (Βουλγαρία), στο BL12-12 στο Portile de Fier (Ρουμανία), ενώ στο BL12-13 στο Tent (Σερβία).

Η μεταβολή αυτή δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την ιδιοτιμή του ευρωπαϊκού ρυθμού (Σχήματα 7.15-7.16). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.15 και στους Πίνακες 7.8-7.10, περισσότερο φαίνεται να επηρεάζεται ο ρυθμός Ελλάδας+Αλβανίας -Βαλκανίων. Πιο συγκεκριμένα η μείωση του φορτίου διατηρώντας σταθερά τα επίπεδα των εξαγωγών προς το ευρωπαϊκό σύστημα τείνει να μετατοπίσει και τις τρεις ιδιοτιμές προς τα δεξιά (στο μιγαδικό επίπεδο) ανεξαρτήτως των

ανακατανομών στην παραγωγή. Η απόσβεση των αντίστοιχων ρυθμών μειώνεται διατηρώντας σταθερή την συχνότητά τους. Τέλος σημειώνεται ότι η πιο μεγάλη μεταβολή του ρυθμού Ελλάδα+Αλβανία-Βαλκάνια περισσότερο πρέπει να σχετίζεται με την αλλαγή στην ροή της διασύνδεσης μεταξύ των δύο περιοχών (αφού η παραγωγή στο ελληνικό σύστημα παραμένει αμετάβλητη, ενώ παράλληλα μειώνεται το φορτίο), παρά με αυτή καθ' εαυτή την μείωση του φορτίου.

Πίνακας 7.8: Ευαισθησία ευρωπαϊκού ρυθμού ως προς την φόρτιση του συστήματος

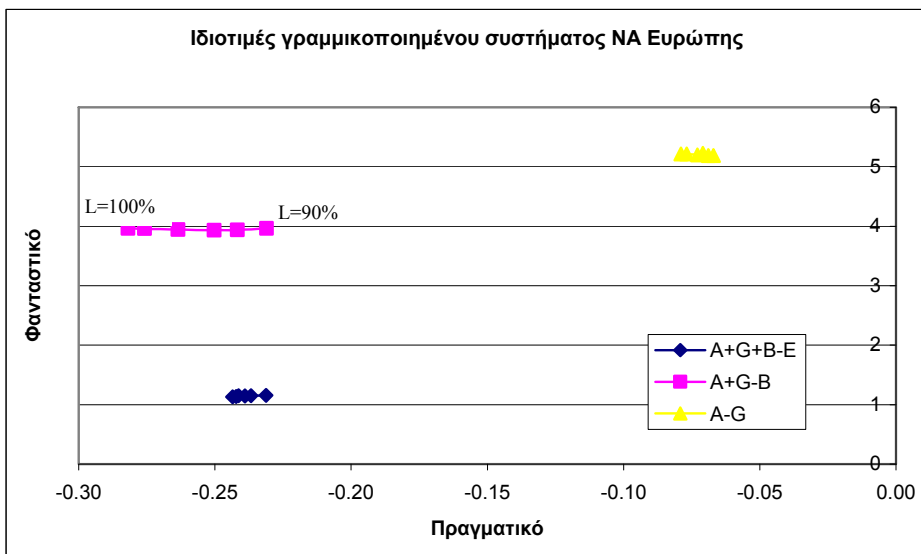
Σενάριο	Φορτίο (%) -L	Ιδιοτιμή ευρωπαϊκού διασυνδεδετικού ρυθμού A+G+B-E			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα (Hz)
BL12	100	-0.244	1.131	21.0%	0.18
BL12-9	99	-0.242	1.136	20.9%	0.18
BL12-10	97	-0.241	1.152	20.5%	0.18
BL12-11	95	-0.239	1.146	20.4%	0.18
BL12-12	93	-0.237	1.152	20.1%	0.18
BL12-13	90	-0.231	1.157	19.6%	0.18

Πίνακας 7.9: Ευαισθησία διασυνδεδετικού ρυθμού Βαλκάνια-Ελλάδα ως προς την φόρτιση του συστήματος

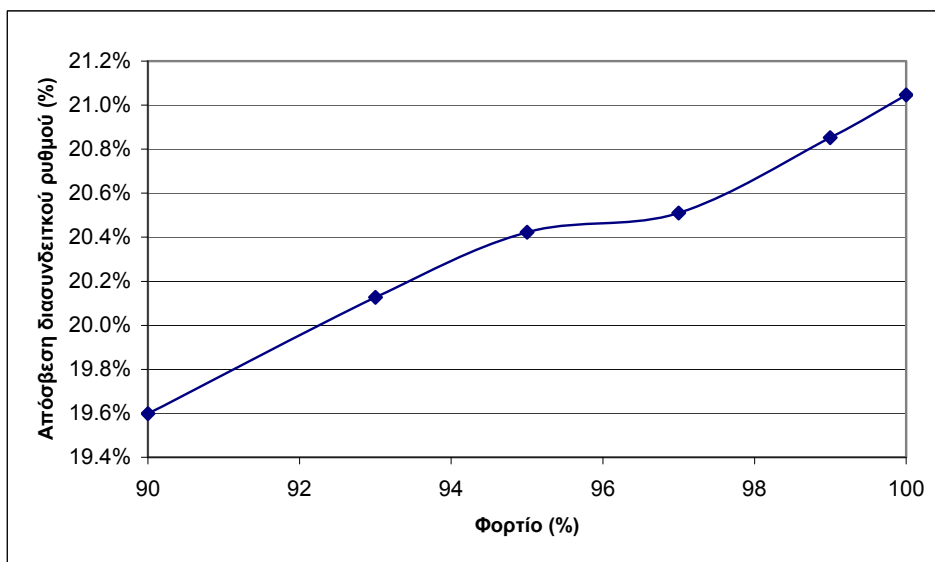
Σενάριο	Φορτίο (%) -L	Ιδιοτιμή διασυνδεδετικού ρυθμού A+G-B			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα (Hz)
BL12	100	-0.282	3.961	7.1%	0.63
BL12-9	99	-0.276	3.956	7.0%	0.63
BL12-10	97	-0.264	3.944	6.7%	0.63
BL12-11	95	-0.250	3.932	6.4%	0.63
BL12-12	93	-0.242	3.939	6.1%	0.63
BL12-13	90	-0.231	3.961	5.8%	0.63

Πίνακας 7.10: Ευαισθησία διασυνδεδετικού ρυθμού Αλβανία-Ελλάδα ως προς την φόρτιση του συστήματος

Σενάριο	Φορτίο (%) -L	Ιδιοτιμή διασυνδεδετικού ρυθμού A-G			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα (Hz)
BL12	100	-0.079	5.217	1.5%	0.83
BL12-9	99	-0.077	5.212	1.5%	0.83
BL12-10	97	-0.073	5.200	1.4%	0.83
BL12-11	95	-0.069	5.189	1.3%	0.83
BL12-12	93	-0.067	5.190	1.3%	0.83
BL12-13	90	-0.071	5.223	1.4%	0.83



Σχήμα 7.15: Ιδιοτιμές βασικών διασυνδετικών ρυθμών συστήματος ΝΑ Ευρώπης σε διάφορα σενάρια φόρτισης του συστήματος (ROM-E/Sim)



Σχήμα 7.16: Απόσβεση διασυνδετικού ηλεκτρομηχανικού ρυθμού ως προς το συνολικό φορτίο του συστήματος -% του αρχικού (ROM-E/Sim)

Συμπερασματικά οι μεταβολές του φορτίου επηρεάζουν πιο ελαφρά τους διασυνδετικούς ρυθμούς από τις μεταβολές των εξαγωγών. Η επίδραση αυτή δεν φαίνεται ικανή να αποσταθεροποιήσει τον ευρωπαϊκό ρυθμό. Ο συγκεκριμένος ρυθμός φαίνεται να διατηρεί αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα απόσβεσης σε όλα τα επίπεδα φορτίου που ελέγχθηκαν.

### 7.3.3. Μεταβολές στο δίκτυο μεταφοράς

Η τροποποίηση του δικτύου φαίνεται να επηρεάζει τους διασυνδετικούς ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς. Στους Πίνακες 7.11-7.13 φαίνονται οι ρυθμοί και οι γραμμές που τέθηκαν εκτός ή εντός λειτουργίας σε κάθε εξεταζόμενο σενάριο της παρούσας παραγράφου. Οι γραμμές αυτές βρίσκονται πλησίον της εξωτερικής διασύνδεσης του βαλκανικού συστήματος.

Στα τρία πρώτα σενάρια που εξετάστηκαν (BL12-g1 έως BL12-g3) φαίνεται ότι η συχνότητα μειώνεται σημαντικά έως τα 0.12Hz. Αυτό διότι οι εν λόγω γραμμές (οι οποίες τίθενται σταδιακά εκτός λειτουργίας) είναι γραμμές της διασύνδεσης της ΝΑ Ευρώπης με το εξωτερικό σύστημα. Η μεταβολή αυτή, στην ουσία αυξάνει την αντίδραση της ισοδύναμης γραμμής διασύνδεσης, οπότε προκαλείται μείωση της συχνότητας του διασυνδεδετικού ρυθμού. Στα υπόλοιπα σενάρια, οι γραμμές που τίθενται εντός ή εκτός λειτουργίας, δεν είναι τόσο κρίσιμες για την διασύνδεση (παρότι βρίσκονται κοντά της) και συνεπώς η συχνότητα παραμένει γενικά σταθερή. Σταδιακά, από το σενάριο BL12-g4 έως το BL12-g8 στο σύστημα εισάγονται νέες γραμμές οι οποίες με βάση το αρχικό σενάριο ήταν εκτός λειτουργίας. Η γενική κατεύθυνση (για το σενάριο που μελετάται) είναι η μείωση της απόσβεσης του ευρωπαϊκού διασυνδεδετικού ρυθμού καθώς το δίκτυο μεταφοράς αποκτά και νέες γραμμές. Επίσης παρατηρείται μια ανεπιθύμητη αύξηση της συχνότητας, λόγω του γεγονότος ότι ενισχύοντας το δίκτυο πλησίον της διασύνδεσης, η ισοδύναμη αντίδραση που παρεμβάλλεται μεταξύ του συστήματος και του άπειρου ζυγού μειώνεται. Ωστόσο η μετατόπιση των αντίστοιχων ιδιοτιμών δεν είναι σημαντική.

Όσον αφορά τους υπόλοιπους διασυνδεδετικούς ρυθμούς, φαίνεται ότι παραμένουν σχετικά ανεπηρέαστοι από τις διερευνούμενες μεταβολές, δεδομένου ότι οι ρυθμοί αυτοί δεν επηρεάζονται από το δίκτυο μεταφοράς πλησίον της εξωτερικής διασύνδεσης. Στο Σχήμα 7.17 συνοψίζονται τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.11-7.13.

Πίνακας 7.11: Ευαισθησία ευρωπαϊκού ρυθμού (A+G+B-E) ως προς μεταβολές του δικτύου μεταφοράς

Σενάριο	Τροποποιήσεις δικτύου	Ιδιοτιμή ευρωπαϊκού διασυνδεδετικού ρυθμού			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα (Hz)
BL12		-0.244	1.131	21.0%	0.18
BL12-g1	εκτός λειτουργίας Emestinovo-Mitrovica	-0.293	0.925	29.5%	<b>0.15</b>
BL12-g2	εκτός λειτουργίας UCTE-Sandorfalva	-0.267	0.931	27.5%	<b>0.15</b>
BL12-g3	εκτός λειτουργίας Sandrofalva-Arad, Emestinovo-Mitrovica	-0.319	0.780	37.8%	<b>0.12</b>
BL12-g4	σε λειτουργία Sarajevo-Mostar	-0.235	1.155	20.0%	0.18
BL12-g5	σε λειτουργία Sarajevo-Mostar, Sarajevo10-Sarajevo20	-0.238	1.184	19.7%	0.19
BL12-g6	σε λειτουργία Sarajevo-Mostar, Sarajevo10-Sarajevo20, Tuzla-Visegrad	-0.241	1.193	19.8%	0.19
BL12-g7	σε λειτουργία Sarajevo-Mostar, Sarajevo10-Sarajevo20, Tuzla-Visegrad, Rosiori-Baia Mare, Gadalín-Iernut	-0.238	1.208	19.3%	0.19
BL12-g8	σε λειτουργία Saraj.-Most., Saraj.10-Saraj.20, Tuz.-Vis., Ros.-B.Mare, Gad.-Ier.	-0.242	1.234	19.2%	0.20

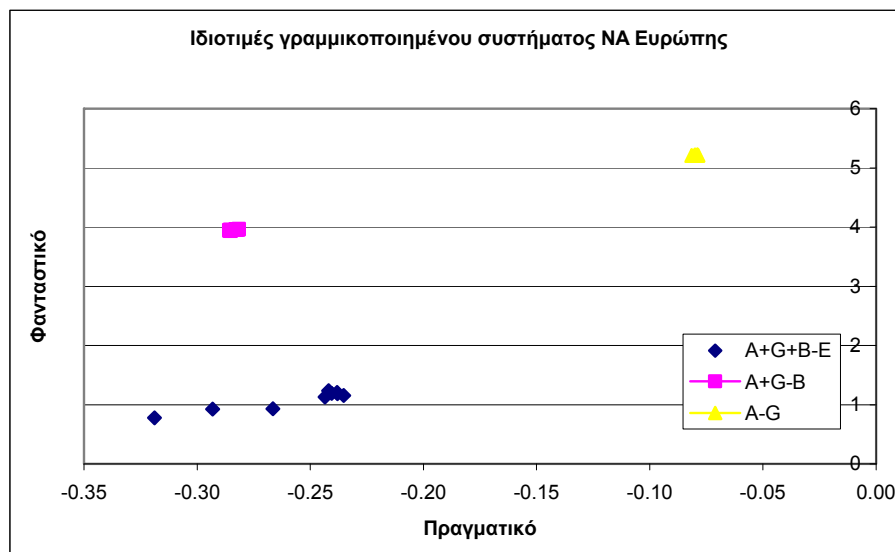


Πίνακας 7.12: Ευαισθησία ρυθμού Ελλάδα-Βαλκάνια ως προς μεταβολές του δικτύου μεταφοράς

Σενάριο	Τροποποιήσεις δικτύου	Ιδιοτιμή διασυνδεδετικού ρυθμού (A+G-B)			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα (Hz)
BL12	-	-0.282	3.961	7.1%	0.63
BL12-g1	εκτός λειτουργίας Emestinovo-Mitrovica	-0.285	3.949	7.2%	0.63
BL12-g2	εκτός λειτουργίας UCTE-Sandorfalva	-0.285	3.945	7.2%	0.63
BL12-g3	εκτός λειτουργίας Sandrofalva-Arad, Emestinovo-Mitrovica	-0.285	3.941	7.2%	0.63
BL12-g4	σε λειτουργία Sarajevo-Mostar	-0.282	3.962	7.1%	0.63
BL12-g5	σε λειτουργία Sarajevo-Mostar, Sarajevo10-Sarajevo20	-0.282	3.958	7.1%	0.63
BL12-g6	σε λειτουργία Sarajevo-Mostar, Sarajevo10-Sarajevo20, Tuzla-Visegrad	-0.283	3.959	7.1%	0.63
BL12-g7	σε λειτουργία Saraj.-Most., Saraj.10-Saraj.20, Tuz.-Vis., Ros.-B.Mare, Gad.-Ier.	-0.283	3.958	7.1%	0.63
BL12-g8	σε λειτουργία Sarajevo-Mostar, Sarajevo10-Sarajevo20, Tuzla-Visegrad, Ros.-Baia Mare, Gadalini-Iernut, Ros.-Orad., Gacko-Most.	-0.286	3.946	7.2%	0.63

Πίνακας 7.13: Ευαισθησία ρυθμού Ελλάδα-Αλβανία ως προς μεταβολές του δικτύου μεταφοράς

Σενάριο	Τροποποιήσεις δικτύου	Ιδιοτιμή διασυνδεδετικού ρυθμού (A-G)			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα (Hz)
BL12	-	-0.079	5.217	1.5%	0.83
BL12-g1	εκτός λειτουργίας Emestinovo-Mitrovica	-0.079	5.215	1.5%	0.83
BL12-g2	εκτός λειτουργίας UCTE-Sandorfalva	-0.079	5.216	1.5%	0.83
BL12-g3	εκτός λειτουργίας Sandrofalva-Arad, Emestinovo-Mitrovica	-0.079	5.217	1.5%	0.83
BL12-g4	σε λειτουργία Sarajevo-Mostar	-0.079	5.217	1.5%	0.83
BL12-g5	σε λειτουργία Sarajevo-Mostar, Sarajevo10-Sarajevo20	-0.080	5.216	1.5%	0.83
BL12-g6	σε λειτουργία Sarajevo-Mostar, Sarajevo10-Sarajevo20, Tuzla-Visegrad	-0.080	5.216	1.5%	0.83
BL12-g7	σε λειτουργία Sarajevo-Mostar, Sarajevo10-Sarajevo20, Tuzla-Visegrad, Rosiori-Baia Mare, Gadalini-Iernut	-0.080	5.215	1.5%	0.83
BL12-g8	σε λειτουργία Sarajevo-Mostar, Sarajevo10-Sarajevo20, Tuzla-Visegrad, Rosiori-Baia Mare, Gadalini-Iernut, Rosiori-Oradea, Gacko-Mostar	-0.082	5.211	1.6%	0.83



Σχήμα 7.17: Ιδιοτιμές βασικών διασυνδετικών ρυθμών συστήματος NA Ευρώπης σε μεταβολές δικτύου μεταφοράς πλησίον της διασύνδεσης (ROM-E/Sim)

Συμπερασματικά, οι μεταβολές του στο δίκτυο μεταφοράς πλησίον της διασύνδεσης επηρεάζουν ελαφρά τους διασυνδετικούς ρυθμούς. Αδύναμο δίκτυο πλησίον της διασύνδεσης προκαλεί σημαντική μείωση της συχνότητας του ευρωπαϊκού ρυθμού. Επίσης παρατηρείται ότι η ενίσχυση του δικτύου μειώνει τον λόγο απόσβεσης. Ωστόσο σε όλες τις περιπτώσεις η ευστάθεια του ευρωπαϊκού ρυθμού δεν απειλείται.

#### 7.4. Σχεδίαση σταθεροποιητή για τον ρυθμό Ελλάδα-Αλβανία (Σενάριο BL12)

Όπως φάνηκε στις ιδιοτιμές που υπολογίστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, η μόνη ιδιοτιμή με χαμηλή απόσβεση είναι του ρυθμού A-G. Συνεπώς απαιτείται η σχεδίαση σταθεροποιητή για την αύξηση της απόσβεσης του ηλεκτρομηχανικού ρυθμού μεταξύ των γεννητριών της Ελλάδας, και των γεννητριών της Αλβανίας οι οποίες συνδέονται ακτινικά στο ελληνικό σύστημα. Η θεώρηση της περιοχής αυτής, αν και περιλαμβάνει δύο μόνο γεννήτριες, σχετίζεται τόσο με το ότι συνδέονται με χαλαρό τρόπο με το ελληνικό σύστημα όσο και με το γεγονός ότι ο ρυθμός A-G δεν μπορεί να απαλειφθεί λόγω της χαμηλής του απόσβεσης.

Παρά το σφάλμα στην εκτίμηση της απόσβεσης του εν λόγω ρυθμού (Σχήμα 7.12), η σχεδίαση γίνεται με το απλοποιημένο μοντέλο. Για τον σκοπό αυτό αφαιρείται ο σταθεροποιητής που υπάρχει στην γεννήτρια AKOMANG3 και επανασχεδιάζεται σταθεροποιητής για τον ρυθμό αυτό.

Η σχεδίαση του σταθεροποιητή γίνεται υπολογίζοντας το μέτρο και την φάση των ολοκληρωτικών υπολοίπων της συνάρτησης μεταφοράς με είσοδο την τάση αναφοράς του APT και έξοδο της συχνότητα της περιοχής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση υποψήφιες γεννήτριες είναι οι γεννήτριες των περιοχών A και G. Τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα με το μεγαλύτερο μέτρο που υπολογίστηκαν με το απλοποιημένο μοντέλο (ROM-E/Sim) για τον συγκεκριμένο ρυθμό φαίνονται στον Πίνακα 7.14. Επίσης φαίνεται η φάση και το κανονικοποιημένο μέτρο (ως προς το μέτρο του μέγιστου ολοκληρωτικού υπολοίπου) των αντίστοιχων ολοκληρωτικών υπολοίπων τα οποία υπολογίστηκαν με το λογισμικό πακέτο PacDyn. Η γεννήτρια με το μέγιστο μέτρο του ολοκληρωτικού υπολοίπου είναι κοινή (AFIERZG3) και στους δύο υπολογισμούς. Οι γωνίες δεν διαφέρουν σημαντικά. Ωστόσο η σειρά με την οποία εμφανίζονται οι γεννήτριες (ως προς το μέτρο του ολοκληρωτικού υπολοίπου) διαφέρουν στην γεννήτρια στον υδροηλεκτρικό σταθμό του Θησαυρού GTHIS\_G1. Αυτό πιθανώς

σχετίζεται με το γεγονός ότι η γεννήτρια αυτή βρίσκεται στο όριο μεταξύ των συνεκτικών περιοχών και η θεώρησή τους αλλοιώνει σημαντικά το ολοκληρωτικό υπόλοιπο.

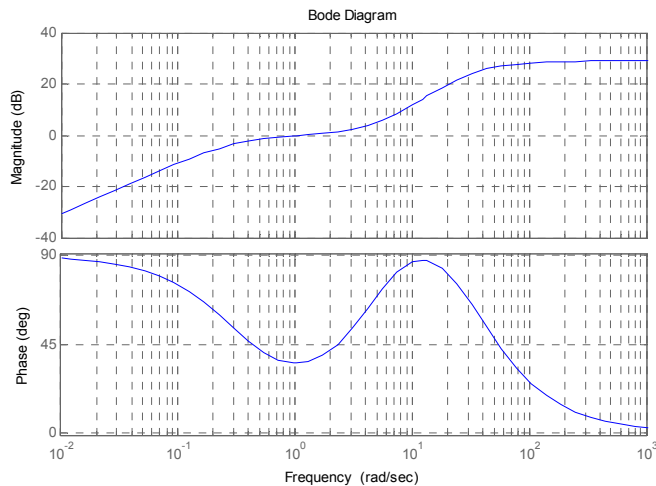
Πίνακας 7.14: Ολοκληρωτικά υπόλοιπα γεννητριών Αλβανίας-Ελλάδας

ROM-E/Sim					PacDyn		
Όνομα γεννήτριας	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο	Μέτρο	Κανον. μέτρο	Φάση	Όνομα γεννήτριας	Κανον. μέτρο	Φάση
AFIERZG3	-0.0078+0.02251j	0.02383	1	109.1	AFIERZG3	1	112.6
GTHIS_G1	-0.00049+0.00166j	0.00173	0.072	106.4	AKOMANG3	0.252	115.2
AKOMANG3	-0.00079+0.00142j	0.00162	0.068	119.0	GMEGAL5	0.056	85.9

Ο ηλεκτρομηχανικός ρυθμός μεταξύ των γεννητριών της Ελλάδας και της Αλβανίας παρουσιάζει μεγαλύτερο μέτρο ολοκληρωτικού υπολοίπου στην γεννήτρια AFIERZG3. Η τοποθέτηση του σταθεροποιητή ισχύος (τύπου STAB1) θα γίνει στην γεννήτρια αυτή. Με βάση την απαιτούμενη αντιστάθμιση φάσης που πρέπει να εισαχθεί για εκείνη την περιοχή των συχνοτήτων και την τεχνική που έχει περιγραφεί στην παράγραφο 3.5.1, επιλέγονται οι χρονικές σταθερές του σταθεροποιητή (Πίνακας 7.15). Στο Σχήμα 7.18 φαίνεται το διάγραμμα Bode του σταθεροποιητή ισχύος.

Πίνακας 7.15: Παράμετροι σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή

	Tw	T1	T2
AFIERZG3	3	0.1830	0.0346



Σχήμα 7.18: Bode διάγραμμα σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή ισχύος στην μονάδα AFIERZ3 (Αλβανία)

Οι ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου συστήματος που αντιστοιχούν στους τρεις διασυνδεδετικούς ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς φαίνονται στους Πίνακες 7.16-7.18 και στο Σχήμα 7.19 για διάφορες τιμές για το κέρδος του σταθεροποιητή. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με το απλοποιημένο μοντέλο. Όπως φαίνεται ο ευρωπαϊκός διασυνδεδετικός ρυθμός παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστος, ενώ οι ρυθμοί A+G-B, A-G μετατοπίζονται προς τα αριστερά χωρίς να τροποποιείται η συχνότητά τους.

Πίνακας 7.16: Μετατόπιση ιδιοτιμής διασυνδεδετικού ρυθμού σε σχέση με το κέρδος του σταθεροποιητή (ROM-E/Sim)

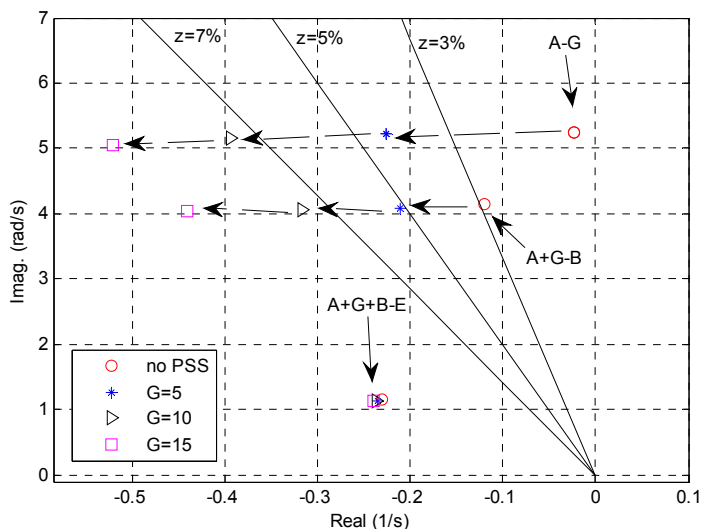
Σενάριο	Κέρδος Σταθεροποιητή	Ιδιοτιμή ευρωπαϊκού ρυθμού A+G+B-E			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα (Hz)
BL12	0	-0.231	1.151	19.7%	0.18
	5	-0.235	1.148	20.1%	0.18
	10	-0.236	1.144	20.2%	0.18
	15	-0.240	1.140	20.6%	0.18

Πίνακας 7.17: Μετατόπιση ιδιοτιμής διασυνδεδετικού ρυθμού Βαλκάνια-Ελλάδα σε σχέση με το κέρδος του σταθεροποιητή (ROM-E/Sim)

Σενάριο	Κέρδος Σταθεροποιητή	Ιδιοτιμή διασυνδεδετικού ρυθμού A+G-B			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα (Hz)
BL12	0	-0.120	4.148	2.9%	0.66
	5	-0.211	4.096	5.1%	0.65
	10	-0.317	4.054	7.8%	0.65
	15	-0.441	4.035	10.9%	0.64

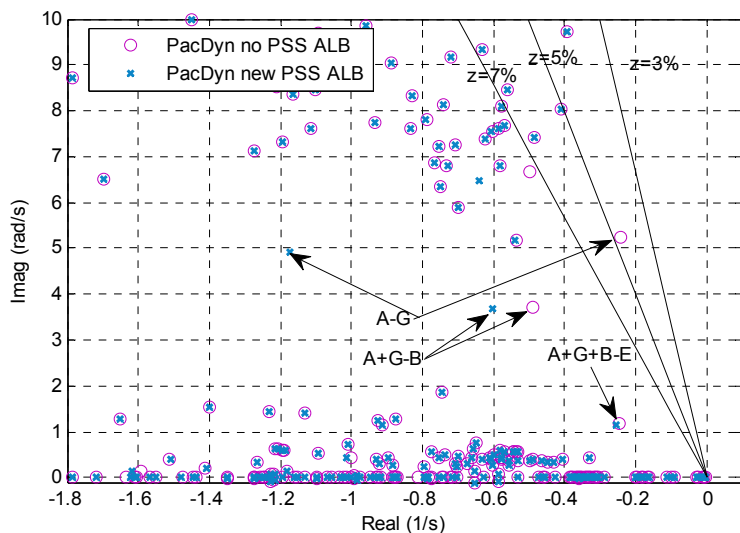
Πίνακας 7.18: Μετατόπιση ιδιοτιμής διασυνδεδετικού ρυθμού Αλβανία-Ελλάδα σε σχέση με το κέρδος του σταθεροποιητή (ROM-E/Sim)

Σενάριο	Κέρδος Σταθεροποιητή	Ιδιοτιμή διασυνδεδετικού ρυθμού A-G			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα (Hz)
BL12	0	-0.023	5.253	0.4%	0.84
	5	-0.226	5.228	4.3%	0.83
	10	-0.394	5.156	7.6%	0.82
	15	-0.521	5.045	10.3%	0.80



Σχήμα 7.19: Ιδιοτιμές για διάφορες τιμές κέρδους για τον σταθεροποιητή (ROM-E/Sim)

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η σωστή σχεδίαση του σταθεροποιητή, υπολογίστηκαν οι ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου συστήματος με το λεπτομερές μοντέλο. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο PacDyn. Στο Σχήμα 7.20 φαίνονται τα αποτελέσματα υπολογισμού των ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος, θεωρώντας το κέρδος του σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή 15. Όπως φαίνεται, οι ιδιοτιμές των ρυθμών Ελλάδα-Αλβανία, και Ελλάδα-Βαλκάνια μετατοπίζονται προς της αριστερή πλευρά του μιγαδικού επιπέδου χωρίς να μεταβάλλεται σημαντικά το φανταστικό τους μέρος. Η ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στην εξωτερική διασύνδεση παραμένει ανεπηρέαστη από την τοποθέτηση του σταθεροποιητή. Γενικά, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την μελέτη του απλοποιημένου μοντέλου επαναβεβαιώνονται. Η απόσβεση που προκύπτει για τον ρυθμό Ελλάδα-Αλβανία με το λεπτομερές μοντέλο είναι πολύ μεγαλύτερη της εκτιμώμενης από το απλοποιημένο, καθώς ο ρυθμός είναι αρκετά κοντά στο όριο των 6d/s που τέθηκε στην διαδικασία της απλοποίησης.



Σχήμα 7.20: Σύγκριση ιδιοτιμών για σενάριο BL12 με και χωρίς τον σχεδιαζόμενο σταθεροποιητή στις γεννήτριες της Αλβανίας με το λογισμικό PacDyn

## 7.5. Αναπαράσταση σεναρίου 1-5-2005 (BL05)

Το δεύτερο σενάριο που μελετήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής είναι μια προσέγγιση του στιγμιότυπου της λειτουργίας την 1-5-2005 προκειμένου να εφαρμοστεί το απλοποιημένο μοντέλο (ROM-E/Sim) σε ένα δεύτερο σενάριο και να διερευνηθούν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες εμφανίστηκε η μη αποσβενύμενη ταλάντωση με συχνότητα περίπου 0.2Hz στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο.

### 7.5.1. Περιγραφή σεναρίου

Στο σενάριο αυτό προσεγγίζουμε ένα στιγμιότυπο χαμηλού φορτίου για το βαλκανικό σύστημα του 2005. Οι συνθήκες της 1-5-2005 δεν ήταν δυνατόν να προσεγγιστούν πλήρως λόγω των ελλειψών στοιχείων που υπάρχουν σχετικά με αυτό το στιγμιότυπο, όποτε και η παράσταση του στιγμιότυπου αποτελεί μια προσέγγισή του. Στον Πίνακα 7.19 παρουσιάζονται οι γραμμές μεταφοράς που ήταν εκτός λειτουργίας στο ηλεκτρικό σύστημα της Ρουμανίας. Οι εξαγωγές και τα φορτία του συστήματος παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.20, 7.21 αντίστοιχα.

Πίνακας 7.19: Γραμμές μεταφοράς εκτός λειτουργίας στην Ρουμανία σεναρίου 1-5-2005 (βάση δεδομένων ΔΕΣΜΗΕ) [JKA05]

Γραμμές μεταφοράς εκτός λειτουργίας στην Ρουμανία για το BL05	
400kV Urechești-Domnești	220kV Iași(FAI)-Gutinaș
400kV Țânțăreni-Sibiu (disconnected 9:10:52AM)	220kV București Sud-Mostiștea- Ghizdaru
400kV Țânțăreni-Kozlodui C1	220kV Munteni Vest-Gutinaș
400kV Brazi Vest-Dârste	220kV Roman-Bacău Sud
400kV Smârdan-Isaccea C2	220kV Mintia-Pestiș2
400kV Gura Ialomiței-Cernavodă C2	220kV Roman-Suceava
400kV Iernut-Gădălin	220kV Craiova-Slatina C1
400kV Roșiori-Oradea Sud	220kV Craiova-Slatina C2
220kV Iernut-Ungheni2	220kV Roșiori-Baia Mare C1+C2

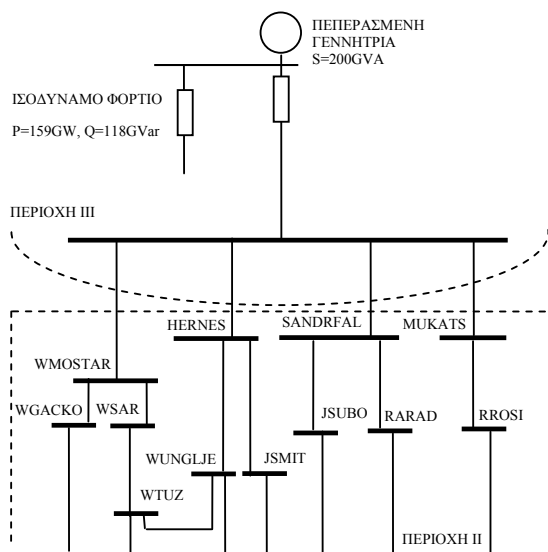
Πίνακας 7.20: Εισαγωγές και εξαγωγές ενέργειας ανά περιοχή Βαλκανικού συστήματος (Σενάριο BL05)

Εξαγωγές Εισαγωγές	Αλβ. (GR)	Αλβ. (ME+RS)	Ελλάδα	Βουλγαρία	Ρουμανία	ΠΓΔΜ	Σερβία+ Μαυρο- βούνιο	Βοσνία	Υπόλ. Ευρώπη
Αλβανία (GR)			96.5						
Αλβανία (ME+RS)							-86.3		
Ελλάδα	-96.5			501		-137			
Βουλγαρία			-501		-89		-261		
Ρουμανία				89			37		-159
ΠΓΔ Μακεδ.			137				11		
Σερβία+ Μαυροβούνιο		86.3		261	-37	-11		-2	-409
Βοσνία							2		-240
Υπόλοιπη Ευρώπη					159		409	240	
<b>Σύνολο</b>	-96.5	86.3	-267.5	851	33	-148	111.7	238	-808

Πίνακας 7.21: Φορτίο και παραγωγή σεναρίου 1-5-2005

Σύστημα	Παραγωγή (MW)	Φορτία (MW)
Αλβανία (AL)	314	320
Ελλάδα (GR)	3769	3959
Βουλγαρία (BG)	3186	2290
Ρουμανία (RO)	4693	4580
ΠΓΔ Μακεδον. (MK)	410	555
Σερβία + Μαυροβούνιο (ME+RS)	3488	3327
Βοσνία (BA)	616	376
NA Ευρώπη	16476	15407
Υπόλοιπη Ευρώπη	159198	160000
Σύνολο	175674	175407

Προκειμένου να προσεγγισθεί καλύτερα ο διασυνδεδετικός ρυθμός των Βαλκανίων, το υπόλοιπο ευρωπαϊκό σύστημα παριστάνεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε σχέση με την παράσταση της ενότητας 7.2 (σενάριο BL12). Στην θέση της άπειρης γεννήτριας θεωρούμε πεπερασμένη, η οποία είναι διαστασιολογημένη με βάση το φορτίο της υπόλοιπης Ευρώπης. Η πεπερασμένη γεννήτρια διαθέτει απλοποιημένες διατάξεις ελέγχου. Θεωρείται δηλαδή ένας απλοποιημένος ρυθμιστής στροφών καθώς και ένας αυτόματος ρυθμιστής τάσης. Επιπλέον θεωρείται φορτίο ισοδύναμο με αυτό του υπόλοιπου ευρωπαϊκού συστήματος (Σχήμα 7.21).



Σχήμα 7.21: Διάγραμμα διασύνδεσης συστήματος NA Ευρώπης με το υπόλοιπο ευρωπαϊκό

### 7.5.2. Απλοποίηση συστήματος και χωρισμός περιοχών

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, το σύστημα μοντελοποιήθηκε με την χρήση απλοποιημένων διατάξεων και την επέκταση της οιονεί στατικής μεταβολής για διασυνδεδετικές ταλαντώσεις. Η ελάττωση των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος είναι αντίστοιχη με αυτή του σεναρίου BL12

και φτάνει το 49% σε σχέση με το λεπτομερές μοντέλο. Αναλυτικά η ελάττωση του μοντέλου ανά μοντελοποιούμενη διάταξη φαίνεται στον Πίνακα 7.22

Πίνακας 7.22: Μεταβλητές κατάστασης στο σενάριο BL05 με λεπτομερές και μοντέλο μειωμένης τάξης

Διάταξη	Τύπος	Αριθμός μεταβλητών κατάστασης	
		Λεπτομερές μοντέλο	Μοντέλο μειωμένης τάξης
Γεννήτριες	GENROU	74•6=444	123+5
	GENSAL	49•5=245	
Αυτόματοι Ρυθμιστές Τάσης	EXST1	23•4=92	23•3=69
	ESAC4A	28•3=84	28•2=56
	IEEET1	51•4=204	51•3=153
	ESAC1A	21•5=105	21•3=63
Ρυθμιστές Στροφών – Στρόβιλοι	HYG0V	12•4=48	12•3=36
	TGOV1	59•2=118	59•2=118
	IEEEG3	26•4=104	26•4=104
	IEEEG1	26•6=156	26•4=104
Σταθεροποιητές Ισχύος	STAB1	7•3=21	7•3=21
Σύνολο		1621	852

Ο χωρισμός των περιοχών γίνεται –όπως και στο προηγούμενο σενάριο- βάση της τεχνικής που περιγράφηκε στην Παράγραφο 1.4 και καταλήγει στην διαμόρφωση τριών περιοχών. Στο συγκεκριμένο σενάριο, η μία εκ των δύο γεννητριών της Αλβανίας (που συνδέονται ακτινικά στο ελληνικό σύστημα) θεωρείται εκτός λειτουργίας. Η περιοχή της Αλβανίας, η οποία θεωρήθηκε στο προηγούμενο σενάριο περιλαμβάνει μία γεννήτρια και ενσωματώνεται στην περιοχή του ελληνικού συστήματος. Οι συνεκτικές περιοχές στις οποίες διαιρείται το σύστημα διαμορφώνονται ως εξής: Η πρώτη περιοχή (G) περιλαμβάνει το ελληνικό σύστημα (και την γεννήτρια της Αλβανίας). Η δεύτερη περιοχή (B) περιλαμβάνει το υπόλοιπο βαλκανικό σύστημα. Τέλος η τρίτη περιοχή (E) περιλαμβάνει την ισοδύναμη πεπερασμένη γεννήτρια του εξωτερικού ευρωπαϊκού συστήματος. Οι περιοχές που διαμορφώνονται φαίνονται στον χάρτη του Σχήματος 7.22.





Σχήμα 7.22: Χάρτης SEU με τον χωρισμό των τριών περιοχών

Το γεγονός ότι ο χωρισμός των περιοχών παραμένει σχεδόν πανομοιότυπος με αυτόν που έγινε στο σενάριο BL12 αναδεικνύει ότι ο χωρισμός αυτός είναι σε σημαντικό επίπεδο ανεξάρτητος του σημείου λειτουργίας. Κυρίως βασίζεται στην τοπολογία του δικτύου και όχι στα επίπεδα των φορτίων και την κατανομή της παραγωγής. Ωστόσο προϋποτίθεται η ικανοποιητική απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ρυθμών που απαλείφονται. Με αυτή την έννοια η ύπαρξη της περιοχής A στο σενάριο BL12 είναι απαραίτητη ακριβώς λόγω της χαμηλής απόσβεσης του ρυθμού A-G.

### 7.5.3. Σύγκριση υπολογισμού ιδιοτιμών με εμπορικά λογισμικά πακέτα

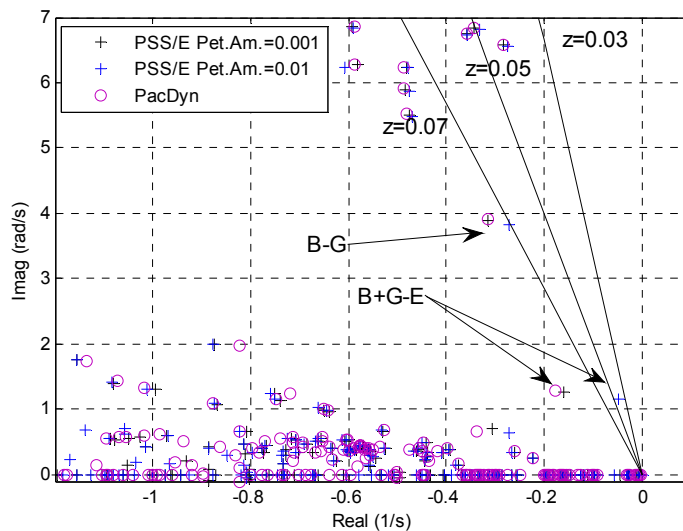
Όπως και στο σενάριο BL12 της παραγράφου 7.2.3 ελέγχεται η ακρίβεια στον υπολογισμό των ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος από τα εμπορικά πακέτα λογισμικού PSS/E και PacDyn. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.23 και οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί στον Πίνακα 7.23.

Πίνακας 7.23: Σύγκριση ιδιοτιμών διασυνδεδετικών ρυθμών για σενάριο BL05

Ρυθμός	ROM-E/Sim			PacDyn			PSS/E		
	Ιδιοτιμή	ζ(%)	Συχνότη. (Hz)	Ιδιοτιμή	ζ(%)	Συχνότη. (Hz)	Ιδιοτιμή	ζ(%)	Συχνότη. (Hz)
G-B	-0.1645+ 4.237j	3.9	0.67	-0.3152+ 3.917j	8.0	0.62	-0.3147 +3.9j	8.0	0.62
G+B-E	-0.1282+ 1.273j	10	0.20	-0.177+ 1.277j	13.7	0.20	- 0.1609+1. 273j	12.5	0.20

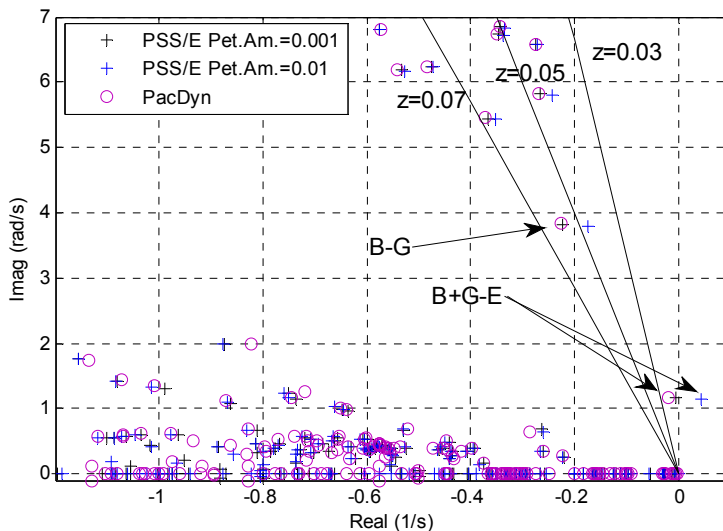
Ο υπολογισμός των ιδιοτιμών με το PSS/E στην ενότητα 7.2.3 ανέδειξε την σημασία της παραμέτρου του μεγέθους της εισαγόμενης διαταραχής  $\Delta x$  (Peturbation Amount) κάτι που εμφανίζεται και στο συγκεκριμένο σενάριο. Για τον λόγο αυτό στην περίπτωση του PSS/E πραγματοποιήθηκαν δύο υπολογισμοί με αλλαγή της παραμέτρου διαταραχής  $\Delta x$ . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.23 ο ρυθμός B-G και πολύ περισσότερο ο ηλεκτρομηχανικός ρυθμός της ευρωπαϊκής διασύνδεσης επηρεάζονται στην περίπτωση του PSS/E από την παράμετρο διαταραχής  $\Delta x$ . Ειδικότερα στον ρυθμό της ευρωπαϊκής διασύνδεσης η απόκλιση είναι πολύ σημαντική μεταξύ των δύο υπολογιζόμενων ιδιοτιμών. Επίσης παρατηρήθηκε σε παραλλαγές του εξεταζόμενου σεναρίου ότι το PSS/E μπορεί να εμφανίσει μια θετική πραγματική ιδιοτιμή, η οποία δεν αντιστοιχεί στο πραγματικό σύστημα. Θεωρούμε λοιπόν ότι ως αναφορά θα θεωρούνται τα αποτελέσματα του PacDyn, ενώ οι ιδιοτιμές που θα υπολογιστούν με το PSS/E θα πρέπει να θέτουν την παράμετρο διαταραχής  $\Delta x$  ίση με  $10^{-3}$ . Με την κατάλληλη ρύθμιση της παραμέτρου  $\Delta x$  τα αποτελέσματα είναι αρκετά παραπλήσια για το PacDyn και το PSS/E, αλλά όχι ταυτόσημα, αφού φαίνονται διαφορές στον υπολογισμό μερικών ιδιοτιμών.

Στο Σχήμα 7.23 με κύκλους παριστάνονται οι ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου συστήματος που υπολογίζονται με το PacDyn. Με σταυρούς (μπλε και μαύρο) τα αποτελέσματα του PSS/E (με μέγεθος διαταραχής 0.01 και 0.001 αντίστοιχα).



Σχήμα 7.23: Επικρατούσες ιδιοτιμές υπολογισμένες με PSS/E και PacDyn (σενάριο BL05)

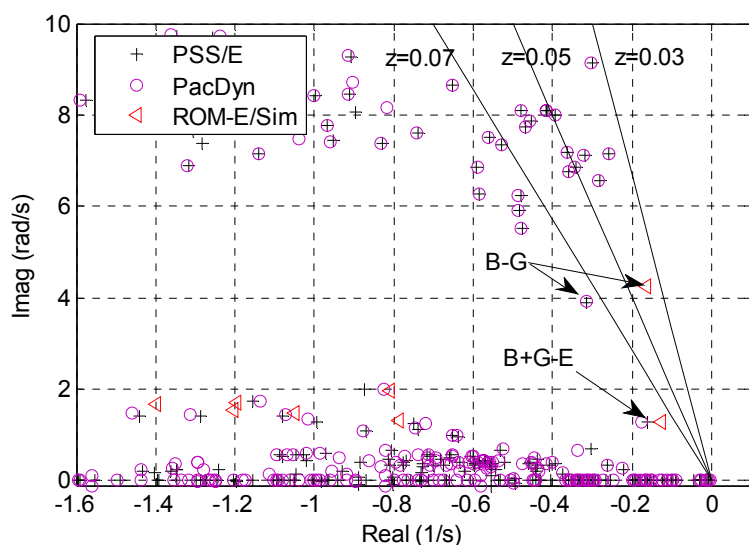
Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε και σύγκριση των ιδιοτιμών στην περίπτωση όπου οι ρυθμιστές στροφών των ατμοστροβλικών μονάδων θεωρούνται ανενεργοί. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 7.24 και επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα που περιγράφηκαν παραπάνω.



Σχήμα 7.24: Επικρατούσες ιδιοτιμές υπολογισμένες με PSS/E και PacDyn (σενάριο BL05 χωρίς ρυθμιστές στροφών ατμοστροβιλικών μονάδων)

#### 7.5.4. Σύγκριση ιδιοτιμών απλοποιημένου και λεπτομερούς μοντέλου

Προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια της απλοποιημένης προσέγγισης του μοντέλου ROM-E/Sim υπολογίστηκαν οι ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου συστήματος με το απλοποιημένο και το λεπτομερές μοντέλο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.25. Στην παρούσα ενότητα, ως αναφορά (benchmark) θα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του PSS/E με μέγεθος διαταραχής 0.001 ή αυτά του PacDyn. Όσον αφορά την διασυνδεδητή ιδιοτιμή το σφάλμα φαίνεται αρκετά μικρό. Αντίθετα στον ρυθμό Βαλκάνια-Ελλάδα υπάρχει απόκλιση κυρίως όσον αφορά την απόσβεση του ρυθμού. Με το απλοποιημένο μοντέλο η εκτίμηση για την απόσβεση είναι απαισιόδοξη. Για τον υπολογισμό των τριών διασυνδεδητικών ταλαντώσεων με το ROM-E/Sim υπολογίστηκαν πέντε ζεύγη ιδιοτιμών (με δύο διανύσματα ασφαλείας)



Σχήμα 7.25: Ιδιοτιμές με PSS/E, PacDyn και ROM-E/Sim

Η σύγκριση αυτή επιβεβαιώνει ότι η προσέγγιση του ευρωπαϊκού διασυνδεδετικού ρυθμού χαμηλής συχνότητας είναι ικανοποιητική στο σενάριο αυτό, συνεπώς η προτεινόμενη απλοποίηση δεν εισάγει μεγάλο σφάλμα στην εκτίμηση του συγκεκριμένου ρυθμού.

#### 7.5.5. Ανάλυση ευαισθησίας διασυνδεδετικών ρυθμών ως προς τη ροή ισχύος στην διασύνδεση

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια ανάλυση ευαισθησίας των διασυνδεδετικών ρυθμών του συστήματος της ΝΑ Ευρώπης, εξετάζεται δηλαδή η ευαισθησία των ρυθμών για το σενάριο BL05.

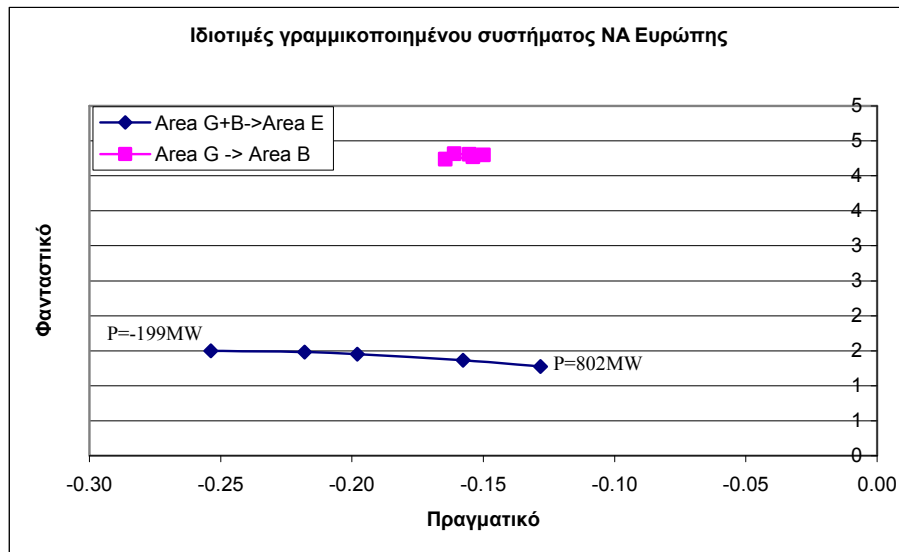
Όπως φαίνεται στους Πίνακες 7.24-7.25 η αλλαγή της ροής της εξωτερικής διασύνδεσης επηρεάζει κατά κύριο λόγο τον ευρωπαϊκό ρυθμό. Η ταλάντωση μεταξύ του ελληνικού και του βαλκανικού συστήματος δεν επηρεάζεται σημαντικά. Η μείωση της διασυνδεδετικής ροής σταθεροποιεί τον ευρωπαϊκό ρυθμό μεταβάλλοντας ελάχιστα την συχνότητά του. Φαίνεται δηλαδή ότι ενώ τα επίπεδα των εξαγωγών/εισαγωγών ισχύος επηρεάζουν την απόσβεση του ρυθμού, η συχνότητά του παραμένει σχετικά ανεπηρέαστη. Η συχνότητα της ταλάντωσης αποτελεί ένα χαρακτηριστικό που σχετίζεται περισσότερο με την τοπολογία του συστήματος και λιγότερο με το μελετώμενο στιγμιότυπο. Επιβεβαιώνονται δηλαδή τα πορίσματα της παραγράφου 7.3.1 σχετικά με την επίδραση της διασυνδεδετικής ροής στον ευρωπαϊκό ηλεκτρομηχανικό ρυθμό. Στα Σχήματα 7.26-7.27 παρουσιάζονται σε διαγράμματα τα αποτελέσματα των Πινάκων 7.24-7.25.

Πίνακας 7.24: Μετατόπιση ιδιοτιμής ευρωπαϊκού ρυθμού λόγω της μείωσης των εξαγωγών

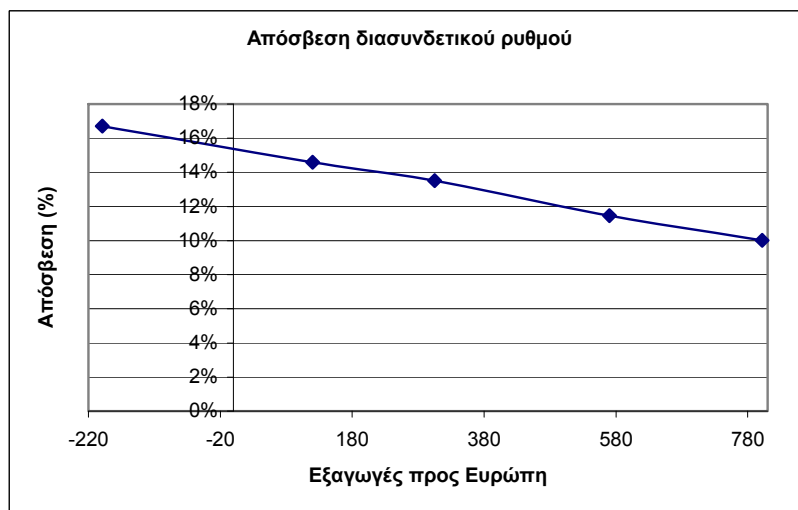
Σενάριο	Ροή διασύνδεσης (MW)	Ιδιοτιμή ευρωπαϊκού ρυθμού (G+B-E)			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα
BL05	802	-0.128	1.273	10.0%	0.20
BL05-2	570	-0.158	1.367	11.5%	0.22
BL05-3	305	-0.198	1.452	13.5%	0.23
BL05-4	120	-0.218	1.480	14.6%	0.24
BL05-5	-199	-0.254	1.497	16.7%	0.24

Πίνακας 7.25: Μετατόπιση ιδιοτιμής ρυθμού Ελλάδας-Βαλκανίων λόγω της μείωσης των εξαγωγών

Σενάριο	Ροή διασύνδεσης (MW)	Ιδιοτιμή διασυνδεδετικού ρυθμού (G-B)			
		Πραγματικό	Φανταστικό	Λόγος απόσβεσης ζ (%)	Συχνότητα
BL05	802	-0.165	4.237	3.9%	0.67
BL05-2	570	-0.154	4.274	3.6%	0.68
BL05-3	305	-0.150	4.297	3.5%	0.68
BL05-4	120	-0.155	4.307	3.6%	0.69
BL05-5	-199	-0.161	4.315	3.7%	0.69



Σχήμα 7.26: Μετατόπιση ιδιοτιμών βασικών ηλεκτρομηχανικών ρυθμών λόγω αλλαγής των εξαγωγών προς την εξωτερική διασύνδεση



Σχήμα 7.27: Απόσβεση διασυνδετικού ρυθμού σε σχέση με το επίπεδο των εξαγωγών προς την εξωτερική διασύνδεση

## 7.6. Επίδραση των ρυθμιστών στροφών και των στροβίλων στις διασυνδετικές ταλαντώσεις.

### 7.6.1. Μεταβολή ιδιοτιμής ευρωπαϊκού ρυθμού

Οι ρυθμιστές στροφών επιδρούν σημαντικά στην διασυνδετικές ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας, παρότι για ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις υψηλότερων συχνοτήτων η επίδρασή τους είναι μικρή και συνήθως αγνοείται. Στα αποτελέσματα της παραγράφου 7.5.4 όλοι οι ρυθμιστές στροφών θεωρούνται ενεργοί. Ωστόσο η παραδοχή αυτή δεν ανταποκρίνεται απαραίτητα στις συνθήκες πραγματικής λειτουργίας ενός συστήματος.

Κατά την λειτουργία ενός ΣΗΕ σε κανονικές συνθήκες (απουσία μεγάλων διαταραχών), η τιμή του φορτίου μεταβάλλεται συνεχώς με αποτέλεσμα η συχνότητα να μεταβάλλεται επίσης με ένα μικρό πλάτος. Αυτές οι μικρές και διαρκείς μεταβολές της συχνότητας δεν θα πρέπει να προκαλούν

αντίστοιχες μεταβολές στην μηχανική ισχύ των αμοστροβλικών μονάδων. Αυτό διότι αν αυτή η διαρκής μικρή διακύμανση της συχνότητας μέσω του ρυθμιστή στροφών μετατραπεί σε μια διαρκή διακύμανση ισχύος άρα και της πίεσης στους ατμοπαραγωγούς και τους αμοστροβίλους θα προκαλέσει πρόωρη φθορά. Προκειμένου λοιπόν να αποφευχθεί μια τέτοια κατάσταση, οι ρυθμιστές στροφών των ατμοηλεκτρικών μονάδων είναι συνήθως εφοδιασμένοι με έναν ελεγκτή νεκρής ζώνης (*dead band*). Ο ελεγκτής αυτός αποκόβει τα σήματα εισόδου, που στην προκειμένη περίπτωση είναι η απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική τιμή, αν αυτή δεν ξεπερνά ένα συγκεκριμένο πλάτος. Συνεπώς, όταν οι αποκλίσεις της συχνότητας βρίσκονται εντός των ορίων της νεκρής ζώνης, ο ρυθμιστής στροφών είναι ανενεργός. Σημειώνεται ότι λόγω των χαρακτηριστικών των σεναρίων (ελάχιστου φορτίου) όλες οι θερμικές μονάδες είναι αμοστροβλικές, συνεπώς οι δύο αυτές αναφορές στο εξής θα είναι ισοδύναμες.

Επομένως έχει ιδιαίτερη σημασία να διερευνηθεί κανείς την επίδραση που έχουν οι ρυθμιστές στροφών στις δύο καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκονται (ενεργοί ή ανενεργοί) στη διαμόρφωση της συχνότητας και της απόσβεσης των διασυνδεδετικών ρυθμών. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας του πίνακα κατάστασης του γραμμικοποιημένου συστήματος ως προς το κέρδος των ρυθμιστών στροφών. Σημειώνεται ότι όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 3.3.2 το κέρδος  $K$  του ρυθμιστή στροφών είναι το αντίστροφο του στατισμού της μονάδας. Η ευαισθησία υπολογίζεται βάση των σχέσεων που παρουσιάστηκαν στις Ενότητες 1.6.5, 5.4.5.

$$K_i = \frac{1}{R_i} \quad (7.1)$$

Ο υπολογισμός της ευαισθησίας γίνεται για τον ευρωπαϊκό ρυθμό. Στην περίπτωση που ο στατισμός γίνει πολύ μεγάλος, ή εναλλακτικά η τιμή του  $K$  τείνει στο μηδέν, ο ρυθμιστής στροφών γίνεται ανενεργός. Η κατάσταση αυτή περιγράφει την λειτουργία της μονάδας με την συχνότητα του δρομέα εντός των ορίων της νεκρής ζώνης του ρυθμιστή στροφών. Στον Πίνακα 7.26 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι υπολογιζόμενες ευαισθησίες για κάποιες υδροηλεκτρικές και θερμικές μονάδες. Για τον υπολογισμό αυτό όλοι οι ρυθμιστές στροφών θεωρούνται αρχικά ενεργοί. Η ευαισθησία για όλες τις θερμικές μονάδες του σεναρίου εμφανίζονται στο Παράρτημα Β.

Πίνακας 7.26: Ευαισθησία ιδιοτιμής ευρωπαϊκού ρυθμού προς το κέρδος του ρυθμιστή στροφών

Τύπος μονάδας	Ονομασία μονάδας	Ευαισθησία ( $\partial\lambda/\partial K$ )	
		Πραγματικό	Φανταστικό
Υδροηλεκτρική	JHDJERG5	0.00000717	0.00000700
	JHDJERG3	0.00000714	0.00000702
	JHDJERG1	0.00000714	0.00000702
Θερμική	VNKOZ0A1	-0.00061991	0.00033735
	VNKOZ9A1	-0.00062039	0.00033417
	RCERNA1	-0.00040720	0.00022188
	GLAURIGN	-0.00013489	0.00032173

Όπως είναι γνωστό όταν το πραγματικό μέρος του δείκτη ευαισθησίας είναι αρνητικό, η ιδιοτιμή μετακινείται προς τα δεξιά καθώς το κέρδος  $K$  μειώνεται., καθώς δηλαδή ο ρυθμιστής στροφών γίνεται ανενεργός. Αντίθετα όταν το πραγματικό μέρος της ευαισθησίας είναι θετικό, η ιδιοτιμή μετακινείται προς τα αριστερά καθώς το  $K$  μειώνεται. Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.26, αλλά και στον πίνακα του Παραρτήματος Β η μείωση του κέρδους του ρυθμιστή στροφών των θερμικών μονάδων τείνει να μετατοπίσει τον ευρωπαϊκό ρυθμό προς τα δεξιά. Από την άλλη πλευρά, η μείωση του κέρδους των ρυθμιστών στροφών των υδροηλεκτρικών μονάδων τείνει να μετατοπίσει την ιδιοτιμή του ευρωπαϊκού ρυθμού προς τα αριστερά. Με άλλα λόγια, οι ρυθμιστές στροφών των θερμικών μονάδων εισάγουν θετική απόσβεση

στον ευρωπαϊκό ρυθμό, ενώ οι ρυθμιστές στροφών των υδροηλεκτρικών μονάδων εισάγουν αρνητική απόσβεση. Ωστόσο, οι ρυθμιστές στροφών των υδροηλεκτρικών μονάδων συνήθως δεν έχουν ελεγκτή νεκρής ζώνης, ενώ οι ρυθμιστές των θερμικών διαθέτουν, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, και μπορεί συνεπώς να είναι ανενεργοί για μικρές διαταραχές.

Η ποσότητα  $\Delta\lambda$  δίνει την μετατόπιση της ιδιοτιμής όταν ένας ρυθμιστής στροφών μιας γεννήτριας γίνεται ανενεργός στην περίπτωση όπου το σύστημα θεωρείται γραμμικό.

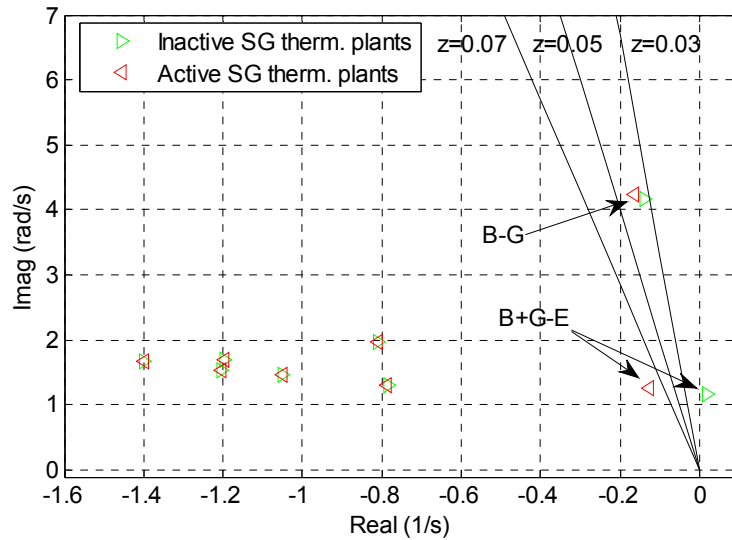
$$\Delta\lambda = -\frac{1}{R_i} \frac{\partial\lambda}{\partial K} \quad (7.2)$$

Η άθροιση όλων αυτών των στοιχειωδών μετατοπίσεων του πίνακα στο Παράρτημα Β δίνει μια εκτίμηση για την μετατόπιση της διασυνδετικής ιδιοτιμής στην περίπτωση όπου οι ρυθμιστές στροφών των θερμικών μονάδων βρίσκονται στη νεκρή ζώνη. Στον Πίνακα 7.27 φαίνεται η μετατόπιση της διασυνδετικής ιδιοτιμής με ενεργή και ανενεργή την νεκρή ζώνη των ρυθμιστών στροφών, όπως υπολογίστηκε με το απλοποιημένο μοντέλο (Σχήμα 7.28) και στην συνέχεια η εκτίμηση για την αναμενόμενη μετατόπιση βάση της ευαισθησίας. Οι μεταβολές έχουν αρκετά παραπλήσιες τιμές. Το σφάλμα σχετίζεται με την μη γραμμική εξάρτηση των ιδιοτιμών από τις παραμέτρους του συστήματος.

Πίνακας 7.27: Εκτίμηση μετατόπισης της ιδιοτιμής του ευρωπαϊκού ρυθμού λόγω νεκρής ζώνης

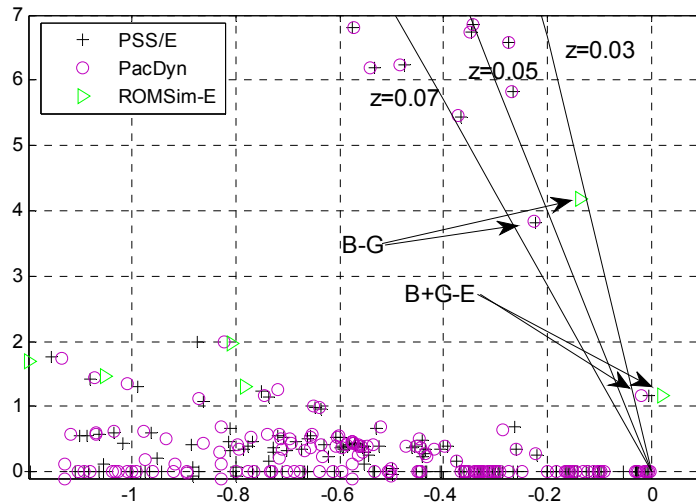
	Ιδιοτιμή ευρωπαϊκού ρυθμού ( $\lambda$ )	
	Πραγματικό	Φανταστικό
Ενεργοί οι ρυθμιστές στροφών των θερμικών μονάδων	-0.12816	1.2733
Ανενεργοί οι ρυθμιστές στροφών των θερμικών μονάδων (ενεργή η νεκρή ζώνη)	0.02003	1.1676
	Μετατόπιση ιδιοτιμής ευρωπαϊκού ρυθμού	
Μετατόπιση $\Delta\lambda$	0.1482	-0.1057
Αναμενόμενη μετατόπιση με βάση της ευαισθησίας	0.1155	-0.1123

Η μετατόπιση ιδιοτιμών και των δύο διασυνδετικών ρυθμών υπολογισμένη με το απλοποιημένο μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 7.28. Με κόκκινο τρίγωνο αναπαριστώνται οι ιδιοτιμές που υπολογίστηκαν θεωρώντας ενεργούς τους ρυθμιστές στροφών, ενώ με πράσινο τρίγωνο οι ιδιοτιμές με ανενεργούς τους ρυθμιστές στροφών των θερμικών μονάδων. Όπως είναι σαφές από το Σχήμα 7.28 στην δεύτερη περίπτωση η ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στον ευρωπαϊκό ρυθμό μετατοπίζεται προς τα δεξιά και ο ρυθμός αυτός αποσταθεροποιείται. Ο ρυθμός μεταξύ ελληνικού και βαλκανικού συστήματος παραμένει πρακτικά αμετάβλητος.



Σχήμα 7.28: Ιδιοτιμές με ενεργούς και ανενεργούς τους ρυθμιστές στροφών των θερμικών μονάδων (σενάριο BL05).

Προκειμένου να πιστοποιηθεί η ακρίβεια των υπολογισμών με το απλοποιημένο μοντέλο για την περίπτωση όπου ο ρυθμιστές στροφών των θερμικών μονάδων είναι ανενεργοί, υπολογίστηκαν οι ιδιοτιμές του γραμμικοποιημένου συστήματος με τα λογισμικά πακέτα PSS/E και PacDyn. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο Σχήμα 7.29 και βρίσκονται σε πλήρη αναλογία με τα αποτελέσματα των προηγούμενων συγκρίσεων (παράγραφος 7.5.4). Η ιδιοτιμή του ευρωπαϊκού ρυθμού προσεγγίζεται ικανοποιητικά (αν και οριακά ευσταθής), ενώ η προσέγγιση της ιδιοτιμής που αντιστοιχεί στον ρυθμό μεταξύ ελληνικού συστήματος και των υπόλοιπων Βαλκανίων παρουσιάζει μικρό σφάλμα.



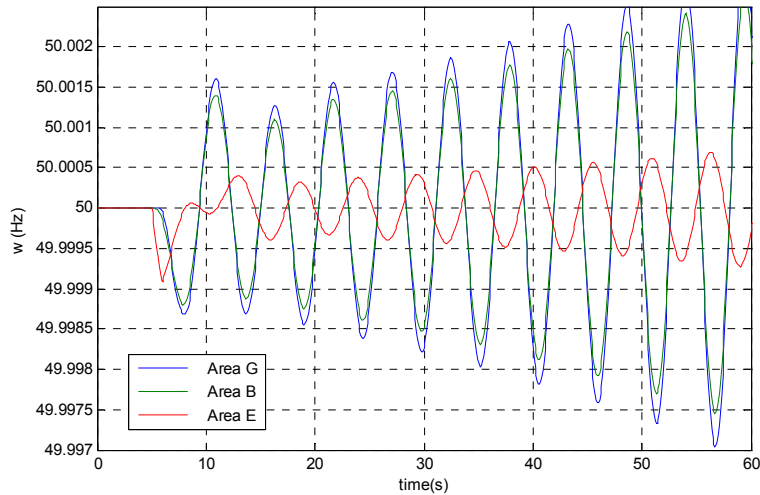
Σχήμα 7.29: Σύγκριση ιδιοτιμών με ανενεργούς τους ρυθμιστές στροφών των θερμικών σταθμών (BL05)

### 7.6.2. Προσομοίωση μεταβατικής μεταβολής φορτίου

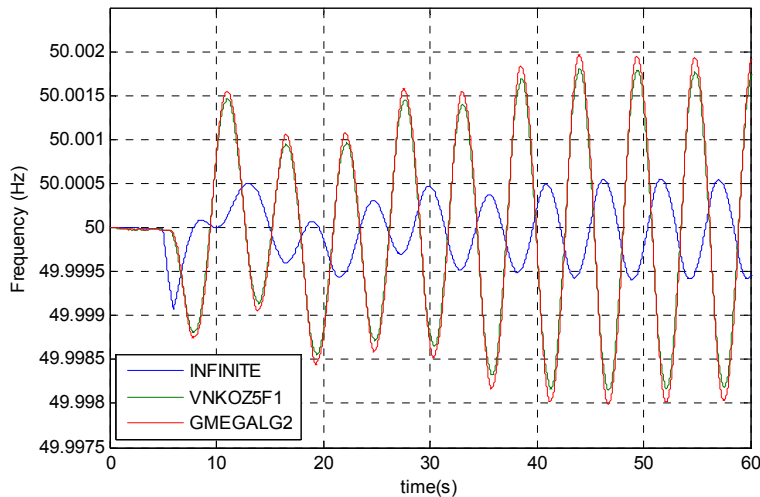
Στα πλαίσια της σύγκρισης μεταξύ πλήρους και απλοποιημένου μοντέλου πραγματοποιήθηκαν και προσομοιώσεις διαταραχών. Στα Σχήματα 7.30-7.31 φαίνεται η προσομοίωση μεταβατικής διαταραχής αύξησης του φορτίου κατά 30MW για ένα δευτερόλεπτο, η οποία προσομοιώθηκε με το



PSS/E και το μοντέλο μειωμένης τάξης (ROM-E/Sim) αντίστοιχα θεωρώντας ανενεργούς τους ρυθμιστές στροφών των θερμικών μονάδων. Όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα επιβεβαιώνεται η ανάλυση των ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου συστήματος καθώς και η ακρίβεια της προσέγγισης με το μοντέλο μειωμένης τάξης.

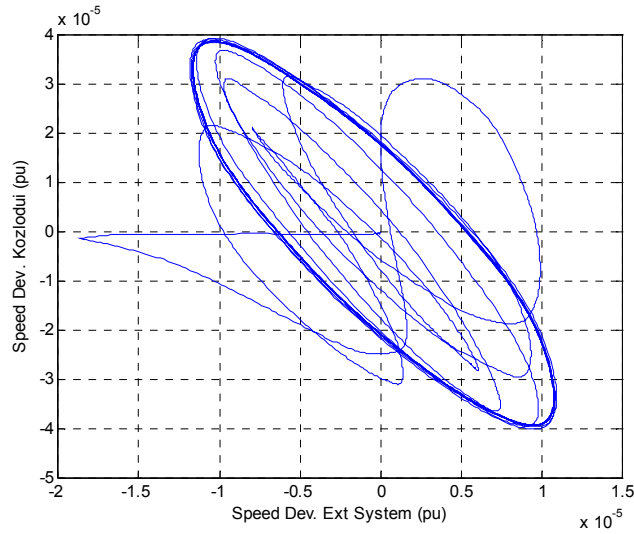


Σχήμα 7.30: Απόκριση σε μεταβατική μεταβολή του φορτίου 30MW με το απλοποιημένο μοντέλο (ROM-E/Sim)



Σχήμα 7.31: Απόκριση σε μεταβατική μεταβολή του φορτίου 30MW με PSS/E.

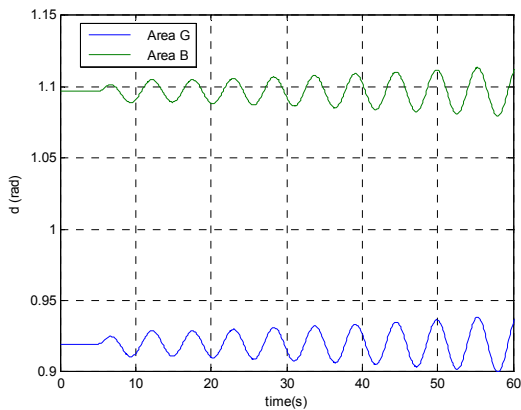
Η απόκριση του PSS/E που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.31, καταλήγει σε οριακό κύκλο. Στο Σχήμα 7.32 φαίνεται το πορτραίτο των φάσεων (όπου στον οριζόντιο άξονα είναι η ανά μονάδα απόκλιση της συχνότητας του ισοδύναμου ευρωπαϊκού συστήματος και στον κάθετο είναι η ανά μονάδα απόκλιση της συχνότητας μιας γεννήτριας στην Βουλγαρία (Kozlodui)). για προσομοίωση διάρκειας 100s. Το σύστημα ξεκινά από την τομή των αξόνων. Με την εμφάνιση της διαταραχής μειώνεται η συχνότητα καταρχήν της ισοδύναμης γεννήτριας (περιοχή E) και η τροχιά πηγαίνει προς τα αριστερά. Μετά από μια σειρά ταλαντώσεων κατά τα πρώτα 35 περίπου δευτερόλεπτα μετά την εμφάνιση της διαταραχής, το σύστημα καταλήγει σχεδόν σε έναν οριακό κύκλο ο οποίος εμφανίζεται ως ταλάντωση περίπου σταθερού πλάτους στο Σχήμα 7.31. Ο οριακός κύκλος είναι ένδειξη εγγύτητας σε διακλάδωση Hopf [SKV11] και η ανάλυσή της ξεφεύγει από τα όρια αυτής της διατριβής.



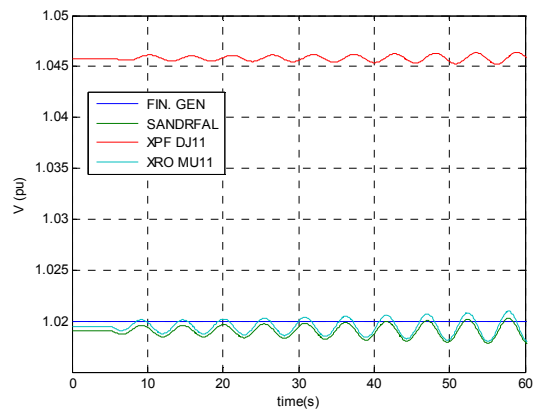
Σχήμα 7.32: Πορτραίτο φάσεων και ο οριακός κύκλος που προκύπτει στην προσομοίωση με το PSS/E.

### 7.6.3. Μεταβατική μεταβολή φορτίου στον ζυγό του ευρωπαϊκού συστήματος.

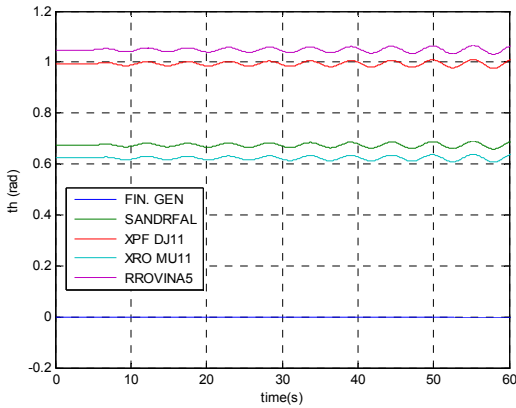
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταβατικής μεταβολής του φορτίου για μια σειρά μεταβλητών του συστήματος. Η προσομοίωση έχει γίνει με το απλοποιημένο μοντέλο (ROM-E/Sim). Στην εν λόγω προσομοίωση θεωρείται ότι το εύρος της νεκρής ζώνης είναι αρκετά μεγάλο, έτσι ώστε δεν ενεργοποιούνται οι ρυθμιστές στροφών των θερμικών μονάδων. Από τις προσομοιώσεις επιβεβαιώνεται ο υπολογισμός για την ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στον ευρωπαϊκό ρυθμό, η οποία δίνει ασταθή ταλάντωση. Ο ρυθμός αυτός, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 7.33-7.37 έχει περίοδο περίπου 5 δευτερόλεπτα και προκαλεί ταλαντώσεις των βασικών μεταβλητών του συστήματος.



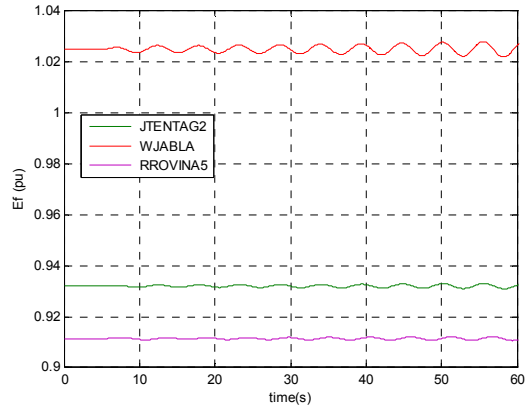
Σχήμα 7.33: Εσωτερική γωνία γεννητριών



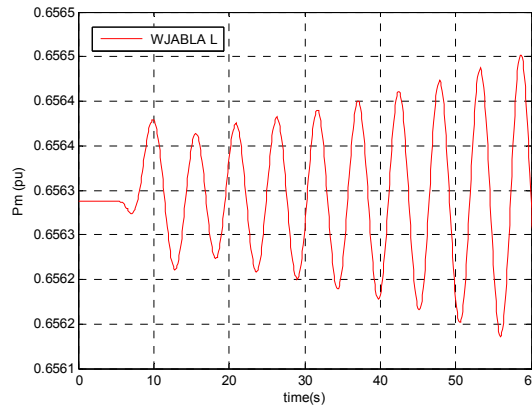
Σχήμα 7.34: Μέτρο Τάσης



Σχήμα 7.35: Γωνία Τάσης



Σχήμα 7.36: Τάση Διέγερσης



Σχήμα 7.37: Μηχανική ισχύς μονάδας WJABLA ( $S_B=142MW$ ).

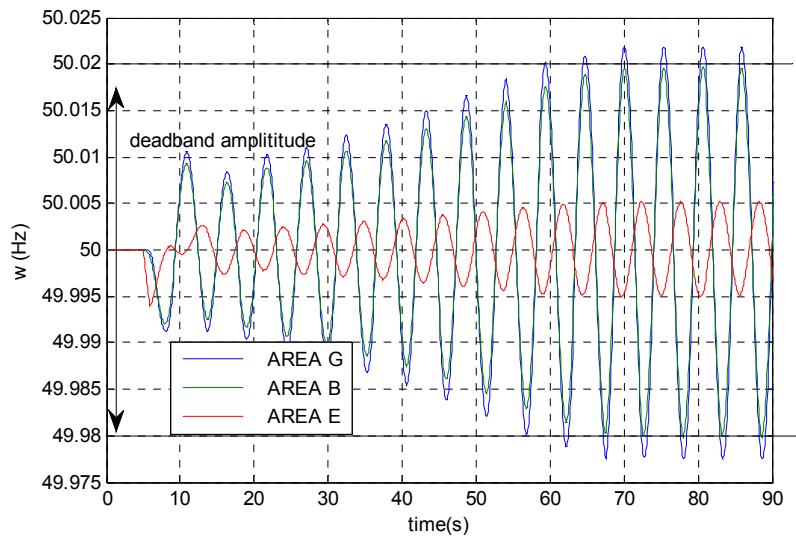
#### 7.6.4. Προσομοίωση λειτουργίας με νεκρή ζώνη ρυθμιστών στροφών σε μεταβατική διαταραχή φορτίου

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι οι ρυθμιστές στροφών των θερμικών σταθμών, έχουν νεκρή ζώνη πλάτους  $10^{-4}$  ανά μονάδα ή 20mHz. Η προσομοίωση γίνεται με το απλοποιημένο μοντέλο (ROM-E/Sim). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.28 στην περίπτωση που η συχνότητα βρίσκεται εντός της νεκρής ζώνης, ο διασυνδεδετικός ρυθμός είναι ασταθής. Αντίστροφα, όταν η συχνότητα βρίσκεται εκτός της νεκρής ζώνης ο ρυθμός είναι ευσταθής. Όταν η συχνότητα της κάθε περιοχής περνά τα όρια της νεκρής ζώνης προκύπτει μια διακριτή μεταβολή στο μοντέλο του συστήματος.

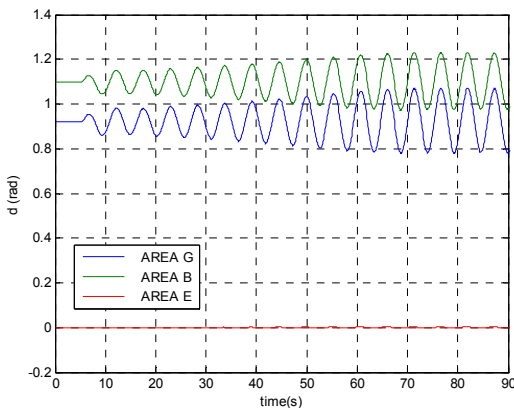
Η διαταραχή που εφαρμόζεται είναι μεταβατική αύξηση φορτίου κατά 200MW στον ισοδύναμο ζυγό του Ευρωπαϊκού συστήματος διάρκειας ενός δευτερολέπτου. Μετά την αρχική διαταραχή, το πλάτος της ταλάντωσης της συχνότητας, αυξάνει έως ότου η συχνότητα βγει εκτός των ορίων της νεκρής ζώνης, οπότε τείνει να μειωθεί το πλάτος της ταλάντωσης. Όταν όμως η συχνότητα εισέρχεται ξανά εντός των ορίων της νεκρής ζώνης το πλάτος τείνει να αυξηθεί. Συνεπώς προκύπτει ταλάντωση της οποίας το πλάτος οριοθετείται από την νεκρή ζώνη. Στα Σχήματα 7.38-7.45 φαίνονται οι αποκρίσεις κάποιων από τις μεταβλητές του συστήματος. Όπως φαίνεται στο Σχήματα 7.43-7.44 η μηχανική ισχύς των θερμικών μονάδων παραμένει αμετάβλητη έως ότου η συχνότητα ξεφεύγει από τα όρια της νεκρής ζώνης. Περίπου στα 59 δευτερόλεπτα, όπου η συχνότητα ξεφεύγει από τη νεκρή ζώνη παρουσιάζονται απότομες μεταβολές της μηχανικής ισχύος στην γεννήτρια του Σχήματος 7.43 (Καρδιά). Η μορφή αυτή εμφανίζεται διότι, στο χρονικό διάστημα μετά τα 59 δευτερόλεπτα, η συχνότητα ξεπερνά το όριο της νεκρής ζώνης μόνο στο μέγιστο και το ελάχιστο σημείο της ταλάντωσης και όχι ενδιάμεσα. Συνεπώς ακόμα και σε αυτή την περίπτωση ο ρυθμιστής στροφών

ενεργοποιείται σε ένα τμήμα του κύκλου και όχι κατά την διάρκεια όλης της ταλάντωσης. Το διάστημα αυτό διαρκεί σχετικά μικρό χρονικό διάστημα και για αυτόν τον λόγο εμφανίζεται η απόκριση του Σχήματος 7.43.

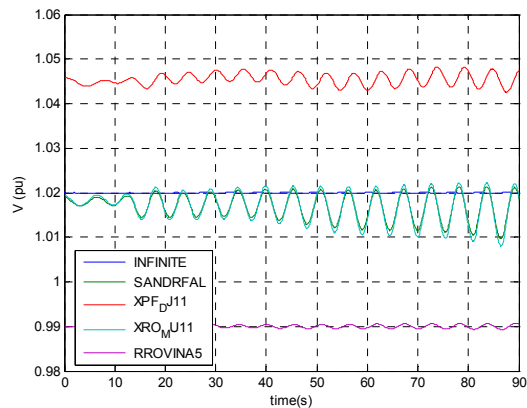
Στο Σχήμα 7.44 εμφανίζονται μόνο απότομες αυξήσεις στην μηχανική ισχύ της γεννήτριας Rovinari, όπου σε αντίθεση με το Σχήμα 7.43 οι μεταβολές είναι προς την μία κατεύθυνση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη γεννήτρια βρίσκεται στην Ρουμανία. Στο Σχήμα 7.38 φαίνεται ότι η συχνότητα της περιοχής B στην οποία ανήκει η συγκεκριμένη γεννήτρια ξεπερνά τα όρια της νεκρής ζώνης μόνο στο ελάχιστο όριο (49.98Hz) και όχι στο μέγιστο και αυτό μετά τα 72 δευτερόλεπτα σε αντίθεση με την περιοχή G όπου αυτό συμβαίνει περίπου στα 59 δευτερόλεπτα. Συνεπώς από εκείνη την χρονική στιγμή και μετά ξεκινούν να μεταβάλουν την ισχύ τους οι γεννήτριες που ανήκουν στην περιοχή B και για τον λόγο αυτό εμφανίζεται αυτή η απόκριση. Αντίθετα από τις θερμικές μονάδες, οι υδροηλεκτρικές μονάδες μεταβάλουν την μηχανική ισχύ τους καθ' όλη την διάρκεια της διαταραχής (Σχήμα 7.45).



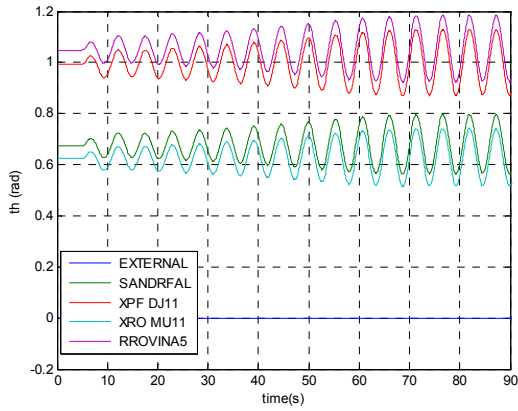
Σχήμα 7.38: Συχνότητα



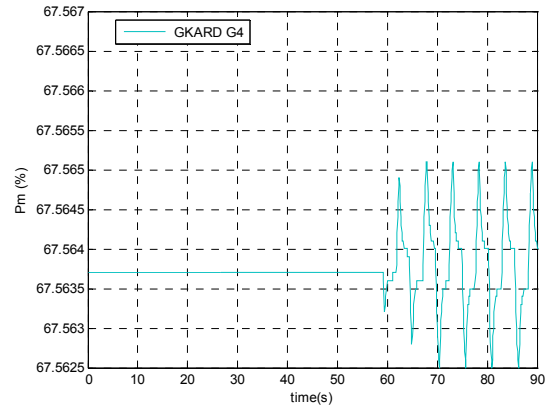
Σχήμα 7.39: Εσωτερική γωνία γεννητριών



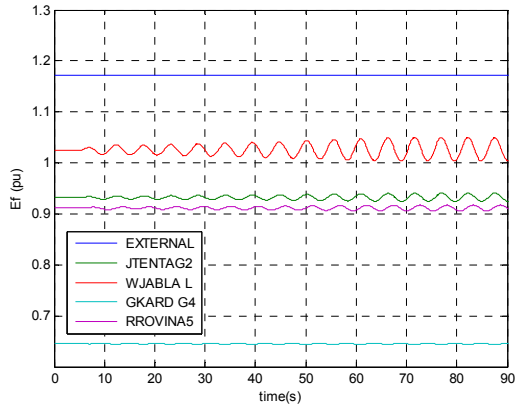
Σχήμα 7.40: Μέτρο Τάσης



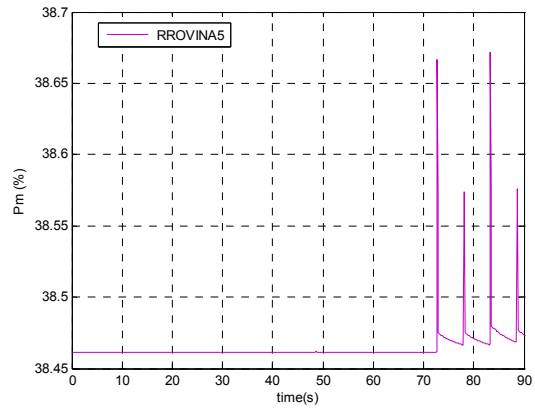
Σχήμα 7.41: Γωνία Τάσης



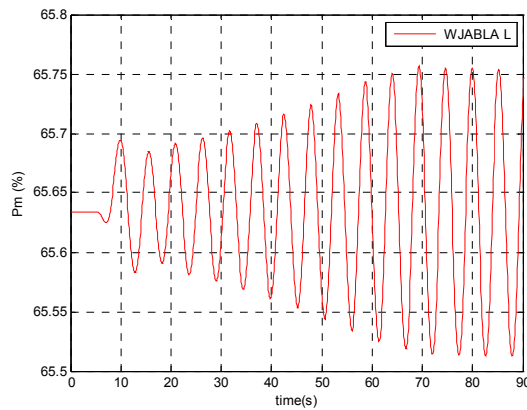
Σχήμα 7.43: Μηχανική ισχύς μονάδας Καρδιά 4 (Λιγνιτική -  $S_B=353MW$ )



Σχήμα 7.42: Τάση Διέγερσης



Σχήμα 7.44: Μηχανική ισχύς μονάδας RROVINA5 (Ανθρακας -  $S_B=390MW$ )



Σχήμα 7.45: Μηχανική ισχύς μονάδας WJABLA (Υδροηλεκτρικό -  $S_B=142MW$ )

### 7.6.5. Σταθεροποίηση με τροποποίηση της νεκρής ζώνης

Στην συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διαταραχής μεταβατικής μεταβολής του φορτίου 400MW. Στην περίπτωση αυτή το φαινόμενο εξελίσσεται πανομοιότυπα με τον τρόπο που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο (απλά το πλάτος αυξάνει ταχύτερα) και καταλήγει το σύστημα σε μια μόνιμη ταλάντωση σταθερού πλάτους που καθορίζεται από το όριο της νεκρής ζώνης (από τα 30s και μετά). Για την απόσβεση της μόνιμης ταλάντωσης που εμφανίζεται, μειώνεται το εύρος της νεκρής ζώνης σε κάποιες γεννήτριες προκειμένου να ελαττωθεί το πλάτος της ταλάντωσης. Για τον σκοπό αυτό επιλέγονται κάποιες γεννήτριες βάση της ευαισθησίας του διασυνδεδετικού ρυθμού ως προς τον στατισμό των θερμικών μονάδων (Πίνακας Παραρτήματος Β). Το εύρος της νεκρής ζώνης ελαττώνεται στο μισό (10mHz) για τις εξής μονάδες:

Βουλγαρία: Kozlodui, Maritsa East (VTMI)

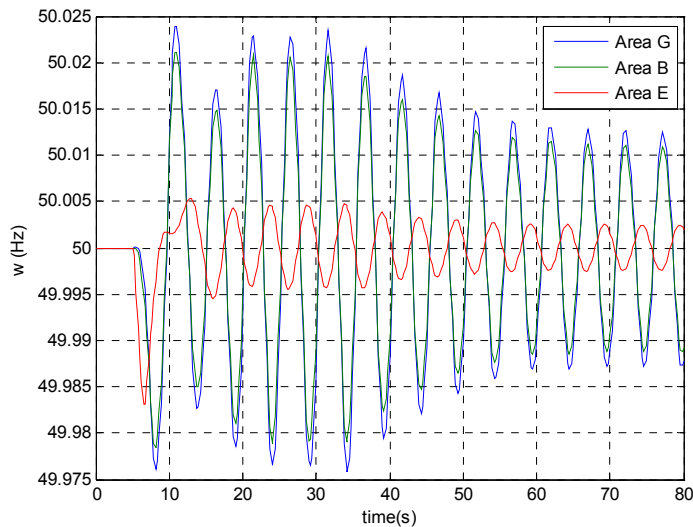
Ρουμανία Cernavoda, Turceni, Rovinari

Γιουγκοσλαβία: Tent, Kostolac (JTDRMNG1)

ΠΓΔ Μακεδονία : Bitola

Ελλάδα: Άγιος Δημήτριος, Φλώρινα, Αμύνταιο, Καρδιά, Λαύριο, Πτολεμαΐδα, Μεγαλόπολη

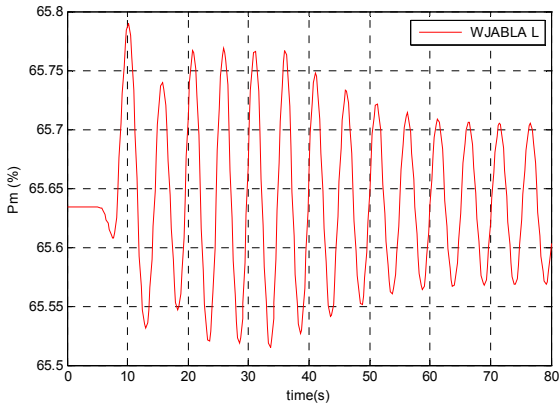
Η ιδέα γύρω από αυτή την προσέγγιση είναι ότι η μείωση του εύρους της νεκρής ζώνης μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του πλάτους της μόνιμης ταλάντωσης έτσι που να εμφανίζεται σε επίπεδα ανεκτά για ένα ηλεκτρικό σύστημα. Στα Σχήματα 7.46-7.50, την χρονική στιγμή  $t=35s$  το πλάτος της νεκρής ζώνης μειώνεται όπως περιγράφηκε. Αποτέλεσμα είναι να μειωθεί το πλάτος της μόνιμης ταλάντωσης στα νέα όρια της νεκρής ζώνης που τίθενται.



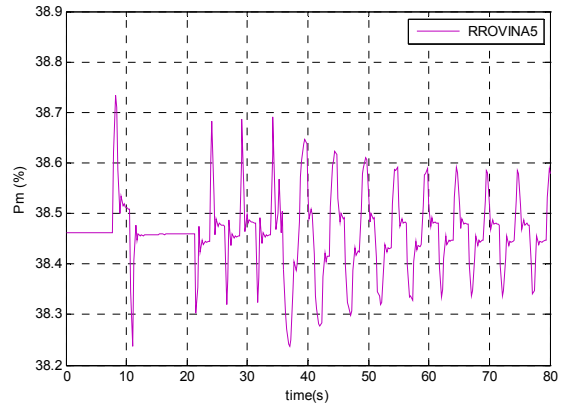
Σχήμα 7.46: Απόκριση συχνότητας σε σύστημα με μειωμένο εύρος νεκρής ζώνης σε κρίσιμες μονάδες.

Στην συνέχεια φαίνονται διακριτά οι αποκρίσεις των μονάδων. Οι υδροηλεκτρικές μονάδες έχουν μεταβαλλόμενη απόκριση καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Η απόκριση των θερμικών μονάδων παίρνει δύο μορφές. Οι μονάδες για τις οποίες δεν αλλάζει το εύρος της νεκρής ζώνης, όπως η μονάδα JTENTAG2 στην Σερβία εμφανίζουν μεταβολές μέχρι τα 35 δευτερόλεπτα (Σχήμα 7.48). Η δεύτερη κατηγορία, είναι οι θερμικές μονάδες στις οποίες μειώνεται το εύρος της νεκρής ζώνης προκειμένου να μειωθεί το πλάτος της μόνιμης ταλάντωσης της συχνότητας. Αυτές παρουσιάζουν απόκριση όπως αυτή του Rovinari (για τις μονάδες των Βαλκανίων, Σχήμα 7.49) και Καρδιά 4 για τις ελληνικές μονάδες (Καρδιά 4- Σχήμα 7.50). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.46, ακόμα και μετά την σταθεροποίηση του πλάτους της ταλάντωσης στην νέα του τιμή, η τιμή της συχνότητας φτάνει τα όρια της νεκρής ζώνης τόσο στα Βαλκάνια, όσο και στην Ελλάδα, με αποτέλεσμα οι μονάδες που

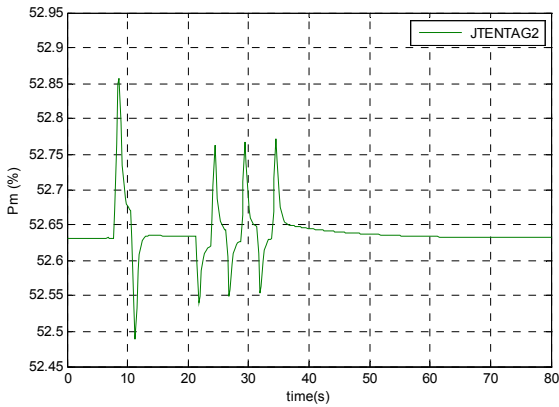
έχουν μειωμένο εύρος νεκρής ζώνης να μεταβάλουν διαρκώς την παραγωγή τους προκειμένου να διατηρηθεί το σταθερό πλάτος της ταλάντωσης.



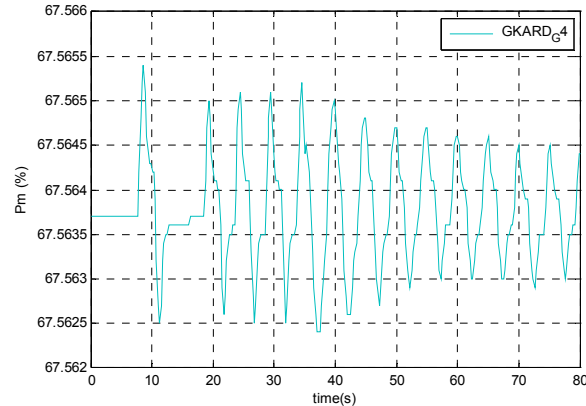
Σχήμα 7.47: Υδροηλεκτρική μονάδα WJABLA (Υδροηλεκτρικό -  $S_B=142MW$ )



Σχήμα 7.49: Μονάδα RROVINA που το εύρος της νεκρής ζώνης μειώνεται στα 10mHz ( $t=45s$ ) (Ανθρακας -  $S_B=390MW$ )



Σχήμα 7.48: Μονάδα JTENTAG2 με εύρος νεκρής ζώνης 20mHz (Λιγνίτης -  $S_B=247MW$ )



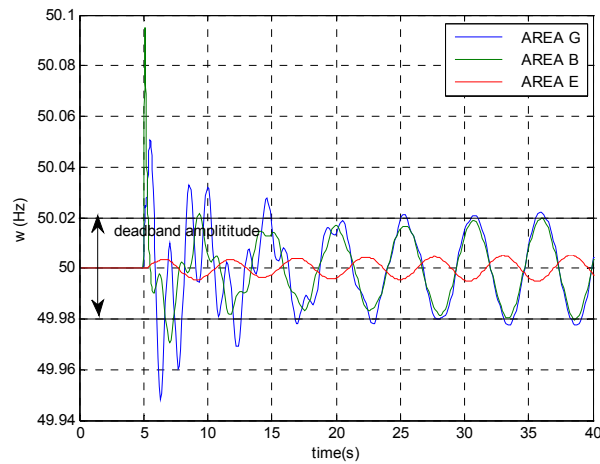
Σχήμα 7.50: Καρδιά 4 -Μονάδα που το εύρος της νεκρής ζώνης μειώνεται στα 10mHz (Λιγνιτική -  $S_B=353MW$ )

### 7.6.6. Προσομοίωση βραχυκυκλώματος κοντά στην διασύνδεση

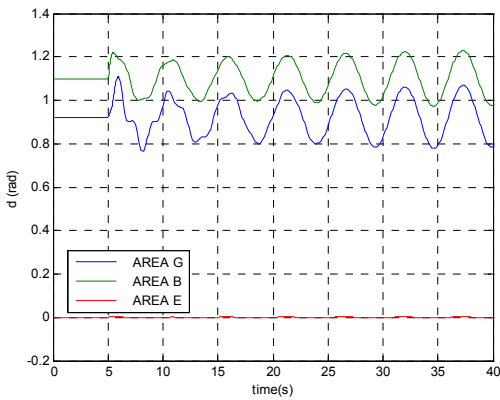
Σε συνέχεια της μελέτης του ηλεκτρικού συστήματος της ΝΑ Ευρώπης με το απλοποιημένο μοντέλο, στην παράγραφο αυτή εφαρμόζεται τριφασικό βραχυκύκλωμα διάρκειας 100ms στον ζυγό SANDRFAL(Sandrofalva) με επαγωγική αντίδραση προς γη  $X=10^{-2}$  ανά μονάδα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.51-7.57. Με την διαταραχή αυτή διεγείρονται και οι δύο ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί (G-B, G+B-E). Μάλιστα ο ρυθμός G-B αποσβένεται μετά από 15 δευτερόλεπτα από την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος, οπότε και αρχίζει να επικρατεί ο ρυθμός της εξωτερικής διασύνδεσης. Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο εμφανίζεται μια μόνιμη ταλάντωση της συχνότητας λόγω της αστάθειας όταν οι ρυθμιστές στροφών των θερμικών σταθμών είναι ανενεργοί (εντός νεκρής ζώνης).

Η συχνότητα για τις γεννήτριες του ελληνικού συστήματος εμφανίζει ταλαντώσεις μεγαλύτερου πλάτους σε σχέση με αυτή των Βαλκανίων και για τον λόγο αυτό οι θερμικοί σταθμοί του ελληνικού συστήματος στην περίπτωση αυτή συμμετέχουν αρκετά στην ρύθμιση της συχνότητας (Σχήμα 7.55). Αντίθετα οι γεννήτριες των Βαλκανίων συμμετέχουν λιγότερο (Σχήμα 7.56) λόγω του μικρότερου

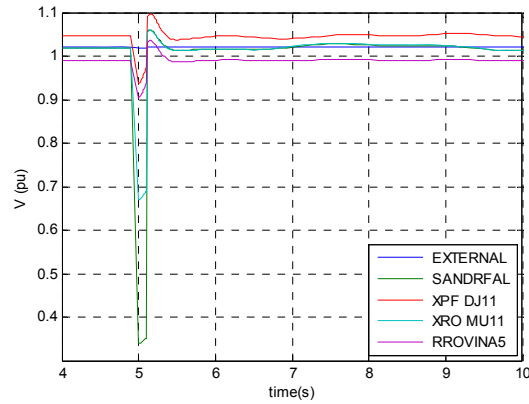
πλάτους της ταλάντωσης της συχνότητας η οποία για το μεγαλύτερο διάστημα της προσομοίωσης δεν ξεπερνά τα όρια της νεκρής ζώνης. Τέλος, όπως και στα προηγούμενα, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί ρυθμίζουν καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης (Σχήμα 7.57).



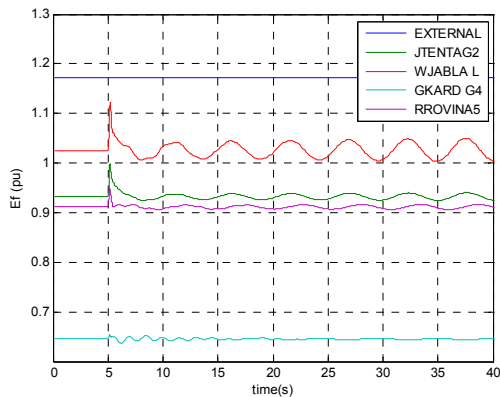
Σχήμα 7.51: Συχνότητα



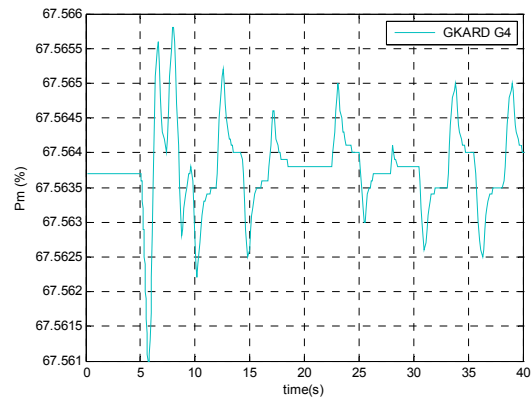
Σχήμα 7.52: Εσωτερική γωνία γεννητριών



Σχήμα 7.54: Μέτρο Τάσης

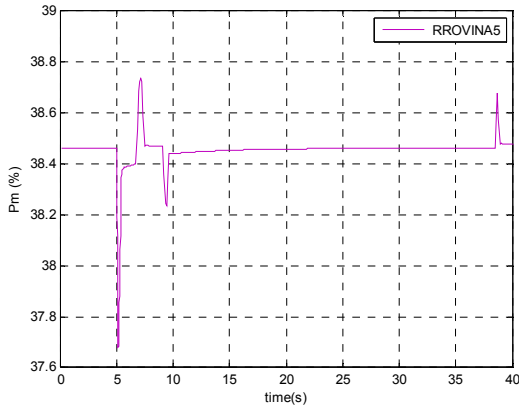


Σχήμα 7.53: Τάση Διέγερσης

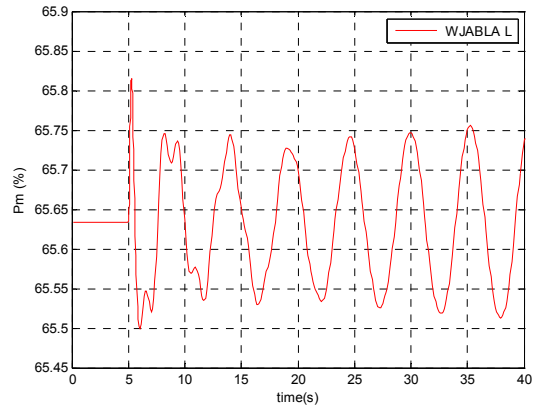


Σχήμα 7.55: Μηχανική ισχύς μονάδας Καρδιά 4 (Αιγυπτιακή -  $S_B=353MW$ )





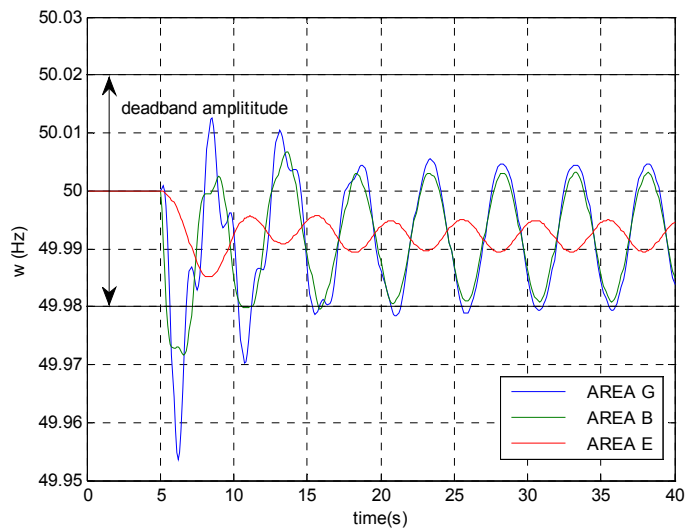
Σχήμα 7.56: Μηχανική ισχύς μονάδας RROVINA5  
(Άνθρακας- $S_B=390MW$ )



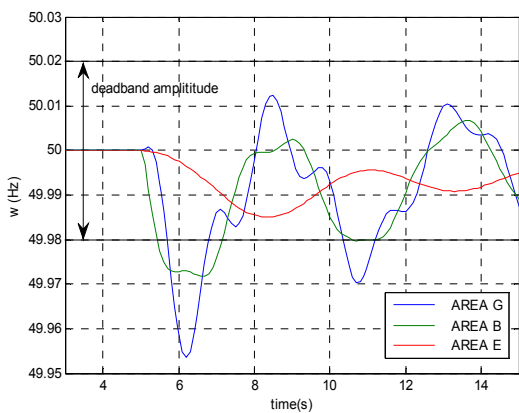
Σχήμα 7.57: Μηχανική ισχύς μονάδας WJABLA  
(Υδροηλεκτρικό -  $S_B=142MW$ )

### 7.6.7. Προσομοίωση λειτουργίας Βαλκανικού συστήματος σε αύξηση φορτίου 200MW στην διασύνδεση Βοσνίας-Μαυροβουνίου

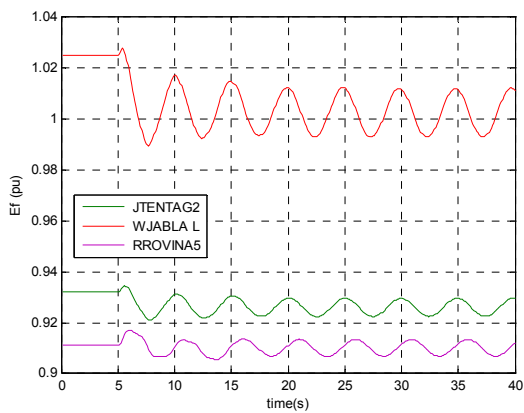
Η διαταραχή αυτή περιλαμβάνει αύξηση του φορτίου κοντά στην διασύνδεση της Βοσνίας με το Μαυροβούνιο κατά 200MW. Κατά την διάρκεια των πρώτων δέκα δευτερολέπτων μετά την διαταραχή και οι δύο ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί (G-B, B+G-E) διεγείρονται. Ο πρώτος ρυθμός γρήγορα αποσβένεται και επικρατεί ο πρώτος. Όπως περιγράφηκε και παραπάνω, όταν η απόκλιση της συχνότητας υπερβεί τα όρια της νεκρής ζώνης ο ρυθμός είναι ευσταθής, ενώ όταν βρίσκεται μέσα στα όρια ο ρυθμός είναι ασταθής. Αποτέλεσμα είναι μια μόνιμη ταλάντωση. Τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.58-7.66 είναι παρόμοια με αυτά της παραγράφου 7.6.3. Λόγω του γεγονότος ότι πρόκειται για μόνιμη διαταραχή, η ταλάντωση της συχνότητας δεν γίνεται μεταξύ του άνω και κάτω ορίου της νεκρής ζώνης, αλλά έχει σταθερό πλάτος που καθορίζεται από το κάτω όριο της νεκρής ζώνης. Στα Σχήματα 7.64-7.65 παρατηρείται παρόμοια απόκριση για την μηχανική ισχύ των θερμικών σταθμών σε σχέση με αυτή της παραγράφου 7.6.3. Το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης για την συχνότητα της περιοχής G οδηγεί σε διαρκή (έστω και ασυνεχή) μεταβολή της μηχανικής ισχύος των θερμικών σταθμών στο ελληνικό σύστημα (Σχήμα 7.65 – Καρδιά) σε αντίθεση με τις γεννήτριες στο βαλκανικό (Σχήμα 7.64 RROVINA5 της Ρουμανίας) όπου μετά τα 20 δευτερόλεπτα ο ρυθμιστής στροφών είναι ανενεργός. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί (Σχήμα 7.66) μεταβάλλουν συνεχώς την παραγωγή τους.



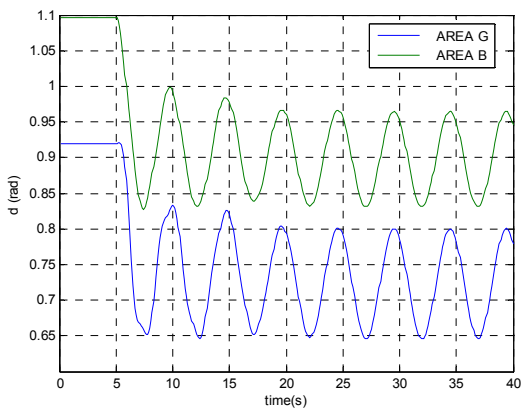
Σχήμα 7.58: Συχνότητα



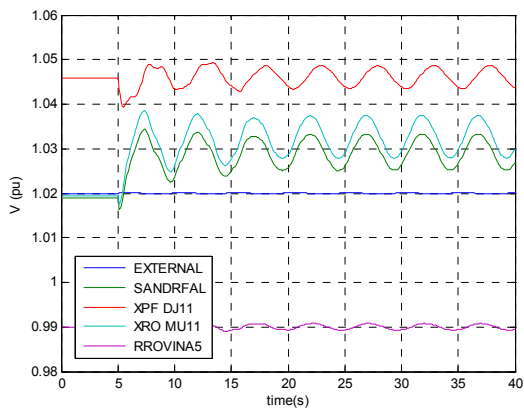
Σχήμα 7.59: Συχνότητα (λεπτομέρεια)



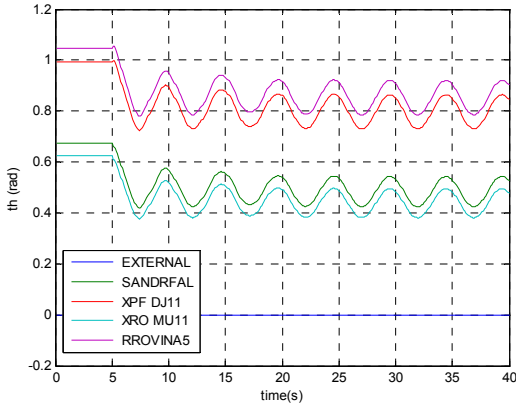
Σχήμα 7.61: Τάση Διέγερσης



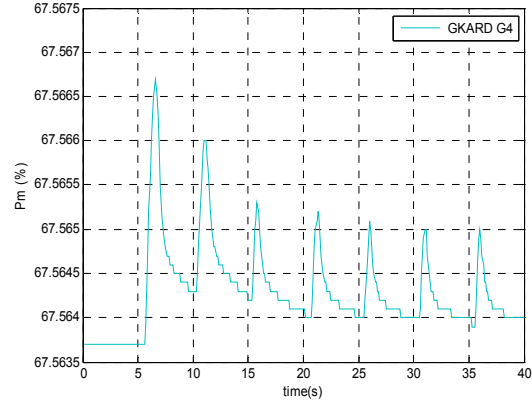
Σχήμα 7.60: Εσωτερική γωνία αναφοράς



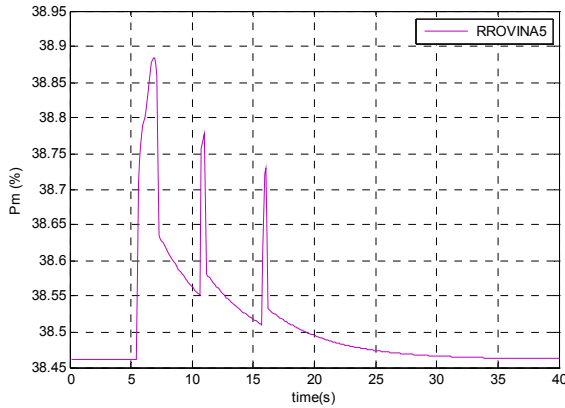
Σχήμα 7.62: Μέτρο Τάσης



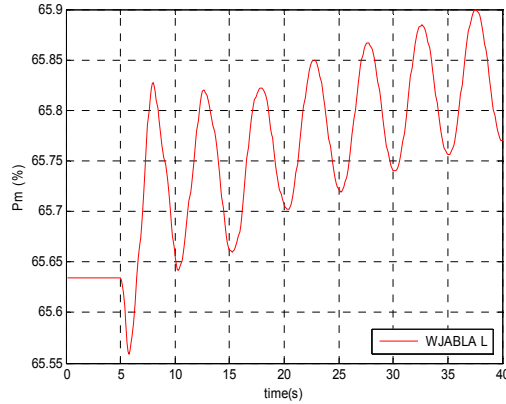
Σχήμα 7.63: Γωνία Τάσης



Σχήμα 7.65: Μηχανική ισχύς μονάδας Καρδιά (Αιγνίτης -  $S_B=353MW$ )



Σχήμα 7.64: Μηχανική ισχύς μονάδας RROVINAS (Ανθρακας -  $S_B=390MW$ )



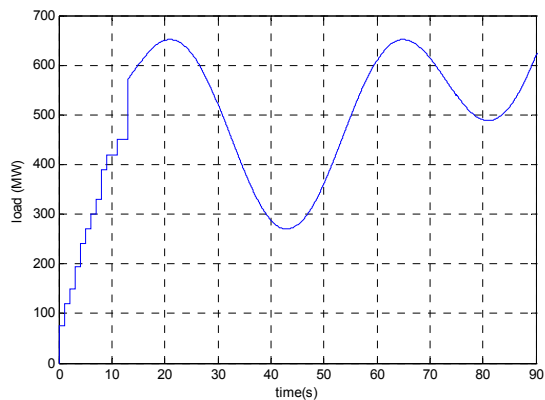
Σχήμα 7.66: Μηχανική ισχύς μονάδας WJABLA (Υδροηλεκτρικό -  $S_B=142MW$ )

### 7.6.8. Αναπαγωγή διαταραχής 1-5-05

Έχοντας μελετήσει την απόκριση του συστήματος και λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της νεκρής ζώνης των ρυθμιστών στροφών των θερμικών μονάδων, στην ενότητα αυτή θα χρησιμοποιηθεί το απλοποιημένο μοντέλο (ROM-E/Sim) προκειμένου να αναπαρασταθεί η μη αποσβενύμενη ταλάντωση που εμφανίστηκε στην ΝΑ Ευρώπη την 1<sup>η</sup> Μαΐου του 2005.

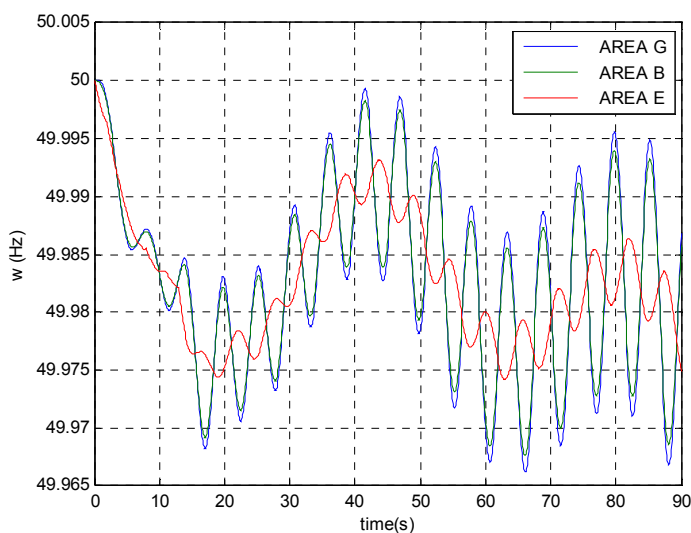
Προκειμένου να αναπαρασταθεί η ταλάντωση, έγινε προσομοίωση θεωρώντας την νεκρή ζώνη των ρυθμιστών στροφών των θερμικών σταθμών ρυθμισμένη για κάποιες γεννήτριες στα  $\pm 20\text{mHz}$  ενώ σε άλλες στα  $\pm 40\text{mHz}$ . Η διαταραχή αρχικά είναι μια σταδιακή αύξηση του φορτίου μεγέθους 450MW. Στην συνέχεια το φορτίο αυξάνεται βηματικά κατά 120MW και επιπλέον μεταβάλλεται με μια ημιτονοειδή σχέση με πλάτος 300MW προκειμένου να αντιστοιχεί στην γενική τάση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.4. Η περιοδική μεταβολή του φορτίου γίνεται βάση της παρακάτω εξίσωσης και φαίνεται στο Σχήμα 7.67:

$$P = 300\sin\left(\frac{2\pi(t+t_0)}{120}\right)\cos\left(\frac{2\pi(t+t_0)}{60}\right) \quad (7.3)$$



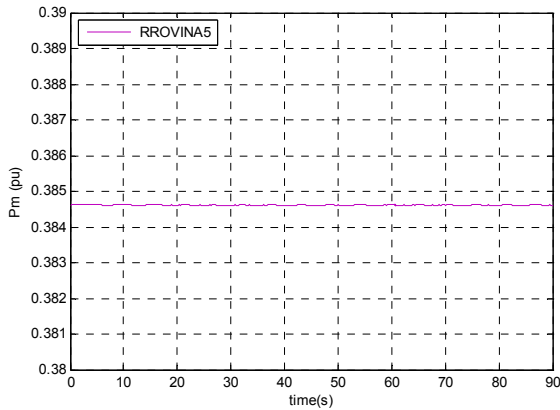
Σχήμα 7.67. Μεταβολή φορτίου ισοδύναμης γεννήτριας περιοχής E

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στο Σχήμα 7.68. Το ελληνικό και το βαλκανικό σύστημα ταλαντώνονται σε φάση, αντίθετα με το υπόλοιπο ευρωπαϊκό σύστημα. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 7.4 και 7.68 προκύπτει ότι το ελαττωμένο μοντέλο, λαμβάνοντας υπ' όψιν την επίδραση της νεκρής ζώνης των ρυθμιστών στροφών των θερμικών μονάδων, μπορεί ικανοποιητικά να αναπαραστήσει την ταλάντωση που καταγράφηκε την 1<sup>η</sup> Μαΐου του 2005.

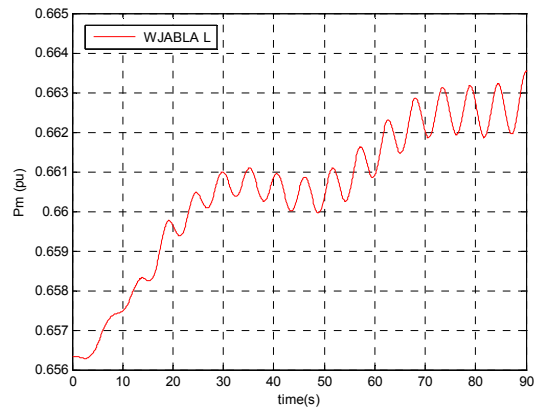


Σχήμα 7.68. Συχνότητες περιοχών μετά από διαταραχή μεταβολής φορτίου (ROM-E/Sim).

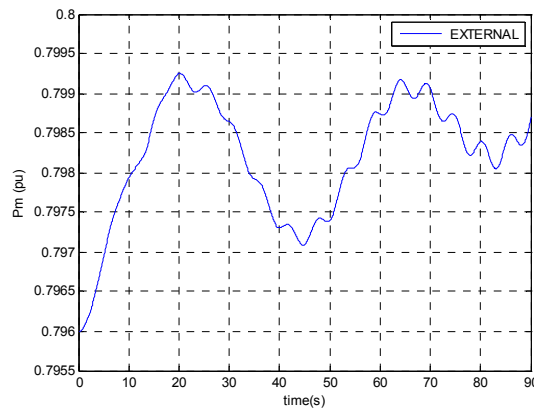
Στα Σχήματα 7.69-7.71 φαίνεται η μεταβολή της μηχανικής ισχύος ενός θερμικού, ενός υδροηλεκτρικού και της ισοδύναμης πεπερασμένης γεννήτριας που αντιστοιχεί στο υπόλοιπο ευρωπαϊκό σύστημα. Η θερμική μονάδα δεν μεταβάλλει την μηχανική της ισχύ λόγω της νεκρής ζώνης του ρυθμιστή στροφών (πλάτος 40mHz), η υδροηλεκτρική μονάδα μεταβάλλει διαρκώς την παραγωγή της, ενώ η ισοδύναμη γεννήτρια παρακολουθεί την γενική μεταβολή του φορτίου.



Σχήμα 7.69: Μηχανική ισχύς μονάδας RROVINA5 (Ανθρακας-Ρουμανία -  $S_B=390MW$ )



Σχήμα 7.70: Μηχανική ισχύς μονάδας WJABLA (Υδροηλεκτρικό -  $S_B=142MW$ )



Σχήμα 7.71: Μηχανική ισχύς ισοδύναμης γεννήτριας εξωτερικού συστήματος ( $S_B=200GW$ )

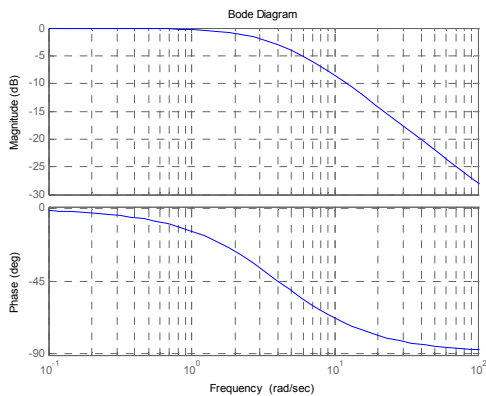
## 7.7. Σχεδίαση σταθεροποιητών ισχύος για τον ευρωπαϊκό ρυθμό στο ελληνικό σύστημα

Στην ενότητα αυτή γίνεται σχεδίαση σταθεροποιητή ισχύος για τις γεννήτριες του ελληνικού συστήματος για τον διασυνδεδετικό ρυθμό G+B-E του συστήματος της ΝΑ Ευρώπης. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το απλοποιημένο μοντέλο που αναπτύχθηκε στην διατριβή. Ένα θέμα που θα πρέπει να αντιμετωπίζεται στην διαδικασία σχεδίασης σταθεροποιητή ισχύος για διασυνδεδετικές ταλαντώσεις είναι η επίδραση στους υπόλοιπους ρυθμούς του συστήματος, και κυρίως στους τοπικούς ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς, (οι οποίοι όπως αναφέρθηκε απαλείφονται στο απλοποιημένο μοντέλο).

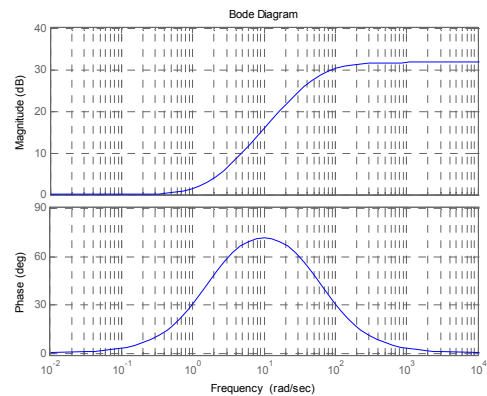
Στην συγκεκριμένη περίπτωση όπου στο σύστημα υπάρχουν σειρά τοπικών ρυθμών οι οποίοι έχουν απλοποιηθεί, ο σταθεροποιητής δεν θα πρέπει να επιδρά σε ρυθμούς υψηλότερων συχνοτήτων. Μια λύση θα ήταν η τοποθέτηση σε σταθεροποιητή ενός κλάδου (τύπος σταθεροποιητή STAB1\*) ενός βαθυπερατού φίλτρου που θα μειώνει το κέρδος στις συχνότητες αυτές. Ωστόσο προκειμένου να διασφαλιστεί το γεγονός ότι δεν θα αποσταθεροποιηθούν οι τοπικοί ρυθμοί των γεννητριών στις οποίες τοποθετείται ο σταθεροποιητής, θα πρέπει να εξασφαλιστεί αυξημένη φάση αντιστάθμισης στην συχνότητα των τοπικών ρυθμών.

Για μια υποθετική σχεδίαση με την μέθοδο που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.5.1 με τον σταθεροποιητή STAB1\* θα ισχύει: Για την μείωση του κέρδους του σταθεροποιητή στην συχνότητα

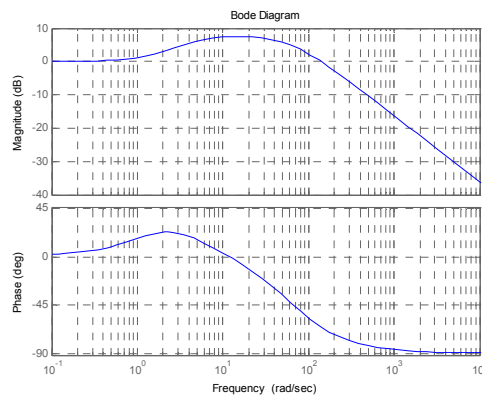
των τοπικών ταλαντώσεων μια κατάλληλη χρονική σταθερά του βαθυπερατού φίλτρου είναι τα 0.25s. Η βαθμίδα του βαθυπερατού φίλτρου, στην συχνότητα του 1r/s αφαιρεί φάση από τον σταθεροποιητή περίπου  $15^\circ$ . Αν θεωρήσουμε μια τιμή για την απαιτούμενη αντιστάθμιση φάσης ίση με  $20^\circ$ , η φάση που θα πρέπει να εισάγει η βαθμίδα υστέρησης προήγησης φάσης στην συχνότητα αυτή θα πρέπει να είναι  $35^\circ$ . Για την εξασφάλιση αυξημένης φάσης αντιστάθμισης στους τοπικούς ρυθμούς επιλέγεται κεντρική συχνότητας 1.6Hz (10r/s). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.73 η επιλογή της κεντρικής συχνότητας στα 10r/s οδηγεί στην αύξηση του κέρδους της βαθμίδας υστέρησης/προήγησης φάσης σε όλο το εύρος συχνοτήτων των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων με αποτέλεσμα να αντισταθμίζεται η μείωση κέρδους που εισάγει το βαθυπερατό φίλτρο. Στο Σχήμα 7.74 φαίνεται ότι ο σταθεροποιητής εμφανίζει υψηλά κέρδη σε όλο το εύρος συχνοτήτων των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Επίσης η φάση που αφαιρεί το βαθυπερατό φίλτρο στην περιοχή συχνοτήτων των τοπικών ταλαντώσεων (Σχήμα 7.72) αναιρεί την αυξημένη φάση που εισάγει η βαθμίδα υστέρησης προήγησης φάσης (Σχήμα 7.73) με αποτέλεσμα η συνολική φάση που εισάγει ο σταθεροποιητής στην συχνότητα των τοπικών ταλαντώσεων να είναι πολύ μικρή (Σχήμα 7.74).



Σχήμα 7.72: Διάγραμμα Bode βαθυπερατού φίλτρου



Σχήμα 7.73: Διάγραμμα Bode βαθμίδας υστέρησης/προήγησης φάσης

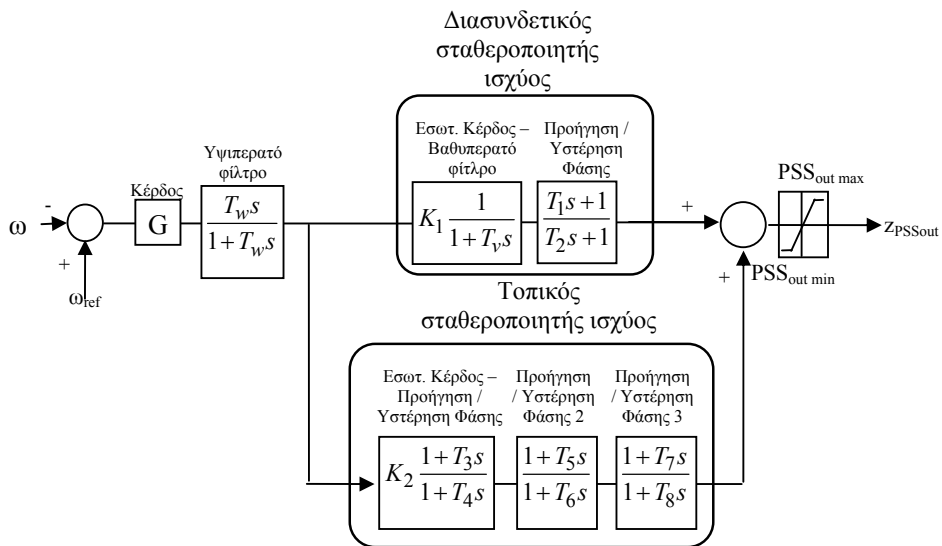


Σχήμα 7.74: Διάγραμμα Bode σταθεροποιητή

Για τους λόγους αυτούς, και προκειμένου να διασφαλιστεί ότι ο σχεδιαζόμενος σταθεροποιητής δεν θα αποσταθεροποιήσει υψηλούς ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς χρησιμοποιείται ο σταθεροποιητής ισχύος PSS2\* που περιγράφηκε στην ενότητα 3.4.2. Το διάγραμμα βαθμίδων του σταθεροποιητή ισχύος φαίνεται στο Σχήμα 7.75.

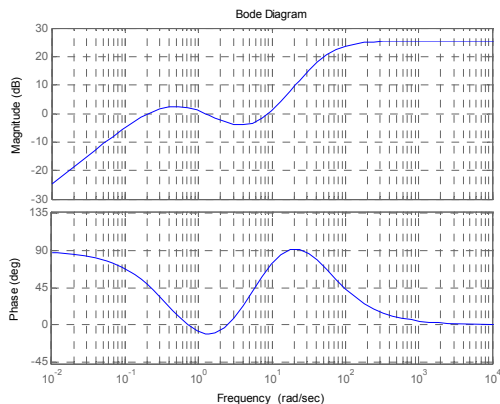
Η διάταξη αυτή αποτελείται από δύο κλάδους και ένα τμήμα κοινό το οποίο είναι ένα υπερπερατό φίλτρο προκειμένου να απαλειφονται τα μόνιμα σφάλματα στη συχνότητα. Ο σταθεροποιητής αυτός στην ουσία είναι ένας συνδυασμός ενός σταθεροποιητή για τοπικές ταλαντώσεις και ενός

σταθεροποιητή για διασυνδεδετικές ταλαντώσεις. Ο πρώτος αποτελείται από τρεις βαθμίδες υστέρησης-προήγησης φάσης διότι οι τοπικοί ρυθμοί γενικά απαιτούν μεγάλες γωνίες αντιστάθμισης. Αντίθετα ο διασυνδεδετικός σταθεροποιητής ισχύος αποτελείται από μια βαθμίδα υστέρησης προήγησης φάσης καθώς οι απαιτούμενες γωνίες αντιστάθμισης δεν είναι πολύ μεγάλες. Επιπλέον ο διασυνδεδετικός σταθεροποιητής ισχύος περιλαμβάνει και ένα βαθυπερατό φίλτρο. Το φίλτρο αυτό μειώνει το κέρδος για τις υψηλές συχνότητες, οπότε με την τοποθέτησή του μπορούμε να θεωρήσουμε, ότι οι ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί με συχνότητα μεγαλύτερη ενός ορίου που καθορίζεται από την ρύθμιση του βαθυπερατού φίλτρου, δεν επηρεάζονται από τον διασυνδεδετικό σταθεροποιητή. Κάθε κλάδος του σταθεροποιητή ισχύος έχει εσωτερικό συντελεστή κέρδους προκειμένου να ρυθμίζεται η συνεισφορά του στο σήμα εξόδου, ενώ υπάρχει και ένα κοινό (για τους δύο κλάδους) κέρδος, το βασικό κέρδος του σταθεροποιητή. Κεντρική συχνότητα του διασυνδεδετικού σταθεροποιητή ορίζεται η συχνότητα του διασυνδεδετικού ρυθμού, καθώς η αυξημένη αντιστάθμιση φάσης στην περιοχή συχνοτήτων των τοπικών ρυθμών προκύπτει από τον τοπικό σταθεροποιητή.

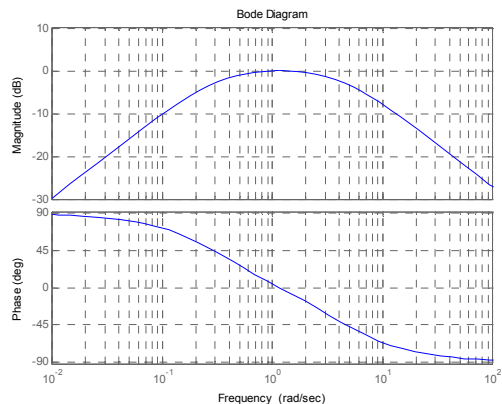


Σχήμα 7.75: Διάγραμμα βαθμίδων σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή ισχύος

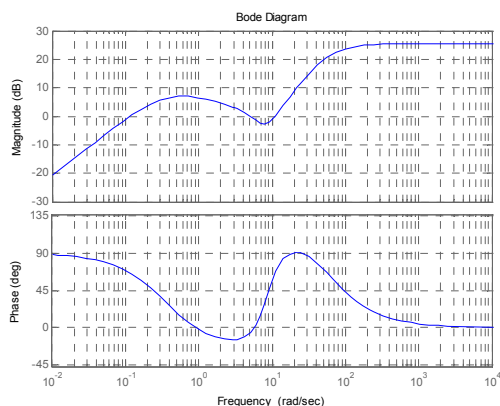
Στα Σχήματα 7.76-7.78 παρουσιάζονται τρία διαγράμματα Bode (το πρώτο για τον διασυνδεδετικό σταθεροποιητή ισχύος, το δεύτερο για τον τοπικό, και το τρίτο για τον συνδυασμένο σταθεροποιητή PSS2\*) για κάποιες τυπικές τιμές. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στα διαγράμματα αυτά, είναι οι τιμές του σταθεροποιητή ισχύος που σχεδιάστηκε για τον Αγ. Δημήτριο 5.



Σχήμα 7.76: Διάγραμμα Bode τοπικού σταθεροποιητή



Σχήμα 7.77: Διάγραμμα Bode διασυνδεδετικού σταθεροποιητή



Σχήμα 7.78: Διάγραμμα Bode συνδυασμένου σταθεροποιητή

Όπως φαίνεται στα σχήματα αυτά οι περιοχές συχνοτήτων που είναι αυξημένο το κέρδος του κάθε σταθεροποιητή είναι ως ένα βαθμό διακριτές. Για παράδειγμα ο διασυνδεδετικός σταθεροποιητής ισχύος σε συχνότητες μεγαλύτερες των  $3\text{r/s}$  έχει αρκετά μειωμένο κέρδος, συνεπώς ο όρος του τοπικού σταθεροποιητή ισχύος γίνεται κυρίαρχος. Επί της ουσίας δηλαδή σε αυτή την περιοχή των συχνοτήτων λειτουργεί μόνο ο τοπικός σταθεροποιητής ισχύος και για τον λόγο αυτό η καμπύλες του κέρδους και της φάσης στα Σχήματα 7.76, 7.78 για αυτές τις περιοχές συχνοτήτων είναι παραπλήσιες. Στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων ο τοπικός σταθεροποιητής ισχύος δεν είναι ανενεργός, ωστόσο δεν αλλοιώνει σημαντικά τη φάση που εισάγεται στους ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς χαμηλής συχνότητας.

Ως σήμα εισόδου θεωρείται η συχνότητα της συνεκτικής περιοχής. Το σήμα είναι απ' ευθείας διαθέσιμο στο απλοποιημένο μοντέλο, ενώ στο πραγματικό σύστημα η ηλεκτρική συχνότητα στους ζυγούς του δικτύου μπορεί να αποτελέσει ένα κατάλληλο υποκατάστατο. Στην προσομοίωση του λεπτομερούς μοντέλου με το PSS/E, χρησιμοποιείται ως σήμα εισόδου η ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας. Όπως θα φανεί στα αποτελέσματα των επόμενων παραγράφων, αυτό δεν δημιουργεί κάποιο πρόβλημα καθώς οι τοπικοί ρυθμοί οι οποίοι υπάρχουν στο πραγματικό σήμα αποσβένονται από το βαθυπερατό φίλτρο και ρυθμίζονται από τον τοπικό σταθεροποιητή.

Η μέθοδος με την οποία γίνεται η σχεδίαση περιγράφεται στην παράγραφο 3.5.3. Το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός των ολοκληρωτικών υπολοίπων της συνάρτησης μεταφοράς όπου εισόδος είναι η τάση αναφοράς του APT της κάθε γεννήτριας και έξοδος η συχνότητα. Στον Πίνακα 7.28 φαίνονται τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα με το μεγαλύτερο μέτρο όπως υπολογίστηκαν με το απλοποιημένο



μοντέλο. Στους υπολογισμούς αυτούς οι ρυθμιστές στροφών των θερμικών μονάδων θεωρούνται ανενεργοί.

Πίνακας 7.28: Ολοκληρωτικά υπόλοιπα με μεγαλύτερο μέτρο

Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο			
		Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Φάση
10001	AFIERZG1	-0.00216	0.00122	0.00249	150.5
29218	RCERNAA1	-0.00188	-0.00005	0.00188	181.5
59477	GLAURIGN	-0.00138	0.00081	0.00160	149.7
13405	VNKOZ9A1	-0.00157	0.00025	0.00159	170.8
22577	GAGDIMG5	-0.00155	0.00001	0.00155	179.6
13404	VNKOZ0A1	-0.00150	0.00035	0.00154	166.9
35030	JTENTBG1	-0.00124	0.00075	0.00145	149.0
29577	GFLWRIG1	-0.00142	0.00022	0.00144	171.3
10502	AKOMANG3	-0.00107	0.00030	0.00111	164.6
21277	GAMYNTG2	-0.00091	0.00045	0.00101	153.7
23477	GKARD_G4	-0.00085	0.00051	0.00099	148.9
22377	GAGDIMG3	-0.00084	0.00043	0.00095	152.9
22477	GAGDIMG4	-0.00084	0.00042	0.00094	153.2
23377	GKARD_G3	-0.00079	0.00049	0.00093	148.2
35024	JTENTAG4	-0.00078	0.00040	0.00087	152.9
13603	VTVAR4F1	-0.00082	0.00008	0.00082	174.6
35026	JTENTAG6	-0.00071	0.00039	0.00082	151.2

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.28 επιλέγονται οι γεννήτριες του ελληνικού συστήματος με το μεγαλύτερο μέτρο του ολοκληρωτικού υπολοίπου. Στον Πίνακα 7.29 φαίνονται οι γεννήτριες αυτές καθώς και τα αντίστοιχα ολοκληρωτικά υπόλοιπα που υπολογίστηκαν με το PacDyn. Για να γίνει πιο εύκολη η σύγκριση, το μέτρο του ολοκληρωτικού υπολοίπου εμφανίζεται κανονικοποιημένο στο μέτρο του μέγιστου ολοκληρωτικού υπολοίπου.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η προσέγγιση των ολοκληρωτικών υπολοίπων είναι ικανοποιητική. Όσον αφορά την φάση, το σφάλμα κυμαίνεται μεταξύ 1°-13° μοιρών ενώ το μέτρο δεν εμφανίζει μεγάλες αποκλίσεις. Στην κατάταξη των υπονηφίων γεννητριών με βάση το μέτρο των ολοκληρωτικών υπολοίπων η σειρά που προκύπτει με το λεπτομερές και απλοποιημένο μοντέλο διαφέρει ελαφρά. Ωστόσο οι διαφοροποιήσεις δεν είναι πολύ σημαντικές δεδομένου ότι τα μέτρα των ολοκληρωτικών υπολοίπων μεταξύ κάποιων γεννητριών είναι παραπλήσια. Για παράδειγμα με το απλοποιημένο μοντέλο η δεύτερη γεννήτρια με το μεγαλύτερο ολοκληρωτικό υπόλοιπο είναι ο Αγ. Δημήτριος 5, ενώ με το λεπτομερές είναι η Φλώρινα 1. Στην ουσία όμως το μέτρο του ολοκληρωτικού υπολοίπου που αντιστοιχεί στις δύο γεννήτριες είναι παραπλήσιο και το που τελικά θα τοποθετηθεί ο σταθεροποιητής ισχύος δεν τροποποιεί σημαντικά το αποτέλεσμα.

Πίνακας 7.29: Ολοκληρωτικά υπόλοιπα με μεγαλύτερο μέτρο για τις γεννήτριες του ελληνικού συστήματος

Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο (ROM)		Ολοκληρωτικό υπόλοιπο (PacDyn)	
		Μέτρο	Φάση	Μέτρο	Φάση
59477	GLAURIGN	0.0467	149.7	0.04536	146.8
22577	GAGDIMG5	0.0451	179.6	0.03997	168.9
29577	GFLWRIG1	0.0419	171.3	0.04082	158.5
21277	GAMYNTG2	0.0295	153.7	0.02555	146.1
23477	GKARD_G4	0.0290	148.9	0.02507	144.1
22377	GAGDIMG3	0.0276	152.9	0.02586	152.0
22477	GAGDIMG4	0.0275	153.2	0.02567	152.2
23377	GKARD_G3	0.0271	148.2	0.02525	149.1
59577	GLAVRIG2	0.0227	128.4	0.02095	124.4
59177	GBLAVRG4	0.0203	129.4	0.02028	130.7
62177	GMEGALG4	0.0198	104.9	0.02043	106.7
23177	GKARD_G1	0.0172	108.5	0.01609	103.2
25477	GPTOLEG4	0.0169	111.1	0.01649	109.5
43487	GALIVEG4	0.0166	113.0	0.01616	114.2
22177	GAGDIMG1	0.0158	113.6	0.01577	118.4
19187	GTHIS_G1	0.0157	155.9	0.01582	149.7

Με την χρήση του απλοποιημένου μοντέλου γίνεται σχεδίαση σταθεροποιητών ισχύος για τις γεννήτριες του ελληνικού συστήματος. Με βάση τον Πίνακα 7.29, οι μονάδες με το μεγαλύτερο μέτρο ολοκληρωτικού υπολοίπου είναι:

Λαύριο

Αγ. Δημήτριος 5

Φλώρινα

Αμύνταιο 2

Καρδιά 3,4

Εκτός των κριτηρίων της φάσης και του μέτρου του ολοκληρωτικού υπολοίπου θα πρέπει η τοποθέτηση σταθεροποιητών να γίνεται σε μονάδες που λειτουργούν αρκετές ώρες σε ετήσια βάση. Συνεπώς θα πρέπει να είναι είτε μονάδες βάσης, είτε νέες μονάδες με σχετικά χαμηλό κόστος λειτουργίας και για τον λόγο αυτό δεν θα σχεδιαστεί σταθεροποιητής για την μονάδα του Λαυρίου. Στον Πίνακα 7.30 παρατίθενται εκ νέου τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα των γεννητριών για τις οποίες θα σχεδιαστεί ο σταθεροποιητής. Παρότι η γεννήτρια Καρδιά 3 είναι χαμηλότερα στην λίστα του Πίνακα 7.29, εντάσσεται στην διαδικασία σχεδίασης εφόσον ο σταθεροποιητής ισχύος που θα σχεδιαστεί για την γεννήτρια Καρδιά 4, θα εφαρμοστεί και στην Καρδιά 3 που είναι ίδιας κατασκευής και λειτουργεί πάντα παράλληλα με την 4.

Πίνακας 7.30: Κρίσιμη ιδιοτιμή και ολοκληρωτικά υπόλοιπα γεννητριών στο ελληνικό σύστημα

Κρίσιμη ιδιοτιμή (ρυθμός G+B-E)					
Ιδιοτιμή		Συχνότητα (Hz)		Ρυθμός απόσβεσης (%)	
2.112E-02±1.170j		0.186		-1.86	
Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο			
		Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Φάση
22577	GAGDIMG5	-0.00155	0.00001	0.00155	179.6
29577	GFLWRIG1	-0.00142	0.00022	0.00144	171.3
21277	GAMYNTG2	-0.00091	0.00045	0.00101	153.7
23477	GKARD_G4	-0.00085	0.00051	0.00099	148.9
23377	GKARD_G3	-0.00079	0.00049	0.00093	148.2

Με βάση την τεχνική σχεδίασης που αναλύθηκε στην Παράγραφο 3.5.3 υπολογίζονται οι παράμετροι του σταθεροποιητή. Καταρχήν επιλέγεται η χρονική σταθερά του υπερβατικού φίλτρου. Για τον τοπικό σταθεροποιητή επιλέγονται τιμές οι οποίες προκύπτουν από το μοντέλο μηχανής-άπειρου ζυγού, δεδομένου ότι στο απλοποιημένο μοντέλο οι ρυθμοί αυτοί έχουν απαλειφθεί. Στην παρούσα εργασία θεωρείται τυπικός τοπικός σταθεροποιητής ισχύος του οποίου οι παράμετροι φαίνονται στον Πίνακα 7.31 και έχουν προκύψει από την εργασία [ANV11]. Το εσωτερικό κέρδος του τοπικού σταθεροποιητή ρυθμίζεται έτσι ώστε το κέρδος να είναι μοναδιαίο σε συχνότητα 9r/s.

Πίνακας 7.31: Παράμετροι τοπικού σταθεροποιητή ισχύος

	$K_2$	$T_3$ (s)	$T_4$ (s)	$T_5$ (s)	$T_6$ (s)	$T_7$ (s)	$T_8$ (s)
Τιμή	1.996	0.16	0.02	0.23	0.02	0.15	1.42

Επιλέγεται η χρονική σταθερά του βαθυπερατού φίλτρου με βάση τις συχνότητες που θα πρέπει να αποκρίνονται στην είσοδο του σταθεροποιητή, ίση με 3s. Οι χρονικές σταθερές της διάταξης προήγησης-υστέρησης φάσης του διασυνδεδετικού σταθεροποιητή καθορίζονται βάση των ολοκληρωτικών υπολοίπων. Σημειώνεται ότι η κεντρική συχνότητα που επιλέχθηκε για τον διασυνδεδετικό σταθεροποιητή είναι 1.2r/s (~0.2Hz). Αντίθετα με τον σταθεροποιητή ισχύος που σχεδιάστηκε στο Κεφάλαιο 6 (ενότητες 6.5-6.6), κατά τη σχεδίαση του κλάδου αυτού δεν επιδιώκεται μεγαλύτερη αντιστάθμιση φάσης σε μεγαλύτερες συχνότητες, καθώς η απαραίτητη φάση θα δοθεί από τον τοπικό σταθεροποιητή. Το εσωτερικό κέρδος του διασυνδεδετικού σταθεροποιητή επιλέγεται έτσι ώστε το κέρδος του κλάδου να είναι μοναδιαίο στην συχνότητα 1r/s.

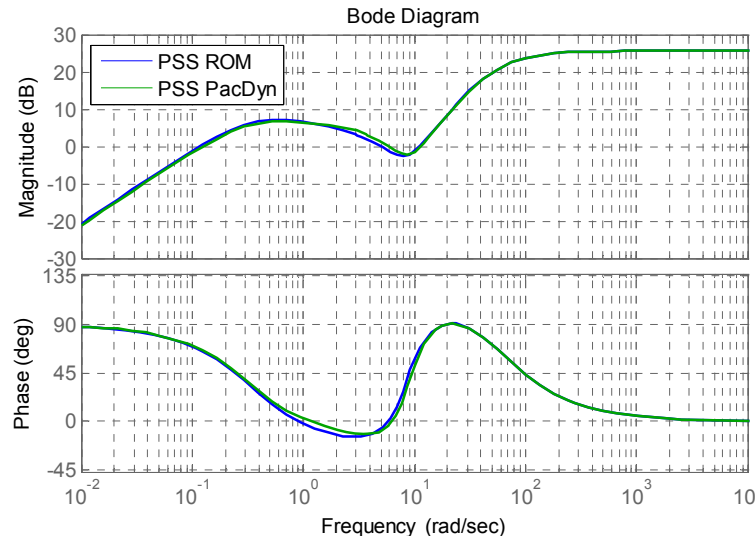
Η σχεδίαση γίνεται σε διαδοχικά βήματα. Σχεδιάζεται και τοποθετείται ο πρώτος σταθεροποιητής, επαναυπολογίζονται τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα, και στη συνέχεια σχεδιάζεται ο δεύτερος σταθεροποιητής. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου επιτευχθεί ικανοποιητική απόσβεση του προς σταθεροποίηση ρυθμού, η οποία ορίζεται στο  $\zeta=10\%$ .

### Βήμα 1: Σταθεροποιητής ισχύος στην μονάδα Άγιος Δημήτριος 5

Για τον σταθεροποιητή στη μονάδα Αγ. Δημήτριος 5 η σχεδίαση έγινε τόσο με βάση τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα που υπολογίστηκαν με το ελαττωμένο μοντέλο (ROM/E-Sim) όσο και με τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα που υπολογίστηκαν με το PacDyn προκειμένου να γίνει σύγκριση. Η τιμή για τις χρονικές σταθερές του διασυνδεδετικού σταθεροποιητή φαίνονται στον Πίνακα 7.32 και το διάγραμμα Bode στο Σχήμα 7.79.

Πίνακας 7.32: Παράμετροι διασυνδεδετικού σταθεροποιητή Αγ. Δημήτριος 5

Σχεδίαση με λογισμικό	$K_1$	$T_v$ (s)	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$T_w$ (s)	G
ROM-E/Sim	1.090	0.25	0.7930	0.7986	3	12
PacDyn	0.941	0.25	0.957	0.6617	3	12



Σχήμα 7.79: Bode διάγραμμα σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή ισχύος Αγ. Δημήτριος 5

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.79 παρότι η διαφορά φάσης των αντίστοιχων ολοκληρωτικών υπολοίπων είναι 10 μοίρες (πρόκειται δηλαδή για μια γεννήτρια όπου το σφάλμα υπολογισμού της φάσης με το ROM-E/Sim είναι από τα μεγαλύτερα που εμφανίζονται στο σενάριο αυτό) η σχεδίαση του σταθεροποιητή δεν διαφοροποιείται σημαντικά. Μολονότι στον Πίνακα 7.32 οι χρονικές σταθερές παρουσιάζουν διαφορές, το διάγραμμα Bode για τους δύο σταθεροποιητές που σχεδιάστηκαν είναι αρκετά παραπλήσιο. Στα επόμενα βήματα της διαδικασίας σχεδίασης θα παρουσιάζονται αποκλειστικά τα δεδομένα που υπολογίζονται με το απλοποιημένο μοντέλο.

Η κρίσιμη ιδιοτιμή και τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα επαναυπολογίζονται συμπεριλαμβάνοντας τον σταθεροποιητή που σχεδιάστηκε στον Αγ. Δημήτριο 5. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.33

Πίνακας 7.33: Κρίσιμη ιδιοτιμή και ολοκληρωτικά υπόλοιπα μετά το Βήμα 1.

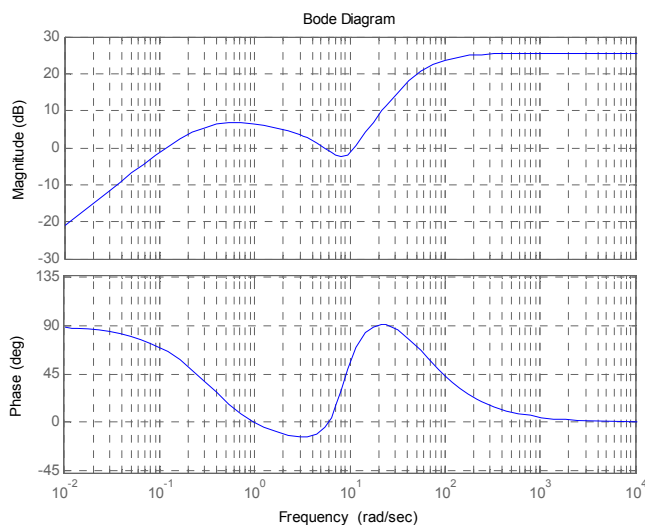
Κρίσιμη ιδιοτιμή (ρυθμός G+B-E)					
Ιδιοτιμή		Συχνότητα (Hz)	Ρυθμός απόσβεσης (%)		
-1.738E-02±1.173j		0.187	1.48		
Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο			
		Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Φάση
29577	GFLWRIG1	-0.00148	0.00012	0.001483	175.4
21277	GAMYNTG2	-0.00096	0.000407	0.001044	157.0
23477	GKARD_G4	-0.00091	0.000482	0.001027	152.0
23377	GKARD_G3	-0.00084	0.000461	0.00096	151.3

## Βήμα 2: Σταθεροποιητής ισχύος στην μονάδα Φλώρινα 1

Εφόσον η απόσβεση του ρυθμού (όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.33) δεν ικανοποιεί το κριτήριο που τέθηκε, γίνεται σχεδίαση δεύτερου σταθεροποιητή. Με βάση τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα του Πίνακα 7.33 σχεδιάζεται με τον ίδιο τρόπο ο σταθεροποιητής ισχύος για την γεννήτρια Φλώρινα 1. Οι παράμετροι φαίνονται στον Πίνακα 7.34. Το διάγραμμα Bode του σταθεροποιητή για την Φλώρινα 1 φαίνεται στο Σχήμα 7.80.

Πίνακας 7.34: Παράμετροι διασυνδεδετικού σταθεροποιητή Φλώρινα 1

	K1	Tv (s)	T1 (s)	T2 (s)	Tw (s)	G
Τιμή	1.032	0.25	0.850	0.7450	3	12



Σχήμα 7.80: Bode διάγραμμα σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή ισχύος Φλώρινα 1

Στην συνέχεια, και αφού η ιδιοτιμή του ευρωπαϊκού ρυθμού δεν έχει ακόμη την επιθυμητή απόσβεση, τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα επαναυπολογίζονται συμπεριλαμβάνοντας και τον σταθεροποιητή που σχεδιάστηκε στον σταθμό Φλώρινα 1. Η ιδιοτιμή του ευρωπαϊκού ρυθμού και τα αποτελέσματα του υπολογισμού των ολοκληρωτικών υπολοίπων φαίνονται στον Πίνακα 7.35

Πίνακας 7.35: Κρίσιμη ιδιοτιμή και ολοκληρωτικά υπόλοιπα μετά το βήμα 2

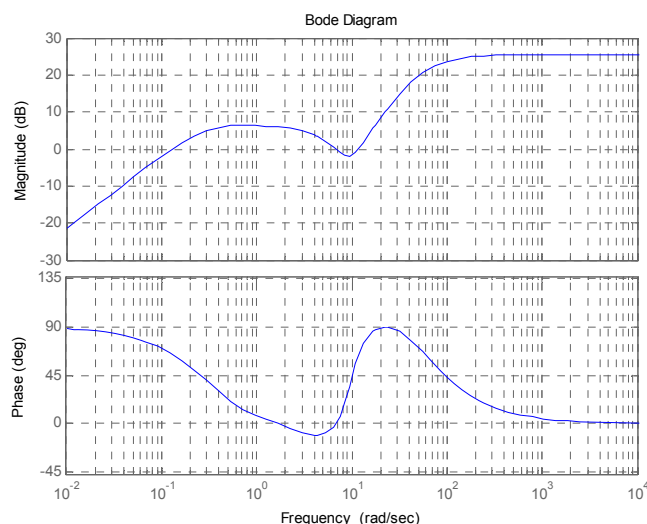
Κρίσιμη ιδιοτιμή (ρυθμός G+B-E)					
Ιδιοτιμή		Συχνότητα (Hz)	Ρυθμός απόσβεσης (%)		
-5.26E-02±1.178j		0.187	4.46		
Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο			
		Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Φάση
21277	GAMYNTG2	-0.00102	0.00036	0.001085	160.6
23477	GKARD_G4	-0.00097	0.000445	0.001068	155.4
23377	GKARD_G3	-0.0009	0.000427	0.000997	154.7

### Βήμα 3: Σταθεροποιητής ισχύος στην μονάδα Αμύνταιο 2

Με βάση τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα του Πίνακα 7.35 σχεδιάζεται με τον ίδιο τρόπο ο σταθεροποιητής ισχύος για την μονάδα Αμύνταιο 2. Οι παράμετροι του σταθεροποιητή φαίνονται στον Πίνακα 7.36. Το διάγραμμα Bode του σταθεροποιητή για το Αμύνταιο 2 φαίνεται στο Σχήμα 7.81.

Πίνακας 7.36: Παράμετροι διασυνδεδετικού σταθεροποιητή Αμύνταιο 2

	$K_1$	$T_v$ (s)	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$T_w$ (s)	G
Τιμή	0.827	0.25	1.1280	0.5614	3	12



Σχήμα 7.81: Bode διάγραμμα σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή ισχύος Αμύνταιο 2

Στην συνέχεια, και αφού η ιδιοτιμή του ευρωπαϊκού ρυθμού δεν έχει ακόμη την επιθυμητή απόσβεση τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα επαναυπολογίζονται συμπεριλαμβάνοντας και τον σταθεροποιητή που σχεδιάστηκε στον σταθμό Αμύνταιο 2. Η ιδιοτιμή του ευρωπαϊκού ρυθμού και τα αποτελέσματα του υπολογισμού των ολοκληρωτικών υπολοίπων φαίνονται στον Πίνακα 7.37

Πίνακας 7.37: Κρίσιμη ιδιοτιμή και ολοκληρωτικά υπόλοιπα μετά το βήμα 3

Κρίσιμη ιδιοτιμή (ρυθμός G+B-E)					
Ιδιοτιμή		Συχνότητα (Hz)		Ρυθμός απόσβεσης (%)	
-8.21E-02±1.181j		0.188		6.93	
Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο			
		Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Φάση
23477	GKARD_G4	-0.00103	0.000428	0.001115	157.4
23377	GKARD_G3	-0.00096	0.000412	0.00104	156.7

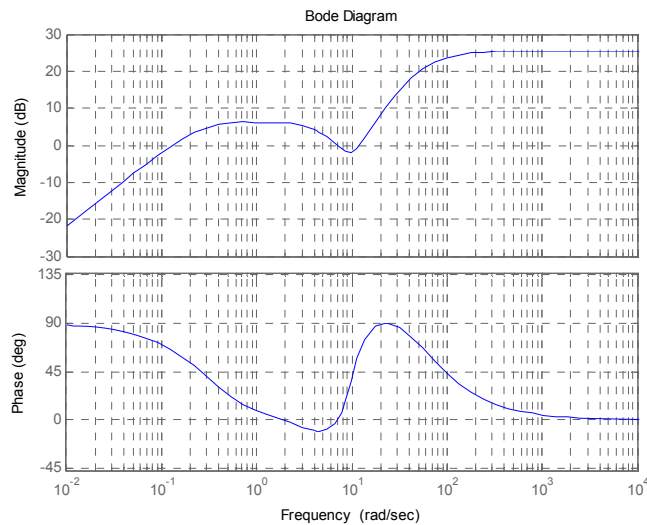
### Βήμα 4: Σταθεροποιητής ισχύος στις μονάδες Καρδιά 3,4

Με βάση τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα του Πίνακα 7.37 σχεδιάζεται με τον ίδιο τρόπο ο σταθεροποιητής ισχύος για την γεννήτρια Καρδιά 4. Ο ίδιος σταθεροποιητής θα τοποθετηθεί και στην γεννήτρια Καρδιά 3 που είναι ίδιας κατασκευής με την μονάδα Καρδιά 4. Οι παράμετροι φαίνονται

στον Πίνακα 7.38. Το διάγραμμα Bode του σταθεροποιητή για τις μονάδες Καρδιά 3,4 φαίνεται στο Σχήμα 7.82.

Πίνακας 7.38: Παράμετροι διασυνδεδετικού σταθεροποιητή Καρδιά 4

	$K_1$	$T_v$ (s)	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$T_w$ (s)	G
Τιμή	0.788	0.25	1.1970	0.5290	3	12



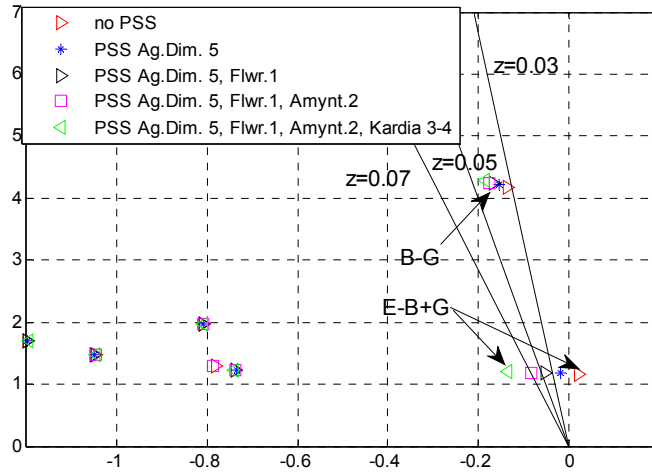
Σχήμα 7.82: Bode διάγραμμα σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή ισχύος Καρδιά 3,4

Η ιδιοτιμή που προκύπτει για τον ευρωπαϊκό ρυθμό μετά την τοποθέτηση των σταθεροποιητών που σχεδιάστηκαν στις μονάδες Καρδιά 3,4 φαίνεται στον Πίνακα 7.39. Το κριτήριο της απόσβεσης ικανοποιείται και η διαδικασία τερματίζεται.

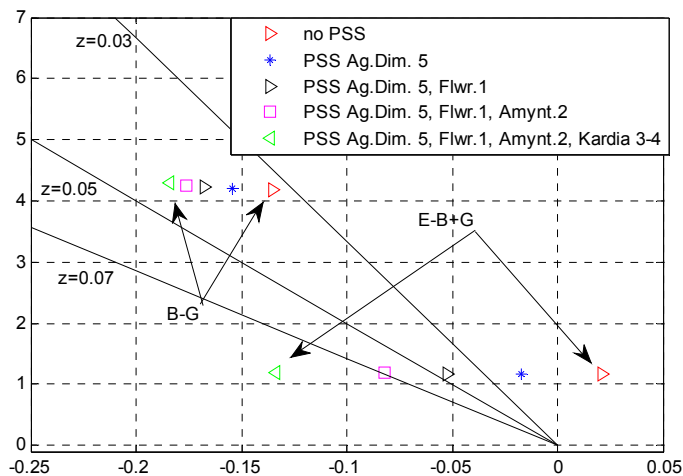
Πίνακας 7.39: Κρίσιμη ιδιοτιμή και ολοκληρωτικά υπόλοιπα μετά το βήμα 4

Κρίσιμη ιδιοτιμή (ρυθμός G+B-E)		
Ιδιοτιμή	Συχνότητα (Hz)	Ρυθμός απόσβεσης (%)
-0.134±1.199j	0.191	11.11

Στα Σχήματα 7.83-7.84 παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές (που αντιστοιχούν στους δύο βασικούς διασυνδεδετικούς ρυθμούς του Βαλκανικού συστήματος) του γραμμικοποιημένου συστήματος υπολογισμένες με το απλοποιημένο μοντέλο κατά την σταδιακή τοποθέτηση των σταθεροποιητών που σχεδιάστηκαν. Ο ρυθμός απόσβεσης φτάνει στο 11% τιμή η οποία θεωρείται ικανοποιητική. Ο ευρωπαϊκός ρυθμός αυξάνει την απόσβεσή του χωρίς να μεταβάλλει σημαντικά την συχνότητά του. Ο ρυθμός G-B δεν επηρεάζεται σημαντικά από την τοποθέτηση των σταθεροποιητών ισχύος.



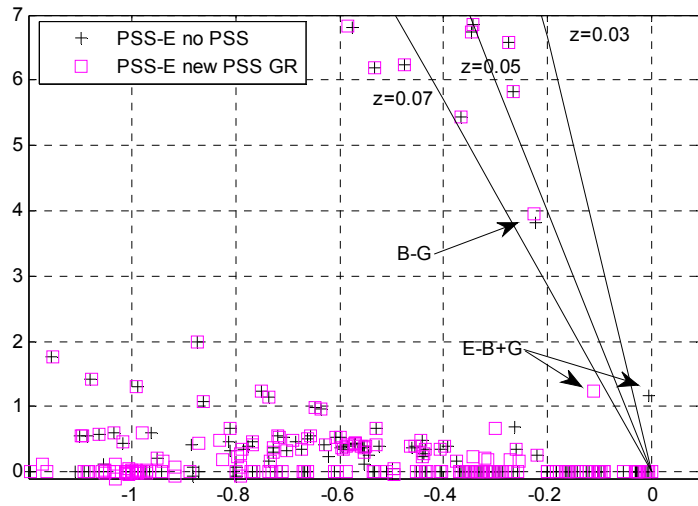
Σχήμα 7.83: Ιδιοτιμές γραμμικοποιημένου συστήματος με απλοποιημένο μοντέλο θεωρώντας την σταδιακή εγκατάσταση των σχεδιαζόμενων σταθεροποιητών



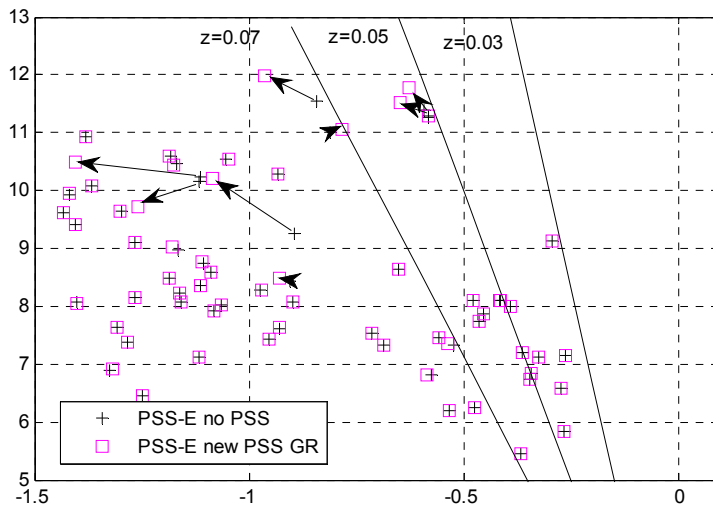
Σχήμα 7.84: Ιδιοτιμές γραμμικοποιημένου συστήματος με απλοποιημένο μοντέλο θεωρώντας την σταδιακή εγκατάσταση των σχεδιαζόμενων σταθεροποιητών (λεπτομέρεια)

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η αποτελεσματικότητα της σχεδίασης σταθεροποιητών με το απλοποιημένο μοντέλο, οι ιδιοτιμές με όλους τους σταθεροποιητές υπολογίστηκαν με τα λεπτομερή μοντέλα PSS/E και PacDyn. Στα Σχήματα 7.85-7.88 φαίνονται οι ιδιοτιμές που υπολογίστηκαν. Επιβεβαιώνεται η καλή λειτουργία των σχεδιαζόμενων σταθεροποιητών τόσο όσον αφορά τον διασυνδεδετικό ρυθμό, όσο και σχετικά με την επίδρασή του στους τοπικούς ρυθμούς. Ο διασυνδεδετικός ρυθμός μετατοπίζεται χωρίς να μεταβάλλει την συχνότητά του, ο ρυθμός G-B επηρεάζεται ελάχιστα, ενώ οι τοπικοί ρυθμοί που σχετίζονται κυρίως με τις γεννήτριες για τις οποίες σχεδιάστηκαν οι σταθεροποιητές μετατοπίζονται στα αριστερά του μιγαδικού επιπέδου.

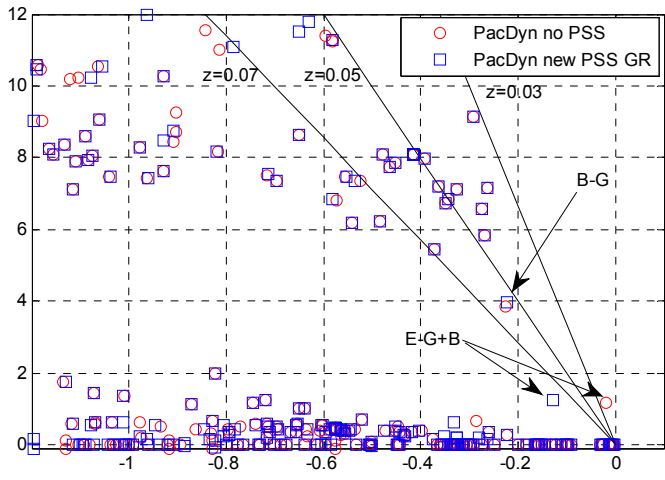




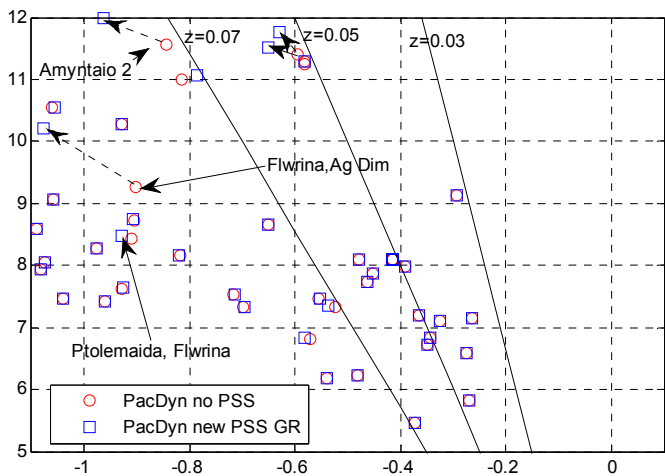
Σχήμα 7.85: Ιδιοτιμές γραμμικοποιημενου συστήματος με λεπτομερές μοντέλο (PSS/E) πριν και μετά την τοποθέτηση των σταθεροποιητών



Σχήμα 7.86: Ιδιοτιμές γραμμικοποιημενου συστήματος με λεπτομερές μοντέλο (PSS/E) πριν και μετά την τοποθέτηση των σταθεροποιητών (λεπτομέρεια –τοπικοί ρυθμοί)



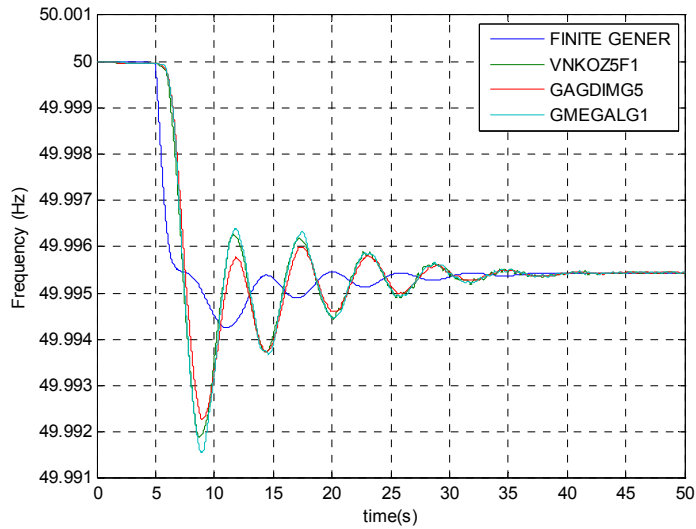
Σχήμα 7.87: Ιδιοτιμές γραμμικοποιημένου συστήματος με λεπτομερές μοντέλο (PacDyn) πριν και μετά την τοποθέτηση των σταθεροποιητών



Σχήμα 7.88: Ιδιοτιμές γραμμικοποιημένου συστήματος με λεπτομερές μοντέλο (PacDyn) πριν και μετά την τοποθέτηση των σταθεροποιητών (λεπτομέρεια –τοπικοί ρυθμοί)

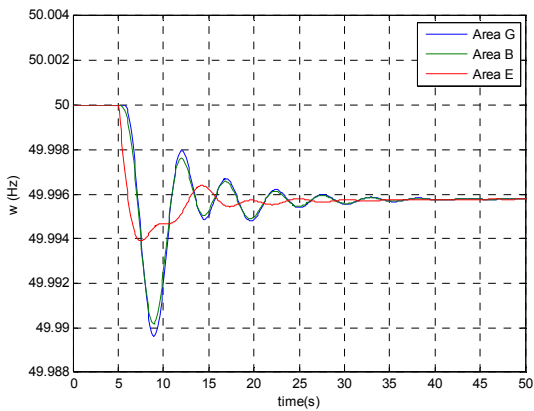
**7.7.1. Απόκριση μετά την τοποθέτηση σταθεροποιητή για αύξηση του φορτίου**

Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε προσομοίωση διαταραχής μεταβολής φορτίου. Στο Σχήμα 7.89 φαίνεται η απόκριση της συχνότητας τεσσάρων γεννητριών υπολογισμένη με το PSS/E μετά από αύξηση φορτίου 120MW πριν και μετά την τοποθέτηση των σταθεροποιητών.

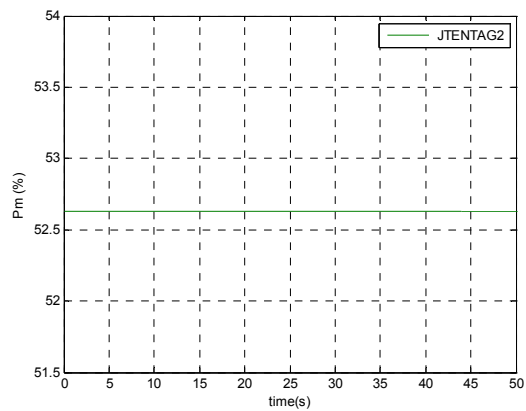


Σχήμα 7.89: Απόκριση συχνότητας γεννήτριας τεσσάρων γεννητριών μετά από διαταραχή αύξησης φορτίου 120MW στον ισοδύναμο ζυγό μετά την τοποθέτηση των σταθεροποιητών (PSS/E)

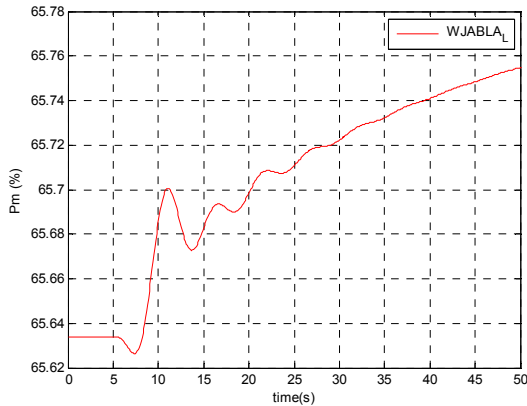
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το ROM-E/Sim της διαταραχής στην οποία εμφανιζόταν η μόνιμη ταλάντωση (παράγραφος 7.6.7). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχήματα 7.90-7.93) δείχνουν ότι ο διασυνδεδετικός ρυθμός σταθεροποιείται με τους σχεδιαζόμενους σταθεροποιητές ισχύος, χωρίς να επηρεάζεται η συχνότητά του, επιβεβαιώνοντας την ανάλυση ιδιοτιμών του γραμμικοποιημένου μοντέλου. Όπως φαίνεται στα αντίστοιχα διαγράμματα ο ρυθμιστής στροφών της θερμικής μονάδας JTENTAG2 (Σερβία) δεν ρυθμίζει εφόσον η συχνότητα παραμένει εντός του εύρους της νεκρής ζώνης. Αντίθετα η υδροηλεκτρική μονάδα WJABLA ρυθμίζει καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.



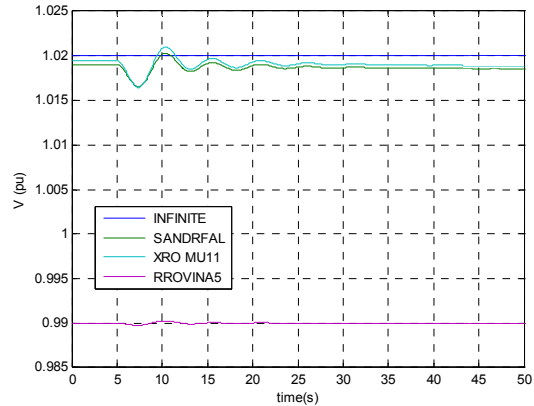
Σχήμα 7.90: Συχνότητα



Σχήμα 7.91: Μηχανική ισχύς JTENTAG2 (Θερμική)



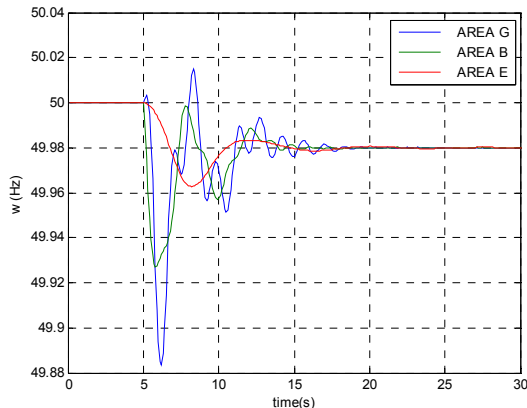
Σχήμα 7.92: Μηχανική ισχύς WJABLA (Υδροηλεκτρικό)



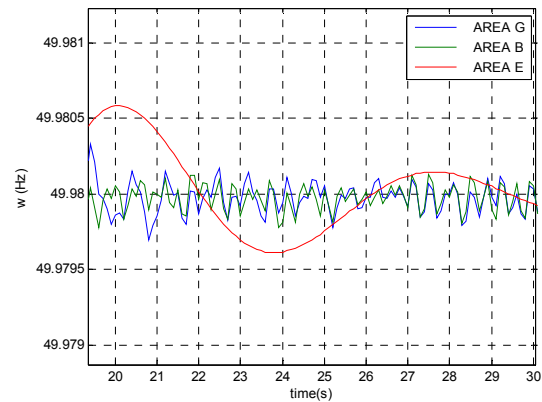
Σχήμα 7.93: Μέτρο τάσεων

## 7.8. Απώλεια σημείου ισορροπίας λόγω νεκρής ζώνης

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η απόκριση του συστήματος της ΝΑ Ευρώπης με το ελαττωμένο πρόγραμμα προσομοίωσης (ROM/E-Sim) μετά την τοποθέτηση σταθεροποιητή για αύξηση του φορτίου 600MW. Το σύστημα καταλήγει να ισορροπεί φαινομενικά στο όριο μεταξύ των δύο καταστάσεων που ορίζονται από τον ελεγκτή νεκρής ζώνης. Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 7.94-7.95 η συχνότητα αποχτά σχεδόν σταθερή τιμή η οποία είναι και το όριο της νεκρής ζώνης.



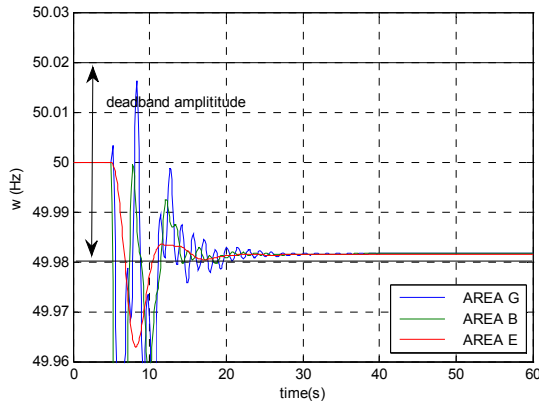
Σχήμα 7.94: Απόκριση συχνότητας σε διαταραχή αύξησης 600MW φορτίου (ROM-E/Sim) με τους σταθεροποιητές στις γεννήτριες του ελληνικού συστήματος



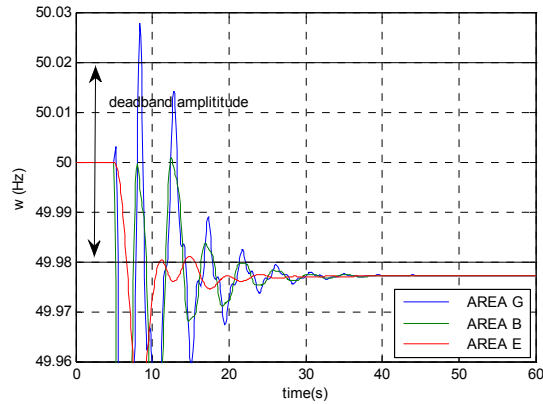
Σχήμα 7.95: Απόκριση συχνότητας σε διαταραχή αύξησης 600MW φορτίου (ROM-E/Sim) με τους σταθεροποιητές στις γεννήτριες του ελληνικού συστήματος (λεπτομέρεια)

Αυτό που συμβαίνει είναι ότι υπάρχουν δύο εν δυνάμει σημεία ισορροπίας τα οποία αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικά μόνιμα σφάλματα συχνότητας για την δεδομένη διαταραχή. Στην περίπτωση όπου λειτουργούν όλοι οι ρυθμιστές στροφών (εκτός νεκρής ζώνης) το μόνιμο σφάλμα της συχνότητας είναι μικρότερο από την περίπτωση όπου δεν λειτουργούν οι ρυθμιστές στροφών των θερμικών μονάδων (εντός νεκρής ζώνης), διότι στην ρύθμιση συμμετέχουν περισσότερες μονάδες. Στην περίπτωση της διαταραχής της Παραγράφου 7.6.7 και τα δύο αυτά μόνιμα σφάλματα συχνότητας είναι μικρότερα των 20mHz και συνεπώς και στις δύο καταστάσεις, το σύστημα τείνει να καταλήξει στην περιοχή του συστήματος όπου είναι ενεργός ο ελεγκτής νεκρής ζώνης των θερμικών σταθμών. Ωστόσο η διαταραχή της παραγράφου αυτής δεν εντάσσεται σε αυτή την περίπτωση.

Στα παρακάτω σχήματα πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις της διαταραχής προκειμένου να εκτιμηθούν τα μόνιμα σφάλματα συχνότητας στα εν δυνάμει σημεία ισορροπίας. Η πρώτη θεωρεί ενεργούς όλους ρυθμιστές στροφών και δίνει μόνιμο σφάλμα συχνότητας 18.4mHz, ενώ η δεύτερη τους θεωρεί ανενεργούς και καταλήγει σε μόνιμο σφάλμα συχνότητας 23mHz. Ο ισοδύναμος στατισμός των γεννητριών του συστήματος δεν είναι ίδιος και για τον λόγο αυτό προκύπτουν τα διαφορετικά μόνιμα σφάλματα στα Σχήματα 7.96-7.97.



Σχήμα 7.96: Απόκριση συχνότητας με ενεργούς τους ρυθμιστές των θερμικών μονάδων



Σχήμα 7.97: Απόκριση συχνότητας με ανενεργούς τους ρυθμιστές των θερμικών μονάδων

Όπως έχει γίνει σαφές στις προηγούμενες παραγράφους η κατάσταση του συστήματος εξαρτάται από το αν ο ελεγκτής ζώνης των ρυθμιστών στροφών των θερμικών μονάδων είναι ενεργός ή όχι. Στο Σχήμα 7.96 όπου όλοι οι ρυθμιστές στροφών είναι ενεργοί τείνει να ισορροπήσει σε σφάλμα συχνότητας 18.4mHz, δηλαδή σε μια μη αποδεκτή λύση διότι όταν το σφάλμα της συχνότητας μειωθεί κάτω των 20mHz οι ρυθμιστές στροφών των θερμικών μονάδων καθίστανται ανενεργοί. Με άλλα λόγια το σημείο ισορροπίας βρίσκεται εκτός των πιθανών καταστάσεων του συστήματος, και άρα η κατάσταση του συστήματος τείνει να εισέλθει στην νεκρή ζώνη. Αντίστοιχα, όταν οι ρυθμιστές στροφών των θερμικών μονάδων είναι ανενεργοί, το σφάλμα συχνότητας τείνει να γίνει 23mHz, σφάλμα το οποίο υπερβαίνει τα 20mHz και δεν ανήκει σε αυτές τις συνθήκες λειτουργίας. Και σε αυτή την περίπτωση η δυναμική του συστήματος τείνει να απομακρυνθεί από το πιθανό σημείο ισορροπίας.

Αποτέλεσμα είναι, να χαθεί το σημείο ισορροπίας αφού κανένα από τα εν δυνάμει σημεία ισορροπίας δεν είναι εφικτό. Έτσι το σύστημα να «ισορροπεί» στο όριο μεταξύ των δύο καταστάσεων, μέσα από διαρκείς μεταγωγές (grazing bifurcation) [HIS04]. Για την μελέτη του φαινομένου αυτού απαιτείται περαιτέρω έρευνα, τόσο σχετικά με την μοντελοποίηση όσο και σχετικά με τις συνθήκες εμφάνισής του.

Για την περιγραφή του διακριτού συστήματος θεωρούμε  $\Theta$  το σύνολο των δεικτών των θερμικών μονάδων για τις οποίες το πλάτος της νεκρής ζώνης είναι κοινό και ίσο με  $\pm d$ . Επίσης θεωρείται  $\Upsilon$  το σύνολο όλων των άλλων ρυθμιζουσών μονάδων (χωρίς νεκρή ζώνη). Αν  $A$  είναι το σύνολο των μονάδων, ισχύει:

$$A = \Theta \cup \Upsilon \quad (7.4)$$

Αν  $C$  η ρυθμιζουσα ενέργεια ισχύει γενικά για το μόνιμο σφάλμα συχνότητας:

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{C} \quad (7.5)$$

Όμως στο συγκεκριμένο σύστημα, λόγω της νεκρής ζώνης για το  $C$  ισχύει:

$$C = C_Y, |\Delta f| \leq d \quad (7.6)$$

$$C = C_A, |\Delta f| > d \quad (7.7)$$

όπου  $C_Y, C_A$  ορίζονται ως εξής:

$$C_Y = \sum_{\forall i \in Y} \frac{P_{N,i}}{f_N R_i} \quad (7.8)$$

$$C_A = \sum_{\forall i \in A} \frac{P_{N,i}}{f_N R_i} \quad (7.9)$$

Είναι προφανές ότι:

$$C_A \geq C_Y \quad (7.10)$$

Οπότε ισχύει:

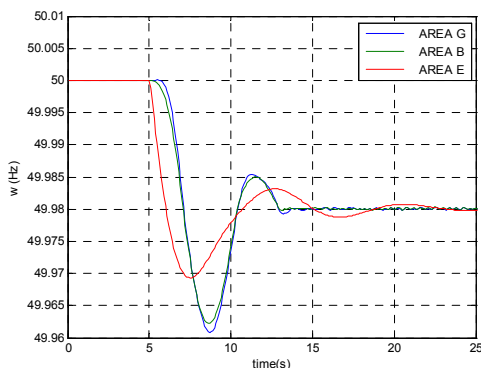
$$\frac{\Delta P}{C_A} \leq \frac{\Delta P}{C_Y} \quad (7.11)$$

Ωστόσο στην περίπτωση που ισχύει:

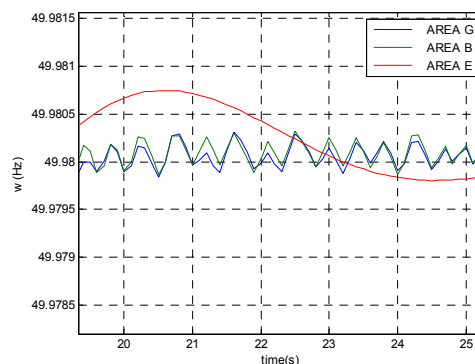
$$\left| \frac{\Delta P}{C_A} \right| \leq d \text{ και } \left| \frac{\Delta P}{C_Y} \right| > d \quad (7.12)$$

Τότε δεν ισχύει η (7.5) και συνεπώς δεν υπάρχει σημείο ισορροπίας.

Είναι χαρακτηριστικό ότι ακόμα και στην περίπτωση όπου αφαιρεθούν οι σταθεροποιητές που σχεδιάστηκαν, και το σύστημα επανέλθει στην κατάσταση που περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους (όπου όταν η συχνότητα βρίσκεται εντός του εύρους του ρυθμιστή νεκρής ζώνης το σύστημα είναι ασταθές, ενώ όταν βρίσκεται εκτός είναι ευσταθές), η απόκριση είναι αρκετά παρόμοια. Η συχνότητα και πάλι, σε αντίθεση με άλλες διαταραχές τείνει να «ισορροπήσει» στο όριο στο οποίο γίνεται η μεταγωγή από την μια κατάσταση στην άλλη όπως φαίνεται και στα Σχήματα 7.98-7.99.



Σχήμα 7.98: Απόκριση συχνότητας σε διαταραχή αύξησης 600MW φορτίου χωρίς τους σταθεροποιητές

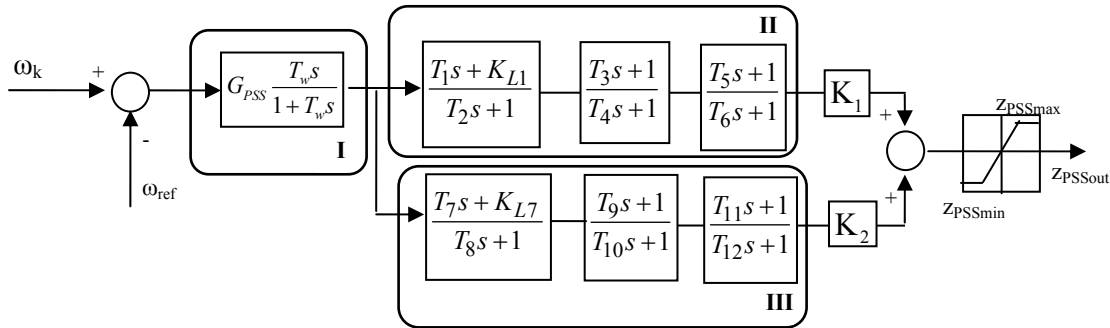


Σχήμα 7.99: Απόκριση συχνότητας σε διαταραχή αύξησης 600MW φορτίου χωρίς τους σταθεροποιητές (λεπτομέρεια)

Με άλλα λόγια, στην περίπτωση αυτή, το κέντρο της ταλάντωσης της συχνότητας (ανεξάρτητα αν η ταλάντωση είναι αυξανόμενου ή μειούμενου πλάτους), όταν αυτή βρίσκεται εντός της νεκρής ζώνης τείνει να εξέλθει από αυτήν, ενώ αντίθετα, όταν βρίσκεται εκτός της νεκρής ζώνης τείνει να εισέλθει σε αυτήν. Αποτέλεσμα είναι το σύστημα να «ισορροπεί» πάνω στο όριο των δύο αυτών ζωνών εναλλάσσοντας διαρκώς τις καταστάσεις αλλά κρατώντας επί της ουσίας ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας το οποίο ισούται με το όριο της νεκρής ζώνης ανεξάρτητα αν τα δύο υποσυστήματα είναι ευσταθή ή όχι.

## 7.9. Σχεδίαση σταθεροποιητών με βελτιστοποίηση

Στην ενότητα αυτή γίνεται σχεδίαση σταθεροποιητή ισχύος για τις γεννήτριες του ελληνικού συστήματος για τον διασυνδεδετικό ρυθμό του συστήματος της ΝΑ Ευρώπης με την τεχνική που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.5.4. Ο σταθεροποιητής είναι τύπου PSS2, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 7.100. Στην τεχνική αυτή λαμβάνεται υπόψιν και η αντιστάθμιση φάσης που εισάγει ο τοπικός σταθεροποιητής, ενώ λαμβάνεται επίσης υπόψιν η αντιστάθμιση φάσης που απαιτεί ο ρυθμός Ελλάδα-Βαλκάνια. Η σχεδίαση θα γίνει για τις πέντε γεννήτριες που έγινε στην ενότητα 7.7 και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα.



Σχήμα 7.100: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου σταθεροποιητή PSS2.

Όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 3.5.4 η αντικειμενική συνάρτηση με τα βάρη  $k$  ορίζεται ως εξής:

$$L = \sum_{\forall i} (k_i f_i(\omega_\lambda))^2 \quad (7.13)$$

όπου  $f$  η κανονικοποιημένη απόσταση από τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί.

Οι τιμές για το τμήμα III που αντιστοιχεί στον τοπικό σταθεροποιητή δίνονται στον Πίνακα 7.31 [ANV11]. Η χρονική σταθερά του βαθυπερατού φίλτρου έχει τιμή 3s. Τέλος στο τμήμα II που αντιστοιχεί στον διασυνδεδετικό σταθεροποιητή θεωρείται βαθυπερατό φίλτρο όπως στην σχεδίαση της ενότητας 7.7. Η χρονική σταθερά του είναι 0.25s. Στον Πίνακα 7.40 συνοψίζονται οι δεδομένες τιμές του σταθεροποιητή του Σχήματος 7.100. Οι παράμετροι που καθορίζονται από την διαδικασία της σχεδίασης είναι οι  $K_{L1}, T_1-T_4, K_1$ .

Πίνακας 7.40: Δεδομένες παράμετροι σταθεροποιητή ισχύος

	$T_w$ (s)	$T_5$ (s)	$T_6$ (s)	$K_{L7}$	$T_7$ (s)	$T_8$ (s)	$T_9$ (s)	$T_{10}$ (s)	$T_{11}$ (s)	$T_{12}$ (s)
Τιμή	3	0	0.25	1	0.16	0.02	0.23	0.02	0.15	1.42

Η σχεδίαση γίνεται με βήματα όπως στην ενότητα 7.7. Οι κρίσιμες ιδιοτιμές και τα αρχικά ολοκληρωτικά υπόλοιπα δίνονται στον Πίνακα 7.41

Πίνακας 7.41: Κρίσιμες ιδιοτιμές και ολοκληρωτικά υπόλοιπα γεννητριών στο ελληνικό σύστημα

Κρίσιμη ιδιοτιμή (ρυθμός G+B-E)					
Ρυθμός	Ιδιοτιμή	Συχνότητα (Hz)		Ρυθμός απόσβεσης (%)	
G+B-E	2.112E-02±1.170j	0.186		-1.86	
G-B	-0.1352±4.183j	0.666		3.23	
Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο (ρυθμός G+B-E)			
		Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Φάση
22577	GAGDIMG5	-0.00155	0.00001	0.00155	179.6
29577	GFLWRIG1	-0.00142	0.00022	0.00144	171.3
21277	GAMYNTG2	-0.00091	0.00045	0.00101	153.7
23477	GKARD_G4	-0.00085	0.00051	0.00099	148.9
23377	GKARD_G3	-0.00079	0.00049	0.00093	148.2
Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο (ρυθμός G-B)			
		Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Φάση
22577	GAGDIMG5	-0.00179	0.001589	0.002397	138.5

### Βήμα 1: Σταθεροποιητής ισχύος στην μονάδα Άγιος Δημήτριος 5

Οι προδιαγραφές που τέθηκαν στην αντικειμενική συνάρτηση για την σχεδίαση του σταθεροποιητή της γεννήτριας Άγιος Δημήτριος 5 φαίνονται στον Πίνακα 7.41. Οι δύο πρώτες προδιαγραφές σχετίζονται με την απαιτούμενη αντιστάθμιση φάσης στους ρυθμούς G+B-E, G-B, ενώ οι δύο τελευταίες με την απαίτηση για ένα ικανοποιητικό κέρδος του σταθεροποιητή στις συχνότητες των ρυθμών αυτών. Οι προδιαγραφές 3,4 σχετίζονται με το κέρδος του διασυνδεδετικού κλάδου. Με την προδιαγραφή 3 απαιτείται μοναδιαίο κέρδος στην συχνότητα του διασυνδεδετικού ρυθμού από τον διασυνδεδετικό σταθεροποιητή, ενώ με την προδιαγραφή 4 απαιτείται μικρό κέρδος του διασυνδεδετικού σταθεροποιητή στην περιοχή συχνοτήτων των τοπικών ρυθμών προκειμένου να μην αλλοιώνεται η αντιστάθμιση φάσης που εισάγει ο τοπικός σταθεροποιητής από τον διασυνδεδετικό.

Πίνακας 7.41: Προδιαγραφές σταθεροποιητή Αγ. Δημήτριος 5

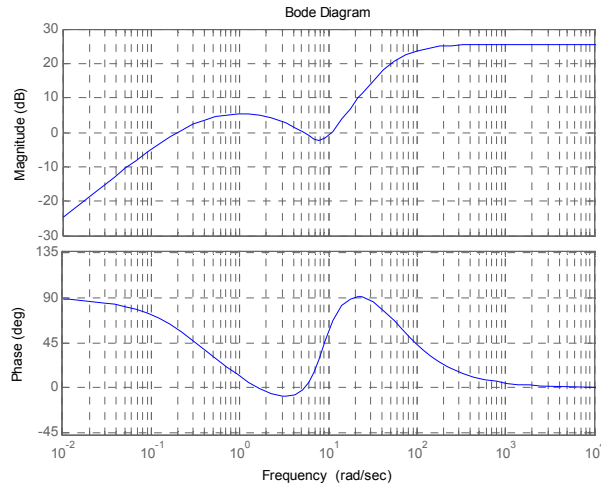
A/A	Βάρος	Τμήμα	Προδιαγραφή		Συχνότητα (r/s)
			Τύπος	Τιμή	
1	3	Σύνολο	Φάση	0.5	1.17
2	2	Σύνολο	Φάση	41.5	4.183
3	1.5	Διασυνδεδετικός	Κέρδος	1	1.17
4	1	Διασυνδεδετικός	Κέρδος	0.1	9.0
5	1	Σύνολο	Κέρδος	1	10.0
6	1	Σύνολο	Κέρδος	1	4.183

Οι παράμετροι του σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή φαίνονται στον Πίνακα 7.42, και το διάγραμμα Bode στο Σχήμα 7.101.



Πίνακας 7.42: Παράμετροι διασυνδεδετικού σταθεροποιητή Αγ. Δημήτριος 5

Παράμετρος	$K_{L1}$	$K_1$	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$T_3$ (s)	$T_4$ (s)	G
Τιμή	0.0002	0.1689	9.4873	1.0463	0.7129	1.0442	12



Σχήμα 7.101: Bode διάγραμμα σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή ισχύος Αγ. Δημήτριος 5

Οι κρίσιμες ιδιοτιμές και τα αρχικά ολοκληρωτικά υπόλοιπα μετά την τοποθέτηση του σταθεροποιητή στην μονάδα Άγιος Δημήτριος 5 δίνονται στον Πίνακα 7.43

Πίνακας 7.43: Κρίσιμη ιδιοτιμή και ολοκληρωτικά υπόλοιπα μετά το Βήμα 1.

Κρίσιμη ιδιοτιμή (ρυθμός G+B-E)					
Ρυθμός	Ιδιοτιμή	Συχνότητα (Hz)		Ρυθμός απόσβεσης (%)	
G+B-E	-1.42E-0.2±1.162j	0.185		1.23%	
G-B	-0.159±4.207j	0.669		3.79%	
Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο (ρυθμός G+B-E)			
		Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Φάση
29577	GFLWRIG1	-0.00144	0.000111	0.001441	175.6
21277	GAMYNTG2	-0.00094	0.000392	0.001018	157.4
23477	GKARD_G4	-0.00089	0.000465	0.001003	152.4
23377	GKARD_G3	-0.00083	0.000445	0.000937	151.7
Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο (ρυθμός G-B)			
		Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Φάση
29577	GFLWRIG1	-0.00128	0.001391	0.001893	132.7

## Βήμα 2: Σταθεροποιητής ισχύος στην μονάδα Φλώρινα 1

Οι προδιαγραφές ορίζονται με παρόμοιο τρόπο όπως στο Βήμα 1 και φαίνονται στον Πίνακα 7.44.

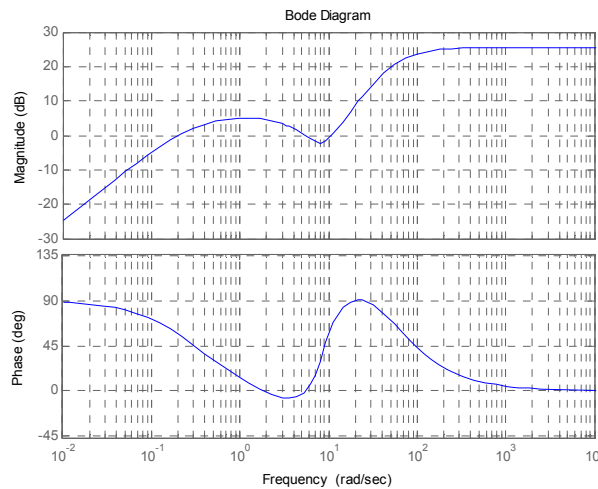
Πίνακας 7.44: Προδιαγραφές σταθεροποιητή Φλώρινα 1

A/A	Βάρος	Τμήμα	Προδιαγραφή		Συχνότητα (r/s)
			Τύπος	Τιμή	
1	3	Σύνολο	Φάση	4.4	1.16
2	2	Σύνολο	Φάση	47.3	4.2
3	1.5	Διασυνδεδετικός	Κέρδος	1	1.17
4	1	Διασυνδεδετικός	Κέρδος	0.1	9.0
5	1	Σύνολο	Κέρδος	1	10.0
6	1	Σύνολο	Κέρδος	1	4.183

Με βάση τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα του Πίνακα 7.43 και τις προδιαγραφές του Πίνακα 7.44 σχεδιάζεται ο σταθεροποιητής ισχύος για την γεννήτρια Φλώρινα 1. Οι παράμετροι φαίνονται στον Πίνακα 7.45. Το διάγραμμα Bode του σταθεροποιητή για την Φλώρινα 1 φαίνεται στο Σχήμα 7.102.

Πίνακας 7.45: Παράμετροι διασυνδεδετικού σταθεροποιητή Φλώρινα 1

Παράμετρος	$K_{L1}$	$K_1$	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$T_3$ (s)	$T_4$ (s)	G
Τιμή	0.0011	0.1427	10.0012	0.9369	0.6616	0.9276	12



Σχήμα 7.102: Bode διάγραμμα σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή ισχύος Φλώρινα 1

Οι κρίσιμες ιδιοτιμές και τα αρχικά ολοκληρωτικά υπόλοιπα μετά την τοποθέτηση του σταθεροποιητή στην μονάδα Φλώρινα 1 δίνονται στον Πίνακα 7.46

Πίνακας 7.46: Κρίσιμη ιδιοτιμή και ολοκληρωτικά υπόλοιπα μετά το Βήμα 2.

Κρίσιμη ιδιοτιμή (ρυθμός G+B-E)					
Ρυθμός	Ιδιοτιμή	Συχνότητα (Hz)		Ρυθμός απόσβεσης (%)	
G+B-E	-4.51E-02±1.158j	0.184		3.89	
G-B	-0.175±4.229j	0.673		4.13	
Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο (ρυθμός G+B-E)			
		Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Φάση
21277	GAMYNTG2	-0.00098	3.31E-04	0.001034	161.3
23477	GKARD_G4	-0.00093	0.000412	0.00102	156.2
23377	GKARD_G3	-0.00087	0.000396	0.000953	155.4
Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο (ρυθμός G-B)			
		Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Φάση
21277	GAMYNTG2	-0.00052	0.000852	0.000998	121.4

### Βήμα 3: Σταθεροποιητής ισχύος στην μονάδα Αμόνταιο 2

Οι προδιαγραφές ορίζονται με παρόμοιο τρόπο όπως στο Βήμα 1 και φαίνονται στον Πίνακα 7.47.

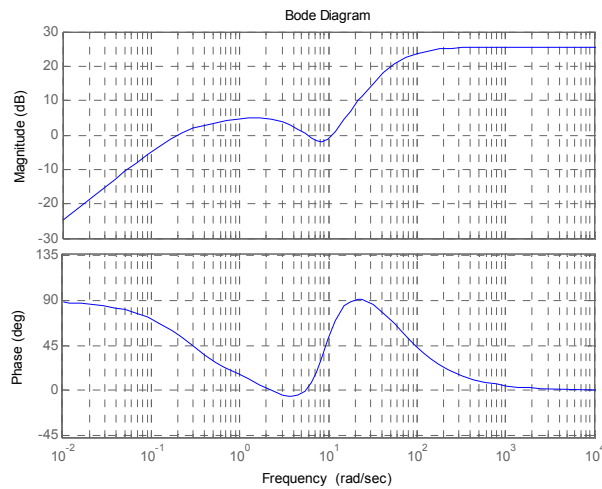
Πίνακας 7.47: Προδιαγραφές σταθεροποιητή Αμόνταιο 2

A/A	Βάρος	Τμήμα	Προδιαγραφή		Συχνότητα (r/s)
			Τύπος	Τιμή	
1	3	Σύνολο	Φάση	19.7	1.16
2	2	Σύνολο	Φάση	59.6	4.23
3	1.5	Διασυνδεδετικός	Κέρδος	1	1.17
4	1	Διασυνδεδετικός	Κέρδος	0.1	9.0
5	1	Σύνολο	Κέρδος	1	10.0
6	1	Σύνολο	Κέρδος	1	4.183

Με βάση τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα του Πίνακα 7.46 και τις προδιαγραφές του Πίνακα 7.47 σχεδιάζεται ο σταθεροποιητής ισχύος για την γεννήτρια Αμόνταιο 2. Οι παράμετροι φαίνονται στον Πίνακα 7.48. Το διάγραμμα Bode του σταθεροποιητή για την Αμόνταιο 2 φαίνεται στο Σχήμα 7.103.

Πίνακας 7.48: Παράμετροι διασυνδεδετικού σταθεροποιητή Αμόνταιο 2

Παράμετρος	$K_{L1}$	$K_1$	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$T_3$ (s)	$T_4$ (s)	G
Τιμή	0.0402	0.111	10.4756	0.7271	0.5456	0.727	12



Σχήμα 7.103: Bode διάγραμμα σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή ισχύος Αμύνταιο 2

Οι κρίσιμες ιδιοτιμές και τα αρχικά ολοκληρωτικά υπόλοιπα μετά την τοποθέτηση του σταθεροποιητή στην μονάδα Αμύνταιο 2 δίνονται στον Πίνακα 7.49

Πίνακας 7.49: Κρίσιμη ιδιοτιμή και ολοκληρωτικά υπόλοιπα μετά το Βήμα 3.

Κρίσιμη ιδιοτιμή (ρυθμός G+B-E)					
Ρυθμός	Ιδιοτιμή	Συχνότητα (Hz)		Ρυθμός απόσβεσης (%)	
G+B-E	-6.67E-02±1.159j	0.184		5.74	
G-B	-0.1812±4.243j	0.676		4.27	
Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο (ρυθμός G+B-E)			
		Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Φάση
23477	GKARD_G4	-0.00097	0.000383	0.001047	158.6
23377	GKARD_G3	-0.0009	0.000369	0.000977	157.8
Αρ. Ζυγού	Γεννήτρια	Ολοκληρωτικό υπόλοιπο (ρυθμός G-B)			
		Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Φάση
21277	GKARD_G4	-0.00048	0.000835	0.000962	119.7

#### Βήμα 4: Σταθεροποιητής ισχύος στις μονάδες Καρδιά 3,4

Οι προδιαγραφές ορίζονται με παρόμοιο τρόπο όπως στο Βήμα 1 και φαίνονται στον Πίνακα 7.50.

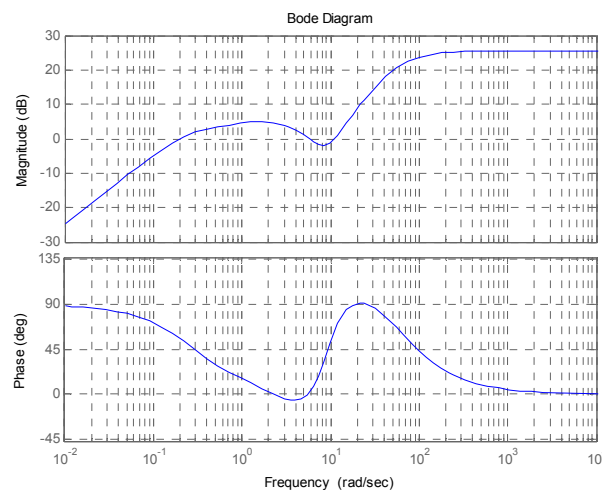
Πίνακας 7.50: Προδιαγραφές σταθεροποιητή Καρδιά 4

A/A	Βάρος	Τμήμα	Προδιαγραφή		Συχνότητα (r/s)
			Τύπος	Τιμή	
1	3	Σύνολο	Φάση	21.4	1.159
2	2	Σύνολο	Φάση	60.3	4.240
3	1.5	Διασυνδεδετικός	Κέρδος	1	1.17
4	1	Διασυνδεδετικός	Κέρδος	0.1	9.0
5	1	Σύνολο	Κέρδος	1	10.0
6	1	Σύνολο	Κέρδος	1	4.183

Με βάση τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα του Πίνακα 7.49 και τις προδιαγραφές του Πίνακα 7.50 σχεδιάζεται ο σταθεροποιητής ισχύος για την γεννήτρια Καρδιά 4. Οι παράμετροι φαίνονται στον Πίνακα 7.51. Το διάγραμμα Bode του σταθεροποιητή για την Καρδιά 4 φαίνεται στο Σχήμα 7.104.

Πίνακας 7.51: Παράμετροι διασυνδεδετικού σταθεροποιητή Καρδιά 4

Παράμετρος	$K_{L1}$	$K_1$	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$T_3$ (s)	$T_4$ (s)	G
Τιμή	0.0014	0.2802	5.8352	0.963	0.5251	0.9645	12



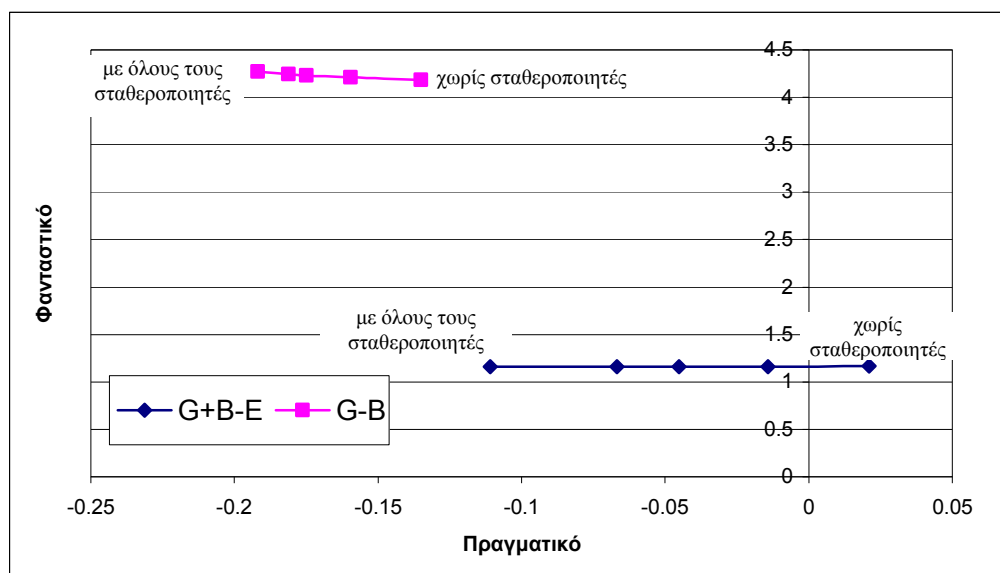
Σχήμα 7.104: Bode διάγραμμα σχεδιαζόμενου σταθεροποιητή ισχύος Καρδιά 4

Οι κρίσιμες ιδιοτιμές μετά την τοποθέτηση του σταθεροποιητή στις μονάδες Καρδιά 3,4 δίνονται στον Πίνακα 7.52

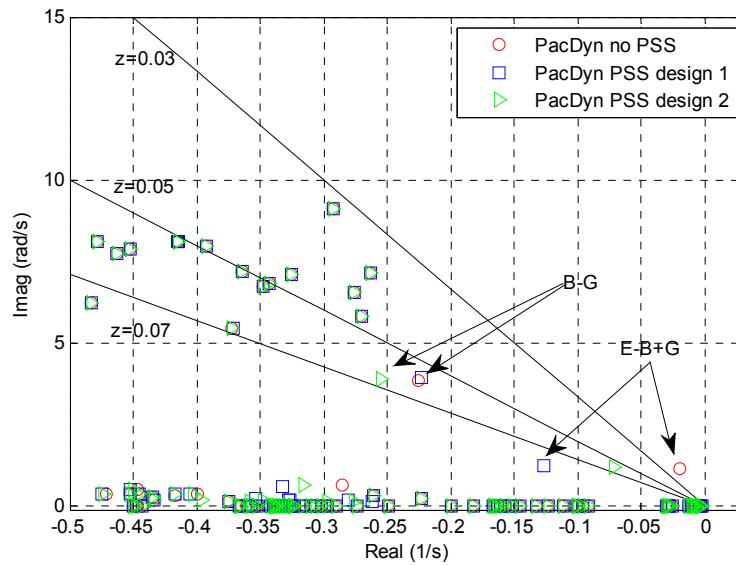
Πίνακας 7.52: Κρίσιμη ιδιοτιμή και ολοκληρωτικά υπόλοιπα μετά το Βήμα 4.

Κρίσιμη ιδιοτιμή (ρυθμός G+B-E)			
Ρυθμός	Ιδιοτιμή	Συχνότητα (Hz)	Ρυθμός απόσβεσης (%)
G+B-E	-0.1109±1.163j	0.185	9.5
G-B	-0.1919±4.270j	0.680	4.5

Στο Σχήμα 7.105 φαίνεται το διάγραμμα των ιδιοτιμών όπως υπολογίζεται από το ROM-E/Sim μετά την τοποθέτηση κάθε σταθεροποιητή. Οι δύο διασυνδεδεμένες ιδιοτιμές μετατοπίζονται προς τα αριστερά χωρίς να μεταβάλλεται σημαντικά η συχνότητά τους. Στο Σχήμα 7.106 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο τεχνικών σχεδίασης (σχεδίαση 1-ενότητα 7.7, σχεδίαση 2 ενότητα 7.9) με το λεπτομερές μοντέλο PacDyn. Παρατηρείται ότι η δεύτερη τεχνική σχεδίασης, παρότι επιτυγχάνει την σταθεροποίηση του ρυθμού, δεν επιτυγχάνει την απόσβεση της πρώτης τεχνικής. Ωστόσο οι σταθεροποιητές που σχεδιάστηκαν με την δεύτερη τεχνική αυξάνουν και την απόσβεση του ρυθμού Ελλάδα-Βαλκάνια, σε αντίθεση με την πρώτη τεχνική που επηρεάζει ελάχιστα την αντίστοιχη ιδιοτιμή. Φαίνεται δηλαδή ότι η εισαγωγή προδιαγραφής στην διαδικασία της σχεδίασης σχετικά με την αντιστάθμιση του ρυθμού Ελλάδα-Βαλκάνια περιορίζει την απόσβεση που επιτυγχάνεται στον ευρωπαϊκό ρυθμό. Σε ένα βαθμό, η μειωμένη απόσβεση του ρυθμού αυτού σχετίζεται και με τα ελαφρώς μειωμένα εσωτερικά κέρδη που προκύπτουν από την δεύτερη σχεδίαση. Στον βαθμό που η συχνότητα των διασυνδεδετικών ρυθμών δεν επηρεάζεται, το κέρδος των σταθεροποιητών που προέκυψαν με την δεύτερη μέθοδο σχεδίασης, είναι δυνατόν να αυξηθεί περαιτέρω προκειμένου να αντισταθμιστεί αυτή η μείωση.



Σχήμα 7.105: Διασυνδεδεμένες ιδιοτιμές πριν και μετά την τοποθέτηση των σταθεροποιητών (ROM-E/Sim)



Σχήμα 7.106: Ιδιοτιμές γραμμικοποιημένου συστήματος με λεπτομερές μοντέλο PacDyn πριν και μετά την τοποθέτηση των σταθεροποιητών (σχεδίαση 1-ενότητα 7.7, σχεδίαση 2-ενότητα 7.9)

Η δεύτερη διαδικασία παρότι επιτυγχάνει μικρότερη απόσβεση φαίνεται να πλεονεκτεί καθώς μπορεί να σχεδιάσει σταθεροποιητές που επιδρούν και στους δύο διασυνδεδετικούς ρυθμούς χωρίς να αποσταθεροποιούν τους τοπικούς ρυθμούς. Σε αντίθεση με την μέθοδο της ενότητας 7.7 όπου οι δύο κλάδοι επιδρούν διακριτά σε δύο ρυθμούς, στην σχεδίαση με βελτιστοποίηση είναι δυνατή η σταθεροποίηση περισσότερων ρυθμών μέσω του ορισμού προδιαγραφών.

# 8. Συμβολή – Συμπεράσματα – Προοπτικές της διατριβής

## 8.1. Συμβολή

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε το θέμα των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων και ειδικότερα η δυνατότητα περιγραφής τους με απλοποιημένα μοντέλα. Η συμβολή της εργασίας σε αυτό το επιστημονικό πεδίο συνοψίζεται σε οχτώ βασικούς άξονες.

1. Καταρχήν αναπτύχθηκε ένα νέο πρωτότυπο απλοποιημένο μοντέλο ΣΗΕ για την μελέτη διασυνδεδετικών ταλαντώσεων. Η ανάπτυξη του μοντέλου γίνεται με την επέκταση της οιονεί στατικής προσέγγισης για μελέτη ταλαντώσεων χαμηλής συχνότητας, το οποίο αποτελεί και την βασική συμβολή της διατριβής. Στα πλαίσια αυτά απαλείφονται οι τοπικές ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις με την χρήση της θεωρίας συνεκτικών περιοχών. Παρά την απλοποίηση και αντίθετα με άλλες μεθόδους, η δομή του συστήματος, οι σταθμοί παραγωγής και τα φορτία διατηρούνται ως ανεξάρτητα τμήματα, όπως και οι διατάξεις ελέγχου τους, επιτρέποντας την μελέτη περισσότερων φαινομένων σε σχέση με τεχνικές απλοποίησης που θεωρούν ισοδύναμα υποσυστήματα. Η προσέγγιση που αναπτύσσεται στην διατριβή γεφυρώνει το κενό μεταξύ ευστάθειας μικρών διαταραχών βραχυπρόθεσμης χρονικής κλίμακας και ανάλυσης ευστάθειας μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας (π.χ. ευστάθεια συχνότητας), παρέχει ένα πλαίσιο που επιτρέπει την εξειδικευμένη μελέτη των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων χωρίς να αλλοιώνει την δομή του συστήματος, καθώς και επιτρέπει την μελέτη φαινομένων που σχετίζονται με τις διατάξεις ελέγχου. Τέλος η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη για την σχεδίαση σταθεροποιητών ισχύος.
2. Επίσης στα πλαίσια της διατριβής αυτής διαμορφώθηκαν απλοποιημένα μοντέλα των διατάξεων των ΣΗΕ (ρυθμιστές στροφών, στρόβιλοι, αυτόματοι ρυθμιστές τάσης, γεννήτριες) τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων.
3. Με βάση την προτεινόμενη προσέγγιση αναπτύχθηκε λογισμικό πακέτο σε γλώσσα FORTRAN (ROM-E/Sim) για την προσομοίωση διαταραχών, καθώς και για τη γραμμικοποίηση του συστήματος και την ανάλυση μικρών διαταραχών. Στο λογισμικό αυτό ενσωματώθηκαν η τεχνική αραιών πινάκων, τεχνικές επιλεκτικού υπολογισμού ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων, καθώς και τεχνική ταυτόχρονης επίλυσης συστήματος διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι το λογισμικό πακέτο μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί χωρίς την παραδοχή συνεκτικών περιοχών, δηλαδή με ανεξάρτητες γεννήτριες και συνεπώς θα μπορούσε να αποτελέσει και την βάση για ένα εκπαιδευτικό εργαλείο.
4. Προτάθηκαν νέες τεχνικές σταθεροποίησης των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων τόσο σχετικά με την δομή των σταθεροποιητών ισχύος, όσο και σχετικά με τις τεχνικές σχεδίασης.
  - Πιο συγκεκριμένα, για την διασφάλιση της καλής λειτουργίας του σταθεροποιητή σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης του συστήματος, προτάθηκε μια τεχνική σχεδίασης



σταθεροποιητών χρησιμοποιώντας πολλαπλά σημεία λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό ξεπερνώνται τα πιθανά προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν όταν ο σταθεροποιητής λειτουργεί σε διαφορετικό σημείο λειτουργίας από αυτό για το οποίο σχεδιάστηκε.

- Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμένος σταθεροποιητής ο οποίος διασφαλίζει όχι μόνο την αύξηση της απόσβεσης του διασυνδεδετικού ρυθμού αλλά και την σταθεροποίηση των τοπικών ρυθμών. Στα πλαίσια αυτά προτάθηκαν δύο τεχνικές σχεδίασης. Η πρώτη ρυθμίζει τον προτεινόμενο σταθεροποιητή με βάση τα ολοκληρωτικά υπόλοιπα του προς σταθεροποίηση ρυθμού, αλλά και την ανάλυση γεννήτριας-άπειρου ζυγού για τον τοπικό ρυθμό. Η δεύτερη γίνεται με βάση προδιαγραφές που τίθενται από τον σχεδιαστή ως προς το κέρδος και την φάση σε συγκεκριμένες συχνότητες και επιτυγχάνει την σταθεροποίηση περισσότερων του ενός διασυνδεδετικούς ρυθμούς διατηρώντας την θετική συμβολή της προηγούμενης μεθόδου σχετικά με τους τοπικούς ρυθμούς.
5. Εξετάστηκε η συμβολή των τοπικών ταλαντώσεων και των διατάξεων ελέγχου στους διασυνδεδετικούς ρυθμούς. Ιδιαίτερη σημασία έχει η διερεύνηση της συμβολής των ρυθμιστών στροφών των ατμοηλεκτρικών μονάδων και πιο συγκεκριμένα της διάταξης ελέγχου νεκρής ζώνης.
  6. Συμβολή της εργασίας είναι και η ανάλυση του συστήματος της ΝΑ Ευρώπης. Στα πλαίσια αυτά έγινε εξήγηση και αναπαραγωγή του φαινομένου των παρατεταμένων ταλαντώσεων που εμφανίστηκαν την 1-5-2005.
  7. Επίσης προτάθηκαν δύο τεχνικές αντιμετώπισης των ταλαντώσεων αυτών. Η πρώτη συνίσταται στην μείωση του εύρους της νεκρής ζώνης συγκεκριμένων γεννητριών που προσδιορίζονται με βάση την ευαισθησία του αντίστοιχου ρυθμού. Η συγκεκριμένη τεχνική δεν σταθεροποιεί τις ταλαντώσεις, ωστόσο μειώνει σημαντικά το πλάτος τους, σε σημείο που αυτό να είναι ίσο ή και μικρότερο από το πλάτος των ταλαντώσεων που προκαλούνται από τις συνεχείς μεταβολές του φορτίου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η δεύτερη τεχνική αντιμετώπισης του φαινομένου περιλαμβάνει την σχεδίαση και εγκατάσταση σταθεροποιητών.
  8. Στα πλαίσια αυτά, τμήμα της συμβολής της διατριβής είναι η επιτυχής σταθεροποίηση του ασταθούς ρυθμού μέσω της σχεδίασης σταθεροποιητών για το ελληνικό σύστημα, τόσο με τις κλασικές μεθόδους όσο και με τεχνικές που εισήχθησαν στα πλαίσια αυτής της διατριβής.

## 8.2. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν μέσα από την παρούσα διατριβή σχετίζονται τόσο με την προτεινόμενη μοντελοποίηση όσο και με τα χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους που συμβάλουν στις διασυνδεδετικές ταλαντώσεις.

Καταρχήν ένα από τα βασικά συμπεράσματα είναι η δυνατότητα του ελαττωμένου μοντέλου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής να περιγράφει τις διασυνδεδετικές ταλαντώσεις. Βάση για την ανάπτυξη αυτού του μοντέλου ήταν η επέκταση της προσέγγισης της οιονεί στατικής μεταβολής, η οποία –όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 4.1- θεωρεί ενιαία την συχνότητα του συστήματος και είναι κατάλληλη για μελέτες ευστάθειας συχνότητας. Η επέκταση που

προτάθηκε στην διατριβή, όπου θεωρείται ενιαία η συχνότητα σε κάθε συνεκτική περιοχή του συστήματος, απλοποιεί σημαντικά την πολυπλοκότητα του μελετούμενου συστήματος. Η μέθοδος αυτή φαίνεται ότι εισάγει σφάλμα όσον αφορά την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ρυθμών χαμηλής συχνότητας, σφάλμα το οποίο θεωρείται αποδεκτό, ενώ παράλληλα προσεγγίζεται με ακρίβεια η συχνότητα των διασυνδεδεικτών ρυθμών. Η προσέγγιση με βάση την προτεινόμενη επέκταση θεωρείται ικανοποιητική.

Το προτεινόμενο απλοποιημένο μοντέλο εφαρμόστηκε σε δύο συστήματα. Στην πρώτη περίπτωση εφαρμόστηκε σε δοκιμαστικό σύστημα 11 ζυγών 4 γεννητριών στο οποίο μοντελοποιείται η διασύνδεση μεταξύ δύο συνεκτικών περιοχών (Κεφάλαιο 6). Από την μελέτη αυτή προέκυψαν μια σειρά συμπερασμάτων:

- Καταρχήν προκύπτει ότι η απαλοιφή των τοπικών ταλαντώσεων επηρεάζει ελαφρώς τον διασυνδεδεικτό ρυθμό παρότι οι τοπικές ταλαντώσεις ανήκουν σε άλλη περιοχή συχνοτήτων.
- Η απλοποίηση των μοντέλων των διατάξεων ΣΗΕ (συστήματα διέγερσης, ρυθμιστές στροφών στρόβιλοι) μπορεί να επηρεάσει την διαμόρφωση του διασυνδεδεικτού ρυθμού. Είναι δυνατόν μικρές χρονικές σταθερές να επηρεάζουν σημαντικά την διαμόρφωση των διασυνδεδεικτών ρυθμών και για τον λόγο αυτό οι διατάξεις αυτές δεν θα πρέπει να απλοποιούνται σημαντικά. Η όποια απλοποίηση πέραν δευτερευουσών χρονικών σταθερών θα πρέπει να προκύπτει λαμβάνοντας υπόψιν και την αλληλεπίδρασή τους με άλλες διατάξεις.
- Ιδιαίτερη αξία έχουν τα συμπεράσματα που σχετίζονται με την επίδραση διαφόρων μοντέλων γεννητριών στην διαμόρφωση των διασυνδεδεικτών ρυθμών. Ένα βασικό συμπέρασμα είναι ότι για την μελέτη των διασυνδεδεικτών ταλαντώσεων απαιτείται να συμπεριληφθεί στην μοντελοποίηση το τύλιγμα διέγερσης των σύγχρονων γεννητριών διότι συμβάλει σημαντικά στην διαμόρφωση των μελετούμενων ρυθμών.
- Ένα ακόμα συμπέρασμα σχετίζεται με την επίδραση των τυλιγμάτων απόσβεσης. Η μοντελοποίηση τυλιγμάτων απόσβεσης στις γεννήτριες μπορεί να μετατοπίζει τις ιδιοτιμές των τοπικών ηλεκτρομηχανικών ρυθμών του μιγαδικού επιπέδου προς τα αριστερά (αύξηση απόσβεσης), ωστόσο η επίδρασή στους διασυνδεδεικτούς ρυθμούς δεν είναι πάντα δεδομένη. Στην παρούσα εργασία φαίνεται ότι η μοντελοποίηση των τυλιγμάτων αυτών είναι δυνατόν να προσθέσει αρνητική απόσβεση στον διασυνδεδεικτό ρυθμό. Είναι δυνατόν λοιπόν, το απλοποιημένο μοντέλο (στο οποίο αγνοούνται τα τυλίγματα απόσβεσης) να υπερεκτιμά την απόσβεση του διασυνδεδεικτού ρυθμού. Η εμφάνιση ή όχι αυτού του «παραδόξου» σχετίζεται με το σημείο λειτουργίας το οποίο μελετάται αναδεικνύοντας την μη γραμμική φύση της λειτουργίας των ΣΗΕ. Πιο συγκεκριμένα, το φαινόμενο αυτό φαίνεται να εξαρτάται από το κέρδος των APT καθώς και από την διασύνδεση μεταξύ των περιοχών.
- Τέλος, στην παράγραφο 6.6.5 αναδείχθηκε ότι η σχεδίαση σταθεροποιητή για ένα σημείο ισοροπίας, δεν εγγυάται την καλή λειτουργία του σταθεροποιητή. Σε διαφορετικά σημεία λειτουργίας, η διαφορά στην φάση του ολοκληρωτικού υπολοίπου που αντιστοιχεί στον προς σταθεροποίηση ρυθμό μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες μεταβολές στην συχνότητα του ρυθμού. Η τεχνική σχεδίασης σταθεροποιητών για πολλαπλά σημεία ισοροπίας που προτάθηκε, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς σταθμίζει περισσότερα του ενός σημεία λειτουργίας και εξασφαλίζει την επιθυμητή λειτουργία του σταθεροποιητή.

Το δεύτερο σύστημα στο οποίο εφαρμόστηκε το απλοποιημένο μοντέλο είναι το ηλεκτρικό σύστημα της Νότιο-Ανατολικής Ευρώπης (πρώην Ζώνη II της UCTE) με την εξωτερική της

διασύνδεση στο υπόλοιπο Ευρωπαϊκό σύστημα (Κεφάλαιο 7). Ιδιαίτερη σημασία έχει ότι το σύστημα αυτό είναι πραγματικό, μεγάλου μεγέθους και συνεπώς τα αποτελέσματα της απλοποίησης έχουν ιδιαίτερη αξία.

- Καταρχήν, όπως και στο δοκιμαστικό σύστημα πραγματοποιήθηκε σύγκριση της ανάλυσης μικρών διαταραχών και των δυναμικών αποκρίσεων του απλοποιημένου μοντέλου με λεπτομερή μοντέλα (εμπορικά πακέτα λογισμικού PSS/E, PacDyn). Μέσα από αυτή την διαδικασία επιβεβαιώθηκε ότι η απλοποιημένη προσέγγιση μπορεί ικανοποιητικά να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη διασυνδεδετικών ταλαντώσεων χαμηλής συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα προκύπτει καλή εκτίμηση της συχνότητας των ρυθμών και δυνατότητα για ανάλυση και σχεδίαση σταθεροποιητών.
- Από την ανάλυση ευαισθησίας προέκυψε το συμπέρασμα ότι η απόσβεση του διασυνδεδετικού ρυθμού εξαρτάται σημαντικά από τα επίπεδα εξαγωγών ηλεκτρικής ενέργειας. Η αύξηση της ροής στην διασύνδεση τείνει να μειώσει την απόσβεση του διασυνδεδετικού ρυθμού.
- Η αύξηση του φορτίου του εξωτερικού συστήματος διατηρώντας σταθερά τα επίπεδα των εξαγωγών δεν επηρεάζει σημαντικά τον διασυνδεδετικό ρυθμό.
- Η τροποποίηση του δικτύου μεταφοράς κοντά στην εξωτερική διασύνδεση επηρεάζει ελαφρώς την απόσβεση του διασυνδεδετικού ρυθμού, αλλά κυρίως επηρεάζει την συχνότητά του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αλλάζει η ισοδύναμη αντίδραση με την οποία διασυνδέεται το εξωτερικό σύστημα επηρεάζοντας την συχνότητα της ταλάντωσης.

Επιπλέον, στα πλαίσια της μελέτης του συστήματος της ΝΑ Ευρώπης διερευνήθηκε η συνεισφορά των ρυθμιστών στροφών και ειδικότερα των ελεγκτών νεκρής ζώνης των μονάδων στην διαμόρφωση των διασυνδεδετικών ρυθμών. Από την διερεύνηση αυτή προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι ρυθμιστές στροφών των υδροηλεκτρικών μονάδων τείνουν να μειώσουν την απόσβεση του διασυνδεδετικού ρυθμού, ενώ αντίθετα οι ρυθμιστές των ατμοηλεκτρικών μονάδων τείνουν να την αυξήσουν. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 7 (ενότητα 7.6) οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί για λόγους ίδιας προστασίας έχουν ελεγκτές νεκρής ζώνης με συνέπεια σε συνθήκες απουσίας σοβαρής διαταραχής οι ρυθμιστές στροφών τους να είναι πρακτικά ανενεργοί. Αποτέλεσμα είναι ο διασυνδεδετικός ρυθμός να παρουσιάζει μειωμένη απόσβεση και να είναι δυνατόν, ενώ το συνολικό σύστημα με την θεώρηση όλων των ρυθμιστών στροφών σε λειτουργία να είναι ευσταθές, στην πραγματική του λειτουργία να είναι ασταθές όταν η συχνότητα βρίσκεται εντός των ορίων της νεκρής ζώνης. Στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται παρατεταμένες ταλαντώσεις στα όρια της νεκρής ζώνης λόγω της μεταγωγής του συστήματος μεταξύ των δύο καταστάσεων. Είναι δυνατή με άλλα λόγια η εμφάνιση παρατεταμένων ταλαντώσεων της συχνότητας εντός των ορίων της νεκρής ζώνης.

Το συμπέρασμα αυτό χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη του συμβάντος της 1-5-05, όπου εμφανίστηκε μια τέτοια ταλάντωση. Η προσομοίωση αυτού του σημείου λειτουργίας με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα ανέδειξε δύο βασικά συμπεράσματα. Καταρχήν ότι το φαινόμενο των παρατεταμένων ταλαντώσεων που παρατηρήθηκε μπορεί να αποδοθεί στη λειτουργία της νεκρής ζώνης των ρυθμιστών στροφών των ατμοστροβιλικών μονάδων. Η προσέγγιση του στιγμιότυπου που έγινε με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα δείχνει ότι η νεκρή ζώνη αποσταθεροποιεί τον ευρωπαϊκό ρυθμό με αποτέλεσμα την εμφάνιση παρατεταμένων ταλαντώσεων. Δεύτερο συμπέρασμα είναι ότι το απλοποιημένο μοντέλο είναι κατάλληλο για την περιγραφή τέτοιων φαινομένων σε αντίθεση με απλοποιημένα μοντέλα που θεωρούν ισοδύναμες γεννήτριες.

Επίσης λόγω της διακριτής λειτουργίας της νεκρής ζώνης των ατμοηλεκτρικών σταθμών είναι δυνατόν, σε διαταραχές μόνιμης μεταβολής του φορτίου, το σύστημα αντί να εμφανίζει μόνιμες ταλαντώσεις όπως αυτές που εμφανίστηκαν την 1-5-2005, να χάνει τα σημεία ισορροπίας. Στην περίπτωση αυτή (ενότητα 7.8), ανεξάρτητα αν εντός της νεκρής ζώνης ο διασυνδεδετικός ρυθμός είναι ευσταθής, το σύστημα καταλήγει σε συνεχείς ταλαντώσεις μικρού πλάτους στο όριο της νεκρής ζώνης (grazing bifurcation). Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται λόγω της μεταγωγής από την ανενεργή κατάσταση των ρυθμιστών στροφών των ατμοηλεκτρικών μονάδων σε ενεργή, που προκύπτει όταν το μόνιμο σφάλμα συχνότητας είναι κοντά στο όριο της νεκρής ζώνης. Λόγω της διαφοράς του ισοδύναμου στατισμού τα μόνιμα σφάλματα συχνότητας διαφοροποιούνται, ανάλογα με το αν οι ρυθμιστές στροφών των ατμοστροβλικών μονάδων είναι ή όχι στην νεκρή ζώνη. Αποτέλεσμα είναι η απαλοιφή του «σημείου ισορροπίας» και η μόνιμη ταλάντωση πολύ μικρού πλάτους στο όριο της νεκρής ζώνης με διαρκείς μεταγωγές.

Φαίνεται δηλαδή ότι η προτεινόμενη ελαττωμένη προτεινόμενη προσέγγιση, επειδή διατηρεί αναλλοίωτη την δομή του δικτύου, αλλά και τα χαρακτηριστικά των διαφόρων διατάξεων ΣΗΕ σε αντίθεση με προσεγγίσεις που αντικαθιστούν περιοχές με ισοδύναμες γεννήτριες, δίνει την δυνατότητα μελέτης μιας σειράς φαινομένων που εμφανίζονται στα ΣΗΕ και συνεπώς συγκροτεί μια μεθοδολογία αρκετά αξιόπιστη παρότι απλοποιημένη.

Σχετικά με την σχεδίαση σταθεροποιητών στο σύστημα την ΝΑ Ευρώπης, όπως στο δοκιμαστικό σύστημα, φάνηκε ότι το απλοποιημένο μοντέλο είναι κατάλληλο για την σχεδίαση σταθεροποιητών ισχύος. Οι σταθεροποιητές ισχύος που σχεδιάστηκαν με το ελαττωμένο μοντέλο μετατοπίζουν τους διασυνδεδετικούς ρυθμούς προς την αριστερή πλευρά του μιγαδικού επιπέδου χωρίς να επηρεάζεται η συχνότητα του ρυθμού και χωρίς να αποσταθεροποιούνται οι υπόλοιποι ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί. Αυτό ισχύει ακόμα και στην περίπτωση υψίσυχνων διασυνδεδετικών ρυθμών, όπως αυτός μεταξύ των γεννητριών της Ελλάδας και της Αλβανίας (ακτινικά συνδεδεμένων), για τον οποίο ακριβώς λόγω της μεγάλης συχνότητας εμφανίζεται σφάλμα τόσο στην απόσβεση όσο και στην συχνότητα του ρυθμού όταν υπολογίζεται με το ελαττωμένο μοντέλο (ενότητα 7.4). Ακόμα και στην περίπτωση αυτή ο σταθεροποιητής που σχεδιάστηκε λειτουργεί ικανοποιητικά αυξάνοντας την απόσβεση του προς σταθεροποίηση ρυθμού. Στην περίπτωση της σχεδίασης σταθεροποιητών για ρυθμούς μικρότερης συχνότητας, τα αποτελέσματα είναι σαφώς βελτιωμένα.

Για την σχεδίαση σταθεροποιητή για τις διασυνδεδετικές ταλαντώσεις η χρησιμοποίηση σταθεροποιητή ενός κλάδου (STAB1) εμφανίζει μια σειρά προβλημάτων. Για την ελάττωση της επίδρασης του σταθεροποιητή, στους τοπικούς ρυθμούς μια λύση είναι η προσθήκη βαθυπερατού φίλτρου προκειμένου η επίδρασή του σταθεροποιητή να είναι μειωμένη σε υψηλότερες συχνότητες. Ωστόσο, η επίτευξη αυξημένης αντιστάθμισης φάσης στις συχνότητες των τοπικών ταλαντώσεων αφ' ενός ακυρώνεται από την φάση που αφαιρεί το βαθυπερατό φίλτρο, αφ' ετέρου η επιλογή αυξημένης κεντρικής συχνότητας της βαθμίδας προήγησης/υστέρησης φάσης έτσι ώστε να επιτευχθεί η φάση αυτή αλλοιώνει το κέρδος του σταθεροποιητή (ενότητα 7.7). Για τον λόγο αυτό προκρίνεται η χρήση συνδυασμένου σταθεροποιητή δύο κλάδων (PSS2/PSS2\*), στον οποίο ο ένας κλάδος λειτουργεί ως διασυνδεδετικός και ο δεύτερος ως τοπικός σταθεροποιητής. Στην περίπτωση αυτή τοποθετείται το βαθυπερατό φίλτρο στον διασυνδεδετικό κλάδο του σταθεροποιητή για την ελάττωση της επίδρασης του σε ρυθμούς υψηλότερων συχνοτήτων, ενώ η αυξημένη γωνία αντιστάθμισης που απαιτεί ο τοπικός ρυθμός προκύπτει από τον τοπικό σταθεροποιητή.

Τέλος, στο κομμάτι της σχεδίασης σταθεροποιητών προκύπτει ότι οι τεχνικές βελτιστοποίησης (ενότητα 7.9) δίνουν μεγαλύτερες δυνατότητες σε σχέση με πιο απλές τεχνικές (ενότητα 7.7). Στην ενότητα 7.7 χρησιμοποιήθηκε ένας σταθεροποιητής δύο κλάδων για την σταθεροποίηση δύο ρυθμών (ευρωπαϊκού και τοπικού) με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η σχεδίαση με συνάρτηση βελτιστοποίησης, ακριβώς επειδή βελτιστοποιεί μεταξύ πολλαπλών

προδιαγραφών δίνει την δυνατότητα σταθεροποίησης περισσότερων ρυθμών από τον αριθμό των κλάδων του σταθεροποιητή. Ωστόσο αυτό φαίνεται ότι προϋποθέτει μεγαλύτερα κέρδη για την επίτευξη ανάλογων επιπέδων απόσβεσης.

### 8.3. Προοπτικές

Οι προοπτικές της εργασίας διαιρούνται σε δύο βασικές ενότητες. Η πρώτη ενότητα αφορά το λογισμικό που αναπτύχθηκε και τις δυνατότητες περαιτέρω εξέλιξής του, καθώς και τη διεξαγωγή μελετών με αυτό για άλλα συστήματα. Προοπτική της εργασίας αυτής θα μπορούσε να είναι καταρχήν η διαμόρφωση του λογισμικού πακέτου σε μια μορφή φιλική προς τον χρήστη με την ανάπτυξη ενός παραθυρικού περιβάλλοντος. Στα πλαίσια αυτά απαραίτητη θα ήταν και η βελτιστοποίηση των αλγορίθμων και της διαχείρισης μνήμης που γίνεται προκειμένου να επιτευχθούν μεγαλύτερες ταχύτητες και ελαχιστοποίηση της χρησιμοποιούμενης υπολογιστικής ισχύος. Σε ένα δεύτερο επίπεδο θα μπορούσαν να ενταχθούν περισσότερα απλοποιημένα μοντέλα ρυθμιστών στροφών και αυτόματων ρυθμιστών τάσης στην βιβλιοθήκη του προγράμματος.

Επιπλέον ενδιαφέρον θα είχε η μελέτη μεγαλύτερων συστημάτων όπως για παράδειγμα αυτό της Ευρώπης όπου οι διασυνδεδειμένοι ρυθμοί είναι περισσότεροι και το πρόβλημα αλγεβρικών-διαφορικών εξισώσεων σαφώς μεγαλύτερο.

Η δεύτερη ενότητα προοπτικών αφορά τα φαινόμενα που εμφανίστηκαν και μελετήθηκαν μερικώς παρότι παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Ένα πρώτο φαινόμενο είναι η επίδραση των τυλίγμάτων απόσβεσης στον διασυνδεδεικτό ρυθμό. Όπως προαναφέρθηκε, διαπιστώθηκε ότι είναι δυνατόν τα τυλίγματα απόσβεσης να συμβάλουν αρνητικά στην απόσβεση του διασυνδεδεικτού ρυθμού, ωστόσο το φαινόμενο αυτό απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση ως προς τις παραμέτρους που το επηρεάζουν και το βαθμό της αλληλεπίδρασης αυτής.

Ένα δεύτερο στοιχείο που χρήζει περαιτέρω μελέτης είναι η ακρίβεια των ολοκληρωτικών υπολοίπων με την απλοποιημένη προσέγγιση. Παρότι στα πλαίσια της διατριβής, έγινε έλεγχος της ακρίβειάς τους (η οποία και κρίνεται ικανοποιητική) απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση σχετικά με το επίπεδο της ακρίβειας των υπολογισμών, καθώς και σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια αυτού του υπολογισμού.

Ένα τρίτο στοιχείο που χρήζει περαιτέρω έρευνας είναι ο οριακός κύκλος που εμφανίστηκε στο σενάριο BL05 (παράγραφος 7.5.2). Η προσομοίωση της διαταραχής (η οποία έχει σχετικά μικρό πλάτος) δείχνει ότι το σύστημα φαίνεται ότι βρίσκεται κοντά σε διακλάδωση Hopf. Η συνδυαστική χρήση γραμμικών εργαλείων και μη γραμμικής ανάλυσης (προσομοίωση) μπορεί να καταλήξει σε περισσότερες πληροφορίες για το είδος της διακλάδωσης Hopf και το είδος του οριακού κύκλου.

Τέλος, συνολικότερα φαίνεται ότι θα είχε ενδιαφέρον η μελέτη των φαινομένων μη γραμμικής δυναμικής που προέκυψαν από την εργασία αυτή παρότι η ανάλυση η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή περισσότερο εδράζεται στην γραμμική παρά στην μη γραμμική ανάλυση. Η διακριτή λειτουργία του συστήματος φαίνεται ότι παράγει ενδιαφέροντα φαινόμενα. Τα φαινόμενα αυτά μπορεί να επηρεάζουν σημαντικά την λειτουργία των ΣΗΕ, χωρίς ωστόσο να λαμβάνονται υπ' όψιν στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται συνήθως για τις μελέτες δυναμικής ασφάλειας μεγάλων συστημάτων.

# Βιβλιογραφία

- [AF77] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, The Iowa State University Press, 1977
- [AKW80] B. Avramovic, P. V. Kokotovic, J. R. Winkelman, J. H. Chow, "Area decomposition for electromechanical models of power systems," *Automatica*, Volume 16, Issue 6, November 1980, Pages 637-648
- [AKWC80] B. Avramovic, P. Kokotovic, J. Winkelman, J. Chow, "Area Decomposition for Electromechanical Models of Power Systems," *Automatica*, Volume 16, Issue 6, November 1980, pp.637-648
- [ANV11] A. Artavanis, V. Nomikos, C.Vournas, "Parameter estimation and PSS tuning for power stations of the Hellenic interconnected system," Greek National Committee of CIGRE Conference, Athens, Dec 2011
- [ANW11] S. Ali, I. Nassar, and H. Weber, "Interconnection of the European ENSO-E-CE system with the Turkish system: Investigation of the expected inter-area-oscillations behavior," presented at the 17<sup>th</sup> Power Systems Computation Conference (PSCC), Stockholm, Sweden, Aug. 2011
- [APO81] Tom M. Apostol, *Mathematical Analysis*, World Students Series Edition, 1981
- [ΒΠ11] Κ. Βουρνά, Β.Κ.Παπαδιά, *Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και έλεγχος συχνότητας και τάσεως*, Συμμετρία 2011
- [BCF03] A. Bihain, D. Cirio, M. Fiorina, R. Lopez, D. Lucarella, S. Massucco, D. R. Vega, C. Vournas, T. Van Cutsem, L. Wehenkel, "OMASES: a dynamic security assessment tool for the new market environment," Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna , Volume 3, pp. 8 pp., 23-26 June 2003
- [BWC00] G. E. Boukarim, S. Wang, J. H. Chow, G. N. Taranto, N. Martins, "A comparison of classical, robust, and decentralized control designs for multiple power system stabilizers," *Power Systems, IEEE Transactions on* , Volume 15, no.4, pp.1287-1292, Nov 2000
- [BWD00] H. Breulmann, W. Winter, M. Losing, R. Witzmann, P. Dupuis, M.P. Houry, T. Margotin, J. Zerenyi, J. Dudzik, J. Machowski, L. Martin, J. M. Rodriguez, E. Urretavizcaya, "Analysis and Damping of Inter-Area Oscillations in the UCTE/CENTREL Power System," in Proc. CIGRE 2000, Paris, France, Paper 38-113
- [ΓΜ98] Γ. Μάνος, "Ανάλυση φαινομένων κατάρρευσης τάσεως σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας," Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Απρίλιος 1998
- [CAP81] U. Di Caprio, "Conditions for Theoretical Coherency in Multimachine Power Systems," *Automatica*, Volume 17, Issue 5, September 1981, pp. 687-701
- [CAP82a] U. Di Caprio, "Theoretical and practical dynamic equivalents in multimachine power systems: Part 1: Construction of coherency-based theoretical equivalent," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 4, Issue 4, October 1982, Pages 224-232
- [CAP82b] U. Di Caprio, "Theoretical and practical dynamic equivalents in multimachine power systems: Part 2: Construction of practical equivalent," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 5, Issue 1, January 1983, Pages 40-54

- [CAP95] J. H. Chow, P. Accari, W. Price, "Inertial and Slow Coherency Aggregation Algorithms for Power System Dynamic Model Reduction," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 10, No.2, pp.680-685, May 1995
- [CGL05] T. Van Cutsem, M.-E. Grenier, D. Lefebvre, "Combined detailed and quasi steady-state time simulations for large-disturbance analysis," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 28, Issue 9, November 2006, Pages 634-642
- [CHA79] M. Hanif Chaudry, *Applied Hydraulic Transients*, Van Nostrand Reinhold Company, USA, 1979
- [CHM05] T. Van Cutsem, G. Hasse, C. Moors, S. Guillon, R. Mailhot, "A new training simulator for improved voltage control of the Hydro-Quebec system," Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES , Volume 1, pp. 366- 371, 10-13 Oct. 2004
- [CHO95] J. H. Chow, et al., "Inertial and Slow Coherency Aggregation for Power System Dynamic Model Reduction," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 10, no. 2, pp. 680-685, May 1995
- [CHP04] B. Chaudhuri, B. C. Pal, "Robust damping of multiple swing modes employing global stabilizing signals with a TCSC," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 19, no.1, pp. 499- 506, Feb. 2004
- [CHP05] D. Chaniotis and M. A. Pai, "Model reduction in power systems using Krylov subspace methods," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 20, no.2, pp. 888- 894, May 2005
- [CIG00] CIGRE Task Force, "Impact of Interactions Among Power System Controls", CIGRE, May 2000, 38.02.16
- [CIG96] CIGRE Task Force, "Analysis and Control of Power System Oscillations", CIGRE, Dec 1996, 111
- [CKC05] T. Van Cutsem, J. Kabouris, G. Christoforidis, C. D. Vournas, "Application of real-time voltage security assessment to the Hellenic interconnected system," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-* , Volume 152, no.1, pp.123-131, 10 Jan. 2005
- [CKW03] Z. Chuanjiang, M. Khammash, V. Vittal, Q. Wenzheng, "Robust power system stabilizer design using  $H_{\infty}$  loop shaping approach," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 18, no.2, pp. 810- 818, May 2003
- [COC72] S. C. Conte, Carl de Boor, *Elementary Numerical Analysis – an algorithmic approach*, Second edition, McGraw-Hill, 1972
- [CWT03] C. Y. Chung, K. W. Wang, C. T. Tse, X. Y. Bian, A. K. David, "Probabilistic eigenvalue sensitivity analysis and PSS design in multimachine systems," *Power Systems, IEEE Transactions on* , Volume 18, no.4, pp. 1439- 1445, Nov. 2003
- [DBA74] G. Dahlquist, A. Bjorck, N. Anderson, *Numerical Methods*, Dover Publications INC, Mineola, New York, 1974
- [DLO10] A. Dysko, W. E. Leithead, and J. O'Reilly, "Enhanced Power System Stability by Coordinated PSS Design," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 25, no. 1, pp.413-422, Feb. 2010
- [DME94] F. P. de Mello, "Exploratory Concepts on Control of Variable Series Compensation in Transmission Systems to Improve Damping of Intermachine/System Oscillations," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 9, no. 1, pp.102-108, Feb 1994

- [DZG01] I. Dobson, J. Zhang, S. Greene, H. Engdahl, P. W. Sauer, "Is strong modal resonance a precursor to power system oscillations?," *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions on*, Volume 48, no.3, pp.340-349, Mar 2001
- [ERB04] A. Elices, L. Rouco, H. Bourles, T. Margotin, "Design of robust controllers for damping interarea oscillations: application to the European power system," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 19, no.2, pp. 1058- 1067, May 2004
- [ΕΠ06] Εμμανουήλ Ποταμιανάκης, "Προσομοίωση και Γραμμικοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας για την Ανάλυση Βραχυπρόθεσμης Ευστάθειας Τάσης," Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Απρίλιος 2006
- [FCDS08] H. Fang, L. Chen, N. Dlakavu, Z. Shen, "Basic Modeling and Simulation Tool for Analysis of Hydraulic Transients in Hydroelectric Power Plants," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Volume 23, no.3, Sep 2008
- [GAS96] G. Angelidis, A. Semlyen, "Improved methodologies for the calculation of critical eigenvalues in small signal stability analysis," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 11, no.3, pp.1209-1217, Aug 1996
- [GIV04] M. Gibbard, D. Vowles, "Reconciliation of methods of compensation for PSSs in multimachine systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 19, No. 1, pp.463-472, Feb 2004
- [GLC05] M.-E. Grenier, D. Lefebvre, T. Van Cutsem, "Quasi steady-state models for long-term voltage and frequency dynamics simulation," Power Tech Conference Proceedings, 2005 IEEE Russia , pp.1-8, 27-30 June 2005
- [GMK89] J. J. Sanchez-Gasca, N. W. Miller, A. Kurita, S. Horiuchi, "Multivariable control for damping interarea oscillations in power systems," *Control Systems Magazine, IEEE*, Volume 9, no.1, pp.28-32, Jan. 1989.
- [GMW91] P. E. Gill, W. Murray, M. H. Wright, *Numerical Linear Algebra and Optimization Volume 1*, Addison-Wesley Publishing Company, 1991
- [GST76] G.W.Stewart, "Simultaneous iteration for computing invariant subspaces of Non-Hermitian matrices," *Numerische Mathematik*, pp.123-136, Springer Berlin / Heidelberg, June 1976
- [GUS10] G. Gurralla, I. Sen, "Power system stabilizers design for interconnected power systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 25, no.2, pp.1042-1051, May 2010
- [HAE88] A. M. A. Hamdan, A. M. Elabdalla, "Geometric measures of modal controllability and observability of power system models," *Electric Power System Research*, Volume 15, no.2, pp.147-155, 1988
- [HAF02] A. Hasanovic, A. Feliachi, "Genetic algorithm based inter-area oscillation damping controller design using MATLAB," Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, Volume 3, pp.1136-1141, 25-25 July 2002
- [HIS04] I. A. Hiskens, "Power system modeling for inverse problems," *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, Volume 51, no.3, pp. 539- 551, March 2004
- [HEK08] A. Heniche, I. Kamwa, "Assessment of two methods to select wide-area-signals for power system damping control," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 23, no.2, pp.572-581, May 2008



- [IEEE06] IEEE Power Engineering Society, "Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Std 421.5-2005, April 2006
- [JEN77] A. Jennings, *Matrix Computation for Engineers and Scientists*, John Wiley and Sons, 1977
- [JJM94] E. De Jaeger, N. Janssens, B. Malfliet, F. Van De Meulebroeke, "Hydro Turbine Model for System Dynamic Studies", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 9, No.4, November 1994
- [JKA05] J. Kabouris, "Data on the prolonged European Oscillation of May 1<sup>st</sup> 2005," HTSO Internal Report.
- [JP96] J. Paserba, CIGRE TF 38.01.07, "Control of Power System Oscillations," Final Report, July 1996
- [JPM10] R. A. Jabr, B. C. Pal, N. Martins, "A Sequential Conic Programming Approach for the Coordinated and Robust Design of Power System Stabilizers," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 25, no.3, pp.1627-1637, Aug. 2010
- [KAC82] P. V. Kokotovic, B. Avramovic, J. H. Chow, J. R. Winkelman, "Coherency based decomposition and aggregation," *Automatica*, Volume 18, Issue 1, pp. 47-56, Jan 1982
- [KAW80] Petar V. Kokotovic, John J. Allemong, James R. Winkelman, Joe H. Chow, "Singular perturbation and iterative separation of time scales," *Automatica*, Volume 16, Issue 1, pp.23-33, Jan 1980
- [KGH01] I. Kamwa, R. Grondin, and Y. Hebert, "Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems-a decentralized/hierarchical approach," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 16, no.1, pp.136-153, Feb. 2001
- [KGT05] I. Kamwa, R. Grondin, G. Trudel, "IEEE PSS2B versus PSS4B: the limits of performance of modern power system stabilizers," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 20, no.2, pp. 903- 915, May 2005
- [KHG07] S. Khanmohammadi, O. Ghaderi, "Simultaneous Coordinated Tuning of Fuzzy PSS and Fuzzy FACTS Device stabilizer for Damping Power System Oscillations in Multi-Machine Power System," Fuzzy Systems Conference, 2007. FUZZ-IEEE 2007. IEEE International, 23-26 July 2007
- [KKO86] Petar V. Kokotović, Hassan K. Khalil, John O'Reilly, *Singular Perturbation Methods in Control: Analysis and Design*, SIAM, 1986
- [KKR89] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers, M. S. Zywno, "Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 4, no. 2, pp.614-626, May 1989
- [KM09] J. Kim, B. Lee, H. Song, Tae-Kyun Kim, Su-Chul Nam, JeongHoon Shin, , "Development of long-term simulator for the large-scaled power system," Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 2009 IEEE, pp.1-4, 26-30 Oct. 2009
- [KOS76] P. V. Kokotovic, R. E. O'Malley Jr., P. Sannuti, "Singular perturbations and order reduction in control theory — An overview," *Automatica*, Volume 12, Issue 2, pp.123-132, March 1976

- [KPA04] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, V. Vittal, "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 19, No. 2, May 2004
- [KRA95] P. Krause, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems (2nd Edition)*, IEEE Press, 1995
- [KRYG82] D. R. Kincaid, J. R. Respass, D. M. Young, R. G. Grimes, "Algorithm 586 ITPACK 2C: A FORTRAN Package for Solving Large Sparse Linear Systems by Adaptive Accelerated Iterative Methods," *Journal ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, Volume 8 Issue 3, Sept. 1982
- [KUN94] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, EPRI Power System Engineering Series, EPRI/McGraw-Hill, 1994
- [KUW05] M. Kurth, E. Welfonder, "Oscillation behavior of the enlarged European power system under deregulated energy market conditions," *Control Engineering Practice*, Volume 13, Issue 12, pp. 1525-1536, Dec 2005,
- [KWS95] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery*, IEEE Press, 1995
- [LAR02] P. de Larminat, *Analysis and Control of Linear Systems*, ISTE, 2002
- [LAS81] E. V. Larsen and D. A. Swann, "Applying power system stabilizers: Part I – III," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions*, Volume PAS-100, pp. 3017–3046, June 1981.
- [LIM07] L. T. G. Lima, "Challenges on Small-Signal Analysis of Large Inteconnected Power Systems," Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, pp.1-7, 24-28 June 2007
- [LXH04] Guoping Liu, Zheng Xu, Ying Huang, Wulue Pan, "Analysis of inter-area oscillations in the South China Interconnected Power System," *Electric Power Systems Research*, Volume 70, Issue 1, pp. 38-45, June 2004
- [LYK04] Chun Liu, Ryuichi Yokoyama, Kaoru Koyanagi, Kwang Y. Lee, "PSS design for damping of inter-area power oscillations by coherency-based equivalent model," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 26, Issue 7, pp. 535-54, Sep 2004
- [MPIX99] Α. Μπακόπουλος, Ι. Χρυσοβέργης, *Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση*, Εκδόσεις Συμεών, 1999
- [MAK06] U. P. Mhaskar, A. M. Kulkarni, "Power oscillation damping using FACTS devices: modal controllability, observability in local signals, and location of transfer function zeros," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 21, Issue 1, pp. 285-294, Feb. 2006
- [MAL90] N. Martins, L.T.G. Lima, "Determination of suitable locations for power system stabilizers and static VAR compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 5, Issue 4, p.p. 1455-1469, Nov 1990
- [MEC69] F. de Mello, C. Concordia, "Concept of synchronous machine stability as effected by excitation control," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions*, Volume 88, pp. 316-329, April 1969
- [MGQ02] N. Martins, S. Gomes Jr., P. E. M. Quintão, A. de Castro, "PacDyn User's Manual v6.0 – 2002," Technical Report, CEPEL, July 2002.

- [MK08] Μαρία Κουβελέτσου, “Σχεδίαση Σταθεροποιητή Ταλαντώσεων για τη Διασύνδεση Ελλάδος-Τουρκίας”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2008
- [MMKV04] P. Miksa, S. Mijailovic, Z. Vujasinovic, J. Kabouris, and C. D. Vournas, “Evaluation of transfer capabilities in the 2nd UCTE zone”, 12th IEEE MELECON Proceedings, Volume 3, pp. 881 – 884, Dubrovnik, May 2004.
- [MPA11] M. Panju, “Iterative Methods for Computing Eigenvalues and Eigenvectors”, *The Waterloo Mathematics Review*, Volume 1, Issue 1, April 2011
- [NB01] Nils Berglund, “Perturbation Theory of Dynamical Systems”, Department of Mathematics, ETH Zurich, Switzerland, Nov 2001
- [NKV07] B. M. Nomikos, M. A. Kotlida, C. D. Vournas, "Interarea Oscillations and Tie-line Transients in the Hellenic Interconnected System," Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, pp.68-73, 1-5 July 2007
- [NKV09] B. M. Nomikos, M. E. Kouveletsou, C. D. Vournas, "PSS design for the Hellenic System with partial interconnection to Turkey," PowerTech, 2009 IEEE Bucharest , pp.1-7, June 28 2009-July 2 2009
- [NO99] N. Nihei T. Oyama, “A Study on Decomposition and Model Reduction for Wide Area Power System Stability Assessment,” Power Engineering Society, 1999 Winter Meeting, IEEE, Volume 1, pp. 651-654, 31 Jan-4 Feb 1999
- [NOM05] Νομικός Βασίλειος, “Συστηματική Σχεδίαση Σταθεροποιητών σε συστήματα με σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές,” Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2005
- [NOV01] B. M. Nomikos, C. D. Vournas, "Modal interaction and PSS design," Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto , Volume 2, pp.6, 2001
- [ODD03] M. L. Ourari, L. A. Dessaint, V. Q. Do, “Coherency Approach for Dynamic Equivalents of Large Power Systems,” International conference on power systems transients–IPST. 2003
- [OM74] R. E. O'Malley, *Introduction to Singular Perturbation*, Academic Press, 1974.
- [PAD08] K. R. Padiyar, *Power System Dynamic – Stability and Control*, BS Publications Second edition 2008
- [PAGT06] F. A. Potra, M. Anitescu, B. Gavrea, J. Trinkle, “A linearly implicit trapezoidal method for integrating stiff multibody dynamics with contact, joints, and friction,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Volume 66, Issue 7, pp. 1079–1124, May 2006
- [PAMM11] R. Preece, A. M. Almutairi, O. Marjanovic, and J. V. Milanović, “Damping of Inter-area Oscillations Using WAMS Based Supplementary Controller Installed at VSC based HVDC Line,” presented at the IEEE/PES Trondheim Power Tech, June 2011.
- [PGP03] M. A. Pai, D. P. Sen Gupta, and K. R. Padiyar, *Small Signal Analysis of Power Systems*, Alpha Science International Limited, 2004.
- [PMT09] K. Prasertwong, N. Mithulananthan and D. Thakur, "Understanding Low Frequency Oscillation in Power Systems," *Intr. Jr. Elect. Eng. Edu.*, Volume 47, no. 3, pp. 248-262, July 2010.
- [PPV89] F. L. Pagola, I. J. Perez-Arriaga, G. C. Verghese, “On sensitivities, residues and participations: applications to oscillatory stability analysis and control”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 4, Issue.1, pp.278-285, Feb.1989

- [PSK06] J. Paserba, J. Sanchez-Gasca, P. Kundur, E. Larsen, and C. Concordia. "Small Signal Stability and Power System Oscillations," *Power system stability and control* (2007).
- [PSR03] J. Persson, J. G. Slootweg, L. Rouco, L. Soder, W. L. Kling, "A Comparison of Eigenvalues Obtained with Two Dynamic Simulation Software Packages", paper presented at 2003 Bologna PowerTech Conference, June 23-26, Bologna, Italy, 2003
- [PSS-M] PSS/E *Program operation Manual* – Model Library, PSSE 3.2
- [RBFV12] R. Ramírez-Betancoura, C.R. Fuerte-Esquivela, T. Van Cutsem, "A two-time scale simulation for dynamic analysis of power systems", *Electric Power System Research*, Volume 83, Issue 1, pp.185-195, Feb 2012
- [RMF10] J. Rommes, N. Martins, F. Freitas, "Computing Rightmost Eigenvalues for Small-Signal-Stability Assessment of Large-Scale Power Systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 25, no.2, pp.929-938, May. 2010
- [ROG00] G. Rogers, *Power System Oscillations*, Kluwer, Norwell, 2000.
- [ROP01] L. Rouco, F. L. Pagola, "On the sign of the feedback applied by power system damping controllers," *Power Tech Proceedings*, 2001 IEEE Porto , 2001
- [RRF96] G. N. Ramaswamy, et al., "Synchronic modal equivalencing (SME) for structure-preserving dynamic equivalents," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 11, no.1, pp.19-29, Feb. 1996.
- [SBR98] W. Sattinger, R. Baumann, and P. Rothermann, "A new dimension in grid monitoring," *Transmission and Distribution World Magazine*, Feb. 2007.
- [SEL98] S. E. Lyshovski, "Model Reduction of Continuous - Time Systems: Boundedness of Solutions and Reduced - Order Models," *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision & Control*, Tampa, Florida USA Dec 1998
- [SKV11] N. G. Sakellariadis, M. E. Karystianos, C. D. Vournas, "Local and global bifurcations in a small power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 33, Issue 7, pp. 1336-1347, September 2011
- [SRP91] P.W. Sauer, C. Rajagopalan, M.A. Pai, "An explanation and generalization of the AESOPS and PEALS Algorithm," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 6, Is.1, p.p 293-299, Feb 1991
- [STB02] J. Stoer, R. Bulirsch, "Introduction to Numerical Analysis", *Texts in Applied Mathematics*, Volume 12, Springer, 2002
- [STJ81] W. J. Stewart, A. Jennings, "A simultaneous iteration algorithm for real matrices," *ACM Transactions on Mathematical Software*, Volume 7, No 2, pp 184-198, June 1981
- [SYI06] T. Sugihara, A. Yokoyama, A. Izena, "Adaptive PSS Designed Based on Low-order Linear Model for Large-scale Power System," *International Conference on Power System Technology*, 2006
- [TT93] C. T. Tse, S. K. Tso, "Refinement of Conventional PSS Design in Multimachine System by Modal Analysis", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 8, No.2, p.p.598-605, 1993
- [VMN09] C. D. Vournas, A. Metsiou, B. M. Nomikos, "Analysis of intra-area and interarea oscillations in South-Eastern UCTE interconnection," *Power & Energy Society General Meeting*, 2009. PES '09. IEEE , 26-30 July 2009

- [VOM09] C. D. Vournas, J. C. Mantzaris, "Quasi-Steady-State modeling of interarea oscillations," *PowerTech*, 2009 IEEE Bucharest , June 28 2009-July 2 2009
- [VOM10] C. D. Vournas, J. C. Mantzaris, "Application of QSS Modeling to Stabilizer Design for Interarea Oscillations," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 25, no.4, pp.1910-1917, Nov. 2010
- [VPM04] C. D. Vournas, E. G. Potamianakis, C. Moors, T. Van Cutsem, "An educational simulation tool for power system control and stability," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 19, pp. 48 – 55, Feb 2004
- [VVC98] T. Van Cutsem and C. D. Vournas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*, Kluwer, Norwell, MA, 1998
- [WAS89] L. Wang, A. Semlyen, "Application of sparse eigenvalue techniques to the small signal stability analysis of large power systems," *Power Industry Computer Application Conference*, 1989. PICA '89, Conference Papers , 358-365, 1-5 May 1989
- [WAV04] X. Wang, V. Vittal, "System islanding using minimal cutsets with minimum net flow," *Power Systems Conference and Exposition*, 2004. IEEE PES , Volume 1, pp. 379- 384 , 10-13 Oct. 2004
- [WCA80] James R. Winkelman, Joe H. Chow, John J. Allemong, Petar V. Kokotovic, "Multi-time-scale analysis of a power system," *Automatica*, Volume 16, Issue 1, Pages 35-43, Jan 1980
- [WCBA81] J. R. Winkelman, J. H. Chow, B. C. Bowler, B. Avramovic, and P. V. Kokotovic, "An analysis of interarea dynamics of multi-machine systems," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, Volume PAS-100, No. 2, pp.754-763, Feb. 1981.
- [WEI02] J. A. C. Weideman "Numerical integration of periodic functions: A few examples", *American Mathematical Monthly*, Volume 109, pp.21-36, 2002
- [WKY97] I. Wang, M. Klein, S. Yirga, P. Kundur, "Dynamic Reduction of Large Power Systems for Stability Studies", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 12, No.2, pp.889-895, May 1997
- [WL03] W. Lim, "Power System Dynamic Security Assessment," School of Information Technology and Electrical Engineering, University of Queensland, October 2003
- [XMJ98] X. Xu, R. M. Mathur, J. Jiang, G. J. Rogers, P. Kundur, "Modeling of generators and their controls in power system simulations using singular perturbations," *Power Systems, IEEE Transactions on* , Volume 13, no.1, pp.109-114, Feb 1998
- [YKK02] H. Motoki, A. Yokoyama, H. Kawakami, K. Kawasaki, "Experimental study on power system damping enhancement by multiple digital adaptive PSS using analog-type real-time power system simulator," *Power System Technology*, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on , Volume 2, pp. 808- 812, 2002
- [YOU99] K. Yoshimura, N. Uchida, "Multi input PSS optimization method for practical use by considering several operating conditions," *Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE* , Volume 1, pp.749-754, 31 Jan-4 Feb 1999
- [YVH06] B. Yang, V. Vittal, G. Heydt, "Slow-Coherency-Based Controlled Islanding – A demonstration of the Approach on the August 14, 2003 Blackout Scenario," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 21, no.4, pp.1840-1847, Nov 2006

[YVW04] H. You, V. Vittal, X. Wang, "Slow coherency Based Islanding", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 19, No.1, pp.483-491, Feb 2004

[ZAB08] Y. Zhang and A. Bose, "Design of wide-area damping controllers for interarea oscillations," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 23, no. 3, pp. 1136–1143, Aug. 2008.

[ZCH12] J. Zhang, C. Y. Chung, Y. Han, "A Novel Modal Decomposition Control and Its Application to PSS Design for Damping Interarea Oscillations in Power Systems," *Power Systems, IEEE Transactions on* , Volume 27, no.4, pp.2015-2025, Nov 2012

[ZMH91] E. Z. Zhou, O. P. Malik, G. S. Hope, "Theory and Method for selection of Power System Stabilizer Location", *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Volume 6, No. 1, pp.170-176, March 1991

# Δημοσιεύσεις του συγγραφέα

## Δημοσιεύσεις σε περιοδικά

1. J. Mantzaris, C. Vournas, "Modelling and Stability of a Single Shaft Combined Cycle Power Plant," *International Journal. of Thermodynamics*, Volume 10 (No. 2), pp. 71-78, June 2007
2. C. D. Vournas, J. C. Mantzaris, "Application of QSS Modeling to Stabilizer Design for Interarea Oscillations," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 25, no.4, pp.1910-1917, Nov. 2010
3. J. C. Mantzaris, A. Metsiou, C. D. Vournas, "Analysis of Interarea Oscillations Including Governor Effects and Stabilizer Design in South Eastern Europe", *IEEE Transactions on Power Systems. Special Section: Analysis and Simulation of Very Large Power Systems* (δεκτό για δημοσίευση),

## Ανακοινώσεις σε συνέδρια

4. J. Mantzaris, C. Vournas, "Modelling and Stability of a Single Shaft Combined Cycle Power Plant," ECOS 06, Crete, Greece, July 2006
5. J. Mantzaris, M. Karystianos, C. Vournas, "Comparison of Gas Turbine and Combined Cycle Models for System Stability Studies," Medpower 08, Thessaloniki, Greece, November 2008
6. C. D. Vournas, J. C. Mantzaris, "Quasi-Steady-State modeling of interarea oscillations," PowerTech, 2009 IEEE Bucharest , June 28 2009-July 2 2009
7. I. Margaris, J. Mantzaris, M. Karystianos, A. Tsouchnikas, C. Vournas, N. Hatziaargyriou, I. Vitellas, "Methods for evaluating penetration levels of wind generation in autonomous systems," Power Tech, 2009 IEEE Bucharest, June 28 2009-July 2 2009
8. K. Tigas, G. Giannakidis, D. Lalas, S. Mirasgentis, G. Sarafidis, N. Sakellaridis, C. Nakos, J. Mantzaris, J. Kambouris, "Analysing the penetration of Renewable Energy Sources and Energy Efficiency in the Greek Energy System, in view of the European Energy policy targets," RENES 4th National Congress on Renewable Energy Sources implementation, 10-12th May 2010, Athens.
9. N. G. Sakellaridis, J. Mantzaris, C. Nakos, G. Giannakidis, K. Tigas, "Hellenic Power Generation System: Towards Meeting the National Targets up to 2020," International Conference on Environment and Electrical Engineering, 8-11th May 2011, Rome, Italy.
10. K. Tigas, J. Mantzaris, C. Nakos, N. Sakellaridis, G. Giannakidis, "Generation Expansion Planning under Wide-Scale RES Energy Penetration," International Energy Workshop, 19-21 June, 2012, Cape Town, South Africa
11. N. G. Sakellaridis, J. C. Mantzaris, S. A. Papathanasiou, I. Vitellas, and C. D. Vournas. "Security Assessment of an Autonomous System with Increased Wind Penetration and Pumped Storage Hybrid Plants," in *IEEE/PES General Meeting*, 22-26 July 2012, San Diego California, USA
12. K. Tigas, J. Mantzaris, G. Giannakidis, C. Nakos, N. Sakellaridis, E. Pyrgioti, A. T. Alexandridis, "Generation expansion planning under wide-scale RES energy penetration," Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), 2012 International Conference on , 28-29 Nov. 2012

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## Παράρτημα Α

Πίνακας Α1: Χωρισμός περιοχών γεννητριών σενάριο BL12

Γεννήτρια	Περιοχή	Γεννήτρια	Περιοχή	Γεννήτρια	Περιοχή	Γεννήτρια	Περιοχή
GTHIS_G1	G	GAWOS_G1	G	RROVINA5	B	JHDJERG3	B
GPLATAG2	G	AFIERZG3	A	RROVINA3	B	JHDJERG5	B
GAMYNTG2	G	AKOMANG3	A	RARGESK1	B	JTDRMNG1	B
GAGDIMG1	G	AFIERZG1	B	RARGESK2	B	JTENTAG1	B
GAGDIMG2	G	AKOMANG1	B	RBUCSG15	B	JTENTAG2	B
GAGDIMG3	G	AVDEJAG1	B	RBUCSG16	B	JTENTAG4	B
GAGDIMG4	G	VBEL23K1	B	RIERNUF5	B	JTENTAG5	B
GAGDIMG5	G	VTBDO2F1	B	RIERNUI4	B	JTENTAG6	B
GKARD_G1	G	VTBDO3F1	B	RRIULMF2	B	JTENTBG1	B
GKARD_G2	G	VHSES1K1	B	RMARISF1	B	JTENTBG2	B
GKARD_G3	G	VHCH34D1	B	RMINTIF1	B	JTKOSBG1	B
GKARD_G4	G	VNKOZ5F1	B	RMINTIF2	B	JHBBASG3	B
GPTOLEG2	G	VNKOZ7F1	B	RMINTIF5	B	JHBBASG4	B
GPTOLEG4	G	VNKOZ0A1	B	RSUGAGF1	B	JHBISTG1	B
GLIPTOG1	G	VNKOZ9A1	B	RISALNA7	B	JTKOSAG3	B
GLIPTOG2	G	VTVAR4F1	B	RPDFE1F1	B	JTKOSAG4	B
GALIVEG4	G	VTVAR5F1	B	RPDFE1F2	B	JTKOSAG5	B
GAHSAGG8	G	VTMI25F1	B	RPDFE1F4	B	JHEPIVG1	B
GBLAVRG4	G	VTMI27F1	B	RPDFE2F5	B	JTPLJEG1	B
GLAVRIG1	G	VTMI31F1	B	RCRAIOF2	B	JHPERUG1	B
GLAVRIG2	G	VHAN_4K1	B	RCRAIOF1	B	JHPERUG2	B
GBLAVRG2	G	VHTESHK1	B	RCERNA1	B	JHPERUG3	B
GBLAVRG3	G	WTGACKG	B	RLOTRUF1	B	JHPERUG4	B
GMEGALG5	G	WHVISEG	B	RROVINA4	B	JHPERUG6	B
GMEGALG3	G	WHTREBG3	B	RPDFE2F6	B	JHPERUG7	B
GMEGALG4	G	RTURCEA1	B	RMINTIF6	B	INFINITE	E
GKASTRG1	G	RTURCEA6	B	RIERNUI3	B		
GLOUROG1	G	RTURCEA7	B	JHDJERG1	B		



Πίνακας Α2: Χωρισμός περιοχών γεννητριών σενάριο BL05 (συνέχεια)

Γεννήτρια	Περιοχή	Γεννήτρια	Περιοχή	Γεννήτρια	Περιοχή	Γεννήτρια	Περιοχή
AKOMANG3	G	GAWOS_G1	G	RBORZ	B	RPDFE2F5	B
GTHIS_G1	G	GPOUR2G1	G	RCTSV	B	RCRAIOF2	B
GPLATAG2	G	AFIERZG1	B	RBARB	B	RCRAIOF1	B
GAMYNTG2	G	AVDEJAG1	B	ROSTR	B	RCERNAA1	B
GAGDIMG1	G	VBEL23K1	B	RCPAL	B	RPDFE2F6	B
GAGDIMG2	G	VTBDO1F1	B	RBUCU	B	RCPRG	B
GAGDIMG3	G	VHSES1K1	B	RBUCU	B	JHDJERG1	B
GAGDIMG4	G	VNKOZ5F1	B	RBUJO	B	JHDJERG3	B
GAGDIMG5	G	VNKOZ6F1	B	RCEBV	B	JHDJERG5	B
GKARD_G1	G	VNKOZ7F1	B	RGOVO	B	JTDRMNG1	B
GKARD_G2	G	VNKOZ8F1	B	RSTUP	B	JTENTAG2	B
GKARD_G3	G	VNKOZ0A1	B	RPITS	B	JTENTAG4	B
GKARD_G4	G	VNKOZ9A1	B	RPARO	B	JTENTAG5	B
GPTOLEG2	G	VTVAR4F1	B	RORDV	B	JTENTAG6	B
GPTOLEG4	G	VTMI12M1	B	RSTEJ	B	JTENTBG1	B
GLIPTOG1	G	VTMI14M1	B	RGROZ	B	JHBBASG1	B
GLIPTOG2	G	VTMI26F1	B	RBUJO	B	JHBBASG2	B
GFLWRIG1	G	VTMI27F1	B	RTURCEA1	B	JHBBASG3	B
GALIVEG4	G	VTMI31F1	B	RTURCEA6	B	JHBBASG4	B
GAHSAGG8	G	VHAN_4K1	B	RROVINA5	B	JHBISTG1	B
GBLAVRG4	G	VHTESHK1	B	RROVINA3	B	JTKOSAG2	B
GLAURIGN	G	WUGLJE1	B	RARGESK1	B	JTKOSAG3	B
GLAVRIG2	G	WTUZLA1B	B	RBUCSGI5	B	JTKOSAG4	B
GMEGALG1	G	WKAKAN_L	B	RIERNUF5	B	JHPERUG1	B
GMEGALG2	G	WMOST41_	B	RIERNUI4	B	JHPERUG2	B
GMEGALG4	G	WSALAK_L	B	RMINTIF1	B	JHPERUG3	B
GLADONG1	G	WJABLA_L	B	RMINTIF2	B	JHPERUG4	B
GMPAKOG2	G	YTBIT2G1	B	RISALNA7	B	JHPERUG6	B
GKASTRG3	G	YTBIT2G2	B	RPDFE1F1	B	JHPERUG7	B
GKASTRG4	G	YTBIT2G3	B	RPDFE1F2	B	INFINITE	E
GLOUROG1	G	RBACS	B	RPDFE1F4	B		

## Παράρτημα Β

Πίνακας Β1: Ευαισθησία διασυνδετικής ιδιοτιμής ως προς τον στατισμό των θερμικών μονάδων

Όνομα ζυγού	Τύπος ρυθμιστή στροφών	Ζυγός	Στατισμός R	Ευαισθησία (1/R)			
				Πραγμ	Φαντ.	Μέτρο	Γωνία (μοίρες)
INFINITE	TGOV1	1	0.15	-0.00652851	0.00542454	0.00848805	140.3
VNKOZ0A1	TGOV1	13404	0.06	-0.00061991	0.00033735	0.00070575	151.4
VNKOZ9A1	TGOV1	13405	0.06	-0.00062039	0.00033417	0.00070467	151.7
RCERNAA1	TGOV1	29218	0.06	-0.00040720	0.00022188	0.00046373	151.4
GLAURIGN	TGOV1	59477	9.9	-0.00013489	0.00032173	0.00034887	112.7
JTENTBG1	IEEEG1	35030	0.08	-0.00021984	0.00026564	0.00034481	129.6
GAGDIMG5	TGOV1	22577	9.9	-0.00018291	0.00024920	0.00030912	126.3
GFLWRIG1	TGOV1	29577	9.9	-0.00018384	0.00022916	0.00029379	128.7
GLAVRIG2	TGOV1	59577	9.9	-0.00015077	0.00023473	0.00027898	122.7
GPTOLEG4	TGOV1	25477	9.9	-0.00013793	0.00023993	0.00027675	119.9
GKARD_G1	TGOV1	23177	9.9	-0.00015959	0.00021851	0.00027058	126.1
GKARD_G4	TGOV1	23477	9.9	-0.00016430	0.00021281	0.00026885	127.7
GKARD_G3	TGOV1	23377	0.04	-0.00015124	0.00021855	0.00026578	124.7
GAGDIMG4	TGOV1	22477	9.9	-0.00014655	0.00021460	0.00025987	124.3
GKARD_G2	TGOV1	23277	9.9	-0.00013519	0.00022189	0.00025983	121.4
GAGDIMG3	TGOV1	22377	9.9	-0.00014617	0.00021475	0.00025977	124.2
GMEGALG4	TGOV1	62177	9.9	-0.00012514	0.00022673	0.00025897	118.9
GAMYNTG2	TGOV1	21277	0.04	-0.00015888	0.00019839	0.00025416	128.7
GAGDIMG2	TGOV1	22277	0.04	-0.00013084	0.00021003	0.00024745	121.9
GAGDIMG1	TGOV1	22177	0.04	-0.00013003	0.00021004	0.00024703	121.8
RTURCEA1	TGOV1	29110	0.06	-0.00019440	0.00010588	0.00022136	151.4
RROVINA5	TGOV1	29119	0.06	-0.00019380	0.00010610	0.00022094	151.3
JTDRMNG1	IEEEG1	35011	0.06	-0.00012109	0.00015475	0.00019650	128.0
JTENTAG4	IEEEG1	35024	0.06	-0.00010537	0.00013750	0.00017323	127.5
JTENTAG5	IEEEG1	35025	0.06	-0.00010576	0.00013642	0.00017261	127.8
JTENTAG6	IEEEG1	35026	0.06	-0.00010515	0.00013645	0.00017227	127.6
VTMI27F1	TGOV1	13709	0.06	-0.00014717	0.00007637	0.00016581	152.6
VNKOZ5F1	TGOV1	13400	0.06	-0.00014553	0.00007611	0.00016423	152.4
VNKOZ7F1	TGOV1	13402	0.06	-0.00014553	0.00007611	0.00016423	152.4
VNKOZ8F1	TGOV1	13403	0.06	-0.00014553	0.00007611	0.00016423	152.4
VNKOZ6F1	TGOV1	13401	0.06	-0.00014553	0.00007611	0.00016423	152.4
VTMI26F1	TGOV1	13708	0.06	-0.00014044	0.00007530	0.00015935	151.8

Πίνακας Β1: Ευαισθησία διασυνδετικής ιδιοτιμής ως προς τον στατισμό των θερμικών μονάδων (συνέχεια)

Όνομα ζυγού	Τύπος ρυθμιστή στροφών	Ζυγός	Στατισμός R	Ευαισθησία (1/R)			
				Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Γωνία (μοίρες)
VTBDO1F1	TGOV1	13300	0.06	-0.00013578	0.00007389	0.00015459	151.4
GBLAVRG4	TGOV1	59177	0.05	-0.00007139	0.00013064	0.00014887	118.7
YTBIT2G2	IIEEG1	26302	0.06	-0.00006842	0.00012447	0.00014204	118.8
YTBIT2G3	IIEEG1	26303	0.06	-0.00006581	0.00012564	0.00014183	117.6
YTBIT2G1	IIEEG1	26301	0.06	-0.00007056	0.00012248	0.00014135	119.9
RMINTIF2	TGOV1	29168	0.06	-0.00011302	0.00007247	0.00013426	147.3
RIERNUF5	TGOV1	29159	0.06	-0.00010722	0.00007442	0.00013052	145.2
GALIVEG4	TGOV1	43487	0.04	-0.00004949	0.00011938	0.00012923	112.5
GAHSAGG8	TGOV1	56187	0.04	-0.00004804	0.00011732	0.00012678	112.3
JTENTAG2	IIEEG1	35022	0.05	-0.00006884	0.00009317	0.00011585	126.5
GPTOLEG2	TGOV1	25287	0.04	-0.00005975	0.00009483	0.00011208	122.2
GMEGALG1	TGOV1	61187	0.04	-0.00005421	0.00009542	0.00010974	119.6
GMEGALG2	TGOV1	61287	0.04	-0.00005421	0.00009542	0.00010974	119.6
RCRAIOF2	TGOV1	29198	0.06	-0.00009396	0.00005202	0.00010740	151.0
RCRAIOF1	TGOV1	29200	0.06	-0.00009393	0.00005182	0.00010728	151.1
RBUCSGI5	TGOV1	29136	0.06	-0.00008531	0.00004769	0.00009773	150.8
VTMI12M1	TGOV1	13700	0.06	-0.00008262	0.00004492	0.00009404	151.5
JTKOSAG2	IIEEG1	35092	0.04	-0.00005340	0.00007097	0.00008882	127.0
WUGLJE1	TGOV1	14005	0.05	-0.00003584	0.00007421	0.00008241	115.8
WKAKAN_L	IIEEG1	16003	0.06	-0.00003870	0.00006530	0.00007590	120.7
RBARB 5B	TGOV1	28230	0.06	-0.00006318	0.00004101	0.00007532	147.0
RBUCU 52	TGOV1	28365	0.06	-0.00006181	0.00003533	0.00007119	150.3
WTUZLA1B	IIEEG1	16002	0.06	-0.00003502	0.00006080	0.00007017	119.9
RCPAL 54	TGOV1	28267	0.06	-0.00005317	0.00004336	0.00006861	140.8
RIERNUI4	TGOV1	29161	0.06	-0.00005727	0.00003557	0.00006742	148.2
RBUCU 5	TGOV1	28364	0.06	-0.00005613	0.00003102	0.00006413	151.1
RBUJO 52	TGOV1	28961	0.06	-0.00005079	0.00003033	0.00005916	149.2
RBUJO 5	TGOV1	28374	0.06	-0.00005060	0.00003058	0.00005913	148.9
RCPRG 5B	TGOV1	29927	0.06	-0.00005061	0.00002641	0.00005708	152.4
RTURCEA6	IIEEG1	29116	0.06	-0.00001306	0.00004927	0.00005097	104.8
RROVINA3	IIEEG1	29121	0.06	-0.00001392	0.00004882	0.00005077	105.9
RISALNA7	IIEEG1	29184	0.06	-0.00001151	0.00004681	0.00004821	103.8
VTMI14M1	TGOV1	13702	0.06	-0.00004143	0.00002269	0.00004724	151.3
RORDV 5	TGOV1	28839	0.06	-0.00003088	0.00003017	0.00004317	135.7

Πίνακας Β1: Ευαισθησία διασυνδετικής ιδιοτιμής ως προς τον στατισμό των θερμικών μονάδων (συνέχεια)

Όνομα ζυγού	Τύπος ρυθμιστή στροφών	Ζυγός	Στατισμός R	Ευαισθησία (1/R)			
				Πραγμ	Φαντ.	Μέτρο	Γωνία (μοίρες)
JHPERUG6	IEEEG1	36526	0.06	-0.00001977	0.00003184	0.00003748	121.8
JHPERUG7	IEEEG1	36527	0.06	-0.00001977	0.00003184	0.00003748	121.8
RGROZ 5	TGOV1	28894	0.06	-0.00003175	0.00001921	0.00003711	148.8
VTMI31F1	IEEEG1	13711	0.05	-0.00001001	0.00003535	0.00003674	105.8
JTKOSAG3	IEEEG1	35093	0.04	-0.00000607	0.00003594	0.00003645	99.6
JTKOSAG4	IEEEG1	35094	0.04	-0.00000607	0.00003594	0.00003645	99.6
VTVAR4F1	IEEEG1	13603	0.05	-0.00000887	0.00003440	0.00003553	104.5
RARGESK1	TGOV1	29125	0.06	-0.00002989	0.00001533	0.00003359	152.8
RBORZ 5	TGOV1	28158	0.06	-0.00002484	0.00002191	0.00003312	138.6
VHAN_4K1	TGOV1	13804	0.06	-0.00002869	0.00001472	0.00003224	152.8
GLIPTOG2	TGOV1	25687	0.04	-0.00001361	0.00002718	0.00003039	116.6
RPARO 5	TGOV1	28808	0.06	-0.00002134	0.00001497	0.00002607	145.0
JHPERUG1	IEEEG1	36521	0.06	-0.00001286	0.00001974	0.00002356	123.1
JHPERUG2	IEEEG1	36522	0.06	-0.00001286	0.00001974	0.00002356	123.1
JHPERUG4	IEEEG1	36524	0.06	-0.00001286	0.00001974	0.00002356	123.1
JHPERUG3	IEEEG1	36523	0.06	-0.00001286	0.00001973	0.00002356	123.1
VHTESHK1	TGOV1	13811	0.06	-0.00002018	0.00001056	0.00002278	152.4
RMINTIF1	IEEEG1	29167	0.05	-0.00000273	0.00001621	0.00001643	99.6
JHDJERG5	IEEEG3	35005	0.06	0.00000717	0.00000700	0.00001002	44.3
JHDJERG3	IEEEG3	35003	0.06	0.00000714	0.00000702	0.00001002	44.5
JHDJERG1	IEEEG3	35001	0.06	0.00000714	0.00000702	0.00001002	44.5
GLIPTOG1	TGOV1	25587	0.04	-0.00000506	0.00000844	0.00000984	121.0
WMOST41_	IEEEG3	18402	0.05	0.00000414	0.00000038	0.00000415	5.2
RPDFE2F5	IEEEG3	29193	0.05	0.00000381	0.00000137	0.00000405	19.7
RPDFE2F6	IEEEG3	29250	0.05	0.00000381	0.00000135	0.00000404	19.6
VHSES1K1	IEEEG3	13303	0.05	0.00000308	0.00000239	0.00000390	37.8
WJABLA_L	IEEEG3	18404	0.05	0.00000382	0.00000031	0.00000383	4.7
RPDFE1F1	IEEEG3	29189	0.05	0.00000338	0.00000125	0.00000361	20.3
RPDFE1F4	IEEEG3	29191	0.05	0.00000338	0.00000125	0.00000361	20.3
VBEL23K1	IEEEG3	13201	0.05	0.00000334	0.00000112	0.00000352	18.6
JHBBASG1	IEEEG3	35051	0.06	0.00000279	0.00000193	0.00000339	34.6
JHBBASG2	IEEEG3	35052	0.06	0.00000279	0.00000193	0.00000339	34.6
JHBBASG4	IEEEG3	35054	0.06	0.00000279	0.00000193	0.00000339	34.6
JHBBASG3	IEEEG3	35053	0.06	0.00000279	0.00000193	0.00000339	34.6

Πίνακας Β1: Ευαισθησία διασυνδετικής ιδιοτιμής ως προς τον στατισμό των θερμικών μονάδων (συνέχεια)

Όνομα ζυγού	Τύπος ρυθμιστή στροφών	Ζυγός	Στατισμός R	Ευαισθησία (1/R)			
				Πραγμ.	Φαντ.	Μέτρο	Γωνία (μοίρες)
WSALAK_L	IEEEG3	18403	0.05	0.00000256	0.00000022	0.00000257	4.9
RSTEJ 5	IEEEG3	28866	0.05	0.00000213	0.00000054	0.00000220	14.2
RGOVO 5	IEEEG3	28571	0.05	0.00000191	0.00000067	0.00000202	19.3
ROSTR 5B	IEEEG3	28250	0.05	0.00000182	0.00000069	0.00000195	20.8
JHBISTG1	IEEEG3	35081	0.06	0.00000152	0.00000109	0.00000187	35.6
RPDFE1F2	IEEEG3	29190	0.05	0.00000119	0.00000144	0.00000187	50.6
RBACS 5	IEEEG3	28147	0.05	0.00000141	0.00000036	0.00000146	14.4
RCTSV 5	IEEEG3	28195	0.05	0.00000123	0.00000024	0.00000125	11.1
RCEBV 5	IEEEG3	28430	0.05	0.00000119	0.00000027	0.00000122	12.6
AFIERZG1	HYGOV	10001	0.06	0.00000041	-0.00000099	0.00000107	-67.2
RPITS 5	IEEEG3	28581	0.05	0.00000088	0.00000027	0.00000092	16.9
RSTUP 5	IEEEG3	28572	0.05	0.00000085	0.00000030	0.00000090	19.3
AVDEJAG1	HYGOV	10003	0.04	0.00000033	-0.00000005	0.00000034	-8.2
AKOMANG3	HYGOV	10502	0.05	0.00000026	-0.00000012	0.00000029	-24.9
GAWOS_G1	HYGOV	84587	0.06	0.00000022	0.00000012	0.00000025	28.5
GPLATAG2	HYGOV	19587	0.02	0.00000015	0.00000018	0.00000024	49.4
GTHIS_G1	HYGOV	19187	0.05	0.00000013	0.00000019	0.00000023	54.9
GKASTRG3	HYGOV	81387	0.04	0.00000005	0.00000001	0.00000005	15.7
GKASTRG4	HYGOV	81487	0.04	0.00000005	0.00000001	0.00000005	15.7
GLOUROG1	HYGOV	84187	0.05	0.00000003	0.00000000	0.00000003	-4.1
GLADONG1	HYGOV	68187	0.02	0.00000002	0.00000002	0.00000003	44.3
GMPAKOG2	HYGOV	73287	0.04	0.00000002	0.00000002	0.00000003	45.7
GPOUR2G1	HYGOV	87177	0.03	0.00000001	-0.00000001	0.00000001	-53.6