

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



Πτυχιακή εργασία

**Μελέτη της παθητικής ιδιότητας (Passivity) των Συστημάτων
Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) και των αποκεντρωμένων
μεθοδολογιών βέλτιστου ελέγχου της συχνότητας του δικτύου**

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΔΗΜΟΣ

ΛΕΜΕΣΟΣ ΜΑΙΟΣ 2016

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή εργασία

**Μελέτη της παθητικής ιδιότητας (Passivity) των Συστημάτων
Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) και των αποκεντρωμένων
μεθοδολογιών βέλτιστου ελέγχου της συχνότητας του δικτύου**

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΔΗΜΟΣ

Σύμβουλος καθηγητής
[Επ. Καθ. Ι. Λέστας]

Λεμεσός ΜΑΪΟΣ 2016

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright ©Δήμος Κωνσταντίνου, [Μάιος 2016]

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τόσο τον διδακτορικό φοιτητή κ. Χρυσοβαλάντη Σπανιά, όσο και τον επίκουρο καθηγητή κύριο Ιωάννη Λέστα για την συνεχή στήριξη και καθοδήγηση τους από την αρχή μέχρι το τέλος της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Άνθιμο Σιακίδη, Μέμνια Κάτσουρα, Λάμπρο Λαζάρου, Κυριάκο Χαραλάμπους, Αντρέα Κτωρή, Μάριο Σούζου και την οικογένεια μου για την βοήθεια και τις χρήσιμες συμβουλές τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές, με τρόπο συνεχή και ποιοτικό είναι ο στόχος όλων των εταιρειών που ασχολούνται με την προσφορά ηλεκτρισμού. Η ηλεκτρική ενέργεια είναι μία από τις πιο κοινές μορφές ενέργειας που χρησιμοποιείται σήμερα. Είναι καθαρή, βολική, και σχετικά εύκολη στην μεταφορά από τα κέντρα παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης, καθώς προσφέρει μεγάλη ευελιξία στην χρήση της. Το υλικό και οικονομικό κόστος της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαγορευτικό, για αυτό τον λόγο η παραγωγή πρέπει να καλύπτει συνεχώς την ζήτηση.

Η μεγάλη επέκταση των υφιστάμενων δικτύων ισχύος, σε συνδυασμό με την διασύνδεση διαφόρων ανεξάρτητων δικτύων ισχύος, είναι ένα κρίσιμο θέμα το οποίο καλούνται να αντιμετωπίσουν οι μηχανικοί τα τελευταία χρόνια. Προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια, σε πολλές χώρες γίνονται σημαντικές συμφωνίες για διασύνδεση των δικτύων τους. Αυτές οι διασυνδέσεις σε συνδυασμό με την νέα δομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας έκανε την ανάλυση των δικτύων συστημάτων ισχύος πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα, ενώ προκύπτει η αδιαμφισβήτητη ανάγκη για πιο βελτιωμένη λειτουργία του δικτύου, των υπηρεσιών και της ασφάλειας. Η κοινή δυσκολία που αντιμετωπίζουν τα τελευταία χρόνια τα συστήματα ισχύος, είναι να διατηρηθεί η ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και του φορτίου.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της παθητικότητας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) και η εξέταση παθητικότητας των προτεινόμενων μηχανισμών ελέγχου της συχνότητας μέσω διαγραμμάτων Nyquist και Bode. Καθώς επίσης και η μελέτη της επίδρασης των πιο πάνω μηχανισμών στην συμπεριφορά και ευστάθεια των ΣΗΕ.

Λέξεις κλειδιά: Πρωτεύον Έλεγχος Συχνότητας, Δευτερεύον Έλεγχος Συχνότητας, Τριτογενής Έλεγχος Συχνότητας, Κυβερνήτης, Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ονομαστική Τιμή, Ελεγκτής Φορτίου, Σταθεροποιητής Συστήματος Ισχύος, Ροή Ισχύος, Πρόβλημα Βελτιστοποίησης, Ευστάθεια, Σταθερότητα Τάσης, Σταθερότητα Συχνότητας, Κεντροποιημένοι Μηχανισμοί, Αποκεντρωμένοι Μηχανισμοί, Απόκλιση Συχνότητας, Σημείο Ισορροπίας, Ταλαντώσεις Συχνότητας, Πολυμήχανών.

ABSTRACT

The supply of electricity to consumers with a continuous and quality is the goal of all companies involved in the electricity supply. Electricity is one of the most common forms of energy used today. Clean, convenient, and relatively easy to transport from production centers to consumption centers, and offers great flexibility in use. The material and financial costs of storage of electricity is prohibitive, for this reason, the production must be continuously covers the demand.

The great expansion of existing power networks, coupled with the interconnection of various independent power networks is a critical issue that faced by engineers in recent years. To meet the need for electricity in many countries are important agreements for interconnection of their national networks. These interfaces along with the new structure of the electricity system makes the analysis of power systems networks more complex and time consuming, while showing the undeniable need for more improved network operation, service and safety. The common difficulty faced in recent years, power systems, is to maintain the balance between generation and load.

The purpose of this study is to study the passivity of Electricity (SIE systems) examination passivity of the proposed frequency control mechanisms by Nyquist and Bode diagrams. Also the study of the effect, of the above mechanisms to the handling and stability of CSP.

Keywords: Primary Frequency Control, Secondary Frequency Control, Tertiary Frequency Control, Governor, Electricity System, Face Value, Controller Load Stabilizer Power System Power Flow Optimization Problem, Stability, Voltage Stability, Stability Frequency, centralized mechanisms, Agencies and Mechanisms, Deviation Frequency, Balance point, Shear Rate, Multimachine.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	vi
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	vi
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ	vi
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1 ΚΙΝΗΤΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	6
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	8
2.1 Για τη σταθερότητα και την βέλτιστη ρύθμιση του πρωτεύον συχνότητας με την συμμετοχή του ελέγχου του φορτίου	8
2.2 Κατανομή ελέγχου πρωτεύον συχνότητας μέσω πολύ-τερματικών συστημάτων μετάδοσης HVDC	11
2.3 Dissipative Hamiltonian Realization and Energy-Based L_2 -Disturbance Attenuation Control of Multimachine Power Systems	16
2.4 Πλαίσιο Ανάλυσης Σταθερότητας	17
2.4.1 Ανάλυση Σταθερότητας Πλαισίου	20
3 ΠΑΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	23
3.1 Διασκορπιζόμενο Σύστημα	23
3.2 Παθητικά συστήματα	26
3.3 Χαρακτηρισμοί της παθητικότητας για γραμμικά συστήματα	26
3.4 Σταθερότητα των παθητικών συστημάτων	28
3.5 Έλεγχος βάσης παθητικότητας	28
3.6 Διαγράμματα Nyquist	29

3.7 Διαγράμματα Bode	31
3.7.1 Πλεονεκτήματα διαγραμμάτων Bode	31
3.7.2 Συστήματα Ελάχιστης/Μη ελάχιστης φάσης.....	31
3.7.3 Σχεδιασμός ελεγκτών στο πεδίο συχνότητας	33
4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	
 ΜΕΣΩ PSS	34
4.1 Προσομοίωση χωρίς PSS και ελεγκτή φορτίου	35
4.2 Προσομοίωση με την χρήση μόνο PSS	37
4.3 Προσομοίωση με την χρήση μόνο ελεγκτή φορτίου($t=0.1s$)	39
4.4 Προσομοίωση με PSS και ελεγκτή φορτίου ($t=0.1$)	41
4.5 Σύγκριση Αποτελεσμάτων	43
4.6 Σύγκριση μεταξύ όλων των μεθόδων	46
4.7 Εξαγωγή συναρτήσεων μεταφοράς των ελεγκτών ρύθμισης της συχνότητας	47
4.8 Αποτίμηση της παθητικότητας των συστημάτων ελέγχου συχνότητας μέσω των διαγραμμάτων Nyquist και Bode	56
5 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	92
Παράρτημα Α	92

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1.1 Ένα δίκτυο συστήματος ισχύος	2
3.1 Διασύνδεση ανάδρασης ενός συστήματος διάχυσης	25
3.2 Διασύνδεση ανάδρασης των παθητικών συστημάτων	28
3.3 Κλειστό κύκλωμα ανάδρασης	30
4.1 Το παράθυρο του προγράμματος Matlab	34
4.2 Επιλέγουμε το file που αντιστοιχεί στο κύκλωμα που θα αναλύσουμε	34
4.7.1: IEEE 39-bus test system New England	48
4.8.1: Μοντέλο ελεγκτή φορτίου	56
4.8.2: Μοντέλο turbine governor	56

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

2.1 Επίπεδα ελεγχόμενης ισχύς στους μετατροπείς.....	15
2.2 Τάσεις των μετατροπέων DC	15
3.1 Συστήματα ελάχιστης/μη ελάχιστης φάσης	32
3.2 Βηματική απόκριση συστήματος Μη Ελάχιστης Φάσης.....	32
4.1.1 Μέγεθος τάσης του κυκλώματος.	35
4.1.2 Τάση φορτίου στον ζυγό 10.	35
4.1.3 Συχνότητα φορτίου στον ζυγό 3.	36
4.1.4 Αλλαγή φορτίου του κυκλώματος.	36
4.1.5 Μεταβολή ελεγχόμενου φορτίου.	36
4.2.1 Μέγεθος τάσης του κυκλώματος.	37
4.2.2 Τάση φορτίου στον ζυγό 10.	37
4.2.3 Συχνότητα φορτίου στον ζυγό 3.	38
4.2.4 Αλλαγή φορτίου του κυκλώματος.	38
4.2.5 Μεταβολή ελεγχόμενου φορτίου.	38
4.3.1 Μέγεθος τάσης του κυκλώματος.	39
4.3.2 Τάση φορτίου στον ζυγό 10.	39
4.3.3 Συχνότητα φορτίου στον ζυγό 3.	40
4.3.4 Αλλαγή φορτίου του κυκλώματος.	40
4.3.5 Μεταβολή ελεγχόμενου φορτίου.	40
4.4.1 Μέγεθος τάσης του κυκλώματος.	41
4.4.2 Τάση φορτίου στον ζυγό 3.	41
4.4.3 Συχνότητα φορτίου στον ζυγό 3.	42
4.4.4 Αλλαγή φορτίου του κυκλώματος.	42
4.4.5 Μεταβολή ελεγχόμενου φορτίου.	42
4.5.1 Συχνότητα bus 10 ανάλογα με χρόνο απόκρισης φορτίου.	43

4.5.2 Τάση bus 10 ανάλογα με χρόνο απόκρισης φορτίου.	44
4.5.3 Συχνότητα bus 10 ανάλογα με χρόνο απόκρισης φορτίου.	44
4.5.4 Τάση bus 10 ανάλογα με χρόνο απόκρισης φορτίου.	44
4.6.1 Συχνότητα με όλους τους συνδυασμούς ελέγχων.	45
4.6.2 Τάση με όλους τους συνδυασμούς ελέγχων.	45
4.6.3 Συχνότητα με ή χωρίς έλεγχο φορτίου	46
4.6.4 Τάση με ή χωρίς έλεγχο φορτίου	46
4.7.1 Απόκλιση συχνότητας στον ζυγό 14.....	49
4.7.2 Συχνότητα στον ζυγό 14	50
4.7.3 Τάση στον ζυγό 14.....	50
4.7.4 Απόκλιση συχνότητας στον ζυγό 14.....	50
4.7.5 Συχνότητα στον ζυγό 14	51
4.7.6 Τάση στον ζυγό 14.....	51
4.7.7 Απόκλιση συχνότητας στον ζυγό 14.....	51
4.7.8 Συχνότητα στον ζυγό 14	52
4.7.9 Τάση στον ζυγό 14.....	52
4.7.10 Απόκλιση συχνότητας στον ζυγό 14.....	52
4.7.11 Συχνότητα στον ζυγό 14	53
4.7.12 Τάση στον ζυγό 14.....	53
4.7.13 Απόκλιση συχνότητας στον ζυγό 14.....	53
4.7.14 Συχνότητα στον ζυγό 14	54
4.7.15 Τάση στον ζυγό 14.....	54
4.7.16 Απόκλιση συχνότητας στον ζυγό 14.....	54
4.7.17 Συχνότητα στον ζυγό 14	55
4.7.12 Τάση στον ζυγό 14.....	55
4.8.3 Generator 3 (H3)	57
4.8.4 Generator 3 (H3)	57

4.8.5 Generator 3 (B3)	58
4.8.6 Generator 7 (H7)	58
4.8.7 Generator 7 (H7)	58
4.8.8 Generator 7 (B3)	59
4.8.9 Generator 8 (H8)	59
4.8.10 Generator 8 (H8)	59
4.8.11 Generator 8 (B8)	60
4.8.12 Generator 9 (H9)	60
4.8.13 Generator 9 (H9)	60
4.8.14 Generator 9 (B9)	61
4.8.15 Generator 10 (H10)	61
4.8.16 Generator 10 (H10)	61
4.8.17 Generator 10 (B10)	62
4.8.18 Generator 3 (H3)	63
4.8.19 Generator 3 (H3)	63
4.8.20 Generator 3 (B3)	63
4.8.21 Generator 7 (H7)	64
4.8.22 Generator 7 (H7)	64
4.8.23 Generator 7 (B3)	64
4.8.24 Generator 8 (H8)	65
4.8.25 Generator 8 (H8)	65
4.8.26 Generator 8 (B8)	65
4.8.27 Generator 9 (H9)	66
4.8.28 Generator 9 (H9)	66
4.8.29 Generator 9 (B9)	66
4.8.30 Generator 10 (H10)	67
4.8.31 Generator 10 (H10)	67

4.8.32 Generator 10 (B10)	67
4.8.33 Load 1 (bus 3) (H1)	68
4.8.34 Load 1 (bus 3) (B1)	68
4.8.35 Load 2 (bus 7) (H2)	69
4.8.36 Load 2 (bus 7) (B2)	69
4.8.37 Generator 3 (H3)	70
4.8.38 Generator 3 (H3)	70
4.8.39 Generator 3 (B3)	71
4.8.40 Generator 7 (H7)	71
4.8.41 Generator 7 (H7)	71
4.8.42 Generator 7 (B7)	72
4.8.43 Generator 8 (H8)	72
4.8.44 Generator 8 (H8)	72
4.8.45 Generator 8 (B8)	73
4.8.46 Generator 9 (H9)	73
4.8.47 Generator 9 (H9)	73
4.8.48 Generator 9 (B9)	74
4.8.49 Generator 10 (H10)	74
4.8.50 Generator 10 (H10)	74
4.8.51 Generator 10 (B10)	75
4.8.52 Loads 1-5 (HL1-5)	75
4.8.53 Loads 1-5 (BL1-5)	76
4.8.54 Loads 6-10 (HL6-10)	76
4.8.55 Loads 11-14 (HL11-14)	76
4.8.56 Generator 3 (H3)	77
4.8.57 Generator 3 (H3)	78
4.8.58 Generator 3 (B3)	78

4.8.59 Generator 7 (H7)	78
4.8.60 Generator 7 (H7)	79
4.8.61 Generator 7 (B7)	79
4.8.62 Generator 8 (H8)	79
4.8.63 Generator 8 (H8)	80
4.8.64 Generator 8 (B8)	80
4.8.65 Generator 9 (H9)	80
4.8.66 Generator 9 (H9)	81
4.8.67 Generator 9 (B9)	81
4.8.68 Generator 10 (H10)	81
4.8.69 Generator 10 (H10)	82
4.8.70 Generator 10 (B10)	82
4.8.71 Loads 1-5 (HL1-5)	83
4.8.72 Loads 1-5 (BL1-5)	83
4.8.73 Loads 6-10 (HL6-10)	83
4.8.74 Loads 11-14 (HL11-14)	84

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

- 1) PSS – Σταθεροποιητής συστήματος ισχύος
- 2) CPS – Current Power System (ΣΗΕ)
- 3) HVDC - Συνεχές Ρεύμα Υψηλής Τάσης (High Voltage DC)
- 4) LC – Load Control (ελεγκτής φορτίου)
- 5) OPF - Βέλτιστης Ροής Ισχύος (Optimal Power Flow)
- 6) FA – Ανάλυση σφαλμάτων
- 7) CA – Ανάλυση έκτακτης ανάγκης
- 8) SA – Ανάλυση ευστάθειας
- 9) ΣΗΕ – Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
- 10) AGC - Αυτόματος Έλεγχος Παραγωγής (Automatic Generation Control)
- 11) PST (Power System Toolbox)
- 12) LR - Lagrangian Relaxation principles
- 13) PI – Proportional – Integral
- 14) OLC – Optimal Load Control
- 15) OGC – Optimal Generation Control
- 16) OFC - Optimal Frequency Control
- 17) ED - Economic Dispatch

ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

PSS – Σταθεροποιητής συστήματος ισχύος

Power system - Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Primary frequency control – Πρωτεύον έλεγχος συχνότητας

Secondary frequency control – Δευτερεύον έλεγχος συχνότητας

Governor – Κυβερνήτης

Power flow – Ροή ισχύος

Power injection – Διάχυση ισχύος

Load Control – Ελεγκτής φορτίου

Optimal Load Control - Βέλτιστος έλεγχος φορτίου

Optimal Generation Control – Βέλτιστος έλεγχος παραγωγής

Optimal Frequency Control – Βέλτιστος έλεγχος συχνότητας

High Voltage DC - Συνεχές Ρεύμα Υψηλής Τάσης

Economic Dispatch - Οικονομική Κατανομή

Optimal Power Flow - Βέλτιστης Ροής Ισχύος

Automatic Generation Control - Αυτόματος Έλεγχος Παραγωγής

Centralized – Κεντροποιημένες

Decentralized – Αποκεντρωμένες

Deviation – Απόκλιση

Oscillation – Ταλάντευση

Multimachine - Πολυμήχανών

Bus – Ζυγός

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές, με τρόπο συνεχή και ποιοτικό είναι ο στόχος όλων των εταιρειών που ασχολούνται με την προσφορά ηλεκτρισμού. Η ηλεκτρική ενέργεια είναι μία από τις πιο κοινές μορφές ενέργειας που χρησιμοποιείται σήμερα. Είναι καθαρή, βολική, και σχετικά εύκολη στην μεταφορά από τα κέντρα παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης, καθώς προσφέρει μεγάλη ευελιξία στην χρήση της. Το υλικό και οικονομικό κόστος της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαγορευτικό, για αυτό τον λόγο η παραγωγή πρέπει να καλύπτει συνεχώς την ζήτηση.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται συνήθως με ηλεκτρομηχανικά συστήματα, αποκλείοντας ένα μικρό μέρος των μονάδων παραγωγής, όπως τα ηλιακά πλέγματα και τις κυψέλες καυσίμου. Φυσικές πηγές, όπως χημική ενέργεια παγιδευμένη σε ορυκτά καύσιμα, χρησιμοποιούνται για να παράγουν μηχανική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται από τους καταναλωτές που συνδέονται με τα εθνικά δίκτυα φορτίου σε όλο το κόσμο. Συστήματα ισχύος είναι δίκτυα που αποτελούνται από συσκευές οι οποίες παράγουν, μεταφέρουν και διανέμουν ηλεκτρική ενέργεια στα κέντρα κατανάλωσης όπως οι βιομηχανίες, τα σπίτια και οι επιχειρήσεις [4].

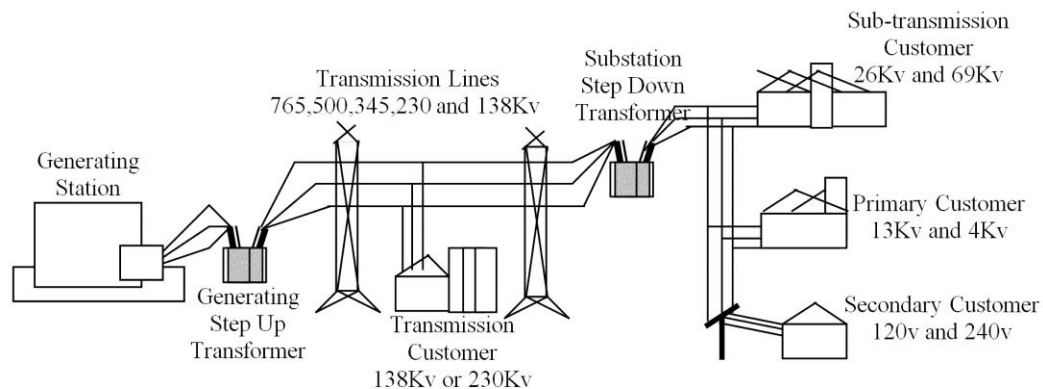
Η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να απεικονισθεί σε διάγραμμα σε σχέση με τον χρόνο, το οποίο καλείται καμπύλη φορτίου. Η καμπύλη αυτή παρουσιάζει διακυμάνσεις, επειδή η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλεται συνεχώς. Η ζήτηση φορτίου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες:

- i. Τον τύπο του καταναλωτή (οικία, μαγαζί, βιομηχανία)
- ii. Τις ηλεκτρικές συσκευές του καταναλωτή
- iii. Το κλίμα
- iv. Τον ανθρώπινο παράγοντα

Η πλειοψηφία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται σε τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, με εξαίρεση κάποιων εξειδικευμένων συστημάτων ισχύος που δεν βασίζονται σε μια τέτοια τροφοδότηση και μπορούν να βρεθούν στα αεροσκάφη, στα πλοία, σε ηλεκτρικά σιδηροδρομικά συστήματα και στα αυτοκίνητα. Η συχνότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έχει οριστεί σε 60Hz (Αμερική) ή 50Hz (Ευρώπη, Ασία, Αφρική και Αυστραλία).

Η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και μεταδίδεται στα τα φορτία μέσω γραμμών μεταφοράς. Στην πορεία αρχικά η τάση ανυψώνεται από μετασχηματιστές, από το πρακτικό επίπεδο των γεννητριών σε σχέση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα επίπεδο που να εξασφαλίζει την αποτελεσματική μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις (ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς). Κοντά στα φορτία, η τάση αυτή μειώνεται επίσης από μετασχηματιστές, σε μια τάση που είναι ωφέλιμη για τους καταναλωτές. Ένα μικρό, απλοποιημένο σύστημα ισχύος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1.

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται σε κέντρα παραγωγής με δύο βασικούς τρόπους: από γεννήτριες που περιστρέφονται από κάποια κινητήρια δύναμη ή με την άμεση μετατροπή από άλλη πηγή ενέργειας, όπως ηλιακή (φωτοβολταϊκά πάνελ) ή χημικές (κυψέλες καυσίμου). Η κινητήρια δύναμη που περιστρέφει τις γεννήτριες μπορεί να προέρχεται από μηχανές θερμότητας, όπως ατμοστρόβιλοι, αεριοστρόβιλοι, μηχανές εσωτερικής καύσης, που καίνε καύσιμο ντίζελ, φυσικό αέριο ή βενζίνη, ή στροβίλους που μετατρέπουν ενέργεια κατευθείαν από την πτώση νερού ή θερμότητας.



Σχήμα 1.1 Ένα δίκτυο συστήματος ισχύος [7]

Επιπλέον, γεωθερμία και ακόμη το φως του ήλιου (πιο σπάνια) χρησιμοποιείται για την ισχύ των κινητήρων θερμότητας [8]. Τα πιο συνηθισμένα ηλεκτρικά ενεργειακά πλάνα που χρησιμοποιήθηκαν σε όλο τον κόσμο είναι:

- Σταθμούς που καίνε ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο
- Πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής
- Υδροηλεκτρικών Σταθμών
- Γεωθερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Αιολικά πάρκα
- Φωτοβολταϊκά Πάρκα

Η ηλεκτρική ενέργεια μεταδίδεται από κέντρα παραγωγής σε κέντρα κατανάλωσης μέσω των ηλεκτρικών συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [14]. Συστήματα μετάδοσης αποτελούνται από γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, υποσταθμών ζεύξης του δικτύου και των υποσταθμών μετασχηματισμού τάσης. Τα περισσότερα συστήματα μετάδοσης είναι υψηλής τάσης, τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Τον τελευταίο καιρό, τεχνολογία υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC) χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα σε πολύ μεγάλες αποστάσεις (τυπικά εκατοντάδες χιλιόμετρα), ή σε υπόγεια καλώδια ενεργείας (συνήθως περισσότερο από 50 χιλιόμετρα).

Η ηλεκτρική ενέργεια διαβιβάζεται σε υψηλές τάσεις (110 kV ή παραπάνω) για να μειωθούν οι απώλειες ενέργειας κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς. Τα κύρια επίπεδα τάσης που χρησιμοποιούνται για τα συστήματα μετάδοσης είναι 110, 132, 138, 220, 345, 400, 500 και 750kV. Η ηλεκτρική ενέργεια συνήθως μεταδίδεται μέσω υπέργειων και υπόγειων γραμμών μεταφοράς ενέργειας. Ωστόσο, η υπόγεια μεταφορά ρεύματος έχει ένα σημαντικά υψηλότερο κόστος και μεγαλύτερους λειτουργικούς περιορισμούς, αλλά μερικές φορές υπάρχει ανάγκη να χρησιμοποιηθούν σε αστικές ή ευαίσθητες περιοχές. Το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ισχύος είναι το τελικό στάδιο της παράδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια από το σύστημα μετάδοσης στους καταναλωτές. Υποσταθμοί διανομής συνδέονται με το σύστημα μετάδοσης έτσι ώστε να μειώσουν την τάση μετάδοσης μεταξύ 1 kV και 100 kV με τη χρήση των μετασχηματιστών. Πρωτοβάθμιες γραμμές διανομής μεταφέρουν αυτό το μέσο τάσης για μετασχηματιστές διανομής που βρίσκονται κοντά στα κέντρα ζήτησης.

Μετασχηματιστές διανομής μειώνουν ξανά την τάση σε επίπεδα τα οποία χρησιμοποιούνται στις οικιακές συσκευές και συνήθως τροφοδοτούν πολλούς πελάτες μέσω δευτερευόντων γραμμών διανομής σε αυτό το επίπεδο τάσης. Για εμπορικούς και οικιακούς πελάτες γίνεται σύνδεση με γραμμές δευτερογενούς διανομής μέσω τις υπηρεσίας. Οι πελάτες που απαιτούν ένα πολύ μεγαλύτερο ποσό ενέργειας μπορεί να συνδεθούν άμεσα με το πρωτεύον επίπεδο διανομής.

Ο Διαχειριστής του συστήματος τροφοδοσίας εξασφαλίζει την κανονική και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος. Για να το επιτύχουμε αυτό, επεξεργαζόμαστε μία μεγάλη ποικιλία από μελέτες ανάλυσης όσο αφορά την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες χωρίζονται στις 2 παρακάτω κατηγορίες:

1. Ανάλυση σταθερής κατάστασης και
2. Ανάλυση Μεταβατικής κατάστασης.

Μια σύντομη περιγραφή των πιο σημαντικών εργασιών που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό και την λειτουργία του συστήματος τροφοδοσίας από τους μηχανικούς δίνεται παρακάτω [12,18,19]:

Βέλτιστη Ροή Ισχύος (OPF) Ανάλυση / Οικονομική Ανάλυση: Είναι μια αριθμητική ανάλυση της ροής τόσο του της ενεργής όσο και της άεργης ισχύος σε δίκτυα συστήματος ισχύος σε πραγματικές ή υποτιθέμενες συνθήκες. Η τάση και η ένταση στον ζυγό επίσης υπολογίζονται. Η OPF ανάλυση είναι πολύ χρήσιμη τόσο για την καθημερινή λειτουργία όσο και για την επέκταση και την ανάπτυξη ενός συστήματος ισχύος. Το υπό πρόβλημα που ασχολείται με τη βέλτιστη κατανομή του συνολικού φορτίου μεταξύ των μονάδων παραγωγής του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας καλείται Οικονομική Ανάλυση.

- Ανάλυση σφαλμάτων (FA): Είναι η ανάλυση, η οποία πραγματοποιείται με σκοπό την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος τροφοδοσίας σε περίπτωση σφάλματος. Ο υπολογισμός της τάσης και της έντασης του δικτύου υπό τέτοιες συνθήκες επιτρέπει στους μηχανικούς να επιλέγουν και να εγκαθιστούν την σωστή συσκευή προστασίας και έτσι να εξασφαλίζεται η αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

- Ανάλυση έκτακτης ανάγκης (CA): Είναι ένα από το «Ανάλυση Ασφαλείας» το οποίο εφαρμόζεται στον έλεγχο συστημάτων ισχύος. Σκοπός του είναι να αναλύσει το σύστημα ισχύος, προκειμένου να προσδιοριστούν οι υπερφορτώσεις, οι υπερτάσεις και τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν λόγω της «έκτακτης ανάγκης» (Μια μη φυσιολογική κατάσταση σε ένα δίκτυο συστήματος ισχύος, όπως ένα ξαφνικό άνοιγμα στην γραμμή μεταφοράς, ή σε μία γεννήτρια ενεργοποίησης κ.λπ.).

- Ανάλυση ευστάθειας (SA): Τα δίκτυα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυναμικά μη γραμμικά συστήματα που είναι συχνά εκτεθειμένα σε ξαφνικές, μικρές ή μεγάλες αλλαγές τόσο του φορτίου όσο και της παραγωγής.

SA είναι η εργασία που ασχολείται με τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όταν τέτοιες αλλαγές συμβαίνουν. Δεδομένου ότι η παρούσα διπλωματική εστιάζεται κυρίως στην ανάλυση και σταθερότητα ενός συστήματος ισχύος, είναι απαραίτητο για τον αναγνώστη να παραθέσουμε ένα σύντομο ορισμό για τους βασικούς όρους όσο αφορά την σταθερότητα, οι οποίες αναλύονται περαιτέρω και χρησιμοποιούνται στις επόμενες ενότητες της παρόντος εργασίας. Τα συστήματα τροφοδοσίας όταν εργάζονται σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας (σταθερή κατάσταση), οι γεννήτριες πληρούν δύο βασικές προϋποθέσεις:

1. Οι ρότορες να περιστρέφονται μεταξύ τους με την ίδια ταχύτητα, η οποία είναι επίσης γνωστή ως σύγχρονη ταχύτητα και,

2. Όταν οι παραγόμενες τάσεις οι οποίες είναι ημιτονοειδείς κυματομορφές παράγονται με την ίδια συχνότητα κρατώντας την ταχύτητα των γεννητριών συγχρονισμένη και την τάση να βρίσκεται στα επιθυμητά επίπεδα ονομάζεται σταθερότητα της συχνότητας και σταθερότητα τάσης, αντίστοιχα.

Όταν όλες οι γεννήτριες του συστήματος ισχύος λειτουργούν με συγχρονισμένη ταχύτητα οι διαφορές μεταξύ των φάσεων τους παραμένουν σταθερές.

Τα συστήματα τροφοδοσίας είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να ανακτούν και να διατηρούν αυτό τον συγχρονισμό μετά από μια μικρή αλλαγή στο φορτίο ή στην παραγωγή. Αυτή η ικανότητα ονομάζεται σταθερότητα της γωνίας του ρότορα. Η διατήρηση της σταθερότητας της γωνίας του ρότορα μετά από μία μεγάλη διαταραχή η οποία συμβαίνει σε ένα σύστημα ισχύος ονομάζεται παροδική σταθερότητα. Αυτές οι μεγάλες διαταραχές είναι υπεύθυνες για την παρουσία βλαβών στο δίκτυο του συστήματος ισχύος[17,59].

Επιπλέον, η χρήση των υπολογιστών έπαιξε σημαντικό ρόλο στην επέκταση και την ανάπτυξη των συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Οι επιστήμονες και οι μηχανικοί συστημάτων ισχύος έχουν αναπτύξει ισχυρά εργαλεία / εξομοιωτές προκειμένου να κάνουν την ανάλυση του συστήματος ισχύος απλούστερη και πιο ακριβής. Αρκετά συστήματα ελέγχου αναπτύχθηκαν επίσης κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών βοηθώντας τους μηχανικούς ισχύος να φτάσουν στην επίτευξη ταχύτερης δυνατότητας ελέγχου και ζωντανής παρακολούθησης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι

επιτεύξεις αυτές οδηγούν τα συστήματα ισχύος σε μια πιο αξιόπιστη, αποτελεσματική και ασφαλέστερη λειτουργία[3,2].

Σήμερα, τα συστήματα τροφοδοσίας συνεχίζουν να επεκτείνονται, λόγω κυρίως στην ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και της βιομηχανίας. Ωστόσο, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι πλέον πολύ κοντά στα όριά τους, και δημιουργείται η τεράστια ανάγκη για βελτίωσής τους. Οι επιστήμονες και οι μηχανικοί είναι σήμερα επικεντρωμένοι στο πώς να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα, την αξιοπιστία και την ευελιξία των συστημάτων παραγωγής ενέργειας ξεπερνώντας τα προβλήματα που θεσπίζονται με την παρόντα ταχεία ανάπτυξη. Σημαντικό έργο, τόσο επιστημονικά όσο και τεχνολογικά, πραγματοποιήθηκε στους τομείς των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, την προστασία, τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και τη σταθερότητα του συστήματος ισχύος. Αυτό το έργο θα έχει μεγάλη σημασία για τη διαμόρφωση των μελλοντικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με την εξομάλυνση της συχνότητας, σε περίπτωση που υπάρξει αστάθεια μεταξύ της ζήτησης και της παραγωγής.

1 ΚΙΝΗΤΡΟ ΚΑΙ ΔΗΛΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η μεγάλη επέκταση των υφιστάμενων δικτύων ισχύος, σε συνδυασμό με την διασύνδεση διαφόρων ανεξάρτητων δικτύων ισχύος [43], είναι ένα κρίσιμο θέμα το οποίο καλούνται να αντιμετωπίσουν οι μηχανικοί τα τελευταία χρόνια. Προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια, σε πολλές χώρες γίνονται σημαντικές συμφωνίες για διασύνδεση των εθνικών δικτύων τους. Αυτές οι διασυνδέσεις σε συνδυασμό με την νέα δομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας έκανε την ανάλυση των δικτύων συστημάτων ισχύος πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα, ενώ προκύπτει η αδιαμφισβήτητη ανάγκη για πιο βελτιωμένη λειτουργία του δικτύου, των υπηρεσιών και της ασφάλειας. Η κοινή δυσκολία που αντιμετωπίζουν τα τελευταία χρόνια τα συστήματα ισχύος, είναι να διατηρηθεί η ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και του φορτίου[5,36].

Σημαντικός παράγοντας στην ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης είναι ο έξυπνος έλεγχος της ζήτησης [58,61,62]. Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας στις τηλεπικοινωνίες μας δίνει την δυνατότητα, με πολύ χαμηλό κόστος, να συνδέσουμε σε ένα ενιαίο δίκτυο τις οικιακές ηλεκτρικές συσκευές. Αυτό θα μας δώσει την δυνατότητα σε ώρες αιχμής να απενεργοποιούμε κάποιες ηλεκτρικές συσκευές ελαφρύνοντας το δίκτυο. Με λίγα λόγια θα έχουμε τον έλεγχο του φορτίου, έτσι ώστε σε πραγματικό χρόνο να μπορούμε να ικανοποιήσουμε τις ανάγκες του συστήματος, αλλά απενεργοποιώντας κάποιες ηλεκτρικές συσκευές. Θα πρέπει να είμαστε πολύ προσεχτικοί όμως, επειδή ο έλεγχος πρέπει να γίνεται σε πραγματικό χρόνο, χωρίς καθυστερήσεις, αφού οποιαδήποτε καθυστέρηση θα μπορούσε να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα στην ισορρόπηση μεταξύ παραγωγής και φορτίου.

Μια ανισορροπία μεταξύ της παραγωγής και του φορτίου, προκαλεί, την απόκλιση των συχνοτήτων γύρω από την ονομαστική τους αξία. Αυτές οι ταλαντώσεις μπορεί να οδηγήσουν το σύστημα ισχύος σε αστάθειες και ανεπιθύμητες καταστάσεις, όπως διακοπές ρεύματος(blackout). Τα σημερινά συστήματα ισχύος, είναι εξοπλισμένα με τον κατάλληλο μηχανισμό έτσι ώστε να ξεπερνούν τέτοιες καταστάσεις και να διατηρούν την συχνότητα του δικτύου σφιχτά γύρω από την ονομαστική της αξία (π.χ. 50 ή 60 Hz). Αυτός ο μηχανισμός ονομάζεται συχνότητα ελέγχου / ρύθμισης και αποτελείται από τρία στάδια που λειτουργούν σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες [35].

Πρώτον, ο πρωτεύον έλεγχος συχνότητας (Droop Control) [36], ο οποίος είναι αποκεντρωμένος, μπορεί να εξισορροπήσει ξανά την ισχύ και να σταθεροποιήσει την συχνότητα, αλλά δεν μπορεί να αποκαταστήσει την ίδια ονομαστική συχνότητα. Λειτουργεί σε χρονική κλίμακα μέχρι και δέκατα του δευτερολέπτου, χρησιμοποιώντας ένα διοικητή για να ρυθμίσει την μηχανική ισχύ σε μια γεννήτρια, βάση της τοπικής απόκλισης συχνότητας.

Δεύτερον, ο δευτερεύον έλεγχος συχνότητας (που ονομάζεται Αυτόματη Ρύθμιση Παραγωγής, Automatic Generation Control (AGC)), ο οποίος λειτουργεί σε χρονική κλίμακα μέχρι και ένα λεπτό, προσαρμόζει τις επιθυμητές τιμές των διοικητών(governor) σε μια περιοχή ελέγχου, οδηγώντας την συχνότητα πίσω στην ονομαστική της αξία και η ισχύ μεταξύ της ζώνης παραμένει στην προγραμματισμένη της τιμή.

Τρίτον, οικονομική κατανομή [40] (Economic Dispatch ,ED), η οποία λειτουργεί σε ένα χρονικό διάστημα αρκετών λεπτών ή περισσότερο, προγραμματίζει τα επίπεδα εξόδου των γεννητριών λειτουργίας και την ισχύει μεταξύ των ζωνών.

Παρά το γεγονός ότι τα υφιστάμενα συστήματα ελέγχου συχνότητας είναι αξιόπιστα και λειτουργούν σωστά, εμφανίζουν σημαντικές αδυναμίες πολύ συχνά, όταν παρουσιάζονται μεγάλες διακυμάνσεις τόσο στην ηλεκτροπαραγωγή όσο και το φορτίο, καθιστώντας τα συστήματα ελέγχου συχνότητας, μη αποτελεσματικά. Οι συνεχείς αλλαγές στη συχνότητα του δικτύου έχουν επιβάλει την αδιαμφισβήτητη ανάγκη για μεγαλύτερες ποσότητες «στρεφόμενης εφεδρείας» και πιο ταχείας δράσης όσο αφορά τα συστήματα ελέγχου. Έτσι, οι ερευνητές είχαν κίνητρο να αναζητήσουν τρόπους για τη βελτίωση των συστημάτων αποκατάστασης της συχνότητας. Ως αποτέλεσμα, πολλές από τις επιστημονικές εργασίες που έγιναν κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών για τον έλεγχο της συχνότητας, οι ερευνητές έχουν προτείνει νέα συστήματα ελέγχου και αλγορίθμων για τη βελτίωση του ελέγχου συχνότητας, το AGC [48] και το ED [40].

Ωστόσο, η εμφάνιση των έξυπνων δικτύων [19,20], έξυπνων συσκευών και άλλων έξυπνων στοιχείων, όπως είναι οι αισθητήρες, καθώς και η ανάπτυξη των επικοινωνιών που μπορούν να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για τα συστήματα ισχύος και τα πιο αποτελεσματικά μέσα ελέγχου, έδωσαν στους επιστήμονες ένα επιπλέον κίνητρο για την έρευνα. Το έργο που έχει πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών είναι πολύ σημαντικό, όσο αφορά την τεχνολογία των έξυπνων συσκευών και ελέγχου, προκειμένου να συμμετάσχουν άμεσα στη λειτουργία του δικτύου.

Τα πρώτα αποτελέσματα σε αυτόν τον τομέα της έρευνας ήταν πολύ ελπιδοφόρα και έδειξαν ότι τα «έξυπνα φορτία» μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη βελτίωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο στην λειτουργία όσο και στην αποτελεσματικότητά τους [50].

Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι η βιβλιογραφία σχετικά με τον έλεγχο της συχνότητας και της οικονομικής κατανομής είναι τεράστια, όταν αναλύονται χωριστά, είναι σχετικά μικρή και πολύ πρόσφατη όσο αφορά τον συνδυασμό τους. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το συγκεκριμένο θέμα αποτελεί ένα ενδιαφέρον πρόβλημα για περαιτέρω έρευνα.

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι η μελέτη της παθητικότητας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ), η εξέταση παθητικότητας των προτεινόμενων μηχανισμών ελέγχου της συχνότητας μέσω διαγραμμάτων Nyquist και Bode. Καθώς επίσης και η μελέτη της επίδρασης των πιο πάνω μηχανισμών στην συμπεριφορά και ευστάθεια των ΣΗΕ.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Για τη σταθερότητα και την βέλτιστη ρύθμιση του πρωτεύον συχνότητας με την συμμετοχή του ελέγχου του φορτίου.

Στην δημοσίευση των J. Liu, B. H. Krogh, και B. E. Ydstie [69] γίνεται μελέτη για την μέθοδο του σχεδιασμού συστημάτων ελέγχου τα οποία θα ρυθμίζουν την κατανομή μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης όσο αφορά την πρωτεύον ρύθμιση συχνότητας σε συστήματα ισχύος τα οποία θα μπορούν να μας προσφέρουν ασυμπτωτική ευστάθεια και ισορροπία στην κατανομή. Έχουν επιβάλει μία κατάσταση παθητικότητας σε μεταβλητά δίκτυα παραγωγής ισχύος, παρέχοντας μία σταθερή κατάσταση (steady state conditions) για μια γενική κατηγορία όσο αφορά τον έλεγχο της δυναμικότητας μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης, εξασφαλίζοντας έτσι την επιτυχία για βελτιστοποίηση της ισορροπίας ενός προβλήματος σε ένα κατάλληλα κατασκευασμένο δίκτυο. Επίσης συζητείτε το πώς διάφορες κατηγορίες δυναμικής που χρησιμοποιήθηκαν σε πρόσφατες μελέτες, εντάσσονται στο πλαίσιο της εργασίας τους, δείχνοντας ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις αυτή η μέθοδος επιτρέπει σε λιγότερο συντηρητικές συνθήκες, βελτιστοποίηση και σταθερότητα. Απεικονίζουν τα αποτελέσματά τους με προσομοιώσεις που σχετίζονται με το IEEE 68 σύστημα ζυγών και παρατηρούν ότι τόσο η στατική όσο και η δυναμική ανταπόκριση της ζήτησης ταιριάζουν στο πλαίσιο τους, βελτιώνοντας παροδικά και σταθερά την κατάσταση, παρατηρήσεις οι οποίες βασίστηκαν στην σύγκριση των αποτελεσμάτων της συμπεριφοράς του ελέγχου όταν γίνεται μόνο στην παραγωγή.

Η μεγάλης κλίμακας ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εντός του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με τους μελετητές, αναμένεται να προκαλέσουν γρήγορες μεταβολές της παραγωγής, καθιστώντας ανισορροπίες στην ισχύ του συστήματος ολοένα και συχνότερα, αφού τα συμβατικά μέσα παραγωγής θα αδυνατούν να αντισταθμίσουν την ισορροπία. Η συμμετοχή του φορτίου στον έλεγχο θεωρείται ως πιθανή λύση σε αυτό το πρόβλημα, παρέχοντας γρήγορα απόκριση στις μεταβολές ισχύος. Οικιακές συσκευές, όπως μονάδες κλιματισμού, θερμοσίφωνες, και τα ψυγεία μπορούν να ελεγχθούν έτσι ώστε να ρυθμίζετε η συχνότητα και οι ανισορροπίες της ισχύς. Αν και η ιδέα χρονολογείται από τη δεκαετία του 1970, η προσοχή στην έρευνα γύρω από το θέμα έχει συγκεντρωθεί στον έλεγχο της ζήτησης, με ιδιαίτερη προσοχή να δίνεται στον πρωτεύον έλεγχο. Ο πρωτεύον έλεγχος (primary control) και το droop control λειτουργούν σε δέκατα δευτερολέπτου και είναι οι έλεγχοι οι οποίοι εξασφαλίζουν ότι η ζήτηση και η παραγωγή είναι συνέχεια σε ισορροπία. Λειτουργούν με το να προσαρμόζουν τα σημεία του κυβερνήτη με βάση τις τοπικές μεταβολές της συχνότητας και είναι εντελώς αποκεντρωμένοι έλεγχοι. Οι προσομοιώσεις και οι δοκιμές, έχουν δείξει την σκοπιμότητα της χρήσης της ελεγχόμενης ζήτησης στην διαδικασία του droop control. Επιπλέον οι προσομοιώσεις και οι δοκιμές έχουν δείξει ότι οι μετρήσεις τοπικών συχνοτήτων επαρκούν για έλεγχο του σήματος, όταν συμμετέχουν τα φορτία στον πρωτεύον έλεγχο.

Ένα ζήτημα της δίκαιης χρήσης των ελεγχόμενων φορτίων αυξάνεται εάν οι συσκευές πρέπει να χρησιμοποιηθούν ως μέσο ελεγχόμενης ζήτησης. Πρόσφατες μελέτες έχουν προσπαθήσει να αντιμετωπίσουν αυτό το ζήτημα με την επινόηση ενός συστήματος

ελέγχου που μπορεί να λύσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης και εγγυώνται δίκαιη κατανομή μεταξύ τους. Αυτή η προσέγγιση έχει μελετηθεί για τον πρωτεύον όσο και για τον δευτερεύον έλεγχο. Θεωρούν εδώ ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο πρωτεύον έλεγχος παρά ο δευτερεύον έλεγχος, προκειμένου να αποφευχθεί η περαιτέρω επικοινωνία που θα ήταν αναγκαία για να μια δίκαιη κατανομή.

Σύμφωνα με τους μελετητές, αυτό συμβαίνει επειδή είναι προφανές ότι μία συγχρονισμένη μεταβλητή είναι αναγκαία για την επίτευξη βελτιστοποίησης, επιτρέποντας σε όλους τους κόμβους να προσαρμόσουν την παραγωγή τους και να ελεγχθεί η ζήτηση έτσι ώστε να επιτευχθεί ίσο οριακό κόστος. Στον πρωτεύον έλεγχο, η απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτό το σκοπό, επιτρέποντας τον αποκεντρωμένο έλεγχο που πρέπει να επιτευχθεί.

Ωστόσο, στον δευτερεύον έλεγχο, όπου η συχνότητα απόκλισης επιστρέψει στο μηδέν, μια διαφορετική μεταβλητή πρέπει να χρησιμοποιηθεί για το συγχρονισμό. Μια κοινή προσέγγιση είναι να γίνεται ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των γειτονικών καλωδίων(bus) για να επιτευχθεί αυτό.

Σε αυτή την δημοσίευση, οι μελετητές θεωρούν ότι ένα μοντέλο δικτύου γίνεται από την περιγραφή μη γραμμικών εξισώσεων swing. Θεωρούν μια γενική κατηγορία δυναμικής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ελεγχόμενης ζήτησης, στην οποία θα επιβάλλουν τις κατάλληλες συνθήκες έτσι ώστε να επιτευχθεί σταθερότητα των σημείων ισορροπίας και η βελτιστοποίηση σε αυτά. Ισχυρίζονται ότι αυτό τους επιτρέπει να εγγραφούν, για μια μεγάλη ποικιλία της δυναμικής της παραγωγής και της ζήτησης, σύγκλιση σε μια κατανομή ισχύος που λύνει ένα κατάλληλα κατασκευασμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης, εξασφαλίζοντας έτσι δικαιοσύνη στην κατανομή αυτή. Η κατηγορία της δυναμικής ενσωματώνει συστήματα ελέγχου χρησιμοποιώντας μόνο τοπική συχνότητα ως είσοδο, και έχουν αποδείξει ότι αυτό είναι επαρκές για να πάρει τις σωστές αποφάσεις, έτσι ώστε να συγκλίνει σε μία γενική βελτιστοποίηση, επιτρέποντας έτσι τον έλεγχο της διανομής. Παρουσιάζουν κατά πόσο είναι εφικτή η εφαρμογή της δικής τους προσέγγισης, καταδεικνύοντας τις ποικίλες δυναμικές, που έχουν χρησιμοποιηθεί σε πρόσφατες ενδιαφέρουσες μελέτες, οι οποίες μπορούν να ενσωματωθούν στο δικό τους πλαίσιο, δείχνοντας έτσι ότι η ανάλυση που παρουσιάζουν, επιτρέπει, σε ορισμένες περιπτώσεις, για λιγότερο συντηρητικές συνθήκες σταθερότητα και βελτιστοποίηση.

Το μοντέλο δικτύου ισχύος περιγράφεται από μια γραφική παράσταση (N,E) όπου $N = \{1,2,\dots,|N|\}$ είναι το σύνολο των καλωδίων(buses) και $(E \subseteq N \times N)$ το σύνολο των γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τα καλώδια(buses).

Υπάρχουν δύο τύποι καλωδίων στο δίκτυο, της παραγωγής και των φορτίων. Η βασική διαφορά τους είναι ότι τα καλώδια παραγωγής έχουν μη μηδενική αδράνεια παραγωγής σε αντίθεση με τα καλώδια φορτίων.

Αντίστοιχα, μόνο τα καλώδια παραγωγής έχουν μη τετριμμένη δυναμική παραγωγή. Έστω $G = \{1,2,\dots,|G|\}$ και $L = \{|G| + 1,\dots, |N|\}$ είναι τα σύνολα καλωδίων της παραγωγής και του φορτίου έτσι ώστε $|G| + |L| = |N|$.

Επιπλέον, χρησιμοποιούν (i,j) για να υποδηλώσουν τη σχέση που συνδέει τα καλώδια i και j και υποθέτουν ότι η γραφική (N,E) κατευθύνεται με αυθαίρετη κατεύθυνση, έτσι ώστε εάν $(i,j) \in E$ τότε $(j,i) \notin E$ για κάθε $j \in N$, χρησιμοποιούν $i : I \rightarrow j$ και $k : j \rightarrow k$ για να υποδηλώσουν τα σύνολα των καλωδίων που είναι προκάτοχα ή διάδοχα του j καλωδίου αντίστοιχα. Επίσης υποθέτουν ότι (N,E) είναι συνδεδεμένο. Οι ακόλουθες παραδοχές που γίνονται για το δίκτυο:

- 1) Μέγεθος της τάσης bus είναι $|V_j| = 1$ p.u. για όλα τα $j \in N$.
- 2) Γραμμές $(i,j) \in E$ είναι χωρίς απώλειες και χαρακτηρίζονται από τους susceptances $B_{ij} = B_{ji} > 0$.
- 3) Οι ροές άεργος ισχύς δεν επηρεάζουν την γωνία και την συχνότητα στην φάση της τάσης των καλωδίων.

Το συνολικό κόστος κατά OSLC στη συνέχεια αθροίζει όλες τις προαναφερόμενες δαπάνες, και το πρόβλημα είναι να επιλέξει τα διανύσματα p^M, d^C και d^u ελαχιστοποιώντας αυτό το συνολικό κόστος που υπόκεινται στην επίτευξη ισορροπίας ισχύος,

$$\min_{p^M, d^C, d^u} \sum_{j \in G} (C_j(p_j^M)) + \sum_{j \in N} \left(C_{d_j}(d_j^C) + \int_0^{d_j^u} \hat{h}_j^{-1}(z) dz \right) \quad (2.1.1)$$

$$\text{subject to } \sum_{j \in G} p_j^M = \sum_{j \in N} (d_j^C + d_j^u + p_j^L) \quad (2.1.2)$$

Ο περιορισμός σε αυτό το πρόβλημα αντιπροσωπεύει τη διατήρηση της ισχύος με το να διευκρινίζει το άθροισμα όλων των συχνοτήτων ανεξάρτητα και η συχνότητα που εξαρτάται από τα φορτία συνοδεύεται από την συνολική παραγωγή.

Μέσα στην δημοσίευση, έχει εξεταστεί το πρόβλημα του σχεδιασμού καταναμημένης παραγωγής και της ζήτησης στα συστήματα ελέγχου σχετικά με την πρωτεύων ρύθμιση της συχνότητας στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε η ασυμπτωτική ευστάθεια να είναι εγγυημένη, εξασφαλίζοντας παράλληλα την βέλτιστη κατανομή της ισχύος. Έχει παρουσιαστεί ένα πλαίσιο παθητικών δικτύων το οποίο παρέχει μια συστηματική μέθοδο για να δείξει σταθερότητα σε μία ευρεία κατηγορία της παραγωγής και του φορτίου. Επιπλέον, έχουν επιβληθεί συνθήκες σταθερής κατάστασης στα συστήματα παραγωγής και ελέγχου ελεγχόμενης ζήτησης έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι η ενέργεια που παράγεται / καταναλώνεται είναι η λύση σε ένα κατάλληλα κατασκευασμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης του δικτύου, επιτρέποντας έτσι και τη δίκαιη κατανομή ισχύος, που πρέπει να διασφαλίζεται. Η προσομοίωση του συστήματος IEEE 68 επαληθεύει τα αποτελέσματά. Ενδιαφέρουσα δυνατότητα παρατάσεων στην ανάλυσή περιλαμβάνει την

ενσωμάτωση δυναμικής τάσης καθώς και πιο προηγμένα μοντέλα για τα φορτία, όπου λαμβάνεται υπόψη η αλλαγή της συμπεριφοράς.

2.2 Κατανομή ελέγχου πρωτεύον συχνότητας μέσω πολύ-τερματικών συστημάτων μετάδοσης HVDC.

Στην δημοσίευση των Zhao, C., Torcu, U., Li, N., και Low, S [74] παρουσιάζουν έναν αποκεντρωμένο ελεγκτή ο οποίος μπορεί να διαμοιράσει τον πρωτεύον AC έλεγχο συχνότητας μέσω ενός πολύ-τερματικού δικτύου συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC). Με τη χρήση των συναρτήσεων του Lyapunov, ο ελεγκτής της συχνότητας που προτείνουν φαίνεται να σταθεροποιεί την ισορροπία στο σύστημα κλειστού βρόχου που αποτελείται από τα διασυνδεδεμένα AC και HVDC δίκτυα, δίνοντας θετική απόδοση του ελεγκτή. Ο στατικός έλεγχος σφάλματος, ο οποίος προκύπτει από τον αναλογικό ελεγκτή, ποσοτικοποιείται και οριοθετείται από την ανάλυση της ισορροπίας του συστήματος κλειστού βρόχου. Ο προτεινόμενος ελεγκτής εφαρμόζεται σε ένα δοκιμαστικό πλέγμα το οποίο αποτελείται από τρεις ασύγχρονες περιοχές AC οι οποίες αλληλοσυνδέονται μαζί με ένα πλέγμα HVDC, και η αποτελεσματικότητά του έχει επικυρωθεί μέσω προσομοίωσης.

Μία μεγάλη πρόκληση στα σημερινά συστήματα διανομής ισχύος, είναι η μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστες απώλειες. Η ισχυρή αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αύξησε το χάσμα μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Αυτή είναι μια κινητήρια δύναμη πίσω από την μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. Ένα τέτοιο παράδειγμα μεγάλης κλίμακας off-shore είναι τα αιολικά πάρκα, τα οποία συχνά απαιτούν δύναμη η οποία πρέπει να διαβιβάζεται στα καλώδια σε μεγάλες αποστάσεις μέσα από το δίκτυο ισχύος. Υψηλή τάση συνεχούς ρεύματος (HVDC) μεταφοράς ισχύος είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για υπεραστικές μεταφορές ισχύος. Το νεκρό σημείο, δηλαδή το σημείο όπου το κόστος για την συνολική κατασκευή και λειτουργία των HVDC γραμμών και AC γραμμών είναι ίσο, όπου συνήθως είναι 500-800 km. Ωστόσο, για τα καλώδια, το νεκρό σημείο είναι συνήθως μικρότερο από 50 km. Η αυξημένη χρήση του HVDC για μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος υποδηλώνει ότι τα μελλοντικά συστήματα μεταφοράς HVDC είναι πιθανό να αποτελούνται από πολλαπλά τερματικά που θα συνδέονται με HVDC γραμμές μεταφοράς. Τέτοια συστήματα αναφέρονται ως Multi-terminal HVDC (MTDC) στην βιβλιογραφία. Το κύριο τεχνικό εμπόδιο που πρέπει να ξεπεραστεί προκειμένου να υλοποιηθεί το σύστημα MTDC είναι η ανάπτυξη ενός διακόπτη DC. Υπάρχουν μερικές προηγμένες ιδέες για την υλοποίηση αυτής της συσκευής στο εγγύς μέλλον.

Η διατήρηση επαρκούς τάσης DC είναι το πιο σημαντικό πρακτικό πρόβλημα ελέγχου για τη μετάδοση HVDC. Εάν η τάση DC αποκλίνει πάρα πολύ μακριά από την ονομαστική τάση λειτουργίας, ο εξοπλισμός θα μπορούσε να υποστεί βλάβη, με αποτέλεσμα την απώλεια της ικανότητας μεταφοράς ρεύματος και το υψηλό κόστος.

Πολλά υπάρχοντα δίκτυα μεταφοράς AC είναι συνδεδεμένα μέσω συνδέσμων συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC), που χρησιμοποιούνται συνήθως για μεταφορά μεγάλων μεγεθών ισχύος μεταξύ των περιοχών AC. Η γρήγορη λειτουργία των μετατροπέων DC θα

επιτρέπει επίσης την ρύθμιση της συχνότητας σε ένα από τα συνδεδεμένα δίκτυα AC, μέσω του συνδέσμου HVDC. Ένα πρακτικό παράδειγμα αυτού του τρόπου, είναι το νησί Γκότλαντ της Σουηδίας, το οποίο είναι συνδεδεμένο με το κύριο σκανδιναβικό δίκτυο, μόνο μέσω ενός HVDC καλωδίου. Ωστόσο, δεδομένου ότι το κύριο δίκτυο Nordic AC έχει μεγαλύτερη αδράνεια από το δίκτυο AC του Gotland, η επίδραση της ρύθμισης της συχνότητας για την κύριο δίκτυο θα είναι αμελητέα.

Με τη σύνδεση πολλών δικτύων AC σε ένα σύστημα MTDC, η ρύθμιση του primary control αποθεματικά μπορεί να μοιραστεί, έτσι μειώνεται η ανάγκη για ρύθμιση της συχνότητας στα ατομικά συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Οι αλγόριθμοι ελέγχου κατανομής έχουν εφαρμοστεί για να μοιράζουν το primary frequency control αποθεματικά, για την ασύγχρονη μετάδοση AC συστήματος, το οποίο είναι συνδεδεμένο σε ένα σύστημα MTDC. Ωστόσο, ο προτεινόμενος ελεγκτής απαιτεί ένα slack bus για να ελέγξει την τάση DC, πετυχαίνοντας τον σκοπό της κατανομής του primary frequency control αποθεματικά. Ελεγκτές διανομής για secondary voltage control των MTDC συστημάτων προτείνονται, οι οποίοι δεν βασίζονται σε ένα slack bus. Οι ελεγκτές όμως βασίζονται στην παρουσία μιας επικοινωνίας μεταξύ του δικτύου. Ενώ ένα δίκτυο επικοινωνίας θα μπορούσε ήδη να έχει παρουσιαστεί, εισάγετε το θέμα των χρονικών καθυστερήσεων, λόγω των μεγάλων γεωγραφικών αποστάσεων σε συστήματα MTDC, έχοντας ένα ορισμένο κίνδυνο διακοπής. Οι επιπτώσεις των καθυστερήσεων έχουν αναλυθεί, και έχουν βρεθεί να υποβαθμίζουν σοβαρά την απόδοση και να αποσταθεροποιούν το σύστημα ισχύος. Ένας ελεγκτής κατανομής χωρίς την ανάγκη ενός slack bus, έχει προταθεί από άλλες σχετικές μελέτες. Η σταθερότητα της ισορροπίας είναι εγγυημένη όταν υπάρχει απουσία καθυστερήσεων επικοινωνίας.

Ωστόσο, η δυναμική τάση του συστήματος HVDC παραμελείται. Επιπλέον, η εφαρμογή του ελεγκτή δεν είναι τόσο ρεαλιστική, όσο ο κάθε τοπικός ελεγκτής που χρειάζεται να έχει πρόσβαση σε DC τάσεις από όλους τους τερματικούς σταθμούς. Ο αποκεντρωμένος έλεγχος χρησιμοποιείται για να μοιράσει τον primary frequency control αποθεματικά. Υπάρχουν μελέτες στις οποίες δεν γίνεται ανάλυση της σταθερότητας του συστήματος κλειστού βρόχου. Άλλες μελέτες εγγυούνται την σταθερότητα της ισορροπίας υπό τον όρο ότι οι συνδεδεμένες περιοχές AC έχουν συγκεκριμένες παραμέτρους. Σε άλλες μελέτες ο βέλτιστος αποκεντρωμένος έλεγχος για συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος που συνδέονται με τα συστήματα HVDC συμπεριλαμβάνεται. Σε όλες τις προαναφερθείσες αναφορές, η δυναμική τάση του συστήματος HVDC έχει παραμεληθεί.

Λόγω των εγγενών δυσκολιών του χρόνου καθυστέρησης, προτείνουν αποκεντρωμένο αναλογικό ελεγκτή για τη διανομή του primary frequency control αποθεματικά, ο οποίος βασίζεται μόνο σε τοπικές μετρήσεις. Ο ελεγκτής φαίνεται να διανέμει τον primary frequency control αποθεματικά μεταξύ των συνδεδεμένων συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), διατηρώντας παράλληλα επαρκή τάση DC. Αντιθέτως όμως σε άλλες μελέτες έχει αποδειχτεί ότι η ισορροπία των συστημάτων κλειστού βρόχου είναι σε γενικό επίπεδο ασυμπτωτικά σταθερή για οποιοδήποτε σύνολο παραμέτρων του συστήματος και για οποιαδήποτε απόδοση του ελεγκτή, χρησιμοποιώντας τα επιχειρήματα Lyapunov.

Υπάρχουν, επίσης, μοντέλα δυναμικής τάσης από συστήματα MTDC, τα οποία αποτελούνται από πολλαπλές γεννήτριες επεκτείνοντας τα αποτελέσματα για συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) σε προσομοιώσεις. Εξαιτίας των εγγενών ιδιοτήτων των αναλογικών ελεγκτών, οι τιμές της σταθερής κατάστασης των τάσεων και οι τιμές των συχνοτήτων θα αποκλίνουν από τις ονομαστικές τους τιμές. Έχουν ποσοτικοποιηστεί αυτές οι αποκλίσεις μέσω των αποδείξεων των upper bounds.

Η δυναμική του μετατροπέα i δίνεται από:

$$C_i \dot{V}_i = - \sum_{j \in N_i} \frac{1}{R_{ij}} (V_i - V_j) + I_i^{inj}, \quad (2.2.1)$$

Συνδυάζοντας τη δυναμική τάση (2.2.1), τη δυναμική συχνότητα, τον ελεγκτή τάσης και την σχέση ισχύς ρεύματος που αναφέρονται στη συγκεκριμένη μελέτη, παίρνουμε την ακόλουθη δυναμική κλειστού βρόχου:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} -M(K^\omega + K^{droop}) & MK^V \\ \frac{1}{V^{nom}} EK^\omega & -E \left(L_R + \frac{K^V}{V^{nom}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ V \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} M((K^\omega + K^{droop})\omega^{ref} \mathbf{1}_{n \times 1} - K^V V^{Vref}) \\ E \left(\frac{1}{V^{nom}} K^V V^{ref} - \frac{\omega^{ref}}{V^{nom}} K^\omega \mathbf{1}_{n \times 1} \right) \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} M(p^m + p^{nom} - p^{inj,nom}) \\ \frac{1}{V^{nom}} E p^{inj,nom} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

Με την χρήση της εξίσωσης (2.2.1), το αποκεντρωμένο σύστημα ελέγχου MTDC που δίνεται από την εξίσωση (2.2.2), μπορεί να γραφεί ως:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M(K^\omega + K^{droop}) & MK^V \\ \frac{1}{V^{nom}} EK^\omega & -E \left(L_R + \frac{K^V}{V^{nom}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} MP^m \\ 0_{n \times 1} \end{bmatrix} \quad (2.2.3)$$

Ας υποθέσουμε ότι ο πίνακας του συστήματος (2.2.3), A , είναι πλήρους τάξης, η οποία διασφαλίζει ότι η μοναδική ισορροπία του (2.2.3) υπάρχει. Δηλώνει ότι $x_0 = [\omega_0^T, V_0^T]^T$. Καθορίζει $\bar{x} \triangleq [\bar{\omega}^T, \bar{V}^T]^T = [\hat{\omega}^T, \hat{V}^T]^T - [\omega_0^T, V_0^T]^T$. Τώρα:

$$\dot{x} = A\bar{x} \quad (2.2.4)$$

με την προέλευση και τη μοναδική ισορροπία του παραπάνω δυναμικού συστήματος. Είμαστε τώρα έτοιμοι να δείξουμε τα κύρια αποτελέσματα της σταθερότητας του παρόντος τμήματος.

Θεώρημα 1: Η ισορροπία του αποκεντρωμένου MTDC συστήματος ελέγχου δίνεται από την εξίσωση 2.2.3 και σε γενικό επίπεδο είναι ασυμπτωτικά ευσταθές.

Απόδειξη: Εξετάζουμε πρώτα την συνάρτηση Lyapunov

$$W(\bar{\omega}, \bar{V}) = \frac{1}{2} \bar{\omega}^T K^\omega (K^V)^{-1} M^{-1} \bar{\omega} + \frac{V^{nom}}{2} \bar{V}^T C \bar{V}, \quad (2.2.5)$$

Όπου $C = diag([C_1, \dots, C_n])$. Ξεκάθαρα $W(\bar{\omega}, \bar{V})$ είναι εξ ορισμού θετικό και ακτινικά απεριόριστο. Διαφοροποίηση της εξίσωσης (2.2.5) με ως προς τον χρόνο κατά μήκος της τροχιάς (2.2.4), παίρνουμε:

$$\begin{aligned} \dot{W}(\bar{\omega}, \bar{V}) &= \bar{\omega}^T K^\omega (K^V)^{-1} M^{-1} \dot{\bar{\omega}} + V^{nom} \bar{V}^T E \dot{\bar{V}} + \bar{\eta}' \dot{\bar{\eta}}' \\ &= \bar{\omega}^T \left(-K^\omega (K^V)^{-1} (K^\omega + K^{droop}) \bar{\omega} + K^\omega \bar{V} \right) \\ &\quad + \bar{V}^T \left(K^\omega \bar{\omega} - (V^{nom} \mathcal{L}_R + K^V) \bar{V} \right) \\ &= -\bar{\omega}^T \left(-K^\omega (K^V)^{-1} (K^\omega + K^{droop}) \bar{\omega} \right. \\ &\quad \left. + 2\bar{\omega}^T K^\omega \bar{V} - \bar{V}^T (V^{nom} \mathcal{L}_R + K^V) \bar{V} \right) \\ &= - \begin{bmatrix} \bar{\omega}^T & \bar{V}^T \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} K^\omega (K^V)^{-1} (K^\omega + K^{droop}) & -K^\omega \\ -K^\omega & K^V \end{bmatrix}}_{\triangleq Q_1} \begin{bmatrix} \bar{\omega} \\ \bar{V} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

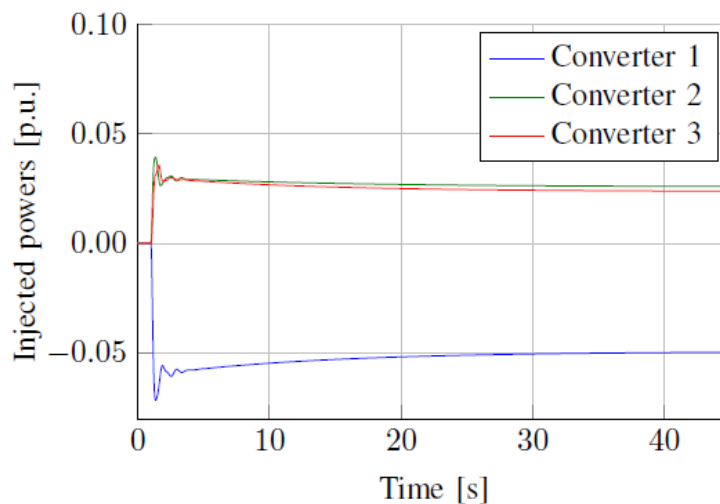
Ξεκάθαρα $\dot{W}(\bar{\omega}, \bar{V}) < 0$, αν ο συμμετρικός πίνακας Q_1 είναι ορισμένο θετικός. Εφαρμόζοντας την κατάσταση συμπλήρωσης Schur για θετική οριστικότητα, Q_1 είναι θετικά ορισμένη αν και μόνο αν:

$$\begin{aligned} K^\omega (K^V)^{-1} (K^\omega + K^{droop}) - K^\omega (K^V)^{-1} K^\omega & \quad (2.2.7) \\ = K^\omega (K^V)^{-1} K^{droop} & > 0. \end{aligned}$$

Ως εκ τούτου, το Q_1 είναι πάντα θετικά ορισμένο, και ως εκ τούτου $\dot{W}(\bar{\omega}, \bar{V}) < 0$ που ολοκληρώνει την απόδειξη.

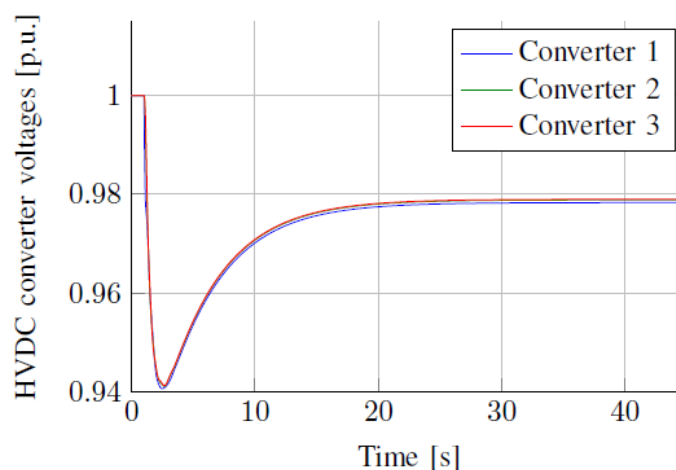
Στο έγγραφο αυτό έχουν προτείνει ένα αποκεντρωμένο έλεγχο για την κοινή χρήση του πρωτεύον ελέγχου συχνότητας σε ασύγχρονα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος τα οποία συνδέονται μέσω ενός συστήματος MTDC. Ο ελεγκτής χρησιμοποιεί την τοπική συχνότητα στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος και η τοπική τάση DC ως είσοδο για να

ελέγχουν επιδράσεις της ισχύς στο δίκτυο MTDC. Η προκύπτουσα ισορροπία του συστήματος κλειστού βρόχου φαίνεται να είναι σε γενικό επίπεδο ασυμπτωτικά ευσταθές χρησιμοποιώντας Lyapunov επιχειρήματα, ανεξάρτητα από τις παραμέτρους του ελεγκτή. Έχει επίσης, αποδειχθεί ότι οι τάσεις DC και AC συχνότητες στην ισορροπία είναι κοντά στην ονομαστική τους αξία. Επιπλέον, η παραγόμενη ισχύς από τον κύριο έλεγχο συχνότητας έχει περίπου κατανεμηθεί δίκαια μεταξύ των περιοχών AC. Ο προτεινόμενος ελεγκτής προσομοιώθηκε σε ένα δοκιμαστικό σύστημα που αποτελείται από 3 AC περιοχές σε συνδυασμό με ένα πλέγμα MTDC έτσι ώστε να αποδειχτεί η αποτελεσματικότητά του. Αυτή η μελέτη αποτελεί ένα πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση να αυξηθεί η ευελιξία, όπου μελλοντικά δίκτυα MTDC θα παρέχουν αυτή την ευελιξία στα συνδεδεμένα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος.



Διάγραμμα 2.1: Επίπεδα ελεγχόμενης ισχύς στους μετατροπείς

Figure 4. Injected power levels at the converters.



Διάγραμμα 2.2: Τάσεις των μετατροπέων DC

2.3 Dissipative Hamiltonian Realization and Energy-Based L_2 -Disturbance Attenuation Control of Multimachine Power Systems.

Η δημοσίευση των J. van der Schaft και B. M. Maschke [64] θεωρεί ότι L_2 είναι η διαταραχή εξασθένησης των πολυμήχανων (multimachine) των συστημάτων ισχύος που γίνεται μέσω διασκορπισμού της υλοποίησης pseudo-Hamiltonian των συστημάτων. Αρχικά το σημείωμα εκφράζει το σύστημα των πολυμήχανων (multimachines) ως σύστημα Hamiltonian. Στη συνέχεια το σημείωμα ερευνά τον σχεδιασμό ελέγχου βάσης L_2 και την ενέργεια εξασθένησης της διαταραχής (disturbance attenuation) των πολυμήχανων των συστημάτων ισχύος και προτείνει αποκεντρωμένη στρατηγική ελέγχου. Η προσομοίωση σε ένα σύστημα αποτελούμενο από έξι μηχανές δείχνει ότι η στρατηγική ελέγχου επίτευξης εξασθένησης διαταραχών L_2 είναι πολύ αποτελεσματική. Πρόσφατα, η μέθοδος λειτουργίας Hamiltonian έχει καταρτίσει σημαντική προσοχή στον έλεγχο των συστημάτων ισχύος η οποία είχε πολλές επιτυχίες. Η μέθοδος σε γενικές γραμμές μπορεί να χρησιμοποιήσει επιμελώς τις εσωτερικές ιδιότητες των συστημάτων ισχύος για σχεδιασμό ελέγχων, και οι έλεγχοι που έχουν σχεδιαστεί με αυτή την μέθοδο είναι απλοί σε μορφή, εύκολοι και αποτελεσματικοί στην λειτουργία. Είναι γνωστό ότι το βασικό βήμα για τη χρήση της μεθόδου Hamiltonian, για να γίνει διερεύνηση των προβλημάτων του ελέγχου, είναι το σύστημα να εκφραστεί σαν dissipative Hamiltonian, δηλαδή να ολοκληρωθεί η υλοποίηση Hamiltonian (DHR). Με τη μέθοδο Hamiltonian πολλά σημαντικά επιτεύγματα έχουν ληφθεί για infinite-bus συστήματα, μίας μηχανής, ενώ για συστήματα ισχύος πολυμήχανων η κατάσταση είναι εντελώς διαφορετική. Το μοντέλο δομής των πολυμήχανων είναι τόσο περίπλοκο όπου το πρόβλημα του συστήματος DHR έχει γίνει ένα ανοιχτό puzzle.. Πρόσφατα, έχουν γίνει ορισμένες μελέτες για το DHR των συστημάτων ισχύος πολυμήχανων. Ωστόσο το DHR του συστήματος πολυμήχανων παραμένει ένα μακρύ άλτο πρόβλημα, το οποίο θεωρείται σημείο συμφόρησης του σχεδιασμού του ελέγχου της βάσης ενέργειας των συστημάτων πολυμήχανων.

Το σημείωμα αυτό, βασίζεται σε ένα ευρέως χρησιμοποιημένο μοντέλο των συστημάτων ισχύος των πολυμήχανων, έχοντας αποκτήσει μια μορφή DHR των συστημάτων ισχύος πολυμήχανων χρησιμοποιώντας τεχνική αξιολόγησης (Prefeed back). Σε αντίθεση με τον παραδοσιακό τρόπο, εξετάζουμε άμεσα την αξιολόγηση της υλοποίησης Hamiltonian και στη συνέχεια προσαρμόζουμε το σημείο λειτουργίας στο προκαθορισμένο σημείο. Η νέα προσέγγιση μπορεί να περιγραφεί απλά ως εξής: Προσαρμογή στο σημείο ανατροφοδότησης -DHR. Στη συνέχεια σαν εφαρμογή της DHR, το σημείωμα ερευνά το σχεδιασμό του ελέγχου της βάσης ενέργειας της L_2 διαταραχής εξασθένησης των συστημάτων ισχύος πολυμήχανων και προτείνει αποκεντρωμένη στρατηγική ελέγχου. Η προσομοίωση σε ένα σύστημα αποτελούμενο από έξι μηχανές δείχνει ότι η στρατηγική ελέγχου επίτευξης εξασθένησης διαταραχών L_2 είναι πολύ αποτελεσματική.

2.4 Πλαίσιο Ανάλυσης Σταθερότητας

Στην δημοσίευση των A. Kasis, E. Devane, και I. Lestas το μοντέλο δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται είναι πολύ απλό, προκειμένου να διευκολύνει την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε από τους ερευνητές. Το μοντέλο αυτό, εκπροσωπείται από τις εξισώσεις swing ως εξής:

$$M_j \Delta \dot{\omega}_j = P_{m,j} - P_{e,j} - D_j \Delta \omega_j \quad (2.4.1)$$

$$\Delta \delta_j = \Delta \omega_j \quad (2.4.2)$$

Ένα βασικό δομικό χαρακτηριστικό που χρησιμοποιείται συχνά στην ανάλυση των συστημάτων μεγάλης κλίμακας είναι η έννοια της παθητικότητας. Η παθητικότητα μπορεί να διευκολύνει την ανάλυση ευστάθειας, ενώ επιτρέπει την ενσωμάτωση πιο προηγμένης δυναμικής. Η εφαρμογή της παθητικότητας εντός της ανάλυσης συστημάτων ισχύος χρονολογείται από το [61], όπου ο H.Miyagi et al. μελέτησε την δυναμική εξέλιξη 2.4.2 χρησιμοποιώντας ένα πρώτο μοντέλο, για τη δυναμική τάση και χρησιμοποίησε διάφορες τεχνικές οι οποίες ήταν βασισμένες στην παθητικότητα για να εξάγει σταθερότητα. Πιο πρόσφατα, η μελέτη της παθητικότητας στα συστήματα ισχύος έχουν βασικά χρησιμοποιήσει το πλαίσιο των συστημάτων port-Hamiltonian (που περιγράφεται στο [62]). Παραδείγματα αυτής της προσέγγισης μπορούν να βρεθούν και σε [63-66].

Δύο επιπλέον ενδιαφέρουσες αναλύσεις, οι οποίες κατέδειξαν ότι οι προσεγγίσεις που βασίζονται σε παθητικότητα μπορεί επίσης να εφαρμοστούν για να μελετηθεί η συμπεριφορά της εξίσωσης swing υπό δυναμικά συστήματα ελέγχου για ελεγχόμενη παραγωγή, μπορεί να βρεθούν στο [67-68]. Και τα δύο έργα θεωρούν μηδενικό τον έλεγχο της ζήτησης και της γραμμικής απόσβεσης. Ο προηγούμενος έκανε χρήση των εξισώσεων παθητικότητας για να αποδείξει τη σταθερότητα όταν η γραμμική μορφή 2.4.2 συνδέεται με τον ελεγκτή

$$P_i^M = -K_i(s) \omega_i \quad (2.4.3)$$

για οποιαδήποτε θετική πραγματική συνάρτηση μεταφοράς $K_i(s)$. Αυτό αντιστοιχεί σε γενίκευση του κλασικού droop control για να επιτραπούν αυθαίρετοι παθητικοί έλεγχοι της παραγωγής.

Στο τελευταίο χαρτί περιλαμβάνεται επίσης δυναμική τάση πρώτης τάξης και χρησιμοποιούνται παρόμοια επιχειρήματα παθητικότητας για να αποδειχτεί ασυμπτωτική σταθερότητα της δυναμικής συχνότητας 2.4.2 υπό την κατηγορία των droop controls:

$$P_i^M = -K_i^\omega \omega_i - K_i^V (V_i - V_i^{nom}) \quad (2.4.4)$$

με σταθερές $K_i^\omega, K_i^V > 0$, σε μοντέλα όπου η ρύθμιση της συχνότητας μοιράζετε

μεταξύ αρκετών υποδίκτυα (subgrids) AC διασυνδεδεμένα σε DC συνδέσεις.

Όπως θα συζητήσουμε στις επόμενες παραγράφους, οι προσεγγίσεις της παθητικότητας προσφέρουν εξαιρετικό δυναμικό για την εξασφάλιση σύγκλισης στο (2.4.2) κάτω από

ευρείες κατηγορίες της πρωτοβάθμιας συχνότητας δυναμικού ελέγχου. Περαιτέρω, όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με κατάλληλες προϋποθέσεις εισόδου-εξόδου σε δυναμικά συστήματα, μπορούν να οδηγήσουν σε ερμηνεία βελτιστοποίησης όσο αφορά το σημείο ισορροπίας που επιτεύχθηκε. Ένα τέτοιο ευέλικτο πλαίσιο παθητικότητα εισήχθη στο [69], και περιγραφεί εκτενώς στο [70,71].

Έγιναν μελέτες σε δυναμικά συστήματα με είσοδο $u(t) \in \mathbb{R}$, κατάσταση $x(t) \in \mathbb{R}$ και εξόδου $y(t) \in \mathbb{R}$ με μια κατάσταση πραγματικού χώρου της μορφής

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (2.4.5)$$

$$y = g(x, u) \quad (2.4.6)$$

Όπου $f = \mathbb{R}^m \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$ είναι τοπικά Lipschitz και $g = \mathbb{R}^m \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ είναι συνεχής. Υποθέτουν ότι το προαναφερθέν σύστημα (2.4.5) πληροί τις ακόλουθες ιδιότητες:

- **Ισορροπία:** Δεδομένου οποιαδήποτε σταθερή είσοδο $u(t) = \bar{u} \in \mathbb{R}$, υπάρχει μια σταθερή *unique* $\bar{x} \in \mathbb{R}^m$ τέτοιο ώστε $f(\bar{x}, \bar{u}) = 0$. Δηλαδή, οποιαδήποτε σταθερή είσοδο (2.4.5) πρέπει να παράγει μία μοναδική σταθερή κατάσταση. Καθορίστε τη στατική είσοδο κατάστασης στον χαρακτηριστικό χάρτη από $k_x: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$ έτσι ώστε $k_x(\bar{u})$. Ομοίως καθορίζουν τη στατική εισροών-εκροών στον χαρακτηριστικό χάρτη ως $k_y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ έτσι ώστε $k_y(\bar{u}) = g(k_x(\bar{u}), \bar{u})$.

- **Σύγκλιση:** Δεδομένου κάθε σταθερά \bar{u} υπάρχει μια ανοιχτή γειτονιά $X_0 \subseteq \mathbb{R}^m$ της $k_x(\bar{u})$ έτσι ώστε κάθε φορά που η είσοδος ικανοποιεί το $\lim_{t \rightarrow \infty} (u(t) - \bar{u}) = 0$ και η αρχική κατάσταση να ικανοποιεί $X(0) \in X_0$, ισχύει ότι $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = k_x(\bar{u})$. Δηλαδή, η κατάσταση είναι σε τοπικό επίπεδο ασυμπτωτικά σταθερή για εισόδους που συγκλίνουν προς τη συνεχή είσοδο.

Στην συνέχεια, υιοθετήθηκε από τους συγγραφείς το παρακάτω δυναμικό σύστημα, το οποίο είναι παρόμοιο με τα πρόσφατα έργα:

$$\dot{\eta}_{ij} = \omega_i - \omega_j, (i, j) \in E \quad (2.4.7)$$

$$M_j \dot{\omega}_j = -p_j^L + p_j^M - (d_j^C + d_j^u) - \sum_{k:j \rightarrow k} p_{jk} + \sum_{i:i \rightarrow j} p_{ij}, \quad j \in G \quad (2.4.8)$$

$$0 = -p_j^L + p_j^M - (d_j^C + d_j^u) - \sum_{k:j \rightarrow k} p_{jk} + \sum_{i:i \rightarrow j} p_{ij}, \quad j \in G \quad (2.4.9)$$

$$p_{ij} = B_{ij} \sin \eta_{ij} - p_{ij}^{nom}, \quad (i, j) \in E \quad (2.4.10)$$

Όπου όλες οι μεταβλητές αντιπροσωπεύουν αποκλίσεις από ένα ονομαστικό σημείο λειτουργίας με αλλαγές βήματος p_j^L , στην ανεξέλεγκτη ζήτηση για κάθε bus_j . Σε αντίθεση

με την πρόσφατη βιβλιογραφία, για την διερεύνηση των αποκεντρωμένων συστημάτων ελέγχου, όσο αφορά τους 2 παράγοντες, εισροή p^M_j και τα ελεγχόμενα φορτία d^C_j , με βάση τις τοπικές μετρήσεις της συχνότητας και μόνο, ο συγγραφέας έκλεισε τον κύκλο στο (2.4.8 – 2.4.10) καθορίζοντας τα p^M_j , d^C_j και d^u_j , ως εξόδους από ανεξάρτητα συστήματα της μορφής (2.4.5) όπου έχει εισόδους οι οποίοι δίνονται από το αρνητικό της τοπικής συχνότητας.

$$\dot{\chi}^{M,j} = f^{M,j}(\chi^{M,j}, -\omega_j),$$

$$p^M_j = g^{M,j}(\chi^{M,j}, -\omega_j), \quad j \in G \quad (2.4.11)$$

$$\dot{\chi}^{c,j} = f^{c,j}(\chi^{c,j}, -\omega_j),$$

$$d^c_j = g^{c,j}(\chi^{c,j}, -\omega_j), \quad j \in N \quad (2.4.12)$$

$$\dot{\chi}^{u,j} = f^{u,j}(\chi^{u,j}, -\omega_j),$$

$$d^u_j = g^{u,j}(\chi^{u,j}, -\omega_j), \quad j \in G \quad (2.4.13)$$

Τα συστήματα (2.4.11) και (2.4.12) αντιπροσωπεύουν τον πρωτεύον δυναμικό έλεγχο που σχετίζεται με την παραγωγή στο καλώδιο(bus) $j \in G$ και με την ελεγχόμενη ζήτηση στο καλώδιο(bus) $j \in N$. Αφού οι μεταβλητές p^M_j και d^c_j μπορούν να ελεγχθούν, η ανάλυση μας παρέχει την ευκαιρία να σχεδιάσουμε συγκεκριμένες ιδιότητες αυτής της δυναμικής. Αντιθέτως η d^u_j αντιπροσωπεύει ανεξέλεγκτο φορτίο και η δυναμική στην (2.4.13) είναι σταθερή.

Στο διασυνδεδεμένο σύστημα (2.4.7)-(2.4.13) υπάρχει κάποια ισορροπία ($\eta^*, \omega^*, \chi^{M,*}, \chi^{c,*}, \chi^{u,*}, p^*, p^{M,*}, d^{c,*}, d^{u,*}$) για την οποία οι διάφορες φάσεις ικανοποιούν τον περιορισμό ασφαλείας. $|\eta_{ik}^*| < \frac{\pi}{2}$ για όλα $(i,k) \in E$. Συγγραφείς θέτουν στόχο να διασφαλίσουν ότι αυτές οι ισορροπίες είναι σταθερές και είναι επίσης λύσεις σε κατάλληλα κατασκευασμένα προβλήματα βελτιστοποίησης δικτύου.

2.4.1 Ανάλυση Σταθερότητας Πλαισίου

Η βασική ιδέα ήταν να συνδυάσει τη δυναμική (2.4.11)-(2.4.13) για να εξετάσει τη συμπεριφορά της προσφοράς των μεταβλητών της απόκλισης.

$$s_j^G = p^M_j - (d^c_j + d^u_j), \quad j \in G \quad (2.4.14a)$$

$$s_j^L = -(d_j^c + d_j^u), \quad j \in G \quad (2.4.14b)$$

Καθώς οι μεταβλητές (2.4.7)-(2.4.10) εξελίσσονται σύμφωνα με τις τάσεις (2.4.11)-(2.4.13) s_j^G και s_j^L μπορεί να θεωρηθεί ως προϊόν από αυτά, σε συνδυασμό δυναμικών συστημάτων με εισόδους $-\omega_j$. Η ευρεία κατηγορία της δυναμικής στην (2.4.11)-(2.4.13) που θα εξεταστεί ορίζεται από την ακόλουθη συνθήκη παθητικότητας στις ακόλουθες δυναμικές προσφορές.

Ορισμός 2.4.1 Ένα σύστημα της μορφής(2.4.5) θεωρείται/λέγεται ότι είναι σε τοπικό επίπεδο εισροών ,αυστηρά παθητική για τις σταθερές τιμές εισόδου \bar{u} και τη διαρκή/σταθερή κατάσταση αξιών \bar{x} αν υπάρχουν ανοιχτές γειτονιές U από \bar{u} και X από \bar{x} και μια συνεχής διαφορετική, θετικής μαθηματικής λειτουργίας $V(x)$ (λειτουργία αποθήκευσης) έτσι ώστε όλα τα $u \in U$ και όλα τα $x \in X$.

$$\dot{V}(x) \leq (u - \bar{u})^T (y - \bar{y}) - \varphi(u - \bar{u}),$$

Όπου είναι φ μια θετικά ορισμένη συνάρτηση $\bar{y} = k_y(\bar{u})$.

Υπόθεση 2.4.1 Το σύστημα συνδυασμένης δυναμικής (2.4.11)-(2.4.13) με εισόδους $-\omega_j$ και εξόδους, δίνεται από την (2.4.14a) για $j \in G$ και (2.4.14b) για $j \in L$, το καθένα είναι αυστηρά είσοδος παθητικότητας, για ισορροπία. Επιπλέον οι λειτουργίες αποθήκευσης έχουν αυστηρά τοπικά ελάχιστα στην ισορροπία.

Η πρωτοτυπία της εργασίας αυτής έγκειται στο γεγονός ότι οι συγγραφείς υποθέτουν μόνο ένα ακίνητο παθητικότητας για τη δυναμική της προσφοράς χωρίς να προσδιορίζει την ακριβή μορφή του συστήματος(2.4.11)-(2.4.13). Αυτό επιτρέπει στο πλαίσιο να περιλαμβάνει μια πιο ευρεία κατηγορία της δυναμικής παραγωγής και του φορτίου.

Ειδικά, αυτό επιτρέπει μια μεγάλη ευελιξία στο σχεδιασμό των ελεγχόμενων δυναμικών φορτίων. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι η παρουσία της απόσβεσης στη δυναμική, συχνά, συνεισφέρει σε ένα βαθμό αυστηρή παθητικότητα με τη δυναμική της προσφοράς, ώστε ακόμη και μη παθητική συμπεριφορά από τα ελεγχόμενα φορτία και τα συστήματα διέγερσης μπορεί να γίνει ανεκτή. Η κατάσταση παθητικότητας στην 2.4.5 είναι αρκετή για να οδηγήσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα σταθερότητας. Στη συνέχεια, οι συγγραφείς συνδυάζουν αυτήν την προσέγγιση με τις συνθήκες σχεδιασμού για την εισόδου-εξόδου συμπεριφορά της δυναμικής ελέγχου (2.4.11) - (2.4.13) που επιτρέπουν μια ερμηνεία βελτιστοποίησης από τις περιοριστικές σταθερές καταστάσεις που πρέπει να συναχθούν. Για να γίνει αυτό, θεωρούμε το ακόλουθο από πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\text{OSLC: } \left\{ \begin{array}{l} \underset{p^M, d^c, d^u}{\text{minimize}} \quad \sum_{j \in G} C_j(p_j^M) + \sum_{j \in N} \left(C_{d_j}(d_j^c) + \int_0^{d_j^c} h_j^{-1}(z) dz \right) \\ \text{subject to} \quad \sum_{j \in G} p_j^M = \sum_{j \in N} (d_j^c + d_j^u + p_j^L), \\ p_j^{M, \min} \leq p_j^M \leq p_j^{M, \max}, \forall j \in G, \\ d_j^{c, \min} \leq d_j^c \leq d_j^{c, \max}, \forall j \in N. \end{array} \right. \quad (2.4.15)$$

Στο πρόβλημα (2.4.15) με την βέλτιστη παροχή (Optimal Supply) και έλεγχο φορτίου (Load Control) τα $p_j^{M,\min}$, $p_j^{M,\max}$, $d_j^{c,\min}$, and $d_j^{c,\max}$ είναι τα όρια παραγωγής και τα όρια ελέγξιμων απαιτούμενων αποκλίσεων αντίστοιχα σε bus_j . Ο περιορισμός της ισότητας καθορίζει την ισορροπία μεταξύ της συχνότητας, ανεξάρτητα από το φορτίο, και της συνολικής παραγωγής, συν όλα τα εξαρτώμενα από τη συχνότητα φορτία. Κάποιες απώλειες φυσικά προκύπτουν λόγω οποιαδήποτε αλλαγής στη συχνότητα που αλλάζει την ζήτηση. Αυτό αναπαριστάστε από μια αναπόσπαστη απώλεια στην λειτουργία HJ την οποία θα προσδιορίσουμε από τη δυναμική στο (2.4.13) ως

$$h_j(\bar{u}) := k_{d_j^u}(-\bar{u}) \text{ for all } \bar{u} \in R \quad (2.4.16)$$

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι προκειμένου να διαχωρίσουν οι αποκλίσεις από τις ονομαστικές τους τιμές, οι συγγραφείς υπέθεσαν ότι οι απώλειες των λειτουργιών C_j και C_{d_j} είναι συνεχώς διαχωρίσιμες και αυστηρά κυρτές.

Επιπλέον, η πρώτη παράγωγος της $h_j^{-1}(z)$ είναι μη αρνητική για όλα τα $z \in R$.

Θεώρημα 2.4.1 Αν οι προαναφερθείσες υποθέσεις είναι ικανοποιητικές και οι δυναμικές ελέγχου (2.4.11) και (2.4.12) επιλέγονται έτσι ώστε:

$$k_{p_j^M}(-\bar{u}) = [(C'_j)^{-1}(-\bar{u})]_{p_j^{M,\min}}^{p_j^{M,\max}} \text{ and } k_{d_j^c}(-\bar{u}) = [(C'_{d_j})^{-1}(\bar{u})]_{d_j^{c,\min}}^{d_j^{c,\max}} \quad (2.4.17)$$

σταθερό για όλα τα $u \in R$, τότε για τυχόν αρχικές συνθήκες αρκετά κοντά στο σετ ισορροπίας, οι λύσεις του συστήματος σίγουρα θα συγκλίνουν σε ένα σημείο ισορροπίας που είναι παγκοσμίως ελάχιστο για το OSLC πρόβλημα (2.4.15).

Τα συμπεράσματα του Θεωρήματος 2.4.1 αποδεικνύουν ότι, σύμφωνα με αρκετά μικρές διαταραχές στις φορτώσεις συστήματος p_j^L η κύρια δυναμική ελέγχου στα (2.4.11) και (2.4.12) εγγυημένα σταθεροποιεί τις συχνότητες του δικτύου και, επιπλέον, εξασφαλίζει τη σύγκλιση της παραγωγής και την ελεγχόμενη κατανομή φορτίου στο βέλτιστο για το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του κόστους (2.4.15).

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι μελέτες ταιριάζουν στο πλαίσιο του γενικού παθητικού εφοδιασμού το οποίο περιγράφεται στις προηγούμενες παραγράφους. Επιπλέον, μπορεί να αποδειχθεί ότι το 2.4.1 διατηρείται κάτω από ασθενέστερες συνθήκες και, συνεπώς, η σταθερότητα και η βελτιστοποίηση μπορεί να συναχθεί με λιγότερο περιοριστικές παραμέτρους. Επιπλέον, διάφορα άλλα ενδιαφέροντα σχήματα ελέγχου ταιριάζουν σε αυτό το πλαίσιο, για παράδειγμα, το καταναμεμένο δυναμικό έλεγχο του φορτίου

$$\frac{dd_i^c}{dt} = -(C'_i(d^c_i) - \omega_i), i \in N \quad (2.4.18)$$

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη αυτό το γενικό πλαίσιο, η σταθερότητα και η βελτιστοποίηση μπορεί να επαληθευτεί για ευρείες κατηγορίες των κύριων δυναμικών ελέγχου τόσο για την παραγωγή όσο και το ελέγξιμο φορτίο [43].

Πέρα από την εισαγωγή του προηγμένου κύριου δυναμικού ελέγχου, το προαναφερμένο παθητικό πλαίσιο προσφέρει την ευκαιρία να υιοθετηθούν πιο λεπτομερή μοντέλα του δικτύου.

Έτσι, μέσα από την αξιοποίηση αυτής της ευελιξίας που προβλέπεται, το μελλοντικό έργο μας θα επικεντρωθεί στην ενσωμάτωση της προώθησης προχωρημένης δυναμικής τάση, όπως έχουμε ήδη αναφέρει στις προηγούμενες παραγράφους. Είναι αρκετά ενδιαφέρον να διερευνηθεί αν το δυναμικό των διαφόρων μηχανισμών ελέγχου τάσης, όπως διεγέρτες και PSS, θα μπορούσαν να χωρέσουν μέσα σε αυτό το πλαίσιο. Αυτό θα μπορούσε να βοηθήσει στην παραγωγή πιο ακριβέστατων συστημάτων ελέγχου συχνότητας (που παρέχεται την παραγωγή και / ή πλευρά του φορτίου), εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι η σταθερότητα του δικτύου διασφαλίζεται από την παρουσία τέτοιων μηχανισμών.

Τέλος, η παθητική ανάλυση των περισσότερων γενικών δικτύων ισχύος θα ήταν ένας επιπρόσθετος μελλοντικός στόχος. Εμείς θα προσπαθήσουμε να εξάγουμε λειτουργίες μεταφοράς με δίκτυα bus (με τη χρήση PST) και θα διερευνήσουμε τα χαρακτηριστικά τους και το κατά πόσον είναι παθητικά ή όχι κάτω από διάφορες συνθήκες (παρουσία διεγερτών, PSS κλπ). Αποκλίσεις από την παθητικότητα θα διερευνηθούν εις βάθος. Επιπλέον, εμείς θα κατασκευάσουμε αρκετούς ελεγκτές παθητικής αποκεντρωμένης ζήτησης και θα εξετάσουμε τη σκοπιμότητά τους και την εφαρμογή τους σε συστήματα πραγματικής ισχύς.

3 ΠΑΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε την παθητικότητα, αφού θα χρησιμοποιήσουμε την παθητικότητα των συστημάτων για να εξάγουμε τα αποτελέσματα μας. Επίσης παρουσιάζονται τα διαγράμματα Nyquist και Bode επειδή μέσω αυτών των εργαλείων θα σχολιάσουμε τα αποτελέσματα, δίνοντας έτσι πληρότητα στα αποτελέσματα μας.

Εμείς θα μελετήσουμε μια ειδική κατηγορία των συστημάτων που ονομάζεται dissipative συστήματα. Διαισθητικά, μπορούμε να σκεφτούμε τα συστήματα που αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον μέσω κάποιας θύρας εισόδου / εξόδου, αποθηκεύοντας, καταναλώνοντας και ανταλλάσσοντας μερική ενέργεια με το περιβάλλον. Για παράδειγμα, τα ηλεκτρικά συστήματα ανταλλάσσουν ισχύος με τον περιβάλλον μέσω ενός εσωτερικού προϊόντος μεταξύ του ρεύματος και της τάσης, δηλαδή, $P_e = u^t i$. Ενέργεια σε αυτά τα συστήματα μπορεί να αποθηκευτεί σε πυκνωτές και / ή πηνία με τη μορφή τάσεως ή ρεύματος, αντιστοίχως. Ένα άλλο παράδειγμα είναι μηχανικά συστήματα, τα συστήματα αυτά μπορούν να παρέχονται με από γραμμικές και / ή περιστροφική δύναμη, δηλαδή, $P_m = \omega^T T$ ή $P_m = u^T F$, όπου u είναι η ταχύτητα, F είναι η εφαρμοζόμενη δύναμη, ω είναι η ταχύτητα περιστροφής, και το T είναι η εφαρμοζόμενη ροπή. Αυτή η ποσότητα μπορεί να αποθηκευτεί με τη μορφή δυναμικής και / ή κινητικής ενέργειας. Στην συνέχεια ακολουθεί, θα παρέχουμε μια σταθερή βάση για την εν λόγω προμήθεια και την αποθήκευση, όπου θα μας επιτρέψουν να περιγράψουμε συστήματα από τη μεριά της εισόδου-εξόδου [1,66].

3.1 Διασκορπιζόμενα Συστήματα

Λαμβάνοντας υπόψη το μη γραμμικό σύστημα state-space, δίνεται από

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3.1)$$

$$y = h(x, u)$$

όπου $x \in X \subseteq R^n, u \in U \subseteq R^m, \text{ and } y \in Y \subseteq R^p$. Συνδέοντας την με την (4.1), έχουμε την ακόλουθη supply rate συνάρτηση:

$$\omega(u, y): U \times Y \rightarrow R \quad (3.2)$$

Ορισμός 1 Το σύστημα state-space (3.1) λέγεται ότι είναι dissipative λαμβάνοντας υπόψη το supply rate $\omega(u, y)$, αν υπάρχει μια εξίσωση $S: X \rightarrow R \geq 0$, η οποία ονομάζεται storage function, έτσι ώστε $\forall x_0 \in X, \forall t_1 > t_0$ και όλες οι εξισώσεις εισόδου u να είναι σύμφωνα με την:

$$S(x(t_1)) \leq S(x(t_0)) + \int_{t_0}^{t_1} w(u(t), y(t)) dt \quad (3.3)$$

όπου $x(t_0) = x_0$, και $x(t_1)$ είναι η κατάσταση του supply rate σε χρόνο t_1 που προκύπτουν από την αρχική x_0 κατάσταση και τη λειτουργία εισόδου $u(t)$.

Η εξίσωση dissipation inequality (3.3) εκφράζει την ιδέα ότι η αποθηκευμένη ενέργεια $S(x(t_1))$ του συστήματος (3.1) ανά πάσα στιγμή t_1 είναι όσο πιο κοντά γίνεται ως προς το άθροισμα της αποθηκευμένης ενέργειας $S(x(t_1))$ που υπάρχει κατά το χρόνο t_0 και η συνολική ενέργεια $\int_{t_0}^{t_1} w(u(t), y(t)) dt$ το οποίο παρέχεται εξωτερικά κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος $[t_0, t_1]$. Ως εκ τούτου, όπως υποδηλώνει το όνομα, dissipative συστήματα δεν μπορούν εσωτερικά να δημιουργήσουν ενέργεια, αλλά μπορούν, είτε να την αποθηκεύσουν είτε να την καταναλώσουν. Θα μελετήσουμε τον επόμενο ειδικό τύπο που αφορά τις λειτουργίες αποθήκευσης.

Θεώρημα 1 Λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα (3.1) με ποσοστό προμήθειας (supply rate) w . Στη συνέχεια, διασκορπίζεται με βάση το w αν και μόνο η διαθέσιμη λειτουργία αποθήκευσης:

$$S_a(x) = \sup_{u(\cdot), T \geq 0} \left(- \int_0^T w(u, y) dt \right), \quad x(0) = x \quad (3.4)$$

είναι σωστά προσδιορισμένη, δηλαδή, $S_a(x) < \infty, \forall x \in X$. Επίσης, αν $S_a(x) < \infty, \forall x \in X$, στην συνέχεια S_a είναι η ίδια από μόνη της μία λειτουργία αποθήκευσης, και παρέχει ένα χαμηλό δεσμό σε όλες τις άλλες εξισώσεις αποθήκευσης, δηλαδή για όλες τις άλλες λειτουργίες αποθήκευσης S

$$S_a(x) \leq S(x)$$

Παρατήρηση 1 Σημειώνεται ότι στη διασύνδεση dissipativity με την ύπαρξη της συνάρτησης S_a , έχουμε αφαιρέσει την προσοχή από την ικανοποίηση την ανισότητα της διάχυσης (dissipation inequality) στην ύπαρξη της λύσης σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Παρατήρηση 2 Η ποσότητα S_a μπορεί να ερμηνευθεί ως η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να εξαχθεί από το σύστημα (3.1), ξεκινώντας από μια αρχική κατάσταση x_0 .

Υποθέτουμε ότι η ανισότητα διάχυσης (dissipation inequality) βρίσκεται στα όρια όπου $t_1 \rightarrow t_0$. Τότε αυτό μπορεί να φανεί ότι η ικανοποίηση της ανισότητας διάχυσης είναι ισοδύναμη με την εκπλήρωση της μερικής διαφορικής εξίσωσης (υποθέτοντας ότι το S είναι διαφορικό)

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S(x)}{\partial x} f(x, u) \leq w(u, h(x, u)), \quad \forall x \in R^n, u \in R^m \quad (3.5)$$

Αυτή η έκδοση της dissipation property ονομάζεται διαφορική ανισότητα διάχυσης (differential dissipation inequality). Έχοντας αυτή την διαφορική έκδοση, μπορούμε να δημιουργήσουμε μια σύνδεση με ό, τι έχουμε ήδη δει στη διάλεξη σχετικά με

τη θεωρία της σταθερότητας Lyapunov. Αλλά πριν το κάνουμε αυτό, ας δούμε πρώτα τον ρυθμό με τον οποίο το σύστημα (3.1) η διάχυση ενέργειας είναι, αυτή που δίνεται από τον ακόλουθο ορισμό.

Ορισμός 2 Η συνάρτηση $d: X \times U \rightarrow R$ είναι ο ρυθμός διάχυσης του διάχυτου συστήματος (4.1), με ρυθμό τροφοδοσίας w και λειτουργία αποθήκευσης S , αν $\forall t_0, t_1 \in R^+, x_0 \in X$ and $u \in U$, η παρακάτω ισότητα ισχύει

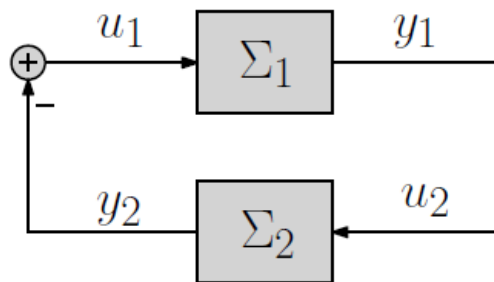
$$S(x(t_0)) + \int_{t_0}^{t_1} (w(t) + d(t))dt = S(x(t_1)) \quad (3.6)$$

Φυσικά, απαιτείτε ότι το d είναι μη αρνητικό για την απόκτηση διάχυσης!

Λήμμα 1 Έστω S μια συνεχώς διαφορική συνάρτηση αποθήκευσης του συστήματος (4) και να υποθέσουμε ότι ο ρυθμός τροφοδοσίας w ικανοποιεί

$$w(0, y) \leq 0, \forall y \in Y \quad (3.7)$$

Ας υποθέσουμε την προέλευση $x = 0$ να είναι ένα αυστηρό τοπικό ελάχιστο της $S(x)$. Τότε $x = 0$ είναι μία τοπική σταθερά ισορροπίας για το αβίαστο σύστημα $\dot{x} = f(x, 0)$ και $V(x) = S(x) - S(0) \geq 0$ είναι μια τοπική συνάρτηση Lyapunov.



Σχήμα 3.1: Διασύνδεση ανάδρασης ενός συστήματος διάχυσης

Λήμμα 2 Εξετάζοντας τα 2 συστήματα

$$(\Sigma_i) \begin{cases} \dot{x}_i = f_i(x_i, u_i) \\ y_i = h(x_i, u_i) \end{cases} \quad (3.8)$$

συνδεδεμένο σε ανάδραση όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Ας υποθέσουμε ότι και τα δύο συστήματα είναι διάχυτα (dissipative) σε σχέση με τον ρυθμό παροχής w_i και την θετική εξίσωση λειτουργίας αποθήκευσης S_i . Ας υποθέσουμε επίσης ότι

$$w_1(u, y) + w_2(y, -u) = 0, \quad \forall u, y$$

Τότε το σύστημα ανάδρασης είναι σταθερό.

3.2 Παθητικά Συστήματα

Τα παθητικά συστήματα είναι μια ειδική υποκατηγορία των διάχυτων (dissipative) συστημάτων, και έχουν ένα ειδικό τύπο του ρυθμού τροφοδοσίας, που δίνεται από

$$w(u, y) = u^T y \quad (3.2.1)$$

με την προϋπόθεση ότι ο αριθμός των εισροών και εκροών είναι ο ίδιος, δηλαδή, $u, y \in R^p$. Μπορούμε επίσης να διαφοροποιήσουμε μεταξύ των διαφόρων τύπων αδρανών δυναμικών συστήματα σύμφωνα με τον ακόλουθο ορισμό:

Ορισμός 3 Ένα σύστημα state space (3.1) καλείται

1. Παθητικό αν είναι διάχυτο σε σχέση με το ρυθμό τροφοδοσίας $w(u, y) = u^T y$.
2. Χωρίς απώλειες, αν $\dot{S}(x) = u^T y$.
3. Παθητικό με εισόδους – feedforward αν είναι διάχυτο σε σχέση με τον ρυθμό τροφοδοσίας $w(u, y) = u^T y - u^T \varphi(u)$ για κάποιες συναρτήσεις φ .
4. Αυστηρά παθητικής εισόδου σε σχέση με το ρυθμό τροφοδοσίας $w(u, y) = u^T y - u^T \varphi(u)$ and $u^T \varphi(u) > 0, \forall u \neq 0$.
5. Παθητική ανάδραση εξόδου σε σχέση με το ρυθμό τροφοδοσίας.

$w(u, y) = u^T y - u^T \rho(u)$ για κάποιες συναρτήσεις ρ .

6. Αυστηρά παθητικής εισόδου σε σχέση με το ρυθμό τροφοδοσίας $w(u, y) = u^T y - u^T \varphi(y)$ για κάποιες συναρτήσεις $y^T \rho(y) > 0, \forall y \neq 0$.
7. Αυστηρά παθητικό αν είναι σε σχέση με το ρυθμό τροφοδοσίας $w(u, y) = u^T y - \psi(x)$ για κάποιες θετικές πεπερασμένες συναρτήσεις ψ .

3.3 Χαρακτηρισμοί της παθητικότητας για Γραμμικά Συστήματα

Τα παθητικά συστήματα είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα στην περίπτωση γραμμικών συστημάτων, για τον λόγο ότι μπορούμε να πάρουμε χαρακτηρισμούς της παθητικότητας, τόσο στο πεδίο της συχνότητας όσο και στο πεδίο του χρόνου. Στο πεδίο των συχνοτήτων, σκεφτόμαστε την συνάρτηση μεταφοράς και μπορούμε να συσχετίσουμε την παθητικότητα με ορισμένες προϋποθέσεις που ικανοποιούν την συνάρτηση μεταφοράς.

Ορισμός 4 Ένας $p \times p$ κατάλληλος πίνακας συνάρτησης μεταφοράς $G(s)$ καλείται πραγματικός και θετικός, αν όλες οι ακόλουθες προϋποθέσεις ικανοποιούνται:

1. Οι πόλοι όλων των στοιχείων της $G(s)$ δεν έχουν κανένα αρνητικό πραγματικό μέρος.
2. Για όλες τις πραγματικές συχνότητες ω των οποίων το ω_i δεν αποτελεί πόλο οποιουδήποτε στοιχείου του $G(s)$, ο πίνακας $G(j\omega) + G(-j\omega)^T$ είναι θετικός πεπερασμένος.

3. Κάθε καθαρός φανταστικός πόλος $j\omega$ κάθε στοιχείου της $G(s)$ είναι ένας απλός πόλος και το υπόλοιπο του πίνακα $\lim_{s \rightarrow j\omega} (s - j\omega)G(s)$ είναι θετικά πεπερασμένος Hermitian.

Ο πίνακας $G(s)$ ονομάζεται αυστηρά πραγματικός θετικός, αν $G(s-\varepsilon)$ είναι θετικός πραγματικός για κάποιους $\varepsilon > 0$.

Παρατήρηση 3 Για $p = 1$, η δεύτερη προϋπόθεση του ορισμού 4 μειώνει το $Re[G(j\omega)] \geq 0, \forall \omega \in R$. Επιπλέον, η προϋπόθεση αυτή ικανοποιείται μόνο αν ο σχετικός βαθμός της συνάρτησης μεταφοράς $G(s)$ είναι το πολύ ένα.

Το πραγματικά θετικό περιεχόμενο των πινάκων μεταφοράς μπορεί να είναι χαρακτηριστικά ισοδύναμο όπως πιο κάτω.

Λήμμα 3 Έστω $G(s)$ είναι ένας σωστός πίνακας μεταφοράς $p \times p$. Υποθέτω πως

$\det(G(s) + G(s)^T)$ δεν είναι ισοδύναμο με μηδέν για όλα τα s . Στη συνέχεια, $G(s)$ είναι αυστηρά θετικός πραγματικός αν και μόνο αν είναι οι ακόλουθες τρεις συνθήκες ικανοποιούνται:

1. $G(s)$ είναι Hurwitz.
2. $(G(j\omega) + G(-j\omega)^T)$ είναι θετικό πεπερασμένο $\forall \omega \in R$.
3. Είτε $G(\infty) + G(\infty)^T$ είναι θετικό πεπερασμένο ή είναι θετικό ημι-πεπερασμένο και $\lim_{\omega \rightarrow \infty} \omega^2 M^T (G(j\omega) + G(-j\omega)^T) M$ είναι θετικό πεπερασμένο για κάθε πλήρη θέση $p \times (p - q)$ πίνακα M τόσο για $M^T (G(\infty) + G(\infty)^T)$.

Λήμμα 4 (Kalman-Yakubovich-Popov)

Θεωρούμε τον $m \times m$ πίνακα συνάρτησης μεταφοράς $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$, όπου το ζευγάρι (A, B) είναι ελεγχόμενο και το ζευγάρι (A, C) είναι παρατηρήσιμο. $G(s)$ είναι αυστηρά πραγματικό θετικό εάν και μόνο αν υπάρχουν πίνακες $P = P^T > 0, L$, και W , και $\varepsilon > 0$ τέτοια ώστε να ισχύουν οι παρακάτω ισότητες:

$$PA + A^T P = -L^T L - \varepsilon P \quad (3.3.1)$$

$$PB = C^T - L^T W \quad (3.3.2)$$

$$W^T W = D + D^T \quad (3.3.3)$$

Παρατήρηση 4 Εάν $\varepsilon = 0$ στο Λήμμα 3, τότε η συνάρτηση μεταφοράς $G(s)$ είναι απλά θετική πραγματική.

Τέλος, είμαστε έτοιμοι να δηλώσουμε τη σχέση μεταξύ των θετικών realness και παθητικότητας για Γραμμικά Χρονικά Αμετάβλητα (LTI).

Θεώρημα 2 Το σύστημα LTI

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.3.4)$$

$$y = Cx + Cu \quad (3.3.5)$$

με τον αντίστοιχο πίνακα μεταφοράς $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ είναι

- παθητικό αν $G(s)$ είναι θετικό πραγματικό
- αυστηρά παθητικό, αν $G(s)$ είναι αυστηρά θετικό πραγματικό

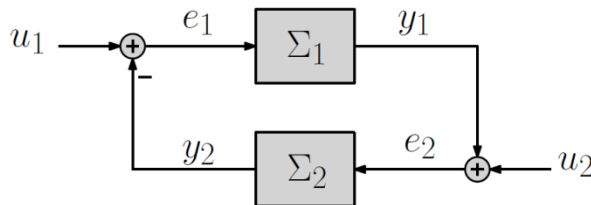
3.4 Σταθερότητα των παθητικών συστημάτων

Ας εξετάσουμε ξανά το μη γραμμικό σύστημα (3.1), όπου $f: R^n \times R^p \rightarrow R^n$ είναι τοπικό Lipschitz, $h: R^n \times R^n \rightarrow R^p$ είναι συνεχές, με $f(0,0) = 0$ και $h(0,0) = 0$.

Λήμμα 5 Ας υποθέσουμε ότι το σύστημα (3.1) είναι παθητικό με μια θετική πεπερασμένη συνάρτηση αποθήκευσης $S(x)$, τότε η προέλευση του $\dot{x} = f(x, 0)$ είναι σταθερή.

Λήμμα 6 Ας υποθέσουμε ότι το σύστημα (3.1) είναι απολύτως παθητικό με κάποια συνάρτηση αποθήκευσης $S(x)$, τότε η προέλευση του $\dot{x} = f(x, 0)$ είναι ασυμπτωτικά σταθερή. Επιπλέον, αν $S(x)$ είναι ακτινικά απεριόριστη, τότε η προέλευση είναι ασυμπτωτικά ευσταθής.

Θα εξετάσουμε μερικές από τις ιδιότητες της σταθερότητας των παθητικών συστημάτων, όταν συνδέεται σε μια δομή ανάδρασης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Διασύνδεση ανάδρασης των παθητικών συστημάτων

Θεώρημα 3 Η σύνδεση ανάδρασης των δύο παθητικών συστημάτων είναι παθητική.

3.5 Έλεγχος βάσης παθητικότητας (passivity-Based Control)

Μετά από αρκετή ανάλυση σχετικά με τα παθητικά συστήματα, μπορούμε να δείξουμε τώρα μια γεύση για το πώς αυτή η θεωρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό του λεγόμενου ελέγχου βάσης παθητικότητας. Θεωρούμε το δυναμικό σύστημα:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3.5.1)$$

$$y = h(x) \quad (3.5.2)$$

με τη συνήθη παραδοχή Lipschitz στο f και της συνέχειας του h . Επιπλέον, υποθέτουμε ότι $f(0,0) = 0$ και $h(0) = 0$.

Ορισμός 5 Το σύστημα (3.5.1 – 3.5.2) ονομάζεται παρατηρήσιμο μηδενικής κατάστασης, αν δεν υπάρξει λύση στο αβίαστο σύστημα $\dot{x} = f(x, 0)$ μπορούν να μείνουν με τον ίδιο τρόπο στο σύνολο $\{h(x) = 0\}$ εκτός από την τετριμμένη λύση $x(t) \equiv 0$.

Θεώρημα 4 Υποθέστε ότι το σύστημα (3.5.1 – 3.5.2) είναι

1. παθητικό με ακτινικά απεριόριστη θετική πεπερασμένη συνάρτηση αποθήκευσης, και
2. Είναι παρατηρήσιμη μηδενικής κατάστασης, τότε η προέλευση μπορεί να σταθεροποιηθεί σε γενικό επίπεδο με ένα νόμο ελέγχου $u = -\varphi(y)$, όπου φ είναι οποιαδήποτε τοπική συνάρτηση Lipschitz τέτοια ώστε $\varphi(0) = 0$, and $y^T \varphi(y) > 0, \forall y \neq 0$.

Αυτό το τελευταίο θεώρημα είναι πολύ χρήσιμο κατά το σχεδιασμό νόμων ελέγχου για ένα μεγάλο αριθμό ηλεκτρικών και μηχανικών συστημάτων. Επιπλέον, αντί της εκκινήσεως με την συστήματα για τα οποία η προέλευση είναι σταθερός ανοικτός βρόχος, μπορούμε να σχεδιάσουμε νόμους ελέγχου που μετατρέπουν ένα μη παθητικό σύστημα σε ένα παθητικό, με την χρήση μίας τεχνικής γνωστή ως ανάδραση παθητικότητας (feedback passivation).

3.6 Διαγράμματα Nyquist

Τα διαγράμματα Nyquist παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα σε σχέση με τα αλγεβρικά κριτήρια μελέτης της ευστάθειας ενός συστήματος:

- Δίνουν πληροφορίες για τη σχετική ευστάθεια (ευρωστέια – robustness) του συστήματος
- Δίνουν πληροφορίες για τη χρονική συμπεριφορά του συστήματος
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη μελέτη ευστάθειας μη γραμμικών συστημάτων όπως και συστημάτων με χρονικές καθυστερήσεις

Υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα της χρήσης των διαγραμμάτων Nyquist για τη μελέτη της ευστάθειας κλειστών (κυρίως συστημάτων)

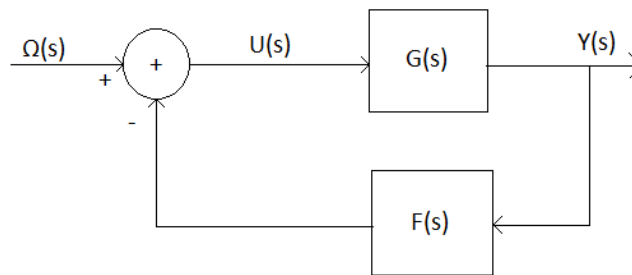
Δεν μας δίνουν πληροφορίες σχετικά με πιθανά πολλαπλά μηδενικά της συνάρτησης $1+G(s)F(s)$ στο $s=0$. Η ύπαρξη τέτοιων μηδενικών οδηγεί σε αστάθεια το κλειστό Σύστημα.

(με συνάρτηση μεταφοράς: $H(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)F(s)}$)

Σε περίπτωση που το διάγραμμα Nyquist της συνάρτησης βρόχου $G(s)F(s)$ περνά από το κρίσιμο σημείο $(-1, j0)$ τότε το κριτήριο Nyquist δεν μπορεί να εφαρμοστεί για ο αριθμός που το διάγραμμα Nyquist περικλείει το κρίσιμο σημείο $(-1, j0)$ είναι απροσδιόριστο.

Θεώρημα:

Έστω το κλειστό σύστημα του σχήματος



Σχήμα 3.3. Κλειστό κύκλωμα ανάδρασης

Ως γνωστό το κλειστό σύστημα έχει συνάρτηση μεταφοράς:

$$H(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)F(s)}$$

Θεωρούμε συνάρτηση μεταφοράς: $W(s) = 1 + G(s)F(s)$

Έστω ότι η συνάρτηση μεταφοράς βρόχου $G(s)F(s)$ είναι ρητή συνάρτηση και έχει τη μορφή:

$$G(s)F(s) = k \frac{(s + z_1)(s + z_2) \dots (s + z_m)}{s^j (s + p_1)(s + p_2) \dots (s + p_k)}$$

Κριτήριο ευστάθειας του Nyquist:

Το κριτήριο ευστάθειας του Nyquist χρησιμοποιεί το Θεώρημα 1 για να αποφανθεί για την ευστάθεια ενός κλειστού συστήματος με συνάρτηση μεταφοράς:

$$H(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)F(s)} = \frac{G(s)}{W(s)}$$

Ένα σύστημα είναι ευσταθές όταν δεν έχει πόλους στο δεξιό μιγαδικό ημιεπίπεδο και ο δρόμος $\Gamma(s)$ ορίζεται έτσι ώστε να περιλαμβάνει δεξιόστροφα όλο το δεξιό μιγαδικό ημιεπίπεδο. Ο κλειστός δρόμος που περιγράφηκε παραπάνω ονομάζεται δρόμος Nyquist και συμβολίζεται με Γ_N . Ο δρόμος Nyquist σχηματίζεται ως εξής:

Ξεκινά από $s=-j\infty$ και καταλήγει σε $s=+j\infty$

Από το $s=+j\infty$ διαγράφει ημικύκλιο με ακτίνα $R \rightarrow \infty$ επιστρέφοντας στο $s=-j\infty$

Ο δρόμος Γ_N της $W(s)$ (στο επίπεδο W) που αντιστοιχεί στον δρόμο Γ_N αποτελεί το διάγραμμα Nyquist της $W(s)$

Το κριτήριο ευστάθειας του Nyquist διατυπώνεται ως εξής:

Έστω ότι η συνάρτηση $W(s) = 1+G(s)F(s)$ δεν έχει πόλους στο δεξιό μιγαδικό ημιεπίπεδο τότε για να είναι το κλειστό σύστημα:

$$H(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)F(s)} = \frac{G(s)}{W(s)}$$

ευσταθές πρέπει το διάγραμμα Nyquist της $W(s)$ διαγραφόμενο κατά τη φορά διαγραφής του δρόμου Nyquist Γ_N (ωρολογιακή φορά) να μην περικλείει (δεξιόστροφα) την αρχή των αξόνων.

3.7 Διαγράμματα Bode

Μία ημιτονοειδής συνάρτηση μεταφοράς $G(s)$ παριστάνεται με το διάγραμμα Bode.

Διαγράμματα Bode : δύο διαγράμματα, με το λογάριθμο του μέτρου και τη γωνία φάσης, σε συνάρτηση με τη συχνότητα στον οριζόντιο άξονα. Λογάριθμος του μέτρου, με βάση το 10: $20 \log |G(j\omega)|$. Η μονάδα παράστασης του μέτρου λέγεται decibel (dB). Κλίμακες στα διαγράμματα Bode: λογαριθμική για μέτρο και συχνότητα και γραμμική για φάση.

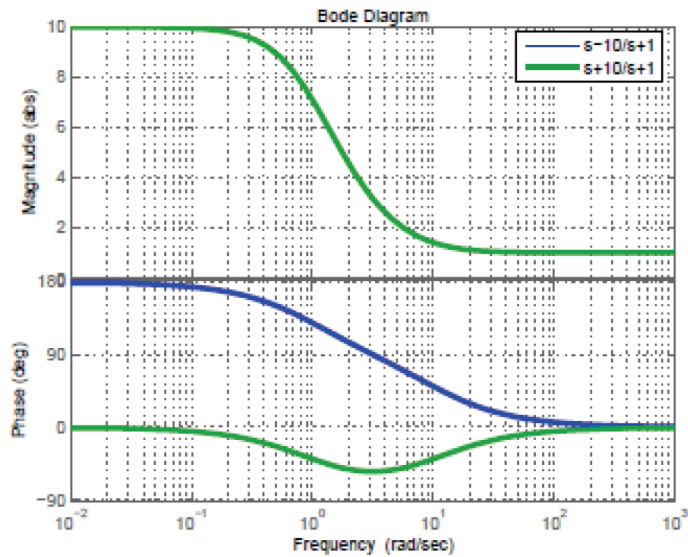
3.7.1 Πλεονέκτημα διαγραμμάτων Bode

Το γινόμενο των μέτρων γίνεται άθροιση. Με χρήση ευθύγραμμων ασύμπτωτων, προσεγγίζονται οι καμπύλες του μέτρου. Η λογαριθμική παράσταση επιτρέπει απεικόνιση συμπεριφοράς της συνάρτησης μεταφοράς σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες. Είναι εύκολη η απεικόνιση πειραματικού προσδιορισμού μιας συνάρτησης μεταφοράς, αρκεί να παρασταθούν τα δεδομένα σε λογαριθμικό διάγραμμα.

3.7.2 Συστήματα Ελάχιστης/Μη Ελάχιστης Φάσης

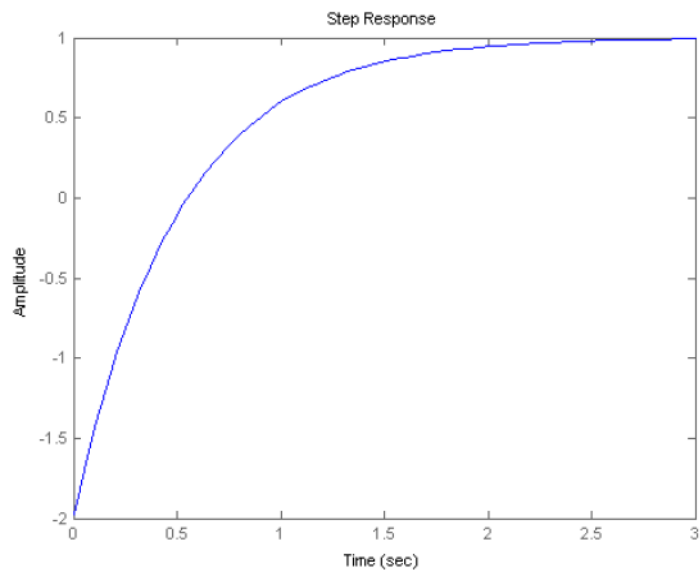
Συστήματα Ελάχιστης Φάσης (mimimum phase): χωρίς μηδενιστές στο δεξιό ημιεπίπεδο ή νεκρούς χρόνους (time delays). Συστήματα Μη-Ελάχιστης Φάσης (Non-mimimum phase): έχουν μηδενιστές στο δεξιό ημιεπίπεδο ή νεκρούς χρόνους,

Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται σύστημα με συνάρτηση μεταφοράς $\frac{s-10}{s+1}$ (μπλε καμπύλη) μαζί με σύστημα με συνάρτηση μεταφοράς $\frac{s+10}{s+1}$. Παρατηρούμε ότι ενώ έχουν ίδια χαρακτηριστικά μέτρου, διαφέρουν στη γωνία φάσης.



Διάγραμμα 3.1: Συστήματα Ελάχιστης/Μη Ελάχιστης Φάσης

Για τα συστήματα Μη-Ελάχιστης Φάσης, υπάρχει α) καθυστέρηση στη απόκριση λόγω ελαττωματικής συμπεριφοράς κατά την έναρξη ή β) έναρξη στην μεταβατική απόκριση με φορά αντίθετη προς την είσοδο, που ενδεχόμενα επανέρχεται σε ορθή. Κατά το σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου, διατάξεις Μη-Ελάχιστης Φάσης πρέπει να αποφεύγονται σχολαστικά. Στο διάγραμμα 3.2 φαίνεται βηματική απόκριση συστήματος με συνάρτηση μεταφοράς $\frac{-s+1}{0,5s+1}$.



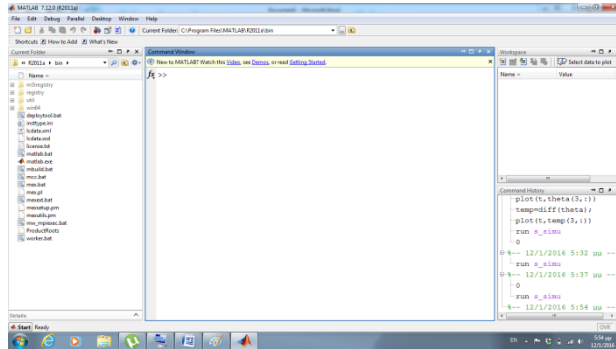
Διάγραμμα 3.2: Βηματική απόκριση συστήματος Μη Ελάχιστης Φάσης

3.7.3 Σχεδιασμός ελεγκτών στο πεδίο της συχνότητας

Οι προδιαγραφές ενός συστήματος ελέγχου μπορούν να περιγραφούν στο πεδίο του χρόνου ή στο πεδίο της συχνότητας. Στην περίπτωση που οι προδιαγραφές ελέγχου δίνονται στο πεδίο της συχνότητας για τον σχεδιασμό του ελεγκτή χρησιμοποιείται η απόκριση συχνότητας και τα διαγράμματα Bode. Προδιαγραφές ελέγχου στο πεδίο της συχνότητας: Μέγιστη τιμή συναρτήσεων L/S/T, bandwidth, phase margin, gain margin. Τυπικές μορφές ελεγκτών: προπορευόμενης /υπολειπόμενης φάσης, loop shaping. Τοποθετούνται σε διάταξη cascade: πριν το σύστημα. Εφόσον συνήθως εξετάζουμε το γινόμενο $L = G \cdot K$, τα διαγράμματα Bode εξυπηρετούν εφόσον έχουμε πρόσθεση των αποκρίσεων συχνότητας.

4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ PST

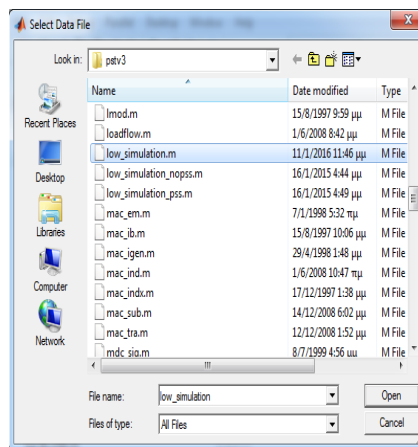
Όλες οι αναλύσεις και προσομοιώσεις πραγματοποιούνται μέσα από το πρόγραμμα Matlab και κατ' επέκταση στο Power System Toolbox. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται το παράθυρο της Matlab όπου εισάγουμε τις εντολές.



Σχήμα 4.1: Το παράθυρο του προγράμματος Matlab.

Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε την εντολή `s_simu` για να μπορούμε να έχουμε προσομοιώσεις τις λειτουργίας του κυκλώματος.

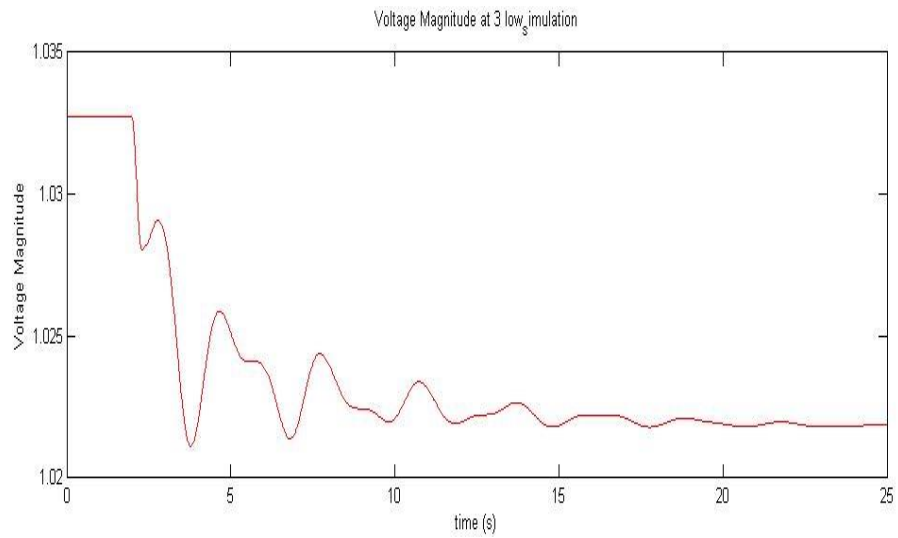
Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 επιλέγουμε το file που θέλουμε να τρέξουμε, `low_simulation.m`. στο οποίο file έχουμε πραγματοποιήσει όλες τις απαραίτητες αλλαγές για να μπορούμε να έχουμε σωστή ανάλυση. Οι κύριες αλλαγές που έγιναν ήταν να προστεθεί ελεγκτής φορτίου και σταθεροποιητής συστήματος ισχύος.



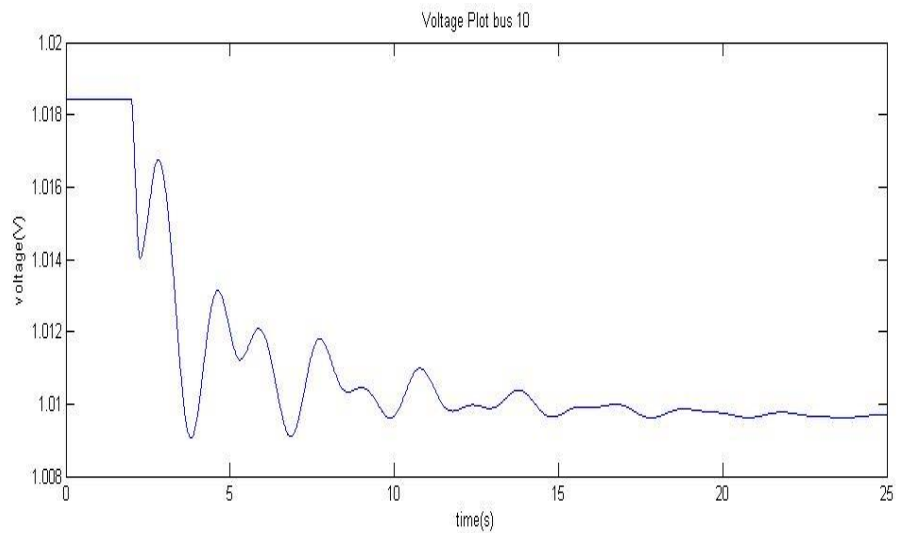
Σχήμα 4.2: Επιλέγουμε το file που αντιστοιχεί στο κύκλωμα που θα αναλύσουμε.

4.1 Προσομοίωση χωρίς PSS και ελεγκτή φορτίου

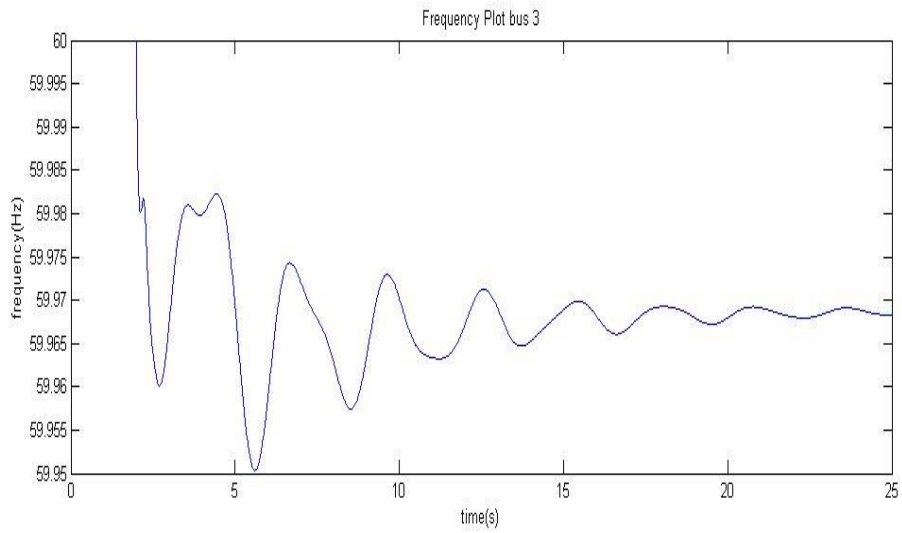
Στα παρακάτω αποτελέσματα δεν χρησιμοποιούμε PSS (Power System Stabilizer) και ελεγκτή φορτίου (load controller).



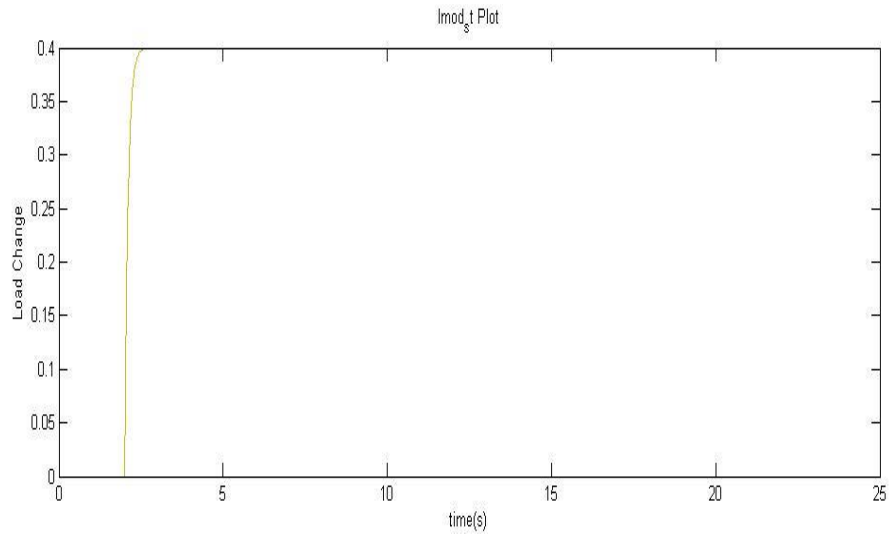
Διάγραμμα 4.1.1: Μέγεθος τάσης του κυκλώματος.



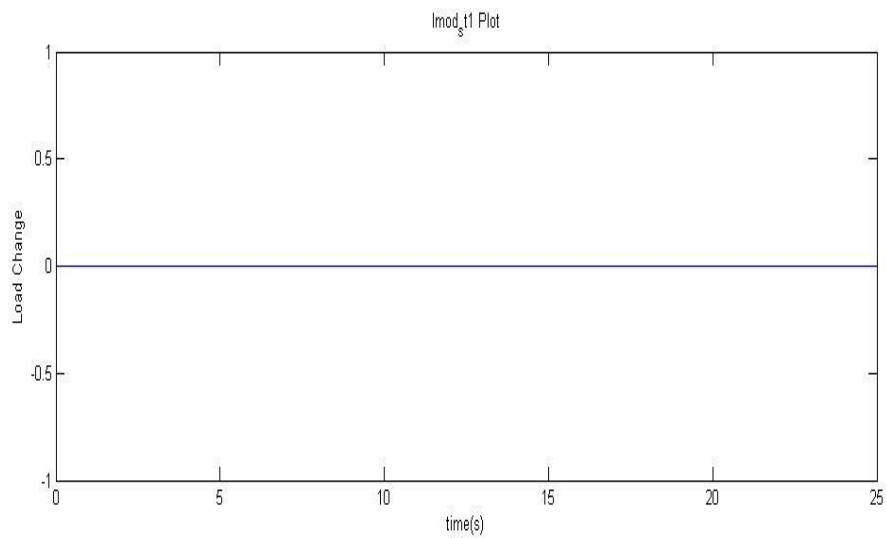
Διάγραμμα 4.1.2: Τάση φορτίου στον ζυγό 10.



Διάγραμμα 4.1.3: Συχνότητα φορτίου στον ζυγό 3.



Διάγραμμα 4.1.4: Αλλαγή φορτίου του κυκλώματος.



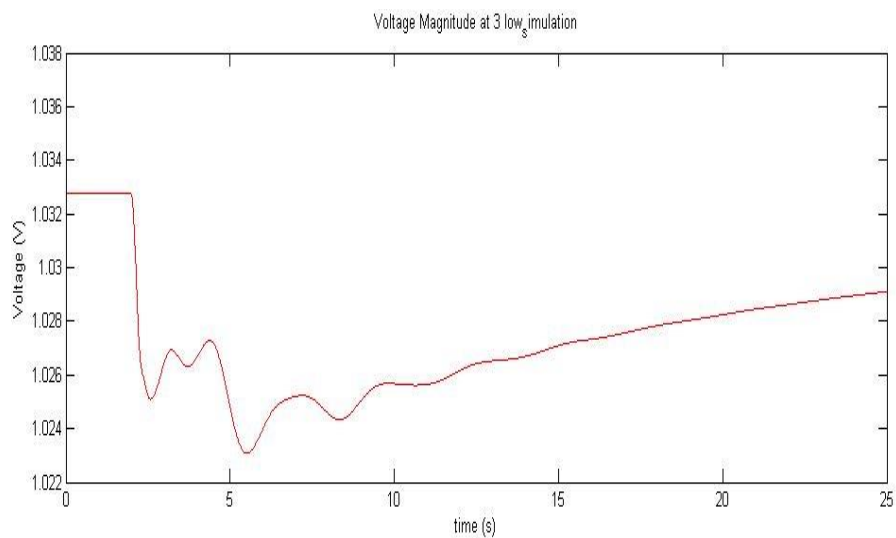
Διάγραμμα 4.1.5: Μεταβολή ελεγχόμενου φορτίου.

Σχολιασμός:

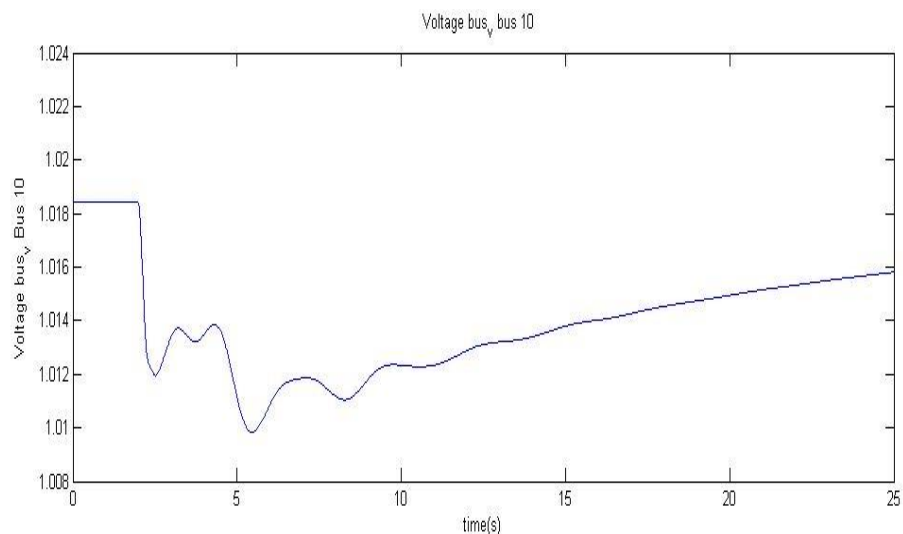
Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 4.1.1 και 4.1.2 η τάση του φορτίου μειώνεται με πολλές ταλαντώσεις. Το σύστημα δεν μπορεί να επαναφέρει την ονομαστική του τιμή. Επίσης όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.1.3 έχουμε πολλές ταλαντώσεις και στην συχνότητα, κάτι το οποίο είναι ανεπιθύμητο. Τα αποτελέσματα στα διαγράμματα 4.1.4 και 4.1.5 είναι αναμενόμενα, δείχνοντας ότι δεν υπάρχει έλεγχος φορτίου στην συγκεκριμένη περίπτωση.

4.2 Προσομοίωση με την χρήση μόνο PSS

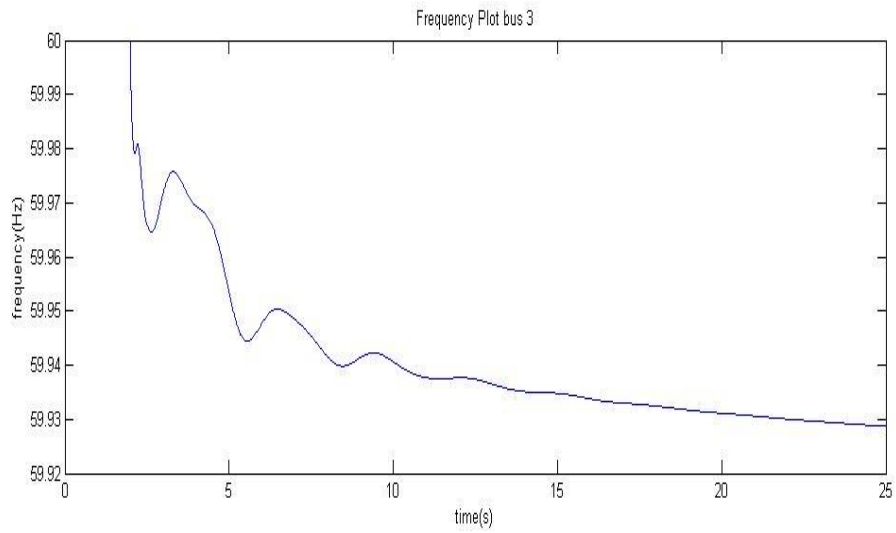
Στα παρακάτω αποτελέσματα χρησιμοποιούμε μόνο το PSS (Power System Stabilizer), χωρίς να έχουμε ελεγκτή φορτίου (load controller).



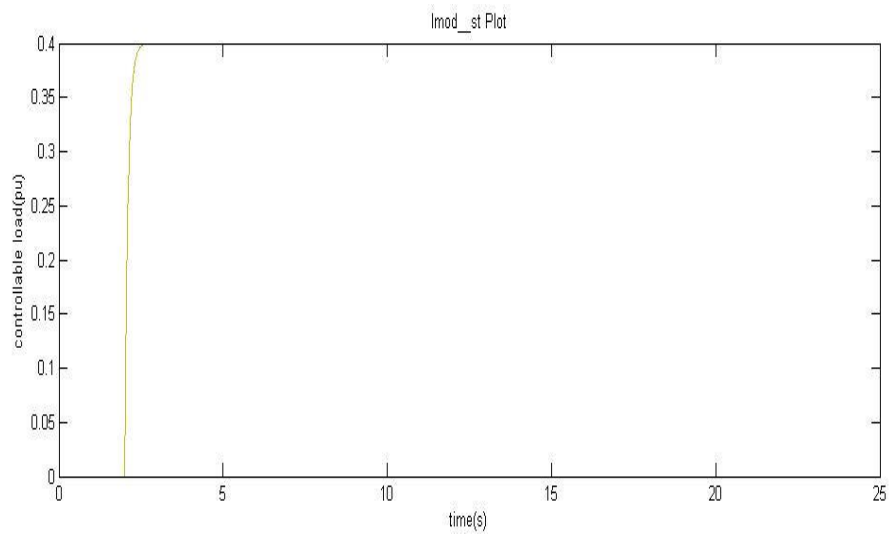
Διάγραμμα 4.2.1: Μέγεθος τάσης του κυκλώματος.



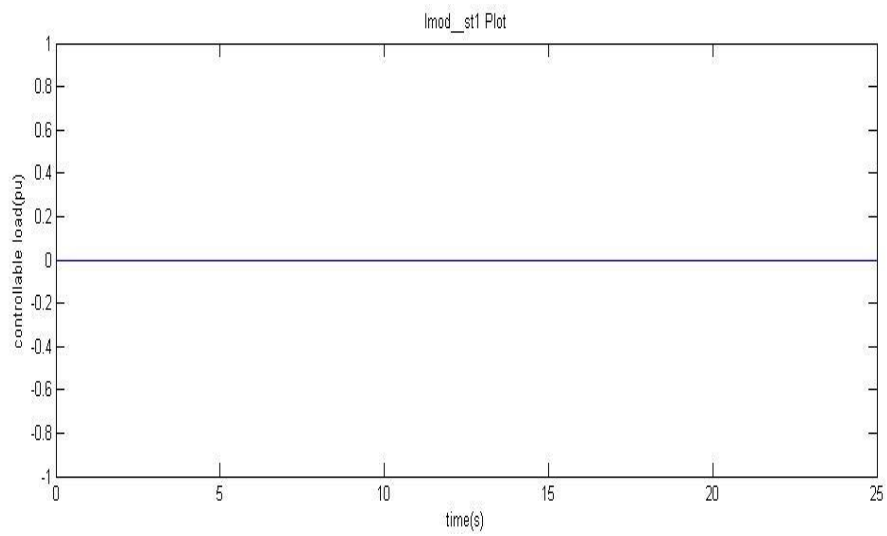
Διάγραμμα 4.2.2: Τάση φορτίου στον ζυγό 10.



Διάγραμμα 4.2.3: Συχνότητα φορτίου στον ζυγό 3.



Διάγραμμα 4.2.4: Αλλαγή φορτίου του κυκλώματος.



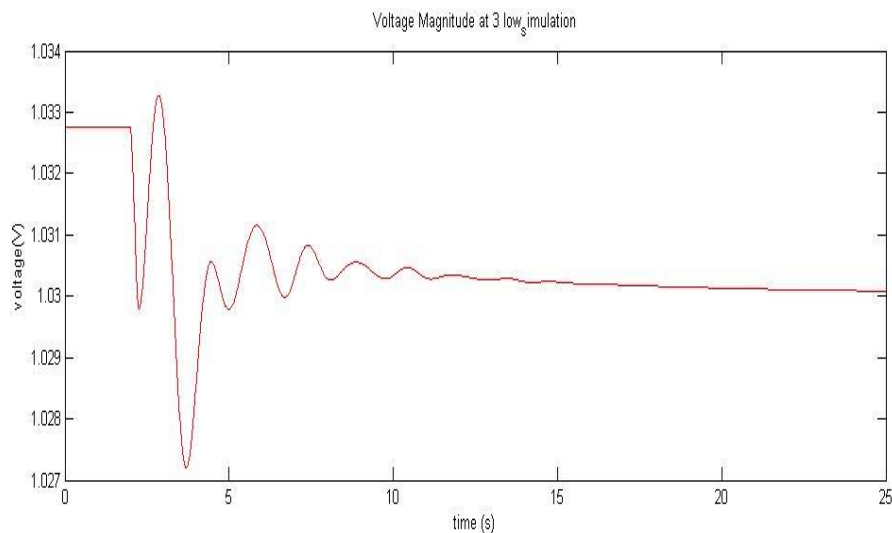
Διάγραμμα 4.2.5: Μεταβολή ελεγχόμενου φορτίου.

Σχολιασμός:

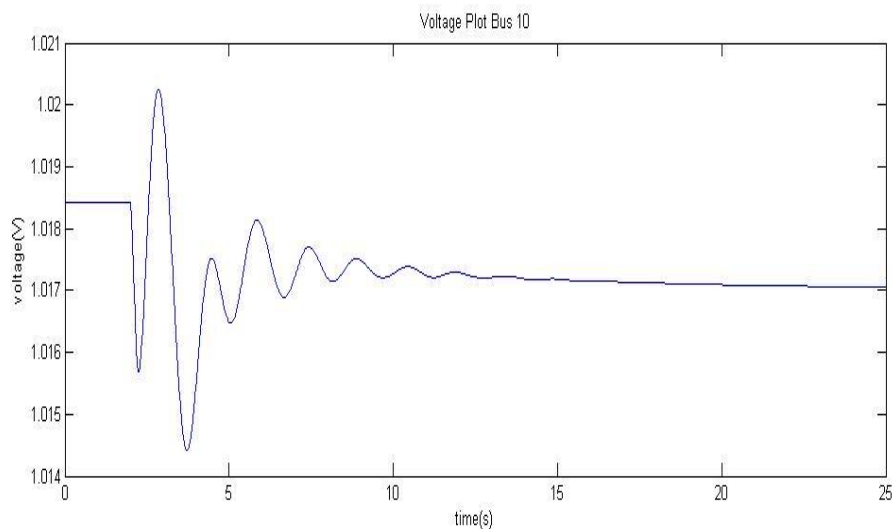
Λόγω του PSS στα διαγράμματα 4.2.1 και 4.2.2 η τάση του φορτίου μειώνεται με σημαντική μείωση των ταλαντώσεων, και φαίνεται η βελτίωση στην σταθεροποίηση της τάσης, αφού πλησιάζει περισσότερο την ονομαστική της τιμή. Επίσης όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.2.3 υπάρχει σημαντική μείωση στις ταλαντώσεις και στην συχνότητα, κάτι το οποίο είναι επιθυμητό. Τα αποτελέσματα στα διαγράμματα 4.2.4 και 4.2.5 είναι αναμενόμενα, δείχνοντας ότι δεν υπάρχει έλεγχος φορτίου στην συγκεκριμένη περίπτωση.

4.3 Προσομοίωση με την χρήση μόνο ελεγκτή φορτίου($t=0.1s$)

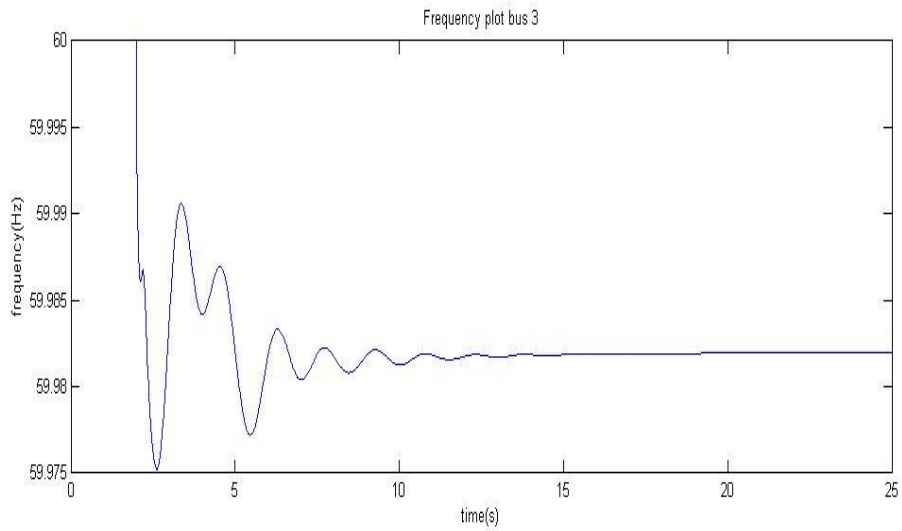
Στα παρακάτω αποτελέσματα δεν χρησιμοποιούμε το PSS (Power System Stabilizer), αλλά χρησιμοποιούμε load controller. Ο χρόνος απόκρισης του load controller είναι 0,1 seconds.



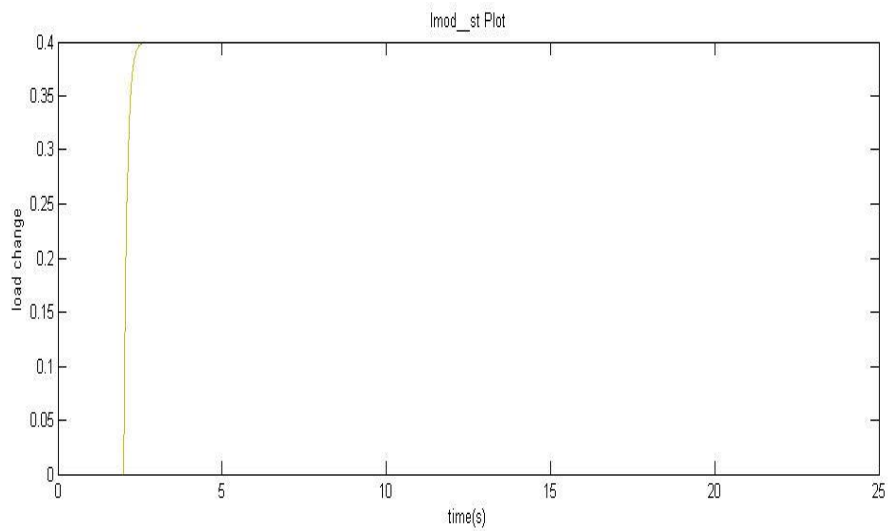
Διάγραμμα 4.3.1: Μέγεθος τάσης του κυκλώματος.



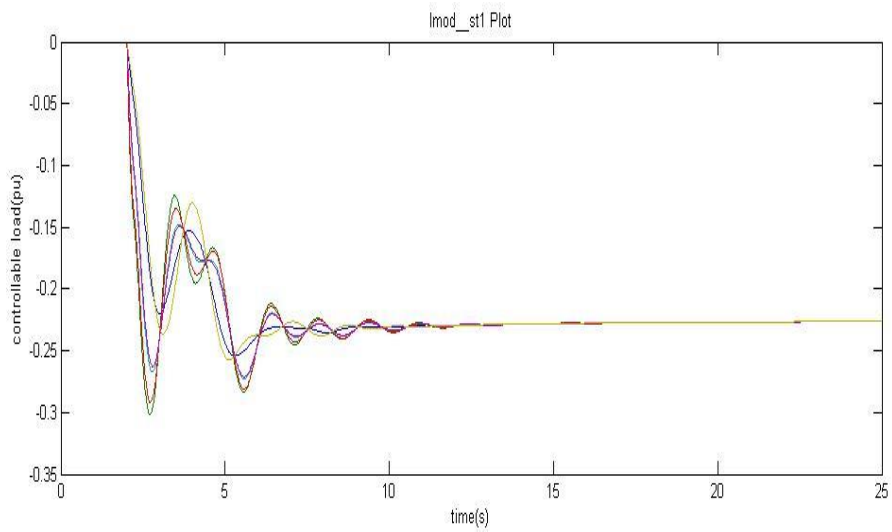
Διάγραμμα 4.3.2: Τάση φορτίου στον ζυγό 10.



Διάγραμμα 4.3.3: Συχνότητα φορτίου στον ζυγό 3.



Διάγραμμα 4.3.4: Αλλαγή φορτίου του κυκλώματος.



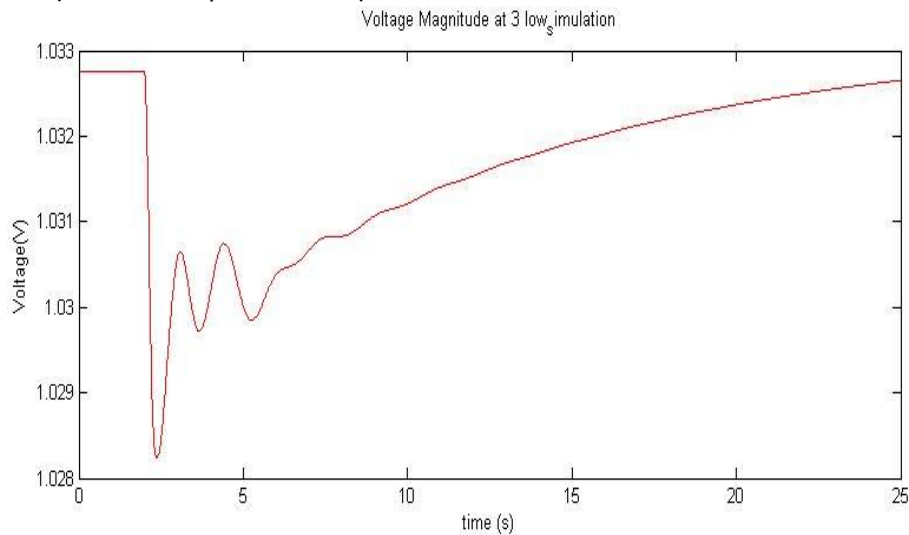
Διάγραμμα 4.3.5: Μεταβολή ελεγχόμενου φορτίου.

Σχολιασμός:

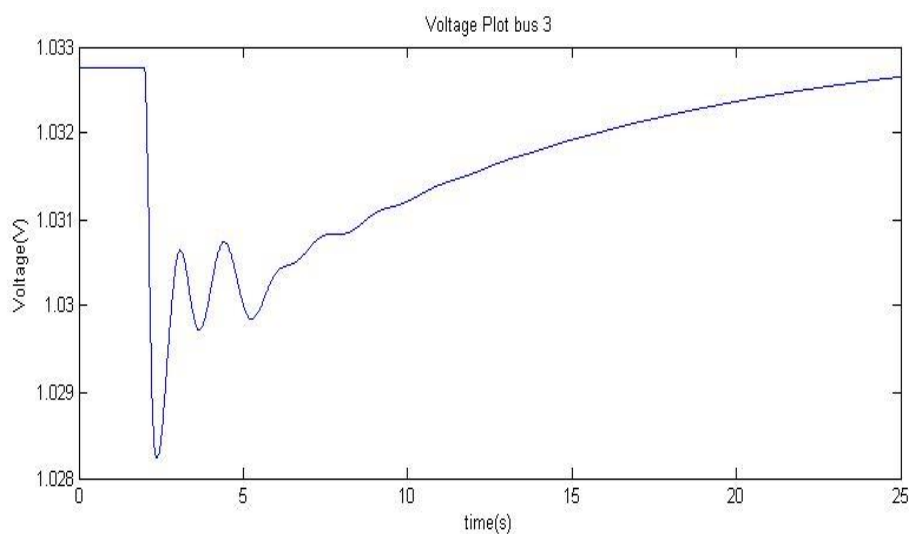
Λόγω απουσίας του PSS στα διαγράμματα 3.1 και 3.2 η τάση του φορτίου μειώνεται αλλά εμφανίζονται αρχικά μεγάλες ταλαντώσεις οι οποίες σταδιακά μειώνονται, και λόγω του ελεγχόμενου φορτίου φαίνεται η βελτίωση στην σταθεροποίηση της τάσης, αφού πλησιάζει περισσότερο την ονομαστική της τιμή σε σύγκριση με τα διαγράμματα 1.1 και 1.2 όπου δεν έχουμε ελεγχόμενα φορτία. Επίσης όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.3 όπως και στην τάση έτσι και στην συχνότητα αρχικά υπάρχουν ταλαντώσεις, κάτι το οποίο είναι ανεπιθύμητο. Τα αποτελέσματα στα διαγράμματα 1.4 και 1.5 μας δείχνουν την συνεισφορά του ελεγχόμενου φορτίου στην σταθεροποίηση της συχνότητας.

4.4 Προσομοίωση με PSS και ελεγκτή φορτίου (t=0.1)

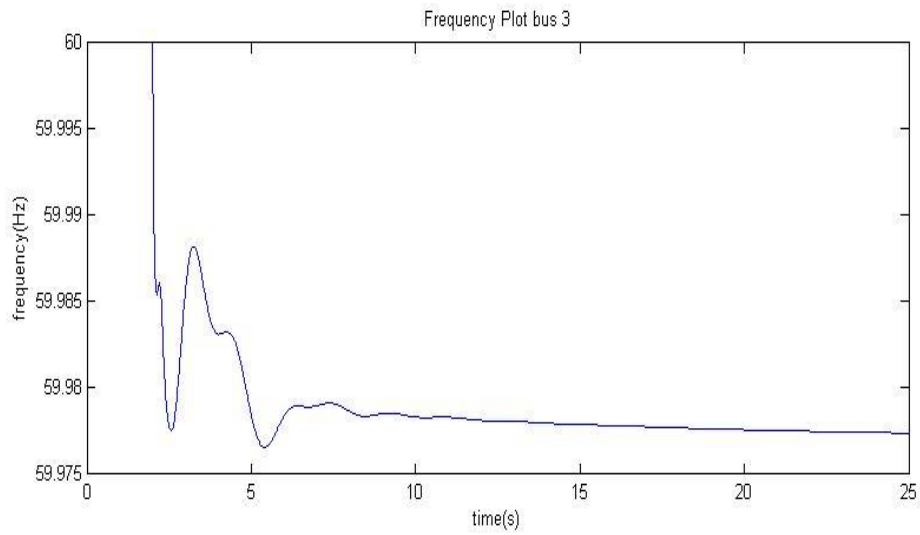
Στα παρακάτω αποτελέσματα έχουμε συνδυασμό του PSS (Power System Stabilizer) και του load controller με χρόνο απόκρισης του load controller να είναι 0,1 seconds. Σε αυτή την περίπτωση αναμένουμε τα καλύτερα αποτελέσματα.



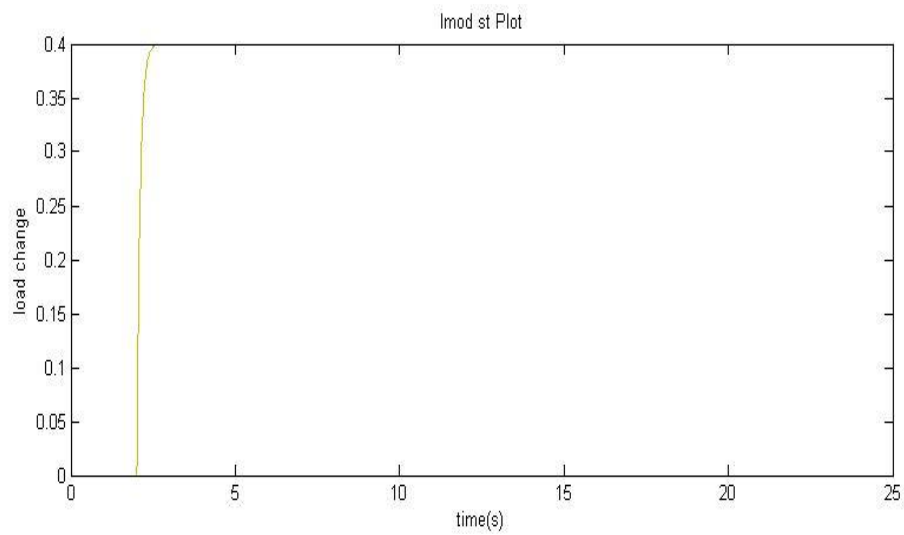
Διάγραμμα 4.4.1: Μέγεθος τάσης του κυκλώματος.



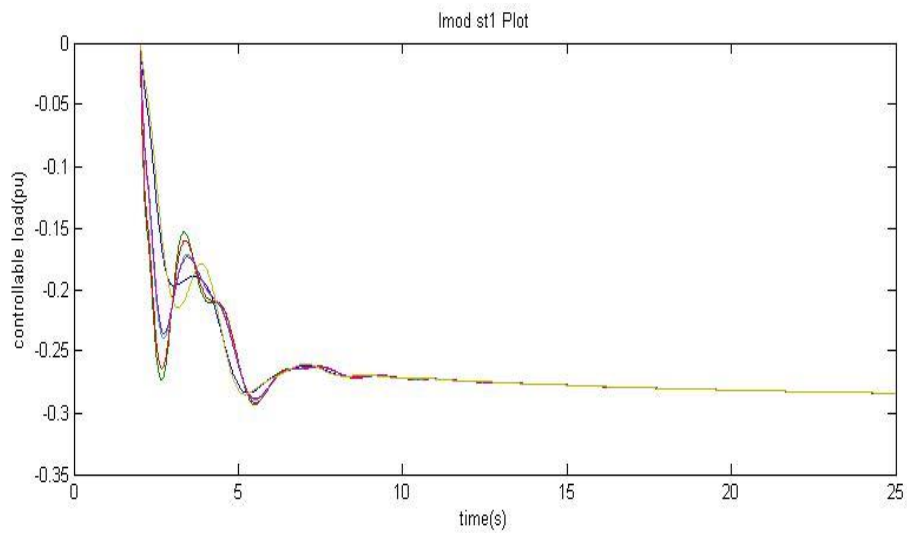
Διάγραμμα 4.4.2: Τάση φορτίου στον ζυγό 3.



Διάγραμμα 4.4.3: Συχνότητα φορτίου στον ζυγό 3.



Διάγραμμα 4.4.4: Αλλαγή φορτίου του κυκλώματος.



Διάγραμμα 4.4.5: Μεταβολή ελεγχόμενου φορτίου.

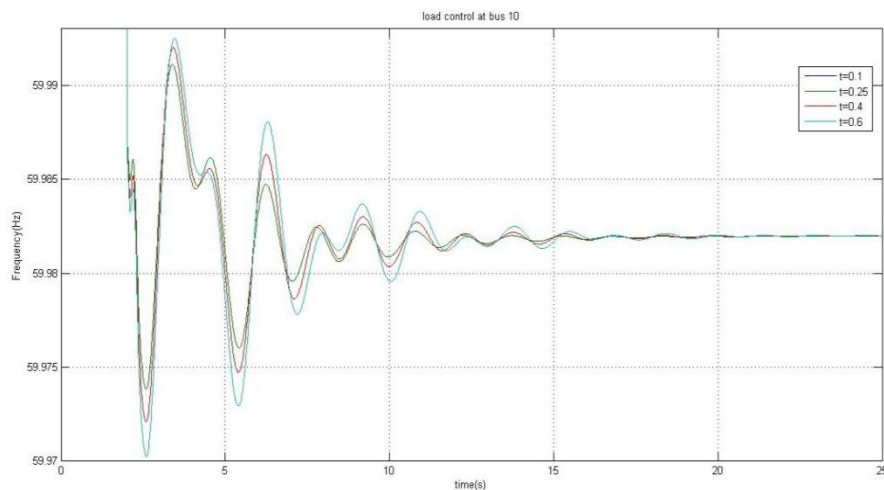
Σχολιασμός:

Λόγω συνδυασμού του PSS και του load controller από τα διαγράμματα 4.4.1 και 4.4.2 η τάση του φορτίου παρουσιάζει μεγάλη μείωση των ταλαντώσεων φαίνεται η βέλτιστη σταθεροποίηση της τάσης, αφού επιστρέφει την τάση στην ονομαστική της τιμή, όπου πλέον είναι ξεκάθαρα ότι έχουμε την βέλτιστη λύση σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Επίσης όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.4.3 έχουμε σταθεροποίηση της συχνότητας χωρίς σημαντικές ταλαντώσεις, όπου είναι και το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τα αποτελέσματα στα διαγράμματα 4.4.4 και 4.4.5 μας δείχνουν την συνεισφορά του ελεγχόμενου φορτίου στην σταθεροποίηση της συχνότητας.

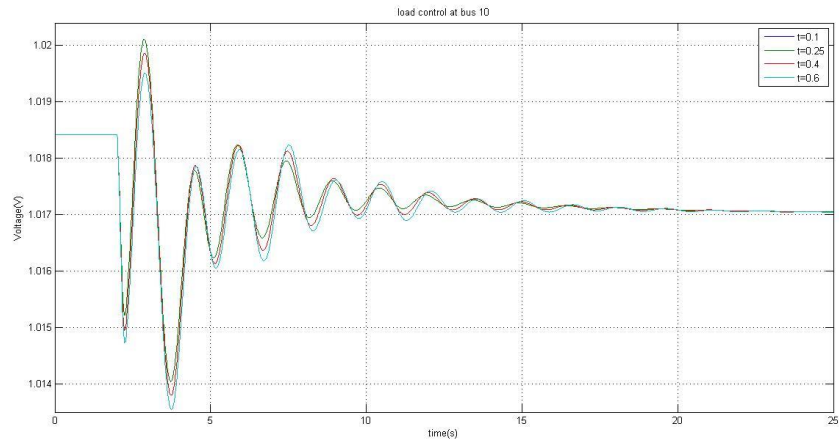
4.5 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Όταν χρησιμοποιούμε load control, ένας παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα είναι ο χρόνος απόκρισης του φορτίου στην συνεισφορά του για έλεγχο της συχνότητας. Έτσι επαναλάβαμε τις 2 περιπτώσεις που χρησιμοποιούμε load control για τους χρόνους $t=0.25$, $t=0.1$, $t=0.4$, $t=0.6$ και είχαμε τα παρακάτω αποτελέσματα όσο αφορά το bus 10:

- Αποτελέσματα χωρίς PSS

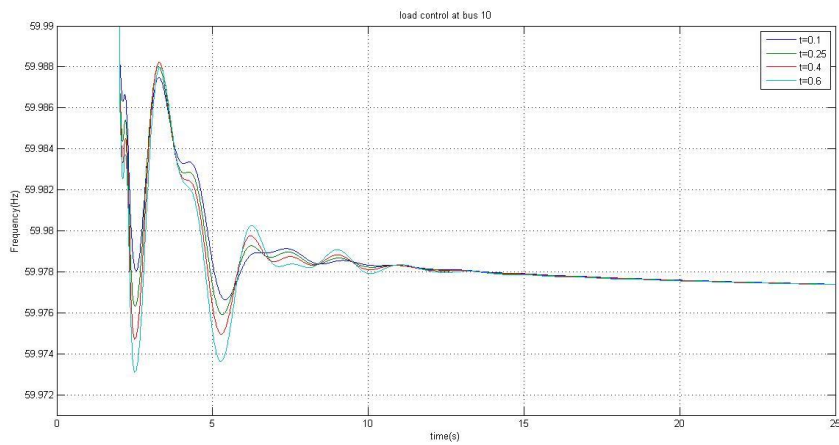


Διάγραμμα 4.5.1: Συχνότητα bus 10 ανάλογα με χρόνο απόκρισης φορτίου.

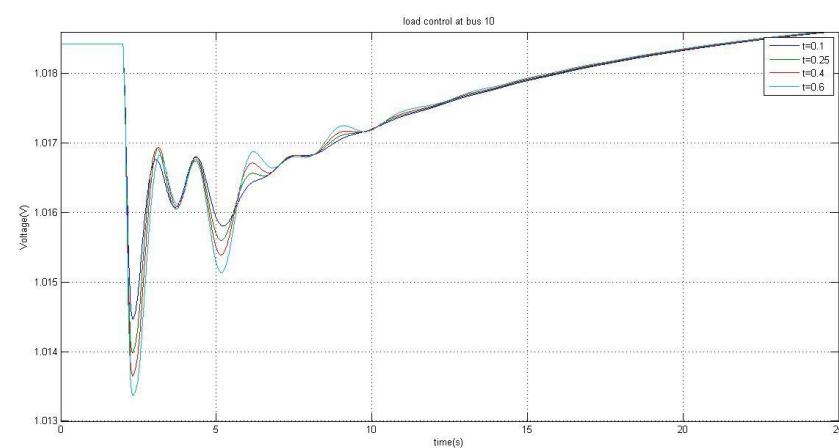


Διάγραμμα 4.5.2: Τάση bus 10 ανάλογα με χρόνο απόκρισης φορτίου.

- Αποτελέσματα με PSS.



Διάγραμμα 4.5.3: Συχνότητα bus 10 ανάλογα με χρόνο απόκρισης φορτίου.

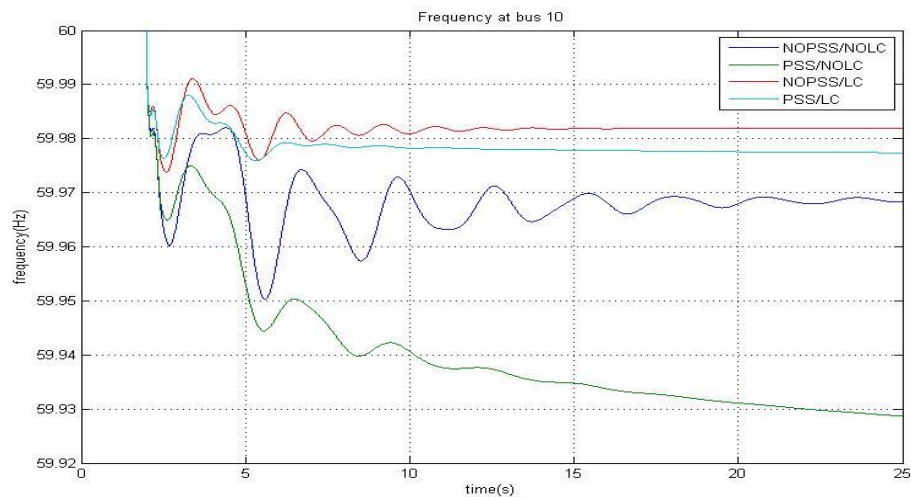


Διάγραμμα 4.5.4: Τάση bus 10 ανάλογα με χρόνο απόκρισης φορτίου.

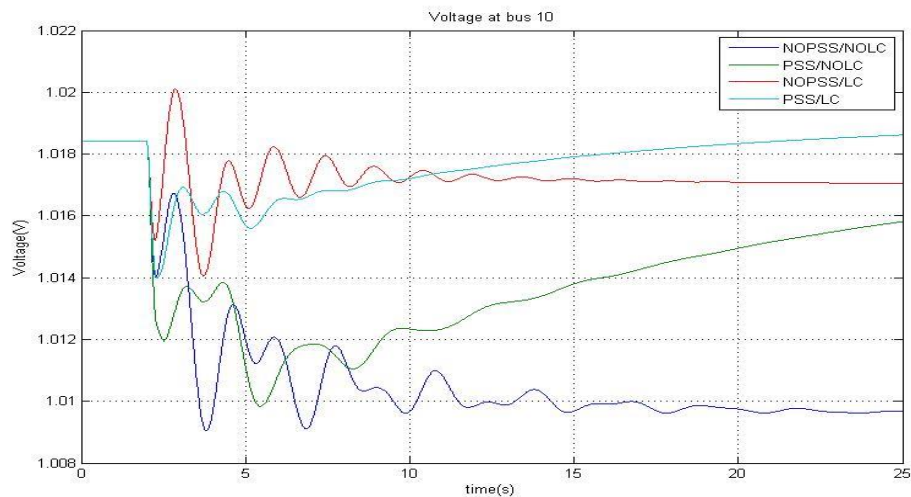
Σχολιασμός:

Και στις 2 περιπτώσεις, δηλαδή χρησιμοποιώντας ή όχι PSS, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι έχουμε γρηγορότερο έλεγχο της συχνότητας και με μικρότερες ταλαντώσεις για τον χρόνο $t=0.1$, καταλήγοντας έτσι στο συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείτε μικρότερος χρόνος απόκρισης στο load control.

4.6 Σύγκριση μεταξύ όλων των μεθόδων



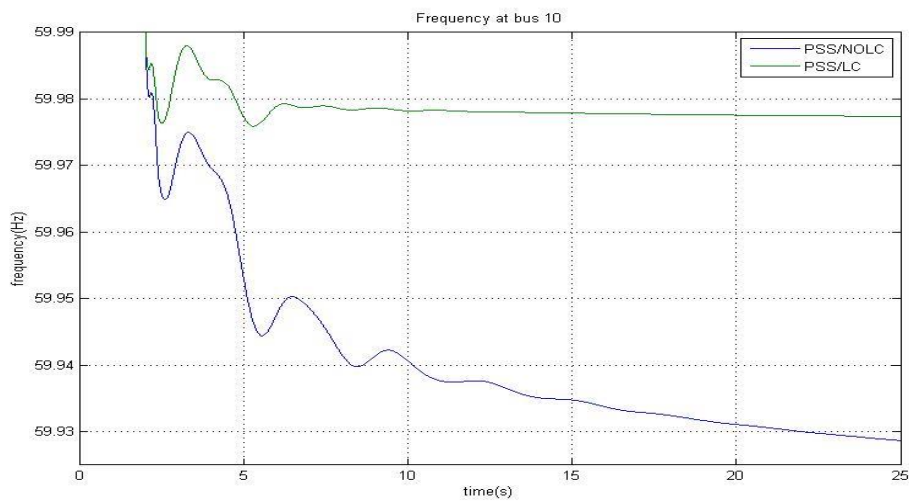
Διάγραμμα 4.6.1: Συχνότητα με όλους τους συνδυασμούς ελέγχων.



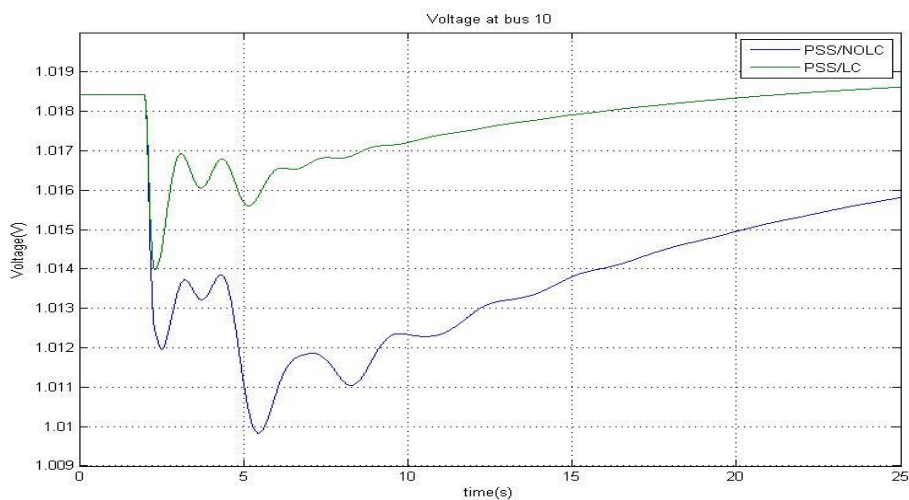
Διάγραμμα 4.6.2: Τάση με όλους τους συνδυασμούς ελέγχων.

Σχολιασμός:

Έχουμε διατυπώσει ένα πρόβλημα για βέλτιστο έλεγχο φορτίου (OLC) στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος όπου ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος με την συμμετοχή των ελεγχόμενων φορτίων που βοηθούν στην ισορροπία της ισχύος σε όλο το δίκτυο. Έχουμε δείξει ότι η δυναμική των εξισώσεων swing και οι ροές ισχύος, σε συνδυασμό με τον έλεγχο του φορτίου συχνότητας, χρησιμεύουν ως ένας primal-dual algorithm για την επίλυση του διπλού προβλήματος της OLC. Ακόμη και αν το σύστημα έχει πολλαπλά σημεία, έχουμε αποδείξει ότι παρ'όλα αυτά συγκλίνει σε ένα βέλτιστο σημείο. Η προσομοίωση του συστήματος δοκιμής 68-bus IEEE επιβεβαίωσε ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός μπορεί να συγχρονίσει ξανά τις συχνότητες των bus με σημαντικά παροδική βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με τη χρήση μόνο των τοπικών μηχανισμών ελέγχου της γεννήτριας.



Διάγραμμα 4.6.3: Συχνότητα με ή χωρίς έλεγχο φορτίου



Διάγραμμα 4.6.4: Τάση με ή χωρίς έλεγχο φορτίου

Γενικό συμπέρασμα:

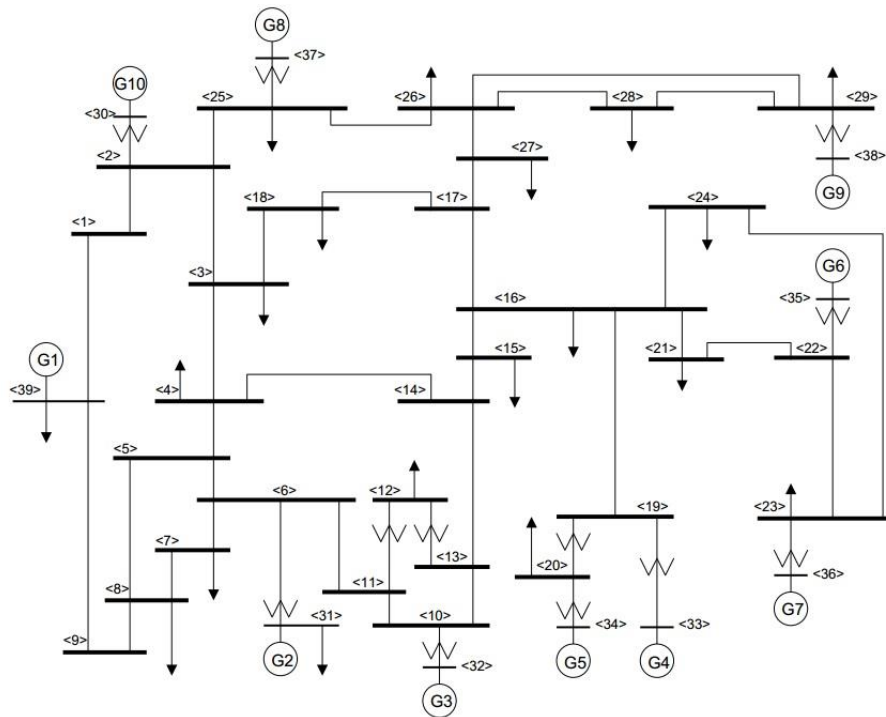
Τρέχοντας κάποιους αλγόριθμους (static load controller) προσομοιώσαμε χρησιμοποιώντας την PST ένα κύκλωμα ισχύος αποτελούμενο από 68 ζυγούς, παρατηρώντας ότι βελτιώνει την λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, επιτρέποντας στην συχνότητα να αποκλίνει λιγότερο από την ονομαστική της τιμή, η οποία είναι τα 50 Hz. Επίσης η παρουσία του PSS βελτιώνει την συμπεριφορά της συχνότητας, δηλαδή μειώνει σε σημαντικό βαθμό τις ταλαντώσεις.

4.7 Εξαγωγή συναρτήσεων μεταφοράς των ελεγκτών ρύθμισης της συχνότητας.

Κύριος στόχος του υποκεφαλαίου αυτού είναι η εξαγωγή των συναρτήσεων μεταφοράς των διάφορων ελεγκτών ρύθμισης της συχνότητας (ελεγκτές φορτίου και turbine governors). Η εξαγωγή των συναρτήσεων μεταφοράς των συγκεκριμένων ελεγκτών γίνεται μέσω προσομοιώσεων στην Matlab με την χρήση του PST Toolbox και την χρήση της εντολής tfest. Περισσότερες πληροφορίες για την εντολή tfest μπορούν να αντληθούν από [82].

Το διάγραμμα Nyquist ενός παθητικού συστήματος πρέπει να βρίσκεται στο δεξιό θετικό ημιπίεδο. Από το διάγραμμα bode μπορούμε να παρατηρήσουμε που βρίσκονται οι πόλοι/ρίζες της συνάρτησης μεταφοράς και ανάλογα με το πού βρίσκονται βλέπουμε να εξάγουμε το αντίστοιχο Gain που αναλογεί. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει για ένα μη παθητικό σύστημα, σε ποιες συχνότητες εμφανίζονται οι μη ασταθείς πόλοι (εάν υπάρχουν) της συνάρτησης μεταφοράς και το αντίστοιχο κέρδος στις συχνότητες αυτές. Ένα μεγάλο Gain μπορεί να προκαλέσει ασταθή συμπεριφορά, ενώ ένα μικρό Gain δεν θα επηρεάσει την σταθερότητα του συστήματος.

Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στην Matlab χρησιμοποιώντας το PST. Τα αποτελέσματα μας προέρχονται μέσα από διάφορες προσομοιώσεις του IEEE 39-bus test system New England. Το μονοφασικό διάγραμμα του προαναφερθέντος συστήματος ισχύος δίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο λόγος χρήσης του εν λόγω συστήματος είναι καταρχήν για το ότι πρόκειται για ένα επικυρωμένο σύστημα δοκιμής μεσαίου μεγέθους και κατά δεύτερο επειδή δίδονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες και στοιχεία για την εξαγωγή των συναρτήσεων μεταφοράς (επίπεδα τάσης, ισχύος κτλ.).



Σχήμα 4.7.1: IEEE 39-bus test system New England

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν μέσω της χρησιμοποίησης αναλυτικών μοντέλων γεννητριών, dc διεγερτών τάσης (exciters) και σταθεροποιητών συστημάτων ισχύος σε διάφορες γεννήτριες και φορτία.

Η διαμόρφωση του συστήματος δοκιμής:

Οι γεννήτριες 2 έως 10 (ζυγοί 30-38) έχουν ενσωματωμένους διαθέσιμους διεγέρτες τάσης (exciters) και δυνατότητα χρήσης PSS. Για την εργασία μας, χρησιμοποιούμε τους διεγέρτες τάσης DC1 όταν οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται χωρίς PSS και ένα απλό διεγέρτη DC με ένα καλά συντονισμένο PSS περιγράφεται στο (H Yassami et al., 2010), όταν οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται με PSS.

Οι γεννήτριες 3,7,8,9,10 (ζυγοί 30,32,36,37,38) έχουν στην διάθεση τους turbine governors. Τα Turbine governors έχουν ενσωματωθεί τόσο σε αργές όσο και σε γρήγορες στον έλεγχο γεννήτριες, με σκοπό την μελέτη μη παθητικών συμπεριφορών. Συγκεκριμένα, η γεννήτρια 9 έχει γρήγορη απόκριση, ενώ η γεννήτρια 10 έχει αργή απόκριση. Οι υπόλοιπες γεννήτριες 3,7 και 8 έχουν μεσαία ταχύτητα απόκρισης.

Διαθέσιμοι στατικοί ελεγκτές φορτίου σε ζυγούς φορτίου 3, 7, 8, 15, 16, 18, 20, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 31.

Πληροφορίες προσομοιώσεων:

Διάρκεια Προσομοίωσης: 40 δευτερόλεπτα

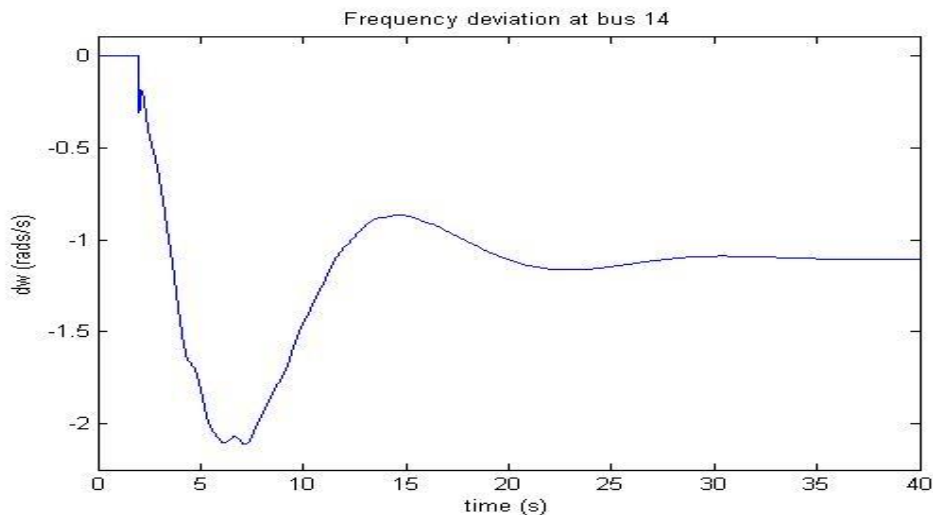
Απότομη αλλαγή φορτίου για 1pu στους ζυγούς φορτίου 4,12,21,26

Προσομοιώσεις:

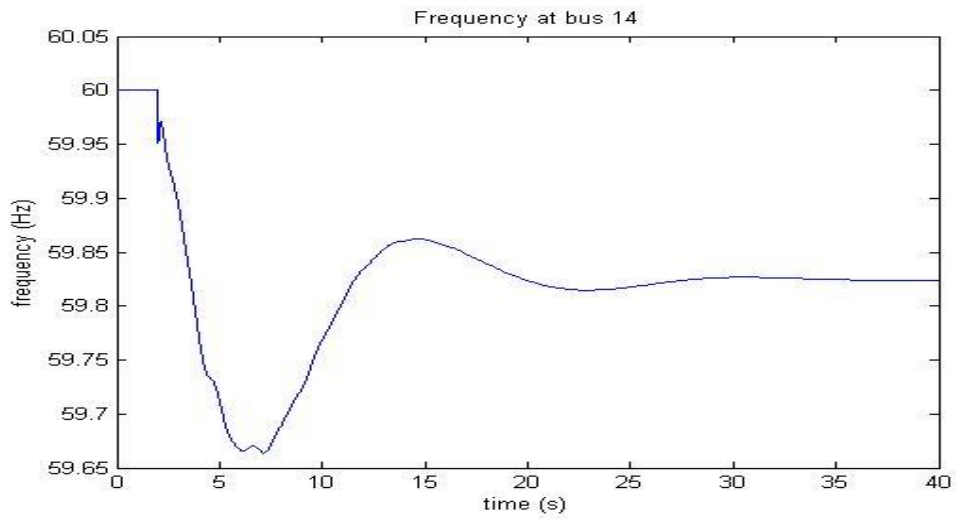
1. Προσομοίωση 1: Turbine governors on / Exciters on / PSS off / Static Load Control off
2. Προσομοίωση 2: Turbine governors on / Exciters on / PSS on / Static Load Control off
3. Προσομοίωση 3: Turbine governors off / Exciters on / PSS off / Static Load Control on (all load control gains set 1)
4. Προσομοίωση 4: Turbine governors off / Exciters on / PSS on / Static Load Control on (all load control gains set 1)
5. Προσομοίωση 5: Turbine governors on / Exciters on / PSS off / Static Load Control on (load control gains are not the same / 3 different gains 0.5,1 and 1.5)
6. Προσομοίωση 6: Turbine governors on / Exciters on / PSS on / Static Load Control on (load control gains are not the same / 3 different gains 0.5,1 and 1.5)

Για λόγους πληρότητας, στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουμε πρώτα την απόκλιση της ταχύτητας του ρότορα (ω), την συχνότητα (f) και την τάση (V) στον ζυγό 14 για την κάθε προσομοίωση. Βάση των μοντέλων που δίνονται από την PST, οι συναρτήσεις μεταφοράς των ελεγκτών φορτίου και των turbine governors υπολογίζονται/προσεγγίζονται με ένα πόλο και μηδέν μηδενικά και τρεις πόλους και δύο μηδενικά αντίστοιχα. Στα δύο παρακάτω σχήματα δίνονται τα μονογραμμικά διαγράμματα των μοντέλων ελέγχου φορτίου και turbine governor αντίστοιχα, όπως αυτά προσομοιώνονται στο PST.

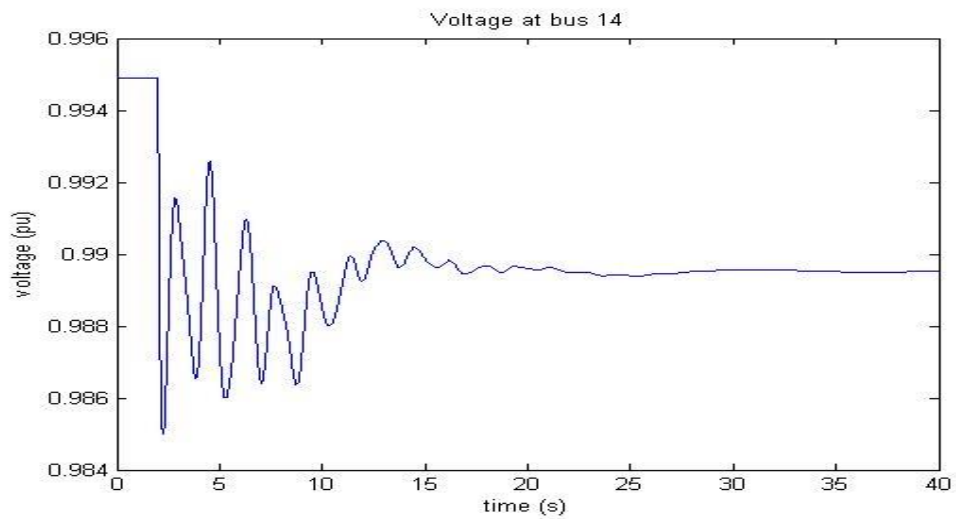
Προσομοίωση 1 - Αποτελέσματα:



Διάγραμμα 4.7.1: Απόκλιση συχνότητας στον ζυγό 14

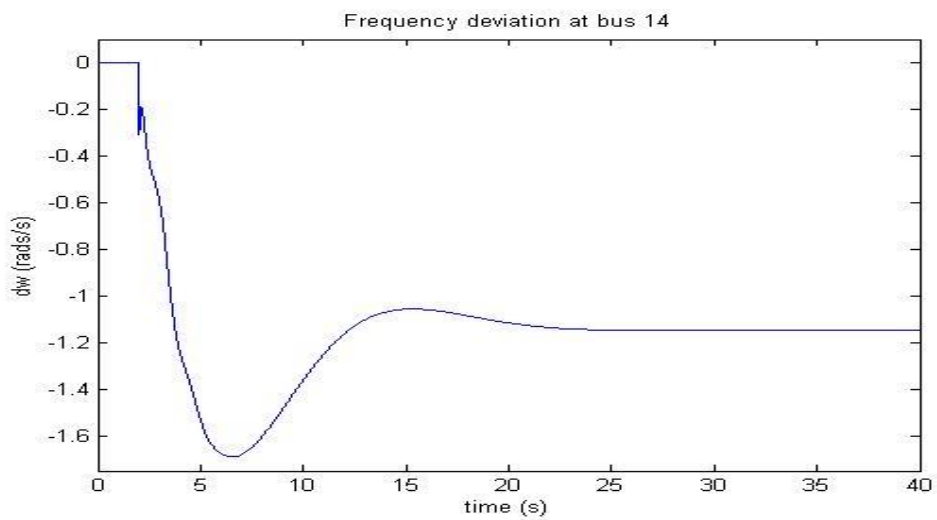


Διάγραμμα 4.7.2: Συχνότητα στον ζυγό 14

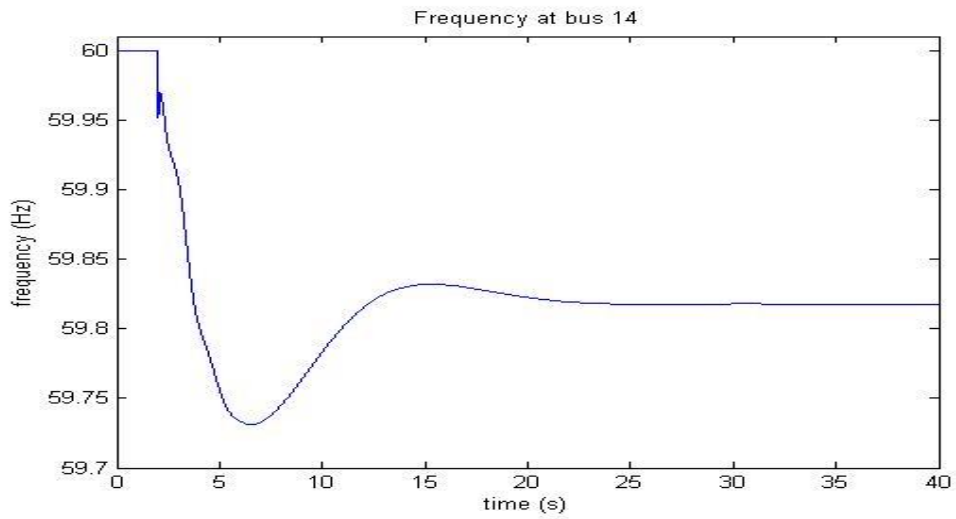


Διάγραμμα 4.7.3: Τάση στον ζυγό 14

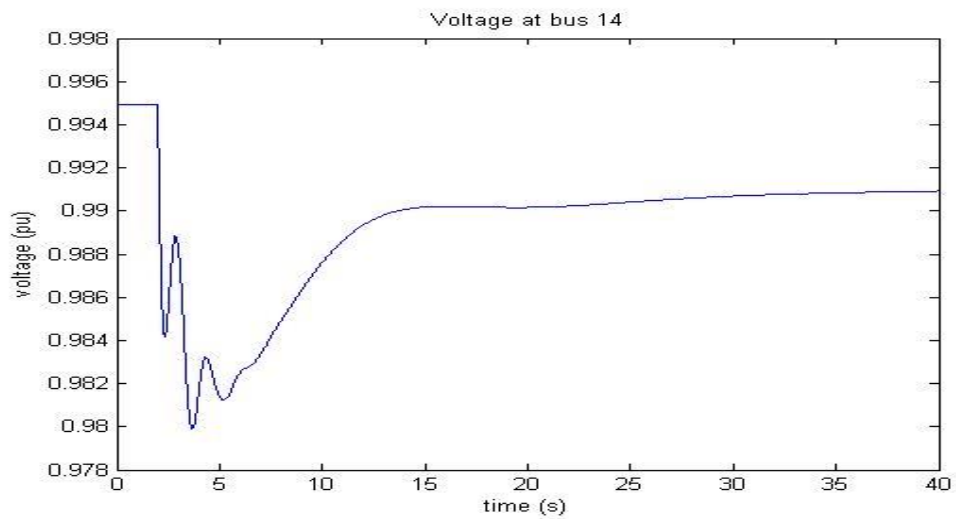
Προσομοίωση 2 - Αποτελέσματα:



Διάγραμμα 4.7.4: Απόκλιση συχνότητας στον ζυγό 14

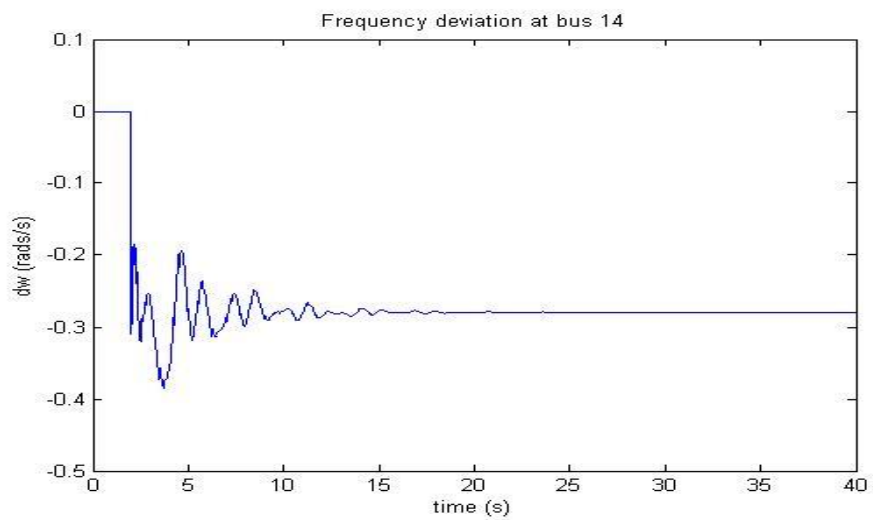


Διάγραμμα 4.7.5: Συχνότητα στον ζυγό 14

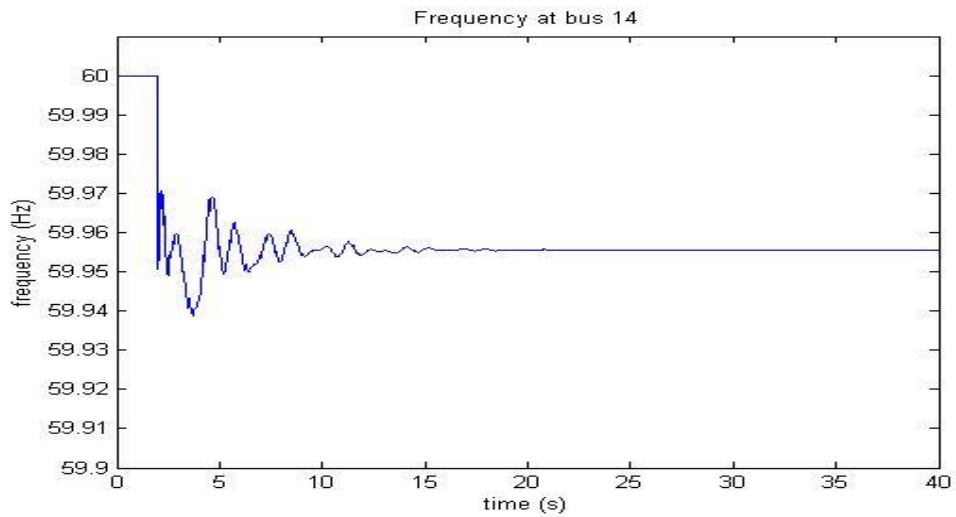


Διάγραμμα 4.7.6: Τάση στον ζυγό 14

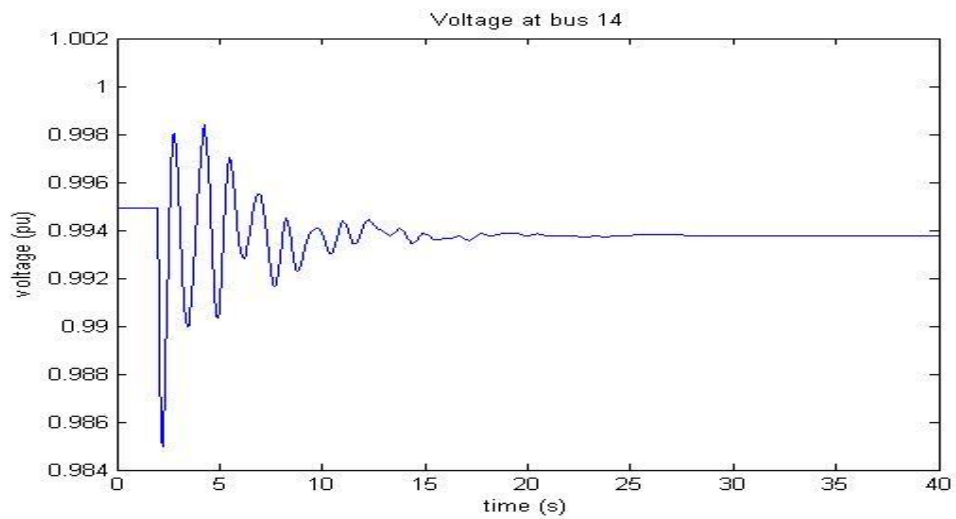
Προσομοίωση 3 - Αποτελέσματα:



Διάγραμμα 4.7.7: Απόκλιση συχνότητας στον ζυγό 14

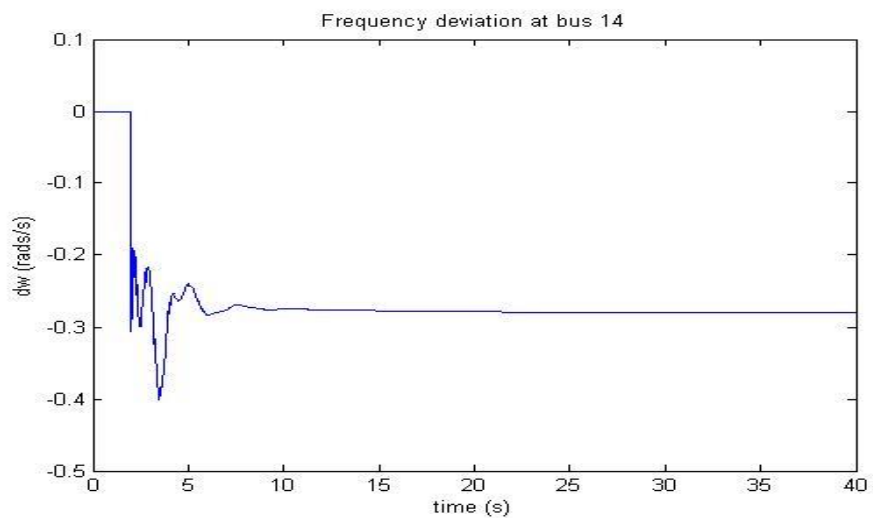


Διάγραμμα 4.7.8: Συχνότητα στον ζυγό 14

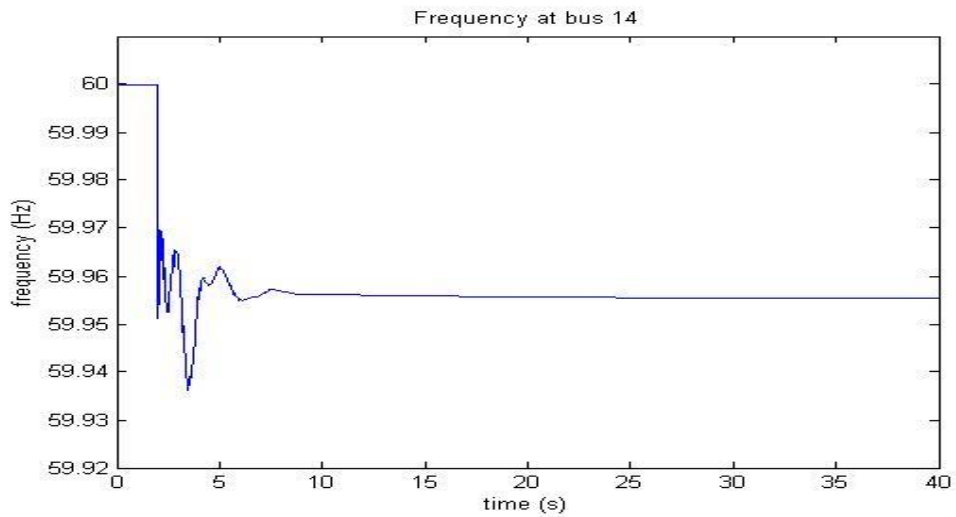


Διάγραμμα 4.7.9: Τάση στον ζυγό 14

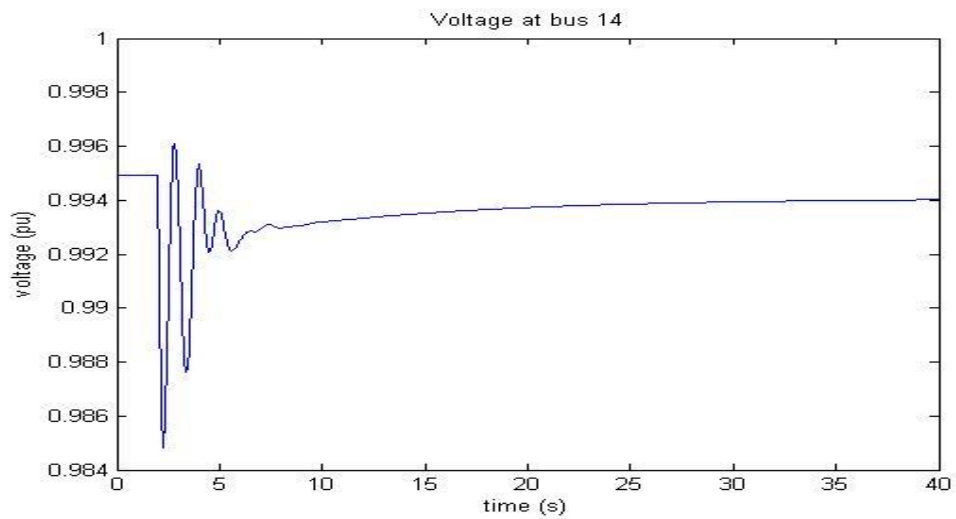
Προσομοίωση 4 - Αποτελέσματα:



Διάγραμμα 4.7.10: Απόκλιση συχνότητας στον ζυγό 14

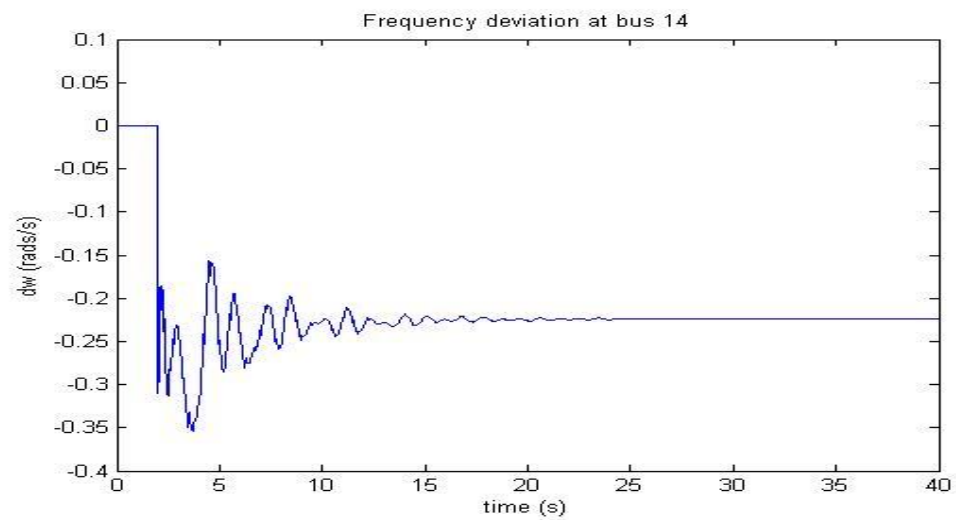


Διάγραμμα 4.7.11: Συχνότητα στον ζυγό 14

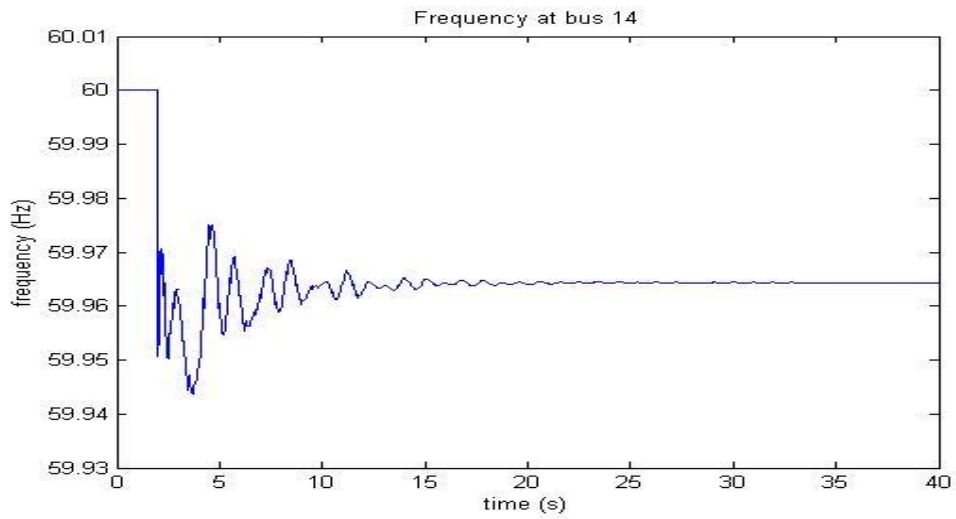


Διάγραμμα 4.7.12: Τάση στον ζυγό 14

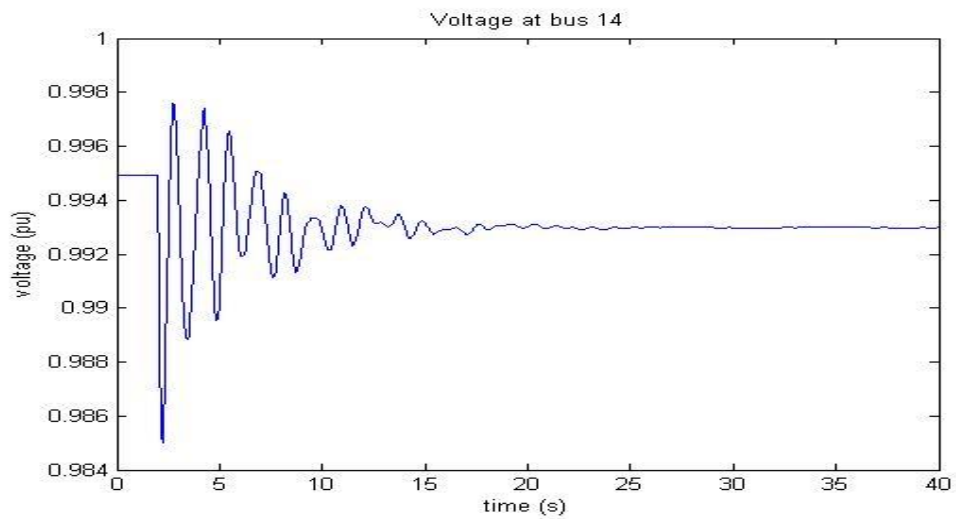
Προσομοίωση 5 - Αποτελέσματα:



Διάγραμμα 4.7.13: Απόκλιση συχνότητας στον ζυγό 14

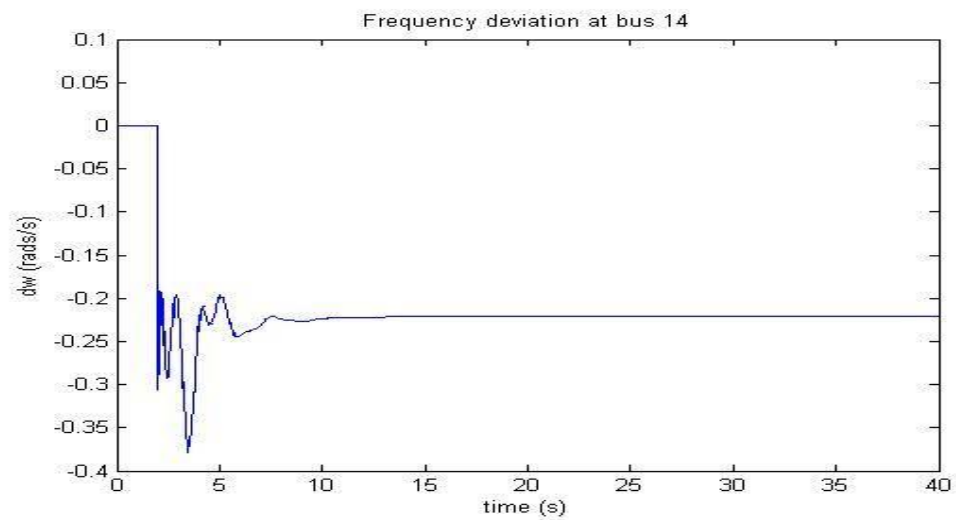


Διάγραμμα 4.7.14: Συχνότητα στον ζυγό 14

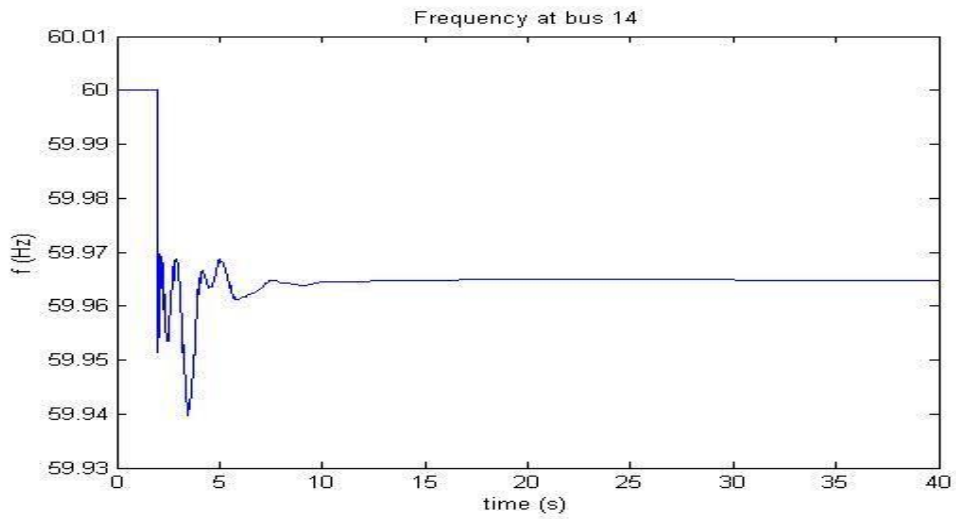


Διάγραμμα 4.7.15: Τάση στον ζυγό 14

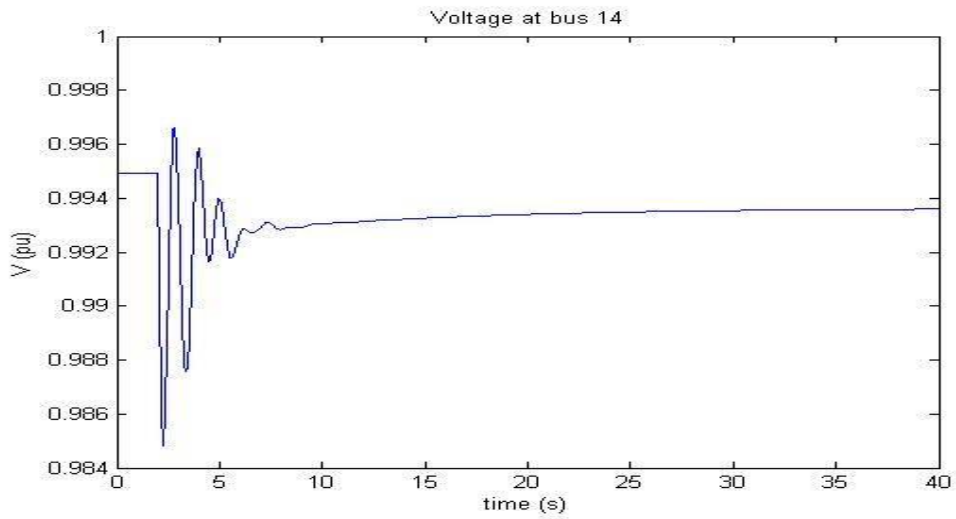
Προσομοίωση 6 - Αποτελέσματα:



Διάγραμμα 4.7.16: Απόκλιση συχνότητας στον ζυγό 14



Διάγραμμα 4.7.17: Συχνότητα στον ζυγό 14

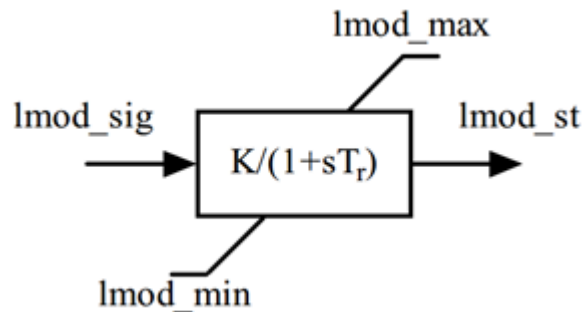


Διάγραμμα 4.7.12: Τάση στον ζυγό 14

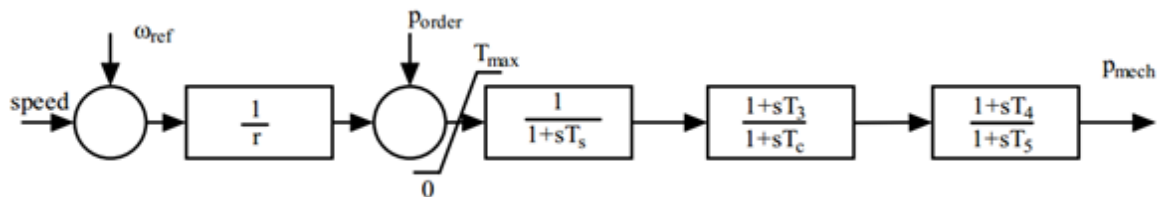
4.8 Αποτίμηση της παθητικότητας των συστημάτων ελέγχου συχνότητας μέσω των διαγραμμάτων Nyquist και Bode.

Χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη ρύθμιση για κάθε προσομοίωση, εκτιμούμε τις λειτουργίες μεταφοράς των turbine governors και των ελεγκτών στατικού φορτίου χρησιμοποιώντας τη λειτουργία tfest Matlab (για περισσότερες πληροφορίες επισκεφθείτε <http://www.mathworks.com/help/ident/ref/tfest.html>). Οι λειτουργίες μεταφοράς υπολογίζονται χρησιμοποιώντας $-\omega$ ως είσοδο και την απόκλιση ισχύος των ελεγκτών ως έξοδο. Δεδομένου ότι, tfest είναι λιγότερο ακριβής σε υψηλές συχνότητες, εισάγουμε περιοδικές μεταβολές φορτίου (κύματα sine), έτσι ώστε να εκτιμήσουμε με ακρίβεια τις απαραίτητες λειτουργίες μεταφοράς. Οι εκτιμώμενες λειτουργίες μεταφοράς ταιριάζουν με τα δεδομένα προσομοίωσης με ακρίβεια πάνω από 93%.

Το PST toolbox χρησιμοποιεί συγκεκριμένα δυναμικά μοντέλα για τη μοντελοποίηση ελεγκτών φορτίου και των turbine governors. Αυτά τα μοντέλα παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα.



Σχήμα 4.8.1: Μοντέλο ελεγκτή φορτίου

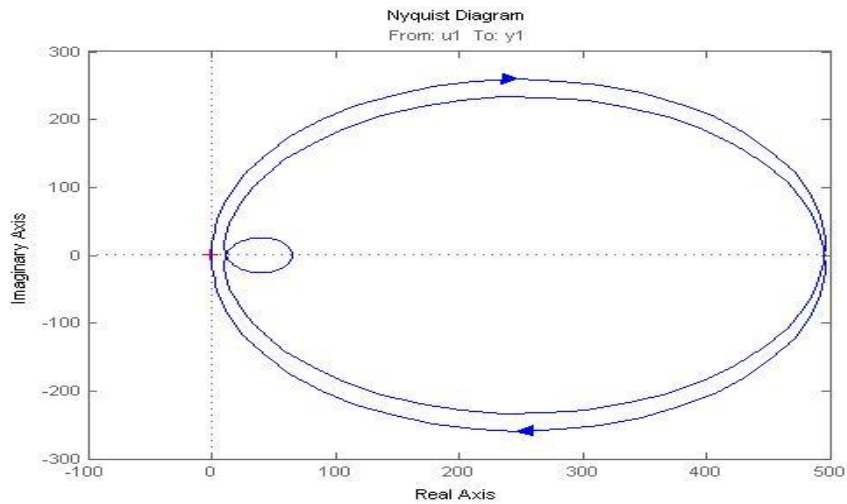


Σχήμα 4.8.2: Μοντέλο turbine governor

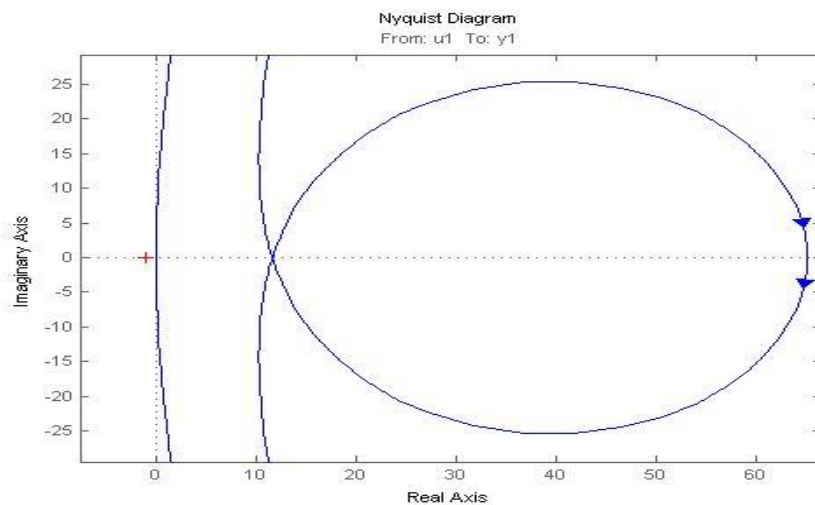
Έτσι, χρησιμοποιούμε ρυθμίσεις 3 πόλους / 2 μηδενικά και 1 πόλο / 0 μηδενικά για την εκτίμηση της λειτουργίας μεταφοράς των turbine governors και των ελεγκτών φορτίου αντίστοιχα.

Προσομοίωση 1:

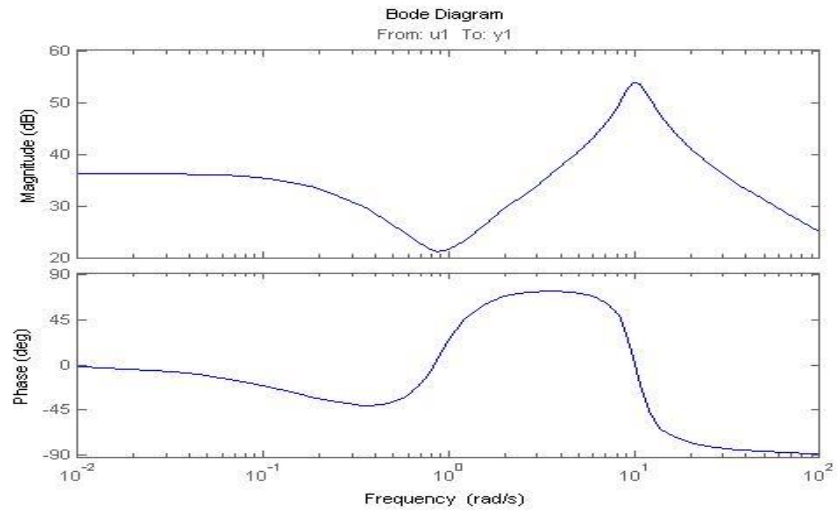
Σημαντικό: Όπως μπορούμε να δούμε από τα ακόλουθα διαγράμματα Nyquist των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς, οι turbine governors δεν είναι καθαρά παθητικά συστήματα. Συγκεκριμένα, γεννήτριες ταχείας δράσης παρουσιάζουν μερικές φορές μη παθητική συμπεριφορά. Παρά αυτή την μη παθητική συμπεριφορά, το σύστημα μας παραμένει σταθερό ακόμη και κάτω από τη λειτουργία του εν λόγω ελέγχου. Η σταθερότητα του συστήματος governor μπορεί να εξηγηθεί με την εύρεση των πόλων του. Χρησιμοποιώντας την Matlab βρήκαμε ότι όλοι οι πόλοι των governors έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος και, συνεπώς, οι governors είναι σταθεροί. Η σταθερότητα μπορεί επίσης να αποδεικνύεται από το γεγονός ότι ούτε το διάγραμμα Nyquist περιβάλλει το σημείο (-1,0). Τα διαγράμματα Bode δείχνουν ότι η μη παθητική συμπεριφορά των γεννητριών εμφανίζεται σε υψηλές συχνότητες, όπου το gain είναι αρκετά χαμηλό έτσι ώστε να μην επηρεάζει τη σταθερότητα του συστήματος.



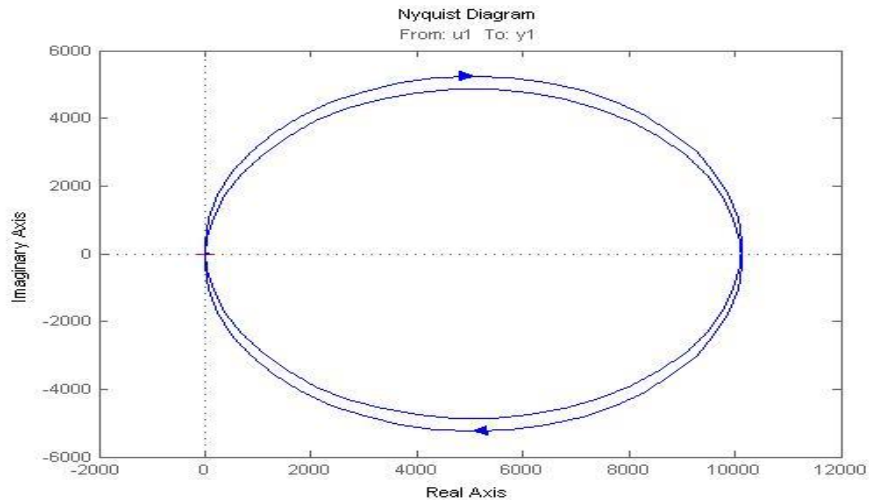
Διάγραμμα 4.8.3: Generator 3 (H_3)



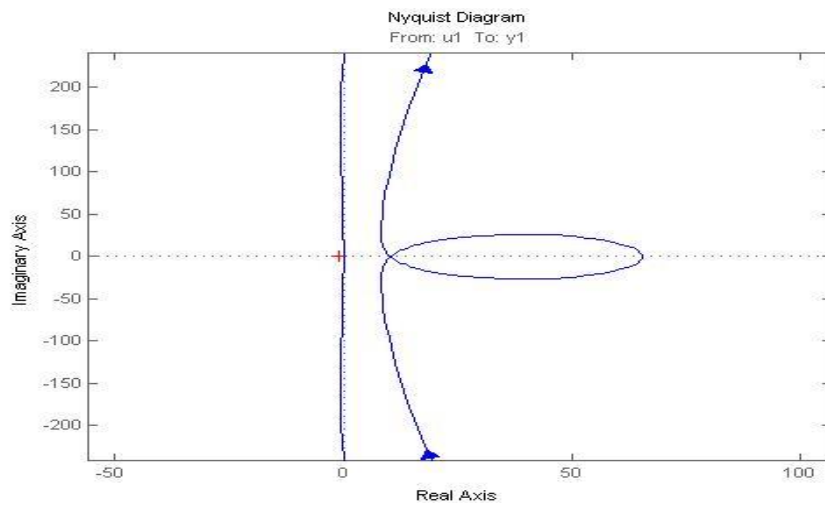
Διάγραμμα 4.8.4: Generator 3 (H_3)



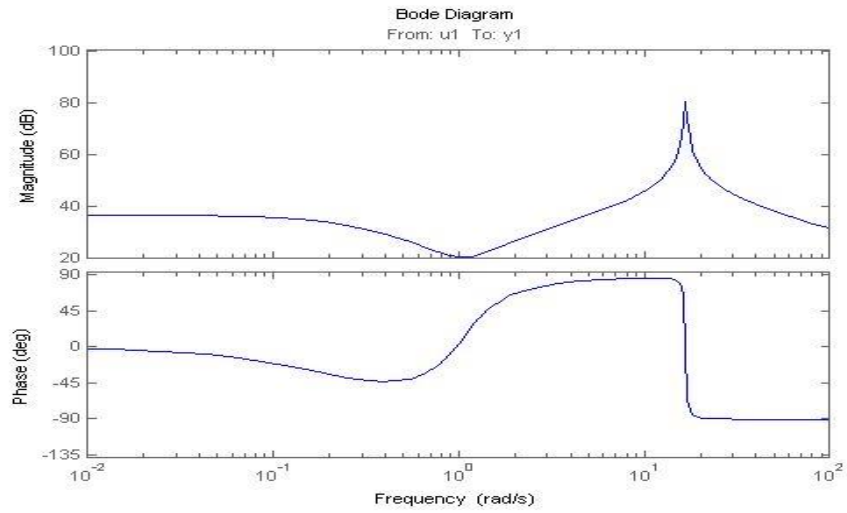
Διάγραμμα 4.8.5: Generator 3 (B₃)



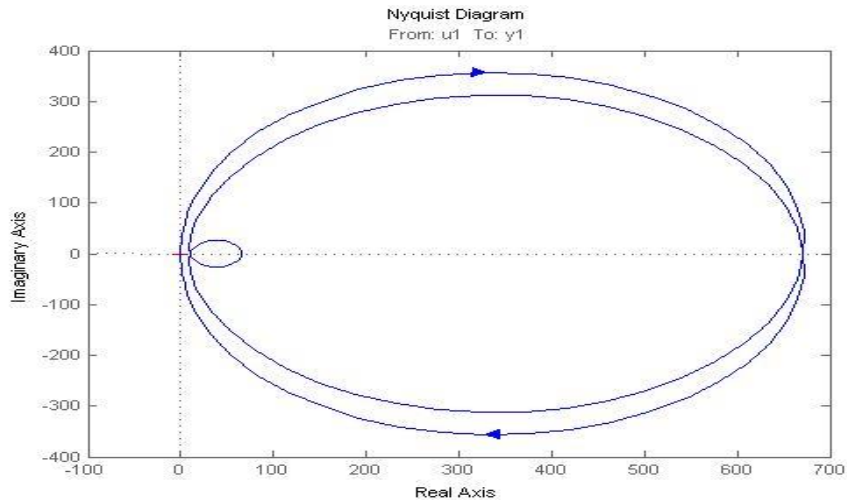
Διάγραμμα 4.8.6: Generator 7 (H₇)



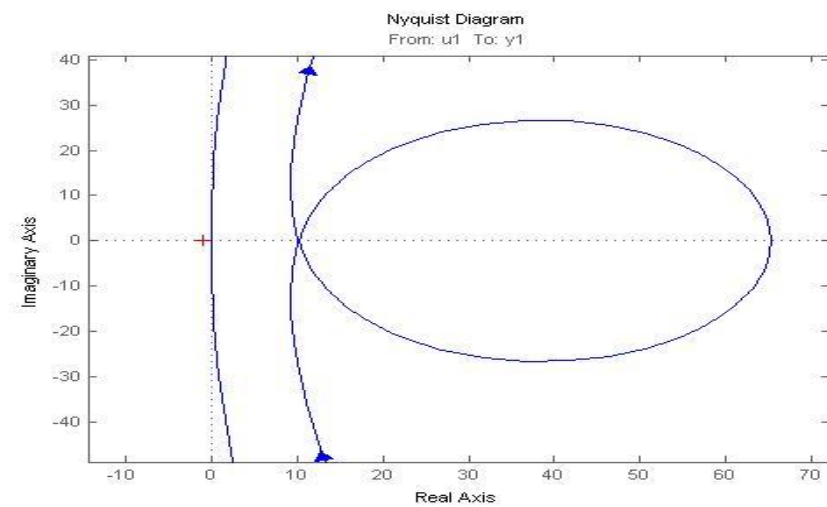
Διάγραμμα 4.8.7: Generator 7 (H₇)



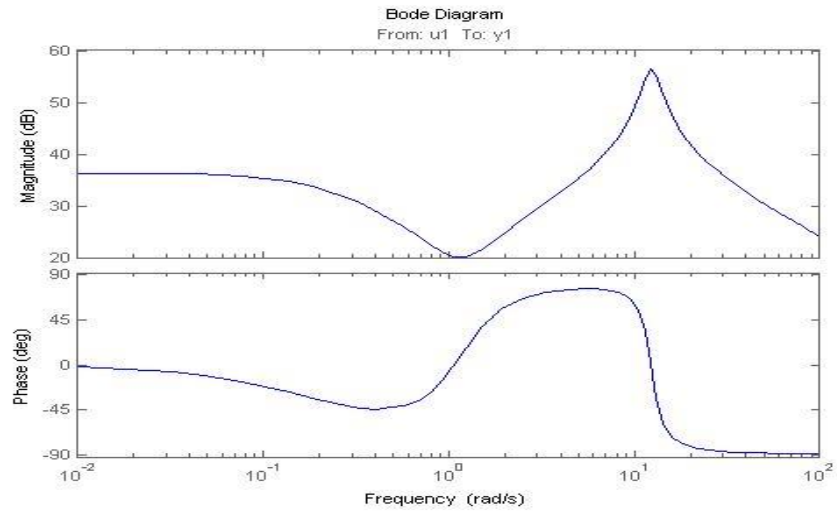
Διάγραμμα 4.8.8: Generator 7 (B_3)



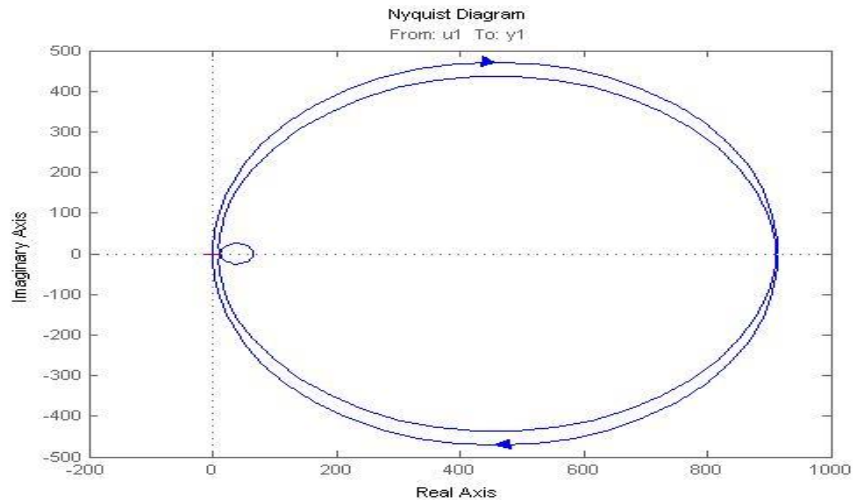
Διάγραμμα 4.8.9: Generator 8 (H_8)



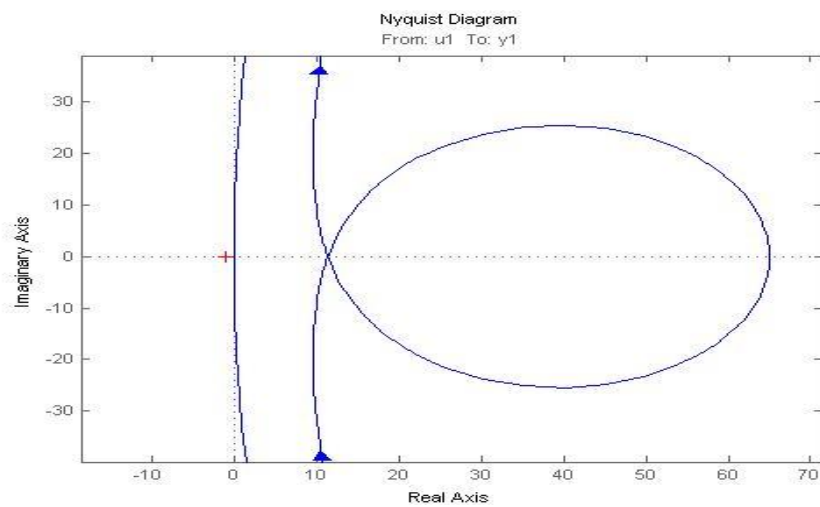
Διάγραμμα 4.8.10: Generator 8 (H_8)



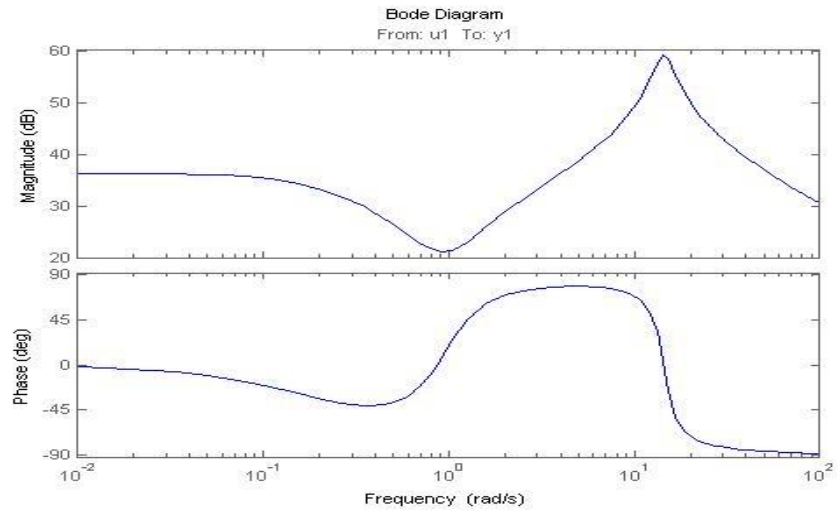
Διάγραμμα 4.8.11: Generator 8 (B_8)



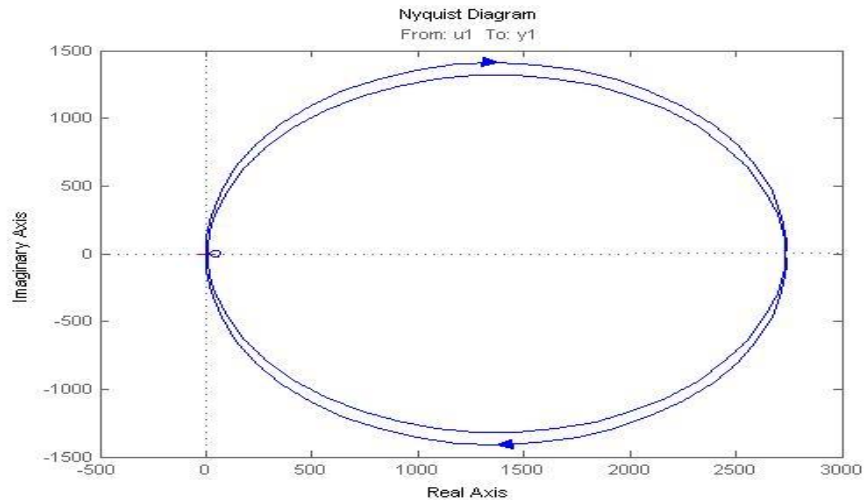
Διάγραμμα 4.8.12: Generator 9 (H_9)



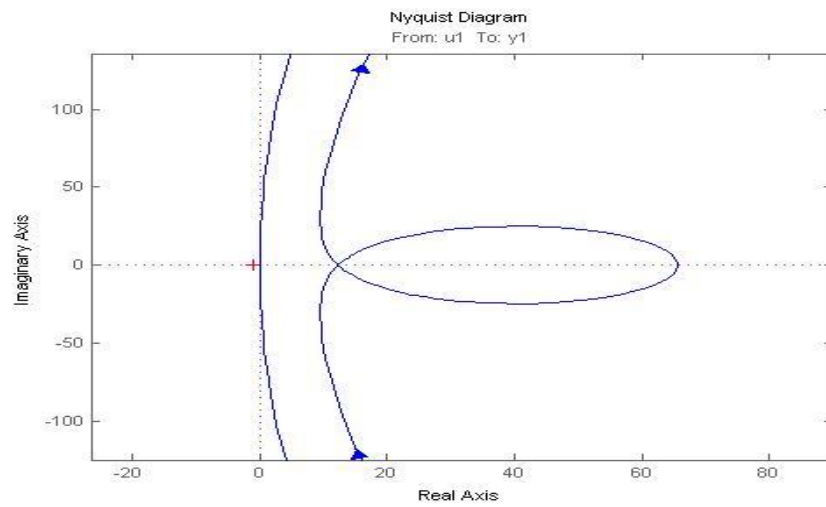
Διάγραμμα 4.8.13: Generator 9 (H_9)



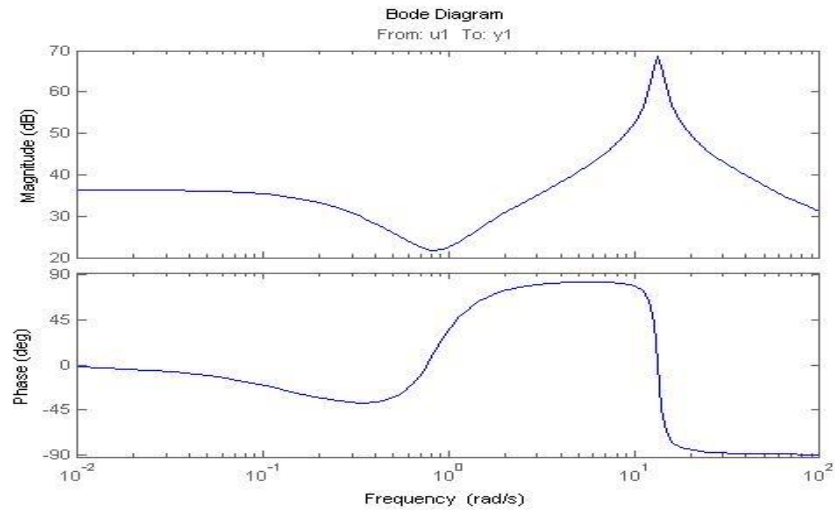
Διάγραμμα 4.8.14: Generator 9 (B_9)



Διάγραμμα 4.8.15: Generator 10 (H_{10})



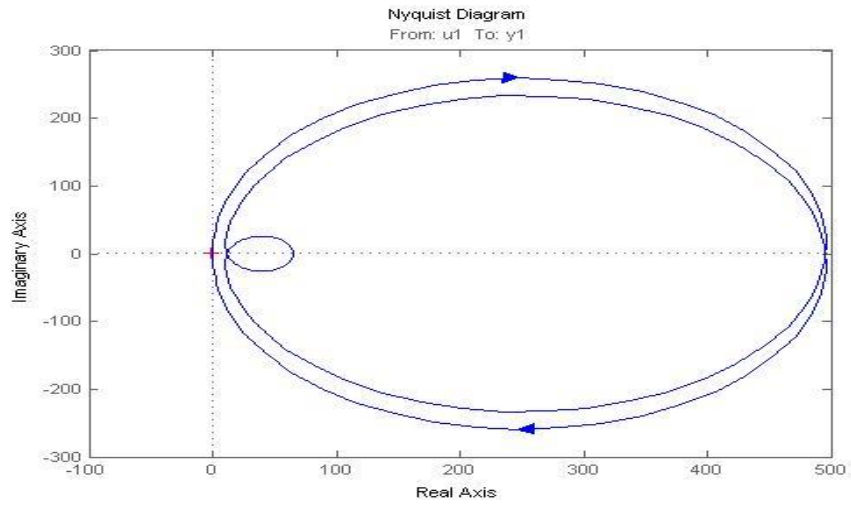
Διάγραμμα 4.8.16: Generator 10 (H_{10})



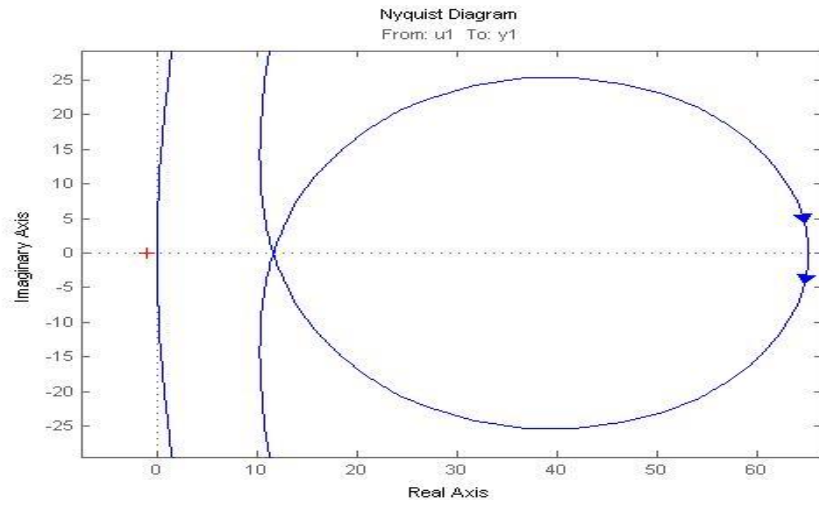
Διάγραμμα 4.8.17: Generator 10 (B₁₀)

Προσομοίωση 2:

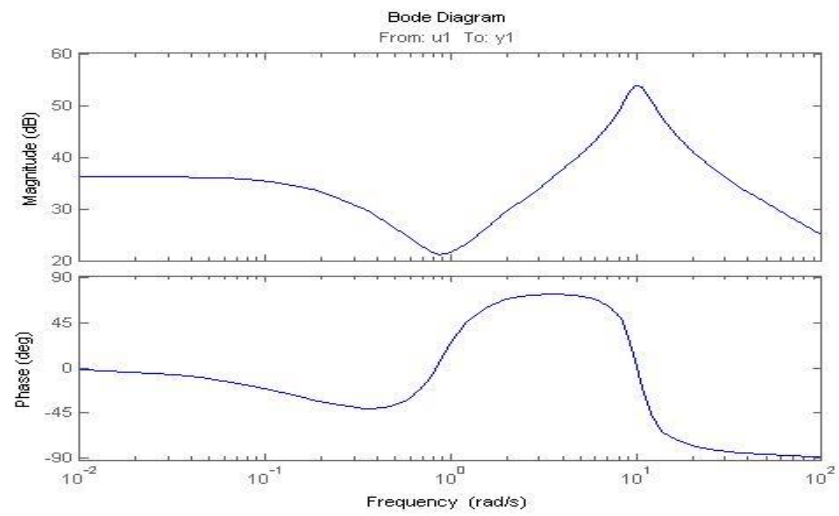
Σημαντικό: Όπως μπορούμε να δούμε από τα ακόλουθα διαγράμματα Nyquist των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς, οι turbine governors δεν είναι καθαρά παθητικά συστήματα. Συγκεκριμένα, γεννήτριες ταχείας δράσης παρουσιάζουν μερικές φορές μη παθητική συμπεριφορά. Παρά αυτή την μη παθητική συμπεριφορά, το σύστημα μας παραμένει σταθερό ακόμη και κάτω από τη λειτουργία του εν λόγω ελέγχου. Η σταθερότητα του συστήματος governor μπορεί να εξηγηθεί με την εύρεση των πόλων του. Χρησιμοποιώντας την Matlab βρήκαμε ότι όλοι οι πόλοι των governors έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος και, συνεπώς, οι governors είναι σταθεροί. Η σταθερότητα μπορεί επίσης να αποδεικνύεται από το γεγονός ότι ούτε το διάγραμμα Nyquist περιβάλλει το σημείο (-1,0). Τα διαγράμματα Bode δείχνουν ότι η μη παθητική συμπεριφορά των γεννητριών εμφανίζεται σε υψηλές συχνότητες, όπου το gain είναι αρκετά χαμηλό έτσι ώστε να μην επηρεάζει τη σταθερότητα του συστήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο PSS προσθέτει απόσβεση στο σύστημα και επομένως ωθεί τις γεννήτριες προς τα δεξιά (εξάλειψη μη παθητική).



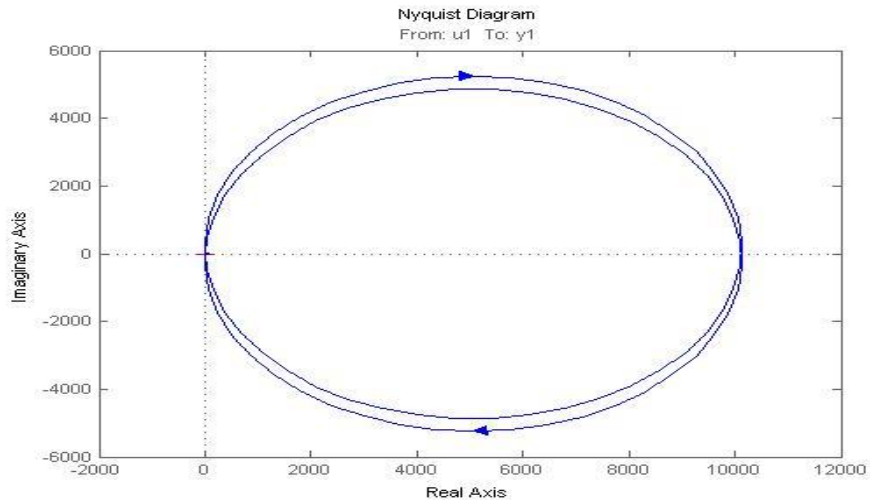
Διάγραμμα 4.8.18: Generator 3 (H_3)



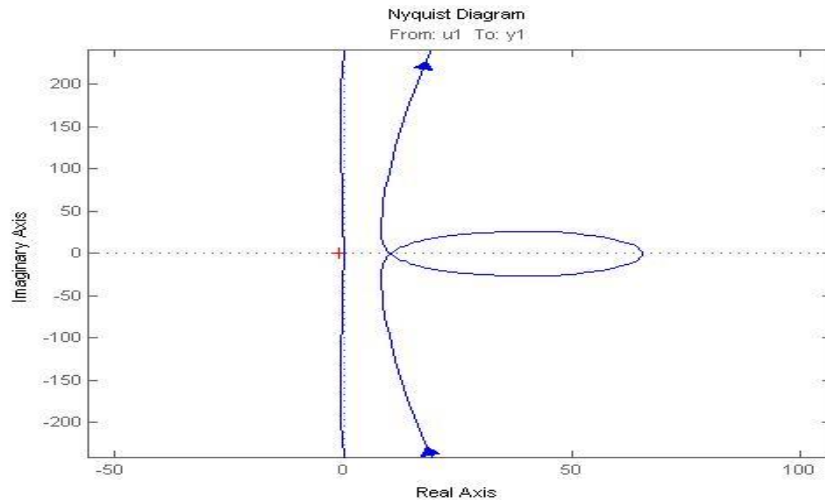
Διάγραμμα 4.8.19: Generator 3 (H_3)



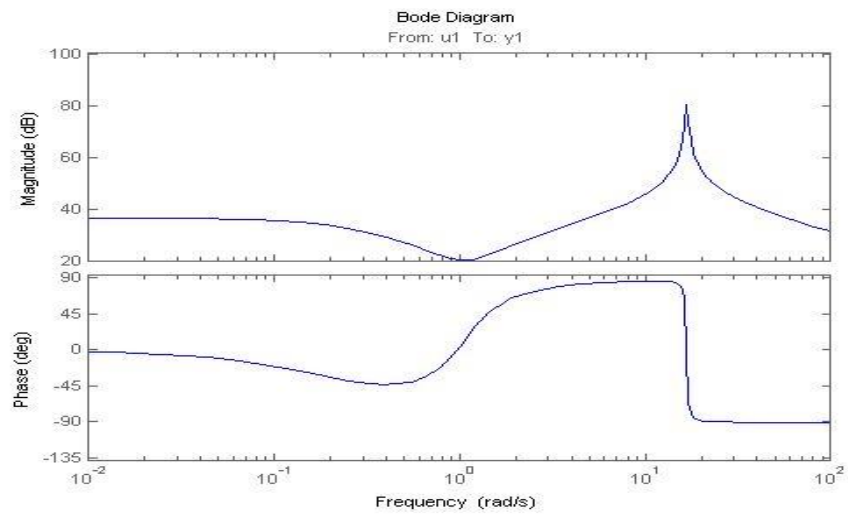
Διάγραμμα 4.8.20: Generator 3 (B_3)



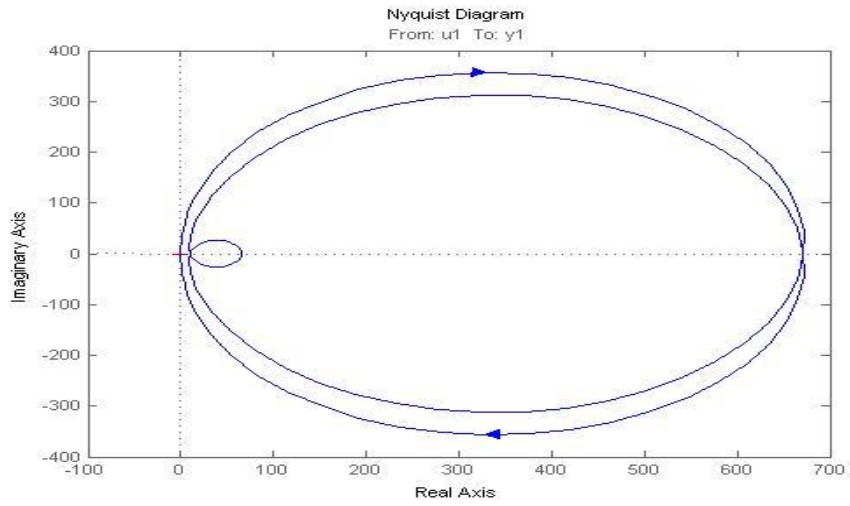
Διάγραμμα 4.8.21: Generator 7 (H_7)



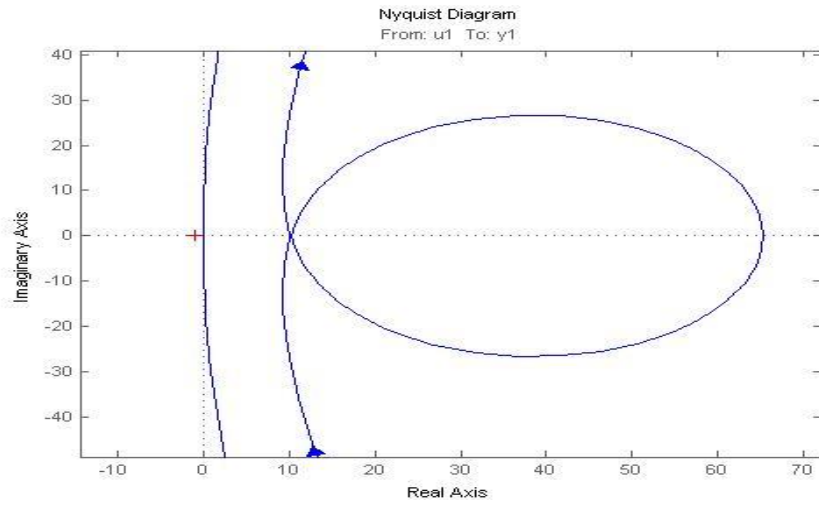
Διάγραμμα 4.8.22: Generator 7 (H_7)



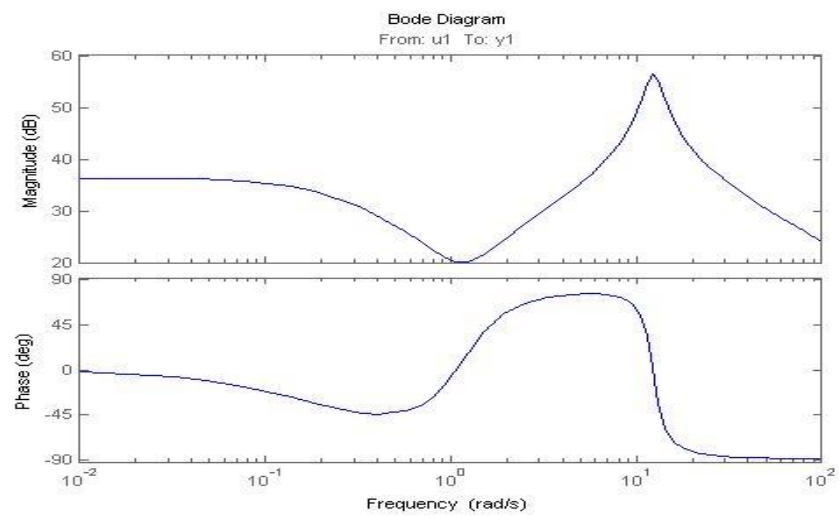
Διάγραμμα 4.8.23: Generator 7 (B_3)



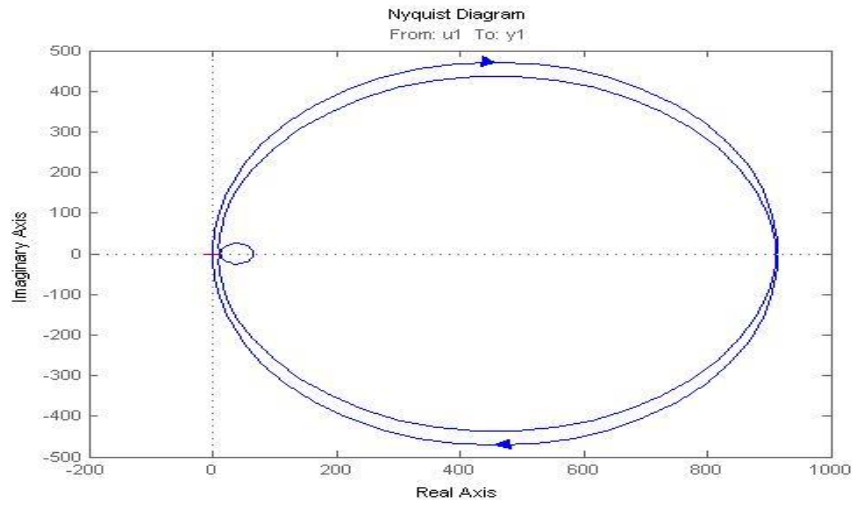
Διάγραμμα 4.8.24: Generator 8 (H_8)



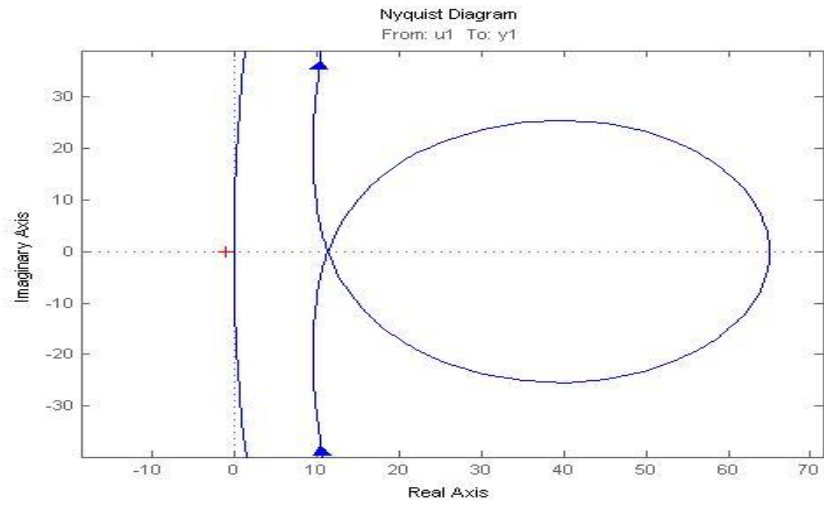
Διάγραμμα 4.8.25: Generator 8 (H_8)



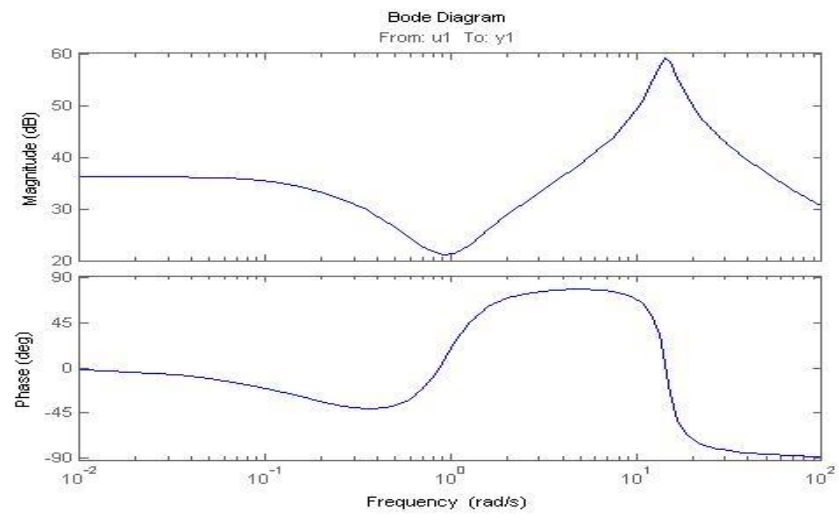
Διάγραμμα 4.8.26: Generator 8 (B_8)



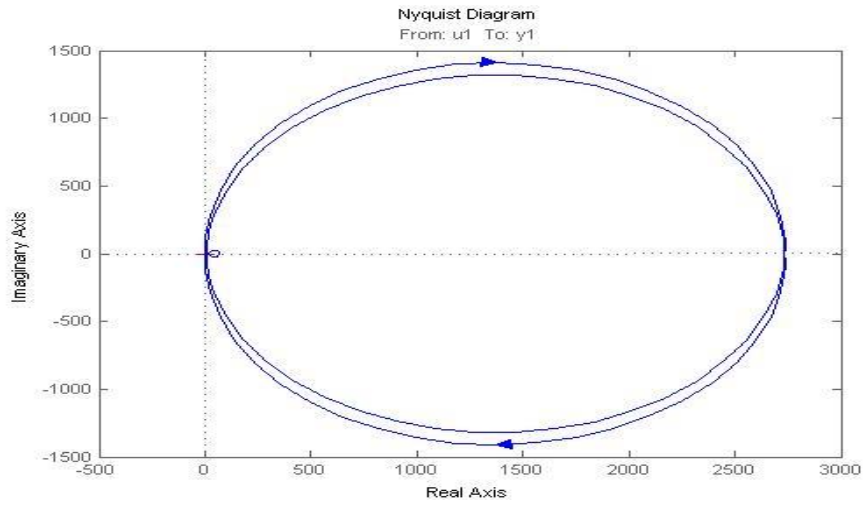
Διάγραμμα 4.8.27: Generator 9 (H_9)



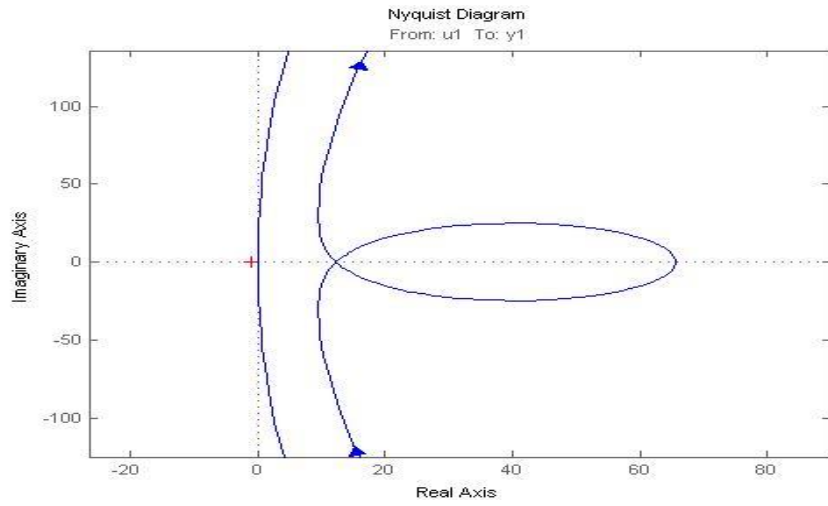
Διάγραμμα 4.8.28: Generator 9 (H_9)



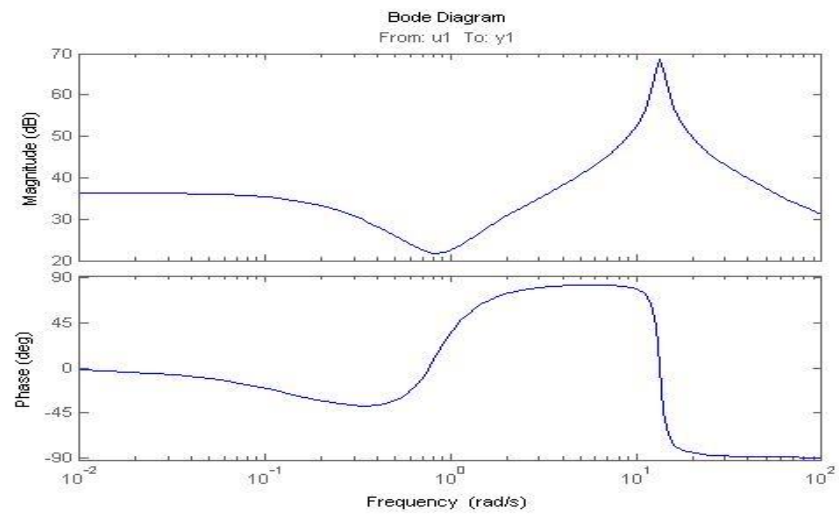
Διάγραμμα 4.8.29: Generator 9 (B_9)



Διάγραμμα 4.8.30: Generator 10 (H_{10})



Διάγραμμα 4.8.31: Generator 10 (H_{10})

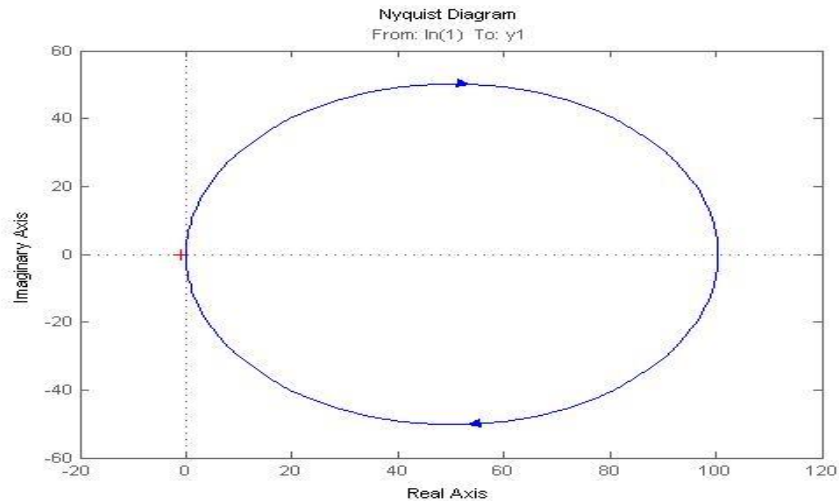


Διάγραμμα 4.8.32: Generator 10 (B_{10})

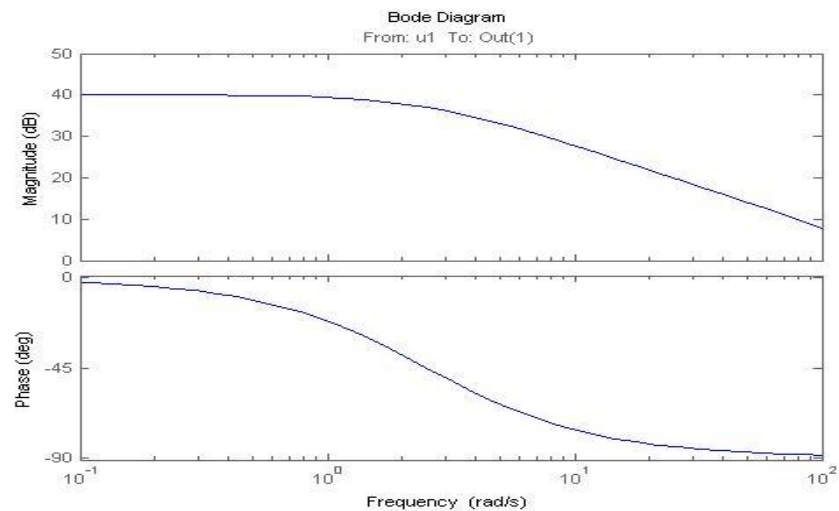
Προσομοίωση 3:

Δεδομένου ότι οι ελεγκτές φορτίου σε όλους τους ζυγούς έχουν το ίδιο gain (= 1), οι εκτιμώμενες συναρτήσεις μεταφοράς είναι όλες οι ίδιες. Έτσι, παρουσιάζουμε μόνο την εκτιμώμενη συνάρτηση μεταφοράς στο ζυγό 3.

Ελεγκτές φορτίου είναι αυστηρώς παθητικά συστήματα και έτσι διασφαλίζουν την σταθερότητα των συστημάτων ισχύος. Η αυστηρή παθητικότητα μπορεί να επιβεβαιωθεί από το γεγονός ότι διαγράμματα Nyquist βρίσκονται εξ ολοκλήρου στην δεξιά πλευρά της γραφικής.



Διάγραμμα 4.8.33: Load 1 (bus 3) (H_1)

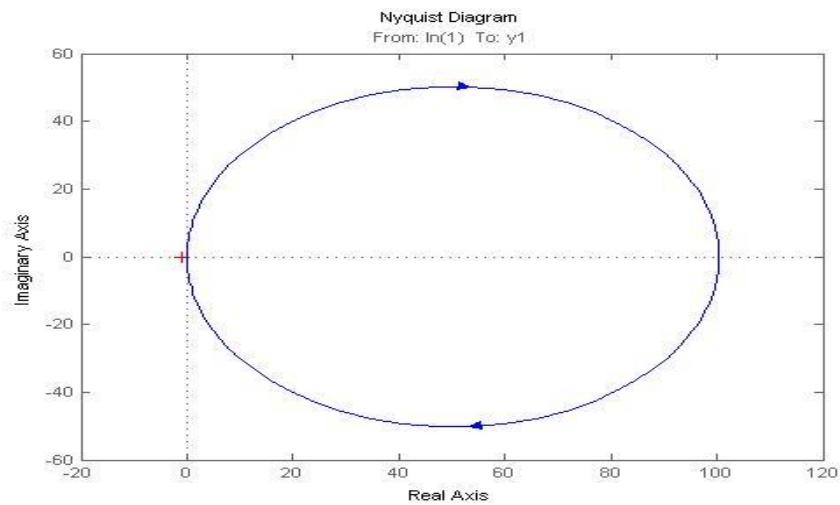


Διάγραμμα 4.8.34: Load 1 (bus 3) (B_1)

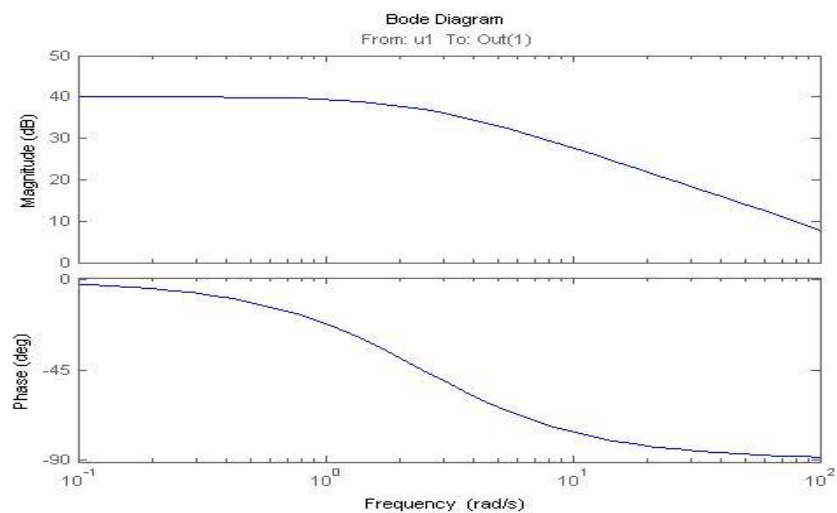
Προσομοίωση 4:

Δεδομένου ότι οι ελεγκτές φορτίου σε όλους τους ζυγούς έχουν το ίδιο gain (= 1), οι εκτιμώμενες συναρτήσεις μεταφοράς είναι όλες οι ίδιες. Έτσι, παρουσιάζουμε μόνο την εκτιμώμενη συνάρτηση μεταφοράς στο ζυγό 3.

Ελεγκτές φορτίου είναι αυστηρώς παθητικά συστήματα και έτσι διασφαλίζουν την σταθερότητα των συστημάτων ισχύος. Η αυστηρή παθητικότητα μπορεί να επιβεβαιωθεί από το γεγονός ότι διαγράμματα Nyquist βρίσκονται εξ ολοκλήρου στην δεξιά πλευρά της γραφικής.



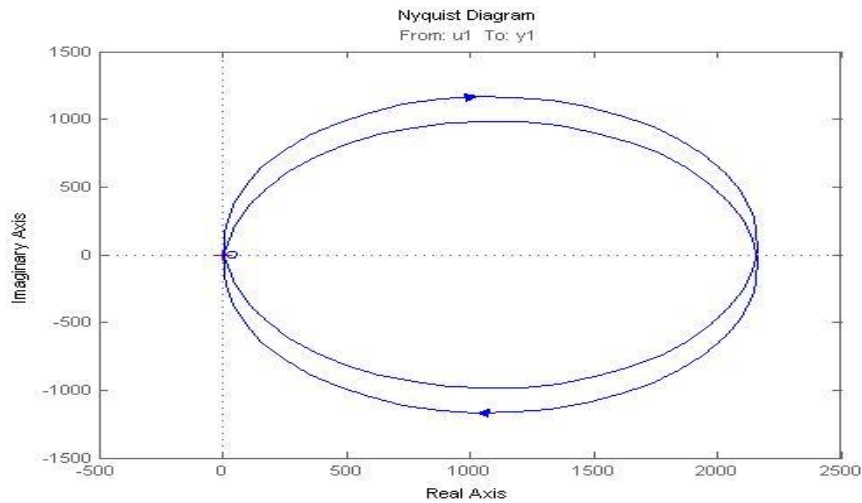
Διάγραμμα 4.8.35: Load 2 (bus 7) (H_2)



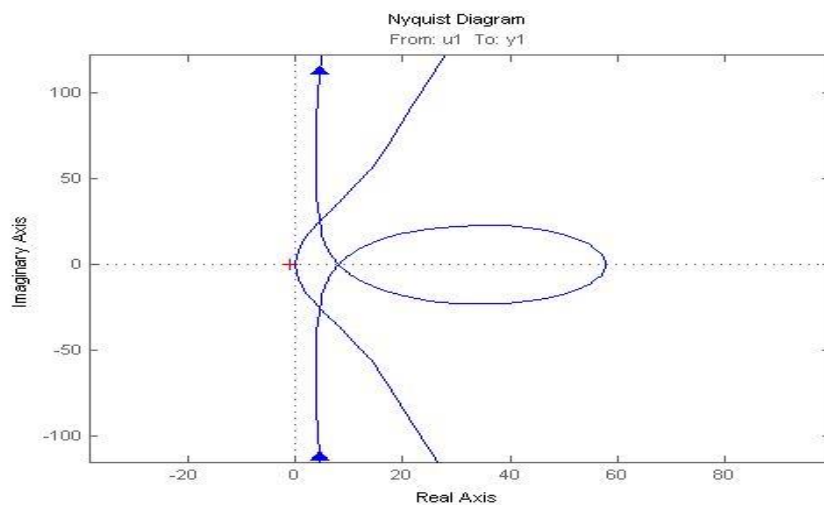
Διάγραμμα 4.8.36: Load 2 (bus 7) (B_2)

Προσομοίωση 5:

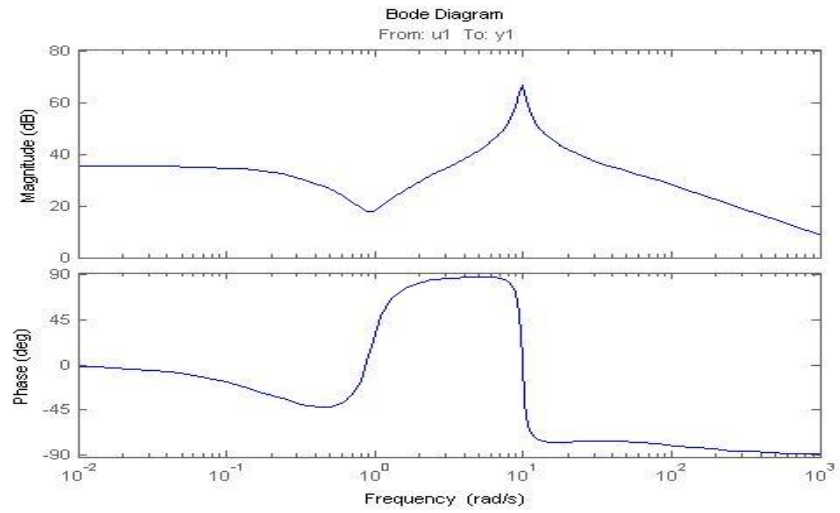
Σημαντικό: Όπως μπορούμε να δούμε από τα ακόλουθα διαγράμματα Nyquist των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς, οι turbine governors δεν είναι καθαρά παθητικά συστήματα. Συγκεκριμένα, γεννήτριες ταχείας δράσης παρουσιάζουν μερικές φορές μη παθητική συμπεριφορά. Παρά αυτή την μη παθητική συμπεριφορά, το σύστημα μας παραμένει σταθερό ακόμη και κάτω από τη λειτουργία του εν λόγω ελέγχου. Η σταθερότητα του συστήματος governor μπορεί να εξηγηθεί με την εύρεση των πόλων του. Χρησιμοποιώντας την Matlab βρήκαμε ότι όλοι οι πόλοι των governors έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος και, συνεπώς, οι governors είναι σταθεροί. Η σταθερότητα μπορεί επίσης να αποδεικνύεται από το γεγονός ότι ούτε το διάγραμμα Nyquist περιβάλλει το σημείο $(-1,0)$. Τα διαγράμματα Bode δείχνουν ότι η μη παθητική συμπεριφορά των γεννητριών εμφανίζεται σε υψηλές συχνότητες, όπου το gain είναι αρκετά χαμηλό έτσι ώστε να μην επηρεάζει τη σταθερότητα του συστήματος.



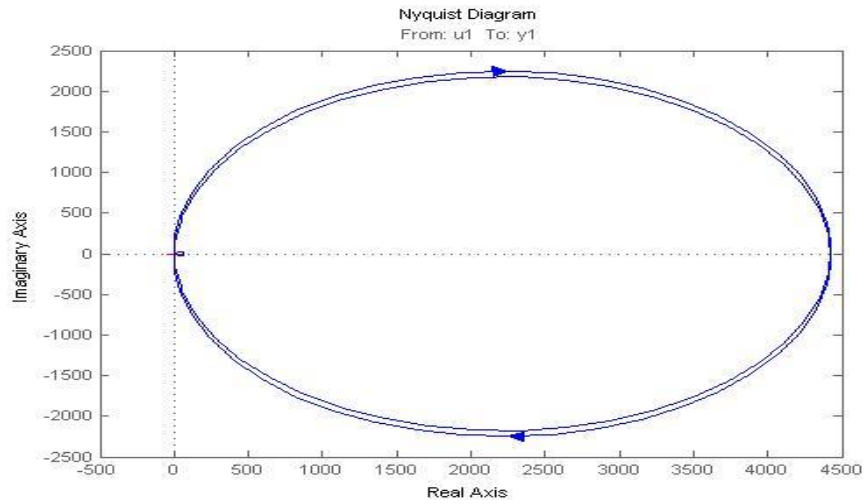
Διάγραμμα 4.8.37: Generator 3 (H_3)



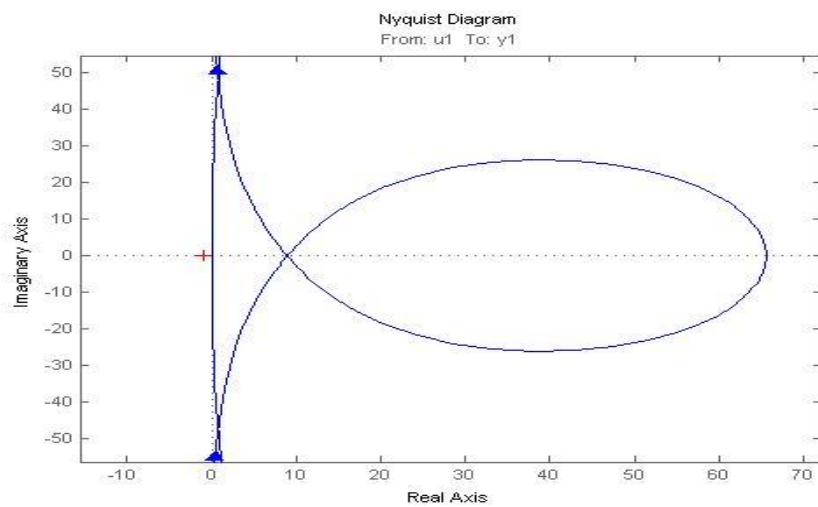
Διάγραμμα 4.8.38: Generator 3 (H_3)



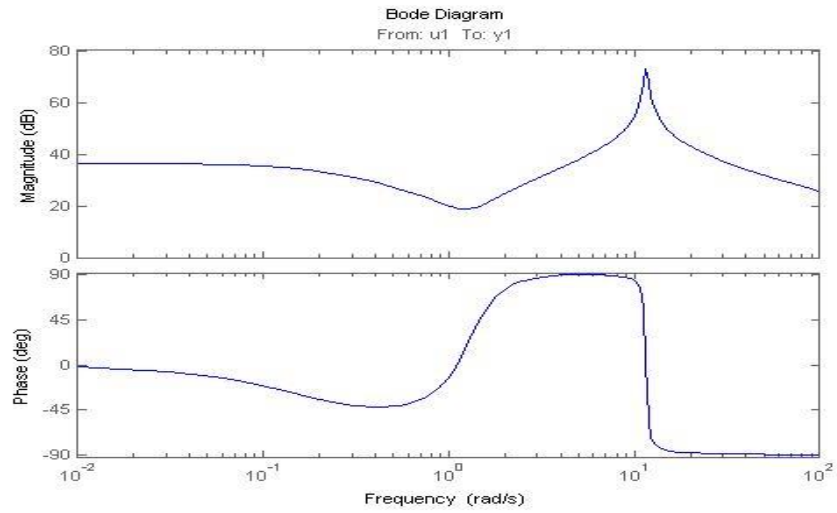
Διάγραμμα 4.8.39: Generator 3 (B₃)



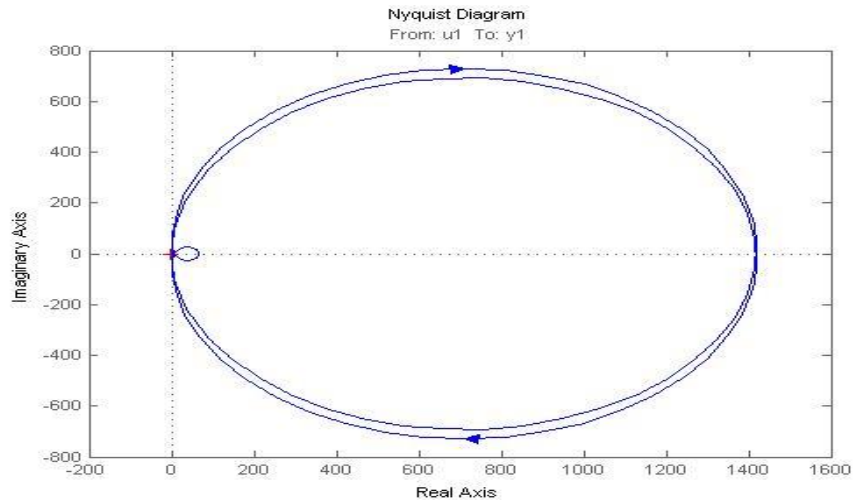
Διάγραμμα 4.8.40: Generator 7 (H₇)



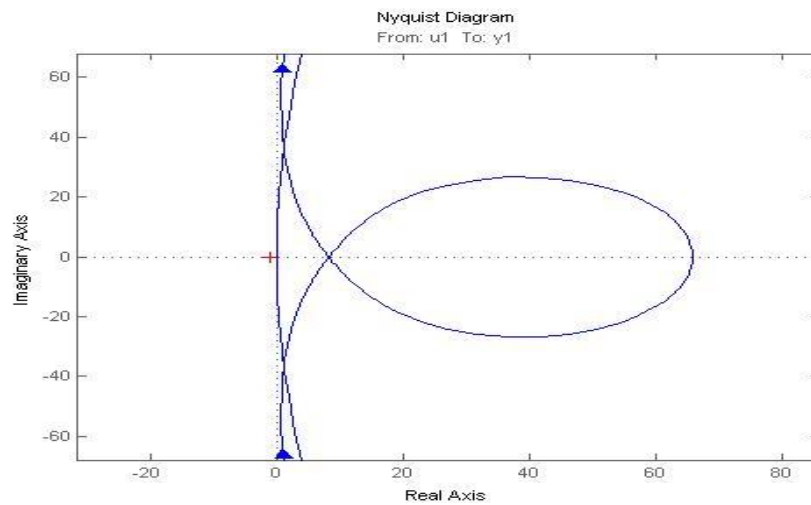
Διάγραμμα 4.8.41: Generator 7 (H₇)



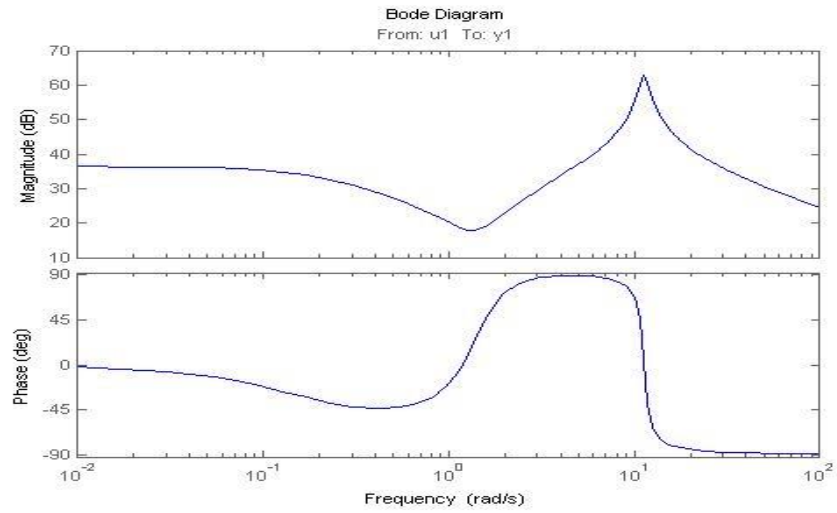
Διάγραμμα 4.8.42: Generator 7 (B₇)



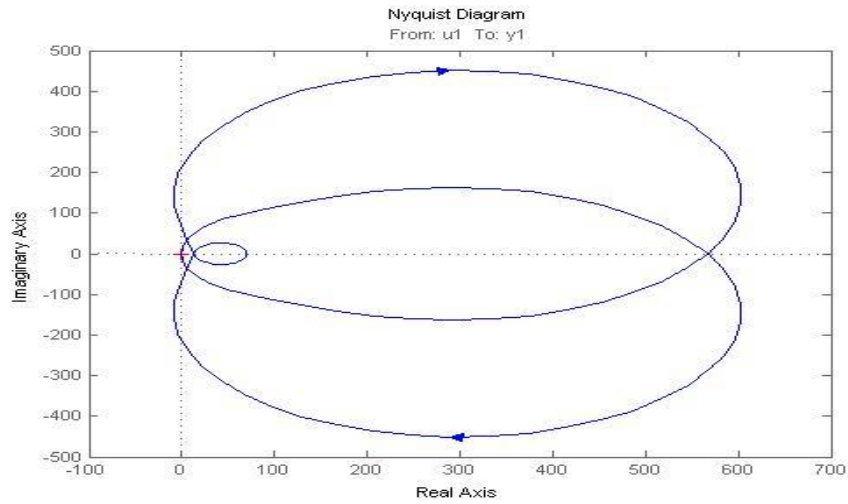
Διάγραμμα 4.8.43: Generator 8 (H₈)



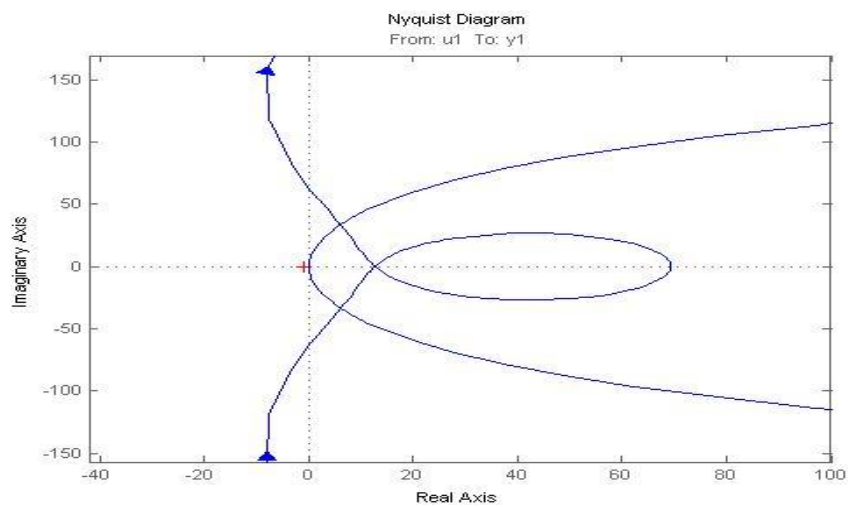
Διάγραμμα 4.8.44: Generator 8 (H₈)



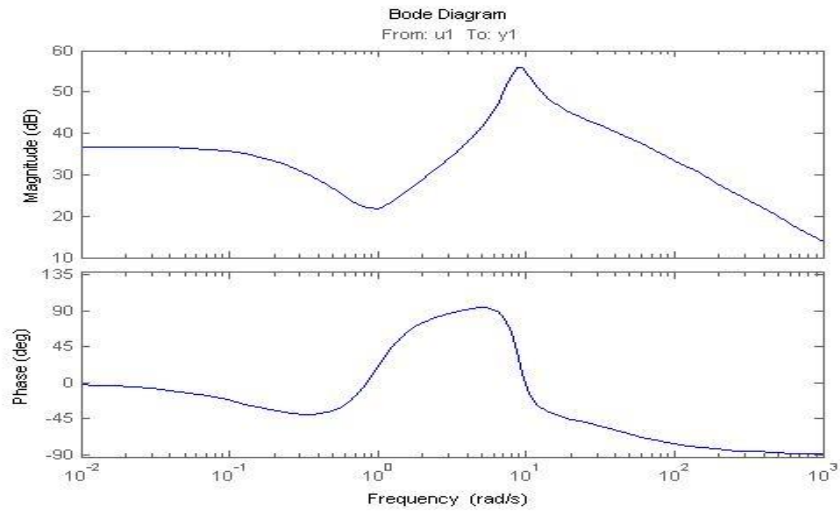
Διάγραμμα 4.8.45: Generator 8 (B₈)



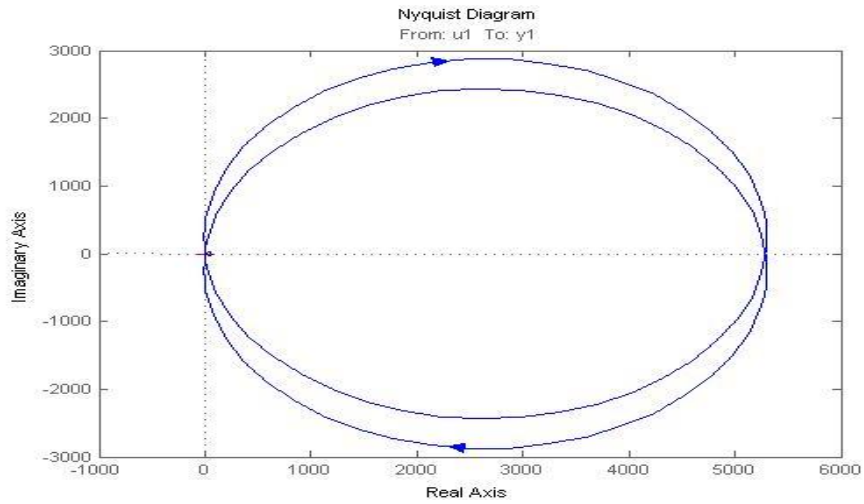
Διάγραμμα 4.8.46: Generator 9 (H₉)



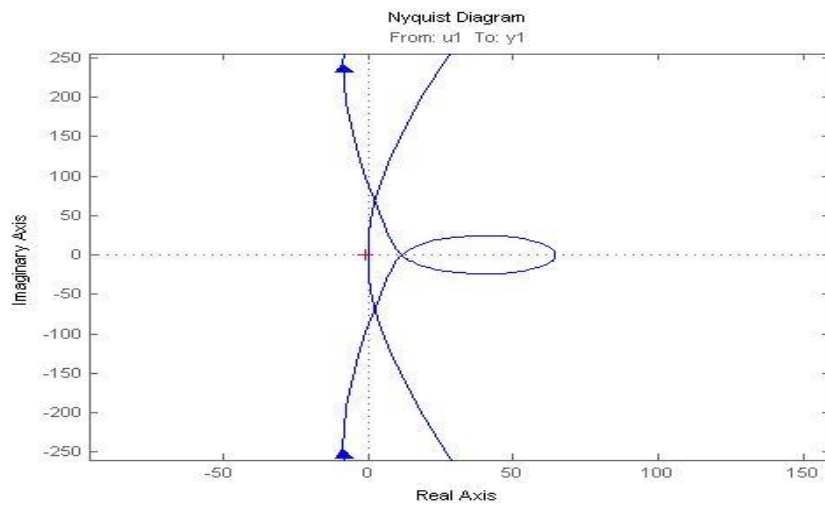
Διάγραμμα 4.8.47: Generator 9 (H₉)



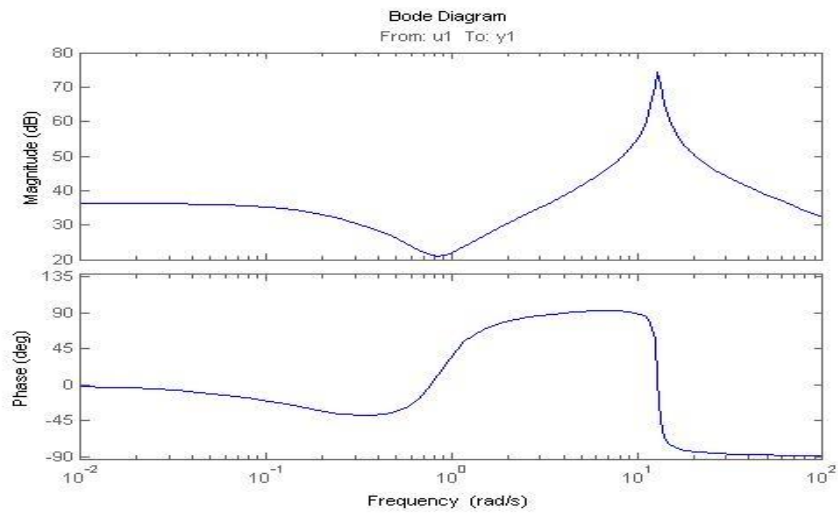
Διάγραμμα 4.8.48: Generator 9 (B₉)



Διάγραμμα 4.8.49: Generator 10 (H₁₀)



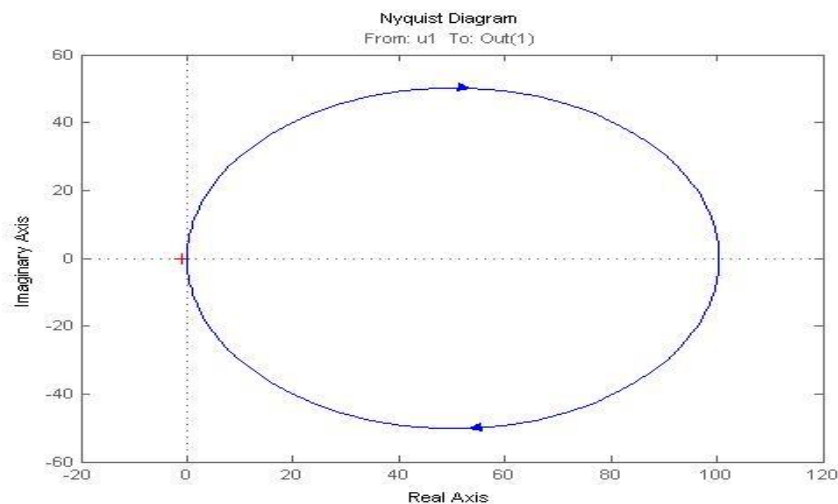
Διάγραμμα 4.8.50: Generator 10 (H₁₀)



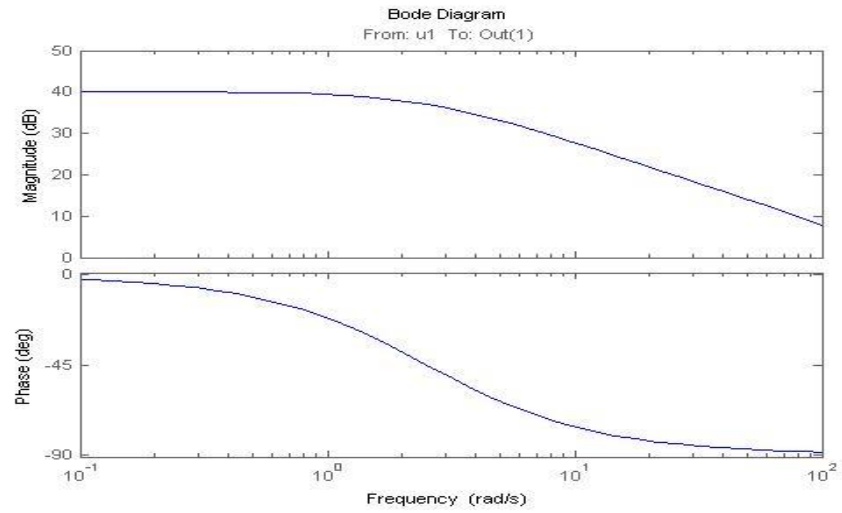
Διάγραμμα 4.8.51: Generator 10 (B₁₀)

Δεδομένου ότι οι ελεγκτές φορτίου στους ζυγούς 1-5, 6-10 και 11-14 έχουν το ίδιο gain (= 1, 1.5 και 0.5 αντίστοιχα), οι εκτιμώμενες συναρτήσεις μεταφοράς είναι όλες οι ίδιες. Έτσι, παρουσιάζουμε μόνο την εκτιμώμενη συνάρτηση μεταφοράς στους ζυγούς 3, 18 και 27.

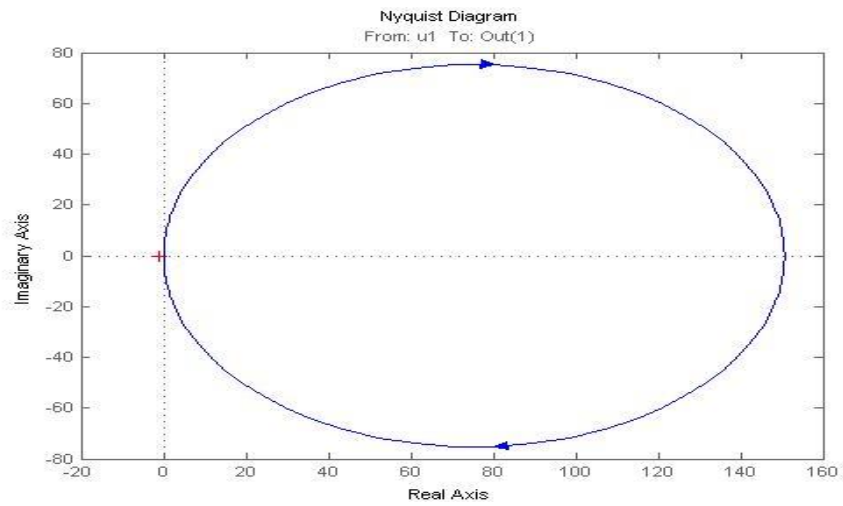
Ελεγκτές φορτίου είναι αυστηρώς παθητικά συστήματα και έτσι διασφαλίζουν την σταθερότητα των συστημάτων ισχύος. Η αυστηρή παθητικότητα μπορεί να επιβεβαιωθεί από το γεγονός ότι διαγράμματα Nyquist βρίσκονται εξ ολοκλήρου στην δεξιά πλευρά της γραφικής.



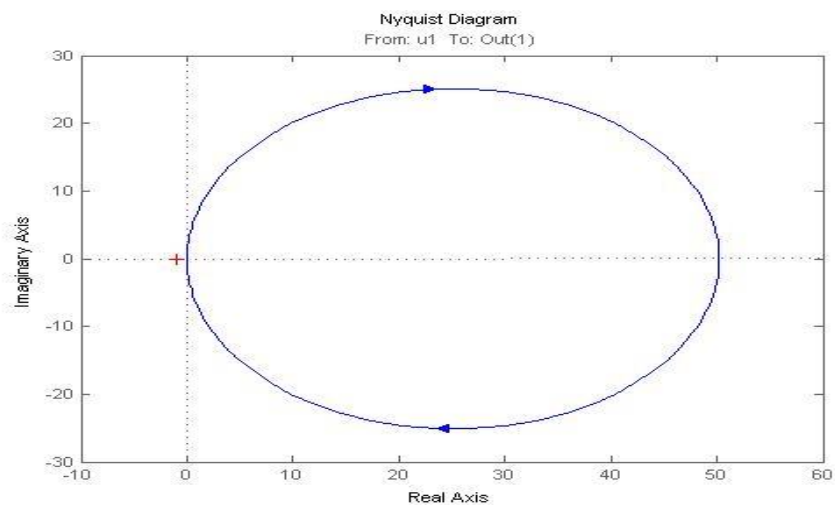
Διάγραμμα 4.8.52: Loads 1-5 (H_{L1-5})



Διάγραμμα 4.8.53 Loads 1-5 (B_{L1-5})



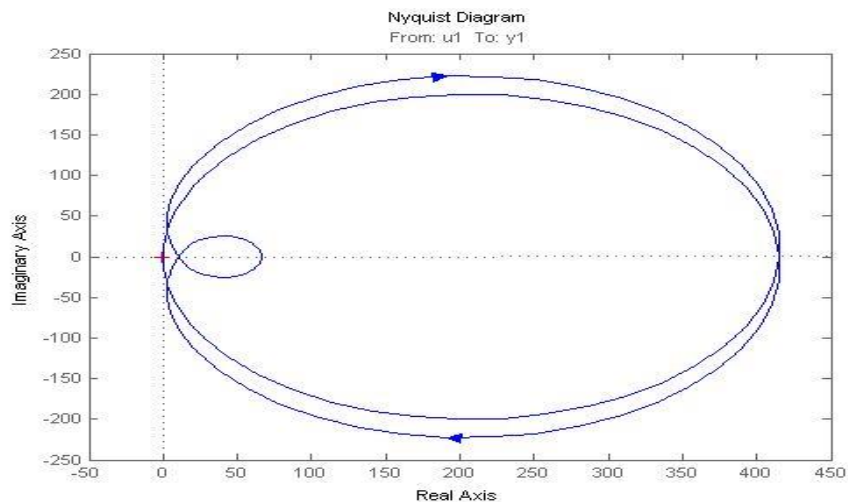
Διάγραμμα 4.8.54 Loads 6-10 (H_{L6-10})



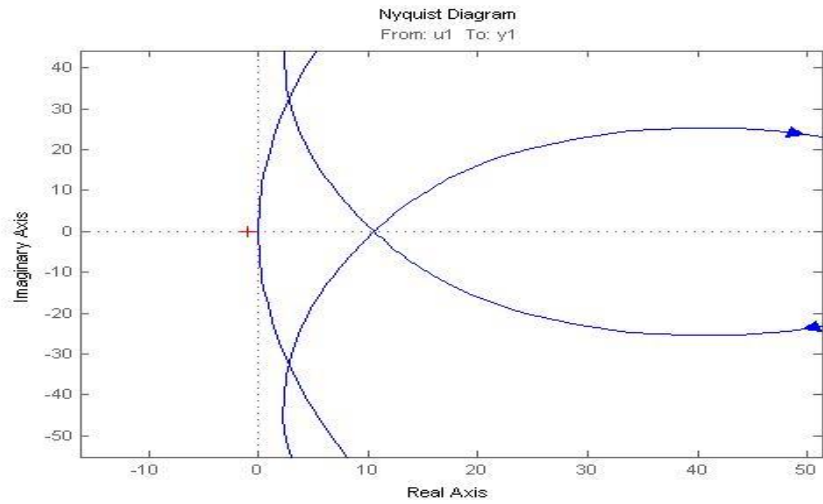
Διάγραμμα 4.8.55 Loads 11-14 (H_{L11-14})

Παραλείπουμε τα διαγράμματα Bode των υπόλοιπων φορτίων, δεδομένου ότι είναι σχεδόν τα ίδιο με το διάγραμμα Bode του ζυγού φορτίου 1 (ζυγός 3). Υπάρχουν μόνο μια μικρή διαφορά μεταξύ των gain τους.

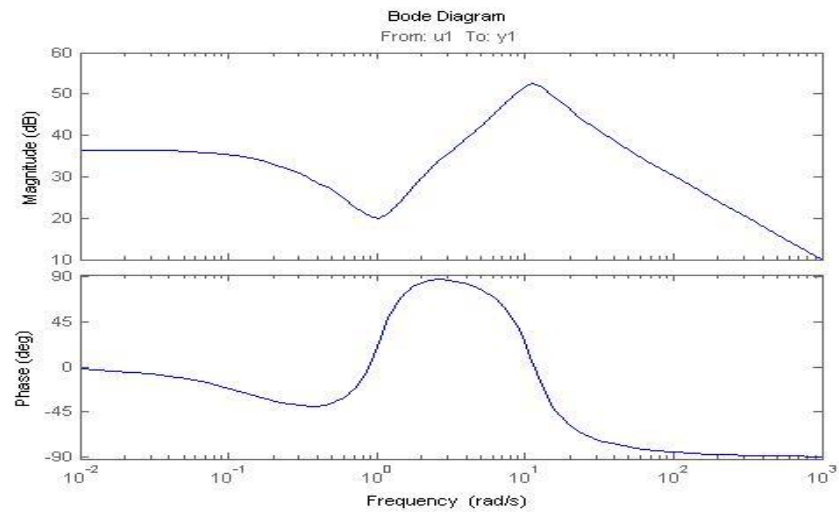
Σημαντικό: Όπως μπορούμε να δούμε από τα ακόλουθα διαγράμματα Nyquist των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς, οι turbine governors δεν είναι καθαρά παθητικά συστήματα. Συγκεκριμένα, γεννήτριες ταχείας δράσης παρουσιάζουν μερικές φορές μη παθητική συμπεριφορά. Παρά αυτή την μη παθητική συμπεριφορά, το σύστημα μας παραμένει σταθερό ακόμη και κάτω από τη λειτουργία του εν λόγω ελέγχου. Η σταθερότητα του συστήματος governor μπορεί να εξηγηθεί με την εύρεση των πόλων του. Χρησιμοποιώντας την Matlab βρήκαμε ότι όλοι οι πόλοι των governors έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος και, συνεπώς, οι governors είναι σταθεροί. Η σταθερότητα μπορεί επίσης να αποδεικνύεται από το γεγονός ότι ούτε το διάγραμμα Nyquist περιβάλλει το σημείο $(-1,0)$. Τα διαγράμματα Bode δείχνουν ότι η μη παθητική συμπεριφορά των γεννητριών εμφανίζεται σε υψηλές συχνότητες, όπου το gain είναι αρκετά χαμηλό έτσι ώστε να μην επηρεάζει τη σταθερότητα του συστήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο PSS προσθέτει απόσβεση στο σύστημα και επομένως ωθεί τις γεννήτριες προς τα δεξιά (εξάλειψη μη παθητική).



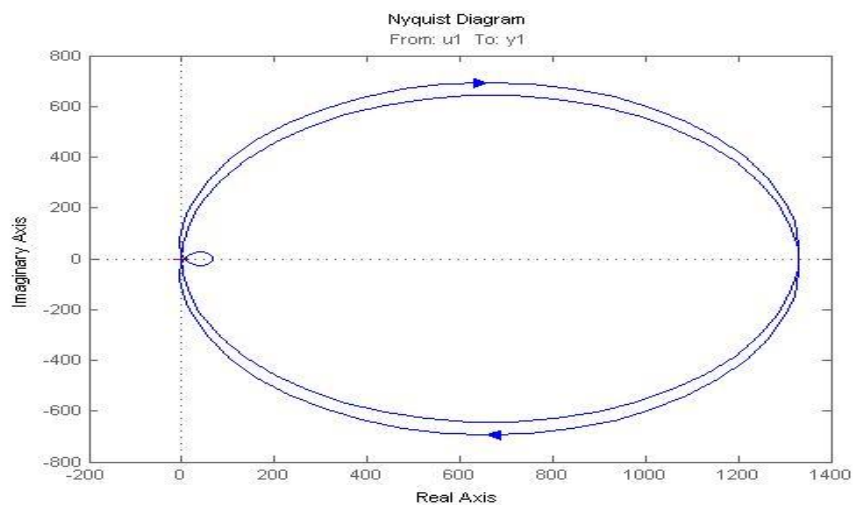
Διάγραμμα 4.8.56 Generator 3 (H_3)



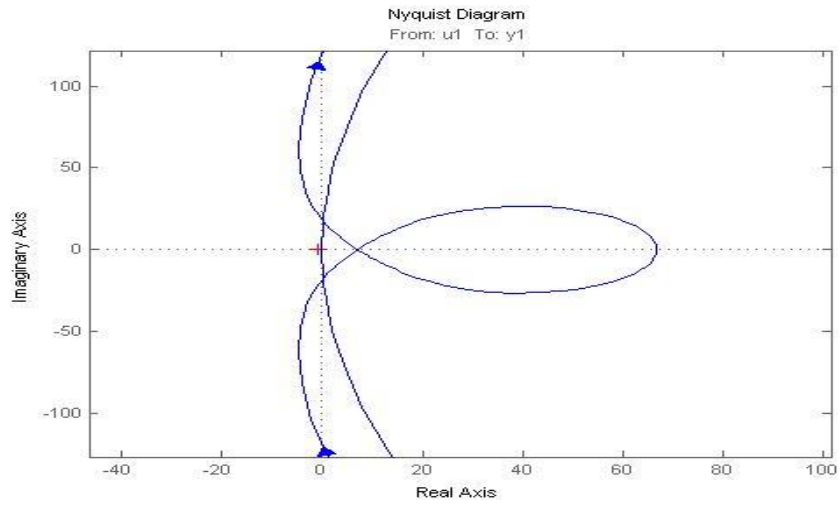
Διάγραμμα 4.8.57 Generator 3 (H_3)



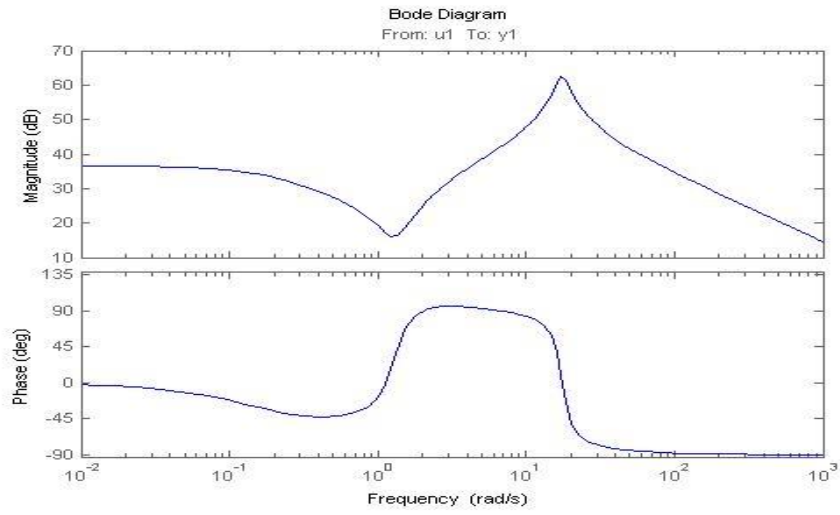
Διάγραμμα 4.8.58 Generator 3 (B_3)



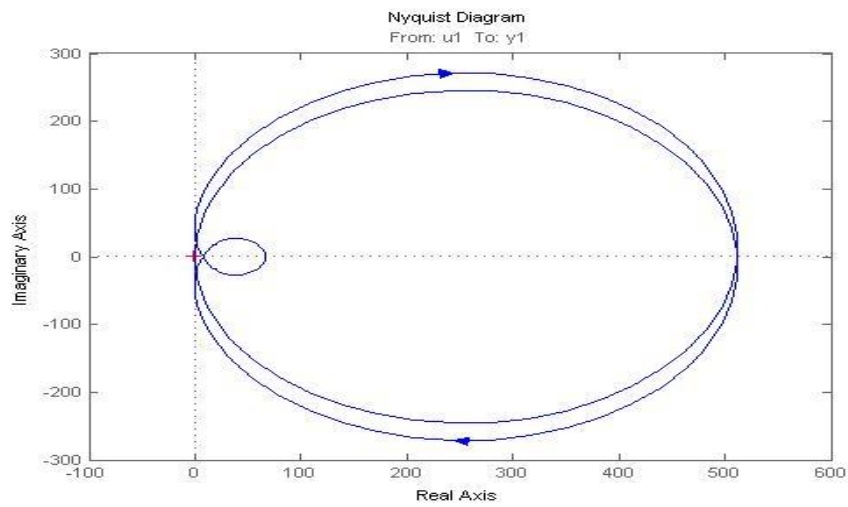
Διάγραμμα 4.8.59: Generator 7 (H_7)



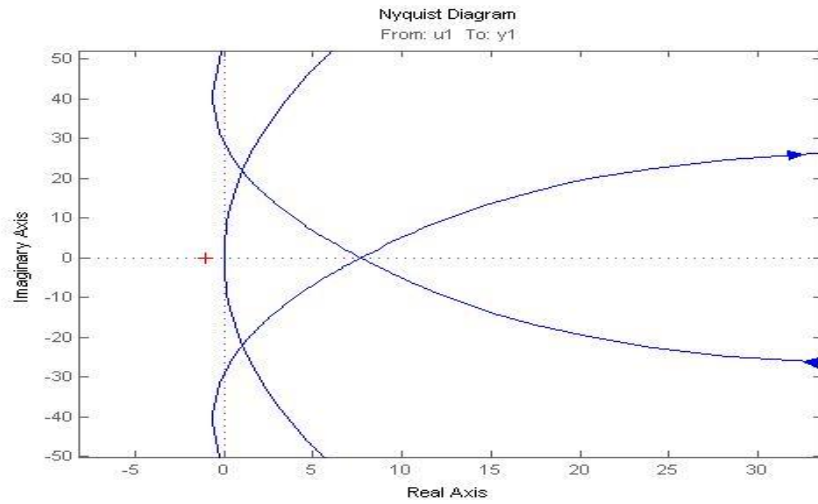
Διάγραμμα 4.8.60: Generator 7 (H_7)



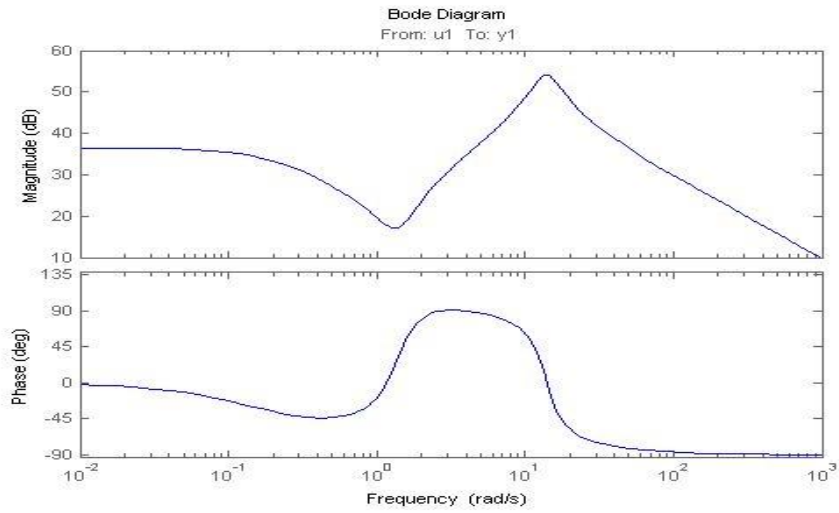
Διάγραμμα 4.8.61: Generator 7 (B_7)



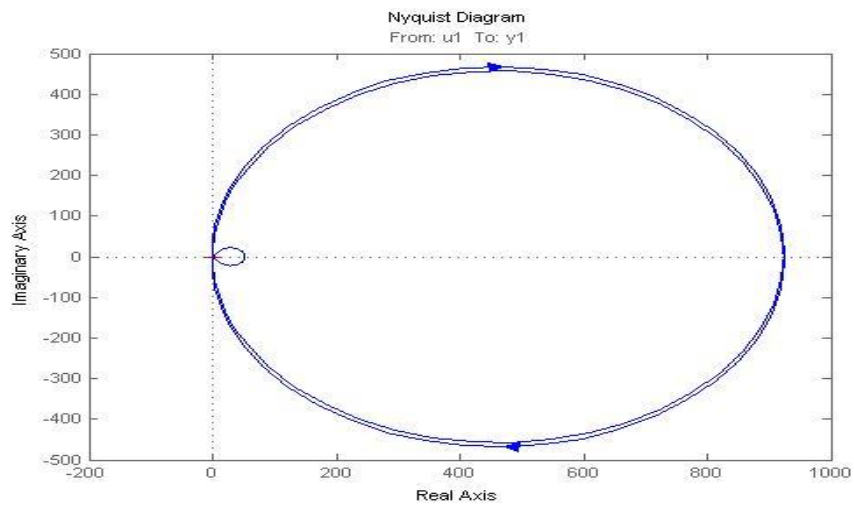
Διάγραμμα 4.8.62: Generator 8 (H_8)



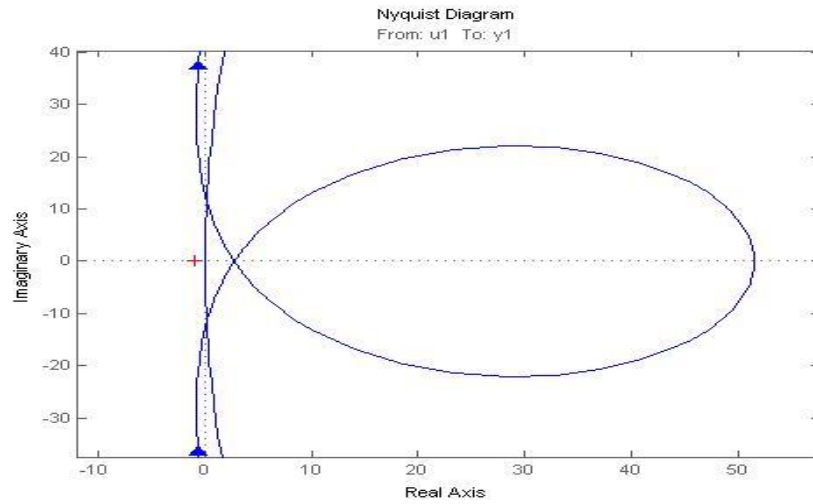
Διάγραμμα 4.8.63: Generator 8 (H_8)



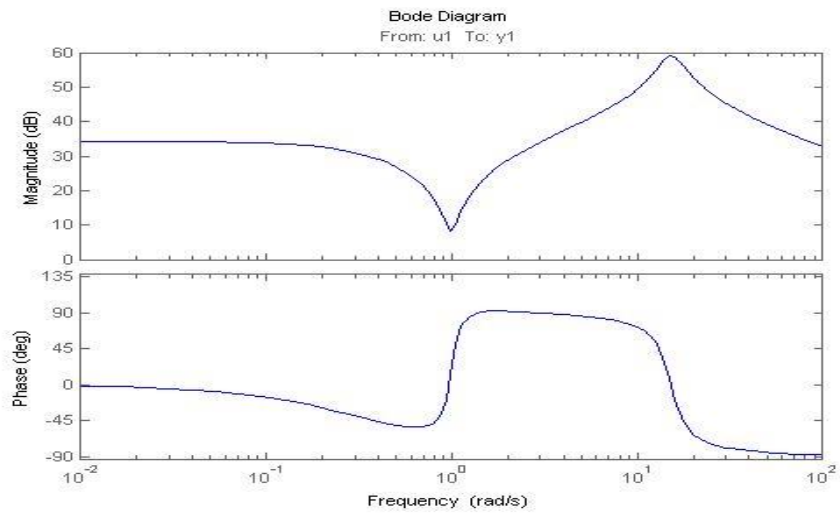
Διάγραμμα 4.8.64: Generator 8 (B_8)



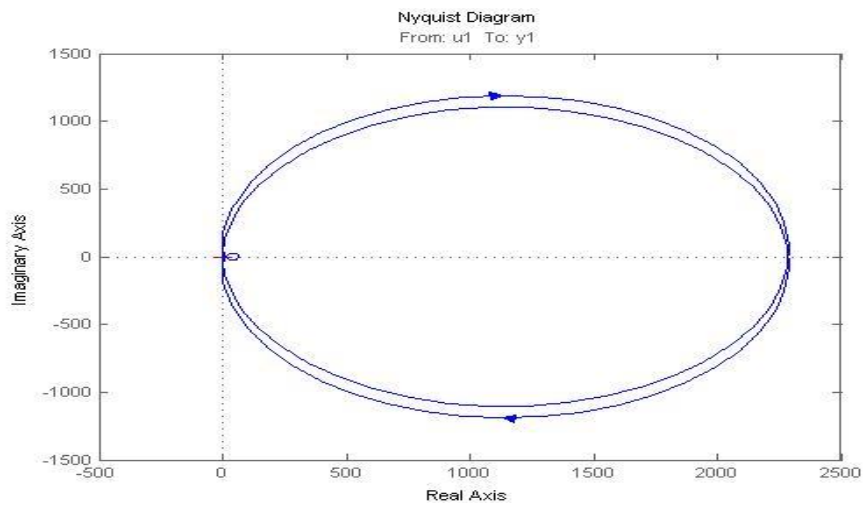
Διάγραμμα 4.8.65: Generator 9 (H_9)



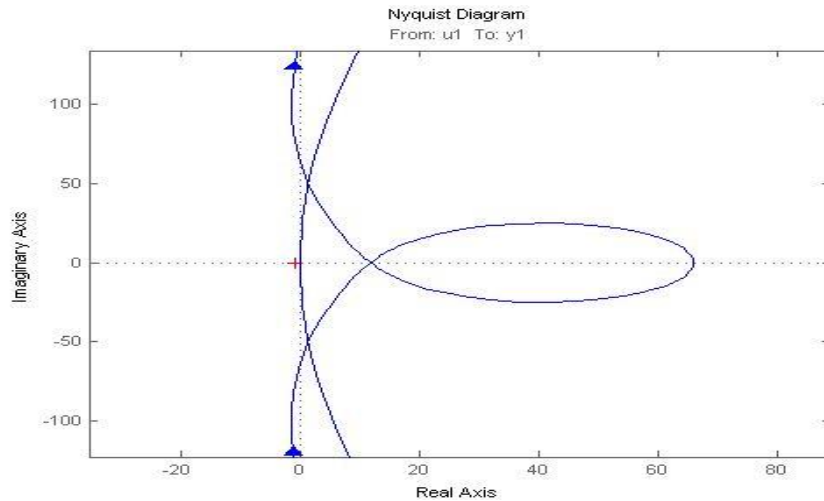
Διάγραμμα 4.8.66: Generator 9 (H_9)



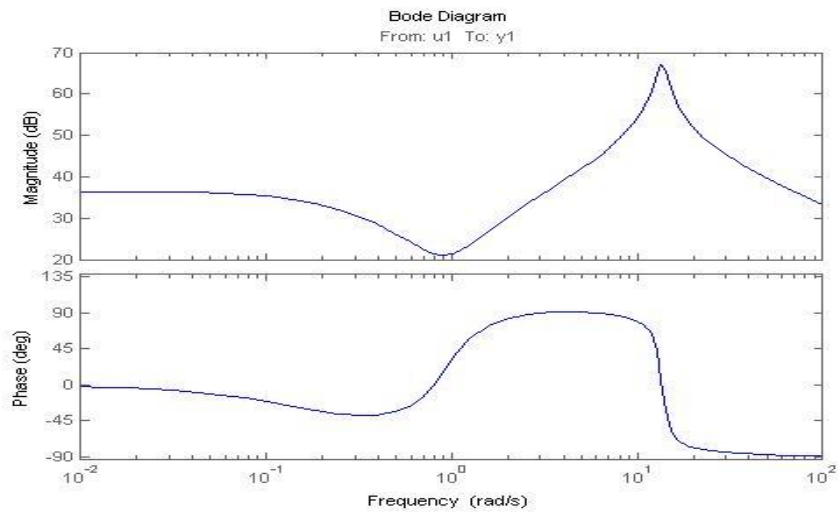
Διάγραμμα 4.8.67: Generator 9 (B_9)



Διάγραμμα 4.8.68: Generator 10 (H_{10})



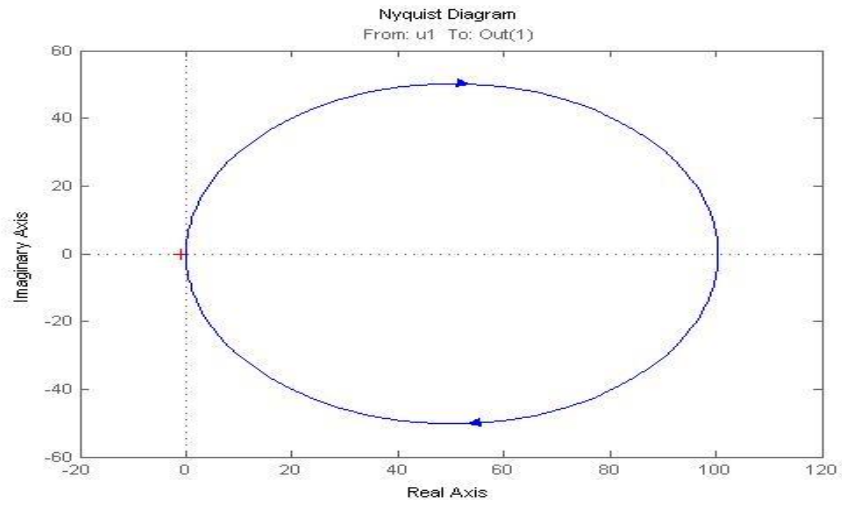
Διάγραμμα 4.8.69: Generator 10 (H_{10})



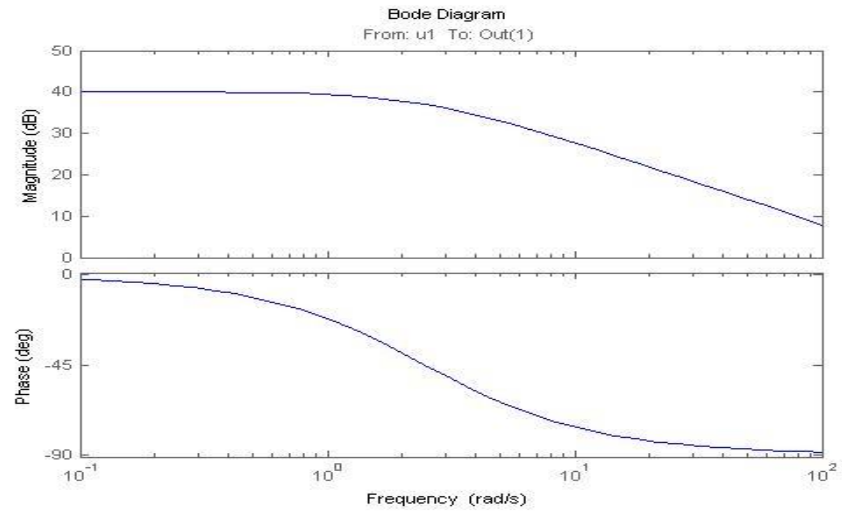
Διάγραμμα 4.8.70: Generator 10 (B_{10})

Δεδομένου ότι οι ελεγκτές φορτίου στους ζυγούς 1-5, 6-10 και 11-14 έχουν το ίδιο gain (= 1, 1.5 και 0.5 αντίστοιχα), οι εκτιμώμενες συναρτήσεις μεταφοράς είναι όλες οι ίδιες. Έτσι, παρουσιάζουμε μόνο την εκτιμώμενη συνάρτηση μεταφοράς στους ζυγούς 3, 18 και 27.

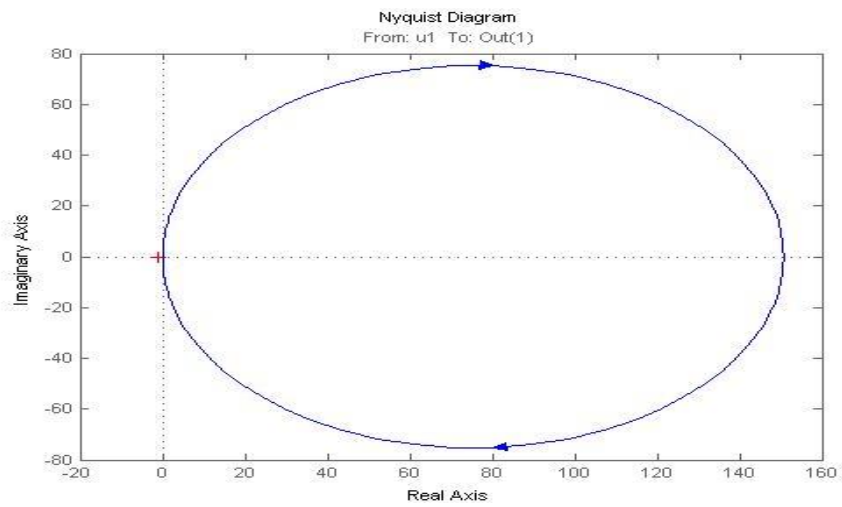
Ελεγκτές φορτίου είναι αυστηρώς παθητικά συστήματα και έτσι διασφαλίζουν την σταθερότητα των συστημάτων ισχύος. Η αυστηρή παθητικότητα μπορεί να επιβεβαιωθεί από το γεγονός ότι διαγράμματα Nyquist βρίσκονται εξ ολοκλήρου στην δεξιά πλευρά της γραφικής.



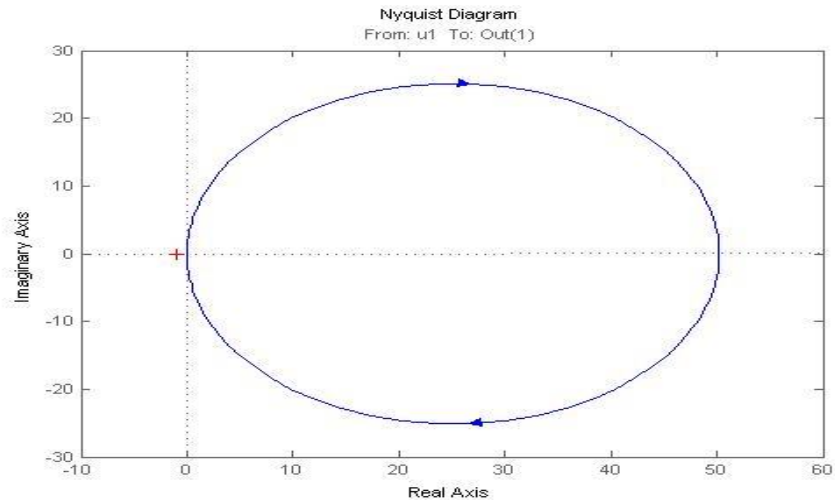
Διάγραμμα 4.8.71: Loads 1-5 (H_{L1-5})



Διάγραμμα 4.8.72: Loads 1-5 (B_{L1-5})



Διάγραμμα 4.8.73: Loads 6-10 (H_{L6-10})



Διάγραμμα 4.8.74: Loads 11-14 (H_{L11-14})

Παραλείπουμε τα διαγράμματα Bode των υπόλοιπων φορτίων, δεδομένου ότι είναι σχεδόν τα ίδιο με το διάγραμμα Bode του ζυγού φορτίου 1 (ζυγός 3). Υπάρχουν μόνο μια μικρή διαφορά μεταξύ των gain τους.

5 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ως πρώτο στόχο είχε την εξοικείωση και εκμάθηση του εργαλείου PST στην Matlab και την δυνατότητα εξαγωγής διαφόρων προσομοιώσεων. Απώτερος σκοπός της εξοικείωσης αυτής ήταν η εκτεταμένη μελέτη της παθητικότητας των δικτύων και η εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων που θα βοηθήσουν και θα διευκολύνουν την μελλοντική σχεδίαση νέων ελεγκτών ρύθμισης της συχνότητας, αλλά και της τάσης.

Όπως έχουμε δει στο προηγούμενο κεφάλαιο κατά την διάρκεια της λειτουργίας ενός συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζονται και μη παθητικές συμπεριφορές από κάποιους ελεγκτές, λόγω χάρη η συμπεριφορά των turbine governors και των exciter στο σύστημα. Για αυτό τον λόγο, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελλοντική εκτενέστερη μελέτη της παθητικότητας τόσο των συστημάτων ελέγχου της συχνότητας, όσο και των συστημάτων ελέγχου της τάσης. Επιπρόσθετα κρίσιμη είναι και η μελέτη διαφόρων υπαρχόντων μελετών παθητικοποίησης μη παθητικών συστημάτων και η ενσωμάτωση τους στην λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιες μέθοδοι παρουσιάζονται στους τομείς των τηλεπικοινωνιών της ρομποτικής και γενικά σε τομείς που ασχολούνται με την ανάλυση και την ευστάθεια δικτύων/συστημάτων μεγάλης κλίμακας.

Εξίσου σημαντική είναι και η μελέτη της συμπεριφοράς και άλλων πιο προηγμένων συστατικών των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι τα FACTs devices [80,81]. Τα FACTs devices έχουν την δυνατότητα να ελέγξουν σε πολύ μικρό χρόνο την ροή του φορτίου ρυθμίζοντας παράλληλα την τάση στους ζυγούς του συστήματος. Έτσι είναι πολύ σημαντική η ενσωμάτωση τους στο συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο και η μελέτη του πως αυτά μπορούν να βοηθήσουν στην ομαλότερη και πιο εύρωστη λειτουργία ενός ΣΗΕ.

Τέλος ένας άλλο σημαντικό κεφάλαιο το οποίο πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω στο μέλλον είναι και ο σχεδιασμός βέλτιστων ελεγκτών ρύθμισης της συχνότητας και της τάσης. Με άλλα λόγια, πως θα μπορούσε ένα ευέλικτο εργαλείο όπως η παθητικότητα, να βοηθήσει στον σχεδιασμό τέτοιων μεθόδων ελέγχου της τάσης και της συχνότητας, στους οποίους τόσο οι διαθέσιμες γεννήτριες όσο και τα ελεγχόμενα φορτία θα συνεισφέρουν βέλτιστα (μέσω της επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης) στην λειτουργία του συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Literature

- [1] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*. Upper Saddle River, New Jersey 07458: Prentice Hall, 2001, p. 767.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc., 1994, p. 1167.
- [3] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. Overbye, *Power Systems Analysis and Design*, Fifth Edit. Stamford, USA: Cengage Learning, 2010, p. 848.
- [4] A. Bergen and V. Vittal, *Power Systems Analysis*, 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey 07458: Prentice-Hall, 2000, p. 619.
- [5] D. P. Bertsekas, *Convex Analysis and Optimization*. Belmont, Massachusetts: Athena Scientific, 2003, p. 550.
- [6] Y. C. H. Arthur E. Byson Jr, *Applied Optimal Control - Optimization, Estimation, and Control*. New York: Taylor & Francis Group, 1975, p. 482.
- [7] 2003 Blackout in the United States Final Report on the August 14, Canada: Causes, and Recommendations. Energy policy highlights. U.S. - Canada Power System Outage Task Force, page 30, 2004.
- [8] J. L. Kirtley. *Electric Power Principles (Sources, Conversion, Distribution and Use)*. Wiley, New Delhi, 2010.
- [9] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004, p. 730.
- [10] D. P. Bertsekas, *Nonlinear Programming*, Second Edi. Belmont, Massachusetts, 1999, p. 773.
- [11] A. P. an S. U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, Fourth Edi. Singapore: Mc Graw Hill, 2002, p. 837.
- [12] H. R. Varian, *Microeconomic Analysis*, Third Edit. 500 Fith Avenue, New York, N.Y. 10110: W. W. Norton Company, Inc., 1992, p. 559.
- [13] K. F. Riley, M. P. Hobson, S. J. Bence, and D. Spector, *Mathematical methods for physics and engineering*, vol. 67. 1999, p. 165.
- [14] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, Sixth Edit. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011, p. 886.
- [15] M. G. and D. J. N. Limebeer, *Linear Robust Control*, vol. 31. Pearson Education Inc., 1995, p. 1681.

- [16] D. S. K. and G. Strbac, *Fundamentals of Power System Economics*. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Inc., 2005, p. 803.
- [17] D. S. Callaway and I. a. Hiskens, "Achieving Controllability of Electric Loads," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 1, 2010.
- [18] D. Angeli and P.-A. Kountouriotis, "A Stochastic Approach to Dynamic-Demand Refrigerator Control," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 20, no. 3, pp. 581–592, 2012.
- [19] M. Aunedi, P. Aristidis Kountouriotis, J. E. Ortega Calderon, D. Angeli, and G. Strbac, "Economic and environmental benefits of dynamic demand in providing frequency regulation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 2036–2048, 2013.
- [20] P. J. Douglass, R. Garcia-Valle, P. Nyeng, J. Ostergaard, and M. Togeby, "Smart demand for frequency regulation: Experimental results," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1713–1720, 2013.
- [21] B. K. and M. K.-M. Grayson Heffner, Charles Goldman, "Loads Providing Ancillary Services: Review of International Experience," *Lawrence Berkeley Natl. Lab.*, p. 50, 2008.
- [22] Z. M. Z. Ma, D. Callaway, and I. Hiskens, "Decentralized charging control for large populations of plug-in electric vehicles," *Decis. Control (CDC), 2010 49th IEEE Conf.*, pp. 206–212, 2010.
- [23] J. Machowski and S. Robak, "Decentralized stability-enhancing control of synchronous generator," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 4, pp. 1336–1344, 2000.
- [24] E. Mallada and S. H. Low, "Distributed frequency-preserving optimal load control," *IFAC World Congr.*, 2014.
- [25] A. Molina-García, F. Bouffard, and D. S. Kirschen, "Decentralized demand-side contribution to primary frequency control," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 411–419, 2011.
- [26] D. Papadaskalopoulos and G. Strbac, "Decentralized participation of flexible demand in electricity markets - Part I: Market mechanism," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 3658–3666, 2013.
- [27] D. Papadaskalopoulos, G. Strbac, P. Mancarella, M. Aunedi, and V. Stanojevic, "Decentralized Participation of Flexible Demand in Electricity Markets--Part II: Application With Electric Vehicles and Heat Pump Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 3667–3674, 2013.
- [28] C. De Persis and S. Trip, "An internal model approach to frequency regulation in inverter-based microgrids with time-varying voltages," in *53rd IEEE Conference on Decision and Control*, 2014, p. 6.
- [29] C. De Persis and S. Trip, "An internal model approach to frequency regulation in

- power grids,” p. 16, 2014.
- [30] B. Ramanathan and V. Vittal, “A framework for evaluation of advanced direct load control with minimum disruption,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 4, pp. 1681–1688, 2008.
 - [31] D. Feijer and F. Paganini, “Stability of primal–dual gradient dynamics and applications to network optimization,” *Automatica*, vol. 46, no. 12, pp. 1974–1981, Dec. 2010.
 - [32] F. C. Schweppe, D. Richard, and J. L. Kirtley, “Homeostatic Control: The Utility/Customer Marketplace for Electric Power,” no. September, pp. 1–44, 1981.
 - [33] P. P. Varaiya, F. F. Wu, and J. W. Bialek, “Smart Operation of Smart Grid: Risk-Limiting Dispatch,” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 40–57, Jan. 2011.
 - [34] C. Zhao and S. Low, “Decentralized Primary Frequency Control in Power Networks,” *arXiv.org*, no. vi, pp. 2467–2473, 2014.
 - [35] C. Zhao, U. Topcu, and S. Low, “Frequency-Based Load Control in Power Systems,” *Smart.Caltech.Edu*.
 - [36] C. Zhao, U. Topcu, N. Li, and S. Low, “Design and Stability of Load-Side Primary Frequency Control in Power Systems,” *Autom. Control. IEEE Trans.*, vol. 59, no. 5, pp. 1177–1189, 2014.
 - [37] C. Zhao, U. Topcu, and S. H. Low, “Fast load control with stochastic frequency measurement,” *Power Energy Soc. Gen. Meet. 2012 IEEE*, pp. 1–8, 2012.
 - [38] C. Zhao, U. Topcu, N. Li, and S. H. Low, “Power System Dynamics as Primal-Dual Algorithm for Optimal Load Control,” no. November 2012, pp. 1–27.
 - [39] C. Zhao, U. Topcu, and S. H. Low, “Optimal load control via frequency measurement and neighborhood area communication,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 3576–3587, 2013.
 - [40] N. Li, L. Chen, C. Zhao, and S. H. Low, “Connecting automatic generation control and economic dispatch from an optimization view,” *2014 Am. Control Conf.*, pp. 735–740, Jun. 2014.
 - [41] A. Brooks, E. Lu, D. Reicher, C. Spirakis, and B. Wehl, “Demand dispatch,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 8, no. june, pp. 20–29, 2010.
 - [42] M. Fahrioglu and F. L. Alvarado, “Designing incentive compatible contracts for effective demand management,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 4, pp. 1255–1260, 2000.
 - [43] Berr, “Dynamic Demand: Government Response to Clause 18 of the Climate Change and Sustainable Energy Act,” no. August, p. 12, 2007.
 - [44] M. Jamshidi and M. Etezadi, “On the Decentralized Control of Large-Scale Power

- Systems,” *1984 Am. Control Conf.*, vol. 36, no. 2000, pp. 1275–1289, 1984.
- [45] Y. Wang, D. J. Hill, and G. Guo, “Robust Decentralized Control for Multimachine Power Systems,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 45, no. 3, pp. 271–279, 1998.
- [46] W. Hogan, “Electricity market structure and infrastructure,” *Act. time energy policy. Brookings ...*, pp. 1–27, 2009.
- [47] E. Mallada and S. H. Low, “Distributed frequency-preserving optimal load control,” *IFAC World Congr.*, 2014.
- [48] N. Hasan, “An Overview of AGC Strategies in Power System,” vol. 2, no. 8, pp. 56–64, 2012.
- [49] K. a. Ellithy and K. a. El-Metwally, “Design of Decentralized Fuzzy Logic Load Frequency Controller,” *Int. J. Intell. Syst. Appl.*, vol. 4, no. March, pp. 66–75, 2012.
- [50] S. Shao, T. Zhang, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, “Impact of TOU rates on distribution load shapes in a smart grid with PHEV penetration,” *2010 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Smart Solut. a Chang. World*, pp. 1–6, 2010.
- [51] C. Zhao and S. Low, “Decentralized Primary Frequency Control in Power Networks,” *arXiv.org*, no. vi, pp. 2467–2473, 2014.
- [52] C. Zhao, S. Low, and L. Li, “Frequency Control Outline Motivation Dynamic network model Simulations,” no. January, 2014.
- [53] A. H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, “Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, pp. 120–133, 2010.
- [54] D. E. L. Steven H. Low, “Optimization Flow Control-I-Basic Algorithm and Convergence,” *Ieee/Acm Trans. Netw.*, vol. vol 7, NO., pp. 861–874, 1999.
- [55] F. Dörfler, M. Chertkov, and F. Bullo, “Synchronization in complex oscillator networks and smart grids,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 110, no. 6, pp. 2005–10, 2013.
- [56] D. Trudnowski, M. Donnelly, and E. Lightner, “Power-system frequency and stability control using decentralized intelligent loads,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 1, pp. 1453–1459, 2006.
- [57] T. Carpenter, S. Singla, P. Azimzadeh, and S. Keshav, “The impact of electricity pricing schemes on storage adoption in Ontario,” *Proc. 3rd Int. Conf. Futur. Energy Syst. Where Energy, Comput. Commun. Meet - e-Energy '12*, pp. 1–10, 2012.
- [58] C. Zhao, U. Topcu, N. Li, and S. H. Low, “Power system dynamics as primal-dual algorithm for optimal load control,” p. 35, 2013.
- [59] S. Y. Caliskan and P. Tabuada, “Compositional transient stability analysis of multi-

- machine power networks,” vol. 1, no. 1, pp. 1–20, 2014.
- [60] C. U. Saraydar, N. B. Mandayam, and D. J. Goodman, “Efficient power control via pricing in wireless data networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 2, pp. 291–303, 2002.
- [61] C. Zhao, U. Topcu, N. Li, and S. H. Low, “Power system dynamics as primal-dual algorithm for optimal load control,” no. November 2012, p. 35, 2013.
- [62] C. Zhao, U. Topcu, and S. H. Low, “Frequency-Based Load Control in Power Systems,” *Am. Control Conf.*, pp. 4423–4430, 2012.
- [63] H. Miyagi and A. R. Bergen, “Stability studies of multimachine power systems with the effects of automatic voltage regulators,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 31, no. 3, pp. 210–215, 1986.
- [64] J. van der Schaft and B. M. Maschke, “Port-Hamiltonian systems on graphs,” *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 51, no. 2, pp. 906–937, 2013.
- [65] B. Maschke, R. Ortega, and A. J. van der Schaft, “Energy-based Lyapunov functions for forced Hamiltonian systems with dissipation,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, no. 8, pp. 1498–1502, 2000.
- [66] Y. Wang, D. Cheng, C. Li, and Y. Ge, “Dissipative Hamiltonian realization and energy-based L_2 -disturbance attenuation control of multimachine power systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, no. 8, pp. 1428–1433, 2003.
- [67] S. Fiaz, D. Zonetti, R. Ortega, J. M. A. Scherpen, and A. J. van der Schaft, “A port-Hamiltonian approach to power network modeling and analysis,” *European Journal of Control*, vol. 19, no. 6, pp. 477–485, 2013.
- [68] S. Y. Caliskan and P. Tabuada, “Compositional transient stability analysis of multimachine power networks,” *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 4–14, 2014.
- [69] J. Liu, B. H. Krogh, and B. E. Ydstie, “Decentralized robust frequency control for power systems subject to wind power variability,” in *Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES)*, pp. 1–8, 2011.
- [70] M. Andreasson, R. Wiget, D. V. Dimarogonas, K. H. Johansson, and G. Andersson, “Distributed primary frequency control through multi-terminal HVDC transmission systems,” in *Proceedings of the American Control Conference (ACC)*, pp. 5029–5034, 2015.
- [71] A. Kasis, E. Devane, and I. Lestas, “On the stability and optimality of primary frequency regulation with load-side participation,” in *Decision and Control (CDC), 2015 IEEE 54th Annual Conference on*, IEEE, 2015.

- [72] E. Devane, A. Kasis, and I. Lestas, "Primary frequency regulation with load-side participation. Part II: beyond passivity approaches," 2015 (under review for publication).
- [73] A. Kasis, E. Devane, and I. Lestas, "Primary frequency regulation with load-side participation. Part I: stability and optimality," arXiv Preprint Server, 2015.
- [74] Zhao, C., Topcu, U., Li, N., and Low, S. (2014). Design and stability of load-side primary frequency control in power systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 59(5), 1177-1189.
- [75] C. Zhao, and S. Low, "Optimal decentralized primary frequency control in power networks," *Proc. 53rd IEEE Conf. Decision Control*, pp 2467–2473, Dec. 2014.
- [76] Martin Andreasson, Roger Wiget, Dimos V. Dimarogonas, Karl H. Johansson and Göran Andersson "Distributed Primary Frequency Control through Multi-Terminal HVDC Transmission Systems"
- [77] Κρικέλης Ν., Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο, Συμμετρία, 2000.
- [78] Franklin, G., Powell, D., Enami-Naeimi, A., *Feedback Control of Dynamic Systems*, Addison Wesley Longman, 5th edition, 2005.
- [79] Dorf, R., Bishop, R., *Modern Control Systems*, Prentice-Hall, 2001.
- [80] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS*. John Wiley & Sons, 2000.
- [81] M. Eslami, H. Shareef, A. Mohamed, and M. Khajehzadeh, "A survey on flexible AC transmission systems (FACTS)," *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 88, no. 1A, pp. 1–11, 2012.
- [82] "Documentation." *Transfer Function Estimation*. N.p., n.d. Web. 09 May 2016. Retrieved from <http://www.mathworks.com/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Α.1 Περιγραφή PST

Το Power System Toolbox (PST) επινοήθηκε και αναπτύχθηκε αρχικά από τον Δρ Kwok W. Cheung και τον καθηγητή Joe Chow από Rensselaer Polytechnic Institute στις αρχές του 1990. Από το 1993 έως το 2009, ήταν στην αγορά, και αναπτύχθηκε περαιτέρω, από τον Graham Rogers (πρώην Cherry Tree Scientific Software), και χρησιμοποιείτε από επιχειρήσεις κοινής ωφελείας, συμβούλους και πανεπιστήμια από όλο τον κόσμο.

Όταν ο Graham Rogers ανέλαβε την ανάπτυξη του PST έγιναν σημαντικές αναβαθμίσεις στο λογισμικό, συμπεριλαμβανομένων vectorized υπολογισμούς για την αύξηση της ταχύτητας υπολογισμού, ακόμα έγινε συμπερίληψη πρόσθετων στοιχείων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, δίνοντας έτσι περισσότερες δυνατότητες για γραμμική ανάλυση, και άλλες βελτιώσεις.

Ξεκινώντας από το Φεβρουάριο του 2010, η PST και άλλο λογισμικό από Graham Rogers θα διανεμηθούν μέσω αυτής της ιστοσελίδας. Cherry Tree Scientific Software δεν είναι πλέον σε λειτουργία.

Το PST αποτελείται από ένα σύνολο συντονισμένων MATLAB m-αρχείων μοντελοποιώντας τα εξαρτήματα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία απαιτούνται για την μελέτη των συστημάτων ισχύος, της ροή ισχύος και τη σταθερότητα. Η εργαλειοθήκη έρχεται με τα m-files, παραδείγματα demo για το πώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα, πολλά σύνολα των δυναμικών δεδομένων και τα εγχειρίδια του χρήστη.

Το αρχικό έγγραφο σχετικά με PST δημοσιεύθηκε στα IEEE Transactions on Συστήματα Ισχύος:

J.H. Chow και K.W. Cheung, μια εργαλειοθήκη για τη δυναμική του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και της μηχανικής εκπαίδευσης έλεγχο και την έρευνα, IEEE Transactions on Power Systems, vol.7, No.4, pp.1559-1564, Νοέμβριος 1992.

A.2 Δυναμική Προσομοίωση

A.2.1 Εισαγωγή

Το Power System Toolbox παρέχει μοντέλα μηχανών και συστημάτων ελέγχου για την εκτέλεση παροδικών προσομοιώσεων σταθερότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και για την οικοδόμηση μοντέλων σε μεταβλητή κατάσταση για μικρή ανάλυση σήματος και απόσβεσης σχεδιασμού των ελεγκτών. Αυτά τα δυναμικά μοντέλα κωδικοποιούνται ως λειτουργίες της MATLAB.

Τα MATLAB m-αρχεία παρέχονται έτσι ώστε να δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εκτελέσει παροδική ανάλυση της σταθερότητας του σήματος χωρίς την προσθήκη νέων μοντέλων. Ωστόσο, δεδομένου ότι ο πλήρης κωδικός είναι υπό τη μορφή του MATLAB m-αρχεία, μετά από ένα σύνολο κανόνων, ο χρήστης μπορεί να συγκεντρώσει προσαρμοσμένα μοντέλα και εφαρμογές.

Σε αυτό το σεμινάριο, αναλύονται οι απαιτήσεις των συμβάσεων μοντέλου, η δομή και τα δεδομένα, καθώς και ο τρόπος διασύνδεσης των μοντέλων για να σχηματίσουν μοντέλα προσομοίωσης του συστήματος ισχύος.

A.2.1.1 Η δομή του συστήματος τροφοδοσίας

Η δομή του συστήματος ισχύος ορίζεται από πίνακες που περιέχουν τις προδιαγραφές για τα καλώδια(bus) και τις γραμμές(lines) οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς της γραμμής ροής φορτίου. Μια λύση περίπτωσης ροής φορτίου απαιτείται για να ρυθμίσετε τις συνθήκες λειτουργίας που χρησιμοποιούνται για την προετοιμασία των δυναμικών μοντέλων συσκευών. Δεδομένα ροής φορτίου που αντιπροσωπεύουν περιπτώσεις χωρίς λύση, οδηγούν σε δυναμικά μοντέλα τα οποία δεν είναι σε ισορροπία, όταν αρχικοποιούνται.

A.2.1.2 DynamicData

Οι γεννήτριες ορίζονται στον πίνακα προδιαγραφών mac_con. Υπάρχουν τρεις τύποι μοντέλου για τις γεννήτριες:

1. Ηλεκτρομηχανολογικές (em), ή κλασικό πρότυπο (mac_em)
2. Το παροδικό μοντέλο (mac_tra)
3. Το υπομεταβατικό μοντέλο (mac_sub)

Όλοι χρησιμοποιούν τα ίδια πεδία για τα δεδομένα, αλλά μόνο το υπομεταβατικό μοντέλο χρησιμοποιεί κάθε τομέα. Έτσι, όλα τα μοντέλα της γεννήτριας καθορίζονται χρησιμοποιώντας ένα ενιαίο πλέγμα προδιαγραφών. Ανάλογα με τις απαιτήσεις πρόσθετων στοιχείων πρέπει να προσδιορίζονται για τον έλεγχο της γεννήτριας:

- Διεγέρτες(exciters) - exc_con
- Σταθεροποιητές Συστήματος Ισχύος (PowerSystemstabilizers) - pss_con
- Τουρμπίνα-γεννήτριες (Turbine-Generators) - tg_con
- Επαγωγικών κινητήρων(induction motors) - ind_conκαιmld_con
- Επαγωγικές γεννήτριες (induction generators) - igen_con
- Φορτία μη συμμορφούμενα (non-conforming loads) - load_con
- Στατικοί Αντισταθμιστές VAR(static VAR compensators) - svc_con
- Thyristor ελεγχόμενων πυκνωτών σειράς(controlled series capacitors) - tcsc_con
- Γραμμές συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDClines)
- Μετατροπείς (converters)- dcsp_con
- Γραμμές (lines)- dcl_con
- Ελεγκτές (controls) - dcc_con
- Σε μικρή προσομοίωση σταθερότητας σήματος, γεννήτριες μπορεί να οριστούν ως άπειρα καλώδια (bus) που χρησιμοποιούν ibus_con

A.2.1.3 Προσομοίωση DataControl

Για παροδική προσομοίωση σταθερότητας, απαιτείται κάποια μέθοδος για την καθοδήγηση του προγράμματος προσομοίωσης για να εφαρμόσει ένα σφάλμα. Το αρχείο δέσμης ενεργειών y_switch είναι ένα παράδειγμα ενός αρχείου προσομοίωσης. Χρησιμοποιεί τα δεδομένα από το αρχείο προδιαγραφών sw_con.

A.2.2 Δυναμικό Μοντέλο Λειτουργίες

Τα μοντέλα που είναι διαθέσιμα σε αυτή την έκδοση του PST περιλαμβάνουν:

1. Μοντέλα Generator

- (α) mac_em - ηλεκτρομηχανολογικών (κλασικό) μοντέλο
- (β) mac_tra- το μοντέλο περιλαμβάνει παροδικό φαινόμενο
- (γ) mac_sub - μοντέλο συμπεριλαμβανομένης της υπομεταβατικής επίδρασης[1]
- (δ) mac_ib - γεννήτρια ως άπειρο μοντέλο του καλωδίου(bus) (χρησιμοποιείται μόνο σε προσομοίωση σταθερότητα μικρό σήμα)

2. Μοντέλα σύστημα διέγερσης

- (A) smprexc - απλοποιημένο μοντέλο διεγέρτη
- (B) exc_dc12 - IEEE τύπου DC1 και DC2 μοντέλα [2]
- (Γ) exc_st3 - IEEE μοντέλο τύπου ST3 [2] μοντέλο σταθεροποιητή

3. Σύστημα Ισχύος ... PSS

4. Απλοποιημένο μοντέλο θερμό - στροβίλου με κυβερνήτη ... tg

5. Απλοποιημένο μοντέλο υδροτουρπίνας με κυβερνήτη ... TGH

6. Μοντέλο επαγωγού Motor ... mac_ind

7. Μοντέλο επαγωγικής γεννήτριας ... mac_igen

8. Στατικό VAR μοντέλο αντισταθμιστή - SVC [3]

9. Ελεγχόμενο Thyristor Seried Compensator - TcSC

10. Τοποθετήστε Διαμόρφωση Ελέγχου ... lmod μοντέλο της γραμμής

11. HVDC - dc_line, dc_cont

12. Μη συμμορφούμενα μοντέλα φορτίου - nc_load

13. Γραμμή λειτουργίας ροής - line_pq

14. Λειτουργίες Utility - pss_des (ενεργειακό σχεδιασμό σταθεροποιητή του συστήματος), statof (απόκριση συχνότητας από το κράτοςχώρου), step_res (βήμα απάντηση από μοντέλα συστημάτων στο χώρο κατάστασης).

A.2.3 Πρότυπο οδηγού Δυναμική

Λειτουργίες οδήγησης δίνονται για παροδική σταθερότητα (s_simu) και μικρή σταθερότητα σήματος (svm_mgen). Αυτές οι λειτουργίες παρέχουν ένα περιβάλλον το οποίο απαιτεί τα δεδομένα του συστήματος να προσδιορίζονται και να ενεργούν σαν stand-alone παροδικές και μικρά προγράμματα σταθερότητας σήματος. Λεπτομέρειες δίνονται στις περιγραφές λειτουργίας στην ενότητα που ακολουθεί σε αυτό το σεμινάριο.

A.2.4 Επεκτείνοντας τις δυνατότητες του PST

Δεδομένου ότι ο πηγαίος κώδικας για όλες τις λειτουργίες παρέχεται, ένας χρήστης μπορεί να επεκτείνει PST για την κάλυψη ειδικών μοντέλων ή απαιτήσεις προσομοίωσης. Στην συνέχεια βλέπουμε την προτιμώμενη μορφή του δυναμικά μοντέλα.

A.2.4.1 Μοντέλο Δομή

Κάθε λειτουργία μοντέλο αποτελείται από 3 μέρη:

1. αρχικοποίηση των μεταβλητών κατάστασης - σημαία = 0
2. δίκτυο διασύνδεσης υπολογισμού - σημαία = 1
3. υπολογισμό των ρυθμών μεταβολής των μεταβλητών κατάστασης - σημαία = 2

Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν 4 μεταβλητές εισόδου σε μια λειτουργία, δηλαδή, i (ο αριθμός της συσκευής), k (χρονικό βήμα), τα καλώδια (bus) και τα flag. Μια σύμβαση που χρησιμοποιείται σε όλα τα παρεχόμενα μοντέλα είναι ότι αν i είναι μηδέν, οι υπολογισμοί του μοντέλου γίνονται χρησιμοποιώντας μεθόδους φορέα. Οι πρόσθετες μεταβλητές συνήθως απαιτούνται για τα δυναμικά μοντέλα. Στο PST αυτές οι μεταβλητές συνήθως προσδιορίζονται ως γενικές(global). Η `pst_varm_file` δηλώνει όλες τις καθολικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στο PST. Για λόγους συνέπειας θα πρέπει να προστεθούν νέες γενικές(global) μεταβλητές στο `pst_var`.

Τα περισσότερα μοντέλα απαιτούν μια κατάσταση διασύνδεσης, αλλά μερικά μοντέλα, όπως ο κινητήρας επαγωγής δεν το κάνουν. Εάν η λειτουργία δεν υπάρχει, είναι καλή πρακτική να ορίζεται μηδενικό τμήμα, δείτε `mac_ind.m` για παράδειγμα. Στην περίπτωση που έχουμε μη-συμμορφούμενα μοντέλα φορτίου, δεν υπάρχουν μεταβλητές κατάστασης και ως εκ τούτου δεν μπορούν να ληφθούν μέτρα, όταν αυτή η λειτουργία είναι καλείτε με `flag = 2`. Το νέο μοντέλο θα πρέπει να κωδικοποιηθεί έτσι ώστε να εξέλθει χωρίς σφάλμα, εάν ο αντίστοιχος δείκτης ή πίνακας προδιαγραφών δεδομένων δεν υπάρχει. Με αυτό τον τρόπο ένα ενιαίο πρόγραμμα οδήγησης, το οποίο καλεί όλα τα πιθανά μοντέλα, δεν θα αποτύχει όταν ο οδηγός έχει τρέξει για ένα σύνολο δεδομένων το οποίο δεν περιέχει το νέο μοντέλο.

A.2.4.2 Vector Υπολογισμού

Στη Matlab, είναι σημαντικό να χρησιμοποιήσετε υπολογισμό διανυσμάτων όποτε είναι δυνατόν, και να αποφευχθεί η χρήση βρόχων σε διαδικασία υπολογισμού. Σε αυτή την έκδοση του PST, οι λειτουργίες του δείκτη χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση δεδομένων σχετικά με τους διάφορους τύπους από παρόμοια μοντέλα, π.χ., γεννήτριες. Για παράδειγμα, εάν προστεθεί ένα νέο μοντέλο διέγερσης, η λειτουργία του δείκτη `exc_indx.m` πρέπει να τροποποιηθεί έτσι ώστε να περιλαμβάνει τα κατάλληλα ευρετήρια που έχουν περάσει στο μοντέλο του νέου διεγέρτη ως γενικές(global) μεταβλητές.

A.2.4.3 Χρήση των Προτύπων

Τ νέα δυναμικά μοντέλα είναι πιο εύκολα και αποτελεσματικά, αφού μπορούν να σχηματιστούν απλά τροποποιώντας τα υπάρχοντα μοντέλα. Η μορφή των δεδομένων εισόδου για το μοντέλο θα πρέπει να ακολουθεί τις ίδιες συμβάσεις με εκείνη των υπάρχοντων μοντέλων. Η κατάσταση των μεταβλητών θα πρέπει να έχει σημασία στα νέα μοντέλα παρόμοια με εκείνα στα υπάρχοντα μοντέλα. Αν δεν υπάρχει σύγχυση, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι καταστάσεις που έχουν ήδη καθοριστεί στο `pst_var`.

A.2.5 Μεταβατική Σταθερότητας Προσομοίωση

Ένα σύστημα ισχύος με μοντέλο προσομοίωσης της σταθερότητας αποτελείται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων που καθορίζεται από τα δυναμικά μοντέλα και ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων που καθορίζεται από το δίκτυο του συστήματος ισχύος. Στο PST, τα δυναμικά μοντέλα γεννητριών, με το `flag = 1`, υπολογίζουν την εσωτερική τάση της γεννήτριας, δηλαδή, η τάση πίσω από την παροδική αντίσταση για τις ηλεκτρομηχανικές γεννήτριες, παροδικές γεννήτριες, και η τάση πίσω από την υπομεταβατική αντίσταση για τη υπομεταβατική γεννήτρια. Στο επαγωγικό μοντέλο κινητήρα η εσωτερικές τάσεις πίσω από την παροδική αντίσταση είναι οι καταστάσεις `vdprime` και `vqprime`. Αυτές οι εσωτερικές τάσεις χρησιμοποιούνται με ένα πίνακα αγωγιμοτήτων του συστήματος όπου μειώνει τους εσωτερικούς κόμβους και τα καλώδια (bus) φορτίων μη συμμορφούμενων κόμβων για να υπολογίσει τις τρέχουσες εισφορές στις γεννήτριες και στους κινητήρες. Όταν υπάρχει μια σύνδεση συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης στο μοντέλο, ο μειωμένος πίνακας Y έχει επιπλέον γραμμές και στήλες που συνδέονται με τους ισοδύναμους ακροδέκτες HT των δεσμών HVDC. Οι τρέχουσες εισδοχές στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στα μοντέλα της γεννήτριας και του κινητήρα, καθώς και οι μη-συμμορφούμενες τάσεις φορτίου που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα με συνδέσμους SVC και HVDC και με `flag = 2`, για τον υπολογισμό των συντελεστών της αλλαγής των μεταβλητών κατάστασης τους.

Όλα τα μοντέλα θα πρέπει να ανιχνεύουν την ύπαρξη των δεδομένων που ισχύουν για κάθε μοντέλο, π.χ., εάν τα απαιτούμενα δεδομένα δεν παρέχονται, το μοντέλο λειτουργίας εξέρχεται χωρίς αλλαγές. Με αυτόν τον τρόπο, ο οδηγός μπορεί να

περιέχει όλα τα υπάρχοντα μοντέλα και να βασίζονται στα δεδομένα που καθορίζουν τις αναγκαίες αλλαγές για την απαιτούμενη προσομοίωση.

Αντί να οικοδομήσουμε ένα νέο πρόγραμμα οδήγησης προσομοίωσης από το μηδέν για κάθε επιπλέον μοντέλο προσομοίωσης, συνιστάται τα νέα μοντέλα να προστεθούν στο γενικό s_simu οδηγό σταθερότητας. Η δομή είναι αρκετά απλή και καλά τεκμηριωμένη μέσα στον κώδικα.

A.2.5.1 Παράδειγμα

Το σύστημα δύο-περιοχών με υπομεταβατικές γεννήτριες, στατικούς διεγέρτες, οι διοικητές θερμικής τουρμπίνας και σταθεροποιητές συστημάτων ισχύος ορίζονται στο αρχείο δεδομένων d2asbegp:

```
% Two Area Test Case
% sub transient generators with static exciters, turbine/governors
% 50% constant current active loads
% load modulation
% with power system stabilizers
disp('Two-area test case with subtransient generator models')
disp('Static exciters and power system stabilizers')
disp('turbine/governors')
% bus data format
% bus:
% col1 number
% col2 voltage magnitude (pu)
% col3 voltage angle (degree)
% col4 p_gen (pu)
% col5 q_gen (pu) ,
% col6 p_load (pu)
% col7 q_load (pu)
% col8 G shunt (pu)
```

Dynamic Simulation

```

* col9 B shunt(pu)
* col10 bus_type
*     bus_type - 1, swing bus
*             - 2, generator bus (PV bus)
*             - 3, load bus (PQ bus)
* col11 q_gen_max(pu)
* col12 q_gen_min(pu)
* col13 v_rated (kV)
* col14 v_max pu
* col15 v_min pu
bus = [...
  1  1.03   18.5   7.00   1.61  0.00  0.00  0.00  0.00  1  5.0  -1.0  22.0  1.1  .9;
  2  1.01   8.80   7.00   1.76  0.00  0.00  0.00  0.00  2  5.0  -1.0  22.0  1.1  .9;
  3  0.9781 -6.1   0.00   0.00  0.00  0.00  0.00  3.00  3  0.0   0.0  230.0  1.5  .5;
  4  0.95  -10   0.00   0.00  9.76  1.00  0.00  0.00  3  0.0   0.0  115.0  1.05 .95;
 10 1.0103 12.1   0.00   0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  3  0.0   0.0  230.0  1.5  .5;
 11 1.03  -6.8   7.16   1.49  0.00  0.00  0.00  0.00  2  5.0  -1.0  22.0  1.1  .9;
 12 1.01  -16.9  7.00   1.39  0.00  0.00  0.00  0.00  2  5.0  -1.0  22.0  1.1  .9;
 13 0.9899 -31.8  0.00   0.00  0.00  0.00  0.00  5.00  3  0.0   0.0  230.0  1.5  .5;
 14 0.95  -35   0.00   0.00 17.65  1.00  0.00  0.00  3  0.0   0.0  115.0  1.05 .95;
 20 0.9876  2.1  0.00   0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  3  0.0   0.0  230.0  1.5  .5;
101 1.00  -19.3  0.00   0.00  0.00  0.00  0.00  2.00  3  2.0   0.0  500.0  1.5  .5;
110 1.0125 -13.4  0.00   0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  3  0.0   0.0  230.0  1.5  .5;
120 0.9938 -23.6  0.00   0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  3  0.0   0.0  230.0  1.5  .5;
];
* line data format
* line:
*     col1     from bus
*     col2     to bus
*     col3     resistance (pu)
*     col4     reactance (pu)
*     col5     line charging (pu)
*     col6     tap ratio
*     col7     tap phase
*     col8     tapmax
*     col9     tapmin
*     col10    tapsize
*
line = [...
  1  10  0.0   0.0167  0.00   1.0  0.  0.  0.  0.;
  2  20  0.0   0.0167  0.00   1.0  0.  0.  0.  0.;
  3   4  0.0   0.005   0.00   1.0  0.  1.2  0.8  0.02;
  3  20  0.001  0.0100  0.0175  1.0  0.  0.  0.  0.;
  3  101 0.011  0.110  0.1925  1.0  0.  0.  0.  0.;
  3  101 0.011  0.110  0.1925  1.0  0.  0.  0.  0.;
 10  20  0.0025  0.025  0.0437  1.0  0.  0.  0.  0.;
 11 110 0.0   0.0167  0.0   1.0  0.  0.  0.  0.;
 12 120 0.0   0.0167  0.0   1.0  0.  0.  0.  0.;
 13 101 0.011  0.11  0.1925  1.0  0.  0.  0.  0.;
 13 101 0.011  0.11  0.1925  1.0  0.  0.  0.  0.;
 13  14  0.0   0.005   0.00   1.0  0.  1.2  0.8  0.02;
 13 120 0.001  0.01  0.0175  1.0  0.  0.  0.  0.;
110 120 0.0025  0.025  0.0437  1.0  0.  0.  0.  0.;
];
* Machine data format
* Machine data format
*     1. machine number,
*     2. bus number,
*     3. base mva,
*     4. leakage reactance x_l(pu),
*     5. resistance r_a(pu),
*     6. d-axis synchronous reactance x_d(pu),
*     7. d-axis transient reactance x'_d(pu),
*     8. d-axis subtransient reactance x''_d(pu),
*     9. d-axis open-circuit time constant T'_do(sec),
*    10. d-axis open-circuit subtransient time constant
*        T''_do(sec),
*    11. q-axis synchronous reactance x_q(pu),
*    12. q-axis transient reactance x'_q(pu),
*    13. q-axis subtransient reactance x''_q(pu),
*    14. q-axis open-circuit time constant T'_qo(sec),
*    15. q-axis open circuit subtransient time constant
*        T''_qo(sec),

```

```

%      16. inertia constant H(sec),
%      17. damping coefficient d_o(pu),
%      18. damping coefficient d_1(pu),
%      19. bus number
%
% note: all the following machines use sub-transient model
mac_con = [ ...

1 1 900 0.200 0.00    1.8 0.30 0.25 8.00 0.03...
                    1.7 0.55 0.24 0.4 0.05...
                    6.5 0 0 1 0.0654 0.5743;
2 2 900 0.200 0.00    1.8 0.30 0.25 8.00 0.03...
                    1.7 0.55 0.25 0.4 0.05...
                    6.5 0 0 2 0.0654 0.5743;
3 11 900 0.200 0.00  1.8 0.30 0.25 8.00 0.03...
                    1.7 0.55 0.24 0.4 0.05...
                    6.5 0 0 3 0.0654 0.5743;
4 12 900 0.200 0.00  1.8 0.30 0.25 8.00 0.03...
                    1.7 0.55 0.25 0.4 0.05...
                    6.5 0 0 4 0.0654 0.5743;

];
% simple exciter model, type 0; there are three exciter models
exc_con = [...
0 1 0.01 200.0 0.05 0 0 0 5.0 -5.0...
  0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 2 0.01 200.0 0.05 0 0 0 5.0 -5.0...
  0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 3 0.01 200.0 0.05 0 0 0 5.0 -5.0...
  0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 4 0.01 200.0 0.05 0 0 0 5.0 -5.0...
  0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;

];
% power system stabilizer model
% col1 type 1 speed input; 2 power input
% col2 generator number
% col3 pssgain*washout time constant
% col4 washout time constant
% col5 first lead time constant
% col6 first lag time constant
% col7 second lead time constant
% col8 second lag time constant
% col9 maximum output limit
% col10 minimum output limit
pss_con = [...
1 1 100 10 0.05 0.015 0.08 0.01 0.2 -0.05;
1 2 100 10 0.05 0.015 0.08 0.01 0.2 -0.05;
1 3 100 10 0.05 0.015 0.08 0.01 0.2 -0.05;
1 4 100 10 0.05 0.015 0.08 0.01 0.2 -0.05;

];

% governor model
% tg_con matrix format
%column data unit
% 1 turbine model number (=1)
% 2 machine number
% 3 speed set point wf pu
% 4 steady state gain 1/R pu
% 5 maximum power order Tmax pu on generator base
% 6 servo time constant Ts sec
% 7 governor time constant Tc sec
% 8 transient gain time constant T3 sec
% 9 HP section time constant T4 sec
% 10 reheater time constant T5 sec

tg_con = [...
1 1 1 25.0 1.0 0.1 0.5 0.0 1.25 5.0;
1 2 1 25.0 1.0 0.1 0.5 0.0 1.25 5.0;
1 3 1 25.0 1.0 0.1 0.5 0.0 1.25 5.0;
1 4 1 25.0 1.0 0.1 0.5 0.0 1.25 5.0;

];

```

```

% induction motor data
% 1. Motor Number
% 2. Bus Number
% 3. Motor MVA Base
% 4. rs pu
% 5. xs pu - stator leakage reactance
% 6. Xm pu - magnetizing reactance
% 7. rr pu
% 8. xr pu - rotor leakage reactance
% 9. H s - motor plus load inertia constant
% 10. rrl pu - second cage resistance
% 11. xrl pu - intercage reactance
% 12. dbf - deepbar factor
% 13. isat pu - saturation current
% 15. fraction of bus power drawn by motor ( if zero motor starts at t=0)
ind_con = [];
% Motor Load Data
% format for motor load data - mld_con
% 1 motor number
% 2 bus number
% 3 stiction load pu on motor base (f1)
% 4 stiction load coefficient (i1)
% 5 external load pu on motor base(f2)
% 6 external load coefficient (i2)
% load has the form
% tload = f1*slip^i1 + f2*(1-slip)^i2
mld_con = [];
% col1 bus number
% col2 proportion of constant active power load
% col3 proportion of constant reactive power load
% col4 proportion of constant active current load
% col5 proportion of constant reactive current load
load_con = [4 0 0 0 0;%constant impedance
            14 0 0 0 0];
];
disp('50% constant current load')
%disp('load modulation')
%active and reactive load modulation enabled
% col1 load number
% col2 bus number
% col3 MVA rating
% col4 maximum output limit pu
% col4 minimum output limit pu
% col6 Time constant
lmod_con = [];
rlmod_con = [];
%Switching file defines the simulation control
% row 1 col1 simulation start time (s) (cols 2 to 6 zeros)
% col7 initial time step (s)
% row 2 col1 fault application time (s)
% col2 bus number at which fault is applied
% col3 bus number defining far end of faulted line
% col4 zero sequence impedance in pu on system base
% col5 negative sequence impedance in pu on system base
% col6 type of fault - 0 three phase
% - 1 line to ground
% - 2 line-to-line to ground
% - 3 line-to-line
% - 4 loss of line with no fault
% - 5 loss of load at bus
% - 6 no action
% col7 time step for fault period (s)
% row 3 col1 near end fault clearing time (s) (cols 2 to 6 zeros)
% col7 time step for second part of fault (s)
% row 4 col1 far end fault clearing time (s) (cols 2 to 6 zeros)
% col7 time step for fault cleared simulation (s)
% row 5 col1 time to change step length (s)
% col7 time step (s)
%
%
%
% row n col1 finishing time (s) (n indicates that intermediate rows may be inserted)

```

```

sw_con = [...
0 0 0 0 0 0 0.01;%sets intitial time step
0.1 3 101 0 0 0 0.01; % 3 ph fault at bus 3
0.15 0 0 0 0 0 0.01; %clear near end
0.20 0 0 0 0 0 0.01; %clear remote end
%0.50 0 0 0 0 0 0.01; % increase time step
%1.0 0 0 0 0 0 0.01; % increase time step
5.0 0 0 0 0 0 0]; % end simulation
%fpos=60;
%ibus_con = [0 1 1 1];% sets generators 2, 3 and 4 to be infinite buses
%
% behind source impedance in small signal stability model

```

Running `s_simu` and choosing the file `d2asbegp`, simulates a three-phase fault at bus 3 on the first line from bus 3 to bus 101. The fault is cleared at bus 3 0.01s after the fault is applied, and at bus 10 0.02 s after the fault is applied.

```

s_simu
non-linear simulation
Two-area test case with subtransient generator models
Static exciters
power system stabilizers
50% constant current load
load modulation
enter the base system frequency in Hz - [60]
enter system base MVA - [100]
Do you want to solve loadflow > (y/n)[y]
inner load flow iterations
    4
tap iterations
    1

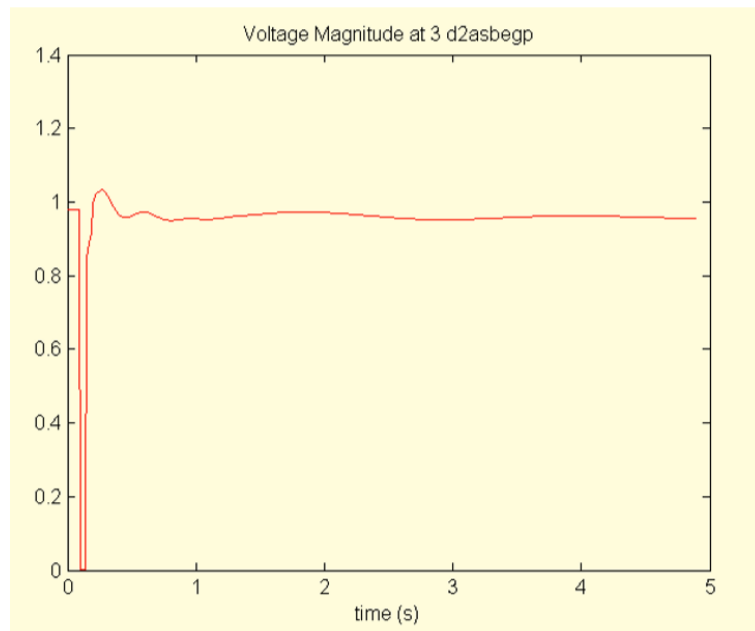
```

```

Performing simulation.
constructing reduced y matrices
initializing motor,induction generator, svc and dc control models
initializing other models
generators
xqpp made equal to xdpp at generators
    1    3
generator controls
non-linear loads
elapsed time = 31.4838s
You can examine the system response
Type 1 to see all machine angles in 3D
    2 to see all machine speed deviation in 3D
    3 to see all machine turbine powers
    4 to see all machine electrical powers
    5 to see all field voltages
    6 to see all bus voltage magnitude in 3D
    7 to see the line power flows
    0 to quit and plot your own curves
enter selection >>

```

Όσο η προσομοίωση εξελίσσεται η τάση στο bus όπου συμβαίνει το σφάλμα(bus 3) σχεδιάζεται. Η τελική απόκριση φαίνεται στην γραφική παράσταση 6.



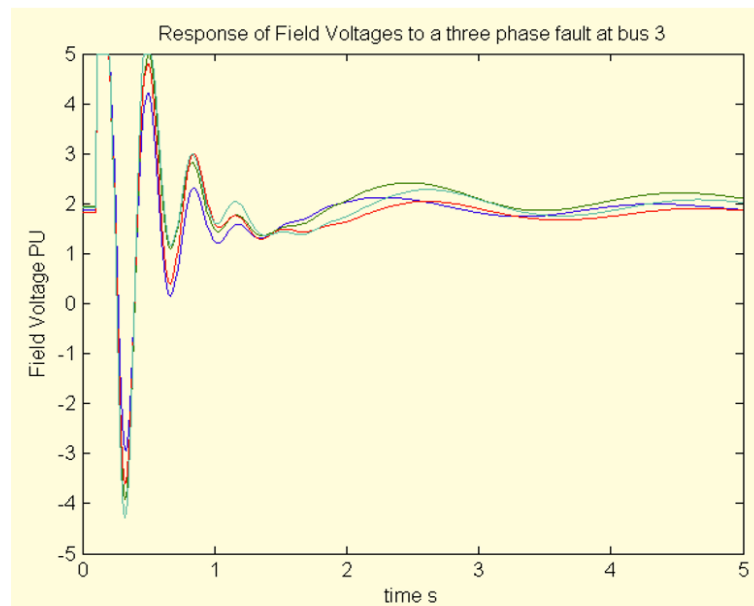
Γραφική παράσταση Α.1: Αντίδραση τάσης σε τριφασικό σφάλμα στο Bus-3

Name	Value	Size	Bytes	Class
B_con	<1x1000 double>	1x1000	8000	double (global)
B_cv	<1x1000 double>	1x1000	8000	double (global)
Efd	<4x1000 double>	4x1000	32000	double (global)
H_sum	189	1x1	8	double
P_dc	<2x1000 double>	2x1000	16000	double (global)
R_f	<4x1000 double>	4x1000	32000	double (global)
VHT	[]	0x0	0	double (global)
V_A	<4x1000 double>	4x1000	32000	double (global)
V_As	<4x1000 double>	4x1000	32000	double (global)
V_B	<4x1000 double>	4x1000	32000	double (global)
V_FB	[]	0x0	0	double (global)
V_R	<4x1000 double>	4x1000	32000	double (global)
V_TR	<4x1000 double>	4x1000	32000	double (global)
V_rgf	<11x4 double>	11x4	900	double (sparse co...)
V_rnfl	<11x4 double>	11x4	900	double (sparse co...)

Γραφική Παράσταση Α.2: Ο πίνακας μεταβλητών MATLAB μετά την ολοκλήρωση της s_simu.

Έτσι, για να σχεδιάσετε τις τάσεις στον τομέα της γεννήτριας

`plot(t,Efd)`



Γραφική παράσταση A.3: Απόκριση τάσης πεδίου γεννήτριας για σφάλμα τριών φάσεων στο bus-3.

A.2.5.2 Εφαρμογή διαταραχών για να γίνει έλεγχος των εισόδων αναφοράς

Κάθε στοιχείο ελέγχου έχει μια είσοδο αναφοράς. Αρχικά, οι εισοδοί αναφοράς ρυθμίζονται να δώσουν την απαιτούμενη σταθερή κατάσταση στην έξοδο από τον έλεγχο, π.χ., η τάση αναφοράς διεγέρτη ρυθμίζεται για να δώσει την τιμή της τάσης της γεννήτριας πεδίου που καθορίζεται από την αρχικοποίηση της γεννήτριας. Οι εισοδοί αναφοράς μπορεί να διαμορφωθούν σε παροδικές προσομοιώσεις με τη χρήση ειδικών `m_files` διαμόρφωσης. Τα αρχεία αυτά συνήθως ορίζονται για να δώσουν μηδενική αλλαγή στην είσοδο αναφοράς, αλλά μπορούν να τροποποιηθούν από έναν χρήστη, ώστε να εφαρμόζουν οποιαδήποτε συνάρτηση του χρόνου. Οι συναρτήσεις διαμόρφωσης είναι:

- `mexc_sig` - ρυθμίζει την τάση αναφοράς διεγέρτη
- `mrm_sig` - ρυθμίζει τη ροπή του άξονα της γεννήτριας
- `mtg_sig` - ρυθμίζει την αναφορά εξουσία κυβερνήτη
- `msvc_sig` - ρυθμίζει την αναφορά SVC
- `ml_sig` - ρυθμίζει την ενεργό φορτίο σε ένα λεωφορείο
- `rml_sig` - ρυθμίζει την άεργο ισχύ σε ένα λεωφορείο
- `mdc_sig` - διαμορφώνει εισόδους αναφοράς DC

Η κατασκευή των συναρτήσεων διαμορφώσεως είναι παρόμοια. Το παρακάτω είναι το m-file `mexc_sig`, που έχει οριστεί να μην παράγει κανένα έξοδο διαμόρφωσης:

```
function f = mexc_sig(t,k)
% Syntax: f = mexc_sig(t,k)
% 1:20 PM 15/08/97
% defines modulation signal for exciter control
global exc_sig n_exc
f=0; %dummy variable
if n_exc~=0
% exc_sig(:,k)=zeros(n_exc,1);
% exc_sig(1,k)=0.1;
%end
if t<=0
exc_sig(:,k) = zeros(n_exc,1);
else
exc_sig(:,k) = zeros(n_exc,1);
%exc_sig(1,k) = 0.05;
end
end
return
```

Για να δείτε πως επηρεάζει η είσοδος βήματος 0,05 στην αναφορά διεγέρτη του G1 στο σύστημα δύο περιοχών, θα πρέπει να ρυθμίσετε το αρχείο μεταγωγής χωρίς σφάλμα. (6 στη στήλη 6 της γραμμής 2)

```

sw_con = [...
0 0 0 0 0 0 0.01;%sets intitial time step
0.1 3 101 0 0 6 0.01; % no fault
0.15 0 0 0 0 0 0.01; %clear near end
0.20 0 0 0 0 0 0.01; %clear remote end
%0.50 0 0 0 0 0 0.01; % increase time step
%1.0 0 0 0 0 0 0.01; % increase time step
5.0 0 0 0 0 0 0]; % end simulation

```

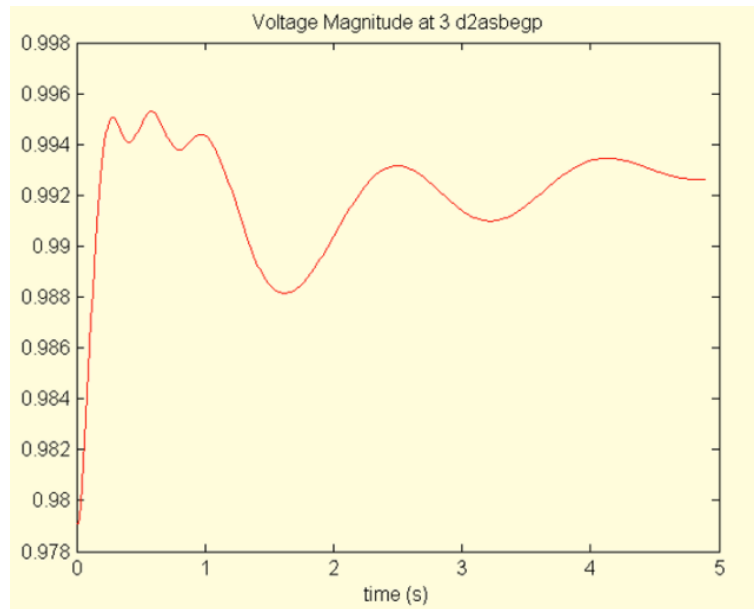
Modify mexc_sig as follows, and save the file

```

function f = mexc_sig(t,k)
% Syntax: f = mexc_sig(t,k)
% 1:20 PM 15/08/97
% defines modulation signal for exciter control
global exc_sig n_exc
f=0; %dummy variable
if n_exc~=0
% exc_sig(:,k)=zeros(n_exc,1);
% exc_sig(1,k)=0.1;
%end
if t<=0
exc_sig(:,k) = zeros(n_exc,1);
else
%exc_sig(:,k) = zeros(n_exc,1);
exc_sig(1,k) = 0.05;
end
end
return

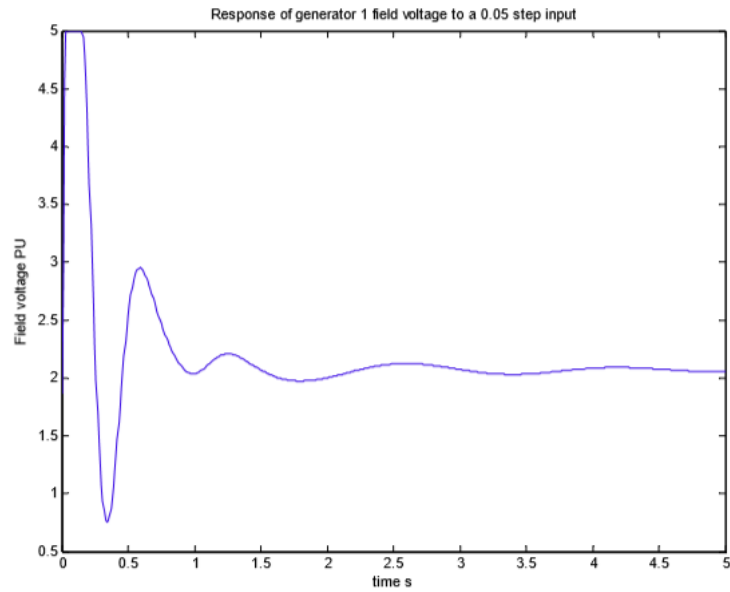
```

Εκτελέστε την εντολή `s_simu`. Η τάση στο bus 3 εμφανίζεται καθώς η προσομοίωση εξελίσσεται. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 9.



Γραφική παράσταση A.4: Αντίδραση τάσης στο bus-3 με είσοδο βήματος 0,05 στην αναφορά διεγέρτη

Η ανταπόκριση της τάσης της γεννήτριας 1 φαίνεται στο Σχήμα 10. Ακόμη και με αυτή την μικρή είσοδο, η απόκριση είναι μη γραμμική - αυτό περιορίζεται από το μέγιστο όριο του διεγέρτη.



Γραφική Παράσταση Α.5: Απόκριση τάσης στην γεννήτρια 1 με βηματική απόκριση 0.05 στο V_{ref} .

Ως δεύτερο παράδειγμα, θεωρήστε την διαμόρφωση του φορτίου στο bus 4. Για να επιτευχθεί αυτή η διαμόρφωση φορτίου πρέπει να είναι ενεργοποιημένη στο bus. Η πρώτη επιστροφή του `mexc_sig` στην αρχική του μορφή η οποία δεν δημιουργεί καμία αλλαγή στην αναφορά διεγέρτη. Προσθέστε ενεργό και άεργο διαφοροποίηση του φορτίου.

```

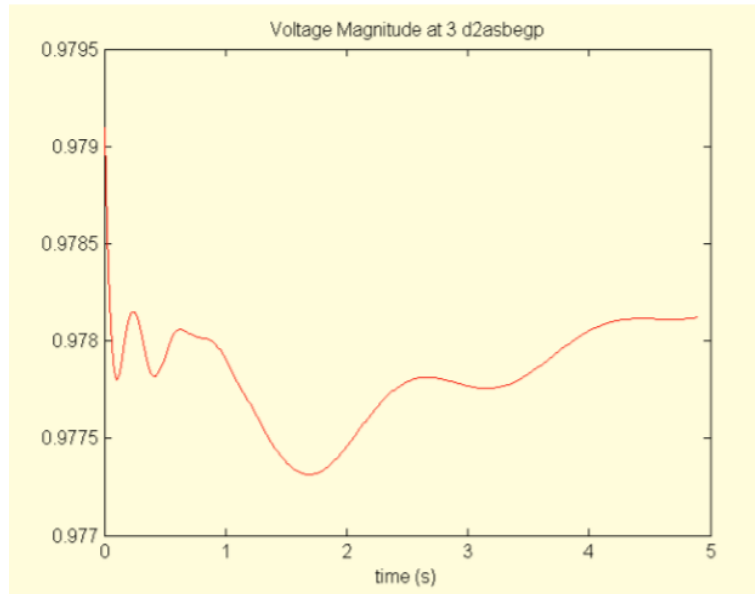
%active and reactive load modulation enabled
% col1 load number
% col2 bus number
% col3 MVA rating
% col4 maximum output limit pu
% col4 minimum output limit pu
% col6 Time constant
lmod_con = [...
1 4 100 1 -1 1 0.05;
2 14 100 1 -1 1 0.05;
];

rlmod_con = [...
1 4 100 1 -1 1 0.05;
2 14 100 1 -1 1 0.05;
];

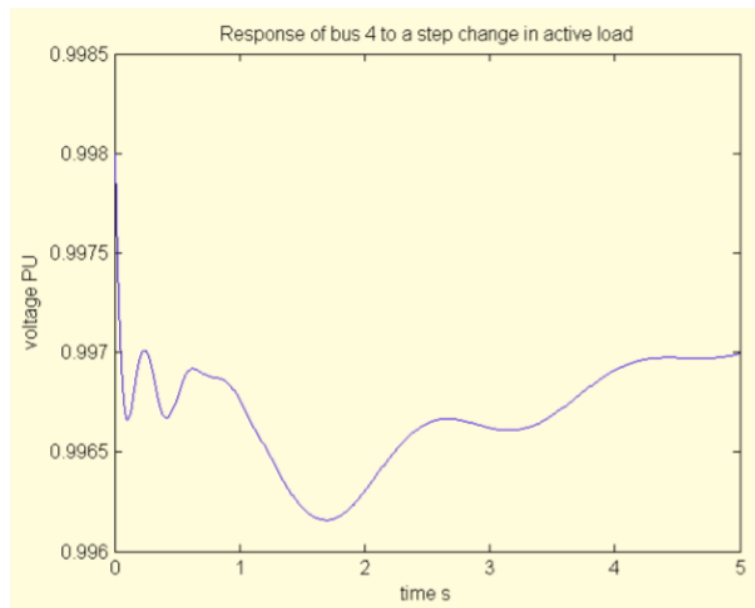
function f = ml_sig(t,k)
% Syntax: f = ml_sig(t,k)
%4:40 PM 15/08/97
% defines modulation signal for lmod control
global lmod_sig n_lmod
f=0; %dummy variable
% you modify the following to do what you want with the load
% lmod_con must be specified in the data file
% and the load bus must be in the nonconforming load list.
if n_lmod~=0
    if t<=0
        lmod_sig(:,k)= zeros(n_lmod,1);
    else
        %lmod_sig(:,k) = zeros(n_lmod,1);
        lmod_sig(1,k) = 0.5;
    end
end
return

```

Το παραπάνω προκαλεί αύξηση κατά 0,5 PU στο ενεργό φορτίο του bus 4 και εκτελώντας την s_simu δίνει:

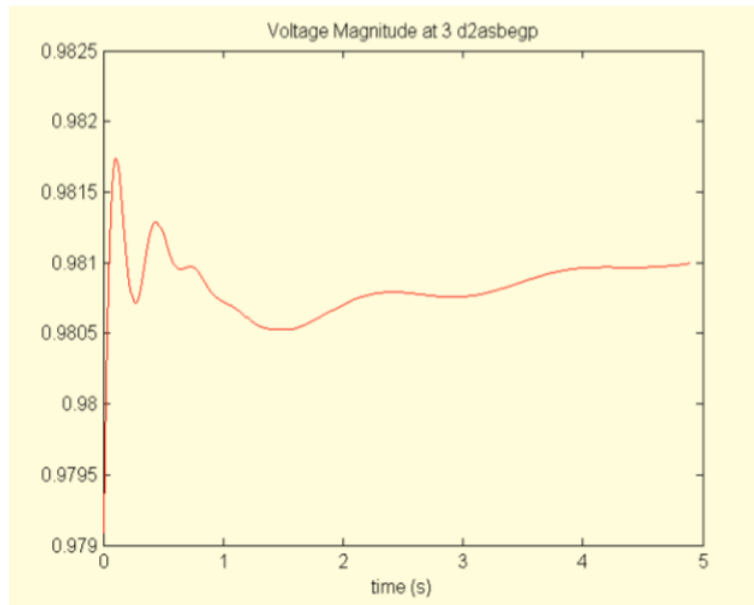


Γραφική παράσταση Α.6: Απόκριση τάσης του bus 3 με βηματική απόκριση 0.5pu στο ενεργό φορτίο του bus 4.

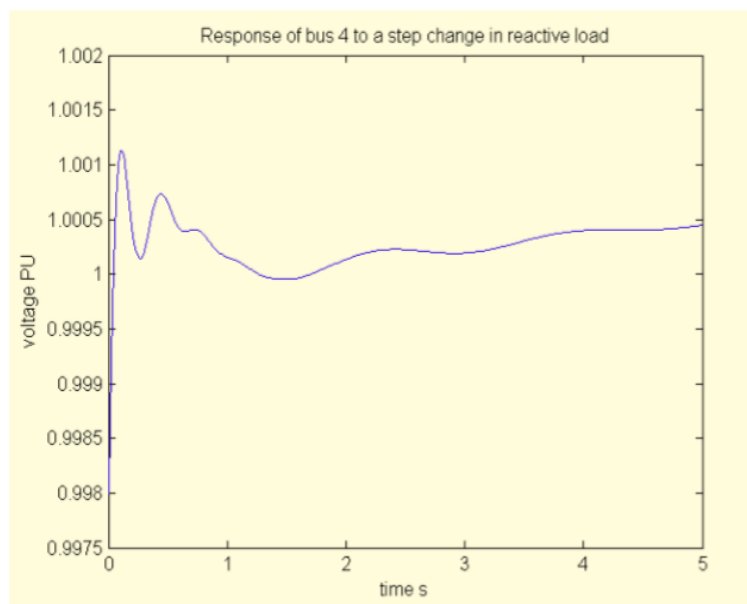


Γραφική παράσταση Α.7: Απόκριση στο bus 4 με βηματική απόκριση 0.5 στο ενεργό φορτίο

Η απόκριση της βηματικής απόκρισης στο αντιδραστικό φορτίο μπορεί να ληφθεί με την τροποποίηση `rlm_sig`. Η συνάρτηση `lm_sig` πρέπει να επιστραφεί με τη μορφή μηδενικής διαταραχής.



Γραφική παράσταση Α.8: Απόκριση τάσης στο bus 3 με βηματική απόκριση 0.1 στο αντιδραστικό φορτίο στο bus 4.



Γραφική παράσταση Α.9: Απόκριση τάσης στο bus 4 με βηματική απόκριση 0.1 στο αντιδραστικό φορτίο.

A.2.6 Small signal σταθεροποιητής

Η σταθερότητα του σημείου λειτουργίας ενός δυναμικού συστήματος σε μικρές διαταραχές ονομάζεται σταθερότητα μικρού σήματος. Για να ελέγξετε για σταθερότητα μικρών σημάτων οι δυναμικές εξισώσεις του συστήματος είναι ευθυγραμμισμένες σε σταθερή κατάσταση σε ένα σημείο λειτουργίας για έτσι ώστε να πάρουμε μια γραμμική σειρά των εξισώσεων:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

όπου A είναι η κατάσταση του πίνακα, B είναι ο πίνακας εισόδου, C είναι ο πίνακας εξόδου, D ο πίνακας τροφοδοσίας προς τα εμπρός, x είναι η διάνυσματική κατάσταση και u είναι η είσοδος.

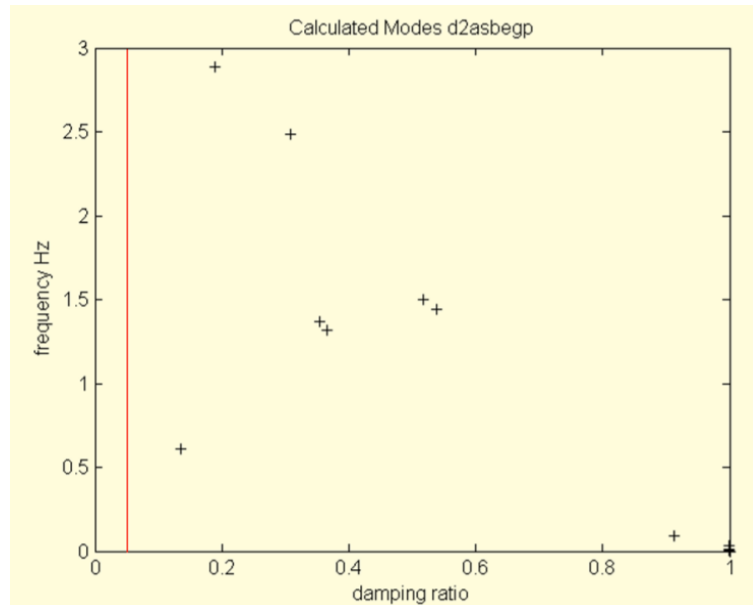
Σε ορισμένα προγράμματα σταθερότητας μικρό σήμα (π.χ. MatNetEig), οι πίνακες υπολογίζονται αναλυτικά με την χρήση Jacobian των μη γραμμικών εξισώσεων κατάστασης. Στο PST, από την άλλη πλευρά, η γραμμικοποίηση γίνεται με τον υπολογισμό του Jacobian αριθμητικά. Αυτό έχει το πλεονέκτημα της χρήσης πανομοιότυπων δυναμικών μοντέλων για παροδική χρήση και για σταθερότητα μικρών σημάτων. Ωστόσο, υπάρχει κάποια απώλεια της ακρίβειας, ιδιαίτερα στο μηδέν, το οποίο είναι χαρακτηριστικό των περισσότερων συστημάτων διασυνδεδεμένης ισχύς.

Στο PST, ξεκινώντας από τις καταστάσεις όπου καθορίζονται από το μοντέλο προετοιμασίας, μια μικρή διαταραχή εφαρμόζεται σε κάθε κατάσταση με τη σειρά της. Η αλλαγή των ρυθμών μεταβολής όλων των καταστάσεων διαιρείται με το μέγεθος της διαταραχής που δίνει μια στήλη της κατάστασης του πίνακα που αντιστοιχεί στην διαταραγμένη κατάσταση. Ένας `p_mat` πίνακας μετάθεσης χρησιμοποιείται για να τακτοποιήσει τις καταστάσεις σε μια λογική σειρά. Μετά από κάθε ρυθμό μεταβολής του υπολογισμένης κατάστασης, η ενόχλημένη κατάσταση επιστρέφει στην τιμή ισορροπίας της και οι ενδιάμεσες τιμές όπου έχουν μεταβληθεί επανέρχονται στις αρχικές τους τιμές. Κάθε βήμα στη διαδικασία αυτή είναι παρόμοιο με ένα μόνο βήμα σε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης. Ο πίνακας εισόδου B , ο πίνακας εξόδου C και ο πίνακας τροφοδοσίας προς τα εμπρός D μπορούν να προσδιορισθούν με παρόμοιο τρόπο.

Ένα ενιαίο πρόγραμμα οδήγησης, `svm_mgen`, για την σταθερότητα μικρών σημάτων παρέχεται. Είναι οργανωμένη παρόμοια με την παροδική προσομοίωση σταθερότητας `s_simu`. Τα νέα μοντέλα θα πρέπει να σχεδιαστούν για να λειτουργούν ικανοποιητικά σε κάθε οδηγό. Γενικά, εάν ένα μοντέλο είναι ικανοποιηθεί το `s_simu`, τότε θα ικανοποιεί το `svm_mgen`.

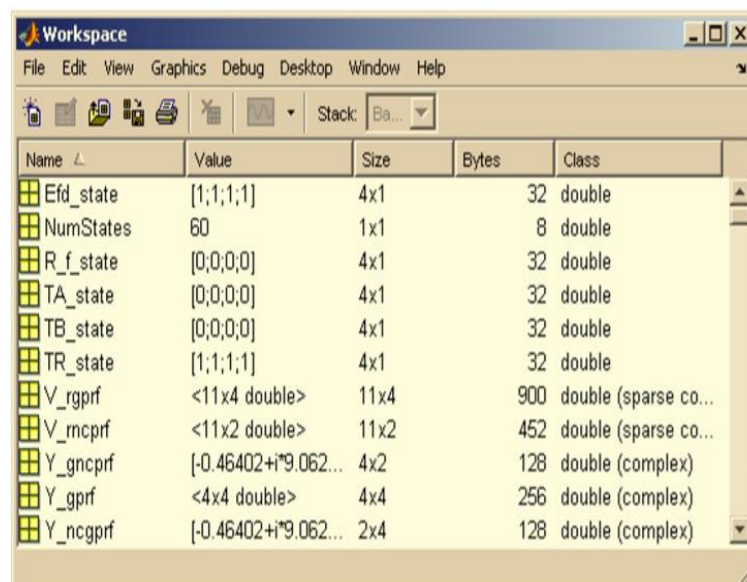
A.2.6.1 Παράδειγμα

Χρησιμοποιώντας το ίδιο αρχείο όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, με ενεργό και άεργο διαμόρφωση φορτίου που προσδιορίζονται στα bus 4 και 14, τρέχοντας την `svm_mgen` δίνει:



Γραφική παράσταση A.10: Υπολογισμένοι τρόποι `d2asbegp`

Το Workspace MATLAB μετά την εκτέλεση `svm_mgen` φαίνεται στο Σχήμα 16.



Γραφική παράσταση A.11: Workspace MATLAB μετά την εκτέλεση `svm_mgen`

Ο αριθμός των δυναμικών καταστάσεων σε αυτό το μοντέλο είναι 60 (NumStates)? 56 για τις γεννήτριες και τους ελέγχους τους και 4 για την ενεργό και άεργο διαφοροποίηση του φορτίου. Οι ιδιότητες απόσβεσης και οι συχνότητες των μοντέλων μπορούν να ληφθούν χρησιμοποιώντας:

```
[1 damp freq]
```

```
ans =
```

```
1.1981e-005          1          0
-0.074232          1          0
-0.10079           1          0
-0.10091           1          0
-0.10098           1          0
-0.19541           1          0
-0.19798           1          0
-0.19801           1          0
-0.49299           1          0
-1.2731 - 0.57246i  0.91203    0.09111
-1.2731 + 0.57246i  0.91203    0.09111
-1.9122 - 0.0034404i 1          0.00054756
-1.9122 + 0.0034404i 1          0.00054756
-1.9146           1          0
-3.1846           1          0
-3.2735           1          0
-3.6349 - 0.056365i 0.99988    0.0089708
-3.6349 + 0.056365i 0.99988    0.0089708
-0.52484 - 3.8483i  0.13513    0.61248
-0.52484 + 3.8483i  0.13513    0.61248
-3.2505 - 8.2795i  0.36545    1.3177
-3.2505 + 8.2795i  0.36545    1.3177
-3.248 - 8.5995i   0.35333    1.3687
-3.248 + 8.5995i   0.35333    1.3687
-10.065           1          0
-10.066           1          0
-10.098           1          0
-10.114           1          0
-5.7661 - 9.0385i  0.53783    1.4385
-5.7661 + 9.0385i  0.53783    1.4385
-5.7078 - 9.4463i  0.51716    1.5034
-5.7078 + 9.4463i  0.51716    1.5034
-5.0489 - 15.634i  0.30732    2.4882
-5.0489 + 15.634i  0.30732    2.4882
-3.4997 - 18.135i  0.18949    2.8862
-3.4997 + 18.135i  0.18949    2.8862
-20               1          0
-20               1          0
-20               1          0
-20               1          0
-30.705           1          0
-31.178           1          0
-36.048           1          0
-36.2             1          0
-41.102           1          0
-41.147           1          0
-41.625 - 0.070921i 1          0.011287
-41.625 + 0.070921i 1          0.011287
-94.588           1          0
-94.633           1          0
-96.049 - 0.22277i 1          0.035455
-96.049 + 0.22277i 1          0.035455
-100              1          0
-100              1          0
-100              1          0
-100              1          0
-105.29 - 0.21481i 1          0.034189
-105.29 + 0.21481i 1          0.034189
-106.14           1          0
-106.22           1          0
```

Οι αριθμοί των καταστάσεων των γεννητριών μπορούν να ληφθούν από την εντολή `mac_state`. Η πρώτη στήλη αναφέρει τον τρόπο, η δεύτερη τον τύπο της κατάστασης, και η τρίτη τον αριθμό της γεννήτριας. Οι αριθμοί στη στήλη 2 από το 1 μέχρι το 6 εκπροσωπούν την κατάσταση της γεννήτριας, οι αριθμοί 7 μέχρι 11 αντιπροσωπεύουν τη κατάσταση διεγέρτη, οι αριθμοί 12 έως 14 αποτελούν τον σταθεροποιητή των συστημάτων ισχύος, και 15 έως 17 αντιπροσωπεύουν την κατάσταση του κυβερνήτη.

```

mac_state =
      1      1      1
      2      2      1
      3      3      1
      4      4      1
      5      5      1
      6      6      1
      7      7      1
      8     10      1
      9     12      1
     10     13      1
     11     14      1
     12     21      1
     13     22      1
     14     23      1
     15      1      2
     16      2      2
     17      3      2
     18      4      2
     19      5      2
     20      6      2
     21      7      2
     22     10      2
     23     12      2
     24     13      2
     25     14      2
     26     21      2
     27     22      2
     28     23      2
     29      1      3
     30      2      3
     31      3      3
     32      4      3
     33      5      3
     34      6      3
     35      7      3
     36     10      3
     37     12      3
     38     13      3
     39     14      3
     40     21      3
     41     22      3
     42     23      3
     43      1      4
     44      2      4
     45      3      4
     46      4      4
     47      5      4
     48      6      4
     49      7      4
     50     10      4
     51     12      4
     52     13      4
     53     14      4
     54     21      4
     55     22      4
     56     23      4

```

Έτσι, για τη φάση 1, που είναι η αποτελεσματική μηδενική ιδιοτιμή, το ιδιοδιάνυσμα είναι

```
[(1:NumStates)' u(:,1)]  
ans =  
1 0.5  
2 1.5891e-008  
3 3.8309e-006  
4 3.5872e-006  
5 2.2235e-006  
6 2.9003e-006  
7 -4.0544e-008  
8 8.109e-006  
9 1.5889e-008  
10 -7.615e-011  
11 -7.6136e-011  
12 -3.9726e-007  
13 -3.9726e-007  
14 -2.9793e-007  
15 0.5  
16 1.5891e-008  
17 3.998e-006  
18 3.6474e-006  
19 2.454e-006  
20 3.2009e-006  
21 -6.3088e-008  
22 1.262e-005  
23 1.5889e-008  
24 -7.6145e-011  
25 -7.6152e-011  
26 -3.9726e-007  
27 -3.9726e-007  
28 -2.9793e-007  
29 0.5  
30 1.5891e-008  
31 3.4891e-006  
32 3.2739e-006  
33 2.0683e-006  
34 2.6978e-006  
35 -3.5293e-008  
36 7.0618e-006  
37 1.5889e-008  
38 -7.6145e-011  
39 -7.6143e-011  
40 -3.9726e-007  
41 -3.9726e-007  
42 -2.9793e-007  
43 0.5  
44 1.589e-008  
45 3.8583e-006  
46 3.5378e-006  
47 2.3714e-006  
48 3.0931e-006  
49 -5.6499e-008  
50 1.1299e-005  
51 1.5889e-008  
52 -7.6144e-011  
53 -7.6146e-011  
54 -3.9726e-007  
55 -3.9726e-007  
56 -2.9793e-007  
57 0  
58 0  
59 0  
60 0
```

Αυτό το ιδιοδιάνυσμα έχει μη μηδενική εισόδους στις σειρές που σχετίζονται με την κατάσταση της γωνίας του ρότορα. Η ιδιοτιμή θα ήταν ακριβώς μηδέν εάν η ροή του φορτίου λύθηκε σε πολύ χαμηλή ανοχή, και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δυναμική του συστήματος δεν αλλάζει, όταν όλες οι γωνίες της τάσης μεταβάλλονται κατά το ίδιο ποσό.

Ιδιοτιμές 19 και 20 αντιστοιχούν στη λειτουργία μεταξύ περιοχών.

[(1:NumStates)' u(:,19:20)]

```
ans =
1      -0.030566 + 0.10935i      -0.030566 - 0.10935i
2      0.0011588 + 0.00015978i    0.0011588 - 0.00015978i
3      0.01681 + 0.024459i        0.01681 - 0.024459i
4      0.014906 + 0.019039i        0.014906 - 0.019039i
5      0.00097158 + 0.0023634i    0.00097158 - 0.0023634i
6      0.0022508 + 0.0025479i    0.0022508 - 0.0025479i
7      0.0084215 + 0.00076658i    0.0084215 - 0.00076658i
8      0.71582 - 0.49534i         0.71582 + 0.49534i
9      -7.3862e-006 +2.9296e-005i -7.3862e-006 -2.9296e-005i
10     -0.04662 - 0.0070506i      -0.04662 + 0.0070506i
11     -0.047011 + 0.00029728i    -0.047011 - 0.00029728i
12     -0.024775 - 0.014278i      -0.024775 + 0.014278i
13     0.0021665 - 0.013706i      0.0021665 + 0.013706i
14     0.00052338 + 0.00012863i    0.00052338 - 0.00012863i
15     -0.0048905 + 0.083325i     -0.0048905 - 0.083325i
16     0.00085739 - 6.608e-005i    0.00085739 + 6.608e-005i
17     0.0015332 + 0.031379i      0.0015332 - 0.031379i
18     -0.0023372 + 0.023349i     -0.0023372 - 0.023349i
19     -0.0078935 + 0.0033738i    -0.0078935 - 0.0033738i
20     -0.0084537 + 0.0076796i    -0.0084537 - 0.0076796i
21     0.0029782 - 0.0024985i     0.0029782 + 0.0024985i
22     1
23     -7.3351e-007 +2.2199e-005i -7.3351e-007 -2.2199e-005i
24     -0.034592 + 0.0022116i     -0.034592 - 0.0022116i
25     -0.033726 + 0.0075513i     -0.033726 - 0.0075513i
26     -0.020027 - 0.0063903i     -0.020027 + 0.0063903i
27     -0.00058291 - 0.010184i    -0.00058291 + 0.010184i
28     0.00039607 +1.0712e-005i    0.00039607 -1.0712e-005i
29     -0.014101 - 0.14862i       -0.014101 + 0.14862i
30     -0.0014975 + 0.00035085i    -0.0014975 - 0.00035085i
31     -0.024464 + 0.010685i      -0.024464 - 0.010685i
32     -0.025875 + 0.015371i      -0.025875 - 0.015371i
33     -0.0077239 + 0.010998i     -0.0077239 - 0.010998i
34     -0.0049198 + 0.01719i      -0.0049198 - 0.01719i
35     -0.015525 + 0.0055899i     -0.015525 - 0.0055899i
36     0.40959 + 0.62916i         0.40959 - 0.62916i
37     -4.763e-006 -3.9439e-005i   -4.763e-006 +3.9439e-005i
38     0.060541 - 0.013352i        0.060541 + 0.013352i
39     0.057553 - 0.022554i        0.057553 + 0.022554i
40     0.037144 + 0.0058288i       0.037144 - 0.0058288i
41     0.0038104 + 0.017843i       0.0038104 - 0.017843i
42     -0.00070302 +8.9181e-005i   -0.00070302 -8.9181e-005i
43     -0.0098859 - 0.13092i      -0.0098859 + 0.13092i
44     -0.0013226 + 0.00028318i    -0.0013226 - 0.00028318i
45     -0.024433 + 0.015799i      -0.024433 - 0.015799i
46     -0.026588 + 0.018475i      -0.026588 - 0.018475i
47     -0.010643 + 0.011629i      -0.010643 - 0.011629i
48     -0.008314 + 0.019255i      -0.008314 - 0.019255i
49     -0.014864 + 0.0044114i     -0.014864 - 0.0044114i
50     0.56109 + 0.65147i         0.56109 - 0.65147i
51     -3.5213e-006 -3.4758e-005i -3.5213e-006 +3.4758e-005i
52     0.053458 - 0.010716i        0.053458 + 0.010716i
53     0.050987 - 0.018858i        0.050987 + 0.018858i
54     0.032561 + 0.0057532i       0.032561 - 0.0057532i
55     0.0030488 + 0.015754i       0.0030488 - 0.015754i
56     -0.00061966 + 6.653e-005i   -0.00061966 - 6.653e-005i
57     0
58     0
59     0
60     0
```

Η κατάσταση γωνίας του ρότορα μπορεί να ταυτοποιηθεί χρησιμοποιώντας:

```
Ang_idx=find(mac_state(:,2)==1)
```

```
Ang_idx=
```

```
1
```

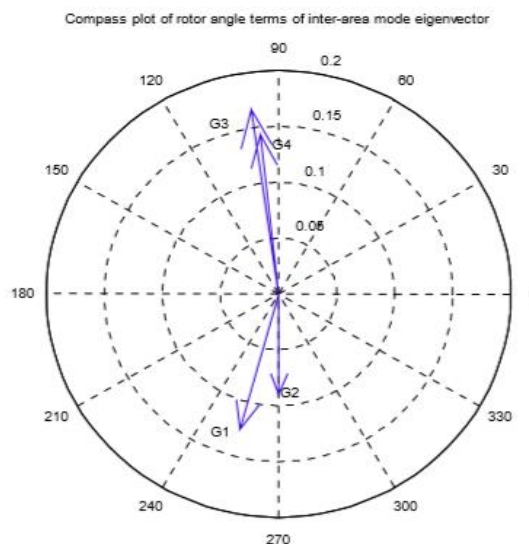
```
15
```

```
29
```

```
43
```

Μία γραφική παράσταση της πυξίδας των όρων των καταστάσεων της γωνίας του ρότορα από το ιδιοδιάνυσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 17. Πήραμε αυτά τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας την εντολή:

```
Compass (u(ang_idx,20))
```



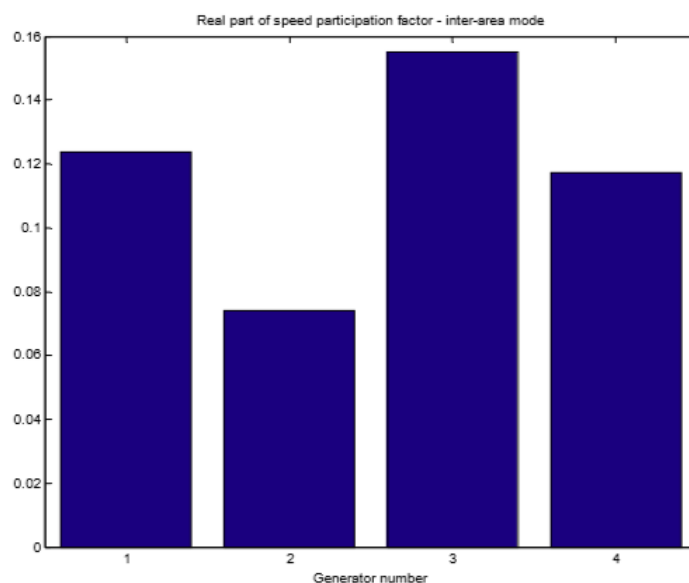
Γραφική παράσταση A.12: Πυξίδα των όρων των καταστάσεων της γωνίας του ρότορα από το ιδιοδιάνυσμα με την λειτουργία μεταξύ περιοχών.

Το ιδιοδιάνυσμα που σχετίζονται με τη λειτουργία δείχνουν τις σχετικές αλλαγές στις καταστάσεις που θα πρέπει να τηρούνται όταν η λειτουργία της ταλάντωση είναι σε ψηλά επίπεδα. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να επιβεβαιώσουμε ότι η λειτουργία 20 είναι μια κατάσταση μεταξύ περιοχών, δεδομένου ότι οι γεννήτριες 1 και 2 παράγουν ταλαντώσεις αντίθετες με τις γεννήτριες 3 και 4. Ωστόσο, οι μεγαλύτερες συνιστώσες του ιδιοδιανύσματος είναι εκείνες που συνδέονται με τη δεύτερη κατάσταση του διεγέρτη. Αυτό σημαίνει ότι η λειτουργία μεταξύ περιοχών μπορεί να παρατηρηθεί πιο εύκολα από

την παρακολούθηση των εν λόγω καταστάσεων. Αυτό δεν σημαίνει ότι οι καταστάσεις αυτές είναι απαραίτητα καλές για τον έλεγχο της λειτουργίας μεταξύ περιοχών.

Παράγοντες συμμετοχής οι οποίοι είναι χρήσιμο μέτρο για την ένδειξη της καλύτερης γεννήτριας για την σταθεροποιητή του συστήματος ισχύος. Δίνουν την ευαισθησία μίας ιδιοτιμής της μεταβολή που επηρεάζει τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα καταστάσεων. Οι παράγοντες της συμμετοχής της ταχύτητας δείχνουν την ευαισθησία ενός τρόπου για την προστιθέμενη απόσβεσης στον άξονα των γεννητριών. Ένα ιστόγραμμα του πραγματικού μέρους της συμμετοχής της ταχύτητας για την κατάσταση μεταξύ της ζώνης επιτυγχάνεται με τη χρήση

```
bar (real(p (ang_idx + 1,20)))
```



Γραφική παράσταση A.13: Πραγματικό μέρος των παραγόντων συμμετοχής της ταχύτητα στην γεννήτρια.

Εάν το πραγματικό μέρος της συμμετοχής της ταχύτητα είναι θετικό, μία ροπή απόσβεσης στον άξονα της αντίστοιχης γεννήτριας θα προσθέσει απόσβεση στη λειτουργία. Στην περίπτωση αυτή, μία ροπή απόσβεσης σε οποιαδήποτε από τις γεννήτριες θα προσθέσει απόσβεση στην λειτουργία μεταξύ περιοχών.

Ένα μοντέλο κατάστασης χώρου του συστήματος μπορεί να κατασκευαστεί, είτε χρησιμοποιώντας το αντικείμενο STSP διαθέσιμο από τον Graham Rogers, ή το Control Toolbox της MATLAB. Ο πίνακας καταστάσεων μετά την ολοκλήρωση της `svm_mgen` αποθηκεύεται ως `a_mat`, και οι πίνακες `b`, `c` και `d` είναι διαθέσιμοι για κανονικούς ελέγχους.

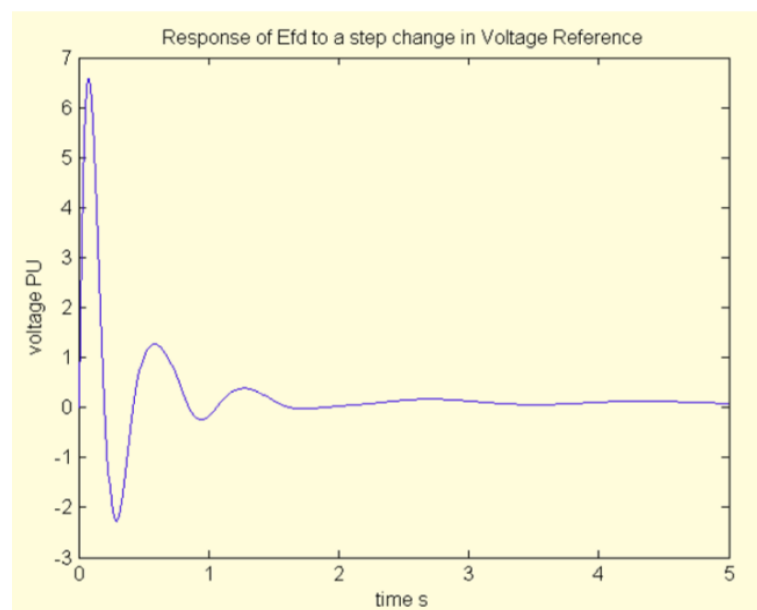
Έτσι, για να σχηματίσουν μοντέλα κατάστασης χώρου χρησιμοποιώντας το αντικείμενο STSP για vref εισόδου στην γεννήτρια 1 και έξοδος Efd από τη γεννήτρια 1:

```
svrefd1 = stsp (a_mat, b_vr (:, 1), c_Efd (1,:), 0);
```

και η απόκριση μεγέθους βήματος εισόδου 0.05 λαμβάνεται χρησιμοποιώντας

```
[R, t] = stepres (svrefd1,0.05,5,0.01);
```

Η απόκριση φαίνεται στο Σχήμα 19. Μπορεί να φανεί ότι είναι όμοια με την μη γραμμική απόκριση που λαμβάνεται χρησιμοποιώντας s_simu όπου φαίνεται στο Σχήμα 10. Δεδομένου ότι το μοντέλο είναι γραμμικό, δεν υπάρχει κανένας περιορισμός της απόκρισης.



Γραφική παράσταση Α.14: Απόκριση γραμμικού μοντέλου Efd σε αλλαγή βήματος 0.05 στην τάση αναφοράς του διεγέρτη.

A.2.7 Σχεδιασμός ελέγχου απόσβεσης

For the two-area system with no PSS, the data file is

```
% Two Area Test Case
% sub transient generators with static exciters, turbine/governors
% 50% constant current active loads
% load modulation

disp('Two-area test case with subtransient generator models')
disp('Static exciters')
disp('turbine/governors')
% bus data format
% bus:
% col1 number
% col2 voltage magnitude (pu)
% col3 voltage angle (degree)
% col4 p_gen (pu)
% col5 q_gen (pu) ,
% col6 p_load (pu)
% col7 q_load (pu)
% col8 G shunt (pu)
% col9 B shunt (pu)
% col10 bus_type
%      bus_type - 1, swing bus
%                - 2, generator bus (PV bus)
%                - 3, load bus (PQ bus)
% col11 q_gen_max (pu)
% col12 q_gen_min (pu)
% col13 vRated (kV)
% col14 v_max pu
```

```

% coll15 v_min pu

bus = [...
 1 1.03 18.5 7.00 1.61 0.00 0.00 0.00 0.00 1 5.0 -1.0 22.0 1.1 .9;
 2 1.01 8.80 7.00 1.76 0.00 0.00 0.00 0.00 2 5.0 -1.0 22.0 1.1 .9;
 3 0.9781 -6.1 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 3.00 3 0.0 0.0 230.0 1.5 .5;
 4 0.95 -10 0.00 0.00 9.76 1.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 115.0 1.05 .95;
10 1.0103 12.1 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 230.0 1.5 .5;
11 1.03 -6.8 7.16 1.49 0.00 0.00 0.00 0.00 2 5.0 -1.0 22.0 1.1 .9;
12 1.01 -16.9 7.00 1.39 0.00 0.00 0.00 0.00 2 5.0 -1.0 22.0 1.1 .9;
13 0.9899 -31.8 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 5.00 3 0.0 0.0 230.0 1.5 .5;
14 0.95 -35 0.00 0.00 17.65 1.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 115.0 1.05 .95;
20 0.9876 2.1 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 230.0 1.5 .5;
101 1.00 -19.3 0.00 1.09 0.00 0.00 0.00 0.00 2 2.0 0.0 500.0 1.5 .5;
110 1.0125 -13.4 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 230.0 1.5 .5;
120 0.9938 -23.6 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 230.0 1.5 .5];

% line data format
% line: from bus, to bus, resistance(pu), reactance(pu),
% line charging(pu), tap ratio, tap phase, tapmax, tapmin, tapsize

line = [...
1 10 0.0 0.0167 0.00 1.0 0.0 0.0 0.0;
2 20 0.0 0.0167 0.00 1.0 0.0 0.0 0.0;
3 4 0.0 0.005 0.00 1.0 0.1.2 0.8 0.02;
3 20 0.001 0.0100 0.0175 1.0 0.0 0.0 0.0;
3 101 0.011 0.110 0.1925 1.0 0.0 0.0 0.0;
3 101 0.011 0.110 0.1925 1.0 0.0 0.0 0.0;
10 20 0.0025 0.025 0.0437 1.0 0.0 0.0 0.0;
11 110 0.0 0.0167 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0;
12 120 0.0 0.0167 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0;
13 101 0.011 0.11 0.1925 1.0 0.0 0.0 0.0;
13 101 0.011 0.11 0.1925 1.0 0.0 0.0 0.0;
13 14 0.0 0.005 0.00 1.0 0.1.2 0.8 0.02;
13 120 0.001 0.01 0.0175 1.0 0.0 0.0 0.0;
110 120 0.0025 0.025 0.0437 1.0 0.0 0.0 0.0];

% Machine data format
% Machine data format
% 1. machine number,
% 2. bus number,
% 3. base mva,
% 4. leakage reactance x_l(pu),
% 5. resistance r_a(pu),
% 6. d-axis synchronous reactance x_d(pu),
% 7. d-axis transient reactance x'_d(pu),
% 8. d-axis subtransient reactance x''_d(pu),
% 9. d-axis open-circuit time constant T'_do(sec),
% 10. d-axis open-circuit subtransient time constant
% T''_do(sec),
% 11. q-axis synchronous reactance x_q(pu),
% 12. q-axis transient reactance x'_q(pu),
% 13. q-axis subtransient reactance x''_q(pu),
% 14. q-axis open-circuit time constant T'_qo(sec),
% 15. q-axis open circuit subtransient time constant
% T''_qo(sec),
% 16. inertia constant H(sec),
% 17. damping coefficient d_o(pu),
% 18. damping coefficient d_1(pu),
% 19. bus number
%
% note: all the following machines use sub-transient model
mac_con = [ ...

1 1 900 0.200 0.00 1.8 0.30 0.25 8.00 0.03...
1.7 0.55 0.24 0.4 0.05...
6.5 0 0 3 0.0654 0.5743;
2 2 900 0.200 0.00 1.8 0.30 0.25 8.00 0.03...
1.7 0.55 0.25 0.4 0.05...
6.5 0 0 3 0.0654 0.5743;
3 11 900 0.200 0.00 1.8 0.30 0.25 8.00 0.03...

```

```

1.7 0.55 0.24 0.4 0.05...
6.5 0 0 3 0.0654 0.5743;
4 12 900 0.200 0.00 1.8 0.30 0.25 8.00 0.03...
1.7 0.55 0.25 0.4 0.05...
6.5 0 0 3 0.0654 0.5743];

exc_con = [...
0 1 0.01 200.0 0.05 0 0 0 5.0 -5.0...
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 2 0.01 200.0 0.05 0 0 0 5.0 -5.0...
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 3 0.01 200.0 0.05 0 0 0 5.0 -5.0...
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 4 0.01 200.0 0.05 0 0 0 5.0 -5.0...
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

pss_con = [];

% governor model
% tg_con matrix format
%column data unit
% 1 turbine model number (=1)
% 2 machine number
% 3 speed set point wf pu
% 4 steady state gain 1/R pu
% 5 maximum power order Tmax pu on generator base
% 6 servo time constant Ts sec
% 7 governor time constant Tc sec
% 8 transient gain time constant T3 sec
% 9 HP section time constant T4 sec
% 10 reheater time constant T5 se
tg_con = [...
1 1 1 25.0 1.0 0.1 0.5 0.0 1.25 5.0;
1 2 1 25.0 1.0 0.1 0.5 0.0 1.25 5.0;
1 3 1 25.0 1.0 0.1 0.5 0.0 1.25 5.0;
1 4 1 25.0 1.0 0.1 0.5 0.0 1.25 5.0;
];
load_con = [4 0 0 .5 0;
14 0 0 .5 0];
disp('50% constant current load')
%disp('load modulation')
%active and reactive load modulation enabled
lmod_con = [...
%1 4 100 1 -1 1 0.05;
%2 14 100 1 -1 1 0.05
];

rlmod_con = [...
%1 4 100 1 -1 1 0.05;
%2 14 100 1 -1 1 0.05
];

%Switching file defines the simulation control
% row 1 col1 simulation start time (s) (cols 2 to 6 zeros)
% col7 initial time step (s)
% row 2 col1 fault application time (s)
% col2 bus number at which fault is applied
% col3 bus number defining far end of faulted line
% col4 zero sequence impedance in pu on system base
% col5 negative sequence impedance in pu on system base
% col6 type of fault - 0 three phase
% - 1 line to ground
% - 2 line-to-line to ground
% - 3 line-to-line
% - 4 loss of line with no fault
% - 5 loss of load at bus
% - 6 no action
% col7 time step for fault period (s)
% row 3 col1 near end fault clearing time (s) (cols 2 to 6 zeros)
% col7 time step for second part of fault (s)
% row 4 col1 far end fault clearing time (s) (cols 2 to 6 zeros)
% col7 time step for fault cleared simulation (s)
% row 5 col1 time to change step length (s)

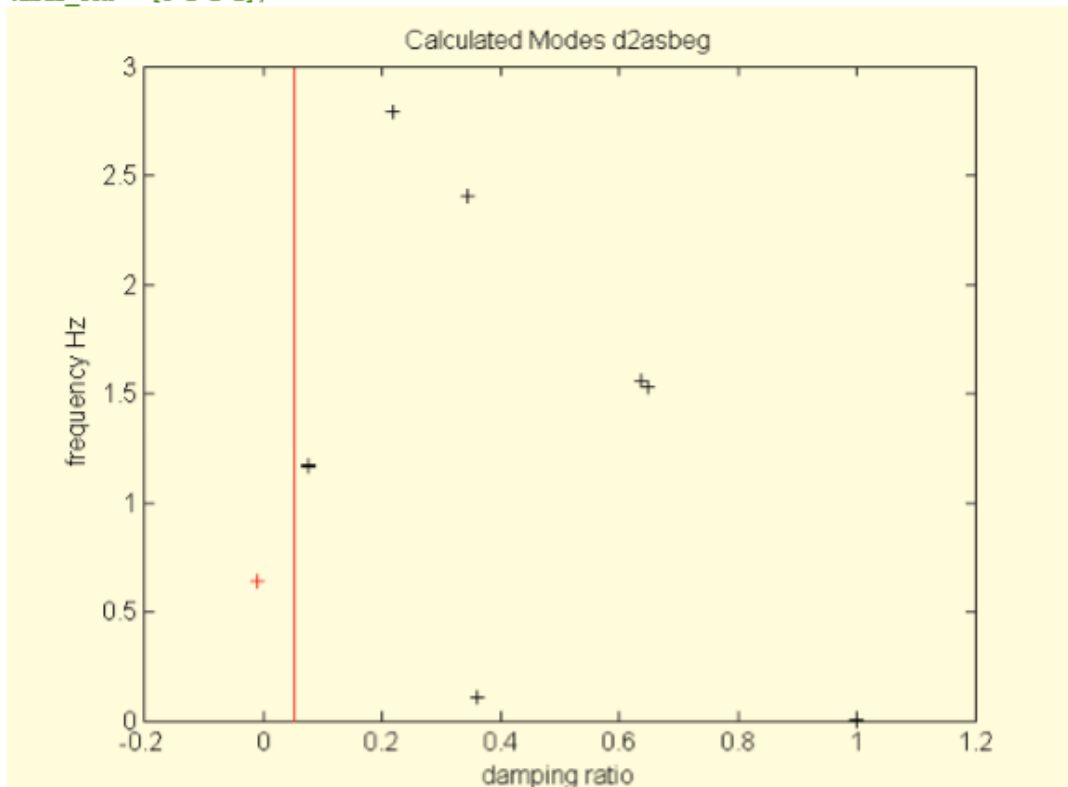
```

```

%      col7  time step (s)
%
%
% row n col1 finishing time (s)  (n indicates that intermediate rows may be inserted)
sw_con = [...
0 0 0 0 0 0 0.01;%sets initial time step
0.1 3 101 0 0 0 0.01;%3 ph to ground fault
0.15 0 0 0 0 0 0.01;%clear near end
0.20 0 0 0 0 0 0.01;%clear remote end
%0.50 0 0 0 0 0 0.01;% increase time step
%1.0 0 0 0 0 0 0.01;% increase time step
10.0 0 0 0 0 0 0]; % end simulation

%ibus_con = [0 1 1 1];

```



Γραφική παράσταση A.15: Λειτουργίες συστημάτων δύο-περιοχών με διεγέρτες και οι διοικητές όλων των μονάδων.

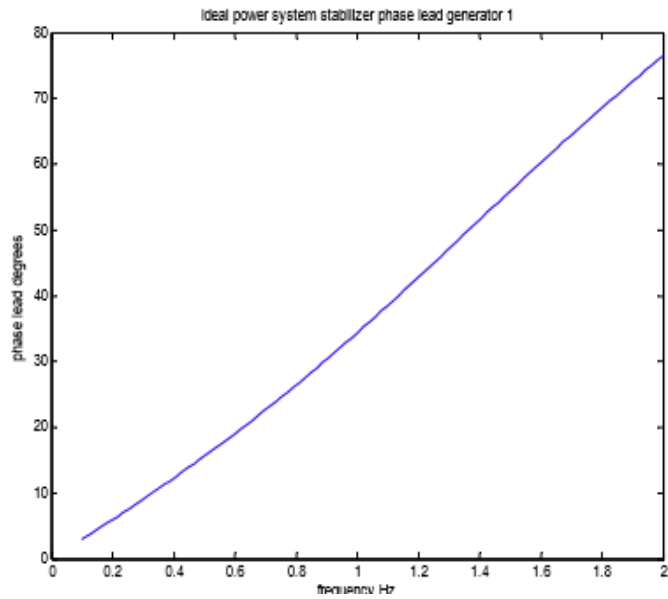
Για να σχεδιαστεί ένας σταθεροποιητής του συστήματος ισχύος, απαιτείται ένα μοντέλο συστήματος με τις καταστάσεις του ρότορα της γεννήτριας να έχουν αφαιρεθεί. Η είσοδος στο σύστημα είναι η αναφορά τάσεως της γεννήτριας στην οποία ο σταθεροποιητής του συστήματος ισχύος έχει τοποθετηθεί. Η έξοδος είναι η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας.

```
a=a_mat; b = b_vr(:,1); c=c_p(1,:); d=0;
ang_idx = find(mac_state(:,2)==1)
ang_idx =
1
12
23
34
spd_idx = ang_idx+1;
rot_idx = sort([ang_idx;spd_idx])
rot_idx =
1
2
12
13
23
24
34
35
a(rot_idx,:)=[];a(:,rot_idx)=[];
b(rot_idx)=[];
c(rot_idx)=[];
spssd = stsp(a,b,c,d);
```

Ο ιδανικός σταθεροποιητής συστημάτων ισχύος της φάσης δίνεται από την αρνητική απόκριση του spssd. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση:

```
f = linspace(.1, 2,100);
[f,ympd,yapd]=fr_stsp(spssd,f);
plot(f,-yapd)
```

.



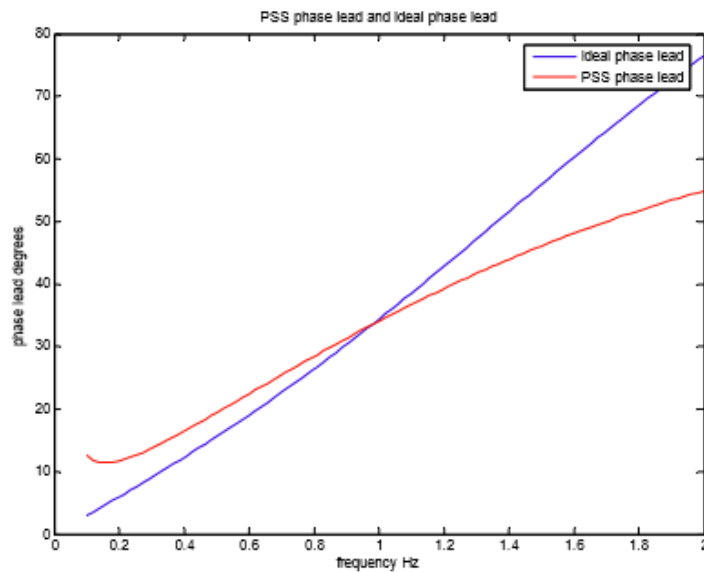
Γραφική παράσταση A.16: Ιδανικός σταθεροποιητής συστημάτων ισχύος της φάσης.

Ο σταθεροποιητής του σύστημα ισχύος έχει τη μορφή:

$$spss = \frac{sT_{wo}}{1 + sT_{wo}} \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^2$$

Ένα μοντέλο κατάστασης χώρου μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση:

`spss1 = wo_stsp(10).*ldlg_stsp(1,.02,.07).*ldlg_stsp(1,.02,.07);`

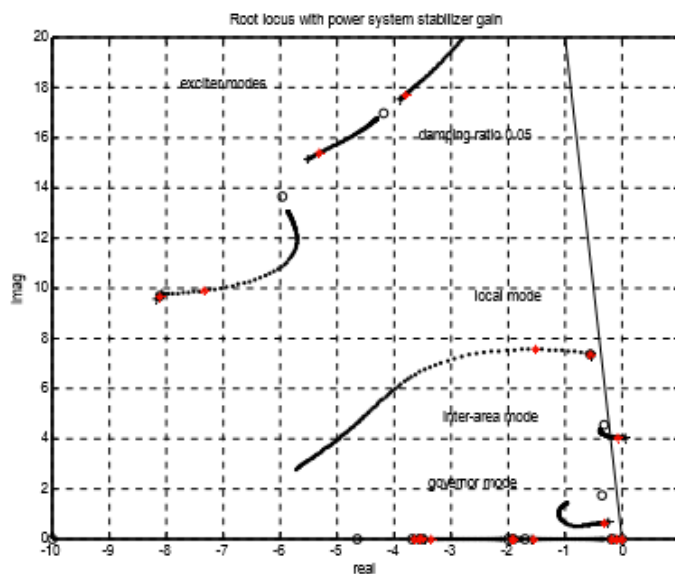


Γραφική παράσταση A.17: Ιδανικό και PSS φάση

Το Σχήμα 22 δείχνει ότι το σύστημα ισχύος σταθεροποιητή φάσης και το ιδανικό φάσης είναι αρκετά κοντά.

Ένα root locus με απολαβή του PSS λαμβάνεται χρησιμοποιώντας:

```
figure
plot(l,'k+')
hold
Current plot held
plot(lz,'ko')
plot(rlpss,'k.')
axis([-10 1 0 20])
grid
plot(l,'k+')
plot(rlpss,'k.')
dr_plot(0,20,0.05,'k');
grid
plot(rlpss(:,10),'r*')
```



Γραφική παράσταση Α.18: Root locus με απολαβή PSS

Σημείωση: Κάθε γραμμική σχεδίαση σταθεροποιητή, θα πρέπει να ελέγχονται για την αξιοπιστία τους χρησιμοποιώντας μια παροδική προσομοίωση σταθερότητας κάτω από ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Είναι φυσιολογικό να ρυθμίσετε τα όρια εξόδου PSS, έτσι ώστε ο σταθεροποιητής να μην έχει αρνητικές επιπτώσεις στην αντίδραση μίας γεννήτριας σε ένα ελάττωμα. Γενικά, όσο χαμηλότερο είναι το αρνητικό όριο εξόδου, τόσο πιο μεγάλη η επίδραση του PSS στο τελική τάση μετά από μία βλάβη.

