

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



Πτυχιακή εργασία

Μελέτη και ανάλυση των μεθοδολογιών κατανεμημένου «βέλτιστου
ελέγχου/ρύθμισης της συχνότητας» σε δίκτυα συστημάτων
ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ)

ΑΝΘΙΜΟΣ ΣΙΑΚΙΔΗΣ

ΛΕΜΕΣΟΣ ΜΑΙΟΣ 2016

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή εργασία

**Μελέτη και ανάλυση των μεθοδολογιών κατανεμημένου «βέλτιστου
ελέγχου/ρύθμισης της συχνότητας» σε δίκτυα συστημάτων
ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ)**

ΑΝΘΙΜΟΣ ΣΙΑΚΙΔΗΣ

Σύμβουλος καθηγητής
[Επ. Καθ. Ι. Λέστας]

Λεμεσός ΜΑΪΟΣ 2016

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Άνθιμος Σιακίδης, [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 τον κ. Χρυσοβαλάντη Σπανιά και τον κ. Ιωάννη Λέστα για την καθοδήγηση και τις χρήσιμες συμβουλές του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Δήμο Κωνσταντίνου, Λάμπρο Λαζάρου, Κυριάκο Χαραλάμπους, Αντρέα Κτωρή, Σάββα Σάββα, Στυλιανό Μηνά, Τεύκρο Καϊλά, Αντρέα Τράντα, Λίλη Σολοβίεβα και την οικογένειά μου για την στήριξη τους.

Περίληψη

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια από τις πιο κοινές μορφές ενέργειας που χρησιμοποιείται. Είναι καθαρή, βολική, σχετικά εύκολη στην μεταφορά από τα κέντρα παραγωγής στα καταναλωτικά κέντρα, καθώς και ευέλικτη στη χρήση της. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταδίδεται από τα κέντρα παραγωγής στα καταναλωτικά κέντρα μέσω των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, όπως η ελευθεροποίηση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, η εισαγωγή νέων τεχνολογιών παραγωγής, και η αύξηση της εισχώρησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σήμερα, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (power systems) συνεχίζουν να επεκτείνονται και η επέκταση αυτή σε συνδυασμό με τη στοχαστική φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οδηγεί αναπόφευκτα στην ανάγκη για ταχύτερους, πιο αποτελεσματικούς και πιο αξιόπιστους μηχανισμούς ελέγχου συχνότητας.

Ο αξιόπιστος και αποτελεσματικός έλεγχος των συχνοτήτων των ζυγών είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία του κάθε δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Κλασικά, ο έλεγχος της συχνότητας υλοποιείται από την πλευρά της παραγωγής, μέσω της πρωτοβάθμιων και δευτεροβάθμιων συστημάτων ελέγχου.

Επιπλέον, η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών έπαιξε σημαντικό ρόλο στην επέκταση και την ανάπτυξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι επιστήμονες και οι μηχανικοί που ασχολούνται με την ενέργεια έχουν αναπτύξει ισχυρά εργαλεία, προσομοιωτές για να κάνουν την ανάλυση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας απλούστερη και πιο ακριβή.

Σε αυτή την διπλωματική εργασία, θα συζητήσουμε διάφορες προσεγγίσεις για καταναεμημένο έλεγχο συχνότητας, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στην οικονομική βελτιστοποίηση των μοντέλων (economic dispatch).

Λέξεις κλειδιά:

Κυβερνήτης, Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Πρωτεύον Έλεγχος Συχνότητας, Δευτερεύον Έλεγχος Συχνότητας, Τριτογενής Έλεγχος Συχνότητας, Ροή Ισχύος, Πρόβλημα Βελτιστοποίησης, Ευστάθεια, Σταθερότητας Τάσης, Σταθερότητα Συχνότητας, Οικονομική Κατανομή, Κεντροποιημένοι Μηχανισμοί, Αποκεντρωμένοι Μηχανισμοί, Απόκλιση Συχνότητας, Σημείο Ισορροπίας, Αδράνεια Γεννήτριας, Αυστηρά Κυρτή, Ταλαντώσεις Συχνότητας.

Abstract

Electricity is one of the most common forms of energy used. It's clean, convenient, relatively easy to transport from production centers to consumption centers, and flexible to use. Electricity is transmitted from production centers to consumption centers through the power transmission systems.

In recent years, power systems have undergone significant changes, such as the liberalization of electricity markets, the introduction of new production technologies, and the increased penetration of renewable energy sources. Today, power systems continue to expand and this extension in conjunction with the stochastic nature of renewables energies inevitably leads to the need for faster, more efficient and more reliable frequency control mechanisms.

The reliable and efficient control of the frequencies of the buses is vital for the operation of any power grid. Classically, the frequency control is implemented on the production side, through the primary and secondary control systems.

Moreover, the use of computers played an important role in the expansion and development of power systems. Scientists and engineers engaged in power have developed powerful tools, simulators to do the analysis of power systems simpler and more accurate.

In this dissertation, we will discuss various approaches to distributed control frequency, paying particular attention to the economic optimization model (economic dispatch).

Keywords:

Governor, Power System, Primary Frequency Control, Secondary Frequency Control, Tertiary Control, Power Flow, Optimization Problem, Stability, Voltage Stability, Frequency Stability, Economic Dispatch, Centralized Mechanisms, Decentralized Mechanisms, Frequency Deviation, Equilibrium Point, Generator Inertia, Strictly Convex, Frequency Oscillations.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	xi
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	xvi
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ	xvii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2 ΚΙΝΗΤΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	7
3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	11
3.1 Σύντομη επισκόπηση της βιβλιογραφίας του Ελέγχου Συχνότητας.....	11
3.2 Ενσωμάτωση Πρωτεύοντος-Δευτερεύοντος Αλγόριθμου για Βέλτιστο Έλεγχο φορτίου σε άπλες δυναμικές εξισώσεις ενός ΣΗΕ	17
3.3 Συνδυασμός Ελέγχου Αυτόματης Παραγωγής και Οικονομική Κατανομής από οπτική βελτιστοποίησης.....	22
3.4 Σχεδιασμός και Ευστάθεια του Πρωτεύον Ελέγχου Συχνότητας στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Μεριά των Φορτίων	27
3.5 Βέλτιστος Αποκεντρωμένος Πρωτεύον Έλεγχος Συχνότητας στα Δίκτυα Ηλεκτρικής ενέργειας	30
3.6 Κατανεμημένη Συχνότητα για την Διατήρηση του Βέλτιστου Ελέγχου Φορτίου	33
3.7 Εσωστρεφείς Μέθοδος Προσέγγισης Ρύθμισης της Συχνότητας σε Δίκτυα Παροχής Ηλεκτρικής Ενέργειας	36
3.8 Επίτευξη Οικονομικής Κατανομής Ισχύος σε δίκτυα σε πραγματικό χρόνο μέσω μιας προσέγγισης σχεδιασμού σημείου ηρεμίας	41
4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΚΑΙ ΤΡΙΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ	45
4.1 Μοντέλο Δευτέρου Βαθμού.....	45

4.2 Μοντέλο Τρίτου Βαθμού	48
5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	52
5.1 Μηχανισμοί Ελέγχου Συχνότητας που Χρησιμοποιήθηκαν για τις Προσομοιώσεις ...	52
5.2 Παρουσίαση Προσομοιώσεων.....	53
5.3 Σύγκριση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	78
6 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	79
6.1 Περιγραφή Προβλήματος Βελτιστοποίησης	79
6.2 Προσομοιώσεις.....	82
7 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	96
1. Συνηθείς Διαφορικές Εξισώσεις.....	96

Κατάλογος πινάκων

3.1	Περιγραφή των κύριων μεταβλητών και των παραμέτρων που εμφανίζονται στο μοντέλο του συστήματος.....	38
4.1	Τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο δευτέρου βαθμού.....	47
4.2	Τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο τρίτου βαθμού.....	49

Κατάλογος διαγραμμάτων

1.1	Ένα μικρό, απλοποιημένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....	2
1.2	Βασική Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	3
3.1	Απλοποιημένη εκδοχή του συστήματος 16-γεννητριών για προσομοιώσεις...	19
3.2	Συχνότητες στους ζυγούς 4, 8, 12 με φορτία που χρησιμοποιούν το OLC.....	21
3.3	Συχνότητες στον ζυγό 12, με μόνο AGC, μόνο με OLC ή και με τα δύο.....	21
3.4	Σύστημα τεσσάρων διασυνδεδεμένων περιοχών.....	25
3.5	AGC βασισμένο στο ACE.....	25
3.6	Οικονομικό AGC.....	26
3.7	Κόστος Παραγωγής.....	26
3.8	Μονοφασικό διάγραμμα του δοκιμαστικού συστήματος 68-ζυγών.....	29
3.9	Το (a) για τη συχνότητα και το (b) για την τάση του ζυγού 66 για τις περιπτώσεις: (i) χωρίς PSS, χωρίς OLC? (ii) με PSS, χωρίς OLC? (iii) χωρίς PSS, με OLC? (iv) με PSS, με OLC.....	29
3.10	IEEE Δοκιμαστικό σύστημα Νέας Αγγλίας.....	32
3.11	Συχνότητες και των 10 γεννητριών κάτω από (1) ελεγχόμενες γεννήτριες μόνο (κόκκινη) και κάτω από (2) ελεγχόμενες γεννήτριες και φορτία (μαύρη). Το συνολικό μέγεθος ελέγχου είναι το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις.....	33
3.12	Δοκιμαστικό σύστημα IEEE 39 ζυγών.....	35
3.13	Εξέλιξη συχνότητας χρησιμοποιώντας ελεγκτές OLC.....	36
3.14	Εξέλιξη συχνότητας χρησιμοποιώντας ελεγκτές FP-OLC.....	36
3.15	Ένα ισοδύναμο δίκτυο τεσσάρων περιοχών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.....	39
3.16	Απόκριση συχνότητας και εισόδου ελέγχου χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο ελεγκτή με σταθερή ζήτηση ισχύος.....	40
3.17	Απόκριση συχνότητας και εισόδου ελέγχου χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο ελεγκτή με το μεταβλητό χρόνο ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.....	40
3.18	Δίκτυο IEEE 14-ζυγών με 5 ζυγούς γεννήτριας, 9 ζυγούς φορτίων και 20 γραμμές μεταφοράς	43
3.19	Ζυγός απόκλισης συχνότητας. Αριστερά: μη ελεγχόμενη περίπτωση. Δεξιά: ελεγχόμενη υπόθεση.....	44
4.1	Ισοδύναμο δίκτυο τεσσάρων περιοχών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας για το μοντέλο δευτέρου βαθμού.....	47

4.2	Ισοδύναμο δίκτυο τεσσάρων περιοχών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας για το μοντέλο τρίτου βαθμού.....	48
4.3	Σύγκριση συχνότητας μεταξύ μοντέλου 2 ^{ου} και 3 ^{ου} βαθμού.....	50
4.4	Σύγκριση τάσης μεταξύ μοντέλου 2 ^{ου} και 3 ^{ου} βαθμού.....	51
5.1	Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και χωρίς κανένα μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 1 pu.....	53
5.2	Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και χωρίς κανένα μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 2 pu.....	54
5.3	Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu.....	55
5.4	Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu.....	55
5.5	Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu.....	56
5.6	Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu.....	57
5.7	Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή 2 pu.....	58
5.8	Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και χωρίς κανένα μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 2 pu.....	58
5.9	Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu.....	59
5.10	Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu.....	59
5.11	Ελεγχόμενη παραγωγή μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu.....	60
5.12	Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu.....	60
5.13	Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu.....	61
5.14	Ελεγχόμενη παραγωγή μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu.....	61
5.15	Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu.....	62
5.16	Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu.....	62

5.17	Ελεγχόμενη παραγωγή μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu.....	63
5.18	Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και χωρίς κανένα μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 1 pu.....	64
5.19	Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και χωρίς κανένα μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 1 pu.....	64
5.20	Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu.....	65
5.21	Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu.....	66
5.22	Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu.....	66
5.23	Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu.....	67
5.24	Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu.....	68
5.25	Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu.....	68
5.26	Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή 2 pu.....	69
5.27	Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή 2 pu.....	70
5.28	Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή 2 pu.....	70
5.29	Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και χωρίς κάποιο μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 2 pu.....	71
5.30	Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και χωρίς κάποιο μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 2 pu.....	71
5.31	Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu.....	72
5.32	Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu.....	72
5.33	Ελεγχόμενη παραγωγή μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu.....	73
5.34	Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu.....	73

5.35	Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 1 pu.....	74
5.36	Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 1 pu.....	74
5.37	Ελεγχόμενη παραγωγή μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 1 pu.....	75
5.38	Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 1 pu.....	75
5.39	Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu.....	76
5.40	Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu.....	76
5.41	Ελεγχόμενη παραγωγή μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu.....	77
5.42	Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu.....	77
6.1	Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A στο μοντέλο δευτέρου βαθμού χωρίς turbine governor.....	83
6.2	Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A στο μοντέλο δευτέρου βαθμού με turbine governor.....	84
6.3	Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B στο μοντέλο δευτέρου βαθμού χωρίς turbine governor.....	84
6.4	Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B στο μοντέλο δευτέρου βαθμού με turbine governor.....	85
6.5	Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C στο μοντέλο δευτέρου βαθμού χωρίς turbine governor.....	85
6.6	Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B στο μοντέλο δευτέρου βαθμού με turbine governor.....	86
6.7	Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A στο μοντέλο τρίτου βαθμού χωρίς turbine governor.....	86

6.8	Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A στο μοντέλο τρίτου βαθμού με turbine governor.....	87
6.9	Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B στο μοντέλο τρίτου βαθμού χωρίς turbine governor.....	87
6.10	Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B στο μοντέλο τρίτου βαθμού με turbine governor.....	88
6.11	Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C στο μοντέλο τρίτου βαθμού χωρίς turbine governor.....	88
6.12	Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C στο μοντέλο τρίτου βαθμού με turbine governor.....	89

Συντομογραφίες

- 1) HVDC - Συνεχές Ρεύμα Υψηλής Τάσης (High Voltage DC)
- 2) ED - Οικονομική Κατανομή (Economic Dispatch)
- 3) OPF - Βέλτιστης Ροής Ισχύος (Optimal Power Flow)
- 4) ΣΗΕ – Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
- 5) AGC - Αυτόματος Έλεγχος Παραγωγής (Automatic Generation Control)
- 6) PST (Power System Toolbox)
- 7) LR - Lagrangian Relaxation principles
- 8) PI – Proportional – Integral
- 9) FLFC - Fuzzy Logic Load Frequency Controller
- 10) GRC - Generation Rate Constraint
- 11) PEV - Plug-in Electric Vehicles
- 12) OLC – Optimal Load Control
- 13) DOLC – Dual Optimal Load Control
- 14) ACE – Automatic Control Error
- 15) OGC – Optimal Generation Control
- 16) OFC - Optimal Frequency Control

Απόδοση όρων

Governor – Κυβερνήτης

Power system - Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Power flow – Ροή ισχύος

Power injection – Διάχυση ισχύος

Primary frequency control – Πρωτεύον έλεγχος συχνότητας

Secondary frequency control – Δευτερεύον έλεγχος συχνότητας

Tertiary control – Τριτογενής έλεγχος

Optimal Load Control - Βέλτιστος έλεγχος φορτίου

Dual Optimal Load Control – Δευτερεύον βέλτιστος έλεγχος φορτίου

Automatic Control Error – Σφάλμα αυτόματου ελέγχου

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

Bus - Ζυγός

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

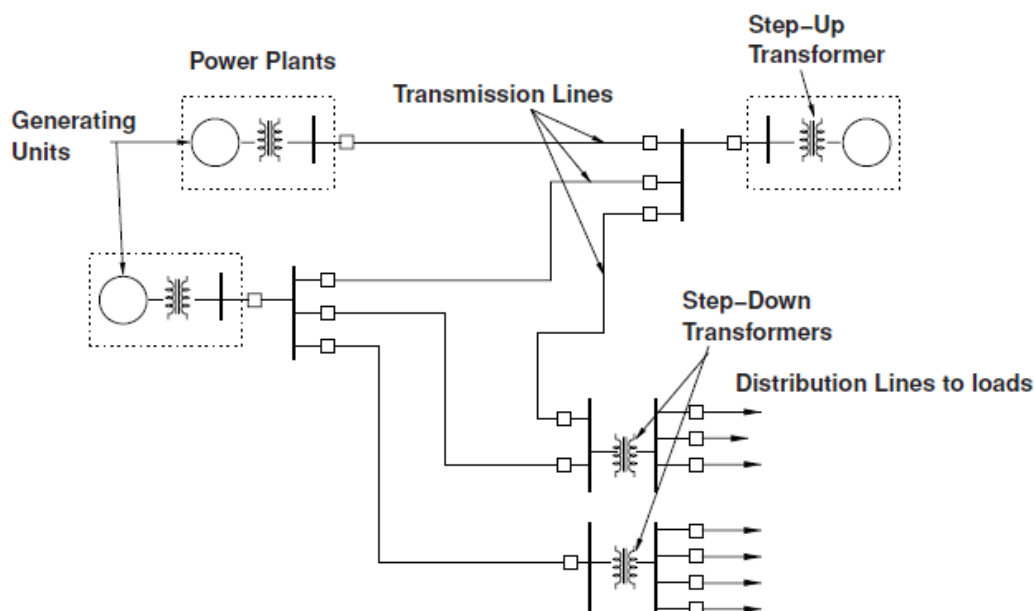
Η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα μια από τις πιο κοινές μορφές ενέργειας που χρησιμοποιείται. Είναι καθαρή, βολική, σχετικά εύκολη στην μεταφορά από τα κέντρα παραγωγής στα καταναλωτικά κέντρα, καθώς είναι πολύ ευέλικτη στη χρήση της. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται συνήθως με ηλεκτρομηχανικά συστήματα, εκτός από ένα μικρό μέρος των μονάδων δημιουργίας, όπως τα ηλιακά κύτταρα (solar cells) και τα κύτταρα καυσίμου (fuel cells). Φυσικές πηγές, όπως η χημική ενέργεια που είναι παγιδευμένη σε ορυκτά καύσιμα, χρησιμοποιούνται για να παράγουν μηχανική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται από τους καταναλωτές είναι συνδεδεμένη με τα εθνικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι δίκτυα που αποτελούνται από συσκευές που παράγουν, μεταφέρουν και διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν μονάδες όπως βιομηχανίες, σπίτια, επιχειρήσεις. Η πλειοψηφία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται σε τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, με εξαίρεση ορισμένων εξειδικευμένων συστημάτων που δεν βασίζονται σε μια τέτοια χορήγηση όπως για παράδειγμα τα αεροσκάφη, τα πλοία, τα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά συστήματα και τα αυτοκίνητα [14]. Η συχνότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έχει οριστεί στα 60Hz (Αμερική) ή 50Hz (Ευρώπη, Ασία, Αφρική και Αυστραλία).

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται σε ένα κεντρικό ηλεκτροπαραγωγό σταθμό μεταδίδεται σε υποσταθμούς, από τους οποίους διανέμεται στους καταναλωτές. Η μετάδοση επιτυγχάνεται με ένα εκτεταμένο δίκτυο γραμμών υψηλής τάσης, το οποίο συμπεριλαμβάνει υπέργεια, υπόγεια και υποθαλάσσια καλώδια μεταφοράς. Τάσεις που είναι υψηλότερες από αυτές που είναι κατάλληλες για τις γεννήτριες στον σταθμό, απαιτούνται κατά τη μετάδοση εναλλασσόμενου ρεύματος σε μεγάλες αποστάσεις, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες ενέργειας που προκύπτουν από την αντίσταση των γραμμών μεταφοράς. Για την αύξηση της τάσης για την μετάδοση χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές ανύψωσης στο σταθμό παραγωγής. Στην συνέχεια χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές υποβίβασης έτσι ώστε η τάση να φτάσει σε κατάλληλα επίπεδα για τα συστήματα διανομής. Τον τελευταίο καιρό, συνεχές ρεύμα τεχνολογία υψηλής τάσης (HVDC) χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη απόδοση σε πολύ μεγάλες αποστάσεις (τυπικά εκατοντάδες χιλιόμετρα), ή σε υποβρύχια καλώδια μεταφοράς (συνήθως περισσότερο από 50 χιλιόμετρα). Η ηλεκτρική ενέργεια μεταδίδεται σε υψηλή τάση (110 kV ή παραπάνω) κατά μήκος των γραμμών. Τα κύρια επίπεδα μετάδοσης της τάσης που χρησιμοποιείται για τα συστήματα μετάδοσης είναι 110, 132, 138, 220, 345, 400, 500 και 750 kV.

Ένα μικρό, απλοποιημένο σύστημα ισχύος φαίνεται στο Σχήμα 1.1.

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται σε κέντρα παραγωγής με δύο βασικούς τρόπους: από γεννήτριες που περιστρέφονται από κάποια κινητήρια δύναμη ή από άμεση μετατροπή από άλλη πηγή ενέργειας όπως η ηλιακή (φωτοβολταϊκά πάνελ) ή χημική (κυψέλες καυσίμου). Η κινητήρια δύναμη που περιστρέφει τις γεννήτριες μπορεί να είναι μηχανές θερμότητας, όπως ατμοστρόβιλοι, αεριοστρόβιλοι, κινητήρες εσωτερικής καύσης που καίνε καύσιμο ντίζελ, φυσικό αέριο ή βενζίνη, ή ανεμογεννήτριες που μετατρέπουν ισχύ άμεσα από την πτώση του νερού ή την θερμότητα. Επιπλέον σαν είσοδο τροφοδοσίας των κινητήρων θερμότητας χρησιμοποιείται η γεωθερμική θερμότητα και το ηλιακό φως [28]. Τα πιο συνηθισμένα ηλεκτρικά ενεργειακά συστήματα που υπάρχουν είναι:



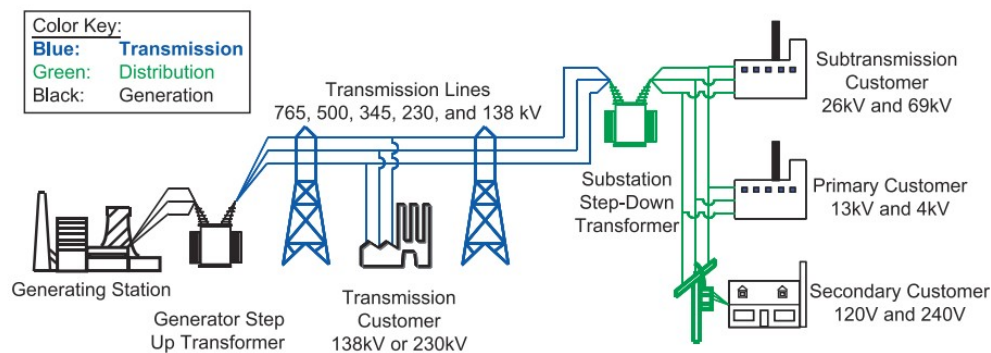
Σχήμα 1.1 Ένα μικρό, απλοποιημένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας [28]

- Σταθμοί που καίνε ορυκτά καύσιμα, όπως άνθρακα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.λπ.
- Πυρηνικοί ηλεκτροπαραγωγοί σταθμοί
- Σταθμοί υδροηλεκτρικής ενέργειας
- Σταθμοί γεωθερμικής ενέργειας
- Αιολικά πάρκα
- Φωτοβολταϊκά Πάρκα

Για περαιτέρω ανάγνωση σχετικά με την παραγωγή και τις τεχνολογίες ηλεκτρικής ενέργειας συμβουλευτείτε [40].

Το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι το τελικό στάδιο της παράδοσής της. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από το σύστημα μετάδοσης στους καταναλωτές. Οι Υποσταθμοί διανομής συνδέονται με το σύστημα μετάδοσης για να μειώσουν την τάση μετάδοσης σε μέση τάση μεταξύ 1 kV και 100 kV με τη χρήση μετασχηματιστών. Οι κύριες γραμμές μεταφοράς φέρουν αυτή την μέση τάση στους μετασχηματιστές διανομής που βρίσκονται κοντά στα κέντρα ζήτησης. Οι μετασχηματιστές διανομής μειώνουν και πάλι την τάση στα επιθυμητά επίπεδα για οικιακές συσκευές και συνήθως σε πολλούς πελάτες η τάση αυτή δίδεται μέσω δευτερευουσών γραμμών διανομής. Οι εμπορικοί και οικιακοί πελάτες συνδέονται με τις δευτερεύουσες γραμμές διανομής μέσω ξεχωριστής υπηρεσίας (service drops). Ενώ πελάτες που απαιτούν ένα πολύ μεγαλύτερο ποσό ενέργειας μπορεί να συνδεθούν άμεσα με κύρια γραμμή διανομής.

Μια πιο ξεκάθαρη εικόνα της δομής του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2 Βασική Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας [24]

Power system operator ensures the system's normal and reliable operation. To achieve that, electricity providers elaborate a variety of study analyses which can be divided into two main categories:

Ο λειτουργός (operator) του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εξασφαλίζει την κανονική και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος. Για να επιτευχθεί αυτό, οι διάφοροι παροχής ηλεκτρικής ενέργειας επεξεργάζονται διάφορες μελέτες αναλύσεων, οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Ανάλυση σταθερής κατάστασης
- Ανάλυση μεταβατικής κατάστασης

Μια σύντομη περιγραφή των πιο σημαντικών σημείων με τα οποία ασχολούνται οι σχεδιαστές και οι λειτουργοί μηχανικοί μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας δίνεται παρακάτω:

Ανάλυση Βέλτιστης Ροής Ισχύος / Οικονομική Κατανομή (Optimal Power Flow (OPF) Analysis / Economic Dispatch): Είναι η μελέτη ροής φορτίου και είναι γνωστή ως ροή ισχύος. Είναι μια αριθμητική ανάλυση της ροής των δύο, ενεργού και άεργου ισχύος σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικές ή υποτιθέμενες συνθήκες. Η ροή του φορτίου χρησιμοποιείται επίσης για τον υπολογισμό της τάσης σε διάφορους ζυγούς και για την έγχυση ισχύος (power injection) στο σύστημα μετάδοσης. Η ανάλυση βέλτιστης ροής ισχύος είναι πολύ χρήσιμη τόσο για την καθημερινή λειτουργία όσο και στην επέκταση και ανάπτυξη ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η άμεση ανάλυση του κυκλώματος δεν είναι δυνατή. Έτσι με ένα δευτερεύον πρόβλημα, που ασχολείται με τη βέλτιστη κατανομή του συνολικού φορτίου μεταξύ των μονάδων παραγωγής του ΣΗΕ, που ονομάζεται Οικονομική Κατανομή (Economic Dispatch), φτάνουμε στην λύση του πρωτεύοντος προβλήματος. Το ΣΗΕ διαμορφώνεται από ένα ηλεκτρικό δίκτυο και επιλύεται με ισχύεις και τάσεις που βρίσκονται σε σταθεροποιημένη κατάσταση στους διάφορους ζυγούς.

Ανάλυση Σφάλματος (Fault Analysis): Είναι η ανάλυση, η οποία πραγματοποιείται με σκοπό να προβλέψει τη συμπεριφορά ενός ΣΗΕ σε περίπτωση σφάλματος. Ο υπολογισμός των τάσεων και ρευμάτων του δικτύου κάτω από τέτοιες συνθήκες επιτρέπει στους αρμόδιους μηχανικούς να επιλέξουν και να εγκαταστήσουν τις σωστές συσκευές προστασίας έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η αξιόπιστη λειτουργία του ΣΗΕ.

Ανάλυση έκτακτης ανάγκης (Contingency Analysis): Είναι μια σημαντική δραστηριότητα στον σχεδιασμό και λειτουργία του ΣΗΕ. Γενικά η διακοπή λειτουργίας σε μια γραμμή μετάδοσης ή ένα μετασχηματιστή και γεννήτριες μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτωση σε άλλους κλάδους ή / και αιφνίδια αύξηση ή πτώση της τάσης του συστήματος. Για να ξεπεραστούν οι παραβιάσεις αυτές χρησιμοποιείται η τεχνική συνεχούς ροής ισχύος για να μάθουμε την ευαισθησία της γραμμής μεταφοράς, του μετασχηματιστή και τις διακοπές στις γεννήτριες.

Ανάλυση ευστάθειας (Stability Analysis): Τα δίκτυα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυναμικά μη γραμμικά συστήματα που εκτίθενται συχνά σε ξαφνικές, μικρές ή μεγάλες αλλαγές τόσο του φορτίου όσο και της παραγωγής. Η ανάλυση ευστάθειας είναι η εργασία που ασχολείται με τη μελέτη της συμπεριφοράς του ΣΗΕ, όταν συμβαίνουν τέτοιες αλλαγές. Δεδομένου ότι η παρούσα διπλωματική εστιάζεται κυρίως στην ανάλυση και σταθερότητα των ΣΗΕ, είναι απαραίτητο για τον αναγνώστη να γνωρίζει ένα σύντομο ορισμό των βασικών όρων σταθερότητας που αναλύονται περαιτέρω και θα χρησιμοποιηθούν στις επόμενες ενότητες του έργου αυτού. Όπως αναφέρεται στο [15], όταν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας (σταθερή κατάσταση), οι γεννήτριες πληρούν δύο βασικές προϋποθέσεις:

1. Οι ρότορες να περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα, η οποία είναι επίσης γνωστή ως σύγχρονη ταχύτητα (synchronous velocity).
2. Οι παραγόμενες τάσεις να είναι ημιτονοειδείς κυματομορφές με την ίδια συχνότητα.

Κρατώντας την ταχύτητα των γεννητριών στην συγχρονισμένη ταχύτητα και τις τερματικές τάσεις στα επιθυμητά επίπεδα, αυτό ονομάζεται σταθερότητα της συχνότητας (frequency stability) και σταθερότητα τάσης (voltage stability), αντίστοιχα. Όταν η συγχρονισμένη ταχύτητα είναι εγκατεστημένη σε όλες τις γεννήτριες του ΣΗΕ, οι γεννήτριες είναι συγχρονισμένες και οι σχετικές διαφορές των γωνιών του ρότορα τους, παραμένουν σταθερές. Τα ΣΗΕ είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να ανακτούν και να διατηρούν αυτόν τον συγχρονισμό μετά από κάποια μικρή αλλαγή στο φορτίο ή στην παραγωγή. Αυτή η ικανότητα ονομάζεται σταθερότητα γωνίας του ρότορα (rotor angle stability). Η διατήρηση της σταθερότητας της γωνίας του ρότορα μετά από μια μεγάλη διαταραχή σε ένα ΣΗΕ ονομάζεται μεταβατική σταθερότητα (transient stability). Παραμένοντας σε συγχρονισμό σημαίνει ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή όλων των γεννητριών εξισορροπείται ακριβώς από τη μηχανική ροπή. Εάν σε κάποια γεννήτρια η ισορροπία μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής και της μηχανικής ροπής έχει διαταραχθεί λόγω διαταραχών στο σύστημα, τότε αυτό θα οδηγήσει σε ταλαντώσεις της γωνίας του ρότορα. Αυτές οι μεγάλες διαταραχές προκαλούνται από βλάβες στο δίκτυο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η πτώση μιας γραμμής μεταφοράς [15, 36].

Η σταθερότητα της γωνίας του ρότορα μπορεί να χαρακτηρίζεται ως εξής:

- Μεταβατική σταθερότητα
- Σταθερότητα μικρού σήματος

Σταθερότητα Τάσης: Είναι η ικανότητα του συστήματος να διατηρεί σε σταθερή κατάσταση τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς του συστήματος, όταν υπόκειται σε μια διαταραχή. Αν η διαταραχή είναι μεγάλη, τότε καλείται σταθερότητα τάσης μεγάλης διαταραχής και αν η διαταραχή αυτή είναι μικρή τότε καλείται σταθερότητα τάσης μικρής διαταραχής. Σε αντίθεση με τη σταθερότητα της γωνία, η σταθερότητα τάσης μπορεί να είναι επίσης μακροπρόθεσμο φαινόμενο.

Σταθερότητα Συχνότητας: Αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί σταθερή την συχνότητα μετά από μια σοβαρή διαταραχή μεταξύ παραγωγής και φορτίου. Εξαρτάται από την δυνατότητα αποκατάστασης της ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και φορτίου του συστήματος, με ελάχιστη απώλεια φορτίου. Η αστάθεια της συχνότητας μπορεί να οδηγήσει σε μια διαρκή ταλάντευση συχνότητας που οδηγεί σε πτώση (tripping) των μονάδων παραγωγής ή φορτίων.

Για περισσότερες πληροφορίες για ανάλυση του συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας βλέπε [14, 28, 29].

Πολλά συστήματα παρακολούθησης, ισχυρά εργαλεία και προσομοιωτές αναπτύχθηκαν επίσης κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, που βοήθησαν τους μηχανικούς για την επίτευξη ταχύτερου ελέγχου και ζωντανής παρακολούθησης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι τα ΣΗΕ οδηγούνται σε μια πιο αξιόπιστη, αποτελεσματική και

ασφαλέστερη λειτουργία [39, 48].

Σήμερα, τα ΣΗΕ συνεχίζουν να επεκτείνονται κυρίως, λόγω της άκαμπτης ανάπτυξης της τεχνολογίας και της βιομηχανίας. Ωστόσο, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι πλέον πολύ κοντά στα όριά τους, και η ανάγκη για βελτίωση τους είναι πολύ σημαντική. Οι επιστήμονες και οι μηχανικοί σήμερα επικεντρώνονται στο πώς να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα, την αξιοπιστία και την ευελιξία των ΣΗΕ, για να ξεπεραστούν τα προβλήματα που εμφανίζονται λόγω της ταχείας επέκτασης. Σημαντικό έργο, τόσο επιστημονικό όσο και τεχνολογικό, πραγματοποιήθηκε στους τομείς των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της αποδοτικής παραγωγής ενέργειας, της προστασίας και σταθερότητας των ΣΗΕ και της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το έργο αυτό θα έχει μεγάλη σημασία για τη διαμόρφωση των μελλοντικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 2

Κίνητρα και Διατύπωση Προβλήματος

Τις τελευταίες δεκαετίες, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν περάσει από κρίσιμες αλλαγές. Πολλές νέες τεχνολογίες έχουν εισαχθεί στα ήδη υπάρχον δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της ανάγκης για μετριασμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος, τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και της ενεργειακής ασφάλειας των χωρών. Οι τεχνολογίες αυτές, μαζί με την άκαμπτη επέκταση των υφιστάμενων ΣΗΕ, έχουν επηρεάσει σημαντικά την λειτουργία, τις υπηρεσίες και την ασφάλεια των δικτύων. [59]

Μία από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες, που εισήχθη κατά την διάρκεια των τελευταίων χρόνων, είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η αιολική, η υδροηλεκτρική, η ηλιακή, η γεωθερμική και η βιοενέργεια χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως στα εθνικά δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και είναι προσιτές, ανεξάντλητες και καθαρές πηγές. Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών αύξησε την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού μέσω της εξάρτησης τους από μια γηγενή, ανεξάντλητη και κυρίως ανεξάρτητη πηγή, την ενίσχυση της αειφορίας, και τη μείωση της ρύπανσης.

Έτσι σε συνδυασμό με την πρόσφατη οικονομική ύφεση οι χώρες αναγκάστηκαν να αυξήσουν τη συμβολή των ανανεώσιμων πηγών στις εθνικές προμήθειες ηλεκτρικής ενέργειας τους, με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Παρόλο ότι υπάρχουν εξαιρετικοί λόγοι για την αύξηση της συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα, ο κίνδυνος που πηγάζει από τα χαρακτηριστικά ορισμένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθιστούν δύσκολη την ενσωμάτωσή τους στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Είναι μόνο οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (και η χρήση τους σε ευρεία κλίμακα) που παρουσιάζουν αυτόν τον κίνδυνο, και μαζί με πολλούς άλλους είναι ευθύνη και του IEC για να βοηθήσει την παγκόσμια κοινότητα να αντιμετωπίσει αυτό τον κίνδυνο. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που αμφισβητούνται είναι η αιολική και η ηλιακή (φωτοβολταϊκά και θερμικά) και ο κίνδυνος είναι ότι, αν υπάρχουν σε μεγάλη κλίμακα μεταβλητότητας και αβεβαιότητας, τότε αποτρέπεται η σωστή λειτουργία στο σύνολο του δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, η αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα στην λειτουργία του ΣΗΕ και προκαλεί συχνές αποκλίσεις στο ισοζύγιο παραγωγής-φορτίου [1,60].

Περαιτέρω από την επέκταση των υφιστάμενων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, η διασύνδεση των διαφόρων ανεξάρτητων δικτύων είναι άλλο ένα κρίσιμο θέμα που αντιμετώπισαν οι μηχανικοί κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων. Προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες τους για ηλεκτρική ενέργεια, πολλές χώρες έκαναν σημαντικές

συμφωνίες για διασύνδεση των εθνικών τους δικτύων και για εναλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι διασυνδέσεις σε συνδυασμό με τη νέα δομή των ΣΗΕ (ελεύθερες και αποκεντρωμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας) έκαναν την ανάλυση των δικτύων ΣΗΕ πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα, ενώ επίσης προέκυψε η αδιαμφισβήτητη ανάγκη για βελτιωμένη λειτουργία του δικτύου, των υπηρεσιών και της ασφάλειας.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα που τέθηκε κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών λόγω της απελευθέρωσης των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, είναι το πώς η ηλεκτρική ενέργεια θα κοστολογείται. Το γεγονός ότι οι προμηθευτές της ηλεκτρικής ενέργειας υπογράφουν βραχυπρόθεσμα συμβόλαια με τους καταναλωτές, προκειμένου να τους παρέχουν ενέργεια, οδήγησε στις συχνές αλλαγές της τιμής της. Αυτό προκαλεί μεγάλες διακυμάνσεις στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και οδηγεί σε μεγάλες και συνεχείς ανισορροπίες παραγωγής-φορτίου. Έτσι πολλοί επιστήμονες κινητοποιήθηκαν να ερευνήσουν και να προτείνουν αρκετούς αλγόριθμους και συστήματα τιμολόγησης, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας.

Ωστόσο, οι εν λόγω εργασίες είναι ακόμη σε προκαταρκτικό στάδιο και η σκοπιμότητα αυτών των συστημάτων τιμολόγησης, πρέπει να διερευνηθεί πιο βαθιά. Επιπλέον, η ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών των μηχανισμών για τη λειτουργία και τη σταθερότητα των ΣΗΕ είναι υψηλού ενδιαφέροντος.

Όπως μπορεί να δει κανείς στις προηγούμενες παραγράφους, η κοινή δυσκολία που αντιμετωπίζουν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια, είναι να διατηρηθεί η ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και του φορτίου. Μια ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και φορτίου προκαλεί την απόκλιση της συχνότητας γύρω από την ονομαστική της τιμή. Αυτές οι ταλαντώσεις μπορεί να οδηγήσουν το ΣΗΕ σε αστάθειες και ανεπιθύμητες καταστάσεις, όπως διακοπές ρεύματος (blackouts).

Τα σημερινά ΣΗΕ είναι εξοπλισμένα με κατάλληλους μηχανισμούς, προκειμένου να ξεπερνούν τέτοιες καταστάσεις και να συντηρείται η συχνότητα των δικτύων αυστηρά γύρω από την ονομαστική της τιμή (π.χ. 50 ή 60 Hz). Αυτός ο μηχανισμός ονομάζεται έλεγχος/ρύθμιση συχνότητας (frequency control/regulation) και αποτελείται από τρία στάδια, τα οποία λειτουργούν σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Αρχικά, γίνεται ο πρωτεύον έλεγχος συχνότητας (έλεγχος πτώσης-droop control).

Droop control είναι μια στρατηγική έλεγχου που συνήθως εφαρμόζεται στις γεννήτριες για τον πρωτεύον έλεγχο της συχνότητας (και περιστασιακά έλεγχο της τάσης) έτσι ώστε να επιτραπεί η παράλληλη λειτουργία των γεννητριών (π.χ. κατανομή του φορτίου). Το droop control είναι χρήσιμο για να επιτρέπει σε πολλαπλές μονάδες παραγωγής να αλλάξουν αυτόματα την ιπποδύναμη τους, η οποία να βασίζεται σε δυναμικά μεταβαλλόμενα φορτία. Ωστόσο, σκεφτείτε τι θα συμβεί όταν υπάρξει μια σημαντική αλλαγή όπως η απώλεια μιας μεγάλης μονάδας παραγωγής. Αν το σύστημα παραμένει σταθερό, όλες οι άλλες μονάδες θα πάρουν τη φορτίο της, αλλά το χαρακτηριστικό droop επιτρέπει στη συχνότητα να φτάσει σε μια σταθερή κατάσταση, τιμή κάτω από την

ονομαστική της (για παράδειγμα, 49.7Hz ή 59.7Hz). Αντίθετα, εάν ένα μεγάλο φορτίο αποκοπεί από το δίκτυο, τότε η συχνότητα θα φτάσει σε μια σταθερή κατάσταση, τιμή πάνω από την ονομαστική της (για παράδειγμα, 50.5Hz ή 60.5Hz).

Είναι εντελώς αποκεντρωμένος έλεγχος, μπορεί επανεξισορροπήσει την ισχύ και να σταθεροποιήσει τη συχνότητα, αλλά από μόνος του δεν μπορεί να αποκαταστήσει την τελευταία στην ονομαστική της τιμή. Λειτουργεί σε μια χρονική κλίμακα δέκατων του δευτερολέπτου και χρησιμοποιεί ένα κυβερνήτη (governor) για να ρυθμίσει την είσοδο της μηχανικής ισχύς σε μια γεννήτρια που βασίζεται στην τοπική απόκλιση συχνότητας.

Ως εκ τούτου, άλλοι έλεγχοι είναι απαραίτητοι για να φέρουν τη συχνότητα πίσω στην ονομαστική της τιμή (δηλαδή 50Hz ή 60Hz), οι οποίοι ονομάζονται δευτερεύον και τριτογενής έλεγχοι συχνότητας.

Ο δευτερεύον έλεγχος συχνότητας που ονομάζεται (**Αυτόματος Έλεγχος Παραγωγής (Automatic Generation Control -AGC)**), λειτουργεί σε ένα χρονικό διάστημα μέχρι ενός λεπτού με μια κεντροποιημένη μορφή, προσαρμόζει τα σημεία ρύθμισης των κυβερνητών σε μια περιοχή ελέγχου για να οδηγήσει τη συχνότητα πίσω στην ονομαστική της τιμή και την ισχύ μεταξύ των περιοχών, να ρέει στις προγραμματισμένες τους τιμές.

Τέλος, ο τριτογενής έλεγχος ονομάζεται **Οικονομικής Κατανομής (Economic Dispatch - ED)**, της οποίας στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό λειτουργικό κόστος σε μια περιοχή, καθορίζοντας τον τρόπο που η έξοδος της πραγματικής ισχύς της κάθε μονάδας παραγωγής, θα συναντήσει ένα φορτίο. Ένας αλγόριθμος του ελέγχου Οικονομικής Κατανομής τρέχει κάθε λίγα λεπτά για να επιλέξει το συνδυασμό των μονάδων παραγωγής σε επιθυμητές τιμές ισχύος έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουν το συνολικό κόστος, υπό την επιφύλαξη των περιορισμών μεταφοράς ή της ασφάλειας του συστήματος έναντι αστοχιών. [25, 29, 52,61].

Παρά το γεγονός ότι τα υφιστάμενα συστήματα ελέγχου συχνότητας είναι αξιόπιστα και λειτουργούν κανονικά, έχουν γίνει αναποτελεσματικά, λόγω των συχνών μεγάλων διακυμάνσεων τόσο στην παραγωγή όσο και στα φορτία. Οι ραγδαίες αλλαγές στη συχνότητα του δικτύου επέβαλαν την αδιαμφισβήτητη ανάγκη για περισσότερες «εφεδρικές μονάδες-spinning reserve» και ακόμα πιο γρήγορα συστήματα ελέγχου ταχείας δράσης. Έτσι, οι ερευνητές είχαν κίνητρο να αναζητήσουν τρόπους για τη βελτίωση των συστημάτων αποκατάστασης της συχνότητας. Ως αποτέλεσμα, πολλές επιστημονικές εργασίες εκπονήθηκαν κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών για τον έλεγχο και την ρύθμιση της συχνότητας όπου οι ερευνητές προτείνουν νέα συστήματα ελέγχου και αλγορίθμους για τη βελτίωση του πρωτεύον ελέγχου συχνότητας, του δευτερεύον (AGC) και του τριτογενή (ED).

Ωστόσο, η εμφάνιση των έξυπνων δικτύων, έξυπνων συσκευών και άλλων έξυπνων στοιχείων/αισθητήρες, καθώς επίσης και η ανάπτυξη των επικοινωνιών που μπορούν να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες σχετικά με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και τα πιο

εκλεπτυσμένα μέσα ελέγχου, έδωσαν στους επιστήμονες ένα επιπλέον κίνητρο για έρευνα [47]. Σημαντικό έργο έχει πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών στην τεχνολογία των έξυπνων συσκευών και ελέγχου, προκειμένου να συμμετάσχουν άμεσα στη λειτουργία του δικτύου και την εξυπηρέτηση.

Οι επιστήμονες και οι μηχανικοί εισήγαγαν την κατανεμημένη συμμετοχή του φορτίου στην εξυπηρέτηση του συστήματος με την παροχή ελέγχων συχνότητας ταχείας δράσης σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Αυτή η αδιαμφισβήτητη ανάγκη για έρευνα και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που θα παρείχαν υπηρεσίες στο σύστημα εμφανίστηκε λόγω των αυξημένων απαιτήσεων για βοηθητικές υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (real time) εάν αυτές ήταν συμβατικής παραγωγής και αναλάμβαναν μέρος του φορτίου, όχι μόνο θα μείωναν την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας του συστήματος, αλλά θα μπορούσαν επίσης να υπονομεύσουν σημαντικά την ικανότητα του συστήματος να απορροφά διαλείπουσες ανανεώσιμες εξόδους [5]. Τα πρώτα αποτελέσματα σε αυτόν τον τομέα της έρευνας ήταν πολύ ενθαρρυντικά και έδειξαν ότι τα «έξυπνα φορτία» μπορεί να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της λειτουργίας και αποτελεσματικότητας του ΣΗΕ.

Ακολουθώντας το τρέχον ερευνητικό ενδιαφέρον, το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής μελέτης βασίζεται στην ενσωμάτωση της Οικονομικής Κατανομής στον έλεγχο της συχνότητας και της συμμετοχής του φορτίου στη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, θα επιδιώξουμε για τέτοιου είδους πρωτογενή και / ή δευτερογενή συστήματα ελέγχου συχνότητας / αλγόριθμους που θα επαναφέρουν τη συχνότητα του δικτύου, καθώς επιλύουν ένα πρόβλημα Οικονομικής Κατανομής (με αρκετή κατανομή της ανισορροπίας παραγωγής-φορτίου στις γεννήτριες και/ή στα φορτία που είναι διαθέσιμα για έλεγχο).

Μελλοντικές εργασίες θα επικεντρωθούν επίσης στην παροχή βελτιστοποιημένων ερμηνειών σε διάφορα μοντέλα δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν από τους ερευνητές σε προηγούμενες εργασίες. Αυτό μπορεί να διευκολύνει το σχεδιασμό των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, δίνοντας έμφαση στα αποτελέσματα του τύπου του δικτύου (δηλαδή σταθερότητα ή / και βέλτιστα αποτελέσματα), ανεξάρτητα από την τοπολογία του δικτύου, που βασίζονται σε τέτοια αποκεντρωμένα σχέδια ελέγχου.

Όπως προαναφέραμε, μεγάλο μέρος της έρευνας εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, στον έλεγχο της συχνότητας και της Οικονομικής Κατανομής και έχει σημειώσει σημαντική συμβολή στις τρέχουσες εξελίξεις των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι η βιβλιογραφία σχετικά με τον έλεγχο της συχνότητας και της Οικονομικής Κατανομής είναι τεράστια όταν αναλύονται ξεχωριστά, είναι σχετικά μικρή και πολύ πρόσφατη όταν συνδυαστούν. **Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το θέμα της διπλωματικής αυτής εργασίας αποτελεί ενδιαφέρον πρόβλημα για περαιτέρω έρευνα. Έτσι θα επιβεβαιώσουμε βέλτιστο έλεγχο σε απλά μοντέλα δεύτερου και τρίτου βαθμού και ακολούθως σε πολύπλοκα μοντέλα μέσω το PST (Power System Toolbox).**

Κεφάλαιο 3

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Ο κύριος σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει την επιστημονική εργασία που σχετίζεται με το πρόβλημα αυτής της διπλωματικής εργασίας. Το κεφάλαιο αυτό θα χωριστεί σε δύο κύριες ενότητες. Το πρώτο κομμάτι θα είναι μια σύντομη ανασκόπηση των πιο σημαντικών και πρόσφατων επιστημονικών εργασιών σχετικά με "τον έλεγχο της συχνότητας», ενώ το κύριο ενδιαφέρον θα επικεντρωθεί στη δυναμική ζήτηση (Dynamic Demand) και πώς τα φορτία μπορούν να συμμετέχουν στη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με την παροχή βοηθητικών υπηρεσιών (ancillary services).

Η εργασία αυτή, βασίζεται κυρίως σε προσομοιώσεις και πειραματικά αποτελέσματα. Το δεύτερο κομμάτι αυτού του κεφαλαίου, θα είναι η ανάλυση των πιο σημαντικών και των πιο πρόσφατων έργων που σχετίζονται με το "βέλτιστο έλεγχο της συχνότητας», εστιάζοντας κυρίως στην ανάλυση και συζήτηση εγκεκριμένων μοντέλων του ΣΗΕ. Αυτές οι μελέτες έχουν προσπαθήσει να αντιμετωπίσουν το ζήτημα της ελεγχόμενης ζήτησης, μέσω της εκπόνησης προγραμμάτων ελέγχου που να λύνουν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που εγγυάται δίκαιη κατανομή μεταξύ των συμμετεχόντων φορτίων.

Η σημασία αυτών των έργων προέρχεται από τα αποτελέσματα του τύπου του δικτύου που βγαίνουν από την ανάλυση αυτή. Τα αποτελέσματα αυτά δίνουν την ευκαιρία στους ερευνητές να αντλήσουν σημαντικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του ΣΗΕ που είναι ανεξάρτητη από την τοπολογία του δικτύου.

3.1 Σύντομη Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας του Ελέγχου Συχνότητας

Το ενδιαφέρον του ελέγχου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και της σταθερότητας των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από [34], όπου ο JC Maxwell συζήτησε καταρχάς για τη λειτουργία του κυβερνήτη (governor) μιας μηχανής και τη συμπεριφορά των μηχανών κάτω από μια ορισμένη διαταραχή. Από τότε, πολλή επιστημονική εργασία εκπονήθηκε και συνέβαλε στην άκαμπτη επέκταση των ΣΗΕ. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η ιδέα του ελέγχου της συχνότητας στην πλευρά του φορτίου πρωτοεμφανίστηκε και άρχισε να επεκτείνεται με γοργούς ρυθμούς. Ο Schweppe και άλλοι, εισήγαγαν την ιδέα της ανάπτυξης της τεχνολογίας των φορτίων για να βοηθήσουν ή ακόμη και να αντικαταστήσουν τα συστήματα με τουρμπίνες και την στρεφόμενη εφεδρεία.

Επίσης, πρότειναν διάφορες ευκολίες στις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας για να δοθούν κίνητρα στους χρήστες να προσαρμόσουν την κατανάλωσή τους στο πραγματικό κόστος της παραγωγής κατά τη στιγμή της κατανάλωσης. Επιπλέον, παρατήρησαν τη σημασία των φορτίων αυτών που προσαρμόζονταν με την συχνότητα προκειμένου να είναι σε θέση τα ΣΗΕ να αποδεχθούν ευκολότερα μια στοχαστική διακύμανση μιας πηγής ενέργειας, όπως η αιολική ή η ηλιακή ενέργεια [42]. Το έργο αυτό ήταν το βασικό κίνητρο όλων των συναφών έργων κατά τα επόμενα έτη.

Ποικιλία από εκτενείς εκθέσεις δημοσιεύθηκαν πρόσφατα επαινώντας τη σημασία της συμμετοχής των φορτίων στη λειτουργία του ΣΗΕ. Η διαθεσιμότητα μικροελεγκτών χαμηλού κόστους δίνει τη δυνατότητα στους μηχανικούς να σχεδιάσουν ηλεκτρικές συσκευές που είναι ευαίσθητες σε ανισοροπίες ισχύος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και που είναι σε θέση να αλλάζουν αυτόματα το χρονοισμό των απαιτήσεων της ζήτησης τους αναλόγως. Τέτοιες τεχνικές ελέγχου είναι γνωστές ως «δυναμικός έλεγχος της ζήτησης», επειδή η συσκευή μπορεί να αλλάξει δυναμικά τη ζήτησή της σύμφωνα με τις συνθήκες του δικτύου της. Αυτές οι «έξυπνες συσκευές», ενεργώντας από κοινού, θα μπορούσαν να αντιδράσουν τάχιστα και θα μπορούσε να ξεπεραστεί η ανισοροπία παραγωγής-ζήτησης πιο γρήγορα από μια παραδοσιακή γεννήτρια στρεφόμενης εφεδρείας.

Συσκευές με δυναμική ζήτηση θα μπορούσαν να είναι τέτοιες συσκευές που δεν είναι εξαρτώμενες από τον χρόνο, αλλά το ότι χρειάζονται ενέργεια, και δεν τις νοιάζει πότε ακριβώς η ενέργεια θα παραδοθεί σ' αυτές. Τέτοιες συσκευές είναι τα ψυγεία, τα κλιματιστικά, οι θερμοσίφωνες και οι αντλίες. Πρώιμη έρευνα δείχνει ότι οι συσκευές αυτές, στο σύνολό τους, παρέχουν τη δυνατότητα για μεγάλη δυναμική ζήτηση η οποία θα μπορούσε να ενεργήσει για τη μείωση των ανισοροπιών στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η δυναμική ζήτηση έχει τη δυνατότητα να προσφέρει μια πιο αποτελεσματική λύση διοξειδίου του άνθρακα από την παραδοσιακή στρεφόμενη εφεδρεία και επιπλέον σταθερότητα που μπορεί να απαιτείται όταν μια μεγάλη ποσότητα ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι συνδεδεμένη. Αν αναπτυχθεί με επιτυχία, η δυναμική ζήτηση παρουσιάζει μια σημαντική ευκαιρία για να μειωθεί το κόστος διαχείρισης ενός ΣΗΕ, ιδίως με την προβλεπόμενη αύξηση της μεταβλητής εξόδου από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [21].

Ομοίως, με την προαναφερθείσα εργασία, οι συγγραφείς στο [47] υπογραμμίζουν ότι η δραστική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής δεν μπορεί να θεωρηθεί σημαντική συνεισφορά από τον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πρέπει να αυξηθούν, η αποτελεσματική ανταπόκριση στη ζήτηση θα πρέπει να εφαρμοστεί ευρέως και πρέπει να αναπτυχθούν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας υψηλής χωρητικότητας. Ένα έξυπνο δίκτυο είναι απαραίτητο να διαχειρίζεται και να ελέγχει όλο και πιο περίπλοκα πλέγματα στο μέλλον.

Όπως αναφέρεται στο [12], η πρόσφατη εξέλιξη των επικοινωνιών και της τεχνολογίας σε συνδυασμό με το γεγονός ότι όλο και περισσότερα ηλεκτρικά φορτία είναι εξοπλισμένα με την επικοινωνία, καθώς και τον έλεγχο, επιτρέπουν ένα νέο τρόπο σκέψης σχετικά με τη ζήτηση ανταπόκρισης (Demand Response - η δυνατότητα να περιορίσει κάποια ηλεκτρικά φορτία σε ώρες αιχμής για να απαλλαγούν από την ανάγκη για υπερφορτωμένες πηγές παραγωγής), γνωστό ως κατανομή ζήτησης (Demand Dispatch). Κατανομή της ζήτησης είναι η ικανότητα να συσσωματώνονται και να ελέγχονται με ακρίβεια τα επιμέρους φορτία όταν βρίσκονται κάτω από εντολή. Αντιπροσωπεύει μια ποιοτικά διαφορετική προσέγγιση στην εξισορρόπηση παραγωγής και φορτίου σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο και επιτρέπει μια σημαντική ευκαιρία για ενσωμάτωση όλο και υψηλότερων επιπέδων της διαλείπουσας ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές στο δίκτυο. Οι συγγραφείς υπογράμμισαν ορισμένες απαιτήσεις για τη κατανομή ζήτησης και πώς το Διαδίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία και τον έλεγχο μεταξύ των φορτίων και τα πλεονεκτήματα στο δίκτυο από την χρήση τους.

Εννοιολογικά πλαίσια για την ενεργό συμμετοχή σε μεγάλο βαθμό των κατανεμημένων φορτίων σε δράσεις ελέγχου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας συζητούνται λεπτομερώς στο [16]. Το πλαίσιο για τον έλεγχο του φορτίου είναι εγκατεστημένο, παρέχοντας μια επισκόπηση των στόχων του ελέγχου του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων της οικονομικής κατανομής φορτίου (Economic Dispatch), της Αυτόματης Ρύθμισης Παραγωγής (Automatic Generation Control) και της στρεφόμενης εφεδρείας. Συγγραφείς επανεξέτασαν υπάρχουσες πρωτοβουλίες που αποσκοπούσαν στην ανάπτυξη προγραμμάτων ελέγχου φορτίου για την παροχή των υπηρεσιών του ΣΗΕ και στη συνέχεια συζητήθηκαν ορισμένες από τις προκλήσεις για την επίτευξη συστημάτων ελέγχου φορτίου με τα οποία θα εξισορροπούνταν τα αντικείμενα σε επίπεδο συσκευής με τα αντικείμενα σε επίπεδο ΣΗΕ.

Μια από τις προτάσεις στην διπλωματική αυτή είναι ότι, προκειμένου να επιτευχθεί η πλήρης ανταπόκριση, ο απευθείας έλεγχος του φορτίου απαιτείται για να ενεργοποιηθεί η γρήγορη κλίμακα, προβλέψιμες ευκαιρίες ελέγχου, κυρίως στο θέμα των βοηθητικών γεννητριών είτε για ρύθμιση είτε σε κάτι απρόοπτο. Κεντροποιημένες, ιεραρχικές και διανεμημένες αρχιτεκτονικές συζητούνται μαζί με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα, ειδικά στην ολοκλήρωση προηγούμενων αρχιτεκτονικών για τον έλεγχο ενός ΣΗΕ και στις διαπλοκές τις οποίες μπορεί να προκύψουν στις δομές των υποστηριζόμενων επικοινωνιών.

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν με βάση την παραδοχή ότι τα φορτία είναι ανεξέλεγκτα και ότι η τάση, η συχνότητα και η σταθερότητα του συστήματος διατηρούνται κυρίως μέσω του ελέγχου της παραγωγής. Ομοίως όπως στις προαναφερθείσες εργασίες, στο [46] ο D. Trudnowski και άλλοι αμφισβήτησαν αυτήν την παραδοχή, προτείνοντας ένα πολύ πιο ενεργό ρόλο για τα έξυπνα φορτία, που σχετίζονται ειδικά με τον έλεγχο της συχνότητας και της δυναμικής σταθερότητας. Στα σύγχρονα συστήματα το φορτίο συνήθως ελέγχεται μόνο κάτω από αντίξοες συνθήκες σταθερότητας μέσω της απόρριψης φορτίου. Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι πολλά φορτία θα μπορούσαν με αποτελεσματικό κόστος να καταστούν ευφυή, επιτρέποντας στα φορτία να συμμετέχουν πιο ενεργά στη λειτουργία και στον έλεγχο του συστήματος. Τα πιθανά οφέλη του ενεργού ελέγχου φορτίου όπως επίσης τα θέματα αξιοπιστίας και εφαρμογών διερευνώνται.

Η έλευση της προηγμένης τεχνολογίας αισθητήρων και οι σημαντικές ανακαλύψεις στον τομέα των τηλεπικοινωνιών άνοιξαν πολλές νέες δυνατότητες για διαχείριση της ζήτησης. Πιο πρόσφατα, έχει υπάρξει μεγαλύτερο ενδιαφέρον από επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, καθώς και διαχειριστές συστημάτων στην αξιοποίηση του φορτίου ως πόρο του συστήματος μέσω της εφαρμογής των νέων τεχνολογιών. Με την ευρύτερη εφαρμογή της διαχείρισης της ζήτησης, υπάρχει μια αυξανόμενη έμφαση στον έλεγχο των φορτίων με την ελάχιστη δυνατή αποδιοργάνωση. Στο [41] αναπτύχθηκε ένα νέο πλαίσιο για το σχεδιασμό καθώς και την αξιολόγηση ενός τέτοιου προηγμένου άμεσου προγράμματος ελέγχου φορτίου, με στόχο την ελαχιστοποίηση της δυσφορίας του τελικού χρήστη. Το πλαίσιο αυτό είχε διατυπωθεί ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Χρησιμοποιώντας αυτό το πλαίσιο, οι γνώσεις σχετικά με την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων και περιορισμών στο μοντέλο για τον έλεγχο του φορτίου έχουν αναπτυχθεί.

Ο A. Molina-Garcia και άλλοι έδειξαν μέσω προσομοιώσεων ότι η ζήτηση μπορεί να έχει σημαντική και αξιόπιστη συμβολή στην πρωτεύον απόκριση συχνότητας, διατηρώντας ωστόσο τα οφέλη που αποκομίζουν οι καταναλωτές στην προμήθεια της ηλεκτρικής ενέργειας. Το [35] εστιάζεται στο γεγονός ότι η αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ πολλών φορτίων το κέντρο ελέγχου δεν είναι απαραίτητα και ότι η ζήτηση μπορεί να ανταποκριθεί στο σφάλμα συχνότητας με ένα τρόπο παρόμοιο με τον τρόπο που χρησιμοποιούν οι γεννήτριες προκειμένου να διατηρηθεί η ονομαστική συχνότητα του δικτύου.

Παρομοίως με τις προαναφερθέντες εργασίες, ο M Aunedi και άλλοι επικεντρώνονται στην έννοια της δυναμικής ζήτησης (Dynamic Demand). Το έργο τους ποσοτικοποιεί την αξία αυτής της έννοιας, η οποία επιτρέπει σε οικιακές συσκευές ψύξης να συμβάλουν στην πρωτεύον ρύθμιση της συχνότητας μέσω ενός προηγμένου στοχαστικού αλγόριθμου ελέγχου. Τα οφέλη της δυναμικής ζήτησης (DD) που παρέχουν απόκριση συχνότητας προσδιορίζονται σε ένα ευρύ φάσμα μελλοντικών συστημάτων παραγωγής χαμηλών εκπομπών άνθρακα, χρησιμοποιώντας ένα αποδοτικό μοντέλο παραγωγής το οποίο περιλαμβάνει τον προγραμματισμό της ρύθμισης της συχνότητας και των αποθεματικών υπηρεσιών. Η ανάλυση εξέτασε επίσης το πιθανό αντίκτυπο της ηλεκτροπαραγωγής από αιολική ενέργεια στην αδράνεια του συστήματος και την πρωτεύον ρύθμιση της συχνότητας. Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι τα οφέλη της δυναμικής ζήτησης αυξάνονται σημαντικά σε συστήματα με υψηλή διείσδυση αιολικής ενέργειας, καθιστώντας την (DD) μια ελκυστική επιλογή για τη σημαντική βελτίωση της αποτελεσματικότητας του συστήματος [5].

Οι συγγραφείς του [22], τόνισαν τη σημασία της ελάφρυνσης της ζήτησης από τους καταναλωτές που μπορούν να βοηθήσουν για να λύσουν μια σειρά από προβλήματα. Όπως αναφέρθηκε από τον M. Fahrioglu κ.ά., αυτό μπορεί να γίνει με μια ποικιλία από προγράμματα διαχείρισης της ζήτησης, αλλά ένα κρίσιμο ζήτημα είναι το κίνητρο που θα παρέχεται στον πελάτη, προκειμένου να συμμετάσχει σε τέτοιου είδους προγράμματα και να προσφέρει ανακούφιση από την πλευρά του φορτίου. Το βοηθητικό πρόγραμμα πρέπει να σχεδιαστεί οικονομικά αποδοτικό αλλά και με ελκυστικά συμβόλαια για να επιτευχθεί διαχείριση της ζήτησης. Ο κύριος στόχος είναι να έχουμε ελάφρυνση στην πλευρά του φορτίου, όταν το χρειαζόμαστε, και να γίνει με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Για τα συμβόλαια αυτά οι συγγραφείς υιοθέτησαν ένα μηχανισμό που να δίνει κίνητρο στα σχέδια πληρωμών για να ελκύσουν τους καταναλωτές και να μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ισχύ τους αναλόγως, χωρίς βέβαια να στερούν την ισχύ από μεμονωμένους καταναλωτές, αλλά με την συμμετοχή όσων περισσότερων γίνεται στην καταμέριση του φόρτου.

Όπως αναφέρθηκε από τον D. Papadaskalopoulos κ.ά. στα άρθρα τους, στα απορρυθμισμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η υλοποίηση της δυνατότητας ευελιξίας της ζήτησης θα πρέπει να συνδυαστεί με την ένταξη της στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κεντροποιημένοι μηχανισμοί στην αγορά έχουν προβλήματα επικοινωνίας, υπολογισμού και προστασίας, ενώ τα υφιστάμενα συστήματα δυναμικής τιμολόγησης αδυνατούν να συνειδητοποιήσουν την πραγματική αξία της ευελιξίας της ζήτησης. Σε αυτό το άρθρο, προτάθηκε μηχανισμός, ο οποίος συνδυάζει τη λύση βέλτιστων κεντροποιημένων μηχανισμών, με την συμμετοχή της αποκεντρωμένης δομής της ζήτησης των δυναμικών συστημάτων τιμολόγησης και ο οποίος βασίζεται στις αρχές χαλάρωσης Lagrangian (Lagrangian Relaxation principles).

Στο [37] οι συγγραφείς παρουσιάζουν το θεωρητικό υπόβαθρο, αλγοριθμικές προσεγγίσεις και κατάλληλα παραδείγματα για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που συνδέονται με την εφαρμογή του μηχανισμού, και παρέχουν ένα πλαίσιο εφαρμογής. Εντοπίζονται οι μη κυριότερες στις αποκρίσεις τιμών σε επαναπρογραμματιζόμενους συμμετέχοντες ζήτησης και οι επιπτώσεις τους στην βασική δομή του LR, ώστε να φτάσουν σε εφικτές και καθαρές λύσεις για την αγορά. Ενώ μια απλή αλλά αποτελεσματική και ευρετική μέθοδος LR έχει αναπτυχθεί για την παραγωγή εφικτών και υψηλής ποιότητας λύσεων, περιορίζοντας τη συγκεντρωμένη μετατόπιση της επαναπρογραμματιζόμενης ζήτησης στις ίδιες περιόδους χαμηλών τιμών.

Στο [38] απέδειξαν τη δυνατότητα εφαρμογής του μηχανισμού, λαμβάνοντας υπόψη δύο επαναπρογραμματιζόμενες τεχνολογίες ζήτησης με σημαντικές προοπτικές, δηλαδή ηλεκτρικά οχήματα με ευέλικτη δυνατότητα φόρτισης και ηλεκτρικά συστήματα αντλιών θερμότητας που συνοδεύεται με αποθήκευση θερμότητας για τη θέρμανση χώρων. Τα υπό-προβλήματα της ανταπόκριση των τιμών αυτών των τεχνολογιών διατυπώθηκαν, συμπεριλαμβανομένων λεπτομερών μοντέλων και των λειτουργικών τους ιδιοτήτων. Κατάλληλες μελέτες σε ένα μοντέλο του συστήματος του Ηνωμένου Βασιλείου, εξετάστηκαν προκειμένου να επικυρώσουν τις ιδιότητες του προτεινόμενου μηχανισμού και επεξηγούν και αναλύουν τα οφέλη που συνδέονται με τη συμμετοχή των εξεταζόμενων τεχνολογιών στην αγορά.

Σημαντική ερευνητική εργασία πραγματοποιήθηκε και στο [3]. Οι συγγραφείς τόνισαν το γεγονός ότι η δυναμική διαχείριση της ζήτησης είναι μια πολύ υποσχόμενη κατεύθυνση έρευνας για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και εξέτασαν το πρόβλημα της διαχείρισης της κατανάλωσης, μέσω «έξυπνου» ελέγχου θερμοστάτη των οικιακών ψυγείων. Στην προσέγγιση αυτή, η θερμοκρασία λειτουργίας των συσκευών αυτών και ως εκ τούτου η κατανάλωση ενέργειάς τους, τροποποιήθηκε δυναμικά, μέσα σε ένα ασφαλές εύρος, σε απόκριση προς τις διακυμάνσεις της συχνότητας δικτύου. Προηγούμενη έρευνα κατέδειξε τις δυνατότητες αυτής της ιδέας για αντιμετώπιση αιφνίδιας διακοπής σταθμού.

Ο P. J. Douglass κ.ά. στο [19] παρουσίασαν αποτελέσματα πειραμάτων με τη χρήση της ζήτησης ως συχνότητα ελέγχου αποθεματικού για τις συσκευές με προγραμματιζόμενους θερμοστάτες. Τα πειράματα που έγιναν έδειξαν την απόκριση πολλών θερμοστατικά ελεγχόμενων φορτίων που ενεργούν ως κανονικά αποθέματα (ρύθμιση πάνω και κάτω), και ως αποθεματικά διαταραχής (ρύθμιση μόνο πάνω), όπως ορίζεται από τους κώδικες του σκανδιναβικού δικτύου. Επιπλέον, βιομηχανικά φορτία αντλίας και φορτία ελεγχόμενα από relay έχουν ελεγχτεί ως αποθεματικό που ελέγχεται από την συχνότητα. Αυτές οι δοκιμές ήταν πολύ ελπιδοφόρες γιατί ένας μεγάλος αριθμός ψυγείων ήταν σε θέση να παραδώσει αποθεματικό συχνότητας περίπου ίσο με τη μέση κατανάλωση ρεύματος των ίδιων και οι ηλεκτρικές θερμάνσεις χώρων ήταν σε θέση να παρέχουν αποθεματικό συχνότητας μεγέθους 2,7 φορές της μέσης κατανάλωσης τους.

Η ρύθμιση της συχνότητας σε κλειστές-κανονικές συνθήκες ήταν ένα σημαντικό ζήτημα στο σχεδιασμό και τη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, και τώρα όλο και πιο κρίσιμο, λόγω του αυξανόμενου μεγέθους και της πολυπλοκότητας των διασυνδεδεμένων μεταξύ τους ΣΗΕ. Ο H.Bevrani κ.α. παρουσίασαν ένα αποκεντρωμένο πλαίσιο ελέγχου συχνότητας χρησιμοποιώντας ένα τροποποιημένο μοντέλο απόκρισης συχνότητας χαμηλής τάξης το οποίο περιέχει έναν αναλογικό-ολοκληρωτικό

(proportional-integral (PI)) ελεγκτή. Το προτεινόμενο πλαίσιο είναι κατάλληλο για συνθήκες λειτουργίας κοντά στις κανονικές και σε έκτακτες. Προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου με ένα παράδειγμα ΣΗΕ πολλαπλών περιοχών έδειξαν ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συμφωνούν με αυτά που έχουν προβλεφθεί αναλυτικά [10].

Στο [20] οι συγγραφείς παρουσίασαν μια νέα προσέγγιση για το σχεδιασμό ενός αποκεντρωμένου ελεγκτή για τον έλεγχο της συχνότητας του φορτίου των διασυνδεδεμένων περιοχών ρεύματος. Ο προτεινόμενος ελεγκτής συχνότητας φορτίου ασαφούς λογικής (fuzzy logic load frequency controller-FLFC) έχει σχεδιαστεί για να βελτιώσει την δυναμική επίδοση της συχνότητας και την γραμμή της ισχύος κάτω από μια ξαφνική αλλαγή φορτίου στις διασυνδεδεμένες περιοχές ρεύματος. Η επίδραση του περιορισμού δημιουργίας ρυθμού (generation rate constraint-GRC) και για τις δύο περιοχές έχει ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό του ελεγκτή. Η FLFC έχει συντονιστεί με τον ελεγκτή συμβατικής ολοκλήρωσης. Για να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης FLFC έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου με τη χρήση MATLAB / SIMULINK.

Έτσι διαμορφώθηκε μετά την ιεραρχική αρχιτεκτονική ελέγχου των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαστρωμάτωση των πρωτεύον, δευτερεύον και τριτογενή ελέγχων έχει γίνει το πρότυπο παράδειγμα για τη λειτουργία σε μεμονωμένα μικροδίκτυα. Παρά την επιφανειακή ομοιότητα, οι στόχοι του ελέγχου στα μικροδίκτυα σε αυτά τα τρία επίπεδα είναι ποικίλες και φιλόδοξες, και πρέπει να επιτευχθούν, επιτρέποντας για αξιόπιστη plug-and-play λειτουργία και μέγιστη ευελιξία, χωρίς ιεραρχική διαδικασία λήψης αποφάσεων και διαχωρισμούς χρονικών κλιμάκων.

Αυτό έγινε κίνητρο για τους συγγραφείς στο [18] ώστε να διερευνήσουν στρατηγικές ελέγχου για αυτά τα τρία στρώματα και να φωτίσει κάποιες ενδεχομένως, απρόσμενες συνδέσεις και εξαρτήσεις μεταξύ τους. Χτίζοντας από μια πρωταρχική ανάλυση, του αποκεντρωμένου πρωτεύον ελέγχου (primary droop control), ο F. Dörfler κ.ά. μελέτησαν κεντροποιημένες, αποκεντρωμένες, και διανεμημένες αρχιτεκτονικές για τη δευτερεύον ρύθμιση της συχνότητας. Βρήκαν ότι με βάση τον μέσο όρο των διανεμημένων ελεγκτών αυτοί που χρησιμοποιούν την επικοινωνία μεταξύ των μονάδων παραγωγής, προσφέρουν τον καλύτερο συνδυασμό ευελιξίας και απόδοσης. Επίσης μόγλευσαν αυτά τα αποτελέσματα για την μελέτη της περιορισμένης AC οικονομικής κατανομής σε ένα τριτογενή στρώμα ελέγχου. Παραδόξως, έδειξαν ότι η ελαχιστοποίηση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής είναι σε αντιστοιχία ένα-προς-ένα με το σύνολο στην σταθερή-κατάσταση και είναι προσβάσιμη με τον πρωτεύον έλεγχο. Με άλλα λόγια, η υιοθέτηση του πρωτεύον ελέγχου είναι αναγκαία και επαρκής για την επίτευξη της οικονομικής βελτιστοποίησης. Η ισοδυναμία αυτή έχει ως αποτέλεσμα σε απλές οδηγίες για να επιλεγούν οι συντελεστές του πρωτεύον ελέγχου, οι οποίες περιλαμβάνουν τα γνωστά κριτήρια για την κατανομή της ισχύος.

Μια νέα αποκεντρωμένη στρατηγική ελέγχου φόρτισης για τους μεγάλους πληθυσμούς των ηλεκτρικών οχημάτων (plug-in electric vehicles (PEVs)) αναπτύχθηκε στο [31]. Κάθε μία από τις κοινές στρατηγικές φόρτισης μέχρι τώρα μπορεί να προσεγγιστεί από ένα άπειρο όριο πληθυσμού που είναι η λύση του προβλήματος σταθερού σημείου. Ο στόχος του ελέγχου ήταν να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη θέσπιση ενός προγράμματος φόρτισης PEV που γεμίζει την καμπίλη της ζήτησης κατά την διάρκεια της νύχτας. Αυτό το άρθρο δείχνει ότι υπό ορισμένες ήπιες συνθήκες, υπάρχει ένα μοναδικό σημείο ισορροπίας Nash που σχεδόν ικανοποιεί αυτόν τον στόχο.

Επιπλέον, μέσα από αυτό το άρθρο, οι συγγραφείς δημιούργησαν μια ικανή συνθήκη σύμφωνα με την οποία το σύστημα συγκλίνει στο μοναδικό σημείο ισορροπίας Nash. Τα θεωρητικά αποτελέσματα απεικονίζονται μέσα από διάφορα αριθμητικά παραδείγματα.

3.2 Ενσωμάτωση Πρωτεύοντος-Δευτερεύοντος Αλγόριθμου για Βέλτιστο Έλεγχο φορτίου σε άπλες δυναμικές εξισώσεις ενός ΣΗΕ

Ο κύριος σκοπός του άρθρου αυτού ήταν να παράσχει μια ενιαία ερμηνεία μέσα σε ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης για τον έλεγχο του φορτίου βασισμένο στην τοπική μέτρηση της συχνότητας. Ο C. Zhao κ.ά. ανέπτυξαν ένα τέτοιο όπου τα φορτία που επηρεάζονται από την συχνότητα βρίσκονται υπό έλεγχο όταν συμβεί μια μικρή διαταραχή στην παραγωγή, προκειμένου να συγχρονιστούν οι συχνότητες των ζυγών και να ελαχιστοποιήσουν ένα μέτρο της συνολικής μη χρησιμότητας της συμμετοχής σε ένα τέτοιο έλεγχο φορτίου. Οι στόχοι αυτοί επισημοποιήθηκαν ως πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου φορτίου (Optimal Load Control) το οποίο λύνεται με ένα κατανεμημένο πρωτεύον-δευτερεύον αλγόριθμο που εξυπηρετείται από την σύζευξη των δυναμικών ταλαντώσεων και της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας με ένα τέτοιο φορτίο ελέγχου βασισμένο στην τοπική μέτρηση της συχνότητας. Οι συγγραφείς επίσης σύγκριναν την απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού με αυτόματο έλεγχο παραγωγής (AGC), και έδειξαν με προσομοιώσεις ότι η προσθήκη του προτεινόμενου μηχανισμού μπορεί να βελτιώσει την μεταβατική απόδοση του AGC.

Οι δυναμικές που υιοθετήθηκαν στο δίκτυο: Ο C. Zhao κ.ά. υιοθέτησαν ένα απλοποιημένο δίκτυο συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για τις προσομοιώσεις τους (swing dynamics). Το δίκτυο μεταφοράς περιγράφεται από ένα γράφημα $G = (V, E)$ όπου $V = \{1, \dots, N\}$ είναι το σύνολο των ζυγών και το E είναι το σύνολο των γραμμών μεταφοράς που συνδέει τους ζυγούς. Υιοθέτησαν τις ακόλουθες παραδοχές:

- Οι γραμμές $(i, j) \in E$ είναι χωρίς απώλειες και χαρακτηρίζονται από την επαγωγή τους \mathbf{x}_{ij} .
- Τα μεγέθη των τάσεων $|V_j|$ των ζυγών $j \in V$ είναι σταθερά
- Η προσφορά άεργου ισχύος στους ζυγούς και ροή άεργου ισχύος στις γραμμές αγνοείται.

Οι συγγραφείς υποθέτουν ότι η κατεύθυνση του G , είναι σε αυθαίρετο προσανατολισμό, έτσι ώστε αν $(i, j) \in E$, τότε το $(j, i) \notin E$. Χρησιμοποίησαν (i, j) και $i \rightarrow j$ εναλλακτικά για να υποδηλώσουν ένα σύνδεσμο στο E . Επίσης υπέθεσαν, το δίκτυο χωρίς γενική βλάβη με το G συνδεδεμένο. Για απλοποίηση των συμβολισμών, έχουν υποθέσει ότι όλες οι μεταβλητές αντιπροσωπεύουν αποκλίσεις από τις ονομαστικές τιμές (λειτουργίας) και είναι στο ανά μονάδα σύστημα.

Θεώρησαν ότι οι δυναμικές σε ένα ζυγό j με μια γεννήτρια προσομοιάζονται από την εξίσωση

$$M_j \dot{\omega}_j = P_j^m - P_j^e \quad (1)$$

όπου ω_j είναι η απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή, M_j είναι η σταθερά αδράνειας της γεννήτριας, P_j^m είναι η απόκλιση μηχανικής ενέργειας που διοχετεύεται στον ζυγό j από την ονομαστική της τιμή και P_j^e είναι η απόκλιση σε

ηλεκτρική ενέργεια από την ονομαστική της τιμή.

Όπου P_{ij} είναι η απόκλιση της ροής του κλάδου (branch) από τον ζυγό i στον j από την ονομαστική της τιμή. Έτσι, η εξίσωση μπορεί να γραφεί ως

$$\dot{\omega}_j = -\frac{1}{M_j} \sum_{l \in L(j)} (d_l + D_j \omega_j - P_j^m + P_j^{out} - P_j^{in}) \quad (2)$$

όπου τα P_j^{out} και P_j^{in} είναι οι ροές που βγαίνουν και μπαίνουν στον ζυγό j αντίστοιχα. Οι ροές των κλάδων P_{ij} ακολουθούν την

$$\dot{P}_{ij} = B_{ij} \omega^0 (\omega_i - \omega_j) \quad (3)$$

όπου ω^0 είναι η αρχική συχνότητα στην οποία βασίζεται η κατά μονάδα μετατροπή, και

$$B_{ij} = \frac{|V_i||V_j|}{X_{ij}} \cos(\theta_i^0 - \theta_j^0) \quad (4)$$

είναι μια σταθερά που σχετίζεται με τις ονομαστικές τάσεις των ζυγών και των αντιστάσεων των γραμμών.

Προτεινόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου: Για να φτιάξουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης οι συγγραφείς υπέθεσαν μια αλλαγή $P^m = (P_1^m, \dots, P_N^m)$ στην παραγωγή η οποία εκχύνεται στους N ζυγούς και ελέγχεται πώς τα φορτία στο δίκτυο $d = (d_l, l \in L(j))$ που είναι ευαίσθητα στην συχνότητα πρέπει να μειωθούν ή να αυξηθούν στην πραγματικότητα με τρόπο που θα ισορροπήσουν την πτώση ή την αύξηση της παραγωγής, θα επανασυγχρονίσουν τις συχνότητες των ζυγών και θα ελαχιστοποιήσουν ένα μέτρο της συνολικής μη χρησιμότητας της συμμετοχής τέτοιων φορτίων στον έλεγχο.

Στόχος των συγγραφέων ήταν να ελαχιστοποιήσουν το ολικό κόστος στο (d, \hat{d}) καθώς ισορροπούν την παραγωγή και την ζήτηση στο δίκτυο, έτσι το OLC γράφεται ως:

$$\min_{\underline{d} < d < \bar{d}, \hat{d}} \sum_{j \in V} \left(\sum_{l \in L(j)} c_l(d_l) + \frac{1}{2D_j} \hat{d}_j^2 \right) \quad (5)$$

δεδομένου ότι

$$\sum_{j \in V} \left(\sum_{l \in L(j)} d_l + \hat{d}_j \right) = \sum_{j \in V} (P_j^m) \quad (6)$$

Το προαναφερθέντα OLC πρόβλημα υποτίθεται ότι είναι εφικτό, και οι συναρτήσεις κόστους c_l είναι αυστηρά κυρτές και δύο φορές συνεχώς παραγωγίσιμες για $[\underline{d}_l, \bar{d}_l]$.

Και ο πρωτεύον-δευτερεύον αλγόριθμος για το DOLC παίρνει την μορφή

$$\dot{v}_j = \gamma_j \frac{\partial L}{\partial v_j}(v, \pi) \quad (7)$$

$$= -\gamma_j \left(\sum_{l \in L(j)} d_l(v_j) + D_j(v_j) - P_j^m + \pi_j^{out} - \pi_j^{in} \right) \quad (8)$$

$$\dot{\pi}_{ij} = -\xi_{ij} \frac{\partial L}{\partial \pi_{ij}}(v, \pi) = \xi(v_i - v_j) \quad (9)$$

Όπου $\gamma_j > 0$, $\xi_{ij} > 0$ είναι αλλαγές και το $\pi_j^{out} := \sum_{k: j \rightarrow k} \pi_{jk}$, $\pi_j^{in} := \sum_{i: i \rightarrow j} \pi_{ij}$.

Προτεινόμενα δυναμικά ελέγχου: Τα δυναμικά του συστήματος και οι προτεινόμενες διαδικασίες ελέγχου φορτίου συνοψίζονται παρακάτω:

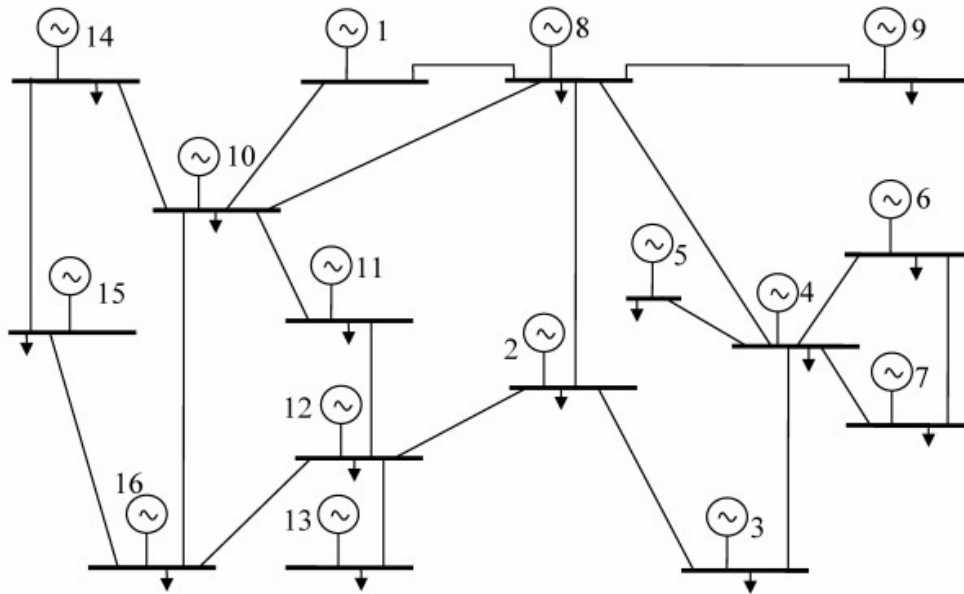
$$\dot{\omega}_j = -\frac{1}{M_j} \sum_{l \in L(j)} (d_l + D_j \omega_j - P_j^m + P_j^{out} - P_j^{in}) \quad (10)$$

$$\dot{P}_{ij} = B_{ij} \omega^0 (v_i - v_j) \quad (11)$$

$$\hat{d}_j(\omega_j) = D_j \omega_j \quad (12)$$

$$d_l(\omega_j) = [\hat{c}_j(\omega_j)] \begin{matrix} \overline{d}_l \\ \underline{d}_l \end{matrix} \quad (13)$$

Για τον έλεγχο της απόδοσης του προτεινόμενου μηχανισμού OLC, οι συγγραφείς έτρεξαν προσομοιώσεις σε ένα δίκτυο μεταφοράς 16-γεννητριών στο πρόγραμμα MATLAB. Θεώρησαν μια απλοποιημένη εκδοχή του συστήματος δοκιμής 16-γεννητριών, 68-ζυγών της διασύνδεσης New England / Νέα Υόρκη η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



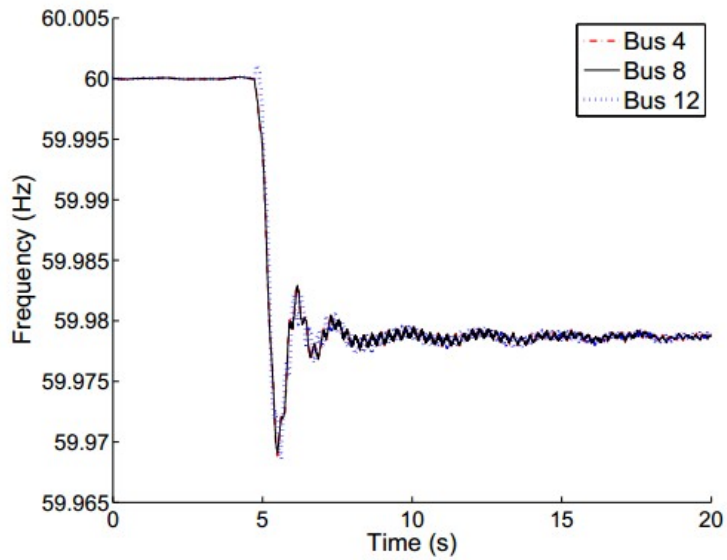
Σχήμα 3.1 Απλοποιημένη εκδοχή του συστήματος 16-γεννητριών για προσομοιώσεις [57]

Τα αποτελέσματά των συγγραφέων έχουν πολλές σημαντικές επιπτώσεις:

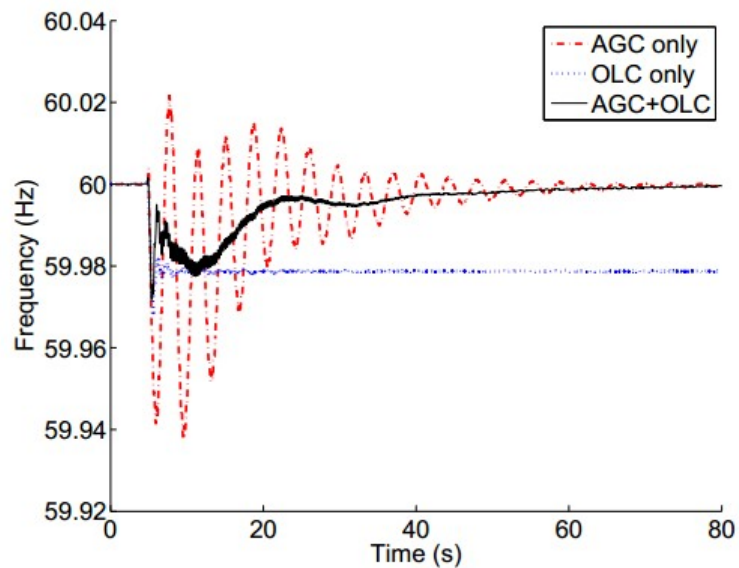
- *Έλεγχος συχνότητας βασισμένος στα φορτία*: Η συχνότητα στα φορτία τα οποία δεν επηρεάζονται από την συχνότητα μπορούν να ελεγχθούν με τη χρήση του ατομικού τους οριακού κόστους λειτουργίας σύμφωνα με το (22), που βασίζονται μόνο στις αποκλίσεις της συχνότητας $\omega_j(t)$ (από την ονομαστική τους τιμή), και αποτιμώνται στους τοπικούς τους ζυγούς.
- *Πλήρης αποκέντρωση*: Το αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι η τοπική απόκλιση της συχνότητας $\omega_j(t)$ σε κάθε ζυγό καταλήγει να μεταφέρει ακριβώς τη σωστή πληροφορία σχετικά με την παγκόσμια ανισοροπία ενέργειας ώστε τα φορτία από μόνα τους να παίρνουν βέλτιστες αποφάσεις με βάση τα δικά τους οριακά κόστη λειτουργίας. Αυτό τους επιτρέπει μια εντελώς αποκεντρωμένη λύση χωρίς την ανάγκη για σαφή επικοινωνία μεταξύ των ζυγών.
- *Reverse engineering των δυναμικών του συστήματος*: Ο έλεγχος φορτίων που είναι βασισμένα στην τοπική μέτρηση της συχνότητας (22), σε συνδυασμό με τη δυναμική (19) - (21) των swing equations και της ροής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμεύουν ως ένας πρωτεύον-δευτερεύον αλγόριθμος διανομής για την επίλυση του OLC και του δευτερεύον OLC.
- *Συχνότητα και ροές κλάδων*: Στο πλαίσιο του βέλτιστου ελέγχου φορτίου, οι αποκλίσεις συχνότητας $\omega_j(t)$ προκύπτουν ως οι πολλαπλασιαστές Lagrange του OLC που μετρούν το κόστος της ανισοροπίας της ισχύς, ενώ οι αποκλίσεις των ροών στους κλάδους προκύπτουν ως οι πολλαπλασιαστές Lagrange του δευτερεύον DOLC που μετρούν το κόστος σε περίπτωση μη συγχρονισμού της συχνότητας.
- *Μοναδικότητα λύσης*: Η βέλτιστη συχνότητα ω^* είναι μοναδική και ως εκ τούτου ο βέλτιστος έλεγχος του φορτίου (d^*, \hat{d}^*) είναι μοναδικός. Όπως έδειξαν, οι βέλτιστες ροές των κλάδων είναι μοναδικές, αν και μόνο αν το δίκτυο είναι δένδροειδούς μορφής. Ενώ ακόμη, για τα δίκτυα πλέγματος, κάθε τροχιά που δημιουργείται από τον έλεγχο φορτίου και των δυναμικών εξισώσεων, συγκλίνει όντως σε ένα βέλτιστο σημείο, με τη βέλτιστη τιμή του P^* που εξαρτάται από την αρχική κατάσταση.
- *Βέλτιστη συχνότητα*: Η δομή του δευτερεύον OLC σημαίνει ότι οι συχνότητες σε όλους τους ζυγούς συγχρονίζονται στο βέλτιστο. Επιπλέον, η κοινή απόκλιση συχνότητας ω^* στο βέλτιστο είναι σε γενικές γραμμές μη μηδενική. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι, ενώ ο έλεγχος φορτίων που είναι βασισμένα στην τοπική μέτρηση της συχνότητας και οι δυναμικές του συστήματος μπορούν να συγχρονίσουν τις συχνότητες των ζυγών σε μία μοναδική κοινή τιμή μετά από μία διαταραχή στην παραγωγή, η νέα συχνότητα μπορεί να είναι διαφορετική από την ονομαστική της τιμή. Άλλοι μηχανισμοί, όπως ο αυτόματος έλεγχος παραγωγής, θα χρειαστούν για να οδηγήσουν τη νέα συχνότητα λειτουργίας στην ονομαστική της τιμή.

Πολλά στοιχεία που δείχνουν την απόδοση του προτεινόμενου OLC και της απόδοσης του OLC όταν συνοδεύεται με τον αυτόματο έλεγχο παραγωγής (AGC) φαίνεται πιο κάτω.

Όπως φαίνεται από τα πιο στοιχεία, σε σύγκριση με την περίπτωση που χρησιμοποιείται μόνο AGC ο χρόνος αποκατάστασης μειώνεται και η υπερβάσεις και οι ταλαντώσεις μετριάζονται σημαντικά. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι η προσθήκη OLC μπορεί να βελτιώσει την μεταβατική απόδοση του AGC [57].



Σχήμα 3.2 Συχνότητες στους ζυγούς 4, 8, 12 με φορτία που χρησιμοποιούν το OLC [57].



Σχήμα 3.3 Συχνότητες στον ζυγό 12, με μόνο AGC, μόνο με OLC ή και με τα δύο [57].

3.3 Συνδυασμός Ελέγχου Αυτόματης Παραγωγής και Οικονομική Κατανομή από οπτική βελτιστοποίησης [30]

Ο πολλαπλασιασμός των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και η ανταπόκριση της ζήτησης στα μελλοντικά ηλεκτρικά δίκτυα, μπορεί να διακυμαίνεται γρήγορα και κατά ένα μεγάλο ποσό να σπρώχνει τους υφιστάμενους ελέγχους εξισορρόπησης της παραγωγής-ζήτησης στο να λειτουργούν οικονομικά αναποτελεσματικά. Έτσι, σε αυτό το άρθρο ο N. Li κ.ά. προτείνουν μια νέα τροποποίηση στο συμβατικό έλεγχο αυτόματης παραγωγής (AGC), ώστε να διατηρηθεί και / ή να βελτιωθεί η οικονομική του αποδοτικότητα. Αυτή η τροποποιημένη AGC, που ονομάζεται οικονομική AGC, διατηρεί αυτόματα την ονομαστική συχνότητα και φτάνει στη βέλτιστη κατανομή ισχύος μεταξύ των διαφόρων περιοχών ελέγχου για εξισορρόπηση της παραγωγής και της ζήτησης στο σύνολο των διασυνδεδεμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Προκειμένου να διατηρηθεί η ελάχιστη τροποποίηση και, επίσης, να διατηρηθεί η αποκεντρωμένη δομή του AGC, οι συγγραφείς πήραν μια «reverse and forward» μηχανική προσέγγιση για την ανάπτυξη της οικονομικής AGC. Κατ' αρχάς ανακατασκεύασαν την συμβατική AGC δείχνοντας ότι οι δυναμικές του ΣΗΕ με τις αντίστοιχες στην συμβατική AGC μπορούν να ερμηνευθούν ως αλγόριθμος μερικής πρωτεύον-δευτερεύον κλίσης για να λύσουν ένα συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια εισήγαγαν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης γενικά έξοδα παραγωγής, ότι αφορά την ισορροπημένη ροή ισχύος, και πρότειναν ένα καταναμημένο σύστημα ελέγχου παραγωγής που εντάχθηκε στο AGC. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που διαμόρφωσαν έχει το ίδιο βέλτιστο σημείο με το πρόβλημα οικονομικής κατανομής (ED), και έτσι το σύστημα ελέγχου διανομής που προκύπτει, ενσωματώνει αυτόματα την οικονομική κατανομή στο AGC.

Δυναμικές δικτύου που υιοθετήθηκαν: Θεώρησαν ένα δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που συμβολίζεται από ένα γράφημα $(\mathcal{N}, \mathcal{E})$, με ένα σύνολο ζυγών $\mathcal{N} = 1, \dots, N$ και ένα σύνολο $\mathcal{E} \subset \mathcal{N} \times \mathcal{N}$ γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τους ζυγούς (ο κάθε ζυγός μπορεί να υποδηλώνει ένα συγκεντρωτικό ζυγό ή περιοχή ελέγχου). Υποθέτουμε ότι το $(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ είναι συνδεδεμένο και καθοδηγείται, με ένα αυθαίρετο προσανατολισμό τέτοιο ώστε αν $(i, j) \in \mathcal{E}$, τότε $(j, i) \notin \mathcal{E}$. Δεδομένου ότι το έργο αυτό έχει σχέση με τον έλεγχο παραγωγής όταν υπάρχει μια αλλαγή στα καθαρά φορτία από το ονομαστικό τους (λειτουργικό) σημείο, το οποίο μπορεί να προκύψει από μια αλλαγή στη ζήτηση ή στην μη καταναμημένη παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και όλες οι μεταβλητές αντιπροσωπεύουν αποκλίσεις από τις ονομαστικές τους τιμές για απλοποίηση.

Οι συγγραφείς έθεσαν τις δυναμικές συχνότητας, τις δυναμικές ροές των κλάδων, τον έλεγχο της τουρμπίνας και του governor, και τον έλεγχο ACE. Αφού η AGC που είναι βασισμένη στο ACE και απαιτεί από κάθε περιοχή να απορροφήσει τις δικές της αλλαγές φορτίων της είναι οικονομικά αναποτελεσματική, είχε ως αποτέλεσμα οι συγγραφείς να προτείνουν την τροποποίηση της AGC βασισμένη στο ACE ώστε να διατηρήσει την ονομαστική συχνότητα και οδηγήσει τη μηχανική ισχύ εξόδου P_j^m , $j \in \mathcal{N}$ στην βέλτιστη λύση του προβλήματος ED:

$$\min \sum_{j \in \mathcal{N}} C_j(P_j^M) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } P_j^M = P_j^L + \sum_{k: j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i: i \rightarrow j} P_{ij}, \quad j \in \mathcal{N} \quad (2)$$

όπου κάθε γεννήτρια j συνεπάγεται κάποιο κόστος $C_j(P_j^M)$ όταν η ισχύς παραγωγής της είναι P_j^M . Η εξίσωση (3.3.2) επιβάλλει ισορροπημένη ροής ισχύος σε κάθε ζυγό. Η συνάρτηση κόστους $C_j(\cdot)$ θεωρείται ότι είναι συνεχής, κυρτή.

Εισήγαγαν τους πολλαπλασιαστές Lagrangian στους περιορισμούς του OGC έφτασαν στην λειτουργία Lagrangian. Χρησιμοποιώντας την λειτουργία αυτή και εφαρμόζοντας γραμμικό μετασχηματισμό ο αλγόριθμος μερικής πρωτεύον-δευτερεύον κλίσης έχει ως εξής:

$$\dot{\omega}_j = -\frac{1}{M_j} \left(D_j \omega_j - P_j^M + P_j^L + \sum_{k: j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i: i \rightarrow j} P_{ij} \right) \quad (3)$$

$$\dot{P}_{ij} = \varepsilon_{P_{ij}} (\omega_i - \omega_j) \quad (4)$$

$$\dot{P}_j^M = -\varepsilon_{P_j} \beta_j \left(P_j^M - \frac{\varepsilon_{\mu_j}}{K_j \beta_j} P_j^C + \frac{1 + \varepsilon_{\mu_j} M_j}{\beta_j} \omega_j \right) \quad (5)$$

$$\dot{P}_j^C = K_j \left(D_j \omega_j + \sum_{k: j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i: i \rightarrow j} P_{ij} \right) \quad (6)$$

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, οι δυναμικές του συστήματος με την AGC που είναι βασισμένη στην ACE (3.3.3) - (3.3.6) είναι ο αλγόριθμος μερικής πρωτεύον-δευτερεύον κλίσης για επίλυση ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης του κόστους OGC με ένα «restrictive» περιορισμό $P_j^M = P_j^L$ που απαιτεί ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης στο εσωτερικό κάθε περιοχής ελέγχου. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να καταστήσει το σύστημα οικονομικά αναποτελεσματικό. Με βάση την εικόνα που λαμβάνεται από το reverse engineering του συμβατικού AGC, οι συγγραφείς χαλάρωσαν αυτό τον περιορισμό και να πρότειναν ένα σύστημα AGC που κρατά την απόκλιση συχνότητας στο μηδέν και επιτυγχάνει οικονομική αποδοτικότητα.

Προτεινόμενο Πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου: Το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει ως εξής

$$\min \sum_{j \in N} C_j(P_j^M) + \sum_{j \in N} \left(\frac{D_j}{2} |\omega_j|^2 \right) \quad (7)$$

$$\text{s. t.} \quad P_j^M = P_j^L + D_j \omega_j + \sum_{k: j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i: i \rightarrow j} P_{ij} \quad (8)$$

$$P_j^M = P_j^L + \sum_{k: j \rightarrow k} \gamma_{jk} - \sum_{i: i \rightarrow j} \gamma_{ij} \quad (9)$$

όπου γ_{ij} είναι βοηθητικές μεταβλητές που εισάχθηκαν για να διευκολυνθεί ο σχεδιασμός του αλγόριθμου.

Προτεινόμενα δυναμικά ελέγχου: Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως και στην reverse engineering, ο N.Li κ.ά.. συμπλήρωσαν τον ακόλουθο αλγόριθμο μερικής πρωτεύον - δευτερεύον επίλυσης OGC-2

$$\omega_j = \lambda_j \quad (10)$$

$$P_{ij} = \varepsilon_{P_{ij}}(\lambda_i - \lambda_j) \quad (11)$$

$$\dot{P}_j^M = \varepsilon_{P_j}(\dot{C}_j(P_j^M) + \lambda_j + \mu_j) \quad (12)$$

$$\dot{\gamma}_{ij} = \varepsilon_{\gamma_{ij}}(\mu_i - \mu_j) \quad (13)$$

$$\dot{\lambda}_j = \varepsilon_{\lambda_j}(P_j^M - P_j^L - D_j \omega_j - \sum_{k: j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i: i \rightarrow j} P_{ij}) \quad (14)$$

$$\dot{\mu}_j = \varepsilon_{\mu_j}(P_j^M - P_j^L - \sum_{k: j \rightarrow k} \gamma_{jk} - \sum_{i: i \rightarrow j} \gamma_{ij}) \quad (15)$$

Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας γραμμικό μετασχηματισμό $\omega_j = \lambda_j$ και $P_j^C = K_j M_j (\lambda_j - \frac{1}{\varepsilon_{\mu_j M_j}} \mu_j)$ ο αλγόριθμος μερικής πρωτεύον-δευτερεύον κλίσης γίνεται:

$$\dot{\omega}_j = -\frac{1}{M_j} \left(D_j \omega_j - P_j^M + P_j^L + \sum_{k: j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i: i \rightarrow j} P_{ij} \right) \quad (16)$$

$$\dot{P}_{ij} = B_{ij} (\omega_i - \omega_j) \quad (17)$$

$$\dot{P}_j^M = -\frac{1}{T_j} \left(\frac{1 - R_j K_j M_j}{R_j} \dot{C}_j(P_j^M) - P_j^C + \frac{1}{R_j} \omega_j \right) \quad (18)$$

$$\dot{P}_j^C = -K_j \left(D_j \omega_j + \sum_{k: j \rightarrow k} (P_{jk} - \gamma_{jk}) - \sum_{i: i \rightarrow j} (P_{ij} - \gamma_{ij}) \right) \quad (19)$$

$$\dot{\gamma}_{ij} = \varepsilon_{\gamma_{ij}} \left(\left(M_i \omega_i - \frac{P_i^C}{K_i} \right) \varepsilon_{\mu_i} - \left(M_j \omega_j - \frac{P_j^C}{K_j} \right) \varepsilon_{\mu_j} \right) \quad (20)$$

Η διαφορά από προηγούμενως είναι οι μεταβλητές γ_{ij} και το οριακό κόστος $\dot{C}_j(\cdot)$ στον έλεγχο παραγωγής (3.3.18). Σημειώστε ότι το γ_{ij} μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις παρατηρήσιμες/μετρήσιμες μεταβλητές. Έτσι, ο παραπάνω αλγόριθμος είναι υλοποιήσιμος. Ωστόσο, ενδέχεται να μην είναι πρακτικό να προστεθεί επιπλέον μεταβλητή γ_{ij} για κάθε κλάδο $(i, j) \in \mathcal{E}$. Για να διευκολυνθεί περαιτέρω η εφαρμογή, συγγραφείς αφαίρεσαν το γ_{ij} και εισήγαγαν το γ_j για κάθε j ζυγό και αντικατέστησαν τις (3.3.13) και (3.3.14) με τις ακόλουθες δυναμικές:

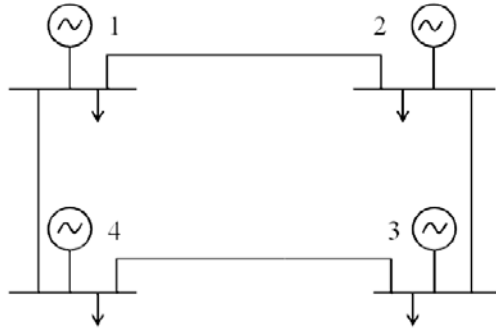
$$\dot{P}_j^C = -K_j \left(D_j \omega_j + \sum_{k: j \rightarrow k} (P_{jk} - \gamma_j + \gamma_k) - \sum_{i: i \rightarrow j} (P_{ij} - \gamma_i + \gamma_j) \right) \quad (21)$$

$$\dot{\gamma}_i = \varepsilon_{\gamma} \left(\left(M_i \omega_i - \frac{P_i^C}{K_i} \right) \varepsilon_{\mu_i} \right) \quad (22)$$

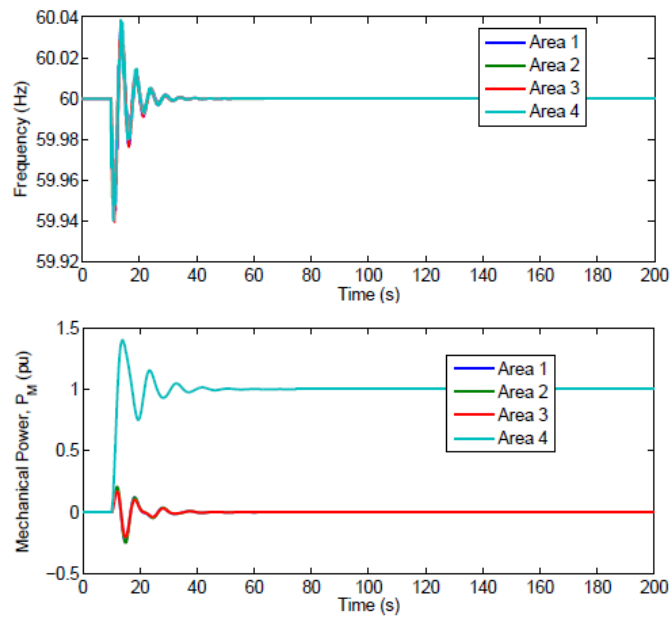
Το οποίο μας λέει ότι η εντολή αλλαγής της ισχύος P_j^C μπορεί να ελεγχθεί με τη χρήση

τοπικών μετρήσεων ω_j , P_{jk} , γ_j και τοπικές επικοινωνίες των γ_i , γ_k με τους γειτονικούς i , k όπου (i, j) , $(j, k) \in \mathcal{E}$.

Ο οικονομικός AGC δοκιμάστηκε και συγκρίθηκε με το συμβατικό AGC βασισμένο στο ACE σε ένα μικρό σύστημα 4 – περιοχών που αλληλοσυνδέονται (βλέπε σχήμα 3.4) Όπως μπορεί να φανεί στα ακόλουθα σχήματα 3.5 – 3.7, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το προτεινόμενο σύστημα AGC λειτουργεί καλά ακόμη και σε ένα τέτοιο μη-ιδανικό σύστημα. Επιπλέον, το οικονομικό AGC δεν ακολουθεί απλά βέλτιστη τιμή του ED προβλήματος αλλά εξομαλύνει και τις δυναμικές της συχνότητας [30].

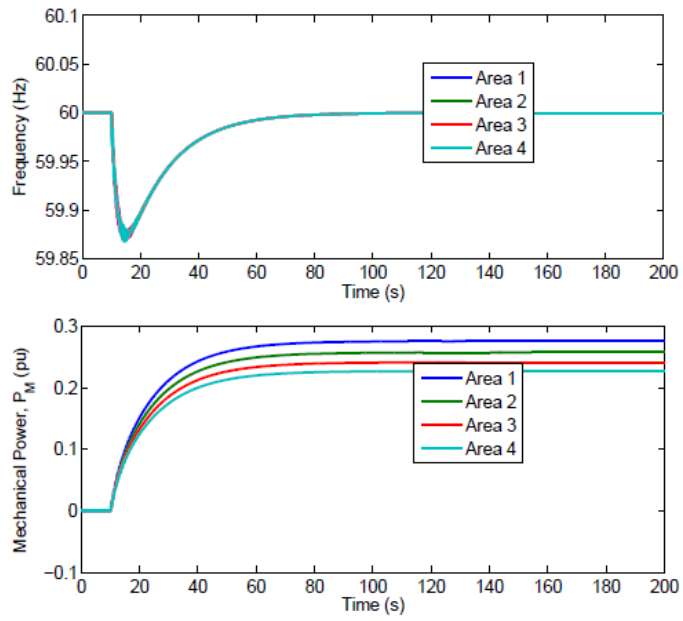


Σχήμα 3.4 Σύστημα τεσσάρων διασυνδεδεμένων περιοχών [30]

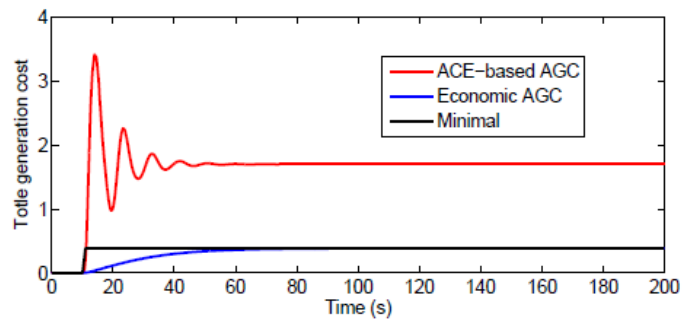


Σχήμα 3.5 AGC βασισμένο στο ACE [30]

3.3 Συνδυασμός Ελέγχου Αυτόματης Παραγωγής



Σχήμα 3.6 Οικονομικό AGC [30]



Σχήμα 3.7 Κόστος Παραγωγής [30]

3.4 Σχεδιασμός και Ευστάθεια του Πρωτεύον Ελέγχου Συχνότητας στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Μεριά των Φορτίων[54]

Σε αυτό το άρθρο, οι συγγραφείς παρουσίασαν μια συστηματική μέθοδο για το σχεδιασμό ενός πανταχού, συνεχούς, ταχείας δράσης, καταναμημένου έλεγχου φορτίου και καθόρισαν τη συνολική ασυμπτωτική ευστάθεια ενός πολυμήχανου δικτύου κάτω αυτού του τύπου πρωτεύον ελέγχου της συχνότητας. Η προσέγγισή τους επιτρέπει στα φορτία να επιλέγουν το δικό τους πρότυπο κατανάλωσης με βάση τις ανάγκες τους και την συνολική ανισορροπία ισχύς στο δίκτυο, που επιτυχαίνεται με την παραγωγή. Επίσης δίνεται μια τεχνική αναφορά για μια πιο αναλυτική παρουσίαση του πλαισίου που παρουσιάζεται στο άρθρο αυτό [53].

Δυναμικές εξισώσεις δικτύου που υιοθετήθηκαν: Το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας περιγράφεται από ένα γράφημα $(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ όπου $\mathcal{N} = \{1, \dots, |\mathcal{N}|\}$ είναι το σύνολο των ζυγών και $\mathcal{E} \subset \mathcal{N} \times \mathcal{N}$ είναι το σύνολο των γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τους ζυγούς. Υποθέτουμε ότι το $(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ είναι συνδεδεμένο και καθοδηγείται, με ένα αυθαίρετο προσανατολισμό τέτοιο ώστε αν $(i, j) \in \mathcal{E}$, τότε $(j, i) \notin \mathcal{E}$. Το προτεινόμενο δίκτυο έχει δύο τύπους ζυγών: Ζυγούς παραγωγής και ζυγούς φορτίων. Ένας ζυγός παραγωγής δεν έχει μόνο φορτία, αλλά και μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος που μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας περιστρεφόμενης κινητήριας μηχανής. Ενώ ένας ζυγός φορτίου έχει μόνο φορτία, αλλά δεν έχει γεννήτρια.

Οι συγγραφείς ακολούθως περιγράφουν τους ζυγούς παραγωγής και την εξίσωση που τους περιγράφει όπως φαίνεται παρακάτω:

$$M_j \Delta \dot{\omega}_j + D_j \Delta \omega_j = P_j^m - P_{loss,j}^0 - P_j^e \quad (1)$$

και τις ροές των κλάδων όπου οι αποκλίσεις ΔP_{ij} από τις ονομαστικές ροές των κλάδων ακολουθούν τις γραμμικές δυναμικές:

$$\Delta \dot{P}_{ij} = B_{ij} (\Delta \omega_i - \Delta \omega_j) \quad (2)$$

όπου

$$B_{ij} = 3 \frac{|V_i| |V_j|}{X_{ij}} \cos(\theta_i^0 - \theta_j^0) \quad (3)$$

είναι σταθερά που καθορίζεται από τις ονομαστικές τάσεις των ζυγών και την αντίσταση των γραμμών.

Ο C. Zhao κ.ά.. υπέθεσαν μια σταθερή διαταραχή $P^m = (P_j^m, j \in \mathcal{N})$ η οποία διαχέεται στο σύνολο των ζυγών \mathcal{N} . Ο στόχος τους ήταν να προσαρμόσουν τα ελεγχόμενα φορτία d_j για να αποκαταστήσουν την ισορροπία της ισχύς με τρόπο που να ελαχιστοποιεί τη συνολική δυσλειτουργία των φορτίων αυτών. Για να επιτευχθεί αυτό, πήραν μια εναλλακτική προσέγγιση διαμορφώνοντας απευθείας τον στόχο τους ως πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου φορτίου (OLC) και άντλησαν τον ελεγκτή ανατροφοδότησης ως ένα καταναμημένο αλγόριθμο για την επίλυση του OLC.

Προτεινόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου: Η αντικειμενική συνάρτηση του OLC αποτελείται από δύο κόστη. Κατ' αρχάς ας υποθέσουμε ότι το (συνολικό) ελεγχόμενο φορτίο στον ζυγό j πραγματοποιεί ένα κόστος (δυσλειτουργίας) $c_j(d_j)$, όταν μεταβάλλεται από το d_j . Δεύτερον, η απόκλιση της συχνότητας ω_j προκαλεί το (συνολικό) φορτίο στον ζυγό j που είναι ευαίσθητο στην συχνότητα να αλλάξει $\hat{d}_j = D_j \omega_j$. Έτσι, το OLC ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος στα d και \hat{d} επανεξισορροπώντας την παραγωγή και το φορτίο σε όλο το δίκτυο:

OLC:

$$\min_{\underline{d} < d < \bar{d}, \hat{d}} \sum_{j \in \mathcal{N}} \left(c_j(d_j) + \frac{1}{2D_j} \hat{d}_j^2 \right) \quad (4)$$

Δεδομένου ότι

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} (d_j + \hat{d}_j) = \sum_{j \in \mathcal{N}} (P_j^m) \quad (5)$$

Όπου $-\infty < \underline{d}_j \leq \bar{d}_j < \infty$. Το OLC είναι εφικτό και οι συναρτήσεις κόστους c_j είναι αυστηρώς κυρτές και δύο φορές συνεχόμενα παραγωγίσιμες στο $[\underline{d}_j, \bar{d}_j]$.

Αντί να λύσουν άμεσα το OLC, οι συγγραφείς προτείνουν την επίλυση του DOLC και να ανακτήσουν το μοναδικό βέλτιστο σημείο (d^*, \hat{d}^*) του OLC από το μοναδικό βέλτιστο σημείο v^* . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι:

- η αντικειμενική συνάρτηση Φ του DOLC είναι αυστηρά κοίλη στο $R^{|\mathcal{N}|}$
- Το DOLC έχει ένα μοναδικό βέλτιστο σημείο v^* με $v_i^* = v_j^* = v^*$ για όλα τα $i, j \in \mathcal{N}$
- Το OLC έχει ένα μοναδικό βέλτιστο σημείο (d^*, \hat{d}^*) όπου $d_j^* = d_j(v^*)$ και $\hat{d}_j^* = D_j v^*$ για όλα τα $j \in \mathcal{N}$.

Για να προκύψει μια κατανομημένη λύση του DOLC, οι συγγραφείς θεώρησαν την Lagrangian του.

Προτεινόμενες Δυναμικές Ελέγχου: Για λόγους ευκολίας, συλλέγουμε τις δυναμικές του συστήματος και τις εξισώσεις ελέγχου του φορτίου, όπως προτείνεται από τον C. Zhao κ.ά.:

$$\dot{\omega}_j = -\frac{1}{M_j} (d_j + \hat{d}_j - P_j^m + P_j^{out} - P_j^{in}), \forall j \in \mathcal{G} \quad (6)$$

$$0 = d_j + \hat{d}_j - P_j^m + P_j^{out} - P_j^{in}, \forall j \in \mathcal{L} \quad (7)$$

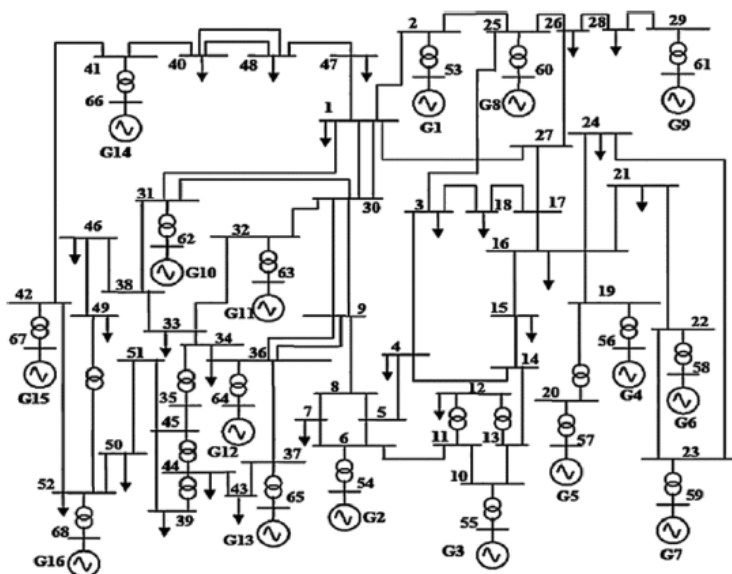
$$\dot{P}_{ij} = B_{ij} (\omega_i - \omega_j), \forall (i, j) \in \mathcal{E} \quad (8)$$

$$\hat{d}_j = D_j \omega_j, \forall j \in \mathcal{N} \quad (9)$$

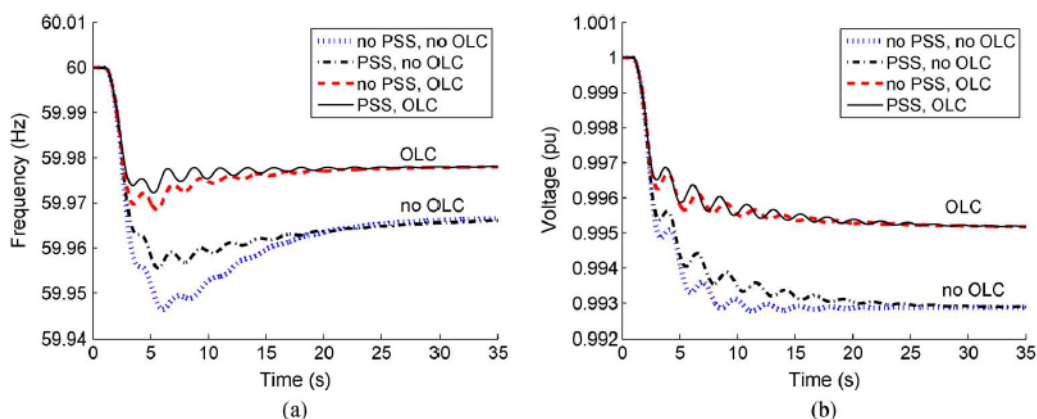
$$d_j = [\hat{c}_j^{-1}(\omega_j)] \frac{\bar{d}_j}{\underline{d}_j}, \forall j \in \mathcal{N} \quad (10)$$

Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν την μέθοδο Lyapunov για να μελετήσουν την σταθερότητα ενός συστήματος κλειστού βρόχου, και να αντλήσουν επαρκή προϋποθέσεις για

οποιοδήποτε σημείο ισορροπίας κλειστού βρόχου να είναι ασυμπλωτικά ευσταθές. Οι συγγραφείς απεικόνισαν την απόδοση του OLC μέσω της προσομοίωσης του δοκιμαστικού συστήματος διασύνδεσης IEEE 68-ζυγών Νέας Αγγλίας/Νέας Υόρκης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8 παρακάτω. Σε αντίθεση με το αναλυτικό τους μοντέλο, το πρόβλημα της προσομοίωσης είναι πολύ πιο λεπτομερές και ρεαλιστικό, το οποίο περιέχει δύο άξονες μοντέλου γεννήτριας υπομεταβατικής αντίδρασης, IEEE τύπου μοντέλου διεγέρτη DC1, κλασικό σταθεροποιητή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ροή ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος και μη μηδενική αντίσταση γραμμών. Περιμένουμε τις επιπτώσεις του OLC τόσο στη σταθερή κατάσταση όσο και στην μεταβατική απόκριση του συστήματος, από την άποψη τόσο της συχνότητας και της τάσης στο Σχήμα 3.9. Εν ολίγοις το OLC βελτιώνει τόσο την σταθερή κατάσταση και την παροδική απόδοση της συχνότητας, και γενικά η ανάπτυξη περισσότερων ελεγχόμενων φορτίων οδηγεί σε μεγαλύτερη βελτίωση [54].



Σχήμα 3.8 Μονοφασικό διάγραμμα του δοκιμαστικού συστήματος 68-ζυγών



Σχήμα 3.9 Το (a) για τη συχνότητα και το (b) για την τάση του ζυγού 66 για τις περιπτώσεις: (i) χωρίς PSS, χωρίς OLC? (ii) με PSS, χωρίς OLC? (iii) χωρίς PSS, με OLC? (iv) με PSS, με OLC [54].

Πολύ παρόμοιο με το [30] και το [54], είναι το έργο που επιτελείται από τους S.You κ.ά.. [49]. Στην εργασία αυτή, οι συγγραφείς ανακατασκεύασαν τη δυναμική συχνότητα με ένα γενικό πρωτεύον έλεγχο συχνότητας και έδειξαν ότι είναι ένας κατανεμημένος αλγόριθμος που μπορεί να λύσει ένα καλά καθορισμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Περαιτέρω διερεύνησαν τον ρόλο του deadband στον έλεγχο, και έδειξαν ότι, αν στο σύνολο η απόκλιση των μη ελεγχόμενων φορτίων είναι μη μηδενική, οι συχνότητες θα συγχρονιστούν, εάν όμως είναι μηδέν οι συχνότητες ίσως θα ταλαντώνονται, αλλά εντός της νεκρής ζώνης. S.You κ.ά.. απέδειξαν ότι το μοντέλο που είναι βασισμένο στην βελτιστοποίηση όχι μόνο παρέχει τρόπο για να χαρακτηρίσει το βέλτιστο σημείο και να δημιουργήσει τη σύγκλιση των δυναμικών της συχνότητας, αλλά προτείνει επίσης ένα τρόπο βασισμένο σε αρχές για να κατασκευάσει τον έλεγχο της συχνότητας. Με τη μόχλευση του προβλήματος βελτιστοποίησης και με ιδέες από την αντίστροφη μηχανική, σχεδίασαν ένα κατανεμημένο σύστημα ελέγχου συχνότητας σε πραγματικό χρόνο, που όχι μόνο διατηρεί τη συχνότητα στην ονομαστική της αξία, αλλά και που επιτυγχάνει οικονομική αποτελεσματικότητα.

3.5 Βέλτιστος Αποκεντρωμένος Πρωτεύον Έλεγχος Συχνότητας στα Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας [51]

Σε αυτό το άρθρο, ο C. Zhao κ.ά.. (i) έχουν σχεδιαστεί έναν πρωτεύον έλεγχο συχνότητας από κοινού στις πλευρές της γεννήτριας και του φορτίου, (ii) θεώρησαν ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο γεννήτριας, συμπεριλαμβάνοντας governor και δυναμικές τουρμπίνες, (iii) σχεδίασαν ένα εντελώς αποκεντρωμένο σύστημα ελέγχου στο οποίο κάθε γεννήτρια και φορτίο λαμβάνει την απόφασή του βασισμένο στην τοπική ανίχνευση της συχνότητας και το δικό του κόστος παραγωγής ή δυσλειτουργίας με τη συμμετοχή του στον έλεγχο του φορτίου, (iv) πέτυχαν σημεία ισορροπίας τα οποία χαρακτηρίζονται από ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που ονομάζεται βέλτιστος έλεγχος συχνότητας (OFC), το οποίο ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος παραγωγής, συν τη συνολική μη λειτουργικότητα απέναντι στον χρήστη, διατηρώντας παράλληλα τη ισορροπία ισχύς σε όλο το δίκτυο, και (v) εφάρμοσαν την μέθοδο Lyapunov σε ένα δυναμικό μοντέλο δικτύου με μη γραμμικές ροές πραγματικής ισχύος να αντλούν επαρκή προϋποθέσεις για την ασυμπτωτική ευστάθεια των σημείων ισορροπίας. Η εργασία τους δεν βασίζεται σε οποιοσδήποτε συγκεκριμένες τοπολογίες δικτύου, όπως δενδροειδής ή αστέρα.

Δυναμικές εξισώσεις δικτύου που υιοθετήθηκαν: Το δίκτυο ΣΗΕ που συμβολίζεται από ένα γράφημα $(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ όπου $\mathcal{N} = \{1, \dots, |\mathcal{N}|\}$ και ένα σύνολο $\mathcal{E} \subset \mathcal{N} \times \mathcal{N}$ γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τους ζυγούς (i, j) χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει την γραμμή που συνδέει τους ζυγούς $i, j \in \mathcal{N}$. Υποθέτουμε ότι το $(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ είναι συνδεδεμένο και καθοδηγείται, με ένα αυθαίρετο προσανατολισμό τέτοιο ώστε αν $(i, j) \in \mathcal{E}$, τότε $(j, i) \notin \mathcal{E}$. Ένα υποσύνολο $\mathcal{G} \in \mathcal{N}$ των ζυγών είναι φανταστικοί ζυγοί που αντιπροσωπεύουν το εσωτερικό των γεννητριών. Ως εκ τούτου, \mathcal{G} ονομάζεται το σύνολο των γεννητριών και $\mathcal{L} = \mathcal{N} / \mathcal{G}$ το σύνολο των ζυγών φορτίου. Οι ζυγοί επισημαίνονται έτσι ώστε $\mathcal{G} = \{1, \dots, |\mathcal{G}|\}$ και $\mathcal{L} = \{|\mathcal{G}| + 1, \dots, |\mathcal{N}|\}$.

Υπέθεσαν, χωρίς γενική βλάβη ότι $(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ είναι συνδεδεμένο, και έχουν κάνει τις ακόλουθες παραδοχές οι οποίες είναι καλά δικαιολογημένες για δίκτυα μεταφοράς:

- Οι γραμμές $(i,j) \in \mathcal{E}$ είναι χωρίς απώλειες και χαρακτηρίζονται από την αντίσταση τους.
- Τα μεγέθη της τάσης $|V_j|$ των ζυγών $j \in \mathcal{N}$ είναι σταθερά.
- Η διάχυση άεργου ισχύος στους ζυγούς και η ροή άεργου ισχύος στις γραμμές δεν υπολογίζονται.

Οι δυναμικές του συστήματος περιγράφονται από την εξίσωση

$$M_j \dot{\omega}_j = -D_j \omega_j + p_j - F_j(\theta) \quad j \in \mathcal{N} \quad (1)$$

όπου $M_j > 0$ για $j \in \mathcal{G}$ είναι οι στιγμές αδράνειας των γεννητριών και $M_j = 0$ για $j \in \mathcal{L}$, και $D_j > 0$ για κάθε $j \in \mathcal{N}$ είναι οι συντελεστές απόσβεσης των γεννητριών ή οι συντελεστές των γραμμικά εξαρτώμενων φορτίων. Η μεταβλητή p_j υποδηλώνει την διάχυση πραγματική ισχύς στον ζυγό j , το οποίο είναι η διάχυση μηχανικής ισχύς στην γεννήτρια αν $j \in \mathcal{G}$, και είναι η αρνητική πραγματικής ισχύς του φορτίου, αν $j \in \mathcal{L}$.

Προτεινόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου: Στόχος τους ήταν να αποκαταστήσει την ισορροπία της ισχύς μετά από μια διαταραχή με ελάχιστο κόστος παραγωγής και μη λειτουργικότητας απέναντι στον χρήστη. Αυτό επισημοποιήθηκε απαιτώντας από οποιοδήποτε σημείο ισορροπίας κλειστού βρόχου (p^*, d^*) να είναι μια λύση του παρακάτω προβλήματος OFC, όπου $d_j^* = D_j \omega_j^*$ για $j \in \mathcal{N}$.

OFC:

$$\min_{p,d} \sum_{j \in \mathcal{N}} \left(c_j(p_j) + \frac{1}{2D_j} \hat{d}_j^2 \right) \quad (2)$$

Δεδομένου ότι

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} (p_j + d_j) = 0 \quad (3)$$

$$\underline{p}_j \leq p_j \leq \bar{p}_j, \quad j \in \mathcal{N} \quad (4)$$

Ο όρος $c_j(p_j)$ στην αντικειμενική συνάρτηση (3.5.3) είναι το κόστος παραγωγής ή η μη λειτουργικότητα έναντι του χρήστη για την συμμετοχή του στον έλεγχο του φορτίου. Ο όρος $\frac{1}{2D_j} \hat{d}_j^2$ έχει ελάχιστο αντίκτυπο στην απόκλιση της συχνότητας του ζυγού j από το σημείο ισορροπίας του. Ο περιορισμός (3.5.3) εξασφαλίζει την ισορροπία σε ολόκληρο το δίκτυο, και η (3.5.4) είναι τα όρια για τις διαχύσεις ισχύος. Αυτά τα όρια καθορίζονται από το μέγεθος ελέγχου που μπορούν να έχουν οι γεννήτριες ή τα ελεγχόμενα φορτία, καθώς και από τις μη ελεγχόμενες διαχύσεις ισχύος ως εξωγενείς εισόδους. Το OFC υποθέτουμε ότι είναι εφικτό και οι συναρτήσεις κόστους είναι αυστηρά κυρτές και δύο φορές συνεχώς παραγωγίσιμες στο $(\underline{p}_j, \bar{p}_j)$.

Προτεινόμενες Δυναμικές Ελέγχου: Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν το OFC για να καθοδηγήσουν το σχεδιασμό του ελεγκτή. Καθόρισαν το σχεδιασμό τους και στη συνέχεια απέδειξαν ότι οποιοδήποτε κλειστό-σημείο ισορροπίας προκύψει, είναι η μοναδική λύση

του OFC προβλήματος. Παρόμοια με το [54], σχεδίασαν τα $p_G^c(\omega), p_L(\omega)$ ως

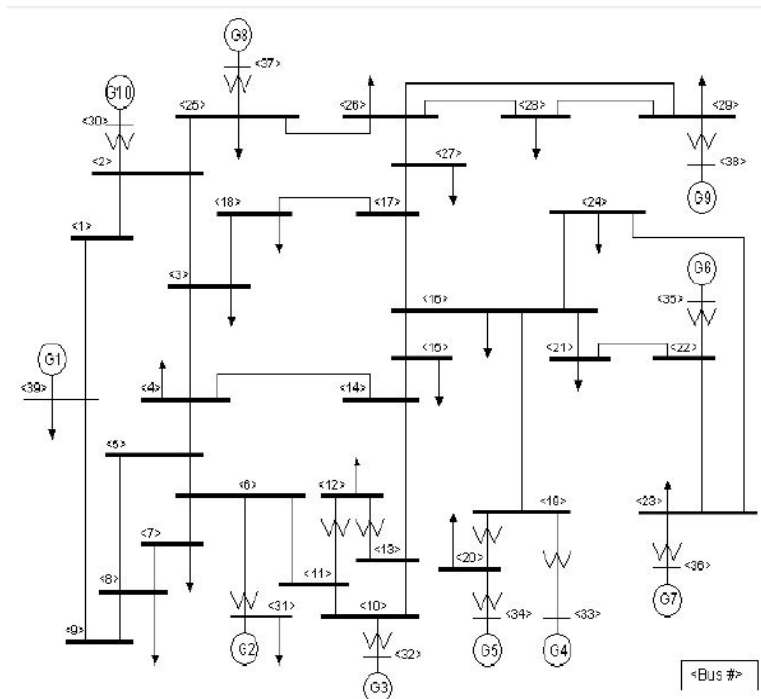
$$p_j^c(\omega_j) = [(c_j')^{-1}(-\omega_j)]_{\underline{p}_j}^{\bar{p}_j} \quad j \in \mathcal{G} \quad (5)$$

$$p_j(\omega_j) = [(c_j')^{-1}(-\omega_j)]_{\underline{p}_j}^{\bar{p}_j} \quad j \in \mathcal{L} \quad (6)$$

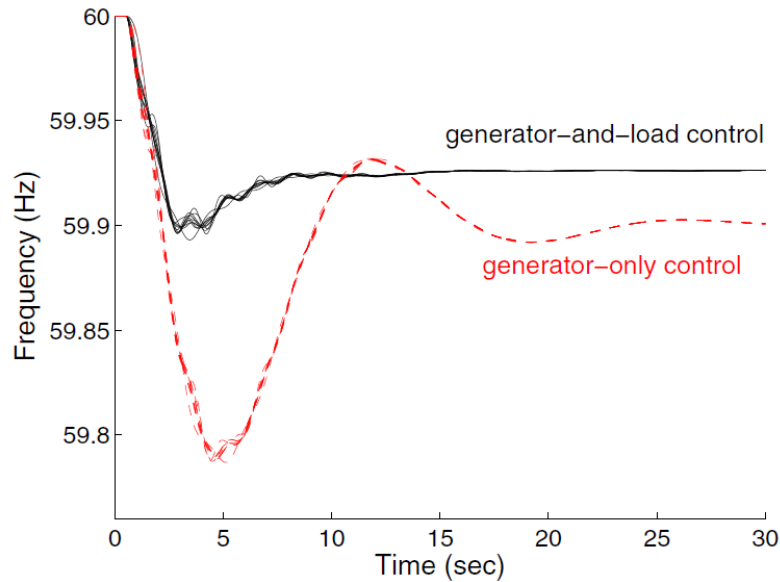
Η συνάρτηση $(c_j')^{-1}(\cdot)$, η οποία είναι η αντίστροφη συνάρτηση της παραγώγου της συνάρτησης κόστους, είναι καλά καθορισμένη, εάν η συνάρτηση κόστους είναι αυστηρά κυρτή και δύο φορές συνεχώς παραγωγίσιμη όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Σημειωτέο ότι ο έλεγχος αυτός είναι πλήρως αποκεντρωμένος στο ότι για κάθε γεννήτρια και φορτίο που είναι αναπροσαρμοσμένα από το j , η απόφαση ελέγχου είναι μια συνάρτηση απόκλισης της συχνότητας, ω_j , η οποία μετράται στον τοπικό της ζυγό. Μόνο η δική της συνάρτηση κόστους c_j και τα όρια της $[\underline{p}_j, \bar{p}_j]$ πρέπει να είναι γνωστά.

Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τη μέθοδο Lyapunov για τη μελέτη της σταθερότητας του συστήματος κλειστού-βρόχου, και άντλησαν επαρκής προϋποθέσεις για οποιοδήποτε σημείο ισορροπίας κλειστού-βρόχου για να είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. Η προσέγγισή τους για την ανάλυση της σταθερότητας είναι συνθετική, στο ότι βρίσκουν υποψήφιες συναρτήσεις Lyapunov ξεχωριστά για το δίκτυο με έλεγχο φορτίου και για τις γεννήτριες, και τις προσθέτουν μέχρι να σχηματίσουν μια συνάρτηση Lyapunov.

Απεικονίζουν την απόδοση του προτεινόμενου ελέγχου μέσω της προσομοίωσης του δοκιμαστικού συστήματος IEEE Νέας Αγγλίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Μια προσομοίωση δείχνει ότι σε συνδυασμό της γεννήτρια και του ελέγχου του φορτίου έχουμε βελτίωση στην παροδική και στην σταθερή κατάσταση της συχνότητας, σε σύγκριση με τον παραδοσιακό έλεγχο μόνο σε γεννήτριες, ακόμα και όταν η συνολική δυνατότητα ελέγχου παραμένει η ίδια. Η απόδοση του OFC φαίνεται στο Σχήμα 3.11 [51].



Σχήμα 3.10 IEEE Δοκιμαστικό σύστημα Νέας Αγγλίας [51]



Σχήμα 3.11 Συχνότητες και των 10 γεννητριών κάτω από (1) ελεγχόμενες γεννήτριες μόνο (κόκκινη) και κάτω από (2) ελεγχόμενες γεννήτριες και φορτία (μαύρη). Το συνολικό μέγεθος ελέγχου είναι το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις [51].

3.6 Κατανεμημένη Συχνότητα για την Διατήρηση του Βέλτιστου Ελέγχου Φορτίου [33]

Ο E Mallada κ.ά. ακολουθήσαν το πλαίσιο που παρουσιάζεται στο [53], όπου ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης (OLC) για πρώτη φορά σχεδιάστηκε και ο έλεγχος του φορτίου ως εκ τούτου προέρχεται ως αλγόριθμος μερικής πρωτεύον-δευτερεύον για την επίλυση του δευτερεύον προβλήματος Lagrangian. Σε αυτό το άρθρο, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν το ίδιο μοντέλο και να τροποποιούν το OLC έτσι ώστε η βέλτιστη λύση του να αποκαθιστά την ονομαστική τιμή της συχνότητας. Στη συνέχεια αντλούν το δικό τους σύστημα ελέγχου φορτίου ως πρωτεύον-δευτερεύον αλγόριθμο για το τροποποιημένο OLC. Σε αντίθεση με τον έλεγχο στο [53] που είναι εντελώς αποκεντρωμένος, το σύστημα τους απαιτεί από κάθε ζυγό να επικοινωνεί μέσω ενός πολλαπλασιαστή Lagrange με τους γείτονές του. Αποδεικνύουν ότι ο σχεδιασμός τους είναι ασυμπτωτικά σταθερός και ότι συγκλίνει σε μία βέλτιστη λύση του τροποποιημένου OLC.

Δυναμικές δικτύου που υιοθετήθηκαν: Θεωρούμε ένα δίκτυο ΣΗΕ που συμβολίζεται από ένα γράφημα $\mathcal{G}(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ όπου $\mathcal{N} = \{1, \dots, |\mathcal{N}|\}$ είναι το σύνολο των ζυγών και $\mathcal{E} \subset \mathcal{N} \times \mathcal{N}$ είναι το σύνολο των γραμμών μεταφοράς που συμβολίζονται είτε από το e είτε από τα ij έτσι ώστε εάν τα $ij \in \mathcal{E}$ τότε τα $ji \in \mathcal{E}$. Οι συγγραφείς στεγανοποίησαν τους ζυγούς $\mathcal{N} = \mathcal{G} \cup \mathcal{L}$ και τη χρησιμοποιούν τα \mathcal{G} και \mathcal{L} για να υποδηλώσουν το σύνολο των γεννητριών και τα φορτία των ζυγών αντίστοιχα. Η εξέλιξη του δικτύου μεταφοράς περιγράφεται από

$$M_j \dot{\omega}_j = P_i^m - (d_i + \hat{d}_i) - \sum_{e \in \mathcal{E}} (C_{ie} P_e) \quad i \in \mathcal{G} \quad (1)$$

$$0_i = P_i^m - (d_i + \hat{d}_i) - \sum_{e \in \mathcal{E}} (C_{ie} P_e) \quad i \in \mathcal{L} \quad (2)$$

$$\dot{P}_{ij} = B_{ij} (\omega_i - \omega_j) \quad (3)$$

όπου το d_i υποδηλώνει ένα συνολικό ελεγχόμενο φορτίο, το $\hat{d}_i = D_i \omega_i$ υποδηλώνει ένα συνολικό μη ελεγχόμενο, αλλά ευαίσθητο στην συχνότητα φορτίο, καθώς και την απώλεια απόσβεσης στη γεννήτρια i . Το M_i είναι η αδράνεια της γεννήτριας, το P_i^m είναι η μηχανική ισχύς που διοχετεύεται από μια γεννήτρια $i \in \mathcal{G}$, το $-P_i^m$ είναι η συνολική ισχύς που καταναλώνεται από σταθερά φορτία για $i \in \mathcal{L}$, και το P_{ij} είναι η γραμμή ροής πραγματική ισχύς από το i στο j . Τέλος, το C_{ie} είναι τα στοιχεία του εμφανιζόμενου πίνακα $C \in \mathbb{R}^{|\mathcal{N}| \times |\mathcal{E}|}$ του γραφήματος \mathcal{G} τέτοια ώστε $C_{ie} = -1$ αν $e = ji \in \mathcal{E}$, $C_{ie} = 1$, αν $e = ij \in \mathcal{E}$ και $C_{ie} = 0$ διαφορετικά.

Προτεινόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου: Η ουσία της λύσης τους προέρχεται από το σχεδιασμό ενός βέλτιστου προβλήματος ελέγχου φορτίου στο οποίο η βέλτιστη λύση ικανοποιεί

$$\hat{d}_i^* = D_i v_i^*, \quad \hat{d}_i^* = 0 \quad (4)$$

διατηρώντας τους περιορισμούς ροής που παρουσιάζονται στο OLC στο [53]. Έτσι οι συγγραφείς διατύπωσαν ένα πρόβλημα Βέλτιστου Ελέγχου Φορτίου στο οποίο οι αποκλίσεις της συχνότητας εξακολουθούν να αντιπροσωπεύουν πολλαπλασιαστές Lagrange, με την βέλτιστη λύση να έχει $\omega_i^* = \hat{d}_i^*/D_i = 0$. Ως εκ τούτου, οποιοσδήποτε κατανεμημένος έλεγχος που προέρχεται από αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης θα αποκαταστήσει την συχνότητα στην ονομαστική της αξία μετά από μια διαταραχή.

OLC:

$$\min_{d, \hat{d}} \sum_{j \in \mathcal{N}} \left(c_j(d_j) + \frac{\hat{d}_j^2}{2D_j} \right) \quad (5)$$

Δεδομένου ότι

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} (d_j + \hat{d}_j) = \sum_{j \in \mathcal{N}} (P_j^m) \quad (6)$$

Ως εκ τούτου, προτείνουν το ακόλουθο πρόβλημα Βέλτιστου Ελέγχου φορτίου (FP-OLC) Διατήρησης – Συχνότητας

FP-OLC:

$$\min_{d, \hat{d}, P, R} \sum_{j \in \mathcal{N}} \left(c_j(d_j) + \frac{\hat{d}_j^2}{2D_j} \right) \quad (7)$$

Δεδομένου ότι

$$P_i^m - (d_i + \hat{d}_i) = \sum_{e \in \mathcal{E}} (C_{ie} P_e), \quad i \in \mathcal{N} \quad (8)$$

$$P_i^m - d_i = \sum_{e \in \mathcal{E}} (C_{ie} P_e), \quad i \in \mathcal{N} \quad (9)$$

όπου (3.6.9) είναι ένας επιπλέον περιορισμός που εγγυάται την δεύτερη ισότητα της

(3.6.4). Είναι επίσης δεδομένο ότι το FP-OLC είναι εφικτό και η συνάρτηση κόστους $c_i(\cdot)$ είναι αυστηρά κυρτή και δεύτερης τάξης παραγωγίσιμη $[d_i, \bar{d}_i]$. Περαιτέρω, για να

καταλάβουν πώς η (3.6.4) ικανοποιείται στο FP-OLC, θεώρησαν ένα δευτερεύον πρόβλημα FP-OLC.

Προτεινόμενες Δυναμικές Ελέγχου: Αυτή η παρατήρηση κίνητρο υποκίνησε τους συγγραφείς να προτείνουν το ακόλουθο διανεμημένο σύστημα ελέγχου φορτίου:

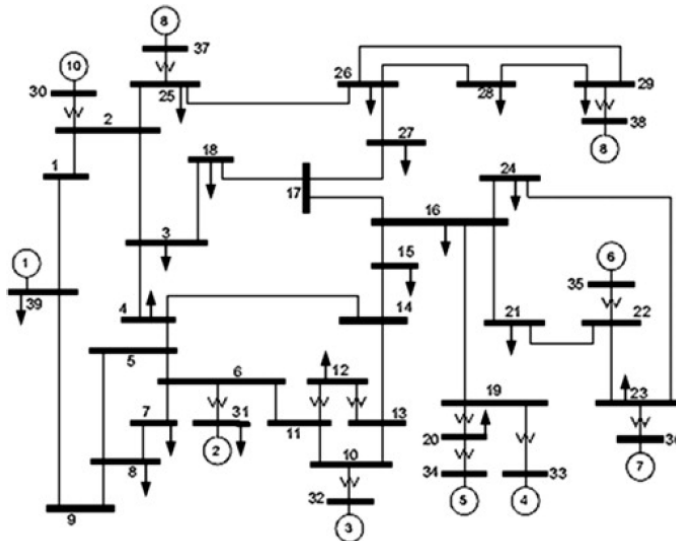
$$\dot{\lambda}_i = \gamma_i (P_i^m - d_i - \sum_{e \in E} (C_{ie} P_e)), \quad i \in N \quad (10)$$

$$\dot{R}_{ij} = a_{ij} (\lambda_i - \lambda_j), \quad i \in E \quad (11)$$

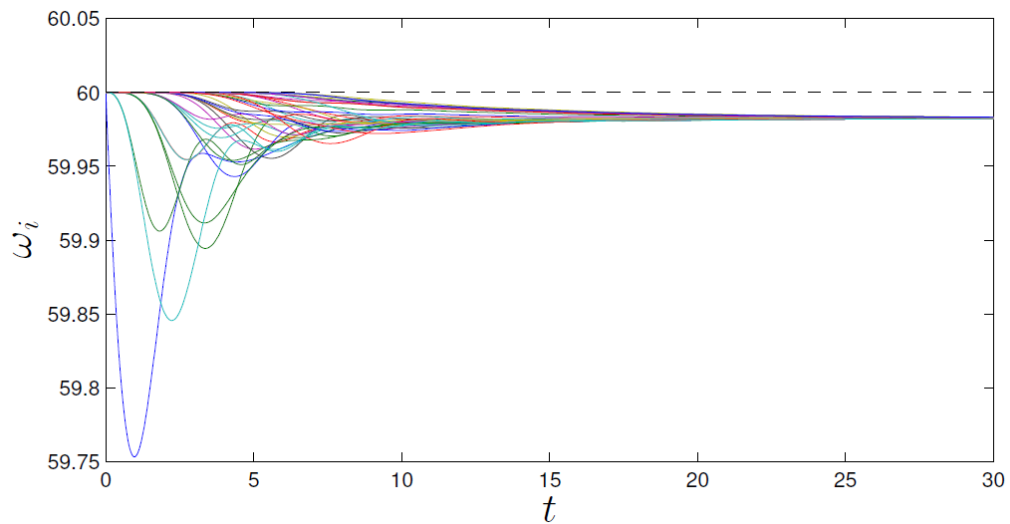
$$d_i = c_j'^{-1} (\omega_i + \lambda_i), \quad i \in N \quad (12)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις δείχνουν πώς οι δυναμικές του δικτύου μπορούν να συμπληρωθούν με δυναμικό έλεγχο φορτίου, τέτοιον ώστε το συνολικό σύστημα να ανέρθει σε ένα κατανεμημένο πρωτεύον-δευτερεύον αλγόριθμο που προσπαθεί να βρει ένα σημείο σταθεροποίησης στο $L(x, \sigma)$.

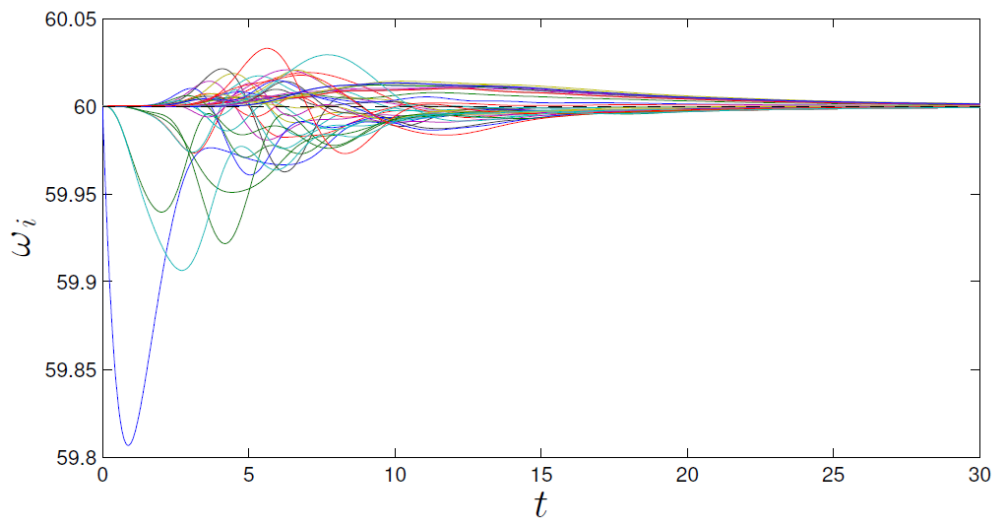
Οι συγγραφείς, με τη χρήση της σταθερότητας Lyapunov, δείχνουν ότι το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου ωθεί το σύστημα να συγκλίνει ασυμπτωτικά προς την επιθυμητή σημείο ισορροπίας κλειστού βρόχου. Απεικονίζουν τη συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου τους και να το συγκρίνουν με αυτό που προτείνεται προηγουμένως στο [53]. Τα προτεινόμενα συστήματα ελέγχου εξετάστηκαν χρησιμοποιώντας την εργαλειοθήκη PST, στο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα IEEE 39 ζυγών (Σχήμα 3.12). Από τα Σχήματα 3.13 και 3.14 μπορεί να φανεί ότι, ενώ οι ελεγκτές φορτίου του OLC αποτυγχάνουν να ανακτήσουν την ονομαστική τιμή της συχνότητας, οι ελεγκτές του FP-OLC μπορούν να εξισορροπήσουν από κοινού την ισχύ, καθώς και να ανακτήσουν την ονομαστική τιμή της συχνότητας [33].



Σχήμα 3.12 Δοκιμαστικό σύστημα IEEE 39 ζυγών [33].



Σχήμα 3.13 Εξέλιξη συχνότητας χρησιμοποιώντας ελεγκτές OLC [33].



Σχήμα 3.14 Εξέλιξη συχνότητας χρησιμοποιώντας ελεγκτές FP-OLC [33].

3.7 Εσωστρεφείς Μέθοδος Προσέγγισης Ρύθμισης της Συχνότητας σε Δίκτυα Παροχής Ηλεκτρικής Ενέργειας [45]

Ο σκοπός του άρθρου αυτού ήταν να προσφέρει ένα διαφορετικό πλαίσιο στο οποίο το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εκμετάλλευση της αυξημένης παθητικής φύσης του δυναμικού συστήματος που υιοθετήθηκε στην μοντελοποίηση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και του μοντέλου που είναι βασισμένο σε εσωστρεφή ελεγκτές. Οι τελευταίοι είναι σε θέση να επιτύχουν μια οικονομικά αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που να ελέγχει την πιθανή παρουσία χρονικά μεταβαλλόμενης ζήτησης ισχύος. Οι συγγραφείς επικεντρώθηκαν σε ένα μοντέλο τρίτης τάξης με μεταβαλλόμενες στον χρόνο τάσεις γνωστό ως «μοντέλο διάσπασης ροής», το οποίο αν και απλοϊκό, είναι προσιτό, ουσιαστικό.

Αφότου έδειξαν ότι το δυναμικό πρόβλημα που υιοθετήθηκε για να περιγράψει το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα αυξητικά παθητικό σύστημα σε σχέση με τις λύσεις που

παρουσιάζουν ενδιαφέρον (λύσεις για τις οποίες η απόκλιση συχνότητας είναι μηδέν), οι συγγραφείς παρέχουν μια συστηματική μέθοδο για το σχεδιασμό μοντέλου παραγωγής που βασίζεται σε εσωστρεφείς ελεγκτές, οι οποίοι είναι σε θέση να εξισορροπούν την ισχύ των φορτίων, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το κόστος παραγωγής σε σταθερή κατάσταση. Αυτός ο σχεδιασμός εκπονήθηκε πρώτα με την επίλυση των εξισώσεων ρύθμισης που σχετίζονται με το πρόβλημα ρύθμισης της συχνότητας. Μεταξύ των ζευγαριών σύγχρονων λύσεων και παραγωγής με εμπροσθόδρομη τροφοδοσία που επιλύουν τις εξισώσεις ρύθμισης, ξεχωρίζουν το ζευγάρι για το οποίο λύνεται το στατικό βέλτιστο πρόβλημα παραγωγής. Στη συνέχεια, προτείνεται ένας αυξητικά παθητικός ελεγκτής που είναι βασισμένος σε εσωστρεφή μοντέλο και ο οποίος είναι σε θέση να παράγει την επιθυμητή είσοδο εμπροσθόδρομης τροφοδοσίας σε ανοικτό βρόχο και να σταθεροποιηθεί το σύστημα κλειστού βρόχου με τέτοιο τρόπο ώστε όλες οι λύσεις να συγκλίνουν προς την επιθυμητή σύγχρονη λύση και στον βέλτιστο έλεγχο παραγωγής.

Δυναμικές δικτύου που υιοθετήθηκαν: Ο S. Trip κ.ά. εστίασαν στις δυναμικές εξισώσεις για να λάβουν υπόψη τις δυναμικές της συχνότητας και σε σύγκριση με το πρόσφατο έργο που αφορά επίσης την βέλτιστη ρύθμιση της συχνότητας, δεν υποθέτουν σταθερές τάσεις. Θα προτιμούσαν να χρησιμοποιούν ένα εκτεταμένο μοντέλο το οποίο συλλαμβάνει απαραίτητες δυναμικές τάσεις συμπεριλαμβανομένων των τάσεων ως μια συγκεκριμένη περίπτωση, και διαθέτει μερικές αυξητικές ιδιότητες παθητικότητας οι οποίες είναι απαραίτητες για την προσέγγισή του προβλήματος. Σε αυτό το έργο, οι συγγραφείς υποθέτουν ότι το ηλεκτρικό δίκτυο χωρίζεται σε μικρότερες περιοχές, όπως περιοχές ελέγχου, όπου η δυναμική συμπεριφορά μιας περιοχής μπορεί να περιγραφεί από μια ισοδύναμη ενιαία γεννήτρια ως αποτέλεσμα της συνοχής και της τεχνικής συνάθροισης.

Θεωρούμε ένα ηλεκτρικό δίκτυο που αποτελείται από n περιοχές. Το δίκτυο αντιπροσωπεύεται από ένα συνδεδεμένο και μη-κατευθυνόμενο γράφημα $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, όπου οι κόμβοι, $\mathcal{V} = \{1, \dots, N\}$ αντιπροσωπεύουν τις περιοχές ελέγχου και τις άκρες $\mathcal{E} \subset \mathcal{V} \times \mathcal{V} = \{1, \dots, m\}$ αντιπροσωπεύουν τις γραμμές μεταφοράς που συνδέουν τις περιοχές. Η δομή του δικτύου μπορεί να εκπροσωπείται από τον αντίστοιχο πίνακα $D \in R^{n \times m}$.

State variables	
δ_i	Voltage angle
ω_i^b	Frequency
$E'_{qi} = V_i$	d-axis voltage behind transient reactance
Parameters	
ω^n	Nominal frequency, e.g. 50 or 60 Hz
M_i	Moment of inertia
A_i	Damping constant
I_{di}	d-axis current
I_{qi}	q-axis current
T_{doi}^i	Direct axis transient open-circuit constant
X_{di}	Direct synchronous reactance
X'_{di}	Direct synchronous transient reactance
B_{ij}	Susceptance of the transmission line
G_{ij}	Conductance of the transmission line
Controllable inputs	
u_i	Controllable power generation
E_{fdi}	Exciter voltage
Uncontrollable inputs	
P_i^l	Power demand

Πίνακας 3.1 Περιγραφή των κύριων μεταβλητών και των παραμέτρων που εμφανίζονται στο μοντέλο του συστήματος

Οι συγγραφείς αποδεικνύουν την ιδιότητα της αυξητικής παθητικότητας του κάθε συστήματος (δηλ. σε δύο υποσυστήματα τα οποία διασυνδέονται μέσω περιορισμών που καθρεφτίζουν την τοπολογία του δικτύου), ανεξάρτητα αρχικά, και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την ιδιότητα της διασύνδεσης των αυξητικά παθητικών συστημάτων αποδεικνύουν ότι το όλο σύστημα είναι αυξητικά παθητικό. Αυτή η δυνατότητα αξιοποιείται για να σχεδιαστούν αυξητικοί παθητικοί ελεγκτές που παράγουν u , εγκαθιστώντας επιθυμητές ιδιότητες για το συνολικό σύστημα κλειστού βρόχου. Αυτές οι ιδιότητες του συστήματος έχουν την άμεση συνέπεια ότι η απόκριση του συστήματος συγκλίνει σε ένα σημείο ισορροπίας όταν η διάχυση ισχύος \bar{u} και το φορτίο P^l είναι τέτοια ώστε η συνολική ανισορροπία $\bar{u} - P^l$ είναι μια σταθερά. Η εκτεταμένη παρουσίαση του πλαισίου που χρησιμοποιείται από τους συγγραφείς δεν είναι ο σκοπός αυτής της διπλωματικής και κατά συνέπεια παραλείπεται.

Προτεινόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου: Ο S. Tlip κ.ά.. χαρακτηρίζουν μια βέλτιστη παραγωγή που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος. Θεωρούν μόνο το κόστος παραγωγής u , καθώς είναι το επικρατέστερο έναντι των δαπανών διέγερσης (excitation costs). Το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης του δικτύου που αντιμετωπίζουν ως εκ τούτου, είναι το εξής:

$$\min_u C(u) = \min_u \sum_{j \in V} (c_j(u_j)) \quad (1)$$

Δεδομένου ότι

$$0 = 1_n^T (u - P^l) \quad (2)$$

Όπου $c_i(u_i)$ είναι αυστηρά κυρτή συνάρτηση και σχετίζεται με την γεννήτρια i . Μετά από

τυπική βιβλιογραφία σχετικά με την βελτιστοποίηση κυρτότητας οι συγγραφείς εισήγαγαν την συνάρτηση Lagrangian και ως εκ τούτου πήραν ως λύση ένα σημείο ισοροπίας.

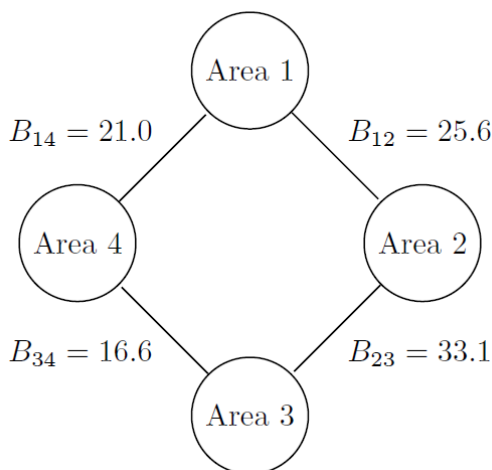
Προτεινόμενες Δυναμικές Ελέγχου: Έστω $C(u) = \frac{1}{2}u^T Q u$, με $Q > 0$ και διαγώνια. Υπάρχει μια λύση $(\bar{u}, \bar{\lambda})$ έως, εάν και μόνο εάν ο βέλτιστος έλεγχος είναι:

$$\bar{u} = Q^{-1} \frac{1_n 1_n^T P^l}{1_n^T Q^{-1} 1_n} \quad (2)$$

και ο βέλτιστος πολλαπλασιαστής Lagrange είναι:

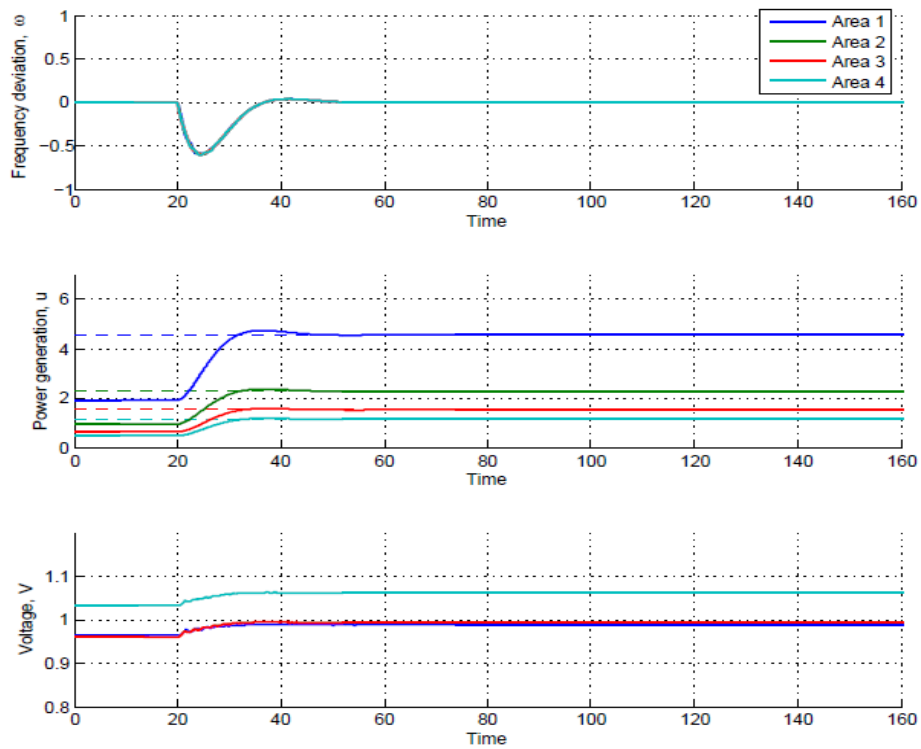
$$\bar{\lambda} = \left(-\frac{1_n^T P^l}{1_n^T Q^{-1} 1_n} \right) \quad (3)$$

Ακολούθως ο S. Trip κ.ά. απεικόνισαν την απόδοση των ελεγκτών σε ένα δίκτυο τεσσάρων περιοχών συνδεδεμένων μεταξύ τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Ως ένα πρώτο σενάριο, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας P^l υποτίθεται ότι είναι σταθερή. Η απόκριση της συχνότητας στην είσοδο ελέγχου δίνεται στο Σχήμα 3.16. Από το Σχήμα 3.16 μπορούμε να δούμε πως η συχνότητα πέφτει λόγω του αυξημένου φορτίου και πώς ο ελεγκτής ρυθμίζει την παραγωγή, έτσι ώστε να επιτευχθεί μια νέα σταθερή κατάσταση όπου η απόκλιση της συχνότητας είναι και πάλι μηδέν και το κόστος ελαχιστοποιείται. Ως δεύτερο σενάριο θεωρούν μια χρονικά μεταβαλλόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Από το Σχήμα 3.17 μπορούμε να δούμε πώς ο ελεγκτής παρέχει μια χρονικά μεταβαλλόμενη είσοδο έτσι ώστε η απόκλιση συχνότητας να οδηγείται στο μηδέν ακόμη και με την παρουσία ενός χρονικά μεταβαλλόμενου φορτίου.

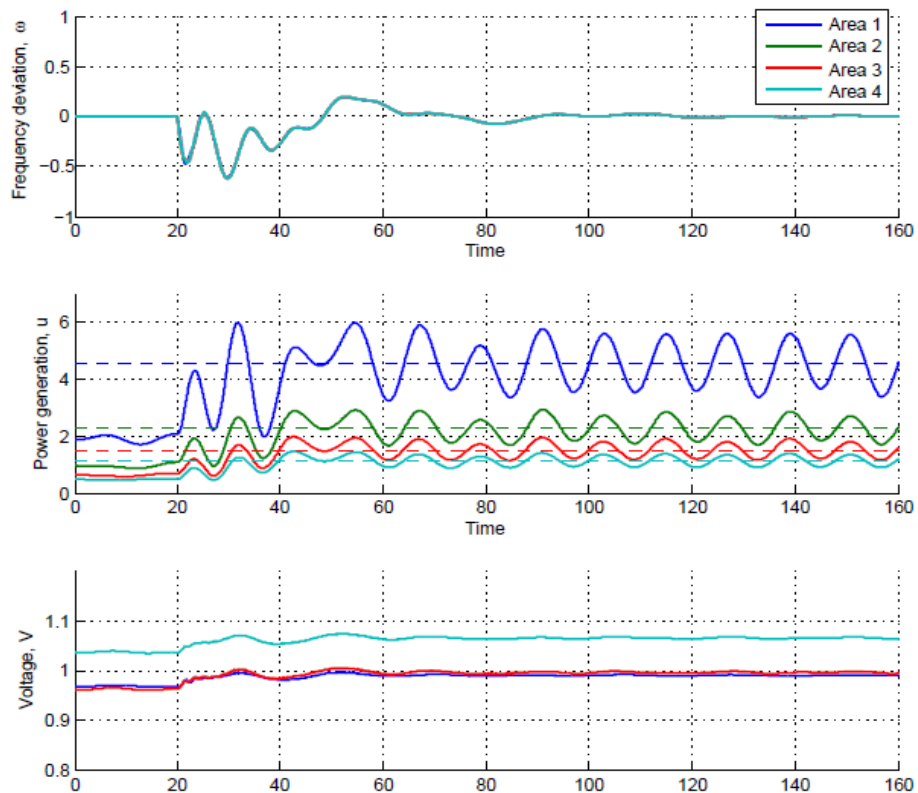


Σχήμα 3.15 Ένα ισοδύναμο δίκτυο τεσσάρων περιοχών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας [45].

3.7 Εσωστρεφείς Μέθοδος Προσέγγισης Ρύθμισης της Συχνότητας



Σχήμα 3.16 Απόκριση συχνότητας και εισόδου ελέγχου χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο ελεγκτή με σταθερή ζήτηση ισχύος [45].



Σχήμα 3.17 Απόκριση συχνότητας και εισόδος ελέγχου χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο ελεγκτή με το μεταβλητό χρόνο ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας [45].

3.8 Επίτευξη Οικονομικής Κατανομής Ισχύος σε δίκτυα σε πραγματικό χρόνο μέσω μιας προσέγγισης σχεδιασμού σημείου ηρεμίας [50]

Στο άρθρο αυτό, ο Zhang κ.ά. μελετούν το πρόβλημα της επίτευξης οικονομικής κατανομής για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, σε πραγματικό χρόνο, με ελεγχόμενα φορτία, συγχωνεύοντας και επανασχεδιάζοντας συμβατικό πρωτεύον και δευτερεύον έλεγχο συχνότητας. Ο σχεδιασμός τους βασίζεται σε ένα πλαίσιο σημείου ηρεμίας που επιτρέπει στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας να λύσουν ένα γενικό πρόβλημα Βέλτιστης Ροής Ισχύος DC (OPF) δυναμικά, δηλαδή να επιτευχθεί Οικονομική Κατανομή σε πραγματικό χρόνο (RED) [23]. Με την προσέγγισή τους κατόρθωσαν να αποκτήσουν έναν ελεγκτή ο οποίος είναι πλήρως κατανομημένος και κλιμακωτός μόνο όταν κάθε ζυγός επικοινωνεί με τους γείτονές του. Επιπλέον, το συνολικό σύστημα συγκλίνει ασυμπτωτικά σε ένα σημείο ισορροπίας όπου το πρόβλημα DC OPF λύνεται και οι περιορισμοί συμμόρφωσης του δικτύου ικανοποιούνται.

Δυναμικές Δικτύου που υιοθετήθηκαν: Οι συγγραφείς υιοθέτησαν ένα απλοποιημένο δίκτυο που προέρχεται μέσα από γραμμικοποίηση. Πιο συγκεκριμένα, θεώρησαν ένα δίκτυο σε επίπεδο μετάδοσης με αυθαίρετη τοπολογία, το οποίο περιγράφεται από ένα συνδεδεμένο μη-κατευθυνόμενο γράφημα $(\mathcal{G} \cup \mathcal{L}, \mathcal{E})$. Το \mathcal{G} είναι το σύνολο των ζυγών της γεννήτριας, το \mathcal{L} είναι το σύνολο των ζυγών του φορτίου, και το $\mathcal{E} \subset (\mathcal{G} \cup \mathcal{L}) \times (\mathcal{G} \cup \mathcal{L})$ είναι το σύνολο των γραμμών μεταφοράς. Τα μεγέθη των τάσεων των ζυγών υπέθεσαν ότι είναι καθορισμένα, η αντίσταση των γραμμών μεταφοράς είναι αμελητέα και η άεργος ροή ισχύος και οι διαχύσεις παραλείπονται. Το δυναμικό μοντέλο που υιοθετήθηκε περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$M_i \dot{\omega}_i + d_i \omega_i = P_{M_i} - d_i - \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} (T_{ij} \delta_{ij}), \quad i \in \mathcal{G} \quad (1)$$

$$d_i \omega_i = -P_{L_i} - d_i - \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} (T_{ij} \delta_{ij}), \quad i \in \mathcal{L} \quad (2)$$

$$\delta_{ij} = (\omega_i - \omega_j), \quad (i,j) \in \mathcal{E} \quad (3)$$

$$\dot{P}_{M_i} = T_{TG_i}^{-1} (P_{C_i} - P_{M_i} - R_i^{-1} \omega_i), \quad i \in \mathcal{G} \quad (4)$$

Εδώ το $M_i > 0$ είναι η αδράνεια της γεννήτριας, $D_i > 0$ είναι ο συντελεστής απόσβεσης, P_{M_i} είναι η μηχανική ισχύς, P_{L_i} είναι η κατανάλωση ενέργειας των ελεγχόμενων φορτίων και d_i είναι η διάχυση διαταραχής. Επίσης, $T_{ij} = u_i^0 u_j^0 \cos(\delta_i^0 - \delta_j^0)$, $(i,j) \in \mathcal{E}$, όπου οι μεταβλητές με μηδενικό δείκτη υποδηλώνουν τις ονομαστικές τιμές λειτουργίας τους, και $B_{ij} = B_{ji} > 0$ είναι η αποδεκτικότητα της γραμμής μετάδοσης στην σύνδεση των ζυγών i και j . Το σύστημα τουρμπίνας-governor για κάθε γεννήτρια διαμορφώνεται από την εξίσωση (3.8.4), όπου το P_{C_i} είναι η εντολή / είσοδος ελέγχου στην γεννήτρια και $T_{TG_i}^{-1}$, $R_i^{-1} > 0$ είναι σταθερές παράμετροι.

Προτεινόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου: Θεωρείται ότι το δίκτυο λειτουργεί γύρω από μια ονομαστική κατάσταση η οποία καθορίζεται από ένα πρόβλημα Οικονομικής Κατανομής σε ένα χρόνο πιο αργής κλίμακας, και ότι συμβαίνει μια σταθερή

διαταραχή d_i , $i \in \mathcal{G} \cup \mathcal{L}$. Ως αποτέλεσμα, η συχνότητα αποκλίνει από την ονομαστική της

τιμή. Οι συγγραφείς θεώρησαν ότι οι γεννήτριες και τα ελεγχόμενα φορτία μπορούν να προσαρμόσουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τους P_{Ci} , $i \in G$ και την κατανάλωση τους P_{Li} , $i \in L$ αντίστοιχα σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας τοπικές πληροφορίες, για να αποκαταστήσουν τη συχνότητα του δικτύου και να οδηγήσουν σε μια καλύτερη ισορροπία μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης (ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής και μεγιστοποίηση της χρησιμότητας του φορτίου). Οι στόχοι αυτοί οδήγησαν σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης σταθερής κατάστασης/DC OPF:

$$\min_{P_{M_i}, P_{L_i}, \delta_i} \sum_{i \in G} (C_i(P_{M_i})) - \sum_{i \in L} (U_i(P_{L_i})) \quad (5)$$

Δεδομένου ότι

$$P_{M_i} - d_i - \sum_{(i,j) \in E} (T_{ij}(\delta_i - \delta_j)) = 0, \quad i \in G \quad (6)$$

$$-P_{L_i} - d_i - \sum_{(i,j) \in E} (T_{ij}(\delta_i - \delta_j)) = 0, \quad i \in L \quad (7)$$

$$P_{C_i}^{min} \leq P_{M_i} \leq P_{C_i}^{max} \quad (8)$$

$$P_{L_i}^{min} \leq P_{L_i} \leq P_{L_i}^{max} \quad (9)$$

$$P_{TC_{ij}}^{min} \leq (T_{ij}(\delta_i - \delta_j)) \leq P_{TC_{ij}}^{max} \quad (10)$$

Για να είναι σε θέση οι συγγραφείς να χρησιμοποιούν ένα πλαίσιο με σημείο ηρεμίας, θεωρείται ότι το παραπάνω πρόβλημα είναι εφικτό και επιπλέον, ότι κάθε C_i είναι αυστηρά κυρτή συνάρτηση με P_{M_i} και κάθε U_i είναι αυστηρά κοίλη συνάρτηση στο P_{L_i} .

Αρχικά, θεώρησαν μian υπογήφια Lagrangian και στην συνέχεια χρησιμοποιώντας την ανάλυση του [23] απέδειξαν ότι η Lagrangian είναι αυστηρά κυρτή συνάρτηση στο δ_{ij} , P_{M_i} και αυστηρά κοίλη συνάρτηση στο ω_i , έτσι διατύπωσαν ένα πρόβλημα σημείο ηρεμίας

$$\min_{\delta_{ij}, P_{M_i}} \max_{\omega_i} L_0$$

στο οποίο σημείο ηρεμίας οι τροχιές του συστήματος συγκλίνουν ασυμπτωτικά.

Προτεινόμενες δυναμικές ελέγχου: Χρησιμοποιώντας την ανάλυση που περιγράφεται στο [23], οι συγγραφείς πέτυχαν να ληφθεί μια βέλτιστη είσοδος ελέγχου που δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

Δυναμικές εξισώσεις εισόδου ελέγχου:

$$\dot{P}_{C_i} = K_{C_i} \left(R_i(P_{M_i} - P_{C_i}) - \gamma(C_i''(P_{C_i}) + \zeta_i + \mu_i^+ - \mu_i^-) \right), \quad i \in G \quad (11)$$

$$\dot{P}_{L_i} = K_{L_i} \left(\omega_i + \gamma(U_i'(P_{L_i}) + \lambda_i - \nu_i^+ - \nu_i^-) \right), \quad i \in L \quad (12)$$

Βοηθητικές μεταβλητές δυναμικές εξισώσεις:

$$\dot{\theta}_i = K_{\theta_i} \sum_{(i,j) \in E} T_{ij}(\{\zeta_i, \lambda_i\} - \{\zeta_j, \lambda_j\} - I_{ij}^+ + I_{ij}^-), \quad i \in G \cup L \quad (13)$$

$$\dot{\zeta}_i = K_{\zeta_i} (P_{C_i} - d_i \sum_{(i,j) \in E} (T_{ij}(\theta_i - \theta_j))), \quad i \in G \quad (14)$$

$$\dot{\lambda}_i = K_{\lambda_i} (P_{L_i} - d_i \sum_{(i,j) \in E} (T_{ij}(\theta_i - \theta_j))), \quad i \in L \quad (15)$$

$$\dot{\mu}_i^+ = K_{\mu_i^+} (P_{C_i} - P_{C_i}^{max}) \mu_i^+, \quad i \in G \quad (16)$$

$$\dot{\mu}_i^- = K_{\mu_i^-} (P_{C_i}^{min} - P_{C_i}) \mu_i^-, \quad i \in G \quad (17)$$

$$\dot{v}_i^+ = K_{v_i^+} (P_{L_i} - P_{L_i}^{max}) v_i^+, \quad i \in L \quad (18)$$

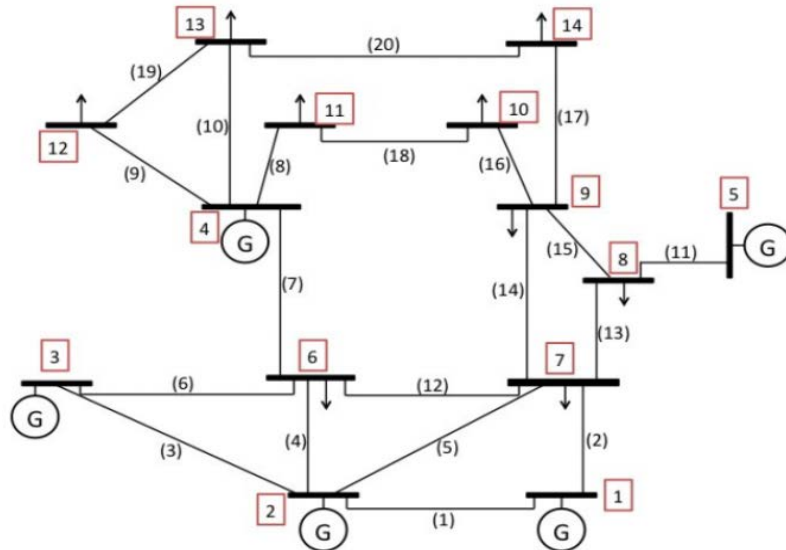
$$\dot{v}_i^- = K_{v_i^-} (P_{L_i}^{min} - P_{L_i}) v_i^-, \quad i \in L \quad (19)$$

$$\dot{I}_{ij}^+ = K_{I_{ij}^+} (T_{ij}(\theta_i - \theta_j) - P_{TC_{ij}}^{max}) I_{ij}^+, \quad i \in E \quad (20)$$

$$\dot{I}_{ij}^- = K_{I_{ij}^-} (P_{TC_{ij}}^{min} - T_{ij}(\theta_i - \theta_j)) I_{ij}^-, \quad i \in E \quad (21)$$

Ο σχεδιασμένος ελεγκτής είναι πλήρως κατανεμημένος και οι καταστάσεις του ενημερώνονται χρησιμοποιώντας μόνο τοπικές πληροφορίες και γειτονικά σήματα.

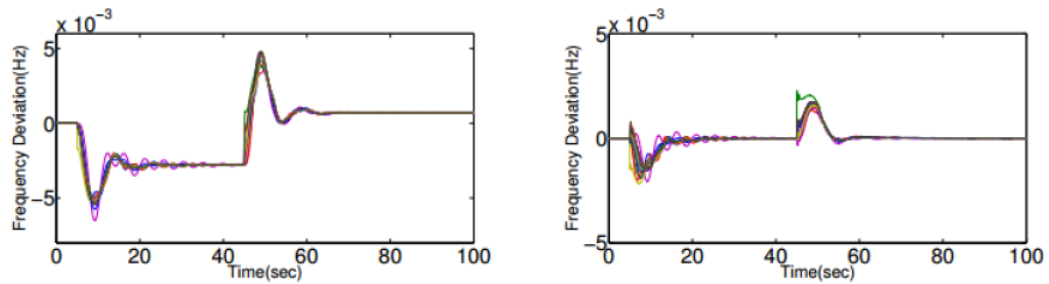
Οι συγγραφείς παρουσίασαν επίσης κάποιες αριθμητικές έρευνες που χρησιμοποιούν το δίκτυο IEEE 14-ζυγών που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Θεώρησαν ένα σενάριο που αποτελείται από δύο διαταραχές και πραγματοποιείται ως εξής:



Σχήμα 3.18 Δίκτυο IEEE 14-ζυγών με 5 ζυγούς γεννήτριες, 9 ζυγούς φορτίων και 20 γραμμές μεταφοράς

το σύστημα σταθεροποιείται στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας σε $t = 0s$. Σε $t = 5s$, υπάρχει μια αλλαγή $d_i = 2$ pu στον ζυγό 6, 40s αργότερα, υπάρχει μια αλλαγή $d_i = -2.5$

ρι στον ζυγό 9. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.19, όπου μπορούμε να δούμε πώς το σύστημα ελέγχου επηρεάζει την απόκλιση της συχνότητας.



Σχήμα. 3.19 Ζυγός απόκλισης συχνότητας. Αριστερά: μη ελεγχόμενη περίπτωση. Δεξιά: ελεγχόμενη υπόθεση

Η μελλοντική τους εργασία θα επικεντρωθεί στην υιοθέτηση πιο λεπτομερών μοντέλων δικτύου, καθώς και στην ανάπτυξη των γενικών συνθηκών για δυναμικά συστήματα αντίστροφης μηχανικής (reverse-engineering), όπως αλγόριθμους για την επίλυση ορισμένων λογικών προβλημάτων βελτιστοποίησης [50].

Κεφάλαιο 4

Σύγκριση Μοντέλων Δευτέρου και Τρίτου Βαθμού

4.1 Μοντέλο Δευτέρου Βαθμού

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε την ανάλυση ενός μοντέλου δευτέρου βαθμού έτσι ώστε να το συγκρίνουμε με ένα μοντέλο τρίτου βαθμού όταν εφαρμοστούν σε ένα δίκτυο, και με προσομοιώσεις να καταλήξουμε σε συμπεράσματα.

Δυναμικές εξισώσεις δικτύου που υιοθετήθηκαν: Στο μοντέλο δευτέρου βαθμού το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας περιγράφεται από ένα γράφημα $(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ όπου $\mathcal{N} = \{1, \dots, |\mathcal{N}|\}$ είναι το σύνολο των ζυγών και $\mathcal{E} \subset \mathcal{N} \times \mathcal{N}$ είναι το σύνολο των γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τους ζυγούς. Υποθέτουμε ότι το $(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ είναι συνδεδεμένο και καθοδηγείται, με ένα αυθαίρετο προσανατολισμό τέτοιο ώστε αν $(i, j) \in \mathcal{E}$, τότε $(j, i) \notin \mathcal{E}$. Το προτεινόμενο δίκτυο έχει δύο τύπους ζυγών: Ζυγούς παραγωγής και ζυγούς φορτίων. Ένας ζυγός παραγωγής δεν έχει μόνο φορτία, αλλά και μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος που μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας περιστρεφόμενης κινητήριας μηχανής. Ενώ ένας ζυγός φορτίου έχει μόνο φορτία, αλλά δεν έχει γεννήτρια.

Οι ζυγοί παραγωγής περιγράφονται από την εξίσωση όπως φαίνεται παρακάτω:

$$M_j \Delta \dot{\omega}_j + D_j \Delta \omega_j = P_j^m - P_{loss,j}^0 - P_j^e \quad (1)$$

Ενώ οι ροές των κλάδων με αποκλίσεις ΔP_{ij} από τις ονομαστικές ροές των κλάδων, ακολουθούν τις γραμμικές δυναμικές:

$$\Delta \dot{P}_{ij} = B_{ij} (\Delta \omega_i - \Delta \omega_j) \quad (2)$$

όπου

$$B_{ij} = 3 \frac{|V_i| |V_j|}{X_{ij}} \cos(\theta_i^0 - \theta_j^0) \quad (3)$$

είναι σταθερά που καθορίζεται από τις ονομαστικές τάσεις των ζυγών και την αντίσταση των γραμμών, επίσης υποθέτουμε μια σταθερή διαταραχή $P^m = (P_j^m, j \in \mathcal{N})$ η οποία διαχέεται στο σύνολο των ζυγών \mathcal{N} .

Προτεινόμενες Δυναμικές Ελέγχου: Για λόγους ευκολίας, συλλέγουμε τις δυναμικές του συστήματος και τις εξισώσεις ελέγχου του φορτίου,

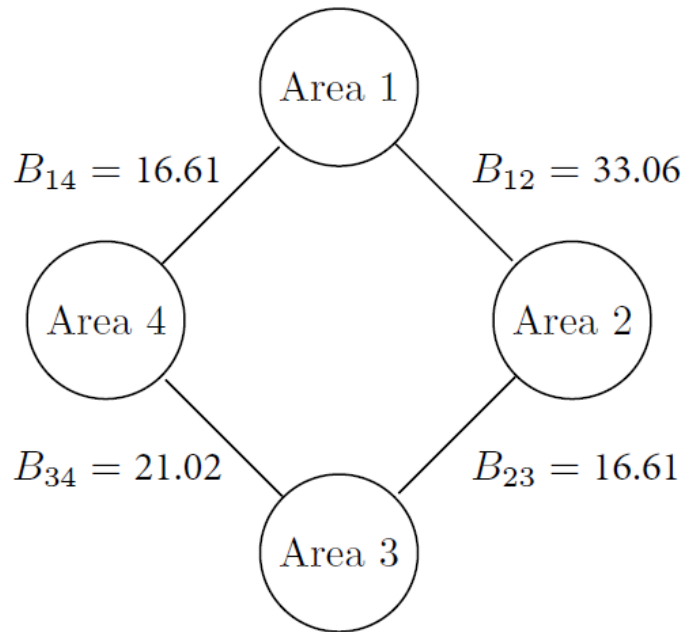
$$\dot{\omega}_j = -\frac{1}{M_j} (d_j + \hat{d}_j - P_j^m + P_j^{out} - P_j^{in}), \forall j \in \mathcal{G} \quad (4)$$

$$0 = d_j + \hat{d}_j - P_j^m + P_j^{out} - P_j^{in}, \forall j \in \mathcal{L} \quad (5)$$

$$\dot{P}_{ij} = B_{ij} (\omega_i - \omega_j), \forall (i, j) \in \mathcal{E} \quad (6)$$

όπου,

M_j	Σταθερά της αδράνειας της γεννήτριας
$\Delta\omega_j$	Αποκλίσεις της συχνότητας
\dot{D}_j	Απώλειες ισχύς της γεννήτριας λόγω τριβής
$P_j^{m'}$	Διάχυση μηχανικής ισχύς στην γεννήτρια
P_j^e	Εξαγωγή ηλεκτρικής ισχύς της γεννήτριας
$P_{loss,j}^0$	Ονομαστική τιμή της απώλειας ισχύς λόγω τριβής
B_{ij}	Επιτρεψιμότητα (susceptance) της γραμμής μεταφοράς
V_i	Ονομαστική τιμή της τάσης του ζυγού i
V_j	Ονομαστική τιμή της τάσης του ζυγού j
θ_i^0	Ονομαστική τιμή της γωνιάς φάσης του i
θ_j^0	Ονομαστική τιμή της γωνιάς φάσης του j
X_{ij}	Επαγωγική αντίδραση γραμμής
d_j	Συνολικό ελεγχόμενο φορτίο
P_j^{out}	Συνολική εξερχόμενη ισχύς από τον j
P_j^{in}	Συνολική εισερχόμενη ισχύς στον j
\dot{P}_{ij}	Ισχύς που διαχέεται από τον ζυγό i στον ζυγό j
ω^0	Ονομαστική τιμή της συχνότητας



Σχήμα 4.1 Ισοδύναμο δίκτυο τεσσάρων περιοχών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας για το μοντέλο δευτέρου βαθμού

	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4
M_j	4	3.5	3	2.5
V_i	1.045	0.98	1.033	0.997
D_i	1	1.5	1.2	1.4
T'_{doi}	8	8	7.5	7.5
X_{di}	1.8	1.8	1.7	1.7
X'_{di}	0.3	0.3	0.25	0.25
T_{g1}	1.67	2	1.43	1.64
T_{g2}	3.79	4	3.57	3.62

Πίνακας 4.1 Τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο δευτέρου βαθμού

4.2 Μοντέλο Τρίτου Βαθμού

Δυναμικές εξισώσεις δικτύου που υιοθετήθηκαν:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \Delta\omega_i \quad (1)$$

$$M_i \frac{d\Delta\omega_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} - D_i \frac{d\delta_i}{dt} \quad (2)$$

$$T'_{doi} \frac{dE'_{qi}}{dt} = (E_{fi} - \hat{E}_{fi}) - (E_{qi} - \hat{E}_{qi}) \quad (3)$$

Σε αυτές τις εξισώσεις ο δείκτης i αναφέρεται στον αριθμό της γεννήτριας, το δ είναι η γωνιά της ισχύς του ρότορα και $\Delta\omega_i = \omega_i - \omega_s = \frac{d\delta_i}{dt}$ είναι η απόκλιση της ταχύτητας. Το $M_i = T_{mi}S_{ni}/\omega_s$ είναι ο συντελεστής αδράνειας, το T_{mi} είναι η σταθερά χρόνου μηχανικής (mechanical time constant), το S_{ni} είναι η ονομαστική ισχύς, το P_{mi} είναι η μηχανική ενέργεια, το P_{ei} είναι η ηλεκτρική ενέργεια, το D_i είναι ο συντελεστής απόσβεσης, το E'_{qi} είναι η συνιστώσα του άξονα τετραγωνισμού της μεταβατικής emf, το T'_{doi} είναι σταθερά μεταβατικού χρόνου ανοιχτού κυκλώματος και το E_{fi} είναι η τάση διέγερσης. Ένα «καπέλο \wedge » στην κορυφή ενός συμβόλου αντιστοιχεί στο σημείο ισορροπίας μετά από κάποιο σφάλμα. Σημειωτέο ότι $\hat{E}_{fi} = E_{qi}$. [62]

Περαιτέρω για το μοντέλο τρίτου βαθμού έχουμε:

$$P_{ei} = E'_{qi}I_{qi} \quad (4)$$

$$E_{qi} = E'_{qi} + \Delta X_{di}I_{di} \quad (5)$$

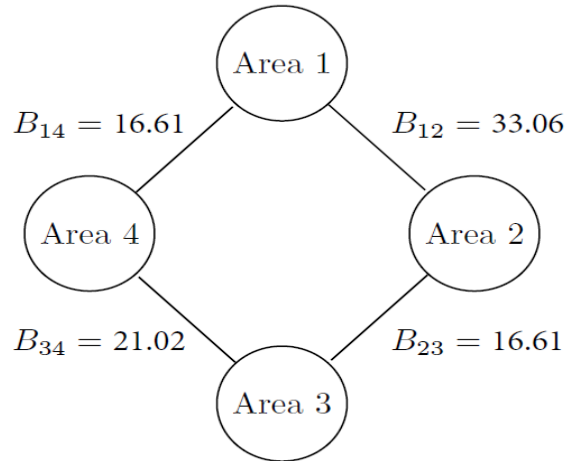
Όπου το I_{qi} και το I_{di} , είναι οι q- και d-άξονες του ρεύματος της γεννήτριας, $\Delta X_{di} = X_{di} - X'_{di}$, και X_{di}, X'_{di} είναι οι σύγχρονες και μεταβατικές επαγωγικές αντιστάσεις της γεννήτριας στον d-άξονα, αντίστοιχα.

Στο δίκτυο οι γραμμές και οι μετασχηματιστές περιγράφονται από τα π-ισοδύναμά τους, καθώς ένα φορτίο αντικαθίσταται από μια σταθερή admittance. Οι μεταβατικές επαγωγικές αντιστάσεις της γεννήτριας $X'_{di} = X'_{qi}$ προστίθενται στο μοντέλο δικτύου για να σχηματίσουν fictitious κόμβους παραγωγής με τη μεταβατική emf της γεννήτρια ως την κομβική τάση. Όλοι οι κόμβοι φορτίων εξαλείφονται έτσι ώστε το αρχικό δίκτυο μεταφοράς να μειώνεται σε ένα ισοδύναμο δίκτυο μεταφοράς που συνδέει όλους τους κόμβους παραγωγής [63]. Για ένα τέτοιο μοντέλο του συστήματος, και σημειώνοντας ότι για το μοντέλο τρίτου βαθμού $E'_d = 0$, τα (d,q) του ηλεκτρικού ρεύματος της i-th γεννήτριας μπορεί να εκφραστούν ως:

$$I_{di} = \sum_{j \neq i}^n B_{ij}E'_{qj} \cos \delta_{ij} + B_{ii}E'_{qi} \quad (6)$$

$$I_{qi} = \sum_{j \neq i}^n B_{ij}E'_{qj} \sin \delta_{ij} + G_{ii}^{eq}E'_{qi} \quad (7)$$

όπου B_{ij} είναι το στοιχείο του πίνακα μεταφοράς admittance και n είναι ο αριθμός των γεννητριών στο σύστημα. Σε αυτές τις εξισώσεις που προκύπτουν, η αγωγιμότητα στο ισοδύναμο δίκτυο μεταφοράς είχε παραμεληθεί, δηλ. $G_{ij} = 0$. Για να ληφθεί υπόψη η ισορροπία ισχύος στο μοντέλο του συστήματος η ισοδύναμη αγωγιμότητα G_{ii}^{eq} στην (4.2.7) περιλαμβάνει τις απώλειες ισχύος που θα ήταν παρούσες στην αγωγιμότητα μεταφοράς G_{ij} .



Σχήμα 4.2 Ισοδύναμο δίκτυο τεσσάρων περιοχών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας για το μοντέλο τρίτου βαθμού

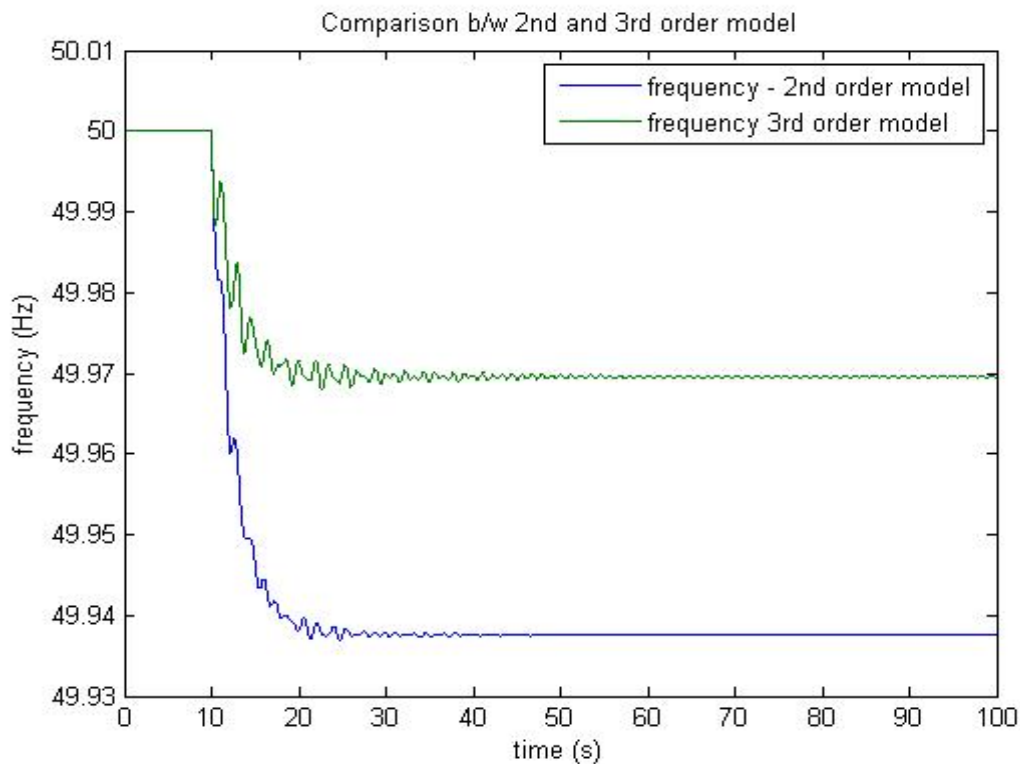
	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4
M_j	4	3.5	3	2.5
V_i	1.045	0.98	1.033	0.997
D_i	1	1.5	1.2	1.4
T'_{doi}	5.54	7.41	6.11	6.22
X_{di}	1.8	1.8	1.7	1.7
X'_{di}	0.3	0.3	0.25	0.25
T_{g1}	1.67	2	1.43	1.64
T_{g2}	3.79	4	3.57	3.62
δ_i	0.324	-0.148	0.154	-0.112

Πίνακας 4.2 Τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο τρίτου βαθμού

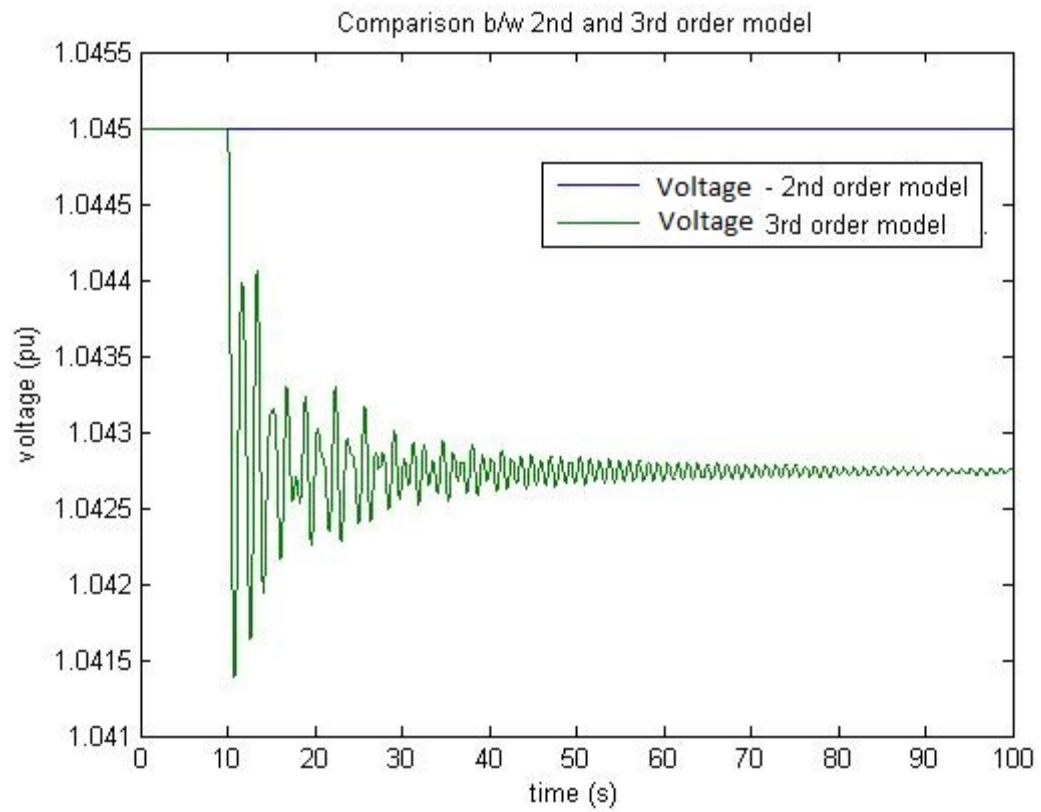
Έτσι, με τις πιο πάνω τιμές του Πίνακα 4.1 και 4.2 έχουμε κάνει προσομοίωση της συχνότητας στα δύο μοντέλα χωρίς governor και χωρίς κανένα έλεγχο στον ζυγό 1 και την στο Σχήμα 4.3, ενώ στο Σχήμα 4.4 στα ίδια μοντέλα συγκρίνουμε και απεικονίζουμε τις τάσεις μεταξύ των 2 επίσης χωρίς governor και χωρίς κανένα έλεγχο στον ζυγό 1. Το τι μπορούμε να συμπεράνουμε είναι ότι η συχνότητα του μοντέλου τρίτου βαθμού έχει αισθητή διαφορά στο βάθος το οποίο πέφτει σε σύγκριση με το μοντέλο δευτέρου βαθμού, με το τελευταίο να είναι μη επιθυμητό.

Όσο αφορά την τάση είναι πολύ θετικό ότι στο μοντέλο τρίτου βαθμού μπορούμε να την συμπεριλάβουμε στις προσομοιώσεις μας, πράγμα αδύνατο στο μοντέλο δευτέρου βαθμού όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι το μοντέλο τρίτου βαθμού είναι πολύ πιο ακριβές από το αντίστοιχο μοντέλο δευτέρου βαθμού.



Σχήμα 4.3 Σύγκριση συχνότητας μεταξύ μοντέλου 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού



Σχήμα 4.4 Σύγκριση τάσης μεταξύ μοντέλου 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού

Κεφάλαιο 5

Προσομοιώσεις

5.1 Μηχανισμοί Ελέγχου Συχνότητας που Χρησιμοποιήθηκαν για τις Προσομοιώσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε τους αλγόριθμους που χρησιμοποιήσαμε για να ελέγξουμε την αντίδραση του συστήματός μας με ή χωρίς governor και με τρία διαφορετικά πλαίσια ελέγχου.

Ο πρώτος μηχανισμός ελέγχου συχνότητας **A** που χρησιμοποιήσαμε έχει ως εξής

$$d_j^c = (C'_{aj})^{-1}(\omega_j), j \in N \quad (1)$$

και είναι πρόπων να αναφέρουμε ότι είναι πλαίσιο εισόδου και αυστηρά παθητικό για οποιοδήποτε σημείο ισορροπίας.

Ο δεύτερος μηχανισμός ελέγχου συχνότητας **B** που χρησιμοποιήσαμε έχει ως εξής

$$\dot{d}_j^c = -\left(C'_{aj}(d_j^c) - (\omega_j)\right), j \in N \quad (2)$$

και είναι επίσης πρόπων να αναφέρουμε ότι είναι πλαίσιο εισόδου και αυστηρά παθητικό για οποιοδήποτε σημείο ισορροπίας.

Ο τρίτος μηχανισμός ελέγχου συχνότητας **C** που χρησιμοποιήσαμε έχει ως εξής

$$d_{jk+1} = d_{jk} + a_j \omega_j \frac{d\omega_j}{dt} \quad (3)$$

Ενώ ο governor που χρησιμοποιήσαμε στις προσομοιώσεις μας έχει την εξής απλοποιημένη μορφή (που προκύπτει από γραμμικοποίηση)

$$\Delta \dot{P}_{Mj} = \frac{1}{T_{TGj}} (\Delta P_{Cj} - \Delta P_{Mj} - \frac{1}{R_j} \Delta \omega_j) \quad (4)$$

με

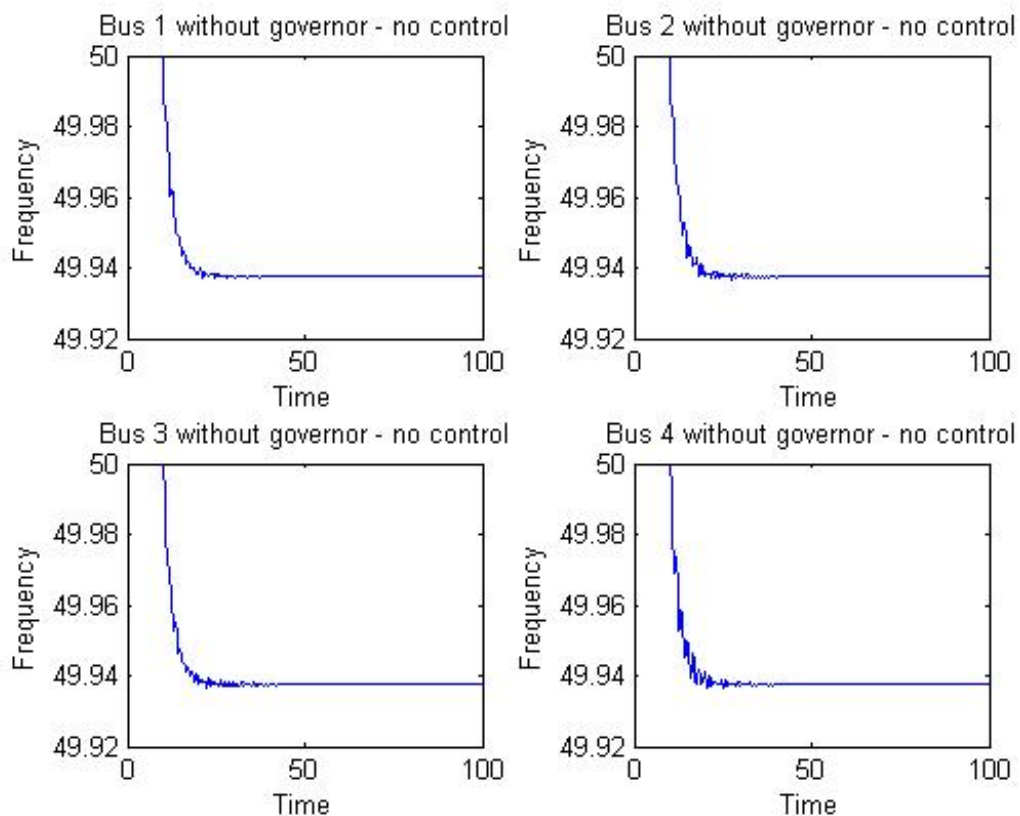
$$T_{TGj} \cong 0,6 \quad (5)$$

$$R > 0.377 \quad (6)$$

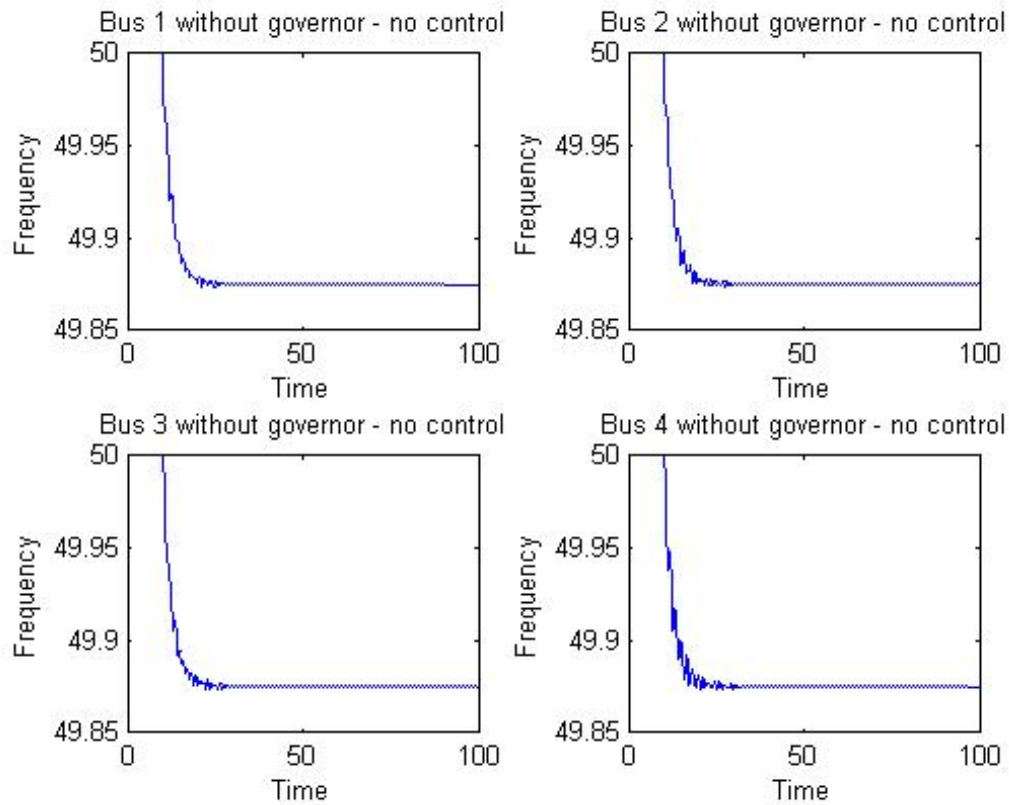
5.2 Παρουσίαση Προσομοιώσεων

Αρχικά θα δούμε το μοντέλο δευτέρου βαθμού χωρίς governor και χωρίς κανένα μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για να μπορούμε να συγκρίνουμε και να εννοήσουμε την σημασία της ύπαρξής τους. Στην συνέχεια ακολουθούν οι προσομοιώσεις χωρίς governor και για τους τρεις μηχανισμούς ελέγχου συχνότητας ξεχωριστά, για το μοντέλο δευτέρου βαθμού. Τέλος θα δούμε όλους τους παραπάνω συνδυασμούς με governor.

Αρχικά στο Σχήμα 5.2 έχουμε κάνει αλλαγή μόνο στον ζυγό 1 της τάξης των 2 pu στα 10 δευτερόλεπτα και στο σύστημα δεν έχουμε βάλει ούτε governor, ούτε κάποιο μηχανισμό ελέγχου συχνότητας. Βλέπουμε πως η συχνότητα πέφτει σε όλους τους ζυγούς το ίδιο (κάποιοι ζυγοί έχουν μεγαλύτερα oscillations από άλλους ζυγούς) και από 50 Hz πάει στα 48,7 Hz. Ενώ βλέπουμε στο Σχήμα 5.8 ότι βάζοντας governor, που η δουλειά του είναι να μετρά και να ρυθμίζει την ταχύτητα μιας γεννήτριας, με αλλαγή στον ζυγό 1 της τάξεως των 2 pu η συχνότητα από 50 πέφτει στο 49,955 Hz που είναι μια σημαντική βελτίωση σε σχέση με την προσομοίωση χωρίς governor.

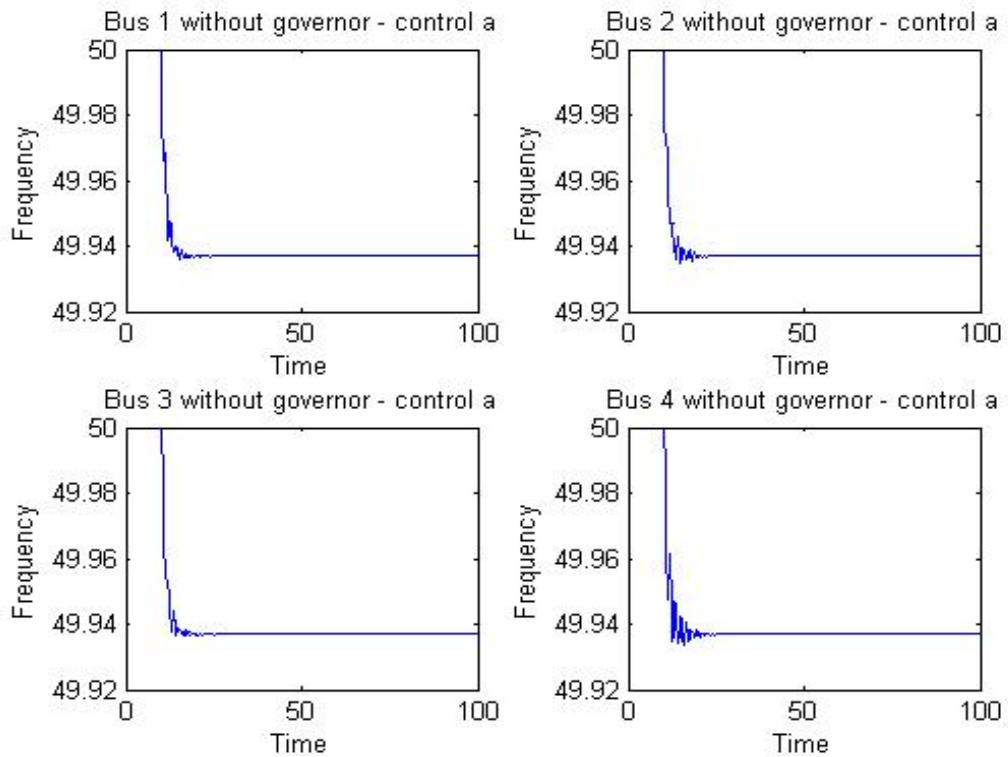


Σχήμα 5.1 Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και χωρίς κανένα μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 1 pu

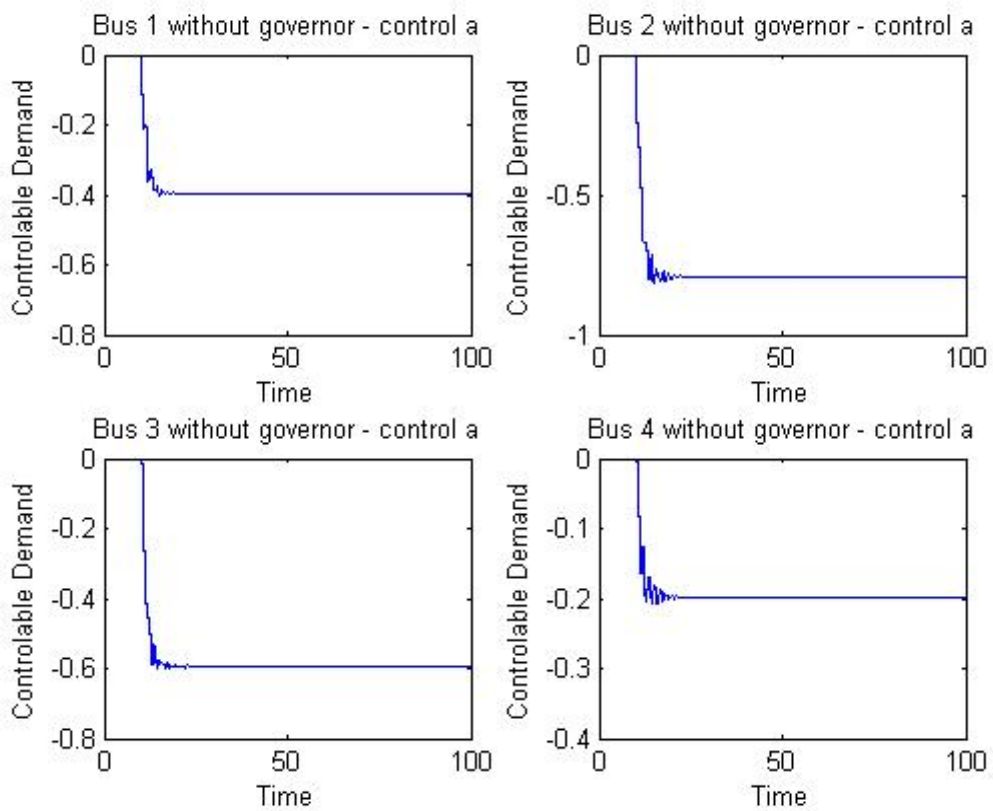


Σχήμα 5.2 Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και χωρίς κανένα μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 2 pu

Στο Σχήμα 5.3 εκτελέσαμε μια αλλαγή της τάξεως των 2 pu στα 10 δευτερόλεπτα χωρίς governor, αλλά έχουμε εφαρμόσει το μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A. Η συχνότητα έχει πέσει από τα 50 Hz στα 49,939 Hz δηλαδή περίπου ίδια επίδραση με την προσομοίωση με μόνο governor. Με τα ίδια δεδομένα η ελεγχόμενη ζήτηση αλλάζει, με τον ζυγό 1 να δέχεται αλλαγή -0,4 pu, τον ζυγό 2 αλλαγή -0,8 pu, τον ζυγό 3 αλλαγή -0,6 pu, και τον ζυγό 4 αλλαγή -0,2 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4. Όταν συνδυάσουμε όμως τον governor και τον έλεγχο A όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9 η συχνότητα πέφτει από 50 στα 49,967 Hz. Αυτό σημαίνει ότι όντως έχουμε βελτίωση. Επίσης στο Σχήμα 5.10 με τα τελευταία δεδομένα βλέπουμε ότι ο ζυγός 1 αλλάζει κατά -0,2 pu, ο ζυγός 2 αλλάζει κατά -0,4 pu, ο ζυγός 3 αλλάζει κατά -0,32 pu και ο ζυγός 4 αλλάζει κατά -0,1 pu, δηλαδή υπάρχει μεγάλη διαφορά από το Σχήμα 5.4 στο οποίο δεν υπάρχει governor. Επίσης στη προσομοίωση με governor έχουμε προσομοιώσει και την ελεγχόμενη παραγωγή με αποτέλεσμα την αλλαγή στον ζυγό 1 της τάξης του 0,5 pu, στον ζυγό 2 της τάξης του 0,4 pu, στον ζυγό 3 της τάξης του 0,5 pu και στο ζυγό 4 της τάξης του 0,48 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.11.

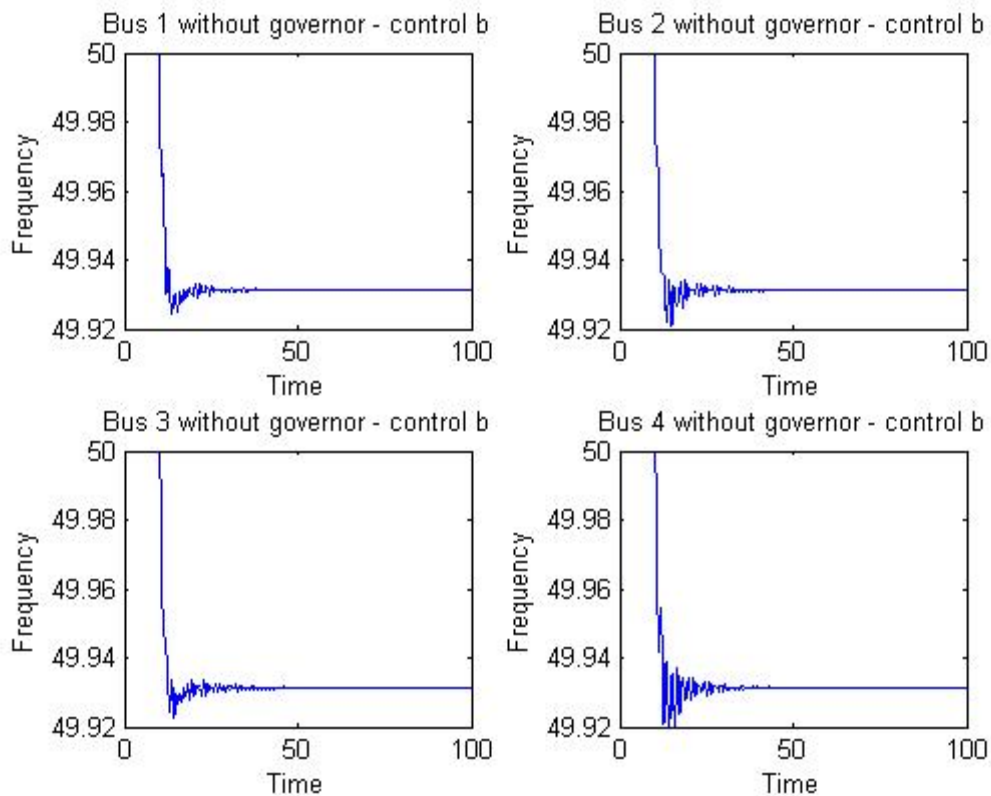


Σχήμα 5.3 Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu

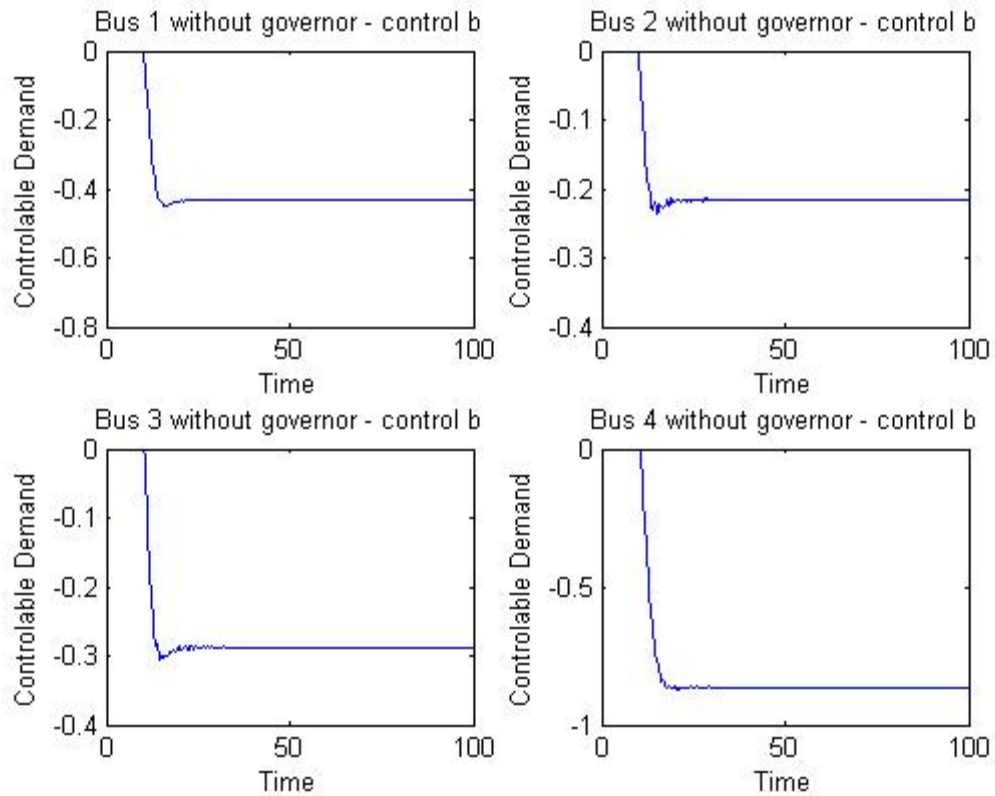


Σχήμα 5.4 Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu

Στο Σχήμα 5.5 εκτελέσαμε μια αλλαγή της τάξεως των 2 pu στα 10 δευτερόλεπτα χωρίς governor, αλλά έχουμε εφαρμόσει το μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B. Η συχνότητα έχει πέσει από τα 50 Hz στα 49,935 Hz δηλαδή περίπου ίδια επίδραση με την προσομοίωση με μόνο governor. Με τα ίδια δεδομένα προσομοιώσαμε την ελεγχόμενη ζήτηση με αποτέλεσμα τον ζυγό 1 να δέχεται αλλαγή -0,415 pu, τον ζυγό 2 αλλαγή -0,2 pu, τον ζυγό 3 αλλαγή -0,3 pu, και τον ζυγό 4 αλλαγή -0,8 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Όταν συνδυάσουμε όμως τον governor και τον έλεγχο B όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12 η συχνότητα πέφτει από 50 στα 49,965 Hz. Αυτό σημαίνει ότι όντως έχουμε βελτίωση. Επίσης στο Σχήμα 5.13 με τα τελευταία δεδομένα στην προσομοίωση της ελεγχόμενης ζήτησης βλέπουμε ότι ο ζυγός 1 αλλάζει κατά -0,2 pu, ο ζυγός 2 αλλάζει κατά -0,1 pu, ο ζυγός 3 αλλάζει κατά -0,15 pu και ο ζυγός 4 αλλάζει κατά -0,4 pu, δηλαδή υπάρχει μεγάλη διαφορά από το Σχήμα 5.5 στο οποίο δεν υπάρχει governor. Επίσης στη προσομοίωση με governor έχουμε την προσομοίωση της ελεγχόμενης παραγωγής με αλλαγή στον ζυγό 1 της τάξης του 0,5 pu, στον ζυγό 2 της τάξης του 0,45 pu, στον ζυγό 3 της τάξης του 0,5 pu και στο ζυγό 4 της τάξης του 0,5 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.14.

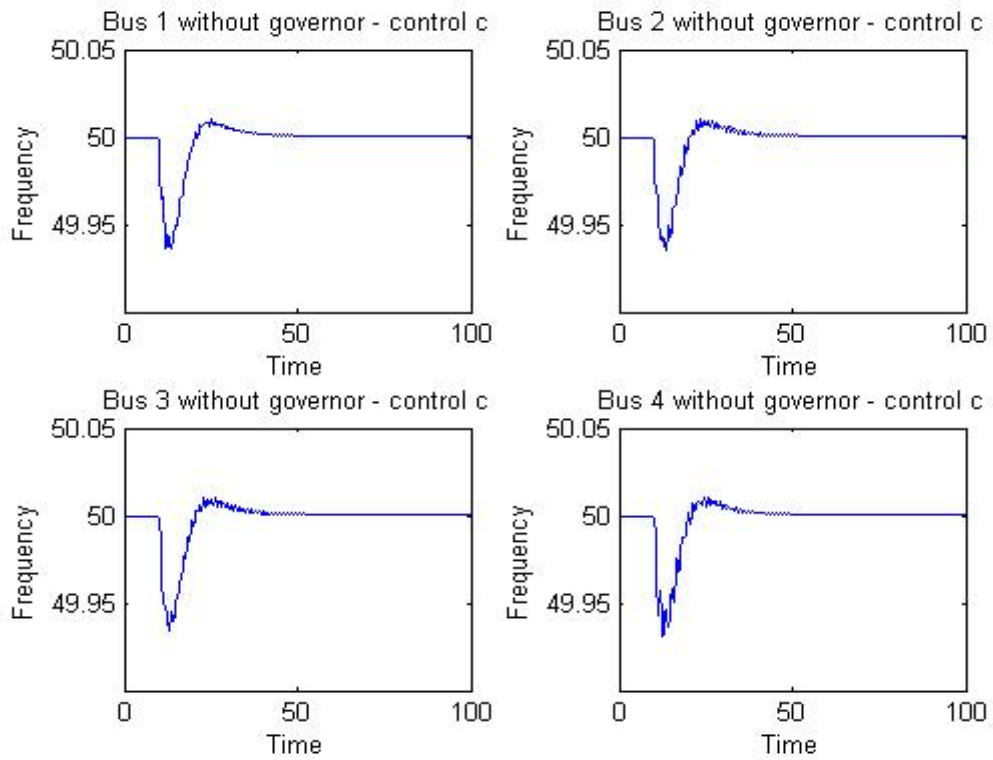


Σχήμα 5.5 Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu

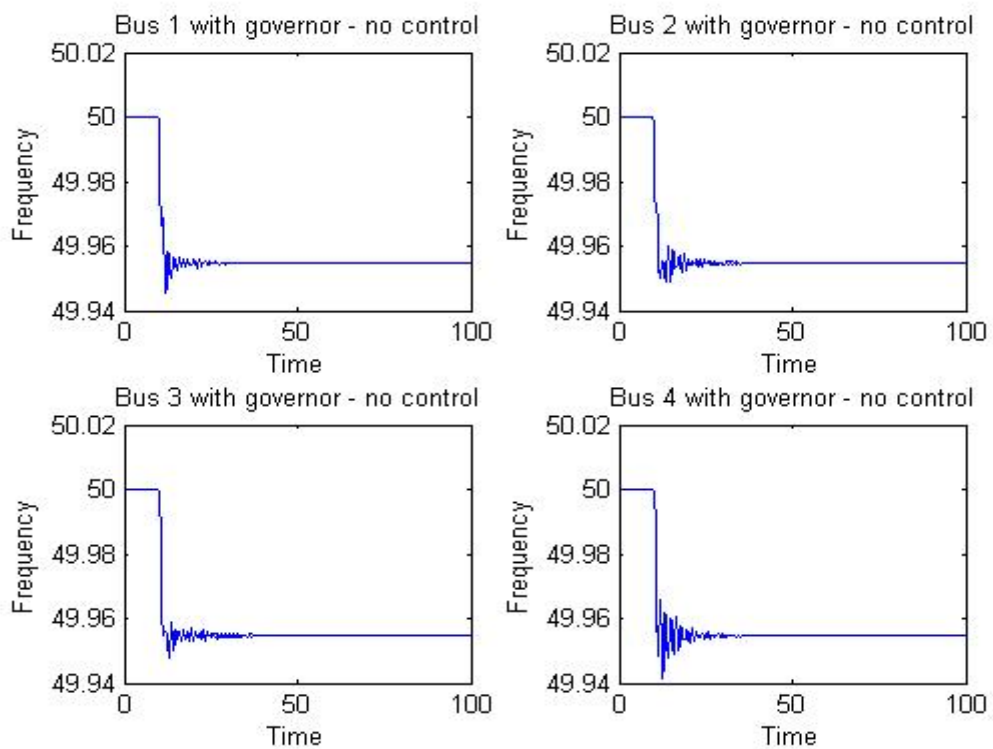


Σχήμα 5.6 Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu

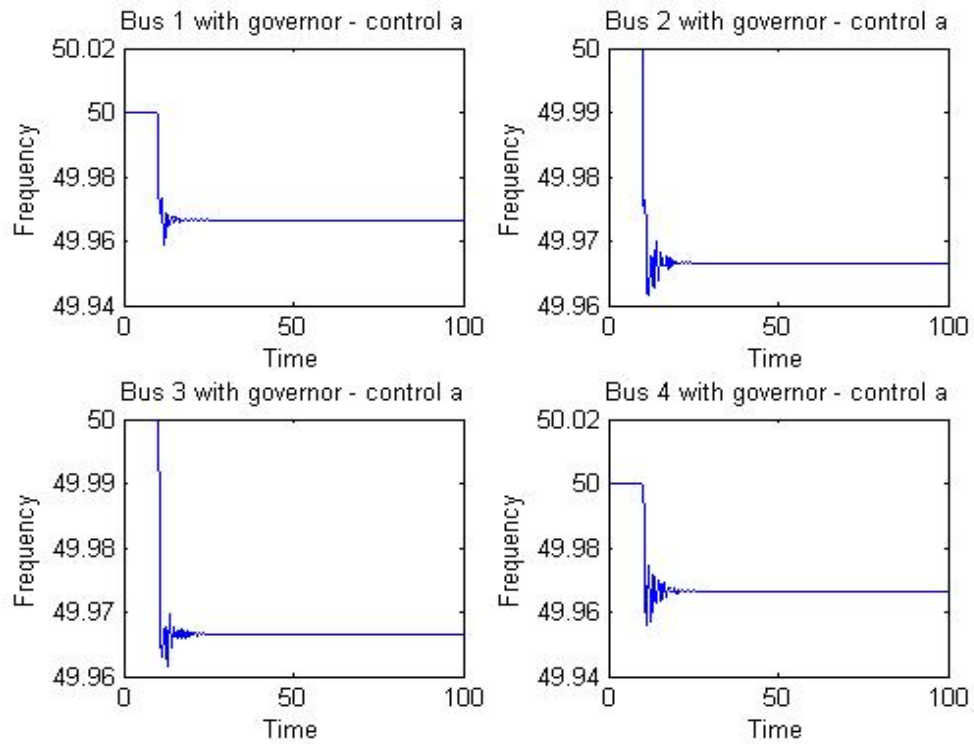
Στο Σχήμα 5.7 εκτελέσαμε μια αλλαγή της τάξεως των 2 pu στα 10 δευτερόλεπτα χωρίς governor, αλλά έχουμε εφαρμόσει το μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C. Η συχνότητα έχει πέσει από τα 50 Hz στα 49,94 Hz και στην συνέχεια επιστρέφει πίσω στα 50 Hz το οποίο είναι μέγιστης σημασίας. Όταν συνδυάσουμε όμως τον governor και τον έλεγχο C όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.15 για αλλαγή -2 pu η συχνότητα ανεβαίνει από 50 στα 50,04 Hz και επιστρέφει στα 50,018 Hz. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε μεγάλη βελτίωση. Επίσης στην προσομοίωση της ελεγχόμενης ζήτησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16, με τα τελευταία δεδομένα βλέπουμε ότι ο ζυγός 1 αλλάζει κατά 0,5 pu, ο ζυγός 2 αλλάζει κατά 1,2 pu, ο ζυγός 3 αλλάζει κατά 0,8 pu και ο ζυγός 4 αλλάζει κατά 0,45 pu, δηλαδή υπάρχει μεγάλη διαφορά με το Σχήμα 5.8 στο οποίο δεν υπάρχει governor. Επίσης στη προσομοίωση της ελεγχόμενης παραγωγής με governor έχουμε αλλαγή στον ζυγό 1 της τάξης του 0,6 pu και καταλήγει στα 0,2 pu, στον ζυγό 2 έχουμε αλλαγή 0,5 pu και καταλήγει στα 0,19 pu, στον ζυγό 3 έχουμε αλλαγή 0,5 pu και καταλήγει στα 0,2 pu και στο ζυγό 4 έχουμε αλλαγή 0,6 pu και καταλήγει στα 0,2 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.17.



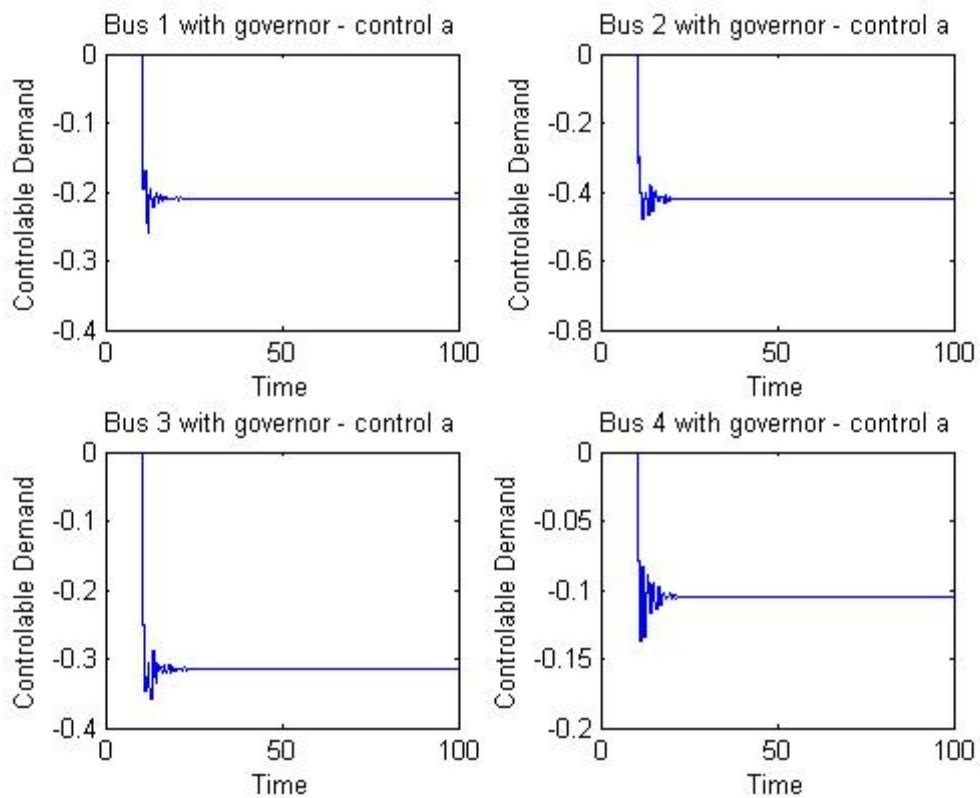
Σχήμα 5.7 Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή 2 pu



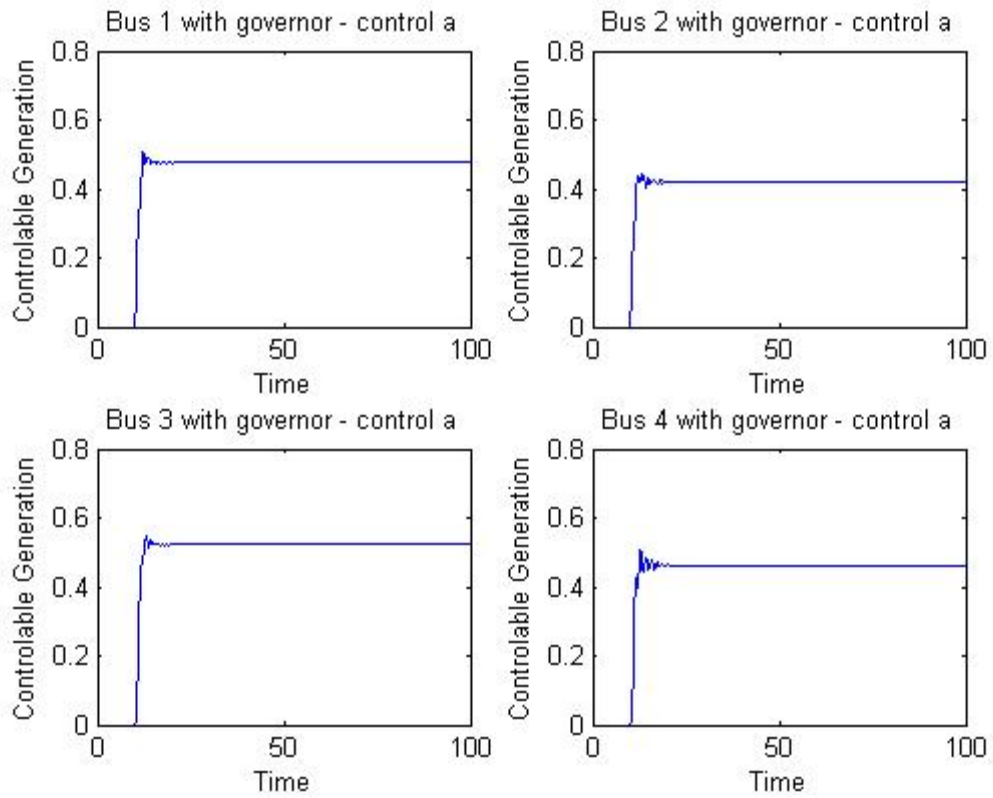
Σχήμα 5.8 Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και χωρίς κανένα μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 2 pu



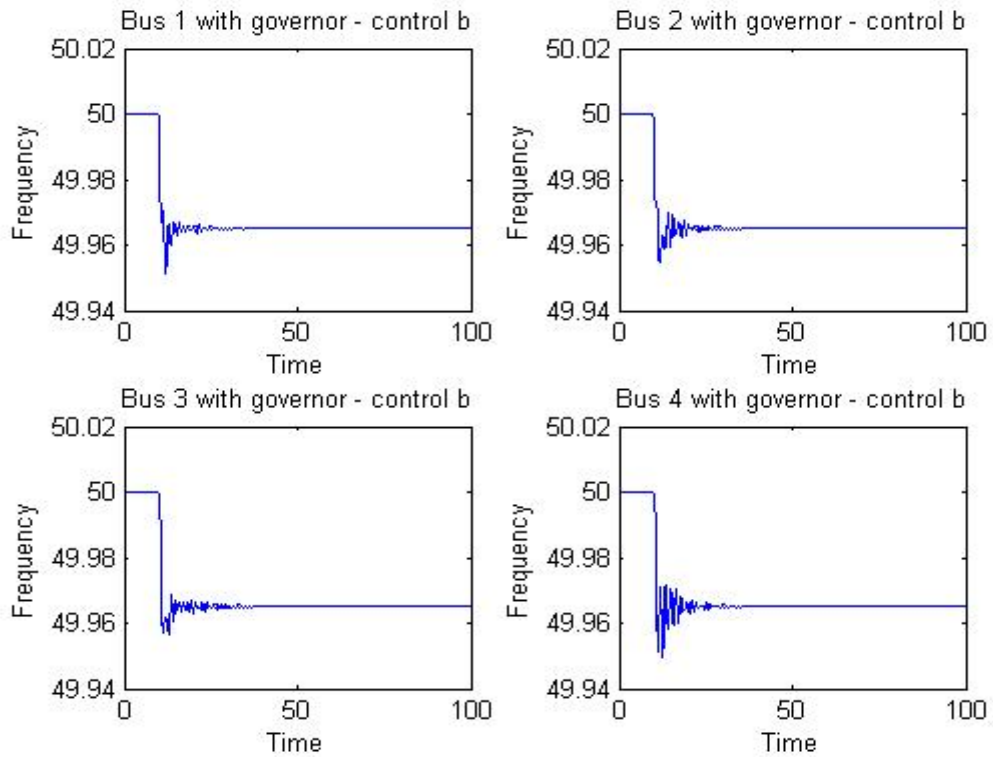
Σχήμα 5.9 Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu



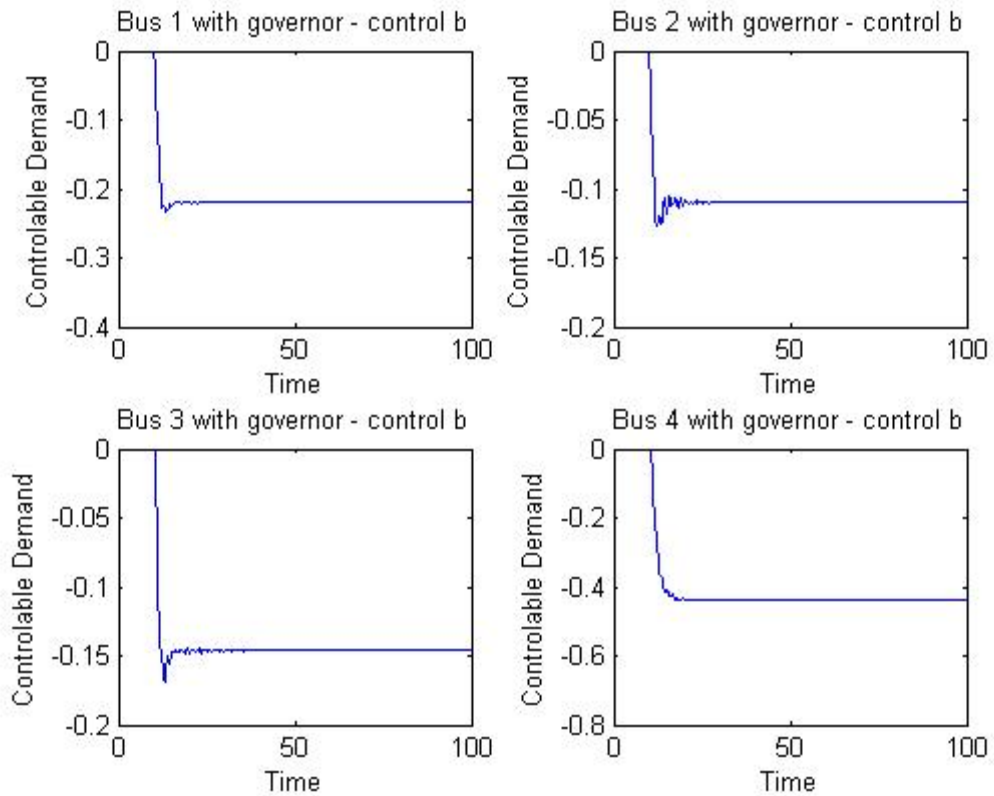
Σχήμα 5.10 Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu



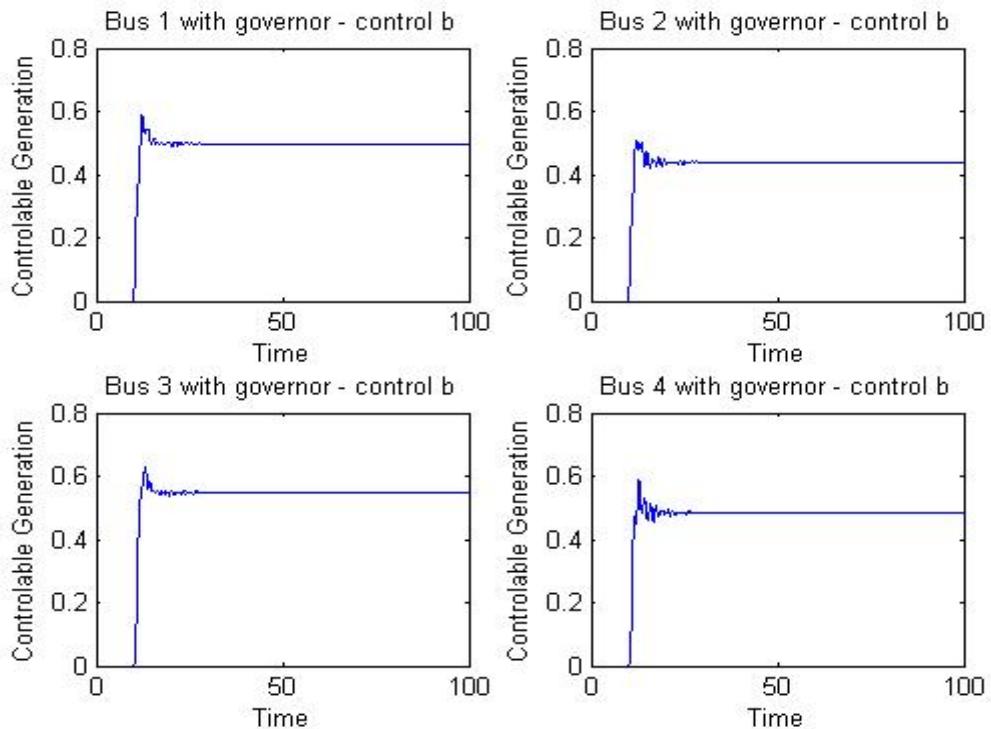
Σχήμα 5.11 Ελεγχόμενη παραγωγή μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu



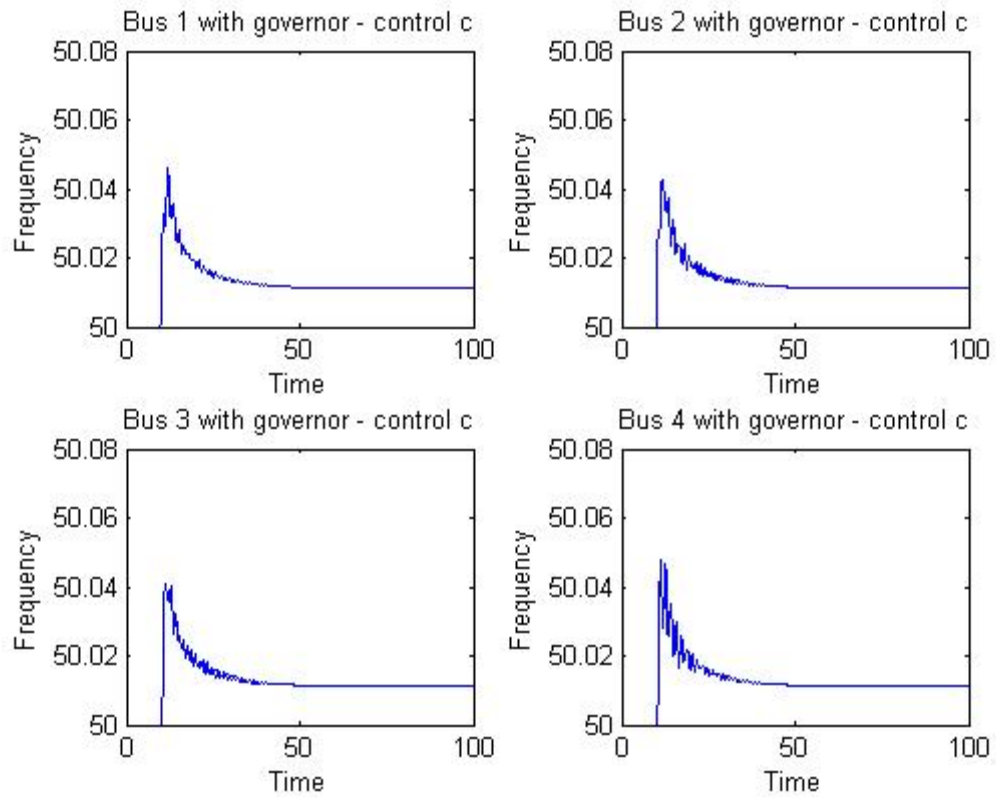
Σχήμα 5.12 Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu



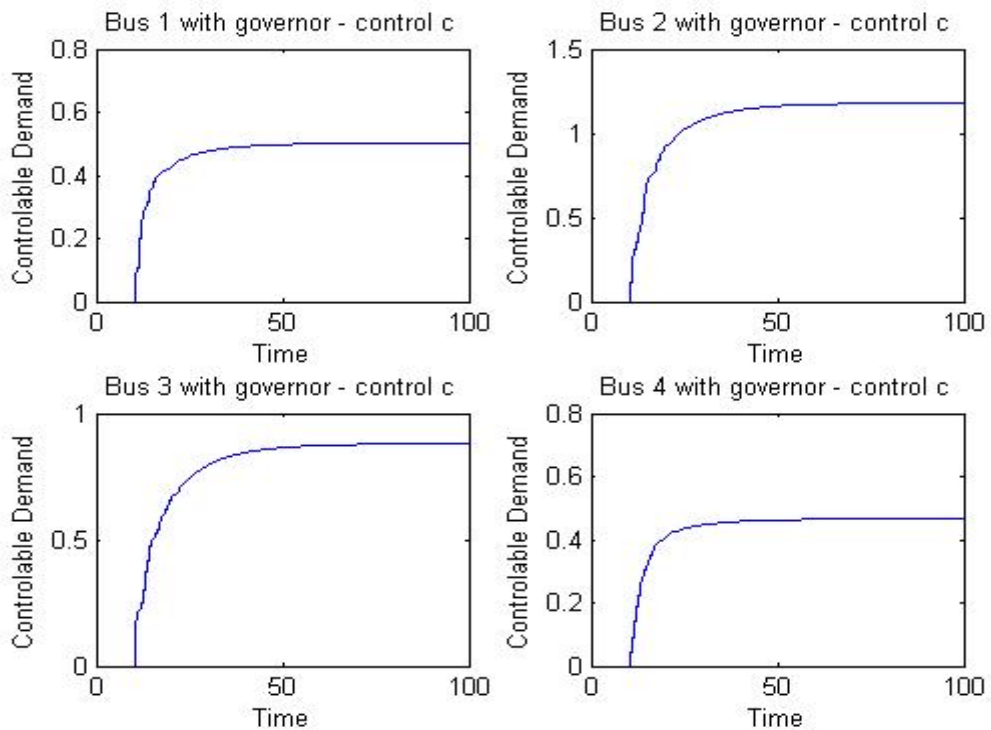
Σχήμα 5.13 Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu



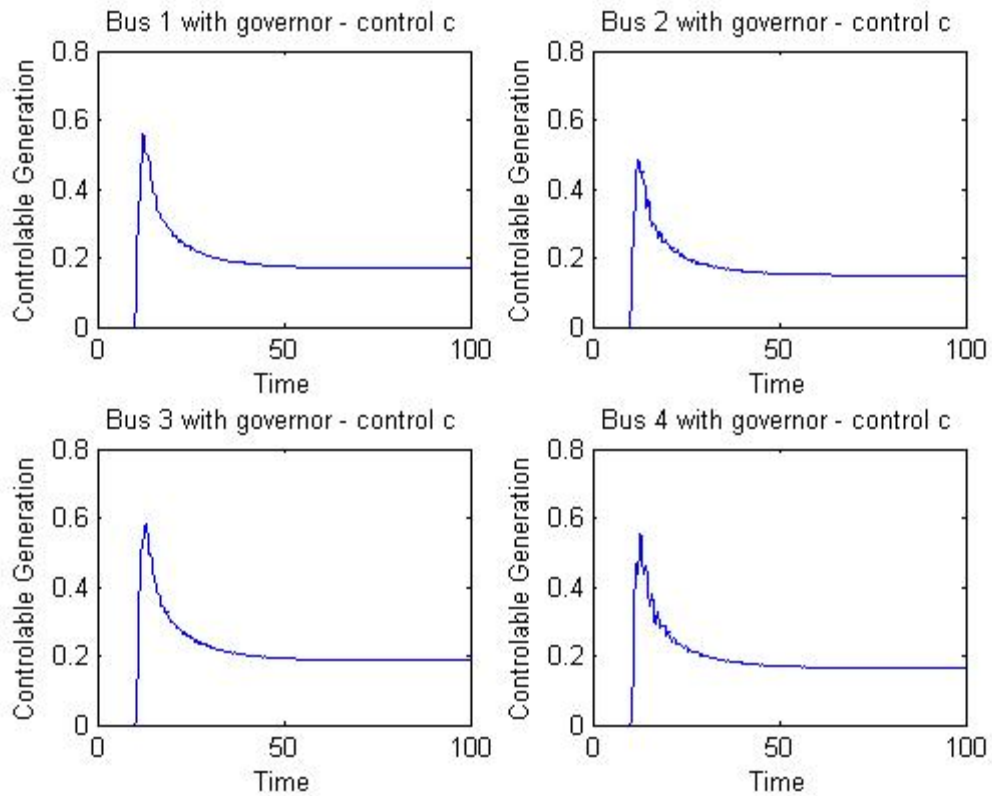
Σχήμα 5.14 Ελεγχόμενη παραγωγή μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu



Σχήμα 5.15 Συχνότητα μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu



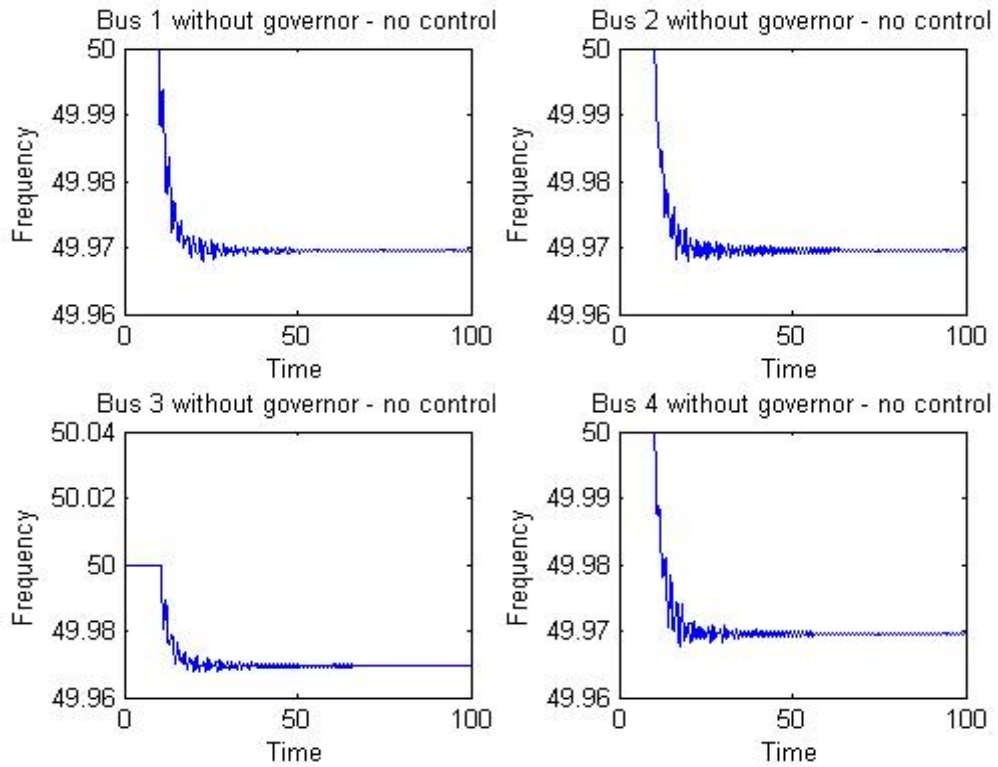
Σχήμα 5.16 Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu



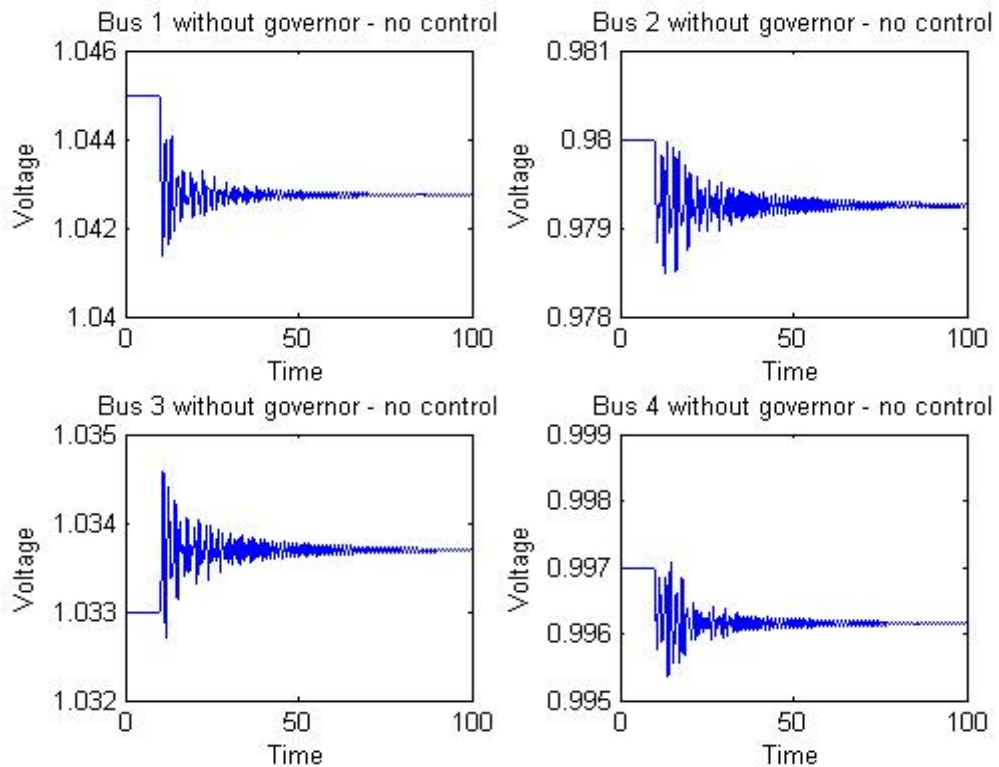
Σχήμα 5.17 Ελεγχόμενη παραγωγή μοντέλου δευτέρου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu

Μετέπειτα βλέπουμε το μοντέλο τρίτου βαθμού, χωρίς governor και χωρίς κανένα μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για να μπορούμε να συγκρίνουμε και να εννοήσουμε την σημασία της ύπαρξής τους. Στην συνέχεια ακολουθούν οι προσομοιώσεις και για τα τρία πλαίσια ελέγχου ξεχωριστά χωρίς governor, για το μοντέλο τρίτου βαθμού. Τέλος θα δούμε όλους τους παραπάνω συνδυασμούς με governor.

Αρχικά στο Σχήμα 5.18 έχουμε κάνει αλλαγή μόνο στον ζυγό 1 της τάξης του 1 pu στα 10 δευτερόλεπτα και στο σύστημα δεν έχουμε βάλει ούτε governor, ούτε κάποιο μηχανισμό ελέγχου συχνότητας. Βλέπουμε πως η συχνότητα πέφτει σε όλους τους ζυγούς το ίδιο (κάποιοι ζυγοί έχουν μεγαλύτερα oscillations από άλλους ζυγούς) και από 50 Hz πάει στα 49,97 Hz. Επίσης επειδή το μοντέλο τρίτου βαθμού είναι πιο ακριβές, κάναμε προσομοίωση και για την τάση, με τα ίδια δεδομένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 19 και βλέπουμε ότι σταθεροποιείται στα 1,0428V. Ενώ βλέπουμε στο Σχήμα 5.29 ότι βάζοντας governor, που η δουλειά του είναι να μετρά και να ρυθμίζει την ταχύτητα μιας γεννήτριας, με αλλαγή στον ζυγό 1 της τάξεως των 2 pu η συχνότητα από 50 πέφτει στο 49,979 Hz που είναι μια σημαντική βελτίωση σε σχέση με την προσομοίωση χωρίς governor η οποία ήταν με αλλαγή 1 pu. Τέλος η τάση όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.30 ο ζυγός 1 σταθεροποιείται στα 1,041 pu, ο ζυγός 2 στα 0,9788 pu, ο ζυγός 3 στα 1,0344 pu και ο ζυγός 4 στα 0,9954 pu.

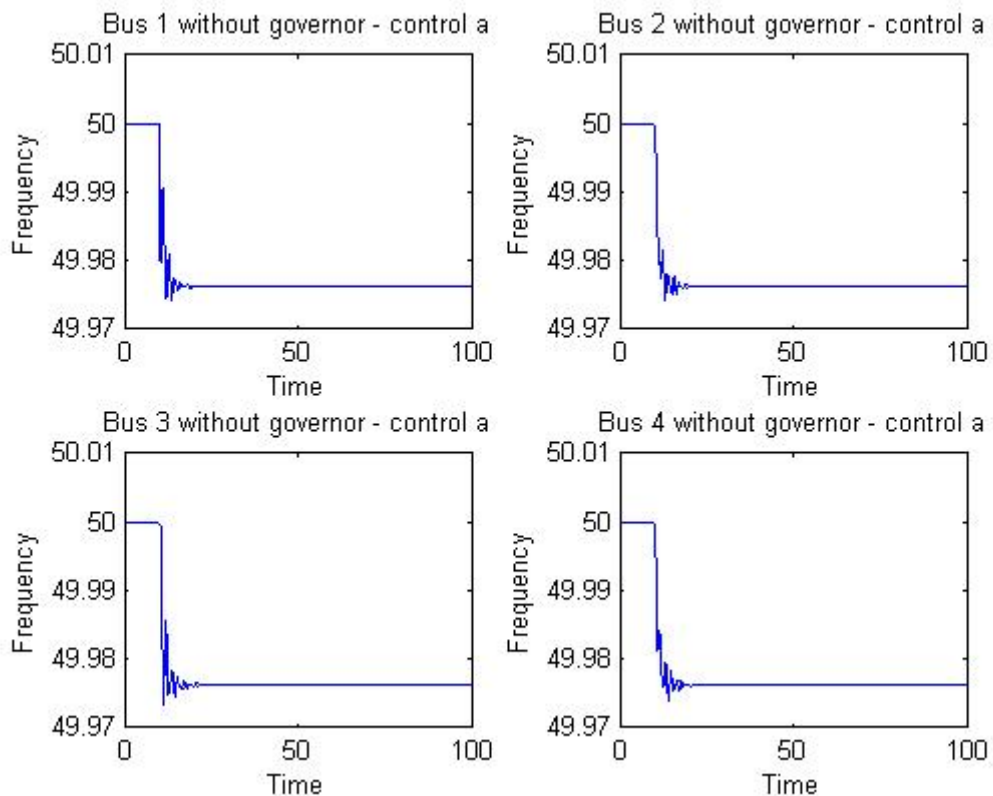


Σχήμα 5.18 Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και χωρίς κανένα μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 1 pu

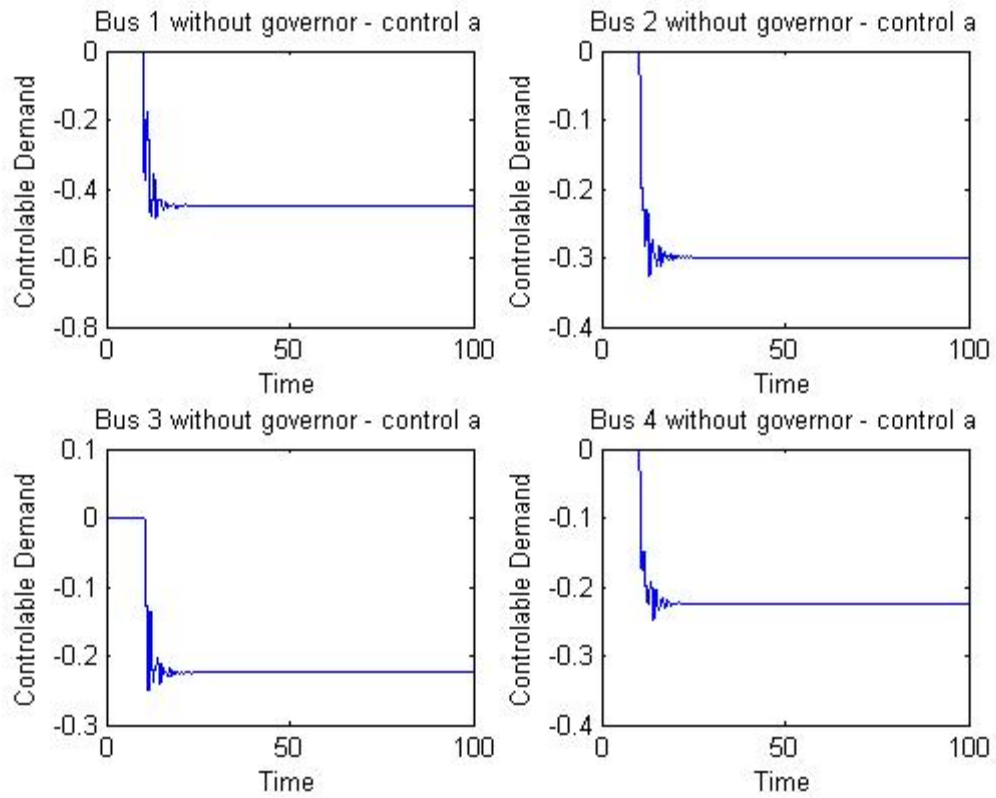


Σχήμα 5.19 Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και χωρίς κανένα μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 1 pu

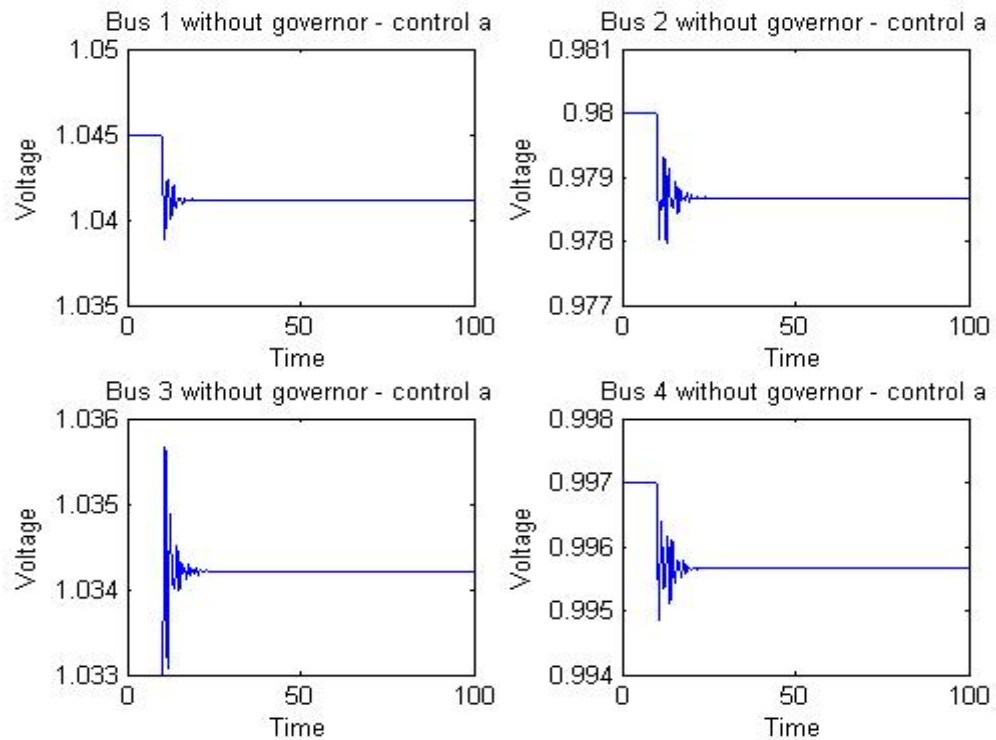
Στο Σχήμα 5.20 εκτελέσαμε μια αλλαγή της τάξεως των 2 pu στα 10 δευτερόλεπτα, χωρίς governor αλλά έχουμε εφαρμόσει το μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A. Η συχνότητα έχει πέσει από τα 50 Hz στα 49,977 Hz. Με τα ίδια δεδομένα προσομοιώσαμε την ελεγχόμενη ζήτηση με αποτέλεσμα ο ζυγός 1 να δέχεται αλλαγή -0,44 pu, ο ζυγός 2 αλλαγή -0,3 pu, ο ζυγός 3 αλλαγή -0,22 pu, και ο ζυγός 4 αλλαγή -0,22 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21. Με τα ίδια δεδομένα με την προσομοίωση της τάσης, στον ζυγό 1 έχουμε αλλαγή και σταθεροποίηση στα 1,041 pu, στον ζυγό 2 σταθεροποίηση στα 0,9787 pu, στον ζυγό 3 σταθεροποίηση στα 1,0342 pu, και στον ζυγό 4 σταθεροποίηση στα 0,9957 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.22. Όταν συνδυάσουμε όμως τον governor και τον έλεγχο A όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.31 η συχνότητα πέφτει από 50 στα 49,986 Hz. Επίσης στο Σχήμα 5.32 η προσομοίωση για την ελεγχόμενη ζήτηση με τα τελευταία δεδομένα μας δείχνει ότι ο ζυγός 1 αλλάζει κατά -0,27 pu, ο ζυγός 2 αλλάζει κατά -0,18 pu, ο ζυγός 3 αλλάζει κατά -0,13 pu και ο ζυγός 4 αλλάζει κατά -0,14 pu, δηλαδή υπάρχει μεγάλη διαφορά με το Σχήμα 5.21 στο οποίο δεν υπάρχει governor. Επίσης στη προσομοίωση της ελεγχόμενης παραγωγής με governor έχουμε αλλαγή στον ζυγό 1 της τάξης του 0,2 pu, στον ζυγό 2 της τάξης του 0,18 pu, στον ζυγό 3 της τάξης του 0,215 pu και στο ζυγό 4 της τάξης του 0,195 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.33. Με την προσομοίωση της τάσης βλέπουμε ότι στον ζυγό 1 σταθεροποιείται στα 1,041 pu, στον ζυγό 2 σταθεροποιείται στα 0,9788 pu, στον ζυγό 3 σταθεροποιείται στα 1,0343 pu και στον ζυγό 4 σταθεροποιείται στα 0,9955 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.34.



Σχήμα 5.20 Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu

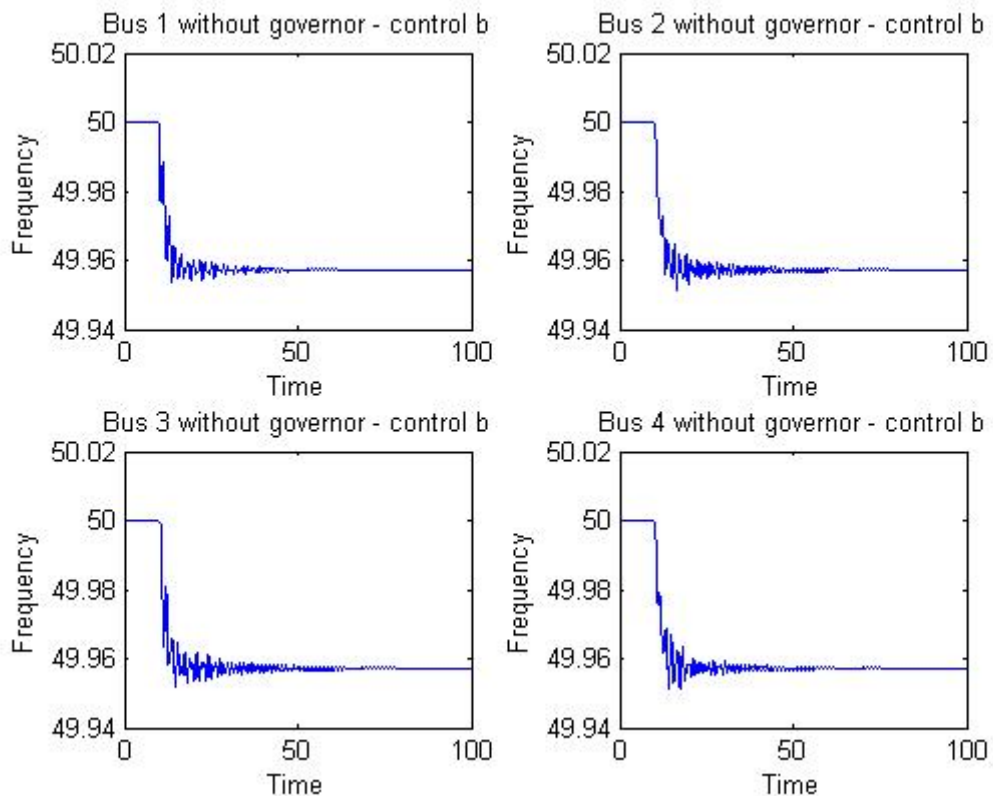


Σχήμα 5.21 Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu

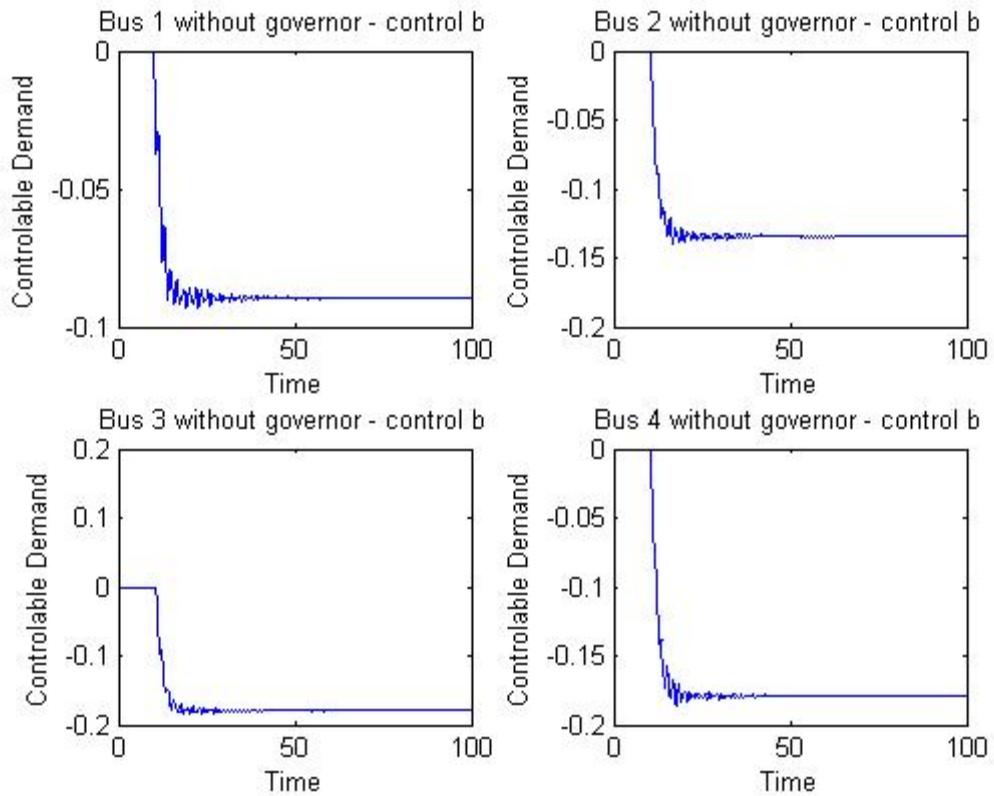


Σχήμα 5.22 Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu

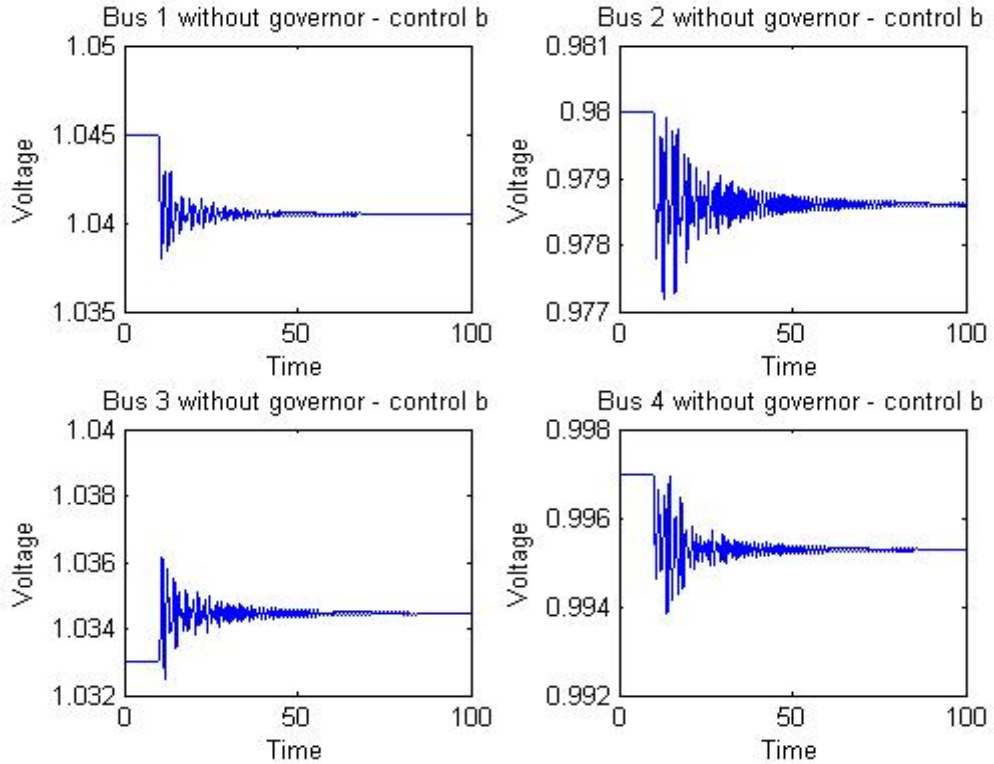
Στο Σχήμα 5.23 εκτελέσαμε μια αλλαγή της τάξεως των 2 pu στα 10 δευτερόλεπτα, χωρίς governor αλλά έχουμε εφαρμόσει το μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B. Η συχνότητα έχει πέσει από τα 50 Hz στα 49,958 Hz. Με τα ίδια δεδομένα η προσομοίωση της ελεγχόμενης ζήτησης να έχει ως αποτέλεσμα τον ζυγό 1 να δέχεται αλλαγή -0,9 pu, τον ζυγό 2 αλλαγή -0,14 pu, τον ζυγό 3 αλλαγή -0,18 pu, και τον ζυγό 4 αλλαγή -0,18 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.24. Με τα ίδια δεδομένα η προσομοίωση της τάσης έχει ως αποτέλεσμα ο ζυγός 1 να δέχεται αλλαγή και να σταθεροποιείται στα 1,0408 pu, ο ζυγός 2 να σταθεροποιείται στα 0,9787 pu, ο ζυγός 3 να σταθεροποιείται στα 1,0344 pu, και ο ζυγός 4 να σταθεροποιείται στα 0,9954 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.25. Όταν συνδυάσουμε όμως τον governor και το μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.35, η συχνότητα πέφτει από 50 στα 49,99 Hz. Επίσης στο Σχήμα 5.36 με την προσομοίωση για την ελεγχόμενη ζήτηση με αλλαγή 1 pu, βλέπουμε ότι ο ζυγός 1 αλλάζει κατά -0,02 pu, ο ζυγός 2 αλλάζει κατά -0,03 pu, ο ζυγός 3 αλλάζει κατά -0,04 pu και ο ζυγός 4 αλλάζει κατά -0,04 pu. Επίσης στην προσομοίωση της ελεγχόμενης παραγωγής με governor, για 1 pu αλλαγή, έχουμε αποτέλεσμα την αλλαγή στον ζυγό 1 της τάξης του 0,14 pu, στον ζυγό 2 της τάξης του 0,12 pu, στον ζυγό 3 της τάξης του 0,15 pu και στο ζυγό 4 της τάξης του 0,13 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.37. Με την προσομοίωση της τάσης έχουμε ως αποτέλεσμα στον ζυγό 1 η τάση να σταθεροποιείται στα 1,0428 pu, στον ζυγό 2 να σταθεροποιείται στα 0,9798 pu, στον ζυγό 3 να σταθεροποιείται στα 1,0338 pu και στον ζυγό 4 να σταθεροποιείται στα 0,9966 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.38.



Σχήμα 5.23 Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu

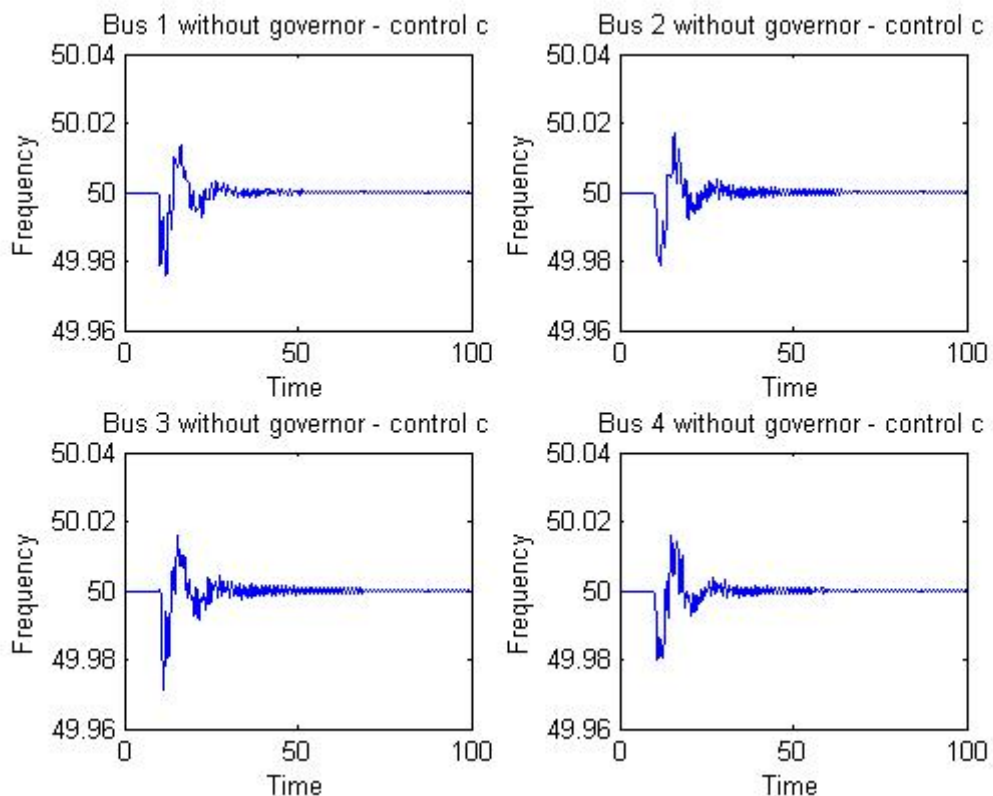


Σχήμα 5.24 Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu

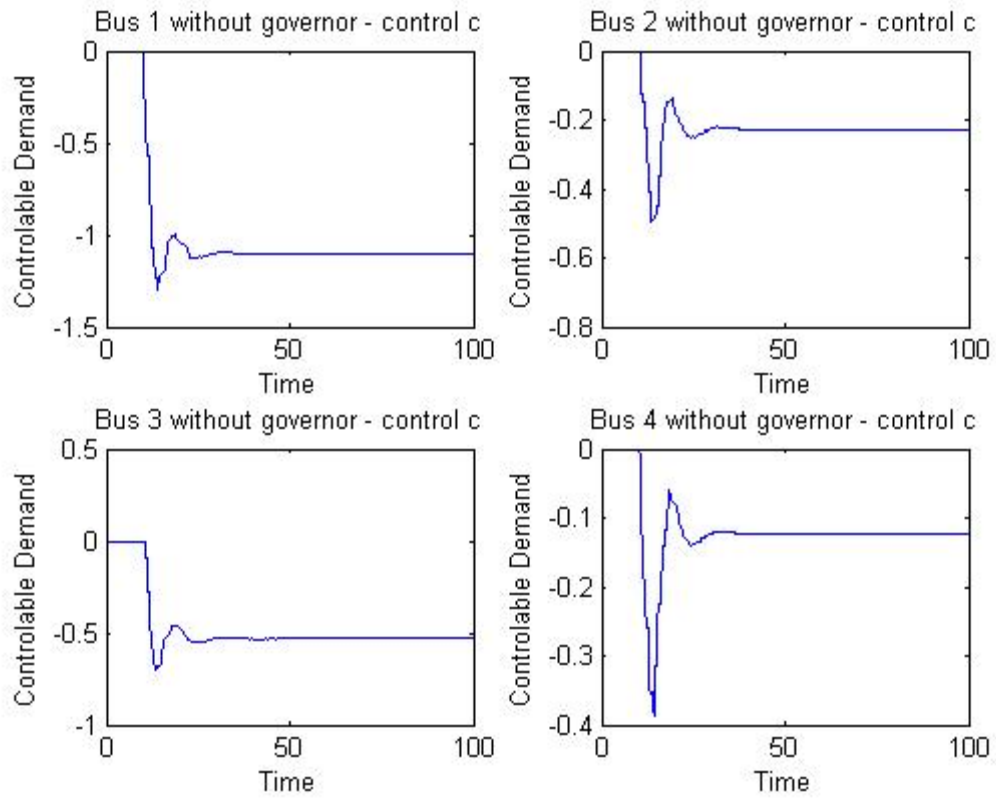


Σχήμα 5.25 Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 2 pu

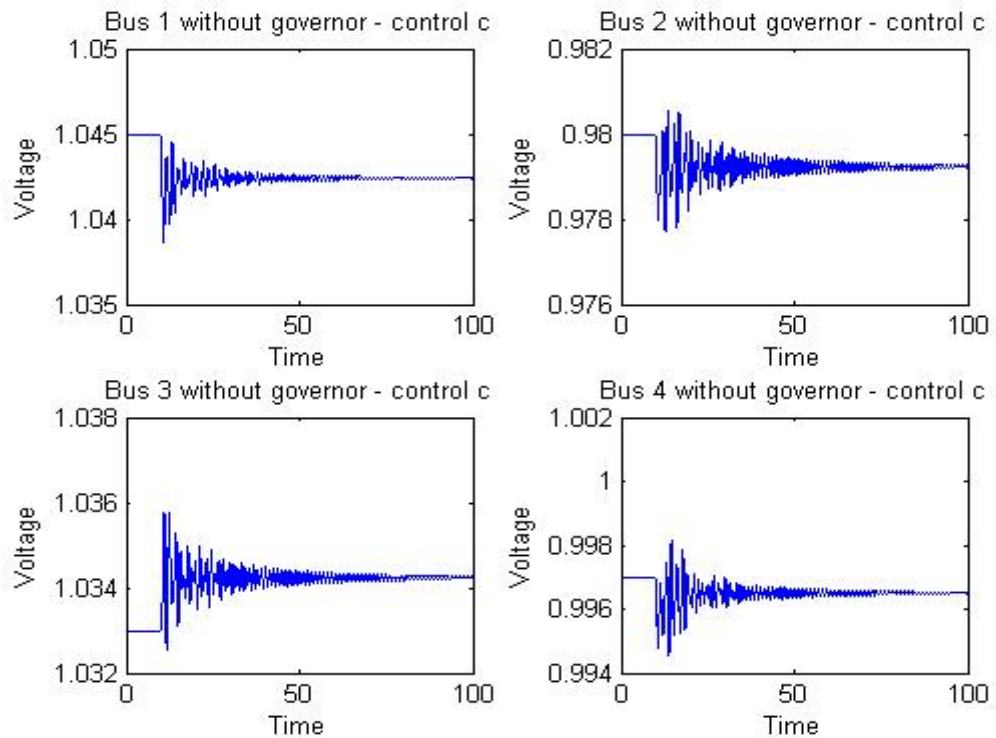
Στο Σχήμα 5.26 εκτελέσαμε μια αλλαγή της τάξεως των 2 pu στα 10 δευτερόλεπτα, χωρίς governor και έχουμε εφαρμόσει το μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C. Η συχνότητα έχει πέσει από τα 50 Hz στα 49,94 Hz και στην συνέχεια επιστρέφει πίσω στα 50 Hz.. Με τα ίδια δεδομένα η προσομοίωση της ελεγχόμενης ζήτησης έχει ως αποτέλεσμα τον ζυγό 1 να δέχεται αλλαγή της τάξης του -0,75 pu, τον ζυγό 2 αλλαγή της τάξης του -1,51 pu, τον ζυγό 3 της τάξης του -1,1 pu, και τον ζυγό 4 της τάξης του -0,64 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.27. Με τα ίδια δεδομένα προσομοίωση της τάσης έχει ως αποτέλεσμα ο ζυγός 1 να δέχεται αλλαγή και να σταθεροποιείται στα 1,045 pu, ο ζυγός 2 να σταθεροποιείται στα 0,9792 pu, ο ζυγός 3 να σταθεροποιείται στα 1,0344 pu, και ο ζυγός 4 να σταθεροποιείται στα 0,9968 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.28. Όταν συνδυάσουμε όμως τον governor και το μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.39, με αλλαγή -2 pu, η συχνότητα ανεβαίνει από 50 στα 50,01 Hz. Επίσης στο Σχήμα 5.40 η προσομοίωση για την ελεγχόμενη ζήτηση με τα τελευταία δεδομένα μας δείχνει ότι ο ζυγός 1 αλλάζει κατά 0,5 pu, ο ζυγός 2 αλλάζει κατά 1,2 pu, ο ζυγός 3 αλλάζει κατά 0,9 pu και ο ζυγός 4 αλλάζει κατά 0,45 pu, δηλαδή υπάρχει μεγάλη διαφορά με το Σχήμα 5.27 στο οποίο δεν υπάρχει governor. Επίσης στη προσομοίωση για την ελεγχόμενη παραγωγή με governor, έχουμε αλλαγή στον ζυγό 1 της τάξης του -0,16 pu, στον ζυγό 2 της τάξης του -0,12 pu, στον ζυγό 3 της τάξης του -0,18 pu και στο ζυγό 4 της τάξης του -0,16 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.41 και τέλος στην προσομοίωση της τάσης έχουμε αλλαγή στον ζυγό 1 της τάξης του 1,0457 pu, στον ζυγό 2 της τάξης του 0,981 pu, στον ζυγό 3 της τάξης του 1,0318 pu και στον ζυγό 4 της τάξης του 0,998 pu όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.42.



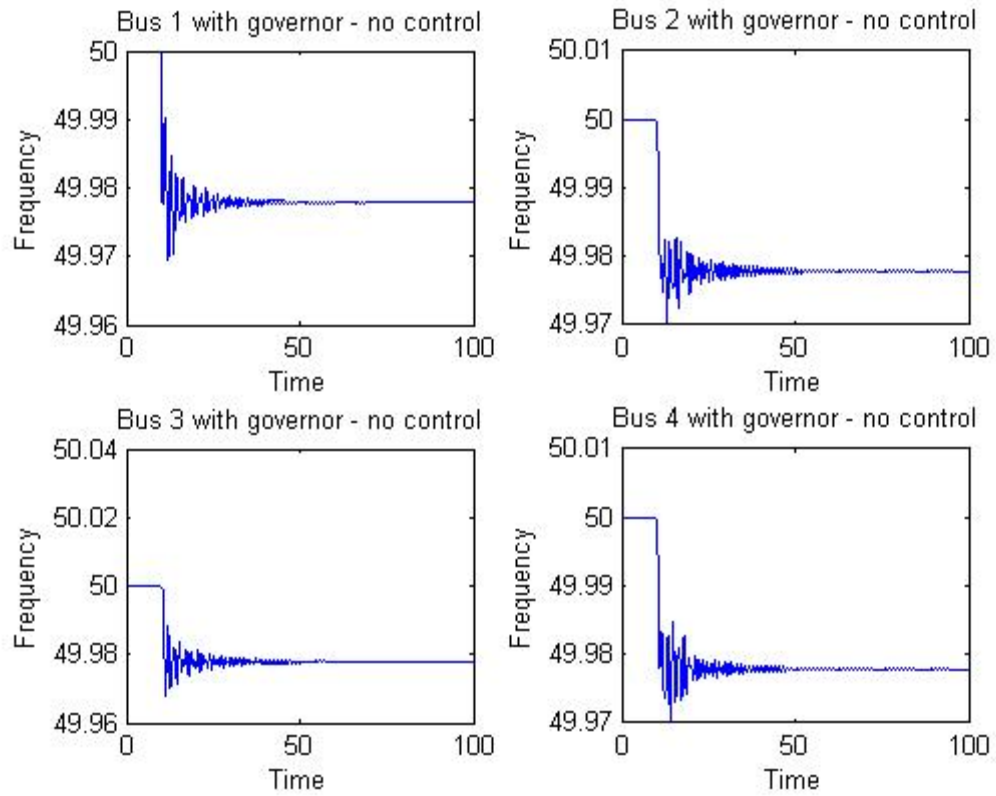
Σχήμα 5.26 Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή 2



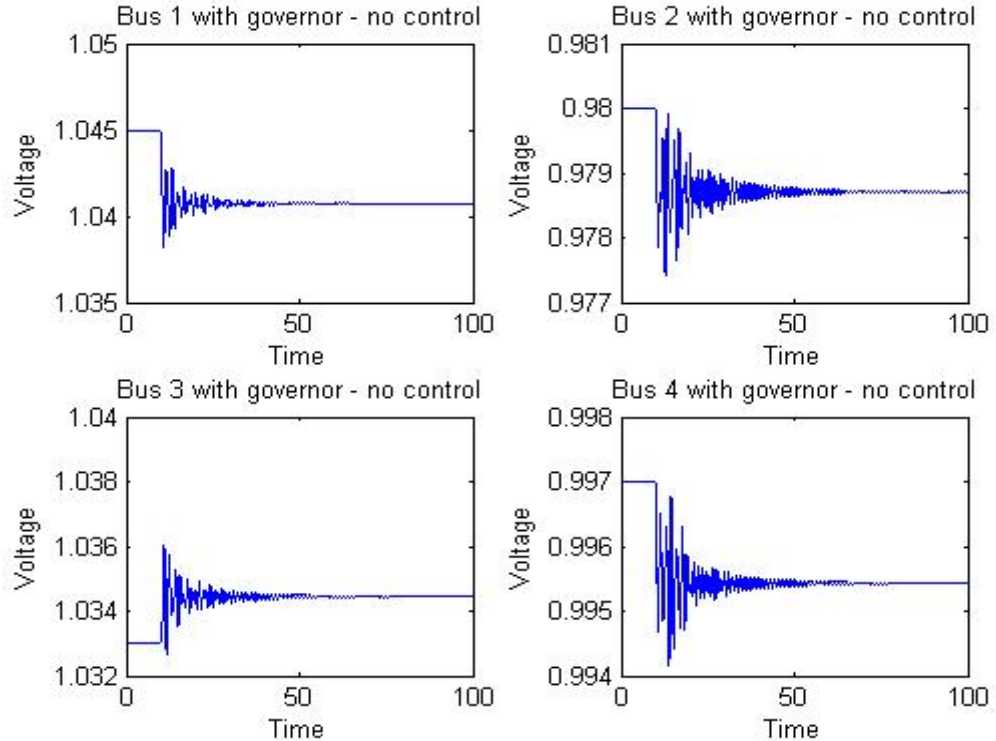
Σχήμα 5.27 Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή 2 pu



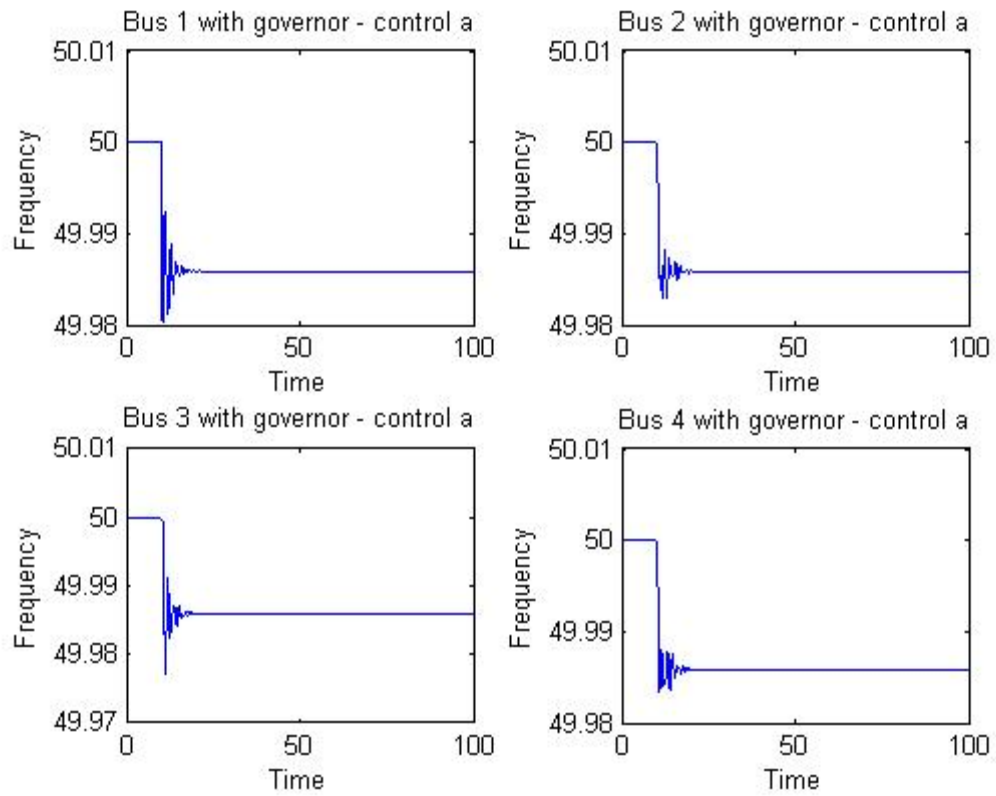
Σχήμα 5.28 Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού χωρίς governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή 2 pu



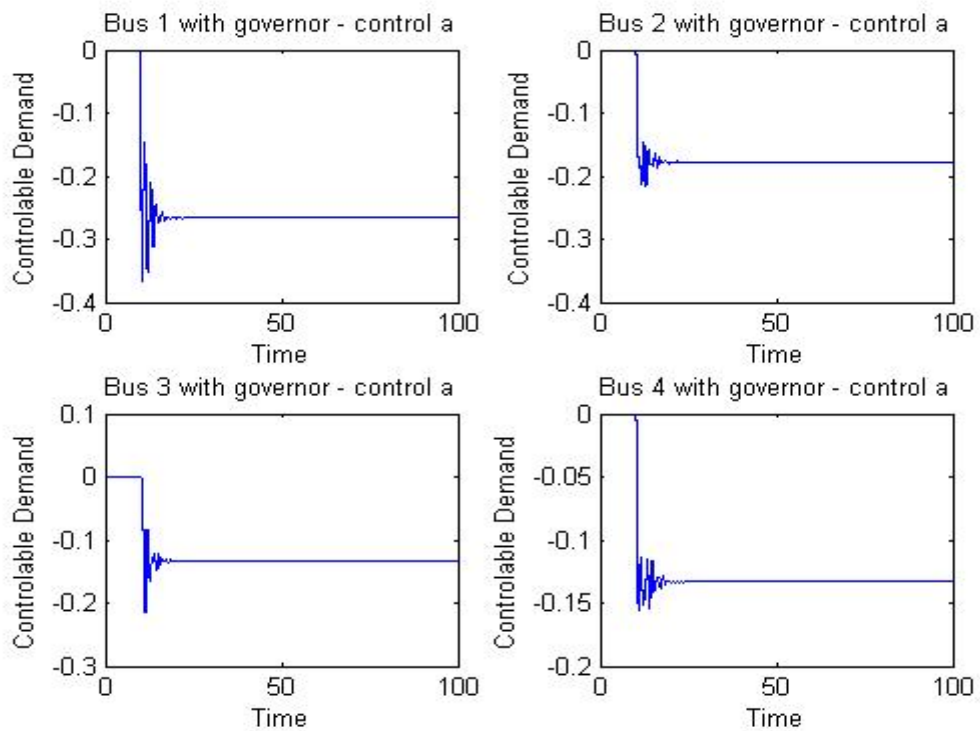
Σχήμα 5.29 Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και χωρίς κάποιο μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 2 pu



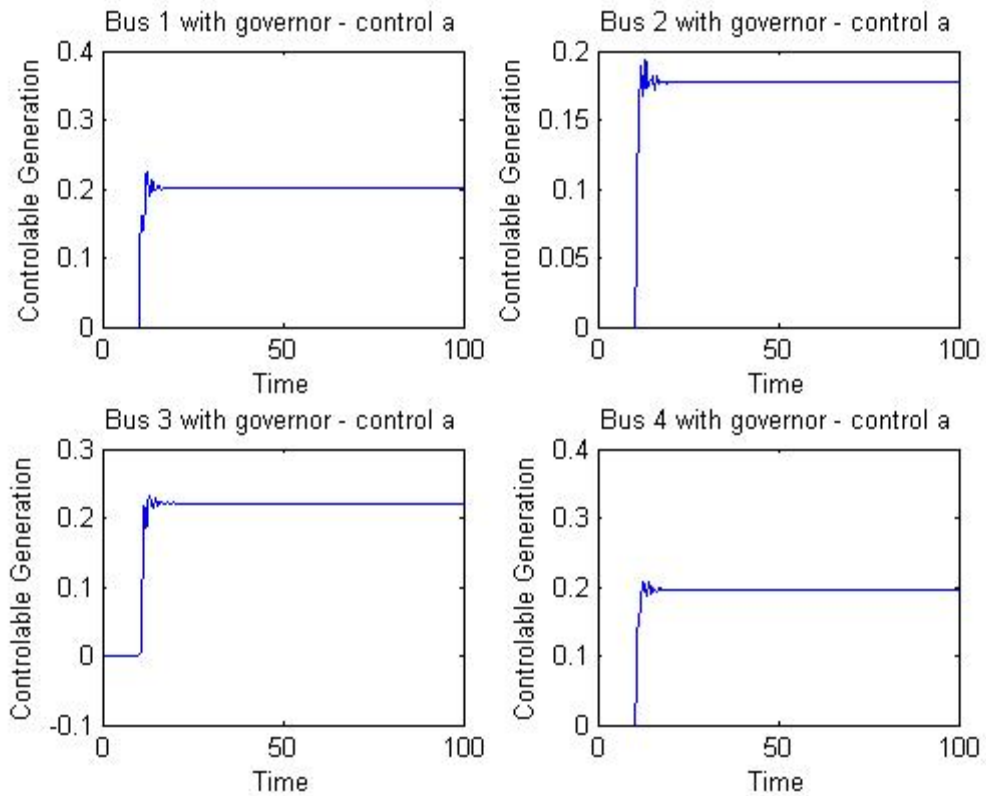
Σχήμα 5.30 Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και χωρίς κάποιο μηχανισμό ελέγχου συχνότητας για αλλαγή 2 pu



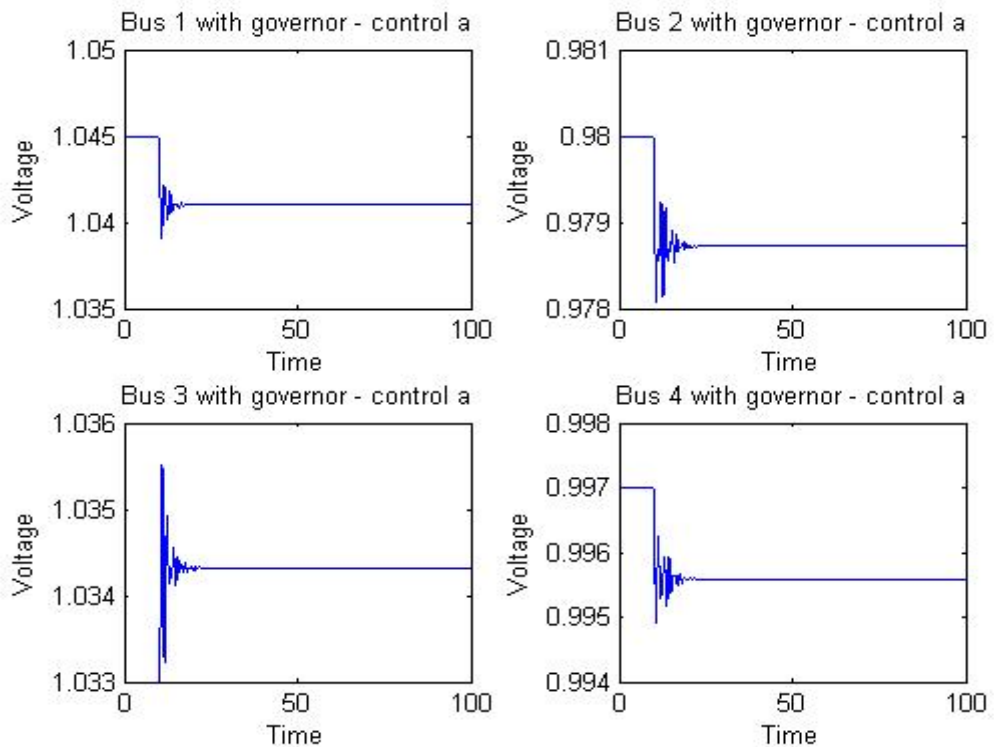
Σχήμα 5.31 Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu



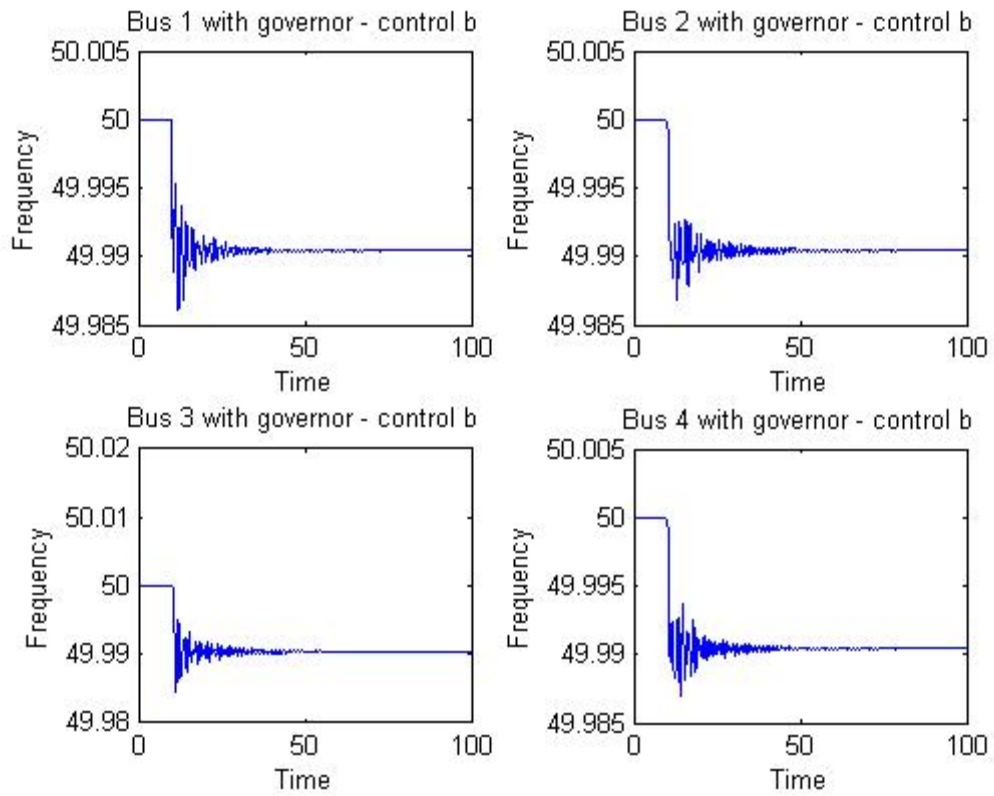
Σχήμα 5.32 Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu



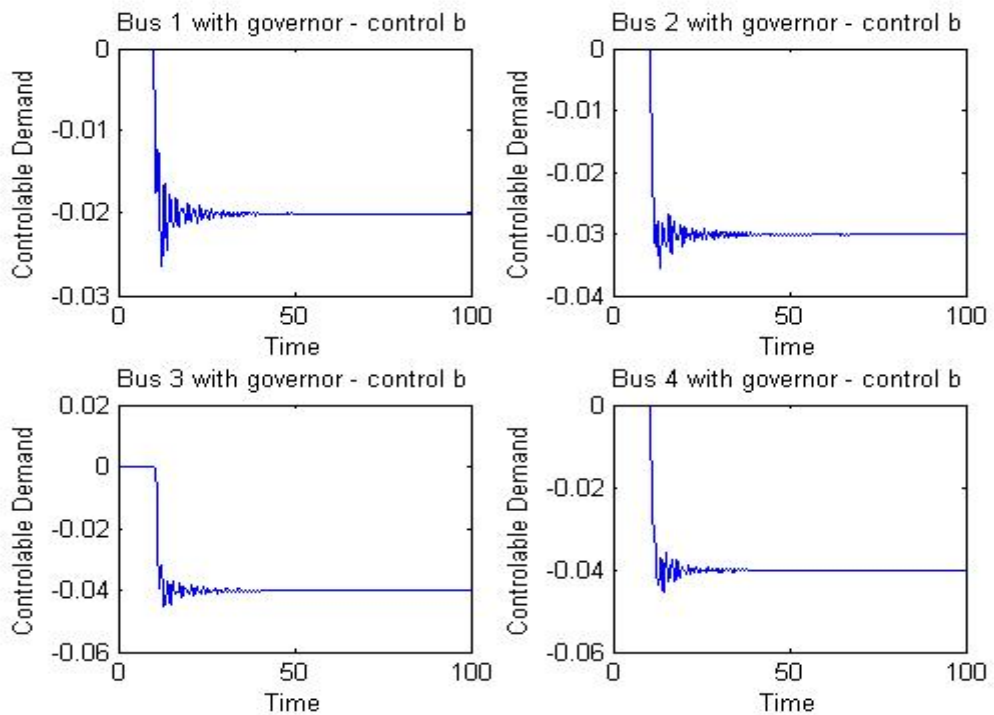
Σχήμα 5.33 Ελεγχόμενη παραγωγή μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu



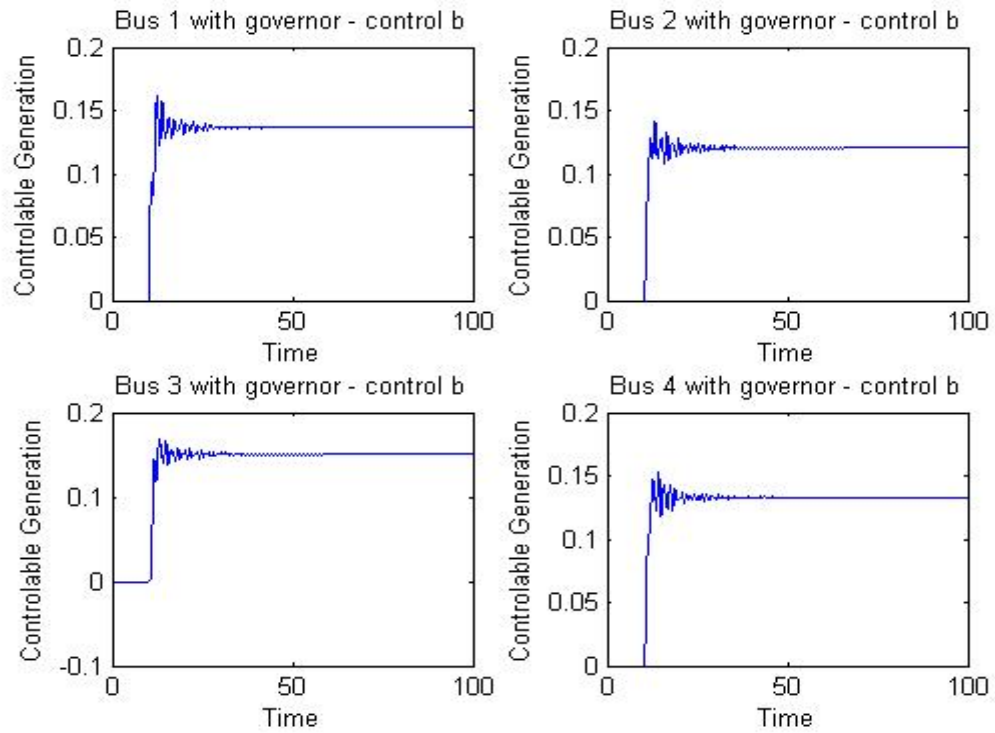
Σχήμα 5.34 Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A για αλλαγή 2 pu



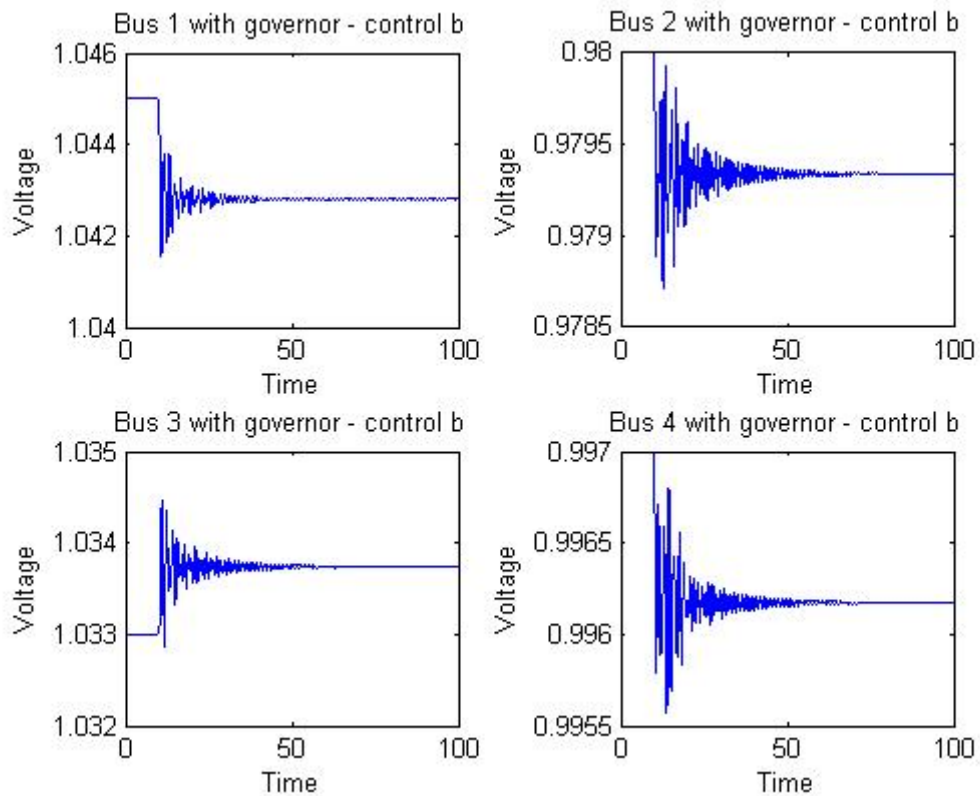
Σχήμα 5.35 Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 1 pu



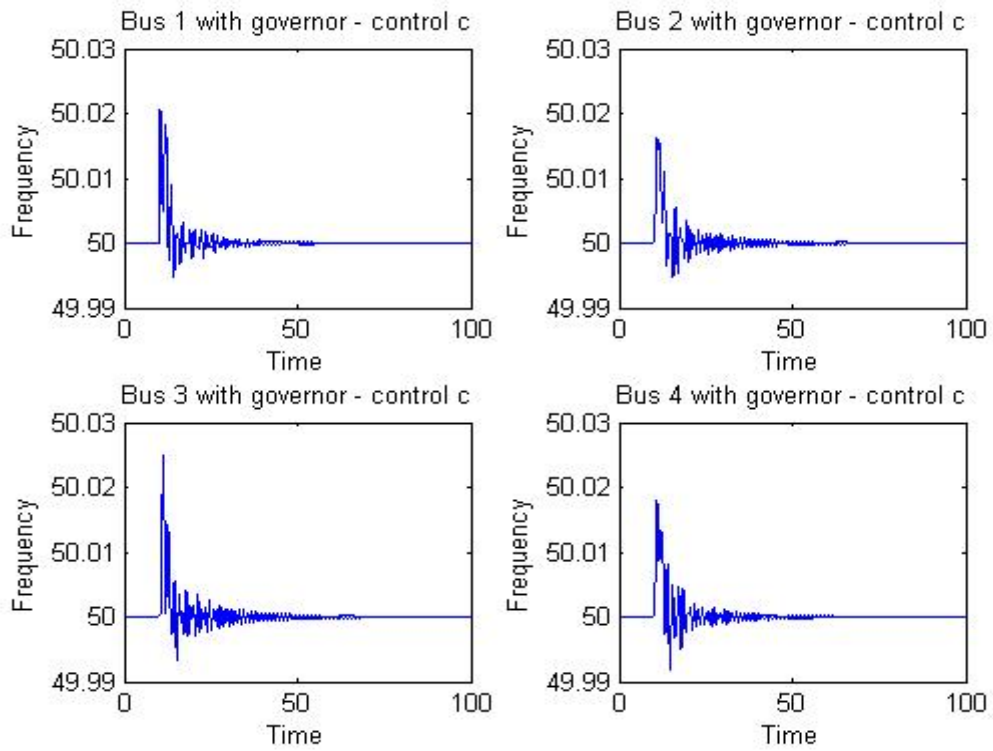
Σχήμα 5.36 Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 1 pu



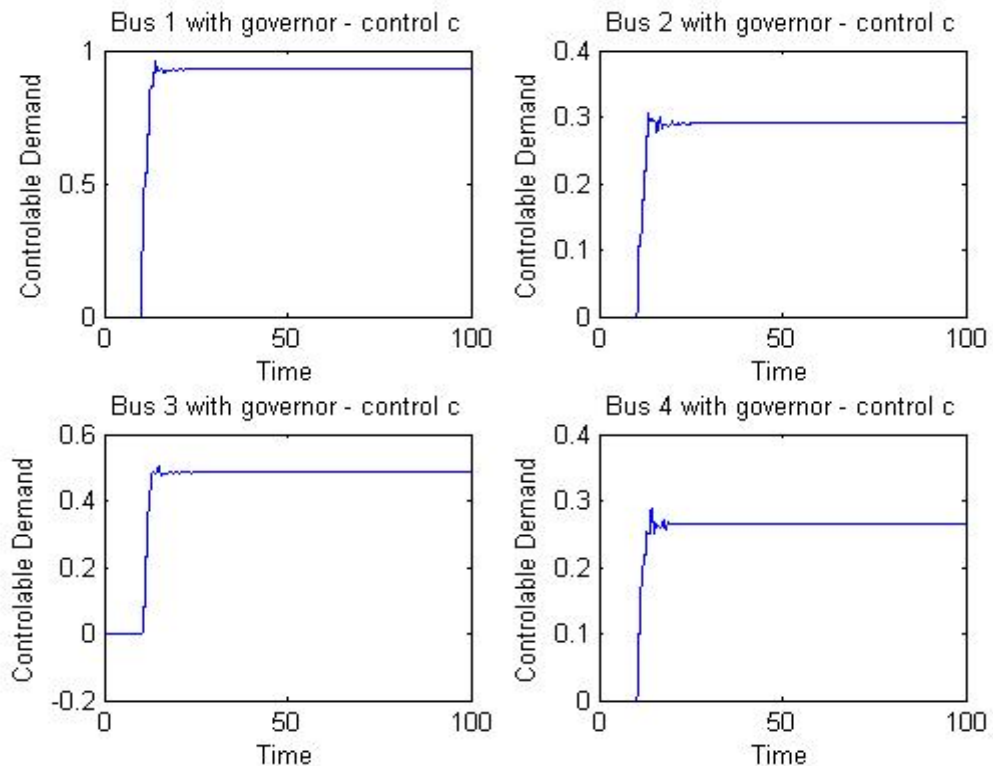
Σχήμα 5.37 Ελεγχόμενη παραγωγή μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 1 pu



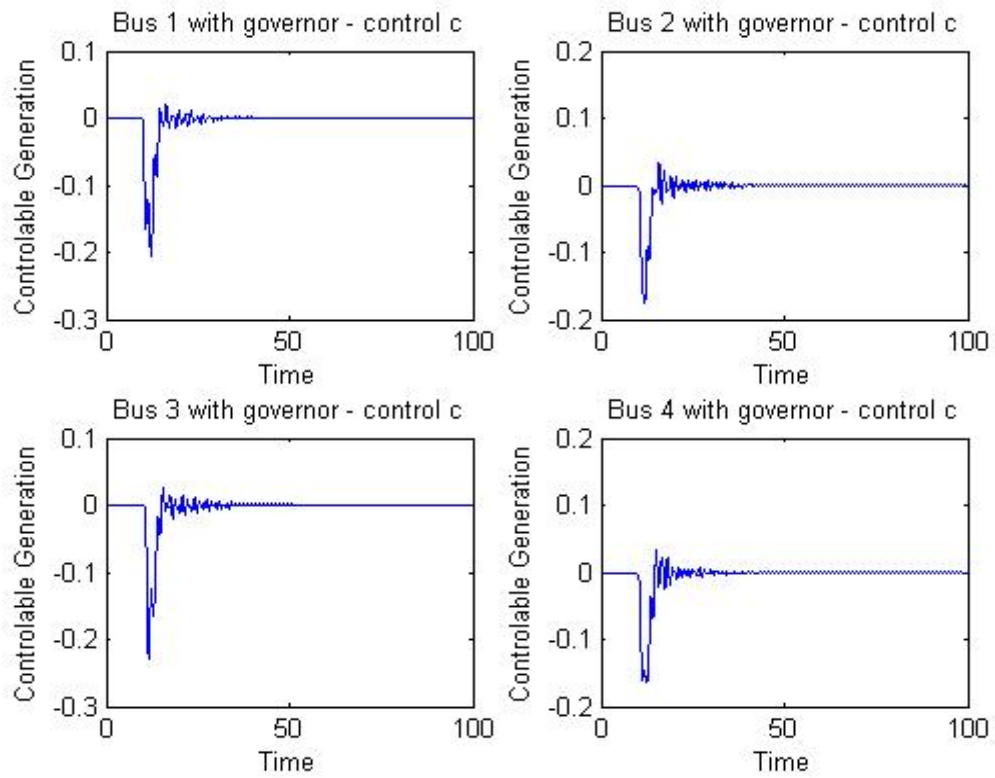
Σχήμα 5.38 Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B για αλλαγή 1 pu



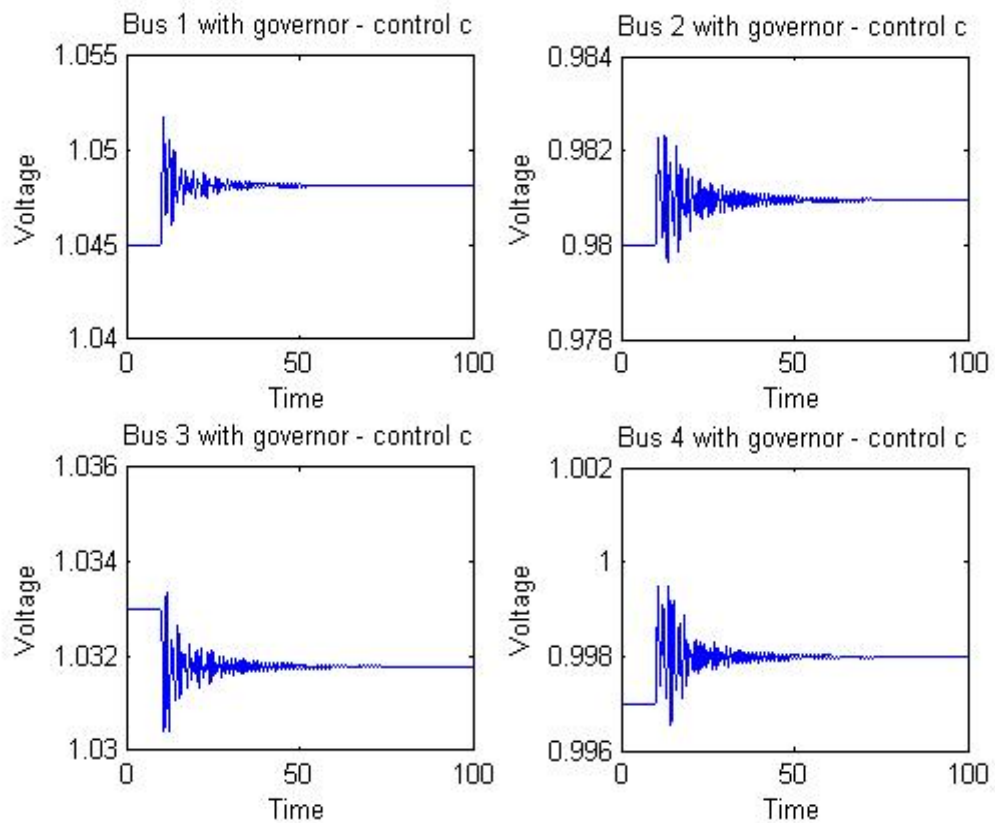
Σχήμα 5.39 Συχνότητα μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu



Σχήμα 5.40 Ελεγχόμενη ζήτηση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu



Σχήμα 5.41 Ελεγχόμενη παραγωγή μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu



Σχήμα 5.42 Τάση μοντέλου τρίτου βαθμού με governor και με μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C για αλλαγή -2 pu

5.3 Σύγκριση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Αφού έχουμε ολοκληρώσει αρκετές προσομοιώσεις είμαστε σε θέση να συγκρίνουμε και να αποφασίσουμε ποιοι μηχανισμοί ελέγχου είναι καλοί για το σύστημά μας και ποιοι όχι. Αρχικά βλέπουμε ότι με governor είναι πολύ αισθητή η βελτίωση από τις προσομοιώσεις που εκτελούνται χωρίς. Ακόμη και χωρίς governor όμως, το σύστημα μπορεί να δουλέψει, με την διαφορά ότι η συχνότητα θα σταθεροποιηθεί σε πιο απομακρυσμένη τιμή από την ονομαστική της το οποίο όμως αποτελεί πρόβλημα από μόνο του. Βλέπουμε ότι από το Σχήμα 8 μέχρι το Σχήμα 17 (μοντέλο δευτέρου βαθμού) στα οποία περιλαμβάνεται governor είναι πιο καλά για το σύστημα από το Σχήμα 1 μέχρι το Σχήμα 7 αντίστοιχα (μοντέλο δευτέρου βαθμού). Επίσης από το Σχήμα 28 μέχρι το Σχήμα 42 (μοντέλο τρίτου βαθμού) σε σύγκριση με τα σχήματα από το Σχήμα 18 μέχρι το Σχήμα 28 (μοντέλο δευτέρου βαθμού) αντίστοιχα είναι καλύτερα για το σύστημα. Περαιτέρω είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι χωρίς governor δεν μπορούμε να ελέγξουμε την παραγωγή, ενώ χωρίς μηχανισμό ελέγχου της συχνότητας δεν μπορούμε να ελέγξουμε ούτε την ζήτηση.

Όσο αφορά τους μηχανισμούς ελέγχου συχνότητας, αρχικά για τον A, μπορούμε να δούμε ότι ανταποκρίνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9 (μοντέλο δευτέρου βαθμού) και στο Σχήμα 5.31 (μοντέλο τρίτου βαθμού). Υπάρχουν μεγαλύτερες ταλαντώσεις στο Σχήμα 5.31, αλλά δεν μπορούμε να πούμε ότι είναι υπερβολικά μεγάλες που θα επηρεάσουν τόσο πολύ το σύστημα. Ξεχωρίζει ότι στον ζυγό 1 υπάρχουν μεγαλύτερες και περισσότερες ταλαντώσεις από τους υπόλοιπους ζυγούς αφού η αλλαγή έχει γίνει στον ίδιο. Παρόλα αυτά στο Σχήμα 5.31 η συχνότητα σταθεροποιείται πιο κοντά στην ονομαστική της τιμή.

Όσο αφορά τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B μπορούμε να παρατηρήσουμε κάτι που χρίζει σημασίας. Στο Σχήμα 12 (μοντέλο δευτέρου βαθμού) έχουμε δώσει αλλαγή της τάξεως των 2 pu και στο Σχήμα 35 (μοντέλο τρίτου βαθμού) έχουμε δώσει αλλαγή της τάξεως του 1 pu. Βλέπουμε ότι παρόλο που έχουμε αλλαγή 1 pu, η συχνότητα του μοντέλου τρίτου βαθμού σταθεροποιείται σε συχνότητα πιο κοντά στην ονομαστική της τιμή σε σύγκριση με το μοντέλο δευτέρου βαθμού, και ενώ στο μοντέλο τρίτου βαθμού έχουμε μεγαλύτερες ταλαντώσεις, δεν αλλάζει σημαντικά την επίδραση στο σύστημα.

Τέλος, όσο αφορά τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C τα αποτελέσματα είναι πολύ ενθαρρυντικά. Στο Σχήμα 5.15 (Μοντέλο δευτέρου βαθμού) φαίνεται για αλλαγή -2 pu, ότι η συχνότητα ανεβαίνει μέχρι ένα σημείο και μετέπειτα επιστρέφει κοντά στα 50 Hz. Εάν το συγκρίνουμε με την αντίστοιχη προσομοίωση στο Σχήμα 5.39 (Μοντέλο τρίτου βαθμού) που βλέπουμε ότι, παρόλο που έχουμε μεγαλύτερες και περισσότερες ταλαντώσεις, η συχνότητα επιστρέφει ακριβώς πίσω στην ονομαστική της τιμή αξιοποιώντας την ελεγχόμενη ζήτηση και παραγωγή. Αυτό είναι τεράστιας σημασίας αφού σκοπός μας είναι να πάρουμε την βέλτιστη λύση.

Με βάση τα πιο πάνω αποτελέσματα μπορούμε να πούμε ότι το μοντέλο τρίτου βαθμού είναι πολύ πιο ακριβές. Είναι τόσο ακριβές που μπορούμε να αντιληφθούμε την αλλαγή στην τάση του συστήματος (στο μοντέλο δευτέρου βαθμού θεωρείται πως δεν υπάρχει αλλαγή και η τάση παραμένει σταθερή) και το πώς επηρεάζει αυτό στο σύστημα, πράγμα που δεν αναφέρει κανένας συγγραφέας στα άρθρα του [57],[30],[54],[51],[33],[50]. Όπως βλέπουμε στα Σχήματα 5.19, 5.22, 5.25, 5.28, 5.30, 5.34, 5.38, 5.42 η τάση αλλάζει και δεν παραμένει σταθερή, ενώ μάλιστα αργεί να σταθεροποιηθεί. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα επηρεάζεται και δεν πρέπει να θεωρείται σταθερή και δεδομένη αλλά μέρος του προβλήματος.

Κεφάλαιο 6

Πρόβλημα Βελτιστοποίησης

6.1 Περιγραφή Προβλήματος Βελτιστοποίησης

Συγκεκριμένα θεωρούμε ένα απλό μοντέλο δικτύου, ένα μοντέλο που περιγράφεται από γραμμικοποιημένες δυναμικές εξισώσεις σε ζυγούς της γεννήτριας, δυναμικές ροής ισχύος στους κλάδους, και ένα μέτρο μη λειτουργικότητας (disutility) για τους χρήστες όταν συμμετέχουν στον πρωτεύον έλεγχο της συχνότητας. Σε σταθερή κατάσταση, οι συχνότητες σε διαφορετικούς ζυγούς συγχρονίζονται σε μια κοινή ονομαστική τιμή και η μηχανική ισχύς εξισορροπείται με την ηλεκτρική ενέργεια σε κάθε ζυγό. Υποθέτουμε μια μικρή αλλαγή στην διάχυση ρεύματος που εμφανίζεται σε ένα αυθαίρετο υποσύνολο των ζυγών, προκαλώντας τις συχνότητες των ζυγών να αποκλίνουν από την ονομαστική τους τιμή [54].

Υποθέτουμε ότι η αλλαγή είναι μικρή και το μοντέλο ροής ισχύος DC είναι αρκετά ακριβές. Αντί να γίνεται προσαρμογή των γεννητριών, με την παραδοσιακή προσέγγιση, πώς πρέπει να προσαρμοστούν τα ελεγχόμενα φορτία στο δίκτυο για να αποκατασταθεί η ισορροπία της ισχύς με τρόπο που να ελαχιστοποιεί την συνολική μη λειτουργικότητα (disutility) αυτών των φορτίων; Έχουμε διατυπώσει το ερώτημα αυτό ως πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου φορτίου (OLC), το οποίο λαμβάνει άτυπα τη μορφή

$$\min_d c(d) \quad \text{subject to} \quad \text{power rebalance}$$

όπου d είναι το διάνυσμα ζήτησης και το c μετρά την μη λειτουργικότητα (disutility) σε φορτία που συμμετέχουν στον έλεγχο. Ακόμα κι αν ούτε η συχνότητα, ούτε η ροή ισχύος στους κλάδους εμφανίζονται στο OLC, θα δείξουμε ότι οι αποκλίσεις της συχνότητας εμφανίζονται ως ένα μέτρο του κόστους της ανισορροπίας της ισχύς και οι αποκλίσεις της ροής στους κλάδους ως μέτρο του μη-συγχρονισμού της συχνότητας. Πιο εντυπωσιακά οι δυναμικές εξισώσεις σε συνδυασμό με τον έλεγχο του φορτίου που είναι βασισμένος σε τοπική συχνότητα, χρησιμεύει ως ένα κατανεμημένο πρωτεύον-δευτερεύον αλγόριθμο για την επίλυση του δευτερεύον προβλήματος OLC. Αυτός ο πρωτεύον-δευτερεύον αλγόριθμος είναι ολικά ασυμπτωτικά ευσταθές, οδηγώντας το δίκτυο στη μοναδική ολική βέλτιστη λύση του OLC.

Η αντικειμενική συνάρτηση του OLC αποτελείται από δύο κόστη. Κατ'αρχάς υποθέτουμε ότι το (συνολικό) ελεγχόμενο φορτίο στον ζυγό j συνεπάγεται ένα κόστος μη λειτουργικότητας (disutility) $\tilde{c}_j(d_j)$ όταν αλλάζει κατά d_j . Δεύτερον, η απόκλιση της συχνότητας ω_j προκαλεί τα (συνολικά) ευαίσθητα στην συχνότητα φορτία στον ζυγό j για να αλλάξουν κατά $\hat{d}_j := D_j \omega_j$.

Στη συνέχεια το πρόβλημα βελτιστοποίησης OLC ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος πάνω στο d και \hat{d} επανεξισορροπώντας την παραγωγή και το φορτίο σε όλο το δίκτυο:

Πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου:

$$\min_{\underline{d} < d < \bar{d}, \hat{d}} \sum_{j \in \mathcal{N}} \left(c_j(d_j) + \frac{1}{2D_j} \hat{d}_j^2 \right) \quad (1)$$

Δεδομένου ότι

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} (d_j + \hat{d}_j) = \sum_{j \in \mathcal{N}} (P_j^m) \quad (2)$$

Όπου $-\infty < \underline{d}_j \leq \bar{d}_j < \infty$. Το OLC είναι εφικτό και οι συναρτήσεις κόστους c_j είναι αυστηρώς κυρτές και δύο φορές συνεχόμενα παραγωγίσιμες στο $[\underline{d}_j, \bar{d}_j]$.

Παρατήρηση: Σημειώνουμε ότι (6.1.2) δεν απαιτεί την ισορροπία της παραγωγής και του φορτίου σε κάθε ζυγό ξεχωριστά, αλλά μόνο την ισορροπία σε ολόκληρο το δίκτυο. Αυτός ο περιορισμός είναι λιγότερο περιοριστικός και προσφέρει περισσότερες ευκαιρίες για την ελαχιστοποίηση του κόστους [54].

Υποθέτουμε την ακόλουθη κατάσταση: Το OLC είναι εφικτό. Οι συναρτήσεις κόστους c_j είναι αυστηρά κυρτές και δύο φορές συνεχώς παραγωγίσιμες στο $[\underline{d}_j, \bar{d}_j]$.

Αντί να λύσουμε άμεσα το OLC, προτείνουμε την επίλυση του DOLC και να ανακτήσουμε το μοναδικό βέλτιστο σημείο (d^*, \hat{d}^*) του OLC από το μοναδικό βέλτιστο σημείο v^* . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι:

- η αντικειμενική συνάρτηση Φ του DOLC είναι αυστηρά κοίλη στο $R^{|\mathcal{N}|}$
- Το DOLC έχει ένα μοναδικό βέλτιστο σημείο v^* με $v_i^* = v_j^* = v^*$ για όλα τα $i, j \in \mathcal{N}$
- Το OLC έχει ένα μοναδικό βέλτιστο σημείο (d^*, \hat{d}^*) όπου $d_j^* = d_j(v^*)$ και $\hat{d}_j^* = D_j v^*$ για όλα τα $j \in \mathcal{N}$.

Για να προκύψει μια κατανομημένη λύση του DOLC, οι συγγραφείς θεώρησαν την Lagrangian του.

Δεύτερο πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου: Η ουσία της λύσης μας προέρχεται από το σχεδιασμό ενός βέλτιστου προβλήματος ελέγχου φορτίου στο οποίο η βέλτιστη λύση ικανοποιεί

$$\hat{d}_i^* = D_i v_i^*, \quad \hat{d}_i^* = 0 \quad (3)$$

διατηρώντας τους περιορισμούς ροής που παρουσιάζονται στο OLC στο [53]. Έτσι διατυπώνουμε ένα πρόβλημα Βέλτιστου Ελέγχου Φορτίου στο οποίο οι αποκλίσεις της συχνότητας εξακολουθούν να αντιπροσωπεύουν πολλαπλασιαστές Lagrange, με την βέλτιστη λύση να έχει $\omega_i^* = \hat{d}_i^*/D_i = 0$. Ως εκ τούτου, οποιοσδήποτε κατανομημένος έλεγχος που προέρχεται από αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης θα αποκαταστήσει την συχνότητα στην ονομαστική της αξία μετά από μια διαταραχή.

Δεύτερο πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου (OLC):

$$\min_{d, \hat{d}} \sum_{j \in N} \left(c_j(d_j) + \frac{\hat{d}_j^2}{2D_j} \right) \quad (4)$$

Δεδομένου ότι

$$\sum_{j \in N} (d_j + \hat{d}_j) = \sum_{j \in N} (P_j^m) \quad (5)$$

Ως εκ τούτου, προτείνουμε το ακόλουθο πρόβλημα Βέλτιστου Ελέγχου φορτίου (FP-OLC) Διατήρησης – Συχνότητας σύμφωνα με το [33]

FP-OLC:

$$\min_{d, \hat{d}, P, R} \sum_{j \in N} \left(c_j(d_j) + \frac{\hat{d}_j^2}{2D_j} \right) \quad (6)$$

Δεδομένου ότι

$$P_i^m - (d_i + \hat{d}_i) = \sum_{e \in E} (C_{ie} P_e), \quad i \in N \quad (7)$$

$$P_i^m - d_i = \sum_{e \in E} (C_{ie} P_e), \quad i \in N \quad (8)$$

όπου (6.1.8) είναι ένας επιπλέον περιορισμός που εγγυάται την δεύτερη ισότητα της (6.1.3). Είναι επίσης δεδομένο ότι το FP-OLC είναι εφικτό και η συνάρτηση κόστους $c_i(\cdot)$ είναι αυστηρά κυρτή και δεύτερης τάξης παραγωγίσιμη $[\underline{d}_i, \overline{d}_i]$. Περαιτέρω, το FP-OLC πρόβλημα έχει ένα απολύτως εφικτό σημείο τέτοιο ώστε $\underline{d}_i < d_i < \overline{d}_i$ ενώ για να καταλάβουν πώς ικανοποιείται το FP-OLC, θεώρησαν ένα δευτερεύον πρόβλημα FP-OLC [33]. Το δευτερεύον πρόβλημα του FP-OLC (DFP-OLC) στη συνέχεια δίνεται από

$$\max_{v, \lambda} D(\sigma) = \sum_{i \in N} \Phi_i(v_i, \lambda_i) \quad (9)$$

Δεδομένου ότι

$$v_j - v_i = 0, \quad ij \in E \quad (10)$$

$$\lambda_j - \lambda_i = 0, \quad ij \in E \quad (11)$$

Παρατήρηση: Όταν οι πολλαπλασιαστές λ_i και η εξίσωση (6.1.11) αφαιρεθούν, το DFP-OLC είναι ακριβώς ο καταναμημένος βέλτιστος έλεγχος φορτίου που προτείνεται στο άρθρο του (Zhao κ.ά., 2013). Αυτό σημαίνει ότι η λύση του μπορεί να ερμηνευθεί ως μερικός πρωτεύον-δευτερεύον αλγόριθμος που επιλύει το FP-OLC με τον περιορισμό (8) να αφαιρείται.

Αν και το $D(\sigma)$ είναι μόνο πεπερασμένο σε \tilde{N} , $\Phi_i(\sigma_i)$ είναι πεπερασμένο παντού στο \mathbb{R}^2 . Έτσι, μερικές φορές χρησιμοποιούμε την εκτεταμένη εκδοχή της δευτερεύον λειτουργίας

$$\Phi(\sigma) = \sum_{i \in N} \Phi_i(\sigma_i) \quad (12)$$

Αντί $D(\sigma)$, γνωρίζοντας ότι $D(\sigma) = \Phi(\sigma)$ για $\sigma \in \tilde{N}$. Τα δύο παρακάτω λήμματα περιγράφουν διάφορες ιδιότητες του προβλήματος βελτιστοποίησης. Δεδομένου οποιουδήποτε σύνολο $S \subseteq N$ ορίζουμε

$$\Phi_S(\sigma) := \sum_{i \in S} \Phi_i(\sigma_i) \quad (13)$$

Λήμμα: (Αυστηρή κοιλότητα του $\Phi_S(\sigma)$). Για κάθε μη κενό σύνολο S , η συνάρτηση $\Phi_S(\sigma)$ είναι το άθροισμα των αυστηρά κοίλων λειτουργιών $\Phi_i(\sigma_i)$ και ως εκ τούτου είναι αυστηρά κοίλες. Ειδικότερα, η (επεκτάσιμη) δευτερεύον λειτουργία $\Phi(\sigma) = \Phi_N(\sigma)$ είναι αυστηρά κοίλη.

Λήμμα: (Βέλτιστο FP-OLC). Λαμβάνοντας υπόψη ένα συνδεδεμένο γράφημα (N, E) , τότε υπάρχουν βαθμωτά v^* και λ^* τέτοια ώστε $(d^*, \hat{d}^*, x^*, \sigma^*)$ είναι μια πρωτεύον-δευτερεύον βέλτιστη λύση του FP-OLC και του DFP-OLC αν και μόνο αν (d^*, \hat{d}^*, x^*) είναι πρωτεύον εφικτό,

$$\hat{d}_i^* = D_i v_i^*, \quad d_i^* = C_i'^{-1}(v_i^* + \lambda_i^*), \quad (14)$$

$$v_i^* = v^* \quad \text{και} \quad \lambda_i^* = \lambda^*. \quad (15)$$

Περεταίρω το d^*, \hat{d}^* και το $\sigma^* = (v^*, \lambda^*)$ είναι μοναδικά και $v^* = 0$.

6.2 Προσομοιώσεις

Στο παρόν στάδιο σκοπός μας είναι να εξακριβώσουμε εάν οι αλγόριθμοι που προτάθηκαν στην βιβλιογραφία συγκλίνουν στο βέλτιστο σημείο το οποίο εξάγεται από το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Κάναμε προσομοιώσεις με ή χωρίς την παρουσία turbine governor για να είμαστε σε θέση να παρατηρήσουμε το κόστος συμμετοχής των ελεγχόμενων φορτίων (cost trajectory) και θα το συγκρίνουμε, λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο δευτέρου και τρίτου βαθμού και πιο ειδικά τους μηχανισμούς ελέγχου A, B και C για το κάθε μοντέλο.

Αρχικά στην εξίσωση μη λειτουργικότητας (disutility function) των ελεγχόμενων φορτίων d_j η οποία είναι

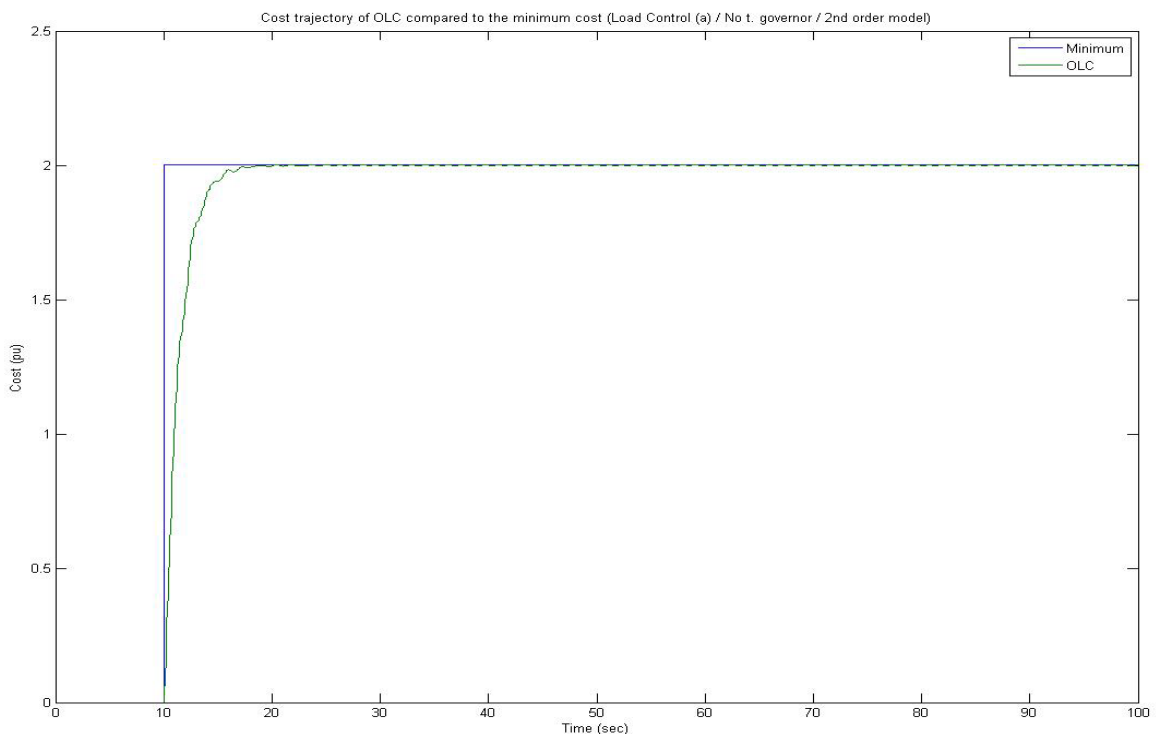
$$c_j(d_j) = \frac{d_j^2}{2a}, \quad (1)$$

θέτουμε το $a = 1$ και το $c_j(d_j)$ καθορίζει το κόστος συμμετοχής του φορτίου, όχι όμως το κόστος παραγωγής της γεννήτριας.

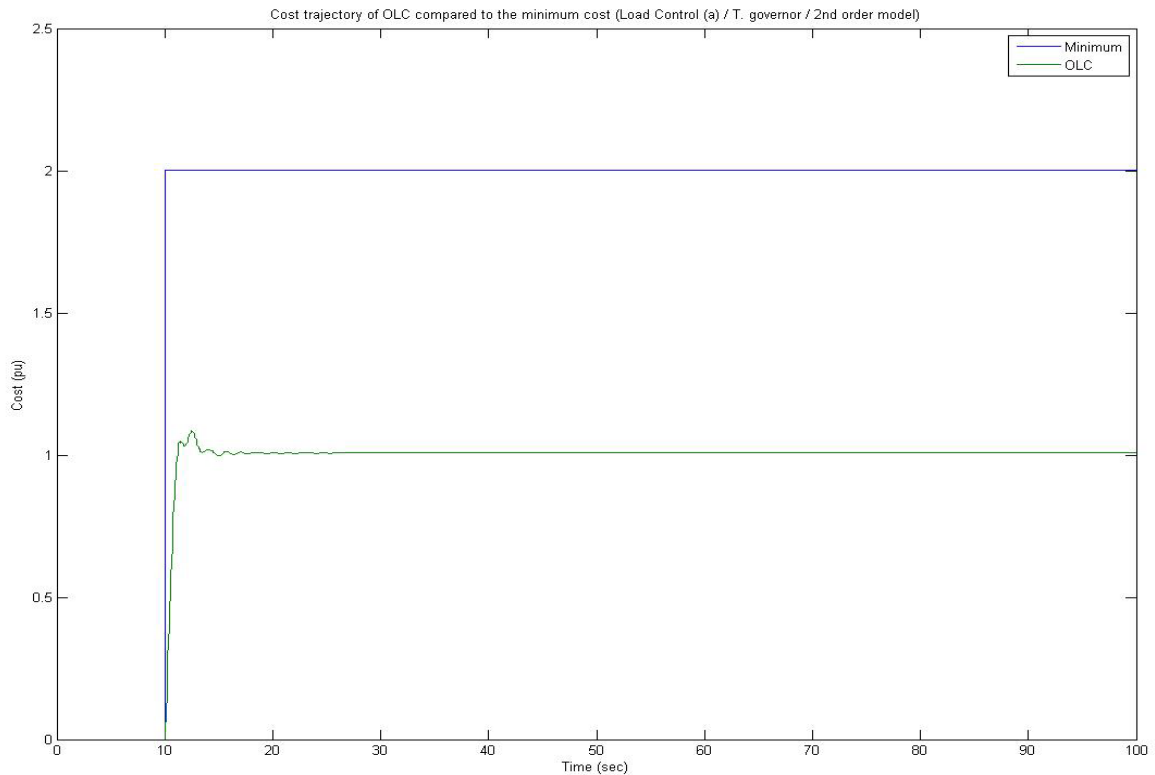
Παρατηρήσεις και συμπεράσματα:

1. Σε όλες τις προσομοιώσεις που έχουμε συμπεριλάβει τον turbine governor (Σχήμα 6.2, 6.4, 6.6, 6.8, 6.10, 6.12) βλέπουμε ότι το κόστος είναι μειωμένο σε σχέση με τις προσομοιώσεις στις οποίες δεν περιλαμβάνεται ο turbine governor (Σχήμα 6.1, 6.3, 6.5, 6.7, 6.9, 6.11). Αυτό, γιατί με την χρήση του turbine governor σημαίνει ότι συνεισφέρουν και οι γεννήτριες, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται να συνεισφέρουν τόσο πολύ τα ελεγχόμενα φορτία.

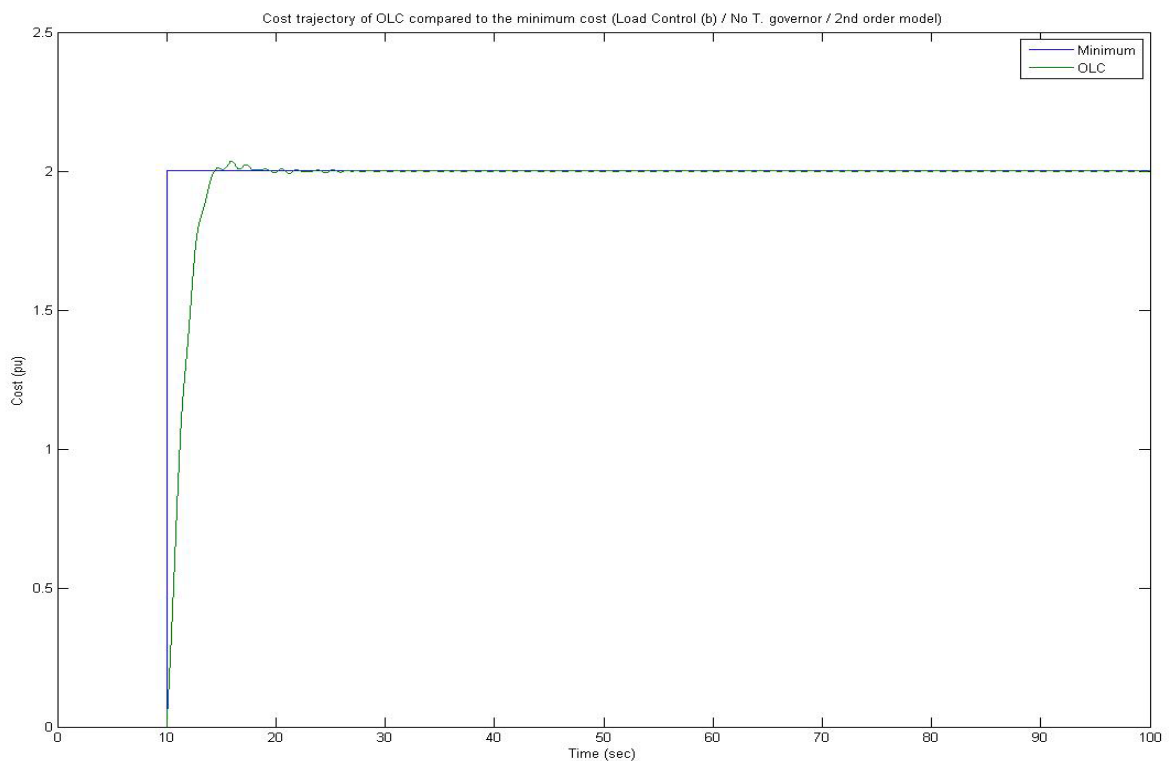
2. Στις προσομοιώσεις δευτέρου βαθμού στις οποίες δεν συμπεριλαμβάνεται ο turbine governor (Σχήμα 6.1, 6.3, 6.5) βλέπουμε ότι το κόστος από το πρόβλημα βελτιστοποίησης καταλήγει ακριβώς όσο και το minimum θεωρητικό κόστος, και αυτό οφείλεται στο ότι το μοντέλο δευτέρου βαθμού δεν είναι τόσο ακριβές.
3. Στις προσομοιώσεις τρίτου βαθμού στις οποίες δεν συμπεριλαμβάνεται ο turbine governor (Σχήμα 6.7, 6.9, 6.11) βλέπουμε ότι το κόστος από το πρόβλημα βελτιστοποίησης καταλήγει πιο κάτω από το minimum θεωρητικό κόστος, δηλαδή παρουσιάζουν ένα steady state error (στην περίπτωση μας της τάξεως του 0,025 pu) και αυτό οφείλεται στο ότι το μοντέλο τρίτου βαθμού είναι μεγάλης ακρίβειας.
4. Βλέπουμε ότι σε όλες τις προσομοιώσεις το κόστος συγκλίνει στο βέλτιστο σημείο. Δηλαδή ο μηχανισμός ελέγχου συχνότητας A που αναφέρεται στην βιβλιογραφία συγκλίνει στο βέλτιστο σημείο που εξάγεται από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης (Σχήμα 6.1, 6.2, 6.7, 6.8). Επίσης ο μηχανισμός ελέγχου συχνότητας B (Σχήμα 6.3, 6.4, 6.9, 6.10) που αναφέρεται στο άρθρο το κ. I. Λέστα, συγκλίνει στο βέλτιστο σημείο το οποίο εξάγεται από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, αλλά ακόμα και ο πειραματικός μηχανισμός ελέγχου συχνότητας C (Σχήμα 6.5, 6.6, 6.11, 6.12) συγκλίνει στο βέλτιστο σημείο με την διαφορά ότι έχει πιο κοστοφόρο cost trajectory.



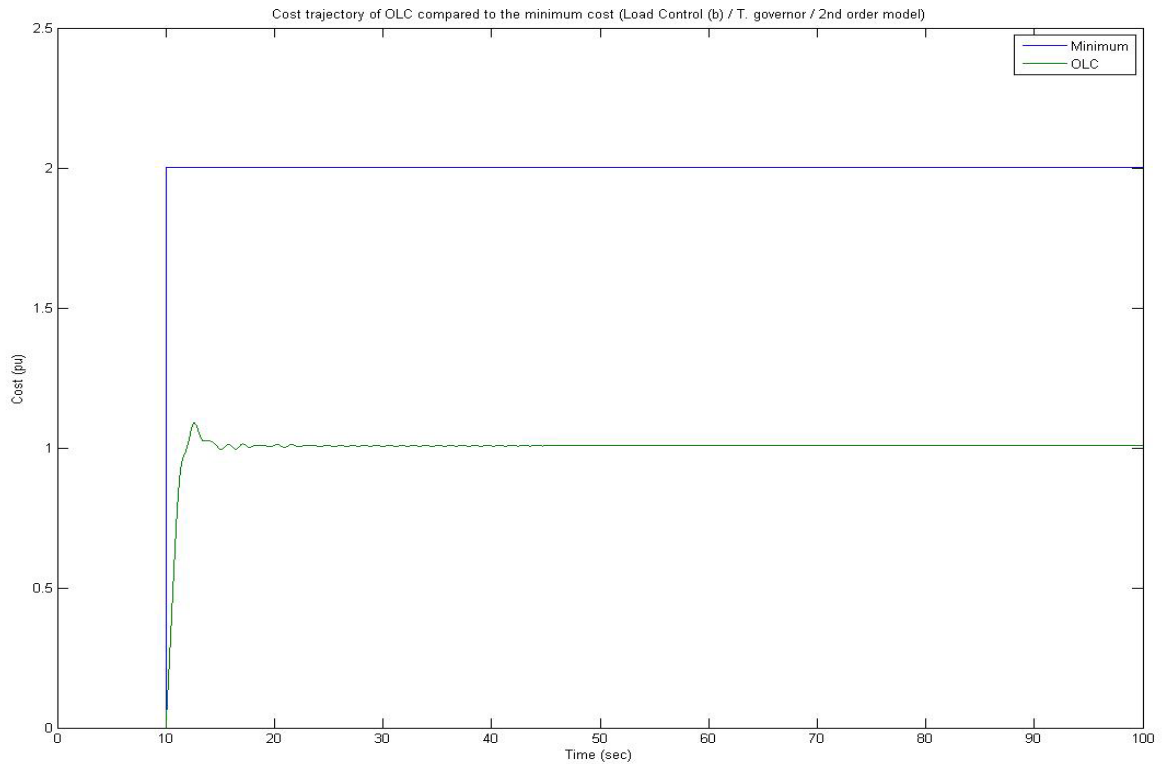
Σχήμα 6.1 Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A στο μοντέλο δευτέρου βαθμού χωρίς turbine governor



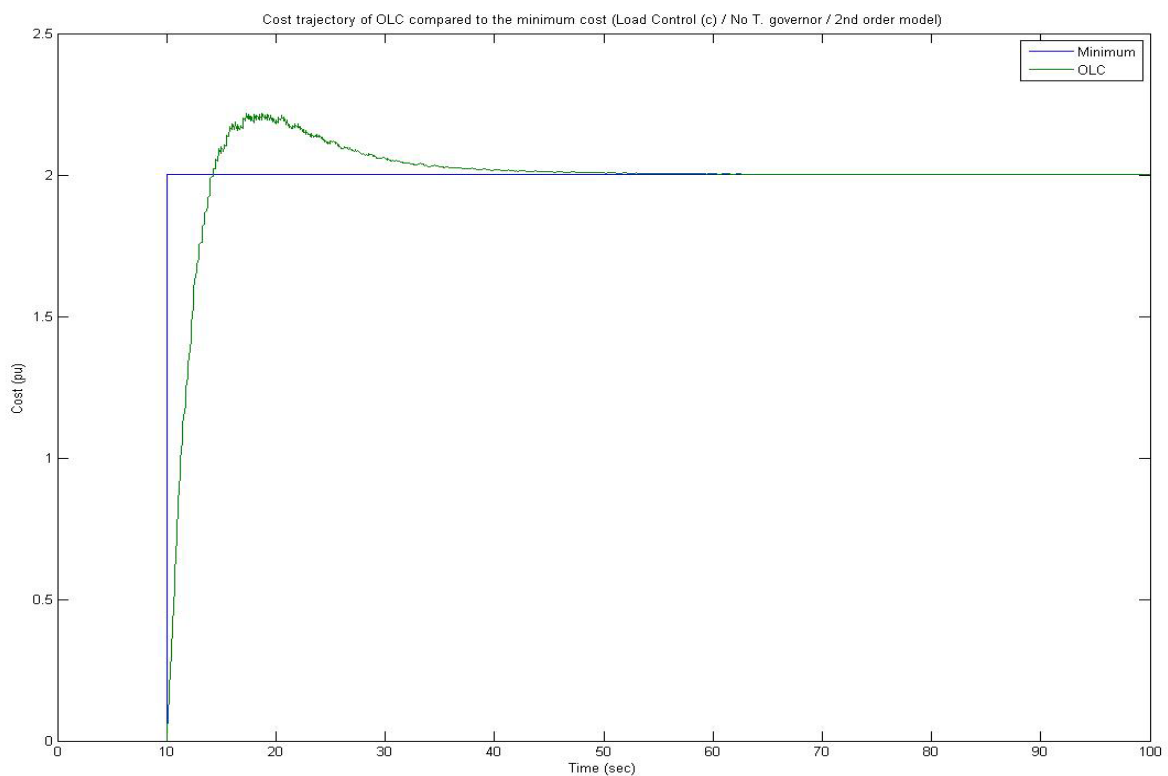
Σχήμα 6.2 Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A στο μοντέλο δευτέρου βαθμού με turbine governor



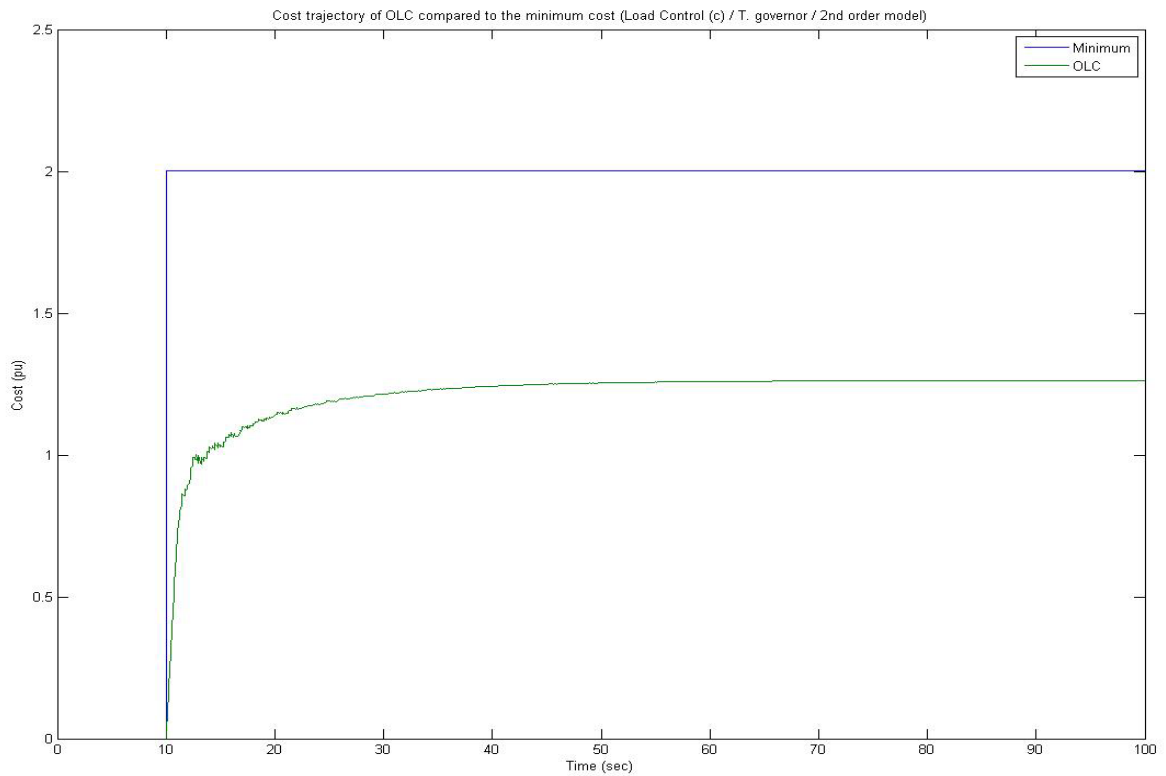
Σχήμα 6.3 Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B στο μοντέλο δευτέρου βαθμού χωρίς turbine governor



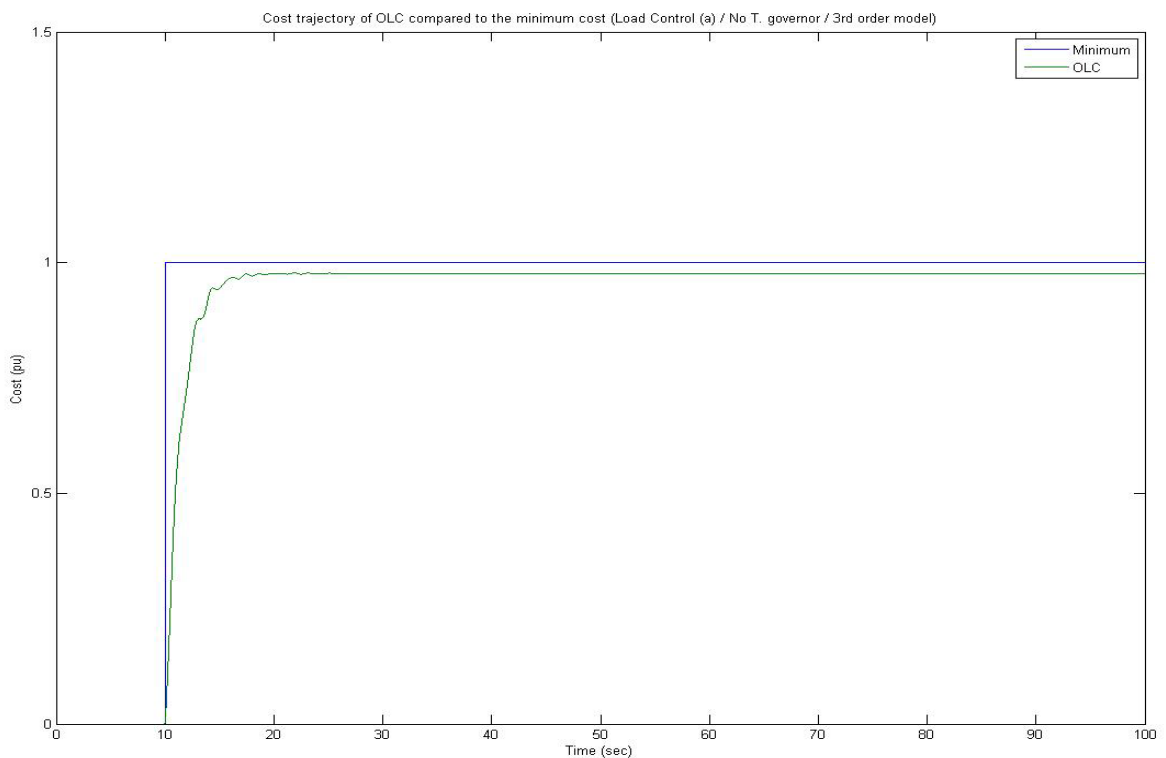
Σχήμα 6.4 Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B στο μοντέλο δευτέρου βαθμού με turbine governor



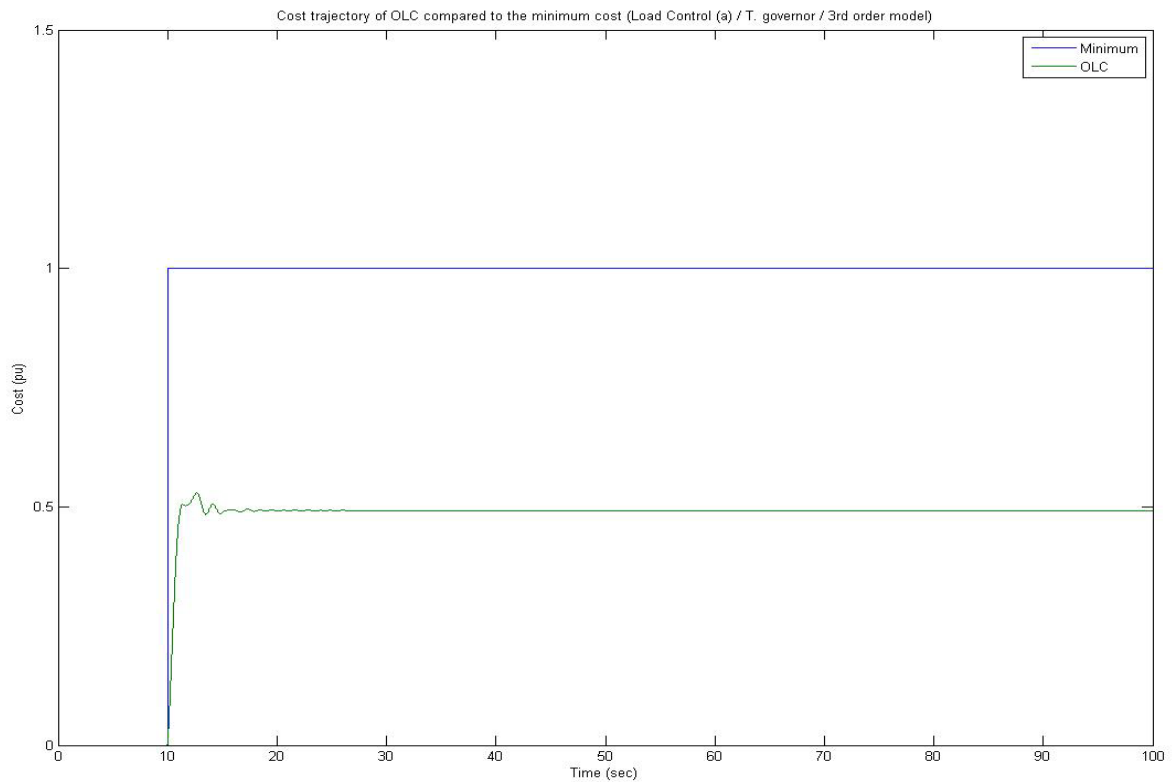
Σχήμα 6.5 Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C στο μοντέλο δευτέρου βαθμού χωρίς turbine governor



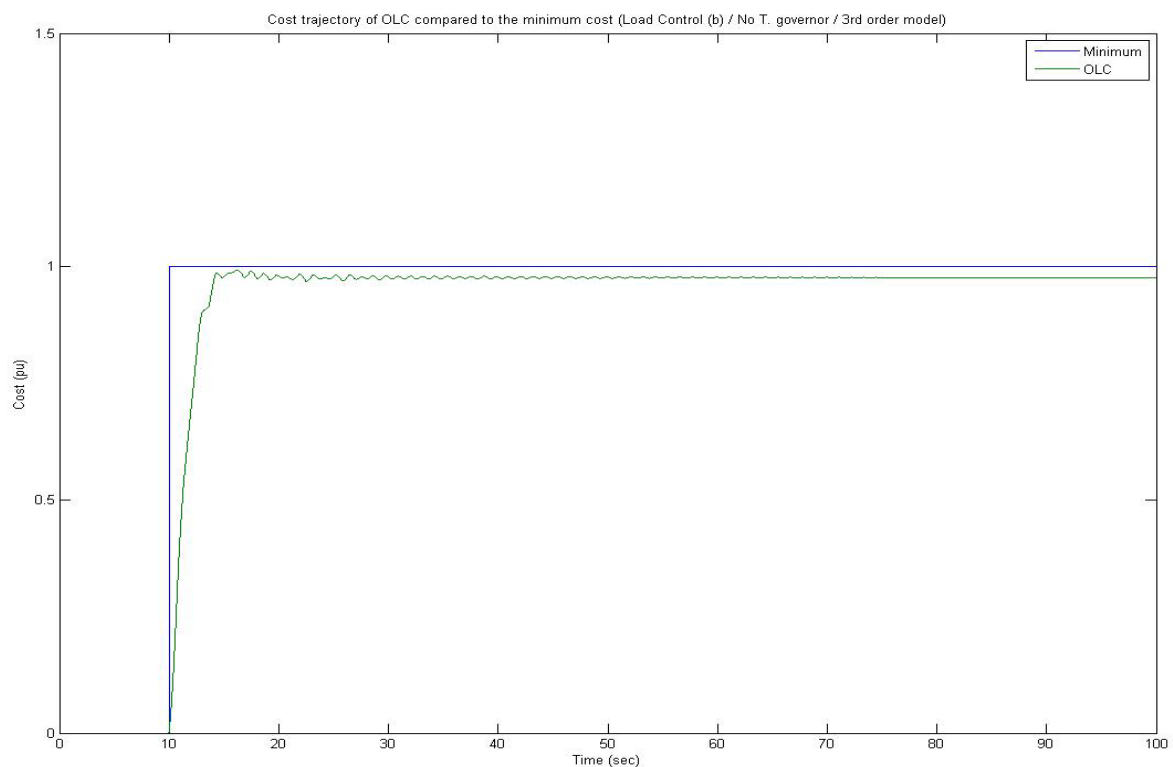
Σχήμα 6.6 Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B στο μοντέλο δευτέρου βαθμού με turbine governor



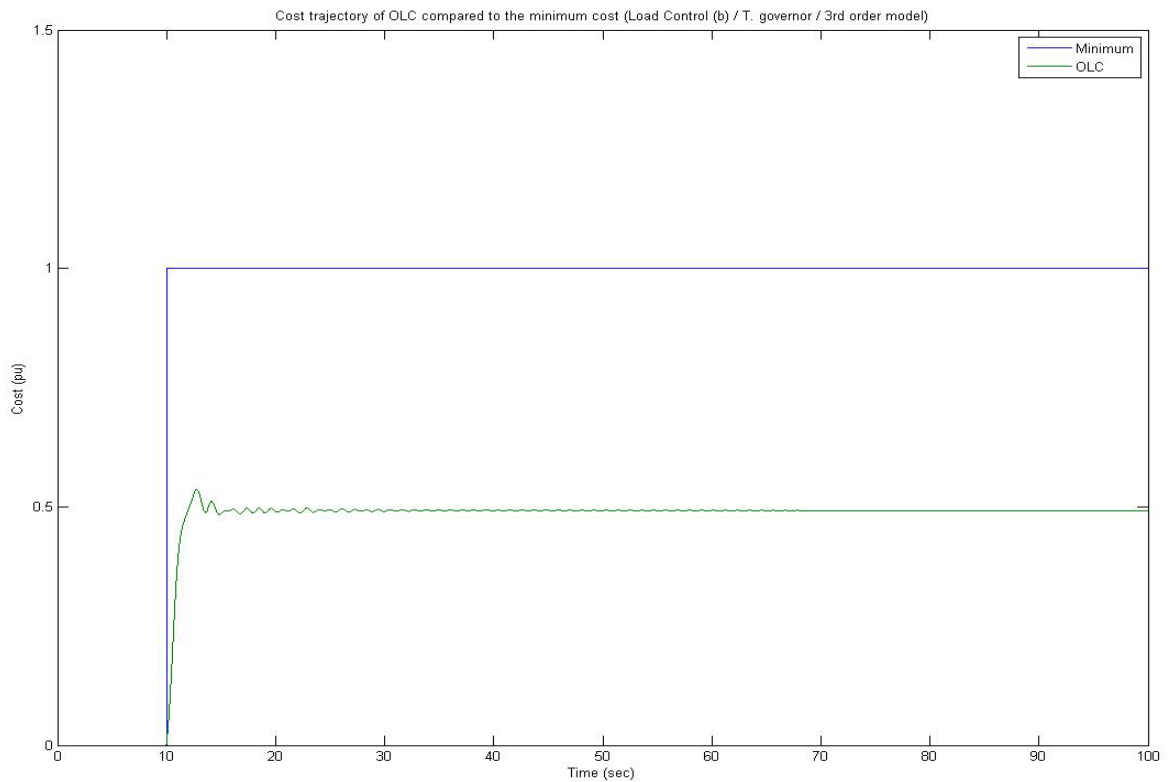
Σχήμα 6.7 Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A στο μοντέλο τρίτου βαθμού χωρίς turbine governor



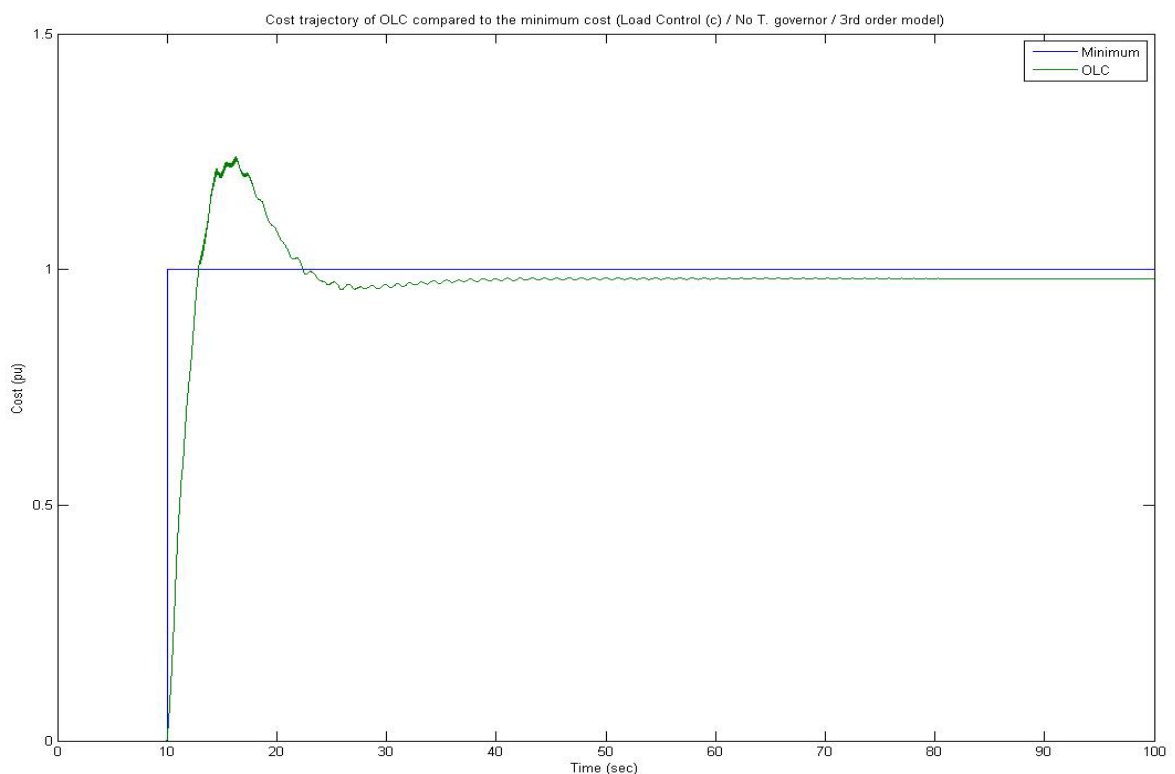
Σχήμα 6.8 Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας A στο μοντέλο τρίτου βαθμού με turbine governor



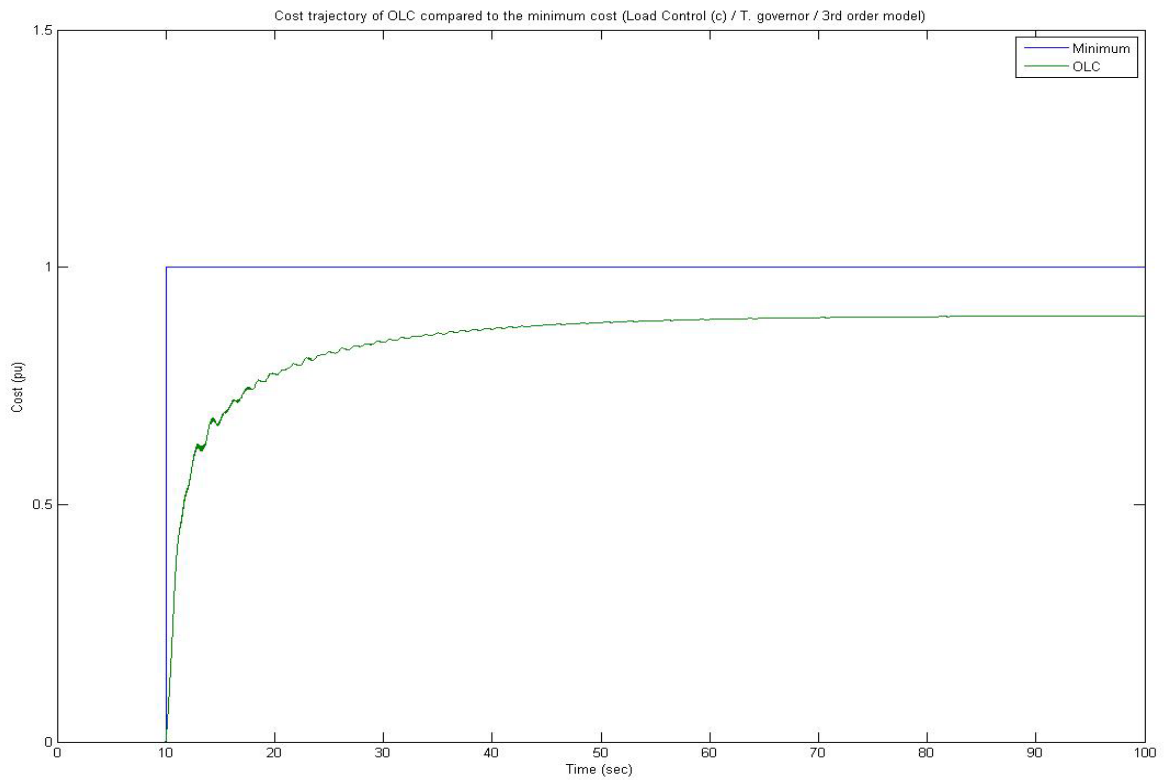
Σχήμα 6.9 Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B στο μοντέλο τρίτου βαθμού χωρίς turbine governor



Σχήμα 6.10 Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας B στο μοντέλο τρίτου βαθμού με turbine governor



Σχήμα 6.11 Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C στο μοντέλο τρίτου βαθμού χωρίς turbine governor



Σχήμα 6.12 Cost trajectory του προβλήματος βελτιστοποίησης (πράσινο) σε σύγκριση με το ελάχιστο cost trajectory (μπλε) για τον μηχανισμό ελέγχου συχνότητας C στο μοντέλο τρίτου βαθμού με turbine governor

Κεφάλαιο 7

Μελλοντική Εργασία

Όπως περιγράφεται εκτενώς στο Κεφάλαιο 4, το τι έχουμε κάνει έχει βασιστεί σε απλά μοντέλα δικτύου και σε επιλύσεις προβλημάτων βελτιστοποίησης προκειμένου να διευκολυνθεί η ανάλυση. Ο στόχος της διπλωματικής, δηλαδή να επαληθεύσουμε εάν οι διάφοροι αλγόριθμοι συγκλίνουν σε βέλτιστο σημείο στα απλά μοντέλα (δευτέρου και τρίτου βαθμού), με σκοπό να προχωρήσουμε πλέον στα σύνθετα.

Ομοίως με τη βιβλιογραφία, τα συστήματα βέλτιστου ελέγχου της συχνότητας θα πρέπει να βασίζονται τόσο στην παραγωγή ή / και στη συμμετοχή φορτίων όπου η αναντιστοιχία παραγωγής - ζήτησης θα εξαλείφεται αρκετά από τις διαθέσιμες μονάδες παραγωγής ή / και τα ελεγχόμενα φορτία σε όλο το δίκτυο. Η εύλογη εξάλειψη αυτής της αναντιστοιχίας θα επιτευχθεί μέσω της επίλυσης ενός κατάλληλα διαμορφωμένου προβλήματος βελτιστοποίησης. Στόχος μας σε αυτό το κεφάλαιο είναι να παρουσιάσουμε το τι θα μας ενδιέφερε να ασχοληθούμε ως μελλοντική εργασία.

Αρχικά θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένα πλαίσιο μοντέλου και μια προσέγγιση επίλυσης, για συστηματική σχεδίαση καταναμημένης, χαμηλής - πολυπλοκότητας παραγωγή και έλεγχος φορτίου για την επίτευξη αποτελεσματικότητας και αξιοπιστίας στο σύστημα.

Θα ήταν χρήσιμο να κατανοήσουμε πόσο συντηρητική είναι η επαρκής συνθήκη σταθερότητας και πώς εξάγει λιγότερο συντηρητικές συνθήκες. Επιπλέον, χρειάζεται ακόμη δουλειά για να επεκτείνουμε τα αποτελέσματα σε πιο λεπτομερή δυναμικά μοντέλα με δυναμικές ροές διάσπασης, χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη τάσης, ροές άεργου ισχύος, καθώς και σε απώλειες γραμμών μεταφοράς. Επίσης θα ήταν ενδιαφέρον να μελετήσουμε την απόδοση του πρωτεύον ελέγχου συχνότητας όταν λειτουργεί από κοινού με τον δευτερεύον και τριτογενή έλεγχο.

Ως μελλοντική έρευνα, θα ήταν πρόπον να διερευνήσουμε διάφορα προβλήματα της βέλτιστης ρύθμισης συχνότητας, όπου η συχνότητα επιτρέπεται να διαφέρει από τη συχνότητα μηδέν με μικρές παραλλαγές.

Βιβλιογραφία

- [1] International Energy Agency. Energy policy highlights. IEA journal, page 108, 2013.
- [2] G. Andersson. Dynamics and control of electric power systems. Lecture notes, page 125, 2012.
- [3] D. Angeli and P. Kountouriotis. A stochastic approach to "dynamic-demand" refrigerator control. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 20(3):581–592, 2012.
- [4] K. Arrow, L. Hurwicz, and H. Uzawa. Studies in linear and non-linear programming, 1958. California, Stanford, Stanford University Press.
- [5] M. Aunedi, P. A. Kountouriotis, J. E. Ortega Calderon, D. Angeli, and G. Strbac. Economic and enviromental benefits of dynamic demand in providing frequency regulation. IEEE Transactions on Smart Grids, 4(4):2036–2048, 2013.
- [6] A. Bacciotti and L. Rosier. Lyapunov Functions and Stability in Control Theory. Springer, Berlin, second edition, 2005.
- [7] D. P. Bertsekas. Dynamic programming and optimal control, volume 1. Athena Scientific Belmont, MA, 1995.
- [8] D. P. Bertsekas. Nonlinear programming. 1999.
- [9] D.P. Bertsekas, A. Nedic', and A.E. Ozdaglar. Convex Analysis and Optimization. Athena Scientific, Belmont, Massachusetts, 2003.
- [10] H. Bevrani, G. Ledwich, J. J. Ford, and Z. Y. Dong. On power system frequency control in emergency conditions. Journal of Electrical Engineering and Technology, 3(4):499–508, 2008.
- [11] S. Boyd and L. Vandenberghe. Convex optimization. Cambridge university press, 2004.
- [12] A. Brooks, E. Lu, D. Reicher, C. Spirakis, and B. Wehl. Demand dispatch using real-time control of demand to help balance generation and load. IEEE Power and Energy Magazine, 10:20–29, 2010.
- [13] A. E. Bryson. Applied optimal control: optimization, estimation and control. CRC Press, 1975.
- [14] A. Burgen and V. Vittal. Power System Analysis. Upper Saddle River, New Jersey, second edition, 2000.
- [15] S. Y. Caliskan and P. Tabuada. Compositional transient stability analysis of multimachine power networks. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 1(1):11, 2014.

- [16] D. S. Callaway and I. A. Hiskens. Achieving controllability of electric loads. *Proceedings of the IEEE*, 99(1):184–199, 2011.
- [17] K. Cheung, J. Chow, and G. Rogers. *Power system toolbox*. Cherry Tree Scientific Software, 2000.
- [18] F. Dorfler, J. W. Simpson-Porco, and F. Bullo. Breaking the hierarchy: Distributed control & economic optimality in microgrids. *arXiv preprint arXiv:1401.1767*, 2014.
- [19] P. J. Douglass, R. Garcia-Valle, P. Nyeng, J. Østergaard, and M. Togeby. Smart demand for frequency regulation: Experimental results. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(3):1713–1720, 2013.
- [20] K. A. Ellithy and K. A. El-Metwally. Design of decentralized fuzzy logic load frequency controller. *I. J. Intelligent Systems and Applications*, 2:66–75, 2012.
- [21] Enterprise and Regulatory Reform Department for Business of UK. Dynamic demand: Government response to clause 18 of the climate change and sustainable energy act. Technical report, August 2007.
- [22] M. Fahrioglu and F. L. Alvarado. Designing incentive compatible contracts for effective demand management. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(4):1255–1260, 2000.
- [23] D. Feijer and F. Paganini. Stability of primal-dual gradient dynamics and applications to network optimization. *Automatica*, Elsevier, 46:1974–1981, 2010.
- [24] 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.
- [25] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye. *Power Systems Analysis and Design*. CENGAGE Learning, Boston, fifth edition, 2011.
- [26] 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 54rd Annual Conference on*. IEEE, 2015.
- [27] H. K. Khalil. *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, New Jersey, third edition, 2002.
- [28] J. L. Kirtley. *Electric Power Principles (Sources, Conversion, Distribution and Use)*. Wiley, New Delhi, 2010.
- [29] P. Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc., New Jersey, 1994.
- [30] N. Li, L. Chen, C. Zhao, and S. H. Low. Connecting automatic generation control and economic dispatch from an optimization view. *American Control Conference (ACC), 2014 IEEE*, pages 735–740, 2014.

- [31] Z. Ma, D. Callaway, and I. Hiskens. Decentralized charging control for large populations of plug-in electric vehicles. 49th IEEE Conference on Decision and Control, pages 206–212, 2010.
- [32] J. Machowski, J. W. Bialek, and J. R. Bumby. *Power System Dynamics - Stability and Control*. John Wiley and Sons, Ltd, West Sussex, UK, second edition, 2008.
- [33] E. Mallada and S. H. Low. Distributed frequency-preserving optimal load control. In IFAC World Congress, pages 5411–5418, 2014.
- [34] J. C. Maxwell. On governors. *Proceedings of the Council of the Royal Society*, pages 270–282, 1868.
- [35] A. Molina-Garcia, F. Bouffard, and D. S. Kirschen. Decentralized demand-side contribution to primary frequency control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1):411–419, 2011.
- [36] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. Definition and classification of power system stability. *IEEE Trans. Power Syst.*, 10(3):1302–1313, 1995.
- [37] D. Papadaskalopoulos and G. Strbac. Decentralized participation of flexible demand in electricity markets - part i: Market mechanism. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(4):3658–3666, 2013.
- [38] 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 Transactions on Power Systems*, 28(4):3667–3667, 2013.
- [39] V. K. Papadia. *Power System Analysis*. N.T.U.A., Athens, 1985.
- [40] A. Poullikkas. *Introduction to Power Generation Technologies (Energy Science, Engineering and Technology)*. Nova Science Pub Inc, New York, 2009.
- [41] B. Ramanathan and V. Vittal. A framework for evaluation of advanced direct load control with minimum disruption. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(4):1681–1688, 2008.
- [42] F. C. Schewpe, R. D. Tabors, and J. L. Kirtley. Homeostatic utility control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-99(3):1151–1163, 1980.
- [43] M. C. Smith and J. M. Maciejowski. *Lecture notes on nonlinear systems and control*, 2011. University of Cambridge, Department of Engineering, Control Group Available: www-control.eng.cam.ac.uk/jmm/4f3/handout4.pdf (Accessed 03 June 2015).
- [44] S. Trip, M. Burger, and C. De Persis. An internal model approach to frequency regulation in inverter-based microgrids with time-varying voltages. In *Decision and Control (CDC), 2014 IEEE 53rd Annual Conference on*, pages 223–228. IEEE, 2014.

- [45] S. Trip, M. Burger, and C. De Persis. An internal model approach to frequency regulation in power grids. arXiv preprint arXiv:1403.7019, 2014.
- [46] D. Trudnowski, M. Donnelly, and E. Lightner. Benefits and challenges for power- system frequency and stability control using decentralized intelligent loads. pages 1–7, 2006.
- [47] P. P. Varaiya, F. F. Wu, and J. W. Bialek. Smart operation of smart grid: Risk-limiting dispatch. *Proceedings of the IEEE*, 99(1):40–57, 2011.
- [48] Z. A. Yamayee and J. L. Bala. *Electromechanical Energy Devices and Power Systems*. John Wiley and Sons, New York, 1994.
- [49] S. You and L. Chen. Reverse and forward engineering of frequency control in power networks. In *Decision and Control (CDC), 2014 IEEE 53rd Annual Conference on*, pages 191–198. IEEE, 2014.
- [50] X Zhang, N. Li, and A. Papachristodoulou. Achieving real-time economic dispatch in power networks via a saddle point design approach. pages 1–5, 2015.
- [51] C. Zhao and S. H. Low. Optimal decentralized primary frequency control in power networks. In *Decision and Control (CDC), 2014 IEEE 53rd Annual Conference on*, pages 2467–2473. IEEE, 2014.
- [52] C. Zhao, U. Topcu, N. Li, and S. Low. Design and stability of load-side primary frequency control in power systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(5):1177–1189, 2014.
- [53] C. Zhao, U. Topcu, N. Li, and S. H. Low. Power system dynamics as primal-dual algorithm for optimal load control. arXiv preprint arXiv:1305.0585, 2013.
- [54] C. Zhao, U. Topcu, N. Li, and S. H. Low. Design and stability of load-side primary frequency control in power systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 59(5):1177–1189, 2014.
- [55] C. Zhao, U. Topcu, and S. H. Low. Fast load control with stochastic frequency measurement. *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, pages 1–8, 2012.
- [56] C. Zhao, U. Topcu, and S. H. Low. Frequency-based load control in power systems. *American Control Conference*, pages 4423–4430, 2012.
- [57] C. Zhao, U. Topcu, and S. H. Low. Swing dynamics as primal-dual algorithm for optimal load control. *Smart Grid Communications, 2012 IEEE Third International Conference on Tainan*, pages 570–575, 2012.
- [58] C. Zhao, U. Topcu, and S. H. Low. Optimal load control via frequency measurement and neighborhood area communication. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 28(4):3576–3587, 2013.
- [59] Jean-Paul Bouttes, François Dassa & Renaud Crassous “The three challenges facing the electricity sector”. Internet: <http://www.paristechreview.com/2011/09/12/three-challenges-facing-electricity->

sector/, September 12th, 2011 [Feb. 23, 2016]

[60] E. Kalyvas (2015). IEC White Paper-“Grid integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage”. [Online]. Available: <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-gridintegrationlargecapacity-LR-en.pdf> [Feb. 2016].

[61] R. C. Dorf (ed.), "Automatic Generation Control" in Electrical Engineering Handbook. UK: Taylor and Francis, 2006.

[62] J. Machowski, S. Robak, J. W. Bialek, J. R. Bumby, and N. Abi-Samra, “Decentralized stability-enhancing control of synchronous generator,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 4. pp. 1336–1344, 2000.

[63] J. Machowski, J. W. Bialek, and J. R. Bumby, Power System Dynamics and Stability: John Wiley & Sons, 1997.

[64] The MathWorks, <http://www.mathworks.com>

[65] L.W. Fausett, Applied Numerical Analysis using MATLAB, Pearson-Prentice Hall, New Jersey, 2008.

[66] A. Kasis, E. Devane, and I. Lestas, Class Lecture Topic: “On the stability and optimality of primary frequency regulation with load-side participation” . CUED, /BElect/TR.94, Aug. 2015.

[67] Γ.Δ. Ακρίβης και Β.Α. Δουγαλής, Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, 2004.

[68] D.J. Ingham and N.J. Ingham, MATLAB Guide (2nd Ed.), SIAM, 2005.

[69] C.B. Moler, Numerical Computing with MATLAB, SIAM, 2004.

[70] H. Moore, MATLAB for Engineers, Pearson-Prentice Hall, New Jersey, 2007.

Παράρτημα Α

Συνήθεις Διαφορικές Εξισώσεις

Γενικά περί συνήθων διαφορικών εξισώσεων:

Μια συνήθης διαφορική εξίσωση (ΣΔΕ) 1^{ης} τάξης έχει τη μορφή

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y(t))$$

όπου $f(t, y)$ γνωστή και $y(t)$ άγνωστη συνάρτηση. Η πιο πάνω εξίσωση καλείται διαφορική γιατί περιέχει την παράγωγο μιας συνάρτησης. Καλείται συνήθης γιατί η παράγωγος είναι συνήθης (και όχι για μερική), και τέλος είναι 1^{ης} τάξης γιατί περιλαμβάνει μόνο την 1^η παράγωγο της άγνωστης συνάρτησης. Αν και μπορούμε να μιλήσουμε για ΣΔΕ 2^{ης}, 3^{ης}, ... τάξης, θα περιοριστούμε μόνο σε αυτές που είναι 1^{ης} τάξης γιατί οι υπόλοιπες μπορούν να εκφραστούν σαν ένα σύστημα ΣΔΕ 1^{ης} τάξης. Άρα είναι αρκετό να ξέρουμε πώς να λύνουμε συστήματα ΣΔΕ 1^{ης} τάξης στη MATLAB. Σημειώνουμε ότι στη ειδική περίπτωση που η συνάρτηση f εξαρτάται μόνο από το t , τότε έχουμε

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y(t)) \rightarrow y = \int f(t)dt + C$$

όπου C μια αυθαίρετη σταθερά, και έτσι παίρνουμε τη λύση αναλυτικά. (Για την ακρίβεια, παίρνουμε άπειρες λύσεις, μια για κάθε σταθερά.)

Αν εκτός από την διαφορική εξίσωση μας δοθεί και μια αρχική συνθήκη, π.χ. $y(t_0) = y_0$, με τα t_0, y_0 δοσμένα, τότε η λύση της Σ.Δ.Ε. είναι μοναδική, με την προϋπόθεση ότι η συνάρτηση $f(t, y)$ ικανοποιεί κάποιες συνθήκες ομαλότητας. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ένα πρόβλημα αρχικών τιμών (ΠΑΤ):

$$\begin{cases} y'(t) = f(t, y(t)) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με μεθόδους (αριθμητικής) επίλυσης ΠΑΤ χρησιμοποιώντας την MATLAB.

Παράδειγμα 1 - Η μέθοδος του Euler:

Η πιο παλιά μέθοδος αριθμητικής επίλυσης του ΠΑΤ

$$\begin{cases} y'(t) = f(t, y(t)) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

είναι η λεγόμενη μέθοδος του Euler, με την οποία βρίσκουμε (διακριτές) προσεγγίσεις $y_i \approx y(t_i)$, $i = 0, 1, 2, \dots$ για κάποια t_i , $i = 0, 1, 2, \dots$ που μας ενδιαφέρουν. Αν επιλέξουμε κάποιο $h > 0$ (το λεγόμενο βήμα) και ορίσουμε $t_{i+1} = t_i + h$, $i = 0, 1, 2, \dots, N$ για κάποιο N , τότε μια και τα f , t_0 και y_0 είναι γνωστά, μπορούμε να βρούμε τα του Euler: $y_i \approx y(t_i)$, $i = 0, 1, 2, \dots, T$ μέσω της λεγόμενης επανάληψης $y_{i+1} = y_i + hf(t_i, y_i)$, $i = 0, 1, 2, \dots, N$

Το πιο κάτω m-file υλοποιεί την πιο πάνω διαδικασία, παίρνοντας σαν δεδομένα εισόδου την συνάρτηση f , τις αρχικές τιμές y_0 , t_0 , το T έτσι ώστε $t \in [t_0, T]$ και το βήμα h , και δίνει σαν δεδομένα εξόδου τα διανύσματα $t = [t_0, t_1, \dots, t_N]$, $y = [y_0, y_1, \dots, y_N]$ έτσι ώστε $y_i \approx y(t_i)$, $i = 0, 1, 2, \dots, N$.

```
function [y,t] = euler(fun,y0,t0,T,h)
% [y,t] = euler(fun,y0,t0,T,h) -
%
% This function computes the solution to the IVP
%      y'(t) = fun(y,t), y(t0)= y0 ,
% for a given function "fun(t,y)" using Euler's method.
%
% The function can be defined via the m-file fun.m,
% or as an anonymous function (or even using the "inline"
% command).
%
% y0 is the initial value, T is the maximum value for t, h
% is the stepsize and t0=initial value for t.
%
% The output is a vector containing the approximate
% solution y_euler.

y(1) = y0;
t(1) = t0;
for i=1:ceil((T-t0)/h)

    y(i+1) = y(i) + h*feval(fun,t(i),y(i));
    t(i+1) = t(i) + h;

end;
t=t';
y=y';

% End of m-file euler.m
```

Ας χρησιμοποιήσουμε το πιο πάνω m-file για το εξής ΠΑΤ:

$$y'(t) = t\sqrt{y}, y(1) = 4$$

όπου το t ανήκει στο διάστημα $[1, 2]$, και ας επιλέξουμε αρχικά $h = 0.1$.

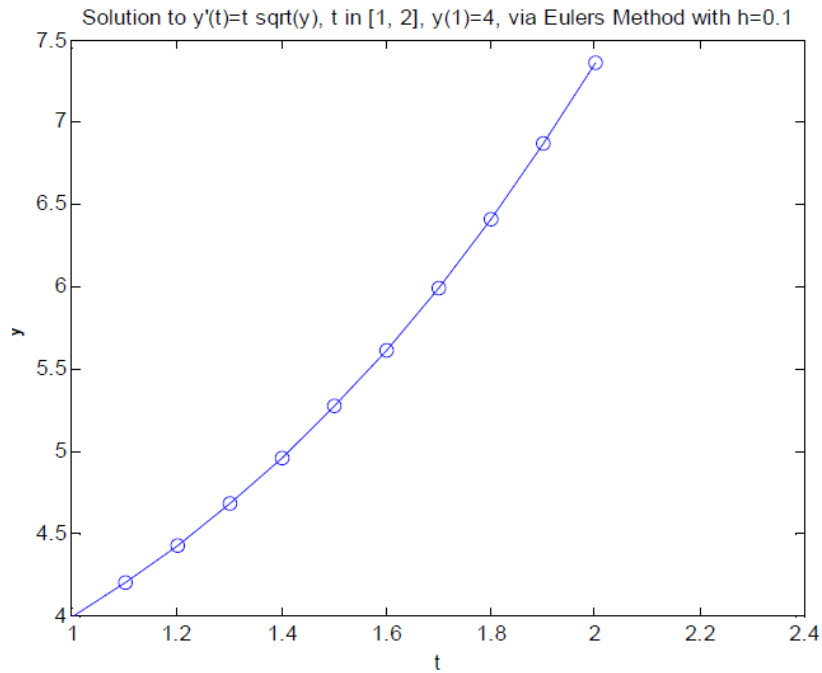
```
>> f = @(t,y) t*sqrt(y);  
>> [y,t]=euler(f,4,1,2,0.1)
```

```
y =  
 4.0000  
 4.2000  
 4.4254  
 4.6779  
 4.9590  
 5.2708  
 5.6152  
 5.9943  
 6.4105  
 6.8663  
 7.3642
```

```
t =  
 1.0000  
 1.1000  
 1.2000  
 1.3000  
 1.4000  
 1.5000  
 1.6000  
 1.7000  
 1.8000  
 1.9000  
 2.0000
```

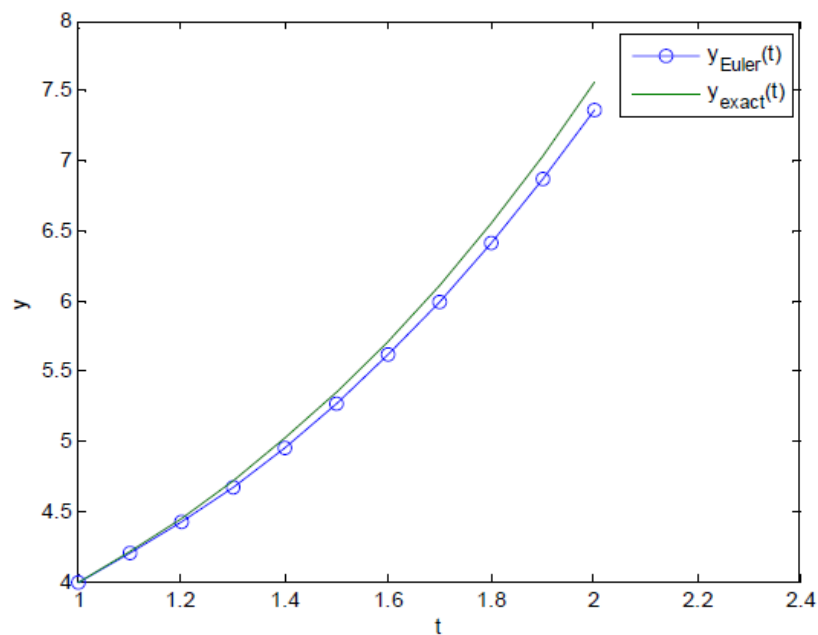
Παίρνουμε τη γραφική παράσταση της λύσης που πήραμε, ως

```
>> plot(t,y,'o-')  
>> xlabel('t')  
>> ylabel('y')  
>> title('Solution to y''(t)=t sqrt(y), t in [1, 2], y(1)=4, via  
Eulers Method with h=0.1')
```



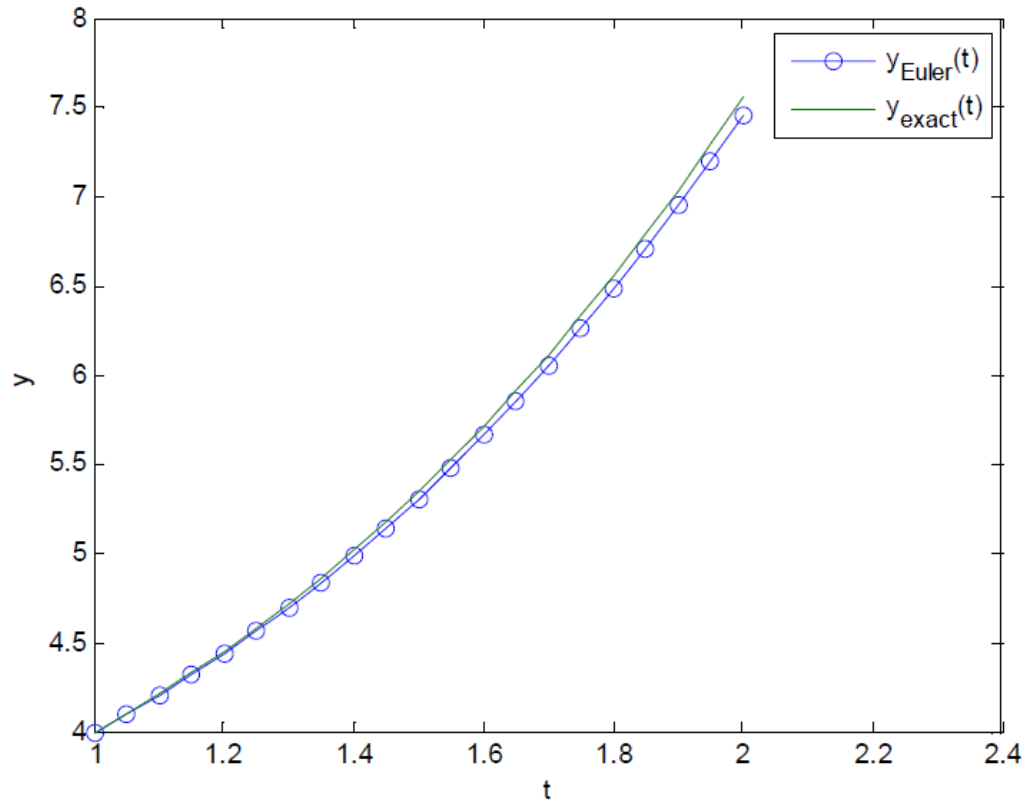
Η ακριβής λύση του πιο πάνω Π.Α.Τ. είναι $y_{ex}(t)=1/16(t^2+7)^2$, και το πιο κάτω γράφημα μας δείχνει ότι η λύση που πήραμε με την μέθοδο του Euler δεν είναι παρά μια προσέγγιση.

```
>> yex=@(t) (1/16)*(t.^2+7).^2;
>> plot(t,y,'o-',t,yex(t))
>> xlabel('t')
>> ylabel('y')
>> legend('y_{Euler}(t)', 'y_{exact}(t)')
```



Αν χρησιμοποιήσουμε πιο μικρό βήμα h , τότε η προσέγγιση θα είναι καλύτερη. Αυτό φαίνεται πιο κάτω, όπου πήραμε $h = 0.05$.

```
>> [y,t]=euler(f,4,1,2,0.05);  
>> plot(t,y,'o-',t,yex(t))  
>> xlabel('t')  
>> ylabel('y')  
>> legend('y_{Euler}(t)', 'y_{exact}(t)')
```



Η εντολή ode 45:

Η MATLAB διαθέτει αρκετές συναρτήσεις/εντολές βιβλιοθήκης για την επίλυση Π.Α.Τ., όπως οι **ode23**, **ode45**, **ode113**, **ode15s**, **ode23s**, **ode23t**, **ode23tb**. (Γράψτε **doc ode23** για περισσότερες πληροφορίες.) Εμείς θα ασχοληθούμε μόνο με την **ode45**, η οποία λύνει το Π.Α.Τ.

$$\begin{cases} y'(t) = f(t, y(t)) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

και έχει την εξής δομή:

[t_out,y_out] = ode45(odefun, t_span, y0)

Τα δεδομένα εισόδου και εξόδου έχουν ως εξής:

- odefun: η συνάρτηση $f(t, y)$ (σαν m-file ή ανώνυμη συνάρτηση)
- t_span: το διάστημα $[t_0, T]$ όπου ανήκει το t – αυτό πρέπει να δοθεί με αγκύλες
- y0: η αρχική τιμή $y_0 (= y(t_0))$
- t_out: το διάστημα με τα σημεία $t_0, t_1, t_2 \dots$
- y_out: το διάστημα με τις προσεγγιστικές τιμές $y_0, y_1, y_2 \dots$ της λύσης

Όπως βλέπετε, τα δεδομένα εισόδου και εξόδου είναι παρόμοια με αυτά που είχαμε στο m-file που γράψαμε για την μέθοδο του Euler. Η διαφορά έγκειται στο ότι για το m-file που γράψαμε, δίναμε και το βήμα h , ενώ στην ode45 δεν το δίνουμε. Η MATLAB επιλέγει της το βήμα με τέτοιο τρόπο ώστε η λύση που παίρνουμε να έχει (απόλυτη) ακρίβεια 10^{-6} . Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος των διανυσμάτων t και y δεν εξαρτάται από εμάς αλλά από τη MATLAB και ότι το διάστημα t μπορεί να μην είναι ομοιόμορφα κατανομημένο. Μπορούμε, αν θέλουμε, να αυξομειώσουμε την ακρίβεια στην εντολή ode45 με το να δώσουμε περισσότερα δεδομένα εξόδου. Για να δείτε πως γράψτε help ode45 στη MATLAB.

Παράδειγμα 2:

Θα βρούμε μια προσέγγιση για τη λύση του Π.Α.Τ.

$$\begin{cases} y'(t) = y(2 - y), 0 \leq t \leq 1 \\ y(0) = 3 \end{cases}$$

χρησιμοποιώντας την εντολή ode45.

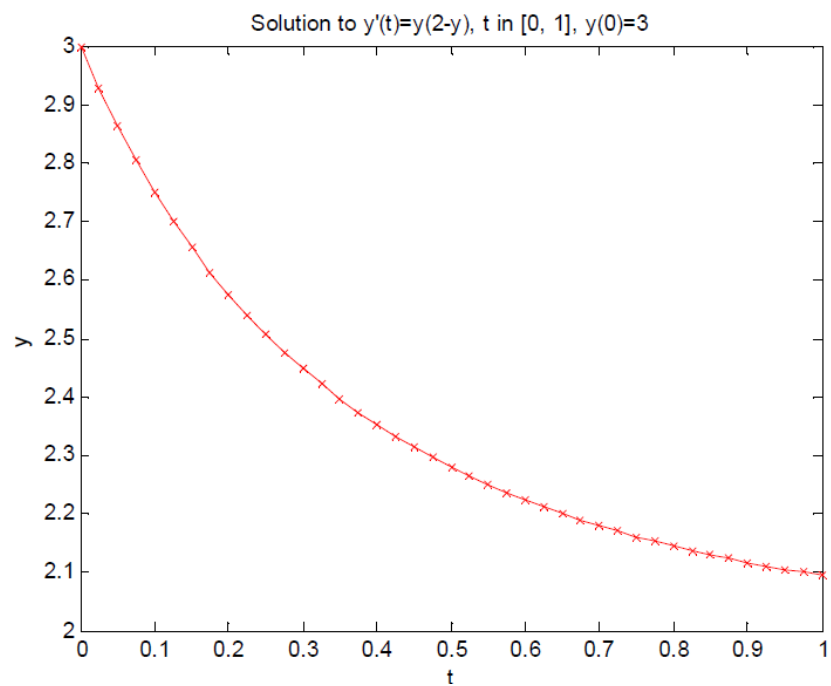
```
>> f = @(t,y) y.*(2-y);
>> [t,y]=ode45(f,[0,1],3);
```

Βάλουμε ‘ ; ’ στο τέλος της εντολής για να μην δούμε τις τιμές που παίρνουμε μια και τα διανύσματα μπορεί να είναι αρκετά μεγάλα:

```
>> length(y) ans =
41
```

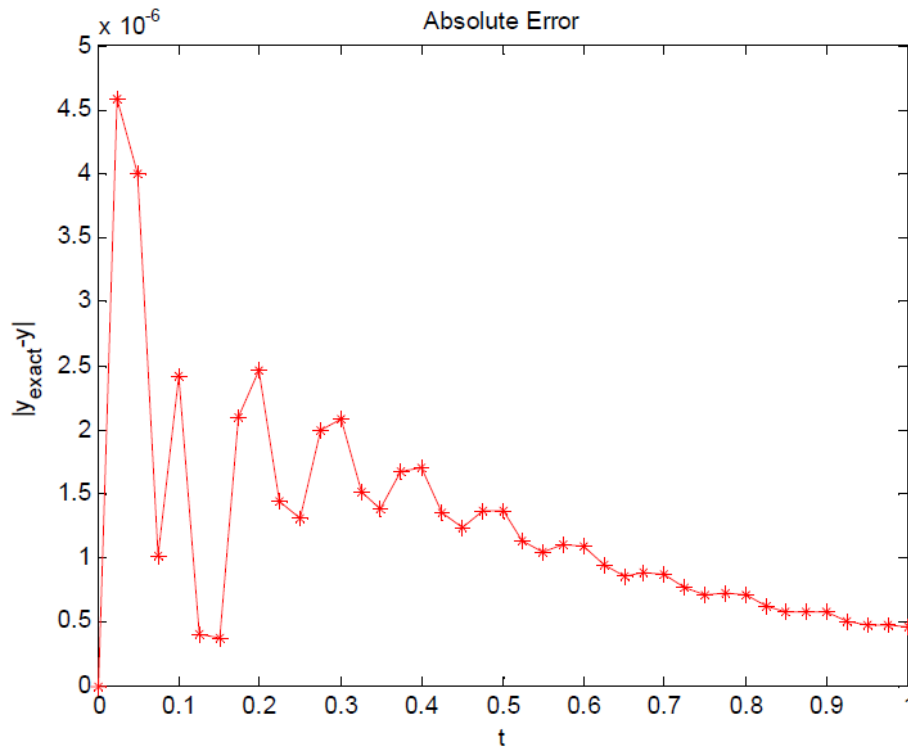
Η γραφική παράσταση της λύσης που πήραμε δίνεται πιο κάτω:

```
>> plot(t,y,'-rx')
>> xlabel('t')
>> ylabel('y')
>> title('Solution to y'(t)=y(2-y), t in [0, 1], y(0)=3')
```



Η ακριβής λύση του πιο πάνω Π.ΑΤ είναι $y_{ex}(t) = 6/(3 - e^{-2t})$ και πιο κάτω δείχνουμε τη γραφική παράσταση του σφάλματος $|y(t) - y_{ex}(t)|$:

```
>> yex=@(t) 6./(3-exp(-2*t));
>> plot(t,abs(y-yex(t)),'*r')
>> plot(t,abs(y-yex(t)),'*-r')
>> xlabel('t')
>> ylabel('|y_{exact}-y|')
>> title('Absolute Error')
```



Πράγματι, έχουμε ακρίβεια της τάξης του 10^{-6} .

Συστήματα ΣΔΕ:

Εκτός από Π.Α.Τ., η εντολή ode45 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για συστήματα Σ.Δ.Ε., όπως για παράδειγμα το πιο κάτω 3×3 σύστημα αρχικών τιμών (Σ.ΑΤ):

$$\begin{cases} x_1(t) = f_1(t, x_1, x_2, x_3) \\ x_2(t) = f_2(t, x_1, x_2, x_3) \\ x_3(t) = f_3(t, x_1, x_2, x_3) \\ x_1(t_0) = a_1, x_2(t_0) = a_2, x_3(t_0) = a_3 \end{cases}$$

όπου οι συναρτήσεις $f_i(t, x_1, x_2, x_3)$, $i = 1, 2, 3$, το σημείο t_0 και οι τιμές a_i , $i = 1, 2, 3$ είναι δεδομένα, και θέλουμε να προσδιορίσουμε τις συναρτήσεις $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$. Αν γράψουμε το πιο πάνω σύστημα σε διανυσματική μορφή, τότε έχουμε

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(\vec{x}(t)) = [F]\vec{x}(t) \\ \vec{x}(t_0) = [a_1, a_2, a_3] \end{cases}$$

που μοιάζει με το ΠΑΤ που μελετήσαμε προηγουμένως. Ας δούμε ένα παράδειγμα

$$\begin{cases} x'_1(t) = -\frac{8}{3}x_1(t) + x_2(t)x_3(t) \\ x'_2(t) = -10x_2(t) + 10x_3(t) \\ x'_3(t) = -x_2(t)x_1(t) + 28x_2(t) - x_3(t) \\ x_1(0) = 20, x_2(0) = 5, x_3(0) = -5 \end{cases}$$

το οποίο γράφουμε σε διανυσματική μορφή ως εξής:

$$\begin{bmatrix} x'_1(t) \\ x'_2(t) \\ x'_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{8}{3} & 0 & x_2(t) \\ 0 & -10 & 10 \\ -x_2(t) & 28 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} \leftrightarrow \frac{d}{dt}(\vec{x}(t)) = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{8}{3} & 0 & x_2(t) \\ 0 & -10 & 10 \\ -x_2(t) & 28 & -1 \end{bmatrix}}_{[F]} \vec{x}(t)$$

Και $\vec{x}(0) = [20, 5, -5]$.

Τώρα, για να χρησιμοποιήσουμε την εντολή ode45, θα πρέπει να ορίσουμε τον πίνακα $[F]$, που ορίζει τις συναρτήσεις του δεξιού μέλους του συστήματος, σε ένα m- file (μια και δεν μπορούμε να τον ορίσουμε σαν μια ανώνυμη συνάρτηση). Για το παράδειγμα μας τον ορίζουμε στο m-file odefun.m, που φαίνεται πιο κάτω:

```
function [xprime] = odefun(t,x)
% [xprime] = odefun(t,x) -
% This function corresponds to the RHS of the system of ODEs, in
% which x=[x(1), x(2), x(3)] represents the (vector) of unknown
% functions.
    xprime = [-8/3,0,x(2);0,-10,10;-x(2),28,-1]*x;
% End of m-file odefun.m
```

Η εντολή ode45 χρησιμοποιείται όπως και πριν

$$[t, x] = \text{ode45}(@\text{odefun}, t_span, a)$$

αλλά, τώρα, τα δεδομένα εισόδου και εξόδου έχουν ως εξής:

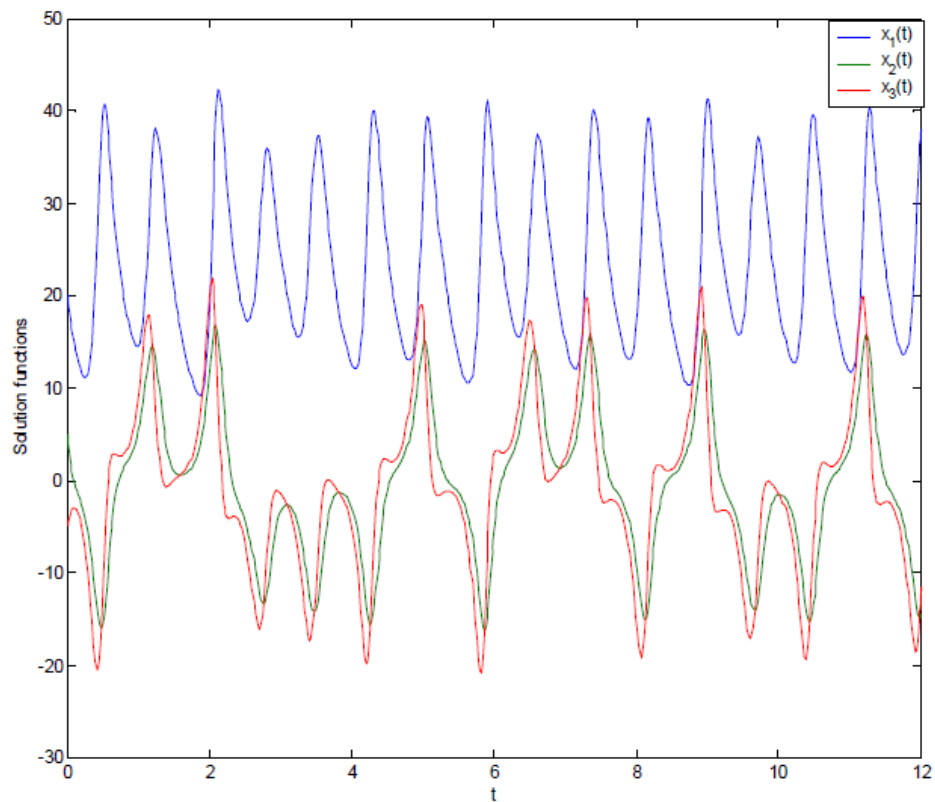
- odefun: το όνομα του m-file που ορίζει τον πίνακα $[F]$. Παρατηρούμε ότι μια και δίνουμε ένα m-file σαν δεδομένο εισόδου, χρειάζεται να βάλουμε το '@' πριν από το όνομα του m-file όταν καλούμε την ode45.
- t_span: το διάνυσμα $[t_0, T]$ όπου ανήκει το t – αυτό πρέπει να δοθεί με αγκύλες
- a: το διάνυσμα $[a_1, a_2, a_3]$ με τις αρχικές τιμές
- t: το διάνυσμα με τα σημεία t_0, t_1, t_2, \dots
- x: ένας πίνακας του οποίου η κάθε στήλη αντιστοιχεί στις προσεγγιστικές τιμές των λύσεων $[x_1, x_2, x_3]$

Για το παράδειγμα μας έχουμε $t_0 = 0$, $[a_1, a_2, a_3] = [20, 5, -5]$, και ας υποθέσουμε ότι το t ανήκει στο διάστημα $[0, 12]$. Γράφουμε

```
>> [t,x] = ode45(@odefun,[0,12],[20,5,-5]);
```

με ';' στο τέλος για να μην τυπωθούν οι απαντήσεις στην οθόνη. Για να δούμε τις γραφικές παραστάσεις όλων των λύσεων (στους ίδιους άξονες) γράφουμε:

```
>> plot(t,x)
>> xlabel('t')
>> ylabel('Solution functions')
>> legend('x_1(t)', 'x_2(t)', 'x_3(t)')
```



Για να πάρουμε τη γραφική παράσταση μιας από τις λύσεις, π.χ. της $x_2(t)$, γράφουμε

```
>> plot(t,x(:,2))
```

Παράδειγμα 3:

Θεωρούμε το εξής Σ.ΑΤ:

$$\begin{cases} x'_1(t) = 2x_1(t) - 2x_1(t)x_2(t) \\ x'_2(t) = x_1(t)x_2(t) - x_2(t) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} x'_1(t) \\ x'_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -2x_1(t) \\ x_2(t) & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

με αρχικές συνθήκες $x_1(0) = 1, x_2(0) = 3$, και $t \in [0, 20]$. Το m-file που ορίζει τον πίνακα του δεξιού μέλους έχει ως εξής:

```
function [xprime] = odefun(t,x)
% [xprime] = odefun(t,x) -
%
% This function corresponds to the RHS of the system of ODEs,
% in which x=[x(1),x(2)] represents the (vector) of unknown
% functions.
%
% The function will be passed as input into the ODE solver.
%
xprime = [2, -2*x(1); x(2), -1]*x;
% End of m-file odefun.m
```

Γράφουμε

```
>> [t,x] = ode45(@odefun,[0,12],[1,3]);
>> plot(t,x)
>> legend('x_1(t)', 'x_2(t)')
>> xlabel('t')
>> ylabel('Solution functions')
```

και παίρνουμε το γράφημα:

