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

# Βέλτιστη Ροή Φορτίου σε Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς με τη Μέθοδο Newton

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Παναγιώτης Γ. Κοντοδήμος**

**Επιβλέπων :** Παύλος Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2011

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

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

# Βέλτιστη Ροή Φορτίου σε Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς με τη Μέθοδο Newton

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Παναγιώτης Γ. Κοντοδήμος**

**Επιβλέπων :** Παύλος Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1η Μαρτίου 2010.

| | | |
|---|---|---|
| Δρ. Κων/νος Βουρνάς | Δρ. Γεώργιος Κορρές | Δρ. Παύλος Γεωργιλάκης |
| ..... | ..... | ..... |

Αθήνα, Μάρτιος 2011

.....

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΚΟΝΤΟΔΗΜΟΣ**

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

© 2010 – All rights reserved

*Στην οικογένεια μου*

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αποτελεί μελέτη της βέλτιστης ροής φορτίου με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενεργού ισχύος, με τη μέθοδο Newton και με ενσωμάτωση ευέλικτων συστημάτων στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η βέλτιστη λύση για να θεωρηθεί αποδεκτή πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην υπάρχει παραβίαση των περιορισμών. Η εργασία έχει πρακτικό ενδιαφέρον καθώς στα πλαίσια αυτής αναπτύχθηκε λογισμικό για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος βελτιστοποίησης.

Η μέθοδος Newton είναι η βάση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης που μελετήθηκε και η διεργασία που εκτελεί είναι η επίλυση μη γραμμικών συστημάτων εξισώσεων. Η βελτιστοποίηση ξεκινά με την κατάστρωση των εξισώσεων, οι οποίες όταν λυθούν δίνουν λύση, η οποία εξετάζεται αν είναι η βέλτιστη με τα σχετικά κριτήρια. Έτσι η μέθοδος Newton είναι απλά το εργαλείο επίλυσης και θα μπορούσε αντί αυτής να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη επαναληπτική μέθοδος. Η συγκεκριμένη μέθοδος ωστόσο παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα και ένας από τους στόχους ήταν να διαπιστωθεί αν από αυτή την αξιόπιστη μέθοδο επίλυσης προκύπτει ένας αξιόπιστος αλγόριθμος βελτιστοποίησης και αν τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά.

Τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς ενσωματώθηκαν μέσω των κατάλληλων μοντέλων τους που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες και ανάλυση για την αποτελεσματικότητά τους ως προς τον έλεγχο ή συγκριτικά μεταξύ τους δεν συμπεριλαμβάνονται στην παρούσα εργασία.

Για την ανάπτυξη του λογισμικού χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, η οποία παρέχει μεγάλη ποικιλία έτοιμων συναρτήσεων, ενώ για τη διασύνδεση χρήστη-λογισμικού αναπτύχθηκε ειδικό γραφικό περιβάλλον με τη χρήση του GUI της MATLAB.

# ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Βελτιστοποίηση, Βέλτιστη Ροή Φορτίου, Μέθοδος Newton, Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς, Αντικειμενική Συνάρτηση Κόστους, Περιορισμοί, Συνάρτηση Lagrange.

# ABSTRACT

This thesis is a study of an algorithm which solves the optimal power flow (OPF) problem in power systems with flexible AC transmission systems using Newton method. The objective of OPF is to minimize active power productiont cost while satisfying all the constraints. This thesis has also practical interest, since a software tool has been developed to solve the OPF problem.

The Newton method, which is a technique for solving systems of nonlinear equations, is the base of the optimization method. The optimization begins with the development of the equations which when solved give a solution which is considered optimal if the relevant criteria are satisfied. Instead of Newton, another iteration method could be also used. This method, however, presents significant advantages and one of the objectives was to determine whether this reliable tool produces a reliable optimization algorithm and if the results are satisfactory.

The flexible AC transmission systems were incorporated by using appropriate models that exist in the literature. Construction details and analysis of their effectiveness in the control or comparison between them is not included in this thesis.

MATLAB programming language was used for software development, because MATLAB provides a wide range of ready to use functions, while for the interaction between user and software, a graphical user interface (GUI) was developed using the GUI tools of MATLAB.

# KEYWORDS

Optimization, Optimal Power Flow, Newton Method, Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Objective Function, Constraints, Lagrange Function.

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία κατατέθηκε ως διπλωματική προπτυχιακού επιπέδου στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το αντικείμενο που πραγματεύεται είναι η Βέλτιστη Ροή Φορτίου (OPF) με χρήση ψηφιακών υπολογιστικών συστημάτων για δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία εκτός από τα συμβατικά παθητικά στοιχεία όπως μετασχηματιστές και γραμμές περιλαμβάνουν και Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς.

Το αντικείμενο είναι ευρύ και ταυτόχρονα εξειδικευμένο και το ενδιαφέρον τόσο ακαδημαϊκά όσο και στη βιομηχανία είναι αυξημένο. Για τη περάτωση μιας τέτοιας εργασίας ένας προπτυχιακός φοιτητής πρέπει να βρίσκεται σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο γνώσεων μαθηματικών, προγραμματισμού και συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, σύνολο γνώσεων το οποίο οι προπτυχιακοί φοιτητές της σχολής Ηλεκτολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ το λαμβάνουν κατά την διάρκεια των σπουδών τους.

Η εκπόνηση της διπλωματικής ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2010 και περατώθηκε τον Ιούλιο του 2010. Η παρουσίαση πραγματοποιήθηκε αργότερα καθώς ξεκίνησα να εργάζομαι στην BCP Switzerland, προϊόν της οποίας είναι το NEPLAN. Η συγκυρία αυτή μου έδωσε τη δυνατότητα να δω αυτά που εγώ ανέπτυσσα σε ακαδημαϊκό επίπεδο, να χρησιμοποιούνται στην πιο εξελιγμένη στο είδος της εμπορική εφαρμογή και έτσι το κίνητρο για μένα ήταν ισχυρό ώστε να προσπαθήσω να πετύχω τον κύριο στόχο της διπλωματικής που ήταν η ανάπτυξη του λογισμικού OPF. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή μου Παύλο Γεωργιλάκη για την ανοχή που έδειξε και για την στήριξη που μου παρείχε προκειμένου να διευκολυνθεί η όλη διαδικασία της εκπόνησης και της παρουσίασης.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ... 13
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ... 13
1.2 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ... 13
1.3 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ... 14
1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ... 16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ... 17
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ... 17
2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΑΣΗΣ (LTC) ... 18
2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΓΩΝΙΑΣ (PS) ... 19
2.4 SVC ... 19
2.5 TCSC ... 20
2.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ... 22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ NEWTON ... 23
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ... 23
3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ NEWTON ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ... 23
3.2.1 Μέθοδος Newton ... 23
3.2.2 OPF ... 24
3.2.3 Διατύπωση προβλήματος ... 24
3.2.4 Αντικειμενική συνάρτηση ... 25
3.2.5 Περιορισμοί ισότητας ... 25
3.2.6 Περιορισμοί ανισότητας ... 26
3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ NEWTON ... 26
3.3.1 Συνάρτηση ποινής ... 27
3.3.2 Γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων ... 28
3.3.3 Ανάπτυξη της συνάρτησης Lagrange και κατασκευή του πίνακα Hessian ... 30
3.3.4 Επίλυση ... 34
3.3.5 Συνθήκες βελτιστοποίησης ... 35
3.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ... 36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ... 37
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ... 37
4.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΜΕΤΡΟΥ ΤΑΣΗΣ ... 37
4.2.1 Συνάρτηση Lagrange του LTC ... 38
4.2.2 Γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων με LTC ... 38
4.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ... 39
4.3.1 Συνάρτηση Lagrange του PS ... 39
4.3.2 Γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων με PS ... 40
4.4 SVC ... 42
4.4.1 Συνάρτηση Lagrange του SVC ... 42
4.4.2 Γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων με SVC ... 43
4.5 TCSC ... 44
4.5.1 Συνάρτηση Lagrange του TCSC ... 44
4.5.2 Γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων με TCSC ... 45
4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ... 49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ... 51
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ... 51
5.1.1 Γραφικό περιβάλλον ... 52
5.1.2 Εκκίνηση και λειτουργίες ... 52
5.1.3 Ιεραρχικό διάγραμμα ... 57
5.1.4 Εκτέλεση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ... 59
5.1.5 Δεδομένα-Αποτελέσματα ... 64
5.1.6 Περιορισμοί-Βελτιώσεις ... 64
5.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ... 66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ... 67
6.1 ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ... 67
6.2 ΔΙΚΤΥΟ 5 ΖΥΓΩΝ ... 67
6.2.1 Δίκτυο 5 ζυγών χωρίς ελεγκτή ισχύος ... 67

6.2.2 Δίκτυο 5 ζυγών με LTC ... 70
6.2.3 Δίκτυο 5 ζυγών με PS ... 73
6.2.4 Δίκτυο 5 ζυγών με SVC ... 76
6.2.5 Δίκτυο 5 ζυγών με TCSC ... 79
6.3 ΔΙΚΤΥΟ 14 ΖΥΓΩΝ ... 82
6.3.1 Δίκτυο 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή ... 82
6.3.2 Δίκτυο 14 ζυγών με LTC ... 86
6.3.3 Δίκτυο 14 ζυγών με PS ... 89
6.3.4 Δίκτυο 14 ζυγών με SVC ... 92
6.3.5 Δίκτυο 14 ζυγών με TCSC ... 95
6.4 ΔΙΚΤΥΟ 68 ΖΥΓΩΝ ... 98
6.4.1 Δίκτυο 68 ζυγών χωρίς ελεγκτή ... 98
6.4.2 Δίκτυο 68 ζυγών με LTC ... 107
6.4.3 Δίκτυο 68 ζυγών με PS ... 111
6.4.4 Δίκτυο 68 ζυγών με SVC ... 115
6.4.5 Δίκτυο 68 ζυγών με TCSC ... 119
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ... 125
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ... 127
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ... 129
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ ... 131
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ ... 141

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ
1

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στη βέλτιστη ροή φορτίου για δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν ελεγκτές ισχύος. Οι ελεγκτές ισχύος που μελετώνται είναι είτε συμβατικοί (π.χ. μετασχηματιστές με μηχανισμό αλλαγής τάσης ή φάσης), είτε ευέλικτα συστήματα μεταφοράς (FACTS-Flexible AC Transmission Systems). Ο σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη λογισμικού κατάλληλου για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου. Το λογισμικό βασίστηκε σε κώδικα ο οποίος επιλύει το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου για δίκτυα χωρίς συσκευές ελέγχου ισχύος [1.1]. Έτσι η πραγματική πρόκληση ήταν να ενταχθούν οι συσκευές ελέγχου στο υπάρχον λογισμικό και πριν από αυτό να αναπτυχθεί η μαθηματική θεμελίωση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Έτσι το υπάρχον λογισμικό έπρεπε να τροποποιηθεί, να διορθωθεί και να δοκιμαστεί, διαδικασίες οι οποίες ήταν οι πιο χρονοβόρες καθόλη τη φάση της εκπόνησης της διπλωματικής.

Το κίνητρο, το οποίο ήταν η ανάπτυξη του λογισμικού που αναφέρθηκε, δημιούργησε την ανάγκη για βαθιά κατανόηση της αντίστοιχης θεωρίας. Επειδή ο πυρήνας του αλγορίθμου είναι η μέθοδος Newton, έπρεπε να μελετηθούν εκτενώς οι ιδιότητες της μεθόδου και να κατανοηθεί το μαθηματικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζεται η μέθοδος. Στη συνέχεια έπρεπε να κατανοηθούν τα μοντέλα των συσκευών ελέγχου (συμβατικών και FACTS). Η θεωρία για τις συσκευές ελέγχου είναι εκτεταμένη και για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν ορισμένα απλοποιημένα μοντέλα τα οποία είναι και σε κατάλληλη μορφή για την εισαγωγή τους στη μέθοδο Newton. Έτσι δεν δαπανήθηκε χρόνος για την εξαγωγή των μοντέλων, καθώς χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα της βιβλιογραφίας.

Τέλος, το εργαλείο υλοποίησης του αλγορίθμου είναι η γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Η γλώσσα επιλέχθηκε για διάφορους σημαντικούς λόγους δεδομένου ότι η εφαρμογή στην παρούσα φάση δεν λαμβάνει υπόψιν σαν κρίσιμο παράγοντα την ταχύτητα επεξεργασίας και η MATLAB είναι υπεραρκετή ως προς τον παράγοντα αυτό. Οι σημαντικότεροι λόγοι είναι η ευκολία που παρέχει για μαθηματικούς χειρισμούς και το γεγονός ότι τα τμήματα πηγαίου κώδικα που προϋπήρχαν [1.1] είχαν αναπτζχθεί σε MATLAB. Για την καλαίσθητη και εύκολη χρήση του λογισμικού από χρήστες αναπτύχθηκε γραφικό περιβάλλον το οποίο αυτοματοποιεί τις διαδικασίες εισαγωγής δεδομένων, υπολογισμού και παρουσίασης αποτελεσμάτων. Φυσικά το γραφικό περιβάλλον δεν παίζει κανέναν απολύτως ρόλο στην αξιοπιστία και ευρωστία του πυρήνα του λογισμικού.

## 1.2 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η απλή ροή φορτίου επιλύει συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με κάποια τυποποιημένη μέθοδο, όπως η Newton-Raphson. Η λύση της ροής φορτίου είναι η εύρεση όλων των μεταβλητών κατάστασης ενός δικτύου (όσο μεγάλο ή πολύπλοκο είναι αυτό) και η ικανοποίηση των εξισώσεων ροής ισχύος χωρίς να υπάρχουν παραβιάσεις ορίων (π.χ. όρια τάσεων στους ζυγούς). Η απλή επίλυση

ροής φορτίου όμως ενδεχομένως δεν είναι η βέλτιστη. Αυτό σημαίνει ότι, πολύ πιθανόν, αλλάζοντας λίγο κάποιες παραμέτρους ελέγχου (π.χ. τάση γεννητριών, λήψεις μετασχηματιστών, παραγωγή γεννητριών) να βρεθεί κάποια άλλη λύση η οποία να είναι αποδεκτή (όλες οι μεταβλητές εντός ορίων) και η οποία να δημιουργεί μικρότερες απώλειες χαλκού, ή να επιτυγχάνει φθηνότερη παραγωγή ενεργού ισχύος για το ίδιο αποτέλεσμα της τροφοδότησης των φορτίων με ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης με την απλή επίλυση ροής φορτίου κάποια τμήματα του δικτύου μπορεί να είναι υπερφορτισμένα ενώ κάποια άλλα τμήματα του δικτύου να έχουν πολύ χαμηλή φόρτιση. Στο παρελθόν όταν τα δίκτυα δεν ήταν τόσο πολύπλοκα και όταν οι αλλαγές στο φορτίο δεν ήταν τόσο γρήγορες, ο χειριστής του δικτύου ήξερε, είχε μάθει, ποιους χειρισμούς έπρεπε να κάνει ώστε να επιτυγχάνει μια καλή λύση βασισμένη σε κάποιο κριτήριο (π.χ. απώλειες) και σχεδόν πάντα δεν ήταν η καλύτερη λύση. Σήμερα όμως είναι αδύνατον να βασιστεί απλά και μόνο στην εμπειρία ο έλεγχος και η βελτιστοποίηση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Από το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο και μετά οι μηχανικοί και μαθηματικοί άρχισαν να εξετάζουν το καθαρά μαθηματικό πρόβλημα της βελτιστοποίησης συναρτήσεων. Ο όρος βελτιστοποίηση σημαίνει την εύρεση του ελάχιστου ή μέγιστου μιας συνάρτησης. Όταν το πρόβλημα προκύπτει από μια συνάρτηση μιας μεταβλητής η επίλυση είναι απλή. Δυστυχώς όμως τα πραγματικά προβλήματα απαιτούν την επίλυση πολλών συναρτήσεων πολλών μεταβλητών. Ως εκ τούτου χρειαζόταν η μαθηματική θεμελίωση που θα επέτρεπε τη λύση τέτοιων πολύπλοκων προβλημάτων. Σήμερα αυτή η μαθηματική βάση υπάρχει και οι μηχανικοί κάθε πεδίου χρησιμοποιούν τα μαθηματικά σαν εργαλείο για επίλυση και βελτιστοποίηση των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν.

Έτσι λοιπόν τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είχαν ήδη μοντελοποιηθεί και τα υπολογιστικά συστήματα έλυναν χρόνια το πρόβλημα της ροής φορτίου. Οπότε δεν άργησε να εφαρμοστεί και η θεωρία της βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα λοιπόν της βέλτιστης ροής φορτίου μπορεί με απλά λόγια να διατυπωθεί ως εξής: Επιλογή μιας αντικειμενικής συνάρτησης ως προς την οποία είναι επιθυμητή η βέλτιστη λύση (απώλειες, κόστος παραγωγής, μεταφορά ισχύος από μια περιοχή σε μία άλλη κτλ), και εύρεση του βέλτιστου που όμως ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς του προβλήματος. Προκύπτει το ερώτημα αν η λύση είναι πάντα εφικτή, αν δηλαδή γίνουν πολύ αυστηροί οι περιορισμοί θα βρίσκεται πάντα μια λύση; Η απάντηση είναι όχι, η λύση δεν είναι πάντα εφικτή και πολύ αυστηροί περιορισμοί μπορεί να οδηγήσουν σε μη επίτευξη λύσης. Η βέλτιστη ροή φορτίου είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης οπότε είναι απαραίτητη κάποια επαναληπτική μέθοδος για την επίλυση με υπολογιστή. Η μέθοδος Newton κάνει ακριβώς αυτό. Επιλύει συστήματα μη γραμμικών εξισώσεων οπότε είναι ένα ισχυρό εργαλείο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βέλτιστη ροή φορτίου. Η λύση της μεθόδου Newton εξετάζεται αν είναι η βέλτιστη με τα κριτήρια Kuhn-Tucker. Αν δεν είναι, η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια αυτά οπότε και βρίσκεται η βέλτιστη λύση.

## 1.3 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στα μοντέλα των ελεγκτών ισχύος που. Τα μοντέλα αυτά δεν αποδεικνύονται, απλά γίνεται παραπομπή στη σχετική βιβλιογραφία. Τα μοντέλα αυτά είναι κατάλληλα για να συμπεριληφθούν στη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης, το οποίο αργότερα θα επιλυθεί με τη μέθοδο Newton.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** περιγράφεται το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου χωρίς ευέλικτα συστήματα μεταφοράς. Το πρόβλημα διατυπώνεται μαθηματικά, αναφέρονται η αντικειμενική συνάρτηση, οι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας και περιγράφονται οι εξισώσεις για δίκτυο με γραμμές μεταφοράς και γεννήτριες μόνο. Στη συνέχεια η διαδικασία επίλυσης αναλύεται και περιγράφεται πως εφαρμόζεται η μέθοδος Newton και με ποιο τρόπο αντιμετωπίζονται οι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας και οι διαδικασίες που εκτελούνται σε περίπτωση παραβίασης ορίων.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** γίνεται χρήση των μοντέλων που περιγράφηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο, και τα μοντέλα αυτά πλέον εντάσσονται στη διατύπωση του προβλήματος για να προκύψει

η βέλτιστη λύση, η οποία θα συμπεριλαμβάνει και τους ελεγκτές ισχύος. Οι ελεγκτές εισάγουν μια νέα μεταβλητή κατάστασης στο σύνολο των μεταβλητών κατάστασης, της οποίας ο τρόπος χειρισμού εξαρτάται από τον ελεγκτή ισχύος. Έτσι, ενώ για το LTC η νέα μεταβλητή κατάστασης είναι η τιμή λήψης της τάσης, για το SVC είναι η γωνία έναυσης των θυρίστορ, κτλ.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** γίνεται περιγραφή και ανάλυση του λογισμικού που υλοποιεί τον αλγόριθμο επίλυσης με την μέθοδο Newton. Περιγράφεται αρχικά το γραφικό περιβάλλον το οποίο αναπτύχθηκε για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας επίλυσης και για την ευκολία χρήσης του λογισμικού από χρήστες. Περιγράφονται τα παραδείγματα που βρίσκονται ενσωματωμένα, γίνεται ανάλυση της λειτουργίας του κώδικα με διαγράμματα ροής και παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με τον πηγαίο κώδικα. Τέλος αναφέρονται σημεία που θα μπορούσαν να βελτιωθούν στα πλαίσια κάποιας άλλης εργασίας.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του λογισμικού σε δίκτυα 5, 14 και 68 ζυγών. Για κάθε δίκτυο, τα αποτελέσματα του λογισμικού συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του λογισμικού NEPLAN, και από τη σύγκριση αυτή προκύπτει ταύτιση αποτελεσμάτων..

Στο **έβδομο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της εργασίας.

Στο **παράρτημα Α** επεξηγείται η κατασκευή του πίνακα Hessian καθώς και του διανύσματος κλίσης.

Στο **παράρτημα Β** ερμηνεύονται οι πολλαπλασιαστές Lagrange και γίνεται η αρχικοποίησή τους για το πρόβλημα οικονομικής κατανομής φορτίου χωρίς απώλειες.

Στο **παράρτημα Γ** δίνονται οι όροι του πίνακα Hessian και του διανύσματος κλίσης για συμβατικά στοιχεία καθώς και για ευέλικτα συστήματα μεταφοράς.

Στο **παράρτημα Δ** δίνεται η λίστα με τα αγγλικά ακρονύμια και η απόδοσή τους στα ελληνικά.

# 1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1.1] E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles-Camacho, “FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks”. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

[1.2] N.G. Hingorani, L. Gyugyi, “Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems”. Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2000.

[1.3] D.P. Bertsekas, “Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods”. Academic Press, 1982.

[1.4] D.G. Luenberger, “Introduction to Linear and Nonlinear Programming”. Addison-Wesley, 1984.

[1.5] J. Arrillaga, C. P. Arnold, “Computer Analysis of Power Systems”. J John Wiley & Sons, 1990.

[1.6] J.A Momoh, R.J. Koessler, M. S. Bond, B. Stott, D. Sun, A. Papalexopoulos, P. Ristanovic “Challenges to Optimal Power Flow”, IEEE Transactions on Power Systems, vol 12, no. 1, pp. 444-445, Feb. 1997.

[1.7] D. A. Wismer and R. Chattergy, “Introduction to Non-Linear Optimization, A Problem Solving Approach”. North Holland Publishing, 1978.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ
2

# ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

## 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μοντελοποίηση όλων των στοιχείων του δικτύου είναι η πρώτη και ίσως η πιό σημαντική διαδικασία, η οποία προηγείται οποιασδήποτε διαδικασίας επίλυσης δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής δεν αναπτύχθηκε κάποιο νέο μοντέλο αλλά χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία τόσο για τα συμβατικά στοιχεία του δικτύου όσο και για τα FACTS. Τα συμβατικά στοιχεία ενός δικτύου είναι: γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, φορτία, πυκνωτές, κτλ. Το κάθε στοιχείο του δικτύου μοντελοποιείται μέσω των ισοδύναμων κυκλωμάτων του σαν συνδυασμός πηνίων, πυκνωτών και αντιστάσεων. Κάθε στοιχείο αποτελεί ένα ηλεκτικό κύκλωμα από μόνο του και η διασύνδεση όλων αυτών των στοιχείων αποτελεί το δίκτυο (μεταφοράς εν προκειμένω).

Τα μοντέλα είναι προσεγγιστικές απλοποιημένες αναπαραστάσεις των πραγματικών εξαρτημάτων, και ο σκοπός τους είναι να διευκολύνουν τους υπολογισμούς. Ανάλογα το σκοπό υπάρχουν διάφορα μοντέλα για κάθε εξάρτημα. Στην διπλωματική αυτή χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα κατάλληλα για ανάλυση μόνιμης κατάστασης στη βασική συχνότητα. Τα μοντέλα αυτά δεν είναι κατάλληλα για μελέτη μεταβατικών και δυναμικών φαινομένων [2.1].

Από τους πολλούς τρόπους που μπορεί να περιγραφεί ένα δίκτυο σύμφωνα με τους νόμους του Kirchhoff, δύο μέθοδοι -κόμβων και βρόχων- χρησιμοποιούνται συνήθως. Η ανάλυση κόμβων έχει διαπιστωθεί ότι είναι ιδιαιτέρως κατάλληλη για τα ψηφιακά υπολογιστικά συστήματα και χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για επίλυση δικτύων [2.2]. Η ανάλυση κόμβων προσφέρει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

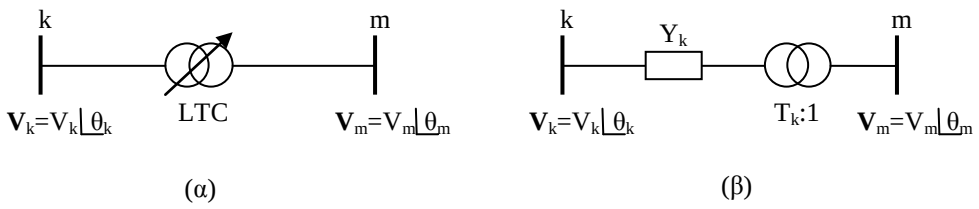
- Η αρίθμηση των κόμβων είναι πολύ απλή και υλοποιείται σε ένα διάγραμμα.
- Τα δεδομένα είναι σε άμεσα επεξεργάσιμη μορφή.
- Ο αριθμός των μεταβλητών και των εξισώσεων είναι συνήθως μικρότερος από ότι με τη μέθοδο των βρόχων.
- Παράλληλοι κλάδοι δεν αυξάνουν τον αριθμό των μεταβλητών ή εξισώσεων.
- Οι τάσεις των κόμβων είναι διαθέσιμες απευθείας από την επίλυση και τα ρεύματα κλάδων υπολογίζονται εύκολα.
- Τιμές λήψεων μετασχηματιστών εκτός ονομαστικής τιμής μπορούν εύκολα να αναπαρασταθούν.

Τα μοντέλα των FACTS που υπάρχουν στη βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπεριλαμβάνονται και οι ασυμμετρίες του εξοπλισμού με έντονες αναφορές στη φυσική δομή τους. Ωστόσο στα πλαίσια της διπλωματικής θεωρήθηκε ότι οι ασυμμετρίες αυτές είναι μικρές και ότι μπορούν να αγνοηθούν, έτσι τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι απλούστερα και η

παρούσα μελέτη περιορίστηκε στα SVC και TCSC καθώς και στους συμβατικούς ελεγκτές ισχύος (LTC και PS). Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστούν τα μοντέλα αυτά.

## 2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΑΣΗΣ (LTC)

Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται το μοντέλο του συστήματος αλλαγής τάσης, το οποίο συνδέεται μεταξύ των κόμβων k και m.




**Σχήμα 2.1:** (α) κυκλωματική αναπαράσταση συστήματος αλλαγής τάσης (LTC)
(β) κυκλωματικό μοντέλο συστήματος αλλαγής τάσης

Το μοντέλο αυτό, εκφράζεται μαθηματικά ως ακολούθως:

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_k & -T_k Y_k \\ -T_k Y_k & T_k^2 Y_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{kk} & T_k Y_{km} \\ T_k Y_{mk} & T_k^2 Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

όπου $Y_k$ είναι η αγωγιμότητα σειράς του LTC και $T_k$ είναι η λήψη του LTC, η οποία είναι πραγματικός αριθμός.

Έτσι, οι εξισώσεις ροής φορτίου του LTC είναι οι ακόλουθες:

$$P_k = V_k^2 G_{kk} + T_k V_k V_m \left[G_{km}\cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_k - \theta_m)\right], \tag{2.2}$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} + T_k V_k V_m \left[G_{km}\sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km}\cos(\theta_k - \theta_m)\right], \tag{2.3}$$

$$P_m = T_k^2 V_m^2 G_{mm} + T_k V_m V_k \left[G_{mk}\cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk}\sin(\theta_m - \theta_k)\right], \tag{2.4}$$

$$Q_m = -T_k^2 V_m^2 B_{mm} + T_k V_m V_k \left[G_{mk}\sin(\theta_m - \theta_k) - B_{mk}\cos(\theta_m - \theta_k)\right] \tag{2.5}$$

όπου

$$Y_{kk} = Y_{mm} = G_{kk} + \mathrm{j}B_{kk} = Y_k, \tag{2.6}$$

$$Y_{km} = Y_{mk} = G_{km} + \mathrm{j}B_{km} = -Y_k. \tag{2.7}$$

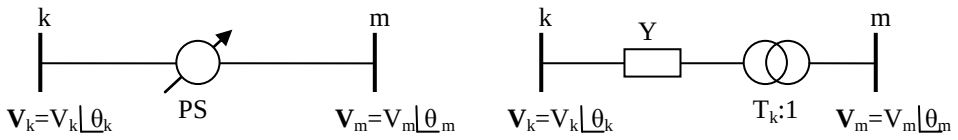
Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι οι μιγαδικές τάσεις αναλύονται σε μέτρο και γωνία για να εισαχθούν στις ανωτέρω εξισώσεις:

$$\mathbf{V}_k=V_k\angle\theta_k \tag{2.8}$$

$$\mathbf{V}_m=V_m\angle\theta_m \tag{2.9}$$

## 2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΓΩΝΙΑΣ (PS)

Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται το μοντέλο του συστήματος αλλαγής γωνίας το οποίο συνδέεται μεταξύ των κόμβων k και m.




**Σχήμα 2.2:** (α) κυκλωματική αναπαράσταση συστήματος αλλαγής φάσης (PS)
(β) κυκλωματικό μοντέλο συστήματος αλλαγής φάσης

Το μοντέλο αυτό, εκφράζεται μαθηματικά ως ακολούθως:

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y & -Y(\cos\phi + \mathrm{j}\sin\phi) \\ -Y(\cos\phi - \mathrm{j}\sin\phi) & Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{kk} & Y_{km} \\ Y_{mk} & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

όπου Y είναι η αγωγιμότητα σειράς του PS και φ είναι η γωνία φάσης του PS, η οποία είναι πραγματικός αριθμός. Έτσι για τη μοντελοποίηση του PS απαιτούνται δύο παράμετροι: το φ και το Y. Το Y είναι σταθερό, ενώ το φ μεταβάλλεται ως ακολούθως:

$$\varphi^{min} \leq \varphi \leq \varphi^{max} \tag{2.11}$$

Οι εξισώσεις ροής ισχύος του PS είναι οι ακόλουθες:

$$P_k = V_k^2 G_{kk} + V_k V_m \left[G_{km}\cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_k - \theta_m)\right], \tag{2.12}$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m \left[G_{km}\sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km}\cos(\theta_k - \theta_m)\right], \tag{2.13}$$

$$P_m = V_m^2 G_{mm} + V_m V_k \left[G_{mk}\cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk}\sin(\theta_m - \theta_k)\right], \tag{2.14}$$

$$Q_m = -V_m^2 B_{mm} + V_m V_k \left[G_{mk}\sin(\theta_m - \theta_k) - B_{mk}\cos(\theta_m - \theta_k)\right] \tag{2.15}$$

όπου

$$Y_{kk} = G_{kk} + \mathrm{j}B_{kk} = Y, \tag{2.16}$$

$$Y_{mm} = G_{mm} + \mathrm{j}B_{mm} = Y, \tag{2.17}$$

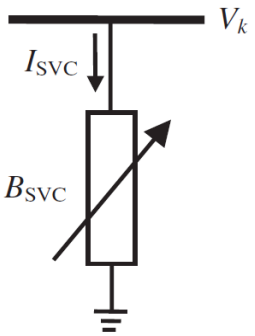
$$Y_{km} = G_{km} + \mathrm{j}B_{km} = -Y(\cos\phi + \mathrm{j}\sin\phi), \tag{2.18}$$

$$Y_{mk} = G_{mk} + \mathrm{j}B_{mk} = -Y(\cos\phi - \mathrm{j}\sin\phi). \tag{2.19}$$

## 2.4 SVC

Υπάρχουν δύο κύρια μοντέλα για το SVC: (α) το μοντέλο μεταβλητής εγκάρσιας αγωγιμότητας, και (β) το μοντέλο γωνίας έναυσης. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το μοντέλο μεταβλητής εγκάρσιας αγωγιμότητας.

Το μοντέλο μεταβλητής εγκάρσιας αγωγιμότητας του SVC φαίνεται στο Σχήμα 2.3.




**Σχήμα 2.3**: Μοντέλο εγκάρσιας αγωγιμότητας SVC

Το μοντέλο αυτό περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$I_{SVC} = jB_{SVC}\, V_k, \tag{2.20}$$

$$Q_{SVC} = Q_k = -V_k^2\, B_{SVC}. \tag{2.21}$$

όπου $B_{SVC}$ (πραγματικός αριθμός) είναι η μεταβλητή εγκάρσια αγωγιμότητα του SVC και $V_k$ είναι η τάση του ζυγού που συνδέεται το SVC.

Για το $B_{SVC}$ ισχύει:

$$B_{SVCmin} \leq B_{SVC} \leq B_{SVCmax}$$

Η εγκάρσια αγωγιμότητα, $B_{SVC}$, του SVC μεταβάλλεται συναρτήσει της γωνίας έναυσης, $\alpha_{SVC}$, του SVC ως ακολούθως:

$$B_{SVC} = \frac{1}{X_C X_L}\left\{X_L - \frac{X_C}{\pi}\left[2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha\right]\right\} \tag{2.22}$$

όπου $X_c$ η χωρητική αντίδραση και $X_L$ η επαγωγική αντίδραση του SVC.
Αντικαθιστώντας τη (2.22) στη (2.21) προκύπτει ότι:

$$Q_k = \frac{-V_k^2}{X_C X_L}\left\{X_L - \frac{X_C}{\pi}\left[2(\pi - \alpha_{SVC}) + \sin(2\alpha_{SVC})\right]\right\} \tag{2.23}$$

όπου $V_k$ το μέτρο τάσης του ζυγού k.

## 2.5 TCSC

Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο για το TCSC είναι αυτό της μεταβλητής σύνθετης αντίστασης σειράς $X_{TCSC}$. Το μοντέλο αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.4 και αναπαριστά τη λειτουργία του TCSC τόσο στην επαγωγική όσο και στη χωρητική περιοχή λειτουργίας.

**Σχήμα 2.4:** Μοντέλο TCSC: (α) επαγωγική περιοχή λειτουργίας
(β) χωρητική περιοχή λειτουργίας

Έτσι το TCSC περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{j}B_{kk} & \mathrm{j}B_{km} \\ \mathrm{j}B_{mk} & \mathrm{j}B_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \tag{2.24}$$

όπου για επαγωγική λειτουργία ισχύει ότι:

$$B_{kk} = B_{mm} = -\frac{1}{X_{\mathrm{TCSC}}}, \tag{2.25}$$

$$B_{km} = B_{mk} = \frac{1}{X_{\mathrm{TCSC}}}, \tag{2.26}$$

ενώ για χωρητική λειτουργία τα πρόσημα αντιστρέφονται.

Οι εξισώσεις υπολογισμού της ισχύος είναι:

$$P_k = V_k V_m B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m), \tag{2.27}$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} - V_k V_m B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m). \tag{2.28}$$

ενώ για τον υπολογισμό των εξισώσεων στον ζυγό m απλά εναλλάσσεται ο δείκτης k με το δείκτη m.

## 2.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[2.1] E. Acha, Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles-Camacho, "FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks". John Wiley & Sons, 2004.

[2.2] J. Arrillaga and C.P.Arnold, "Computer analysis of power systems". John Wiley & Sons 1990.

[2.3] I.A. Erinmez, "Modeling of SVC for Load Flow Analysis", 1986.

[2.4] P. Kundur, "Power System Stability and Control". McGraw-Hill, 1994.

[2.5] IEEE SSCWG, 1995.

[2.6] C. R. Fuerte-Esquivel, E. Acha, H. Ambriz-Perez, "A Thyristor Controlled Series Compensator Model for the Power Flow Solution of Practical Power Networks". IEEE Trans. Power Systems, vol 15, pp 58-64, 2002.

[2.7] H. Ambriz-Perez, C. R. Fuerte-Esquivel, C. R. Acha "Advanced Transformer Control Modelling in an Optimal Power Flow using Newton's Method". IEEE Trans. Power Systems, vol 15, pp 290-298 2000.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ
3

# ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ NEWTON

## 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη και στους τρεις τομείς από τους οποίους απαρτίζονται, δηλαδή, στην παραγωγή, στη μεταφορά και στη διανομή. Στο παρελθόν τα συστήματα μεταφοράς χαρακτηρίζονταν από χαμηλό βαθμό διασύνδεσης, οπότε και ήταν απλό πρόβλημα το να τροφοδοτηθεί το εκάστοτε φορτίο από τις μονάδες παραγωγής. Η αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε στη διασύνδεση δικτύων μεταφοράς, δημιουργώντας εκτεταμένα δίκτυα πολλών χιλιομέτρων, και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να εμφανισθούν σημαντικές δυσκολίες στη λειτουργία των δικτύων. Έγινε απαραίτητο για οικονομικούς λόγους, τα συστήματα να λειτουργούν πολύ κοντά στα λειτουργικά τους όρια. Έγινε επίσης μη πρακτικό το να επιλέγεται κάποια στρατηγική λειτουργίας απλά και μόνο βασισμένη στην παρατήρηση και στην πείρα του διαχειριστή του δικτύου.

Η φιλοσοφία λειτουργίας έπρεπε να επαναπροσδιοριστεί και νέες ιδέες βασισμένες σε οικονομικά μεγέθη έπρεπε να υιοθετηθούν. Οι μέθοδοι επίλυσης βέλτιστης ροής φορτίου (OPF-optimal power flow) αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια ακριβώς για να ικανοποιήσουν αυτές τις πολύ πρακτικές απαιτήσεις των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Η βέλτιστη ροή φορτίου συμπεριλαμβάνει μια αντικειμενική συνάρτηση η οποία βελτιστοποιείται χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί λειτουργίας του δικτύου. Αυτοί οι περιορισμοί είναι οι εξισώσεις του δικτύου, οι συνθήκες φόρτισης, περιορισμοί στις μεταβλητές ελέγχου και φυσικοί περιορισμοί στην παραγωγή άεργου και ενεργού ισχύος. Η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης εξαρτάται από τη φιλοσοφία διαχείρισης δικτύου κάθε συστήματος. Οι δύο πιο συνήθεις αντικειμενικές συναρτήσεις είναι η συνάρτηση κόστους παραγωγής ενεργού ισχύος και οι απώλειες χαλκού.

Η βέλτιστη ροή φορτίου είναι ένα σύνθετο μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα αυτό λύνεται μόνο αριθμητικά και μια από τις πιο ισχυρές μεθόδους για λύση τέτοιων προβλημάτων είναι η μέθοδος Newton.

## 3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ NEWTON ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

### 3.2.1 Μέθοδος Newton

Η μέθοδος Newton είναι ευρέως γνωστή στον τομέα των συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος και ενέργειας. Είναι ο τυποποιημένος αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος της απλής ροής φορτίου εδώ

και δεκαετίες [3.1] και αποτέλεσε τον πυρήνα για την υλοποίηση του λογισμικού της διπλωματικής εργασίας.

Καλές αναφορές για τη μέθοδο είναι τα βιβλία του Luenberger [3.2] και του Bertsekas [3.3] τα οποία περιγράφουν τη μέθοδο καθώς επίσης και τις ιδιότητες της δευτεροβάθμιας σύγκλισής της. Η λεπτομερής περιγραφή της μεθόδου Newton σαν γενικός αλγόριθμος επίλυσης συστημάτων γραμμικών εξισώσεων και οι ιδιότητες σύγκλισης είναι θέματα εκτεταμένα και μια λεπτομερής περιγραφή δεν είναι δυνατόν να δοθεί στα πλαίσια της διπλωματικής.

Η μέθοδος Newton είναι πολύ ισχυρός αλγόριθμος επίλυσης εξαιτίας της ταχύτατης σύγκλισης όταν οι αρχικές τιμές βρίσκονται κοντά στη λύση, ιδιότητα ιδιαίτερα χρήσιμη για εφαρμογή στα δίκτυα ισχύος καθώς οι αρχικές τιμές που προκύπτουν "μαντεύοντας" δεν απέχουν πολύ από τη λύση. Οι αρχικές τάσεις κόμβων είναι κοντά στις ονομαστικές (1 α.μ.), ως αρχικές τιμές για τις γεννήτριες (ενεργός και άεργος ισχύς) τίθενται τιμές από κάποια λύση της απλής ροής φορτίου ή γίνεται κάποια εμπειρική προσέγγιση, και οι τιμές των λήψεων των μετασχηματιστών υποτίθενται αρχικά κοντά στην τιμή 1 α.μ. Έτσι η μέθοδος έχει μια αρχική υπόθεση αρκετά κοντά στη λύση. Αυτό σημαίνει ότι μετά από λίγες επαναλήψεις επιτυγχάνεται σύγκλιση εφαρμόζοντας ένα αυστηρό κριτήριο σύγκλισης. Έτσι λοιπόν προκύπτει ένα πολύ ισχυρό εργαλείο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να λυθεί το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου.

### 3.2.2 OPF

Η βέλτιστη ροή φορτίου δίνει τη βέλτιστη κατάσταση ενός δικτύου ισχύος το οποίο υπόκειται σε περιορισμούς φυσικούς αλλά και λειτουργικούς. Μία αντικειμενική συνάρτηση, η οποία μπορεί να αναπαριστά κάποιους οικονομικούς ή περιβαλλοντικούς συντελεστές ή κάποιους συντελεστές ασφάλειας, σχηματίζεται και επιλύεται με κάποιον κατάλληλο αλγόριθμο επίλυσης. Η λύση αυτή ονομάζεται βέλτιστη και προκύπτει αφού έχουν ληφθεί υπόψη οι περιορισμοί οι οποίοι τίθενται από τους φυσικούς νόμους, τις δυνατότητες παραγωγής, την ικανότητα του συστήματος μεταφοράς, τα σχεδιαστικά όρια του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και τις στρατηγικές λειτουργίας. Αυτού του είδους τα προβλήματα συνήθως έχουν την μαθηματική έκφραση ενός στατικού προβλήματος, μη γραμμικού προγραμματισμού, με την αντικειμενική συνάρτηση να αναπαρίσταται σαν μια μη γραμμική εξίσωση και τους περιορισμούς να αναπαρίστανται σαν μη γραμμικές ή γραμμικές εξισώσεις. Πολύ συχνά ως αντικειμενική συνάρτηση επιλέγεται το κόστος παραγωγής ενεργού ισχύος [3.4]. Έτσι πρακτικά, μέσω της μαθηματικής του αναπαράστασης, το κόστος παραγωγής ενεργού ισχύος ελαχιστοποιείται ρυθμίζοντας κατάλληλα τις μεταβλητές ελέγχου εντός επιτρεπτών ορίων.

### 3.2.3 Διατύπωση προβλήματος

Το γενικό πρόβλημα OPF διατυπώνεται ως εξής:

Ελαχιστοποίησε την $f(\mathbf{x})$ υπό τους περιορισμούς $h(\mathbf{x}) = 0$ και $g(\mathbf{x}) \leq 0$ (3.1)

Σε αυτή την έκφραση, x είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης, f(x) είναι η αντικειμενική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση, h(x) αναπαριστά τις εξισώσεις ροής ισχύος και η g(x) αναπαριστά τα όρια των μεταβλητών κατάστασης καθώς και τους λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος. Έτσι ο σκοπός είναι να βελτιστοποιηθεί (ελαχιστοποιηθεί εν προκειμένω) η αντικειμενική συνάρτηση με τη λύση να ικανοποιεί έναν αριθμό εξισώσεων και ανισώσεων. Οποιαδήποτε λύση ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς είναι αποδεκτή σαν εφικτή. Ένα σημείο θεωρείται σαν αποδεκτή λύση όταν είναι το ελάχιστο σε μια ορισμένη γειτονιά και ονομάζεται τοπικό ελάχιστο. Το ολικό ελάχιστο, είναι το τοπικό ελάχιστο θεωρώντας ως γειτονιά όλη την εφικτή περιοχή [3.2]

### 3.2.4 Αντικειμενική συνάρτηση

Το συνολικό κόστος παραγωγής ενεργού ισχύος, $F_T$, είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη αντικειμενική συνάρτηση στις μελέτες βέλτιστης ροής φορτίου:

$$F_T = \sum_{k=1}^{n_g} F_k\left(P_{gk}\right), \tag{3.2}$$

όπου $F_k$ είναι το κόστος καυσίμου της μονάδας k, $P_{gk}$ είναι η ενεργός ισχύς παραγόμενη από την μονάδα k, και $n_g$ είναι ο αριθμός των γεννητριών στο σύστημα, συμπεριλαμβανομένης και της γεννήτριας αναφοράς. Το κόστος καυσίμου κάθε θερμικής μονάδας αναπαρίσταται από ένα δευτεροβάθμιο πολυώνυμο [3.3]:

$$\mathrm{F}_k\left(P_{gk}\right) = a_k + b_k P_{gk} + c_k P_{gk}^2, \tag{3.3}$$

όπου $a_k$, $b_k$, και $c_k$ είναι οι συντελεστές κόστους της μονάδας k οι οποίοι είναι δεδομένοι.

Πρέπει να σημειωθεί ότι είναι απαραίτητο να συμπεριληφθεί και η γεννήτρια αναφοράς στην αντικειμενική συνάρτηση αλλιώς κατά τη διαδικασία ελαχιστοποίησης όλες οι γεννήτριες θα τεθούν στο ελάχιστο της ικανότητάς τους και η υπολειπόμενη ισχύς θα αφεθεί στη γεννήτρια αναφοράς, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το κόστος παραγωγής και αυτής της γεννήτριας με αποτέλεσμα να ληφθούν τελείως εσφαλμένα αποτελέσματα.

### 3.2.5 Περιορισμοί ισότητας

Οι εξισώσεις ροής φορτίου παρέχουν τον τρόπο για τον υπολογισμό του ισοζυγίου ισχύος του δικτύου κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Πρέπει σε κάθε περίπτωση να ικανοποιούνται για να μπορεί να υπάρξει μια εφικτή λύση [3.4] διαφορετικά η λύση του OPF προβλήματος θεωρείται ανέφικτη. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν το σύνδεσμο μεταξύ των μεταβλητών ελέγχου και των εξαρτημένων μεταβλητών:

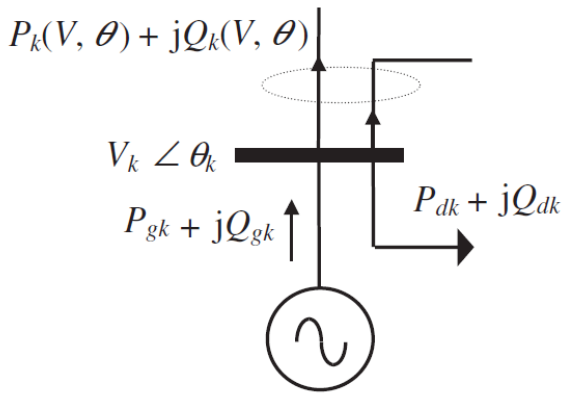
$$\mathrm{P}_k(V,\theta) + P_{dk} - P_{gk} = 0, \tag{3.4}$$

$$\mathrm{Q}_k(V,\theta) + Q_{dk} - Q_{gk} = 0, \tag{3.5}$$

όπου

$P_k$ και $Q_k$ είναι αντίστοιχα η ενεργός και άεργος ισχύς εγχεόμενη στο ζυγό k,
$P_{dk}$ και $Q_{dk}$ είναι αντίστοιχα η ενεργός και άεργος ισχύς φορτίου στο ζυγό k,
$P_{gk}$ και $Q_{gk}$ είναι αντίστοιχα η παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς στο ζυγό k και
V και θ είναι αντίστοιχα το μέτρο και η γωνία της τάσης ζυγού.

Ένας γενικός ζυγός ο οποίος συμπεριλαμβάνει γεννήτρια, φορτίο και γραμμές μεταφοράς φαίνεται στο Σχήμα 3.1.




**Σχήμα 3.1:** Γενικός ζυγός σε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Πρέπει να τονιστεί ότι όλοι οι περιορισμοί ισότητας (εξισώσεις) στο δίκτυο είναι μη γραμμικοί αλλά ωστόσο θα χρησιμοποιηθούν αφού πρώτα γραμματικοποιηθούν [3.2].

### 3.2.6 Περιορισμοί ανισότητας

Όλες οι μεταβλητές έχουν άνω και κάτω όρια τα οποία πρέπει να μην παραβιάζονται στην OPF λύση. Οι περιορισμοί στις μεταβλητές ελέγχου αντικατοπτρίζουν τους φραγμούς λειτουργίας του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται. Έτσι τα όρια παραγωγής ενεργούς ισχύος και τα μέτρα των τάσεων στις μονάδες παραγωγής είναι τα πιο σημαντικά.

Οι περιορισμοί στις συναρτήσεις προέρχονται από την εφαρμογή των ορίων στις μεταβλητές ελέγχου, με τους περιορισμούς στο μέτρο των τάσεων των ζυγών φορτίου και στη ροή ενεργού και αέργου ισχύος των γραμμών μεταφοράς να είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι:

$$P_{gk}^{\min} \leq P_{gk} \leq P_{gk}^{\max}, \quad k = 1, \ldots, n_{\mathrm{g}}; \tag{3.6}$$

$$Q_{gk}^{\min} \leq Q_{gk} \leq Q_{gk}^{\max}, \quad k = 1, \ldots, n_{\mathrm{g}}; \tag{3.7}$$

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max}, \quad k = 1, \ldots, n_{\mathrm{b}}; \tag{3.8}$$

όπου $n_b$ είναι το συνολικό πλήθος των ζυγών, $n_g$ είναι το συνολικό πλήθος των ζυγών παραγωγής και

$$Q_{gk} = \mathrm{Q}_k(V, \theta) + Q_{dk}. \tag{3.9}$$

Εάν ένα όριο αέργου ισχύος παραβιάζεται σε ένα ζυγό παραγωγής, τότε αυτός αλλάζει σε ζυγό φορτίου με τους σχετικούς περιορισμούς τάσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι περιορισμοί λειτουργίας μπορούν να χαλαρώσουν σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ώστε να είναι δυνατό να ευρεθεί μια υποβέλτιστη λύση, η οποία παραμένει τεχνικά εφικτή.

## 3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ NEWTON

Το πρώτο βήμα για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με περιορισμούς χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Newton είναι να μετατραπεί σε πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Αυτό επιτυγχάνεται καταστρώνοντας την προσαυξημένη συνάρτηση Lagrange ικανοποιώντας τη σχέση (3.1) η οποία στη γενική της μορφή γράφεται ως εξής:

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{t}} h(\mathbf{x}) + \psi[g(\mathbf{x}), \boldsymbol{\mu}], \tag{3.10}$$

όπου λ και μ είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange για τους περιορισμούς ισότητας και ανισότητας αντίστοιχα, ψ[g(**x**),**μ**] είναι η συνάρτηση ποινής για τους περιορισμούς ανισότητας, και ο δείκτης t υποδεικνύει αναστροφή. Υπάρχουν τόσοι πολλαπλασιαστές Lagrange όσος και ο αριθμός των ενεργών περιορισμών. Η μέθοδος για τη διαχείριση των περιορισμών ανισότητας περιγράφεται στην ενότητα 3.2.8.

Στην εφαρμογή OPF με τη μέθοδο Newton, η συνάρτηση Lagrange συμπεριλαμβάνει τους περιορισμούς ισότητας για ροές ενεργού και άεργου ισχύος και μοντελοποιείται από την παρακάτω εξίσωση:

$$L_{\text{system}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = F_T + \sum_{k=1}^{n_{\text{b}}} \lambda_{pk} \left[\mathrm{P}_k(V, \theta) + P_{dk} - P_{gk}\right] + \sum_{k=1}^{n_{\text{b}}} \lambda_{qk} \left[\mathrm{Q}_i(V, \theta) + Q_{dk} - Q_{gk}\right], \tag{3.11}$$

όπου $F_T$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση, τα αθροίσματα είναι για τους $n_b$ ζυγούς που απαιτεί η μελέτη, και $\lambda_{pk}$, $\lambda_{qk}$ είναι η πολλαπλασιαστές Lagrange για τις εξισώσεις ενεργού και άεργου ισχύος, αντίστοιχα.

## 3.3.1 Συνάρτηση ποινής

Το σύνολο των περιορισμών ισότητας το οποίο συμπεριλαμβάνεται στη συνάρτηση Lagrange σε οποιοδήποτε στάδιο της επαναληπτικής διαδικασίας ονομάζεται ενεργό σύνολο [3.2], [3.3] και είναι αυτό το οποίο χρησιμοποιείται στην συνάρτηση Lagrange.

Το σύνολο των περιορισμών ανισότητας που είναι ενεργοί όταν το βέλτιστο σημείο βρεθεί ονομάζεται ενεργό σύνολο και η βέλτιστη λύση δεν απαιτεί όλοι οι περιορισμοί ανισότητας να είναι ενεργοί. Το ενεργό σύνολο δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων και είναι ευθύνη του αλγορίθμου βελτιστοποίησης να το καθορίσει και να το εφαρμόσει. Οι ανισότητες οι οποίες γίνονται ενεργές κατά τη διαδικασία επίλυσης μετατρέπονται σε εξισώσεις και συμπεριλαμβάνονται στο ενεργό σύνολο. Το πρόβλημα έτσι, μετατρέπεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης της συνάρτησης Lagrange ανανεωμένης με το νέο ενεργό σύνολο.

Ο OPF αλγόριθμος μεταχειρίζεται τους περιορισμούς ανισότητας με τη μέθοδο της συνάρτησης-ποινής [3.2], [3.3]. Όταν κάποιος περιορισμός παραβιάζεται μετατρέπεται σε περιορισμός ισότητας. Αυτό έχει σαν συνέπεια να "ασκείται πίεση" στα αποτελέσματα εκτός παραδεκτής λύσης ώστε να επιστρέψουν σε περιοχή αποδεκτής λύσης αφού η εξίσωση (ισότητα) πρέπει να ικανοποιείται. Κατά τη μέθοδο αυτή, μια ποινή, ένας νέος όρος προστίθεται στην αρχική συνάρτηση Lagrange L(x,k). Η νέα συνάρτηση Lagrange ονομάζεται προσαυξημένη Lagrange (augmented) και η ελαχιστοποίησή της γίνεται με χρήση της μεθόδου Newton μόνο για τις αρχικές μεταβλητές (μεταβλητές κατάστασης).

Οι δυικές μεταβλητές $\mu$ που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.2.7 ανανεώνονται στο τέλος κάθε επανάληψης του κύριου βρόχου (όπως θα δειχθεί υπάρχουν δύο βρόχοι επαναλήψεων: ο κύριος βρόχος και ο εσωτερικός). Επίσης οι μεταβλητές αυτές οι οποίες θεωρούνται πολλαπλασιαστές, ελέγχονται για παραβίαση ορίων και όταν βρίσκονται μέσα στα αποδεκτά όρια αγνοούνται.

Έτσι η διαχείριση των περιορισμών ανισότητας γίνεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω γενικευμένη σχέση:

$$\psi_k[g_k(\mathbf{x}),\mu_k] = \begin{cases} \mu_k[g_k(\mathbf{x}) - \bar{g}_k] + \frac{c}{2}[g_k(\mathbf{x}) - \bar{g}_k]^2, & \text{if } \mu_k + c[g_k(\mathbf{x}) - \bar{g}_k] \geq 0; \\ \mu_k\left[g_k(\mathbf{x}) - \underline{g_k}\right] + \frac{c}{2}\left[g_k(\mathbf{x}) - \underline{g_k}\right]^2, & \text{if } \mu_k + c\left[g_k(\mathbf{x}) - \underline{g_k}\right] \leq 0; \\ 0 \text{ otherwise;} \end{cases} \tag{3.12}$$

όπου $\underline{g}_k$ και $\overline{g}_k$ είναι τα όρια στις μεταβλητές κατάστασης καθώς επίσης και περιορισμοί συναρτήσεων.

Σε μια δεδομένη επανάληψη (i +1), οι πολλαπλασιαστές ενημερώνονται σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια:

$$\mu_k^{(i+1)} = \begin{cases} \mu_k^{(i)} + c^{(i)}\left[g_k(\mathbf{x}^{(i)}) - \bar{g}_k\right], & \text{if } \mu_k^{(i)} + c^{(i)}\left[g_k(\mathbf{x}^{(i)}) - \bar{g}_k\right] \geq 0; \\ \mu_k^{(i)} + c^{(i)}\left[g_k(\mathbf{x}^{(i)}) - \underline{g_k}\right], & \text{if } \mu_k^{(i)} + c^{(i)}\left[g_k(\mathbf{x}^{(i)}) - \underline{g_k}\right] \leq 0; \\ 0 \text{ otherwise;} \end{cases} \tag{3.13}$$

όπου $0 < c^{(i)} < c^{(i+1)}$.

Όταν υπάρξει σύγκλιση, η μεταβλητή $\mu$ ικανοποιεί τα κριτήρια βέλτιστης λύσης τα οποία ονομάζονται Kuhn-Tucker [3.2], [3.3] και τα οποία περιγράφονται στην παράγραφο 3.2.12. Σε αυτή τη περίπτωση, οι μεταβολές όλων των μεταβλητών κατάστασης είναι μικρότερες από μια προκαθορισμένη ανοχή και επίσης καμία παραβίαση δεν συμβαίνει.

Η μέθοδος αυτή παρέχει έναν αποδοτικό τρόπο για τη διαχείρηση των συνόλων ενεργών και μή ενεργών περιορισμών. Αν μια μεταβλητή βρεθεί στο όριό της, τότε ο αλγόριθμος την κρατά εκεί όσο χρειάζεται αλλιώς η μεταβλητή ελευθερώνεται.

Η επιτυχής αρχικοποίηση και ενημέρωση της παραμέτρου $c$ της συνάρτησης ποινής εξαρτάται κυρίως από το είδος του υπό μελέτη συστήματος και από την εμπειρία, και μπορούν να γίνουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- η αρχική παράμετρος $c^{(0)}$ δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη σε σημείο που η μη φραγμένη ελαχιστοποίηση να μην συγκλίνει.
- η παράμετρος $c^{(i)}$ δεν πρέπει να αυξάνεται πολύ γρήγορα τόσο που η μη φραγμένη ελαχιστοποίηση να γίνεται ασταθής.
- η παράμετρος $c^{(i)}$ δεν πρέπει να αυξάνεται πολύ αργά τόσο που οι επαναλήψεις να δίνουν πολύ χαμηλό ρυθμό σύγκλισης των πολλαπλασιαστών.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι μια αποδοτική εκτίμηση της παραμέτρου ποινής επιτυγχάνεται δίνοντας στην $c^{(0)}$ τιμή που καθορίζεται από πειρματισμό, με επιμέρους εκτιμήσεις της $c^{(i)}$ βασισμένης στην παρακάτω μονότονη αύξηση: $c^{(i+1)}=\beta c^{(i)}$ όπου $\beta$ είναι μια βαθμωτή τιμή μεγαλύτερη της μονάδας.

## 3.3.2 Γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων

Λύση της συνάρτησης Lagrange με τη μορφή που περιγράφεται στην εξίσωση (3.10) μπορεί αποδοτικά να βρεθεί λύνοντας επαναληπτικά το παρακάτω σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$[\mathbf{W}]\begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x} \\ \Delta\boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla\mathbf{x} \\ \nabla\boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix}. \tag{3.14}$$

Μερικές φορές είναι πιο βολικό να εκφραστεί το σύστημα αυτό όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\mathbf{W}\Delta\mathbf{z}=-\mathbf{g} \tag{3.15}$$

όπου

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{J}^{\mathrm{t}} \\ \mathbf{J} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \tag{3.16}$$

$$\Delta\mathbf{z} = [\Delta\mathbf{x}\,\Delta\boldsymbol{\lambda}]^{\mathrm{t}}, \tag{3.17}$$

$$\mathbf{g} = [\nabla\mathbf{x}\,\nabla\boldsymbol{\lambda}]^{\mathrm{t}}, \tag{3.18}$$

$$\nabla\mathbf{x} = [\nabla\mathbf{P}_{\mathrm{g}}\,\nabla\boldsymbol{\theta}\,\nabla\mathbf{V}]^{\mathrm{t}}, \tag{3.19}$$

$$\nabla\boldsymbol{\lambda} = [\nabla\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{p}}\,\nabla\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{q}}]^{\mathrm{t}}, \tag{3.20}$$

$$\Delta\mathbf{x} = [\Delta\mathbf{P}_{\mathrm{g}}\,\Delta\boldsymbol{\theta}\,\Delta\mathbf{V}]^{\mathrm{t}}, \tag{3.21}$$

$$\Delta\boldsymbol{\lambda} = [\Delta\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{p}}\,\Delta\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{q}}]^{\mathrm{t}}. \tag{3.22}$$

Ο πίνακας **W** περιέχει τις μερικές παραγώγους δεύτερης τάξης της συνάρτησης (3.10) ως προς τις μεταβλητές κατάστασης **x** και τους πολλαπλασιαστές Lagrange λ. Μερικοί όροι σχηματίζουν την Εσσιανή **H** ενώ κάποιοι άλλοι την Ιακωβιανή **J** ή την ανάστροφη αυτής μήτρα $\mathbf{J}^{\mathbf{t}}$.

Ο πίνακας **W** είναι συμμετρικός και έχει μηδενικό τον υποπίνακα στην κάτω δεξιά γωνία, αφού οι δεύτερες μερικές παράγωγοι της μορφής:

$$\partial^2 \mathrm{L}(\mathbf{x},\boldsymbol{\lambda})/\partial\lambda_k\partial\lambda_m \tag{3.23}$$

είναι μηδενικές.

Το διάνυσμα κλίσης **g** είναι ∇ **L(x,λ)** και οι πρώτες μερικές παράγωγοι του **g** είναι οι δεύτερες μερικές παράγωγοι της συνάρτησης Lagrange **L(x,λ)**.

Οι πολλαπλασιαστές Lagrange εκφράζουν το πρόσθετο κόστος για τις ενεργές και άεργες ισχείς και συμβολίζονται $\lambda_p$ και $\lambda_q$ αντίστοιχα. **Δz** είναι το διάνυσμα το οποίο περιέχει τους συντελεστές διόρθωσης σε κάθε επανάληψη.

Οι μεταβλητές κατάστασης είναι η παραγωγή ενεργούς ισχύος, το μετρο των τάσεων ζυγών και οι γωνίες των τάσεων, $P_g$, V, και θ αντίστοιχα.

Οι παράγωγοι που σχετίζονται με τους περιορισμούς ισότητας ψ[**g(x)**,**μ**] δεν συμπεριλαμβάνονται στη συνάρτηση Lagrange από την αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας αλλά ενσωματώνονται στο γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων (3.14) μόνο όταν εφαρμοστούν τα όρια, έτσι οι όροι της Εσσιανής και της Ιακωβιανής είναι:

$$\mathbf{H} = \frac{\partial^2 L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \mathbf{x}^2} = \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} + \left[\frac{\partial^2 h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2}\right]^t \boldsymbol{\lambda}, \tag{3.24}$$

$$\mathbf{J} = \frac{\partial^2 L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \mathbf{x} \partial \boldsymbol{\lambda}} = \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}. \tag{3.25}$$

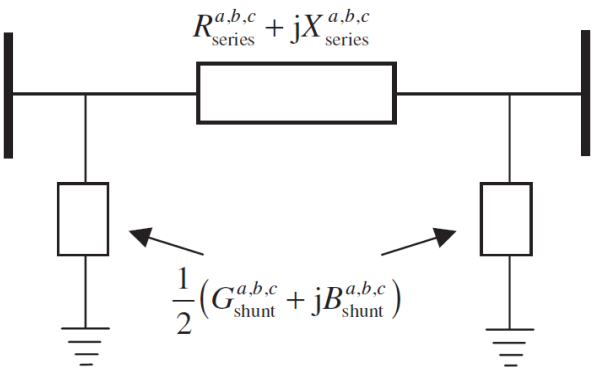
Μια σημαντική ιδιότητα των υποπινάκων **H**, **J**, και $\mathbf{J}^t$ είναι το ότι έχουν όλοι την ίδια αραιή δομή με τον πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών [3.6].

## 3.3.3 Ανάπτυξη της συνάρτησης Lagrange και κατασκευή του πίνακα Hessian

Το γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων (3.14) κατασκευάζεται με επαλληλία σε κάθε επανάληψη. Όλα τα στοιχεία μοντελοποιούνται ανεξάρτητα και τοποθετούνται ξεχωριστά στον πίνακα **W** και στο διάνυσμα **g**. Ο αριθμός του ζυγού στον οποίο το στοιχείο του δικτύου συνδέεται καθορίζει τη θέση των αντίστοιχων μεμονωμένων όρων Εσσιανών και Ιακωβιανών στον πίνακα **W** και στο διάνυσμα **g**.

### 3.3.3.1 Γραμμές μεταφοράς

Η αναπαράσταση θετικής ακολουθίας του ονομαστικού π κυκλώματος όπως αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, χρησιμοποιείται για να παραχθούν οι εξισώσεις ροής ισχύος της γραμμής μεταφοράς.




**Σχήμα 3.2:** Αναπαράσταση γραμμών μεταφοράς με χρήση του ονομαστικού *π* κυκλώματος

Το μέρος της συνάρτησης Lagrange που σχετίζεται με τις εξισώσεις ισχύος στους ζυγούς *k* και *m* είναι:

$$\begin{aligned} L = L_{\text{trans-line}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) &= \lambda_{pk}(P_k + P_{dk} - P_{gk}) + \lambda_{qk}(Q_k + Q_{dk} - Q_{gk}) \\ &+ \lambda_{pm}(P_m + P_{dm} - P_{gm}) + \lambda_{qm}(Q_m + Q_{dm} - Q_{gm}). \end{aligned} \tag{3.26}$$

Οι πρώτες μερικές παράγωγοι της συνάρτησης Lagrange (3.11), ως προς τα μέτρα και τις γωνίες της τάσης στους ζυγούς *k* και *m*, και τους τέσσερις πολλαπλασιαστές Lagrange χρησιμοποιούνται σαν όροι του διανύσματος **g**. Οι μεμονωμένοι όροι του πίνακα **W** είναι οι δεύτερες μερικές παράγωγοι της συνάρτησης Lagrange ως προς τα μέτρα και τις γωνίες της τάσης στους ζυγούς *k* και *m*, και τους τέσσερις πολλαπλασιαστές Lagrange. Αυτοί οι όροι δίνονται ξεχωριστά στο Παράρτημα Γ.

Η συμβολή μιας γραμμής μεταφοράς στο συνολικό γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων (3.14) είναι:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_{\mathrm{kk}} & \mathbf{W}_{\mathrm{km}} \\ \mathbf{W}_{\mathrm{mk}} & \mathbf{W}_{\mathrm{mm}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{z}_{\mathrm{k}} \\ \Delta\mathbf{z}_{\mathrm{m}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{\mathrm{k}} \\ \mathbf{g}_{\mathrm{m}} \end{bmatrix} \tag{3. 27}$$

όπου

$$\mathbf{W}_{\mathrm{kk}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_k^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_k \partial V_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial V_k \partial \theta_k} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_k^2} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} \\ \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.28}$$

$$\mathbf{W}_{\mathrm{km}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_k \partial \theta_m} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_k \partial V_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial V_k \partial \theta_m} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_k \partial V_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} \\ \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.29}$$

$$\mathbf{W}_{\mathrm{mk}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_m \partial \theta_k} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta_m \partial V_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial V_m \partial \theta_k} & \frac{\partial^2 L}{\partial V_m \partial V_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.30}$$

$$\mathbf{W}_{\mathrm{mm}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial \theta_m^2} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial \theta_m \partial V_m} & \dfrac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \dfrac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} \\ \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_m \partial \theta_m} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_m^2} & \dfrac{\partial P_m}{\partial V_m} & \dfrac{\partial Q_m}{\partial V_m} \\ \dfrac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \dfrac{\partial P_m}{\partial V_m} & 0 & 0 \\ \dfrac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \dfrac{\partial Q_m}{\partial V_m} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.31}$$

$$\Delta \mathbf{z}_{\mathrm{k}} = \left[\Delta\theta_k \;\; \Delta V_k \;\; \Delta\lambda_{pk} \;\; \Delta\lambda_{qk}\right]^{\mathrm{t}}, \tag{3.32}$$

$$\Delta \mathbf{z}_{\mathrm{m}} = \left[\Delta\theta_m \;\; \Delta V_m \;\; \Delta\lambda_{pm} \;\; \Delta\lambda_{qm}\right]^{\mathrm{t}}, \tag{3.33}$$

$$\mathbf{g}_{\mathrm{k}} = \left[\nabla\theta_k \;\; \nabla V_k \;\; \nabla\lambda_{pk} \;\; \nabla\lambda_{qk}\right]^{\mathrm{t}}, \tag{3.34}$$

$$\mathbf{g}_{\mathrm{m}} = \left[\nabla\theta_m \;\; \nabla V_m \;\; \nabla\lambda_{pm} \;\; \nabla\lambda_{qm}\right]^{\mathrm{t}}. \tag{3.35}$$

Οι όροι όπως δόθηκαν τοποθετούνται με συστηματικό τρόπο στον πίνακα **W** και στο διάνυσμα **g** έτσι ώστε το σημείο τοποθέτησής τους να σχετίζεται με τη θέση των ζυγών *k* και *m*.

### 3.3.3.2 Στοιχεία αντιστάθμισης

Στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, οι τάσεις των ζυγών επηρεάζονται αισθητά από τις μεταβολές του φορτίου και από τις αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου. Η τάση βυθίζεται όταν ένα δίκτυο λειτουργεί υπό συνθήκες υψηλής ζήτησης ισχύος και αντιστρόφως όταν το φορτίο είναι μικρό υπερτάσεις μπορούν να εμφανιστούν εξαιτίας της χωρητικότητας των γραμμών. Αυτές οι μεταβολές της τάσης θα πρέπει να αποφεύγονται και έλεγχος της τάσης θα πρέπει να εφαρμόζεται ελέγχοντας την απορρόφηση ή την έγχυση αέργου ισχύος σε σημεία τα οποία έχουν τη μεγαλύτερη επιρροή στο δίκτυο. Εγκάρσιοι χωρητικοί και επαγωγικοί αντισταθμιστές χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό. Οι εγκάρσιοι αντισταθμιστές είναι είτε σταθερής σύνδεσης είτε μπορούν να συνδέονται και να αποσυνδέονται σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις [3.6].

Ένας τρόπος να συμπεριληφθεί ένας εγκάρσιος επαγωγικός αντισταθμιστής στο OPF πρόβλημα φαίνεται παρακάτω όπου θεωρείται ότι ο αντισταθμιστής συνδέεται στον ζυγό *k*. Τότε το μέρος της συνάρτησης Lagrange που σχετίζεται με αυτόν τον αντισταθμιστή είναι:

$$L = L_{\mathrm{shunt}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \lambda_{qk}(Q_{\mathrm{shunt},k}) = \lambda_{qk}(-V_k^2 B_{\mathrm{shunt}}). \tag{3.36}$$

Τότε η συμβολή του αντισταθμιστή στο ολικό σύστημα γραμματικοποιημένων εξισώσεων είναι:

$$\begin{bmatrix} -2\lambda_{qk}B_{\mathrm{shunt}} & -2V_k B_{\mathrm{shunt}} \\ -2V_k B_{\mathrm{shunt}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_k \\ \Delta\lambda_{qk} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} -2\lambda_{qk}V_k B_{\mathrm{shunt}} \\ -V_k^2 B_{\mathrm{shunt}} \end{bmatrix}. \tag{3.37}$$

### 3.3.3.3 Γεννήτριες

Εκτός από το να παρέχουν την ενεργό ισχύ που απαιτείται από το σύστημα, οι σύγχρονες γεννήτριες ελέγχουν επίσης τη παραγωγή ή απορόφηση αέργου ισχύος, ώστε να διατηρούνται σταθερά τα επίπεδα τάσης στους ζυγούς. Κατά τη κατάστρωση των εξισώσεων με σκοπό την επίλυση του OPF προβλήματος, συμπεριλαμβάνονται η ενεργός ισχύς και τα χαρακτηριστικά κόστους των γεννητριών των θερμικών μονάδων ενώ οι γεννήτριες των υδροηλεκτρικών μονάδων θεωρείται ότι λειτουργούν παράγοντας μια σταθερή τιμή ενεργού ισχύος χωρίς κόστος ενώ συνεισφέρουν πλήρως στην παραγωγή και απορρόφηση αέργου ισχύος.

Η αναπαράσταση των γεννητριών, για να εισαχθούν στο OPF πρόβλημα, βασίζεται σε μια δευτεροβάθμια συνάρτηση της ενεργού ισχύος και των συντελεστών κόστους. Οι τιμές των συντελεστών *a*, *b*, *c* προκύπτουν από ανάλυση της παραγωγής και θεωρούνται γνωστοί.

Το μέρος της συνάρτησης Lagrange που σχετίζεται με το κόστος καυσίμου μιας γεννήτριας, η οποία παρέχει ενεργό ισχύ στον ζυγό *k* είναι:

$$L = L_{\text{gen}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = a_k + b_k P_{gk} + c_k P_{gk}^2. \tag{3.38}$$

και η συμβολή της στο ολικό σύστημα γραμμικοποιημένων εξισώσεων είναι:

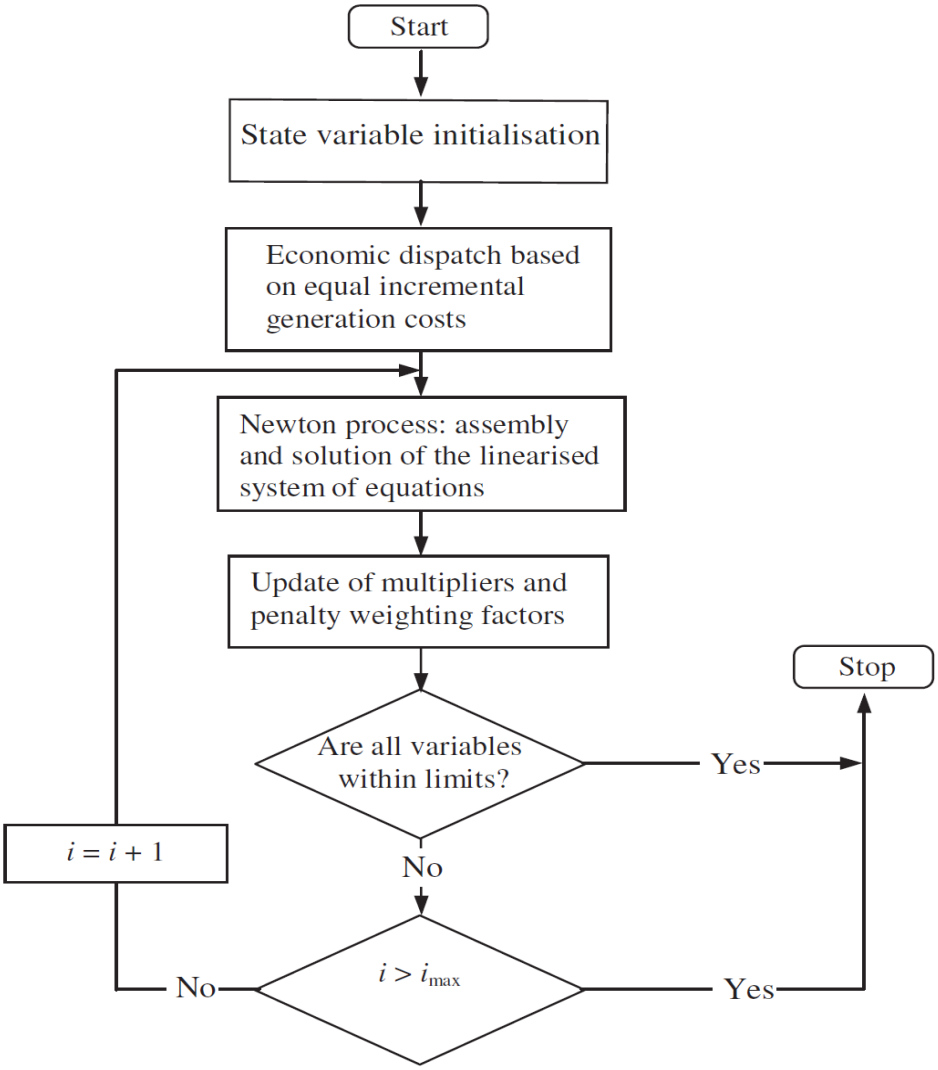
$$\begin{bmatrix} 2c_k & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{gk} \\ \Delta \lambda_{pk} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} b_k + 2c_k P_{gk} - \lambda_{pk} \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{3.39}$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η μεγάλη ευκολία που προκύπτει από την παραπάνω θεώρηση είναι πως πλέον κάθε σοιχείο εισάγεται ξεχωριστά χωρίς να εμπλέκονται οι συμβολές των γεννητριών με αυτές των γραμμών. Έτσι αρχικά κατασκευάζεται ο πίνακας Hessian και το διάνυσμα κλίσης (W, g) και αρχικά συμπεριλαμβάνονται οι συμβολές αποκλειστικά και μόνο των γραμμών μεταφοράς. Στην συνέχεια, μέσω της σχέσης (3.39) εισάγονται και οι γεννήτριες στο σύστημα των εξισώσεων, δηλαδή στον πίνακα. Εξήγηση για το πως εισάγονται στον πίνακα οι συμβολές αυτές κατά την εκτέλεση του λογισμικού, παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

Οι πολλαπλασιαστές $\lambda$ έχουν οικονομική ερμηνεία και ο τρόπος που αυτοί αρχικοποιούνται παρατίθεται στο Παράρτημα Β.

### 3.3.4 Επίλυση

Η διαδικασία επίλυσης είναι αλγοριθμική και ως εκ τούτου μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα διάγραμμα ροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.




**Σχημα 3.3:** Αλγόριθμος επίλυσης προβλήματος OPF

Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 3.3, ο αλγόριθμος εκτελείται σε τρία βασικά βήματα: (1) την αρχικοποίηση των μεταβλητών ελέγχου, (2) τον εξωτερικό (κύριο) βρόχο και (3) τον εσωτερικό βρόχο όπου η διαδικασία επίλυσης βασίζεται στον αλγόριθμο Newton [3.7].

Κατά το πρώτο βήμα πραγματοποιείται αρχικοποίηση των μεταβλητών και εφαρμόζεται μια οικονομική κατανομή φορτίου χωρίς απώλειες [3.6]. Στον κύριο βρόχο οι μεταβλητές ελέγχου ελέγχονται εάν βρίσκονται εντός ορίων. Οι περιορισμοί ανισότητας είναι είτε ενεργοί είτε ανενεργοί σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν τεθεί στην εξίσωση (3.8). Οι πολλαπλασιαστές και οι συντελεστές βάρους ενημερώνονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.9) Σε μια δεδομένη επανάληψη, ($i$), εάν καμία αλλαγή στο σύνολο των περιορισμών ανισότητας δεν έχει συμβεί μέχρι το τέλος του κύριου βρόχου, τότε η διαδικασία βελτιστοποίησης τερματίζεται.

Η διαδικασία Newton πραγματοποιείται στον εσωτερικό βρόχο και χαρακτηρίζεται από τις σταθερές τιμές των πολλαπλασιαστών και των συντελεστών βάρους.

Το γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων του οποίου η λύση ελαχιστοποιεί το κόστος παραγωγής επιλύεται εντός αυτού του βρόχου. Άπαξ και το γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων καταστρωθεί, τότε αναζητείται μια λύση εκμεταλλευόμενη την αραιά δομή των πινάκων.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι μιας μικρής, προκαθορισμένης ανοχής. Συνήθως ένα αυστηρό κριτήριο υιοθετείται για τις διαφορές που προκύπτουν στο διάνυσμα **g** (π.χ. $10^{-12}$)

## 3.3.5 Συνθήκες βελτιστοποίησης

Γενικά μπορεί να εξεταστεί αν μια λύση ($\mathbf{x}^{opt}$, $\boldsymbol{\lambda}^{opt}$) είναι βέλτιστη ελέγχοντας αν ο πίνακας **W** είναι θετικά ορισμένος. Όμως αυτός ο τρόπος είναι υπολογιστικά ασύμφορος για προβλήματα που περιέχουν εκτεταμένα δίκτυα και αυτός ο έλεγχος στην πράξη δεν χρησιμοποιείται.
Άλλα κριτήρια βέλτιστου εφαρμόζονται τα οποία ελέγχουν αν το διάνυσμα **g** είναι μηδενικό και αν οι πολλαπλασιαστές Lagrange για τους περιορισμούς ανίσωσης που είναι ενεργοί έχουν το κατάλληλο πρόσημο [3.2], [3.3].

Έτσι για την υλοποίηση ενός OPF αλγορίθμου πρακτικά εξετάζονται τα παρακάτω:

- αν όλες οι εξισώσεις του δικτύου ικανοποιούνται εντός μιας προκαθορισμένης ανοχής
- αν όλες οι ανισώσεις ικανοποιούνται
- αν το διάνυσμα κλίσης είναι μηδέν
- αν περαιτέρω μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης είναι δυνατή μόνο αν παραβιαστούν περιορισμοί.

Πρέπει να τονιστεί ότι στα γενικά προβλήματα βελτιστοποίησης, η λύση πρέπει να ικανοποιεί έναν αριθμό περιορισμών ισότητας και ανισότητας.

Οι περιορισμοί ανισότητας γίνονται ενεργοί όταν μετατραπούν σε περιορισμούς ισότητας. Έτσι πρακτικά το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι η εύρεση του βέλτιστου μιας συνάρτησης η οποία υπόκειται σε περιορισμούς ισότητας (ικανοποίηση εξισώσεων).

Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στις ικανές και αναγκαίες συνθήκες Kuhn-Tucker:

- $\nabla_x L(z) = \nabla_x L([x, \lambda, \mu]) = 0$;
- $\nabla_\lambda L(z) = \nabla_\lambda L([x, \lambda, \mu]) = 0$;
- $\nabla_\mu L(z) = \nabla_\mu L([x, \lambda, \mu]) = 0$;
- $\lambda_i \geq 0$ αν $g(x) = 0$ (ήτοι, οι περιορισμοί ανισότητας είναι ενεργοί)
- $\lambda_i = 0$ αν $g(x) \leq 0$ (ήτοι, οι περιορισμοί ανισότητας είναι ενεργοί)
- $\mu_i$ = πραγματικός αριθμός

όπου $z = [x, \lambda, \mu]$ είναι η βέλτιστη λύση.

έτσι επιλύοντας την εξίσωση $\nabla_z L(z) = 0$ προκύπτει η βέλτιστη λύση.

## 3.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[3.1] W. F. Tinney, C. E. Hart, “Power Flow Solution by Newton’s Method”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 86, no. 11, pp. 1866-1876, Nov. 1967.

[3.2] D.G. Luenberger, "Introduction to Linear and Nonlinear Programming". Addison-Wesley, 1984.

[3.3] D.P. Bertsekas, "Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods". Academic Press, 1982.

[3.4] H.W. Dommel, W.F. Tinney, "Optimal Power Flow Solutions". IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 87, no. 10, pp. 1866–1876, Nov. 1968.

[3.5] E. Acha, Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles-Camacho, "FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks". John Wiley & Sons, 2004.

[3.6] A.J. Wood, B.Wollenberg, "Power Generation, Operation and Control". John Wiley & Sons, Chichester 1984.

[3.7] H. Ambriz-Perez, "Flexible AC Transmission Systems Modelling in Optimal Power Flows Using Newton’s Method", PhD Thesis, Department of Electronics and Electrical Engineering. University of Glasgow, 1998.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ
4

# ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

## 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αφού παρουσιάστηκε η βασική θεωρία για την εφαρμογή OPF με χρήση της μεθόδου Newton, στο κεφάλαιο αυτό επεκτείνεται η μελέτη έτσι ώστε να συμπεριληφθούν και τα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως οι μετασχηματιστές με μηχανισμό αλλαγής λήψης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως εδώ και αρκετά χρόνια, και όπως οι συσκευές ελέγχου με ηλεκτρονικά ισχύος, κοινώς FACTS, οι οποίες εμφανίστηκαν τα τελευταία χρόνια [4.1]. Συγκεκριμένα στα πλαίσια της διπλωματικής μελετήθηκαν και εντάχθηκαν στο λογισμικό βελτιστοποίησης οι παρακάτω συσκευές ελέγχου: Μετασχηματιστές LTC, μετασχηματιστές PS, το SVC και το TCSC.

Η δομή, λειτουργία και φιλοσοφία ελέγχου κάθε μίας από αυτές τις συσκευές διαφέρει και η μοντελοποίησή τους εντός του λογισμικού αντανακλά αυτές τις διαφορές.

Γενικά, για κάθε συσκευή ελέγχου αναπτύσσεται μια συνάρτηση Lagrange με τη μορφή της σχέσης (3.10), η οποία είναι και η βάση για την ανάπτυξη του γραμμικοποιημένου συστήματος εξισώσεων της μορφής (3.14).

Οι μεταβλητές κατάστασης κάθε ελεγκτή συνδυάζονται με τις τάσεις ζυγών του δικτύου (μέτρα και γωνίες) σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς από το οποίο προκύπτει μια ενοποιημένη λύση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Newton. Οι μεταβλητές κατάστασης του ελεγκτή ρυθμίζονται αυτόματα έτσι ώστε να ικανοποιούν τις συνθήκες ροής φορτίου, τις τιμές τάσης των ζυγών και τη συνθήκη βέλτιστου, όπως αυτά δίνονται από το κριτήριο Kuhn-Tucker [4.2].

Άπαξ και οι εξισώσεις έχουν καταστρωθεί και οι πίνακες **W** και **g** έχουν προκύψει, τεχνικές επίλυσης αραιών μητρών εφαρμόζονται. Η διαδικασία είναι επαναλαμβανόμενη και τερματίζεται όταν η λύση βρίσκεται εντός ενός προκαθορισμένου ορίου ακρίβειας για όλες τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται.

## 4.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΜΕΤΡΟΥ ΤΑΣΗΣ

Οι μετασχηματιστές LTC χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του μέτρου της τάσης ζυγών αλλάζοντας αυτομάτως το λόγο μετασχηματισμού υπό φορτίο. Ο τρόπος που αυτοί ενσωματώνονται στις εξισώσεις είναι ζήτημα μεγάλης σημασίας και έχει μελετηθεί για μια μεγάλη ποικιλία LTC μοντέλων τα οποία είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία [4.3].

Στα πλαίσια της διπλωματικής μελετήθηκε η εισαγωγή των LTC μετασχηματιστών στην μελέτη και επίλυση του OPF προβλήματος, καθώς και η ενσωμάτωση αυτών στο λογισμικό που αναπτύχθηκε.

### 4.2.1 Συνάρτηση Lagrange του LTC

Οι εξισώσεις ισχύος στους ζυγούς που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εφαρμογή OPF εκφράζονται παρακάτω και χρησιμοποιούνται στη συνάρτηση Lagrange συσχετίζοντας την ενεργό και άεργο ισχύ στους ζυγούς *k* και *m*:

$$\begin{aligned} L_{\mathrm{ltc}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\lambda}) = {} & \lambda_{pk}(P_k + P_{dk} - P_{gk}) + \lambda_{qk}(Q_k + Q_{dk} - Q_{gk}) \\ & + \lambda_{pm}(P_m + P_{dm} - P_{gm}) + \lambda_{qm}(Q_m + Q_{dm} - Q_{gm}). \end{aligned} \tag{4.1}$$

Σε αυτή την έκφραση, $\lambda$ είναι το διάνυσμα των πολλαπλασιαστών Lagrange, και $x$ είναι το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης το οποίο συμπεριλαμβάνει τα $P_g$, V, θ και $T_k$ όπου θεωρήθηκε ότι ο μηχανισμός αλλαγής λήψεων βρίσκεται στο πρωτεύων του μετασχηματιστή.

### 4.2.2 Γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων με LTC

Η ενσωμάτωση του LTC μετασχηματιστή στον αλγόριθμο επίλυσης OPF απαιτεί τη προσαύξηση του πίνακα **W** με μια σειρά και μια στήλη. Επιπλέον το $T_k$ θεωρείται σαν μια επιπλέον μεταβλητή κατάστασης κατά τον σχηματισμό του OPF προβλήματος.

Έτσι θεωρώντας το μηχανισμό αλλαγής λήψεων στο πρωτεύων τύλιγμα προκύπτει το παρακάτω γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_{\mathrm{kk}} & \mathbf{W}_{\mathrm{km}} & \mathbf{W}_{\mathrm{kT}} \\ \mathbf{W}_{\mathrm{mk}} & \mathbf{W}_{\mathrm{mm}} & \mathbf{W}_{\mathrm{mT}} \\ \mathbf{W}_{\mathrm{Tk}} & \mathbf{W}_{\mathrm{Tm}} & \mathbf{W}_{\mathrm{TT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{z}_{\mathrm{k}} \\ \Delta\mathbf{z}_{\mathrm{m}} \\ \Delta\mathbf{z}_{\mathrm{T}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{\mathrm{k}} \\ \mathbf{g}_{\mathrm{m}} \\ \mathbf{g}_{\mathrm{T}} \end{bmatrix}. \tag{4.2}$$

Οι δομές των υποπινάκων $\mathbf{W}_{\mathbf{kk}}$, $\mathbf{W}_{\mathbf{km}}$, $\mathbf{W}_{\mathbf{mk}}$, $\mathbf{W}_{\mathbf{mm}}$, $\boldsymbol{\Delta}_{\mathbf{zk}}$, $\boldsymbol{\Delta}_{\mathbf{zm}}$, $\mathbf{g}_{\mathbf{k}}$, και $\mathbf{g}_{\mathbf{m}}$ δίνονται από τις εξισώσεις (3.14)–(3.22), αντίστοιχα. Οι επιπλέον υποπίνακες που εμφανίζονται εδώ αντανακλούν την συμβολή του $T_k$, δηλαδή την μεταβλητή κατάστασης του LTC και δίνονται παρακάτω:

$$\mathbf{W}_{\mathrm{kT}}^{\mathrm{t}} = \mathbf{W}_{\mathrm{Tk}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial \theta_k \partial T_k} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_k \partial T_k} & \dfrac{\partial P_k}{\partial T_k} & \dfrac{\partial Q_k}{\partial T_k} \end{bmatrix}, \tag{4.3}$$

$$\mathbf{W}_{\mathrm{mT}}^{\mathrm{t}} = \mathbf{W}_{\mathrm{Tm}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial \theta_m \partial T_k} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_m \partial T_k} & \dfrac{\partial P_m}{\partial T_k} & \dfrac{\partial Q_m}{\partial T_k} \end{bmatrix}, \tag{4.4}$$

$$\mathbf{W}_{\mathrm{TT}} = \left[\frac{\partial^2 L}{\partial T_k^2}\right], \tag{4.5}$$

$$\Delta \mathbf{z}_{\mathrm{T}} = [\Delta T_k], \tag{4.6}$$

$$\mathbf{g}_{\mathrm{T}} = [\nabla T_k]. \tag{4.7}$$

Οι όροι πρώτων και δεύτερων μερικών παραγώγων των όρων των σχέσεων (4.3)-(4.7) προκύπτουν από την συνάρτηση Lagrange (4.1) και δίνονται στο Παράρτημα Γ.

Οι παράγωγοι που προκύπτουν από τους περιορισμούς ανισότητας περιλαμβάνονται στον πίνακα W μόνο όταν επιβάλλονται τα όρια σαν αποτέλεσμα κάποιας παραβίασης.

Αν το LTC ελέγχει και διατηρεί το μέτρο της τάσης σε μια συγκεκριμένη τιμή είτε στο ζυγό *k* είτε στο ζυγό *m* τότε στον όρο $W_{TT}$ (4.5) αθροίζεται η δεύτερη παράγωγος μιας δευτεροβάθμιας συνάρτησης ποινής. Επιπλέον η πρώτη παράγωγος αυτής της συνάρτησης ποινής εισάγεται στο διάνυσμα g όπου βρίσκεται ο όρος $g_T$.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι η επίλυση OPF με χρήση της μεθόδου Newton συγκλίνει [4.4].

## 4.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΤΑΣΗΣ

Η ενσωμάτωση του μοντέλου του μετασχηματιστή αλλαγής φάσης στον OPF αλγόριθμο θα παρουσιαστεί σε αυτή την ενότητα.

Ο OPF αλγόριθμος χρησιμοποιεί τη μέθοδο Newton σαν το εργαλείο βελτιστοποίησης επιτρέποντας τη χρήση και ενσωμάτωση του μοντέλου PS, που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.3, συγκλίνοντας με ευρωστία σε λύση [4.3].

Μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να προσομοιώνει διάφορα σενάρια λειτουργίας με ευκολία.
Οι εξισώσεις (2.10)-(2.19) χρησιμοποιούνται για να ενταχθεί το PS στον αλγόριθμο OPF.

### 4.3.1 Συνάρτηση Lagrange του PS

Ο κύριος σκοπός του αλγορίθμου βελτιστοποίησης είναι να ελαχιστοποιήσει το κόστος παραγωγής ενεργού ισχύος στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ρυθμίζοντας κατάλληλα συγκεκριμένες παραμέτρους ελέγχου.

Για το μοντέλο PS με δυνατότητα αλλαγής γωνίας τάσης στο πρωτεύων, η συνάρτηση Lagrange μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(P_g) + \boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{t}} h(P_g,\ V,\ \theta,\ \phi_t). \tag{4.8}$$

Σε αυτή την έκφραση, f ($P_g$) είναι η αντικειμενική συνάρτηση η οποία βελτιστοποιείται. Ο όρος h($P_g$, $V$, $\theta$, $\varphi_t$) αντιπροσωπεύει τις εξισώσεις ροής φορτίου, το διάνυσμα $x$ είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης, $\lambda$ είναι το διάνυσμα των πολλαπλασιαστών Lagrange για τους περιορισμούς εξισώσεων και $P_g$, $V$, $\theta$, $\varphi_t$ είναι η παραγόμενη ενεργός ισχύς, το μέτρο τάσης, η γωνία της τάσης και γωνία του PS για τη θέση του μηχανισμού λήψεων αντίστοιχα.

Οι περιορισμοί ανισότητας h($P_g$, $V$, $\theta$, $\varphi_t$)<0 δεν παρουσιάζονται στην σχέση (4.2) διότι συμπεριλαμβάνονται μόνο εφόσον οι μεταβλητές είναι εκτός ορίων. Η συνάρτηση Lagrange της ροής ισχύος μεταξύ των κόμβων k και m ενσωματώνεται στον OPF αλγόριθμο σαν ένας περιορισμός ισότητας και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned} L_{km}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = {} & \lambda_{pk}(P_k + P_{dk} - P_{gk}) + \lambda_{qk}(Q_k + Q_{dk} - Q_{gk}) \\ & + \lambda_{pm}(P_m + P_{dm} - P_{gm}) + \lambda_{qm}(Q_m + Q_{dm} - Q_{gm}). \end{aligned} \tag{4.9}$$

Σε αυτή την έκφραση, $P_{dk}$, $P_{dm}$, $Q_{dk}$, και $Q_{dm}$ οι τιμές της ενεργού και αέργου ισχύς των φορτίων στους ζυγούς k και m. Οι ισχύς $P_{gk}$, $P_{gm}$, $Q_{gk}$, και $Q_{gm}$ είναι οι τιμές της ενεργού και αέργου ισχύος εγχεόμενης από γεννήτριες στους ζυγούς k και m και $\lambda_{pk}$, $\lambda_{pm}$, $\lambda_{qk}$, and $\lambda_{qm}$ είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange για τις ενεργές και άεργες ισχείς στους ζυγούς k και m.

Μία λειτουργία κλειδί του μετασχηματιστή PS είναι να ρυθμίζει το ποσό της ενεργού ισχύος $P_{km}$ η οποία ρέει μέσω αυτού. Για τον αλγόριθμο OPF αυτή η συνθήκη λειτουργίας εκφράζεται σαν ένας περιορισμός ισότητας ο οποίος αναπαρίσταται από την ακόλουθη συνάρτηση Lagrange:

$$L_{\mathrm{flow}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \lambda_{\mathrm{flow}-km}(P_{km} - P_{\mathrm{specified}}). \tag{4.10}$$

Σε αυτή την έκφραση $\lambda_{flow-km}$ είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange ο οποίος σχετίζεται με την ενεργό ισχύ η οποία ρέει από τον ζυγό k στον ζυγό m, και $P_{specified}$ είναι η απαιτούμενη ισχύς που πρέπει να ρέει μέσω του PS.

Η συνολική συνάρτηση Lagrange όταν συμπεριληφθεί και η λειτουργία ελέγχου του PS:

$$L_{\mathrm{ps}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = L_{km}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) + L_{\mathrm{flow}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}). \tag{4.11}$$

### 4.3.2 Γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων με PS

Για την αναπαράσταση του PS στον αλγόριθμο OPF απαιτείται ο πίνακας **W** να προσαυξηθεί κατά μία γραμμή και μία στήλη με το $\varphi_t$ να είναι μια νέα μεταβλητή κατάστασης. Επιπλέον εάν το PS έχει ρυθμιστεί ώστε να ελέγχει την ενεργό ισχύ τότε οι διαστάσεις του πίνακα **W** πρέπει να προσαυξηθούν ακόμα κατά μία στήλη και γραμμή. Έτσι για κάθε PS που περιλαμβάνεται στο δίκτυο ο πίνακας **W** πρέπει να προσαυξηθεί μέχρι και κατά δύο γραμμές και δύο στήλες ανάλογα με τη λειτουργία που εκτελεί το PS.

Στα πλαίσια της διπλωματικής το PS δεν ελέγχει την ενεργό ισχύ που ρέει διαμέσου. Εάν ο μηχανισμός αλλαγής λήψεων του PS βρίσκεται στο πρωτεύων τύλιγμα τότε το γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης Lagrange με την μέθοδο Newton είναι:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_{\mathrm{kk}} & \mathbf{W}_{\mathrm{km}} & \mathbf{W}_{\mathrm{k}\phi} \\ \mathbf{W}_{\mathrm{mk}} & \mathrm{W}_{\mathrm{mm}} & \mathbf{W}_{\mathrm{m}\phi} \\ \mathbf{W}_{\phi\mathrm{k}} & \mathbf{W}_{\phi\mathrm{m}} & \mathbf{W}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{z}_{\mathrm{k}} \\ \Delta\mathbf{z}_{\mathrm{m}} \\ \Delta\mathbf{z}_{\phi} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{\mathrm{k}} \\ \mathbf{g}_{\mathrm{m}} \\ \mathbf{g}_{\phi} \end{bmatrix}. \tag{4.12}$$

Σε αυτή την έκφραση, η δομή των υποπινάκων και διανυσμάτων $W_{kk}$, $W_{km}$, $W_{mk}$, $W_{mm}$, $\Delta_{zk}$, $\Delta_{zm}$, $g_k$, και $g_m$ δίνεται από τις εξισώσεις (3.27)-(3.34) αντίστοιχα. Οι επιπρόσθετοι όροι-υποπίνακες που εμφανίζονται στην σχέση (4.12) αντανακλούν την συμβολή του $\varphi_t$, δηλαδή την μεταβλητή κατάστασης του PS και δίνονται ξεχωριστά όπως ακολούθως:

$$\mathbf{W}_{\mathrm{k}\phi}^{\mathrm{t}} = \mathbf{W}_{\phi\mathrm{k}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial\theta_k \partial\phi_t} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_k \partial\phi_t} & \dfrac{\partial P_k}{\partial\phi_t} & \dfrac{\partial Q_k}{\partial\phi_t} \\ \dfrac{\partial^2 L}{\partial\theta_k \partial\lambda_\phi} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_k \partial\lambda_\phi} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{4.13}$$

$$\mathbf{W}_{\mathrm{m}\phi}^{\mathrm{t}} = \mathbf{W}_{\phi\mathrm{m}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial\theta_m \partial\phi_t} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_m \partial\phi_t} & \dfrac{\partial P_m}{\partial\phi_t} & \dfrac{\partial Q_m}{\partial\phi_t} \\ \dfrac{\partial^2 L}{\partial\theta_m \partial\lambda_\phi} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_m \partial\lambda_\phi} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{4.14}$$

$$\mathbf{W}_{\phi\phi} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial\phi_t^2} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial\phi_t \partial\lambda_\phi} \\ \dfrac{\partial^2 L}{\partial\lambda_\phi \partial\phi_t} & 0 \end{bmatrix}, \tag{4.15}$$

$$\Delta\mathbf{z}_\phi = \left[\Delta\phi_t \;\; \Delta\lambda_\phi\right]^{\mathrm{t}}, \tag{4.16}$$

$$\mathbf{g}_\phi = \left[\nabla\phi_t \;\; \nabla\lambda_\phi\right]^{\mathrm{t}}. \tag{4.17}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι πρώτες και δεύτερες μερικές παράγωγοι των διάφορων όρων των ανωτέρω υποπινάκων προκύπτουν από την συνάρτηση Lagrange (4.11) και δίνονται στο Παράρτημα Γ.

Οι παράγωγοι που αντιστοιχούν σε ανισωτικούς περιορισμούς εισέρχονται στον πίνακα W μόνο αφού συμβεί κάποια παραβίαση.

Η κατάστρωση των εξισώσεων όπως περιγράφεται ανωτέρω αντιστοιχεί στην κατάσταση όπου το PS είναι ρυθμισμένο ώστε να ελέγχει την ενεργό ισχύ, λειτουργία η οποία είναι τυποποιημένη για τα PS. Εντούτοις κατά την επίλυση του OPF οι μεταβλητές του PS πολλές φορές, πρέπει να τεθούν σε τιμές τέτοιες ώστε να λαμβάνεται η βέλτιστη λύση για το προς μελέτη ηλεκτρικό δίκτυο.
Σε αυτή την περίπτωση το PS δε ρυθμίζεται για να ελέγχει την ενεργό ισχύ που ρέει από το ζυγό k στο ζυγό m σε μια συγκεκριμένη τιμή και ο πίνακας W διαφοροποιείται ανάλογα ώστε να αντανακλά αυτή την κατάσταση λειτουργίας. Αυτό επιτυγχάνεται προσθέτοντας τη δεύτερη παράγωγο μιας δευτεροβάθμιας συνάρτησης ποινής τεράστιας τιμής στο διαγώνιο στοιχείο του πίνακα το οποίο αντιστοιχεί στον πολλαπλασιαστή Lagrange $\lambda_{km}$. Η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης ποινής εισάγεται σαν όρος στο αντίστοιχο στοιχείο του διανύσματος κλίσης της σχέσης (4.17).

Οι αρχικές συνθήκες οι οποίες δίνονται στις μεταβλητές έχουν σαφή επίδραση στη συμπεριφορά σύγκλισης. Η εμπειρία έχει δείξει ότι το μοντέλο PS επιτυγχάνει σύγκλιση με ευρωστία όταν η γωνία αρχικοποιείται στην τιμή $0^o$. Οι υπόλοιπες μεταβλητές κατάστασης αρχικοποιούνται όπως και κατά την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου (πχ 1 α.μ. μέτρο τάσης και $0^o$ γωνία τάσης σε όλους τους ζυγούς).

# 4.4 SVC

Αυτή η ενότητα επικεντρώνεται στα μοντέλα του SVC τα οποία είναι κατάλληλα για χρήση και ενσωμάτωση στον αλγόριθμο OPF με τη μέθοδο Newton. Η προσέγγιση μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκε υποθέτει ότι το SVC λειτουργεί σαν ένας αντισταθμιστής με τιμές συνεχείς και όχι διακριτές, ο οποίος αλλάζει τιμή αυτόματα έτσι ώστε να εξασφαλίσει ότι το μέτρο της τάσης ζυγού θα βρίσκεται στην καθορισμένη τιμή ενώ θα πληρούνται οι περιορισμοί και θα τηρούνται τα όρια.

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι μοντελοποίησης του SVC : (1) το μοντέλο γωνίας έναυσης και (2) το μοντέλο μεταβλητής αγωγιμότητας.

Παρακάτω περιγράφεται ένα γραμμικοποιημένο μοντέλο κατάλληλο για την επαναληπτική διαδικασία επίλυσης της μεθόδου Newton για OPF. Η μεταβλητή κατάστασης του SVC συνδυάζεται με τις μεταβλητές κατάστασης του δικτύου για να προκύψει μια ενιαία βέλτιστη λύση [4.4].

## 4.4.1 Συνάρτηση Lagrange του SVC

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς όπως διατυπώθηκε στην σχέση (3.1) μετατρέπεται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης δίχως περιορισμούς σχηματίζοντας την επαυξημένη συνάρτηση Lagrange του SVC μοντέλου και εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(P_g) + \boldsymbol{\lambda}^t h[P_g,\ V,\ \theta,\ B(\alpha)]. \tag{4.18}$$

Σε αυτή την έκφραση f(*Pg*) είναι η αντικειμενική συνάρτηση, ο όρος h[*Pg, V, θ, B(α)*] αντιπροσωπεύει τις εξισώσεις ροής ισχύος, το x είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης και το λ είναι το διάνυσμα των πολλαπλασιαστών Lagrange για τους περιορισμούς ισότητας. Pg, V, θ και B(α) είναι η παραγωγή ενεργού ισχύος, το μέτρο της τάσης ζυγού, η γωνία της τάσης ζυγού και η αγωγιμότητα αντιστάθμισης του SVC, αντίστοιχα. Οι περιορισμοί ανισότητας g[*Pg, V, θ, B(α)*]<0 δεν περιλαμβάνονται στην προηγούμενη εξίσωση καθώς προστίθενται στην L(x,λ) μόνο όταν κάποια σχετική μεταβλητή βγει εκτός ορίων.

Η αγωγιμότητα B(α) του SVC μπορεί να εκφραστεί είτε σαν μια ισοδύναμη αγωγιμότητα Bsvc είτε σαν μια συνάρτηση της γωνίας έναυσης α. Και οι δύο παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μεταβλητές κατάστασης.

Η συνεισφορά του SVC στην συνάρτηση Lagrange εμφανίζεται ανεξάρτητη σαν ένας περιορισμός ισότητας ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$L_{\mathrm{svc}}(\mathbf{x},\ \boldsymbol{\lambda}) = \lambda_{qk} Q_k . \tag{4.19}$$

Σε αυτή την έκφραση x είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης $[V_k\ B(\alpha)]^t$, $Q_k$ είναι η άεργος ισχύς η οποία απορροφάται ή εγχέεται από το SVC στον ζυγό k, και λ είναι το διάνυσμα των πολλαπλασιαστών Lagrange με $\lambda_{qk}$ να είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange του ζυγού k οι οποίοι σχετίζονται με το ισοζύγιο αέργου ισχύος. Η μεταβλητή που χρησιμοποιήθηκε σαν μεταβλητή κατάστασης του SVC, για την ανάπτυξη του λογισμικού της παρούσας διπλωματικής είναι η γωνία έναυσης.

## 4.4.2 Γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων με SVC

Η απεικόνιση του ελεγκτή SVC στον αλγόριθμο OPF απαιτεί ότι για κάθε SVC που υπάρχει στο δίκτυο ο πίνακας W επαυξάνεται κατά μία γραμμή και μία στήλη. Η γωνία έναυσης εισάγεται σαν μια επιπλέον μεταβλητή κατάστασης στην διατύπωση των εξισώσεων OPF.

Η εφαρμογή της μεθόδου Newton στο SVC δίνεται από τις παρακάτω γραμμικοποιημένες εξισώσεις:

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_k^2} & \dfrac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_k \partial \alpha} \\ \dfrac{\partial Q_k}{\partial V_k} & 0 & \dfrac{\partial Q_k}{\partial \alpha} \\ \dfrac{\partial^2 L}{\partial \alpha \partial V_k} & \dfrac{\partial Q_k}{\partial \alpha} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial \alpha^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_k \\ \Delta \lambda_{qk} \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla V_k \\ \nabla \lambda_{qk} \\ \nabla \alpha \end{bmatrix} . \tag{4.20}$$

Οι όροι των εξισώσεων (4.20) παράγονται από τις παραγώγους της εξίσωσης (4.19) ως προς τη σχετική μεταβλητή κατάστασης και το σχετικό πολλαπλασιαστή Lagrange. Αυτοί οι όροι δίνονται ξεχωριστά στο Παράρτημα Γ.

Οι όροι παραγώγων οι οποίοι σχετίζονται με τους περιορισμούς ισότητας δεν απαιτούνται από την αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας και εισάγονται στις εξισώσεις (4.20) αφού εφαρμοστούν τα όρια σαν απόκριση σε κάποια παραβίαση ορίων.

Στις μελέτες OPF είναι λογικό να υποτεθεί ότι τα μέτρα τάσεων στους ζυγούς σύνδεσης των SVC ελέγχονται ώστε να βρίσκονται εντός ορίων (π.χ. 0.95–1.05 α.μ.). Πάραυτα πιο αυστηρά κριτήρια μπορούν να τεθούν με ευκολία χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Newton. Για παράδειγμα, για να ελεγχθεί το μέτρο τάσης στο ζυγό k σε μια συγκεκριμένη τιμή, είναι απαραίτητο μόνο να προστεθεί η δεύτερη παράγωγος ενός δευτεροβάθμιου παράγοντα ποινής μεγάλης τιμής στη δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης Lagrange ως προς το μέτρο τάσης $V_k$. Επίσης η πρώτη παράγωγος του παράγοντα ποινής πρέπει να προστεθεί στον σχετικό όρο του διανύσματος κλίσης. Έτσι στην εξίσωση (4.20) τα

διαγώνια στοιχεία τα οποία σχετίζονται με την τάση $V_k$ θα έχουν μια πολύ μεγάλη τιμή (άπειρη), έχοντας σαν αποτέλεσμα μηδενική αύξηση τάσης $\Delta V_k$.

Το SVC αρχικοποιείται ικανοποιητικά όταν ως γωνία έναυσης επιλέγονται οι $145^o$ και οι πολλαπλασιαστές Lagrange $\lambda_{qk}$ έχουν ως αρχική τιμή το μηδέν. Με αυτές τις τιμές προκύπτει μια πολύ εύρωστη επαναληπτική διαδικασία η οποία καταλήγει σε σύγκλιση.

# 4.5 TCSC

Σε αυτή την ενότητα μελετάται το TCSC και πως αυτό εισάγεται στον αλγόριθμο OPF. Αυτό είναι εφικτό με τη μέθοδο Newton κατά την οποία το TCSC μοντελοποιείται σαν μια ρυθμιζόμενη μη γραμμική εν σειρά σύνθετη αντίσταση η οποία είναι συνάρτηση της γωνίας έναυσης του TCSC.

## 4.5.1 Συνάρτηση Lagrange του TCSC

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς όπως διατυπώθηκε στην σχέση (3.1) μετατρέπεται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης δίχως περιορισμούς σχηματίζοντας την επαυξημένη συνάρτηση Lagrange του TCSC μοντέλου και εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

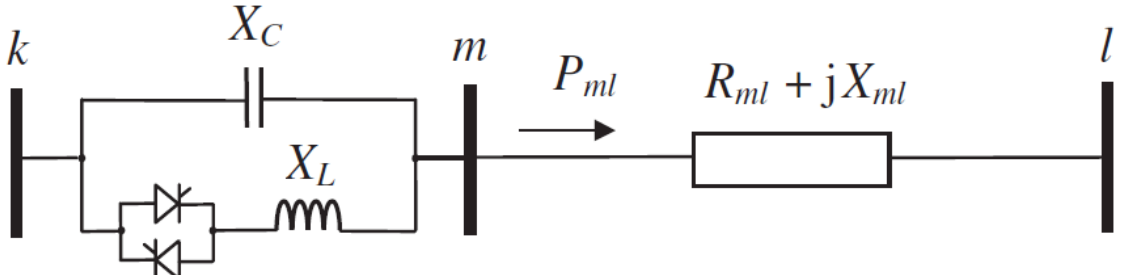
$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(P_g) + \boldsymbol{\lambda}^t h[P_g,\ V,\ \theta,\ X(\alpha)]. \tag{4.21}$$

Σε αυτή την έκφραση f(*Pg*) είναι η αντικειμενική συνάρτηση, ο όρος h[*Pg, V, θ, X(α)*] αντιπροσωπεύει τις εξισώσεις ροής ισχύος, το x είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης και το λ είναι το διάνυσμα των πολλαπλασιαστών Lagrange για τους περιορισμούς ισότητας. Pg, V, θ και X(α) είναι η παραγωγή ενεργού ισχύος, το μέτρο της τάσης ζυγού, η γωνία της τάσης ζυγού και η επαγωγή του TCSC, αντίστοιχα. Οι περιορισμοί ανισότητας g[*Pg, V, θ, X(α)*]<0 δεν περιλαμβάνονται στην προηγούμενη εξίσωση καθώς προστίθενται στην L(x,λ) μόνο όταν κάποια σχετική μεταβλητή βγει εκτός ορίων.

Οι εξισώσεις ροής ισχύος στους ζυγούς k και m μοντελοποιούνται ξεχωριστά στη συνάρτηση Lagrange σαν περιορισμοί ισότητας οι οποίοι δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{aligned} L_{\text{tcsc}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = {} & \lambda_{pk}(P_k + P_{dk} - P_{gk}) + \lambda_{qk}(Q_k + Q_{dk} - Q_{gk}) \\ & + \lambda_{pm}(P_m + P_{dm} - P_{gm}) + \lambda_{qm}(Q_m + Q_{dm} - Q_{gm}). \end{aligned} \tag{4.22}$$

Σε αυτή την έκφραση, $P_{dk}$, $P_{dm}$, $Q_{dk}$, και $Q_{dm}$ είναι οι τιμές της ενεργού και αέργου ισχύς των φορτίων στους ζυγούς k και m. Οι ισχύς $P_{gk}$, $P_{gm}$, $Q_{gk}$, και $Q_{gm}$ είναι οι τιμές της ενεργού και άεργου ισχύος εγχεόμενης από γεννήτριες στους ζυγούς k και m και $\lambda_{pk}$, $\lambda_{pm}$, $\lambda_{qk}$, and $\lambda_{qm}$ είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange για τις ενεργές και άεργες ισχείς στους ζυγούς k και m.




**Σχημα 4.1:** Γραμμή με αντιστάθμιση TCSC

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 η ροή ενεργού ισχύος μέσω του κλάδου m-l, $P_{ml}$, ελέγχεται από το TCSC το οποίο συνδέεται μεταξύ των ζυγών m και k. Στην κατάστρωση εξισώσεων του προβλήματος OPF αυτή η συνθήκη λειτουργίας εκφράζεται σαν ένας περιορισμός ισότητας, ο οποίος παραμένει ενεργός σε όλη την διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας εκτός αν ο χρήστης επιθυμεί να μην συμπεριλαμβάνεται αυτός ο περιορισμός.

Η συνάρτηση Lagrange του ενιαίου κλάδου k-l δίνεται παρακάτω:

$$L = L_{\text{tcsc}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) + L_{\text{flow}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}), \tag{4.23}$$

όπου

$$L_{\text{flow}} = \lambda_{ml}(P_{ml} - P_{\text{specified}}). \tag{4.24}$$

Σε αυτή την έκφραση $\lambda_{ml}$ είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange για τη ροή ενεργού ισχύος στον κλάδο m-l και $P_{specified}$ είναι η τιμή της ισχύος που απαιτείται να ρέει δια μέσω του TCSC. Στην έκδοση του λογισμικού που θα παρουσιαστεί, αυτή η επιλογή είναι απενεργοποιημένη.

## 4.5.2 Γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων με TCSC

Ενσωμάτωση του ελεγκτή TCSC στον αλγόριθμο OPF για επίλυση με την μέθοδο Newton συνεπάγεται ότι για κάθε TCSC που υπάρχει στο δίκτυο, ο πίνακας **W** θα προσαυξάνεται κατά δύο γραμμές και δύο στήλες αν απατείται να έλεγχος της ροή ισχύος και γίνεται χρήση του πολλαπλασιαστή Lagrange $\lambda_{ml}$. Αν δεν απαιτείται έλεγχος της ροής ισχύος τότε ο πίνακας **W** προσαυξάνεται κατά μία γραμμή και μία στήλη.

Η γωνία έναυσης α εισάγεται σαν επιπλέον μεταβλητή κατάστασης στο σύστημα.
Εφαρμογή της μεθόδου Newton στο TCSC για το μοντέλο γωνίας έναυσης δίνεται από το παρακάτω γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_{\text{kk}} & \mathbf{W}_{\text{km}} & \mathbf{0} & \mathbf{W}_{\text{k}\alpha} \\ \mathbf{W}_{\text{mk}} & \mathbf{W}_{\text{mm}} & \mathbf{W}_{\text{ml}} & \mathbf{W}_{\text{m}\alpha} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W}_{\text{ml}} & \mathbf{W}_{\text{ll}} & \mathbf{W}_{\text{l}\alpha} \\ \mathbf{W}_{\alpha\text{k}} & \mathbf{W}_{\alpha\text{m}} & \mathbf{W}_{\alpha\text{l}} & \mathbf{W}_{\alpha\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{z}_{\text{k}} \\ \Delta\mathbf{z}_{\text{m}} \\ \Delta\mathbf{z}_{\text{l}} \\ \Delta\mathbf{z}_{\alpha} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{\text{k}} \\ \mathbf{g}_{\text{m}} \\ \mathbf{g}_{\text{l}} \\ \mathbf{g}_{\alpha} \end{bmatrix}. \tag{4.25}$$

Σε αυτή την έκφραση η δομή του των υποπινάκων και διανυσμάτων $W_{kk}$, $W_{km}$, $W_{mk}$, $W_{mm}$, $\Delta_{zk}$, $\Delta_{zm}$, $g_k$, και $g_m$ δίνονται αντίστοιχα από τις εξισώσεις (3.27)-(3.34). Οι επιπλέον υποπίνακες που σχετίζονται με τη συνεισφορά της μεταβλητής κατάστασης του TCSC δίνονται ξεχωριστά παρακάτω:

$$\mathbf{W}_{\alpha \mathrm{k}} = \mathbf{W}_{\mathrm{k}\alpha}^{\mathrm{t}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial \theta_k \partial \alpha} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_k \partial \alpha} & \dfrac{\partial P_k}{\partial \alpha} & \dfrac{\partial Q_k}{\partial \alpha} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{4.26}$$

$$\mathbf{W}_{\mathrm{lm}} = \mathbf{W}_{\mathrm{ml}}^{\mathrm{t}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial \theta_m \partial \theta_l} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial \theta_m \partial V_l} & \dfrac{\partial P_l}{\partial \theta_m} & \dfrac{\partial Q_l}{\partial \theta_m} \\ \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_m \partial \theta_l} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_m \partial V_l} & \dfrac{\partial P_l}{\partial V_m} & \dfrac{\partial Q_l}{\partial V_m} \\ \dfrac{\partial P_m}{\partial \theta_l} & \dfrac{\partial P_m}{\partial V_l} & 0 & 0 \\ \dfrac{\partial Q_m}{\partial \theta_l} & \dfrac{\partial Q_m}{\partial V_l} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{4.27}$$

$$\mathbf{W}_{\alpha \mathrm{m}} = \mathbf{W}_{\mathrm{m}\alpha}^{\mathrm{t}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial \theta_m \partial \alpha} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_m \alpha} & \dfrac{\partial P_m}{\partial \alpha} & \dfrac{\partial Q_m}{\partial \alpha} \\ \dfrac{\partial P_{ml}}{\partial \theta_m} & \dfrac{\partial P_{ml}}{\partial V_m} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{4.28}$$

$$\mathbf{W}_{\mathrm{ll}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial \theta_l^2} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial \theta_l \partial V_l} & \dfrac{\partial P_l}{\partial \theta_l} & \dfrac{\partial Q_l}{\partial \theta_l} \\ \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_l \partial \theta_l} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial V_l^2} & \dfrac{\partial P_l}{\partial V_l} & \dfrac{\partial Q_l}{\partial V_l} \\ \dfrac{\partial P_l}{\partial \theta_l} & \dfrac{\partial P_l}{\partial V_l} & 0 & 0 \\ \dfrac{\partial Q_l}{\partial \theta_l} & \dfrac{\partial Q_l}{\partial V_l} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{4.29}$$

$$\mathbf{W}_{\alpha \mathrm{l}} = \mathbf{W}_{\mathrm{l}\alpha}^{\mathrm{t}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dfrac{\partial P_{ml}}{\partial \theta_l} & \dfrac{\partial P_{ml}}{\partial V_l} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{4.30}$$

$$\mathbf{W}_{\alpha\alpha} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial \alpha^2} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{4.31}$$

$$\Delta \mathbf{z}_{\mathrm{l}} = [\, \Delta\theta_l \quad \Delta V_l \quad \Delta\lambda_{pl} \quad \Delta\lambda_{ql} \,]^{\mathrm{t}}, \tag{4.32}$$

$$\mathbf{g}_{\mathrm{l}} = [\, \nabla\theta_l \quad \nabla V_l \quad \nabla\lambda_{pl} \quad \nabla\lambda_{ql} \,]^{\mathrm{t}}, \tag{4.33}$$

$$\Delta \mathbf{z}_{\alpha} = [\, \Delta\alpha \quad \Delta\lambda_{ml} \,]^{\mathrm{t}}, \tag{4.34}$$

$$\mathbf{g}_{\alpha} = [\, \nabla\alpha \quad \nabla\lambda_{ml} \,]^{\mathrm{t}}. \tag{4.35}$$

Οι πρώτες και δεύτερες παράγωγοι των διαφόρων όρων στη σχέση (4.25) προκύπτουν από τη συνάρτηση Lagrange και δίνονται ξεχωριστά στο Παράρτημα Γ.

Οι παράγωγοι που σχετίζονται με τους ανισωτικούς περιορισμούς εισέρχονται στον πίνακα W μόνο αφού συμβεί κάποια παραβίαση ορίων.

Πρέπει να τονιστεί ότι η διαδικασία που προκύπτει από την εξίσωση (4.25) αντιστοιχεί στη περίπτωση που εφαρμόζεται ο έλεγχος της ροής διαμέσου του ελεγκτή TCSC και είναι η γενική περίπτωση και ο τυποποιημένος έλεγχος ενός TCSC. Στις εφαρμογές OPF όμως η επίλυση η οποία δίνει και το ελάχιστο κόστος παραγωγής βρίσκεται όταν ο αλγόριθμος από μόνος του μπορεί να επιλέξει τη ροή διαμέσου του κλάδου του TCSC. Αυτή η κατάσταση λειτουργίας εφαρμόζεται και από το λογισμικό που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής και είναι αρκετά εύκολο να επιτευχθεί η προηγούμενη κατάσταση λειτουργίας απλά προσθέτοντας ένα τεράστιο όρο ποινής δεύτερης τάξης στα σημεία του πίνακα W και του διανύσματος g τα οποία αντιστοιχούν στις θέσεις που έχουν οι ζυγοί m και l (παράγωγος δεύτερης τάξης στο W και πρώτης τάξης στο g) έτσι ώστε με την επίλυση να προκύπτει μηδενική αύξηση ισχύος.

Οι πολλαπλασιαστές Lagrange για τις εξισώσεις ροής ενεργού και αέργου ισχύος αρχικοποιούνται στην τιμή $\lambda_p$ όπως αυτή προκύπτει από την αρχική οικονομική κατανομή χωρίς απώλειες και οι πολλαπλασιαστές $\lambda_q$ τίθενται στην τιμή μηδέν. Για το TCSC οι πολλαπλασιαστές τίθενται στην αρχική τιμή μηδέν.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι με αυτές τις τιμές επιτυγχάνεται μια εύρωστη επαναληπτική διαδικασία. Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τη σύγκλιση του λογισμικού OPF είναι η αρχική γωνία έναυσης α. Καλές αρχικές συνθήκες απαιτούνται για να αποφευχθεί η απόκλιση της λύσης ή ο τερματισμός σε κάποιο ανώμαλο σημείο. Έτσι για να επιτευχθούν καλές αρχικές συνθήκες για την αρχικοποίηση της γωνίας α γίνεται χρήση της παρακάτω εμπειρικής σχέσης:

$$\alpha_{\mathrm{TCSC}} = \pi - \frac{1}{\varpi}\arctan\left(\frac{-X_{\mathrm{TL}}}{C_2\varpi}\right). \tag{4.36}$$

όπου $X_{TL}$ είναι η επαγωγή της γραμμής που αντισταθμίζεται και

$$\varpi = \left(\frac{X_C}{X_L}\right)^{1/2}. \tag{4.37}$$

# 4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[4.1] IEEE/CIGRE´ (Institute of Electrical and Electronic Engineers/Conseil International des Grands reseaux Electriques), 1995, ‘FACTS Overview’, Special Issue, 95TP108. IEEE Service Centre Piscataway, NJ.

[4.2] D.P. Bertsekas, "Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods", Academic Press, 1982.

[4.3] E. Acha, H. Ambriz-Perez, "FACTS Device Modelling in Optimal Power Flows Using Newton’s Method", Proceedings of the 13th Power System Computation Conference. Trondhein, Norway, June–July 1999, pp. 1277–1284 1999.

[4.4] H. Ambriz-Perez, E.Acha, C.R. Fuerte-Esquivel, "Advanced SVC Models for Newton–Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies", IEEE Trans. Power Systems 15(1) 129–136, 2000.

[4.5] H. Ambriz-Perez, "Flexible AC Transmission Systems Modelling in Optimal Power Flows Using Newton’s Method", PhD Thesis, Department of Electronics and Electrical Engineering. University of Glasgow, 1998.

Αυτή η σελίδα είναι σκοπίμως λευκή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ
5

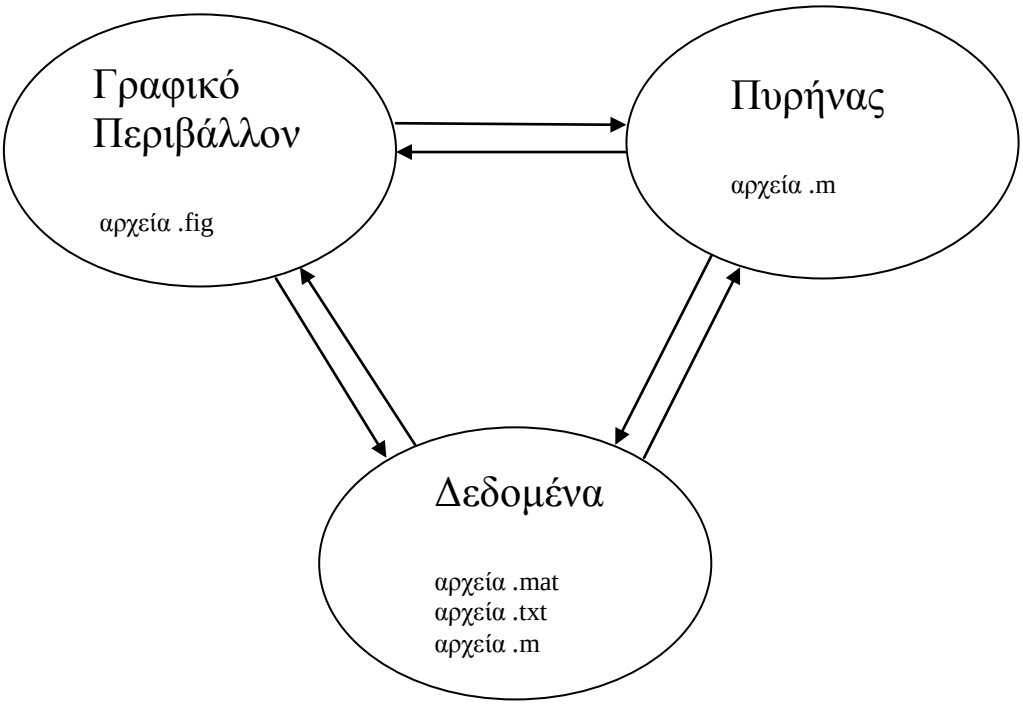
# ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

## 5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, αναπτύχθηκε με την γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για την επιλογή της γλώσσας αυτής σαν εργαλείο ανάπτυξης. Οι σημαντικότεροι λόγοι είναι:

- Βελτιστοποιημένος κώδικας για διεξαγωγή υπολογισμών με πίνακες (π.χ. αποδοτικότητα αντιστροφής πίνακα)
- Γλώσσα προγραμματισμού για ανάπτυξη εφαρμογών και ταυτόχρονα λογισμικό υλοποίησης επιστημονικών υπολογισμών
- Ο αρχικός κώδικας στον οποίο βασίστηκε η ανάπτυξη του λογισμικού προϋπήρχε σε MATLAB

Ξεκινώντας την περιγραφή του λογισμικού θα πρέπει να αναφερθεί η γενική δομή του λογισμικού η οποία μπορεί να αναπαρασταθεί από το Σχήμα 5.1, και περιλαμβάνει:




**Σχημα 5.1:** Γενική δομή λογισμικού

- Το Γραφικό Περιβάλλον (Graphical User Interface) είναι η διασύνδεση του χρήστη με το λογισμικό και μέσω αυτού ο χρήσης δίνει δεδομένα και εντολές στο λογισμικό και λαμβάνει αποτελέσματα και μηνύματα.

- Ο Πυρήνας (Kernel) είναι το τμήμα που επιτελούνται όλοι οι υπολογισμοί και οι διεργασίες.

- Τα Δεδομένα είναι αποθηκευμένα σαν .mat και .txt αρχεία. Με αυτόν τον τρόπο η προσπέλαση γίνεται πολύ γρήγορα και αποδοτικά χωρίς να καλούνται εξωτερικά προγράμματα.

### 5.1.1 Γραφικό περιβάλλον

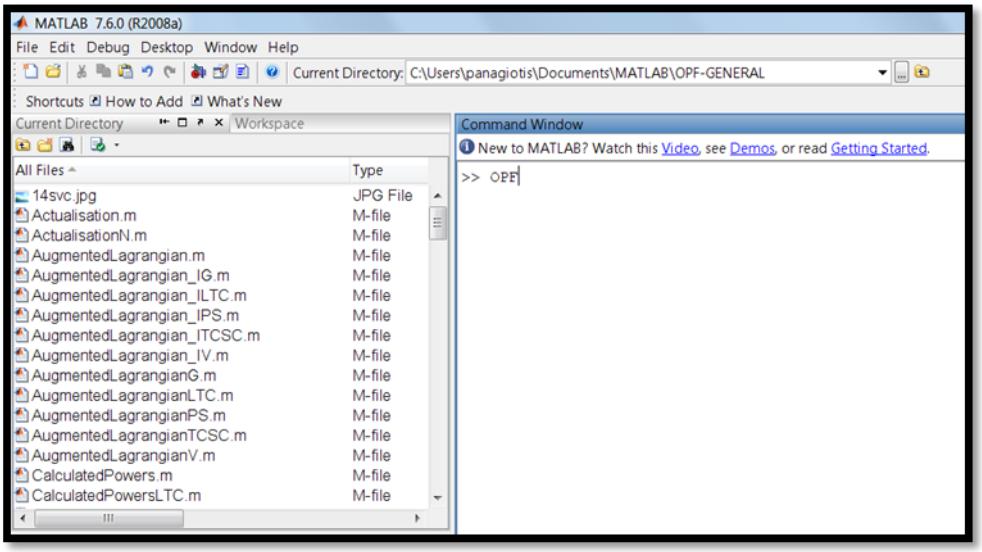
Η MATLAB διαθέτει γραφικό περιβάλλον προγραμματισμού για την ανάπτυξη GUI εφαρμογών. Tutorials και καλά παραδείγματα για την ανάπτυξη GUI με MATLAB δίνονται στη βιβλιογραφία [5.1].

Η λειτουργία του γραφικού περιβάλλοντος είναι να διευκολύνει τη χρήση του λογισμικού, με το να εισάγονται εύκολα τα δεδομένα εισόδου, να γίνονται οι κατάλληλες ρυθμίσεις στις παραμέτρους και να εμφανίζονται με ευανάγνωστο τρόπο όσα αποτελέσματα κρίνεται σκόπιμο να εμφανιστούν.

Το γραφικό περιβάλλον για το λογισμικό που αναπτύχθηκε δε λαμβάνει μέρος στην εκτέλεση του αλγορίθμου και θεωρητικά θα μπορούσε να γίνεται εκκίνηση της εφαρμογής, να δίνονται δεδομένα και να λαμβάνονται αποτελέσματα χρησιμοποιώντας αποκλειστικά το παράθυρο εντολών της MATLAB.

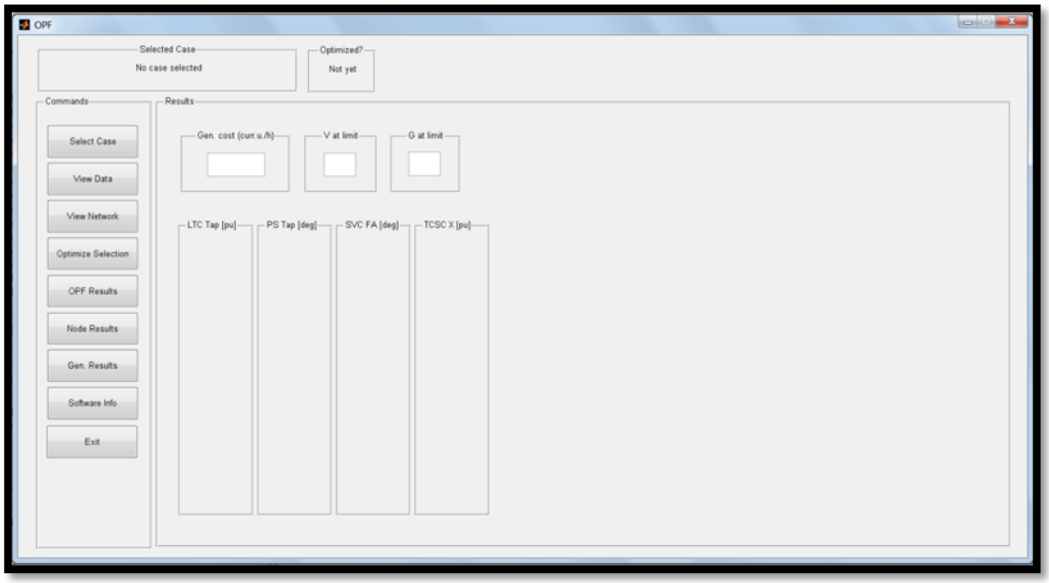
### 5.1.2 Εκκίνηση και λειτουργίες

Η εκκίνηση του λογισμικού γίνεται αφού ανοιχθεί ο φάκελος "OPF-GENERAL", και το μόνο που έχει ο χρήστης να κάνει είναι να πληκτρολογήσει στο παράθυρο εντολών της MATLAB την εντολή OPF όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2.



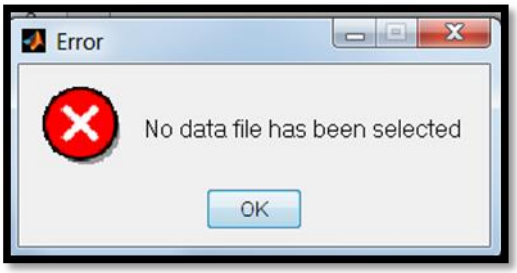

**Σχήμα 5.2**: Εκκίνηση γραφικού περιβάλλοντος λογισμικού.

Έτσι λοιπόν εμφανίζεται το γραφικό περιβάλλον το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



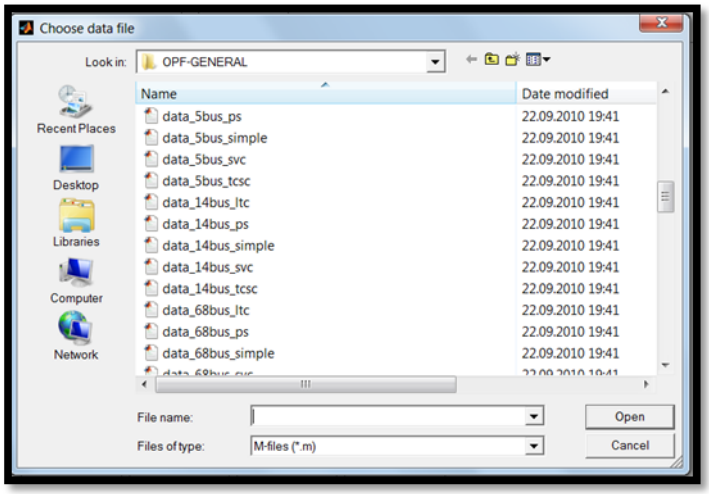

**Σχήμα 5.3**: Γραφικό περιβάλλον λογισμικού.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί τα πεδία αποτελεσμάτων είναι απενεργοποιημένα. Αν γίνει προσπάθεια προβολής αποτελεσμάτων ή δεδομένων θα εμφανιστεί μήνυμα σφάλματος καθώς κανένα παράδειγμα δεν έχει επιλεχθεί:




**Σχήμα 5.4**: Μήνυμα σφάλματος για λανθασμένη ενέργεια.

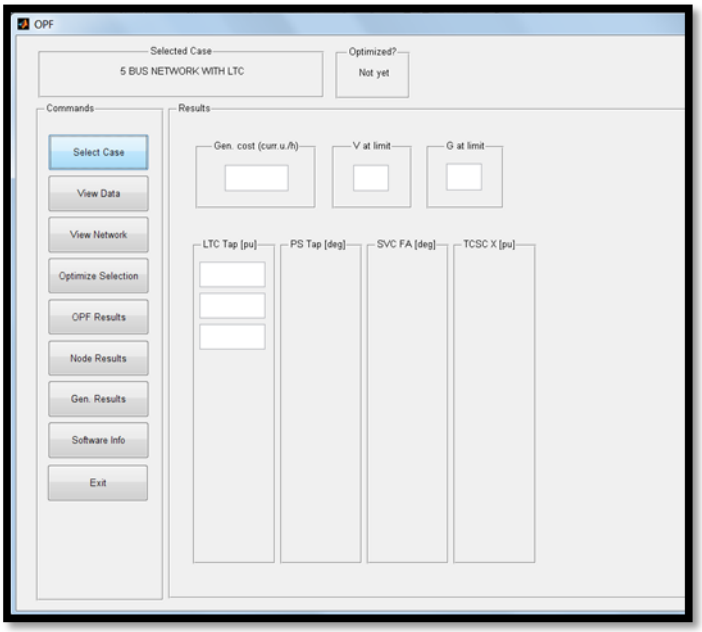
Για να εμφανιστούν έγκυρα αποτελέσματα ή δεδομένα θα πρέπει να επιλεχθεί πρώτα ένα παράδειγμα από τα παραδείγματα που είναι προεγκατεστημένα πατώντας το κουμπί "Select Case" οπότε και εμφανίζεται το μενού επιλογής αρχείων:




**Σχήμα 5.5**: Μενού επιλογής παραδείγματος από αρχείο.

Τα αρχεία παραδειγμάτων είναι αρχεία .m και η εκτέλεσή τους πραγματοποιεί όλες τις απαραίτητες εκχωρήσεις και αρχικοποιήσεις. Επειδή στον ίδιο φάκελο ενδεχομένως υπάρχουν και αρχεία τύπου .m τα οποία δεν είναι αρχεία δεδομένων, έχει ενσωματωθεί ο κατάλληλος έλεγχος. Για αυτό το λόγο υποχρεωτικά πρέπει τα αρχεία δεδομένων να ξεκινούν με το πρόθεμα "data_". Έτσι αν κάποιος επιθυμεί τη μελέτη άλλων δικτύων εκτός από αυτά που υπάρχουν δεν έχει παρά να κατασκευάσει ένα τέτοιο αρχείο, προσέχοντας να το ονομάσει σωστά και να ακολουθήσει την ονοματολογία για τα διάφορα στοιχεία του δικτύου όπως αυτά υπάρχουν στα εγκατεστημένα παραδείγματα. Η λογική ορθότητα των δεδομένων εισόδου είναι ευθύνη του χρήστη ενώ η συντακτική είναι ευθύνη του λογισμικού (MATLAB).

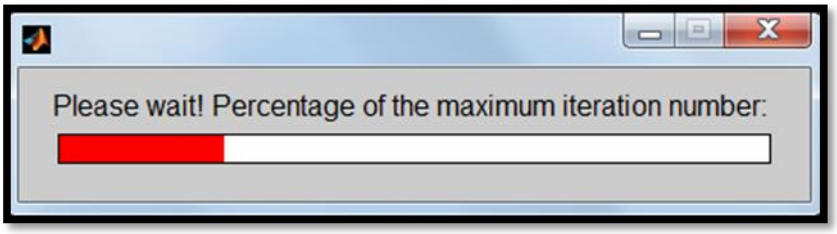
Όταν επιλεγχθεί ένα δίκτυο για μελέτη, αυτόματα αναγνωρίζεται το είδος του ελεγκτή που διαθέτει, αν διαθέτει κάποιον, και τα κατάλληλα πεδία αποτελεσμάτων ανάλογα με τον ελεγκτή ενεργοποιούνται, όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 5.6 όπου επιλέχθηκε το κλασικό παράδειγμα των 5 ζυγών με τρία LTC.




**Σχήμα 5.6:** Τροποποίηση γραφικού περιβάλλοντος ανάλογα με τον ελεγκτή που διαθέτει το δίκτυο.

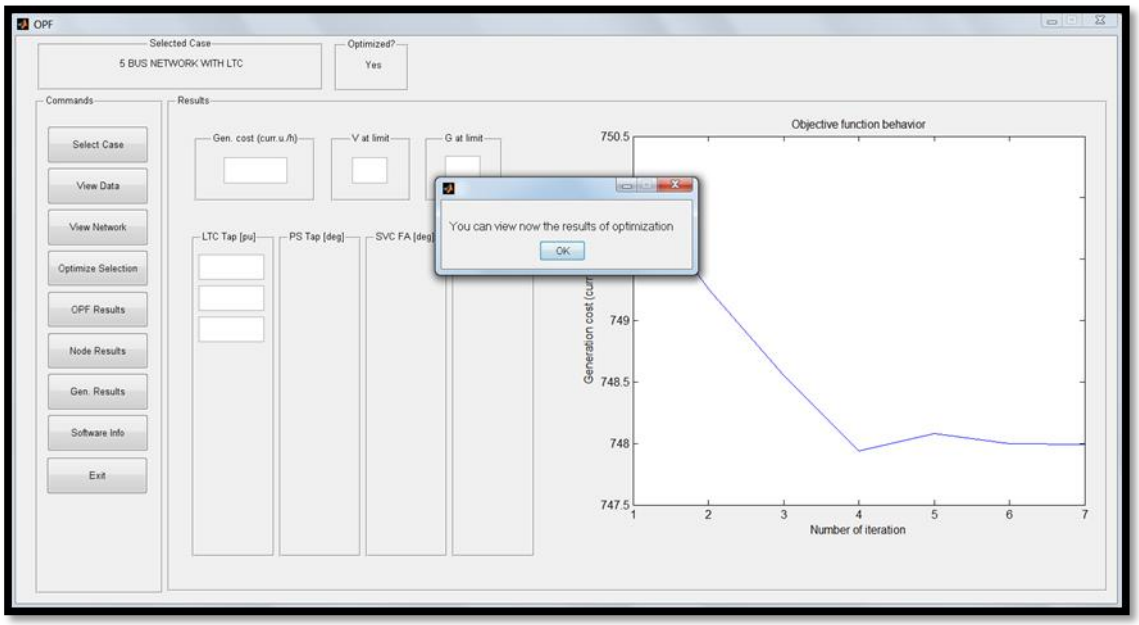
Στην παρούσα έκδοση δεν υποστηρίζεται ταυτόχρονη εισαγωγή δύο ή περισσότερων τύπων ελεγκτή. Έτσι αν γίνει προσπάθεια να κατασκευαστεί ένα δίκτυο π.χ. με ένα LTC και ένα PC θα εμφανιστεί μήνυμα σφάλματος ενώ υποστηρίζεται απεριόριστος αριθμός ελεγκτών του ίδιου είδους. Βέβαια για λόγους περιορισμού χώρου σε ένα τέτοιο γραφικό περιβάλλον δεν είναι δυνατόν να απεικονιστούν τα πεδία αποτελεσμάτων πολλών ελεγκτών και περιορίζονται στους εννέα τον αριθμό αλλά ο υπολογισμός της βελτιστοποίησης δεν επηρεάζεται από τους περιορισμούς του γραφικού περιβάλλοντος.

Στο γραφικό περιβάλλον εμφανίζονται επίσης πληροφορίες για το ποιό παράδειγμα/project έχει επιλεχθεί. Τη δεδομένη στιγμή το λογισμικό είναι έτοιμο να ξεκινήσει τη βελτιστοποίηση στο δίκτυο που έχει επιλεχθεί. Η βελτιστοποίηση ξεκινά όταν πατηθεί το κουμπί "Optimize Selection". Τότε γίνεται κλήση της ρουτίνας του πυρήνα run_opf.m και η επαναληπτική διαδικασία ξεκινά (Σχήμα 5.7).



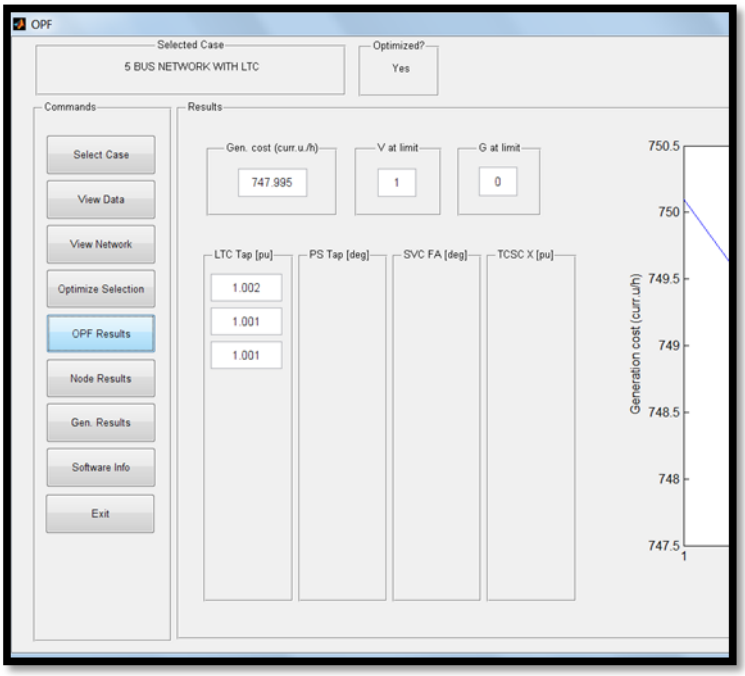

**Σχήμα 5.7**: Εκκίνηση βελτιστοποίησης.

Όταν η διαδικασία ολοκληρωθεί χωρίς σφάλματα, το πρόγραμμα εμφανίζει σχετικό μήνυμα. Τώρα τα αποτελέσματα είναι διαθέσιμα για επεξεργασία όμως ακόμα δεν έχουν εμφανιστεί στο γραφικό περιβάλλον γιατί δεν έχει δοθεί η σχετική εντολή. Το μόνο που εμφανίζεται αυτόματα στο γραφικό περιβάλλον είναι η καμπύλη συμπεριφοράς της αντικειμενικής συνάρτησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8.



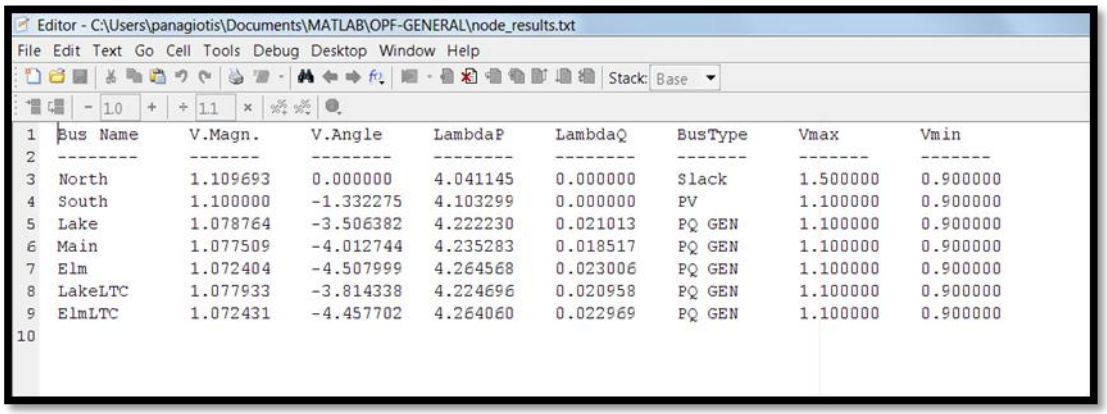

**Σχήμα 5.8**: Ολοκλήρωση διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Τώρα πλέον μπορεί να πατηθεί το κουμπί "OPF Results" και να εμφανιστούν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης που έχουν σχέση με τους ελεγκτές, την αντικειμενική συνάρτηση και τους ενεργούς περιορισμούς (Σχήμα 5.1)




**Σχήμα 5.9**: Προβολή αποτελεσμάτων αντικειμενικής συνάρτησης, ελεγκτών και ενεργών περιορισμών.

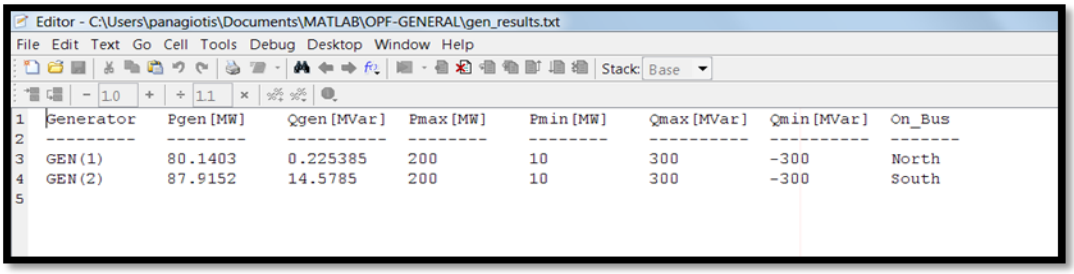
Για να εμφανιστούν τα αποτελέσματα που έχουν σχέση με τους ζυγούς ή με τις γεννήτριες πρέπει να πατηθούν τα κουμπιά "Node Result" και "Gen. Results" αντίστοιχα οπότε και θα εμφανιστούν τα αποτελέσματα τα οποία βρίσκονται αποθηκευμένα σε .txt αρχεία (Σχήμα 5.10 και 5.11).



Editor - C:\Users\panagiotis\Documents\MATLAB\OPF-GENERAL\node_results.txt

| Bus Name | V.Magn. | V.Angle | LambdaP | LambdaQ | BusType | Vmax | Vmin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| North | 1.109693 | 0.000000 | 4.041145 | 0.000000 | Slack | 1.500000 | 0.900000 |
| South | 1.100000 | -1.332275 | 4.103299 | 0.000000 | PV | 1.100000 | 0.900000 |
| Lake | 1.078764 | -3.506382 | 4.222230 | 0.021013 | PQ GEN | 1.100000 | 0.900000 |
| Main | 1.077509 | -4.012744 | 4.235283 | 0.018517 | PQ GEN | 1.100000 | 0.900000 |
| Elm | 1.072404 | -4.507999 | 4.264568 | 0.023006 | PQ GEN | 1.100000 | 0.900000 |
| LakeLTC | 1.077933 | -3.814338 | 4.224696 | 0.020958 | PQ GEN | 1.100000 | 0.900000 |
| ElmLTC | 1.072431 | -4.457702 | 4.264060 | 0.022969 | PQ GEN | 1.100000 | 0.900000 |

**Σχήμα 5.10**: Προβολή αποτελεσμάτων σχετικών με τους ζυγούς.



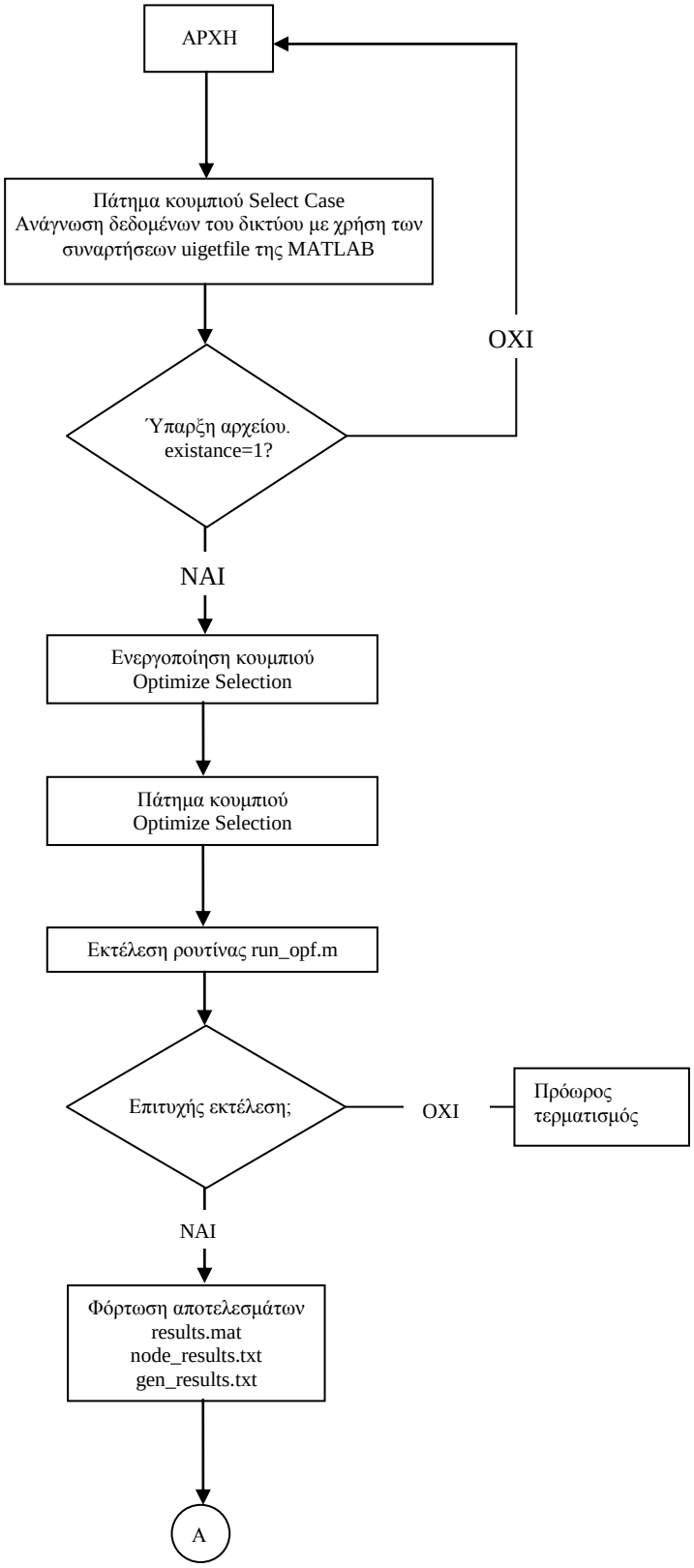
Editor - C:\Users\panagiotis\Documents\MATLAB\OPF-GENERAL\gen_results.txt

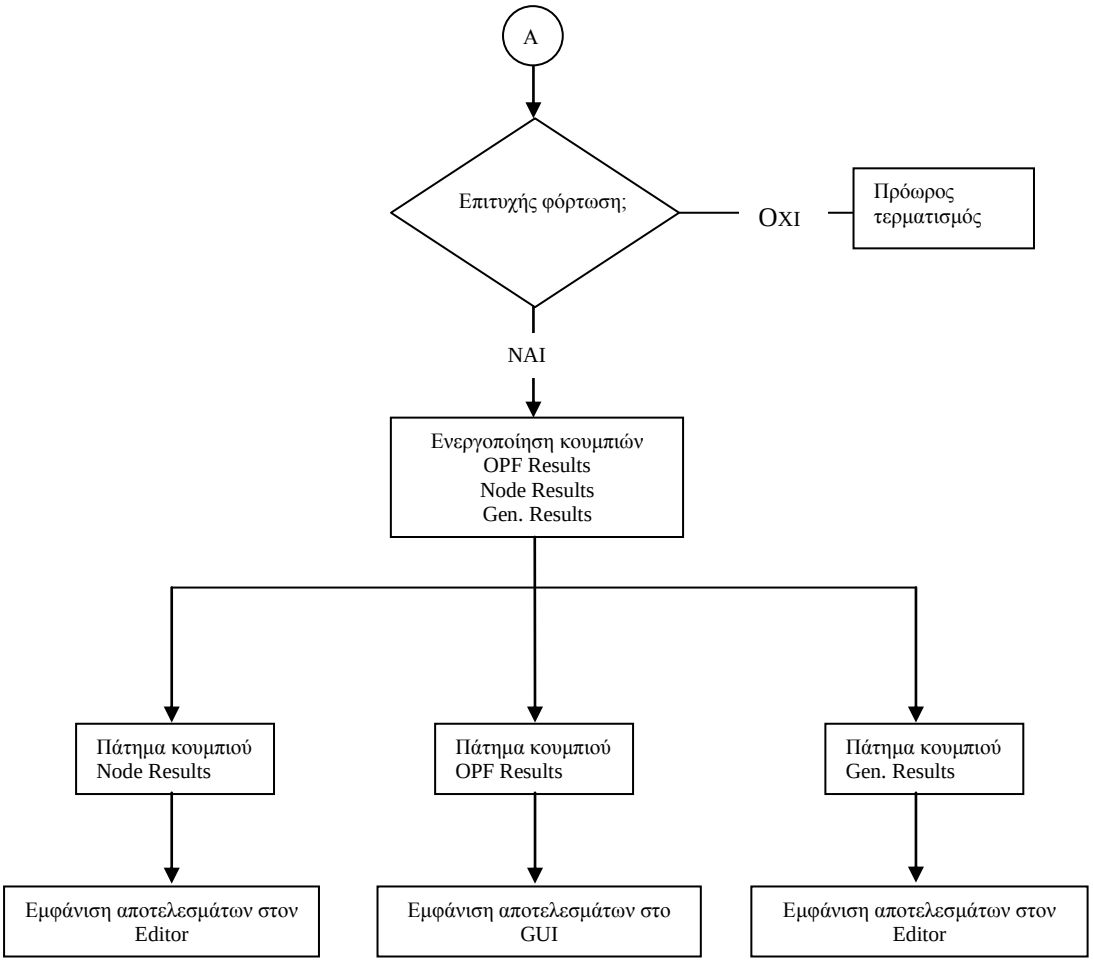
| Generator | Pgen [MW] | Qgen [MVar] | Pmax [MW] | Pmin [MW] | Qmax [MVar] | Qmin [MVar] | On_Bus |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GEN(1) | 80.1403 | 0.225385 | 200 | 10 | 300 | -300 | North |
| GEN(2) | 87.9152 | 14.5785 | 200 | 10 | 300 | -300 | South |

**Σχήμα 5.11**: Προβολή αποτελεσμάτων σχετικών με τις γεννήτριες.

### 5.1.3 Ιεραρχικό διάγραμμα

Η πλήρης περιγραφή των λειτουργιών του λογισμικού μπορεί να γίνει μόνο με ιεραρχικό διάγραμμα ροής και αυτό παρατίθεται στο Σχήμα 5.12 .






**Σχήμα 5.12**: Ιεραρχικό διάγραμμα λειτουργίας λογισμικού.

Συνολικά το λογισμικό αποτελείται από τα παρακάτω αρχεία:

- 76 αρχεία τύπου .m ή .pcode
- 2 αρχεία τύπου .txt
- 1 αρχεία τύπου .pdf
- 2 αρχεία τύπου .mat
- 1 αρχεία τύπου .fig
- 16 αρχεία τύπου .m (παραδείγματα)
- 15 αρχεία τύπου .jpg

### 5.1.4 Εκτέλεση αλγορίθμου βελτιστοποίησης

Η υλοποίηση της ρουτίνας υπολογισμού **run_opf.m** αποτελείται από 1026 γραμμές κώδικα μαζί με σχόλια και ο κώδικας καλεί κατά περίπτωση ένα σύνολο υπορουτίνων οι οποίες είναι τα δομικά τμήματα που χτίζουν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης και περιγράφονται παρακάτω κατά ομάδες ανάλογα με το κομμάτι του αλγορίθμου που εκτελούν:

| **Υπορουτίνα** | **Γραμμές κώδικα** | **Περιγραφή** |
|---|---|---|
| AugmentedLagrangian.m | 62 | Πρώτη και δεύτερη παράγωγος της (3.12) για αρχική εισαγωγή τους στα W, g σχετιζόμενες όλες τις ενεργές ισχείς και τάσεις |
| AugmentedLagrangianG.m | 33 | Πρώτη και δεύτερη παράγωγος της (3.12) για εισαγωγή τους στα W, g σχετιζόμενες με τις ενεργές ισχείς εκτός ορίων |
| AugmentedLagrangianLTC.m | 33 | Πρώτη και δεύτερη παράγωγος της (3.12) για εισαγωγή τους στα W, g σχετιζόμενες με τις λήψεις των LTC εκτός ορίων |
| AugmentedLagrangianPS.m | 33 | Πρώτη και δεύτερη παράγωγος της (3.12) για εισαγωγή τους στα W, g σχετιζόμενες με τις λήψεις των PS εκτός ορίων |
| AugmentedLagrangianTCSC.m | 33 | Πρώτη και δεύτερη παράγωγος της (3.12) για εισαγωγή τους στα W, g σχετιζόμενες με τις τιμές $X_{tcsc}$ των TCSC εκτός ορίων |
| AugmentedLagrangianV.m | 32 | Πρώτη και δεύτερη παράγωγος της (3.12) για εισαγωγή τους στα W, g σχετιζόμενες με τις τιμές τάσεων εκτός ορίων |
| AugmentedLagrangian_IG.m | 23 | Πρώτη και δεύτερη παράγωγος της (3.12) για εισαγωγή τους στα W, g σχετιζόμενες με την ενεργό ισχύ i-οστής γεννήτριας |
| AugmentedLagrangian_ILTC.m | 23 | Πρώτη και δεύτερη παράγωγος της (3.12) για εισαγωγή τους στα W, g σχετιζόμενες με τη λήψη i-οστού LTC |
| AugmentedLagrangian_IPS.m | 23 | Πρώτη και δεύτερη παράγωγος της (3.12) για εισαγωγή τους στα W, g σχετιζόμενες με τη λήψη i-οστού PS |
| AugmentedLagrangian_ITCSC.m | 23 | Πρώτη και δεύτερη παράγωγος της (3.12) για εισαγωγή τους στα W, g σχετιζόμενες με την τιμή $X_{tcsc}$ i-οστού TCSC |
| AugmentedLagrangian_IV.m | 22 | Πρώτη και δεύτερη παράγωγος της (3.12) για εισαγωγή τους στα W, g σχετιζόμενες με την τάση i-οστού ζυγού |
| ReleasingAumentedLagrangianG.m | 17 | Αναίρεση προσαύξησης Lagrange για γεννήτριες. Αφαίρεση πρώτης και δεύτερης παραγώγου της (3.12) από W, g |

| | | |
|---|---|---|
| ReleasingAumentedLagrangianLTC.m | 17 | Αναίρεση προσαύξησης Lagrange για LTC. Αφαίρεση πρώτης και δεύτερης παραγώγου της (3.12) από W, g |
| ReleasingAumentedLagrangianPS.m | 17 | Αναίρεση προσαύξησης Lagrange για PS. Αφαίρεση πρώτης και δεύτερης παραγώγου της (3.12) από W, g |
| ReleasingAumentedLagrangianTCSC.m | 17 | Αναίρεση προσαύξησης Lagrange για TCSC. Αφαίρεση πρώτης και δεύτερης παραγώγου της (3.12) από W, g |
| ReleasingAumentedLagrangianV.m | 20 | Αναίρεση προσαύξησης Lagrange για μέτρα τάσεων. Αφαίρεση πρώτης και δεύτερης παραγώγου της (3.12) από W, g |

**Πίνακας 5.1:** Υπορουτίνες κατασκευής προσαυξημένης συνάρτησης Lagrange

| **Υπορουτίνα** | **Γραμμές κώδικα** | **Περιγραφή** |
|---|---|---|
| MatrixSVC.m | 44 | Ενημέρωση πίνακα W σύμφωνα με σχέση (4.20) |
| MatrixW.m | 417 | Κατασκευή πίνακα W σύμφωνα με σχέσεις (3.27)-(3.35) |
| MatrixWGen.m | 18 | Ενημέρωση πίνακα W σύμφωνα με σχέση (4.39) |
| MatrixWGenMiu.m | 28 | Δείκτης για την κατάσταση του πολλαπλασιαστή γεννητριών |
| MatrixWLTC.m | 44 | Ενημέρωση πίνακα W σύμφωνα με σχέση (4.2) |
| MatrixWLTCMiu.m | 28 | Δείκτης για την κατάσταση του πολλαπλασιαστή LTC |
| MatrixWLTCaugmentation.m | 92 | Προσαύξηση γραμμής-στήλης πίνακα W σύμφωνα με σχέσεις (4.3)-(4.7) |
| MatrixWPS.m | 44 | Ενημέρωση πίνακα W σύμφωνα με σχέση (4.12) |
| MatrixWPSMiu.m | 28 | Δείκτης για την κατάσταση του πολλαπλασιαστή PS |
| MatrixWPSaugmentation.m | 92 | Προσαύξηση γραμμής-στήλης πίνακα W σύμφωνα με σχέσεις (4.13)-(4.17) |
| MatrixWTCSC.m | 44 | Ενημέρωση πίνακα W σύμφωνα με σχέση (4.25) |
| MatrixWTCSCMiu.m | 28 | Δείκτης για την κατάσταση του πολλαπλασιαστή TCSC |
| MatrixWTCSCaugmentation.m | 92 | Προσαύξηση γραμμής-στήλης πίνακα W σύμφωνα με σχέσεις (4.26)-(4.35) |
| MatrixWVoltageMiu.m | 33 | Δείκτης για την κατάσταση του πολλαπλασιαστή τάσεων |
| Reset_Hessian_grad.m | 8 | Διαγραφή πίνακα Hessian και διανύσματος κλίσης |

**Πίνακας 5.2:** Υπορουτίνες κατασκευής πίνακα γραμμικών εξισώσεων

| **Υπορουτίνα** | **Γραμμές κώδικα** | **Περιγραφή** |
|---|---|---|
| MultiplierBus.m | 16 | Κατασκευή κατάλληλου πολλαπλασιαστή για τάσεις ζυγών σύμφωνα με σχέση (3.13) |
| MultiplierGen.m | 17 | Κατασκευή κατάλληλου πολλαπλασιαστή για παραγωγή γεννητριών σύμφωνα με σχέση (3.13) |
| MultiplierLTC.m | 17 | Κατασκευή κατάλληλου πολλαπλασιαστή για λήψεις LTC σύμφωνα με σχέση (3.13) |
| MultiplierPS.m | 17 | Κατασκευή κατάλληλου πολλαπλασιαστή για λήψεις PS σύμφωνα με σχέση (3.13) |
| MultiplierTCSC.m | 17 | Κατασκευή κατάλληλου πολλαπλασιαστή για τιμή $X_{tscs}$ των TCSC σύμφωνα με σχέση (3.13) |
| PenaltyFunctionQ.m | 15 | Συνάρτηση ποινής για άεργο ισχύ |

**Πίνακας 5.3:** Υπορουτίνες επιβολής ποινών για παραβίαση ορίων

| **Υπορουτίνα** | **Γραμμές κώδικα** | **Περιγραφή** |
|---|---|---|
| IdentifyConstQ.m | 40 | Καθορισμός πολλαπλασιαστή $\lambda_q$ |
| IdentifyMiuBus.m | 38 | Καθορισμός πολλαπλασιαστή τάσεων |
| IdentifyMiuGen.m | 50 | Καθορισμός πολλαπλασιαστή γεννητριών |
| IdentifyMiuLTC.m | 50 | Καθορισμός πολλαπλασιαστή LTC |
| IdentifyMiuPS.m | 50 | Καθορισμός πολλαπλασιαστή PS |
| IdentifyMiuTCSC.m | 50 | Καθορισμός πολλαπλασιαστή TCSC |
| CheckQGenLimits.m | 12 | Έλεγχος ορίων αέργου ισχύος γεννήτριας |
| Check_Limits_LTC.m | 33 | Έλεγχος ορίων LTC |
| Check_Limits_P.m | 33 | Έλεγχος ορίων ενεργού ισχύος γεννήτριας |
| Check_Limits_PS.m | 33 | Έλεγχος ορίων PS |
| Check_Limits_TCSC.m | 33 | Έλεγχος ορίων TCSC |
| Check_Limits_V.m | 32 | Έλεγχος ορίων τάσεων |

| | | |
|---|---|---|
| ReviewGen.m | 12 | Δείκτες κατάστασης γεννητριών |
| ReviewLTC.m | 12 | Δείκτες κατάστασης LTC |
| ReviewNodes.m | 36 | Δείκτες κατάστασης ζυγών |
| ReviewPS.m | 12 | Δείκτες κατάστασης PS |
| ReviewTCSC.m | 12 | Δείκτες κατάστασης TCSC |

**Πίνακας 5.4:** Υπορουτίνες ελέγχου παραβίασης ορίων

| **Υπορουτίνα** | **Γραμμές κώδικα** | **Περιγραφή** |
|---|---|---|
| CalculatedPowers.m | 39 | Υπολογισμός ενεργών και αέργων ισχύων |
| CalculatedPowersLTC.m | 39 | Υπολογισμός ενεργών και αέργων ισχύων για το LTC από σχέσεις (2.2)-(2.5) |
| CalculatedPowersPS.m | 39 | Υπολογισμός ενεργών και αέργων ισχύων για το PS από σχέσεις (2.12)-(2.15) |
| CalculatedPowersSVC.m | 39 | Υπολογισμός ενεργών και αέργων ισχύων για το SVC από σχέσεις (2.23) |
| CalculatedPowersTCSC.m | 39 | Υπολογισμός ενεργών και αέργων ισχύων για το TCSC από σχέσεις (2.27)-(2.28) |
| YBus.m | 17 | Υπολογισμός μήτρας αγωγιμοτήτων |
| YbusLTC.m | 17 | Υπολογισμός μήτρας αγωγιμοτήτων με LTC |
| YbusPS.m | 17 | Υπολογισμός μήτρας αγωγιμοτήτων με PS |
| CostGeneration.m | 7 | Υπολογισμός κόστους παραγωγής από σχέση (3.2) |
| ReactivePowerGenerators.m | 20 | Υπολογισμός παραγωγής αέργου ισχύος |

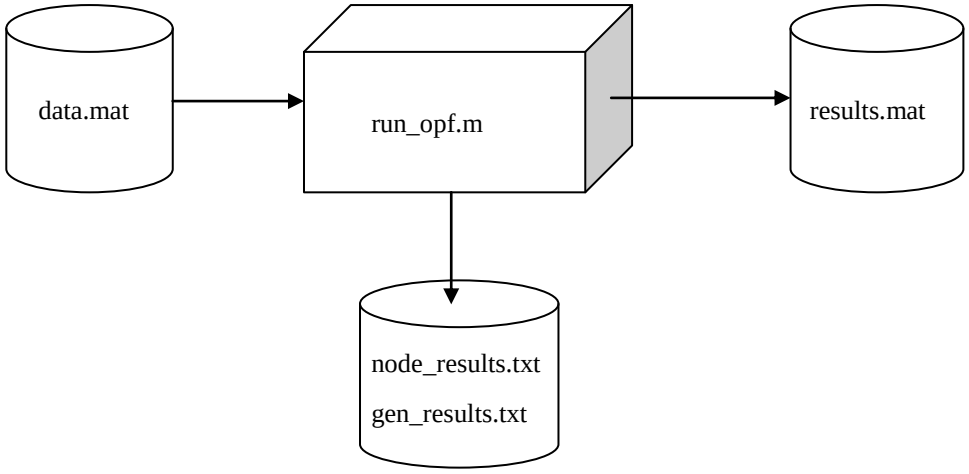
**Πίνακας 5.5:** Υπορουτίνες υπολογισμών

| **Βοηθητικές συναρτήσεις** | **Γραμμές κώδικα** | **Περιγραφή** |
|---|---|---|
| InitialDispatch.m | 40 | Αρχικοποίηση τιμών μεταβλητών κατάστασης |
| Convexificacion.m | 29 | Εξασφάλιση κυρτότητας καμπύλης |
| CheckConvexification.m | 12 | Έλεγχος κυρτότητας καμπύλης |
| VectorAux.m | 18 | Βοηθητικό διάνυσμα ενδιάμεσων τιμών όταν δεν υπάρχει ελεγκτής |
| VectorAuxN.m | 18 | Βοηθητικό διάνυσμα ενδιάμεσων τιμών όταν υπάρχει ελεγκτής |
| Voltage.m | 52 | Έλεγχος εφικτού ενδιάμεσης λύσης |
| Actualisation.m | 38 | Ενημέρωση μεταβλητών κατάστασης όταν δεν υπάρχει ελεγκτής |
| ActualisationN.m | 38 | Ενημέρωση μεταβλητών κατάστασης όταν υπάρχει ελεγκτής |

**Πίνακας 5.6:** Υπορουτίνες με βοηθητικές συναρτήσεις

Η ρουτίνα run_opf.m αποτελεί τον πυρήνα. Ο πυρήνας είναι το τμήμα που εκτελεί τον αλγόριθμο. Όλα τα δεδομένα καταλήγουν στον πυρήνα και όλα τα αποτελέσματα ξεκινούν από αυτόν. Τμήματα του πηγαίου κώδικα που κατασκευάζουν τον πυρήνα χρησιμοποιήθηκαν από την βιβλιογραφία [5.7] τα οποία όμως ήταν διάσπαρτα και με πολλά σφάλματα λογικά και συντακτικά. Έτσι έπρεπε πρώτα από όλα να γίνει η εκσφαλμάτωση και η ανασύνταξη του πηγαίου κώδικα. Η διαδικασία αυτή ήταν και η πιο χρονοβόρα στην όλη εκπόνηση της διπλωματικής. Επίσης ο κώδικας που συναρμολογήθηκε και εκσφαλματώθηκε αρχικά, εκτελούσε ήταν τον αλγόριθμο Βέλτιστης Ροής Φορτίου χωρίς όμως την ενσωμάτωση των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς. Έπρεπε λοιπόν να αναπτυχθεί ο κώδικας ο οποίος θα ενσωμάτωνε επιτυχώς τους ελεγκτές LTC, PS, SVC και TCSC. Αυτή η διαδικασία ήταν η δεύτερη πιο χρονοβόρα κατά την εκπόνηση της διπλωματικής.

Ο πυρήνας εκτελείται με την κλήση της ρουτίνας run_opf.m. Η ρουτίνα αυτή κάνει χρήση των άλλων υπορουτινών που υλοποιούν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης με την μέθοδο Newton. Η ρουτίνα run_opf.m έχει τις εισόδους και εξόδους που φαίνονται στο Σχήμα 5.12.




**Σχήμα 5.12**: Έξοδοι και είσοδοι ρουτίνας run_opf.m

Έτσι το GUI έχει διαθέσιμα τα αποτελέσματα για εμφάνιση.

### 5.1.5 Δεδομένα-Αποτελέσματα

Η βέλτιστη λύση είναι οι τιμές των μεταβλητών κατάστασης του δικτύου η που ελαχιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας. Έτσι λαμβάνονται τα εξής αποτελέσματα:

Ζυγοί:

- Μέτρο τάσης
- Γωνία τάσης
- Πολλαπλασιαστές $\lambda_P$
- Πολλαπλασιαστές $\lambda_q$

Γεννήτριες:

- Ενεργός παραγωγή (MW)
- Άεργος παραγωγή (MVar)

LTC:

- Tap μέτρου τάσης

PS:

- Tap γωνίας τάσης

SVC:

- Γωνία έναυσης α

TCSC:

- Εμπέδηση X

### 5.1.6 Περιορισμοί-Βελτιώσεις

Σε αυτήν την ενότητα προτείνονται κάποιες βελτιώσεις που θα μπορούσαν σε επόμενο στάδιο ανάπτυξης και εξέλιξης να πραγματοποιηθούν. Επίσης αναφέρονται και κάποιοι περιορισμοί που υπάρχουν στο λογισμικό με τον τρόπο που αυτό αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής:

- Αδυναμία διαχείρισης περισσότερων του ενός τύπων ελεγκτών. Π.χ. δεν υποστηρίζεται ταυτόχρονη ενσωμάτωση LTC και SVC. Αυτός ο περιορισμός εξαλείφεται σχετικά εύκολα, ορίζοντας διαφορετικά τις συναρτήσεις υλοποίησης του αλγορίθμου.
- Μη ύπαρξη ξεχωριστού πεδίου εισαγωγής δεδομένων μετασχηματιστών. Οι μετασχηματιστές πρέπει να δοθούν σαν γραμμές μεταφοράς.
- Κατά την επαναληπτική διαδικασία δεν εμφανίζονται μηνύματα από το λογισμικό σε περίπτωση μη σύγκλισης.
- Για την εισαγωγή νέων δικτύων θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένα GUI το οποίο θα καθοδηγούσε τον χρήστη στη σωστή εισαγωγή δεδομένων.
- Δεν υπολογίζονται απώλειες συνολικές και για κάθε γραμμή. Θα μπορούσε πολύ εύκολα να ενσωματωθεί μια συνάρτηση για τον υπολογισμό των απωλειών κατά τη βέλτιστη λύση.

- Απλή Ροή Φορτίου θα μπορούσε επίσης να ενσωματωθεί και να παράγονται αυτόματα συγκριτικά αποτελέσματα.
- Ακόμα θα μπορούσε να ενσωματωθεί ως εναλλακτική αντικειμενική συνάρτηση και οι απώλειες MW και ο χρήστης να μπορούσε να επιλέγει την αντικειμενική συνάρτηση που επιθυμεί.
- Για το TCSC δεν υποστηρίζεται η λειτουργία ελέγχου ροής σε συγκεκριμένη τιμή παρά ο αλγόριθμος αναζητά την τιμή ισχύος δια μέσω του TCSC για επίτευξη βέλτιστου.
- Για το SVC δεν υποστηρίζεται λειτουργία ελέγχου μέτρου τάσης ζυγού σε συγκεκριμένη τιμή παρά ο αλγόριθμος αναζητά την τιμή αυτή για την επίτευξη βέλτιστου.

## 5.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[5.1] A. Knight, "Basics of MATLAB and Beyond", CRC Press LLC, 2000.

[5.2] R. Brian, L. Hunt Ronald, "A Guide to MATLAB for Beginners and Experienced Users". Cambridge University Press, 2001.

[5.3] P. Marchand, O .Thomas Holland, "Graphics and GUIs with MATLAB". Chapman & Hall/CRC, 2003

[5.4] "MathWorks – MATLAB and Simulink for Technical Computing", [Online] Διαθέσιμο: http://www.mathworks.com, προσπελάστηκε Ιούλιο 2010.

[5.5] "Blinkdagger – a MATLAB blog and Engineering resource filled with guides and tutorials", [Online] Διαθέσιμο: http://blinkdagger.com, προσπελάστηκε Ιούλιο 2010.

[5.6] S.R. Otto and J.P. Denier, "An Introduction to Programming and Numerical Methods in MATLAB". Springer-Verlag London Limited, 2005.

[5.7] E. Acha, Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles-Camacho, "FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks". John Wiley & Sons, 2004.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ
6

# ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

## 6.1 ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του λογισμικού και κατά επέκταση του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξή του. Τα παραδείγματα που υπάρχουν αποθηκευμένα στο λογισμικό θα χρησιμοποιηθούν για να αξιολογηθεί το πρόγραμμα. Ως αναφορά έπρεπε να χρησιμοποιήθεί ένα δοκιμασμένο εμπορικό λογισμικό και το καλύτερο που θα μπορούσε να επιλεχθεί ήταν το NEPLAN V5.4.3.

Τα δίκτυα που δοκιμάστηκαν διαχωρίζονται από το μέγεθός τους (αριθμός ζυγών) και από το είδος του ελεγκτή που χρησιμοποιείται συμπεριλαμβανομένης και της περίπτωσης δίχως ελεγκτή. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιείται ένα είδος ελεγκτή. Έτσι υπάρχουν τρία μεγέθη δικτύων με πέντε περιπτώσεις ελεγκτών για το κάθε μέγεθος, οπότε δοκιμάστηκαν συνολικά δεκαπέντε περιπτώσεις.

Όλα τα δεδομένα των δικτύων εισήχθηκαν και στο NEPLAN με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και τον υπολογισμό της απλής ροής φορτίου.

Το NEPLAN χρησιμοποιεί σαν μέθοδο βελτιστοποίησης τη μέθοδο εσωτερικού σημείου (interior point method) οπότε τα αποτελέσματα έχουν ενδιαφέρον και για την σύγκριση των δύο μεθόδων.

## 6.2 ΔΙΚΤΥΟ 5 ΖΥΓΩΝ

### 6.2.1 Δίκτυο 5 ζυγών χωρίς ελεγκτή ισχύος

#### 6.2.1.1 Δεδομένα

Το δίκτυο αυτό έχει 5 ζυγούς και 7 γραμμές μεταφοράς. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV. Τα δεδομένα του δικτύου φαίνονται στους Πίνακες 6.1 έως 6.4.

| Αριθμός ζυγών | Όνομα ζυγού | Τύπος ζυγού | $V_{max}$ (α.μ.) | $V_{min}$ (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|
| 5 | North | SL | 1.5 | 0.9 |
| | South | PV | 1.1 | 0.9 |
| | Lake | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | Main | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | Elm | PQ | 1.1 | 0.9 |

**Πίνακας 6.1:** Δεδομένα ζυγών του δικτύου 5 ζυγών

| Αριθμός γεννητριών | Όνομα γεννήτριας | Ζυγός σύνδεσης | $P_{max}$ (MW) | $P_{min}$ (MW) | $Q_{max}$ (MVar) | $Q_{min}$ (MVar) | Συντ. κόστους a | Συντ. κόστους b | Συντ. κόστους c |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | GEN1 | North | 200 | 10 | 300 | -300 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| | GEN2 | South | 200 | 10 | 300 | -300 | 60 | 3.4 | 0.004 |

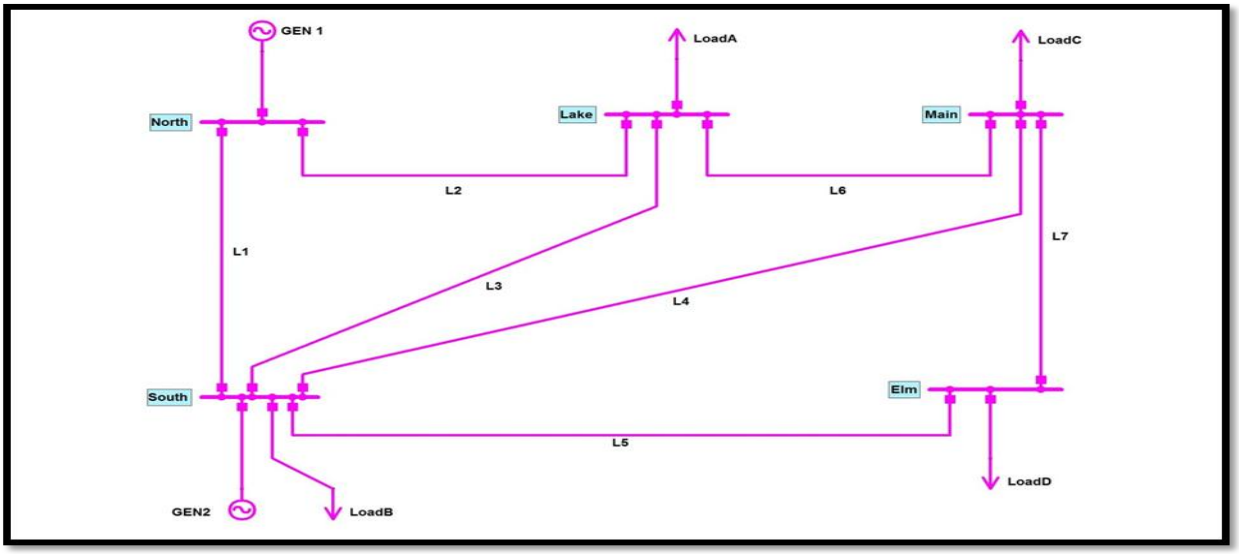
**Πίνακας 6.2:** Δεδομένα παραγωγής του δικτύου 5 ζυγών

| Αριθμός γραμμών | Όνομα γραμμής | Από ζυγό | Προς ζυγό | R (α.μ.) | X (α.μ.) | B (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | L1 | North | South | 0.02 | 0.06 | 0.06 |
| | L2 | North | Lake | 0.08 | 0.24 | 0.05 |
| | L3 | South | Lake | 0.06 | 0.18 | 0.04 |
| | L4 | South | Main | 0.06 | 0.18 | 0.04 |
| | L5 | South | Elm | 0.04 | 0.12 | 0.03 |
| | L6 | Lake | Main | 0.01 | 0.03 | 0.02 |
| | L7 | Main | Elm | 0.08 | 0.24 | 0.05 |

**Πίνακας 6.3:** Δεδομένα γραμμών του δικτύου 5 ζυγών

| Αριθμός φορτίων | Όνομα φορτίου | Ζυγός σύνδεσης | P (MW) | Q (MVar) |
|---|---|---|---|---|
| 4 | LoadA | Lake | 20 | 10 |
| | LoadB | South | 45 | 15 |
| | LoadC | Main | 40 | 5 |
| | LoadD | Elm | 60 | 10 |
| | | Σύνολο | 165 | 40 |

**Πίνακας 6.4:** Δεδομένα φορτίων του δικτύου 5 ζυγών




**Σχήμα 6.1:** Δίκτυο 5 ζυγών χωρίς ελεγκτή

### 6.2.1.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της βέλτιστης ροής φορτίου για αυτό το δίκτυο φαίνονται στους Πίνακες 6.5 έως 6.8.

| Όνομα ζυγού | Μέτρο τάσης (α.μ.) | Γωνία τάσης (◦) | $\lambda_p$ | $\lambda_q$ |
|---|---|---|---|---|
| North | 1.109627 | 0 | 4.04122 | 0 |
| South | 1.1 | -1.305109 | 4.10319 | 0 |
| Lake | 1.078402 | -3.618335 | 4.22325 | 0.021 |
| Main | 1.0779 | -3.853952 | 4.23412 | 0.0185 |
| Elm | 1.072588 | -4.420616 | 4.2639 | 0.02285 |

**Πίνακας 6.5:** Τάσεις ζυγών του δικτύου 5 ζυγών χωρίς ελεγκτή

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GEN1 | 80.1495 | 0.274378 |
| GEN2 | 87.9014 | 14.4331 |
| Σύνολο | 167.051 | 14.7074 |

**Πίνακας 6.6:** Παραγωγή γεννητριών του δικτύου 5 ζυγών χωρίς ελεγκτή

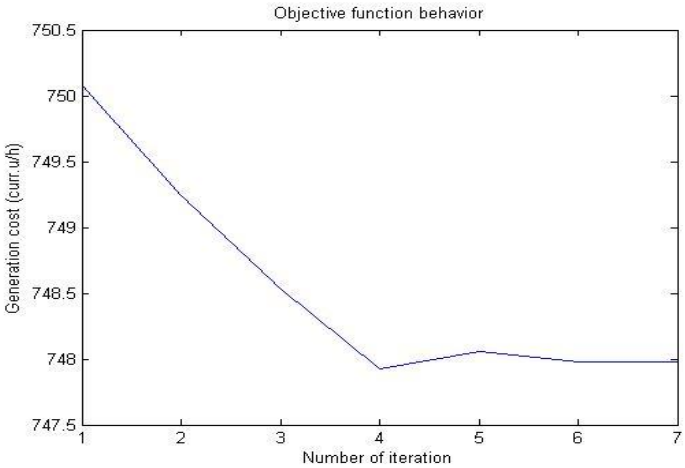
Με βάση τα στοιχεία που υπάρχουν στους Πίνακες 6.1 έως 6.6, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει με χρήση των σχέσεων (3.2) και (3.3) και φαίνεται στον Πίνακα 6.7. Επίσης στον Πίνακα 6.7 φαίνεται και η σύγκριση του αποτελέσματος με το αποτέλεσμα που επιστρέφει το NEPLAN.

| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 747.976 | 747.975 | 0.0001337 |

**Πίνακας 6.7:** Κόστος παραγωγής του δικτύου 5 ζυγών χωρίς ελεγκτή

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.6) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.4) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.

Η συμπεριφορά της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς την σύγκλιση για κάθε επανάληψη που εκτελέστηκε φαίνεται στο Σχήμα 6.2, από όπου προκύπτει ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει έπειτα από έξι επαναλήψεις.




**Σχήμα 6.2:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 5 ζυγών χωρίς ελεγκτή

Τέλος στον Πίνακα 6.8 εμφανίζεται το αποτέλεσμα της απλής ροής φορτίου όπως αυτό υπολογίστικε με το NEPLAN καθώς και το πλήθος παραβιάσεων μέτρου τάσης στους ζυγούς.

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 776.98 | 0 |

**Πίνακας 6.8:** Αποτελέσματα απλής ροής φορτίου για δίκτυο 5 ζυγών χωρίς ελεγκτή ισχύος

Από τους Πίνακες 6.8 και 6.7 προκύπτει ότι η βέλτιστη ροή φορτίου εξοικονομεί 776.98-747.976=29 curr. u/h σε σχέση με την απλή ροή φορτίου ή 3.73%.

## 6.2.2 Δίκτυο 5 ζυγών με LTC

Το δίκτυο αυτό έχει 5 κανονικούς ζυγούς και 2 dummy, 7 γραμμές μεταφοράς και 3 LTC. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

### 6.2.2.1 Δεδομένα

Η εισαγωγή των ζυγών και των LTC τροποποιεί τα δεδομένα όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην ενότητα 6.2.1. Για την παρουσίαση των δεδομένων του δικτύου με LTC παρατίθενται μόνο τα δεδομένα που τροποποιούνται σε σχέση με το βασικό δίκτυο χωρίς ελεγκτή:

| Αριθμός ζυγών | Όνομα ζυγού | Τύπος ζυγού | $V_{max}$ (α.μ.) | $V_{min}$ (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|
| 7 | North | SL | 1.5 | 0.9 |
| | South | PV | 1.1 | 0.9 |
| | Lake | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | Main | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | Elm | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | LakeLTC | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | MainLTC | PQ | 1.1 | 0.9 |

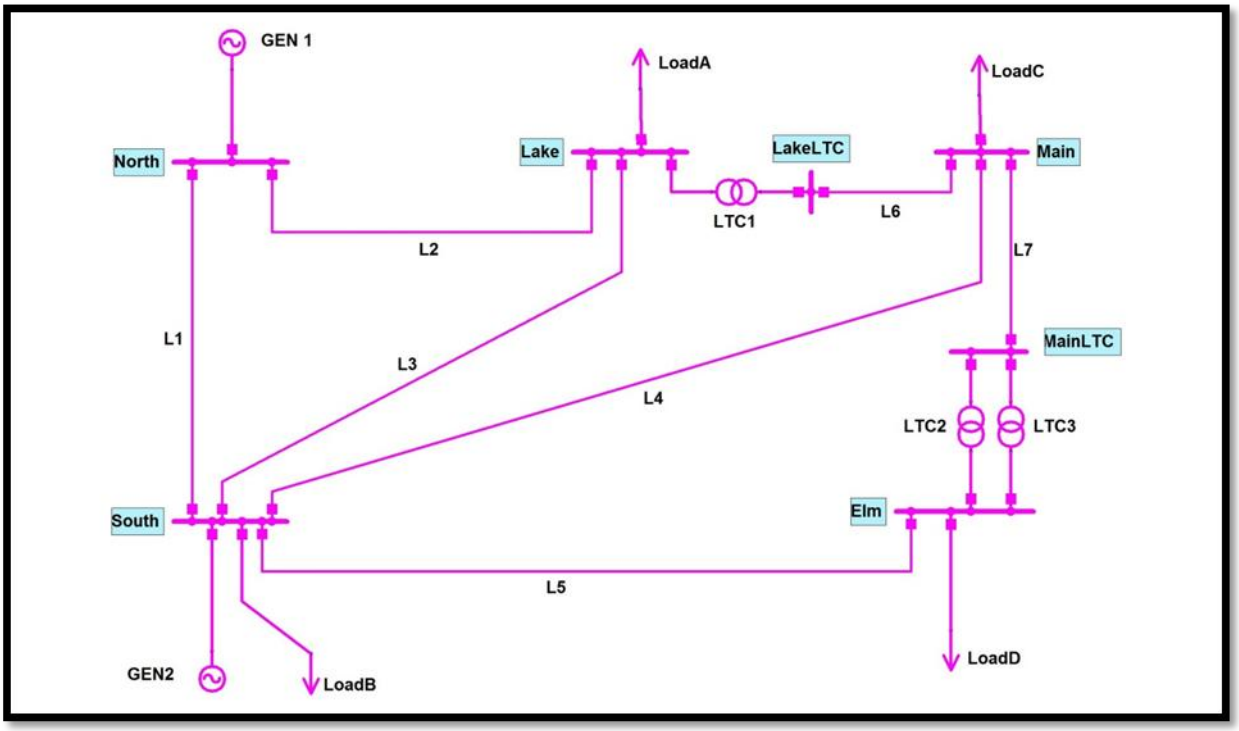
**Πίνακας 6.9:** Δεδομένα ζυγών του δικτύου 5 ζυγών με LTC

| Αριθμός γραμμών | Όνομα γραμμής | Από ζυγό | Προς ζυγό | R (α.μ.) | X (α.μ.) | B (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | L1 | North | South | 0.02 | 0.06 | 0.06 |
| | L2 | North | Lake | 0.08 | 0.24 | 0.05 |
| | L3 | South | Lake | 0.06 | 0.18 | 0.04 |
| | L4 | South | Main | 0.06 | 0.18 | 0.04 |
| | L5 | South | Elm | 0.04 | 0.12 | 0.03 |
| | L6 | LakeLTC | Main | 0.01 | 0.03 | 0.02 |
| | L7 | Main | MainLTC | 0.08 | 0.24 | 0.05 |

**Πίνακας 6.10:** Δεδομένα γραμμών του δικτύου 5 ζυγών με LTC

| Αριθμός LTC | Όνομα LTC | Από ζυγό | Προς ζυγό | R (α.μ.) | X (α.μ.) | $T_{min}$ | $T_{max}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | LTC1 | Lake | LakeLTC | 0 | 0.05 | 0.5 | 1.5 |
| | LTC2 | MainLTC | Elm | 0 | 0.05 | 0.5 | 1.5 |
| | LTC3 | MainLTC | Elm | 0 | 0.05 | 0.5 | 1.5 |

**Πίνακας 6.11:** Δεδομένα ελεγκτών του δικτύου 5 ζυγών με LTC




**Σχήμα 6.3:** Δίκτυο 5 ζυγών με LTC

### 6.2.2.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της βέλτιστης ροής φορτίου για αυτό το δίκτυο φαίνονται στους Πίνακες 6.12 έως 6.15.

| Όνομα ζυγού | Μέτρο τάσης (α.μ.) | Γωνία τάσης (◦) | $\lambda_p$ | $\lambda_q$ |
|---|---|---|---|---|
| North | 1.109693 | 0 | 4.041145 | 0 |
| South | 1.1 | -1.33228 | 4.103299 | 0 |
| Lake | 1.078764 | -3.50638 | 4.22223 | 0.021013 |
| Main | 1.077509 | -4.01274 | 4.235283 | 0.018517 |
| Elm | 1.072404 | -4.508 | 4.264568 | 0.023006 |
| LakeLTC | 1.077933 | -3.81434 | 4.224696 | 0.020958 |
| ElmLTC | 1.072431 | -4.4577 | 4.26406 | 0.022969 |

**Πίνακας 6.12:** Τάσεις ζυγών του δικτύου 5 ζυγών με LTC

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GEN(1) | 80.1403 | 0.225385 |
| GEN(2) | 87.9152 | 14.5785 |
| Σύνολο | 168.0555 | 14.80389 |

**Πίνακας 6.13:** Παραγωγή γεννητριών του δικτύου 5 ζυγών με LTC

Με βάση τα δεδομένα και τα αποτελέσματα η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει με χρήση των σχέσεων (3.2) και (3.3) και φαίνεται στον Πίνακα 6.14 για το δίκτυο 5 ζυγών με LTC.

Επίσης στον Πίνακα 6.14 φαίνεται και η σύγκριση του αποτελέσματος με το αποτέλεσμα που επιστρέφει το NEPLAN.

| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 747.995 | 747.994 | <0.001 |

**Πίνακας 6.14:** Κόστος παραγωγής του δικτύου 5 ζυγών με LTC

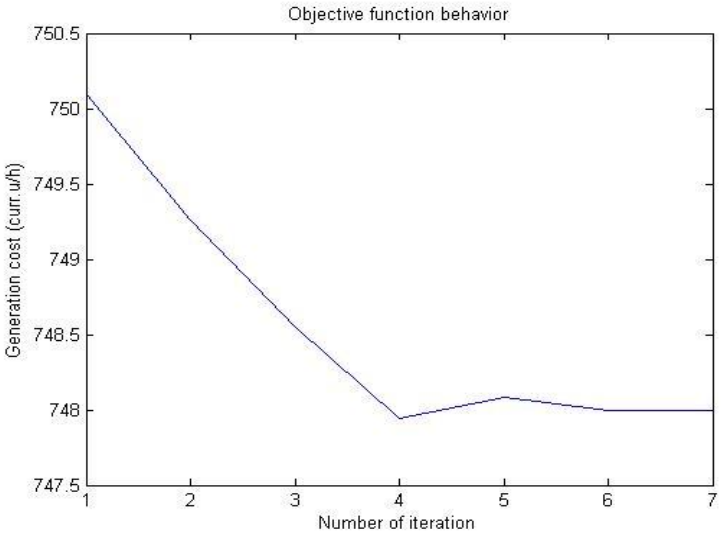
Οι τιμές των λήψεων για τα LTC, όπως αυτές υπολογίστηκαν από το λογισμικό που αναπτύχθηκε καθώς και οι τιμές που δίνει το NEPLAN φαίνονται στον Πίνακα 6.15.

| Τιμή λήψεως | | |
|---|---|---|
| LTC | Διπλωματική εργασία | NEPLAN |
| LTC1 | 1.002 | 1.002 |
| LTC2 | 1.001 | 1.001 |
| LTC3 | 1.001 | 1.001 |

**Πίνακας 6.15:** Τιμές λήψεων ελεγκτών LTC για δίκτυο 5 ζυγών

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.12) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.4) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.

Η συμπεριφορά της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς την σύγκλιση για κάθε επανάληψη που εκτελέστηκε φαίνεται στο Σχήμα 6.4, από όπου προκύπτει ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει έπειτα από έξι επαναλήψεις.




**Σχήμα 6.4:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 5 ζυγών με LTC.

Τέλος στον Πίνακα 6.15 εμφανίζεται το αποτέλεσμα της απλής ροής φορτίου όπως αυτό υπολογίστικε με το NEPLAN καθώς και το πλήθος παραβιάσεων μέτρου τάσης στους ζυγούς.

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 785.92 | 0 |

**Πίνακας 6.16:** Αποτελέσματα απλής ροής φορτίου για δίκτυο 5 ζυγών με LTC

Από τους Πίνακες 6.16 και 6.15 προκύπτει ότι η βέλτιστη ροή φορτίου εξοικονομεί 785.92-747.995=37.92 curr. u/h σε σχέση με την απλή ροή φορτίου ή 4.82%.

## 6.2.3 Δίκτυο 5 ζυγών με PS

Το δίκτυο αυτό έχει 5 κανονικούς ζυγούς και 1 dummy, 7 γραμμές μεταφοράς και 1 PS. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

### 6.2.3.1 Δεδομένα

Η εισαγωγή του PS τροποποιεί τα δεδομένα όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην ενότητα 6.2.1. Για την παρουσίαση των δεδομένων του δικτύου με PS παρατίθενται μόνο τα δεδομένα που τροποποιούνται σε σχέση με το βασικό δίκτυο χωρίς ελεγκτή.

| Αριθμός ζυγών | Όνομα ζυγού | Τύπος ζυγού | $V_{max}$ (α.μ.) | $V_{min}$ (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|
| 6 | North | SL | 1.5 | 0.9 |
| | South | PV | 1.1 | 0.9 |
| | Lake | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | Main | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | Elm | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | Lakefa | PQ | 1.1 | 0.9 |

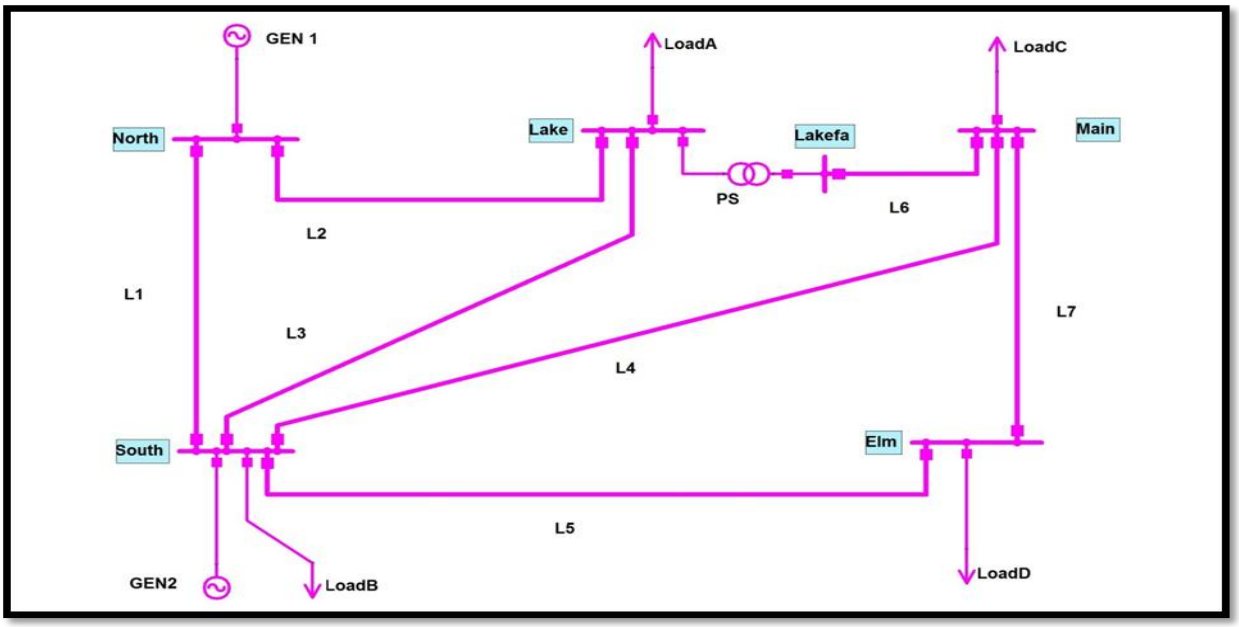
**Πίνακας 6.17:** Δεδομένα ζυγών του δικτύου 5 ζυγών με PS

| Αριθμός γραμμών | Όνομα γραμμής | Από ζυγό | Προς ζυγό | R (α.μ.) | X (α.μ.) | B (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | L1 | North | South | 0.02 | 0.06 | 0.06 |
| | L2 | North | Lake | 0.08 | 0.24 | 0.05 |
| | L3 | South | Lake | 0.06 | 0.18 | 0.04 |
| | L4 | South | Main | 0.06 | 0.18 | 0.04 |
| | L5 | South | Elm | 0.04 | 0.12 | 0.03 |
| | L6 | Lakefa | Main | 0.01 | 0.03 | 0.02 |
| | L7 | Main | Elm | 0.08 | 0.24 | 0.05 |

**Πίνακας 6.18:** Δεδομένα γραμμών του δικτύου 5 ζυγών με PS

| Αριθμός PS | Όνομα PS | Από ζυγό | Προς ζυγό | R (α.μ.) | X (α.μ.) | $T_{min}$ | $T_{max}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | PS1 | Lake | Lakefa | 0 | 0.05 | -10 | 10 |

**Πίνακας 6.19:** Δεδομένα ελεγκτή του δικτύου 5 ζυγών με PS




**Σχήμα 6.5:** Δίκτυο 5 ζυγών με PS

### 6.2.3.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της βέλτιστης ροής φορτίου για αυτό το δίκτυο φαίνονται στους Πίνακες 6.19 έως 6.23.

| Όνομα ζυγού | Μέτρο τάσης (α.μ.) | Γωνία τάσης (◦) | $\lambda_p$ | $\lambda_q$ |
|---|---|---|---|---|
| North | 1.109514 | 0 | 4.041197 | 0 |
| South | 1.1 | -1.30684 | 4.103219 | 0 |
| Lake | 1.077631 | -3.61108 | 4.223216 | 0.021524 |
| Main | 1.078627 | -3.86487 | 4.234288 | 0.018179 |
| Elm | 1.072835 | -4.42475 | 4.263938 | 0.022741 |
| LakePS | 1.079306 | -3.6322 | 4.223487 | 0.020595 |

**Πίνακας 6.20:** Τάσεις ζυγών του δικτύου 5 ζυγών με PS

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GEN(1) | 80.1469 | 0.364147 |
| GEN(2) | 87.905 | 14.444 |
| Σύνολο | 168.0519 | 14.80815 |

**Πίνακας 6.21:** Παραγωγή γεννητριών του δικτύου 5 ζυγών με PS

Με βάση τα δεδομένα και τα αποτελέσματα η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει με χρήση των σχέσεων (3.2) και (3.3) και φαίνεται στον Πίνακα 6.21 για το δίκτυο 5 ζυγών με PS.

Επίσης στον Πίνακα 6.21 φαίνεται και η σύγκριση του αποτελέσματος με το αποτέλεσμα που επιστρέφει το NEPLAN.

| OPF MATLAB Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 747.98 | 747.97 | <0.001 |

**Πίνακας 6.22:** Κόστος παραγωγής του δικτύου 5 ζυγών με PS

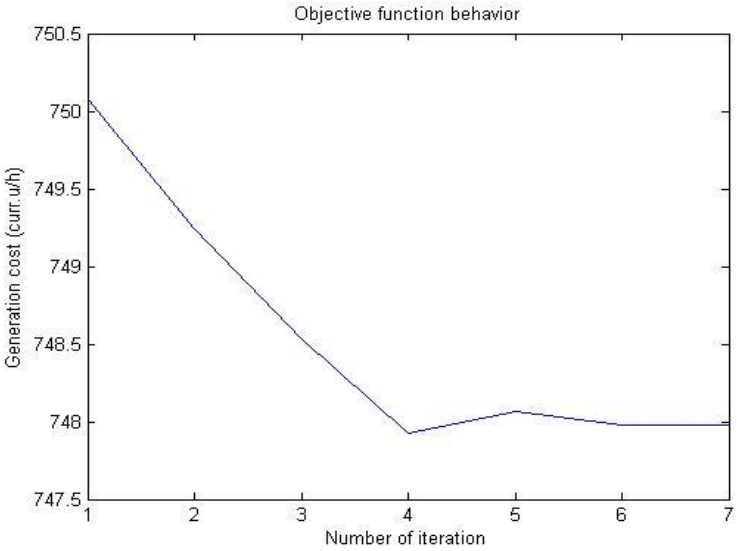
Οι τιμές των λήψεων για το PS, όπως αυτές υπολογίστηκαν από το λογισμικό που αναπτύχθηκε καθώς και οι τιμές που δίνει το NEPLAN φαίνονται στον Πίνακα 6.22.

| Τιμή λήψης (◦) | | |
|---|---|---|
| PS | Διπλωματική εργασία | NEPLAN |
| PS1 | -0.346459 | -0.34 |

**Πίνακας 6.23:** Τιμές λήψης ελεγκτή PS για δίκτυο 5 ζυγών

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.21) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.4) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.

Η συμπεριφορά της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τη σύγκλιση για κάθε επανάληψη που εκτελέστηκε φαίνεται στο Σχήμα 6.6, από όπου προκύπτει ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει έπειτα από έξι επαναλήψεις.




**Σχήμα 6.6:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 5 ζυγών με PS.

Τέλος στον Πίνακα 6.23 εμφανίζεται το αποτέλεσμα της απλής ροής φορτίου όπως αυτό υπολογίστικε με το NEPLAN καθώς και το πλήθος παραβιάσεων μέτρου τάσης στους ζυγούς.

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 779.05 | 0 |

**Πίνακας 6.24:** Αποτελέσματα απλής ροής φορτίου για δίκτυο 5 ζυγών με PS

Από τους Πίνακες 6.24 και 6.22 προκύπτει ότι η βέλτιστη ροή φορτίου εξοικονομεί 779.05-747.98= 31.07 curr. u/h σε σχέση με την απλή ροή φορτίου ή 3.98%.

## 6.2.4 Δίκτυο 5 ζυγών με SVC

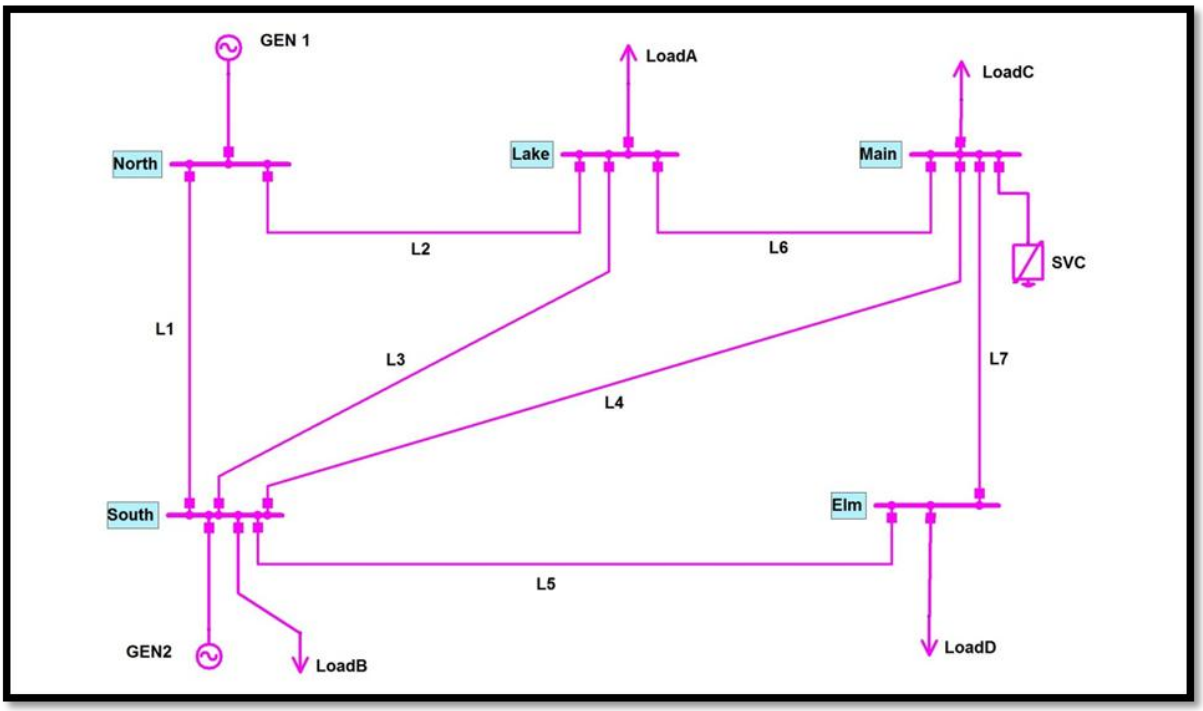
Το δίκτυο αυτό έχει 5 ζυγούς, 7 γραμμές μεταφοράς και 1 SVC. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

### 6.2.4.1 Δεδομένα

Η εισαγωγή του SVC δεν τροποποιεί τα δεδομένα όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην ενότητα 6.2.1. Η μόνη διαφορά είναι τα επιπλέον δεδομένα του SVC (Πίνακας 6.24).

| Αριθμός SVC | Όνομα SVC | Στον ζυγό | $X_c$ (α.μ.) | $X_l$ (α.μ.) | $Fa_{hi}$ (◦) | $Fa_{lo}$ (◦) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | SVC1 | Main | 0.9375 | 0.1625 | 90 | 180 |

**Πίνακας 6.25:** Δεδομένα ελεγκτή του δικτύου 5 ζυγών με SVC




**Σχήμα 6.7:** Δίκτυο 5 ζυγών με SVC

### 6.2.4.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της βέλτιστης ροής φορτίου για αυτό το δίκτυο φαίνονται στους Πίνακες 6.25 έως 6.29:

| Όνομα ζυγού | Μέτρο τάσης (α.μ.) | Γωνία τάσης (◦) | $\lambda_p$ | $\lambda_q$ |
|---|---|---|---|---|
| North | 1.109564 | 0 | 4.04115 | 0 |
| South | 1.1 | -1.304833 | 4.103041 | 0 |
| Lake | 1.083925 | -3.701518 | 4.221735 | 0.006602 |
| Main | 1.085016 | -3.9631 | 4.232414 | 0 |
| Elm | 1.075002 | -4.450453 | 4.26254 | 0.016574 |

**Πίνακας 6.26:** Τάσεις ζυγών του δικτύου 5 ζυγών με SVC

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | 'Αεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GEN(1) | 80.1403 | -2.37141 |
| GEN(2) | 87.8834 | 4.75367 |
| Σύνολο | 168.0237 | 2.38226 |

**Πίνακας 6.27:** Παραγωγή γεννητριών του δικτύου 5 ζυγών με SVC

Με βάση τα δεδομένα και τα αποτελέσματα η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει με χρήση των σχέσεων (3.2) και (3.3) και φαίνεται στον Πίνακα 6.27 για το δίκτυο 5 ζυγών με SVC.

Επίσης στον Πίνακα 6.27 φαίνεται και η σύγκριση του αποτελέσματος με το αποτέλεσμα που επιστρέφει το NEPLAN.

| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 747.865 | 747.864 | <0.001 |

**Πίνακας 6.28:** Κόστος παραγωγής του δικτύου 5 ζυγών με PS

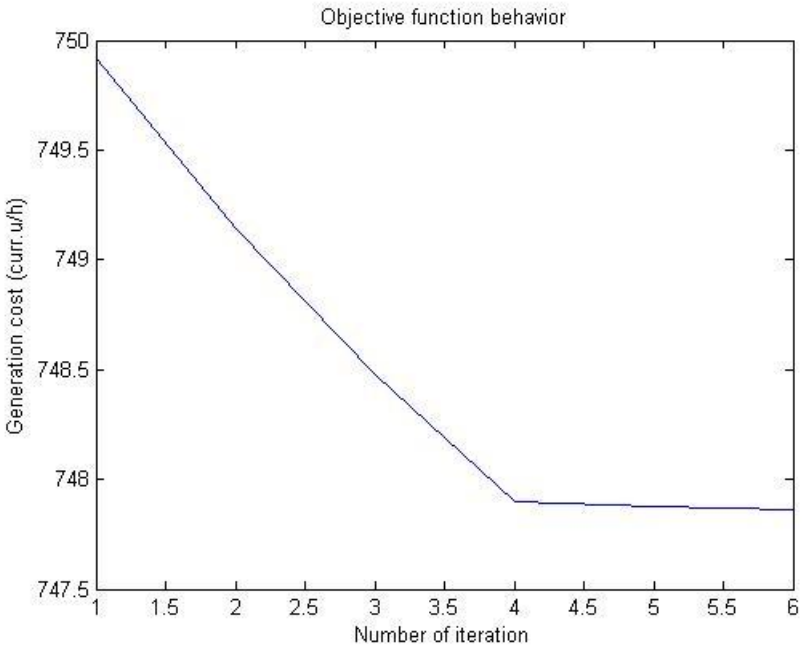
Η γωνία έναυσης όπως αυτή υπολογίστικε από το λογισμικό που αναπτύχθηκε καθώς και οι τιμές που δίνει το NEPLAN φαίνονται στον Πίνακα 6.28.

| Γωνία έναυσης (◦) | | |
|---|---|---|
| SVC | Διπλωματική εργασία | NEPLAN |
| SVC1 | 137.348 | 137.3 |

**Πίνακας 6.29:** Γωνία έναυσης SVC για δίκτυο 5 ζυγών

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.27) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.4) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.

Η συμπεριφορά της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τη σύγκλιση για κάθε επανάληψη που εκτελέστηκε φαίνεται στο Σχήμα 6.8, από όπου προκύπτει ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει έπειτα από τέσσερις επαναλήψεις.




**Σχήμα 6.8:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 5 ζυγών με SVC

Τέλος στον Πίνακα 6.29 εμφανίζεται το αποτέλεσμα της απλής ροής φορτίου όπως αυτό υπολογίστικε με το NEPLAN καθώς και το πλήθος παραβιάσεων μέτρου τάσης στους ζυγούς:

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 776.83 | 0 |

**Πίνακας 6.30:** Αποτέλεσμα απλής ροής φορτίου για δίκτυο 5 ζυγών με SVC

Από τους Πίνακες 6.29 και 6.27 προκύπτει ότι η βέλτιστη ροή φορτίου εξοικονομεί 776.83-747.865= 28.96 curr. u/h σε σχέση με την απλή ροή φορτίου ή 3.72%.

## 6.2.5 Δίκτυο 5 ζυγών με TCSC

Το δίκτυο αυτό έχει 5 κανονικούς ζυγούς και 1 dummy, 7 γραμμές μεταφοράς και 1 TCSC. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

### 6.2.5.1 Δεδομένα

Η εισαγωγή του TCSC τροποποιεί τα δεδομένα όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην ενότητα 6.2.1. Για την παρουσίαση των δεδομένων του δικτύου με TCSC παρατίθενται μόνο τα δεδομένα που τροποποιούνται σε σχέση με το βασικό δίκτυο χωρίς ελεγκτή:

| Αριθμός ζυγών | Όνομα ζυγού | Τύπος ζυγού | $V_{max}$ (α.μ.) | $V_{min}$ (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|
| 6 | North | SL | 1.5 | 0.9 |
| | South | PV | 1.1 | 0.9 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Lake | PQ | 1.1 | 0.9 |
| Main | PQ | 1.1 | 0.9 |
| Elm | PQ | 1.1 | 0.9 |
| LakeTCSC | PQ | 1.1 | 0.9 |

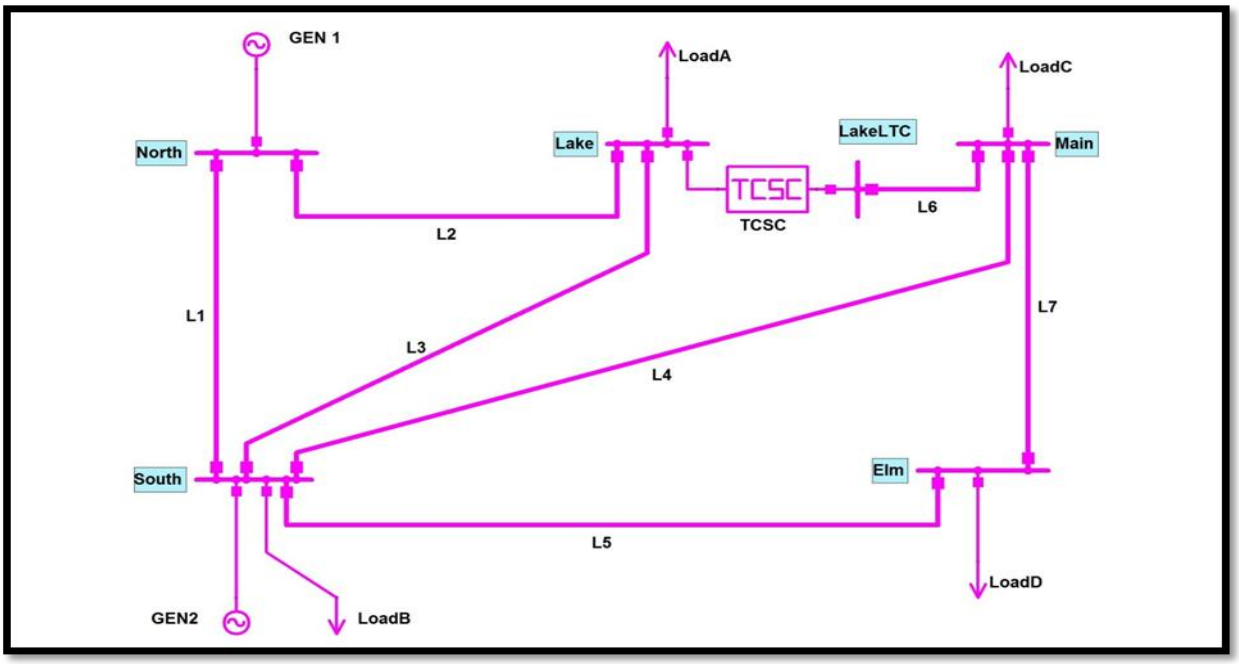
**Πίνακας 6.31:** Δεδομένα ζυγών του δικτύου 5 ζυγών με TCSC

| Αριθμός γραμμών | Όνομα γραμμής | Από ζυγό | Προς ζυγό | R (α.μ.) | X (α.μ.) | B (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | L1 | North | South | 0.02 | 0.06 | 0.06 |
| | L2 | North | Lake | 0.08 | 0.24 | 0.05 |
| | L3 | South | Lake | 0.06 | 0.18 | 0.04 |
| | L4 | South | Main | 0.06 | 0.18 | 0.04 |
| | L5 | South | Elm | 0.04 | 0.12 | 0.03 |
| | L6 | LakeTCSC | Main | 0.01 | 0.03 | 0.02 |
| | L7 | Main | Elm | 0.08 | 0.24 | 0.05 |

**Πίνακας 6.32:** Δεδομένα γραμμών του δικτύου 5 ζυγών με TCSC

| Αριθμός TCSC | Όνομα TCSC | Από ζυγό | Προς ζυγό | X (α.μ.) | $X_{lo}$ | $X_{hi}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | TCSC1 | Lake | LakeTCSC | -0.0015 | -0.05 | 0.05 |

**Πίνακας 6.33:** Δεδομένα TCSC για το δίκτυο 5 ζυγών




**Σχήμα 6.9:** Δίκτυο 5 ζυγών με TCSC

### 6.2.5.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της βέλτιστης ροής φορτίου για αυτό το δίκτυο φαίνονται στους Πίνακες 6.33 έως 6.36:

| Όνομα ζυγού | Μέτρο τάσης (α.μ.) | Γωνία τάσης (◦) | $\lambda_p$ | $\lambda_q$ |
|---|---|---|---|---|
| North | 1.109554 | 0 | 4.041171 | 0 |
| South | 1.1 | -1.30285 | 4.102949 | 0 |
| Lake | 1.086516 | -3.74494 | 4.221282 | -0.00002 |
| Main | 1.084364 | -3.94253 | 4.232021 | 0.001647 |
| Elm | 1.074782 | -4.44286 | 4.262403 | 0.017125 |
| LakeTCSC | 1.086446 | -3.7352 | 4.221283 | 0 |

**Πίνακας 6.34:** Τάσεις ζυγών του δικτύου 5 ζυγών με TCSC

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GEN(1) | 80.1293 | -3.56269 |
| GEN(2) | 87.8854 | 3.79294 |
| Σύνολο | 168.0147 | 0.23025 |

**Πίνακας 6.35:** Παραγωγή του δικτύου 5 ζυγών με TCSC

Με βάση τα δεδομένα και τα αποτελέσματα η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει με χρήση των σχέσεων (3.2) και (3.3) και φαίνεται στον Πίνακα 6.35 για το δίκτυο 5 ζυγών με TCSC.

Επίσης στον Πίνακα 6.35 φαίνεται και η σύγκριση του αποτελέσματος με το αποτέλεσμα που επιστρέφει το NEPLAN.

| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 747.828 | 747.976 | 0.021 |

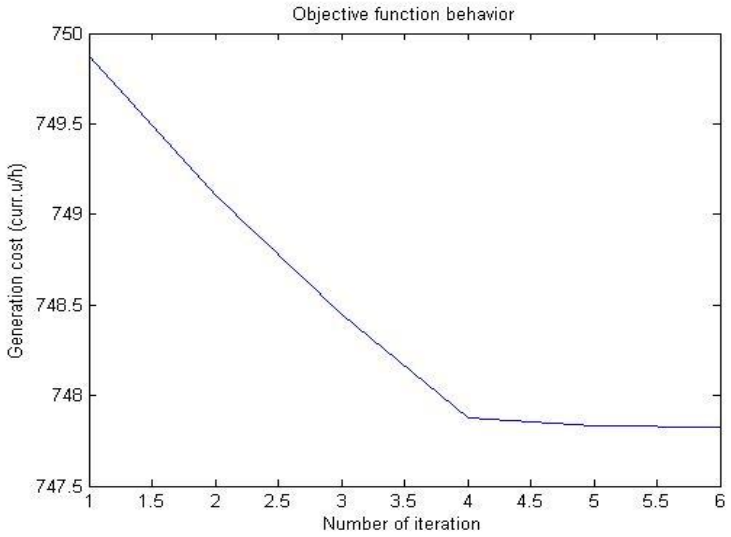
**Πίνακας 6.36:** Κόστος παραγωγής δικτύου 5 ζυγών με TCSC

| Αντίδραση $X_{tcsc}$ (α.μ.) | | |
|---|---|---|
| TCSC | Διπλωματική εργασία | NEPLAN |
| TCSC1 | -0.0012 | -0.0014 |

**Πίνακας 6.37:** Αποτέλεσμα για TCSC σε δίκτυο 5 ζυγών

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.35) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.4) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.

Η συμπεριφορά της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς την σύγκλιση για κάθε επανάληψη που εκτελέστηκε φαίνεται στο Σχήμα 6.10, από όπου προκύπτει ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει έπειτα από 4 επαναλήψεις.




**Σχήμα 6.10:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 5 ζυγών με TCSC

# 6.3 ΔΙΚΤΥΟ 14 ΖΥΓΩΝ

## 6.3.1 Δίκτυο 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή

Το δίκτυο αυτό έχει 14 ζυγούς και 20 γραμμές μεταφοράς. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

### 6.3.1.1 Δεδομένα

| Αριθμός ζυγών | Όνομα ζυγού | Τύπος ζυγού | $V_{max}$ (α.μ.) | $V_{min}$ (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|
| 14 | Ein | SL | 1.5 | 0.9 |
| | Zwei | PV | 1.1 | 0.9 |
| | Drei | PV | 1.1 | 0.9 |
| | Vier | PV | 1.1 | 0.9 |
| | Fuenf | PV | 1.1 | 0.9 |
| | Sechs | PV | 1.1 | 0.9 |
| | Sieben | PV | 1.1 | 0.9 |
| | Acht | PV | 1.1 | 0.9 |
| | Neun | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | Zehn | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | Elf | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | Zwoelf | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | Dreizehn | PQ | 1.1 | 0.9 |
| | Vierzehn | PQ | 1.1 | 0.9 |

**Πίνακας 6.38:** Δεδομένα ζυγών δικτύου 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή

| Αριθμός γραμμών | Όνομα γραμμής | Από ζυγό | Προς ζυγό | R (α.μ.) | X (α.μ.) | B (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | LINE-01-02 | Bus 01 | Bus 02 | 0.092 | 0.28 | 0.09 |
| | LINE-01-05 | Bus 01 | Bus 05 | 0.257 | 0.7 | 0.08 |
| | LINE-02-04 | Bus 02 | Bus 04 | 0.27 | 0.82 | 0.06 |
| | LINE-02-05 | Bus 02 | Bus 05 | 0.27 | 0.827 | 0.06 |
| | LINE-03-02 | Bus 03 | Bus 02 | 0.223 | 0.94 | 0.07 |
| | LINE-03-04 | Bus 03 | Bus 04 | 0.319 | 0.81 | 0.06 |
| | LINE-04-09 | Bus 09 | Bus 04 | 0.003 | 0.055 | 0 |
| | LINE-05-04 | Bus 05 | Bus 04 | 0.063 | 0.2 | 0.02 |
| | LINE-06-05 | Bus 06 | Bus 05 | 0.01 | 0.025 | 0 |
| | LINE-06-11 | Bus 06 | Bus 11 | 0.018 | 0.0378 | 0 |
| | LINE-06-12 | Bus 06 | Bus 12 | 0.023 | 0.0487 | 0 |
| | LINE-06-13 | Bus 06 | Bus 13 | 0.012 | 0.0248 | 0 |
| | LINE-07-04 | Bus 07 | Bus 04 | 0.009 | 0.02 | 0 |
| | LINE-07-09 | Bus 07 | Bus 09 | 0.009 | 0.02 | 0 |
| | LINE-08-07 | Bus 08 | Bus 07 | 0.009 | 0.02 | 0 |
| | LINE-09-10 | Bus 09 | Bus 10 | 0.006 | 0.0165 | 0 |
| | LINE-09-14 | Bus 09 | Bus 14 | 0.024 | 0.051 | 0 |
| | LINE-11-10 | Bus 11 | Bus 10 | 0.015 | 0.0365 | 0 |
| | LINE-12-13 | Bus 12 | Bus 13 | 0.042 | 0.038 | 0 |
| | LINE-14-13 | Bus 14 | Bus 13 | 0.032 | 0.066 | 0 |

**Πίνακας 6.39:** Δεδομένα γραμμών δικτύου 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή

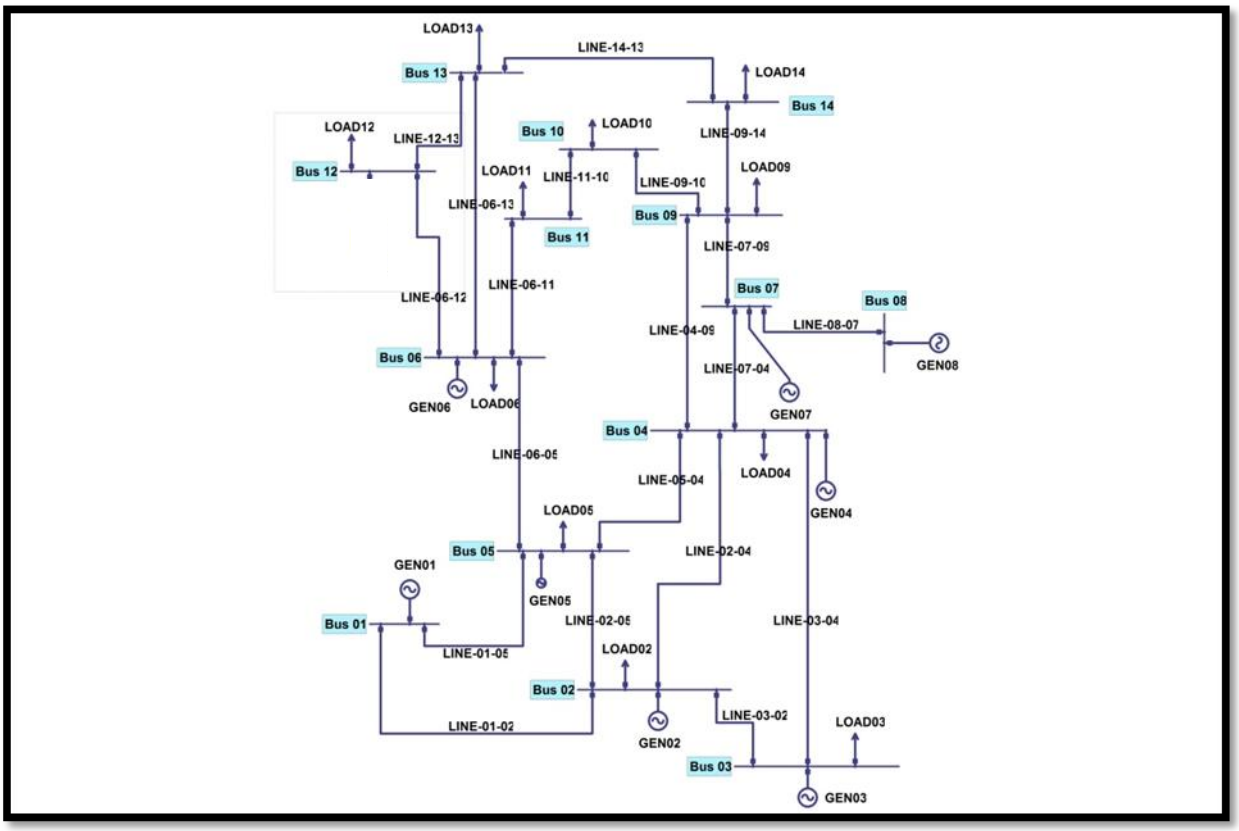
| Αριθμός γενν. | Όνομα γεννήτριας | Ζυγός σύνδεσης | $P_{max}$ (MW) | $P_{min}$ (MW) | $Q_{max}$ (MVar) | $Q_{min}$ (MVar) | Συντ. κόστους a | Συντ. κόστους b | Συντ. κόστους c |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | GEN01 | Bus 01 | 100 | 10 | 50 | -60 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| | GEN02 | Bus 02 | 100 | 10 | 50 | -60 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| | GEN03 | Bus 03 | 100 | 10 | 50 | -60 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| | GEN04 | Bus 04 | 100 | 10 | 50 | -60 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| | GEN05 | Bus 05 | 100 | 10 | 50 | -60 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| | GEN06 | Bus 06 | 100 | 10 | 50 | -60 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| | GEN07 | Bus 07 | 100 | 10 | 50 | -60 | 60 | 3.4 | 0.004 |

**Πίνακας 6.40:** Δεδομένα γεννητριών δικτύου 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή

| Αριθμός φορτίων | Όνομα φορτίου | Ζυγός σύνδεσης | P (MW) | Q (MVar) |
|---|---|---|---|---|
| 11 | LOAD02 | Bus 02 | 10 | 7 |
| | LOAD03 | Bus 03 | 20 | 5 |
| | LOAD04 | Bus 04 | 30 | 5 |
| | LOAD05 | Bus 05 | 10 | 2 |
| | LOAD06 | Bus 06 | 15 | 10 |
| | LOAD09 | Bus 09 | 30 | 22 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| LOAD10 | Bus 10 | 12 | 8 |
| LOAD11 | Bus 11 | 5 | 3 |
| LOAD12 | Bus 12 | 8 | 2 |
| LOAD13 | Bus 13 | 15 | 8 |
| LOAD14 | Bus 14 | 20 | 7 |
| | Σύνολο | 175 | 79 |

**Πίνακας 6.41:** Δεδομένα φορτίων δικτύου 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή




**Σχήμα 6.11.** Δίκτυο 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή

### 6.3.1.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της βέλτιστης ροής φορτίου για αυτό το δίκτυο φαίνονται στους Πίνακες 6.40 έως 6.43:

| Αριθμός ζυγών | Όνομα ζυγού | Τύπος ζυγού | $V_{max}$ (α.μ.) | $V_{min}$ (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|
| Ein | 1.106305 | 0 | 3.5129 | 0 |
| Zwei | 1.1 | -0.67211 | 3.543682 | 0 |
| Drei | 1.099075 | -1.60536 | 3.574151 | 0 |
| Vier | 1.089134 | -3.07946 | 3.650186 | 0 |
| Fuenf | 1.090561 | -2.76442 | 3.630268 | 0 |
| Sechs | 1.088016 | -3.11441 | 3.646773 | 0 |
| Sieben | 1.088603 | -3.10373 | 3.648035 | 0 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Acht | 1.088603 | -3.10373 | 3.648035 | 0 |
| Neun | 1.082467 | -3.35902 | 3.663288 | 0.009148 |
| Zehn | 1.081516 | -3.38453 | 3.66549 | 0.010846 |
| Elf | 1.083703 | -3.28167 | 3.659554 | 0.007476 |
| Zwoelf | 1.084423 | -3.31474 | 3.659743 | 0.004371 |
| Dreizehn | 1.083204 | -3.32622 | 3.663572 | 0.007879 |
| Vierzehn | 1.078365 | -3.57989 | 3.680844 | 0.014787 |

**Πίνακας 6.42:** Τάσεις ζυγών δικτύου 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GEN01 | 13.5442 | -9.95984 |
| GEN02 | 17.877 | -11.7207 |
| GEN03 | 21.7641 | -2.55357 |
| GEN04 | 31.4696 | 11.8396 |
| GEN05 | 28.8694 | -6.85401 |
| GEN06 | 31.0192 | 30.664 |
| GEN07 | 31.1826 | 16.5359 |
| Σύνολο | 175.7261 | 27.95138 |

**Πίνακας 6.43:** Παραγωγή γεννητριών του 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή

Με βάση τα δεδομένα και τα αποτελέσματα η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει με χρήση των σχέσεων (3.2) και (3.3) και φαίνεται στον Πίνακα 6.42 για το δίκτυο 14 ζυγών.

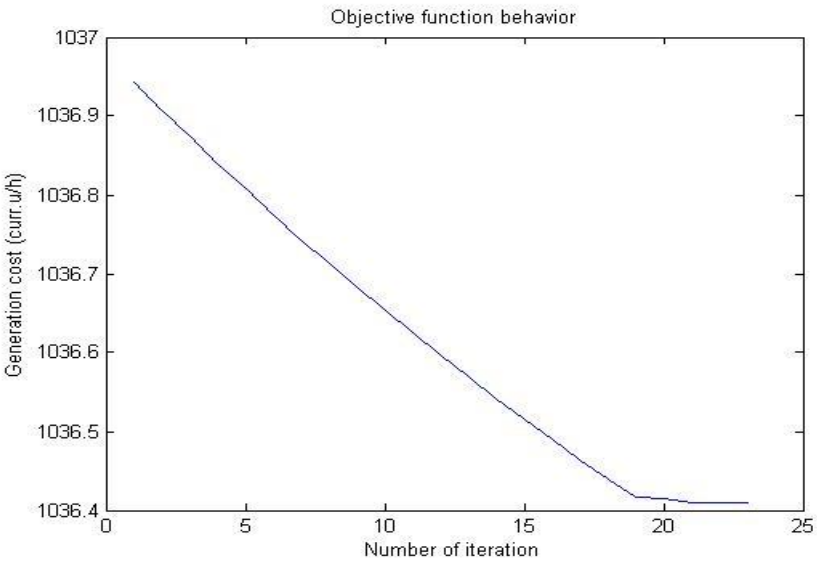
Επίσης στον Πίνακα 6.35 φαίνεται και η σύγκριση του αποτελέσματος με το αποτέλεσμα που επιστρέφει το NEPLAN.

| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 1036.41 | 1036.4 | 0.00096487 |

**Πίνακας 6.44:** Κόστος παραγωγής δικτύου 14 ζυγών

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.43) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.41) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.

Η συμπεριφορά της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς την σύγκλιση για κάθε επανάληψη που εκτελέστηκε φαίνεται στο Σχήμα 6.12, από όπου προκύπτει ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει έπειτα από είκοσι επαναλήψεις.




**Σχήμα 6.12:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή.

Τέλος στον Πίνακα 6.29 εμφανίζεται το αποτέλεσμα της απλής ροής φορτίου όπως αυτό υπολογίστικε με το NEPLAN καθώς και το πλήθος παραβιάσεων μέτρου τάσης στους ζυγούς:

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 1271.8 | 0 |

**Πίνακας 6.45:** Αποτέλεσμα απλής ροής φορτίου για δίκτυο 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή

## 6.3.2 Δίκτυο 14 ζυγών με LTC

Το δίκτυο αυτό έχει 14 κανονικούς ζυγούς και 1 dummy, 20 γραμμές μεταφοράς και 1 LTC. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

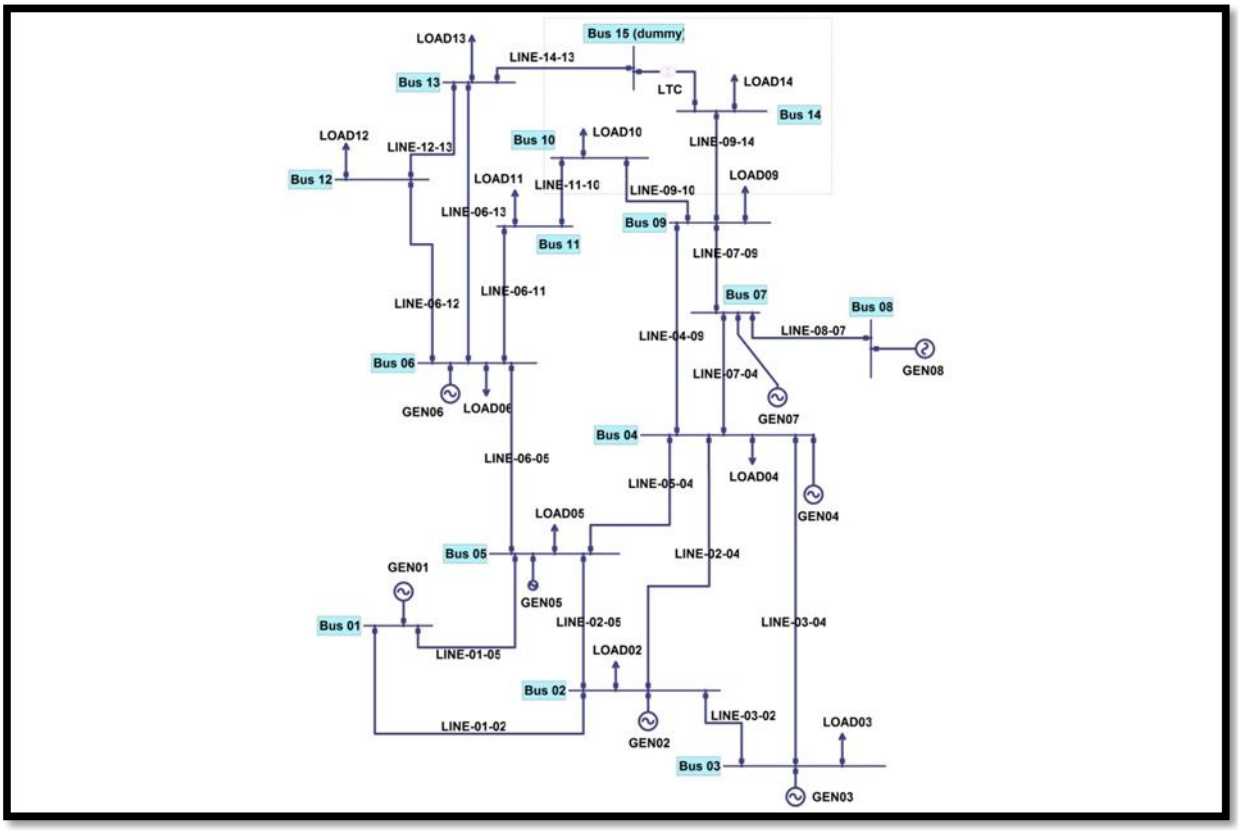
### 6.3.2.1 Δεδομένα

Παρατίθενται μόνο τα δεδομένα που τροποποιούνται σε σχέση με το βασικό δίκτυο χωρίς ελεγκτή:

- Εισαγωγή PQ ζυγού με όνομα Bus 15 (dummy) μεταξύ των ζυγών Bus 13 και Bus 14 με ίδια όρια τάσης.
- Η γραμμή LINE-14-12 καταλήγει πλέον στον ζυγό Bus 15(dummy).
- Το LTC συνδέεται μεταξύ του Bus 15(dummy) και του Bus 14. Αυτό έχει τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 6.44

| Αριθμός LTC | Όνομα LTC | Από ζυγό | Προς ζυγό | R (α.μ.) | X (α.μ.) | $T_{min}$ | $T_{max}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | LTC | Bus 15 (dummy) | Bus 14 | 0 | 0.05 | 0.5 | 1.5 |

**Πίνακας 6.46:** Δεδομένα LTC για το δίκτυο 14 ζυγών




**Σχήμα 6.13.** Δίκτυο 14 ζυγών με LTC

### 6.3.2.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της βέλτιστης ροής φορτίου για αυτό το δίκτυο φαίνονται στους Πίνακες 6.45 έως 6.49:

| Αριθμός ζυγών | Όνομα ζυγού | Τύπος ζυγού | $V_{max}$ (α.μ.) | $V_{min}$ (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|
| Ein | 1.106337 | 0 | 3.512973 | 0 |
| Zwei | 1.1 | -0.67804 | 3.543739 | 0 |
| Drei | 1.098926 | -1.62561 | 3.574102 | 0 |
| Vier | 1.088894 | -3.1097 | 3.650131 | 0 |
| Fuenf | 1.090685 | -2.74901 | 3.630302 | 0 |
| Sechs | 1.088193 | -3.09195 | 3.646754 | 0 |
| Sieben | 1.088758 | -3.14502 | 3.647956 | 0.001 |
| Acht | 1.088758 | -3.14502 | 3.647956 | -0.001 |
| Neun | 1.082622 | -3.40186 | 3.663168 | 0.008334 |
| Zehn | 1.081853 | -3.4198 | 3.665455 | 0.00965 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Elf | 1.084461 | -3.30094 | 3.659606 | 0.005311 |
| Zwoelf | 1.08464 | -3.28292 | 3.659841 | 0.004368 |
| Dreizehn | 1.083529 | -3.28615 | 3.663305 | 0.007723 |
| Vierzehn | 1.078182 | -3.66857 | 3.681041 | 0.01429 |
| Dummy | 1.079125 | -3.47981 | 3.680044 | 0.014251 |

**Πίνακας 6.47:** Τάσεις ζυγών δικτύου 14 ζυγών με LTC

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GEN01 | 13.5436 | -9.96211 |
| GEN02 | 17.8782 | -11.6958 |
| GEN03 | 21.7557 | -2.55763 |
| GEN04 | 31.4679 | 8.76872 |
| GEN05 | 28.8767 | -6.81683 |
| GEN06 | 31.0215 | 28.5437 |
| GEN07 | 31.1775 | 18.6929 |
| Σύνολο | 175.7211 | 24.97295 |

**Πίνακας 6.48:** Παραγωγή ζυγών δικτύου 14 ζυγών με LTC

Με βάση τα δεδομένα και τα αποτελέσματα η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει με χρήση των σχέσεων (3.2) και (3.3) και φαίνεται στο Πίνακα 6.47 για το δίκτυο 14 ζυγών.

Επίσης στον Πίνακα 6.47 φαίνεται και η σύγκριση του αποτελέσματος με το αποτέλεσμα που επιστρέφει το NEPLAN.

| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) |
|---|---|
| 1036.4 | 1036.4 |

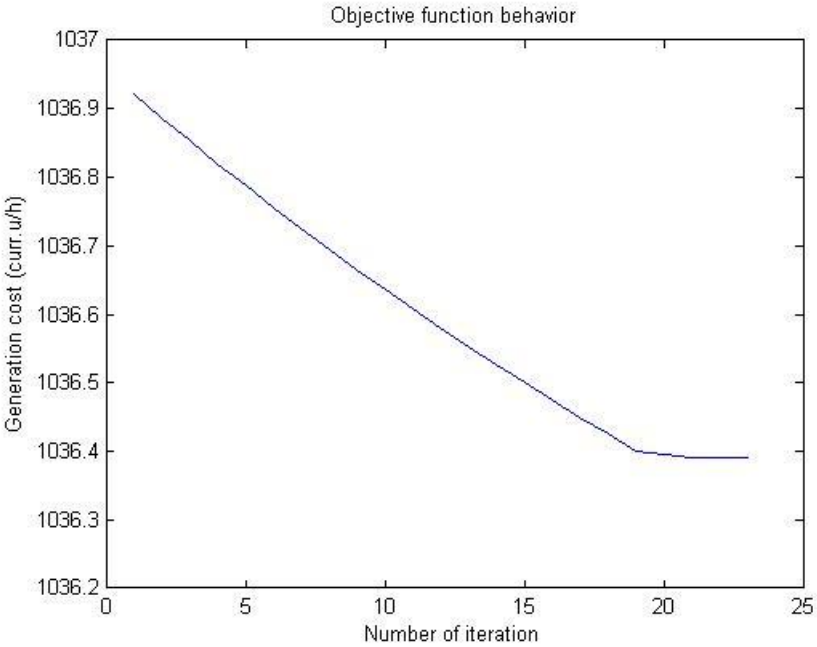
**Πίνακας 6.49:** Κόστος παραγωγής δικτύου 14 ζυγών με LTC

| Τιμή λήψης | | |
|---|---|---|
| LTC | Διπλωματική εργασία | NEPLAN |
| LTC | 1.001 | 1.001 |

**Πίνακας 6.50:** Αποτελέσματα LTC για το δίκτυο 14 ζυγών

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.48) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.41) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.

Η συμπεριφορά της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς την σύγκλιση για κάθε επανάληψη που εκτελέστηκε φαίνεται στο Σχήμα 6.14 , από όπου προκύπτει ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει έπειτα από είκοσι επαναλήψεις.




**Σχήμα 6.14:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 14 ζυγών με LTC.

Τέλος στον Πίνακα 6.49 εμφανίζεται το αποτέλεσμα της απλής ροής φορτίου όπως αυτό υπολογίστικε με το NEPLAN καθώς και το πλήθος παραβιάσεων μέτρου τάσης στους ζυγούς:

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 1152.82 | 0 |

**Πίνακας 6.51:** Αποτέλεσμα απλής ροής φορτίου για το δίκτυο 14 ζυγών ως προς το κόστος παραγωγής

## 6.3.3 Δίκτυο 14 ζυγών με PS

Το δίκτυο αυτό έχει 14 κανονικούς ζυγούς και 1 dummy, 20 γραμμές μεταφοράς και 1 LTC. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

### 6.3.3.1 Δεδομένα

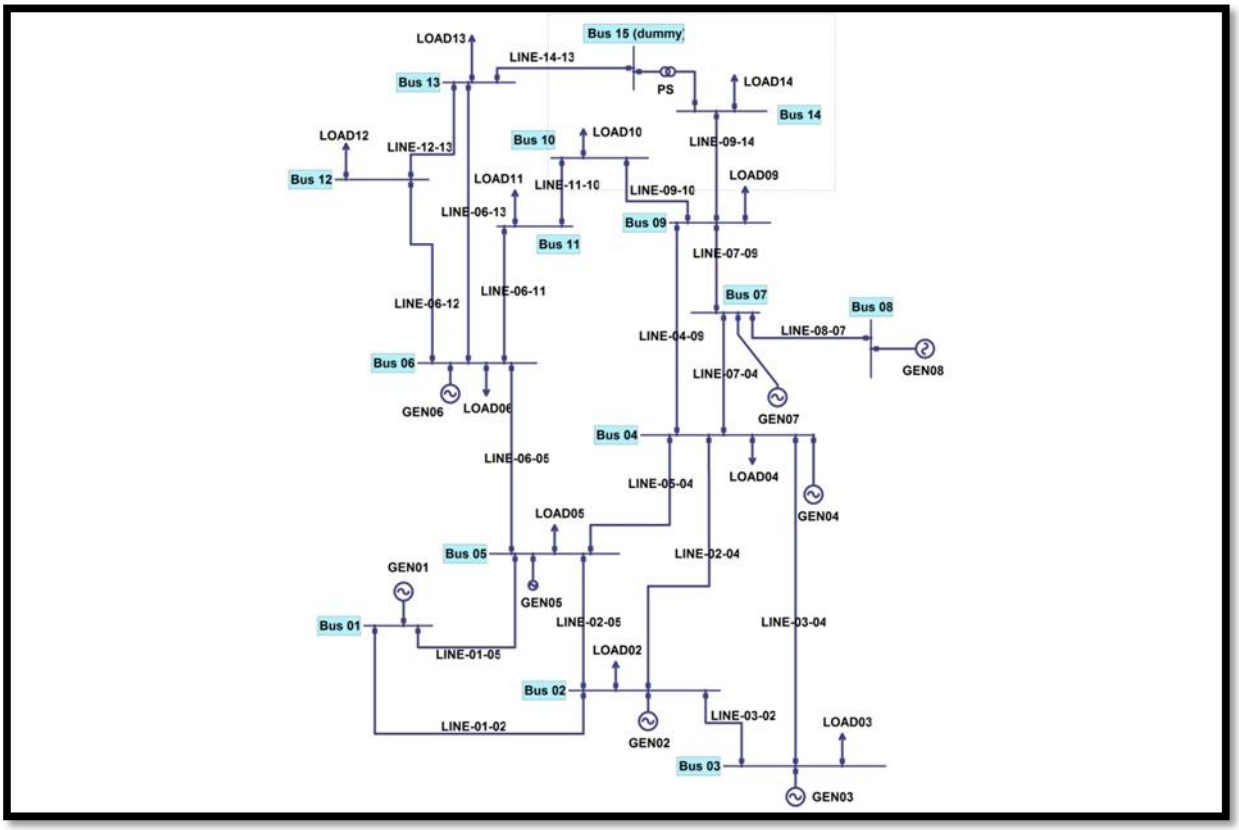
Παρατίθενται μόνο τα δεδομένα που τροποποιούνται σε σχέση με το βασικό δίκτυο χωρίς ελεγκτή:

- Εισαγωγή PQ ζυγού με όνομα Bus 15(dummy) μεταξύ των ζυγών Bus 13 και Bus 14 με ίδια όρια τάσης.

- Η γραμμή LINE-14-12 καταλήγει πλέον στον ζυγό Bus 15(dummy).
- Το PS συνδέεται μεταξύ του Bus 15(dummy) και του Bus 14. Αυτό έχει τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 6.50

| Αριθμός PS | Όνομα PS | Από ζυγό | Προς ζυγό | R (α.μ.) | X (α.μ.) | $T_{min}$ | $T_{max}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | PS | Bus 15 (dummy) | Bus 14 | 0 | 0.05 | -10 | 10 |

**Πίνακας 6.52:** Δεδομένα PS για το δίκτυο 14 ζυγών




**Σχήμα 6.15:** Δίκτυο 14 ζυγών με PS

### 6.3.3.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της βέλτιστης ροής φορτιου φαίνονται στους Πίνακες 6.51 έως 6.55

| Αριθμός ζυγών | Όνομα ζυγού | Τύπος ζυγού | $V_{max}$ (α.μ.) | $V_{min}$ (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|
| Ein | 1.106343 | 0 | 3.512972 | 0 |
| Zwei | 1.1 | -0.67524 | 3.543733 | 0 |
| Drei | 1.098892 | -1.616 | 3.574117 | 0 |
| Vier | 1.088853 | -3.09468 | 3.650089 | 0 |
| Fuenf | 1.090707 | -2.75548 | 3.630318 | 0 |
| Sechs | 1.088218 | -3.1017 | 3.646809 | 0 |
| Sieben | 1.088328 | -3.12058 | 3.647914 | 0 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Acht | 1.088328 | -3.12058 | 3.647914 | 0 |
| Neun | 1.082317 | -3.38037 | 3.663144 | 0.008785 |
| Zehn | 1.081613 | -3.40371 | 3.665412 | 0.010045 |
| Elf | 1.084357 | -3.29723 | 3.659571 | 0.005536 |
| Zwoelf | 1.084686 | -3.29683 | 3.65986 | 0.004402 |
| Dreizehn | 1.083565 | -3.3046 | 3.663519 | 0.007744 |
| Vierzehn | 1.077823 | -3.62478 | 3.680759 | 0.014677 |
| Dummy | 1.079222 | -3.52739 | 3.680655 | 0.014351 |

**Πίνακας 6.53:** Τάσεις ζυγών δικτύου 14 ζυγών με PS

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GEN01 | 13.5421 | -9.96137 |
| GEN02 | 17.8764 | -11.6935 |
| GEN03 | 21.7572 | -2.55921 |
| GEN04 | 31.463 | 11.3072 |
| GEN05 | 28.8793 | -6.80694 |
| GEN06 | 31.0295 | 28.8091 |
| GEN07 | 31.1727 | 15.8818 |
| Σύνολο | 175.7202 | 24.97708 |

**Πίνακας 6.54:** Παραγωγή γεννητριών του 14 ζυγών με PS

Με βάση τα δεδομένα και τα αποτελέσματα η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει με χρήση των σχέσεων (3.2) και (3.3) και φαίνεται στο Πίνακα 6.53 για το δίκτυο 14 ζυγών.

Επίσης στον Πίνακα 6.53 φαίνεται και η σύγκριση του αποτελέσματος με το αποτέλεσμα που επιστρέφει το NEPLAN.

| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 1036.39 | 1036.4 | -0.00096489 |

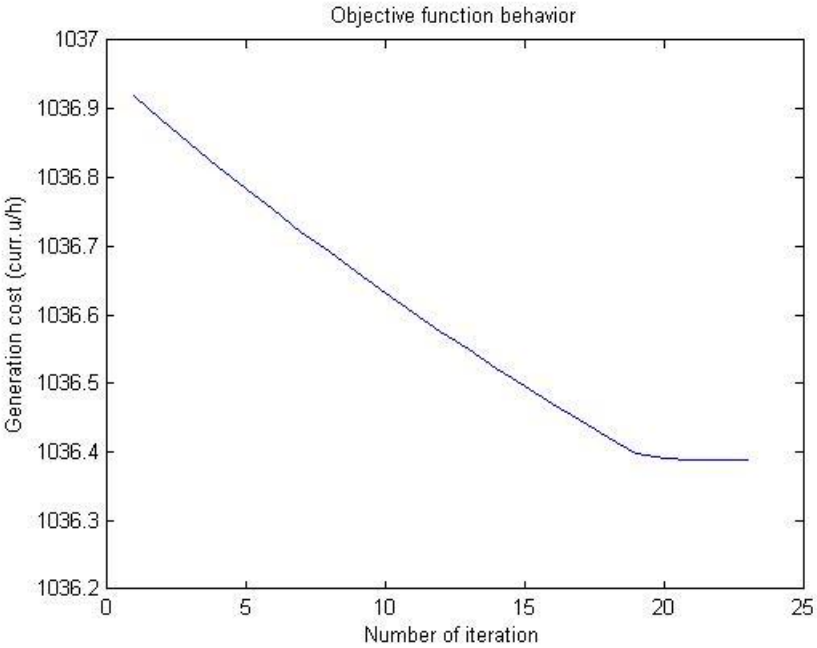
**Πίνακας 6.55:** Κόστος παραγωγής δικτύου 14 ζυγών με PS

| | Λήψη PS (◦) | |
|---|---|---|
| Όνομα PS | Διπλωματική εργασία | NEPLAN |
| PS | -0.1085 | -0.108 |

**Πίνακας 6.56:** Αποτέλεσμα ελεγκτή PS

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.54) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.41) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.

Η συμπεριφορά της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς την σύγκλιση για κάθε επανάληψη που εκτελέστηκε φαίνεται στο Σχήμα 6.16, από όπου προκύπτει ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει έπειτα από είκοσι επαναλήψεις.




**Σχήμα 6.16:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 14 ζυγών με PS.

Τέλος στον Πίνακα 6.55 εμφανίζεται το αποτέλεσμα της απλής ροής φορτίου όπως αυτό υπολογίστικε με το NEPLAN καθώς και το πλήθος παραβιάσεων μέτρου τάσης στους ζυγούς:

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 1236.4 | 0 |

**Πίνακας 6.57:** Αποτέλεσμα απλής ροής φορτίου για το δίκτυο 14 ζυγών ως προς το κόστος παραγωγής με ελεγκτή PS

## 6.3.4 Δίκτυο 14 ζυγών με SVC

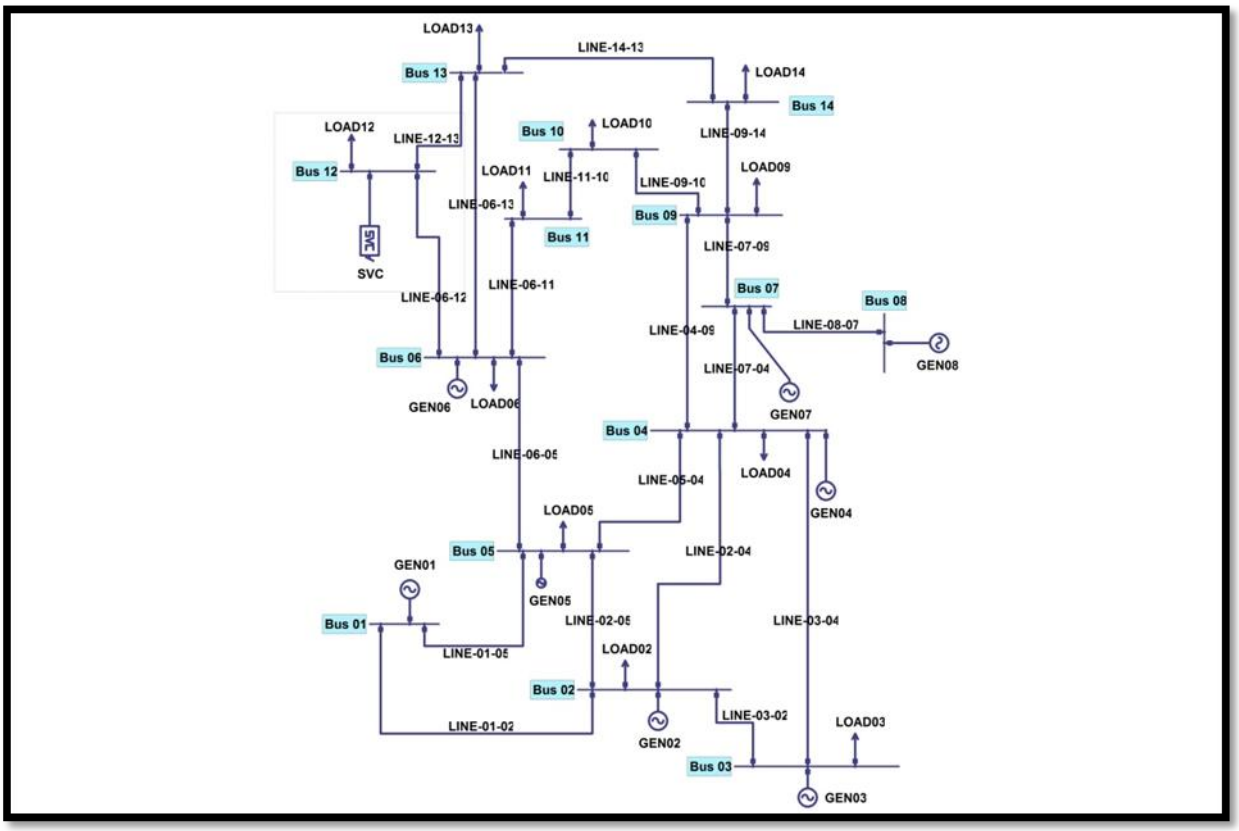
Το δίκτυο αυτό έχει 14 ζυγούς, 20 γραμμές μεταφοράς και 1 SVC. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

### 6.3.4.1 Δεδομένα

Παρατίθενται μόνο τα δεδομένα του ελεγκτή καθώς το δίκτυο παραμένει ίδιο σε σχέση με το βασικό δίκτυο 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή:

| Αριθμός SVC | Όνομα SVC | Στον ζυγό | $X_c$ (α.μ.) | $X_l$ (α.μ.) | $Fa_{hi}$ (◦) | $Fa_{lo}$ (◦) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | SVC1 | Bus 12 | 0.9375 | 0.1625 | 90 | 180 |

**Πίνακας 6.58:** Δεδομένα ελεγκτή SVC για το δίκτυο 14 ζυγών με SVC




**Σχήμα 6.17:** Δίκτυο 14 ζυγών με SVC

### 6.3.4.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της βέλτιστης ροής φορτιου φαίνονται στους Πίνακες 6.57 έως 6.61.

| Όνομα ζυγού | Μέτρο τάσης (α.μ.) | Γωνία τάσης (◦) | $\lambda_p$ | $\lambda_q$ |
|---|---|---|---|---|
| Ein | 1.106292 | 0 | 3.512916 | 0 |
| Zwei | 1.1 | -0.67211 | 3.543697 | 0 |
| Drei | 1.099076 | -1.60509 | 3.574156 | 0 |
| Vier | 1.089138 | -3.07879 | 3.650171 | 0 |
| Fuenf | 1.090528 | -2.76377 | 3.630257 | 0 |
| Sechs | 1.087977 | -3.11373 | 3.646761 | 0 |
| Sieben | 1.088615 | -3.10304 | 3.648019 | 0 |
| Acht | 1.088615 | -3.10304 | 3.648019 | 0 |
| Neun | 1.0825 | -3.35865 | 3.663271 | 0.009104 |
| Zehn | 1.081537 | -3.38415 | 3.665474 | 0.010805 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Elf | 1.083695 | -3.28119 | 3.65954 | 0.00745 |
| Zwoelf | 1.085432 | -3.34816 | 3.659713 | 0 |
| Dreizehn | 1.08352 | -3.33077 | 3.663549 | 0.007198 |
| Vierzehn | 1.078522 | -3.58154 | 3.680816 | 0.014469 |

**Πίνακας 6.59:** Τάσεις ζυγών δικτύου 14 ζυγών με SVC

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GEN01 | 13.5415 | -9.96085 |
| GEN02 | 17.8759 | -11.7116 |
| GEN03 | 21.7637 | -2.55368 |
| GEN04 | 31.4701 | 11.7645 |
| GEN05 | 28.8694 | -6.85871 |
| GEN06 | 31.02 | 26.6697 |
| GEN07 | 31.183 | 16.4576 |
| Σύνολο | 175.7236 | 23.80696 |

**Πίνακας 6.60:** Παραγωγή γεννητριών του 14 ζυγών με SVC

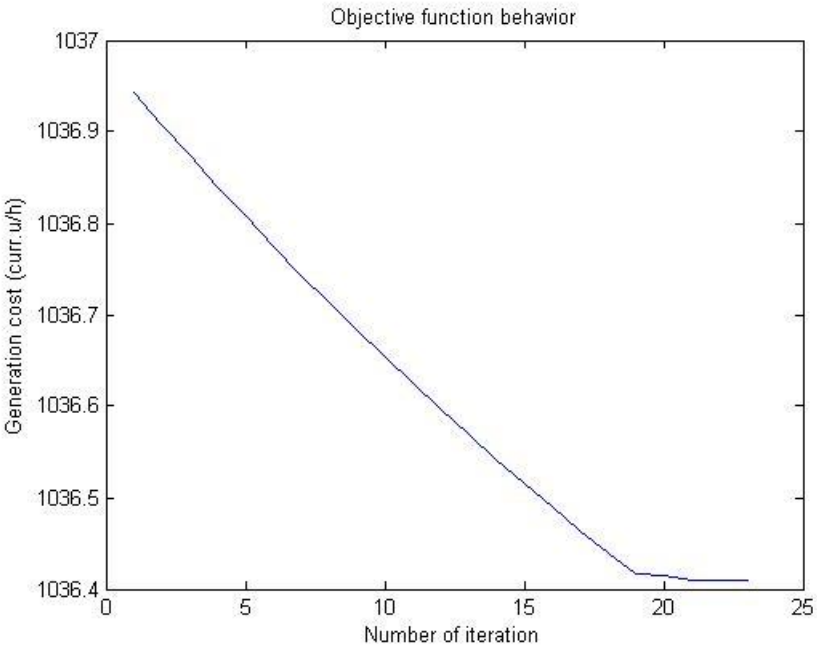
| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 1036.41 | 1036.39 | 0.00192974 |

**Πίνακας 6.61:** Κόστος παραγωγής δικτύου 14 ζυγών με SVC

| SVC F.A. (◦) | | |
|---|---|---|
| Όνομα SVC | Διπλωματική εργασία | NEPLAN |
| SVC1 | 136.294 | 136.29 |

**Πίνακας 6.62:** Αποτελέσματα SVC για το δίκτυο 14 ζυγών

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.60) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.41) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.




**Σχήμα 6.18:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 14 ζυγών με SVC.

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 1211.9 | 0 |

**Πίνακας 6.63:** Αποτελέσματα απλής ροής φορτίου για το δίκτυο 14 ζυγών με SVC ως προς το κόστος παραγωγής

Από τους Πίνακες 6.63 και 6.61 προκύπτει ότι η βέλτιστη ροή φορτίου εξοικονομεί 1211.9-1036.41=175.49 curr. u/h σε σχέση με την απλή ροή φορτίου ή 14.48%.

## 6.3.5 Δίκτυο 14 ζυγών με TCSC

Το δίκτυο αυτό έχει 14 κανονικούς ζυγούς και 1 dummy, 20 γραμμές μεταφοράς και 1 TCSC. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

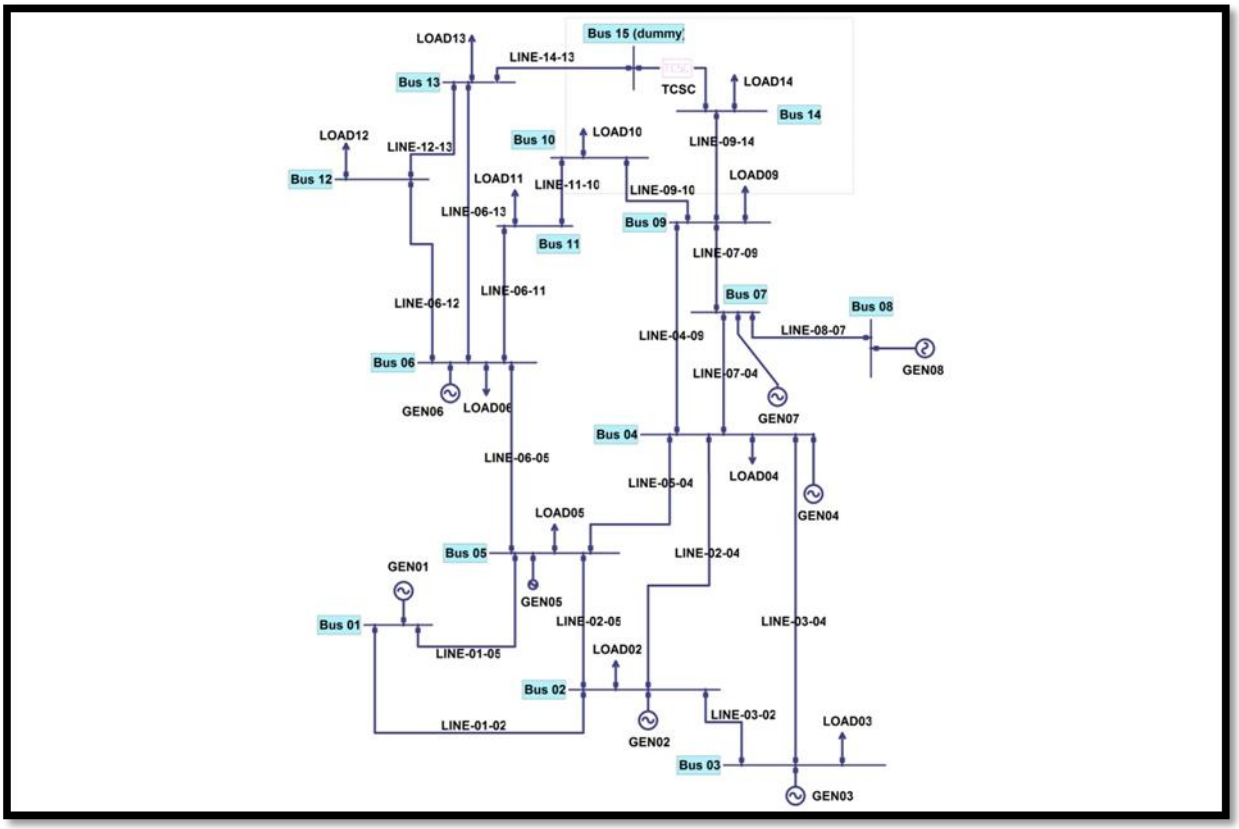
### 6.3.5.1 Δεδομένα

Παρατίθενται μόνο τα δεδομένα που τροποποιούνται σε σχέση με το βασικό δίκτυο χωρίς ελεγκτή:

- Εισαγωγή PQ ζυγού με όνομα Bus 15(dummy) μεταξύ των ζυγών Bus 13 και Bus 14 με ίδια όρια τάσης.
- Η γραμμή LINE-14-12 καταλήγει πλέον στον ζυγό Bus 15(dummy).
- Το TCSC συνδέεται μεταξύ του Bus 15(dummy) και του Bus 14. Αυτό έχει τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 6.62

| Αριθμός TCSC | Όνομα TCSC | Από ζυγό | Προς ζυγό | X (α.μ.) | $X_{lo}$ | $X_{hi}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | TCSC | Bus 15 (dummy) | Bus 14 | -0.033 | -0.09 | 0.09 |

**Πίνακας 6.64:** Δεδομένα TCSC για το δίκτυο 14 ζυγών




**Σχήμα 6.19:** Δίκτυο 14 ζυγών με TCSC

### 6.3.5.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της βέλτιστης ροής φορτιου φαίνονται στους Πίνακες 6.63 έως 6.67.

| Όνομα ζυγού | Μέτρο τάσης (α.μ.) | Γωνία τάσης (◦) | $\lambda_p$ | $\lambda_q$ |
|---|---|---|---|---|
| Ein | 1.105869 | 0 | 3.513645 | 0 |
| Zwei | 1.1 | -0.67139 | 3.544398 | 0 |
| Drei | 1.098676 | -1.59147 | 3.574514 | 0 |
| Vier | 1.088629 | -3.04727 | 3.649669 | 0 |
| Fuenf | 1.09051 | -2.7378 | 3.629813 | 0 |
| Sechs | 1.088025 | -3.08697 | 3.64625 | 0 |
| Sieben | 1.088366 | -3.07077 | 3.647495 | 0 |
| Acht | 1.088366 | -3.07077 | 3.647495 | 0 |
| Neun | 1.083399 | -3.34726 | 3.66274 | 0.006393 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Zehn | 1.082473 | -3.37449 | 3.664923 | 0.007982 |
| Elf | 1.08471 | -3.27586 | 3.658999 | 0.00438 |
| Zwoelf | 1.085037 | -3.29686 | 3.659179 | 0.003202 |
| Dreizehn | 1.084331 | -3.33062 | 3.663005 | 0.003933 |
| Vierzehn | 1.083426 | -3.66752 | 3.680135 | -0.00139 |
| Dummy | 1.083291 | -3.68241 | 3.680046 | -0.00141 |

**Πίνακας 6.65:** Τάσεις ζυγών δικτύου 14 ζυγών με TCSC

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GEN01 | 13.3911 | -10.1366 |
| GEN02 | 17.8023 | -11.4117 |
| GEN03 | 21.743 | -2.57125 |
| GEN04 | 31.5433 | 7.42249 |
| GEN05 | 28.8842 | -6.82016 |
| GEN06 | 31.0759 | 21.7986 |
| GEN07 | 31.2462 | 11.6115 |
| Σύνολο | 175.686 | 9.89288 |

**Πίνακας 6.66:** Παραγωγή γεννητριών του 14 ζυγών με TCSC

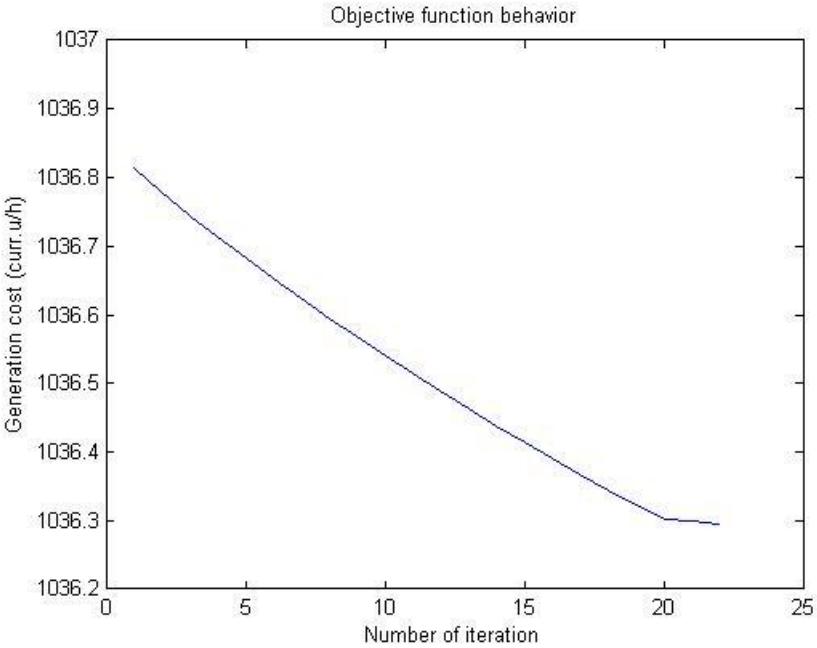
| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 1036.41 | 1036.41 | 0 |

**Πίνακας 6.67:** Κόστος παραγωγής δικτύου 14 ζυγών με TCSC

| $X_{tcsc}$ (pu) | | |
|---|---|---|
| Όνομα TCSC | Διπλωματική εργασία | NEPLAN |
| TCSC1 | -0.03266 | -0.03 |

**Πίνακας 6.68:** Αποτελέσματα TCSC για το δίκτυο 14 ζυγών

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.66) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.41) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.




**Σχήμα 6.67:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 14 ζυγών με TCSC

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 1211.9 | 0 |

**Πίνακας 6.69:** Αποτελέσματα απλής ροής φορτίου για το δίκτυο 14 ζυγών με TCSC ως προς το κόστος παραγωγής

Από τους Πίνακες 6.69 και 6.67 προκύπτει ότι η βέλτιστη ροή φορτίου εξοικονομεί 1211.9-1036.41= 175.49 curr. u/h σε σχέση με την απλή ροή φορτίου ή 14.48%.

# 6.4 ΔΙΚΤΥΟ 68 ΖΥΓΩΝ

## 6.4.1 Δίκτυο 68 ζυγών χωρίς ελεγκτή

Το δίκτυο αυτό έχει 14 ζυγούς, 20 γραμμές μεταφοράς. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

### 6.4.1.1 Δεδομένα

Αριθμός ζυγών: 68
Αριθμός γραμμών: 83
Αριθμός γεννητριών: 16
Αριθμός φορτίων: 52

| Όνομα ζυγού | Τύπος ζυγού | $V_{min}$ (α.μ.) | $V_{max}$ (α.μ.) |
|---|---|---|---|
| Bus1 | SL | 90 | 150 |
| Bus2 | PV | 90 | 110 |
| Bus3 | PV | 90 | 110 |
| Bus4 | PV | 90 | 110 |
| Bus5 | PV | 90 | 110 |
| Bus6 | PV | 90 | 110 |
| Bus7 | PV | 90 | 110 |
| Bus8 | PV | 90 | 110 |
| Bus9 | PV | 90 | 110 |
| Bus10 | PV | 90 | 110 |
| Bus11 | PV | 90 | 110 |
| Bus12 | PV | 90 | 110 |
| Bus13 | PV | 90 | 110 |
| Bus14 | PV | 90 | 110 |
| Bus15 | PV | 90 | 110 |
| Bus16 | PV | 90 | 110 |
| Bus17 | PQ | 90 | 110 |
| Bus18 | PQ | 90 | 110 |
| Bus19 | PQ | 90 | 110 |
| Bus20 | PQ | 90 | 110 |
| Bus21 | PQ | 90 | 110 |
| Bus22 | PQ | 90 | 110 |
| Bus23 | PQ | 90 | 110 |
| Bus24 | PQ | 90 | 110 |
| Bus25 | PQ | 90 | 110 |
| Bus26 | PQ | 90 | 110 |
| Bus27 | PQ | 90 | 110 |
| Bus28 | PQ | 90 | 110 |
| Bus29 | PQ | 90 | 110 |
| Bus30 | PQ | 90 | 110 |
| Bus31 | PQ | 90 | 110 |
| Bus32 | PQ | 90 | 110 |
| Bus33 | PQ | 90 | 110 |
| Bus34 | PQ | 90 | 110 |

| Όνομα ζυγού | Τύπος ζυγού | $V_{min}$ (α.μ.) | $V_{max}$ (α.μ.) |
|---|---|---|---|
| Bus35 | PQ | 90 | 110 |
| Bus36 | PQ | 90 | 110 |
| Bus37 | PQ | 90 | 110 |
| Bus38 | PQ | 90 | 110 |
| Bus39 | PQ | 90 | 110 |
| Bus40 | PQ | 90 | 110 |
| Bus41 | PQ | 90 | 110 |
| Bus42 | PQ | 90 | 110 |
| Bus43 | PQ | 90 | 110 |
| Bus44 | PQ | 90 | 110 |
| Bus45 | PQ | 90 | 110 |
| Bus46 | PQ | 90 | 110 |
| Bus47 | PQ | 90 | 110 |
| Bus48 | PQ | 90 | 110 |
| Bus49 | PQ | 90 | 110 |
| Bus50 | PQ | 90 | 110 |
| Bus51 | PQ | 90 | 110 |
| Bus52 | PQ | 90 | 110 |
| Bus53 | PQ | 90 | 110 |
| Bus54 | PQ | 90 | 110 |
| Bus55 | PQ | 90 | 110 |
| Bus56 | PQ | 90 | 110 |
| Bus57 | PQ | 90 | 110 |
| Bus58 | PQ | 90 | 110 |
| Bus59 | PQ | 90 | 110 |
| Bus60 | PQ | 90 | 110 |
| Bus61 | PQ | 90 | 110 |
| Bus62 | PQ | 90 | 110 |
| Bus63 | PQ | 90 | 110 |
| Bus64 | PQ | 90 | 110 |
| Bus65 | PQ | 90 | 110 |
| Bus66 | PQ | 90 | 110 |
| Bus67 | PQ | 90 | 110 |
| Bus68 | PQ | 90 | 110 |

**Πίνακας 6.70:** Δεδομένα ζυγών δικτύου 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή

| Όνομα γραμμής | Από ζυγό | Προς ζυγό | R (α.μ.) | X (α.μ.) | B (α.μ.) |
|---|---|---|---|---|---|
| LINE-19-20 | Bus20 | Bus19 | 0.002 | 0.015 | 0.025 |
| LINE-06-20 | Bus6 | Bus20 | 0.09 | 0.02 | 0.025 |
| LINE-11-31 | Bus31 | Bus11 | 0.01 | 0.02 | 0.025 |
| LINE-12-32 | Bus12 | Bus32 | 0.008 | 0.01 | 0.025 |
| LINE-05-19 | Bus19 | Bus5 | 0.001 | 0.017 | 0.025 |
| LINE-04-61 | Bus4 | Bus61 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| LINE-63-64 | Bus63 | Bus64 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-62-63 | Bus63 | Bus62 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-10-29 | Bus10 | Bus29 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-02-53 | Bus53 | Bus2 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-34-35 | Bus34 | Bus35 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-07-22 | Bus7 | Bus22 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-13-36 | Bus13 | Bus36 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-01-37 | Bus1 | Bus37 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-09-25 | Bus25 | Bus9 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-03-57 | Bus3 | Bus57 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-65-53 | Bus65 | Bus53 | 0.02 | 0.04 | 0.025 |
| LINE-65-30 | Bus65 | Bus30 | 0.01 | 0.04 | 0.025 |
| LINE-53-54 | Bus53 | Bus54 | 0 | 0.01 | 0.025 |
| LINE-53-25 | Bus53 | Bus25 | 0.015 | 0.02 | 0.025 |
| LINE-54-55 | Bus54 | Bus55 | 0.04 | 0.04 | 0.025 |
| LINE-54-18 | Bus54 | Bus18 | 0.01 | 0.05 | 0.025 |
| LINE-55-56 | Bus55 | Bus56 | 0.009 | 0.01 | 0.025 |
| LINE-55-66 | Bus55 | Bus66 | 0.02 | 0.01 | 0.025 |
| LINE-56-57 | Bus56 | Bus57 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-56-59 | Bus56 | Bus59 | 0.009 | 0.01 | 0.025 |
| LINE-57-58 | Bus57 | Bus58 | 0.02 | 0.02 | 0.025 |
| LINE-57-62 | Bus57 | Bus62 | 0.04 | 0.1 | 0.025 |
| LINE-58-59 | Bus58 | Bus59 | 0.01 | 0.09 | 0.025 |
| LINE-59-60 | Bus59 | Bus60 | 0.02 | 0.04 | 0.025 |
| LINE-60-30 | Bus60 | Bus30 | 0.01 | 0.12 | 0.025 |
| LINE-61-62 | Bus61 | Bus62 | 0.03 | 0.02 | 0.025 |
| LINE-61-64 | Bus61 | Bus64 | 0.01 | 0.04 | 0.025 |
| LINE-64-66 | Bus64 | Bus66 | 0.02 | 0.01 | 0.025 |
| LINE-66-67 | Bus66 | Bus67 | 0.01 | 0.04 | 0.025 |
| LINE-67-68 | Bus67 | Bus68 | 0.02 | 0.01 | 0.025 |
| LINE-68-17 | Bus68 | Bus17 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-68-19 | Bus68 | Bus19 | 0.05 | 0.04 | 0.025 |
| LINE-68-21 | Bus68 | Bus21 | 0.004 | 0.04 | 0.025 |
| LINE-68-24 | Bus68 | Bus24 | 0.02 | 0.1 | 0.025 |
| LINE-17-18 | Bus17 | Bus18 | 0.01 | 0.01 | 0.025 |
| LINE-17-27 | Bus17 | Bus27 | 0.01 | 0.02 | 0.025 |
| LINE-21-22 | Bus21 | Bus22 | 0.03 | 0.04 | 0.025 |
| LINE-22-23 | Bus22 | Bus23 | 0.04 | 0.06 | 0.025 |
| LINE-23-24 | Bus23 | Bus24 | 0.03 | 0.02 | 0.025 |
| LINE-23-08 | Bus23 | Bus8 | 0.01 | 0.009 | 0.025 |
| LINE-25-26 | Bus25 | Bus26 | 0.02 | 0.01 | 0.025 |
| LINE-26-27 | Bus26 | Bus27 | 0.01 | 0.009 | 0.025 |
| LINE-26-28 | Bus26 | Bus28 | 0.04 | 0.02 | 0.025 |
| LINE-26-29 | Bus26 | Bus29 | 0.06 | 0.05 | 0.025 |
| LINE-28-29 | Bus28 | Bus29 | 0.01 | 0.025 | 0.025 |
| LINE-60-36 | Bus60 | Bus36 | 0.02 | 0.08 | 0.025 |
| LINE-36-37 | Bus36 | Bus37 | 0.06 | 0.02 | 0.025 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| LINE-34-36 | Bus34 | Bus36 | 0.01 | 0.04 | 0.025 |
| LINE-33-34 | Bus33 | Bus34 | 0.01 | 0.01 | 0.025 |
| LINE-32-33 | Bus32 | Bus33 | 0.06 | 0.005 | 0.025 |
| LINE-30-31 | Bus30 | Bus31 | 0.03 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-30-32 | Bus30 | Bus32 | 0.01 | 0.04 | 0.025 |
| LINE-65-31 | Bus65 | Bus31 | 0.03 | 0.02 | 0.025 |
| LINE-31-38 | Bus31 | Bus38 | 0.03 | 0.06 | 0.025 |
| LINE-33-38 | Bus33 | Bus38 | 0.03 | 0.06 | 0.025 |
| LINE-38-46 | Bus38 | Bus46 | 0.01 | 0.07 | 0.025 |
| LINE-46-49 | Bus46 | Bus49 | 0 | 0.09 | 0.025 |
| LINE-65-47 | Bus65 | Bus47 | 0.02 | 0.09 | 0.025 |
| LINE-47-48 | Bus47 | Bus48 | 0.04 | 0.1 | 0.025 |
| LINE-48-40 | Bus48 | Bus40 | 0.02 | 0.4 | 0.025 |
| LINE-35-45 | Bus35 | Bus45 | 0.03 | 0.2 | 0.025 |
| LINE-37-43 | Bus37 | Bus43 | 0.04 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-43-44 | Bus43 | Bus44 | 0.02 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-44-45 | Bus44 | Bus45 | 0.02 | 0.05 | 0.025 |
| LINE-39-44 | Bus39 | Bus44 | 0.04 | 0.06 | 0.025 |
| LINE-39-45 | Bus39 | Bus45 | 0 | 0.02 | 0.025 |
| LINE-45-51 | Bus45 | Bus51 | 0.01 | 0.02 | 0.025 |
| LINE-50-52 | Bus50 | Bus52 | 0.01 | 0.03 | 0.025 |
| LINE-50-51 | Bus50 | Bus51 | 0.03 | 0.01 | 0.025 |
| LINE-49-52 | Bus49 | Bus52 | 0.02 | 0.01 | 0.025 |
| LINE-52-42 | Bus52 | Bus42 | 0.04 | 0.09 | 0.025 |
| LINE-42-41 | Bus42 | Bus41 | 0.02 | 0.08 | 0.025 |
| LINE-41-40 | Bus41 | Bus40 | 0.05 | 0.08 | 0.025 |
| LINE-41-14 | Bus41 | Bus14 | 0 | 0.06 | 0.025 |
| LINE-42-15 | Bus42 | Bus15 | 0 | 0.05 | 0.025 |
| LINE-52-16 | Bus52 | Bus16 | 0.03 | 0.2 | 0.025 |
| LINE-65-27 | Bus65 | Bus27 | 0.04 | 0.03 | 0.025 |

**Πίνακας 6.71:** Δεδομένα γραμμών δικτύου 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή

| Όνομα γεννήτριας | Ζυγός σύνδεσης | $P_{max}$ (MW) | $P_{min}$ (MW) | $Q_{max}$ (MVar) | $Q_{min}$ (MVar) | Συντ. κόστους a | Συντ. κόστους b | Συντ. κόστους c |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GNBus1 | Bus1 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus2 | Bus2 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus3 | Bus3 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus4 | Bus4 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus5 | Bus5 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus6 | Bus6 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus7 | Bus7 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus8 | Bus8 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus9 | Bus9 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus10 | Bus10 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus11 | Bus11 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GNBus12 | Bus12 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus13 | Bus13 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus14 | Bus14 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus15 | Bus15 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |
| GNBus16 | Bus16 | 100 | 10 | 500 | -500 | 60 | 3.4 | 0.004 |

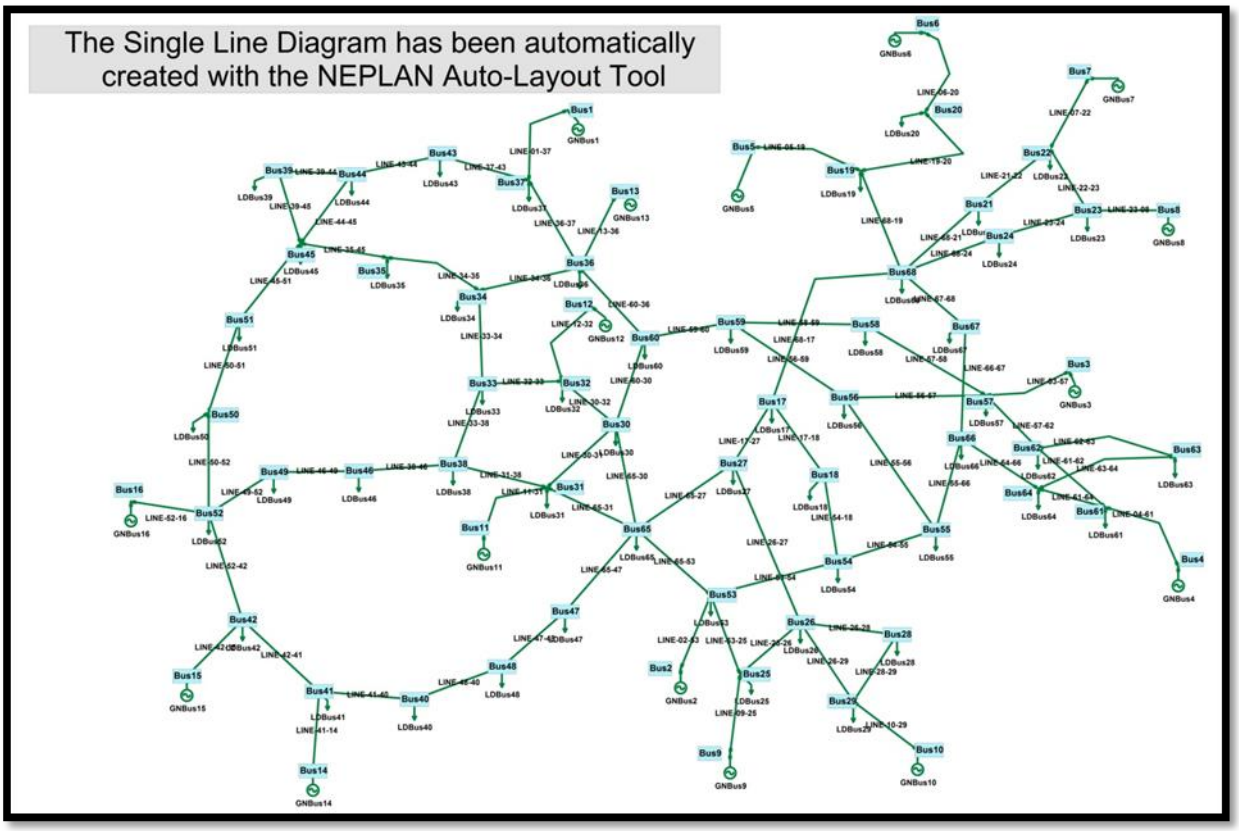
**Πίνακας 6.72:** Δεδομένα γεννητριών δικτύου 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή

Στον Πίνακα 6.72 παρουσιάζονται και τα φορτία τα οποία στην παρούσα φάση είναι αποσυνδεδεμένα με μηδενική ενεργό και άεργο ισχύ. Ο λόγος που παρουσιάζονται είναι διότι αυτά εμφανίζονται και στο σχεδιάγραμμα του δικτύου.

| Όνομα φορτίου | Ζυγός σύνδεσης | P (MW) | Q (MVar) |
|---|---|---|---|
| LDBus17 | Bus17 | 0 | 0 |
| LDBus18 | Bus18 | 10 | 1 |
| LDBus19 | Bus19 | 0 | 0 |
| LDBus20 | Bus20 | 20 | 8 |
| LDBus21 | Bus21 | 20 | 5 |
| LDBus22 | Bus22 | 0 | 0 |
| LDBus23 | Bus23 | 2 | 1 |
| LDBus24 | Bus24 | 10 | -1 |
| LDBus25 | Bus25 | 5 | 5 |
| LDBus26 | Bus26 | 10 | 3 |
| LDBus27 | Bus27 | 30 | 10 |
| LDBus28 | Bus28 | 3 | 7 |
| LDBus29 | Bus29 | 3 | 7 |
| LDBus30 | Bus30 | 0 | 0 |
| LDBus31 | Bus31 | 0 | 0 |
| LDBus32 | Bus32 | 0 | 0 |
| LDBus33 | Bus33 | 10 | 0 |
| LDBus34 | Bus34 | 0 | 0 |
| LDBus35 | Bus35 | 0 | 0 |
| LDBus36 | Bus36 | 10 | -8 |
| LDBus37 | Bus37 | 7 | 3 |
| LDBus38 | Bus38 | 0 | 0 |
| LDBus39 | Bus39 | 10 | 10 |
| LDBus40 | Bus40 | 5 | 2 |
| LDBus41 | Bus41 | 5 | 10 |
| LDBus42 | Bus42 | 10 | 25 |
| LDBus43 | Bus43 | 0 | 0 |
| LDBus44 | Bus44 | 5 | 10 |
| LDBus45 | Bus45 | 10 | 5 |
| LDBus46 | Bus46 | 10 | 5 |
| LDBus47 | Bus47 | 10 | 7 |
| LDBus48 | Bus48 | 20 | 9 |
| LDBus49 | Bus49 | 4 | 4 |
| LDBus50 | Bus50 | 10 | -10 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| LDBus51 | Bus51 | 8 | -10 |
| LDBus52 | Bus52 | 20 | 20 |
| LDBus53 | Bus53 | 0 | 0 |
| LDBus54 | Bus54 | 2 | 2 |
| LDBus55 | Bus55 | 10 | 19 |
| LDBus56 | Bus56 | 0 | 0 |
| LDBus57 | Bus57 | 0 | 0 |
| LDBus58 | Bus58 | 10 | 10 |
| LDBus59 | Bus59 | 5 | 9 |
| LDBus60 | Bus60 | 10 | 4 |
| LDBus61 | Bus61 | 0 | 0 |
| LDBus62 | Bus62 | 0 | 0 |
| LDBus63 | Bus63 | 6 | 2 |
| LDBus64 | Bus64 | 0 | 0 |
| LDBus65 | Bus65 | 5 | 10 |
| LDBus66 | Bus66 | 0 | 0 |
| LDBus67 | Bus67 | 10 | 1 |
| LDBus68 | Bus68 | 10 | 2 |
| | Σύνολο | 335 | 187 |

**Πίνακας 6.73:** Δεδομένα φορτίων δικτύου 14 ζυγών χωρίς ελεγκτή




**Σχήμα 6.21:** Δίκτυο 68 ζυγών χωρίς ελεγκτή

### 6.4.1.2 Αποτελέσματα

| Όνομα ζυγού | Μέτρο τάσης (α.μ.) | Γωνία τάσης (◦) | $\lambda_p$ | $\lambda_q$ |
|---|---|---|---|---|
| Bus1 | 1.089478 | 0 | 3.589062 | 0 |
| Bus2 | 1.090472 | 0.030358 | 3.577519 | 0 |
| Bus3 | 1.09025 | 0.137817 | 3.572221 | 0 |
| Bus4 | 1.090161 | 0.283227 | 3.562054 | 0 |
| Bus5 | 1.09135 | 0.00667 | 3.560849 | 0 |
| Bus6 | 1.1 | -0.079957 | 3.492494 | 0 |
| Bus7 | 1.092195 | 0.263326 | 3.554709 | 0 |
| Bus8 | 1.094056 | 0.102461 | 3.553093 | 0 |
| Bus9 | 1.091301 | -0.003715 | 3.573329 | 0 |
| Bus10 | 1.093608 | 0.054605 | 3.566395 | 0 |
| Bus11 | 1.091389 | -0.123591 | 3.574003 | 0 |
| Bus12 | 1.0957 | -0.136874 | 3.56556 | 0 |
| Bus13 | 1.087386 | 0.066536 | 3.59054 | 0 |
| Bus14 | 1.096402 | 0.756034 | 3.583466 | 0 |
| Bus15 | 1.1 | 0.479878 | 3.586977 | 0 |
| Bus16 | 1.090231 | 1.480191 | 3.594919 | 0 |
| Bus17 | 1.086815 | -0.54589 | 3.608856 | -0.005 |
| Bus18 | 1.086836 | -0.562711 | 3.609479 | -0.00528 |
| Bus19 | 1.09157 | -0.158973 | 3.562051 | -0.00016 |
| Bus20 | 1.09064 | -0.215133 | 3.562867 | -0.00101 |
| Bus21 | 1.086606 | -0.455279 | 3.602309 | -0.00576 |
| Bus22 | 1.092 | -0.042656 | 3.566218 | -0.00345 |
| Bus23 | 1.092829 | -0.010358 | 3.564459 | -0.00378 |
| Bus24 | 1.089167 | -0.209922 | 3.593439 | -0.00993 |
| Bus25 | 1.089573 | -0.321138 | 3.586348 | -0.0006 |
| Bus26 | 1.08679 | -0.436111 | 3.604127 | -0.00053 |
| Bus27 | 1.08507 | -0.545548 | 3.614968 | -0.00049 |
| Bus28 | 1.089097 | -0.335494 | 3.585732 | 0.00409 |
| Bus29 | 1.090576 | -0.225147 | 3.578846 | 0.00243 |
| Bus30 | 1.091038 | -0.395866 | 3.590972 | -0.00402 |
| Bus31 | 1.090731 | -0.367758 | 3.587044 | -0.0044 |
| Bus32 | 1.094632 | -0.254207 | 3.575399 | -0.00232 |
| Bus33 | 1.088755 | -0.509668 | 3.620085 | -0.01417 |
| Bus34 | 1.089008 | -0.514269 | 3.619538 | -0.01414 |
| Bus35 | 1.088091 | -0.615627 | 3.629941 | -0.01524 |
| Bus36 | 1.089145 | -0.347854 | 3.604917 | -0.00872 |
| Bus37 | 1.088914 | -0.369965 | 3.603336 | -0.00355 |
| Bus38 | 1.08904 | -0.597019 | 3.61181 | -0.00916 |
| Bus39 | 1.077205 | -1.30716 | 3.685715 | -0.01225 |
| Bus40 | 1.088851 | -0.404396 | 3.593504 | 0.001567 |
| Bus41 | 1.091825 | 0.097351 | 3.583466 | 0 |
| Bus42 | 1.090827 | -0.078234 | 3.58698 | 0.000314 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Bus43 | 1.080514 | -0.780272 | 3.66293 | -0.01004 |
| Bus44 | 1.077889 | -1.063665 | 3.678706 | -0.0088 |
| Bus45 | 1.079072 | -1.270218 | 3.683088 | -0.01263 |
| Bus46 | 1.083232 | -0.88329 | 3.640183 | -0.00149 |
| Bus47 | 1.07889 | -1.418812 | 3.614095 | 0.005575 |
| Bus48 | 1.074875 | -1.982404 | 3.619047 | 0.007764 |
| Bus49 | 1.082347 | -0.892513 | 3.643441 | 0.000113 |
| Bus50 | 1.083875 | -1.288744 | 3.662354 | -0.01947 |
| Bus51 | 1.081068 | -1.373225 | 3.682755 | -0.02567 |
| Bus52 | 1.083048 | -0.874056 | 3.639447 | -0.00044 |
| Bus53 | 1.089262 | -0.304885 | 3.590875 | -0.00184 |
| Bus54 | 1.089109 | -0.358357 | 3.591879 | -0.00213 |
| Bus55 | 1.087448 | -0.330883 | 3.5942 | 0.001897 |
| Bus56 | 1.088224 | -0.333255 | 3.590105 | -0.00043 |
| Bus57 | 1.088801 | -0.182822 | 3.585171 | -0.00119 |
| Bus58 | 1.086435 | -0.272608 | 3.593659 | 0.00222 |
| Bus59 | 1.086068 | -0.381717 | 3.602369 | 0.002181 |
| Bus60 | 1.087391 | -0.504104 | 3.604117 | -0.00434 |
| Bus61 | 1.09106 | -0.057426 | 3.574151 | -0.00603 |
| Bus62 | 1.091185 | -0.150861 | 3.577951 | -0.00751 |
| Bus63 | 1.090086 | -0.276528 | 3.586041 | -0.00907 |
| Bus64 | 1.090342 | -0.308158 | 3.58341 | -0.00871 |
| Bus65 | 1.087138 | -0.499173 | 3.602813 | 0.000599 |
| Bus66 | 1.088978 | -0.362283 | 3.590299 | -0.00759 |
| Bus67 | 1.087453 | -0.507348 | 3.603527 | -0.00868 |
| Bus68 | 1.087677 | -0.474003 | 3.601811 | -0.0077 |

**Πίνακας 6.74:** Τάσεις ζυγών δικτύου 68 ζυγών χωρίς ελεγκτή

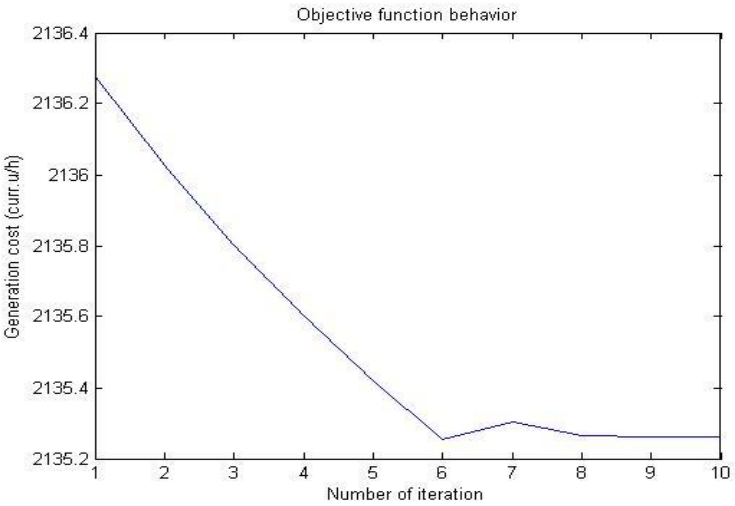
| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GNBus1 | 23.6201 | -7.2268 |
| GNBus2 | 22.19 | -4.41596 |
| GNBus3 | 21.5272 | -3.33448 |
| GNBus4 | 20.2565 | -11.4337 |
| GNBus5 | 20.1077 | -4.06035 |
| GNBus6 | 11.5708 | -2.0861 |
| GNBus7 | 19.3384 | -7.16924 |
| GNBus8 | 19.1363 | -7.8159 |
| GNBus9 | 21.6661 | -2.36432 |
| GNBus10 | 20.7993 | 2.67044 |
| GNBus11 | 21.7499 | -8.71849 |
| GNBus12 | 20.6943 | -6.33478 |
| GNBus13 | 23.8148 | -15.6886 |
| GNBus14 | 22.9359 | 6.99255 |
| GNBus15 | 23.376 | 18.7817 |
| GNBus16 | 24.3656 | -0.726732 |
| Σύνολο | 337.1489 | -52.9308 |

**Πίνακας 6.75:** Παραγωγή γεννητριών του δικτύου 68 ζυγών χωρίς ελεγκτή

| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 2135.26 | 2135.23 | 0.001405 |

**Πίνακας 6.76:** Κόστος παραγωγής δικτύου 68 ζυγών χωρίς ελεγκτή

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.75) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.73) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.




**Σχήμα 6.22:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 68 ζυγών χωρίς ελεγκτή

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 4683.3 | 1 |

**Πίνακας 6.77:** Αποτελέσματα απλής ροής φορτίου για το δίκτυο 68 ζυγών χωρίς ελεγκτή ως προς το κόστος παραγωγής

Από τους Πίνακες 6.77 και 6.76 προκύπτει ότι η βέλτιστη ροή φορτίου εξοικονομεί 4683.3-2135.26=2548.04 curr. u/h σε σχέση με την απλή ροή φορτίου ή 54.4%.

## 6.4.2 Δίκτυο 68 ζυγών με LTC

Το δίκτυο αυτό έχει 68 κανονικούς ζυγούς και 1 dummy, 83 γραμμές μεταφοράς και 1 LTC. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

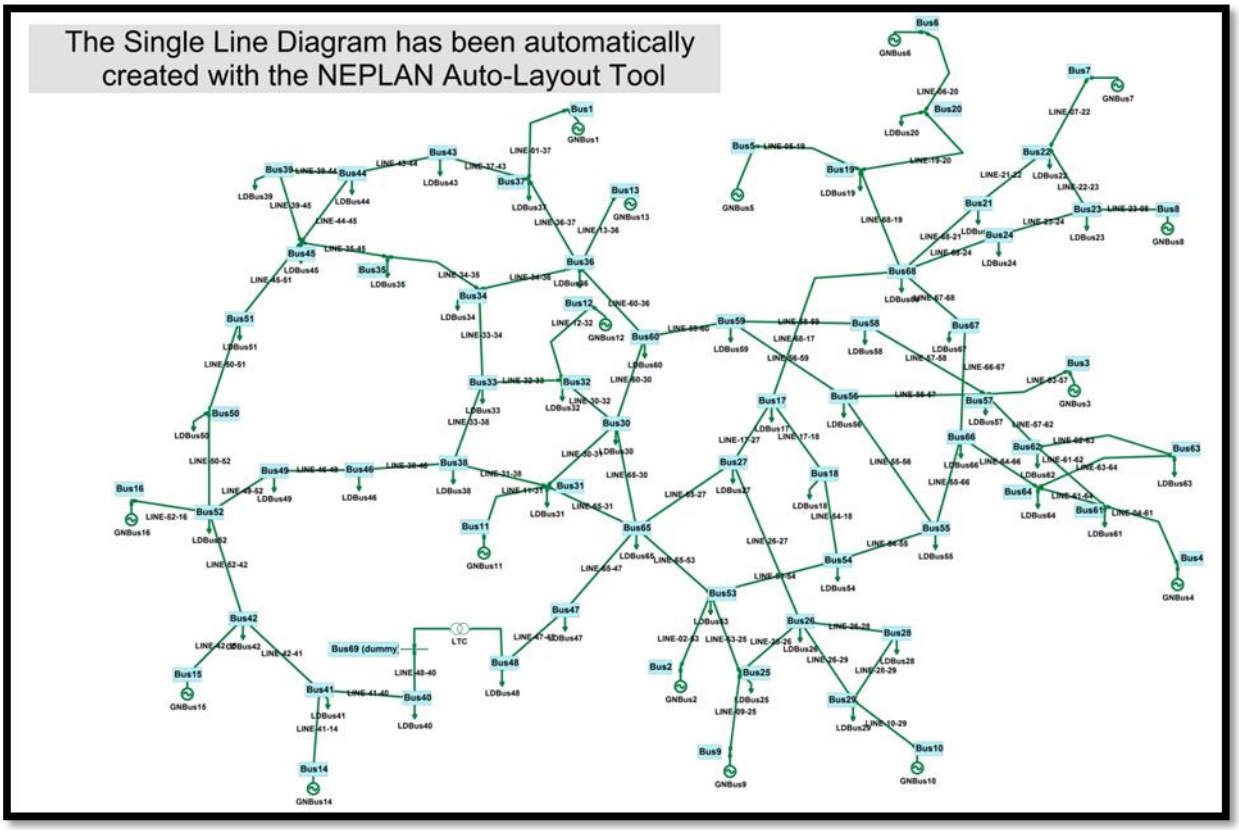
### 6.4.2.1 Δεδομένα

Παρατίθενται μόνο τα δεδομένα που τροποποιούνται σε σχέση με το βασικό δίκτυο χωρίς ελεγκτή:

- Εισαγωγή PQ ζυγού με όνομα Bus 69(dummy) μεταξύ των ζυγών Bus 40 και Bus 48 με ίδια όρια τάσης.
- Η γραμμή LINE-48-45 καταλήγει πλέον στον ζυγό Bus 69 (dummy).
- Το LTC συνδέεται μεταξύ του Bus 69(dummy) και του Bus 48. Αυτό έχει τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 6.78

| Αριθμός LTC | Όνομα LTC | Από ζυγό | Προς ζυγό | R (α.μ.) | X (α.μ.) | $T_{min}$ | $T_{max}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | LTC | Bus 69 (dummy) | Bus 48 | 0 | 0.05 | 0.5 | 1.5 |

**Πίνακας 6.78:** Δεδομένα LTC για το δίκτυο 68 ζυγών




**Σχήμα 6.23:** Δίκτυο 68 ζυγών με LTC

### 6.4.2.2 Αποτελέσματα

| Όνομα ζυγού | Μέτρο τάσης (α.μ.) | Γωνία τάσης (◦) | $\lambda_p$ | $\lambda_q$ |
|---|---|---|---|---|
| Bus1 | 1.089417 | 0 | 3.589133 | 0 |
| Bus2 | 1.0904 | 0.025045 | 3.577771 | 0 |
| Bus3 | 1.090199 | 0.134284 | 3.572388 | 0 |
| Bus4 | 1.090108 | 0.279635 | 3.562212 | 0 |
| Bus5 | 1.091329 | 0.00268 | 3.560977 | 0 |
| Bus6 | 1.1 | -0.084 | 3.492591 | 0 |
| Bus7 | 1.092489 | 0.25179 | 3.554866 | 0.001 |
| Bus8 | 1.094057 | 0.098892 | 3.553234 | 0 |
| Bus9 | 1.091239 | -0.00902 | 3.573543 | 0 |
| Bus10 | 1.093552 | 0.049303 | 3.566573 | 0 |
| Bus11 | 1.091337 | -0.12926 | 3.574179 | 0 |
| Bus12 | 1.095616 | -0.14003 | 3.565833 | 0 |
| Bus13 | 1.087318 | 0.0656 | 3.590667 | 0 |
| Bus14 | 1.096452 | 0.785149 | 3.582437 | 0 |
| Bus15 | 1.1 | 0.496855 | 3.586156 | 0 |
| Bus16 | 1.090198 | 1.484829 | 3.594666 | 0 |
| Bus17 | 1.086782 | -0.55242 | 3.609079 | -0.00513 |
| Bus18 | 1.086799 | -0.56905 | 3.609712 | -0.00539 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Bus19 | 1.09156 | -0.16313 | 3.562179 | -0.00016 |
| Bus20 | 1.09063 | -0.21921 | 3.562996 | -0.001 |
| Bus21 | 1.086686 | -0.46164 | 3.602496 | -0.00605 |
| Bus22 | 1.092163 | -0.05208 | 3.566375 | -0.00416 |
| Bus23 | 1.092849 | -0.01518 | 3.564611 | -0.00393 |
| Bus24 | 1.089178 | -0.21487 | 3.593617 | -0.01007 |
| Bus25 | 1.089518 | -0.32703 | 3.586581 | -0.00062 |
| Bus26 | 1.086739 | -0.44247 | 3.604359 | -0.00059 |
| Bus27 | 1.085022 | -0.55237 | 3.61521 | -0.00058 |
| Bus28 | 1.089048 | -0.34148 | 3.585933 | 0.004068 |
| Bus29 | 1.090525 | -0.23091 | 3.579039 | 0.002416 |
| Bus30 | 1.090972 | -0.40139 | 3.591241 | -0.00404 |
| Bus31 | 1.090679 | -0.3737 | 3.587235 | -0.0044 |
| Bus32 | 1.094549 | -0.25766 | 3.57569 | -0.00233 |
| Bus33 | 1.0887 | -0.51187 | 3.62017 | -0.01417 |
| Bus34 | 1.088954 | -0.51598 | 3.619606 | -0.01414 |
| Bus35 | 1.088037 | -0.61667 | 3.629989 | -0.01524 |
| Bus36 | 1.089079 | -0.34912 | 3.605057 | -0.00873 |
| Bus37 | 1.088853 | -0.37015 | 3.603414 | -0.00356 |
| Bus38 | 1.088988 | -0.59938 | 3.611885 | -0.00917 |
| Bus39 | 1.077143 | -1.30406 | 3.685707 | -0.01227 |
| Bus40 | 1.08877 | -0.35313 | 3.592392 | 0.001577 |
| Bus41 | 1.091828 | 0.130197 | 3.582437 | 0 |
| Bus42 | 1.090827 | -0.0588 | 3.586159 | 0.000338 |
| Bus43 | 1.080461 | -0.77876 | 3.662904 | -0.01004 |
| Bus44 | 1.077832 | -1.06124 | 3.678689 | -0.0088 |
| Bus45 | 1.079007 | -1.26699 | 3.683097 | -0.01265 |
| Bus46 | 1.083203 | -0.88135 | 3.63999 | -0.00147 |
| Bus47 | 1.078895 | -1.44802 | 3.614548 | 0.005546 |
| Bus48 | 1.07498 | -2.03483 | 3.619538 | 0.00776 |
| Bus49 | 1.082294 | -0.8857 | 3.643273 | 0.000099 |
| Bus50 | 1.08384 | -1.28281 | 3.662089 | -0.01945 |
| Bus51 | 1.081008 | -1.36871 | 3.682696 | -0.02569 |
| Bus52 | 1.083013 | -0.86643 | 3.639137 | -0.00043 |
| Bus53 | 1.089201 | -0.31095 | 3.591148 | -0.00188 |
| Bus54 | 1.089051 | -0.36413 | 3.592151 | -0.00216 |
| Bus55 | 1.087401 | -0.33552 | 3.594419 | 0.001866 |
| Bus56 | 1.088176 | -0.33757 | 3.590306 | -0.00045 |
| Bus57 | 1.088752 | -0.18676 | 3.585353 | -0.00119 |
| Bus58 | 1.086386 | -0.27651 | 3.593838 | 0.002216 |
| Bus59 | 1.08602 | -0.38547 | 3.602537 | 0.00219 |
| Bus60 | 1.087335 | -0.50741 | 3.604289 | -0.00433 |
| Bus61 | 1.091014 | -0.06148 | 3.574322 | -0.00605 |
| Bus62 | 1.09114 | -0.15495 | 3.578123 | -0.00753 |
| Bus63 | 1.090043 | -0.28084 | 3.586218 | -0.0091 |
| Bus64 | 1.090302 | -0.31274 | 3.583594 | -0.00875 |
| Bus65 | 1.087068 | -0.50754 | 3.603204 | 0.000546 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Bus66 | 1.08894 | -0.36715 | 3.590495 | -0.00766 |
| Bus67 | 1.087443 | -0.5128 | 3.603718 | -0.0088 |
| Bus68 | 1.087675 | -0.48015 | 3.602004 | -0.00791 |
| Bus69 dummy | 1.074234 | -1.84008 | 3.618101 | 0.007724 |

**Πίνακας 6.79:** Τάσεις ζυγών δικτύου 68 ζυγών με LTC

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GNBus1 | 23.629 | -7.22925 |
| GNBus2 | 22.2214 | -4.46807 |
| GNBus3 | 21.5482 | -3.34857 |
| GNBus4 | 20.2762 | -11.464 |
| GNBus5 | 20.1238 | -4.12166 |
| GNBus6 | 11.5831 | -2.08413 |
| GNBus7 | 19.358 | -6.69874 |
| GNBus8 | 19.154 | -8.0615 |
| GNBus9 | 21.693 | -2.39922 |
| GNBus10 | 20.8215 | 2.64687 |
| GNBus11 | 21.7719 | -8.72646 |
| GNBus12 | 20.7285 | -6.36376 |
| GNBus13 | 23.8307 | -15.6987 |
| GNBus14 | 22.8071 | 7.07896 |
| GNBus15 | 23.2732 | 18.7805 |
| GNBus16 | 24.3339 | -0.722446 |
| Σύνολο | 337.1535 | -52.8802 |

**Πίνακας 6.80:** Παραγωγή γεννητριών του 68 ζυγών με LTC

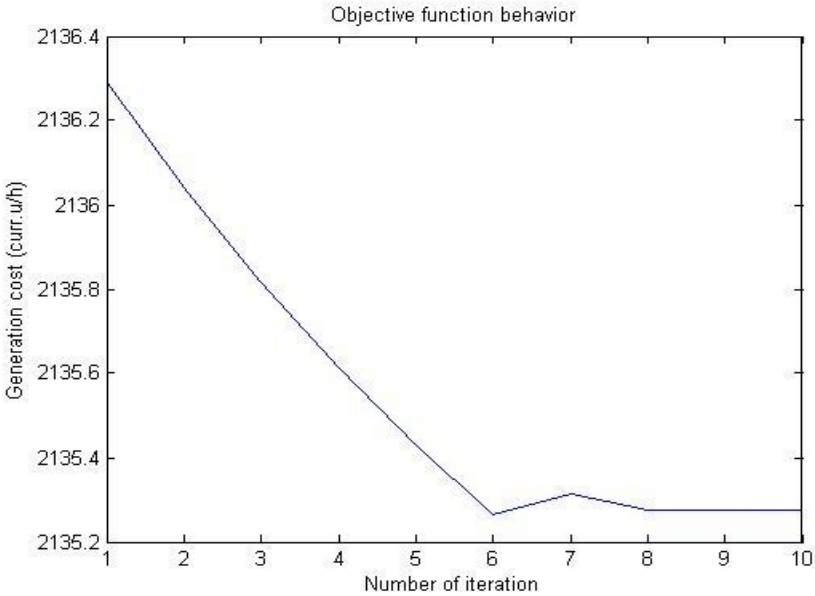
| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 2135.27 | 2135.24 | 0.001405 |

**Πίνακας 6.81:** Κόστος παραγωγής δικτύου 68 ζυγών με LTC

| Τιμή λήψης | | |
|---|---|---|
| Όνομα LTC | Διπλωματική εργασία | NEPLAN |
| LTC1 | 1.002 | 0.99 |

**Πίνακας 6.82:** Αποτελέσματα LTC για το δίκτυο 68 ζυγών

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.80) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.73) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.




**Σχήμα 6.24:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 68 ζυγών με LTC

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 4683.3 | 1 |

**Πίνακας 6.83:** Αποτελέσματα απλής ροής φορτίου για το δίκτυο 68 ζυγών με LTC ως προς το κόστος παραγωγής

Από τους Πίνακες 6.83 και 6.81 προκύπτει ότι η βέλτιστη ροή φορτίου εξοικονομεί 4683.3-2135.27=2548.03 curr. u/h σε σχέση με την απλή ροή φορτίου ή 54.4%.

## 6.4.3 Δίκτυο 68 ζυγών με PS

Το δίκτυο αυτό έχει 68 κανονικούς ζυγούς και 1 dummy, 83 γραμμές μεταφοράς και 1 PS. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

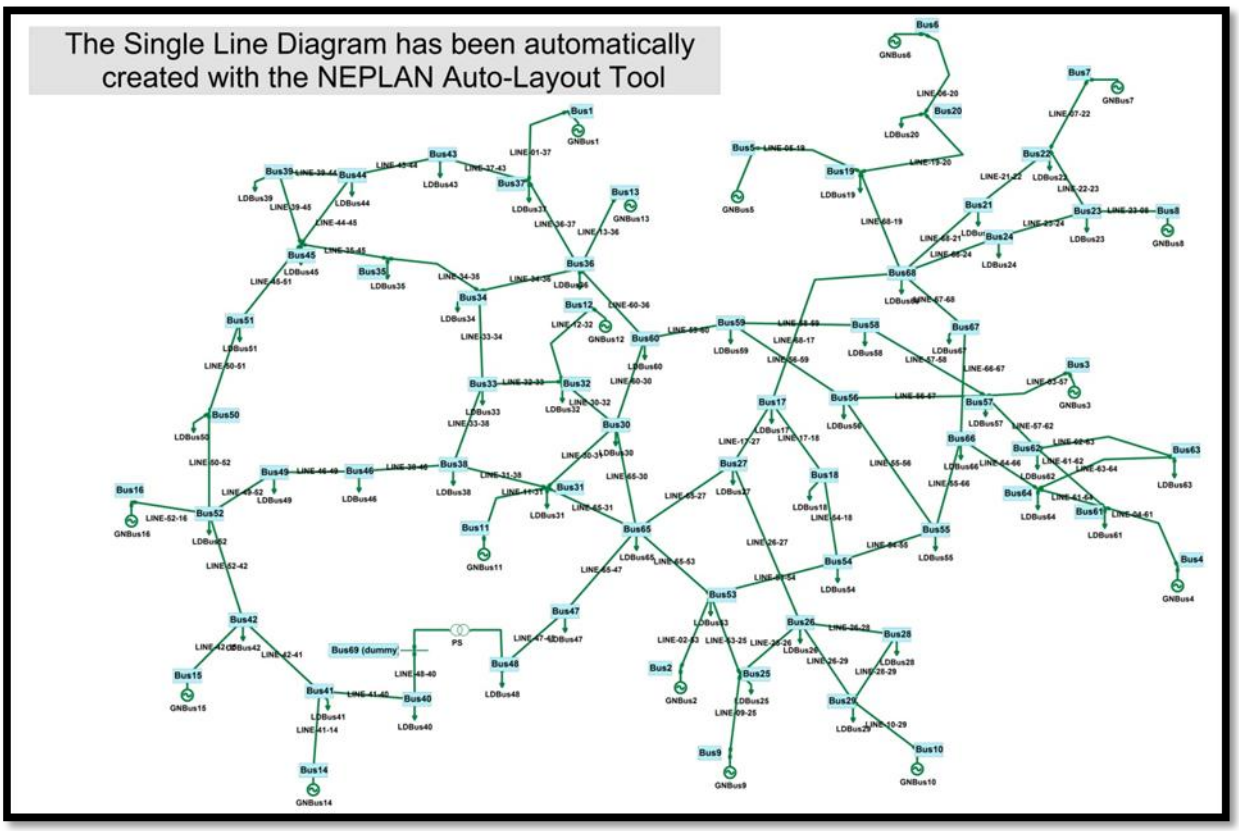
### 6.4.3.1 Δεδομένα

Παρατίθενται μόνο τα δεδομένα που τροποποιούνται σε σχέση με το βασικό δίκτυο χωρίς ελεγκτή:

- Εισαγωγή PQ ζυγού με όνομα Bus 69(dummy) μεταξύ των ζυγών Bus 40 και Bus 48 με ίδια όρια τάσης.
- Η γραμμή LINE-48-45 καταλήγει πλέον στον ζυγό Bus 69(dummy).
- Το PS συνδέεται μεταξύ του Bus 69(dummy) και του Bus 48. Αυτό έχει τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 6.78

| Αριθμός PS | Όνομα PS | Από ζυγό | Προς ζυγό | R (α.μ.) | X (α.μ.) | $T_{min}$ (◦) | $T_{max}$ (◦) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | PS | Bus 69 (dummy) | Bus 48 | 0 | 0.05 | 90 | 180 |

**Πίνακας 6.84:** Δεδομένα PS για το δίκτυο 68 ζυγών




**Σχήμα 6.25:** Δίκτυο 68 ζυγών με PS

### 6.4.3.2 Αποτελέσματα

| Όνομα ζυγού | Μέτρο τάσης (α.μ.) | Γωνία τάσης (◦) | $\lambda_p$ | $\lambda_q$ |
|---|---|---|---|---|
| Bus1 | 1.089693 | 0 | 3.588732 | 0 |
| Bus2 | 1.090705 | 0.067207 | 3.576312 | 0 |
| Bus3 | 1.090414 | 0.164296 | 3.571426 | 0 |
| Bus4 | 1.090316 | 0.31058 | 3.561288 | 0 |
| Bus5 | 1.09141 | 0.037184 | 3.560173 | 0 |
| Bus6 | 1.1 | -0.04883 | 3.491864 | 0 |
| Bus7 | 1.092305 | 0.291139 | 3.554009 | 0 |
| Bus8 | 1.094164 | 0.130855 | 3.552416 | 0 |
| Bus9 | 1.091502 | 0.033147 | 3.572298 | 0 |
| Bus10 | 1.09378 | 0.091527 | 3.565541 | 0 |
| Bus11 | 1.091564 | -0.08732 | 3.573302 | 0 |
| Bus12 | 1.096047 | -0.11567 | 3.564109 | 0 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Bus13 | 1.087635 | 0.073337 | 3.589897 | 0 |
| Bus14 | 1.095966 | 0.560391 | 3.588204 | 0 |
| Bus15 | 1.1 | 0.359792 | 3.591207 | 0 |
| Bus16 | 1.090237 | 1.443439 | 3.59628 | 0 |
| Bus17 | 1.087008 | -0.50806 | 3.607765 | -0.00498 |
| Bus18 | 1.087039 | -0.52501 | 3.608344 | -0.00527 |
| Bus19 | 1.091638 | -0.12776 | 3.561369 | -0.00016 |
| Bus20 | 1.090703 | -0.18439 | 3.562186 | -0.00106 |
| Bus21 | 1.08676 | -0.42433 | 3.601357 | -0.00579 |
| Bus22 | 1.092121 | -0.01357 | 3.56546 | -0.00345 |
| Bus23 | 1.092946 | 0.018377 | 3.563727 | -0.00378 |
| Bus24 | 1.089307 | -0.18058 | 3.592562 | -0.00995 |
| Bus25 | 1.089784 | -0.28226 | 3.585231 | -0.00059 |
| Bus26 | 1.086997 | -0.39615 | 3.603011 | -0.00052 |
| Bus27 | 1.085279 | -0.50446 | 3.613807 | -0.00046 |
| Bus28 | 1.089283 | -0.29619 | 3.584766 | 0.004094 |
| Bus29 | 1.090757 | -0.18658 | 3.577921 | 0.002432 |
| Bus30 | 1.091311 | -0.36136 | 3.5897 | -0.00401 |
| Bus31 | 1.090918 | -0.33068 | 3.586284 | -0.00441 |
| Bus32 | 1.094987 | -0.23179 | 3.573851 | -0.00228 |
| Bus33 | 1.088931 | -0.49615 | 3.619821 | -0.01419 |
| Bus34 | 1.08918 | -0.50386 | 3.619335 | -0.01416 |
| Bus35 | 1.088259 | -0.60978 | 3.629834 | -0.01526 |
| Bus36 | 1.089394 | -0.33956 | 3.604215 | -0.0087 |
| Bus37 | 1.089132 | -0.36902 | 3.602965 | -0.00355 |
| Bus38 | 1.089201 | -0.58341 | 3.611601 | -0.00917 |
| Bus39 | 1.077425 | -1.32963 | 3.6857 | -0.01222 |
| Bus40 | 1.088655 | -0.72114 | 3.597908 | 0.001575 |
| Bus41 | 1.091503 | -0.11584 | 3.588204 | 0 |
| Bus42 | 1.090683 | -0.21108 | 3.591208 | 0.000082 |
| Bus43 | 1.08067 | -0.7914 | 3.66316 | -0.01007 |
| Bus44 | 1.078079 | -1.08132 | 3.678816 | -0.0088 |
| Bus45 | 1.079313 | -1.29358 | 3.682945 | -0.01258 |
| Bus46 | 1.083239 | -0.89881 | 3.641484 | -0.00162 |
| Bus47 | 1.078903 | -1.24991 | 3.612821 | 0.005713 |
| Bus48 | 1.07446 | -1.68151 | 3.618598 | 0.007978 |
| Bus49 | 1.082514 | -0.94095 | 3.644225 | 0.00012 |
| Bus50 | 1.083919 | -1.33106 | 3.663871 | -0.01959 |
| Bus51 | 1.081278 | -1.40554 | 3.682975 | -0.02565 |
| Bus52 | 1.083094 | -0.92803 | 3.641135 | -0.00054 |
| Bus53 | 1.089503 | -0.26562 | 3.589567 | -0.00183 |
| Bus54 | 1.08935 | -0.32074 | 3.590567 | -0.00212 |
| Bus55 | 1.087656 | -0.29985 | 3.593129 | 0.001888 |
| Bus56 | 1.088423 | -0.3038 | 3.589133 | -0.00043 |
| Bus57 | 1.088981 | -0.15492 | 3.584309 | -0.0012 |
| Bus58 | 1.086613 | -0.24501 | 3.592829 | 0.002188 |
| Bus59 | 1.086245 | -0.35554 | 3.601651 | 0.00211 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Bus60 | 1.087597 | -0.48185 | 3.603371 | -0.00439 |
| Bus61 | 1.091226 | -0.02864 | 3.573321 | -0.00603 |
| Bus62 | 1.091352 | -0.12193 | 3.577121 | -0.00751 |
| Bus63 | 1.090256 | -0.24688 | 3.585181 | -0.00907 |
| Bus64 | 1.090518 | -0.27771 | 3.582507 | -0.00871 |
| Bus65 | 1.087458 | -0.44846 | 3.600959 | 0.000673 |
| Bus66 | 1.089164 | -0.3312 | 3.589329 | -0.00759 |
| Bus67 | 1.087617 | -0.47524 | 3.602587 | -0.00872 |
| Bus68 | 1.087837 | -0.44115 | 3.600838 | -0.00773 |
| dummy | 1.076206 | -2.81652 | 3.618523 | 0.00783 |

**Πίνακας 6.85:** Τάσεις ζυγών δικτύου 68 ζυγών με PS

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GNBus1 | 23.5674 | -7.21909 |
| GNBus2 | 22.0394 | -4.39777 |
| GNBus3 | 21.4278 | -3.3588 |
| GNBus4 | 20.1606 | -11.444 |
| GNBus5 | 20.022 | -4.09637 |
| GNBus6 | 11.4998 | -2.11107 |
| GNBus7 | 19.2501 | -7.18305 |
| GNBus8 | 19.0509 | -7.82695 |
| GNBus9 | 21.5375 | -2.35776 |
| GNBus10 | 20.6925 | 2.67409 |
| GNBus11 | 21.6628 | -8.74205 |
| GNBus12 | 20.5132 | -6.26264 |
| GNBus13 | 23.7325 | -15.6663 |
| GNBus14 | 23.5305 | 6.79004 |
| GNBus15 | 23.9074 | 19.1043 |
| GNBus16 | 24.538 | -0.76724 |
| Σύνολο | 337.1324 | -52.8647 |

**Πίνακας 6.86:** Παραγωγή γεννητριών του 68 ζυγών με PS

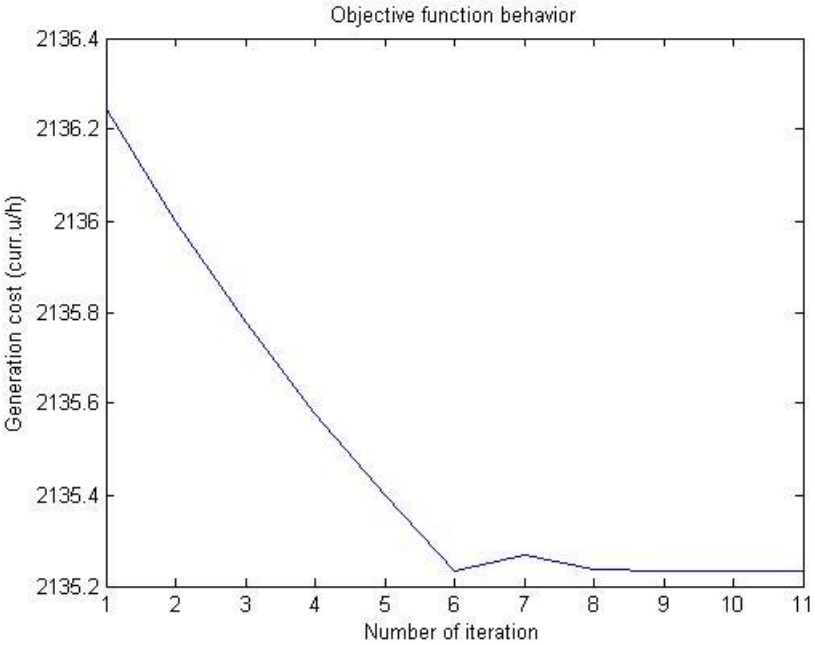
| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 2135.24 | 2135.21 | 0.001405 |

**Πίνακας 6.87:** Κόστος παραγωγής δικτύου 68 ζυγών με PS

| Τιμή λήψης (◦) | | |
|---|---|---|
| Όνομα PS | Διπλωματική εργασία | NEPLAN |
| PS1 | 1.39821 | 1.566 |

**Πίνακας 6.88:** Αποτελέσματα PS για το δίκτυο 68 ζυγών

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.86) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.73) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.




**Σχήμα 6.18:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 68 ζυγών με PS

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 4683.3 | 1 |

**Πίνακας 6.89:** Αποτελέσματα απλής ροής φορτίου για το δίκτυο 68 ζυγών με PS ως προς το κόστος παραγωγής

Από τους Πίνακες 6.89 και 6.87 προκύπτει ότι η βέλτιστη ροή φορτίου εξοικονομεί 4683.3-2135.24=2548.06 curr. u/h σε σχέση με την απλή ροή φορτίου ή 54.4%.

## 6.4.4 Δίκτυο 68 ζυγών με SVC

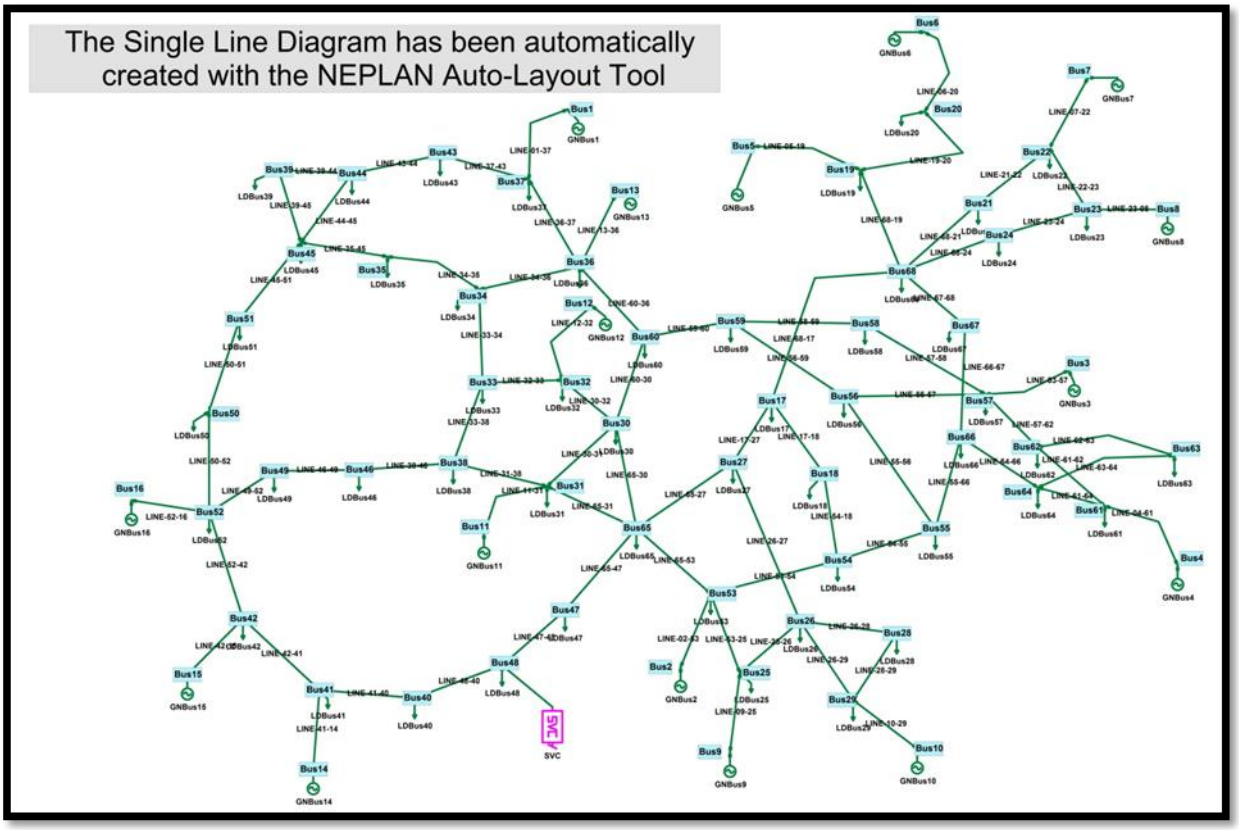
Το δίκτυο αυτό έχει 68 ζυγούς, 83 γραμμές μεταφοράς και 1 SVC. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

### 6.4.4.1 Δεδομένα

Παρατίθενται μόνο τα δεδομένα του ελεγκτή καθώς το δίκτυο παραμένει ίδιο σε σχέση με το βασικό δίκτυο 68 ζυγών χωρίς ελεγκτή.

| Αριθμός SVC | Όνομα SVC | Στον ζυγό | $X_c$ (α.μ.) | $X_l$ (α.μ.) | $Fa_{hi}$ (◦) | $Fa_{lo}$ (◦) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | SVC1 | Bus 48 | 0.9375 | 0.1625 | 90 | 180 |

**Πίνακας 6.90:** Δεδομένα ελεγκτή SVC για το δίκτυο 68 ζυγών με SVC




**Σχήμα 6.27:** Δίκτυο 68 ζυγών με SVC

### 6.4.4.2 Αποτελέσματα

| Όνομα ζυγού | Μέτρο τάσης (α.μ.) | Γωνία τάσης (◦) | $\lambda_p$ | $\lambda_q$ |
|---|---|---|---|---|
| Slack | 1.089328 | 0 | 3.589048 | 0 |
| Bus2 | 1.09027 | 0.030713 | 3.577493 | 0 |
| Bus3 | 1.090123 | 0.138079 | 3.572196 | 0 |
| Bus4 | 1.090076 | 0.283472 | 3.56203 | 0 |
| Bus5 | 1.091336 | 0.006943 | 3.560819 | 0 |
| Bus6 | 1.1 | -0.079594 | 3.492445 | 0 |
| Bus7 | 1.092113 | 0.263518 | 3.554684 | 0 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Bus8 | 1.093996 | 0.102645 | 3.553068 | 0 |
| Bus9 | 1.091302 | -0.003411 | 3.573303 | 0 |
| Bus10 | 1.093698 | 0.054853 | 3.566374 | 0 |
| Bus11 | 1.091567 | -0.123342 | 3.573998 | 0 |
| Bus12 | 1.095599 | -0.136706 | 3.56554 | 0 |
| Bus13 | 1.087194 | 0.066606 | 3.590524 | 0 |
| Bus14 | 1.094403 | 0.756676 | 3.58356 | 0 |
| Bus15 | 1.1 | 0.477147 | 3.587094 | 0 |
| Bus16 | 1.089938 | 1.480509 | 3.59495 | 0 |
| Bus17 | 1.086984 | -0.549706 | 3.608814 | -0.00553 |
| Bus18 | 1.086993 | -0.566622 | 3.609437 | -0.005825 |
| Bus19 | 1.091575 | -0.158727 | 3.56202 | -0.000164 |
| Bus20 | 1.090644 | -0.214911 | 3.562837 | -0.001019 |
| Bus21 | 1.086609 | -0.457537 | 3.602275 | -0.006076 |
| Bus22 | 1.091953 | -0.043056 | 3.566192 | -0.003521 |
| Bus23 | 1.092777 | -0.01065 | 3.564434 | -0.003838 |
| Bus24 | 1.089133 | -0.211552 | 3.59341 | -0.010156 |
| Bus25 | 1.089702 | -0.322996 | 3.586317 | -0.000879 |
| Bus26 | 1.086992 | -0.439651 | 3.604087 | -0.001032 |
| Bus27 | 1.085336 | -0.550484 | 3.614919 | -0.001173 |
| Bus28 | 1.089277 | -0.336772 | 3.585702 | 0.003881 |
| Bus29 | 1.090728 | -0.225872 | 3.57882 | 0.002296 |
| Bus30 | 1.091326 | -0.403437 | 3.590945 | -0.005012 |
| Bus31 | 1.091076 | -0.371773 | 3.58703 | -0.004943 |
| Bus32 | 1.094609 | -0.257253 | 3.575377 | -0.00272 |
| Bus33 | 1.088746 | -0.512249 | 3.620078 | -0.014499 |
| Bus34 | 1.088974 | -0.515971 | 3.619532 | -0.014354 |
| Bus35 | 1.088046 | -0.617297 | 3.62994 | -0.015441 |
| Bus36 | 1.089036 | -0.349313 | 3.604903 | -0.008903 |
| Bus37 | 1.08879 | -0.370486 | 3.603326 | -0.003607 |
| Bus38 | 1.089167 | -0.600606 | 3.611802 | -0.00962 |
| Bus39 | 1.077094 | -1.30926 | 3.685732 | -0.012445 |
| Bus40 | 1.089938 | -0.418949 | 3.593573 | -0.00016 |
| Bus41 | 1.091292 | 0.096178 | 3.58356 | 0 |
| Bus42 | 1.09064 | -0.081357 | 3.587095 | 0.000152 |
| Bus43 | 1.080393 | -0.781687 | 3.662943 | -0.01018 |
| Bus44 | 1.077774 | -1.065472 | 3.678723 | -0.00897 |
| Bus45 | 1.078964 | -1.272325 | 3.683103 | -0.012825 |
| Bus46 | 1.083253 | -0.885231 | 3.640206 | -0.001702 |
| Bus47 | 1.083625 | -1.453057 | 3.613845 | 0.000428 |
| Bus48 | 1.084088 | -2.029046 | 3.6186 | 0 |
| Bus49 | 1.082247 | -0.896037 | 3.643472 | -0.000226 |
| Bus50 | 1.083759 | -1.290942 | 3.662397 | -0.019646 |
| Bus51 | 1.080956 | -1.375445 | 3.68278 | -0.025865 |
| Bus52 | 1.082928 | -0.876335 | 3.639495 | -0.000618 |
| Bus53 | 1.089388 | -0.310257 | 3.590843 | -0.002562 |
| Bus54 | 1.089217 | -0.363354 | 3.591846 | -0.002802 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Bus55 | 1.087463 | -0.333461 | 3.594169 | 0.001537 |
| Bus56 | 1.088221 | -0.335055 | 3.590077 | -0.000687 |
| Bus57 | 1.088745 | -0.183817 | 3.585145 | -0.001341 |
| Bus58 | 1.086387 | -0.273972 | 3.593633 | 0.002019 |
| Bus59 | 1.086063 | -0.383937 | 3.602345 | 0.001871 |
| Bus60 | 1.087409 | -0.507487 | 3.604094 | -0.004788 |
| Bus61 | 1.091013 | -0.057843 | 3.574126 | -0.006113 |
| Bus62 | 1.091143 | -0.151317 | 3.577926 | -0.007596 |
| Bus63 | 1.090061 | -0.277212 | 3.586015 | -0.009185 |
| Bus64 | 1.090336 | -0.30925 | 3.583383 | -0.008879 |
| Bus65 | 1.087808 | -0.517926 | 3.602757 | -0.001834 |
| Bus66 | 1.088988 | -0.364024 | 3.590269 | -0.007841 |
| Bus67 | 1.087493 | -0.509231 | 3.603493 | -0.008952 |
| Bus68 | 1.087729 | -0.476434 | 3.601776 | -0.008047 |

**Πίνακας 6.91:** Τάσεις ζυγών δικτύου 68 ζυγών με SVC

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GNBus1 | 23.6185 | -7.31965 |
| GNBus2 | 22.1868 | -5.60726 |
| GNBus3 | 21.5244 | -3.59162 |
| GNBus4 | 20.2537 | -11.5705 |
| GNBus5 | 20.1041 | -4.17377 |
| GNBus6 | 11.5669 | -2.09028 |
| GNBus7 | 19.3354 | -7.29377 |
| GNBus8 | 19.1334 | -7.91523 |
| GNBus9 | 21.6631 | -2.82984 |
| GNBus10 | 20.7968 | 2.44699 |
| GNBus11 | 21.7494 | -9.63076 |
| GNBus12 | 20.692 | -7.17491 |
| GNBus13 | 23.8133 | -15.9847 |
| GNBus14 | 22.946 | 4.30956 |
| GNBus15 | 23.3884 | 19.1932 |
| GNBus16 | 24.3689 | -0.820657 |
| Σύνολο | 337.1411 | -60.0532 |

**Πίνακας 6.92:** Παραγωγή γεννητριών του 68 ζυγών με SVC

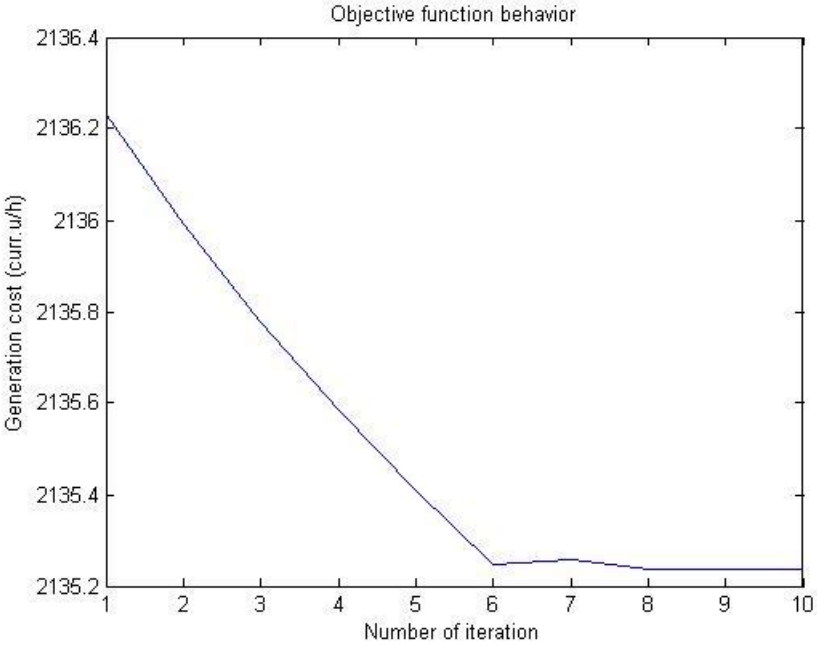
| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 2135.24 | 2135.17 | 0.003278 |

**Πίνακας 6.93:** Κόστος παραγωγής δικτύου 68 ζυγών με SVC

| SVC F.A. (deg) | | |
|---|---|---|
| Όνομα SVC | Διπλωματική εργασία | NEPLAN |
| SVC1 | 136.665 | 134.5 |

**Πίνακας 6.94:** Αποτελέσματα SVC για το δίκτυο 68 ζυγών

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.92) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.73) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.




**Σχήμα 6.28:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 68 ζυγών με SVC

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 4683.3 | 1 |

**Πίνακας 6.95:** Αποτελέσματα απλής ροής φορτίου για το δίκτυο 68 ζυγών με SVC ως προς το κόστος παραγωγής

Από τους Πίνακες 6.95 και 6.93 προκύπτει ότι η βέλτιστη ροή φορτίου εξοικονομεί 4683.3-2135.24=2548.06 curr. u/h σε σχέση με την απλή ροή φορτίου ή 54.4%.

## 6.4.5 Δίκτυο 68 ζυγών με TCSC

Το δίκτυο αυτό έχει 68 κανονικούς ζυγούς και 1 dummy, 83 γραμμές μεταφοράς και 1 TCSC. Η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι 10 kV.

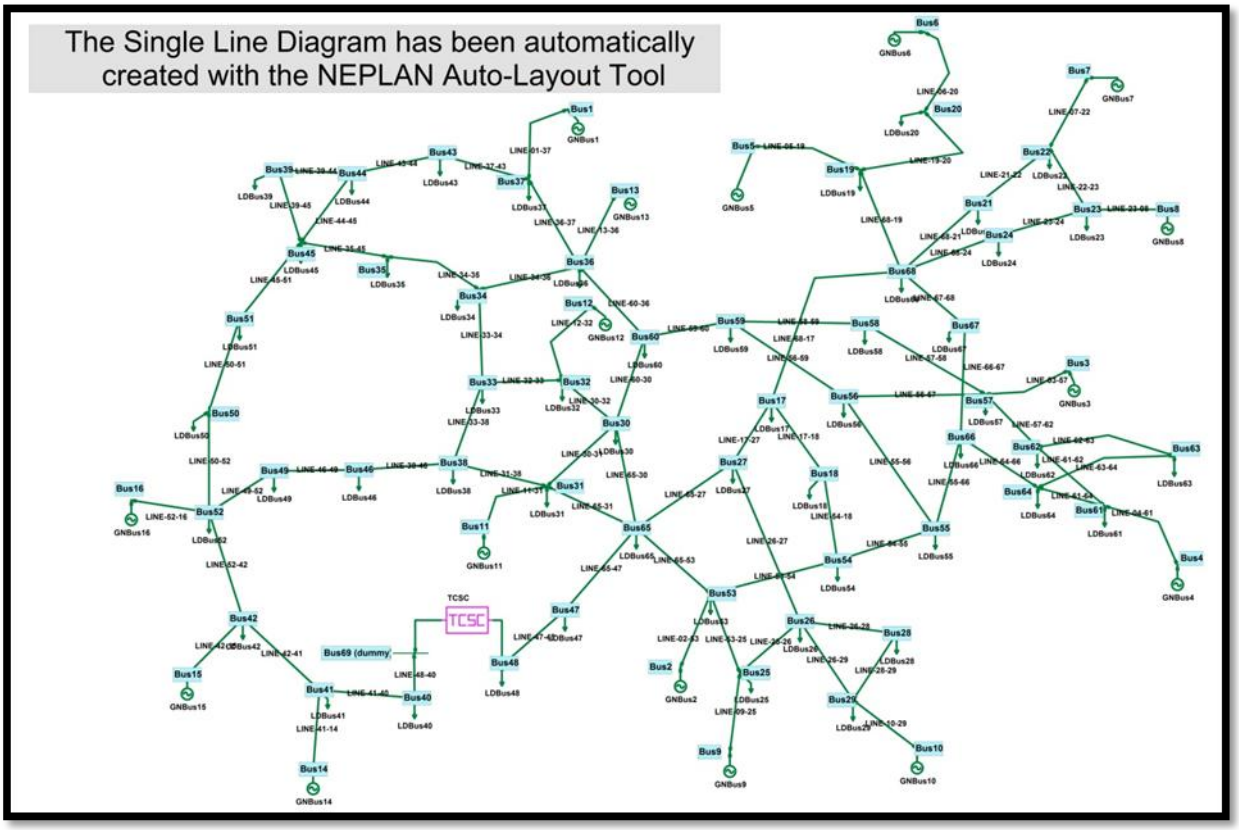
### 6.4.5.1 Δεδομένα

Παρατίθενται μόνο τα δεδομένα που τροποποιούνται σε σχέση με το βασικό δίκτυο χωρίς ελεγκτή:

- Εισαγωγή PQ ζυγού με όνομα Bus 69(dummy) μεταξύ των ζυγών Bus 40 και Bus 48 με ίδια όρια τάσης.
- Η γραμμή LINE-48-40 καταλήγει πλέον στον ζυγό Bus 15(dummy).
- Το TCSC συνδέεται μεταξύ του Bus 69(dummy) και του Bus 48. Αυτό έχει τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 6.96

| Αριθμός TCSC | Όνομα TCSC | Από ζυγό | Προς ζυγό | X (α.μ.) | $X_{lo}$ | $X_{hi}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | TCSC | Bus 69 (dummy) | Bus 48 | -0.033 | -0.09 | 0.09 |

**Πίνακας 6.96:** Δεδομένα TCSC για το δίκτυο 14 ζυγών




**Σχήμα 6.29:** Δίκτυο 68 ζυγών με TCSC

### 6.4.5.2 Αποτελέσματα

| Όνομα ζυγού | Μέτρο τάσης (α.μ.) | Γωνία τάσης (◦) | $\lambda_p$ | $\lambda_q$ |
|---|---|---|---|---|
| Slack | 1.089349 | 0 | 3.589107 | 0 |
| Bus2 | 1.090328 | 0.033428 | 3.577424 | 0 |
| Bus3 | 1.090153 | 0.140133 | 3.572162 | 0 |
| Bus4 | 1.090095 | 0.285578 | 3.561996 | 0 |
| Bus5 | 1.091335 | 0.00956 | 3.560747 | 0 |
| Bus6 | 1.1 | -0.076696 | 3.492302 | 0 |
| Bus7 | 1.092128 | 0.265636 | 3.55465 | 0 |
| Bus8 | 1.094005 | 0.104813 | 3.553036 | 0 |
| Bus9 | 1.091304 | -0.000687 | 3.573246 | 0 |
| Bus10 | 1.093675 | 0.057585 | 3.566329 | 0 |
| Bus11 | 1.091522 | -0.120552 | 3.573956 | 0 |
| Bus12 | 1.095631 | -0.134941 | 3.565468 | 0 |
| Bus13 | 1.087236 | 0.067328 | 3.590526 | 0 |
| Bus14 | 1.094881 | 0.747898 | 3.583845 | 0 |
| Bus15 | 1.1 | 0.473075 | 3.587314 | 0 |
| Bus16 | 1.089989 | 1.480245 | 3.595012 | 0 |
| Bus17 | 1.086942 | -0.545779 | 3.608754 | -0.005389 |
| Bus18 | 1.086954 | -0.562688 | 3.609375 | -0.005681 |
| Bus19 | 1.091569 | -0.156037 | 3.561948 | -0.000162 |
| Bus20 | 1.090638 | -0.212164 | 3.562762 | -0.001022 |
| Bus21 | 1.086606 | -0.454502 | 3.602221 | -0.005997 |
| Bus22 | 1.09196 | -0.040671 | 3.566153 | -0.003502 |
| Bus23 | 1.092785 | -0.008327 | 3.564397 | -0.003823 |
| Bus24 | 1.089139 | -0.208828 | 3.593362 | -0.010099 |
| Bus25 | 1.089672 | -0.319552 | 3.586255 | -0.000804 |
| Bus26 | 1.086942 | -0.435682 | 3.604027 | -0.000899 |
| Bus27 | 1.08527 | -0.546058 | 3.614857 | -0.00099 |
| Bus28 | 1.089231 | -0.333452 | 3.585651 | 0.003937 |
| Bus29 | 1.09069 | -0.222755 | 3.578771 | 0.002332 |
| Bus30 | 1.091256 | -0.398719 | 3.590877 | -0.004749 |
| Bus31 | 1.090987 | -0.367772 | 3.586986 | -0.004797 |
| Bus32 | 1.094621 | -0.254576 | 3.575299 | -0.002615 |
| Bus33 | 1.08874 | -0.510138 | 3.620084 | -0.01441 |
| Bus34 | 1.088973 | -0.514306 | 3.619547 | -0.014295 |
| Bus35 | 1.088047 | -0.615879 | 3.62996 | -0.015386 |
| Bus36 | 1.089057 | -0.348082 | 3.604899 | -0.008856 |
| Bus37 | 1.088808 | -0.369983 | 3.603369 | -0.003591 |
| Bus38 | 1.089128 | -0.598081 | 3.611797 | -0.009499 |
| Bus39 | 1.07711 | -1.309281 | 3.685764 | -0.012397 |
| Bus40 | 1.089409 | -0.431875 | 3.593892 | 0.000345 |
| Bus41 | 1.091326 | 0.086196 | 3.583845 | 0 |
| Bus42 | 1.090651 | -0.086474 | 3.587315 | 0.000159 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Bus43 | 1.080408 | -0.781446 | 3.662995 | -0.010145 |
| Bus44 | 1.077789 | -1.065382 | 3.678764 | -0.008927 |
| Bus45 | 1.07898 | -1.272371 | 3.68313 | -0.012777 |
| Bus46 | 1.083229 | -0.884591 | 3.640275 | -0.001651 |
| Bus47 | 1.0824 | -1.432139 | 3.613773 | 0.001836 |
| Bus48 | 1.081686 | -1.995795 | 3.618576 | 0.00215 |
| Bus49 | 1.082259 | -0.89675 | 3.643519 | -0.000146 |
| Bus50 | 1.083768 | -1.291758 | 3.662483 | -0.019609 |
| Bus51 | 1.080972 | -1.375846 | 3.682818 | -0.025819 |
| Bus52 | 1.082938 | -0.877613 | 3.639584 | -0.000583 |
| Bus53 | 1.089361 | -0.305864 | 3.590769 | -0.002372 |
| Bus54 | 1.089194 | -0.359176 | 3.591772 | -0.002626 |
| Bus55 | 1.08746 | -0.330355 | 3.594116 | 0.00163 |
| Bus56 | 1.088221 | -0.332257 | 3.590031 | -0.00062 |
| Bus57 | 1.088757 | -0.181331 | 3.585107 | -0.0013 |
| Bus58 | 1.086397 | -0.2714 | 3.593598 | 0.002071 |
| Bus59 | 1.086061 | -0.381205 | 3.60232 | 0.001951 |
| Bus60 | 1.0874 | -0.504725 | 3.604072 | -0.004671 |
| Bus61 | 1.091023 | -0.055454 | 3.574087 | -0.006092 |
| Bus62 | 1.091152 | -0.148905 | 3.577887 | -0.007573 |
| Bus63 | 1.090065 | -0.274689 | 3.585974 | -0.009155 |
| Bus64 | 1.090336 | -0.306562 | 3.583338 | -0.008835 |
| Bus65 | 1.087645 | -0.509238 | 3.602648 | -0.00119 |
| Bus66 | 1.088984 | -0.361121 | 3.59022 | -0.007775 |
| Bus67 | 1.087481 | -0.506174 | 3.603443 | -0.008884 |
| Bus68 | 1.087714 | -0.473171 | 3.60172 | -0.00796 |
| dummy | 1.080799 | -2.068642 | 3.618993 | 0.002101 |

**Πίνακας 6.97:** Τάσεις ζυγών δικτύου 68 ζυγών με TCSC

| Όνομα γεννήτριας | Ενεργός παραγωγή (MW) | Άεργος παραγωγή (MVar) |
|---|---|---|
| GNBus1 | 23.5919 | -7.29815 |
| GNBus2 | 22.1762 | -5.29325 |
| GNBus3 | 21.5176 | -3.52528 |
| GNBus4 | 20.2465 | -11.5352 |
| GNBus5 | 20.0966 | -4.14784 |
| GNBus6 | 11.5747 | -2.09206 |
| GNBus7 | 19.3278 | -7.26246 |
| GNBus8 | 19.1259 | -7.8902 |
| GNBus9 | 21.6539 | -2.70654 |
| GNBus10 | 20.7888 | 2.50655 |
| GNBus11 | 21.7419 | -9.38768 |
| GNBus12 | 20.6785 | -6.95444 |
| GNBus13 | 23.8058 | -15.9073 |
| GNBus14 | 22.9986 | 5.12191 |

| | | |
|---|---|---|
| GNBus15 | 23.4324 | 19.1703 |
| GNBus16 | 24.3838 | -0.800361 |
| Σύνολο | 337.1409 | -58.002 |

**Πίνακας 6.98:** Παραγωγή γεννητριών του 68 ζυγών με TCSC

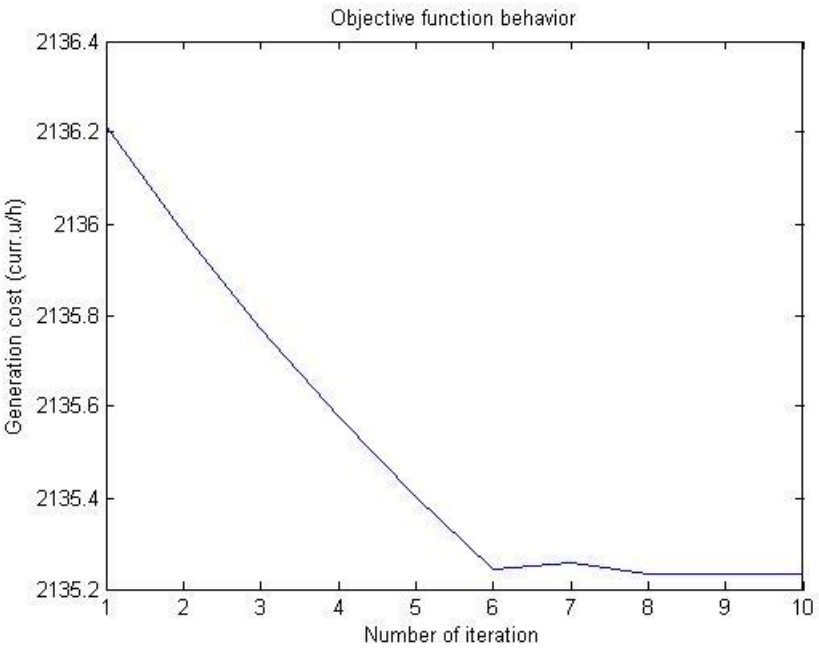
| Διπλωματική εργασία Cost (curr.u/h) | NEPLAN Cost (curr.u/h) | Απόκλιση % |
|---|---|---|
| 2135.24 | 2135.19 | 0.002342 |

**Πίνακας 6.99:** Κόστος παραγωγής δικτύου 68 ζυγών με TCSC

| $X_{tcsc}$ (pu) | | |
|---|---|---|
| Όνομα TCSC | Διπλωματική εργασία | NEPLAN |
| TCSC1 | 1.39821 | 0.192 |

**Πίνακας 6.100:** Αποτελέσματα TCSC για το δίκτυο 68 ζυγών

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής παραγωγής, (Πίνακας 6.98) και του συνολικού φορτίου (Πίνακας 6.73) εκφράζει τις συνολικές απώλειες του δικτύου.




**Σχήμα 6.18:** Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Δίκτυο 68 ζυγών με TCSC

| Απλή ροή φορτίου | |
|---|---|
| Cost (curr.u/h) | Voltage Violations |
| 4683.3 | 1 |

**Πίνακας 6.101:** Αποτελέσματα απλής ροής φορτίου για το δίκτυο 68 ζυγών με TCSC ως προς το κόστος παραγωγής

Από τους Πίνακες 6.101 και 6.99 προκύπτει ότι η βέλτιστη ροή φορτίου εξοικονομεί 4683.3-2135.24=2548.06 curr. u/h σε σχέση με την απλή ροή φορτίου ή 54.4%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ
7

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε μεθοδολογία και λογισμικό που επιλύει το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου (OPF) με τη μέθοδο Newton ενσωματώνοντας τόσο τους συμβατικούς ελεγκτές (μετασχηματιστές με σύστημα αλλαγής λήψεων μέτρου και γωνίας τάσης, LTC και PS) όσο και δύο ευέλικτα συστήματα μεταφοράς (SVC και TCSC). Οι ελεγκτές που αναφέρθηκαν χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο διάφορων μεταβλητών του δικτύου (ανάλογα με τον ελεγκτή), άσχετα με τη βέλτιστη ή με τη μη βέλτιστη κατάσταση του δικτύου. Με άλλα λόγια, οι ελεγκτές δεν είναι εργαλεία βελτιστοποίησης αλλά εργαλεία ελέγχου και το ζητούμενο για αυτά τα εργαλεία ελέγχου ήταν να ενσωματωθούν στη βέλτιστη ροή φορτίου. Για αυτό το λόγο και επειδή η εισαγωγή στο δίκτυο ενός ελεγκτή αλλάζει τα χαρακτηριστικά του δικτύου, παρουσιάζονται μεν τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των LTC, PS, SVC και TCSC ως προς την συνεισφορά τους στη βέλτιστη λύση (Πίνακας 7.1), πρέπει ωστόσο να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων αυτών. Αυτό που είναι πολύ σημαντικό είναι η σύγκριση μεταξύ της απλής ροής φορτίου (LF) και της βέλτιστης ροής φορτίου (OPF) για δίκτυα τα οποία συμπεριλαμβάνουν τους εξεταζόμενους ελεγκτές (Πίνακας 7.1). Επίσης, η βέλτιστη θέση για κάθε ελεγκτή παραμένει άγνωστη και είναι ξεχωριστό θέμα μελέτης: το σημείο τοποθέτησης κάθε ελεγκτή έχει επίδραση στην αποτελεσματικότητα του ελέγχου. Για την περίπτωση δικτύων 14 και 68 ζυγών δεν είναι γνωστό ποιά είναι η βέλτιστη θέση κάθε ελεγκτή. Επίσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.1, για την περίπτωση του δικτύου 68 ζυγών, οι ελεγκτές δεν φαίνεται να έχουν επίδραση στη συγκεκριμένη θέση που τοποθετήθηκαν. Παρόλα αυτά είναι ενσωματωμένοι στη βέλτιστη ροή φορτίου, γεγονός που ήταν και το ζητούμενο αυτής της εργασίας.

| | Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (curr.u/h) για δίκτυο 5 ζυγών | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Χωρίς ελεγκτή | LTC | PS | SVC | TCSC |
| OPF | 747.98 | 748.00 | 747.98 | 747.87 | 747.83 |
| LF | 776.98 | 785.92 | 779.05 | 776.83 | 778.03 |

| | Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (curr.u/h) για δίκτυο 14 ζυγών | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Χωρίς ελεγκτή | LTC | PS | SVC | TCSC |
| OPF | 1036.41 | 1036.40 | 1036.39 | 1036.41 | 1036.41 |
| LF | 1271.80 | 1152.82 | 1236.40 | 1211.90 | 1211.90 |

| | Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (curr.u/h) για δίκτυο 68 ζυγών | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Χωρίς ελεγκτή | LTC | PS | SVC | TCSC |
| OPF | 2135.26 | 2135.27 | 2135.24 | 2135.24 | 2135.24 |
| LF | 4683.30 | 4683.30 | 4683.30 | 4683.30 | 4683.30 |

**Πίνακας 7.1**: Σύνοψη αποτελεσμάτων με τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που είναι το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Ωστόσο η δυνατότητα ελέγχου που παρέχουν οι ελεγκτές, προσφέρει έναν επιπλέον μοχλό στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, ώστε αυτός να βρει μια καλύτερη λύση, από τη λύση που προκύπτει όταν ο ελεγκτής δεν ενσωματώνεται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Ως παράδειγμα μπορεί να θεωρηθεί ένα δίκτυο με PS. Αν το PS χρησιμοποιείται ώστε να ελέγχει και να ρυθμίζει, σε μια συγκεκριμένη τιμή, την ενεργό ισχύ που ρέει διαμέσου αυτού, τότε η τιμή λήψης της γωνίας φ της τάσης θα είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται αυτή η τιμή της ισχύος. Αν όμως δεν απαιτείται αυτός ο έλεγχος από το PS τότε η τιμή λήψης της γωνίας φ της τάσης θα επιλεχθεί από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης ώστε να παραχθεί μια καλύτερη λύση σχετικά με την αντικειμενική συνάρτηση που έχει επιλεχθεί. Έτσι θα είχε νόημα η σύγκριση μεταξύ αυτών των δύο τρόπων λειτουργίας του PS. Στην παρούσα έκδοση του λογισμικού που αναπτύχθηκε όμως δεν εφαρμόζεται έλεγχος σε μια συγκεκριμένη τιμή ισχύος-τάσης για κανέναν από τους ελεγκτές και έτσι τέτοια συγκριτικά αποτελέσματα δεν είναι διαθέσιμα.

Η ορθότητα του αλγορίθμου της εργασίας αυτής έχει επιβεβαιωθεί συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του αλγορίθμου με τα αποτελέσματα του λογισμικού NEPLAN και από τη σύγκριση αυτή προέκυψε είτε ταύτιση είτε πολύ μικρή διαφορά των αποτελεσμάτων. Η βελτιστοποίηση (OPF) δίνει χαμηλότερο κόστος παραγωγής και επίσης τυχόν παραβιάσεις ορίων που υπήρχαν πριν τη βελτιστοποίηση εξαλείφονται. Τα συμβατικά συστήματα LTC και PS καθώς και τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς τα οποία βρίσκονται στο δίκτυο για σκοπούς ελέγχου ενσωματώνονται επιτυχώς στην ενιαία βέλτιστη ροή φορτίου.

Ο αλγόριθμος είναι πολύ εύρωστος ως προς τη σύγκλιση και η ταχύτητα υπολογισμού είναι ικανοποιητική. Όλες οι περιπτώσεις συνδυασμών μεγέθους δικτύου και ελεγκτή συγκλίνουν. Η εμπειρία έδειξε ότι, από πλευράς μοντελοποίησης στη βέλτιστη ροή φορτίου, το πιο δύσκολο σύστημα ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς είναι το TCSC το οποίο περιέχει σημεία συντονισμού όπου το TCSC περνάει από την χωρητική στην επαγωγική λειτουργία και αντίστροφα. Αν δεν δοθεί προσοχή, αυτά τα σημεία συντονισμού δημιουργούν ανωμαλίες κατά την επαναληπτική διαδικασία επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΙΝΑΚΑ HESSIAN ΚΑΙ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ ΚΛΙΣΗΣ

Ας υποτεθεί ότι $\Delta\lambda_{pk}$ είναι η i-οστη μεταβλητή και ότι η $\Delta P_{gk}$ είναι η j-οστή μεταβλητή του διανύσματος Δz. Ο πίνακας της σχέσης (3.39) πληροφορεί ότι κατά την επαναληπτική διαδικασία θα πρέπει να υπάρξουν της εξής εκχωρήσεις:

W(i,i)=W(i,i)+0
W(i,i)=W(i,j)-1
W(i,i)=W(j,i)-1
W(i,i)=W(j,j)+$2c_k$
grad(i)=grad(i)-($b_k$+$2c_kP_{gk}$-$\lambda_{pk}$)
grad(j)=grad(j)-0

Έτσι λοιπόν για το παράδειγμα των 5 ζυγών με 2 γεννήτριες προκύπτουν 22 μεταβλητές στο διάνυσμα grad και κατά συνέπεια στο διάνυσμα Δz. Έτσι προκύπτει:

| | | |
|---|---|---|
| Pg1 | ΔPg1 | 21η μεταβλητή στο διάνυσμα grad |
| Pg2 | ΔPg2 | 22η μεταβλητή στο διάνυσμα grad |
| λp1 | Δλp1 | 11η μεταβλητή στο διάνυσμα grad |
| λp2 | Δλp2 | 12η μεταβλητή στο διάνυσμα grad |

Έτσι κατά την επαναληπτική διαδικασία το λογισμικό θα πρέπει να εκχωρεί:

Hessian(11,11)=Hessian(11,11)+0
Hessian(11,21)=Hessian(11,21)-1
Hessian(21,11)=Hessian(21,11)-1
Hessian(21,21)=Hessian(21,21)+ $2c_1$
Hessian(12,12)=Hessian(12,12)+0
Hessian(12,22)=Hessian(12,22)-1
Hessian(22,12)=Hessian(22,12)-1
Hessian(22,22)=Hessian(22,22)+ $2c_2$

Η αυτή φιλοσοφία ακολουθείται και για τα υπόλοιπα στοιχεία όπου δίδεται ο πίνακας συνεισφοράς στον πίνακα W.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

## ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΩΝ LAGRANGE ΓΙΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΧΩΡΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Οι πολλαπλασιαστές Lagrange οι οποίοι συμπεριλαμβάνονται στην βέλτιστη λύση μπορούν να ερμηνευθούν με οικονομικούς όρους. Μπορεί να αποδειχθεί ότι οι πολλαπλασιαστές Lagrange είναι οι παράγωγοι (με αντίθετο πρόσημο) της αντικειμενικής συνάρτησης που ελαχιστοποιείται τηρώντας τους περιορισμούς. Με άλλα λόγια είναι το περιθώριο κόστους όταν εφαρμόζονται οι περιορισμοί.

Απόδειξη[1.3]:

Το πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού το οποίο πρέπει να επιλυθεί εκφράζεται με την ακόλουθη μορφή (χωρίς να περιλαμβάνονται περιορισμοί ανισότητας):

Ελαχιστοποίησε την f(**x**) υπό τους περιορισμούς h(**x**) = u

Έτσι η συνάρτηση Lagrange που προκύπτει είναι:

$$L(\mathrm{x}(\mathrm{u}),\lambda(\mathrm{u}),\mathrm{u}) = f(\mathrm{x}(\mathrm{u})) + \lambda^{T}(\mathrm{u})\left[h(\mathrm{x}(\mathrm{u})) - \mathrm{u}\right]$$

με λ(u) να συμβολίζει το διάνυσμα των πολλαπλασιαστών Lagrange.

Η βέλτιστη λύση για u=0 είναι ($x^{opt}$, $\lambda_{opt}$).

Είναι εμφανές πως αν το u αλλάξει τότε αλλάζει και η βέλτιστη λύση η οποία εξαρτάται από το u. Το ζητούμενο είναι να προσδιοριστεί ο βαθμός επηρεασμού, δηλαδή η ευαισθησία. Η ευαισθησία μπορεί να εκφραστεί σαν η παράγωγος της συνάρτησης Lagrange ως προς την μεταβλητή u, και η οποία δίνεται παρακάτω:

$$\nabla_{\mathrm{u}} L(\mathrm{x},\lambda,\mathrm{u}) = \frac{\partial \mathrm{x}}{\partial \mathrm{u}} \nabla_{\mathrm{x}} f(\mathrm{x}(\mathrm{u})) + \frac{\partial \mathrm{x}}{\partial \mathrm{u}} \frac{\partial h(\mathrm{x}(\mathrm{u}))}{\partial \mathrm{x}} \lambda(\mathrm{u}) + \frac{\partial \lambda(\mathrm{u})}{\partial \mathrm{u}} \left[h(\mathrm{x}(\mathrm{u})) - \mathrm{u}\right] - \lambda(\mathrm{u})$$

Ομαδοποιώντας τους όρους η σχέση γράφεται:

$$\nabla_{\mathrm{u}} L(\mathrm{x},\lambda,\mathrm{u}) = \underbrace{\frac{\partial \mathrm{x}}{\partial \mathrm{u}}\left[\nabla_{\mathrm{x}} f(\mathrm{x}(\mathrm{u})) + \frac{\partial h(\mathrm{x}(\mathrm{u}))}{\partial \mathrm{x}} \lambda(\mathrm{u})\right]}_{\text{First Term}} + \underbrace{\frac{\partial \lambda(\mathrm{u})}{\partial \mathrm{u}}\left[h(\mathrm{x}(\mathrm{u})) - \mathrm{u}\right]}_{\text{Second Term}} - \lambda(\mathrm{u})$$

Τώρα μελετώντας τους δύο όρους προσεκτικά:

$$\left[\nabla_x f(x(u)) + \frac{\partial h(x(u))}{\partial x}\lambda(u)\right] = \nabla_x L(x,\lambda,u)$$

$$\left[h(x(u)) - u\right] = \nabla_\lambda L(x,\lambda,u)$$

μπορεί να γραφεί:

$$\nabla_u L(x,\lambda,u) = \underbrace{\frac{\partial x}{\partial u}\nabla_x L(x,\lambda,u)}_{\text{First Term}} + \underbrace{\frac{\partial \lambda(u)}{\partial u}\nabla_\lambda L(x,\lambda,u)}_{\text{Second Term}} - \lambda(u)$$

Σύμφωνα με το κριτήριο βέλτιστου των Kuhn-Tucker πρέπει τα

$$\nabla_x L(x,\lambda,u) \text{ and } \nabla_\lambda L(x,\lambda,u)$$

να είναι μηδέν στην βέλτιστη λύση. Έτσι και ο πρώτος και ο δεύτερος όρος πρέπει να είναι μηδέν στην βέλτιστη λύση και ο όρος που απομένει είναι:

$$\nabla_u L(x^*,\lambda^*) = -\lambda^*$$

Επίσης είναι γνωστό ότι στην βέλτιστη λύση ισχύει:

$$\nabla_u L(x^*,\lambda^*) = \nabla_u f(x^*)$$

Συνδυάζοντας τις δύο εξισώσεις, αποδεικνύεται ότι στην βέλτιστη λύση ισχύει:

$$\lambda^* = -\nabla_u f(x^*)$$

Έτσι οι πολλαπλασιαστές Lagrange είναι οι αρνητικές παράγωγοι της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τους περιορισμούς που εφαρμόζονται. Αν ως αντικειμενική συνάρτηση θεωρηθεί μια συνάρτηση κόστους τότε το $\lambda_{opt}$ μπορεί να ερμηνευτεί σαν το κόστος ανά μονάδα σχετιζόμενη με κάθε περιορισμό. Αν π.χ. ο περιορισμός είναι η παραγωγή ενεργού ισχύος και η αντικειμενική συνάρτηση είναι το κόστος παραγωγής ανά ώρα, τότε το $\lambda_{opt}$ θα είναι το κόστος παραγωγής ανά kWh (curr.u/kWh). Αυτοί οι πολλαπλασιαστές Lagrange αναφέρονται συχνά σαν shadow prices.

Παρόλο που η προηγούμενη παραγώγιση δεν συμπεριέλαβε ανισωτικούς περιορισμούς, η παραγώγιση όταν αυτοί συμπεριληφθούν είναι ουσιαστικά η ίδια επειδή για όλους τους περιορισμούς οι οποίοι δεν εφαρμόζονται (ανενεργοί), η παραγώγιση της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς αυτούς είναι μηδέν καθώς η λύση δεν επηρεάζεται αλλάζοντας τον περιορισμό $u_i$ από την στιγμή που δεν εφαρμόζεται έτσι και αλλιώς. Για τους ανισωτικούς περιορισμούς οι οποίοι εφαρμόζονται, αντιμετωπίζονται σαν περιορισμοί ισότητας και η διαχείρησή τους είναι η ίδια όπως προηγουμένως.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

# ΟΡΟΙ ΠΙΝΑΚΑ HESSIAN ΚΑΙ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ ΚΛΙΣΗΣ

## Παράρτημα Γ: Όροι πίνακα Hessian και διανύσματος grad.

### Γ.1 Γραμμές μεταφοράς

### Γ1.1 Διάνυσμα κλίσης

Όροι πρώτων μερικών παραγώγων ως προς k

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_k} = \lambda_{pk}\frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} + \lambda_{qk}\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} + \lambda_{pm}\frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} + \lambda_{qm}\frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k},$$
$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_{pk}} = P_k + P_{dk} - P_{gk},$$
$$\frac{\partial L}{\partial V_k} = \lambda_{pk}\frac{\partial P_k}{\partial V_k} + \lambda_{qk}\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} + \lambda_{pm}\frac{\partial P_m}{\partial V_k} + \lambda_{qm}\frac{\partial Q_m}{\partial V_k},$$
$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_{qk}} = Q_k + Q_{dk} - Q_{gk}.$$

Όροι πρώτων μερικών παραγώγων ως προς m

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_m} = \lambda_{pk}\frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} + \lambda_{qk}\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} + \lambda_{pm}\frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} + \lambda_{qm}\frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m},$$
$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_{pm}} = P_m + P_{dm} - P_{gm},$$
$$\frac{\partial L}{\partial V_m} = \lambda_{pk}\frac{\partial P_k}{\partial V_m} + \lambda_{qk}\frac{\partial Q_k}{\partial V_m} + \lambda_{pm}\frac{\partial P_m}{\partial V_m} + \lambda_{qm}\frac{\partial Q_m}{\partial V_m},$$
$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_{qm}} = Q_m + Q_{dm} - Q_{gm}.$$

## Γ1.2 Πίνακας W

Δεύτερες μερικές παράγωγοι ως προς το k (διαγώνια blocks)

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \theta_k^2} = \lambda_{pk}\frac{\partial^2 P_k}{\partial \theta_k^2} + \lambda_{qk}\frac{\partial^2 Q_k}{\partial \theta_k^2} + \lambda_{pm}\frac{\partial^2 P_m}{\partial \theta_k^2} + \lambda_{qm}\frac{\partial^2 Q_m}{\partial \theta_k^2},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \theta_k \partial \lambda_{pk}} = \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda_{pk} \partial \theta_k} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \theta_k \partial V_k} = \frac{\partial^2 L}{\partial V_k \partial \theta_k} = \lambda_{pk}\frac{\partial^2 P_k}{\partial \theta_k \partial V_k} + \lambda_{qk}\frac{\partial^2 Q_k}{\partial \theta_k \partial V_k} + \lambda_{pm}\frac{\partial^2 P_m}{\partial \theta_k \partial V_k} + \lambda_{qm}\frac{\partial^2 Q_m}{\partial \theta_k \partial V_k},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \theta_k \partial \lambda_{qk}} = \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda_{qk} \partial \theta_k} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial V_k^2} = \lambda_{pk}\frac{\partial^2 P_k}{\partial V_k^2} + \lambda_{qk}\frac{\partial^2 Q_k}{\partial V_k^2} + \lambda_{pm}\frac{\partial^2 P_m}{\partial V_k^2} + \lambda_{qm}\frac{\partial^2 Q_m}{\partial V_k^2},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial V_k \partial \lambda_{pk}} = \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda_{pk} \partial V_k} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial V_k \partial \lambda_{qk}} = \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda_{qk} \partial V_k} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k}.$$

Δεύτερες μερικές παράγωγοι ως προς το k και m (μη διαγώνια τμήματα)

$$\frac{\partial^2 L}{\partial\theta_k\partial\theta_m}=\frac{\partial^2 L}{\partial\theta_m\partial\theta_k}=\lambda_{pk}\frac{\partial^2 P_k}{\partial\theta_k\partial\theta_m}+\lambda_{qk}\frac{\partial^2 Q_k}{\partial\theta_k\partial\theta_m}+\lambda_{pm}\frac{\partial^2 P_m}{\partial\theta_k\partial\theta_m}+\lambda_{qm}\frac{\partial^2 Q_m}{\partial\theta_k\partial\theta_m},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial\theta_k\partial\lambda_{pm}}=\frac{\partial^2 L}{\partial\lambda_{pm}\partial\theta_k}=\frac{\partial P_m}{\partial\theta_k},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial\theta_k\partial V_m}=\frac{\partial^2 L}{\partial V_m\partial\theta_k}=\lambda_{pk}\frac{\partial^2 P_k}{\partial\theta_k\partial V_m}+\lambda_{qk}\frac{\partial^2 Q_k}{\partial\theta_k\partial V_m}+\lambda_{pm}\frac{\partial^2 P_m}{\partial\theta_k\partial V_m}+\lambda_{qm}\frac{\partial^2 Q_m}{\partial\theta_k\partial V_m},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial\theta_k\partial\lambda_{qm}}=\frac{\partial^2 L}{\partial\lambda_{qm}\partial\theta_k}=\frac{\partial Q_m}{\partial\theta_k},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial V_k\partial\theta_m}=\frac{\partial^2 L}{\partial\theta_m\partial V_k}=\lambda_{pk}\frac{\partial^2 P_k}{\partial V_k\partial\theta_m}+\lambda_{qk}\frac{\partial^2 Q_k}{\partial V_k\partial\theta_m}+\lambda_{pm}\frac{\partial^2 P_m}{\partial V_k\partial\theta_m}+\lambda_{qm}\frac{\partial^2 Q_m}{\partial V_k\partial\theta_m},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial V_k\partial\lambda_{pm}}=\frac{\partial^2 L}{\partial\lambda_{pm}\partial V_k}=\frac{\partial P_m}{\partial V_k},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial V_k\partial V_m}=\frac{\partial^2 L}{\partial V_m\partial V_k}=\lambda_{pk}\frac{\partial^2 P_k}{\partial V_k\partial V_m}+\lambda_{qk}\frac{\partial^2 Q_k}{\partial V_k\partial V_m}+\lambda_{pm}\frac{\partial^2 P_m}{\partial V_k\partial V_m}+\lambda_{qm}\frac{\partial^2 Q_m}{\partial V_k\partial V_m},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial V_k\partial\lambda_{qm}}=\frac{\partial^2 L}{\partial\lambda_{qm}\partial V_k}=\frac{\partial Q_m}{\partial V_k},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial\lambda_{pk}\partial\theta_m}=\frac{\partial^2 L}{\partial\theta_m\partial\lambda_{pk}}=\frac{\partial P_k}{\partial\theta_m},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial\lambda_{qk}\partial\theta_m}=\frac{\partial^2 L}{\partial\theta_m\partial\lambda_{qk}}=\frac{\partial Q_k}{\partial\theta_m},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial\lambda_{pk}\partial V_m}=\frac{\partial^2 L}{\partial V_m\partial\lambda_{pk}}=\frac{\partial P_k}{\partial V_m},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial\lambda_{qk}\partial V_m}=\frac{\partial^2 L}{\partial V_m\partial\lambda_{qk}}=\frac{\partial Q_k}{\partial V_m}.$$

Δεύτερες μερικές παράγωγοι ως προς το m (διαγώνια τμήματα)

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \theta_m^2} = \lambda_{pk}\frac{\partial^2 P_k}{\partial \theta_m^2} + \lambda_{qk}\frac{\partial^2 Q_k}{\partial \theta_m^2} + \lambda_{pm}\frac{\partial^2 P_m}{\partial \theta_m^2} + \lambda_{qm}\frac{\partial^2 Q_m}{\partial \theta_m^2},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \theta_m \partial \lambda_{pm}} = \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda_{pm} \partial \theta_m} = \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \theta_m \partial V_m} = \frac{\partial^2 L}{\partial V_m \partial \theta_m} = \lambda_{pk}\frac{\partial^2 P_k}{\partial \theta_m \partial V_m} + \lambda_{qk}\frac{\partial^2 Q_k}{\partial \theta_m \partial V_m} + \lambda_{pm}\frac{\partial^2 P_m}{\partial \theta_m \partial V_m} + \lambda_{qm}\frac{\partial^2 Q_m}{\partial \theta_m \partial V_m},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \theta_m \partial \lambda_{qm}} = \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda_{qm} \partial \theta_m} = \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial V_m^2} = \lambda_{pk}\frac{\partial^2 P_k}{\partial V_m^2} + \lambda_{qk}\frac{\partial^2 Q_k}{\partial V_m^2} + \lambda_{pm}\frac{\partial^2 P_m}{\partial V_m^2} + \lambda_{qm}\frac{\partial^2 Q_m}{\partial V_m^2},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial V_m \partial \lambda_{pm}} = \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda_{pm} \partial V_m} = \frac{\partial P_m}{\partial V_m},$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial V_m \partial \lambda_{qm}} = \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda_{qm} \partial V_m} = \frac{\partial Q_m}{\partial V_m}.$$

Δεύτερες μερικές παράγωγοι εξισώσεων ενεργού και άεργου ισχύος

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial \theta_m \partial \theta_k} = V_k V_m [G_{km}\cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_k - \theta_m)],$$

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial \theta_m \partial \theta_k} = V_k V_m [G_{km}\sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km}\cos(\theta_k - \theta_m)],$$

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial \theta_m \partial V_k} = V_m [G_{km}\sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km}\cos(\theta_k - \theta_m)],$$

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial \theta_m \partial V_k} = -V_m [G_{km}\cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_k - \theta_m)],$$

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial \theta_m \partial V_m} = V_k [G_{km}\sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km}\cos(\theta_k - \theta_m)],$$

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial \theta_m \partial V_m} = -V_k [G_{km}\cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_k - \theta_m)],$$

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial \theta_k \partial V_k} = -V_m [G_{km}\sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km}\cos(\theta_k - \theta_m)],$$

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial\theta_k \partial V_k} = V_m[G_{km}\cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_k - \theta_m)],$$
$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial\theta_k \partial V_m} = -V_k[G_{km}\sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km}\cos(\theta_k - \theta_m)],$$
$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial\theta_k \partial V_m} = V_k[G_{km}\cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_k - \theta_m)],$$
$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial V_k \partial V_m} = [G_{km}\cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_k - \theta_m)],$$
$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial V_k \partial V_m} = [G_{km}\sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km}\cos(\theta_k - \theta_m)],$$
$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial\theta_m^2} = -V_k V_m[G_{km}\cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_k - \theta_m)],$$
$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial\theta_m^2} = -V_k V_m[G_{km}\sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km}\cos(\theta_k - \theta_m)],$$
$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial\theta_k^2} = -V_k V_m[G_{km}\cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km}\sin(\theta_k - \theta_m)],$$
$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial\theta_k^2} = -V_k V_m[G_{km}\sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km}\cos(\theta_k - \theta_m)],$$
$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial V_k^2} = 2G_{kk},$$
$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial V_k^2} = -2B_{kk},$$
$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial V_m^2} = 0,$$
$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial V_m^2} = 0.$$

Για τις μερικές παράγωγους ως προς m απλά εναλλάσσουμε τον δείκτη m με τον δείκτη k.

## Γ.2 Phase Shifter

### Γ2.1 Διάνυσμα κλίσης

Πρώτες μερικές παράγωγοι ως προς k

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -\frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = -\frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m = -\frac{\partial P_k}{\partial \phi} = -Q_k - V_k^2 B,$$
$$\frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k = P_k + V_k^2 G,$$
$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m = -\frac{\partial Q_k}{\partial \phi} = P_k - V_k^2 G,$$
$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k = Q_k - V_k^2 B,$$

Πρώτες μερικές παράγωγοι ως προς k

$$\frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} = -\frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} = -\frac{\partial Q_m}{\partial V_k} V_k = \frac{\partial P_m}{\partial \phi} = -Q_m - V_m^2 B,$$
$$\frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m = P_m + V_m^2 G,$$
$$\frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} = -\frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} = \frac{\partial P_m}{\partial V_k} V_k = \frac{\partial Q_m}{\partial \phi} = P_m - V_m^2 G,$$
$$\frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m = Q_m - V_m^2 B.$$

## Γ2.2 Πίνακας W

Δεύτερες μερικές παράγωγοι ως προς $\varphi_{tu}$ και ως προς γωνίες $\theta_k$ $\theta_m$

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial \phi_{tv} \partial \theta_k} = V_k V_m (G_{km} \cos \delta_1 + B_{km} \sin \delta_1),$$
$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial \phi_{tv} \partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \sin \delta_1 - B_{km} \cos \delta_1),$$

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial\phi_{tv}\partial\delta_m} = -V_k V_m (G_{km}\cos\delta_1 + B_{km}\sin\delta_1),$$
$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial\phi_{tv}\partial\theta_m} = -V_k V_m (G_{km}\sin\delta_1 - B_{km}\cos\delta_1),$$
$$\frac{\partial^2 P_m}{\partial\phi_{tv}\partial\theta_m} = -V_m V_k (G_{mk}\cos\delta_2 + B_{mk}\sin\delta_2),$$
$$\frac{\partial^2 Q_m}{\partial\phi_{tv}\partial\theta_m} = -V_m V_k (G_{mk}\sin\delta_2 - B_{mk}\cos\delta_2),$$
$$\frac{\partial^2 P_m}{\partial\phi_{tv}\partial\theta_k} = V_m V_k (G_{mk}\cos\delta_2 + B_{mk}\sin\delta_2),$$
$$\frac{\partial^2 Q_m}{\partial\phi_{tv}\partial\theta_k} = V_m V_k (G_{mk}\sin\delta_2 - B_{mk}\cos\delta_2).$$

Δεύτερες μερικές παράγωγοι ως προς $\varphi_{tu}$ και ως προς τα πλάτη $V_k$, $V_m$

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial\phi_{tv}\partial V_k} = V_m (G_{km}\sin\delta_1 - B_{km}\cos\delta_1),$$
$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial\phi_{tv}\partial V_k} = -V_m (G_{km}\cos\delta_1 + B_{km}\sin\delta_1),$$
$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial\phi_{tv}\partial V_m} = V_k (G_{km}\sin\delta_1 - B_{km}\cos\delta_1),$$
$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial\phi_{tv}\partial V_m} = -V_k (G_{km}\cos\delta_1 + B_{km}\sin\delta_1),$$
$$\frac{\partial^2 P_m}{\partial\phi_{tv}\partial V_k} = -V_m (G_{mk}\sin\delta_2 - B_{mk}\cos\delta_2),$$
$$\frac{\partial^2 Q_m}{\partial\phi_{tv}\partial V_k} = V_m (G_{mk}\cos\delta_2 + B_{mk}\sin\delta_2),$$
$$\frac{\partial^2 P_m}{\partial\phi_{tv}\partial V_m} = -V_k (G_{mk}\sin\delta_2 - B_{mk}\cos\delta_2),$$
$$\frac{\partial^2 Q_m}{\partial\phi_{tv}\partial V_k} = V_k (G_{mk}\cos\delta_2 + B_{mk}\sin\delta_2).$$

Δεύτερες μερικές παράγωγοι ως προς $\varphi_{tu}$ μόνο

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial^2 \phi_{tv}} = V_k V_m \left( \sin\delta_1 \frac{\partial G_{mk}}{\partial \phi_{tv}} - \cos\delta_1 \frac{\partial B_{mk}}{\partial \phi_{tv}} \right),$$

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial^2 \phi_{tv}} = V_k V_m \left( \cos\delta_1 \frac{\partial G_{mk}}{\partial \phi_{tv}} + \sin\delta_1 \frac{\partial B_{mk}}{\partial \phi_{tv}} \right),$$

$$\frac{\partial^2 P_m}{\partial^2 \phi_{tv}} = -V_m V_k \left( \sin\delta_2 \frac{\partial G_{mk}}{\partial \phi_{tv}} - \cos\delta_2 \frac{\partial B_{mk}}{\partial \phi_{tv}} \right),$$

$$\frac{\partial^2 Q_m}{\partial^2 \phi_{tv}} = V_m V_k \left( \cos\delta_2 \frac{\partial G_{mk}}{\partial \phi_{tv}} + \sin\delta_2 \frac{\partial B_{mk}}{\partial \phi_{tv}} \right),$$

$$\frac{\partial G_{km}}{\partial \phi_{tv}} = \frac{T_v U_v}{A_2} (F_1 \sin\phi_1 - F_2 \cos\phi_1),$$

$$\frac{\partial B_{km}}{\partial \phi_{tv}} = -\frac{T_v U_v}{A_2} (F_2 \sin\phi_1 + F_1 \cos\phi_1),$$

$$\frac{\partial G_{mk}}{\partial \phi_{tv}} = -\frac{T_v U_v}{A_2} (F_1 \sin\phi_2 - F_2 \cos\phi_2),$$

$$\frac{\partial B_{mk}}{\partial \phi_{tv}} = \frac{T_v U_v}{A_2} (F_2 \sin\phi_2 + F_1 \cos\phi_2).$$

Όπου:

$$\begin{aligned}
F_1 &= T^2 R_s + U_v^2 R_p + R_{\mathrm{eq1}}, \\
F_2 &= T_v^2 X_s + U_v^2 X_p + X_{\mathrm{eq1}}, \\
R_{\mathrm{eq1}} &= (R_p R_s - X_p X_s) G_o - (R_p X_s + R_s X_p) B_o, \\
X_{\mathrm{eq1}} &= (R_p R_s - X_p X_s) B_o + (R_p X_s + R_s X_p) G_o, \\
R_1 &= R_s G_o - X_s B_o, \\
R_2 &= R_s B_o + X_s G_o, \\
R_3 &= R_p G_0 - X_p B_0, \\
R_4 &= R_p B_0 + X_p G_0, \\
\phi_1 &= \phi_{tv} - \phi_{uv}, \\
\phi_2 &= \phi_{uv} - \phi_{tv}, \\
\Delta &= F_1^2 + F_2^2, \\
\delta_1 &= \theta_k - \theta_m.
\end{aligned}$$

## Γ.3 SVC

### Γ3.1 Διάνυσμα κλίσης

Είναι συνάρτηση μόνο της γωνίας έναυσης και η παράγωγος ως προς την γωνία έναυσης είναι:

$$\frac{2V_k^2}{\pi X_L}[\cos(2\alpha_{\mathrm{SVC}}) - 1]$$

### Γ3.2 Πίνακας W

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial V_k^2} = -2B_{\mathrm{SVC}},$$

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial V_k^2} = \frac{2}{X_C X_L}\left\{X_L - \frac{X_C}{\pi}[2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)]\right\},$$

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial V_k \partial B_{\mathrm{SVC}}} = -2V_k,$$

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial \alpha^2} = -\frac{4V_k \sin(2\alpha)}{\pi X_L},$$

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial \alpha \partial V_k} = \frac{4V_k[\cos(2\alpha) - 1]}{\pi X_L},$$

$$B_{\mathrm{SVC}} = -\frac{1}{X_C X_L}\left\{X_L - \frac{X_c}{\pi}[2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)]\right\}.$$

## Γ.4 TCSC

### Γ4.1 Διάνυσμα κλίσης

$$\frac{\partial P_k}{\partial \alpha} = P_k B_{\mathrm{TCSC}(1)} \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}(1)}}{\partial \alpha},$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \alpha} = Q_k B_{\mathrm{TCSC}(1)} \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}(1)}}{\partial \alpha},$$

$$\frac{\partial B_{\mathrm{TCSC}(1)}}{\partial \alpha} = B_{\mathrm{TCSC}(1)}^2 \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}(1)}}{\partial \alpha},$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}(1)}}{\partial \alpha} &= -2C_1[1 + \cos(2\alpha)] + C_2 \sin(2\alpha)\{\varpi \tan[\varpi(\pi - \alpha)] - \tan\alpha\} \\ &\quad + C_2\left\{\varpi^2 \frac{\cos^2(\pi - \alpha)}{\cos^2[\varpi(\pi - \alpha)]} - 1\right\}.\end{aligned}$$

## Γ4.2 Πίνακας W

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial\alpha\partial V_k} = -V_m \sin(\theta_k - \theta_m) B_{\mathrm{TCSC}}^2 \frac{\partial\, X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha},$$

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial\alpha\partial V_k} = [-2V_k + V_m \cos(\theta_k - \theta_m)] B_{\mathrm{TCSC}}^2 \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha},$$

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial\alpha\partial V_m} = -V_k \sin(\theta_k - \theta_m) B_{\mathrm{TCSC}}^2 \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha},$$

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial\alpha\partial V_m} = V_k \cos(\theta_k - \theta_m) B_{\mathrm{TCSC}}^2 \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha},$$

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial\alpha\partial\theta_k} = -V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m) B_{\mathrm{TCSC}}^2 \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha},$$

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial\alpha\partial\theta_k} = -V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) B_{\mathrm{TCSC}}^2 \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha},$$

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial\alpha\partial\theta_m} = V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m) B_{\mathrm{TCSC}}^2 \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha},$$

$$\frac{\partial^2 Q_k}{\partial\alpha\partial\theta_m} = V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) B_{\mathrm{TCSC}}^2 \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha},$$

$$\frac{\partial^2 P_k}{\partial\alpha^2} = -V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) \left( B_{\mathrm{TCSC}}^2 \frac{\partial^2 X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha^2} + \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha} \frac{\partial B_{\mathrm{TCSC}}^2}{\partial\alpha} \right),$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial\alpha} = \left[-V_k^2 + V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)\right] \left( B_{\mathrm{TCSC}}^2 \frac{\partial^2 X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha^2} + \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha} \frac{\partial B_{\mathrm{TCSC}}^2}{\partial\alpha} \right),$$

$$\frac{\partial^2 B_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha^2} = B_{\mathrm{TCSC}}^2 \frac{\partial^2 X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha^2} + \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha} \frac{\partial B_{\mathrm{TCSC}}^2}{\partial\alpha},$$

$$\frac{\partial B_{\mathrm{TCSC}}^2}{\partial\alpha} = -\frac{2}{X_{\mathrm{TCSC}}^3} \frac{\partial X_{\mathrm{TCSC}}}{\partial\alpha},$$

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

## ΛΙΣΤΑ ΜΕ ΑΚΡΟΝΥΜΙΑ

| **Ακρονύμιο** | **Αγγλική ορολογία** | **Ελληνική ορολογία** |
|---|---|---|
| OPF | Optimal power flow | Βέλτιστη ροή φορτίου |
| LTC | Load tap changer | Σύστημα αλλαγής τάσης |
| PS | Phase shifter | Σύστημα αλλαγής γωνίας |
| SVC | Static VAR compensator | Στατικος αντισταθμιστής άεργου ισχύος |
| TCSC | Thyristor controlled series capacitor | Αντισταθμιστής σειράς με πυκνωτές ελεγχόμενος απο θυρίστορ |
| FACTS | Flexible AC transmission systems | Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς |