



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

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΛΗΘΟΥΣ, ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ
ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΓΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ
ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καντηλάφτη Ι. Ανδρέας

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011



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

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΛΗΘΟΥΣ, ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ
ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΓΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ
ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καντηλάφτη Ι. Ανδρέας

Επίβλεψη : Πάυλος Σ. Γεωργιλιάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη 19^η Ιουλίου 2011.

.....
Πάυλος Γεωργιλιάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Κορρές
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....
Καντηλάφτη Ι. Ανδρέας

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

Copyright © Ανδρέας Καντηλάφτη, 2011.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος στα ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με τοποθέτηση εγκάρσιων πυκνωτών σε επιλεγμένους ζυγούς για να προκαλούν την απαραίτητη έγχυση αέργου ισχύος στο σύστημα. Με την τοποθέτηση εγκάρσιων πυκνωτών, δεν μειώνονται μόνο οι απώλειες, αλλά επίσης βελτιώνονται οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος.

Στην παρούσα εργασία, υλοποιήθηκε αλγόριθμος σε περιβάλλον MATLAB για τον υπολογισμό του βέλτιστου πλήθους, των θέσεων και του μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών, για μείωση των απωλειών ισχύος σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για την καλύτερη και πιο εύχρηστη εφαρμογή του προγράμματος από το χρήστη δημιουργήθηκε και γραφικό περιβάλλον (GUI). Με βάση τον αλγόριθμο μείωσης των απωλειών, αρχικά γίνεται ανάλυση ροών φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson και έπειτα υπολογίζονται οι απώλειες του υπό μελέτη δικτύου και τα ρεύματα σε όλους τους κλάδους του. Στη συνέχεια, μέσω υπολογισμού της μείωσης των απωλειών ισχύος με την τοποθέτηση μεμονωμένων πυκνωτών, υπολογίζεται το βέλτιστο πλήθος και οι θέσεις τοποθέτησης των εγκάρσιων πυκνωτών. Τέλος, υπολογίζεται το βέλτιστο μέγεθος των πυκνωτών που θα τοποθετηθούν, στις θέσεις που έχουν υπολογιστεί, και η μείωση των απωλειών ισχύος που επιτεύχθηκε, μέσω της τοποθέτησης πολλαπλών πυκνωτών.

Ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε εφαρμόστηκε σε ένα δίκτυο 4 ζυγών, ένα δίκτυο 15 ζυγών, δύο δίκτυα 10 ζυγών, και σε ένα δίκτυο 34 ζυγών. Τα αποτελέσματα των εφαρμογών της μεθόδου της εργασίας παρουσιάζονται και συγκρίνονται με διαθέσιμα αποτελέσματα άλλων μεθόδων βέλτιστης τοποθέτησης πυκνωτών στα ίδια δίκτυα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Αντιστάθμιση δικτύων διανομής, συμμετρικά ακτινικά δίκτυα διανομής, μείωση απωλειών ισχύος, βέλτιστη τοποθέτηση πυκνωτών, πυκνωτές, ανάλυση ροών φορτίου.

ABSTRACT

The scope of this thesis is to maximize the power loss reduction in radial distribution networks. In order to achieve the minimization of power losses a solution is the allocation of shunt capacitors on selected buses to cause the necessary injected reactive power into the system. Shunt capacitors placement, not only reduces the power losses, but also improves the bus voltages of the system.

In the present diploma thesis, an algorithm in MATLAB environment was implemented for calculating the optimal number, buses and capacitors size, for power loss reduction, in radial distribution networks. A graphical interface (GUI) was created in order to make the program user-friendly. Bases on the power loss reduction algorithm, a power flow analysis with Newton-Raphson method is calculated first and then line losses and line currents of the studied network are calculated. Then, a loss minimization with single capacitors is computed and the optimal number of capacitors as well as the locations (buses) of shunt capacitors are calculated. Finally, the optimal sizes of capacitors are calculated, based on loss minimization with multiple capacitors.

The implemented algorithm was tested on a 4 buses network, a 15 buses network, two 10 buses network, and a 34 buses network. The application results using this method are presented and compared with available results of other methods for optimal capacitor placement for the same test systems.

KEY WORDS

Distribution systems compensation, balanced radial distribution systems, power loss reduction, optimal capacitor allocation, capacitors, power flow analysis.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2010-2011 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, το άριστο κλίμα συνεργασίας κατά τη διάρκεια εκπόνησής της, τις συμβουλές και τις επισημάνσεις του. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη βοήθεια τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Αντικείμενο της εργασίας	2
1.3 Δομή της εργασίας	3
1.4 Βιβλιογραφία.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	5
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Κατηγοριοποίηση μεθόδων βέλτιστης τοποθέτησης πυκνωτών	5
2.2.1 Αναλυτικές μέθοδοι.....	6
2.2.2 Μέθοδοι αριθμητικού προγραμματισμού.....	7
2.2.3 Ευριστικές μέθοδοι.....	8
2.2.4 Μέθοδοι βασισμένες στην τεχνητή νοημοσύνη	9
2.2.4.1 Γενετικοί αλγόριθμοι.....	9
2.2.4.2 Συστήματα εμπειρογνώμονα	9
2.2.4.3 Προσομοιωμένη απόπτηση	10
2.2.4.4 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	10
2.2.4.5 Ασαφής λογική.....	11
2.2.5 Κριτήρια επιλογής μεθόδου βέλτιστης τοποθέτησης πυκνωτών.....	11
2.3 Ανάλυση μεθόδων σύγκρισης	12
2.3.1 Μέθοδος 1	12
2.3.2 Μέθοδος 2	13
2.3.3 Μέθοδος 3	14
2.3.4 Μέθοδος 4	14
2.3.5 Μέθοδος 5	15
2.4 Βιβλιογραφία.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	21
3.1 Εισαγωγή.....	21
3.2 Διατύπωση του προβλήματος ροών φορτίου	21
3.3 Επίλυση του προβλήματος	24
3.3.1 Μέθοδος Newton-Raphson	24
3.4 Βιβλιογραφία.....	27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΛΗΘΟΥΣ, ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΓΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ..... 29

4.1	Εισαγωγή.....	29
4.2	Διατύπωση και ανάλυση του προβλήματος	29
4.2.1	Μείωση απωλειών με μεμονωμένους πυκνωτές	30
4.2.2	Μείωση απωλειών με πολλαπλούς πυκνωτές	32
4.3	Αλγόριθμος.....	33
4.4	Βιβλιογραφία.....	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΛΗΘΟΥΣ, ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΓΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ..... 37

5.1	Εισαγωγή.....	37
5.2	Περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογής.....	37
5.2.1	Το περιβάλλον του MATLAB.....	38
5.2.2	Δημιουργία και εκτέλεση m-files	39
5.2.3	Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (GUI)	39
5.3	Λογισμικό εύρεσης βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	44
5.3.1	Απαιτήσεις συστήματος	44
5.3.2	Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής.....	44
5.3.3	Εισαγωγή δεδομένων	47
5.3.4	Επεξεργασία δεδομένων.....	49
5.3.5	Αποθήκευση αποτελεσμάτων και έξοδος.....	51
5.3.6	Ανάλυση m-files και δομή της εφαρμογής.....	52
5.4	Βιβλιογραφία.....	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΔΟΚΙΜΕΣ-ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ 57

6.1	Εισαγωγή.....	57
6.2	Αριθμητικό παράδειγμα	57
6.2.1	Δεδομένα συστήματος.....	57
6.2.2	Επίλυση προβλήματος ροών φορτίου	58
6.2.3	Καθορισμός βέλτιστων θέσεων με τοποθέτηση μεμονωμένων πυκνωτών	60
6.2.3.1	Υπολογισμός πρώτης βέλτιστης θέσης	60
6.2.3.2	Υπολογισμός δεύτερης βέλτιστης θέσης.....	62
6.2.3.3	Υπολογισμός τρίτης βέλτιστης θέσης	64

6.2.4	Καθορισμός βέλτιστου μεγέθους πυκνωτών με τοποθέτηση πολλαπλών πυκνωτών	65
6.3	Δίκτυο 15 ζυγών	68
6.4	Πρώτο δίκτυο 10 ζυγών	74
6.5	Δεύτερο δίκτυο 10 ζυγών	75
6.6	Δίκτυο 34 ζυγών	77
6.7	Βιβλιογραφία.....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		81
7.1	Σύνοψη εργασίας και αποτελέσματα.....	81
7.2	Επεκτάσεις της εργασίας.....	83
7.3	Βιβλιογραφία.....	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΩΝ.....		85
A.1	Δίκτυο αναλυτικού παραδείγματος	85
A.2	Δίκτυο 15 ζυγών	86
A.3	Πρώτο δίκτυο 10 ζυγών	87
A.4	Δεύτερο δίκτυο 10 ζυγών	88
A.5	Δίκτυο 34 ζυγών	89
A.6	Βιβλιογραφία.....	91

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και μέσων, τα οποία χρησιμεύουν στην εξυπηρέτηση των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας ενός συνόλου καταναλωτών. Βασικές προϋποθέσεις σωστής λειτουργίας του συστήματος είναι:

1. Να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση.
2. Να μπορεί να ικανοποιεί τη συνεχώς μεταβαλλόμενη στο χρόνο ζήτηση πραγματικής και αέργου ισχύος.
3. Η παρεχόμενη ενέργεια πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους όρους ποιότητας, όπως είναι η σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδοτήσεως.
4. Η ενέργεια πρέπει να παρέχεται με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη.

Τα ΣΗΕ από πλευράς εκτάσεως μπορούν να διακριθούν σε “Εθνικά Συστήματα”, “Περιφερειακά Συστήματα” και “Ιδιωτικά Συστήματα”, στην περίπτωση που καλύπτουν το σύνολο μιας χώρας, το σύνολο μιας γεωγραφικής περιοχής ή τις ανάγκες ενός μεμονωμένου ιδιωτικού συγκροτήματος, αντίστοιχα [1.1].

Η δομή του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια της ημέρας και από τη χωροταξική της κατανομή. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60Hz, χρησιμοποιούνται όμως και συστήματα συνεχούς ρεύματος (για μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας). Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του ΣΗΕ: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή.

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διαδικασία για τη μετατροπή μιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική και γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στους καταναλωτές προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, με την καύση ορυκτών καυσίμων, από υδροηλεκτρικούς σταθμούς, με τη ροή ή την πτώση των υδάτων, από πυρηνικούς σταθμούς, με την πυρηνική σχάση και τα τελευταία χρόνια γίνεται μια ανάπτυξη στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κυρίως με την εκμετάλλευση του αέρα και του ήλιου.

Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας καλείται το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, από την έξοδο των σταθμών παραγωγής μέχρι τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης και από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής. Περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής και υπερυψηλής τάσης, τους υποσταθμούς

ζεύξεως των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μεταφοράς.

Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου, με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας που τη μεταφέρουν μέχρι τους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης διαθέτουν επίσης και τον ουδέτερο αγωγό.

Οι πελάτες που είναι συνδεδεμένοι στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης είναι στην πλειονότητά τους βιομηχανικοί καταναλωτές με τριφασικές παροχές, ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος των πελατών εμπορικής χρήσης με μονοφασικές παροχές [1.2].

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ένα μεγάλο ποσοστό των φορτίων που τροφοδοτούνται από ένα ΣΗΕ είναι επαγωγικού χαρακτήρα και έτσι απαιτείται η παροχή αέργου ισχύος από το σύστημα. Επιπρόσθετα, άεργος ισχύς καταναλώνεται και σαν απώλειες ($I^2 \cdot X$) στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Μερικές σημαντικές επιπτώσεις της κυκλοφορίας αέργου ισχύος στο σύστημα είναι:

1. Προκαλούνται πρόσθετες απώλειες ενεργού ισχύος ($I^2 \cdot R$) στις γραμμές και τον εξοπλισμό.
2. Αυξημένη εγκατεστημένη ισχύς γραμμών και εξοπλισμού και επομένως αυξημένες επενδύσεις κεφαλαίων.
3. Πτώση τάσης από την παραγωγή προς τις θέσεις των φορτίων [1.1].

Οι απώλειες των δικτύων διανομής μέσης και χαμηλής τάσης μπορεί να αποτελούν σχετικά μικρό ποσοστό της διανεμόμενης προς τους καταναλωτές ενέργειας, όμως είναι αρκετά σημαντικές λόγω των μεγάλων ποσών της διακινούμενης ενέργειας. Για παράδειγμα, στο Ελληνικό σύστημα οι ετήσιες απώλειες ενέργειας των δικτύων μέσης και χαμηλής τάσης της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), εκφραζόμενες ως ποσοστά της εισερχόμενης ενέργειας από τα δίκτυα μεταφοράς, ανέρχονται περίπου σε ποσοστό 6,5% και η κατά προσέγγιση κατανομή τους είναι:

Δίκτυο μέσης τάσης:	3,0%
Δίκτυο χαμηλής τάσης:	2,0%
Υποσταθμοί μέσης/χαμηλής τάσης:	1,5%
Σύνολο:	6,5%

Το αντίστοιχο ποσοστό για τα δίκτυα μεταφοράς (150kV και 400kV) του Ελληνικού συστήματος είναι περίπου 4,0% [1.3].

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι να κατανεμηθεί η άεργος ισχύς στα ακτινικά δίκτυα διανομής, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ενεργού ισχύος. Για να

επιτευχθεί αυτό θα υλοποιηθεί κατάλληλος αλγόριθμος που θα υπολογίζει το βέλτιστο πλήθος, τις θέσεις και το μέγεθος (kVAr) εγκάρσιων πυκνωτών που θα τοποθετούνται στους επιλεγμένους ζυγούς (βέλτιστες θέσεις) για να προκαλούν την απαραίτητη έγχυση αέργου ισχύος στο σύστημα.

1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το αντικείμενο της εργασίας παρουσιάστηκε συνοπτικά στην Ενότητα 1.2. Στην παρούσα ενότητα θα γίνει μια παρουσίαση της δομής της εργασίας που οργανώνεται σε επτά κεφάλαια τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

- **Κεφάλαιο 1:** Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια γενική εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και στις λειτουργίες τους (παραγωγή, μεταφορά, διανομή). Αναφέρονται οι απώλειες ισχύος και ενέργειας των ΣΗΕ και περιγράφεται ο σκοπός και η δομή της εργασίας.
- **Κεφάλαιο 2:** Γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, όσον αφορά τη βέλτιστη τοποθέτηση πυκνωτών σε δίκτυα διανομής και κατηγοριοποιούνται οι διάφορες μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος. Επιπλέον γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων, με τις οποίες θα γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων στο Κεφάλαιο 6, με τη μέθοδο του Κεφαλαίου 4 χρησιμοποιώντας το λογισμικό του Κεφαλαίου 5.
- **Κεφάλαιο 3:** Διατυπώνεται και επιλύεται το πρόβλημα της ροής φορτίου. Παρουσιάζεται η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια στην επίλυση των ροών φορτίου που απαιτεί ο αλγόριθμος που θα υλοποιηθεί στο Κεφάλαιο 4.
- **Κεφάλαιο 4:** Παρουσιάζεται με ποιο τρόπο επιτυγχάνεται μείωση απωλειών με την τοποθέτηση μεμονωμένων, αλλά και πολλαπλών πυκνωτών. Επίσης, περιγράφεται ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος για την εύρεση του βέλτιστου πλήθους, της βέλτιστης θέσης και του βέλτιστου μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών, για μείωση των απωλειών ισχύος, σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Κεφάλαιο 5:** Περιγράφεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε για την εύρεση του βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών σε ακτινικά δίκτυα διανομής. Επεξηγείται ο τρόπος εισαγωγής δεδομένων, η επεξεργασία τους και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του προγράμματος. Ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB, όπου επιπλέον δημιουργήθηκε γραφικό περιβάλλον (GUI) για τη λειτουργία του λογισμικού.
- **Κεφάλαιο 6:** Παρουσιάζεται αναλυτικά ένα αριθμητικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου εύρεσης βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών σε ένα μικρό δίκτυο 4 ζυγών. Ακόμα, παρουσιάζονται και άλλες 4 εφαρμογές της μεθόδου της εργασίας, αλλά και τα αποτελέσματά τους. Επίσης γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων και σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα των μεθόδων που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2.
- **Κεφάλαιο 7:** Συνοψίζεται η εργασία, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επεκτάσεις της εργασίας.

- **Παράρτημα Α:** Περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα δεδομένα των συστημάτων που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 6, δηλαδή συνδεσμολογία, δεδομένα γραμμών και δεδομένα φορτίων των ΣΗΕ.

1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι, Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985, σελ. 1, 250.
- [1.2] Κ. Βουρνάς, και Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001, σελ. 1-20.
- [1.3] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1994, σελ. 138.

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας οι απώλειες ισχύος αποτελούν ένα σημαντικό μέρος της παραγόμενης ισχύος και για αυτό είναι πολύ σημαντική η μείωση τους. Ο λόγος είναι ότι τα δίκτυα διανομής συνδέουν τους καταναλωτές με το δίκτυο μεταφοράς υψηλής τάσης και έτσι, λόγω της πιο χαμηλής τάσης σχετικά που βρίσκονται, έχουν μεγαλύτερη τιμή ρεύματος και επομένως οι απώλειες ισχύος είναι σημαντικά μεγαλύτερες στα δίκτυα διανομής, σε σχέση με τα δίκτυα υψηλής τάσης. Μετά από μελέτες βρέθηκε ότι οι απώλειες ισχύος στα δίκτυα διανομής είναι περίπου ίσες με 13% της παραγόμενης ισχύος [2.1].

Μια λύση για τη μείωση των απωλειών των δικτύων διανομής είναι η επαναδιαμόρφωση του δικτύου, η οποία αλλάζει τη διαδρομή της ροής ισχύος, από την πηγή στον καταναλωτή, με άνοιγμα και κλείσιμο διακοπών. Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών ισχύος οφείλεται στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος των γραμμών, μια εναλλακτική και πιο εύχρηστη λύση για τη μείωση των απωλειών είναι η τοποθέτηση πυκνωτών σε ζυγούς του συστήματος.

Με την τοποθέτηση εγκάρσιων πυκνωτών, δεν μειώνονται μόνο οι απώλειες, αλλά επίσης βελτιώνονται οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος. Επομένως, για την επίλυση του προβλήματος μείωσης των απωλειών σε ακτινικά δίκτυα διανομής πρέπει να βρεθεί η θέση τοποθέτησης πυκνωτών, το μέγεθός τους και ο αριθμός τους, που επιτυγχάνουν τη μεγαλύτερη δυνατή μείωση απωλειών, χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί λειτουργίας του συστήματος.

2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ

Το πρόβλημα της τοποθέτησης πυκνωτών σε δίκτυα διανομής για τη μείωση των απωλειών ερευνάται εδώ και αρκετά χρόνια (περίπου από το 1950). Λόγω του πλήθους των μεθόδων που αναπτύχθηκαν και της τεράστιας βιβλιογραφίας επί του θέματος, γίνεται μια κατηγοριοποίησή τους. Οι τεχνικές επίλυσης του προβλήματος χωρίζονται στις επόμενες 4 κατηγορίες: αναλυτικές (analytical methods), αριθμητικού προγραμματισμού (numerical programming methods), ευριστικές (heuristic methods) και μέθοδοι βασισμένες στην τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence based methods).

Ο χρήστης βασισμένος σε αυτή την κατηγοριοποίηση, μπορεί να αποφασίσει ποιας κατηγορίας αλγόριθμο είναι καλύτερα να υλοποιήσει, σύμφωνα με το μέγεθος και την τοπολογία του δικτύου διανομής του, την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων, τα διαθέσιμα δεδομένα που έχει και τους πόρους που διαθέτει.

Παρακάτω ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των 4 κατηγοριών των μεθόδων τοποθέτησης πυκνωτών και γίνεται αναφορά σε μερικά από τα δημοσιευμένα άρθρα των αντίστοιχων μεθόδων σύμφωνα με το [2.2].

2.2.1 Αναλυτικές μέθοδοι

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι περισσότερες από τις τεχνικές επίλυσης που αναπτύχθηκαν χρονικά πρώτες. Οι αλγόριθμοι αυτοί επινοήθηκαν και εφαρμόστηκαν όταν οι δυνατότητες των υπολογιστικών συστημάτων ήταν περιορισμένες και πολύ δαπανηρές. Η κεντρική ιδέα τους ήταν με αναλυτικούς υπολογισμούς να επιτύχουν μεγιστοποίηση μιας συνάρτησης οικονομικού οφέλους λόγω εγκατάστασης πυκνωτών, που συνήθως δινόταν από μια σχέση της μορφής:

$$S = K_E \cdot \Delta E + K_P \cdot \Delta P - K_C \cdot C \quad (2.1)$$

όπου $K_E \cdot \Delta E$ και $K_P \cdot \Delta P$ είναι το οικονομικό όφελος από τη μείωση των απωλειών ενέργειας και μέγιστης ισχύος, αντίστοιχα, μετά την τοποθέτηση των πυκνωτών, και $K_C \cdot C$ είναι το κόστος εγκατάστασης των πυκνωτών.

Μεταξύ 1956 και 1978, οι πρώτοι που ανέπτυξαν αναλυτικές τεχνικές βέλτιστης τοποθέτησης πυκνωτών είναι οι Neagle και Samson [2.3], Cook [2.4], [2.5], Schmill [2.6], Chang [2.7], [2.8] και Bae [2.9], οι οποίοι χρησιμοποίησαν αναλυτικές προσεγγίσεις για να μεγιστοποιήσουν μια συνάρτηση της μορφής (2.1). Παρόλο που επιτυγχάνονταν με εύκολο τρόπο οι απαραίτητες λύσεις, έκαναν κάποιες μη ρεαλιστικές παραδοχές, όπως ίδιο μέγεθος αγωγών και ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου. Τότε εφευρέθηκε και η γνωστή μέθοδος των “δύο τρίτων”, όπου σύμφωνα με αυτή, για τη μέγιστη μείωση των απωλειών, έπρεπε να τοποθετηθεί πυκνωτής στα δύο τρίτα της συνολικής απόστασης κατά μήκος της γραμμής τροφοδότησης μεγέθους ίσου με τα δύο τρίτα της μέγιστης ζήτησης αέργου ισχύος.

Αυτές οι πρώτες αναλυτικές μέθοδοι μπορούν να γίνουν εύκολα κατανοητές και να υλοποιηθούν. Παρά τις όχι και τόσο ρεαλιστικές παραδοχές που γίνονται από τον κανόνα των “δύο τρίτων” εφαρμόζεται αρκετά από διάφορες εταιρίες [2.10] και ακόμα κάποιοι κατασκευαστές πυκνωτών έχουν αυτόν τον κανόνα μέσα στους οδηγούς τους [2.11].

Μεταγενέστερα, για να επιτύχουν πιο ακριβή αποτελέσματα, βελτιώθηκαν τα μοντέλα των αγωγών τροφοδότησης. Οι Grainger et al. [2.12], [2.13] και Salam et al. [2.14], [2.15] διατύπωσαν ισοδύναμα κανονικοποιημένα μοντέλα, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά μεγέθη αγωγών και μη ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου. Οι Grainger et al. συμπεριέλαβαν αποξεύξιμους πυκνωτές (switched capacitors) στους αλγόριθμους τους και μια περαιτέρω βελτίωση ήταν ο συνδυασμός πυκνωτών με ρυθμιστές τάσης (voltage regulators) [2.16]-[2.18]. Οι τελευταίες αναλυτικές μέθοδοι προσφέρουν ρεαλιστική μοντελοποίηση των ακτινικών δικτύων διανομής και λαμβάνουν υπόψη και τη μεταβλητότητα του φορτίου.

Ένα μειονέκτημα όλων των αναλυτικών μεθόδων, είναι η μοντελοποίηση της θέσης τοποθέτησης των πυκνωτών, αλλά και του μεγέθους τους σαν συνεχείς μεταβλητές. Έτσι, το

μέγεθος ενός πυκνωτή που υπολογίστηκε μπορεί να μην ταιριάζει με τα διαθέσιμα μεγέθη ή η υπολογισμένη θέση τοποθέτησης να μην συμπίπτει με τις φυσικές τοποθεσίες των ζυγών του δικτύου. Η στρογγυλοποίηση των αποτελεσμάτων προς τα πάνω ή κάτω, είναι πιθανόν να μεταβάλλει ανεπιθύμητα τις τάσεις των ζυγών ή η μείωση απωλειών να είναι μικρότερη από αυτή που αρχικά υπολογίστηκε. Οι πιο πρόσφατες αναλυτικές μέθοδοι προσφέρουν πιο ακριβή αποτελέσματα και είναι πιο κατάλληλες για μεγάλα δίκτυα διανομής από τη μια, αλλά από την άλλη απαιτούν περισσότερα στοιχεία σαν δεδομένα και περισσότερο χρόνο υλοποίησης.

2.2.2 Μέθοδοι αριθμητικού προγραμματισμού

Καθώς η υπολογιστική ισχύς έγινε πιο εύκολα διαθέσιμη και η υπολογιστική μνήμη πιο φθηνή, για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης αναπτύχθηκαν αριθμητικές υπολογιστικές μέθοδοι. Πρόκειται για επαναληπτικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, όπου οι τιμές των μεταβλητών απόφασης πρέπει ακόμα να ικανοποιούν ένα σύνολο περιορισμών.

Στην περίπτωση της βέλτιστης τοποθέτησης πυκνωτών, η συνάρτηση εξοικονόμησης θα είναι η αντικειμενική συνάρτηση και τα σημεία τοποθέτησης, το μέγεθος και ο αριθμός των πυκνωτών, οι τάσεις των ζυγών και οι τιμές των ρευμάτων, θα είναι οι μεταβλητές απόφασης, οι οποίες πρέπει να τηρούν ένα σύνολο περιορισμών. Οι μέθοδοι αριθμητικού προγραμματισμού επιτρέπουν τη χρήση πιο λεπτομερών συναρτήσεων κόστους για το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης πυκνωτών. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις μπορούν να λάβουν υπόψη τους τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς, τις διακριτές τιμές των πυκνωτών και τα πραγματικά σημεία που βρίσκονται οι ζυγοί.

Με τις μεθόδους αριθμητικού προγραμματισμού, η βέλτιστη τοποθέτηση πυκνωτών μπορεί να διατυπωθεί ως:

$$\max\{S\} = \max\{K_L \cdot \Delta L - K_C \cdot C\} \quad (2.2)$$

υπό τον περιορισμό:

$$\Delta V \leq \Delta V_{MAX} \quad (2.3)$$

όπου $K_L \cdot \Delta L$ είναι η εξοικονόμηση κόστους, που μπορεί να συμπεριλαμβάνει τη μείωση της ενέργειας και της μέγιστης ισχύος, $K_C \cdot C$ είναι το κόστος εγκατάστασης των πυκνωτών, ΔV είναι η μεταβολή της τάσης λόγω της εγκατάστασης των πυκνωτών, που δεν πρέπει να περνάει ένα ανώτατο όριο ΔV_{MAX} .

Ο Duran [2.19] ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε τη μέθοδο του δυναμικού προγραμματισμού, όπου λάμβανε υπόψη τη μείωση των απωλειών και τις διακριτές τιμές μεγέθους των πυκνωτών. Οι Fawzi et al. [2.20] ακολούθησαν την προηγούμενη μέθοδο, αλλά συμπεριέλαβαν στη συνάρτηση εξοικονόμησης τα kVA που εξοικονομούνται από τον υποσταθμό. Οι Ronnavaikko και Rao [2.21] χρησιμοποίησαν μια αριθμητική μέθοδο, που ονομάζεται μέθοδος τοπικής διακύμανσης (method of local variations), και επέκτειναν το πρόβλημα συνυπολογίζοντας τις επιδράσεις από την ανάπτυξη και τη μεταβολή του φορτίου και των αποξέυξιμων πυκνωτών. Παρόμοια, οι Baran και Wu [2.22], [2.23] διατύπωσαν το

πρόβλημα χρησιμοποιώντας μεικτό ακέραιο προγραμματισμό. Οι Baldick και Wu [2.24] συνέχισαν χρησιμοποιώντας τετραγωνικό ακέραιο προγραμματισμό για να συνδυάσουν τη βέλτιστη λειτουργία των πυκνωτών και των ρυθμιστών στα δίκτυα διανομής.

Παρατηρώντας τις μεθόδους αριθμητικού προγραμματισμού, φαίνεται ότι το επίπεδο της βελτίωσης και της πολυπλοκότητας των μοντέλων αυξάνεται ανάλογα με τη χρονολογία ανάπτυξής τους. Η εξέλιξη αυτή οφείλεται και στην πρόοδο των υπολογιστικών συστημάτων.

Μερικές από τις μεθόδους αυτής της κατηγορίας έχουν το πλεονέκτημα να λαμβάνουν υπόψη τις φυσικές θέσεις των ζυγών του συστήματος και τις διακριτές τιμές μεγέθους των πυκνωτών, κάτι που πλεονεκτεί σε σχέση με τις αναλυτικές μεθόδους. Από την άλλη όμως, τα δεδομένα που απαιτούνται είναι περισσότερα και η προετοιμασία του προγράμματος στις αριθμητικές μεθόδους χρειάζεται περισσότερο χρόνο από τις αναλυτικές. Ακόμα, θα πρέπει να οριστεί και η κυρτότητα (convexity) του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης πυκνωτών για να μπορεί να προσδιοριστεί αν τα τελικά αποτελέσματα από τη μέθοδο αριθμητικού προγραμματισμού αποτελούν τοπικό ή ολικό μέγιστο. Τέλος, στις περιπτώσεις που συνυπολογίζονται το κέρδος από τα kVA που εξοικονομούνται και οι επιδράσεις από την ανάπτυξη του φορτίου, είναι δύσκολο να γίνει συσχέτισή τους με οικονομικά μεγέθη.

2.2.3 Ευριστικές μέθοδοι

Πρόκειται για εμπειρικούς κανόνες που αναπτύσσονται μέσω της διαίσθησης, εμπειρίας και κρίσης. Οι ευριστικές μέθοδοι παράγουν με γρήγορο και πρακτικό τρόπο, που μειώνει τον τεράστιο χώρο αναζήτησης, μια λύση του προβλήματος, που είναι αρκετά κοντά στη βέλτιστη.

Αρχικά, οι ευριστικές μέθοδοι αναπτύχθηκαν για τη μείωση των απωλειών σε δίκτυα διανομής με την επαναδιαμόρφωση του συστήματος [2.25], [2.26]. Οι Abdel-Salam et al. [2.27] ανέπτυξαν μια τεχνική βασισμένη σε αυτές τις ιδέες, για να εντοπίζει σε ποιο μέρος του δικτύου διανομής προκαλούνται οι μεγαλύτερες απώλειες λόγω της αέργου συνιστώσας του ρεύματος και έπειτα, να εντοπίζει τους ευαίσθητους ζυγούς αυτού του μέρους του συστήματος, που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση των απωλειών του. Οι πυκνωτές που θα τοποθετηθούν στους ευαίσθητους ζυγούς καθορίζονται στη συνέχεια από τη μέγιστη μείωση απωλειών που προκαλείται από την αντιστάθμιση του δικτύου. Οι M. Chis et al. [2.28] βελτίωσαν τη μέθοδο [2.27], καθορίζοντας τους ευαίσθητους ζυγούς που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση σε ολόκληρο το σύστημα και όχι σε μέρος αυτού και όσον αφορά το μέγεθος των πυκνωτών, με την εύρεση της λύσης που μεγιστοποιεί την εξοικονόμηση του δικτύου από τη μείωση των απωλειών ενέργειας, αλλά και μέγιστης ισχύος. Ακόμα κάτι σημαντικό είναι ότι δεν αγνοεί τη μεταβλητότητα του φορτίου.

Οι ευριστικές μέθοδοι που αναφέρθηκαν, είναι εύκολο να κατανοηθούν και είναι απλές στην υλοποίησή τους, σε σχέση με τις αναλυτικές και τις μεθόδους αριθμητικού προγραμματισμού. Από την άλλη όμως, τα αποτελέσματά τους μπορεί να μην είναι τα βέλτιστα.

2.2.4 Μέθοδοι βασισμένες στην τεχνητή νοημοσύνη

Είναι η πιο πρόσφατη κατηγορία και άρχισε μετά τη διάδοση της τεχνητής νοημοσύνης. Πιο συγκεκριμένα, για τη βέλτιστη τοποθέτηση πυκνωτών σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιήθηκαν οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms), τα συστήματα εμπειρογνώμονα (expert systems), η προσομοιωμένη απόπτηση (simulated annealing), τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks) και η ασαφής λογική (fuzzy set theory).

2.2.4.1 Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν τη θεωρία της εξέλιξης της φύσης (αναπαραγωγή, μετάλλαξη, εξέλιξη, θάνατος οργανισμών), για να εκτελέσουν μια αναζήτηση στο χώρο των υπονήφιων λύσεων με στόχο την εύρεση αποδεκτών λύσεων, σύμφωνα με κάποιο κριτήριο. Η προσέγγιση αυτή, αντί να ασχολείται με τις παραμέτρους, απαιτεί την κωδικοποίησή τους. Οι γενετικοί αλγόριθμοι λειτουργούν παίρνοντας ένα πλήθος από τις παραμέτρους αυτές που παράγουν τα καλύτερα αποτελέσματα, ενώ μετά από ένα συνδυασμό ζευγαρώματος (mating), διασταύρωσης (crossover) και μετάλλαξης (mutation) των παραμέτρων αυτών προκύπτει ένα καλύτερο σύνολο κωδικοποιημένων παραμέτρων. Στη γενική περίπτωση, αυτές οι μέθοδοι υλοποιούνται εύκολα και μπορούν να εντοπίσουν τη βέλτιστη λύση.

Οι Boone και Chiang [2.29] επινόησαν μια μέθοδο βασισμένη στους γενετικούς αλγόριθμους για τον προσδιορισμό της βέλτιστης θέσης και του μεγέθους των πυκνωτών. Τα μεγέθη και οι θέσεις των πυκνωτών κωδικοποιούνταν υπό μορφή δυαδικών συμβολοσειρών και μετά από μια εφαρμογή διασταύρωσης, προέκυπτε ένα νέο σύνολο. Η διατύπωση του προβλήματος αφορούσε μόνο το κόστος των πυκνωτών και τη μείωση της μέγιστης ισχύος. Οι Sundhararajan και Pahwa [2.30] χρησιμοποίησαν επίσης γενετικό αλγόριθμο για τη βέλτιστη επιλογή πυκνωτών σε ακτινικά δίκτυα διανομής. Μπορεί να εφαρμόζουν την ίδια διατύπωση με το [2.29], όσον αφορά τη μείωση των απωλειών, αλλά διαφέρουν στο ότι οι κωδικοποιημένες συμβολοσειρές δεν υφίστανται διαδικασίες μετάλλαξης ή διασταύρωσης αλλά μια διαφορετική διαδικασία. Οι Miu et al. [2.31] επανεξέτασαν τη διατύπωση του [2.29] και πρόσθεσαν κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά για πυκνωτές αντικατάστασης και για τον έλεγχο ασύμμετρων δικτύων διανομής.

2.2.4.2 Συστήματα εμπειρογνώμονα

Αποτελούνται από μια συλλογή κανόνων, εμπειρικής γνώσης και μια διαδικασία που εξάγει αποτελέσματα για να επιτευχθεί ένας λογικός συλλογισμός. Γενικά, ένα σύστημα εμπειρογνώμονα είναι πολύ χρήσιμο στα προβλήματα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτούν λήψη αποφάσεων ή εμπειρικών κρίσεων και εφαρμόζονται κυρίως στη διάγνωση σφαλμάτων, στο σχεδιασμό και τον προγραμματισμό ενός συστήματος [2.32].

Οι Salama et al. [2.33] ανέπτυξαν ένα σύστημα εμπειρογνώμονα, που περιλάμβανε ανθρώπινες εμπειρίες, για τον έλεγχο της αέργου ισχύος σε δίκτυα διανομής. Σε συνδυασμό με τη μέθοδο τοποθέτησης πυκνωτών που περιγράφεται στα [2.14], [2.15] για τη μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης λόγω της μείωσης των απωλειών μέγιστης ισχύος και των

απωλειών ενέργειας, οι ανθρώπινες εμπειρίες παρέχουν πληροφορίες στο χρήστη για να τον καθοδηγήσουν στον έλεγχο της αέργου ισχύος, κατά τα στάδια του σχεδιασμού, της λειτουργίας και της επέκτασης του συστήματος.

2.2.4.3 Προσομοιωμένη ανόπτηση

Η προσομοιωμένη ανόπτηση είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που βασίζεται στην ανόπτηση των στερεών. Κατά τη διαδικασία της ανόπτησης, ένα υλικό θερμαίνεται μέχρι μια υψηλή θερμοκρασία και μετά ψύχεται με ελεγχόμενο τρόπο για να έρθει σε μια τελική επιθυμητή κατάσταση. Όταν το υλικό βρίσκεται στην υψηλή θερμοκρασία, τα σωματίδιά του είναι σε τυχαίο σχηματισμό, ενώ μετά που ψύχεται τα σωματίδια οργανώνονται σε ένα πλέγμα που είναι μια κατάσταση ελάχιστης ενέργειας.

Για το πρόβλημα τοποθέτησης πυκνωτών τώρα, χρησιμοποιείται μια συνάρτηση συνολικού κόστους, αντί για συνάρτηση εξοικονόμησης. Σε αναλογία με την ελάχιστη ενεργειακή κατάσταση των προς ανόπτηση υλικών, έτσι και οι Ananthapadmanabha et al. [2.35] χρησιμοποίησαν την προσομοιωμένη ανόπτηση για να ελαχιστοποιήσουν τη συνάρτηση συνολικού κόστους που δίνεται από τη σχέση:

$$T_{loss} = K_P \cdot P_{loss} + K_E \cdot E_{loss} + K_C \cdot C \quad (2.4)$$

όπου $K_P \cdot P_{loss}$ είναι το κόστος από τις απώλειες της μέγιστης ισχύος, $K_E \cdot E_{loss}$ είναι το κόστος των απωλειών ενέργειας και $K_C \cdot C$ είναι το κόστος της εγκατάστασης των πυκνωτών.

2.2.4.4 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι διασυνδέσεις νευρώνων, που προσομοιώνουν το νευρικό σύστημα του ανθρώπινου εγκεφάλου και είναι πολύ χρήσιμα στην περίπτωση αποτύπωσης μη γραμμικών σχέσεων μεταξύ κάποιων εισόδων και εξόδων.

Αποτελούνται από τρία είδη νευρώνων που είναι οι νευρώνες εισόδου, οι νευρώνες εξόδου και οι υπολογιστικοί ή κρυμμένοι νευρώνες. Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο επιτρέπει την είσοδο γνωστών δεδομένων και μειώνει τη διαφορά μεταξύ των τιμών των επιθυμητών (γνωστών) εξόδων και των εξόδων που υπολογίζονται από το νευρωνικό δίκτυο. Για την εξασφάλιση της ορθότητας των εξόδων, πρέπει να υπάρχουν οι απαραίτητοι κρυμμένοι νευρώνες και τα κατάλληλα δεδομένα εισόδου. Στη γενική περίπτωση, ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, αφού δεχτεί ένα σύνολο δεδομένων, μπορεί να προσφέρει σε μικρό χρονικό διάστημα τα αποτελέσματα.

Οι Santoso και Tan [2.36] χρησιμοποίησαν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για το βέλτιστο έλεγχο αποζεύξιμων πυκνωτών, όπου για τη μέθοδό τους έφτιαξαν δύο νευρωνικά δίκτυα. Το πρώτο προβλέπει τη μεταβολή του φορτίου από ένα σύνολο προηγούμενων τιμών του φορτίου που μετρήθηκαν και το άλλο επιλέγει τις βέλτιστες θέσεις τοποθέτησης πυκνωτών βασισμένο στη μεγιστοποίηση της μείωσης απωλειών για τη μεταβολή του φορτίου, που υπολογίστηκε από το πρώτο δίκτυο. Παρά τα υποσχόμενα αποτελέσματα της μεθόδου σε μικρά δίκτυα, σε μεγαλύτερα και πιο ρεαλιστικά δίκτυα διανομής δεν είναι η κατάλληλη. Οι Gu και Rizy [2.37] ακολούθησαν τη μέθοδο αυτή και πρόσθεσαν μια διαδικασία ελέγχου των ρυθμιστών τάσης του δικτύου διανομής.

2.2.4.5 Ασαφής λογική

Η έννοια της ασαφούς λογικής εισήχθη από τον Zadeh [2.38] στα μέσα της δεκαετίας του 1960, σαν ένα εργαλείο αντιμετώπισης μιας αβέβαιης μοντελοποίησης. Μια ασαφής μεταβλητή μοντελοποιείται από μια συνάρτηση συμμετοχής, η οποία αποδίδει ένα βαθμό συμμετοχής σε ένα σύνολο και παίρνει τιμές από 0 έως 1.

Ο Chin [2.39] χρησιμοποίησε την ασαφή λογική και έφτιαξε τρεις συναρτήσεις συμμετοχής για να περιγράψει τις απώλειες, την απόκλιση της τάσης των ζυγών, και την αρμονική παραμόρφωση. Από την τομή αυτών των συναρτήσεων καθορίζεται μια μεταβλητή απόφασης για την τοποθέτηση ή όχι πυκνωτή για κάθε ζυγό του συστήματος και τελικά, επιλέγονται οι ζυγοί με τις μεγαλύτερες τιμές, όμως δεν γίνεται κάποιος μαθηματικός υπολογισμός για τις τιμές των πυκνωτών που θα τοποθετηθούν. Οι H. Ng et al. [2.40] επίσης εφάρμοσαν μια ασαφή συλλογιστική προσέγγιση για το πρόβλημα. Δύο δείκτες, της τάσης και των απωλειών ισχύος του συστήματος, συνδέονται με μια συνάρτηση συμμετοχής και χρησιμοποιεί ένα σύστημα εμπειρογνώμονα βασισμένο στην ασαφή λογική, αντί στη δυαδική, για να εξάγει ένα δείκτη καταλληλότητας τοποθέτησης πυκνωτή σε κάθε ζυγό. Έπειτα, για την τοποθέτηση πυκνωτών επιλέγονται οι ζυγοί με τους μεγαλύτερους δείκτες καταλληλότητας. Το ασαφές σύστημα της μεθόδου αυτής, λαμβάνει υπόψη οποιαδήποτε αβεβαιότητα στις παραμέτρους ή έλλειψη δεδομένων.

Όλες οι παραπάνω μέθοδοι που είναι βασισμένες στην τεχνητή νοημοσύνη, μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας εμπορικά διαθέσιμα προγράμματα, με τη βοήθεια τεχνικών βασισμένων σε γενετικούς αλγορίθμους, προσομοιωμένης απόκτησης ή τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Για εφαρμογές πραγματικού χρόνου (online applications) προτείνεται η χρήση τεχνικών με σύστημα εμπειρογνώμονα, ενώ οι τεχνικές με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μπορούν να εφαρμοστούν μόνο για ένα συγκεκριμένο σύνολο φορτίων.

2.2.5 Κριτήρια επιλογής μεθόδου βέλτιστης τοποθέτησης πυκνωτών

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επίλυσης του προβλήματος τοποθέτησης πυκνωτών σε ένα δίκτυο διανομής δεν είναι απόλυτη, αλλά εξαρτάται από τις απαιτήσεις του χρήστη. Πιο συγκεκριμένα, εξαρτάται από το πρόβλημα που θα επιλέξει να λύσει ο χρήστης, την πολυπλοκότητά του, την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων και την πρακτικότητα της υλοποίησης. Παρακάτω περιγράφονται τα κριτήρια επιλογής μεθόδου.

- Πρόβλημα τοποθέτησης πυκνωτών προς επίλυση.

Το πρόβλημα τοποθέτησης πυκνωτών μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες που είναι ο σχεδιασμός, η επέκταση και ο έλεγχος του συστήματος. Οι περισσότερες τεχνικές επίλυσης του προβλήματος ανήκουν στην κατηγορία σχεδιασμού του συστήματος, ενώ πολλές από αυτές μπορούν να εφαρμοστούν και στην επέκταση του συστήματος, αν λάβουν υπόψη την αύξηση του φορτίου και τη μετατροπή του συστήματος. Οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επέκταση του συστήματος χωρίς καμιά τροποποίηση είναι οι [2.21], [2.31], [2.33] και [2.34]. Για την περίπτωση ελέγχου του συστήματος, η μέθοδος πρέπει να περιέχει λειτουργία αποζεύξιμων πυκνωτών για μεγαλύτερη μείωση των απωλειών. Για αυτή την υποκατηγορία μερικές μέθοδοι είναι οι [2.31], [2.36] και [2.37].

- Πολυπλοκότητα του προβλήματος.
Για την επίλυση του προβλήματος ο χρήστης πρέπει να αποφασίσει τις παραμέτρους που θα συμπεριλάβει στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η συνάρτηση εξοικονόμησης μπορεί να περιέχει την εξοικονόμηση χρημάτων, από τη μείωση των απωλειών, τα kVA που εξοικονομούνται από τον υποσταθμό και τη βελτίωση των τάσεων. Πρέπει ακόμα να αποφασίσει αν θα λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα του φορτίου, πως θα μοντελοποιήσει τα φορτία και αν θα συμπεριλάβει ρυθμιστές τάσης. Στην πολυπλοκότητα του προβλήματος ανήκει και το είδος του δικτύου διανομής. Μερικές από τις τεχνικές εφαρμόζονται σε δίκτυα με μόνο τον κορμό χωρίς διακλαδώσεις, ενώ άλλες τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν σε ακτινικά δίκτυα με διακλαδώσεις και τέλος, λίγες τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε τοπολογία. Όλες τις παραμέτρους αυτές δεν υπάρχει μέθοδος που να τις συμπεριλαμβάνει, αλλά γενικά όσο πιο πολλές παραμέτρους ζητάει ο χρήστης, τόσο πιο δύσκολη είναι η υλοποίηση της μεθόδου και θα απαιτούνται περισσότερα δεδομένα του συστήματος.
- Ακρίβεια αποτελεσμάτων.
Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από τη μοντελοποίηση του προβλήματος και τη μέθοδο βελτιστοποίησης που ακολουθείται. Οι πιο πρόσφατες αναλυτικές μέθοδοι που αναπτύχθηκαν, οι οποίες χρησιμοποιούν ισοδύναμα μοντέλα τροφοδότησης και δεν αγνοούν τη μεταβλητότητα του φορτίου, παράγουν πιο ακριβή αποτελέσματα από τις προηγούμενες τεχνικές. Ακόμα, μερικές μέθοδοι αριθμητικού προγραμματισμού, ευριστικές και τεχνικές βασισμένες στην τεχνητή νοημοσύνη που θεωρούν τους πυκνωτές σαν διακριτές τιμές και δεν παραμελούν τη μη γραμμικότητα του κόστους των πυκνωτών, εξάγουν αρκετά ακριβή αποτελέσματα. Σημαντικός παράγοντας για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι και η διαθεσιμότητα των απαραίτητων δεδομένων του συστήματος.
- Πρακτικότητα.
Με την πρακτικότητα ορίζεται η ευχέρεια με την οποία κατανοείται και υλοποιείται μια μέθοδος. Πρόκειται για το πιο υποκειμενικό κριτήριο επιλογής μεθόδου από ένα χρήστη, αλλά είναι και από τα πιο σημαντικά κριτήρια. Για παράδειγμα, μια μέθοδος μπορεί να απαιτεί πολλά στοιχεία του συστήματος σαν δεδομένα, τα οποία δεν είναι διαθέσιμα, ενώ μια άλλη να είναι πολύ απλή στην εφαρμογή της και να δίνει και τη ζητούμενη ακρίβεια αποτελεσμάτων.

2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται πέντε μέθοδοι, με τις οποίες στο Κεφάλαιο 6 θα συγκριθεί η μέθοδος βέλτιστης τοποθέτησης πυκνωτών της διπλωματικής εργασίας.

2.3.1 Μέθοδος 1 [2.13]

Πρόκειται για τη μέθοδο του άρθρου [2.13]. Το πρόβλημα που επιλύει είναι ο υπολογισμός βέλτιστης θέσης και/ή μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών, που θα τοποθετηθούν στον κορμό ενός δικτύου διανομής, με σκοπό να αυξηθούν τα οικονομικά οφέλη από τη μείωση των απωλειών ενέργειας και ισχύος.

Ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων αριθμητικού προγραμματισμού και η αντικειμενική της συνάρτηση είναι η ακόλουθη:

$$\max\{S\} = \max\{K_P \cdot LP + K_E \cdot LE - K_C \cdot \sum_{i=1}^n Q_{Ci}\} \quad (2.5)$$

όπου K_P , K_E , K_C είναι οι σταθερές που μετατρέπουν τη μείωση των απωλειών ισχύος (LP), τη μείωση των απωλειών ενέργειας (LE) και τις τιμές των πυκνωτών (Q_{Ci}) σε χρηματικές μονάδες (\$) στη συγκεκριμένη περίπτωση), αντίστοιχα.

Προτού γίνει ο υπολογισμός της αντιστάθμισης, προηγείται μια διαδικασία μοντελοποίησης των γραμμών τροφοδότησης σε κανονικοποιημένα ισοδύναμα μοντέλα και επίσης, γίνεται κανονικοποίηση στις τιμές των έργων συνιστωσών του ρεύματος των γραμμών του συστήματος. Εκτός από την κλασική προγραμματιστική μέθοδο για την επίλυση του προβλήματος, εφαρμόζεται μια μέθοδος με γραφική αναπαράσταση, χρησιμοποιώντας το κριτήριο ίσων εμβαδών, όπου εδώ χωρίζεται στις περιπτώσεις που αγνοείται το κόστος των πυκνωτών, δηλαδή το K_C είναι ίσο με μηδέν, και στις περιπτώσεις που το κόστος λαμβάνεται υπόψη.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου, για την εποχή της, είναι ότι οι πυκνωτές τοποθετούνται σε σημεία που αντιστοιχούν στους πραγματικούς κόμβους του συστήματος, δηλαδή η θέση τοποθέτησής τους δεν είναι μια συνεχής τιμή, αλλά διακριτή.

Όσον αφορά τις παραδοχές της μεθόδου, τα δίκτυα πρέπει να είναι ακτινικά και συμμετρικά, με πιθανόν διαφορετικά μεγέθη αγωγών, και τα φορτία μπορεί μην έχουν ομοιόμορφη κατανομή ή να μην είναι συγκεντρωμένα, αλλά πρέπει να αποτελούνται μόνο από έργο ισχύ. Τα φορτία θεωρείται ότι βρίσκονται στο τέλος κάθε γραμμής και δεν μεταβάλλονται μετά τη μοντελοποίηση των γραμμών. Ακόμα, η τοποθέτηση ενός πυκνωτή στο ζυγό i , θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται από τους πυκνωτές που πιθανόν να είναι τοποθετημένοι στους ζυγούς $j > i$.

2.3.2 Μέθοδος 2 [2.28]

Για τον προσδιορισμό της θέσης και του μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών σε ένα δίκτυο διανομής, με σκοπό τη μέγιστη αύξηση της εξοικονόμησης χρημάτων από τη μείωση των απωλειών, χρησιμοποιείται μια ευριστική μέθοδος [2.28]. Οι πιθανοί ζυγοί αντιστάθμισης λαμβάνονται σύμφωνα με τις απώλειες που προκαλεί η άεργος συνιστώσα των ρευμάτων του φορτίου του κάθε ζυγού. Οι ζυγοί αυτοί που επιλέγονται καλούνται ευαίσθητοι ζυγοί (sensitive nodes).

Αφού βρεθούν οι ευαίσθητοι ζυγοί, τότε υπολογίζεται το μέγεθος των πυκνωτών που θα τοποθετηθούν στον κάθε ζυγό, σύμφωνα με μια συνάρτηση εξοικονόμησης της μορφής (2.5). Η αντιστάθμιση μπορεί να γίνει με δυο κριτήρια, που είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ή η μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης χρημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, κατά την εφαρμογή του, ελέγχει αν γίνεται παραβίαση κάποιου προκαθορισμένου ορίου στις τιμές των τάσεων, μετά την οποιαδήποτε αντιστάθμιση.

Καθώς ο αριθμός των ευαίσθητων ζυγών είναι μικρότερος από το συνολικό αριθμό των ζυγών του συστήματος, μειώνεται η διάσταση του προβλήματος και η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε μεγάλα συστήματα, όσο και σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (online volt/VAr compensation). Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι επίσης

ότι λαμβάνει υπόψη τις πραγματικές θέσεις των ζυγών του συστήματος και τις πραγματικές τιμές των πυκνωτών, δηλαδή οι θέσεις τοποθέτησης και το μέγεθος των πυκνωτών είναι διακριτές μεταβλητές. Επιπλέον, δεν αγνοείται η μεταβολή του φορτίου, καθώς χωρίζεται η μέρα σε 3 περιόδους διάρκειας 8 ωρών με διαφορετικούς συντελεστές φορτίων (load factors).

Οι παραδοχές που γίνονται κατά την ανάλυση της μεθόδου είναι ότι το σύστημα και το φορτίο είναι συμμετρικά και αγνοούνται οι οποιοσδήποτε αρμονικές του συστήματος. Ακόμα, τα ρεύματα των φορτίων (load currents) θεωρείται ότι δεν επηρεάζονται από τις τάσεις των ζυγών.

2.3.3 Μέθοδος 3 [2.41]

Ανήκει στην κατηγορία των αναλυτικών μεθόδων και παρουσιάζει μια μέθοδο ελέγχου της ροής αέργου ισχύος σε ακτινικά δίκτυα διανομής με διακλαδώσεις [2.41]. Για τον έλεγχο αυτό, τοποθετούνται εγκάρσιοι πυκνωτές κατάλληλου μεγέθους στο σύστημα.

Αρχικά, γίνεται αντικατάσταση όλων των γραμμών τροφοδοσίας του συστήματος με το ισοδύναμο κανονικοποιημένο μοντέλο τους, με σκοπό οι γραμμές του συστήματος που πιθανόν να είχαν διαφορετικό μέγεθος να αποκτήσουν ίδιο σταθερό μέγεθος. Έπειτα, η κάθε διακλάδωση λαμβάνεται σαν ένα υποσύστημα και η διαδικασία αντιστάθμισης γίνεται για το κάθε υποσύστημα ξεχωριστά. Για τον υπολογισμό της θέσης τοποθέτησης και του μεγέθους των πυκνωτών στο κάθε υποσύστημα, χρησιμοποιείται η αναλυτική μέθοδος [2.15]. Στη συνέχεια, για τη βέλτιστη αντιστάθμιση ολόκληρου του συστήματος, οι πυκνωτές που βρέθηκαν στα υποσυστήματα, παριστάνονται στο σύστημα σαν πηγές ρεύματος ελεγχόμενης τάσης [2.42]. Έτσι, υπολογίζεται η τάση σε κάθε ζυγό και τέλος, οι πραγματικές βέλτιστες θέσεις των πυκνωτών, το μέγεθός τους και η συνολική εξοικονόμηση ολόκληρου του συστήματος.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι η τοποθέτηση δεν γίνεται μόνο στον κορμό του δικτύου, αλλά και στις διακλαδώσεις. Μπορεί να αντιμετωπίσει δίκτυα που έχουν διαφορετικά μεγέθη γραμμών τροφοδοσίας και λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή του φορτίου. Ακόμα, ελέγχει τις τάσεις αν είναι εντός κάποιων προκαθορισμένων ορίων μετά την αντιστάθμιση. Η συγκεκριμένη μέθοδος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος, όσο και για έλεγχο πραγματικού χρόνου.

2.3.4 Μέθοδος 4 [2.43]

Λόγω του ότι η απόδοση του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, επιχειρείται μείωση των απωλειών με εγκάρσιους πυκνωτές σε επιλεγμένους ζυγούς, με σκοπό τη βελτίωση της θερμικής ικανότητας των αγωγών τροφοδοσίας [2.43].

Η κύρια διαφορά στη διαδικασία αντιστάθμισης, με τις προηγούμενες μεθόδους, είναι ότι επιδιώκεται η μείωση των συνολικών απωλειών του συστήματος μέσω της μείωσης των απωλειών σε κάθε γραμμή του δικτύου ξεχωριστά. Για την ελαχιστοποίηση των απωλειών, ορίζεται μια συνάρτηση κόστους της μορφής:

$$S = K_P \cdot P_{Loss} + \sum_{i=1}^n K_{Ci} \cdot Q_i \quad (2.6)$$

υπό τον περιορισμό:

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (2.7)$$

όπου K_p (\$/kW) είναι το κόστος των απωλειών, P_{Loss} (kW) είναι οι απώλειες του συστήματος που προκύπτουν από την άθροιση των απωλειών της κάθε γραμμής, K_{Ci} (\$/kVAr) είναι το κόστος του πυκνωτή Q_i (kVAr) στο ζυγό i και V_{min} , V_{max} είναι τα επιτρεπτά όρια της τάσης, 0,9 p.u. και 1,1 p.u., αντίστοιχα.

Η γενική ιδέα της μεθόδου είναι ότι ελέγχονται όλοι οι ζυγοί, αρχίζοντας από τον πιο μακρινό της πηγής, και αντισταθμίζονται. Κάθε φορά που ένας ζυγός i είναι προς αντιστάθμιση, δοκιμάζεται όλο και μεγαλύτερο μέγεθος πυκνωτών, μέχρι να μη γίνεται περαιτέρω μείωση των απωλειών. Αφού βρεθεί το βέλτιστο μέγεθος πυκνωτών για το ζυγό i , ελέγχονται τα όρια της τάσης και αν είναι εκτός των επιτρεπόμενων ορίων, αρχίζει αντιστάθμιση του ζυγού $n-i-1$ (ουσιαστικά είναι ο προηγούμενος ζυγός). Αν είναι εντός των ορίων, τότε τερματίζεται η διαδικασία και οι βέλτιστες θέσεις και τα μεγέθη των εγκάρσιων πυκνωτών έχουν υπολογιστεί.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι οι μεταβλητές της θέσης και του μεγέθους των πυκνωτών είναι διακριτές μεταβλητές. Επίσης, εκτός από τους περιορισμούς των τάσεων που χρησιμοποιούνταν μέχρι τώρα, εισάγεται ακόμα ένας περιορισμός σχετικά με τις ωμικές απώλειες στις γραμμές τροφοδοσίας του συστήματος, με αποτέλεσμα σε καμία περίπτωση να μην αυξάνονται οι απώλειες σε μια γραμμή του συστήματος, μετά την οποιαδήποτε αντιστάθμιση.

2.3.5 Μέθοδος 5 [2.44]

Για να επιτευχθεί έλεγχος της αέργου ισχύος, βελτίωση της ευστάθειας και των τάσεων ενός δικτύου διανομής, διόρθωση του συντελεστή ισχύος και μείωση των απωλειών, είναι αναγκαία η τοποθέτηση βέλτιστου αριθμού και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών στους κατάλληλους ζυγούς του συστήματος [2.44].

Στο συγκεκριμένο άρθρο, παρουσιάζονται κάποιες μέθοδοι που αναπτύχθηκαν παλαιότερα, βασισμένες στην ασαφή λογική και στις ευριστικές τεχνικές. Αναπτύσσεται επίσης μια μέθοδος, η οποία μετά από συγκρίσεις σε παραδείγματα που γίνονται, φαίνεται ότι εξάγει καλύτερα αποτελέσματα. Επομένως, εδώ θα γίνει συνοπτική περιγραφή μόνο της συγκεκριμένης μεθόδου.

Η συνάρτηση κόστους της μεθόδου και οι περιορισμοί της τάσης είναι όπως στο [2.43] και δίνονται από τις σχέσεις (2.6) και (2.7). Αρχικά, ο πρώτος ζυγός του συστήματος τίθεται προς αντιστάθμιση και δοκιμάζονται όλα τα δυνατά μεγέθη πυκνωτών. Σε κάθε διαφορετική τιμή του πυκνωτή Q_{C1} , μετά από ανάλυση ροών φορτίου, υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης κόστους από τη (2.6). Από όλες τις τιμές που υπολογίστηκαν καταγράφεται η μικρότερη τιμή της συνάρτησης κόστους για το συγκεκριμένο ζυγό και ο πυκνωτής Q_{C1} που την προκαλεί. Αυτό γίνεται για όλους τους ζυγούς του συστήματος και τελικά τοποθετείται στο ζυγό i , με τη μικρότερη τιμή συνάρτησης κόστους, ο πυκνωτής μεγέθους Q_{Ci} που υπολογίστηκε. Αφού αντισταθμίστηκε ο συγκεκριμένος ζυγός με το βέλτιστο μέγεθος πυκνωτή, επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία για να βρεθεί ο επόμενος προς αντιστάθμιση ζυγός. Τα βήματα αυτά επαναλαμβάνονται μέχρι να μη γίνεται σημαντική

περαιτέρω μείωση της συνάρτησης κόστους και να τελειώσουν οι υποψήφιοι ζυγοί. Στην περίπτωση που η ελάχιστη τιμή της τάσης του συστήματος είναι μικρότερη από 0,9 p.u., προτείνεται η αύξηση του μεγέθους των πυκνωτών που βρίσκονται στον πιο μακρινό ζυγό από την πηγή.

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι όπως και σε άλλες περιπτώσεις, οι διακριτές μεταβλητές της θέσης και του μεγέθους των πυκνωτών, που αντιστοιχούν στις πραγματικές.

Από τη σύγκριση των μεθόδων που γίνεται στο άρθρο, προκύπτουν τα συμπεράσματα ότι στην περίπτωση ανάπτυξης αλγορίθμων βασισμένων στην ασαφή λογική, η επιρροή των άεργων απωλειών στη συνάρτηση συμμετοχής είναι πιο αποτελεσματική, έναντι της επιρροής των ενεργών απωλειών. Ακόμα, οι συντελεστές βαρύτητας, που πιθανό να έχουν οι παράμετροι στη συνάρτηση συμμετοχής, μπορούν να επηρεάσουν κατά πολύ τα αποτελέσματα της μεθόδου. Εκτός από τη μέθοδο που αναλύθηκε σε αυτή την ενότητα, για τα πολύ καλά αποτελέσματά της, προτείνεται και μια μέθοδος βασισμένη στην ασαφή λογική σε συνδυασμό με την ευριστική τεχνική που εφαρμόστηκε στο [2.28].

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] J. B. Bunch, R. D. Miller, and J. E. Wheeler, "Distribution system integrated voltage and reactive power control," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 101, no. 2, pp. 284–289, Feb. 1982.
- [2.2] H. N. Ng, M. M. A. Salama, and A. Y. Chikhani, "Classification of capacitor allocation techniques," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, no. 1, Jan. 2000.
- [2.3] N. M. Neagle, and D. R. Samson, "Loss reduction from capacitors installed on primary feeders," *AIEE Trans.*, vol. 75, pp. 950–959, Oct. 1956.
- [2.4] R. F. Cook, "Analysis of capacitor application as affected by load cycle," *AIEE Trans.*, vol. 78, pp. 950–957, Oct. 1959.
- [2.5] R. F. Cook, "Optimizing the application of shunt capacitors for reactive-volt-ampere control and loss reduction," *AIEE Trans.*, vol. 80, pp. 430–444, Aug. 1961.
- [2.6] J. V. Schmill, "Optimum size and location of shunt capacitors on distribution feeders," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 84, no. 9, pp. 825–832, Sept. 1965.
- [2.7] N. E. Chang, "Locating shunt capacitors on primary feeder for voltage control and loss reduction," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 88, no. 10, pp. 1574–1577, Oct. 1969.
- [2.8] N. E. Chang, "Generalized equations on loss reduction with shunt capacitors," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 91, pp. 1574–1577, 1969.
- [2.9] Y. G. Bae, "Analytical method of capacitor allocation on distribution primary feeders," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 97, no. 11, pp. 1232–1238, July/Aug. 1978.
- [2.10] A. Dwyer, "The use of shunt capacitors applied for line loss savings," in *Proc. 1992 CEA Conference*, Apr. 1992.
- [2.11] T. Marx, *The Why and How of Power Capacitor Switching*: Fisher Pierce, Mar. 1991.

- [2.12] S. H. Lee, and J. J. Grainger, "Optimum placement of fixed and switched capacitors on primary distribution feeders," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 1, pp. 345–352, Jan. 1981.
- [2.13] J. J. Grainger, and S. H. Lee, "Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses on distribution feeders," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 3, pp. 1105–1118, Mar. 1981.
- [2.14] M. M. A. Salama, A. Y. Chikhani, and R. Hackam, "Control of reactive power in distribution systems with an end-load and fixed load conditions," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 10, pp. 2779–2788, Oct. 1985.
- [2.15] M. M. A. Salama, E. A. A. Mansour, A. Y. Chikhani, and R. Hackam, "Control of reactive power in distribution systems with an end-load and varying load conditions," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 4, pp. 941–947, Apr. 1985.
- [2.16] J. J. Grainger, and S. Civanlar, "Volt/var control on distribution systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators, Part I: The overall problem," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 11, pp. 3278–3283, Nov. 1985.
- [2.17] S. Civanlar, and J. J. Grainger, "Volt/var control on distribution systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators, Part II: The solution method," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 11, pp. 3284–3290, Nov. 1985.
- [2.18] S. Civanlar, and J. J. Grainger, "Volt/var control on distribution systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators, Part III: The numerical results," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 11, pp. 3291–3297, Nov. 1985.
- [2.19] H. Duran, "Optimum number, location, and size of shunt capacitors in radial distribution feeders, A dynamic programming approach," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 87, no. 9, pp. 1769–1774, Sept. 1968.
- [2.20] T. H. Fawzi, S. M. El-Sobki, and M. A. Abdel-Halim, "New approach for the application of shunt capacitors to the primary distribution feeders," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 102, no. 1, pp. 10–13, Jan. 1983.
- [2.21] M. Ponnavaikko, and K. S. Prakasa Rao, "Optimal choice of fixed and switched shunt capacitors on radial distributors by the method of local variations," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 102, no. 6, pp. 1607–1615, June 1983.
- [2.22] M. E. Baran, and F. F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 725–734, Jan. 1989.
- [2.23] M. E. Baran, and F. F. Wu, "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 735–743, Jan. 1989.
- [2.24] R. Baldick, and F. F. Wu, "Efficient integer optimization algorithms for optimal coordination of capacitors and regulators," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 805–812, Aug. 1990.
- [2.25] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, and S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 3, no. 3, pp. 1217–1223, July 1988.

- [2.26] T. Taylor, and D. Lubkeman, "Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 5, no. 1, pp. 239–246, Jan. 1990.
- [2.27] T. S. Abdel-Salam, A. Y. Chikhani, and R. Hackam, "A new technique for loss reduction using compensating capacitors applied to distribution systems with varying load condition," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 9, no. 2, pp. 819–827, Apr. 1994.
- [2.28] M. Chis, M. M. A. Salama, and S. Jayaram, "Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 3, pp. 225–230, May 1997.
- [2.29] G. Boone, and H. D. Chiang, "Optimal capacitor placement in distribution systems by genetic algorithm," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 15, no. 3, pp. 155–162, 1993.
- [2.30] S. Sundhararajan, and A. Pahwa, "Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 1499–1507, Aug. 1994.
- [2.31] K. N. Miu, H. D. Chiang, and G. Darling, "Capacitor placement, replacement and control in large-scale distribution systems by a GA-based two-stage algorithm," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 1160–1166, Aug. 1997.
- [2.32] C. C. Liu, and T. Dillon, "State-of-the-art of expert system applications to power systems," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 86–92, 1992.
- [2.33] M. M. A. Salama, and A. Y. Chikhani, "An expert system for reactive power control of a distribution systems, Part 1: System configuration," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 7, no. 2, pp. 940–945, Apr. 1992.
- [2.34] J. R. P. R. Laframboise, G. Ferland, A. Y. Chikhani, and M. M. A. Salama, "An expert system for reactive power control of a distribution system, Part 2: System implementation," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1433–1441, Aug. 1995.
- [2.35] T. Ananthapadmanabha, A. D. Kulkarni, A. S. Gopala Rao, and K. Raghavendra Rao, "Knowledge-based expert system for optimal reactive power control in distribution system," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 27–31, 1996.
- [2.36] N. I. Santoso, and O. T. Tan, "Neural-net based real-time control of capacitors installed on distribution systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 5, no. 1, pp. 266–272, Jan. 1990.
- [2.37] Z. Gu, and D. T. Rizy, "Neural networks for combined control of capacitor banks and voltage regulators in distribution systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 11, no. 4, pp. 1921–1928, Oct. 1996.
- [2.38] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [2.39] H. C. Chin, "Optimal shunt capacitor allocation by fuzzy dynamic programming," *Electric Power Systems Research*, vol. 35, pp. 133–139, 1995.
- [2.40] H. N. Ng, M. M. A. Salama, and A.Y. Chikhani, "Capacitor allocation by approximate reasoning: Fuzzy capacitor placement," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 393–398, Jan. 2000.
- [2.41] M. M. A. Salama, and A. Y. Chikhani, "A simplified network approach to the VAR control problem for radial distribution systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1529–1535, July 1993.

-
- [2.42] T. H. Chen, M. S. Chen, K. J. Hwang, P. Kotas, and E. A. Chebli, "Distribution system power flow analysis-a rigid approach," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 6, pp. 1146-1152, 1991.
- [2.43] M. H. Hamada, M. A. A. Wahab, A. M. El-Sayed, and H. A. Ramadan, "A proposed strategy for capacitor allocation in radial distribution feeders," presented at the 12th Int. Middle-East Power System Conf., MEPCON, Aswan, Egypt, 12-15 Mar., 2008, pp. 146-151.
- [2.44] S. F. Mekhamer, S. A. Soliman, M. A. Moustafa, and M. E. El-Hawary, "Application of fuzzy logic for reactive-power compensation of radial distribution feeders," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 18, no. 1, Feb. 2003.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) πραγματοποιούνται κάποιες μελέτες με απώτερο σκοπό να επιτευχθεί η σωστή σχεδίαση, αλλά και η καλή και αξιόπιστη λειτουργία του κάθε ΣΗΕ. Οι μελέτες αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες που είναι οι μελέτες μόνιμης κατάστασης ή κανονικής λειτουργίας και οι μελέτες μεταβατικής κατάστασης ή μη κανονικής λειτουργίας ή ανώμαλης λειτουργίας. Η ανάλυση ροών φορτίου ανήκει στην πρώτη κατηγορία και με αυτήν υπολογίζονται οι τάσεις κατά μέτρο και γωνία σε όλους τους ζυγούς, το ρεύμα, οι ροές ενεργού και αέργου ισχύος σε όλες τις γραμμές και τέλος οι διάφορες απώλειες του συστήματος [3.1].

Η μελέτη ροών φορτίου σε ένα δίκτυο είναι αναγκαία και προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες, από τις οποίες οι κυριότερες είναι:

- Γίνεται έλεγχος των τάσεων και των ροών ενεργού και αέργου ισχύος ώστε να διατηρούνται εντός των επιτρεπόμενων ορίων λειτουργίας.
- Είναι απαραίτητη στον προσδιορισμό των επιπτώσεων πιθανών διαταραχών, όπως είναι η απώλεια μιας γεννήτριας ή μιας γραμμής.
- Χρειάζεται για τις μελέτες ανάπτυξης και επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας όπως για παράδειγμα μετά την εισαγωγή νέων φορτίων ή την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής, τις διασυνδέσεις με άλλα συστήματα ή την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς [3.1].

3.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ

Αρχικά, αναφέρονται κάποιες παραδοχές που γίνονται συνήθως κατά την ανάλυση των δικτύων διανομής (ΔΔ):

- Τα φορτία λαμβάνονται συνήθως ως σταθερής έντασης. Από την άλλη, λαμβάνοντας υπόψη ότι η τάση στα ΔΔ βρίσκεται συνήθως εντός των ορίων $\pm 5\%$, η μετατροπή των φορτίων σε ισχύ βάση της ονομαστικής τους τάσης δεν προκαλεί αξιόλογο σφάλμα.
Αντιθέτως, στην περίπτωση των Δικτύων Μεταφοράς τα φορτία εκφράζονται ως σταθερής πραγματικής και αέργου ισχύος.
- Στα δίκτυα χαμηλής τάσης, η χωρητικότητα των γραμμών θεωρείται αμελητέα. Παραλείπεται επίσης στα εναέρια ή υπόγεια δίκτυα μέσης τάσης, όταν το μήκος των γραμμών είναι σχετικά μικρό.

- Οι γραμμές θεωρούνται συμμετρικές, δηλαδή η κάθε φάση έχει την ίδια σύνθετη αντίσταση.
- Τα φορτία θεωρούνται συμμετρικά, δηλαδή τα διανύσματα των εντάσεων σε κάθε φάση έχουν το ίδιο μέτρο με διαφορά στη γωνία τους 120° [3.2].

Στην πιο γενική περίπτωση, κατά την ανάλυση ροών φορτίου, οι γραμμές παριστάνονται με το ισοδύναμο π-κύκλωμά τους, τα φορτία ορίζονται από την πραγματική και άεργο ισχύ τους και οι γεννήτριες από την παραγόμενη πραγματική και άεργο ισχύ τους και την τάση στο ζυγό που είναι εγκατεστημένες.

Σε κάθε ζυγό i του συστήματος αντιστοιχούν οι παρακάτω μεταβλητές:

- Έγχυση πραγματικής ισχύος:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad (3.1)$$

όπου P_{Gi} : πραγματική παραγόμενη ισχύς
 P_{Di} : πραγματική καταναλισκόμενη ισχύς

- Έγχυση αέργου ισχύος:

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (3.2)$$

όπου Q_{Gi} : παραγόμενη άεργος ισχύς
 Q_{Di} : καταναλισκόμενη άεργος ισχύς

- Μέτρο της τάσης V_i
- Φασική γωνία της τάσης δ_i

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι ζυγοί διακρίνονται στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

1. Ζυγός ταλάντωσης ή ζυγός αναφοράς: Στο ζυγό αυτό επιβάλλεται σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία, ενώ προσδιορίζονται η πραγματική και η άεργος παραγόμενη ισχύς.
2. Ζυγός φορτίου (PQ): Ζυγός στον οποίο είναι γνωστή η έγχυση πραγματικής και αέργου ισχύος, ενώ προσδιορίζεται η τάση κατά μέτρο και γωνία.
3. Ζυγός παραγωγής (PV): Ζυγός στον οποίο είναι γνωστή η έγχυση πραγματικής ισχύος και το μέτρο της τάσης, ενώ προσδιορίζεται η άεργος ισχύς και η γωνία της τάσης [3.3].

Έστω n ο αριθμός των ζυγών του συστήματος και m ο αριθμός των ζυγών φορτίου. Έστω ότι ζυγός ταλάντωσης είναι ο ζυγός με αριθμό 1, οι ζυγοί 2 ως $n - m$ είναι οι ζυγοί παραγωγής και τέλος οι ζυγοί $n - m + 1$ ως n είναι οι ζυγοί φορτίου.

Η κατάσταση του συστήματος περιγράφεται από τις μεταβλητές:

- Φασική γωνία της τάσης όλων των ζυγών εκτός από το ζυγό ταλάντωσης, $\delta_2, \dots, \delta_n$.
- Το μέτρο της τάσης όλων των ζυγών φορτίου, V_{n-m+1}, \dots, V_n .

Οι μεταβλητές αυτές αποτελούν το διάνυσμα κατάστασης \mathbf{X} , που έχει διάσταση $n - 1 + m$ και απαιτούνται $n - 1 + m$ ανεξάρτητες εξισώσεις, οι οποίες είναι:

- $n - 1$ εξισώσεις πραγματικής ισχύος:

$$\mathbf{b}_p = \mathbf{f}_p(\mathbf{x}) \quad (3.3)$$

όπου \mathbf{b}_p , \mathbf{f}_p είναι διανύσματα διάστασης $n - 1$, αφού πρόκειται για όλους τους ζυγούς εκτός του ζυγού ταλάντωσης. Το στοιχείο που αντιστοιχεί στο ζυγό i υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$b_{pi} = P_{Gi} - P_{Di} \quad (3.4)$$

$$f_{pi} = V_i^2 \cdot G_{ii} - V_i \cdot \sum_{m \in A(i)} V_m \cdot a_{im} \quad (3.5)$$

$$a_{im} = -G_{im} \cdot \cos(\delta_i - \delta_m) - B_{im} \cdot \sin(\delta_i - \delta_m) \quad (3.6)$$

$$A(i) = \{m: y_{im} \neq 0\} \quad (3.7)$$

$$Y_{im} = G_{im} + j \cdot B_{im} \quad (3.8)$$

όπου $A(i)$: σύνολο που περιέχει τους αριθμούς των ζυγών που είναι διασυνδεδεμένοι με το ζυγό i .

Y_{ii} , Y_{im} : διαγώνια και μη διαγώνια στοιχεία, αντίστοιχα, του πίνακα αγωγιμοτήτων.

- m εξισώσεις αέργου ισχύος:

$$\mathbf{b}_q = \mathbf{f}_q(\mathbf{x}) \quad (3.9)$$

όπου \mathbf{b}_q , \mathbf{f}_q είναι διανύσματα διάστασης m , αφού πρόκειται για όλους τους ζυγούς φορτίου. Το στοιχείο που αντιστοιχεί στο ζυγό i υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$b_{qi} = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (3.10)$$

$$f_{qi} = -V_i^2 \cdot B_{ii} - V_i \cdot \sum_{m \in A(i)} V_m \cdot \beta_{im} \quad (3.11)$$

$$\beta_{im} = -G_{im} \cdot \sin(\delta_i - \delta_m) + B_{im} \cdot \cos(\delta_i - \delta_m) \quad (3.12)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις σε μια ενιαία μορφή γράφονται:

$$\mathbf{b} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (3.13)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_p \\ \mathbf{b}_q \end{bmatrix} \quad \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_p \\ \mathbf{f}_q \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad \delta = [\delta_2, \dots, \delta_n]^T \quad \mathbf{V} = [V_{n-m+1}, \dots, V_n]^T \quad (3.15)$$

Αφού γίνει ο υπολογισμός των τάσεων, η πραγματική και η άεργος ισχύς στις γραμμές είναι:

$$P_{im} = V_i^2 \cdot (g_{im} + g_{sim}) - V_i \cdot V_m \cdot a_{im} \quad (3.16)$$

$$Q_{im} = -V_i^2 \cdot (b_{im} + b_{sim}) - V_i \cdot V_m \cdot \beta_{im} \quad (3.17)$$

$$y_{im} = g_{im} + j \cdot b_{im} \quad y_{sim} = g_{sim} + j \cdot b_{sim} \quad (3.18)$$

όπου y_{im}, y_{sim} : αγωγιμότητα σειράς και εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής.

3.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Για την ανάλυση ροών φορτίου πρέπει να βρεθεί λύση σε ένα σύνολο μη γραμμικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές είναι της μορφής:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = 0 \quad (3.19)$$

Για την επίλυση τέτοιων μη γραμμικών εξισώσεων χρησιμοποιούνται ανακυκλωτικοί αλγόριθμοι και μια συνοπτική διαδικασία επίλυσής τους είναι η ακόλουθη:

1. Λαμβάνεται μια αρχική τιμή του διανύσματος κατάστασης $\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(0)}$ και μηδενίζεται ο μετρητής ανακυκλώσεων $k = 0$.
2. Αντικατάσταση του διανύσματος κατάστασης για τον υπολογισμό των $\mathbf{g}(\mathbf{x}^{(k)})$ και γίνεται έλεγχος κατά πόσον ικανοποιούνται οι (3.19).
3. Αν δεν ικανοποιούνται οι (3.19) τότε υπολογίζεται ένα νέο διάνυσμα κατάστασης $\mathbf{x}^{(k+1)}$ χρησιμοποιώντας το προηγούμενο διάνυσμα $\mathbf{x}^{(k)}$, αλλά και τις $\mathbf{g}(\mathbf{x}^{(k)})$ και ενημερώνεται ο μετρητής ανακυκλώσεων $k = k + 1$.
4. Γίνεται αντικατάσταση του νέου διανύσματος κατάστασης στις (3.19) και επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 και 3 μέχρι να ικανοποιηθούν οι εξισώσεις (3.19) με μια προκαθορισμένη ανοχή σφάλματος.

Οι πιο γνωστές επαναληπτικές μέθοδοι για την ανάλυση ροών φορτίου είναι η μέθοδος Gauss, η παραλλαγή της Gauss-Seidel, και η μέθοδος Newton-Raphson [3.1].

3.3.1 Μέθοδος Newton-Raphson

Η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson είναι πιο σύνθετη, αλλά και πιο ασφαλής. Συνήθως δεν έχει πρόβλημα σύγκλισης και κατά κανόνα συγκλίνει ταχύτερα από την Gauss-Seidel. Η μέθοδος Newton-Raphson συνίσταται στη γραμμικοποίηση του αρχικού συστήματος εξισώσεων γύρω από ένα αρχικό διάνυσμα κατάστασης, με τη βοήθεια του αναπτύγματος Taylor, όπου αμελούνται οι όροι δεύτερης τάξης και άνω. Παρακάτω παρουσιάζεται η συγκεκριμένη μέθοδος.

Για ένα ζυγό i , το ρεύμα που εισέρχεται σε αυτόν και η μιγαδική ισχύς του είναι αντίστοιχα:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (3.20)$$

$$P_i - j \cdot Q_i = V_i^* \cdot I_i \quad (3.21)$$

Από τις δυο παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$P_i - j \cdot Q_i = (|V_i| \angle -\delta_i) \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (3.22)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.23)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.24)$$

Οι εξισώσεις (3.23) και (3.24) συνιστούν ένα σύστημα από μη γραμμικές εξισώσεις. Η εξίσωση (3.23) εφαρμόζεται τόσο στους ζυγούς φορτίου, όσο και στους ζυγούς παραγωγής, ενώ η (3.24) εφαρμόζεται μόνο στους ζυγούς φορτίου.

Με τη βοήθεια του αναπτύγματος Taylor και αγνοώντας τους όρους δεύτερης τάξης και άνω, προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

όπου $\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$ είναι ο Ιακωβιανός πίνακας.

Αφού η σχέση (3.24) ισχύει μόνο για τους ζυγούς φορτίου (m ζυγοί) οι σχέσεις που συνδέουν τη μεταβολή της τάσης και τη μεταβολή της αέργου ισχύος θα μειωθούν από $n - 1$ σε m . Έτσι οι διαστάσεις των πινάκων θα είναι:

$$J : (n - 1 + m) \times (n - 1 + m)$$

$$J_1 : (n - 1) \times (n - 1)$$

$$J_2 : (n - 1) \times (m)$$

$$J_3 : (m) \times (n - 1)$$

$$J_4 : (m) \times (m)$$

Ακολουθώντας δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού των διαγώνιων και μη διαγώνιων στοιχείων των τεσσάρων υποπινάκων του Ιακωβιανού πίνακα:

$$J_{1ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.27)$$

$$J_{1ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (3.28)$$

$$J_{2ii} = \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2 \cdot |V_i| \cdot |Y_{ii}| \cdot \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.29)$$

$$J_{2ij} = \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (3.30)$$

$$J_{3ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.31)$$

$$J_{3ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (3.32)$$

$$J_{4ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2 \cdot |V_i| \cdot |Y_{ii}| \cdot \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.33)$$

$$J_{4ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (3.34)$$

Σαν $\Delta P_i^{(k)}$ και $\Delta Q_i^{(k)}$ ορίζεται η διαφορά της δοσμένης τιμής P_i^{sch}, Q_i^{sch} και της υπολογισμένης $P_i^{(k)}, Q_i^{(k)}$ δηλαδή:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (3.35)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (3.36)$$

Οι νέες τιμές για την τάση στους ζυγούς είναι:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} - \Delta \delta_i^{(k)} \quad (3.37)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (3.38)$$

Η συνολική διαδικασία για την ανάλυση ροών φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson είναι:

1. Για τους ζυγούς φορτίου, όπου η πραγματική (P_i^{sch}) και η άεργος ισχύς (Q_i^{sch}) είναι γνωστές, η αρχική τιμή της τάσης κατά μέτρο και γωνία τίθεται ίση με αυτήν του ζυγού ταλάντωσης (συνήθως $1 \angle 0^\circ$ p.u.).

Για τους ζυγούς παραγωγής, όπου είναι γνωστή η τάση ($|V_i|$) και η πραγματική ισχύς (P_i^{sch}), η γωνία της τάσης τους τίθεται ίση με την γωνία της τάσης του ζυγού ταλάντωσης.

2. Για τους ζυγούς φορτίου, από τις σχέσεις (3.23) και (3.24) υπολογίζεται η $P_i^{(k)}$ και $Q_i^{(k)}$, αντίστοιχα. Από τις σχέσεις (3.35) και (3.36) υπολογίζονται τα σφάλματα $\Delta P_i^{(k)}$ και $\Delta Q_i^{(k)}$, αντίστοιχα.
3. Για τους ζυγούς παραγωγής από τις σχέσεις (3.23) και (3.35) υπολογίζεται η $P_i^{(k)}$ και $\Delta P_i^{(k)}$, αντίστοιχα.
4. Από τις σχέσεις (3.27)-(3.34) υπολογίζονται οι υποπίνακες του Ιακωβιανού πίνακα.
5. Επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων (3.26) με τριγωνική παραγοντοποίηση και απαλοιφή Gauss.
6. Οι νέες τιμές των τάσεων κατά μέτρο και γωνία υπολογίζονται από τις σχέσεις (3.38) και (3.37), αντίστοιχα.
7. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι τα σφάλματα $\Delta P_i^{(k)}$ και $\Delta Q_i^{(k)}$ να γίνουν μικρότερα από μια προκαθορισμένη ανοχή ε :

$$\Delta P_i^{(k)} \leq \varepsilon \quad , \quad \Delta Q_i^{(k)} \leq \varepsilon \quad (3.39)$$

Τέλος, αναφέρεται ότι η ταχύτητα σύγκλισης της μεθόδου εξαρτάται από την αρχική λύση και το βασικό μειονέκτημά της είναι ο υπολογισμός και η αντιστροφή του Ιακωβιανού πίνακα [3.4].

3.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Κ. Βουρνάς, και Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001, σελ. 20, 229, 233-242.
- [3.2] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1994, σελ. 115.
- [3.3] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι, Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985, σελ. 126-132.
- [3.4] Η. Saadat, *Power system analysis, second edition*, New York: McGraw-Hill, 1999, pp. 200-209, 232-240.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΛΗΘΟΥΣ, ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΓΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα των απωλειών ισχύος $I^2 \cdot R$ στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ σημαντικό και μια λύση του προβλήματος είναι η τοποθέτηση πυκνωτών κατάλληλου μεγέθους, στις κατάλληλες θέσεις. Τα δίκτυα διανομής λειτουργούν συνήθως ακτινικά, δηλαδή όλα τα φορτία τροφοδοτούνται από μια μόνο πηγή που ονομάζεται υποσταθμός διανομής. Με την προσθήκη των εγκάρσιων πυκνωτών παράγεται άεργος ισχύς με αποτέλεσμα να μη χρειάζεται η πηγή να τροφοδοτεί όλη την απαιτούμενη άεργο ισχύ και τις απώλειες. Αυτή είναι η βασική ιδέα για τη μείωση των απωλειών ισχύος με τη χρήση πυκνωτών.

Στο κεφάλαιο αυτό, αφού γίνει αρχικά η διατύπωση του προβλήματος, θα αναλυθεί η μείωση των απωλειών με την τοποθέτηση μεμονωμένων, αλλά και πολλαπλών πυκνωτών και στο τέλος θα αναπτυχθεί ο αλγόριθμος υλοποίησης της μεθόδου υπολογισμού βέλτιστου πλήθους, βέλτιστης θέσης και βέλτιστου μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

4.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σημειώνεται ότι όλα τα μεγέθη, κατά την διατύπωση και την ανάλυση του προβλήματος, αναφέρονται στις ανά φάση τιμές τους (απώλειες, τιμές πυκνωτών κ.α.).

Οι συνολικές απώλειες P_{Lt} σε ένα δίκτυο διανομής με n αριθμό γραμμών είναι:

$$P_{Lt} = \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot R_i \quad (4.1)$$

όπου I_i : ρεύμα i γραμμής

R_i : αντίσταση i γραμμής.

Τα ρεύματα γραμμής μπορούν να βρεθούν από την ανάλυση ροών φορτίου και στην συγκεκριμένη υλοποίηση εφαρμόζεται η μέθοδος Newton-Raphson όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 3.3.1.

Το ρεύμα γραμμής αποτελείται από δυο μέρη που είναι το ενεργό I_{ai} και το άεργο I_{ri} μέρος. Έτσι οι απώλειες τώρα χωρίζονται σε:

$$P_{La} = \sum_{i=1}^n I_{ai}^2 \cdot R_i \quad (4.2)$$

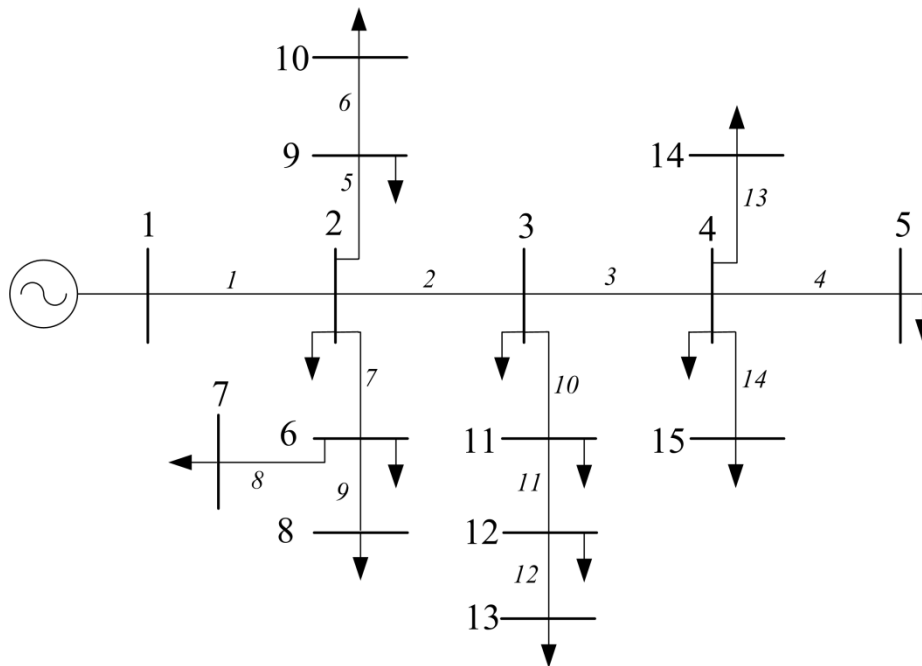
$$P_{Lr} = \sum_{i=1}^n I_{ri}^2 \cdot R_i \quad (4.3)$$

Όσον αφορά τις δυο παραπάνω σχέσεις, στην περίπτωση των απωλειών που σχετίζονται με την ενεργό συνιστώσα του ρεύματος (4.2), σε ένα ακτινικό δίκτυο με μια πηγή δεν μπορούν να μειωθούν για το λόγο ότι όλη η πραγματική ισχύς τροφοδοτείται από την πηγή που είναι στο ζυγό 1. Στην περίπτωση των απωλειών που σχετίζονται με την άεργο συνιστώσα του ρεύματος (4.3), μπορούν να μειωθούν παράγοντας τοπικά ένα μέρος της αέργου ισχύος.

Η μέθοδος που θα αναπτυχθεί παρακάτω ασχολείται με τη μείωση των απωλειών που οφείλονται στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος τοποθετώντας πυκνωτές κατάλληλου μεγέθους στις κατάλληλες θέσεις. Η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος χωρίζεται σε δύο μέρη. Αρχικά, υπολογίζεται μια ακολουθία ζυγών προς αντιστάθμιση με την επαναλαμβανόμενη χρησιμοποίηση μιας τεχνικής μείωσης των απωλειών με την εγκατάσταση μεμονωμένων πυκνωτών. Αφού γίνει ο υπολογισμός της ακολουθίας των ζυγών προς αντιστάθμιση, υπολογίζεται ταυτόχρονα για όλες τις θέσεις το ιδανικό μέγεθος των πυκνωτών που θα τοποθετηθεί. Στη συνέχεια περιγράφονται οι διαδικασίες μείωσης των απωλειών με την τοποθέτηση μεμονωμένων πυκνωτών, αλλά και πολλαπλών πυκνωτών.

4.2.1 Μείωση απωλειών με μεμονωμένους πυκνωτές

Έστω n είναι ο αριθμός των γραμμών, m είναι ο ζυγός που τοποθετείται ο πυκνωτής C και a είναι ένα σύνολο γραμμών που οδηγούν από την πηγή (ζυγός 1) προς το ζυγό m .



Σχήμα 4.1: Ακτινικό δίκτυο διανομής 15 ζυγών.

Για παράδειγμα, στο ακτινικό δίκτυο διανομής 15 ζυγών που φαίνεται στο Σχήμα 4.1, ο αριθμός των γραμμών είναι $n = 14$. Αν ο πυκνωτής τοποθετηθεί στο ζυγό 12, τότε $m = 12$ και $a = \{1, 2, 10, 11\}$.

Ο πυκνωτής απορροφά άεργο ρεύμα I_C και στην περίπτωση των υπό μελέτη ακτινικών δικτύων, επηρεάζει την άεργο συνιστώσα του ρεύματος μόνο των γραμμών που ανήκουν στο σύνολο a . Επομένως, η νέα τιμή της αέργου συνιστώσας του ρεύματος I_{ri}^{new} για το ζυγό i δίνεται από τη σχέση:

$$I_{ri}^{new} = I_{ri} + D_i \cdot I_C \quad (4.4)$$

$$\text{όπου } D_i = \begin{cases} 1, & \text{αν ο ζυγός } i \in a \\ 0, & \text{αν ο ζυγός } i \notin a \end{cases}$$

I_{ri} : ρεύμα γραμμής i αρχικού συστήματος πριν την τοποθέτηση του πυκνωτή.

Οι απώλειες που σχετίζονται με την άεργο συνιστώσα του ρεύματος, μετά την τοποθέτηση του πυκνωτή, είναι:

$$P_{Lr}^{com} = \sum_{i=1}^n (I_{ri} + D_i \cdot I_C)^2 \cdot R_i \quad (4.5)$$

Για τον υπολογισμό της μείωσης απωλειών S αφαιρούμε από τη σχέση (4.3) την (4.5).

$$S = P_{Lr} - P_{Lr}^{com} = - \sum_{i=1}^n (2 \cdot D_i \cdot I_{ri} \cdot I_C + D_i \cdot I_C^2) \cdot R_i \quad (4.6)$$

Το ρεύμα I_C που προκαλεί μεγιστοποίηση της συνάρτησης μείωσης απωλειών S υπολογίζεται παραγωγίζοντας την συνάρτηση S ως προς I_C και θέτοντάς την ίση με 0:

$$\frac{\partial S}{\partial I_C} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n (D_i \cdot I_{ri} + D_i \cdot I_C) \cdot R_i = 0 \quad (4.7)$$

$$I_C = - \frac{\sum_{i=1}^n D_i \cdot I_{ri} \cdot R_i}{\sum_{i=1}^n D_i \cdot R_i} \quad (4.8)$$

Το μέγεθος του αντίστοιχου πυκνωτή είναι:

$$Q_C = V_m \cdot I_C \quad (4.9)$$

όπου V_m : είναι η τάση στο ζυγό m που είναι ο πυκνωτής.

Για να υπολογιστεί ο ζυγός με τη μεγαλύτερη μείωση απωλειών, επαναλαμβάνεται η διαδικασία αυτή για όλους τους ζυγούς. Αφού βρεθεί ο ζυγός που προκαλεί μέγιστη μείωση απωλειών, τότε αντισταθμίζεται και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία για να βρεθεί ο επόμενος προς αντιστάθμιση ζυγός. Έτσι θα βρεθεί μια σειρά από ζυγούς προς αντιστάθμιση, αλλά τονίζεται ότι το μέγεθος του πυκνωτή από τη σχέση (4.9) είναι η βέλτιστη τιμή του πυκνωτή όταν τοποθετείται μόνο αυτός, επομένως όταν τοποθετηθούν κι άλλοι πυκνωτές αυτή η τιμή θα μεταβληθεί. Η ακριβής τιμή των πυκνωτών που θα

τοποθετηθούν υπολογίζεται από το δεύτερο μέρος της μεθόδου που περιγράφεται στην Ενότητα 4.2.2.

4.2.2 Μείωση απωλειών με πολλαπλούς πυκνωτές

Η διαδικασία που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 4.2.1 μπορεί να επεκταθεί στην τοποθέτηση πολλών πυκνωτών. Έστω:

k : πλήθος ζυγών που θα τοποθετηθούν πυκνωτές

I_C : διάνυσμα k διάστασης αποτελούμενο από τα ρεύματα των πυκνωτών

a_j : σύνολο γραμμών που συνδέουν την πηγή με τον προς αντιστάθμιση ζυγό j

D : πίνακας διαστάσεων $n \times k$

$$D_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν η γραμμή } i \in a_j \\ 0, & \text{αν η γραμμή } i \notin a_j \end{cases}$$

Για παράδειγμα, αν στο ακτινικό δίκτυο 15 ζυγών του Σχήματος 4.1 πρόκειται να τοποθετηθούν πυκνωτές στους ζυγούς 10, 12 και 14 τότε $k = 3$, $a_1 = \{1, 5, 6\}$, $a_2 = \{1, 2, 10, 11\}$, $a_3 = \{1, 2, 3, 13\}$ και ο πίνακας D είναι:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Σε αυτήν την περίπτωση, η νέα τιμή της αέργου συνιστώσας του ρεύματος I_r^{new} των ζυγών και οι αντίστοιχες απώλειες P_{Lr}^{com} , μετά την τοποθέτηση των πυκνωτών, δίνονται από τις σχέσεις:

$$[I_r^{new}] = [I_r] + [D] \cdot [I_C] \quad (4.10)$$

$$P_{Lr}^{com} = \sum_{i=1}^n (I_{ri} + \sum_{j=1}^k D_{ij} \cdot I_{Cj})^2 \cdot R_i \quad (4.11)$$

Η μείωση απωλειών είναι η διαφορά των σχέσεων (4.3) και (4.11).

$$S = P_{Lr} - P_{Lr}^{com} = - \sum_{i=1}^n \left[2 \cdot I_{ri} \cdot \sum_{j=1}^k D_{ij} \cdot I_{Cj} + \left(\sum_{j=1}^k D_{ij} \cdot I_{Cj} \right)^2 \right] \cdot R_i \quad (4.12)$$

Όπως και προηγουμένως, το ρεύμα I_C που προκαλεί μεγιστοποίηση της συνάρτησης μείωσης απωλειών S υπολογίζεται παραγωγίζοντας τη συνάρτηση S ως προς I_C και θέτοντάς την ίση με 0.

$$\frac{\partial S}{\partial I_{Ci}} = 0, \quad i = 1 \dots k \quad (4.13)$$

Η λύση του συστήματος εξισώσεων (4.13) για τον προσδιορισμό των I_C είναι:

$$[A] \cdot [I_C] = [B] \quad (4.14)$$

όπου $[A]$: τετραγωνικός πίνακας $k \times k$

$[B]$: διάνυσμα διάστασης k

$$A_{jj} = \sum_{i \in a_j} R_i \quad (4.15)$$

$$A_{jm} = \sum_{i \in (a_j \cap a_m)} R_i \quad (4.16)$$

$$B_j = \sum_{i \in a_j} I_{ri} \cdot R_i \quad (4.17)$$

Επομένως, τα στοιχεία των πινάκων $[A]$ και $[B]$ υπολογίζονται εύκολα από τις αντιστάσεις των γραμμών και τις τιμές των ρευμάτων γραμμής του αρχικού συστήματος και έπειτα υπολογίζονται και οι τιμές των ρευμάτων των πυκνωτών που προκαλούν μέγιστη μείωση των απωλειών ως ακολούθως:

$$[I_C] = [A]^{-1} \cdot [B] \quad (4.18)$$

Αφού υπολογιστούν τα ρεύματα $[I_C]$ και γνωρίζοντας τις τάσεις $[V_C]$ στους προς αντιστάθμιση ζυγούς του αρχικού συστήματος (πριν την τοποθέτηση πυκνωτών), υπολογίζονται οι τελικές τιμές των πυκνωτών.

$$[Q_C] = [V_C] \cdot [I_C] \quad (4.19)$$

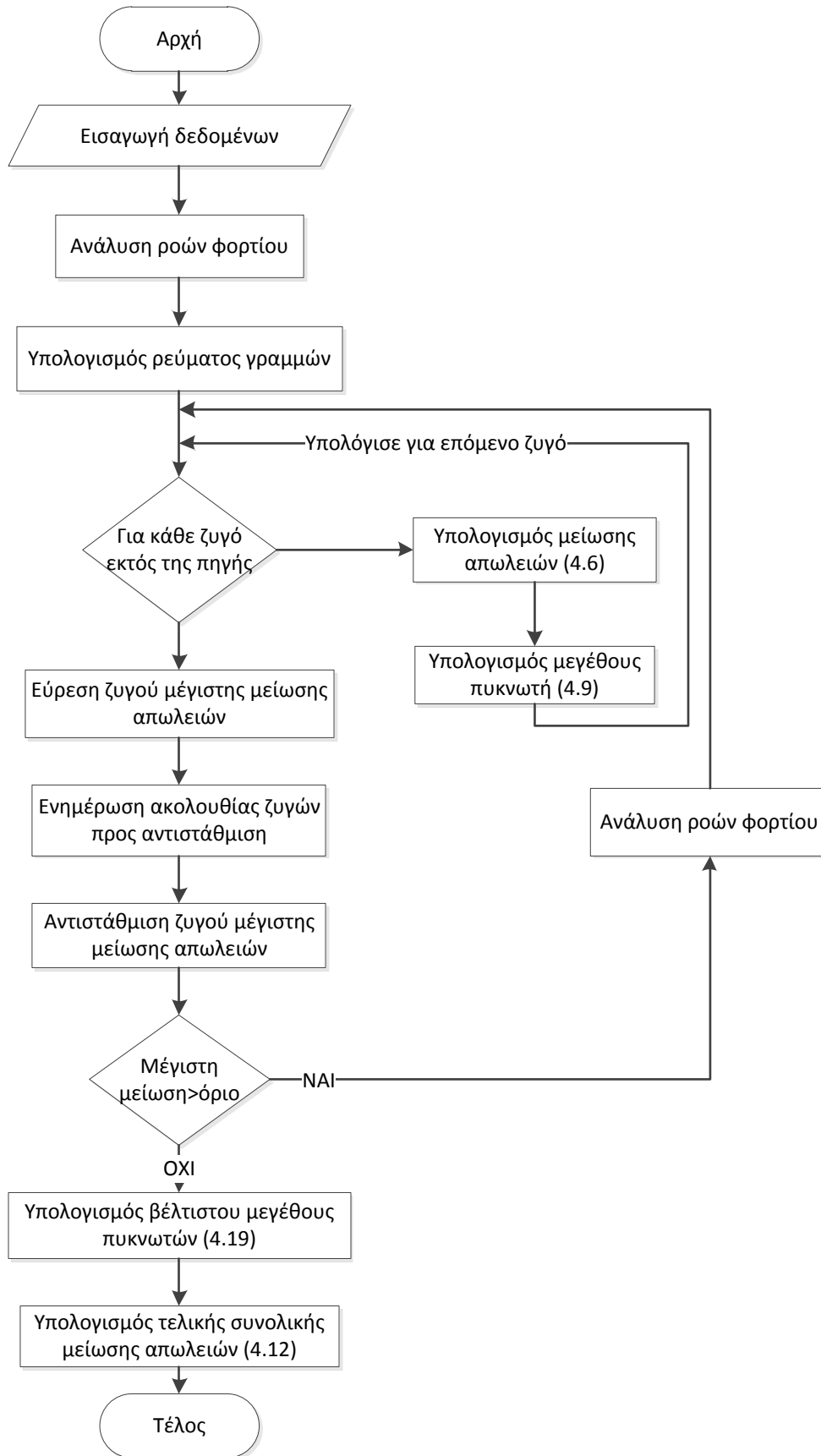
4.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

Τα βήματα για την υλοποίηση του αλγόριθμου υπολογισμού βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση των απωλειών ισχύος είναι τα ακόλουθα:

1. Χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα ανάλυσης ροών φορτίου υπολογίζονται τα ρεύματα σε όλες τις γραμμές του συστήματος. Υπολογίζονται η τιμή του ρεύματος πυκνωτών που προκαλεί μέγιστη μείωση απωλειών από τη σχέση (4.8) για όλους τους ζυγούς του συστήματος, εκτός της πηγής (ζυγός 1), η αντίστοιχη μείωση απωλειών από τη σχέση (4.6) και το μέγεθος του πυκνωτή από την (4.9). Από όλους τους ζυγούς που έγιναν οι υπολογισμοί βρίσκουμε το ζυγό με τη μεγαλύτερη μείωση απωλειών.

2. Γίνεται αντιστάθμιση του ζυγού με τη μεγαλύτερη μείωση απωλειών, τοποθετώντας σε αυτόν το ζυγό ένα πυκνωτή μεγέθους όσο βρέθηκε από τη σχέση (4.9).
3. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 και 2 για τον υπολογισμό της ακολουθίας των ζυγών προς αντιστάθμιση, μέχρι η μείωση των απωλειών ισχύος να μην ξεπερνάει ένα προκαθορισμένο όριο αντιστάθμισης (saving tolerance).
4. Αφού βρεθεί η ακολουθία των προς αντιστάθμιση ζυγών, υπολογίζεται το ρεύμα των πολλαπλών τοποθετημένων πυκνωτών που προκαλεί μέγιστη μείωση απωλειών από την (4.18), ακολούθως το τελικό μέγεθος των πυκνωτών από την (4.19) και τέλος από τη σχέση (4.12) η τελική μείωση απωλειών [4.1].

Τέλος στο Σχήμα 4.2 φαίνεται ο αλγόριθμος που περιγράφηκε πιο πάνω σε διάγραμμα ροής.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής μεθόδου υπολογισμού βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών σε ακτινικά δίκτυα διανομής.

4.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] M. H. Haque, "Capacitor placement in radial distribution systems for loss reduction," *IEE Proceedings -Generation, Transmission and Distribution*, pp. 501-505, Sept. 1999.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΛΗΘΟΥΣ, ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΓΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η περιγραφή του λογισμικού που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για να επιτευχθεί μείωση των απωλειών ισχύος. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη περιγραφή του περιβάλλοντος ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκε (MATLAB) και των χρήσιμων εργαλείων, που προσφέρονται από αυτό για τη δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (GUIDE-Graphical User Interface Design Environment). Στη συνέχεια, αναφέρονται οι απαιτήσεις του συστήματος για το συγκεκριμένο πρόγραμμα, παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του γραφικού περιβάλλοντος της εφαρμογής, ο τρόπος εισαγωγής δεδομένων, η επεξεργασία τους και τα αποτελέσματα που εξάγονται. Τέλος, παρουσιάζεται η λειτουργία των αρχείων (m-files) και η δομή του λογισμικού.

5.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Το περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της εφαρμογής βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών σε ακτινικά δίκτυα διανομής είναι το MATLAB σε έκδοση 7.11.0.584 (R2010b).

Το MATLAB είναι μια γλώσσα τέταρτης γενιάς, έχει διαδραστικό περιβάλλον και επιτρέπει στο χρήστη να κάνει τεχνικούς υπολογισμούς. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προγραμματισμό, καθώς περιέχει αρκετές εντολές, όπως while, for και if. Οι βασικές εντολές της χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις εντολές ελέγχου ροής (if) και τις εντολές για επαναληπτικές διαδικασίες (for, while).

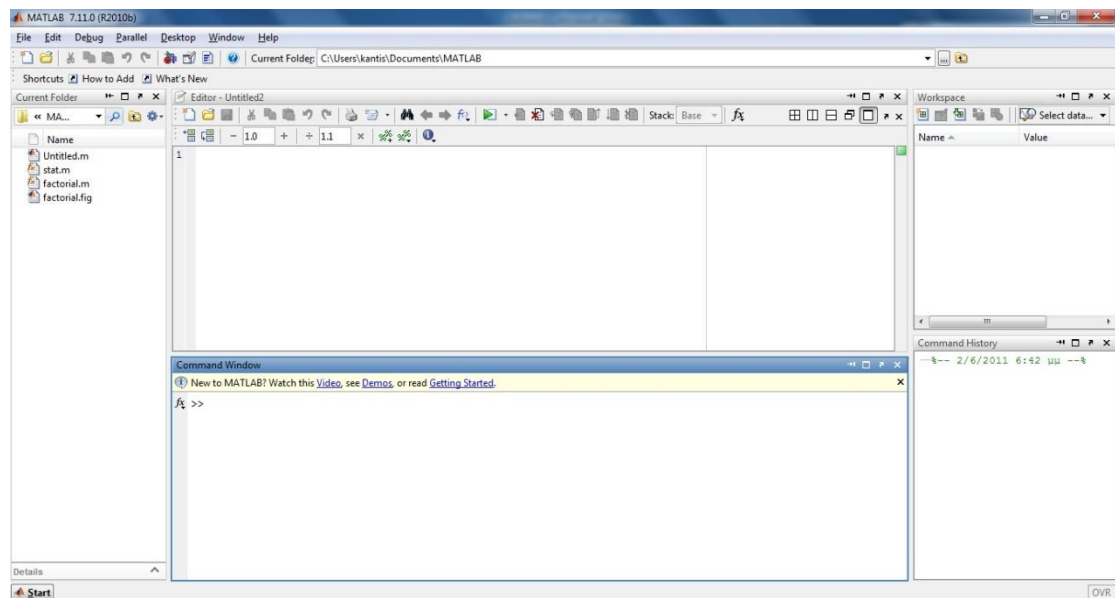
Συνοπτικά η γλώσσα MATLAB έχει τις ακόλουθες δυνατότητες:

- Μαθηματικούς/αριθμητικούς υπολογισμούς
- Ανάπτυξη αλγορίθμων

- Μοντελοποίηση και αναπαράσταση
- Ανάλυση και γραφική παρουσίαση δεδομένων

5.2.1 Το περιβάλλον του MATLAB

Τα βασικότερα μέρη του περιβάλλοντος του MATLAB είναι (Σχήμα 5.1):



Σχήμα 5.1: Το περιβάλλον του MATLAB.

- Command window (παράθυρο εντολών): Μέσα στο παράθυρο αυτό γράφονται οι εντολές, δίνεται η εντολή εκτέλεσής τους και εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πράξεων, δηλαδή γίνονται όλες οι αλληλεπιδράσεις του χρήστη με το πρόγραμμα.
- Command history (ιστορικό εντολών): Σε αυτό το παράθυρο φαίνονται οι εντολές που εκτέλεσε ο χρήστης και αν θέλει μπορεί να τις αντιγράψει ή να τις σύρει (drag and drop) στο παράθυρο εντολών.
- Workspace (χώρος εργασίας): Ο χώρος διεκπεραίωσης των πράξεων είναι ο βασικός χώρος λειτουργίας του προγράμματος. Ο χώρος αυτός βρίσκεται στη μνήμη του υπολογιστή και μέσα σε αυτόν εκτελούνται οι πράξεις και ταυτόχρονα διατηρούνται όλα τα αποτελέσματά τους, με σκοπό να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επόμενες πράξεις.
- Current directory (τρέχων κατάλογος): Είναι το σημείο αναφοράς των αρχείων του προγράμματος. Αν είναι επιθυμητό να κληθεί μια συνάρτηση ή ένα m-file πρέπει να βρίσκεται στο τρέχοντα κατάλογο [5.1].

5.2.2 Δημιουργία και εκτέλεση m-files

Ένα από τα πράγματα που κάνουν το Matlab να υπερτερεί απέναντι σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού, είναι η ευκολία με την οποία μπορεί κανείς να προγραμματίσει. Στη γενική περίπτωση, για απλούς υπολογισμούς, το παράθυρο εντολών είναι αρκετά εύχρηστο. Όσο αυξάνεται όμως το πλήθος των εντολών ή πρέπει να αλλάζουν οι τιμές κάποιων μεταβλητών, η διαδικασία να γράφει ο χρήστης στο παράθυρο εντολών είναι χρονοβόρα. Το κυριότερο είναι ότι όταν κλείσει το πρόγραμμα τότε ότι γράφτηκε στο παράθυρο εντολών θα σβηστεί.

Για να λυθούν τα παραπάνω προβλήματα, θα πρέπει να γίνεται αποθήκευση των εντολών αυτών σε ένα αρχείο, το οποίο θα καλείται από το παράθυρο εντολών και θα εκτελούνται οι ανάλογες εντολές. Το MATLAB δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει τα λεγόμενα m-files, τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα script files και τις functions.

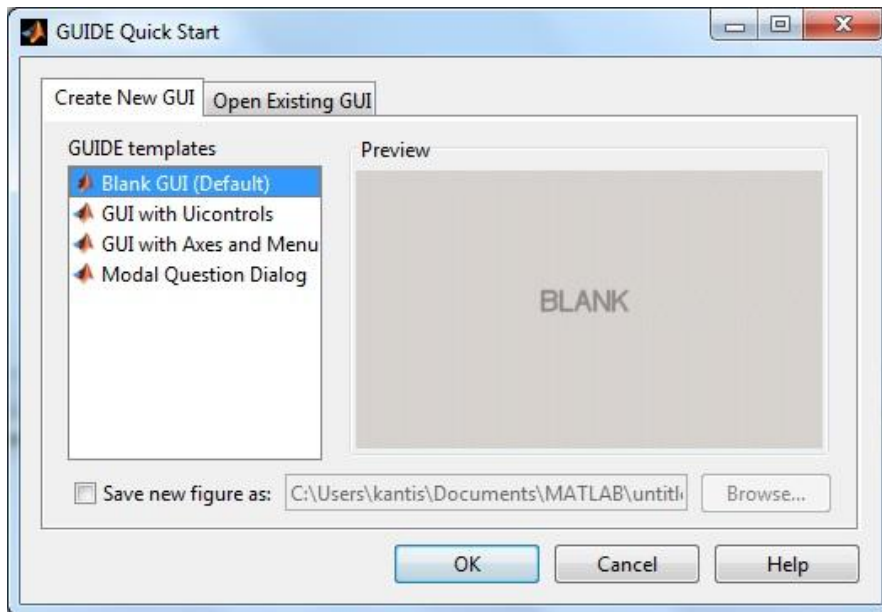
- Script files: Για να δημιουργηθεί ένα script file, ακολουθείται η διαδικασία: *File* → *New* → *Script* και ανοίγει ο editor. Μέσα στο παράθυρο αυτό συντάσσονται οι εντολές, όπως ακριβώς θα συντάσσονταν και μέσα στο παράθυρο εντολών του MATLAB. Τα αρχεία αυτά αποθηκεύονται μέσα στην ενεργό διεύθυνση αποθήκευσης του MATLAB, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα άμεσης εκτέλεσής τους με την κλήση του ονόματός τους από το παράθυρο εντολών. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα να αποθηκεύεται πλήθος εντολών, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται όποτε απαιτείται. Τα script files λειτουργούν με γενικές μεταβλητές, δηλαδή είναι “ορατές” και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και έξω από το συγκεκριμένο αρχείο.
- Functions: Αποτελούν τη δεύτερη κατηγορία των m-files και η διαδικασία δημιουργίας τους είναι: *File* → *New* → *Function*. Η μεγάλη διαφορά τους με τα script files είναι ότι οι μεταβλητές είναι τοπικές, δηλαδή μια μεταβλητή που περιέχεται σε μια function δεν μπορεί να επηρεαστεί από διαδικασίες εκτός function. Ακόμα μπορεί να δεχθεί δεδομένα σαν ορίσματα και να επιστρέφει αποτελέσματα. Μια function πρέπει πάντα να αρχίζει με την ακόλουθη γραμμή:

$$\text{function} [\text{out1}, \dots, \text{outn}] = \text{name} (\text{input1}, \dots, \text{inputm})$$
όπου out1, ..., outn είναι τα αποτελέσματα που επιστρέφονται, name είναι το όνομά της και input1, ..., inputm τα ορίσματά της. Μια function δεν είναι απαραίτητο να έχει ορίσματα ή να επιστρέφει αποτελέσματα. Σαν ορίσματα, (αντίστοιχα αποτελέσματα), μπορούν να μπουν μεταβλητές των οποίων οι τιμές μπορούν να είναι πολλών ειδών. Όπως για παράδειγμα αριθμοί, συμβολοσειρές, πίνακες και πολλές άλλες δομές που μπορεί να επεξεργαστεί το MATLAB [5.2].

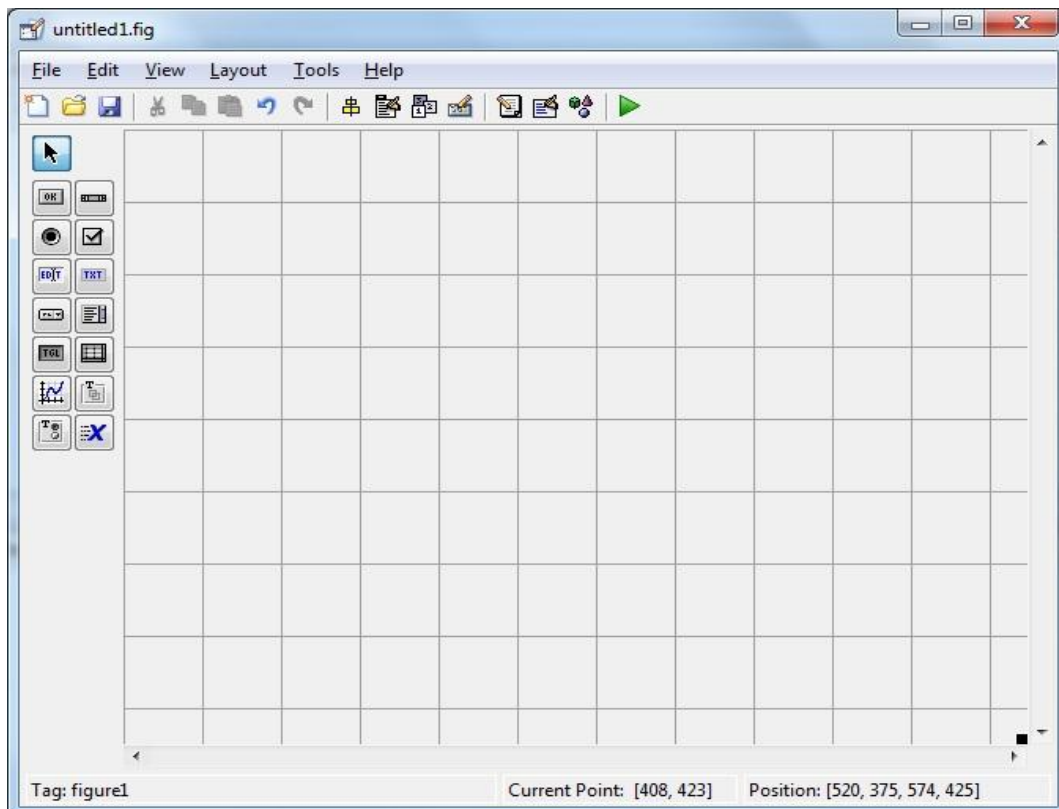
5.2.3 Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (GUI)

Μια πολύ χρήσιμη δυνατότητα που προσφέρει το MATLAB στο χρήστη, είναι να δημιουργήσει γραφικό περιβάλλον για τις εφαρμογές του. Η εκκίνηση του GUIDE γίνεται εύκολα με δύο τρόπους. Πρώτον, εκτελώντας την εντολή *guide* στο παράθυρο εντολών και δεύτερον, επιλέγοντας από τη γραμμή του μενού *File* → *New* → *GUI*. Στη συνέχεια, ο οδηγός ρωτάει το χρήστη αν θέλει να δημιουργήσει ένα κενό παράθυρο (Blank GUI), ένα

παράθυρο βασισμένο σε κάποια πρότυπα ή να ανοίξει ένα έτοιμο παράθυρο (Σχήμα 5.2). Στη συνέχεια, αν ο χρήστης αφήσει την προεπιλεγμένη επιλογή “Blank GUI” θα ανοίξει ένα άδειο παράθυρο, στο οποίο μπορεί να δημιουργήσει το δικό του GUI (Σχήμα 5.3).

















Σχήμα 5.2: Επιλογές για δημιουργία νέου γραφικού περιβάλλοντος.






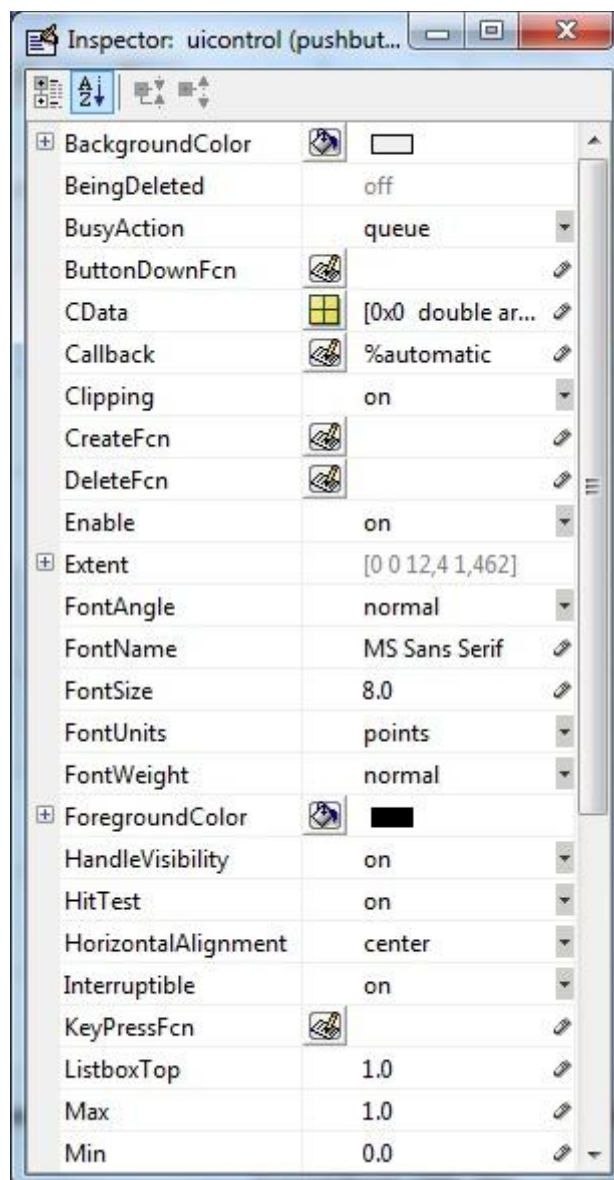
Σχήμα 5.3: Περιβάλλον και εργαλεία για τη δημιουργία GUI.

Ακολουθώς, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3, το περιβάλλον δημιουργίας του παραθύρου αποτελείται από μια κεντρική γραμμή επιλογών, μια γραμμή εργαλείων και μια κάθετη εργαλειοθήκη στα αριστερά. Η γκρίζα περιοχή με το πλέγμα είναι το φόντο του παραθύρου. Η κάθετη εργαλειοθήκη περιέχει τα παρακάτω 14 αντικείμενα (objects), με τα οποία ο χρήστης μπορεί να εμπλουτίσει το γραφικό του περιβάλλον:

1. Push button  : κουμπί που όταν πατηθεί εκτελεί μια επιθυμητή λειτουργία.
2. Slider  : δίνει τη δυνατότητα να μεταβάλλει ο χρήστης κάποια μεταβλητή, με τη βοήθεια μιας μπάρας μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής. Συνοδεύει κάποιο κείμενο ή γράφημα και η μπάρα μπορεί να είναι είτε οριζόντια είτε κάθετη.
3. Radio button  : στρογγυλό κουμπί με το οποίο ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μόνο μια επιλογή από ένα πλήθος επιλογών. Διαλέγοντας μια, αναιρείται κάποια άλλη.
4. Check box  : δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να διαλέξει μια ή περισσότερες επιλογές.
5. Edit text  : είναι ένα πεδίο στο οποίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει ή να μορφοποιήσει αλφαριθμητικά δεδομένα. Μπορεί να γίνει εισαγωγή κειμένου μονής ή πολλαπλής γραμμής.
6. Static text  : προβάλλει στην οθόνη μια γραμμή κειμένου. Το κείμενο αυτό δε μπορεί να το επεξεργαστεί ο χρήστης του λογισμικού.
7. Pop-up menu  : παρέχει στο χρήστη μια λίστα επιλογών που ανοίγει όταν πατηθεί.
8. List box  : παρέχει στο χρήστη μια λίστα ενός ή περισσότερων επιλογών που παραμένει ανοιχτή. Όταν υπάρχουν πολλές επιλογές εμφανίζεται αυτόματα μια μπάρα.
9. Toggle button  : δίνει τη δυνατότητα επιλογής ή όχι μιας λειτουργίας.
10. Table  : παρέχει στο χρήστη επιλογές σε μορφή πίνακα.
11. Axes  : δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής μιας γραφικής παράστασης στο παράθυρο.
12. Panel  : χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση πολλών στοιχείων ελέγχου.
13. Button group  : είναι σαν το panel, αλλά επιδρά αυτόματα στην ομαδοποίηση των radio buttons και toggle buttons.
14. ActiveX control  : αντικείμενο ελέγχου ActiveX.

Η εισαγωγή των παραπάνω αντικειμένων στο παράθυρο είναι απλή και γίνεται με απλό σύρσιμο (drag and drop). Ειδικά τα αντικείμενα push button, radio button, slider, edit text, static text, list box, pop-up menu, check box και toggle button ανήκουν στην κατηγορία των στοιχείων ελέγχου (uicontrols). Ο χρήστης μπορεί να εισάγει όσες φορές θέλει το κάθε

αντικείμενο στο παράθυρο. Μέσω του object browser  βλέπει πόσα και ποια αντικείμενα υπάρχουν στο συγκεκριμένο παράθυρο της εφαρμογής του και επιλέγοντάς τα βλέπει τη θέση τους. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να στοιχίσει κάθετα ή οριζόντια όποια στοιχεία ελέγχου επιθυμεί, μέσω του εικονιδίου align objects . Χρησιμοποιώντας τον property inspector (Σχήμα 5.4), μέσω του εικονιδίου  ή με διπλό κλικ ή δεξί κλικ πάνω στο αντικείμενο, μπορεί να καθορίσει τις ιδιότητες των κουμπιών, όπως το χρώμα του φόντου, τη γραμματοσειρά, το είδος των γραμμάτων, αν είναι ορατό ή όχι ένα στοιχείο, τη θέση του, την ετικέτα του (tag) ή το κείμενο (string) που θα είναι πάνω του κ.α.. Αυτές είναι κάποιες από τις κοινές ιδιότητες σε όλα τα στοιχεία ελέγχου που χρησιμοποιούνται.



Σχήμα 5.4: Property inspector.


Σε κάθε αντικείμενο αντιστοιχεί ένας δείκτης (handle). Κάποιοι χρήσιμοι αυτόματοι δείκτες είναι οι παρακάτω:

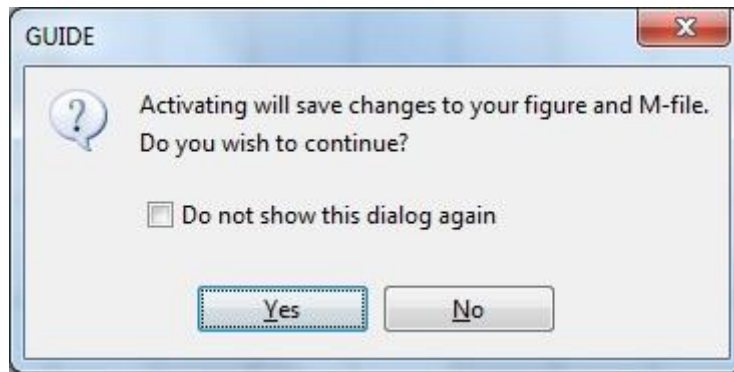
- gcf : δείκτης στο τρέχον figure
- gco : δείκτης στο τρέχον object
- gca : δείκτης στο τρέχον axes
- gcbo : δείκτης στο object του οποίου εκτελείται η συνάρτηση callback

Τα περισσότερα στοιχεία ελέγχου συνοδεύονται από μια συνάρτηση callback, στην οποία ο χρήστης προσθέτει τις εντολές που θέλει να εκτελεί η ενεργοποίηση του κάθε στοιχείου ελέγχου. Όποιες μεταβλητές χρησιμοποιήσει μέσα στη συνάρτηση είναι τοπικές και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλες συναρτήσεις. Αρχικά, δημιουργούνται δύο callbacks που είναι η opening function και η output function. Η πρώτη εκτελείται πριν η εικόνα του GUI (figure) γίνει ορατή στο χρήστη, αλλά αφού δημιουργήσει όλα τα αντικείμενα που θέλει και η δεύτερη επιστρέφει δεδομένα στο παράθυρο εντολών. Και στις δύο περιπτώσεις μπορεί ο χρήστης να προσθέσει δικό του κώδικα, όπως για παράδειγμα στην opening function μπορεί να αρχικοποιήσει δεδομένα. Κάθε φορά που εισάγεται ένα γραφικό αντικείμενο με το GUIDE παράγεται και στο m-file το αντίστοιχο callback.

Το GUI δημιουργεί για κάθε παράθυρο δύο αρχεία, το m-αρχείο και το fig-αρχείο. Το fig-αρχείο είναι το αρχείο στο οποίο το MATLAB αποθηκεύει όλα τα αντικείμενα που έχει εισάγει ο χρήστης, την ακριβή θέση τους, καθώς και όλες τις τιμές των ιδιοτήτων τους που μπορεί να υπάρχουν. Εδώ ο χρήστης σχεδιάζει την εμφάνιση του παραθύρου. Το m-αρχείο είναι το αρχείο στο οποίο ο χρήστης θα γράψει τον κώδικα που θα ενσωματωθεί στα στοιχεία ελέγχου, ώστε αυτά να εκτελέσουν τις επιθυμητές λειτουργίες. Αυτό το αρχείο αναφέρεται και σαν GUI m-file. Κάθε αρχείο *.fig πρέπει να συνοδεύεται από το αντίστοιχο αρχείο *.m με το ίδιο όνομα. Κάθε φορά που ο χρήστης δημιουργεί ένα νέο παράθυρο (figure), το GUI δημιουργεί αυτόματα και τους δύο αυτούς τύπους αρχείων.

Δύο χρήσιμες ιδιότητες στον προγραμματισμό των m-files είναι οι string και οι value. Με την ιδιότητα string ο χρήστης μπορεί να εισάγει κείμενο πάνω σε κάποιο αντικείμενο με την εντολή set ή να πάρει κείμενο με την εντολή get, ενώ με την ιδιότητα value να ορίσει ή να πάρει κάποια τιμή από ένα αντικείμενο. Επίσης, το MATLAB προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας dialogs. Τα dialogs είναι ειδικού τύπου παράθυρα τα οποία χρησιμοποιούνται για να δώσουν πληροφορίες στο χρήστη ή να ζητήσουν εισαγωγή πληροφορίας.

Τέλος, αφού κατασκευάσει ο χρήστης το παράθυρο της εφαρμογής με τα κουμπιά που επιθυμεί, μπορεί να τρέξει την εφαρμογή πατώντας το κουμπί “Run” . Το GUI θα ζητήσει να επιβεβαιώσει ο χρήστης τις αλλαγές που έκανε (Σχήμα 5.5). Επιλέγοντας “Yes” το GUI θα ζητήσει από το χρήστη να δώσει ένα όνομα στην εφαρμογή του και θα την αποθηκεύσει σε δύο αρχεία .fig και .m [5.3].



Σχήμα 5.5: Παράθυρο διαλόγου για αποθήκευση αλλαγών στο GUI.

5.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΛΗΘΟΥΣ, ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του λογισμικού εύρεσης του πλήθους, της θέσης και του μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών για τοποθέτηση σε ακτινικά δίκτυα διανομής, με σκοπό τη μείωση των απωλειών, είναι αυτός που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Ακόμα, στην εφαρμογή έχει προστεθεί μια επιπλέον μέθοδος επίλυσης του προβλήματος, όπου ο χρήστης μπορεί να δώσει όποια λύση επιθυμεί και να γίνει ο υπολογισμός της αντιστάθμισης που επιτεύχθηκε.

5.3.1 Απαιτήσεις συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της εφαρμογής είναι το MATLAB σε έκδοση 7.11.0.584 (R2010b). Ο υπολογιστής στον οποίο αναπτύχθηκε είχε λειτουργικό σύστημα Windows 7 Home Premium 64 bit, επεξεργαστή Intel Core i5 2.27 GHz, δίσκο 500 GB και RAM 4.00 GB.


Οι τυπικές απαιτήσεις όμως για να μπορεί το σύστημα να χρησιμοποιήσει το λογισμικό MATLAB είναι στην περίπτωση λειτουργικού συστήματος Windows να είναι νεότερο από Windows XP Service Pack 3, επεξεργαστή οποιοδήποτε Intel ή AMD×86 που να υποστηρίζει το σύνολο εντολών SSE2, 3-4 GB χώρο στο δίσκο και 1024 MB RAM.

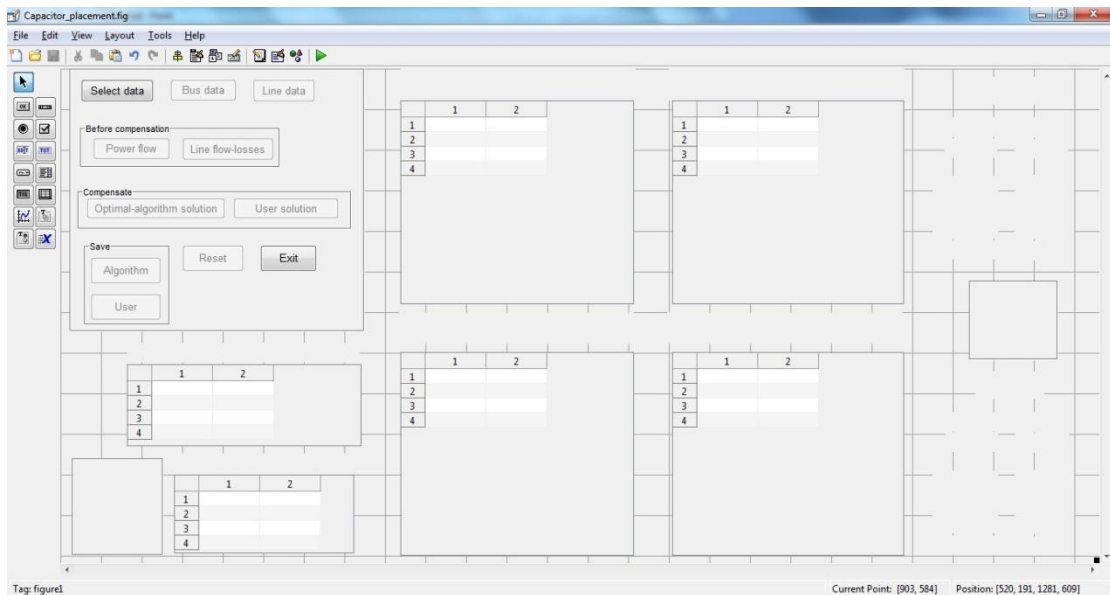
5.3.2 Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής

Το γραφικό περιβάλλον που δημιουργήθηκε για την εφαρμογή ονομάστηκε Capacitor_placement και τα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ακόλουθα:

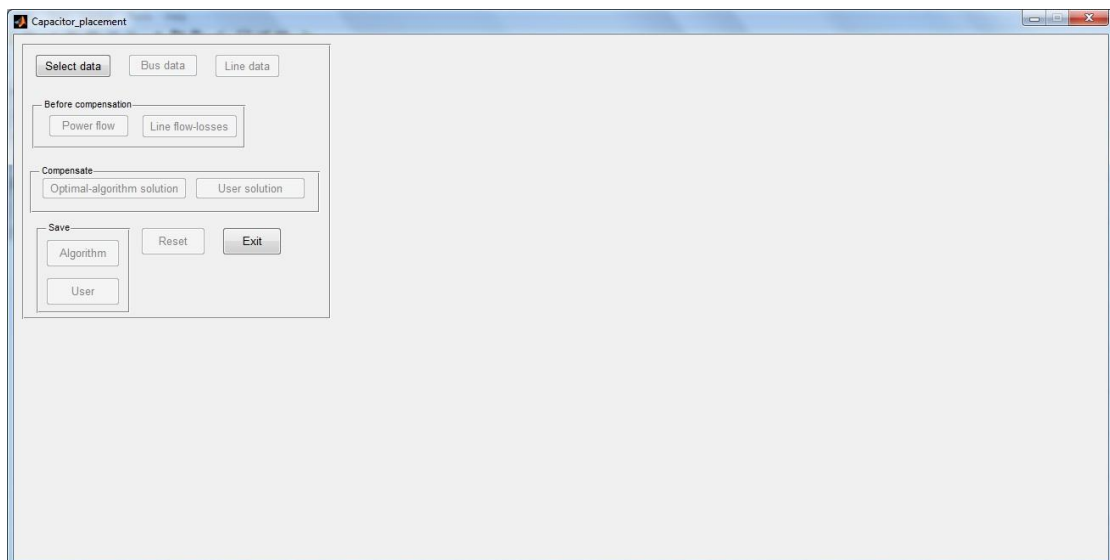
- 11 push buttons για την εισαγωγή δεδομένων, εκτέλεση υπολογισμών, καθαρισμό και αποθήκευση δεδομένων και έξοδο από την εφαρμογή.
- 28 static texts για εμφάνιση τίτλων, αλλά και αποτελεσμάτων.
- 6 tables για εμφάνιση αποτελεσμάτων σε μορφή πίνακα.

- 6 panels, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ομαδοποιημένη εμφάνιση των επιλογών του χρήστη, αλλά και για το όριο αντιστάθμισης των απωλειών ισχύος και την έξοδο του αποτελέσματος της ποσοστιαίας αντιστάθμισης.

Μετά την εκκίνηση του GUIDE, όταν ο χρήστης επιλέξει να ανοίξει το γραφικό περιβάλλον Capacitor_placement, εμφανίζεται το παράθυρο που φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Πατώντας το κουμπί “Run” , ο χρήστης μπορεί να τρέξει την εφαρμογή (Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.6: Εισαγωγή όλων των αντικειμένων του GUI για την υλοποίηση της εφαρμογής.



Σχήμα 5.7: Το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής.

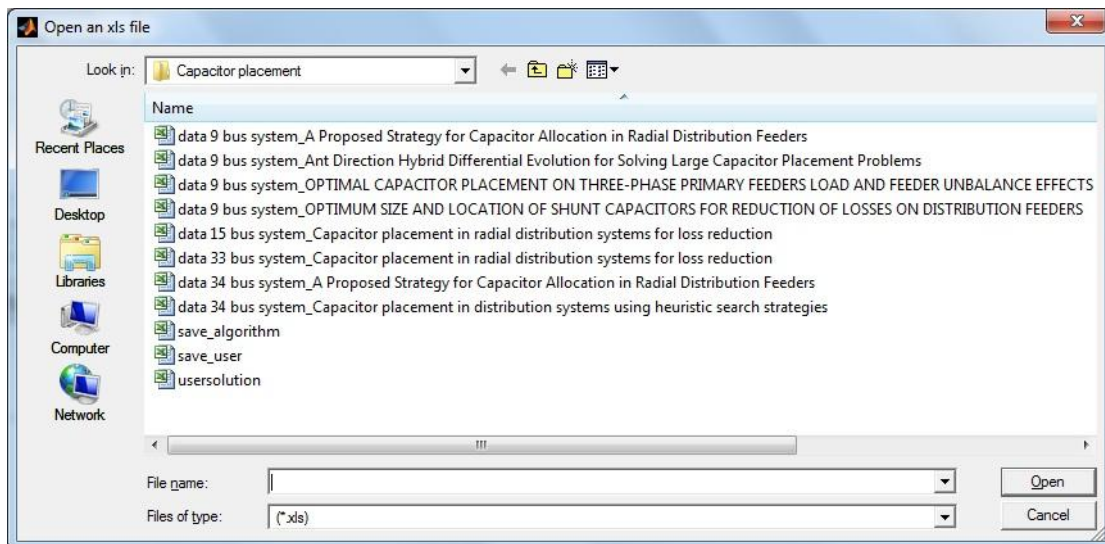
Από το Σχήμα 5.7 φαίνεται ότι μόνο δυο επιλογές είναι ενεργοποιημένες. Η εφαρμογή είναι φτιαγμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να καθοδηγεί το χρήστη στην επόμενη κίνηση που πρέπει κάνει. Για παράδειγμα, δεν μπορεί να τρέξει την εφαρμογή αν πρώτα δεν εισάγει δεδομένα, ή να αποθηκεύσει τα αποτελέσματα της εφαρμογής αν δεν τρέξει πρώτα την εφαρμογή. Έτσι, κατά την εκκίνηση της εφαρμογής, οι μοναδικές ενεργοποιημένες επιλογές του χρήστη στο γραφικό περιβάλλον είναι να εισάγει δεδομένα (“Select data”) ή να εγκαταλείψει την εφαρμογή (“Exit”). Αφού εισάγει δεδομένα ο χρήστης, ακολούθως θα ενεργοποιηθούν και άλλα κουμπιά. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι λειτουργίες του κάθε κουμπιού και στις επόμενες υποενότητες γίνεται μια πιο λεπτομερής ανάλυσή τους.

Πίνακας 5.1: Συνοπτική επεξήγηση λειτουργιών των κουμπιών του γραφικού περιβάλλοντος της εφαρμογής.

Κουμπί	Συνοπτική λειτουργία
Select data	Ανοίγει παράθυρο διαλόγου για την επιλογή αρχείου Excel, όπου είναι τα δεδομένα των ζυγών, των γραμμών και το όριο ανοχής της αντιστάθμισης (saving tolerance).
Bus data	Παρουσιάζει στο γραφικό περιβάλλον τα στοιχεία των ζυγών που επιλέχτηκαν.
Line data	Παρουσιάζει στο γραφικό περιβάλλον τα στοιχεία των γραμμών που επιλέχτηκαν.
Power flow (Before compensation)	Υπολογίζει ανάλυση ροών φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson.
Line flow-losses (Before compensation)	Υπολογίζει τις ροές ισχύος σε όλους τους ζυγούς και τις απώλειες στις γραμμές του συστήματος.
Optimal-algorithm solution (Compensate)	Εφαρμόζεται η μέθοδος του Κεφαλαίου 4 για τον υπολογισμό πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών για μείωση των απωλειών ισχύος στο υπό μελέτη δίκτυο.
User solution (Compensate)	Ο χρήστης επιλέγει μέσω παράθυρου διαλόγου μια δική του λύση για την αντιστάθμιση του συστήματος.
Algorithm (Save)	Αποθηκεύει τα αποτελέσματα από το Optimal-algorithm solution (Compensate).
User (Save)	Αποθηκεύει τα αποτελέσματα του User solution (Compensate).
Reset	Κάνει επανεκκίνηση της εφαρμογής.
Exit	Μέσω ενός παραθύρου διαλόγου μπορεί να γίνει ο τερματισμός της εφαρμογής.

5.3.3 Εισαγωγή δεδομένων

Επιλέγοντας το κουμπί “Select data”, ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 5.8), στο οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει κάποια δεδομένα εισόδου από ένα αρχείο Excel (*.xls) που ήδη υπάρχει.



Σχήμα 5.8: Εισαγωγή δεδομένων από αρχείο Excel.

Αν ο χρήστης επιλέξει “Cancel”, τότε δεν γίνεται τίποτα και επιστρέφει στο αρχικό παράθυρο, ενώ αν εισάγει δικό του όνομα, εμφανίζεται ένα μήνυμα σφάλματος. Αν επιλέξει κάποιο υπάρχον αρχείο, τότε διαβάζεται το συγκεκριμένο αρχείο και στη συνέχεια ενεργοποιούνται όλα τα κουμπιά που ήταν ανενεργά προηγουμένως (Σχήμα 5.7), ώστε να μπορούν να εκτελέσουν τις λειτουργίες τους, εκτός από τα κουμπιά αποθήκευσης της μεθόδου του Κεφαλαίου 4, αλλά και της λύσης του χρήστη. Ακόμα, απενεργοποιείται το κουμπί “Select data”, αφού ο χρήστης έχει επιλέξει δεδομένα, όμως σε περίπτωση που θέλει να τα αλλάξει, τότε θα πρέπει να πατήσει πρώτα το κουμπί “Reset” για να γίνει επανεκκίνηση της εφαρμογής και να εισάγει τα νέα δεδομένα με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε.

Τα δεδομένα εισόδου που πρέπει να εισαχθούν είναι στοιχεία που αφορούν τις γραμμές, τους ζυγούς του συστήματος αλλά και το όριο ανοχής της αντιστάθμισης για το οποίο θα επαναλαμβάνεται η διαδικασία της Ενότητας 4.3. Τονίζεται ότι για την εφαρμογή ο χρήστης θα πρέπει να δίνει τα δεδομένα με τον παρακάτω συγκεκριμένο τρόπο (format).

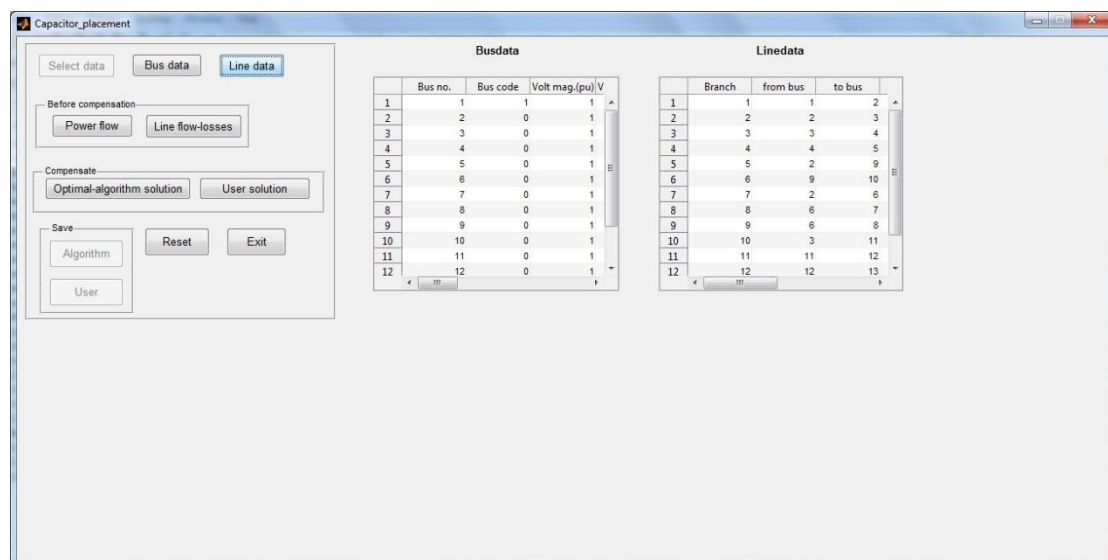
Στο πρώτο φύλλο του αρχείου είναι τα δεδομένα των ζυγών. Στη στήλη A είναι ο αριθμός των ζυγών (Bus no), όπου ο πρώτος ζυγός είναι ο ζυγός ταλάντωσης, ενώ στη δεύτερη στήλη είναι ο κωδικός του ζυγού (Bus code). Για το ζυγό ταλάντωσης, ο κωδικός είναι 1 και για αυτόν πρέπει να δίνονται η τάση του κατά μέτρο και γωνία. Για τους ζυγούς φορτίου, ο κωδικός είναι 0, και εισάγονται σαν θετικοί αριθμοί η ενεργός (kW) και η άεργος ζήτηση (kVAr). Ακόμα, πρέπει να γίνει μια αρχικοποίηση της τάσης που συνήθως αν δεν δίνεται τότε θεωρείται ίση με την αντίστοιχη τάση του ζυγού ταλάντωσης ($1\angle 0^\circ p.u.$). Τέλος, για τους ζυγούς παραγωγής, ο κωδικός είναι 2 και πρέπει να είναι γνωστά το μέτρο

της τάσης, η πραγματική παραγόμενη ισχύς σε kW, αλλά και το ελάχιστο και μέγιστο όριο αέργου ισχύος σε kVAr. Στις στήλες C και D είναι η τάση του ζυγού σε ανά μονάδα τιμή (Voltage mag. pu) και σε kV (Voltage mag. kV) αντίστοιχα, ενώ στην επόμενη στήλη είναι η γωνία της τάσης σε μοίρες (Angle degree). Οι στήλες F και G αντιστοιχούν στην πραγματική (kW) και άεργο ισχύ (kVAr) του φορτίου. Οι επόμενες τέσσερις στήλες αφορούν την παραγωγή και είναι με σειρά η πραγματική ισχύς (kW), η άεργος ισχύς (kVAr), η ελάχιστη παραγωγή αέργου ισχύος (Q_{min}-kVAr) και η μέγιστη παραγωγή αέργου ισχύος (Q_{max}-kVAr). Στην τελευταία στήλη τοποθετείται τυχόν εισερχόμενη στο σύστημα άεργος ισχύς λόγω εγκατεστημένων παράλληλων πυκνωτών (Injected kVAr).

Στο δεύτερο φύλλο του αρχείου βρίσκονται τα στοιχεία των γραμμών. Μια γραμμή καθορίζεται από το ζευγάρι των ζυγών που την αποτελούν. Έτσι στην πρώτη στήλη είναι ο αριθμός της γραμμής (Branch) και στις επόμενες δύο είναι ο αρχικός (Bus nr) και ο τελικός ζυγός (Bus nr) μιας γραμμής, αντίστοιχα. Οι στήλες D, E και F είναι η ωμική αντίσταση (R pu), η επαγωγική αντίσταση (X pu) και το μισό της χωρητικής αγωγιμότητας (1/2 B pu), όλα αναγμένα σε ανά μονάδα τιμές με $S_{base} = 100 \text{ kVA}$, για το λόγο ότι αυτή χρησιμοποιείται και στην εφαρμογή. Στην τελευταία γραμμή τοποθετείται ο κωδικός της γραμμής, όπου στην περίπτωση των μετασχηματιστών είναι η λήψη τους και για γραμμές είναι 1. Σημειώνεται ότι η φορά της γραμμής δεν επηρεάζει το πρόγραμμα, αλλά στην περίπτωση μετασχηματιστή η αριστερή πλευρά πρέπει να είναι η πλευρά λήψης του, που συνήθως είναι η πλευρά του πρωτεύοντος [5.4].

Στο τρίτο φύλλο ο χρήστης πρέπει να ορίσει το όριο ανοχής σε ποσοστό των αρχικών απωλειών ισχύος (saving tolerance), για το οποίο θα γίνεται αντιστάθμιση. Δηλαδή, ο αλγόριθμος της Ενότητας 4.3 θα σταματήσει όταν δεν μπορεί να επιτευχθεί αυτό το όριο.

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων, ο χρήστης με τα κουμπιά “Bus data” και “Line data” μπορεί να δει τα στοιχεία των ζυγών και των γραμμών που εισήγαγε (Σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.9: Εμφάνιση στοιχείων ζυγών και γραμμών στο γραφικό περιβάλλον.

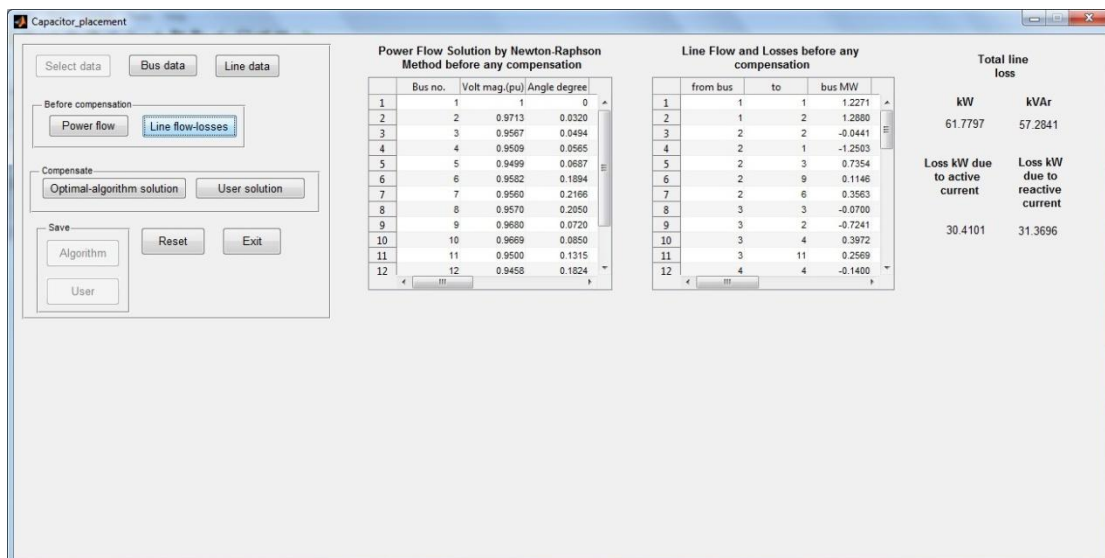
5.3.4 Επεξεργασία δεδομένων

Αφού γίνει εισαγωγή δεδομένων από το χρήστη, μπορεί να δει και να μελετήσει τα αποτελέσματα των υπολογισμών που εκτελούν τα υπόλοιπα ενεργοποιημένα κουμπιά που περιλαμβάνει το γραφικό περιβάλλον. Τα αποτελέσματα και οι απαραίτητοι τίτλοι αυτών εμφανίζονται συνολικά σε 6 tables, 2 panels και 28 static texts.

Οι επιλογές του χρήστη χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.9. Η πρώτη κατηγορία είναι στο panel “Before compensation” και αναφέρεται πριν την οποιαδήποτε αντιστάθμιση του συστήματος και οι υπόλοιπες επιλογές είναι στο panel “Compensate” και αναφέρονται στον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η αντιστάθμιση.

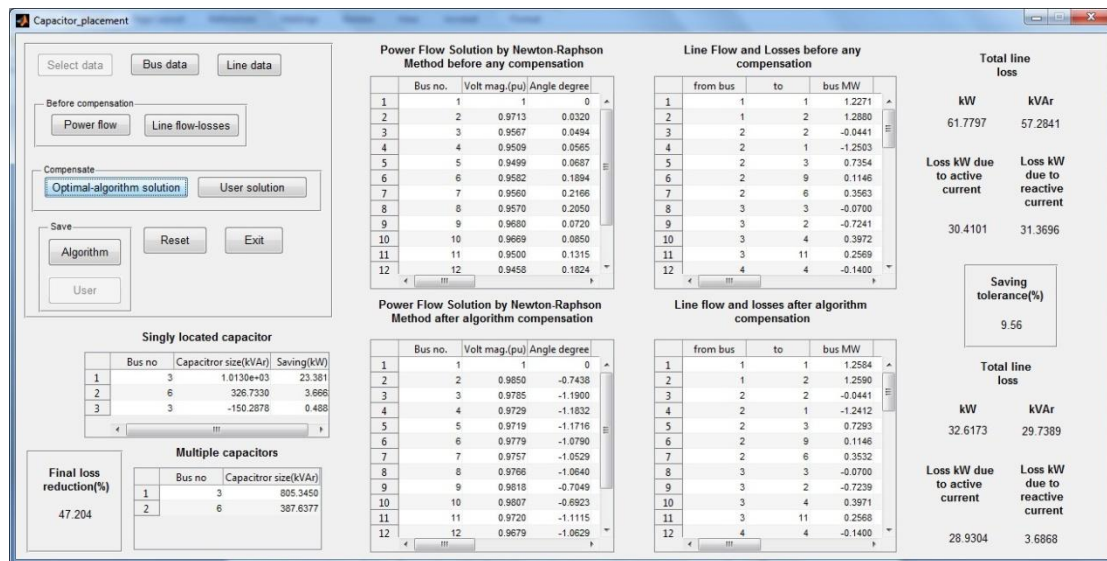
Στην πρώτη περίπτωση, δηλαδή πριν την αντιστάθμιση, ο χρήστης μπορεί να κάνει ανάλυση ροών φορτίου (“Power flow”) ή υπολογισμό των απωλειών στις γραμμές (“Line flow-losses”). Η ανάλυση ροών φορτίου γίνεται με τη μέθοδο Newton-Raphson που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, όπου υπολογίζεται η τάση κατά μέτρο και γωνία σε όλους τους ζυγούς, τόσο οι καταναλώσεις, όσο και η παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος. Οι απώλειες των γραμμών υπολογίζονται σύμφωνα με [5.4], όπου υπολογίζεται η ενεργός, η άεργος και η φαινόμενη ισχύς σε όλους τους ζυγούς και οι απώλειες ενεργού και αέργου ισχύος σε όλες τις γραμμές του συστήματος. Ακόμα, υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες του συστήματος, αλλά και οι πραγματικές απώλειες του συστήματος που οφείλονται στην ενεργό και άεργο συνιστώσα του ρεύματος. Τα αποτελέσματα των δύο αυτών επιλογών του χρήστη για την απεικόνισή τους χρειάζονται 2 tables και 11 static texts όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.10.

Στη δεύτερη περίπτωση, οι επιλογές του χρήστη αφορούν τον τρόπο αντιστάθμισης. Οι επιλογές είναι δύο και είναι να γίνει αντιστάθμιση σύμφωνα με τη μέθοδο υπολογισμού βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών (“Optimal-algorithm solution”) που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4 ή να γίνει αντιστάθμιση σύμφωνα με τις επιλογές του χρήστη (“User solution”), όσον αφορά τη θέση και το μέγεθος των πυκνωτών.



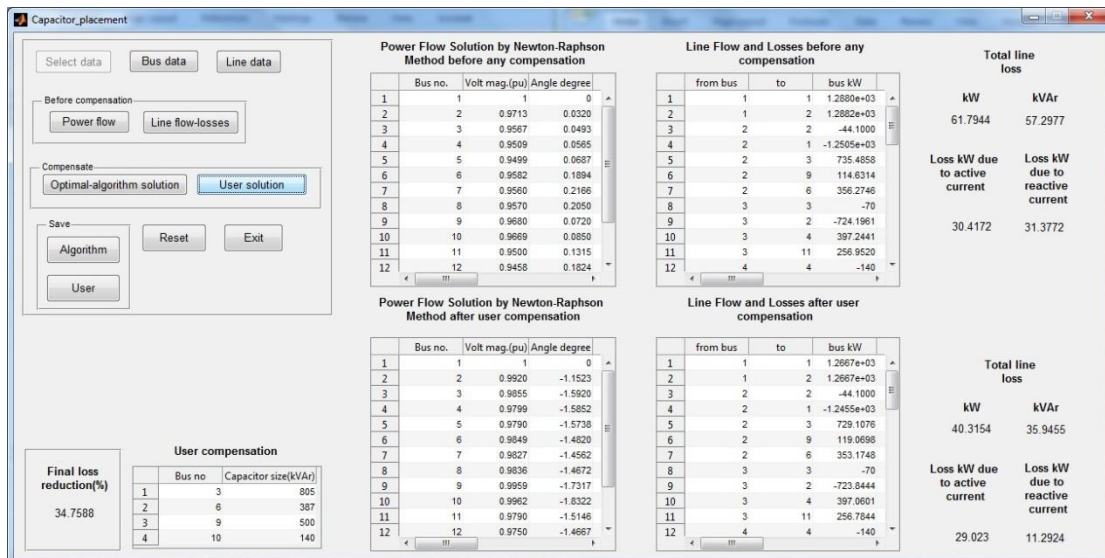
Σχήμα 5.10: Εμφάνιση αποτελεσμάτων ανάλυσης ροών φορτίου και απωλειών γραμμών.

Αν ο χρήστης πατήσει το κουμπί “Optimal-algorithm solution” τότε υλοποιείται ο αλγόριθμος του Κεφαλαίου 4 και γίνονται υπολογισμοί για την τοποθέτηση μεμονωμένων πυκνωτών, όπου καθορίζεται το βέλτιστο πλήθος και οι βέλτιστες θέσεις τοποθέτησης των εγκάρσιων πυκνωτών και ακολούθως γίνεται ο υπολογισμός για την τοποθέτηση πολλαπλών πυκνωτών, όπου υπολογίζεται το μέγεθός τους. Ακόμα, για σκοπούς σύγκρισης, αφού γίνει αντιστάθμιση σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγόριθμου, γίνεται ανάλυση ροών φορτίου και υπολογισμός των απωλειών των γραμμών, όπως περιγράφηκαν πιο πάνω, για να προκύψει και το αποτέλεσμα της ποσοστιαίας αντιστάθμισης του συστήματος. Τα αποτελέσματα του “Optimal-algorithm solution” απεικονίζονται σε 4 tables, 2 panels και 17 static texts (Σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11: Εμφάνιση αποτελεσμάτων μεθόδου εύρεσης βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους πυκνωτών.

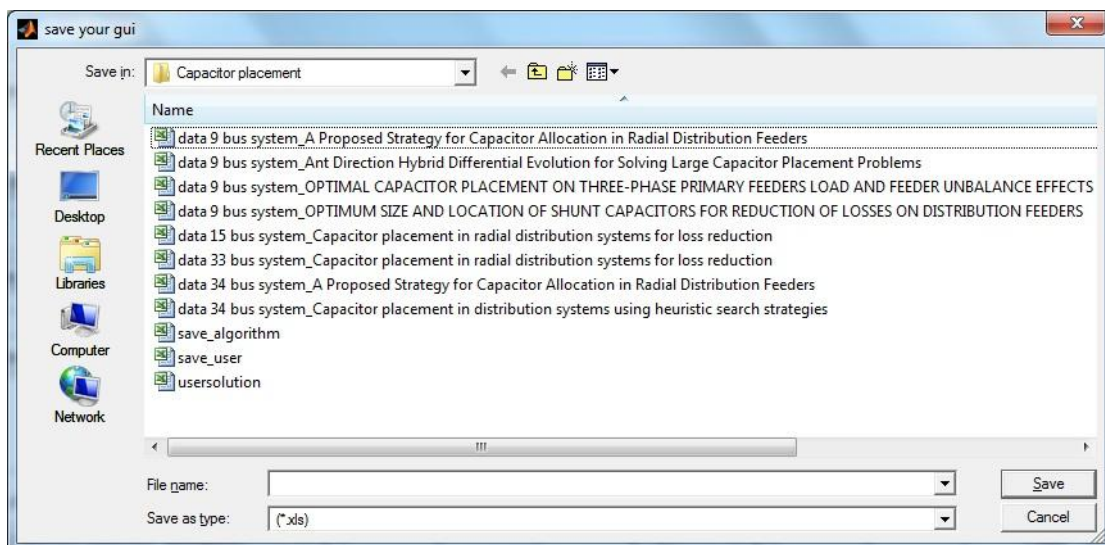
Πατώντας το κουμπί “User solution”, ο χρήστης τότε θα πρέπει να δώσει τις θέσεις στις οποίες θα τοποθετηθούν οι πυκνωτές, όπως και το μέγεθός τους. Για την είσοδο της λύσης του χρήστη ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου, όπως στο Σχήμα 5.8, για να επιλεγεί ένα αρχείο Excel (*.xls). Το αρχείο αυτό, όπως και προηγουμένως, θα πρέπει να έχει τα απαραίτητα δεδομένα με συγκεκριμένη σειρά (format). Θα πρέπει να έχει στη στήλη A του πρώτου φύλλου τους αριθμούς των προς αντιστάθμιση ζυγών (Bus no) και στη στήλη B τα αντίστοιχα μεγέθη των πυκνωτών σε kVAr (Capacitor size kVAr). Μετά την επιλογή του κατάλληλου αρχείου, αντισταθμίζεται το σύστημα, σύμφωνα με τη λύση του χρήστη, και γίνεται όπως και πριν η ανάλυση ροών φορτίου και ο υπολογισμός των απωλειών των γραμμών. Στα αποτελέσματα φαίνονται ακόμα οι επιλογές του χρήστη για αντιστάθμιση και η συνολική ποσοστιαία αντιστάθμιση που επιτεύχθηκε. Για την απεικόνισή τους, σύμφωνα και με το Σχήμα 5.12, χρειάζονται 3 tables, 1 panel και 14 static texts.



Σχήμα 5.12: Εμφάνιση αποτελεσμάτων αντιστάθμισης σύμφωνα με τη λύση του χρήστη.

5.3.5 Αποθήκευση αποτελεσμάτων και έξοδος

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων από το λογισμικό, μέσω της αποθήκευσής τους σε κάποιο εξωτερικό αρχείο Excel. Αναλόγως με το είδος της αντιστάθμισης που πραγματοποίησε ο χρήστης, ενεργοποιείται και το αντίστοιχο κουμπί αποθήκευσης στο panel “Save” (“Algorithm” ή “User”) του γραφικού περιβάλλοντος. Στην περίπτωση που γίνουν και τα δύο είδη αντισταθμίσεων, ενεργοποιούνται και τα δυο κουμπιά αποθήκευσης και τότε ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει την κάθε λύση σε ξεχωριστά αρχεία. Πατώντας σε οποιοδήποτε κουμπί από τα δύο ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 5.13), το οποίο ζητά από το χρήστη να δώσει ένα δικό του όνομα σε κάποιο αρχείο Excel, στο οποίο θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα.



Σχήμα 5.13: Αποθήκευση αποτελεσμάτων σε αρχείο Excel.

Αν ο χρήστης επιλέξει κάποιο αρχείο από όσα ήδη υπάρχουν, τότε θα ρωτηθεί αν θέλει να αντικαταστήσει το υπάρχον αρχείο ή όχι, ενώ αν επιλέξει “Cancel” δεν γίνεται αποθήκευση, αλλά επιστροφή στο παράθυρο της εφαρμογής.

Και στις δυο περιπτώσεις αποθήκευσης, στο πρώτο φύλλο του αρχείου αποθηκεύονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ρών φορτίου και του υπολογισμού των απωλειών των γραμμών, προτού γίνει οποιαδήποτε αντιστάθμιση. Στο δεύτερο φύλλο αποθηκεύονται οι ίδιοι υπολογισμοί, αφού έγινε αντιστάθμιση, είτε με τη μέθοδο του Κεφαλαίου 4, είτε από το χρήστη. Ακόμα, στο δεύτερο φύλλο αποθηκεύονται οι ζυγοί στους οποίους τοποθετήθηκαν πυκνωτές και το μέγεθός τους, όπως και το τελικό ποσοστό αντιστάθμισης του συστήματος. Στην περίπτωση που γίνει η αντιστάθμιση με τη μέθοδο του Κεφαλαίου 4, αποθηκεύεται και το όριο ανοχής της αντιστάθμισης των απωλειών ισχύος που επέλεξε ο χρήστης.

Σημειώνεται ότι κατά την αποθήκευση, για το λόγο ότι διαρκεί κάποιο μικρό χρονικό διάστημα, εμφανίζεται ένα μήνυμα που λέει στο χρήστη να περιμένει, ώστε να μην προχωρήσει σε κάποια άλλη ενέργεια, όπως για παράδειγμα το πάτημα κάποιου κουμπιού και όταν τελειώσει τη διαδικασία της αποθήκευσης που εκτελούσε, τον ενημερώνει να συνεχίσει με ένα δεύτερο μήνυμα.

Τέλος, αφού γίνει και η αποθήκευση των αποτελεσμάτων από το χρήστη, μπορεί να γίνει επανεκκίνηση της εφαρμογής με το κουμπί “Reset” ή ο τερματισμός της εφαρμογής πατώντας το κουμπί “Exit”. Ακόμα και να μην αποθηκεύτηκαν τα αποτελέσματα πάλι είναι δυνατή η επανεκκίνηση ή ο τερματισμός της εφαρμογής. Για τον τερματισμό, ο χρήστης πατάει το κουμπί “Exit” και στο παράθυρο διαλόγου που θα εμφανιστεί (Σχήμα 5.14) πρέπει να επιλέξει “Yes”. Σε αντίθετη περίπτωση που επιλέξει “No” ή “Cancel” τότε απλά γίνεται επιστροφή στο παράθυρο της εφαρμογής.



Σχήμα 5.14: Επιλογή τερματισμού της εφαρμογής.

5.3.6 Ανάλυση m-files και δομή της εφαρμογής

Η εφαρμογή που υλοποιήθηκε αποτελείται από 1 fig-αρχείο και 12 m-files. Στα αρχεία της εφαρμογής δεν αναφέρονται τα αρχεία Excel που είναι τα δεδομένα των συστημάτων, καθώς έγιναν δοκιμές σε αρκετά συστήματα και ο χρήστης μπορεί να προσθέσει όσα επιθυμεί. Οι δοκιμές αυτές και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων τους βρίσκονται στο επόμενο κεφάλαιο. Τα 12 συνολικά m-files που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Περιγραφή m-files της μεθόδου εύρεσης βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών σε ακτινικά δίκτυα διανομής.

A/A	Όνομα αρχείου	Περιγραφή λειτουργίας
1	Capacitor_placement.m	Αρχείο στο οποίο υπάρχει ο κώδικας που ενσωματώθηκε στα στοιχεία ελέγχου, ώστε αυτά να εκτελούν τις επιθυμητές λειτουργίες για την υλοποίηση της εφαρμογής και να είναι λειτουργικό το γραφικό περιβάλλον.
2	Lfybus.m	Υπολογισμός και δημιουργία πίνακα αγωγιμοτήτων, σύμφωνα με τα στοιχεία που εισήγαγε ο χρήστης.
3	Lfnewton.m	Γίνεται ανάλυση ροών φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson.
4	Busout.m	Τυπώνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου στο παράθυρο εντολών (στην περίπτωση που ο χρήστης υλοποιήσει την εφαρμογή από το παράθυρο εντολών και όχι από το γραφικό περιβάλλον).
5	Lineflow.m	Υπολογίζει και τυπώνει στο παράθυρο εντολών τις ροές ισχύος στους ζυγούς και τις απώλειες των γραμμών του συστήματος.
6	Chp6.m	Πραγματοποιεί ανάλυση ροών φορτίου, χρησιμοποιώντας τα m-files αυτού του πίνακα με αύξοντα αριθμό 2-5.
7	CalculateLineLoss.m	Με δεδομένες τις τάσεις των ζυγών, από την ανάλυση ροών φορτίου, υπολογίζει τα ρεύματα και τις απώλειες των γραμμών του συστήματος.
8	ComputeMatrixD.m	Καταστρώνει τον πίνακα D που δείχνει τις διαδρομές προς όλους τους ζυγούς του συστήματος, μέσω των αριθμών των γραμμών.
9	ComputeSaving.m	Είναι το μοναδικό function της εφαρμογής και υπολογίζει τη μείωση των απωλειών ισχύος του συστήματος, μέσω της σχέσης (4.6), και το μέγεθος των πυκνωτών από τη σχέση (4.9), στην περίπτωση τοποθέτησης μεμονωμένων πυκνωτών.
10	ComputeMatrixAandB.m	Υπολογισμός και δημιουργία πινάκων A και B από τις σχέσεις (4.15)-(4.17) για τον υπολογισμό των ρευμάτων των πυκνωτών που προκαλούν μέγιστη μείωση των απωλειών, στην περίπτωση πολλαπλών πυκνωτών.
11	Main.m	Είναι το κυρίως πρόγραμμα, που υλοποιεί τη μέθοδο εύρεσης πλήθους, θέσης και μεγέθους πυκνωτών σε ακτινικά δίκτυα διανομής του Κεφαλαίου 4 και χρησιμοποιεί τα m-files αυτού του πίνακα με αύξοντα αριθμό 2-10.
12	userCompensate.m	Σύμφωνα με τη λύση για αντιστάθμιση που δίνει ο χρήστης, μέσω του αρχείου Excel, μεταβάλλει τα στοιχεία των ζυγών για να γίνει μετά ο υπολογισμός της αντιστάθμισης.

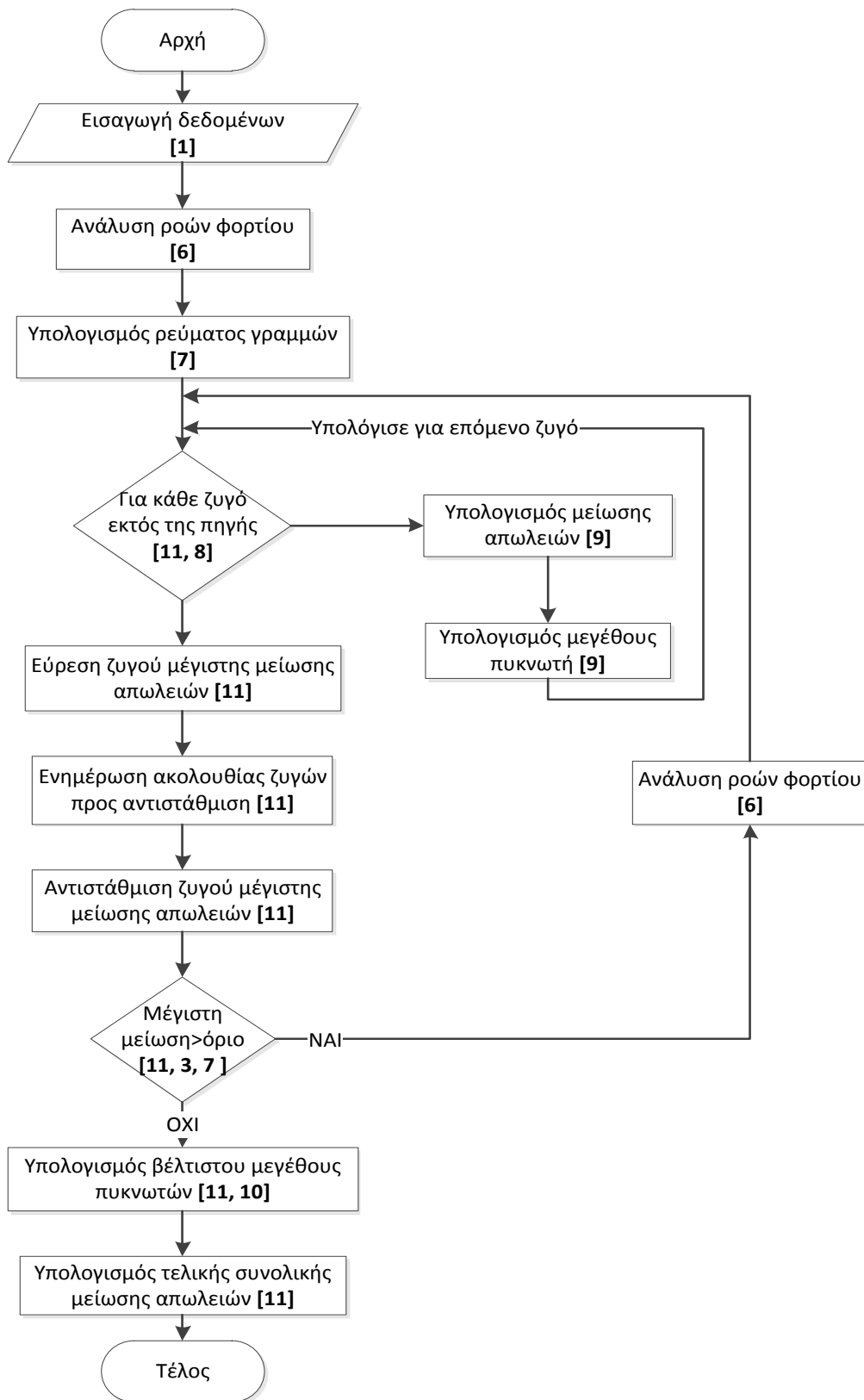
Σημειώνεται ότι στο m-file του Πίνακα 5.2 με αύξοντα αριθμό 8, ο πίνακας D δεν είναι ο πίνακας που αναφέρεται στην Ενότητα 4.2.2. Ο πίνακας της Ενότητας 4.2.2 είναι ο subD που υπολογίζεται στο αρχείο Main.m με αύξοντα αριθμό 12.

Στον Πίνακα 5.3 αναφέρονται τα κουμπιά του γραφικού περιβάλλοντος και ποια m-files καλούνται πατώντας τα, σύμφωνα με τον αύξοντα αριθμό m-files του Πίνακα 5.2. Η σειρά των m-files είναι και η σειρά που καλούνται.

Πίνακας 5.3: M-files που καλούνται από τα κουμπιά του γραφικού περιβάλλοντος.
Παρατήρηση: ο αύξοντας αριθμός (A/A) των m-files είναι αυτός του Πίνακα 5.2.

Κουμπί	A/A m-files που καλούνται
Select data	-
Bus data	-
Line data	-
Power flow (Before compensation)	2, 3
Line flow-losses (Before compensation)	2, 3, 5, 7
Optimal-algorithm solution (Compensate)	11
User solution (Compensate)	6, 12, 2, 3, 5, 7
Algorithm (Save)	2, 3, 5, 7, 11
User (Save)	2, 3, 5, 7, 6, 12, 2, 3, 5, 7
Reset	-
Exit	-

Τέλος, στο Σχήμα 5.15 είναι το διάγραμμα ροής της μεθόδου εύρεσης βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους πυκνωτών, για μείωση των απωλειών ισχύος, σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάστηκε και στο Κεφάλαιο 4. Στο σχήμα αυτό φαίνονται τα m-files με τον αύξοντα αριθμό τους (A/A), στα οποία υλοποιείται η συγκεκριμένη λειτουργία-διαδικασία.



Σχήμα 5.15: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου βέλτιστης τοποθέτησης πυκνωτών με επισυναπτόμενους τους αύξοντες αριθμούς των m-files που υλοποιούν την κάθε λειτουργία. Για παράδειγμα, “Εισαγωγή δεδομένων [1]” σημαίνει εισαγωγή δεδομένων με χρήση του m-file με A/A 1 του Πίνακα 5.2, δηλαδή του Capacitor_placement.m.

5.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] Α. Αρβαντιδης, και Χ. Σαραγιώτης, “Εισαγωγή στο MATLAB,” [Online]. Διαθέσιμο: http://users.auth.gr/~arvanit/Eisagogi_sto_Matlab.pdf, προσπελάστηκε το Μάιο 2011.
- [5.2] Γ. Θεοδώρου, και Ν. Θεοδώρου, “Πρακτικός οδηγός στο MATLAB,” [Online]. Διαθέσιμο: http://users.auth.gr/~theodoru/CompuStat/MATLAB_AUTHH.pdf, προσπελάστηκε το Μάιο 2011.
- [5.3] Δ. Βαρσάμης, "MATLAB - Graphical User Interfaces," [Online]. Διαθέσιμο: http://teiserron.gr/index.php?topic=1531.0;prev_next=prev, προσπελάστηκε το Μάιο 2011.
- [5.4] H. Saadat, *Power system analysis, second edition*, New York: McGraw-Hill, 1999, pp. 223-224, 212-220, 232-240.

ΔΟΚΙΜΕΣ-ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται εφαρμογές του λογισμικού που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5, σε διάφορα ακτινικά δίκτυα. Αρχικά, παρουσιάζεται ένα αναλυτικό αριθμητικό παράδειγμα, δείχνοντας το κάθε βήμα της μεθόδου και τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Έπειτα η μέθοδος του Κεφαλαίου 4, που χρησιμοποιείται στο λογισμικό του Κεφαλαίου 5, συγκρίνεται με άλλες μεθόδους βέλτιστης τοποθέτησης πυκνωτών, οι οποίες περιγράφηκαν στην Ενότητα 2.3.

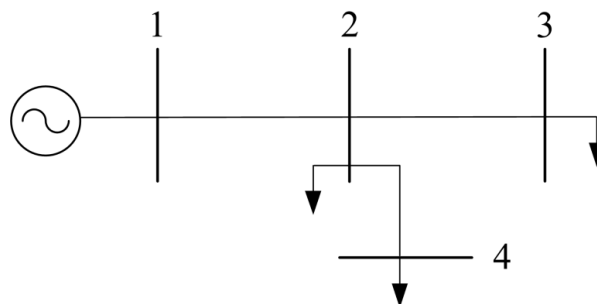
Σημειώνεται ότι για όλα τα συστήματα που θα αναλυθούν, η βασική ισχύς είναι $S_{base} = 100 \text{ kVA}$, ενώ η βασική τάση V_{base} θα αναφέρεται στην κάθε περίπτωση.

6.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

6.2.1 Δεδομένα συστήματος

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί αναλυτικά ένα αριθμητικό παράδειγμα επίλυσης του προβλήματος εύρεσης βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών, για τη μείωση των απωλειών ισχύος, σε ένα μικρό ακτινικό δίκτυο, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 και υλοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 5.

Το δίκτυο του παραδείγματος αποτελείται από 4 ζυγούς και 3 γραμμές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Ο ζυγός 1 είναι ο ζυγός ταλάντωσης και η τάση του είναι ίση με $1\angle 0^\circ \text{ p.u.}$ (βασική τάση 11kV παντού), ενώ οι υπόλοιποι ζυγοί είναι ζυγοί φορτίου (PQ). Τα δεδομένα του συστήματος βρίσκονται στο Παράρτημα Α, στους Πίνακες Α.1.1 και Α.1.2.



Σχήμα 6.1: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 4 ζυγών.

6.2.2 Επίλυση προβλήματος ροών φορτίου

Σύμφωνα με τα στοιχεία των γραμμών, ο πίνακας αγωγιμοτήτων (p.u.) του συστήματος είναι:

$$Y = \begin{bmatrix} 457,01 - j447,02 & -457,01 + j447,02 & 000,00 + j000,00 & 000,00 + j000,00 \\ -457,01 + j447,02 & 1310,64 - j1183,23 & -528,42 + j516,86 & -325,21 + j219,35 \\ 000,00 + j000,00 & -528,42 + j516,86 & 528,42 - j516,86 & 000,00 + j000,00 \\ 000,00 + j000,00 & -325,21 + j219,35 & 000,00 + j000,00 & 325,21 - j219,35 \end{bmatrix}$$

Για την επίλυση του προβλήματος αντιστάθμισης, είναι αναγκαία η επίλυση του προβλήματος ροών φορτίου. Οι εξισώσεις ροών φορτίου προκύπτουν σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στην Ενότητα 3.2:

- Ζυγός 2

$$P_{G2} - P_{D2} = V_2^2 \cdot G_{22} - V_2 \cdot (V_1 \cdot \alpha_{21} + V_3 \cdot \alpha_{23} + V_4 \cdot \alpha_{24}) \quad (6.1)$$

$$Q_{G2} - Q_{D2} = -V_2^2 \cdot B_{22} - V_2 \cdot (V_1 \cdot \beta_{21} + V_3 \cdot \beta_{23} + V_4 \cdot \beta_{24}) \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{21} &= -G_{21} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) - B_{21} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1) \\ &= 457,01 \cdot \cos(\delta_2) - 447,02 \cdot \sin(\delta_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{23} &= -G_{23} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_3) - B_{23} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_3) \\ &= 528,42 \cdot \cos(\delta_2 - \delta_3) - 516,86 \cdot \sin(\delta_2 - \delta_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{24} &= -G_{24} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_4) - B_{24} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_4) \\ &= 325,21 \cdot \cos(\delta_2 - \delta_4) - 219,35 \cdot \sin(\delta_2 - \delta_4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_{21} &= -G_{21} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1) + B_{21} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) \\ &= 457,01 \cdot \sin(\delta_2) + 447,02 \cdot \cos(\delta_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_{23} &= -G_{23} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_3) + B_{23} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_3) \\ &= 528,42 \cdot \sin(\delta_2 - \delta_3) + 516,86 \cdot \cos(\delta_2 - \delta_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_{24} &= -G_{24} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_4) + B_{24} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_4) \\ &= 325,21 \cdot \sin(\delta_2 - \delta_4) + 219,35 \cdot \cos(\delta_2 - \delta_4) \end{aligned}$$

Επομένως, οι δύο εξισώσεις ροής φορτίου για το ζυγό 2 είναι:

$$\begin{aligned} (6.1) \Rightarrow -0,441 &= 1310,64 \cdot V_2^2 - \\ &V_2 \cdot [457,01 \cdot \cos(\delta_2) - 447,02 \cdot \sin(\delta_2)] + \\ &V_2 \cdot V_3 \cdot [528,42 \cdot \cos(\delta_2 - \delta_3) - 516,86 \cdot \sin(\delta_2 - \delta_3)] + \\ &V_2 \cdot V_4 \cdot [325,21 \cdot \cos(\delta_2 - \delta_4) - 219,35 \cdot \sin(\delta_2 - \delta_4)] \end{aligned} \quad (6.3)$$

$$(6.2) \Rightarrow -0,4499 = 1183,23 \cdot V_2^2 - V_2 \cdot [457,01 \cdot \sin(\delta_2) + 447,02 \cdot \cos(\delta_2)] + V_2 \cdot V_3 \cdot [528,42 \cdot \sin(\delta_2 - \delta_3) + 516,86 \cdot \cos(\delta_2 - \delta_3)] + V_2 \cdot V_4 \cdot [325,21 \cdot \sin(\delta_2 - \delta_4) + 219,35 \cdot \cos(\delta_2 - \delta_4)] \quad (6.4)$$

- Ζυγός 3

$$P_{G3} - P_{D3} = V_3^2 \cdot G_{33} - V_3 \cdot (V_2 \cdot \alpha_{32}) \quad (6.5)$$

$$Q_{G3} - Q_{D3} = -V_3^2 \cdot B_{33} - V_3 \cdot (V_2 \cdot \beta_{32}) \quad (6.6)$$

$$(6.5) \Rightarrow -0,7 = 528,42 \cdot V_3^2 - V_3 \cdot V_2 \cdot [528,42 \cdot \cos(\delta_3 - \delta_2) - 516,86 \cdot \sin(\delta_3 - \delta_2)] \quad (6.7)$$

$$(6.6) \Rightarrow -0,7141 = 516,86 \cdot V_3^2 - V_3 \cdot V_2 \cdot [528,42 \cdot \sin(\delta_3 - \delta_2) + 516,86 \cdot \cos(\delta_3 - \delta_2)] \quad (6.8)$$

- Ζυγός 4

$$P_{G4} - P_{D4} = V_4^2 \cdot G_{44} - V_4 \cdot (V_2 \cdot \alpha_{42}) \quad (6.9)$$

$$Q_{G4} - Q_{D4} = -V_4^2 \cdot B_{44} - V_4 \cdot (V_2 \cdot \beta_{42}) \quad (6.10)$$

$$(6.9) \Rightarrow -1,4 = 325,21 \cdot V_4^2 - V_4 \cdot V_2 \cdot [325,21 \cdot \cos(\delta_4 - \delta_2) - 219,35 \cdot \sin(\delta_4 - \delta_2)] \quad (6.11)$$

$$(6.10) \Rightarrow -1,4283 = 219,35 \cdot V_4^2 - V_4 \cdot V_2 \cdot [325,21 \cdot \sin(\delta_4 - \delta_2) + 219,35 \cdot \cos(\delta_4 - \delta_2)] \quad (6.12)$$

Αφού το σύστημα αποτελείται από 3 ζυγούς φορτίου, το διάνυσμα κατάστασης \mathbf{x} αποτελείται από τις ακόλουθες 6 μεταβλητές:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad \text{όπου} \quad \delta = [\delta_2, \delta_3, \delta_4]^T \quad \mathbf{V} = [V_2, V_3, V_4]^T$$

Για τη λύση του προβλήματος ροών φορτίου με 6 αγνώστους, χρειάζονται 6 εξισώσεις, οι οποίες είναι οι εξισώσεις (6.3), (6.4), (6.7), (6.8), (6.11) και (6.12).

Στην υλοποίηση της εφαρμογής, για την επίλυση του προβλήματος ροών φορτίου, χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson, όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 3.3.1 και τα αποτελέσματά της φαίνονται στους Πίνακες 6.1 και 6.2.

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου του αναλυτικού παραδείγματος, όσον αφορά τους ζυγούς, πριν την αντιστάθμιση.

Αποτελέσματα ροών φορτίου							
Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (kW)	Φορτίο (kVAr)	Παραγωγή (kW)	Παραγωγή (kVAr)	Έγχυση (kVAr)
1	1	0	0	0	256,5618	261,3796	0
2	0,9943	0,0067	44,1	44,991	0	0	0
3	0,9929	0,0084	70	71,4143	0	0	0
4	0,9892	0,0663	140	142,8286	0	0	0
Σύνολο:			254,1	259,2339	256,5618	261,3796	0

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου του αναλυτικού παραδείγματος, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, πριν την αντιστάθμιση.

Ροές γραμμών και απώλειες							
Από ζυγό	Προς ζυγό	Ροή ισχύος (kW)	Ροή ισχύος (kVAr)	Ροή ισχύος (kVA)	Απώλειες (kW)	Απώλειες (kVAr)	Λήψη Μ/Σ
1	-	256,5618	261,3796	366,2557	-	-	-
1	2	256,5621	261,3798	366,256	1,5001	1,4673	-
2	-	-44,1	-44,991	63	-	-	-
2	1	-255,062	-259,913	364,1581	1,5001	1,4673	-
2	3	70,0981	71,51024	100,1372	0,0981	0,096	-
2	4	140,8639	143,4113	201,021	0,8639	0,5827	-
3	-	-70	-71,4143	100	-	-	-
3	2	-70	-71,4143	100	0,0981	0,096	-
4	-	-140	-142,829	200	-	-	-
4	2	-140	-142,829	200	0,8639	0,5827	-
Σύνολο:					2,4621	2,1459	

6.2.3 Καθορισμός βέλτιστων θέσεων με τοποθέτηση μεμονωμένων πυκνωτών

6.2.3.1 Υπολογισμός πρώτης βέλτιστης θέσης

Υπολογίζονται τα ρεύματα σε όλους τους κλάδους του συστήματος, με εφαρμογή του νόμου τάσεων του Kirchhoff, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των τάσεων του Πίνακα 6.1 και τα δεδομένα των γραμμών από τον Πίνακα Α.1.1. Για παράδειγμα, το ρεύμα στον κλάδο 1 είναι:

$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{R_{12} + jX_{12}} = \frac{1\angle 0^\circ - 0,9943\angle 0,0067^\circ}{\frac{1,3531 + j1,3235}{11^2/0,1}} = 2,5553 - j2,5987 \text{ p.u.} = I_{a1} + jI_{r1}$$

Όμοια προκύπτουν οι τιμές των ρευμάτων και στους υπόλοιπους κλάδους, οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Τιμές ρευμάτων στους 3 κλάδους του δικτύου του αναλυτικού παραδείγματος.

Κλάδος	Από ζυγό	Προς ζυγό	I (p.u.)
1	1	2	2,5553-j2,5987
2	2	3	0,7246-j0,7391
3	2	4	1,4332-j1,4533

Μετά τον υπολογισμό των τιμών των ρευμάτων στους κλάδους, μπορεί να γίνει ο χωρισμός των ενεργών απωλειών που υπολογίστηκαν (2,4641 kW) από την ανάλυση ροών φορτίου, σε αυτές που οφείλονται στην ενεργό συνιστώσα του ρεύματος (P_{La}) από τη σχέση (4.2) και σε αυτές που οφείλονται στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος (P_{Lr}) από τη σχέση (4.3) ως ακολούθως:

$$\begin{aligned}
 (4.2) \Rightarrow P_{La} &= \sum_{i=1}^n I_{ai}^2 \cdot R_i = I_{a1}^2 \cdot R_1 + I_{a2}^2 \cdot R_2 + I_{a3}^2 \cdot R_3 \\
 &= 2,5553^2 \cdot \frac{1,3531}{11^2/0,1} + 0,7246^2 \cdot \frac{1,1702}{11^2/0,1} + 1,4332^2 \cdot \frac{2,5573}{11^2/0,1} \\
 &= 0,0121507 \text{ p.u.} = 1215,07 \text{ W} = 1,21507 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (4.3) \Rightarrow P_{Lr} &= \sum_{i=1}^n I_{ri}^2 \cdot R_i = I_{r1}^2 \cdot R_1 + I_{r2}^2 \cdot R_2 + I_{r3}^2 \cdot R_3 \\
 &= (-2,5987)^2 \cdot \frac{1,3531}{11^2/0,1} + (-0,7391)^2 \cdot \frac{1,1702}{11^2/0,1} + (-1,4533)^2 \cdot \frac{2,5573}{11^2/0,1} \\
 &= 0,012544 \text{ p.u.} = 1254,4 \text{ W} = 1,2544 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Σημειώνεται ότι το άθροισμα των ενεργών απωλειών του συστήματος που οφείλονται στην ενεργό συνιστώσα του ρεύματος (1215,07 W) και στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος (1254,4 W) δεν είναι ακριβώς ίσο με τις συνολικές ενεργές απώλειες του συστήματος (2464,1 W) που υπολογίστηκαν από την ανάλυση ροών φορτίου (Πίνακας 6.2), ενώ θα έπρεπε να είναι. Ο λόγος είναι ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου (Πίνακες 6.1 και 6.2) προέρχονται από το λογισμικό που αναπτύχθηκε, ενώ τα P_{La} , P_{Lr} για λόγους επεξήγησης της μεθόδου υπολογίστηκαν με μικρότερη ακρίβεια μέσω υπολογιστή τσέπης.

Για τον υπολογισμό των βέλτιστων θέσεων τοποθέτησης πυκνωτών υπολογίζεται από τη σχέση (4.6) για όλους τους ζυγούς του συστήματος, εκτός της πηγής (ζυγός 1), η μείωση των απωλειών (S_i) που επιτυγχάνεται στο σύστημα με τη τοποθέτηση πυκνωτών μεγέθους Q_{Ci} στο ζυγό i . Τα μεγέθη των πυκνωτών Q_{Ci} υπολογίζονται από τη σχέση (4.9), αφού πρώτα προσδιοριστεί από τη σχέση (4.8) η τιμή ρεύματος του πυκνωτή που θα τοποθετηθεί στο ζυγό i (I_{Ci}), η οποία προκαλεί τη μέγιστη μείωση απωλειών (S_i).

Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των τάσεων από τον Πίνακα 6.1, τις τιμές των ρευμάτων από τον Πίνακα 6.3 και τις τιμές των ωμικών αντιστάσεων των γραμμών του Πίνακα Α.1.1, για το ζυγό 2 υπολογίζεται:

$$(4.8) \Rightarrow I_{C2} = -\frac{\sum_{i=1}^n D_{i2} \cdot I_{ri} \cdot R_i}{\sum_{i=1}^n D_{i2} \cdot R_i} = -\frac{I_{r1} \cdot R_1}{R_1} = -I_{r1} = 2,5987 \text{ p.u.}$$

$$(4.6) \Rightarrow S_2 = -\sum_{i=1}^n (2 \cdot D_{i2} \cdot I_{ri} \cdot I_{C2} + D_i \cdot I_C^2) \cdot R_i = -[2 \cdot I_{r1} \cdot I_{C2} + I_{C2}^2] \cdot R_1$$

$$= -[2 \cdot (-2,5987) \cdot 2,5987 + (2,5987)^2] \cdot \frac{1,3531}{11^2/0,1}$$

$$= 7,5631 \times 10^{-3} \text{ p.u.} = 756,31 \text{ W}$$

$$(4.9) \Rightarrow Q_{C2} = V_2 \cdot I_{C2} = 0,9943 \cdot 2,5987 = 2,5839 \text{ p.u.} = 258,39 \text{ kVAr}$$

Οι τιμές που προκύπτουν, στην περίπτωση του αναλυτικού παραδείγματος, είναι μείωση απωλειών $S_2 = 756,31 \text{ W}$ με μέγεθος πυκνωτών $Q_{C2} = 258,39 \text{ kVAr}$ στο ζυγό 2, μείωση απωλειών $S_3 = 627,83 \text{ W}$ με $Q_{C3} = 172,28 \text{ kVAr}$ στο ζυγό 3 και μείωση απωλειών $S_4 = 1103,19 \text{ W}$ με $Q_{C4} = 182,77 \text{ kVAr}$ στο ζυγό 4. Από τις τιμές μείωσης απωλειών που βρέθηκαν, επιλέγεται η μεγαλύτερη και ακολούθως αντισταθμίζεται ο ζυγός με τη μέγιστη μείωση απωλειών, εισάγοντας στα δεδομένα του συστήματος στη στήλη Έγχυση kVAr το μέγεθος του πυκνωτή που βρέθηκε. Επομένως, επιλέγεται σαν πρώτη βέλτιστη θέση τοποθέτησης ο ζυγός 4, στον οποίο τοποθετούνται πυκνωτές μεγέθους $182,77 \text{ kVAr}$.

Στο σημείο αυτό, γίνεται έλεγχος αν η αντιστάθμιση που επιτεύχθηκε είναι μεγαλύτερη ή όχι από ένα προκαθορισμένο όριο. Αν είναι μεγαλύτερη, τότε συνεχίζεται το πρώτο μέρος της εφαρμογής, ενώ στην περίπτωση που δεν είναι, τότε τερματίζεται το πρώτο μέρος και η μέθοδος συνεχίζει στο δεύτερο μέρος. Το όριο που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι 2% των αρχικών απωλειών ισχύος του συστήματος που υπολογίστηκαν και οφείλονται στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος, δηλαδή το όριο είναι:

$$\text{Saving tolerance} = 0,02 \cdot 1254,4 = 25,09 \text{ W}$$

Αφού η επιτευχθείσα μείωση απωλειών είναι μεγαλύτερη από το όριο, δηλαδή αφού $S_4 = 1103,19 \text{ W} > \text{Saving tolerance}$, συνεχίζεται η εύρεση θέσεων τοποθέτησης πυκνωτών.

6.2.3.2 Υπολογισμός δεύτερης βέλτιστης θέσης

Επαναλαμβάνεται η ανάλυση ροών φορτίου, λαμβάνοντας υπόψη την τοποθέτηση πυκνωτή $182,77 \text{ kVAr}$ στο ζυγό 4. Λόγω του ότι στους ζυγούς 2 και 3 δεν άλλαξε κάτι, δεν θα μεταβληθούν οι εξισώσεις ροών φορτίου τους. Επίσης η σχέση (6.11) δεν θα μεταβληθεί, αφού η έγχυση ενεργού ισχύος στο ζυγό 4 είναι η ίδια, ενώ η (6.12) θα μεταβληθεί λόγω της προσθήκης παραγόμενης αέργου ισχύος $182,77 \text{ kVAr}$. Κατά συνέπεια, το ισοζύγιο αέργου ισχύος στο ζυγό 4 είναι το ακόλουθο:

$$1,8277 - 1,4283 = 219,35 \cdot V_4^2 - V_4 \cdot V_2 \cdot [325,21 \cdot \sin(\delta_4 - \delta_2) + 219,35 \cdot \cos(\delta_4 - \delta_2)] \quad (6.13)$$

Έτσι το πρόβλημα ροών φορτίου αποτελείται από τις εξισώσεις (6.3), (6.4), (6.7), (6.8), (6.11) και (6.13). Η λύση του προβλήματος ροών φορτίου φαίνεται στους Πίνακες 6.4 και 6.5.

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου του αναλυτικού παραδείγματος, όσον αφορά τους ζυγούς, μετά την αντιστάθμιση του ζυγού 4.

Αποτελέσματα ροών φορτίου							
Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (kW)	Φορτίο (kVAr)	Παραγωγή (kW)	Παραγωγή (kVAr)	Έγχυση (kVAr)
1	1	0	0	0	255,4482	77,6449	0
2	0,9963	-0,1108	44,1	44,991	0	0	0
3	0,9949	-0,1091	70	71,41428	0	0	0
4	0,9939	-0,2751	140	142,8286	0	0	182,77
Σύνολο:			254,1	259,2339	255,4482	77,6449	182,77

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου του αναλυτικού παραδείγματος, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, μετά την αντιστάθμιση του ζυγού 4.

Ροές γραμμών και απώλειες							
Από ζυγό	Προς ζυγό	Ροή ισχύος (kW)	Ροή ισχύος (kVAr)	Ροή ισχύος (kVA)	Απώλειες (kW)	Απώλειες (kVAr)	Λήψη M/Σ
1	-	255,4482	77,6449	266,9879	-	-	-
1	2	255,4483	77,645	266,988	0,7971	0,7797	-
2	-	-44,1	-44,991	63	-	-	-
2	1	-254,651	-76,8653	265,9991	0,7971	0,7797	-
2	3	70,0977	71,5099	100,1366	0,0977	0,0956	-
2	4	140,4535	-39,6356	145,9389	0,4535	0,3059	-
3	-	-70	-71,4143	100	-	-	-
3	2	-70	-71,4143	100	0,0977	0,0956	-
4	-	-140	39,9414	145,5861	-	-	-
4	2	-140	39,9414	145,5861	0,4535	0,3059	-
Σύνολο:					1,3483	1,1811	

Οι τιμές που προκύπτουν για την εύρεση του επόμενου ζυγού προς αντιστάθμιση, όσον αφορά τη μείωση των απωλειών, είναι 67,42 W με μέγεθος πυκνωτών 77,36 kVAr στο ζυγό 2, μείωση 117,26 W με 74,61 kVAr στο ζυγό 3 και μείωση 0,0342 W με 1,02 kVAr στο ζυγό 4. Επομένως, ως δεύτερος προς αντιστάθμιση ζυγός επιλέγεται ο ζυγός 3, με πυκνωτές αντιστάθμισης 74,61 kVAr για να επιτευχθεί μείωση απωλειών 117,26 W. Πάλι η μείωση απωλειών είναι μεγαλύτερη από το προκαθορισμένο ελάχιστο όριο των 25,09 W, οπότε συνεχίζεται η εύρεση της επόμενης βέλτιστης θέσης.

6.2.3.3 Υπολογισμός τρίτης βέλτιστης θέσης

Αφού τοποθετηθούν 74,61 kVAr στο ζυγό 3, η επόμενη ανάλυση ροών φορτίου αποτελείται από τις εξισώσεις (6.3), (6.4), (6.7), (6.11), (6.13) και την εξίσωση (6.14) που αποτελεί το ισοζύγιο αέργου ισχύος στο ζυγό 3:

$$0,7461 - 0,7141 = 516,86 \cdot V_3^2 - V_3 \cdot V_2 \cdot [528,42 \cdot \sin(\delta_3 - \delta_2) + 516,86 \cdot \cos(\delta_3 - \delta_2)] \quad (6.14)$$

Η λύση του προβλήματος ροών φορτίου φαίνεται στους Πίνακες 6.6 και 6.7.

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου του αναλυτικού παραδείγματος, όσον αφορά τους ζυγούς, μετά την αντιστάθμιση και του ζυγού 3.

Αποτελέσματα ροών φορτίου							
Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (kW)	Φορτίο (kVAr)	Παραγωγή (kW)	Παραγωγή (kVAr)	Έγχυση (kVAr)
1	1	0	0	0	255,3296	2,9191	0
2	0,9971	-0,1586	44,1	44,991	0	0	0
3	0,9965	-0,1986	70	71,4143	0	0	74,61
4	0,9947	-0,3227	140	142,8286	0	0	182,77
Σύνολο:			254,1	259,2339	255,3296	2,9191	257,38

Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου του αναλυτικού παραδείγματος, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, μετά την αντιστάθμιση και του ζυγού 3.

Ροές γραμμών και απώλειες							
Από ζυγό	Προς ζυγό	Ροή ισχύος (kW)	Ροή ισχύος (kVAr)	Ροή ισχύος (kVA)	Απώλειες (kW)	Απώλειες (kVAr)	Λήψη Μ/Σ
1	-	255,3296	2,9191	255,3463	-	-	-
1	2	255,3297	2,9192	255,3464	0,7291	0,7132	-
2	-	-44,1	-44,991	63	-	-	-
2	1	-254,601	-2,206	254,6101	0,7291	0,7132	-
2	3	70,0478	-3,1489	70,1186	0,0478	0,0468	-
2	4	140,4527	-39,6361	145,9383	0,4527	0,3054	-
3	-	-70	3,1957	70,0729	-	-	-
3	2	-70	3,1957	70,0729	0,0478	0,0468	-
4	-	-140	39,9414	145,5861	-	-	-
4	2	-140	39,9414	145,5861	0,4527	0,3054	-
Σύνολο:					1,2297	1,0653	

Στην τρίτη επανάληψη η μέγιστη μείωση απωλειών υπολογίζεται 19,76 W με πυκνωτές -24.6 kVA_r στο ζυγό 4. Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι πρέπει να αφαιρεθούν 24.6 kVA_r από αυτά που τοποθετήθηκαν στην πρώτη επανάληψη στο ζυγό 4. Επομένως, η νέα τιμή του μεγέθους των πυκνωτών του ζυγού 4 είναι $182,77 - 24,6 = 158,17$ kVA_r. Σε αυτή την επανάληψη η μείωση απωλειών (19,76 W) είναι μικρότερη από το όριο (25,09 W) και έτσι τερματίζεται το πρώτο μέρος της μεθόδου και συνεχίζει το δεύτερο.

Τονίζεται ότι το πρώτο μέρος της μεθόδου ήταν για να βρεθεί η ακολουθία των προς αντιστάθμιση ζυγών και οι βέλτιστες τιμές των πυκνωτών δεν είναι αυτές που υπολογίστηκαν. Ο υπολογισμός του βέλτιστου μεγέθους των πυκνωτών γίνεται στο δεύτερο μέρος, μέσω τοποθέτησης πολλαπλών πυκνωτών.

6.2.3 Καθορισμός βέλτιστου μεγέθους πυκνωτών με τοποθέτηση πολλαπλών πυκνωτών

Μετά τον προσδιορισμό της ακολουθίας των προς αντιστάθμιση ζυγών, συνεχίζει το δεύτερο μέρος της μεθόδου, σύμφωνα με τις Ενότητες 4.2 και 4.3. Σε πρώτο στάδιο υπολογίζονται οι πίνακες A και B από τις σχέσεις (4.15), (4.16) και (4.17), χρησιμοποιώντας τις τιμές των αέργων συνιστωσών των ρευμάτων στις γραμμές του αρχικού συστήματος (Πίνακας 6.3) και τις τιμές των ωμικών αντιστάσεων των γραμμών από τον Πίνακα Α.1.1.

$$(4.15) \Rightarrow A_{11} = \sum_{i \in a_1} R_i = R_1 + R_2 = \frac{1,3531}{11^2/0,1} + \frac{1,1702}{11^2/0,1} = 0,0021 \text{ p.u.}$$

$$(4.15) \Rightarrow A_{22} = \sum_{i \in a_2} R_i = R_1 + R_3 = \frac{1,3531}{11^2/0,1} + \frac{2,5573}{11^2/0,1} = 0,0032 \text{ p.u.}$$

$$(4.16) \Rightarrow A_{12} = A_{21} = \sum_{i \in (a_1 \cap a_2)} R_i = R_1 = \frac{1,3531}{11^2/0,1} = 0,0011 \text{ p.u.}$$

$$(4.17) \Rightarrow B_1 = \sum_{i \in a_1} I_{ri} \cdot R_i = I_{r1} \cdot R_1 + I_{r2} \cdot R_2 \\ = -2,5987 \cdot \frac{1,3531}{11^2/0,1} - 0,7391 \cdot \frac{1,1702}{11^2/0,1} = -0,0036 \text{ p.u.}$$

$$(4.17) \Rightarrow B_2 = \sum_{i \in a_2} I_{ri} \cdot R_i = I_{r1} \cdot R_1 + I_{r3} \cdot R_3 \\ = -2,5987 \cdot \frac{1,3531}{11^2/0,1} - 1,4533 \cdot \frac{2,5573}{11^2/0,1} = -0,006 \text{ p.u.}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0,0021 & 0,0011 \\ 0,0011 & 0,0032 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -0,0036 \\ -0,006 \end{bmatrix}$$

Τα ζητούμενα μεγέθη των πυκνωτών, που επιτυγχάνουν μέγιστη μείωση των απωλειών ισχύος, λόγω της αέργου συνιστώσας του ρεύματος, δίνονται από τη σχέση (4.19), αφού πρώτα υπολογιστούν οι τιμές των ρευμάτων των πυκνωτών που προκαλούν μέγιστη μείωση των απωλειών από τη σχέση (4.18):

$$(4.18) \Rightarrow [I_c] = [A]^{-1} \cdot [B] = \begin{bmatrix} 0,0021 & 0,0011 \\ 0,0011 & 0,0032 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -0,0036 \\ -0,006 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,9140 \text{ p.u.} \\ -1,5314 \text{ p.u.} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \end{bmatrix}$$

$$(4.19) \Rightarrow Q_{C3} = V_3 \cdot |I_{C1}| = 0,9929 \cdot 0,9140 = 0,9075 \text{ p.u} = 90,75 \text{ kVAr}$$

$$(4.19) \Rightarrow Q_{C4} = V_4 \cdot |I_{C2}| = 0,9892 \cdot 1,5314 = 1,5149 \text{ p.u} = 151,49 \text{ kVAr}$$

όπου χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των τάσεων που υπολογίστηκαν από τη ροή φορτίου στο αρχικό σύστημα (Πίνακας 6.1).

Επομένως, το βέλτιστο μέγεθος των πυκνωτών είναι 90,75 kVAr για το ζυγό 3 και 151,49 kVAr για το ζυγό 4.

Όσον αφορά τη μείωση των ενεργών απωλειών του συστήματος, που οφείλονται στην αέργο συνιστώσα του ρεύματος, υπολογίζεται με βάση τα ρεύματα I_{C1} , I_{C2} και τα ρεύματα των κλάδων του αρχικού συστήματος (Πίνακας 6.3) από τη σχέση (4.12):

$$\begin{aligned} (4.12) \Rightarrow S &= -\sum_{i=1}^n \left[2 \cdot I_{ri} \cdot \sum_{j=1}^k D_{ij} \cdot |I_{Cj}| + \left(\sum_{j=1}^k D_{ij} \cdot |I_{Cj}| \right)^2 \right] \cdot R_i \\ &= -[2 \cdot (-2,5987) \cdot (0,9140 + 1,5314) + (0,9140 + 1,5314)^2] \cdot \frac{1,3531}{11^2/0,1} \\ &\quad - [2 \cdot (-0,7391) \cdot 0,9140 + 0,9140^2] \cdot \frac{1,1702}{11^2/0,1} \\ &\quad - [2 \cdot (-1,4533) \cdot 1,5314 + 1,5314^2] \cdot \frac{2,5573}{11^2/0,1} \\ &= 0,0125 \text{ p.u.} = 1,25 \text{ kW} \end{aligned}$$

Η μείωση των ενεργών απωλειών του συστήματος, λόγω της αέργου συνιστώσας του ρεύματος, επομένως είναι 1,25 kW.

Για λόγους σύγκρισης, στους Πίνακες 6.8 και 6.9 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου μετά την αντιστάθμιση των ζυγών 3 και 4 με τα βέλτιστα μεγέθη πυκνωτών που υπολογίστηκαν.

Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου του αναλυτικού παραδείγματος, όσον αφορά τους ζυγούς, μετά τη βέλτιστη αντιστάθμιση του δικτύου.

Αποτελέσματα ροών φορτίου							
Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (kW)	Φορτίο (kVAr)	Παραγωγή (kW)	Παραγωγή (kVAr)	Έγχυση (kVAr)
1	1	0	0	0	255,2805	18,032	0
2	0,997	-0,1489	44,1	44,991	0	0	0
3	0,9965	-0,1979	70	71,4143	0	0	90,75
4	0,9941	-0,2748	140	142,8286	0	0	151,49
Σύνολο:			254,1	259,2339	255,2805	18,032	242,24

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου του αναλυτικού παραδείγματος, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, μετά τη βέλτιστη αντιστάθμιση του δικτύου.

Ροές γραμμών και απώλειες							
Από ζυγό	Προς ζυγό	Ροή ισχύος (kW)	Ροή ισχύος (kVAr)	Ροή ισχύος (kVA)	Απώλειες (kW)	Απώλειες (kVAr)	Λήψη Μ/Σ
1	-	255,2805	18,032	255,9165	-	-	-
1	2	255,3047	18,0519	255,9421	0,7325	0,7165	-
2	-	-44,1	-44,991	63	-	-	-
2	1	-254,572	-17,3354	255,1617	0,7325	0,7165	-
2	3	70,0514	-19,2827	72,6569	0,051368	0,0502	-
2	4	140,4208	-8,3729	140,6702	0,420773	0,2838	-
3	-	-70	19,334	72,6207	-	-	-
3	2	-70	19,333	72,6207	0,0514	0,0503	-
4	-	-140	8,6567	140,2674	-	-	-
4	2	-140	8,6567	140,2674	0,4208	0,2838	-
Σύνολο :					1,2047	1,0506	

Για τον υπολογισμό των δύο συνιστωσών των ενεργών απωλειών του συστήματος, αρχικά υπολογίζονται τα ρεύματα σε όλους τους κλάδους, μετά τη βέλτιστη αντιστάθμιση των ζυγών 3 και 4, με νόμο τάσεων Kirchhoff, όπως έγινε και προηγουμένως. Τα αποτελέσματα των ρευμάτων φαίνονται στον Πίνακα 6.10.

Πίνακας 6.10: Τιμές ρευμάτων στους 3 κλάδους του δικτύου του αναλυτικού παραδείγματος μετά τη βέλτιστη αντιστάθμιση του συστήματος.

Κλάδος	Από ζυγό	Προς ζυγό	I (p.u.)
1	1	2	2,553-j0,1805
2	2	3	0,7032+j0,1916
3	2	4	1,4087+j0,0803

Από τις σχέσεις (4.2) και (4.3), όπως έγινε και κατά τον υπολογισμό της πρώτης βέλτιστης θέσης, αλλά με τις τιμές των ρευμάτων του Πίνακα 6.10 αυτή τη φορά, καθορίζονται οι τιμές των ενεργών απωλειών που οφείλονται στην ενεργό συνιστώσα του ρεύματος, που είναι 1196,11 W, και οι απώλειες που οφείλονται στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος, που είναι 8,56 W.

Συγκρίνοντας τους Πίνακες 6.1 και 6.8, φαίνεται ότι οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος βελτιώθηκαν και είναι πιο κοντά στην ονομαστική τους τιμή, μετά την αντιστάθμιση του συστήματος. Ακόμα, η παραγωγή αέργου ισχύος από το σύστημα είναι μικρότερη (από 261,3796 kVAr μειώθηκε στα 18,032 kVAr) και ο λόγος είναι ότι με την

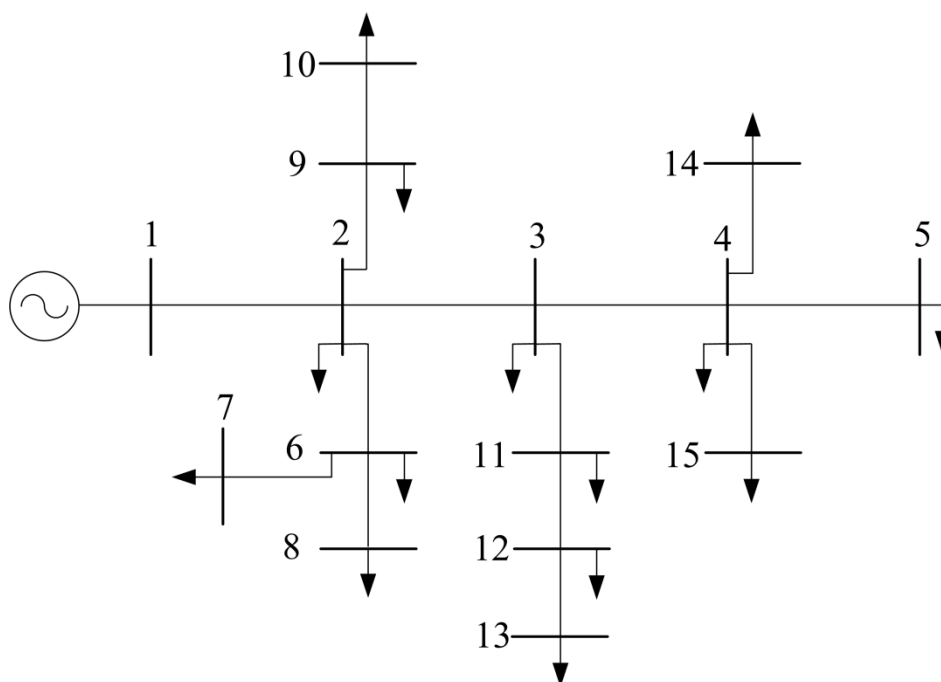
προσθήκη των εγκάρσιων πυκνωτών παράγεται άεργος ισχύς και έτσι δεν χρειάζεται η πηγή να τροφοδοτεί όλη την απαιτούμενη άεργο ισχύ και τις απώλειες. Τέλος, από τους Πίνακες 6.2 και 6.9 φαίνεται καθαρά ότι επιτεύχθηκε μείωση των απωλειών. Οι άεργες απώλειες του δικτύου μειώθηκαν από 2,1459 kVA_r σε 1,0506 kVA_r, ενώ οι συνολικές ενεργές απώλειες μειώθηκαν από 2,4621 kW σε 1,2047 kW, δηλαδή κατά ποσοστό ίσο με 51,07%. Όσον αφορά τις ενεργές απώλειες του συστήματος, το ποσοστό που οφείλεται στην ενεργό συνιστώσα του ρεύματος μειώθηκε από 1215,07 W σε 1196,11 W, ενώ το ποσοστό που οφείλεται στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος από 1254,4 W σε 8,56 W.

6.3 ΔΙΚΤΥΟ 15 ΖΥΓΩΝ

Τα δεδομένα του δικτύου 15 ζυγών είναι από το [6.1] και βρίσκονται επίσης στο Παράρτημα Α, στους Πίνακες Α.2.1 και Α.2.2, για τις γραμμές και τους ζυγούς του δικτύου, αντίστοιχα. Πρόκειται για δίκτυο τάσης 11kV και η τοπολογία του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 6.2.

Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου παραδείγματος δεν θα συγκριθούν με κάποια άλλη μέθοδο, καθώς το παράδειγμα είναι από το [6.2], του οποίου ο αλγόριθμος αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4 και υλοποιήθηκε στο Κεφαλαίο 5, και τα αποτελέσματα είναι ακριβώς τα ίδια.

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό (στο GUI), μέσω ενός αρχείου Excel όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 5.3.3, τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής φορτίου πριν την οποιαδήποτε αντιστάθμιση φαίνονται στους Πίνακες 6.11 και 6.12.



Σχήμα 6.2: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 15 ζυγών.

Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου δικτύου 15 ζυγών, όσον αφορά τους ζυγούς, πριν την αντιστάθμιση.

Αποτελέσματα ροών φορτίου							
Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (kW)	Φορτίο (kVAr)	Παραγωγή (kW)	Παραγωγή (kVAr)	Έγχυση (kVAr)
1	1	0	0	0	1288,041	1308,336	0
2	0,9713	0,032	44,1	44,991	0	0	0
3	0,9567	0,0493	70	71,4143	0	0	0
4	0,9509	0,0565	140	142,8286	0	0	0
5	0,9499	0,0687	44,1	44,991	0	0	0
6	0,9582	0,1894	140	142,8286	0	0	0
7	0,956	0,2166	140	142,8286	0	0	0
8	0,957	0,205	70	71,4143	0	0	0
9	0,968	0,072	70	71,4143	0	0	0
10	0,9669	0,085	44,1	44,991	0	0	0
11	0,95	0,1315	140	142,8286	0	0	0
12	0,9458	0,1824	70	71,4143	0	0	0
13	0,9445	0,1987	44,1	44,991	0	0	0
14	0,9486	0,0849	70	71,4143	0	0	0
15	0,9484	0,0869	140	142,8286	0	0	0
Σύνολο:			1226,4	1251,1783	1288,041	1308,336	0

Πίνακας 6.12: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου δικτύου 15 ζυγών, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, πριν την αντιστάθμιση.

Ροές γραμμών και απώλειες							
Από ζυγό	Προς ζυγό	Ροή ισχύος (kW)	Ροή ισχύος (kVAr)	Ροή ισχύος (kVA)	Απώλειες (kW)	Απώλειες (kVAr)	Λήψη Μ/Σ
1	-	1288,041	1308,336	1835,972	-	-	-
1	2	1288,194	1308,476	1836,179	37,7026	36,8778	-
2	-	-44,1	-44,991	63	-	-	-
2	1	-1250,49	-1271,6	1783,449	37,7026	36,8778	-
2	3	735,4858	748,5397	1049,405	11,2898	11,0428	-
2	9	114,6314	116,7637	163,628	0,4722	0,3185	-
2	6	356,2746	361,3037	507,4169	5,7681	3,8906	-
3	-	-70	-71,4143	100	-	-	-
3	2	-724,196	-737,497	1033,616	11,2898	11,0428	-
3	4	397,2441	404,9251	567,2453	2,4439	2,3905	-
3	11	256,952	261,1575	366,3708	2,1763	1,468	-
4	-	-140	-142,829	200	-	-	-

Πίνακας 6.12: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου δικτύου 15 ζυγών, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, πριν την αντιστάθμιση (συνέχεια).

Ροές γραμμών και απώλειες							
Από ζυγό	Προς ζυγό	Ροή ισχύος (kW)	Ροή ισχύος (kVAr)	Ροή ισχύος (kVA)	Απώλειες (kW)	Απώλειες (kVAr)	Λήψη Μ/Σ
4	3	-394,8	-402,535	563,8274	2,4439	2,3905	-
4	5	44,1554	45,0284	63,0654	0,0554	0,0374	-
4	14	70,2049	71,5525	100,2421	0,2049	0,1382	-
4	15	140,4399	143,1253	200,5199	0,4399	0,2967	-
5	-	-44,1	-44,991	63	-	-	-
5	4	-44,1	-44,991	63	0,0554	0,0374	-
6	-	-140	-142,829	200	-	-	-
6	2	-350,507	-357,413	500,5986	5,7681	3,8906	-
6	7	140,3936	143,0941	200,4651	0,3936	0,2655	-
6	8	70,1129	71,4905	100,1335	0,1129	0,0762	-
7	-	-140	-142,829	200	-	-	-
7	6	-140	-142,829	200	0,3936	0,2655	-
8	-	-70	-71,4143	100	-	-	-
8	6	-70	-71,4143	100	0,1129	0,0762	-
9	-	-70	-71,4143	100	-	-	-
9	2	-114,159	-116,445	163,07	0,4722	0,3185	-
9	10	44,1592	45,0309	63,0699	0,0592	0,0399	-
10	-	-44,1	-44,991	63	-	-	-
10	9	-44,1	-44,991	63	0,0592	0,0399	-
11	-	-140	-142,829	200	-	-	-
11	3	-254,776	-259,69	363,7984	2,1763	1,468	-
11	12	114,7756	116,861	163,7985	0,6016	0,4058	-
12	-	-70	-71,4143	100	-	-	-
12	11	-114,174	-116,455	163,0875	0,6016	0,4058	-
12	13	44,174	45,0409	63,08747	0,074	0,0499	-
13	-	-44,1	-44,991	63	-	-	-
13	12	-44,1	-44,991	63	0,074	0,0499	-
14	-	-70	-71,4143	100	-	-	-
14	4	-70	-71,4143	100	0,2049	0,1382	-
15	-	-140	-142,829	200	-	-	-
15	4	-140	-142,829	200	0,4399	0,2967	-
Σύνολο:					61,7944	57,2977	

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει ότι το δίκτυο έχει συνολικό ενεργό φορτίο 1226,4 kW και άεργο φορτίο 1251,18 kVAr. Οι ενεργές απώλειες του συστήματος είναι 61,79 kW και οι άεργες απώλειες είναι 57,3 kVAr. Από τις σχέσεις (4.2), (4.3) χωρίζονται οι ενεργές απώλειες του δικτύου, λόγω της ενεργού συνιστώσας και της αέργου συνιστώσας του ρεύματος, που είναι ίσες με 30,42 kW και 31,38 kW, αντίστοιχα.

Στο σημείο αυτό αρχίζει το πρώτο μέρος της εφαρμογής, για τον προσδιορισμό του βέλτιστου πλήθους και των βέλτιστων θέσεων τοποθέτησης εγκάρσιων πυκνωτών, μέσω της τοποθέτησης μεμονωμένων πυκνωτών. Το όριο αντιστάθμισης (0,63 kW) που τέθηκε στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι 2% των αρχικών απωλειών ισχύος (31,38 kW) του συστήματος που οφείλονται στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, όπως στο αναλυτικό παράδειγμα, προκύπτει ότι ο πρώτος ζυγός για αντιστάθμιση είναι ο ζυγός 3 με πυκνωτές 1012,98 kVAr και προκαλούν μείωση απωλειών 23,38 kW. Στην επόμενη επανάληψη επιλέγεται ο ζυγός 6 που προκαλεί μείωση 3,67 kW με πυκνωτές 326,74 kVAr. Για περαιτέρω μείωση των απωλειών αφαιρούνται 150,29 kVAr από τον ζυγό 3 για να επιτευχθεί μείωση 0,49 kW. Η τρίτη επανάληψη είναι και η τελευταία, καθώς η μείωση των απωλειών είναι μικρότερη από το προκαθορισμένο όριο (0,63 kW). Επομένως, το βέλτιστο πλήθος πυκνωτών είναι 2 και οι βέλτιστες θέσεις τοποθέτησής τους στο ακτινικό δίκτυο είναι οι ζυγοί 3 και 6.

Αφού ολοκληρώθηκε το πρώτο μέρος της εφαρμογής, συνεχίζει το δεύτερο για τον καθορισμό του βέλτιστου μεγέθους των πυκνωτών και της τελικής μείωσης των απωλειών ισχύος που επιτυγχάνεται. Από τις σχέσεις (4.19) και (4.12) υπολογίζονται τα βέλτιστα μεγέθη των πυκνωτών και η τελική μείωση των απωλειών, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα είναι για το ζυγό 3 πυκνωτές μεγέθους 805,43 kVAr και για το ζυγό 6 πυκνωτές 387,68 kVAr. Η μείωση των ενεργών απωλειών του συστήματος, που οφείλονται στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος, είναι 27,69 kW.

Μετά την αντιστάθμιση των ζυγών 3 και 6, με τα βέλτιστα μεγέθη πυκνωτών, επαναλαμβάνεται η ανάλυση ροών φορτίου και τα αποτελέσματά της φαίνονται στους Πίνακες 6.13 και 6.14.

Από τους Πίνακες 6.11 και 6.13, προκύπτουν βελτιωμένες τάσεις στους ζυγούς του δικτύου μετά την αντιστάθμισή του και μειωμένη παραγόμενη άεργος ισχύς από το σύστημα από 1308,34 kVAr σε 87,8 kVAr. Ακόμα, από τους Πίνακες 6.12 και 6.14 φαίνεται η μείωση των απωλειών που επιτεύχθηκε. Πιο συγκεκριμένα, οι άεργες απώλειες του συστήματος μειώθηκαν από 57,3 kVAr σε 29,74 kVAr. Το κυριότερο που μας ενδιαφέρει είναι οι συνολικές ενεργές απώλειες, οι οποίες μειώθηκαν από 61,79 kW σε 32,62 kW, δηλαδή κατά ποσοστό ίσο με 47,21%. Το ποσοστό των ενεργών απωλειών του συστήματος που οφείλεται στην ενεργό συνιστώσα του ρεύματος μειώθηκε από 30,42 kW σε 28,93 kW, ενώ το ποσοστό που οφείλεται στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος από 31,38 kW σε 3,69 kW.

Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 15 ζυγών, όσον αφορά τους ζυγούς, μετά τη βέλτιστη αντιστάθμιση του δικτύου.

Αποτελέσματα ροών φορτίου							
Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (kW)	Φορτίο (kVAr)	Παραγωγή (kW)	Παραγωγή (kVAr)	Έγχυση (kVAr)
1	1	0	0	0	1259,017	87,8034	0
2	0,985	-0,7439	44,1	44,991	0	0	0
3	0,9785	-1,1902	70	71,4143	0	0	805,4349
4	0,9729	-1,1833	140	142,8286	0	0	0
5	0,9719	-1,1717	44,1	44,991	0	0	0
6	0,9779	-1,0792	140	142,8286	0	0	387,6787
7	0,9757	-1,053	140	142,8286	0	0	0
8	0,9766	-1,0641	70	71,4143	0	0	0
9	0,9818	-0,705	70	71,4143	0	0	0
10	0,9807	-0,6924	44,1	44,991	0	0	0
11	0,972	-1,1116	140	142,8286	0	0	0
12	0,9679	-1,063	70	71,4143	0	0	0
13	0,9666	-1,0475	44,1	44,991	0	0	0
14	0,9706	-1,1563	70	71,4143	0	0	0
15	0,9705	-1,1543	140	142,8286	0	0	0
Σύνολο:			1226,4	1251,1783	1259,017	87,8034	1193,1136

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 15 ζυγών, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, μετά τη βέλτιστη αντιστάθμιση του δικτύου.

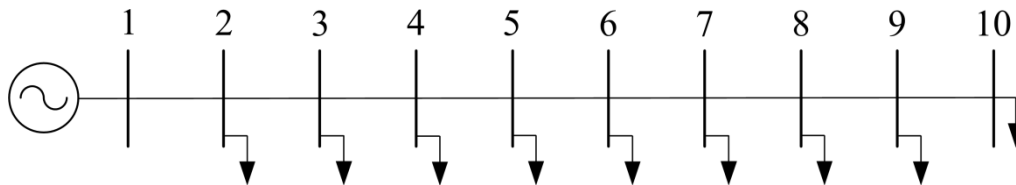
Ροές γραμμών και απώλειες							
Από ζυγό	Προς ζυγό	Ροή ισχύος (kW)	Ροή ισχύος (kVAr)	Ροή ισχύος (kVA)	Απώλειες (kW)	Απώλειες (kVAr)	Λήψη Μ/Σ
1	-	1259,017	87,8034	1262,075	-	-	-
1	2	1259,017	87,8034	1262,075	17,812	17,4223	-
2	-	-44,1	-44,991	63	-	-	-
2	1	-1241,21	-70,3811	1243,199	17,8120	17,4223	-
2	3	729,2672	-62,9293	731,9773	5,3404	5,2236	-
2	9	114,6165	116,7537	163,6104	0,459	0,3096	-
2	6	353,2214	-28,4343	354,3641	2,7351	1,8449	-
3	-	-70	734,0206	737,3509	-	-	-
3	2	-723,927	68,1528	727,1278	5,3404	5,2236	-
3	4	397,1032	404,7969	567,055	2,3344	2,2834	-
3	11	256,8236	261,071	366,2191	2,0785	1,402	-
4	-	-140	-142,829	200	-	-	-

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 15 ζυγών, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, μετά τη βέλτιστη αντιστάθμιση του δικτύου (**συνέχεια**).

Ροές γραμμών και απώλειες							
Από ζυγό	Προς ζυγό	Ροή ισχύος (kW)	Ροή ισχύος (kVAr)	Ροή ισχύος (kVA)	Απώλειες (kW)	Απώλειες (kVAr)	Λήψη Μ/Σ
4	3	-394,769	-402,513	563,7903	2,3344	2,2834	-
4	5	44,1529	45,0267	63,06252	0,0529	0,0357	-
4	14	70,1957	71,5463	100,2313	0,1957	0,132	-
4	15	140,4202	143,112	200,4965	0,4202	0,2834	-
5	-	-44,1	-44,991	63	-	-	-
5	4	-44,1	-44,991	63	0,0529	0,0357	-
6	-	-140	244,8501	282,0489	-	-	-
6	2	-350,486	30,2792	351,7918	2,7351	1,8449	-
6	7	140,3779	143,0834	200,4465	0,3779	0,2549	-
6	8	70,1084	71,4874	100,1281	0,1084	0,0731	-
7	-	-140	-142,829	200	-	-	-
7	6	-140	-142,829	200	0,3779	0,2549	-
8	-	-70	-71,4143	100	-	-	-
8	6	-70	-71,4143	100	0,1084	0,0731	-
9	-	-70	-71,4143	100	-	-	-
9	2	-114,158	-116,444	163,068	0,459	0,3096	-
9	10	44,1575	45,0298	63,068	0,0575	0,0388	-
10	-	-44,1	-44,991	63	-	-	-
10	9	-44,1	-44,991	63	0,0575	0,0388	-
11	-	-140	-142,829	200	-	-	-
11	3	-254,745	-259,669	363,7624	2,0785	1,402	-
11	12	114,7451	116,8404	163,7624	0,5744	0,3875	-
12	-	-70	-71,4143	100	-	-	-
12	11	-114,171	-116,453	163,0835	0,5744	0,3875	-
12	13	44,1708	45,0387	63,0835	0,0707	0,0477	-
13	-	-44,1	-44,991	63	-	-	-
13	12	-44,1	-44,991	63	0,0707	0,0477	-
14	-	-70	-71,4143	100	-	-	-
14	4	-70	-71,4143	100	0,1957	0,132	-
15	-	-140	-142,829	200	-	-	-
15	4	-140	-142,829	200	0,4202	0,2834	-
Σύνολο:					32,6171	29,7387	

6.4 ΠΡΩΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 10 ΖΥΓΩΝ

Η συνδεσμολογία του πρώτου δικτύου 10 ζυγών φαίνεται στο Σχήμα 6.3 και το επίπεδο τάσης του είναι 23 kV. Τα δεδομένα του δικτύου, που φαίνονται στους Πίνακες Α.3.1 και Α.3.2, είναι από το [6.3].



Σχήμα 6.3: Μονογραμμικό διάγραμμα του πρώτου δικτύου 10 ζυγών.

Οι ενεργές απώλειες του συστήματος έχουν υπολογιστεί με τη βοήθεια του λογισμικού που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5, χρησιμοποιώντας την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου της Ενότητας 3.3, και βρέθηκαν ίσες με 45,1 kW. Από τις απώλειες αυτές 0,0088 kW οφείλονται στην ενεργό συνιστώσα του ρεύματος, ενώ 45,09 kW στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος.

Για την επίλυση του προβλήματος εύρεσης βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών, για τη μείωση των απωλειών, τέθηκε όριο αντιστάθμισης των απωλειών 1% των αρχικών ενεργών απωλειών λόγω της άεργου συνιστώσας του ρεύματος, δηλαδή το όριο αντιστάθμισης είναι 0,4509 kW.

Στον Πίνακα 6.15 φαίνονται, για το συγκεκριμένο δίκτυο, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 4 και συγκρίνονται με τη μέθοδο 1 [6.3] που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.3.1.

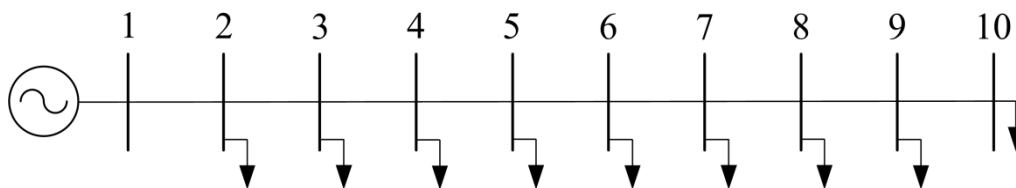
Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα πρώτου δικτύου 10 ζυγών με τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 4 και τη μέθοδο 1 [6.3].

	Μέθοδος εργασίας	Μέθοδος 1 [6.3]
Πλήθος πυκνωτών	2	3
Θέση εγκατάστασης (κόμβοι)	5, 10	5, 6, 10
Μέγεθος πυκνωτών (kVAr)	<ul style="list-style-type: none"> • 2911,14 στο ζυγό 5 • 403,48 στο ζυγό 10 	<ul style="list-style-type: none"> • 1578 στο ζυγό 5 • 571 στο ζυγό 6 • 212 στο ζυγό 10
Απώλειες ισχύος αρχικού δικτύου (kW)	45,1	45,1
Μείωση απωλειών ισχύος (kW)	42,34	40,76
Μείωση απωλειών ισχύος ως ποσοστό των απωλειών ισχύος του αρχικού συστήματος (%)	93,88	90,38

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.15 φαίνεται καταρχήν ότι το ποσοστό της αντιστάθμισης από τη μέθοδο της εργασίας είναι μεγαλύτερο από τη μέθοδο 1, κατά 3,5%. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τη μέθοδο 1 ο βέλτιστος αριθμός πυκνωτών δεν υπολογίστηκε, αλλά θεωρήθηκε ότι είναι ίσος με 3, δηλαδή υπολογίστηκε το μέγεθος των πυκνωτών και οι θέσεις εγκατάστασής τους με δεδομένο ότι θα χρησιμοποιηθούν 3 πυκνωτές. Αυτός είναι ένας λόγος που διαφέρουν τα αποτελέσματα, ενώ ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι ότι οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν διαφορετική αντικειμενική συνάρτηση. Από τη μια, η μέθοδος της εργασίας ασχολείται καθαρά με τη μείωση των απωλειών ισχύος, ενώ από την άλλη η μέθοδος 1 ασχολείται με την αύξηση των εσόδων από τη μείωση των απωλειών ισχύος (σχέση 2.4). Έτσι η μέθοδος της εργασίας υπερτερεί της μεθόδου 1, όσον αφορά τη μείωση των απωλειών ισχύος στο συγκεκριμένο δίκτυο.

6.5 ΔΕΥΤΕΡΟ ΔΙΚΤΥΟ 10 ΖΥΓΩΝ

Η τοπολογία του δεύτερου δικτύου 10 ζυγών φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Η τάση του συστήματος είναι 23 kV παντού, τα δεδομένα του είναι από το [6.4] και φαίνονται και στους Πίνακες A.4.1 και A.4.2.



Σχήμα 6.4: Μονογραμμικό διάγραμμα του δεύτερου δικτύου 10 ζυγών.

Οι ενεργές απώλειες του συστήματος, σύμφωνα με το λογισμικό της εργασίας, είναι ίσες με 783,78 kW. Από τις απώλειες αυτές 706,66 kW οφείλονται στην ενεργό συνιστώσα του ρεύματος και 77,12 kW στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος.

Για την επίλυση του προβλήματος με την εφαρμογή της εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν δύο όρια αντιστάθμισης απωλειών: α) 1% των αρχικών ενεργών απωλειών λόγω της άεργου συνιστώσας του ρεύματος (0,7712 kW) και β) 0,2% (0,1542 kW).

Στον Πίνακα 6.16 φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 4 και συγκρίνονται με τη μέθοδο 4 [6.5] που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.3.4 και τη μέθοδο 5 [6.6] που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.3.5.

Ο λόγος που υλοποιήθηκε το πρόβλημα με τη μέθοδο της εργασίας με δύο όρια αντιστάθμισης απωλειών είναι για να επισημανθεί η επίδρασή του στα τελικά αποτελέσματα της μείωσης των απωλειών ισχύος. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.16 με τη μείωση του ορίου αντιστάθμισης από 1% σε 0,2% αυξήθηκε ο αριθμός των πυκνωτών από 4 σε 7. Ακόμα, όπως ήταν αναμενόμενο, η μείωση των απωλειών ισχύος είναι μεγαλύτερη στη δεύτερη περίπτωση κατά 1,6 kW. Στο σημείο αυτό, καθώς η αντικειμενική συνάρτηση της μεθόδου της εργασίας δεν λαμβάνει υπόψη το κόστος των πυκνωτών, είναι θέμα του χρήστη αν θα

προτιμήσει ή όχι μικρό όριο αντιστάθμισης, λαμβάνοντας υπόψη την αντιστάθμιση που επιθυμεί και τους οικονομικούς πόρους που διαθέτει.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου 4 είναι πολύ κοντά στη μέθοδο της εργασίας. Ο λόγος είναι ότι παρά την αντικειμενική συνάρτηση της μεθόδου 4 που είναι μια συνάρτηση κόστους, ένα δεύτερο κριτήριο κατά την εφαρμογή της είναι η μείωση των απωλειών σε όλους τους κλάδους του συστήματος. Επομένως, εξάγει πολύ καλά αποτελέσματα όσον αφορά τη μείωση των απωλειών ισχύος.

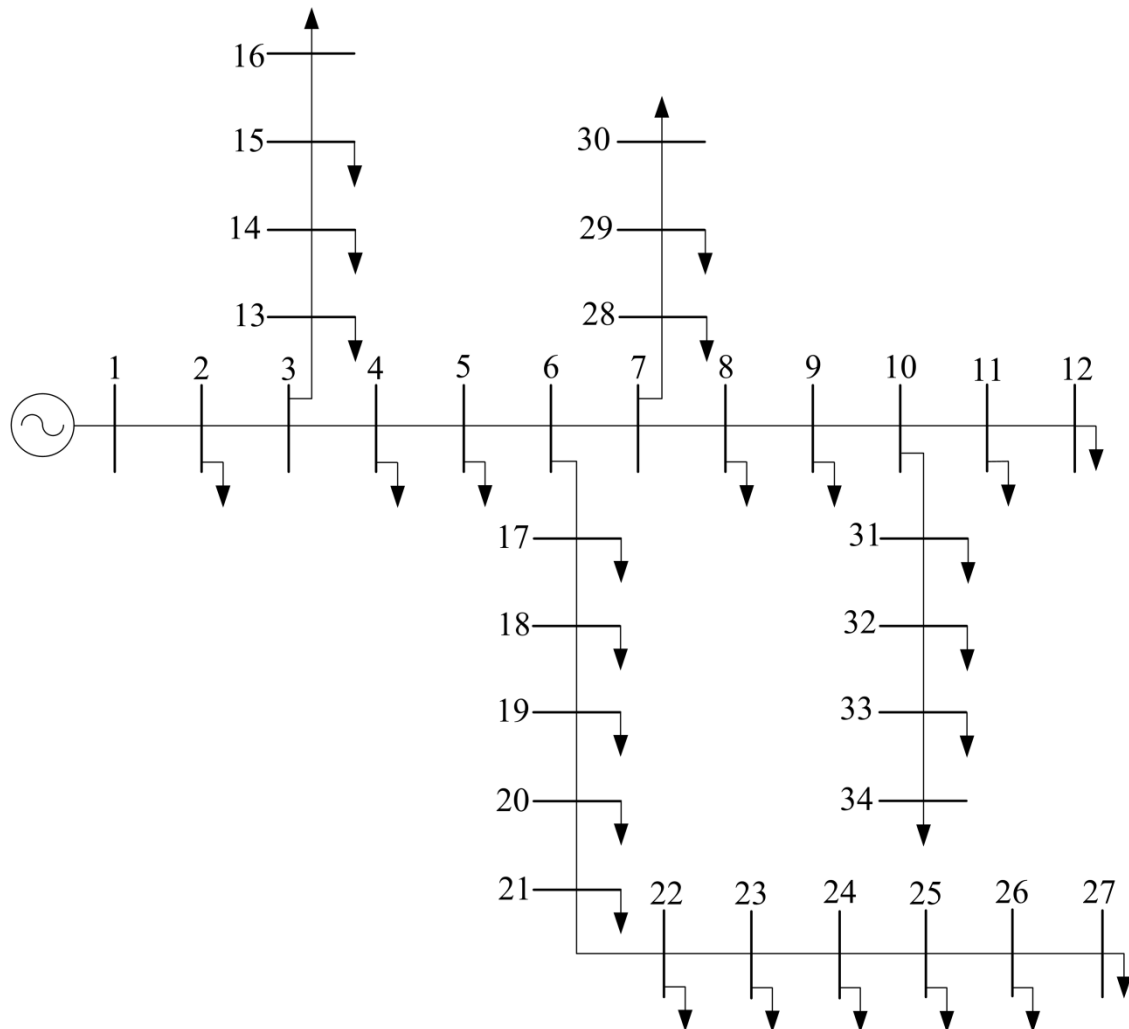
Από την άλλη η μέθοδος 5, παρόλο που η αντικειμενική της συνάρτηση είναι μια συνάρτηση κόστους, η μείωση των απωλειών ισχύος που επιτεύχθηκε στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι μικρότερη από τη μέθοδο της εργασίας (με όριο αντιστάθμισης 0,2%) μόνο κατά 2,93 kW.

Πίνακας 6.16: Αποτελέσματα δεύτερου δικτύου 10 ζυγών με τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 4, τη μέθοδο 4 [6.5] και τη μέθοδο 5 [6.6].

	Μέθοδος εργασίας		Μέθοδος 4 [6.5]	Μέθοδος 5 [6.6]
	1	0,2	-	-
Όριο αντιστάθμισης (%)	1	0,2	-	-
Πλήθος πυκνωτών	4	7	7	4
Θέση εγκατάστασης (κόμβοι)	4, 5, 6, 10	2, 4, 5, 6, 8, 9, 10	3, 5, 6, 7, 8, 9, 10	3, 5, 6, 9
Μέγεθος πυκνωτών (kVAr)	<ul style="list-style-type: none"> • 637,79 στο ζυγό 4 • 1911,97 στο ζυγό 5 • 1077,74 στο ζυγό 6 • 541,13 στο ζυγό 10 	<ul style="list-style-type: none"> • 833,67 στο ζυγό 2 • 524,92 στο ζυγό 4 • 1911,97 στο ζυγό 5 • 819,72 στο ζυγό 6 • 202,14 στο ζυγό 8 • 221,71 στο ζυγό 9 • 370,05 στο ζυγό 10 	<ul style="list-style-type: none"> • 300 στο ζυγό 3 • 2850 στο ζυγό 5 • 1200 στο ζυγό 6 • 300 στο ζυγό 7 • 150 στο ζυγό 8 • 150 στο ζυγό 9 • 450 στο ζυγό 10 	<ul style="list-style-type: none"> • 3600 στο ζυγό 3 • 4050 στο ζυγό 5 • 1650 στο ζυγό 6 • 600 στο ζυγό 9
Απώλειες ισχύος αρχικού δικτύου (kW)	783,78	783,78	783,78	783,78
Μείωση απωλειών ισχύος (kW)	98,67	100,27	99,52	97,34
Μείωση απωλειών ισχύος ως ποσοστό των απωλειών ισχύος του αρχικού συστήματος (%)	12,59	12,79	12,7	12,42

6.6 ΔΙΚΤΥΟ 34 ΖΥΓΩΝ

Στο Σχήμα 6.5 φαίνεται το δίκτυο 34 ζυγών με επίπεδο τάσης 11 kV. Τα δεδομένα του δικτύου, που είναι από το [6.7], φαίνονται στους Πίνακες Α.5.1 και Α.5.2.



Σχήμα 6.5: Μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου 34 ζυγών.

Με το λογισμικό που αναπτύχθηκε στην εργασία, οι ενεργές απώλειες του αρχικού συστήματος υπολογίζονται ότι είναι 221,72 kW. Λόγω της ενεργού συνιστώσας του ρεύματος προκαλούνται απώλειες 162,71 kW και λόγω της αέργου συνιστώσας απώλειες 59,01 kW.

Το όριο αντιστάθμισης των απωλειών, για την επίλυση του προβλήματος, τέθηκε ίσο με 1% των αρχικών ενεργών απωλειών που οφείλονται στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος, δηλαδή το όριο αντιστάθμισης είναι 0,5901 kW.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το συγκεκριμένο δίκτυο, από τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 4, τη μέθοδο 2 [6.7] και τη μέθοδο 3 [6.8] που περιγράφηκαν στις Ενότητες 2.3.2 και 2.3.3, αντίστοιχα, φαίνονται στον Πίνακα 6.17.

Οι δύο στήλες της μεθόδου 2 στον Πίνακα 6.17 αντιστοιχούν σε δυο διαφορετικές προσεγγίσεις της μεθόδου για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης εγκάρσιων πυκνωτών για μείωση των απωλειών ισχύος. Η πρώτη στήλη αντιστοιχεί στην περίπτωση που η αντικειμενική συνάρτηση στηρίζεται στην εξοικονόμηση χρημάτων και η δεύτερη στήλη στην περίπτωση που στηρίζεται στη μεγιστοποίηση της μείωσης των απωλειών. Για αυτό το λόγο και η μείωση των απωλειών είναι μεγαλύτερη στη δεύτερη περίπτωση.

Ακόμα, από τον Πίνακα 6.17 φαίνεται ότι η πιο υψηλή αντιστάθμιση επιτεύχθηκε με τη μέθοδο της εργασίας με ποσοστό 28,02% των απωλειών ισχύος του αρχικού συστήματος. Το πλήθος των πυκνωτών είναι το ίδιο στην περίπτωση της μεθόδου 2 και της μεθόδου της εργασίας, ενώ με τη μέθοδο 3 είναι μικρότερο. Οι ζυγοί τοποθέτησης που επιλέχθηκαν για τοποθέτηση είναι διαφορετικοί σε κάθε μέθοδο, με μοναδική εξαίρεση τους ζυγούς 21 και 26 που εμφανίζονται σε 3 περιπτώσεις και τους 5 και 11 που εμφανίζονται σε 2 περιπτώσεις. Οι λόγοι που παρουσιάζουν αυτές τις διαφορές είναι οι διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις και η διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος στην κάθε μέθοδο.

Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα δικτύου 34 ζυγών με τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 4, τη μέθοδο 2 [6.7] και τη μέθοδο 3 [6.8].

Αντικειμενική συνάρτηση	Μέθοδος εργασίας	Μέθοδος 2 [6.7]		Μέθοδος 3 [6.8]
	Ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος	Μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης χρημάτων	Ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος	Ελαχιστοποίηση μέγιστης ισχύος και απωλειών ενέργειας
Πλήθος πυκνωτών	4	4	4	2
Θέση εγκατάστασης (κόμβοι)	5, 10, 21, 26	11, 20, 21, 26	4, 11, 17, 26	5, 21
Μέγεθος πυκνωτών (kVAr)	<ul style="list-style-type: none"> • 708,53 στο ζυγό 5 • 635,02 στο ζυγό 10 • 712,3 στο ζυγό 21 • 534,65 στο ζυγό 26 	<ul style="list-style-type: none"> • 400 στο ζυγό 11 • 150 στο ζυγό 20 • 250 στο ζυγό 21 • 750 στο ζυγό 26 	<ul style="list-style-type: none"> • 250 στο ζυγό 4 • 750 στο ζυγό 11 • 300 στο ζυγό 17 • 1400 στο ζυγό 26 	<ul style="list-style-type: none"> • 1003 στο ζυγό 5 • 672 στο ζυγό 21
Απώλειες ισχύος αρχικού δικτύου (kW)	221,72	221,72	221,72	221,72
Μείωση απωλειών ισχύος (kW)	62,12	53,37	53,69	43,97
Μείωση απωλειών ισχύος ως ποσοστό των απωλειών ισχύος του αρχικού συστήματος (%)	28,02	24,07	24,22	19,83

Επιπρόσθετα από τις μεθόδους 2 [6.7] και 3 [6.8] το συγκεκριμένο δίκτυο 34 ζυγών επιλύθηκε και από τις μεθόδους 4 [6.5] και 5 [6.6]. Έτσι στον Πίνακα 6.18 φαίνονται τα

αποτελέσματα της μεθόδου του Κεφαλαίου 4, με όριο αντιστάθμισης 0,5% αυτή τη φορά, και των μεθόδων 4 [6.5] και 5 [6.6], που περιγράφηκαν στις Ενότητες 2.3.4 και 2.3.5, αντίστοιχα.

Στις δύο μεθόδους 4 [6.5] και 5 [6.6] δεν είναι διαθέσιμα τα αποτελέσματα όσον αφορά το πλήθος των πυκνωτών και τις θέσεις εγκατάστασης τους, αλλά μόνο το συνολικό μέγεθος των πυκνωτών που θα τοποθετηθούν στο σύστημα και η αντιστάθμιση που πετυχαίνουν.

Συγκρίνοντας τους Πίνακες 6.17 και 6.18 παρατηρείται ότι μειώνοντας το όριο αντιστάθμισης από 1% σε 0,5% αυξήθηκε ο βέλτιστος αριθμός των πυκνωτών από 4 σε 6 και η μείωση των απωλειών ισχύος από 62,12 kW σε 62,59 kW. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι παρόλο που αναμενόταν να αυξηθεί και το συνολικό μέγεθος των πυκνωτών στην δεύτερη περίπτωση, αυτό μειώθηκε ελάχιστα από 2590,5 kVAr σε 2589,71 kVAr. Αυτό δεν είναι πρόβλημα, καθώς οι δύο περιπτώσεις αποτελούν δυο διαφορετικά προβλήματα μείωσης απωλειών με τοποθέτηση πολλαπλών πυκνωτών (Ενότητα 4.2.2).

Όπως και στην περίπτωση του δεύτερου δικτύου 10 ζυγών, η μέθοδος 4 εξάγει πολύ καλά αποτελέσματα, που είναι ελαφρώς καλύτερα από τη μέθοδο της εργασίας στο συγκεκριμένο δίκτυο 34 ζυγών. Ο λόγος, όπως προαναφέρθηκε, είναι ο συνδυασμός της μείωσης των απωλειών ισχύος, σε κάθε γραμμή του συστήματος ξεχωριστά, μαζί με μια συνάρτηση κόστους. Τέλος, η μέθοδος 5 με συνολικά εγκατεστημένα 2100 kVAr πετυχαίνει μείωση απωλειών ισχύος σε ποσοστό 25,26% των αρχικών απωλειών ισχύος του συστήματος.

Πίνακας 6.18: Αποτελέσματα δικτύου 34 ζυγών με τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 4, τη μέθοδο 4 [6.5] και τη μέθοδο 5 [6.6].

	Μέθοδος εργασίας	Μέθοδος 4 [6.5]	Μέθοδος 5 [6.6]
Πλήθος πυκνωτών	6	(ΜΔ)*	(ΜΔ)
Θέση εγκατάστασης (κόμβοι)	5, 10, 21, 25, 26, 29	(ΜΔ)	(ΜΔ)
Μέγεθος πυκνωτών (kVAr)	<ul style="list-style-type: none"> • 581,38 στο ζυγό 5 • 547,25 στο ζυγό 10 • 652,74 στο ζυγό 21 • 352,97 στο ζυγό 25 • 221,05 στο ζυγό 26 • 234,31 στο ζυγό 29 	συνολικά 3000	συνολικά 2100
Απώλειες ισχύος αρχικού δικτύου (kW)	221,72	221,72	221,72
Μείωση απωλειών ισχύος (kW)	62,59	63,5	56
Μείωση απωλειών ισχύος ως ποσοστό των απωλειών ισχύος του αρχικού συστήματος (%)	28,23	28,64	25,26

* ΜΔ: Μη διαθέσιμο

6.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] D. Das, D. P. Kothari, and A. Kalam, “Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks,” *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 17, no. 5, pp. 335-346, 1995.
- [6.2] M. H. Haque, “Capacitor placement in radial distribution systems for loss reduction,” *IEE Proceedings -Generation, Transmission and Distribution*, pp. 501-505, Sept. 1999.
- [6.3] J. J. Grainger, and S. H. Lee, “Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses on distribution feeders,” *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 3, pp. 1105–1118, Mar. 1981.
- [6.4] S. H. Lee, and J. J. Grainger, “Optimum placement of fixed and switched capacitors on primary distribution feeders,” *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 1, pp. 345–352, Jan. 1981.
- [6.5] M. H. Hamada, M. A. A. Wahab, A. M. El-Sayed, and H. A. Ramadan, “A proposed strategy for capacitor allocation in radial distribution feeders,” presented at the 12th Int. Middle-East Power System Conf., MEPCON, Aswan, Egypt, 12-15 Mar., 2008, pp. 146-151.
- [6.6] S. F. Mekhamer, S. A. Soliman, M. A. Moustafa, and M. E. El-Hawary, “Application of fuzzy logic for reactive-power compensation of radial distribution feeders,” *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 18, no. 1, Feb. 2003.
- [6.7] M. Chis, M. M. A. Salama, and S. Jayaram, “Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies,” *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 3, pp. 225–230, May 1997.
- [6.8] M. M. A. Salama, and A. Y. Chikhani, “A simplified network approach to the VAR control problem for radial distribution systems,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1529–1535, July 1993.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της μείωσης των απωλειών ισχύος σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον MATLAB για την επίλυση του προβλήματος. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε διαθέτει ένα φιλικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης με το χρήστη. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε για τη μείωση των απωλειών σε 5 δίκτυα διανομής και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων του με άλλες μεθόδους επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος στα ίδια δίκτυα.

Οι απώλειες ισχύος αποτελούν ένα σημαντικό μέρος της παραγόμενης ισχύος στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο λόγος είναι ότι τα δίκτυα διανομής συνδέουν τους καταναλωτές με το δίκτυο μεταφοράς υψηλής τάσης και έτσι, λόγω της πιο χαμηλής τάσης που βρίσκονται, έχουν μεγαλύτερη τιμή ρεύματος και επομένως οι απώλειες ισχύος είναι σημαντικά μεγαλύτερες στα δίκτυα διανομής, σε σχέση με τα δίκτυα υψηλής τάσης. Το ποσοστό των απωλειών ισχύος στα δίκτυα διανομής είναι περίπου 13% της παραγόμενης ισχύος [7.1]. Έτσι είναι επιτακτική η μείωση των απωλειών ισχύος στα δίκτυα διανομής.

Δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος των απωλειών ισχύος οφείλεται στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος των γραμμών, μια λύση για τη μείωση των απωλειών, η οποία χρησιμοποιείται, είναι η τοποθέτηση εγκάρσιων πυκνωτών σε ζυγούς του συστήματος. Με την τοποθέτηση πυκνωτών, δεν μειώνονται μόνο οι απώλειες, αλλά επίσης βελτιώνονται οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος. Επομένως, για την επίλυση του προβλήματος μείωσης των απωλειών ισχύος σε ακτινικά δίκτυα διανομής υπολογίζεται η θέση τοποθέτησης πυκνωτών, το μέγεθός τους και ο αριθμός τους, που επιτυγχάνουν τη μεγαλύτερη δυνατή μείωση απωλειών, χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί λειτουργίας του συστήματος.

Για την υλοποίηση της μεθόδου εύρεσης βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών, για μείωση των απωλειών ισχύος, σε ακτινικά δίκτυα διανομής απαιτείται αρχικά η λύση του προβλήματος ροών φορτίου. Για την ανάλυση ροών φορτίου και τον υπολογισμό των τάσεων κατά μέτρο και γωνία σε όλους τους ζυγούς, των ρευμάτων, των ροών ενεργού και άεργου ισχύος σε όλες τις γραμμές και τέλος των απωλειών του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Newton-Raphson [7.2], όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 3.3.1.

Η μέθοδος της εργασίας, που είναι από το [7.3], όπως περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 4, αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος της μεθόδου γίνεται ο υπολογισμός του βέλτιστου πλήθους και των βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης των εγκάρσιων πυκνωτών στο υπό μελέτη ακτινικό δίκτυο διανομής. Για την υλοποίηση του πρώτου μέρους

εφαρμόζεται η διαδικασία μείωσης των απωλειών με μεμονωμένους πυκνωτές, όπως περιγράφεται στην Ενότητα 4.2.1. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή των προς αντιστάθμιση ζυγών γίνεται σύμφωνα με ένα όριο αντιστάθμισης (saving tolerance) που επιλέγει ο χρήστης, μέσω των δεδομένων εισόδου, σαν ποσοστό των αρχικών ενεργών απωλειών του δικτύου που οφείλονται στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος. Το δεύτερο μέρος της μεθόδου γίνεται με τη διαδικασία μείωσης των απωλειών με πολλαπλούς πυκνωτές, όπως περιγράφεται στην Ενότητα 4.2.2. Κατά το δεύτερο μέρος της μεθόδου γίνεται ο υπολογισμός του βέλτιστου μεγέθους των πυκνωτών και ο υπολογισμός της μείωσης των ενεργών απωλειών που επιτεύχθηκε για το πλήθος και τις θέσεις του υπό μελέτη δικτύου που έχουν ήδη υπολογιστεί στο πρώτο βήμα.

Μια επιπλέον δυνατότητα που δίνεται στο χρήστη από το λογισμικό που αναπτύχθηκε είναι να επιλέγει αυτός τη λύση του προβλήματος. Δηλαδή, μπορεί να επιλέξει τους ζυγούς του δικτύου στους οποίους επιθυμεί να τοποθετηθούν πυκνωτές και το μέγεθός τους (kVAr), μέσω ενός αρχείου Excel που θα εισάγει.

Τα αποτελέσματα του λογισμικού, είτε γίνει αντιστάθμιση με τη μέθοδο του Κεφαλαίου 4, είτε σύμφωνα με τις επιλογές του χρήστη, είναι τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου όσον αφορά τις τάσεις κατά μέτρο και γωνία σε όλους τους ζυγούς, την ενεργό και άεργο ισχύ των φορτίων, αλλά και της παραγωγής, και την έγχυση αέργου ισχύος. Ακόμα, παρουσιάζονται οι ροές της ενεργού και αέργου ισχύος σε όλες τις γραμμές και οι ενεργές και άεργες απώλειες του δικτύου. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται τόσο πριν γίνει οποιαδήποτε αντιστάθμιση, όσο και μετά την αντιστάθμιση, για να μπορεί να γίνει σύγκριση από το χρήστη. Μετά την επίλυση του προβλήματος και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στο γραφικό περιβάλλον (GUI), ο χρήστης έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης των αποτελεσμάτων με την εξαγωγή τους σε ένα αρχείο Excel.

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας εφαρμόστηκε σε 5 δίκτυα διανομής. Το πρώτο δίκτυο είναι ένα μικρό δίκτυο 4 ζυγών που χρησιμοποιήθηκε σαν αριθμητικό παράδειγμα (Ενότητα 6.2), όπου παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος εύρεσης βέλτιστου πλήθους, θέσης και μεγέθους εγκάρσιων πυκνωτών που υλοποιήθηκε στην εργασία. Χρησιμοποιώντας όριο αντιστάθμισης 2% των αρχικών απωλειών λόγω της αέργου συνιστώσας του ρεύματος (0,0251 kW), οι ενεργές απώλειες του συστήματος μειώθηκαν από 2,4641 kW σε 1,2047 kW, δηλαδή κατά ποσοστό 51,02%. Στο δίκτυο των 15 ζυγών [7.4], που μελετήθηκε στην Ενότητα 6.3, με τη μέθοδο του Κεφαλαίου 4 και όριο αντιστάθμισης 0,63 kW, επιτεύχθηκε μείωση των απωλειών ισχύος ίση με 47,2% των αρχικών ενεργών απωλειών του συστήματος.

Στα επόμενα 3 δίκτυα η μέθοδος της διπλωματικής εργασίας συγκρίνεται με τις μεθόδους που περιγράφηκαν στην Ενότητα 2.3. Στο πρώτο δίκτυο 10 ζυγών [7.5] στην Ενότητα 6.4, η μέθοδος του Κεφαλαίου 4 με όριο αντιστάθμισης 0,4509 kW πετυχαίνει μείωση απωλειών ισχύος από 45,1 kW σε 3,56 kW, μείωση μεγαλύτερη από τη μέθοδο 1 [7.5] κατά 1,35 kW. Στην περίπτωση του δεύτερου δικτύου 10 ζυγών [7.6], που μελετήθηκε στην Ενότητα 6.5, η μέθοδος της εργασίας δοκιμάστηκε για δυο όρια αντιστάθμισης, 0,7712 kW και 0,1542 kW, και η μέγιστη μείωση απωλειών που επιτεύχθηκε ήταν 98,67 kW και 100,27 kW, αντίστοιχα. Η μείωση που αντιστοιχεί στο μικρότερο όριο αντιστάθμισης είναι μεγαλύτερη από τη μείωση της μεθόδου 4 [7.7] κατά 0,75 kW και της μεθόδου 5 [7.8] κατά 2,93 kW. Τέλος, στην Ενότητα 6.6 στο δίκτυο 34 ζυγών [7.9] τη μεγαλύτερη μείωση απωλειών επιτυγχάνει η μέθοδος 4 [7.7], που μειώνει τις αρχικές ενεργές απώλειες από

221,72 kW σε 158,22 kW (μείωση 63,5 kW). Η μέθοδος της εργασίας με όριο αντιστάθμισης 0,5% (0,118 kW) πετυχαίνει λίγο μικρότερη μείωση και ίση με 62,59 kW.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις εφαρμογές που έγιναν είναι ότι η μέθοδος του Κεφαλαίου 4, που υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία πετυχαίνει πολύ καλά αποτελέσματα, όσον αφορά τη μείωση των απωλειών ισχύος. Τα καλύτερα αποτελέσματα που πετυχαίνει σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους οφείλονται στο γεγονός ότι η αντικειμενική της συνάρτηση λαμβάνει υπόψη μόνο τη μείωση των απωλειών ισχύος, ενώ στις άλλες μεθόδους η αντικειμενική τους συνάρτηση είναι διαφορετική. Έτσι στο θέμα μείωσης απωλειών υπερτερεί η μέθοδος της διπλωματικής εργασίας. Μοναδική εξαίρεση είναι η μέθοδος 4 [7.7] που στο τελευταίο δίκτυο πέτυχε λίγο μεγαλύτερη μείωση. Ο λόγος είναι ότι εκτός από τη συνάρτηση κόστους που ελαχιστοποιεί κατά την εφαρμογή της, εφαρμόζει ακόμα ένα κριτήριο που είναι η μείωση των απωλειών ισχύος σε κάθε γραμμή του συστήματος ξεχωριστά.

Ακόμα, κάτι που παρατηρείται από τα αποτελέσματα των δικτύων που επιλύθηκαν με δύο όρια αντιστάθμισης είναι η επίδραση του ορίου στα αποτελέσματα. Με τη μείωση του ορίου αντιστάθμισης όπως αναμένεται αυξάνεται η μείωση των απωλειών ισχύος, το βέλτιστο πλήθος, αλλά δεν σημαίνει και την αύξηση του συνολικού μεγέθους των πυκνωτών. Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε φορά που αλλάζει το πλήθος και οι θέσεις των πυκνωτών, αποτελεί ένα διαφορετικό ανεξάρτητο πρόβλημα μείωσης απωλειών με πολλαπλούς πυκνωτές.

7.2 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Μια πρώτη επέκταση της εργασίας που μπορεί να γίνει είναι η τροποποίηση της αντικειμενικής της συνάρτησης. Η παρούσα αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει υπόψη μόνο τη μείωση των απωλειών ισχύος. Θα μπορούσε να τροποποιηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να συνυπολογίζει και τη μείωση των απωλειών ενέργειας, αλλά και το κόστος αγοράς και εγκατάστασης των πυκνωτών. Ακόμα καλύτερα θα ήταν αν υπήρχε η δυνατότητα επιλογής από το χρήστη της αντικειμενικής συνάρτησης από μια λίστα 3-4 διαθέσιμων συναρτήσεων.

Ακόμα, τα μεγέθη (kVAr) των πυκνωτών, αντί για συνεχείς τιμές, θα μπορούσαν να λαμβάνουν διακριτές τιμές, καθώς έτσι θα αντιστοιχούσαν στα πραγματικά μεγέθη πυκνωτών που είναι διαθέσιμα.

Μια άλλη πιθανή επέκταση της εργασίας αφορά το φορτίο που θα μπορούσε να μην θεωρείται σταθερό, αλλά να λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή του κατά τη διάρκεια της ημέρας. Μια πιθανή λύση είναι ο χωρισμός της ημέρας σε περιόδους με διαφορετικούς συντελεστές φορτίου ή από διαθέσιμες μετρήσεις του φορτίου να γίνεται πρόβλεψη.

Τέλος, η μεγαλύτερη επέκταση που μπορεί να γίνει είναι η δυνατότητα αντιστάθμισης ασύμμετρων ακτινικών δικτύων και όχι μόνο συμμετρικών δικτύων.

7.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [7.1] J. B. Bunch, R. D. Miller, and J. E. Wheeler, "Distribution system integrated voltage and reactive power control," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 101, no. 2, pp. 284–289, Feb. 1982.
- [7.2] H. Saadat, *Power system analysis, second edition*, New York: McGraw-Hill, 1999, pp. 200-209, 232-240.
- [7.3] M. H. Haque, "Capacitor placement in radial distribution systems for loss reduction," *IEE Proceedings -Generation, Transmission and Distribution*, pp. 501-505, Sept. 1999.
- [7.4] D. Das, D. P. Kothari, and A. Kalam, "Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 17, no. 5, pp. 335-346, 1995.
- [7.5] J. J. Grainger, and S. H. Lee, "Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses on distribution feeders," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 3, pp. 1105–1118, Mar. 1981.
- [7.6] S. H. Lee, and J. J. Grainger, "Optimum placement of fixed and switched capacitors on primary distribution feeders," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 1, pp. 345–352, Jan. 1981.
- [7.7] M. H. Hamada, M. A. A. Wahab, A. M. El-Sayed, and H. A. Ramadan, "A proposed strategy for capacitor allocation in radial distribution feeders," presented at the 12th Int. Middle-East Power System Conf., MEPCON, Aswan, Egypt, 12-15 Mar., 2008, pp. 146-151.
- [7.8] S. F. Mekhamer, S. A. Soliman, M. A. Moustafa, and M. E. El-Hawary, "Application of fuzzy logic for reactive-power compensation of radial distribution feeders," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 18, no. 1, Feb. 2003.
- [7.9] M. Chis, M. M. A. Salama, and S. Jayaram, "Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 3, pp. 225–230, May 1997.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΩΝ

Α.1 ΔΙΚΤΥΟ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Πίνακας Α.1.1: Στοιχεία γραμμών του δικτύου του αναλυτικού παραδείγματος.

Αριθμός γραμμής	Από ζυγό (nl)	Προς ζυγό (nr)	R (ohm)	X (ohm)	1/2 B (ohm ⁻¹)	Κωδικός γραμμής
1	1	2	1,3531	1,3235	0	1
2	2	3	1,1702	1,1446	0	1
3	2	4	2,5573	1,7249	0	1

Πίνακας Α.1.2: Στοιχεία ζυγών του δικτύου του αναλυτικού παραδείγματος.

Αρ. ζυγού	Κωδικός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο		Παραγωγή				Έγχυση (kVAr)
					kW	kVAr	kW	kVAr	Qmin (kVAr)	Qmax (kVAr)	
1	1	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	11	0	44,1	142,8286	0	0	0	0	0
3	0	1	11	0	70	44,991	0	0	0	0	0
4	0	1	11	0	140	142,8286	0	0	0	0	0

Α.2 ΔΙΚΤΥΟ 15 ΖΥΓΩΝ [Α.1]

Πίνακας Α.2.1: Στοιχεία γραμμών του δικτύου 15 ζυγών.

Αριθμός γραμμής	Από ζυγό (nl)	Προς ζυγό (nr)	R (ohm)	X (ohm)	1/2 B (ohm ⁻¹)	Κωδικός γραμμής
1	1	2	1,3531	1,3235	0	1
2	2	3	1,1702	1,1446	0	1
3	3	4	0,8411	0,8227	0	1
4	4	5	1,5235	1,0276	0	1
5	2	9	2,0132	1,3579	0	1
6	9	10	1,6867	1,1377	0	1
7	2	6	2,5573	1,7249	0	1
8	6	7	1,0882	0,734	0	1
9	6	8	1,2514	0,8441	0	1
10	3	11	1,7955	1,2111	0	1
11	11	12	2,4485	1,6515	0	1
12	12	13	2,0132	1,3579	0	1
13	4	14	2,2308	1,5047	0	1
14	4	15	1,197	0,8074	0	1

Πίνακας Α.2.2: Στοιχεία ζυγών του δικτύου 15 ζυγών.

Αρ. ζυγού	Κωδικός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο		Παραγωγή				Έγχυση (kVAr)
					kW	kVAr	kW	kVAr	Qmin (kVAr)	Qmax (kVAr)	
1	1	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	11	0	44,1	44,991	0	0	0	0	0
3	0	1	11	0	70	71,4143	0	0	0	0	0
4	0	1	11	0	140	142,8286	0	0	0	0	0
5	0	1	11	0	44,1	44,991	0	0	0	0	0
6	0	1	11	0	140	142,8286	0	0	0	0	0
7	0	1	11	0	140	142,8286	0	0	0	0	0
8	0	1	11	0	70	71,4143	0	0	0	0	0
9	0	1	11	0	70	71,4143	0	0	0	0	0
10	0	1	11	0	44,1	44,991	0	0	0	0	0
11	0	1	11	0	140	142,8286	0	0	0	0	0
12	0	1	11	0	70	71,4143	0	0	0	0	0
13	0	1	11	0	44,1	44,991	0	0	0	0	0
14	0	1	11	0	70	71,4143	0	0	0	0	0
15	0	1	11	0	140	142,8286	0	0	0	0	0

A.3 ΠΡΩΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 10 ΖΥΓΩΝ [A.2]

Πίνακας A.3.1: Στοιχεία γραμμών του πρώτου δικτύου 10 ζυγών.

Αριθμός γραμμής	Από ζυγό (nl)	Προς ζυγό (nr)	R (ohm)	X (ohm)	1/2 B (ohm ⁻¹)	Κωδικός γραμμής
1	1	2	0,1233	0	0	1
2	2	3	0,2467	0	0	1
3	3	4	0,7463	0	0	1
4	4	5	0,6984	0	0	1
5	5	6	1,9831	0	0	1
6	6	7	0,9053	0	0	1
7	7	8	2,0552	0	0	1
8	8	9	4,7954	0	0	1
9	9	10	5,3434	0	0	1

Πίνακας A.3.2: Στοιχεία ζυγών του πρώτου δικτύου 10 ζυγών.

Αρ. ζυγού	Κωδικός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο		Παραγωγή				Έγχυση (kVAr)
					kW	kVAr	kW	kVAr	Qmin (kVAr)	Qmax (kVAr)	
1	1	1	23	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	23	0	0	460	0	0	0	0	0
3	0	1	23	0	0	340	0	0	0	0	0
4	0	1	23	0	0	446	0	0	0	0	0
5	0	1	23	0	0	1840	0	0	0	0	0
6	0	1	23	0	0	600	0	0	0	0	0
7	0	1	23	0	0	110	0	0	0	0	0
8	0	1	23	0	0	60	0	0	0	0	0
9	0	1	23	0	0	130	0	0	0	0	0
10	0	1	23	0	0	200	0	0	0	0	0

A.4 ΔΕΥΤΕΡΟ ΔΙΚΤΥΟ 10 ΖΥΓΩΝ [A.3]

Πίνακας A.4.1: Στοιχεία γραμμών του δεύτερου δικτύου 10 ζυγών.

Αριθμός γραμμής	Από ζυγό (nl)	Προς ζυγό (nr)	R (ohm)	X (ohm)	1/2 B (ohm ⁻¹)	Κωδικός γραμμής
1	1	2	0,1233	0,4127	0	1
2	2	3	0,014	0,6051	0	1
3	3	4	0,7463	1,205	0	1
4	4	5	0,6984	0,6084	0	1
5	5	6	1,9831	1,7276	0	1
6	6	7	0,9053	0,7886	0	1
7	7	8	2,0552	1,164	0	1
8	8	9	4,7953	2,716	0	1
9	9	10	5,3434	3,0264	0	1

Πίνακας A.4.2: Στοιχεία ζυγών του δεύτερου δικτύου 10 ζυγών.

Αρ. ζυγού	Κωδικός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο		Παραγωγή				Έγχυση (kVAr)
					kW	kVAr	kW	kVAr	Qmin (kVAr)	Qmax (kVAr)	
1	1	1	23	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	23	0	1840	460	0	0	0	0	0
3	0	1	23	0	980	340	0	0	0	0	0
4	0	1	23	0	1790	446	0	0	0	0	0
5	0	1	23	0	1598	1840	0	0	0	0	0
6	0	1	23	0	1610	600	0	0	0	0	0
7	0	1	23	0	780	110	0	0	0	0	0
8	0	1	23	0	1150	60	0	0	0	0	0
9	0	1	23	0	980	130	0	0	0	0	0
10	0	1	23	0	1640	200	0	0	0	0	0

Α.5 ΔΙΚΤΥΟ 34 ΖΥΓΩΝ [Α.4]

Πίνακας Α.5.1: Στοιχεία γραμμών του δικτύου 34 ζυγών.

Αριθμός γραμμής	Από ζυγό (nl)	Προς ζυγό (nr)	R (ohm)	X (ohm)	1/2 B (ohm ⁻¹)	Κωδικός γραμμής
1	1	2	0,117	0,048	0	1
2	2	3	0,1073	0,044	0	1
3	3	4	0,1645	0,0457	0	1
4	4	5	0,1495	0,0415	0	1
5	5	6	0,1495	0,0415	0	1
6	6	7	0,3144	0,054	0	1
7	7	8	0,2096	0,036	0	1
8	8	9	0,3144	0,054	0	1
9	9	10	0,2096	0,036	0	1
10	10	11	0,131	0,0225	0	1
11	11	12	0,1048	0,018	0	1
12	3	13	0,1572	0,027	0	1
13	13	14	0,2096	0,036	0	1
14	14	15	0,1048	0,018	0	1
15	15	16	0,0524	0,009	0	1
16	6	17	0,1794	0,0498	0	1
17	17	18	0,1645	0,0457	0	1
18	18	19	0,2079	0,0473	0	1
19	19	20	0,189	0,043	0	1
20	20	21	0,189	0,043	0	1
21	21	22	0,262	0,045	0	1
22	22	23	0,262	0,045	0	1
23	23	24	0,3144	0,054	0	1
24	24	25	0,2096	0,036	0	1
25	25	26	0,131	0,0225	0	1
26	26	27	0,1048	0,018	0	1
27	7	28	0,1572	0,027	0	1
28	28	29	0,1572	0,027	0	1
29	29	30	0,1572	0,027	0	1
30	10	31	0,1572	0,027	0	1
31	31	32	0,2096	0,036	0	1
32	32	33	0,1572	0,027	0	1
33	33	34	0,1048	0,018	0	1

Πίνακας Α.5.2: Στοιχεία ζυγών του δικτύου 34 ζυγών.

Αρ. ζυγού	Κωδικός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο		Παραγωγή				Έγχυση (kVAr)	
					kW	kVAr	kW	kVAr	Qmin (kVAr)	Qmax (kVAr)		
1	1	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
3	0	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
5	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
6	0	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
9	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
10	0	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
12	0	1	11	0	137	84	0	0	0	0	0	0
13	0	1	11	0	72	45	0	0	0	0	0	0
14	0	1	11	0	72	45	0	0	0	0	0	0
15	0	1	11	0	72	45	0	0	0	0	0	0
16	0	1	11	0	13,5	7,5	0	0	0	0	0	0
17	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
18	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
19	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
20	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
21	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
22	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
23	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
24	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
25	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
26	0	1	11	0	230	142,5	0	0	0	0	0	0
27	0	1	11	0	137	85	0	0	0	0	0	0
28	0	1	11	0	75	48	0	0	0	0	0	0
29	0	1	11	0	75	48	0	0	0	0	0	0
30	0	1	11	0	75	48	0	0	0	0	0	0
31	0	1	11	0	57	34,5	0	0	0	0	0	0
32	0	1	11	0	57	34,5	0	0	0	0	0	0
33	0	1	11	0	57	34,5	0	0	0	0	0	0
34	0	1	11	0	57	34,5	0	0	0	0	0	0

A.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [A.1] D. Das, D. P. Kothari, and A. Kalam, "Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 17, no. 5, pp. 335-346, 1995.
- [A.2] J. J. Grainger, and S. H. Lee, "Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses on distribution feeders," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 3, pp. 1105–1118, Mar. 1981.
- [A.3] S. H. Lee, and J. J. Grainger, "Optimum placement of fixed and switched capacitors on primary distribution feeders," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 1, pp. 345–352, Jan. 1981.
- [A.4] M. Chis, M. M. A. Salama, and S. Jayaram, "Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 3, pp. 225–230, May 1997.

