



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

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΑΣΥΜΜΕΤΡΑ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπυρίδων Χ. Παπαδόπουλος

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



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

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΑΣΥΜΜΕΤΡΑ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπυρίδων Χ. Παπαδόπουλος

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Οκτωβρίου 2011.

.....
Πάυλος Γεωργιάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

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

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

.....
Σπυρίδων Χ. Παπαδόπουλος

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

Copyright © Σπυρίδων Χ. Παπαδόπουλος, 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 τον συγγραφέα.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση ροής φορτίου ασύμμετρων ακτινικών δικτύων διανομής. Η ανάλυση ροής φορτίου είναι ένας από τους πιο θεμελιώδεις υπολογισμούς στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του είναι σημαντική για τη μελέτη ενός δικτύου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Στα ασύμμετρα δίκτυα διανομής, η μοντελοποίηση των στοιχείων του δικτύου πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη και τις τρεις φάσεις, καθώς η χρήση του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος δίνει πολύ προσεγγιστικά αποτελέσματα.

Για τη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος “backward and forward sweep”. Η μέθοδος αυτή είναι μια τροποποίηση της μεθόδου ανάλυσης των κλιμακωτών δικτύων της θεωρίας κυκλωμάτων. Η κύρια διαφορά είναι ότι ένα δίκτυο διανομής δεν είναι γραμμικό και επομένως ο αλγόριθμος πρέπει να είναι επαναληπτικός.

Στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκε λογισμικό με γραφικό περιβάλλον (GUI) σε περιβάλλον MATLAB, το οποίο εφαρμόστηκε στα πρότυπα δίκτυα 4, 13 και 123 ζυγών της IEEE. Επίσης σχεδιάστηκε δίκτυο 6 ζυγών με διακλαδώσεις και φορτία τριών διαφορετικών τύπων και πραγματοποιήθηκε, για εκπαιδευτικούς σκοπούς, βήμα προς βήμα επίδειξη του αλγορίθμου. Τέλος, τροποποιημένες εκδοχές των συστημάτων αναλύονται, συγκρίνονται μεταξύ τους και προτείνονται τρόποι επέκτασης της εργασίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ανάλυση ροής φορτίου, ασύμμετρα ακτινικά δίκτυα διανομής, γραμμές διανομής, μήτρα σύνθετης αντίστασης σειράς, μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας, αντισταθμιστής, ρυθμιστής διανομής, μετασχηματιστής υποβιβασμού, δεικτοδότηση δικτύου.

ABSTRACT

The scope of this thesis is the load flow analysis of unbalanced radial distribution systems. The load flow analysis is one of the most fundamental calculations in power systems and precision of the results is important for the study of a network in steady state. Due to the unbalanced loading of the system, modeling of network components was made without the use of the per phase equivalent, but considering all three phases.

For this particular analysis the “backward and forward sweep” method was used. This method is a modification of the ladder network from circuit theory. The main difference is that the distribution system is not linear and therefore the algorithm must be iterative.

In the present diploma thesis a software with graphical user interface (GUI) was developed using the MATLAB environment. This software was applied to 4, 13 and 123-bus test feeder cases of IEEE as well as to modified versions of the same cases. Furthermore, an additional 6-bus test case feeder was designed, which includes sublaterals and three different types of loads. Also, for educational purposes, a step by step execution of load flow is demonstrated for this particular test case. Results of each test case are presented and comparisons on the results are discussed. Finally, aspects on expanding the diploma thesis are proposed.

KEY WORDS

Power flow, load flow, unbalanced radial distribution system, distribution lines, shunt admittance matrix, series impedance matrix, indexing, compensator, regulator, concentric neutral, tape shielded, step down transformer.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2010-2011 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιλάκη, λέκτορα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της καθώς και τη πολύτιμη βοήθειά του και καθοδήγηση σε κάθε δυσκολία που προέκυπτε. Επίσης, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον αδερφό μου Νικόλαο Παπαδόπουλο για τη στήριξη που μου προσέφερε σε όλα τα φοιτητικά μου χρόνια καθώς και την Αγάθου Ποθητή και τους φίλους μου για την υπομονή τους κατά την εκπόνηση της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για τη σημαντική στήριξη και βοήθειά τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας	1
1.3	Ανάλυση Ροής Φορτίου	3
1.4	Δομή της εργασίας	3
1.5	Βιβλιογραφία	4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

2.1	Εισαγωγή	5
2.2	Ζυγοί και Κλάδοι Συστήματος	6
2.3	Γενικευμένο Μοντέλο Περιγραφής Δικτύου	7
2.4	Βιβλιογραφία	10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

3.1	Εισαγωγή	11
3.2	Φορτία	12
3.3	Πυκνωτές	18
3.4	Γραμμές διανομής	20
3.4.1	Μοντελοποίηση	20
3.4.2	Υπολογισμός μήτρας σύνθετων αντιστάσεων σειράς γραμμής	22
3.4.2.1	Εναέριες γραμμές διανομής	22
3.4.2.2	Υπόγειες γραμμές διανομής	23
3.4.3	Υπολογισμός μήτρας εγκάρσιων αγωγιμοτήτων γραμμής	27
3.4.3.1	Εναέριες γραμμές διανομής	27
3.4.3.2	Υπόγειες γραμμές διανομής	29
3.5	Μετασχηματιστές	30
3.6	Διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	34
3.7	Ρυθμιστές τάσης	35
3.8	Διακόπτες	38
3.9	Βιβλιογραφία	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ “BACK AND FORWARD SWEEP”

4.1	Εισαγωγή	41
4.2	Γενική περιγραφή αλγορίθμου "Back and Forward Sweep"	43

4.2.1	Βήματα Backward Sweep	43
4.2.2	Βήματα Forward Sweep	48
4.3	Τροποποιημένες Μέθοδοι	51
4.4	Βιβλιογραφία	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ BFS

5.1	Δεδομένα του υπό εξέταση συστήματος	53
5.2	Αναλυτικοί υπολογισμοί	56
5.2.1	Υπολογισμός παραμέτρων δικτύου	56
5.2.1.1	Υπολογισμός παραμέτρων γραμμής	56
5.2.1.2	Υπολογισμός παραμέτρων μετασχηματιστή	59
5.2.2	Υπολογισμός RBF σειράς διάσχισης του δικτύου	60
5.2.3	Αρχικοποίηση των τάσεων	60
5.2.4	Επανάληψη 1	61
5.2.4.1	Backward Sweep	61
5.2.4.2	Υπολογισμός σφάλματος	68
5.2.4.3	Forward Sweep	68
5.2.5	Επανάληψη 2	70
5.2.5.1	Backward Sweep	70
5.2.5.2	Υπολογισμός σφάλματος	75
5.2.5.3	Forward Sweep	75
5.2.6	Επανάληψη 3	77
5.2.6.1	Backward Sweep	77
5.2.6.2	Υπολογισμός σφάλματος	81
5.2.6.3	Forward Sweep	82
5.2.7	Επανάληψη 4	83
5.2.7.1	Backward Sweep	83
5.2.7.2	Υπολογισμός σφάλματος	88
5.3	Βιβλιογραφία	88

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΚΤΙΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

6.1	Εισαγωγή	89
6.2	Χαρακτηριστικά λογισμικού για ανάλυση ροής ισχύος	90
6.2.1	Περιβάλλον ανάπτυξης και απαιτήσεις συστήματος	90
6.2.2	Λειτουργίες και δομή λογισμικού	90

6.2.2.1	Γραφικό περιβάλλον	90
6.2.2.2	Εισαγωγή δεδομένων	96
6.2.2.3	Μελέτη και ανάλυση αποτελεσμάτων	105
6.2.2.4	Εξαγωγή αποτελεσμάτων	107
6.2.2.5	Συναρτήσεις λογισμικού	110
6.2.2.6	Απόδοση και υπολογιστικοί πόροι	116
6.3	Μελλοντικές επεκτάσεις λογισμικού	117
6.4	Βιβλιογραφία	118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

7.1	Εισαγωγή	119
7.2	Εφαρμογή στο δίκτυο 4 ζυγών της IEEE	120
7.2.1	Δεδομένα του συστήματος	120
7.2.2	Αποτελέσματα	121
7.2.3	Τροποποιημένες εκδοχές του συστήματος	123
7.2.4	Αποτελέσματα τροποποιημένων εκδοχών	124
7.2.5	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	126
7.3	Εφαρμογή στο δίκτυο των 13 ζυγών της IEEE	128
7.3.1	Δεδομένα του συστήματος	128
7.3.2	Αποτελέσματα	132
7.3.3	Τροποποιημένη εκδοχή του συστήματος	139
7.3.4	Αποτελέσματα τροποποιημένης εκδοχής	139
7.3.5	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	143
7.4	Εφαρμογή στο δίκτυο των 123 ζυγών της IEEE	144
7.4.1	Δεδομένα του συστήματος	144
7.4.2	Αποτελέσματα	155
7.4.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	180
7.5	Βιβλιογραφία	183

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	185
8.2	Επεκτάσεις της εργασίας	188

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σύγχρονη κοινωνία η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται αυτονόητη στην πλειονότητα των ανεπτυγμένων ή υπό ανάπτυξη κρατών. Η ηλεκτρική ενέργεια έρχεται στο χώρο του καταναλωτή με την επονομαζόμενη «καθαρή» μορφή, είναι άμεσα διαθέσιμη οποτεδήποτε και για όση ώρα χρειαστεί και μεταφέρεται εύκολα και αποδοτικά για μεγάλες αποστάσεις, ακόμα και στα πιο απομακρυσμένα σημεία.

Σπάνια όμως γίνεται αντιληπτό ότι για να έρθει μέχρι τον καταναλωτή η ενέργεια αυτή έχουν μεσολαβήσει κάποια απαραίτητα στάδια. Οι σταθμοί παραγωγής αναλαμβάνουν την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή αυτή μπορεί να προέρχεται από εντελώς διαφορετικού τύπου σταθμούς παραγωγής. Οι ατμοηλεκτρικοί, οι υδροηλεκτρικοί, οι φωτοβολταϊκοί, οι πυρηνικοί σταθμοί και τα αιολικά πάρκα είναι μόνο μερικά παραδείγματα των πολλών διαφορετικών τρόπων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη συνέχεια το δίκτυ μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αναλαμβάνει να κάνει τη μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Η συγκεκριμένη μεταφορά πραγματοποιείται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς, από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής. Το στάδιο της μεταφοράς έχει υψηλές τιμές τάσης, καθώς με αυτό τον τρόπο καταφέρνει να έχει τις μικρότερες απώλειες κατά μήκος των μεγάλου μήκους των γραμμών του.

Τέλος, σειρά αναλαμβάνει το δίκτυο διανομής το οποίο επιτελεί το έργο της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Μάλιστα στη σύγχρονη εποχή της πράσινης ενέργειας, μέρος της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται και μέσα από στοιχεία που είναι εγκατεστημένα στο χώρο του καταναλωτή. Για παράδειγμα ένας καταναλωτής με εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να καλύπτει μέρος των αναγκών του και ενδεχομένως να εισάγει και επιπλέον ισχύ στο σύστημα (διεσπαρμένη παραγωγή).

Ο ρόλος του ενεργειακού ηλεκτρολόγου μηχανικού είναι να μελετά, να επεκτείνει, να βελτιστοποιεί και να συντηρεί όλες τις συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ), κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιφέρει την ασφαλέστερη, αποδοτικότερη και οικονομικότερη λειτουργία του συνόλου του συστήματος.

1.2 ΔΙΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων αυτή φτάνει έως τους καταναλωτές και τους υποσταθμούς, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς.

Τα δίκτυα διανομής φθάνουν μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας. Μετά τον μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, η οποία περιλαμβάνει το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης. Έχει βέβαια επικρατήσει με τον όρο δίκτυο διανομής να συμπεριλαμβάνεται και η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση και επομένως και η διανομή και η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας [1.1].

Η διάκριση μεταξύ μεταφοράς και διανομής διαφέρει από χώρα σε χώρα. Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η παράλληλη τεχνολογική ανάπτυξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση υψηλότερων τάσεων για τη διανομή με αποτέλεσμα δίκτυα που παλαιότερα ανήκαν στα δίκτυα μεταφοράς, να χαρακτηρίζονται πλέον ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής. Σε κάθε περίπτωση το επίπεδο της τάσης των δικτύων διανομής είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο των δικτύων μεταφοράς και αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο οι απώλειες ενέργειας της διανομής είναι περίπου διπλάσιες από τις απώλειες της μεταφοράς [1.1].

Η κατασκευαστική διαμόρφωση των δικτύων διανομής συνδέεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δόμησης των πόλεων και, γενικότερα, του τρόπου χωροταξικής διαμόρφωσης κάθε χώρας. Αυτό διαπιστώνεται από το γεγονός ότι τα δίκτυα διανομής κάθε χώρας έχουν κατά γενικό κανόνα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, σε αντίθεση με τα δίκτυα μεταφοράς που είναι, συνήθως, διεθνώς όμοια. Σε κάθε περίπτωση, κατηγοριοποιούνται γενικότερα με κριτήριο τον τρόπο κατασκευής τους σε υπόγεια και εναέρια. Τα εναέρια δίκτυα είναι φθηνότερα στην κατασκευή τους και έχουν ταχύτερη αποκατάσταση βλαβών, ενώ τα υπόγεια έχουν καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα και δεν παραβιάζουν τους κανόνες ασφάλειας και τις αποστάσεις που πρέπει να τηρούνται, όπως συνήθως συμβαίνει στα εναέρια.

Τα δίκτυα διανομής αποτελούνται από δύο μέρη με βάση το επίπεδο της παρεχόμενης τάσης:

- Διανομή μέσης τάσης (Μ.Τ.) ή αλλιώς πρωτεύουσα διανομή.
- Διανομή χαμηλής τάσης (Χ.Τ.) ή αλλιώς δευτερεύουσα διανομή.

Κατάλληλοι μετασχηματιστές φροντίζουν να μετατρέπουν το επίπεδο τάσης από τη μέση στη χαμηλή ώστε να εξυπηρετούνται οι αντίστοιχοι καταναλωτές (μετασχηματιστές διανομής).

Τα δίκτυα διανομής είναι συνήθως βροχοειδούς δομής, αλλά έχουν ανοιχτούς τους κατάλληλους διακόπτες ώστε να λειτουργούν ως ακτινικά δίκτυα. Η βροχοειδής μορφή επιτρέπει οικονομία των γραμμών για τον ίδιο βαθμό εξυπηρέτησης και εναλλακτική τροφοδότηση σε περίπτωση βλαβών, ενώ η ακτινική λειτουργία επιβάλλεται για την απλότητα της προστασίας και της ροής της ενέργειας στα δίκτυα αυτά [1.1]. Φυσικά δεν αποκλείεται η ύπαρξη αμιγώς βροχοειδών ή αντίστοιχα αμιγώς ακτινικών δικτύων στη δομή και στη λειτουργία.

Τέλος τα δίκτυα αυτά, όπως και το σύνολο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, είναι τριφασικά. Αυτό σημαίνει ότι διαφορετικοί καταναλωτές, συνδεδεμένοι σε διαφορετικές φάσεις (μονοφασικές παροχές) προκαλούν ασύμμετρη φόρτιση των φάσεων. Δεδομένου του αριθμού των καταναλωτών, η ασύμμετρη αυτή φόρτιση δημιουργεί, εύλογα, την ανάγκη ανάπτυξης μεθόδων ανάλυσης τέτοιου είδους δικτύων, που πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι διαφορετικές με την ανά φάση ανάλυση που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μεταφοράς.

1.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Ο όρος ανάλυση ροής φορτίου αναφέρεται στον υπολογισμό κατά μέτρο και γωνία των τάσεων, των ρευμάτων και των ροών ενεργού και αέργου ισχύος στα διάφορα σημεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από πραγματικές ή υποτιθέμενες συνθήκες λειτουργίας. Η ανάλυση αυτή αφορά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και όχι τυχόν μεταβατικά φαινόμενα τα οποία εμφανίζονται κατά την σύνδεση ή την αποσύνδεση στοιχείων του δικτύου, είτε κατά τη διάρκεια τριφασικών βραχυκυκλωμάτων [1.2].

Η μελέτη αυτή είναι αναγκαία τόσο κατά την καθημερινή λειτουργία ενός δικτύου, όσο και για τις μελέτες επέκτασης και ανάπτυξης του συστήματος. Η ανάλυση των ροών φορτίου χρειάζεται επίσης για να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις από τις διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, την εισαγωγή νέων φορτίων, την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής, την εύρεση της κατάλληλης θέσης για την τοποθέτηση πυκνωτών αντιστάθμισης ή ρυθμιστών, την κατασκευή νέων γραμμών, κλπ [1.2].

Είναι λοιπόν θεμελιώδης υπολογισμός στα περισσότερα προγράμματα βελτιστοποίησης και ανάλυσης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και επομένως η υποστήριξη της συγκεκριμένης διαδικασίας από κάποιο λογισμικό κρίνεται ως επιβεβλημένη.

Οι αλγόριθμοι ανάλυσης ροής φορτίου είναι στην πλειονότητά τους επαναληπτικής φύσεως και προσεγγίζουν συνήθως τα πραγματικά αποτελέσματα σε ικανοποιητικά επίπεδα της τάξεως του 0.001 p.u. και χαμηλότερα. Επίσης η εκτέλεσή τους γίνεται συνήθως σε σύντομο χρονικό διάστημα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ένα σύστημα ελέγχου ώστε να λάβει την κατάλληλη απόφαση σε πραγματικό χρόνο για επιβολή αλλαγών στο δίκτυο με σκοπό τη βέλτιστη οικονομικά, λειτουργικά και σε θέματα ασφαλείας, λειτουργία.

Στα δίκτυα μεταφοράς υπάρχει ο αλγόριθμος Newton Raphson ο οποίος είναι σχετικά αργός για στην ανάλυση μεγάλων δικτύων. Μια τροποποιημένη εκδοχή του, η ταχεία αποζευγμένη μέθοδος ροής φορτίου, επιλύει τα προβλήματα αποδοτικότητας και με σχετικά καλή προσέγγιση έχει επικρατήσει στα λογισμικά ανάλυσης ροής φορτίου των δικτύων μεταφοράς. Η διαφορετική τιμή όμως στα δίκτυα διανομής του λόγου R/X των γραμμών σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή των δικτύων μεταφοράς, δεν επιτρέπει τη σχετική προσέγγιση [1.3]. Επιπλέον, η ανάγκη δημιουργίας μιας μεθόδου που να εκμεταλλεύεται την ακτινική τοπολογία και να δίνει ταχύτερα αποτελέσματα σε μεγάλο μεγέθους δίκτυα, οδήγησε στη δημιουργία μεθόδων ροής φορτίου αποκλειστικά για τα ακτινικά δίκτυα.

Επίσης στα δίκτυα μεταφοράς η ανάλυση γίνεται συνήθως στο ανά φάση ισοδύναμο μιας και σε αυτά παρουσιάζεται συμμετρία στη φόρτιση των φάσεων. Αντίθετα στα δίκτυα διανομής υπάρχει στις περισσότερες των περιπτώσεων ασύμμετρη φόρτιση των γραμμών και επομένως παρουσιάζεται η ανάγκη δημιουργίας αλγορίθμου που να αναλύει τα συγκεκριμένα δίκτυα, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τη φόρτιση της κάθε φάσης, αλλά και το πώς η φόρτιση της κάθε μιας φάσης επηρεάζει τη φόρτιση της άλλης και ως εκ τούτου ολόκληρο το δίκτυο.

Αυτό ακριβώς το έργο πρόκειται να αναλάβει να φέρει εις πέρας η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν.

1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση ροής φορτίου σε ασύμμετρα ακτινικά δίκτυα διανομής. Αναλυτικότερα, η δομή της εργασίας οργανώνεται σε οκτώ κεφάλαια:

- Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται η δομή των ακτινικών δικτύων διανομής και εισάγεται η έννοια της δεικτοδότησης στα πλαίσια του μοντέλου περιγραφής του δικτύου. Το κεφάλαιο αυτό είναι σημαντικό για την κατανόηση του τρόπου διάσχισης ενός δικτύου στα πλαίσια του αλγορίθμου ροής φορτίου που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.
- Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύονται όλα τα στοιχεία του δικτύου και παρατίθενται οι εξισώσεις που τα διέπουν. Οι εξισώσεις αυτές χαρακτηρίζονται θεμελιώδεις για την ανάλυση ροής φορτίου.
- Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται η μέθοδος ανάλυσης ροής φορτίου ακτινικών δικτύων διανομής “Backward and Forward Sweep” η οποία θα χρησιμοποιηθεί στο λογισμικό που θα σχεδιαστεί. Επιπλέον παρατίθεται ο αλγόριθμος που περιγράφει τη μέθοδο αυτή.
- Στο **Κεφάλαιο 5** δίνεται ένα παράδειγμα εκτέλεσης βήμα-βήμα του αλγορίθμου σε ένα δίκτυο που εμφανίζεται πρώτη φορά στη βιβλιογραφία και αποτελείται από 6 κλάδους, 4 διακλαδώσεις, εγκάρσιο πυκνωτή αντιστάθμισης αέργου ισχύος και 3 διαφορετικά είδη φορτίων. Η προσομοίωση αυτή πρόκειται να βοηθήσει ιδιαίτερα στην κατασκευή παρόμοιων αλγορίθμων μιας και με αυτό το παράδειγμα μπορεί να πραγματοποιείται πιο εύκολα η αποσφαλμάτωση (debugging), με γρήγορο εντοπισμό των λαθών.
- Στο **Κεφάλαιο 6** περιγράφεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής. Το λογισμικό δημιουργήθηκε σε περιβάλλον MATLAB και συνοδεύεται από γραφικό περιβάλλον (GUI) με το οποίο ο χρήστης επικοινωνεί με το πρόγραμμα. Επίσης αναφέρονται στοιχεία απόδοσης και υπολογιστικών πόρων που καταλαμβάνει το συγκεκριμένο λογισμικό.
- Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται έλεγχος του λογισμικού με την προσομοίωση των πρότυπων δικτύων 4, 13 και 123 ζυγών της IEEE. Επίσης στις δύο πρώτες κατηγορίες παρουσιάζονται και τροποποιημένες μέθοδοι με τα αποτελέσματά τους, γεγονός το οποίο βοηθά αρκετά στην εξαγωγή επιπλέον συμπερασμάτων.
- Στο **Κεφάλαιο 8** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας, παρουσιάζονται τα γενικότερα συμπεράσματα και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επέκτασής της.

1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001, σελ. 1-21.
- [1.2] Β. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος Ι*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985, σελ. 126-130.
- [1.3] R. Zimmerman, *Comprehensive Distribution Power Flow: Modeling, Formulation, Solution Algorithms and Analysis*, Ph.D. Dissertation, Cornell University, Jan 1995, pp. 1-7.

ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα δίκτυα διανομής που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα ακτινικά δίκτυα διανομής. Τα δίκτυα αυτά έχουν μια κεντρική τροφοδοσία (main feeder), από την οποία και διοχετεύεται στους υπόλοιπους ζυγούς του συστήματος η απαιτούμενη για τη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρική ενέργεια.

Η τοπολογία τους θα μπορούσε να απλοποιηθεί στην παρομοίωσή της με ένα δέντρο. Ο κορμός του δέντρου είναι η κύρια και μοναδική τροφοδότηση του υπόλοιπου συστήματος. Όλα τα φύλλα του τροφοδοτούνται αποκλειστικά από τον κορμό του δέντρου, διαμέσου των αντίστοιχων κλάδων [2.1].

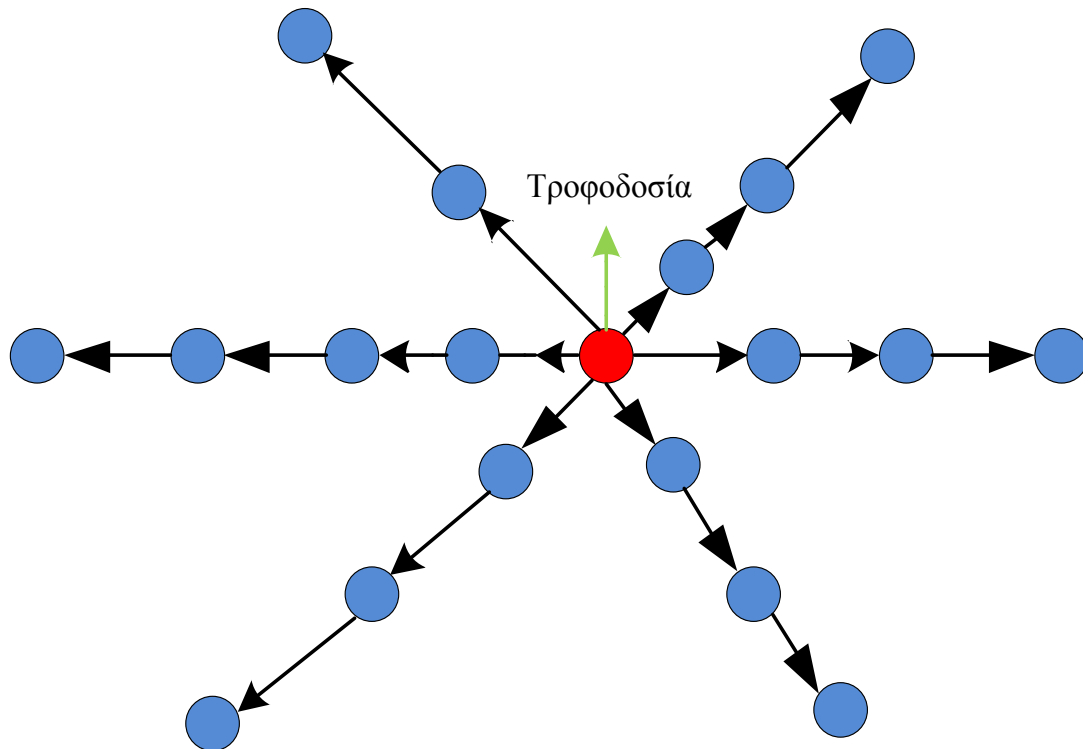
Έτσι και στα ηλεκτρικά ακτινικά δίκτυα διανομής, κορμός ονομάζεται το κύριο τμήμα του δικτύου από το οποίο διέρχεται το σύνολο της ισχύος ώστε να καταλήξει στους υπόλοιπους υποκλάδους. Ομοίως, η ροή ισχύος και επομένως και η κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι συνήθως μονόπλευρη και πραγματοποιείται μόνο από το κορμό στους υπόλοιπους κλάδους. Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση της διοχέτευσης της πλεονάζουσας ισχύος από συμπαραγωγό γεννήτρια που είναι εγκατεστημένη σε ζυγό του συστήματος [2.2].

Επίσης οι κλάδοι του δικτύου δεν σχηματίζουν βρόχους αλλά διαδίδονται ακτινικά από την κεντρική τροφοδοσία προς τα υπόλοιπα σημεία του δικτύου. Σε αυτό τον τρόπο σχεδιασμού του δικτύου οφείλεται και ο χαρακτηρισμός «ακτινικό».

Φυσικά, παρότι η ακτινική μορφή των δικτύων υπερτερεί οικονομικά έναντι των περιπτώσεων ύπαρξης πολλαπλών διαδρομών για την τροφοδότηση των φορτίων (π.χ. βροχοειδή συστήματα), αντιμετωπίζει προβλήματα σε θέματα αξιοπιστίας και αυτό διότι μια βλάβη στο κεντρικό τροφοδότη οδηγεί στην αποσύνδεση από την τροφοδοσία του συνόλου του συστήματος. Για αυτό το λόγο σε συστήματα που είναι δύσκολη η επιδιόρθωση, όπως τα υπόγεια δίκτυα διανομής, είτε επιλέγονται βροχοειδή δίκτυα διανομής, είτε εγκαθίστανται με χειροκίνητους ή αυτόματους διακόπτες διαθέσιμες εναλλακτικές τροφοδοτήσεις, οι οποίες διατηρούν την ακτινική φύση του δικτύου [2.4].

Λαμβάνοντας βέβαια υπόψιν πως το κόστος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή ενός δικτύου, παρατηρείται πως επί του συνόλου του συστήματος διανομής και κυρίως στα εναέρια δίκτυα, εμφανίζεται σε μεγάλο ποσοστό η ακτινική τοπολογία.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η δομή ενός συστήματος με ακτινική τοπολογία και στο κέντρο του έχει σημειωθεί ο τροφοδότης του δικτύου. Παρατηρείται εύκολα η ροή της ισχύος από τον τροφοδότη (feeder) προς τους υπόλοιπους ζυγούς του συστήματος καθώς επίσης και η παντελής απουσία βρόχων.



Σχήμα 2.1: Σχεδιάγραμμα τοπολογίας ενός ακτινικού δικτύου.

Να σημειωθεί ότι η ανάλυση και η περιγραφή της τοπολογίας ενός δικτύου, είναι ένα απαραίτητο στάδιο για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η ανάλυση ροής φορτίου. Ως εκ τούτου κρίνεται αναγκαία η εύρεση μιας γενικευμένης περιγραφής ούτως ώστε να μπορεί να εισάγεται σε ένα πρόγραμμα η σειρά εμφάνισης των ζυγών του συστήματος, οι κλάδοι που τους διασυνδέουν και όπου υπάρχουν διακλαδώσεις τα ονόματα των ζυγών που εμφανίζονται πρώτοι στη διακλάδωση.

Πριν παρουσιαστεί όμως αυτή η μεθοδολογία θα χρειαστεί να οριστούν οι έννοιες των ζυγών και των κλάδων σε ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

2.2 ΖΥΓΟΙ ΚΑΙ ΚΛΑΔΟΙ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η τοπολογία των δικτύων μπορεί πολύ εύκολα να περιγραφεί σε αναλογία με τα δέντρα. Σε ένα γενεαλογικό δέντρο οι πρόγονοι δημιουργούν απογόνους και η σύνδεσή τους στο αντίστοιχο δέντρο γίνεται με τη χρονολογική μετάβαση και συμβολίζεται με τον κλάδο.

Αντίστοιχα, σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ισχύος χαμηλής τάσης συναντώνται οι κόμβοι και οι κλάδοι. Οι κλάδοι αποτελούν τμήματα του κυκλώματος (πηγές τάσης, αντίσταση, πυκνωτές, μετασχηματιστές, γραμμές, κ.α.) και οι κόμβοι αποτελούν τα σημεία στα οποία ενώνονται δύο κλάδοι. Ομοίως, στα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας το ρόλο των κόμβων διαδραματίζουν οι ζυγοί και φυσικά τη διασύνδεσή τους υλοποιούν οι κλάδοι. Οι κλάδοι σε ένα σύστημα διανομής μπορούν να είναι τα ακόλουθα στοιχεία:

- Γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
- Μετασχηματιστές τάσης
- Ρυθμιστές τάσης
- Διακόπτες

Μάλιστα η παρουσία ενός κλάδου δεν είναι ανάγκη να περιλαμβάνει μόνο μια κατηγορία εκ των στοιχείων που περιγράφηκαν, αλλά μπορεί να είναι συνδυασμός αυτών. Για παράδειγμα συνηθίζεται στα προς εξέταση συστήματα ανάμεσα στον πρώτο και στο δεύτερο ζυγό να παρεμβάλλεται ένας ρυθμιστής και μία γραμμή διανομής συνδεδεμένοι σε σειρά.

Η περιγραφή της συνδεσμολογίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου και των αντίστοιχων κλάδων που τους διασυνδέουν, είναι ένα αντικείμενο που αφορά τη θεωρία των δέντρων εν προκειμένω, αλλά και τη θεωρία των γράφων γενικότερα. Με τη βοήθεια αυτών των θεωριών είναι δυνατό να διασχίζονται στους επαναληπτικούς αλγορίθμους διαδοχικά όλοι οι ζυγοί και να αποθηκεύονται οι ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τον κάθε ζυγό ή τον κάθε κλάδο.

Επίσης, οι ιδιότητες των δέντρων, δίνουν τη δυνατότητα να διασχίζεται το δίκτυο με τεχνικές όπως η ανάστροφη κατά πλάτος διάσχιση (RBF-Reverse Breadth First), η οποία είναι απαραίτητη σε αρκετούς αλγορίθμους [2.1].

Στην Ενότητα 2.3 θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο καταχωρείται η τοπολογία σε κατάλληλη μορφή ώστε να είναι δυνατή η διάσχισή της και η εισαγωγή του δικτύου σε επαναληπτικούς αλγορίθμους.

2.3 ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

Για να είναι δυνατή η γενίκευση του τρόπου εισαγωγής της τοπολογίας ενός δικτύου, θα πρέπει να δημιουργηθεί μια δομή η οποία θα περιέχει τις βασικές πληροφορίες (building block) που απαιτούνται να δίνονται για κάθε ζυγό. Στη συνέχεια θα πρέπει να γίνει η απαραίτητη δεικτοδότηση (indexing) έτσι ώστε να μπορεί να διασχίζεται το εκάστοτε δίκτυο κατά τη συγκεκριμένη σειρά που απαιτεί ο κατά περίπτωση εφαρμοζόμενος αλγόριθμος [2.2].

Για να μπορεί ένας αλγόριθμος να διαβάσει την πλήρη περιγραφή της τοπολογίας του συστήματος, απαιτείται από το χρήστη να εισάγει:

- Το όνομα του ζυγού από τον οποίο προήλθε ο τρέχον ζυγός.
- Το όνομα του ζυγού που ακολουθεί στον ίδιο κλάδο.
- Τον αριθμό των υποκλάδων που ξεκινούν από το συγκεκριμένο ζυγό.
- Τα ονόματα των ζυγών που συνδέονται άμεσα με το ζυγό και δεν ανήκουν στον ίδιο κλάδο με αυτόν.

Η έννοια του κλάδου και του υποκλάδου γίνεται εύκολα αντιληπτή εάν μελετηθεί η διάσχιση ενός δέντρου. Με αφετηρία τον κορμό ενός δέντρου και καθώς διατρέχονται οι ζυγοί του, παρατηρείται ότι σε μερικούς ζυγούς εμφανίζονται διακλαδώσεις. Οι κλάδοι στους οποίους διασπάται ο κορμός αποτελούν τους υποκλάδους του. Με τη σειρά τους, οι υποκλάδοι αυτοί, μπορούν αργότερα να χωριστούν σε περισσότερους κλάδους. Έτσι δημιουργούνται διασπάσεις σε δύο, τρία ή και περισσότερα επίπεδα σε ένα ζυγό ενός κλάδου.

Είναι λοιπόν απαραίτητο να εισαχθεί μέθοδος δεικτοδότησης του εκάστοτε ζυγού, που θα του προσδίδει ένα μοναδικό αναγνωριστικό και ταυτόχρονα θα μπορεί να συσχετίζει τη δική του πληροφορία με τους άμεσα συνδεδεμένους με αυτόν ζυγούς.

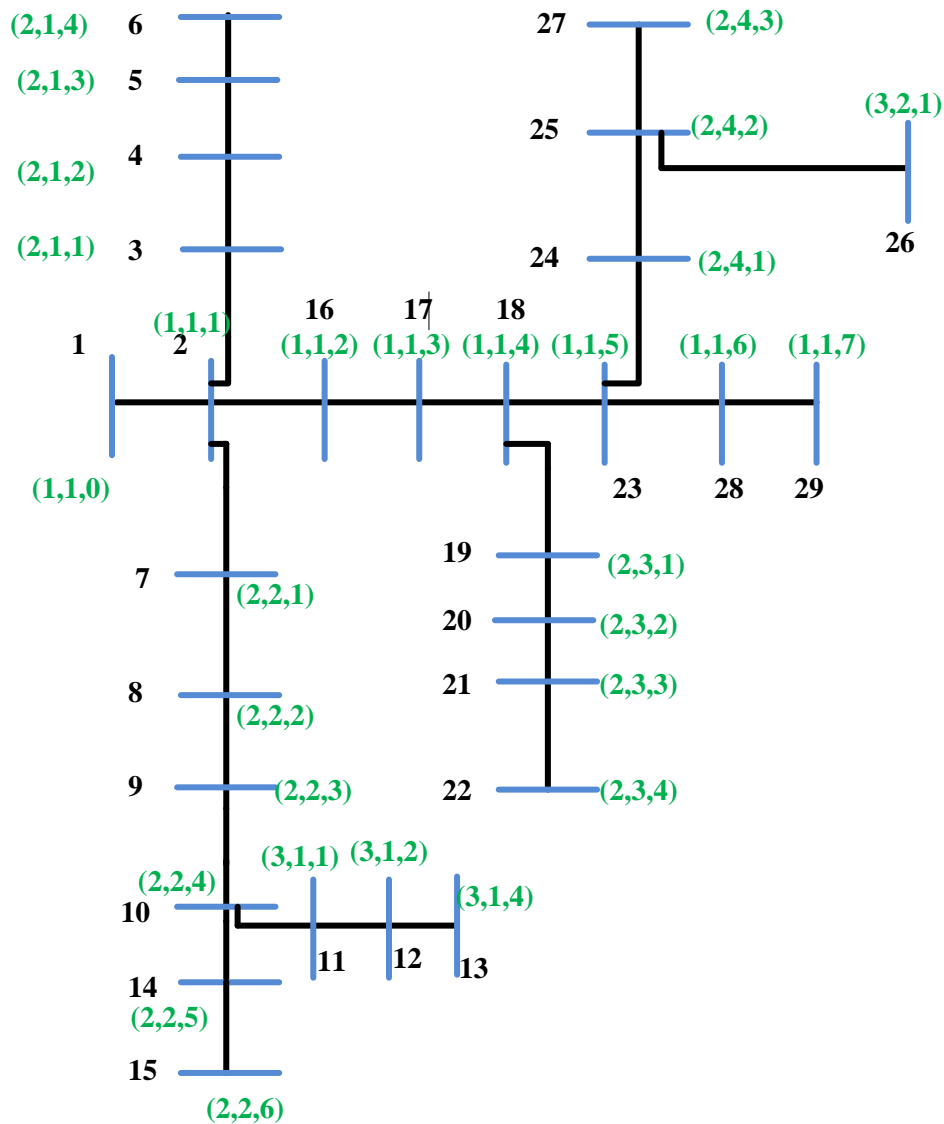
Αυτό το οποίο τελικά απαιτείται είναι μια τριάδα δεικτών για τον κάθε ζυγό, η (l,m,n) :

- ✓ Ο δείκτης l δηλώνει το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται ο κάθε ζυγός. Για παράδειγμα εφόσον βρίσκεται στον κορμό έχει την τιμή 1, ενώ εάν βρίσκεται σε άμεση διακλάδωση του κορμού, θεωρείται ότι ανήκει στο επίπεδο 2.
- ✓ Ο δείκτης m διαχωρίζει δύο διαφορετικούς υποκλάδους του ίδιου επιπέδου μεταξύ τους, ώστε να συνεχίζει να είναι μοναδική η δεικτοδότηση και να έχει ως εκ τούτου νόημα η αναφορά με αυτή. Για παράδειγμα, δύο υποκλάδοι που ξεκινούν από τον κορμό θα έχουν τον ίδιο δείκτη l ίσο με δύο. Επομένως οι πρώτοι ζυγοί των κλάδων αυτών δεν θα μπορούσαν να διαχωριστούν και δεν θα ήταν μοναδική η αναφορά με βάση τους δείκτες. Έτσι, στον πρώτο υποκλάδο τέτοιου επιπέδου που συναντάται αντιστοιχίζεται δείκτης $m=1$, στο δεύτερο $m=2$ κλπ.
- ✓ Ο δείκτης n χρησιμοποιείται για να δεικτοδοτήσει τους ζυγούς που έχουν ίδιο l , m , και επομένως ανήκουν στον ίδιο κλάδο. Ο δείκτης αυτός είναι φανερό πως θα αυξάνεται καθώς προχωρά η διάσχιση του δικτύου επάνω σε ένα κλάδο. Ο πρώτος ζυγός του κορμού έχει πάντα $n=0$, ενώ οι πρώτοι ζυγοί των υπολοίπων υποκλάδων έχουν πάντα $n=1$.

Ένα εύλογο ερώτημα το οποίο τίθεται συνήθως, είναι με ποιο κριτήριο γίνεται ο διαχωρισμός σε μια διακλάδωση για το ποιος θα θεωρηθεί ότι είναι τμήμα του τρέχοντος κλάδου και ποιος ότι είναι ο υποκλάδος. Εφόσον κάτι τέτοιο δεν καθορίζεται από το ίδιο το πρόβλημα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια ότι η μεγαλύτερη ισχύς ανήκει στον κύριο κλάδο και η μικρότερη στον υποκλάδο, είτε ότι η πιο μεγάλη, σε μήκος ή σε αριθμό ζυγών, διαδρομή ανήκει στον κύριο κλάδο. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή αυτή δεν θα διαφοροποιήσει σημαντικά τα αποτελέσματα του αλγορίθμου.

Τέλος, ο τρόπος με τον οποίο εισάγει τα δεδομένα ο χρήστης μπορεί να μεταβάλει τις τιμές του δείκτη m , ανάλογα με τη σειρά που καταχώρησε τον εκάστοτε ζυγό. Παρότι κάτι τέτοιο δεν έχει κανένα σοβαρό αντίκτυπο στην εφαρμογή των αλγορίθμων, συνηθίζεται η επιλογή του επόμενου προς καταχώρηση ζυγού να γίνεται με κριτήριο τη διάσχιση όλων των υποκλάδων ενός ζυγού πριν τη συνέχιση στον επόμενο ζυγό του ίδιου κλάδου.

Στο Σχήμα 2.2 παρατίθεται ένα παράδειγμα ενός δικτύου διανομής 29 ζυγών. Η αρίθμηση των ζυγών έχει γίνει με βάση τη σειρά που προσπελάστηκε για να γίνει η καταχώρησή τους στη τοπολογία του δικτύου, σύμφωνα με τα ανωτέρω που περιγράφηκαν. Επίσης με βάση αυτή τη τοπολογία φαίνονται μέσα σε παρένθεση οι δείκτες (l,m,n) για το συγκεκριμένο δίκτυο.



Σχήμα 2.2: Δεικτοδότηση δικτύου διανομής 29 ζυγών.

Από την τριάδα δεικτών που εισήχθησαν, είναι δυνατόν να απαντηθεί με ποια σειρά πρέπει να προσπελαστούν οι κλάδοι ώστε να πραγματοποιηθεί η RBF (Reverse Breadth First-Ανάστροφη κατά Πλάτος) διάσχιση του εν λόγω δικτύου. Οι ζυγοί σε αυτή τη διάσχιση επιλέγονται ξεκινώντας από το τέλος των κλάδων που έχουν κατά σειρά προτεραιότητας το μεγαλύτερο l , το μεγαλύτερο m και τέλος το μεγαλύτερο n , ώστε να γίνει διάσχιση των αντίστοιχων κλάδων από το τέλος τους μέχρι την αρχή τους.

Έτσι παρατηρείται ότι η RBF σειρά διάσχισης αποτελείται κατά σειρά από τον κλάδο του ζυγού 26, του ζυγού 13, του ζυγού 27, του ζυγού 22, του ζυγού 15, του ζυγού 16 και του ζυγού 29. Αντίθετα, η BF (Breadth First) διάσχιση περιλαμβάνει τους κλάδους των αντίστοιχων ζυγών με αντίστροφη όμως σειρά.

Αυτοί οι τρόποι διάσχισης ήταν αναγκαίο να οριστούν μιας και θα χρειαστούν σε επόμενα κεφάλαια που θα γίνεται αντίστοιχη διάσχιση του δικτύου σε κάθε επανάληψη.

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Ν. Μισυρλής, *Δομές Δεδομένων με C*, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2002, σελ. 213-219.
- [2.2] R. D. Zimmerman, "Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 4, pp. 2046-2048, Nov. 1995.
- [2.3] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001, σελ. 1-21.
- [2.4] Μ. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος Ι*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1994, σελ. 30-35.

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε κάθε πρόβλημα στο οποίο χρησιμοποιούνται μαθηματικά και μέθοδοι αριθμητικής ανάλυσης ώστε να αναλυθεί ένα φυσικό σύστημα, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι τόσο ακριβή όσο και τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται. Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η μέθοδος ανάλυσης ροής φορτίου είναι χρήσιμη μόνο εφόσον παρέχει αποτελέσματα που ανταποκρίνονται στις τιμές που υπάρχουν στα πραγματικά συστήματα. Επομένως, είναι επιθυμητό τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται να έχουν την καλύτερη δυνατή ακρίβεια [3.1].

Από την άλλη όμως πλευρά πρέπει να μειώνεται, κατά το δυνατόν, η πολυπλοκότητα του εκάστοτε στοιχείου του δικτύου στη μοντελοποίηση. Κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο για να μειωθεί η γενικότερη πολυπλοκότητα του αλγορίθμου ώστε να μπορεί να εκτελείται σε πραγματικό χρόνο, αλλά και ακόμη περισσότερο διότι όσο πιο πολύπλοκο είναι ένα μοντέλο τόσο περισσότερα δεδομένα χρειάζεται ώστε να αρχικοποιηθεί. Δεδομένου μάλιστα ότι η ροή φορτίου πραγματοποιείται σε πραγματικά συστήματα, συνήθως τα διαθέσιμα δεδομένα επί των στοιχείων του δικτύου είναι στην καλύτερη περίπτωση τα βασικά που αναφέρονται στα εγχειρίδια των κατασκευαστών.

Επομένως καταβάλλεται κάθε δυνατή προσπάθεια, έτσι ώστε τα μοντέλα τα οποία δημιουργούνται:

- ❖ Να προσεγγίζουν τη συμπεριφορά του πραγματικού μοντέλου.
- ❖ Να μην είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα και να μην απαιτούν δεδομένα τα οποία είναι είτε δυσεύρετα είτε μη διαθέσιμα στα πραγματικά συστήματα.

Τέλος, πριν αναφερθούν οι εξισώσεις που ισχύουν για το κάθε στοιχείο, κρίνεται αναγκαίο να επισημανθούν τα ακόλουθα:

- Στις περιπτώσεις που θα γίνει αναφορά σε ρεύματα φορτίων, πυκνωτών και άλλων στοιχείων του δικτύου, οι τιμές αυτές θα αντιστοιχούν στην εγγεόμενη τιμή του ρεύματος. Έτσι το αντίθετο πρόσημο από το αναμενόμενο θα έχει την έννοια ότι τα ρεύματα έχουν φορά αντίθετη από αυτής του εγγεόμενου ρεύματος που θα σημειώνεται στο εκάστοτε σχήμα και η οποία ήταν η φορά σύμβασης που επιλέχθηκε.
- Επειδή τα δίκτυα τα οποία θα μελετηθούν είναι κατεξοχήν τριφασικά, τα θεμελιώδη μεγέθη όπως τάση, ρεύμα και ισχύς θα εμφανίζονται υπό τη μορφή πινάκων διαστάσεων 3×1 . Ακόμη και όταν κάποια φάση απουσιάζει από ένα τμήμα του δικτύου, οι διαστάσεις των πινάκων για τα αντίστοιχα μεγέθη θα παραμένουν ίδιες, ώστε να μην αλλοιώνεται η γενικότητα του μοντέλου. Φυσικά οι τιμές των μεγεθών στις φάσεις που απουσιάζουν είναι μηδενικές.

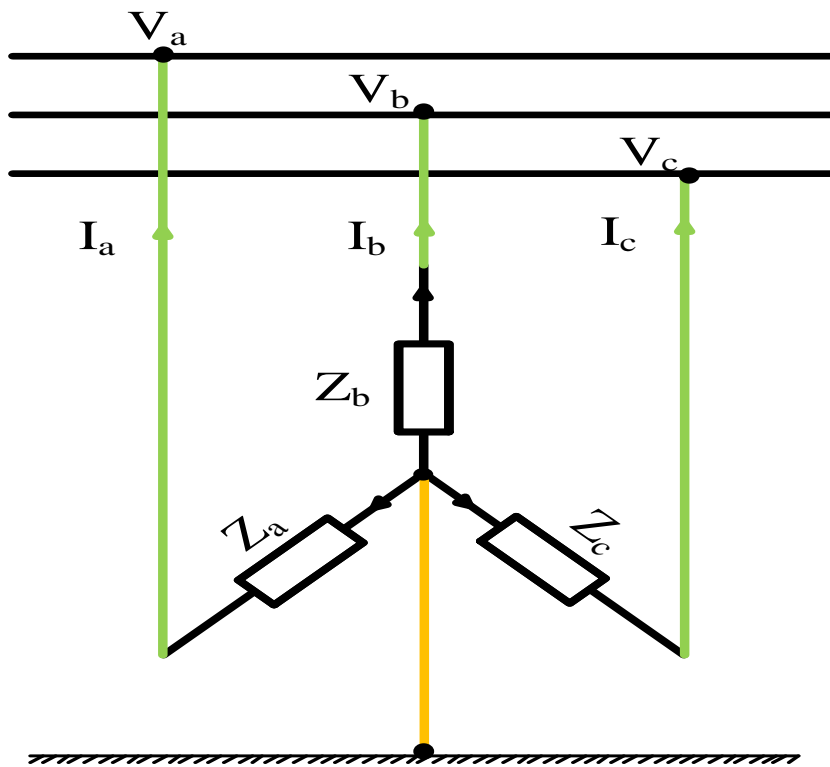
- Τα μαθηματικά σύμβολα “ ./ ” και “ .* ” έχουν την έννοια διαίρεση ανά στοιχείο του πίνακα και πολλαπλασιασμός ανά στοιχείο του πίνακα αντίστοιχα. Έτσι για παράδειγμα η τάση και η συζυγής τιμή του ρεύματος μπορούν να πολλαπλασιαστούν ώστε να δώσουν την ισχύ και ο συμβολισμός της πράξης αυτής να γίνει με τη χρήση του παραπάνω συμβόλου αντί για την παράθεση τριών διαφορετικών εξισώσεων.

3.2 ΦΟΡΤΙΑ

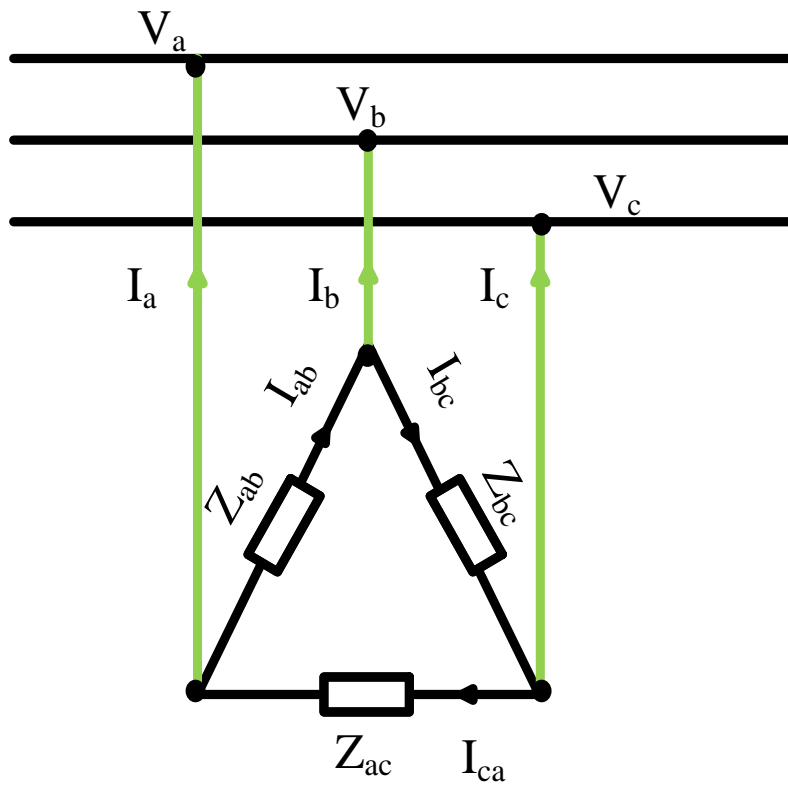
Ο λόγος για τον οποίο παράγεται, μεταφέρεται και διανέμεται η ηλεκτρική ενέργεια είναι αδιαμφισβήτητα η τροφοδότηση των φορτίων του συστήματος. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία είναι αναγκαία για την παροχή της απαραίτητης ισχύος και ως εκ τούτου την εξυπηρέτηση του φορτίου.

Το μοντέλο του φορτίου σε έναν αλγόριθμο ροής φορτίου είναι απαραίτητο να χαρακτηρίζεται από ένα βαθμό ευελιξίας. Αυτό συμβαίνει επειδή τα φορτία δεν είναι μόνο μιας κατηγορίας. Αντίθετα, στα δίκτυα διανομής μπορεί κανείς να συναντήσει τρεις κύριες κατηγοριοποιήσεις των φορτίων:

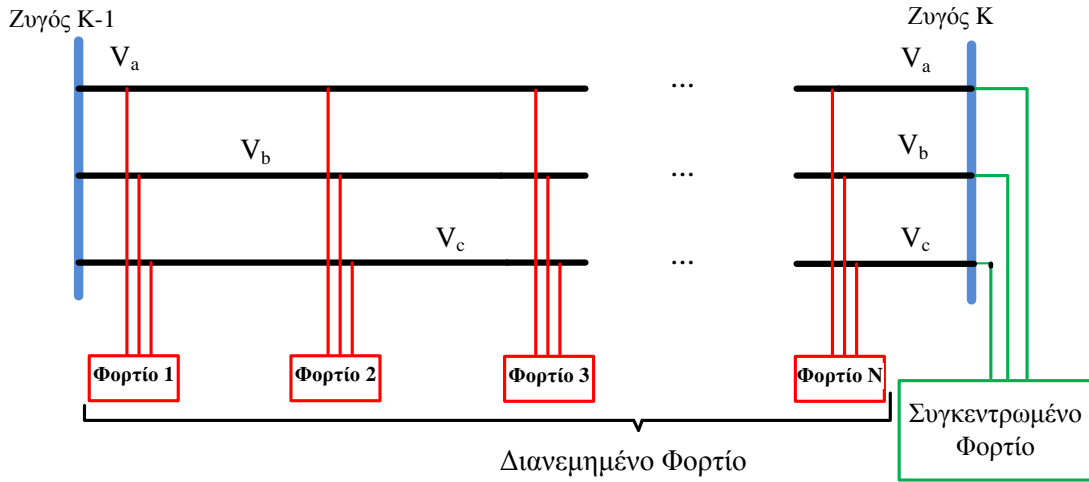
- Με βάση τη συνδεσμολογία τους διακρίνονται σε:
 - ❖ φορτία συνδεδεμένα κατά αστέρα, τα οποία συνδέονται με τις φασικές τάσεις του δικτύου (Σχήμα 3.1)
 - ❖ φορτία συνδεδεμένα κατά τρίγωνο, τα οποία συνδέονται με τις πολικές τάσεις του δικτύου (Σχήμα 3.2)
- Με βάση τον τρόπο λειτουργίας τους διακρίνονται σε:
 - ❖ φορτία σταθερής ισχύος, τα οποία ονομάζονται και φορτία σταθερού PQ, το οποίο σημαίνει ότι απορροφούν σταθερή ενεργή και άεργη ισχύ. Με διαφορετική τιμή της τάσης τα εν λόγω φορτία απορροφούν διαφορετική τιμή ρεύματος, ώστε τελικά να απορροφήσουν την ίδια ισχύ.
 - ❖ φορτία σταθερού ρεύματος, τα οποία διακρίνονται για το σταθερό μέτρο ρεύματος που απορροφούν. Σε αυτόν τον τύπο φορτίου σταθερός παραμένει επίσης ο συντελεστής ισχύος της απορροφόμενης ισχύος και επομένως και η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος.
 - ❖ φορτία σταθερής σύνθετης αντίστασης, τα οποία λειτουργούν όπως μια σύνθετη αντίσταση, με βάση το νόμο του Ohm. Δηλαδή μεταβαλλόμενη τάση έχει ως αποτέλεσμα ανάλογα μεταβαλλόμενο απορροφούμενο ρεύμα.
- Με βάση τη θέση τους στο δίκτυο τους διακρίνονται σε:
 - ❖ Συγκεντρωμένα φορτία (Σχήμα 3.3), τα οποία βρίσκονται σε ένα σημείο του δικτύου, δηλαδή είναι γνωστό το όνομα του ζυγού στον οποίο συνδέονται.
 - ❖ Διανεμημένα φορτία (Σχήμα 3.4), τα οποία βρίσκονται διεσπαρμένα κατά μήκος μιας γραμμής του δικτύου και χρειάζονται ειδική τεχνική ανάλυσης. [3.2]



Σχήμα 3.1: Φορτίο συνδεδεμένο σε αστέρα.



Σχήμα 3.2: Φορτίο συνδεδεμένο σε τρίγωνο.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα διανεμημένου και συγκεντρωμένου φορτίου.

Η εισαγωγή των δεδομένων ενός φορτίου γίνεται πάντοτε δηλώνοντας τη συνδεσμολογία, τον τύπο και την ισχύ του κάθε φορτίου που έχει συνδεθεί στην αντίστοιχη φάση (πολική ή φασική) σε συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας. Για την παρακάτω ανάλυση θα θεωρείται ότι τα φορτία που μελετώνται είναι συγκεντρωμένα και όχι διανεμημένα. Στη συνέχεια με μια μεθοδολογία που θα αναφερθεί θα φανεί ότι τα διανεμημένα φορτία λειτουργούν όπως τα συγκεντρωμένα προσθέτοντας κάποιους ζυγούς στην περιοχή των διανεμημένων φορτίων.

Το μέγεθος το οποίο χρειάζεται να υπολογιστεί από τα φορτία για την πραγματοποίηση της ροής φορτίου, είναι το ρεύμα το οποίο απορροφούν. Επομένως για την κάθε κατηγορία θα υπολογιστεί το εγγεόμενο ρεύμα.

- Φορτίο σταθερής ισχύος (**PQ**) σε συνδεσμολογία αστέρα:

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{a_injected} \\ \bar{I}_{b_injected} \\ \bar{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = \left(- \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} \right)^* \quad (3.1)$$

Όπου $\bar{I}_{a_injected}$, $\tilde{S}_{a,nom}$ και \tilde{V}_a είναι το εγγεόμενο ρεύμα, η ονομαστική φαινομένη ισχύς και η φασική τάση της φάσης a.

- Φορτίο σταθερής ισχύος (**PQ**) σε συνδεσμολογία τριγώνου:

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{a_injected} \\ \bar{I}_{b_injected} \\ \bar{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left(- \begin{bmatrix} \tilde{S}_{ab,nom} \\ \tilde{S}_{bc,nom} \\ \tilde{S}_{ca,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{ab} \\ \tilde{V}_{bc} \\ \tilde{V}_{ca} \end{bmatrix} \right)^* \quad (3.2)$$

Όπου $\tilde{S}_{ab,nom}$ και \tilde{V}_{ab} είναι η ονομαστική φαινομένη ισχύς και η πολική τάση μεταξύ των φάσεων a και b.

Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό στα φορτία PQ η ισχύς διατηρείται σταθερή και ίση με την ονομαστική και το ρεύμα του φορτίου είναι αυτό το οποίο μεταβάλλεται με τη μεταβολή της τάσης. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στο επίπεδο τάσης του ζυγού τροφοδοσίας τέτοιων φορτίων. Μια ενδεχόμενη, εκτός των επιτρεπομένων ορίων, πτώση τάσης θα οδηγήσει σε χαμηλή τάση τροφοδοσίας του φορτίου. Από τις εξισώσεις (3.1) και (3.2) γίνεται εύκολα αντιληπτό πως κάτι τέτοιο θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος γραμμής και φορτίου, κάτι το οποίο μπορεί να έχει ολέθριες συνέπειες τόσο για το δίκτυο όσο και για το ίδιο το φορτίο. Απαραίτητη κρίνεται λοιπόν η ύπαρξη ρυθμιστή για τη διατήρηση της τάσης σε τιμές παραπλήσιες της ονομαστικής, καθώς και η παρουσία μέσων προστασίας τόσο από την πλευρά του δικτύου όσο και στην εγκατάσταση του καταναλωτή [3.2].

- Φορτίο σταθερού ρεύματος (I constant) σε συνδεσμολογία αστέρα:

Στα φορτία τύπου σταθερού ρεύματος, σταθερά παραμένουν το μέτρο του ρεύματος που απορροφά το κάθε φορτίο και ο συντελεστής ισχύος της παρεχόμενης ισχύος. Επομένως για να βρεθεί το ρεύμα που απορροφάται από κάθε φάση, αρχικά υπολογίζεται το μέτρο του ρεύματος (εξίσωση (3.3)) και στη συνέχεια της γωνίας του ρεύματος (εξίσωση (3.4)). Εφόσον είναι γνωστά η γωνία και το μέτρο του ρεύματος για κάθε φάση, είναι δυνατόν μέσω της εξίσωσης (3.5) να υπολογιστεί η τελική τιμή του εγχεόμενου ρεύματος. Τέλος μια συνεπτυγμένη μορφή της εξίσωσης (3.5) μπορεί να εκφραστεί με την (3.6).

$$|\bar{I}_{load_inj.}| = \begin{bmatrix} |\tilde{I}_{a_injected}| \\ |\tilde{I}_{b_injected}| \\ |\tilde{I}_{c_injected}| \end{bmatrix} = \left| - \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \right| \quad (3.3)$$

Όπου $\tilde{V}_{a,nom}$, είναι η ονομαστική φασική τιμή της φάσης a.

$$\begin{aligned} \text{Arg}(\bar{S}_{nom.}) &= \text{Arg}[\bar{V} \cdot (\bar{I}_{load_inj.})^*] \Rightarrow \\ \text{Arg}(\bar{I}_{load_inj.}) &= (\text{Arg}(\bar{V}) - \text{Arg}(\bar{S}_{nom.})) \Rightarrow \\ \text{Arg}(\bar{I}_{load_inj.}) &= \begin{bmatrix} \text{Arg}(\tilde{I}_{a_injected}) \\ \text{Arg}(\tilde{I}_{b_injected}) \\ \text{Arg}(\tilde{I}_{c_injected}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Arg}(\tilde{V}_a) - \text{Arg}(\tilde{S}_{a,nom}) \\ \text{Arg}(\tilde{V}_b) - \text{Arg}(\tilde{S}_{b,nom}) \\ \text{Arg}(\tilde{V}_c) - \text{Arg}(\tilde{S}_{c,nom}) \end{bmatrix} \quad (3.4) \end{aligned}$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{a_injected} \\ \tilde{I}_{b_injected} \\ \tilde{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} |\tilde{I}_{a_injected}| \\ |\tilde{I}_{b_injected}| \\ |\tilde{I}_{c_injected}| \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{a_injected})) \\ \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{b_injected})) \\ \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{c_injected})) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = -|\bar{I}_{load_inj.}| \cdot \exp(j \cdot \text{Arg}(\bar{I}_{load_inj.})) \quad (3.6)$$

- Φορτίο σταθερού ρεύματος (I constant) σε συνδεσμολογία τριγώνου:

Αντίστοιχα με τον υπολογισμό των ρευμάτων της συνδεσμολογίας αστέρα γίνεται και της συνδεσμολογίας τριγώνου. Μοναδική διαφορά είναι ότι πλέον οι τάσεις είναι πολικές και όχι φασικές.

$$|\bar{I}_{\text{πολικά}}| = \begin{bmatrix} |\tilde{I}_{ab}| \\ |\tilde{I}_{bc}| \\ |\tilde{I}_{ca}| \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{S}_{ab,nom} \\ \tilde{S}_{bc,nom} \\ \tilde{S}_{ca,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{ab,nom} \\ \tilde{V}_{bc,nom} \\ \tilde{V}_{ca,nom} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\text{Arg}(\bar{I}_{\text{πολικά}}) = \begin{bmatrix} \text{Arg}(\tilde{I}_{ab}) \\ \text{Arg}(\tilde{I}_{bc}) \\ \text{Arg}(\tilde{I}_{ca}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Arg}(\tilde{V}_{ab}) - \text{Arg}(\tilde{S}_{ab,nom}) \\ \text{Arg}(\tilde{V}_{bc}) - \text{Arg}(\tilde{S}_{bc,nom}) \\ \text{Arg}(\tilde{V}_{ca}) - \text{Arg}(\tilde{S}_{ca,nom}) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{a_injected} \\ \tilde{I}_{b_injected} \\ \tilde{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = - \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} \cdot \begin{bmatrix} |\tilde{I}_{ab}| \\ |\tilde{I}_{bc}| \\ |\tilde{I}_{ca}| \end{bmatrix} .* \begin{bmatrix} \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{ab})) \\ \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{bc})) \\ \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{ca})) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = - \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} \cdot |\bar{I}_{\text{πολικά}}| .* \exp(j \cdot \text{Arg}(\bar{I}_{load_inj.})) \quad (3.10)$$

- Φορτίο σταθερής αντίστασης (Z constant) σε συνδεσμολογία αστέρα:

Τα φορτία σταθερής αντίστασης είναι συνήθως τα πρώτα φορτία που συναντά κάποιος στην πρώτη επαφή του με τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και τη θεωρία κυκλωμάτων γενικότερα. Συνήθως ως δεδομένο δίνεται η ισχύς σε ονομαστική τάση και από αυτή την τιμή με τη βοήθεια της εξίσωσης (3.11) μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της σύνθετης αγωγιμότητας του φορτίου ανά φάση. Εν συνεχεία για δεδομένη τάση είναι εύκολο να υπολογιστεί η τιμή του ρεύματος που απορροφά το φορτίο αυτό (εξίσωση (3.12)).

$$\bar{Y}_{load} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_a \\ \tilde{Y}_b \\ \tilde{Y}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix}^* ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{a_injected} \\ \tilde{I}_{b_injected} \\ \tilde{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \tilde{Y}_a \\ \tilde{Y}_b \\ \tilde{Y}_c \end{bmatrix} .* \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

- Φορτίο σταθερής αντίστασης (Z constant) σε συνδεσμολογία τριγώνου:

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις που μελετήθηκαν, η μόνη διαφορά της συνδεσμολογίας τριγώνου είναι ότι οι τάσεις είναι πολικές.

$$\bar{Y}_{load} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_{ab} \\ \tilde{Y}_{bc} \\ \tilde{Y}_{ca} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \tilde{S}_{ab,nom} \\ \tilde{S}_{bc,nom} \\ \tilde{S}_{ca,nom} \end{bmatrix}^* \cdot / \begin{bmatrix} \tilde{V}_{ab,nom} \\ \tilde{V}_{bc,nom} \\ \tilde{V}_{ca,nom} \end{bmatrix} \cdot / \begin{bmatrix} \tilde{V}_{ab,nom} \\ \tilde{V}_{bc,nom} \\ \tilde{V}_{ca,nom} \end{bmatrix} \right) \quad (3.11)$$

Για συντομία χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι πίνακες:

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\bar{I}_{load} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{a,injected} \\ \tilde{I}_{b,injected} \\ \tilde{I}_{c,injected} \end{bmatrix} = -\bar{K} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{Y}_{ab} \\ \tilde{Y}_{bc} \\ \tilde{Y}_{ca} \end{bmatrix} \cdot * \left(\bar{U} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} \right) \quad (3.14)$$

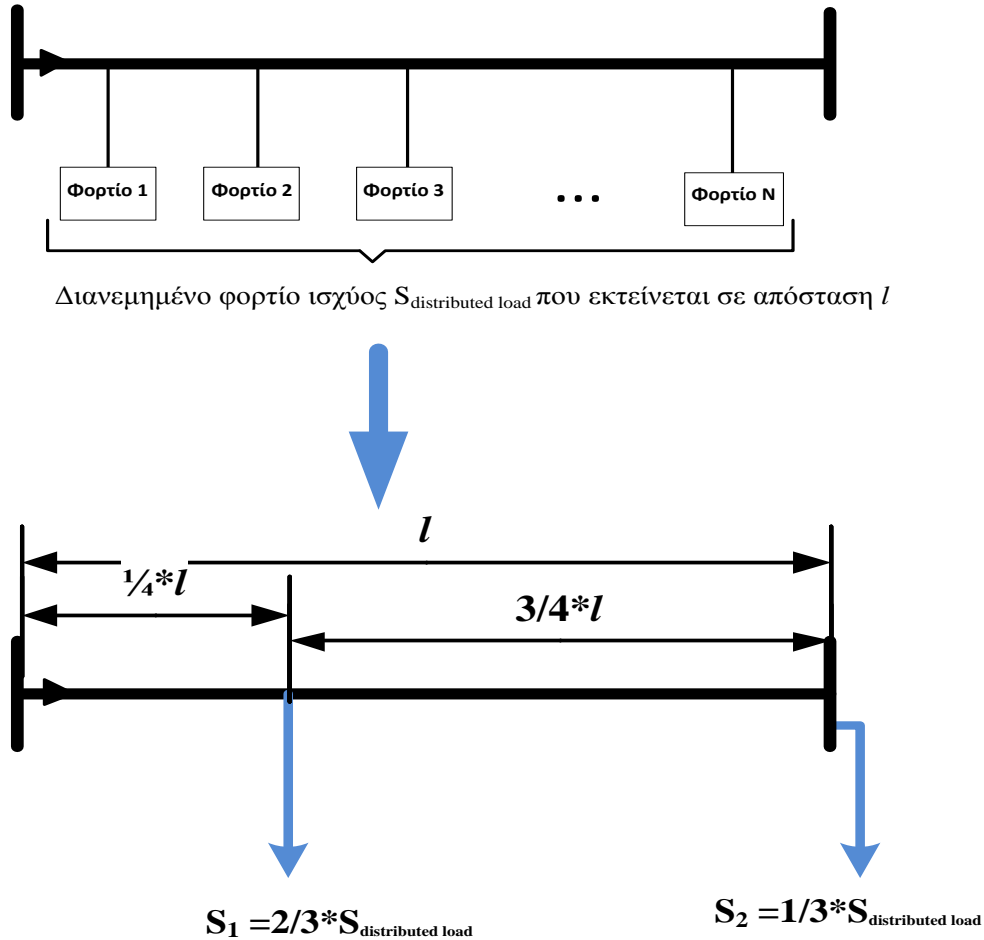
Όλες οι παραπάνω περιπτώσεις αποτελούν τις εξισώσεις των συγκεντρωμένων φορτίων των δικτύων διανομής, έτσι ώστε να υπολογιστούν τα εγγεόμενα ρεύματά τους. Οι εξισώσεις αναπτύχθηκαν τόσο για τις περιπτώσεις των συνδεδεμένων κατά αστέρα όσο και για τις συνδεσμολογίες τριγώνου. Μπορούν μάλιστα οι ίδιες εξισώσεις να εφαρμοστούν και για περιπτώσεις φορτίων που τροφοδοτούνται μόνο από μια ή δύο φάσεις.

Εκτός όμως από τα συγκεντρωμένα φορτία υπάρχουν και τα διανεμημένα. Στο Σχήμα 3.3 δόθηκε ένα παράδειγμα διανεμημένου και συγκεντρωμένου φορτίου στο ίδιο δίκτυο. Η μεθοδολογία η οποία ακολουθείται σε αυτή την περίπτωση είναι η προσέγγιση των κατανεμημένων φορτίων με αντίστοιχα συγκεντρωμένα.

Το διανεμημένο φορτίο μετατρέπεται σε δύο συγκεντρωμένα φορτία. Το πρώτο συγκεντρωμένο φορτίο έχει τιμή ισχύος τα $\frac{2}{3}$ της συνολικής του διανεμημένου και το άλλο $\frac{1}{3}$ της τιμής του διανεμημένου. Για την εισαγωγή των δύο αυτών φορτίων δημιουργείται ένας ζυγός σε απόσταση ίση με το $\frac{1}{4}$ της συνολικής απόστασης που εκτείνεται το διανεμημένο φορτίο και τοποθετείται στο συγκεκριμένο ζυγό το πρώτο φορτίο, ενώ το δεύτερο φορτίο τοποθετείται στο τέλος της γραμμής που εκτείνεται το προς ανάλυση διανεμημένο φορτίο [3.2].

Γραφική απεικόνιση της μεθοδολογίας αυτής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η προσέγγιση αυτή είναι η καλύτερη δυνατή μιας και έχει πολύ χαμηλή πολυπλοκότητα, δεν απαιτεί πολλούς υπολογισμούς καθώς και επίσης δεν παρουσιάζει μεγάλο σφάλμα ως προς την πραγματική πτώση τάσης που δημιουργεί το διανεμημένο φορτίο. Ακόμα η μεθοδολογία αυτή δεν παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις ως προς την απώλεια ισχύος επί της γραμμής. Εναλλακτικές μέθοδοι, όπως η θεώρηση N συγκεντρωμένων φορτίων πάνω στη γραμμή (με N να τείνει θεωρητικά στο άπειρο) όχι μόνο

αυξάνουν την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου και μειώνουν την απόδοσή του, αλλά παράλληλα δεν προσφέρουν αισθητά καλύτερα αποτελέσματα.



Σχήμα 3.4: Αναγωγή ενός διανεμημένου φορτίου σε δύο συγκεντρωμένα φορτία

3.3 ΕΓΚΑΡΣΙΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ

Ένα από τα πιο γνωστά προβλήματα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν σε εναλλασσόμενη τάση είναι η αυξημένη απαίτηση σε άεργο ισχύ εξαιτίας του ότι τα φορτία σε ένα σύστημα διανομής είναι συνήθως επαγωγικού χαρακτήρα. Η αύξηση της απαίτησης σε άεργο ισχύ μειώνει τη διαθέσιμη ενεργό ισχύ στο σύστημα και αναγκάζει την παροχή μεγαλύτερης τιμής ρεύματος έτσι ώστε να φτάσει μια δεδομένη ποσότητα ενεργού ισχύος στο φορτίο. Η αύξηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται μεγαλύτερες πτώσεις τάσης στους ζυγούς του δικτύου. Ακόμα, η παρουσία μεγαλύτερων ρευμάτων καταπονεί το σύνολο των στοιχείων του δικτύου και μειώνεται η αξιοπιστία του συστήματος, καθώς ο ρυθμός βλαβών εμφανίζεται μεγαλύτερος. Επίσης από το σύνολο της ισχύος που παράγεται ένα ποσοστό μόνο καταλήγει να χρησιμοποιείται (ενεργός ισχύς) και έτσι το κόστος παραγωγής αυξάνεται όσο μεγαλώνει και το ποσοστό της αέργου ισχύος [3.3].

Επομένως, ιδιαιτέρως τις ώρες της αιχμής, πρέπει με κάποιο τρόπο να υπάρξει εισαγωγή αέργου ισχύος στο δίκτυο. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνεται από την

εγκατάσταση εγκάρσιων πυκνωτών σε ορισμένους ζυγούς του δικτύου. Οι πυκνωτές αυτοί μπορούν να συνοδεύονται από χειροκίνητους ή χειριζόμενους από απόσταση διακόπτες έτσι ώστε να μπορούν να εισάγονται στο δίκτυο σε στιγμές αιχμής όπου η απαίτηση σε άεργο ισχύ είναι αυξημένη και να αποσυνδέονται όταν δεν απαιτείται τόσο μεγάλη ποσότητα αέργου ισχύος. Ενδεικτικό είναι ότι κατά τη λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων λόγω της διαδικασίας εκκίνησης και λειτουργίας πολλών κινητήρων ταυτόχρονα, απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα αέργου ισχύος. Αντίθετα τις απογευματινές ώρες που τα εν λόγω φορτία είναι αποσυνδεδεμένα δεν παρουσιάζεται τόσο ανάγκη σε άεργο ισχύ και η προσθήκη εγκάρσιων πυκνωτών στο σύστημα ενδέχεται να προκαλέσει, αντί για μείωση, αύξηση της πτώσης τάσης κατά απόλυτη τιμή.

Επίσης κρίνεται αναγκαίο να τονιστεί πως συνήθως οι εταιρίες διανομής και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θέτουν στους πελάτες τους όριο στο ποσοστό της αέργου ισχύος επί της συνολικής απαίτησής τους σε ισχύ. Με άλλα λόγια τους υποχρεώνουν να διατηρούν πάνω από ένα όριο τον συντελεστή ισχύος τους.

Οι εγκάρσιοι πυκνωτές που τοποθετούνται στα συστήματα διανομής μπορούν να προσομοιωθούν χρησιμοποιώντας το μοντέλο του φορτίου σταθερής αντίστασης, όπως αυτό περιγράφηκε στην Ενότητα 3.2. Συγκεκριμένα η περιγραφή του φορτίου θα δίνεται και πάλι με την ισχύ του φορτίου σε κατάσταση ονομαστικής φόρτισης. Αυτή τη φορά όμως η συνολική ισχύς του φορτίου θα αποτελείται μόνο από άεργη ισχύ και μηδενική ενεργή. Να σημειωθεί επίσης ότι το πρόσημο της άεργης ισχύος θα είναι αρνητικό, δίνοντας την έννοια ότι τροφοδοτεί ο εγκάρσιος πυκνωτής με άεργο ισχύ το σύστημα και δεν την απορροφά από το δίκτυο. Επομένως οι εξισώσεις που θα ισχύουν για τα εγγεόμενα ρεύματα του εγκάρσιου πυκνωτή θα είναι:

- Εγκάρσιος πυκνωτής σε συνδεσμολογία αστέρα:

$$\bar{Y}_{shunt_capacitor} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_a \\ \tilde{Y}_b \\ \tilde{Y}_c \end{bmatrix} = -j \cdot \begin{bmatrix} |Q_{a,nom}| \\ |Q_{b,nom}| \\ |Q_{c,nom}| \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\bar{I}_{shunt_capacitor_inj.} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{a_injected} \\ \tilde{I}_{b_injected} \\ \tilde{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_a \\ \tilde{Y}_b \\ \tilde{Y}_c \end{bmatrix} .* \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Η χρησιμοποίηση του αρνητικού προσήμου στην εξίσωση (3.15) έχει την έννοια του ότι η άεργος ισχύς ενός εγκάρσιου πυκνωτή είναι πάντα αρνητική και επομένως προσφερόμενη στο δίκτυο.

- Εγκάρσιος πυκνωτής σε συνδεσμολογία τριγώνου:

$$\bar{Y}_{shunt_capacitor} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_{ab} \\ \tilde{Y}_{bc} \\ \tilde{Y}_{ca} \end{bmatrix} = -j \cdot \begin{bmatrix} |Q_{ab,nom}| \\ |Q_{bc,nom}| \\ |Q_{ca,nom}| \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{ab,nom} \\ \tilde{V}_{bc,nom} \\ \tilde{V}_{ca,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{ab,nom} \\ \tilde{V}_{bc,nom} \\ \tilde{V}_{ca,nom} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\vec{I}_{\text{shunt_capacitor_inj.}} = \begin{bmatrix} \vec{I}_{a_injected} \\ \vec{I}_{b_injected} \\ \vec{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{K}} \cdot \begin{bmatrix} \vec{Y}_{ab} \\ \vec{Y}_{bc} \\ \vec{Y}_{ca} \end{bmatrix} \cdot * \left(\bar{\mathbf{U}} \cdot \begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} \right) \quad (3.18)$$

Οι πίνακες $\bar{\mathbf{K}}$ και $\bar{\mathbf{U}}$ είναι αυτοί που έχουν οριστεί στις εξισώσεις (3.12) και (3.13). Στο σημείο αυτό φαίνεται και η ομοιότητα των εξισώσεων του εγκάρσιου πυκνωτή με του φορτίου σταθερής αντίστασης.

3.4 ΓΡΑΜΜΕΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

3.4.1 Μοντελοποίηση

Οι γραμμές διανομής αποτελούν το πιο συχνά εμφανιζόμενο στοιχείο των κλάδων του δικτύου. Αναλαμβάνουν να μεταφέρουν την ηλεκτρική ισχύ από τους υποσταθμούς διανομής στα φορτία των καταναλωτών. Η κατασκευή τους και η τοποθέτησή τους γίνεται με γνώμονα τη συνεχή και απροβλημάτιστη λειτουργία του δικτύου. Δεδομένου όμως του μήκους και του πλήθους των γραμμών είναι κατανοητό ότι πρέπει να επιλεγούν προσεκτικά, φροντίζοντας να καλύπτουν και μια μελλοντική αύξηση της παρεχόμενης ισχύος μέσω του δικτύου διανομής.

Οι γραμμές διανομής πρέπει να χαρακτηρίζονται από:

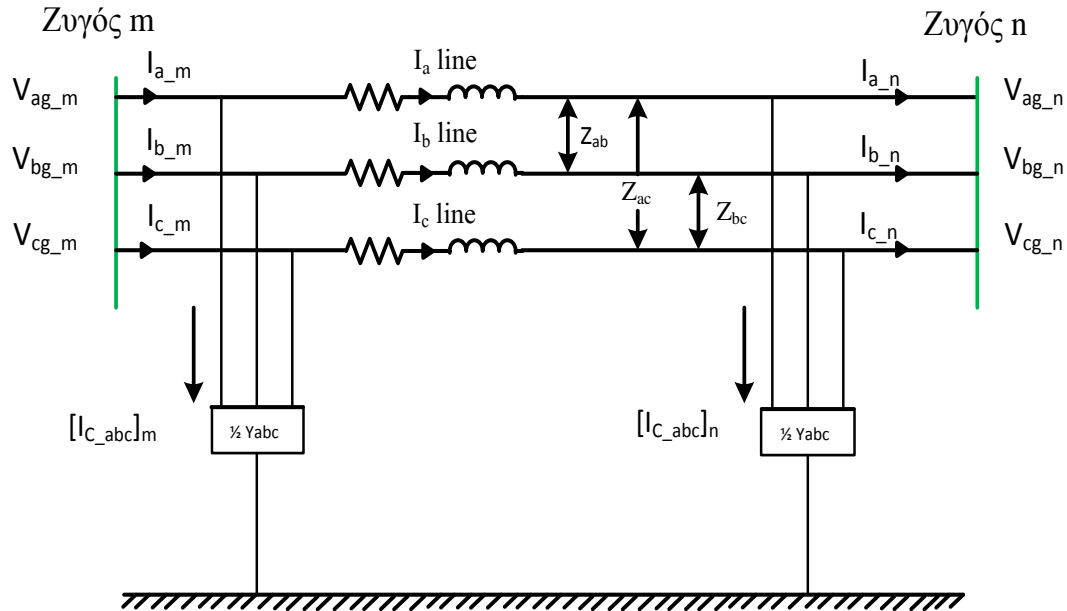
- τη μικρότερη δυνατή αντίσταση έτσι ώστε να υπάρχουν οι λιγότερες απώλειες κατά τη διανομή. Υπενθυμίζεται ότι μεγάλες απώλειες κατά μήκος των γραμμών οδηγούν σε τάσεις αρκετά κάτω της ονομαστικής, που με τη σειρά τους οδηγούν σε υψηλά ρεύματα τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στα στοιχεία του δικτύου.
- την καλύτερη δυνατή αξιοπιστία ώστε ο ρυθμός βλαβών τους να είναι αρκετά μικρός. Μια βλάβη στο μέσον μιας γραμμής μπορεί να χρειαστεί αρκετές ώρες ή και μέρες επισκευής.
- αντοχή στην καταπόνηση εξαιτίας φυσικών φαινομένων και ακραίων καιρικών συνθηκών.

Για την κατασκευή του μοντέλου της γραμμής πρέπει να είναι γνωστά τα ακόλουθα χαρακτηριστικά της:

- ❖ Η τοπολογία της γραμμής, δηλαδή εάν είναι υπόγεια ή εναέρια καθώς και τις αποστάσεις μεταξύ των φάσεων αλλά και μεταξύ φάσεων και του ουδέτερου, εάν αυτός υπάρχει. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις οι γραμμές ακολουθούν συγκεκριμένη τυποποίηση στην οποία οι αποστάσεις αυτές είναι προκαθορισμένες και το μόνο που χρειάζεται να καθοριστεί είναι η σειρά εμφάνισης των φάσεων και να δηλωθεί η ύπαρξη ή όχι του ουδέτερου.
- ❖ Οι τύποι των αγωγών που χρησιμοποιούνται για τις φάσεις και τον ουδέτερο.

Όπως θα αναλυθεί στις Ενότητες 3.4.2 και 3.4.3 με τη βοήθεια των εν λόγω παραμέτρων υπολογίζεται η μήτρα σύνθετων αντιστάσεων σειράς Z_{abc} και η μήτρα εγκάρσιων αγωγιμοτήτων Y_{abc} της κάθε γραμμής.

Θεωρώντας δεδομένες τις ανωτέρω μήτρες, μπορεί να αναπτυχθεί το μοντέλο της γραμμής. Στο Σχήμα 3.5 φαίνονται στη γραμμή που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο ζυγούς τα μεγέθη που θα περιγράψουν οι εξισώσεις του μοντέλου.



Σχήμα 3.5: Μοντέλο τριφασικής γραμμής διανομής.

Η μήτρα αγωγιμοτήτων για το κύκλωμα του Σχήματος 3.5 προκύπτει από τη βιβλιογραφία [3.4] ότι είναι η ακόλουθη:

$$Y_{ABC}^{BR} = \begin{bmatrix} Z_{ABC}^{-1} + \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC} & -Z_{ABC}^{-1} \\ -Z_{ABC}^{-1} & Z_{ABC}^{-1} + \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Από τη θεωρία ανάλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων είναι γνωστό ότι για τη μήτρα αγωγιμοτήτων ισχύει η εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ABC}^{-1} + \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC} & -Z_{ABC}^{-1} \\ -Z_{ABC}^{-1} & Z_{ABC}^{-1} + \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{V}_m \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Επιλύοντας από την (3.20) κάθε φορά ως προς το αντίστοιχο μέγεθος, προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\bar{V}_n = \bar{V}_m + Z_{ABC} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC} \cdot \bar{V}_m - \bar{I}_m \right) \quad (3.21)$$

$$\bar{I}_n = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC} * (\bar{V}_n + \bar{V}_m) - \bar{I}_m \quad (3.22)$$

$$\bar{V}_m = \bar{V}_n + Z_{ABC} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC} \cdot \bar{V}_n - \bar{I}_n \right) \quad (3.23)$$

$$\bar{I}_m = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC} * (\bar{V}_n + \bar{V}_m) - \bar{I}_n \quad (3.24)$$

Εύκολα διαπιστώνεται πως οι εξισώσεις (3.21) και (3.22) δίνουν τις τιμές της τάσης και του ρεύματος στο ζυγό n του Σχήματος 3.5, εφόσον είναι γνωστές οι τιμές των αντίστοιχων μεγεθών στο ζυγό m. Αντίστοιχα οι εξισώσεις (3.23) και (3.24) δίνουν τις τιμές της τάσης και του ρεύματος στο ζυγό m συναρτήσει των αντίστοιχων μεγεθών στο ζυγό n. Στο Κεφάλαιο 4 θα αναδειχθεί η σημασία αυτών των εξισώσεων στον αλγόριθμο ροής φορτίου.

3.4.2 Υπολογισμός μήτρας σύνθετων αντιστάσεων σειράς γραμμής

3.4.2.1 Εναέριες γραμμές διανομής

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.4.1, για να ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση των γραμμών είναι απαραίτητο να υπολογιστούν η μήτρα σύνθετων αντιστάσεων σειράς Z_{ABC} και η μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας Y_{ABC} . Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται ότι εκτός της σύνθετης αντίστασης που υπάρχει κατά μήκος των γραμμών, εμφανίζεται σύνθετη αντίσταση μεταξύ των γραμμών. Επίσης στην περίπτωση που υπήρχε γραμμή ουδετέρου, θα έπρεπε να ληφθούν υπόψιν και οι σύνθετες αντιστάσεις που υπάρχουν μεταξύ των φάσεων και του ουδέτερου.

Η μέθοδος η οποία θα ακολουθηθεί για την εξαγωγή της μήτρας σύνθετων αντιστάσεων σειράς είναι η τροποποιημένη μέθοδος του Carson. Σύμφωνα με αυτή ορίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

- \hat{z}_{ii} = σύνθετη αντίσταση αγωγού i σε $\frac{\Omega}{\text{mile}}$
- \hat{z}_{ij} = σύνθετη αντίσταση μεταξύ αγωγών i και j σε $\frac{\Omega}{\text{mile}}$
- \hat{r}_i = αντίσταση αγωγού i σε $\frac{\Omega}{\text{mile}}$
- D_{ij} = απόσταση μεταξύ αγωγών i και j σε feet
- ρ = ειδική αντίσταση γης σε $\frac{\Omega}{\text{meter}}$
- GMR_i = Μέση Γεωμετρική Ακτίνα αγωγού i σε feet
- f = συχνότητα του συστήματος

Οι σχέσεις εύρεσης της μήτρας σύνθετης αντίστασης σειράς είναι:

$$\hat{z}_{ii} = \hat{r}_i + \frac{0,158836}{100} \cdot f + j \cdot \frac{0,202237}{100} \cdot f \cdot \left(\ln \left(\frac{1}{GMR_i} \right) + 7,6786 + \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{\rho}{f} \right) \right) \quad (3.25)$$

$$\hat{z}_{ij} = \frac{0,158836}{100} \cdot f + j \cdot \frac{0,202237}{100} \cdot f \cdot \left(\ln \left(\frac{1}{D_{ij}} \right) + 7,6786 + \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{\rho}{f} \right) \right) \quad (3.26)$$

Στις περιπτώσεις έλλειψης ουδέτερου ο πίνακας Z_{ABC} που θα προκύψει θα είναι διαστάσεων 3×3 και μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς κάποια τροποποίηση στις εξισώσεις (3.21) και (3.23). Εφόσον όμως η γραμμή έχει και ουδέτερο αγωγό τότε ο πίνακας που προκύπτει θα έχει διαστάσεις 4×4 και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αυτή τη διάσταση στις εξισώσεις των γραμμών.

Η λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα έρχεται από τη μέθοδο μείωσης του Kron [3.1]. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου φαίνεται με τις εξισώσεις (3.27) έως (3.33) που αναλύονται

παρακάτω για την περίπτωση 3 φάσεων και ουδέτερου. Εξυπακούεται ότι στην περίπτωση απουσίας κάποιας φάσης μηδενίζονται τα αντίστοιχα στοιχεία που σχετίζονται με αυτή.

$$Z_{\text{primitive}} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{11} & \hat{z}_{12} & \hat{z}_{13} & \hat{z}_{1n} \\ \hat{z}_{21} & \hat{z}_{22} & \hat{z}_{23} & \hat{z}_{2n} \\ \hat{z}_{31} & \hat{z}_{32} & \hat{z}_{33} & \hat{z}_{3n} \\ \hat{z}_{n1} & \hat{z}_{n2} & \hat{z}_{n3} & \hat{z}_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$[\hat{z}_{ij}] = \begin{bmatrix} \hat{z}_{11} & \hat{z}_{12} & \hat{z}_{13} \\ \hat{z}_{21} & \hat{z}_{22} & \hat{z}_{23} \\ \hat{z}_{31} & \hat{z}_{32} & \hat{z}_{33} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$[\hat{z}_{in}] = \begin{bmatrix} \hat{z}_{1n} \\ \hat{z}_{2n} \\ \hat{z}_{3n} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$[\hat{z}_{nj}] = [\hat{z}_{n1} \quad \hat{z}_{n2} \quad \hat{z}_{n3}] \quad (3.30)$$

$$[\hat{z}_{in}] = \begin{bmatrix} \hat{z}_{1n} \\ \hat{z}_{2n} \\ \hat{z}_{3n} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$[\hat{z}_{nn}] = [\hat{z}_{nn}] \quad (3.32)$$

$$[Z_{ABC}] = [\hat{z}_{ij}] - [\hat{z}_{in}] * [\hat{z}_{nn}]^{-1} * [\hat{z}_{nj}] \quad (3.33)$$

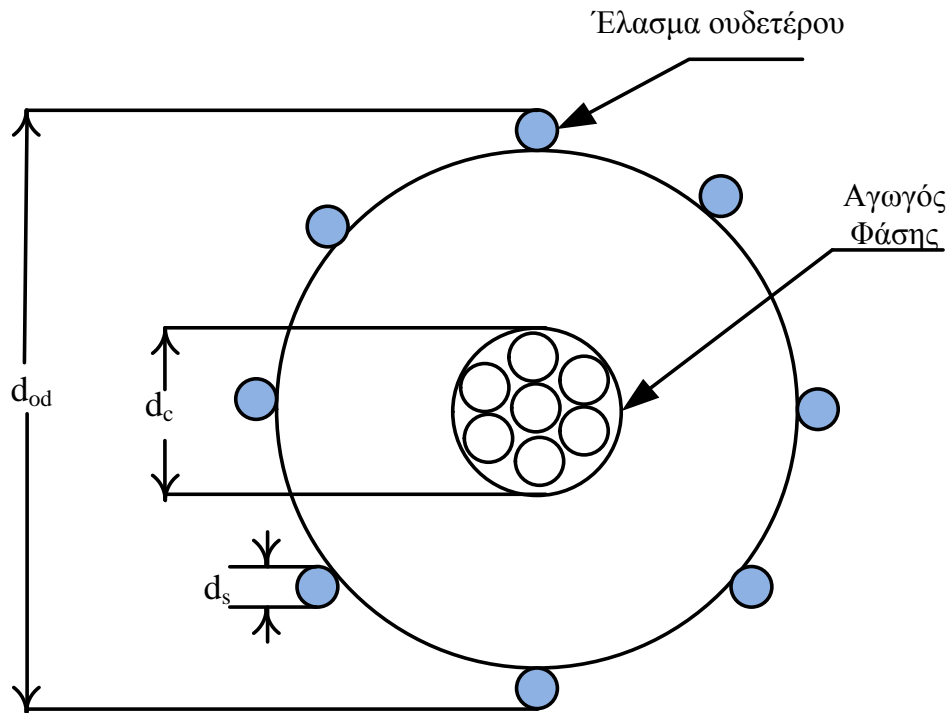
3.4.2.2 Υπόγειες γραμμές διανομής

Οι υπόγειες γραμμές και γενικότερα η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας υπογείως συνηθίζεται στα δίκτυα διανομής μεγάλων πόλεων και πυκνοκατοικημένων περιοχών, διότι έχει πολλαπλά οφέλη για τη διαρρύθμιση του περιβάλλοντος της πόλης. Με τέτοιου είδους δίκτυα:

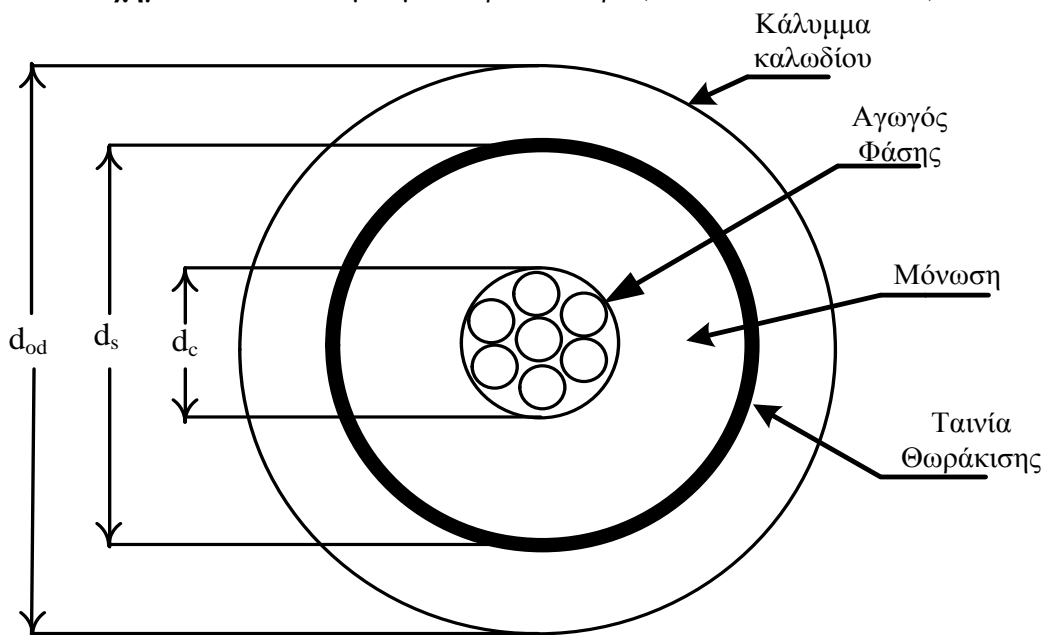
- Δεν δεσμεύεται χώρος από το ήδη επιβαρυνόμενο περιβάλλον των μεγαλουπόλεων
- Δεν κινδυνεύει ο εξοπλισμός από εξωγενείς παράγοντες όπως έντονα καιρικά φαινόμενα
- Υπάρχει μεγαλύτερη ασφάλεια για τους ανθρώπους, καθώς πιο δύσκολα μπορεί να έρθουν σε επαφή με τον εξοπλισμό του δικτύου.

Από την άλλη πλευρά όμως, μια ενδεχόμενη βλάβη στο υπόγειο δίκτυο θα έχει ως αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερο χρόνο αποκατάστασης. Επίσης το κόστος κατασκευής των υπογείων δικτύων είναι πολύ μεγαλύτερο από των αντίστοιχων εναέριων.

Οι υπόγειες γραμμές αποτελούνται από τα καλώδια που έχουν τοποθετημένο στο εσωτερικό τους τον ουδέτερο (concentric neutral cables) και από τα καλώδια που έχουν ταινία θωράκισης (tape shielded cables) πριν το κάλυμμα του καλωδίου. Θα πρέπει να τονιστεί ότι στην περίπτωση των **tape shielded** καλωδίων ο αγωγός του ουδέτερου βρίσκεται υποχρεωτικά σε ξεχωριστό καλώδιο [3.2]. Στα Σχήματα 3.6 και 3.7 φαίνονται οι δύο κατηγορίες καλωδίων καθώς και κάποια από τα μεγέθη τους που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς των μητρών.



Σχήμα 3.6: Καλώδιο με ομόκεντρο ουδέτερο (concentric neutral cable).



Σχήμα 3.7: Θωρακισμένο καλώδιο (tape shielded cable).

Για τον υπολογισμό της μήτρας αντιστάσεων σειράς των καλωδίων με ομόκεντρο ουδέτερο χρειάζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

- GMR_c = Μέση Γεωμετρική Ακτίνα αγωγού φάσης (feet)
- GMR_s = Μέση Γεωμετρική Ακτίνα ελάσματος ουδέτερου (feet)

- GMR_{cn} =ισοδύναμο Μέσης Γεωμετρικής Ακτίνας ουδετέρου ενός καλωδίου (feet)
- r_c = αντίσταση αγωγού φάσης $\left(\frac{\Omega}{\text{mile}}\right)$
- r_s = αντίσταση ελάσματος ουδετέρου $\left(\frac{\Omega}{\text{mile}}\right)$
- d_c =διάμετρος του αγωγού φάσης (inches)
- d_{od} =ονομαστική διάμετρος του αγωγού ουδετέρου του καλωδίου (inches)
- d_s = διάμετρος των ελασμάτων του αγωγού ουδετέρου (inches)
- k =σύνολο ελασμάτων του αγωγού ουδετέρου
- R = ακτίνα του κύκλου που περνάει από το κέντρο των ελασμάτων του ουδετέρου (feet)
- r_{cn} = ισοδύναμο αντίστασης ουδετέρου στο καλώδιο $\left(\frac{\Omega}{\text{mile}}\right)$
- $D_{\text{phase } n,m}$ = απόσταση μεταξύ αγωγών φάσης n και m (feet)
- $D_{\text{phase } n,\text{neutral } n}$ = απόσταση μεταξύ αγωγού φάσης n και ελασμάτων ουδετέρου του ίδιου καλωδίου (feet)
- $D_{\text{phase } n,\text{neutral } m}$ = μέση γεωμετρική απόσταση μεταξύ αγωγού φάσης n και ελασμάτων ουδετέρου του καλωδίου της φάσης m (feet)

Στις εξισώσεις (3.34) έως (3.38) υπολογίζονται όσα από τα μεγέθη δεν δίνονται στους πίνακες της βιβλιογραφίας [3.2] ή ως δεδομένα από την τοπολογία του χώρου τοποθέτησης των καλωδίων:

$$R = \frac{d_{od} - d_s}{24} \quad (3.34)$$

$$D_{\text{phase } n,\text{neutral } n} = R \quad (3.35)$$

$$r_{cn} = \frac{r_s}{k} \quad (3.36)$$

$$D_{\text{phase } n,\text{neutral } m} = \sqrt[k]{D_{\text{phase } n,m}^k - D_{\text{phase } m,\text{neutral } m}^k} \quad (3.37)$$

$$GMR_{cn} = \sqrt[k]{GMR_s \cdot k \cdot R^{k-1}} \quad (3.38)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.25) και (3.26) και αντικαθιστώντας τα αντίστοιχα μεγέθη με βάση τις εξισώσεις (3.34) έως (3.38) θα προκύψει ο $[Z_{\text{primitive}}]$ για υπόγεια καλώδια τριών φάσεων με ομόκεντρο ουδέτερο. Ο πίνακας αυτός, λαμβανομένου υπόψιν ότι θα εμφανίζονται τρεις φάσεις και τρεις ουδέτεροι θα έχει διαστάσεις 6×6 .

Με βάση τις εξισώσεις ελαχιστοποίησης του Kron ((3.27) έως (3.33)), ο πίνακας αυτός εύκολα προσεγγίζεται σε έναν άλλο με διαστάσεις 3×3 που μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί στις εξισώσεις των γραμμών (3.21) και (3.23).

Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι στην περίπτωση τοποθέτησης σε φρεάτια των υπόγειων καλωδίων, η εξίσωση (3.37) μπορεί να απλοποιηθεί σε:

$$D_{\text{phase n,neutral m}} \cong D_{\text{phase n,m}} \quad (3.39)$$

μιας και η απόσταση μεταξύ των δύο καλωδίων υπερβαίνει κατά πολύ, σε αυτή την περίπτωση, την ακτίνα μεταξύ αγωγού φάσης και ουδετέρου του δεύτερου καλωδίου.

Εκτός όμως από την περίπτωση των υπόγειων καλωδίων με ομόκεντρο ουδέτερο υπάρχουν και τα υπόγεια θωρακισμένα καλώδια. Σε αυτά τα καλώδια, για να υπολογιστεί η μήτρα σύνθετης αντίστασης σειράς χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα μεγέθη:

- d_c = διάμετρος του αγωγού φάσης (inches)
- d_s = εξωτερική διάμετρος της ταινίας θωράκισης (inches)
- d_{od} = εξωτερική διάμετρος του καλύμματος καλωδίου (inches)
- T = πάχος της ταινίας θωράκισης σε mils ($1 \text{ mils} = \frac{1}{1000} \text{ inch}$)
- r_{shield} = αντίσταση ταινίας θωράκισης $\left(\frac{\Omega}{\text{mile}}\right)$
- GMR_{shield} = ισοδύναμο γεωμετρικής μέσης ακτίνας που περνάει μέσα από το κέντρο της ταινίας θωράκισης (feet)
- r_c = αντίσταση αγωγού φάσης $\left(\frac{\Omega}{\text{mile}}\right)$
- GMR_c = Γεωμετρική μέση ακτίνα αγωγού φάσης (feet)

Τα περισσότερα από τα παραπάνω μεγέθη μπορούν αν βρεθούν από τους πίνακες της βιβλιογραφίας [3.2]. Παρόλα αυτά κάποια από τα μεγέθη εξάγονται σε συνδυασμό μεγεθών που δίνονται ως δεδομένα, από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$GMR_{shield} = \frac{d_s - \frac{T}{1000}}{24} \quad (3.40)$$

$$r_{shield} = \frac{2.3715 \cdot 7.9385}{d_s \cdot T} \quad (3.41)$$

Για να εξαχθεί η τιμή της μήτρας αντιστάσεων ακολουθείται και πάλι η μέθοδος του Carson που περιγράφεται στις εξισώσεις (3.25) και (3.26). Εφόσον πρέπει, για παράδειγμα, να υπολογιστεί η μήτρα σύνθετης αντίστασης σειράς ενός θωρακισμένου καλωδίου μιας μόνο φάσης και ενός αγωγού ουδετέρου θα προκύψει σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.25) και (3.26) ένας πίνακας $[Z_{\text{primitive}}]$ διαστάσεων 3×3 . Η κάθε γραμμή αυτού του πίνακα αναφέρεται στον αγωγό φάσης, στην ταινία θωράκισης και στον ουδέτερο αντιστοίχως. Όπως όμως προαναφέρθηκε, αυτό το οποίο απαιτείται στην περίπτωση της γραμμής είναι οι σύνθετες αντιστάσεις των αγωγών φάσεων και οι μεταξύ τους αυτεπαγωγές. Εφόσον, λοιπόν, υπάρχει μόνο μια φάση θα πρέπει να προκύπτει ένας πίνακας 3×3 με όλα τα στοιχεία μηδενικά, εκτός από το διαγώνιο στοιχείο του οποίου η γραμμή αντιστοιχεί στη φάση του καλωδίου.

Ο υπολογισμός της τιμής αυτού του στοιχείου μπορεί να γίνει από τον πίνακα $[Z_{\text{primitive}}]$ που υπολογίστηκε ήδη με τα παραπάνω στοιχεία και συγκεκριμένα με εφαρμογή των εξισώσεων (3.27) έως (3.33) σύμφωνα με τη μέθοδο μείωσης του Kron [3.2].

3.4.3 Υπολογισμός μήτρας εγκάρσιων αγωγιμοτήτων γραμμής

3.4.3.1 Εναέριες γραμμές διανομής

Εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα, η διαφορά της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου καθώς απομακρύνεται κάποιος από τον αγωγό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χωρητικοτήτων και ως εκ τούτου την ανάγκη εισαγωγής της εγκάρσιας μήτρας αγωγιμότητας στο μοντέλο που υλοποιήθηκε στην Ενότητα 3.4.1 για τη γραμμή διανομής.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η χρήση αυτής της μήτρας, ειδικά στις εναέριες γραμμές, δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα σε σχέση με την περίπτωση αγνόησής της. Παρόλα αυτά για να θεωρηθεί ολοκληρωμένη η μελέτη, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί και να συμπεριληφθεί στο μοντέλο της γραμμής.

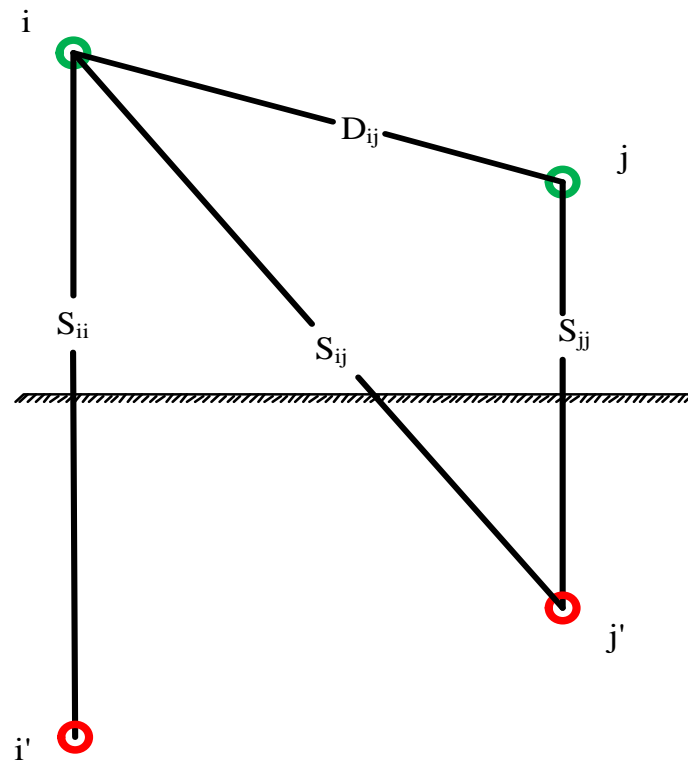
Στον υπολογισμό της μήτρας εγκάρσιας αγωγιμότητας χρησιμοποιείται η μέθοδος των ειδώλων και της επαλληλίας. Ειδικότερες λεπτομέρειες του υπολογισμού των τελικών εξισώσεων (3.42) και (3.43) μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία [3.2]. Κρίνεται όμως αναγκαίο να αναφερθεί πως στη μέθοδο των ειδώλων δημιουργούνται είδωλα των φορτίων που ουσιαστικά είναι τα συμμετρικά τους ως προς το γειωμένο επίπεδο (έδαφος), με αντίθετο όμως φορτίο. Ως εκ τούτου στο Σχήμα 3.8 χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι συμβολισμοί:

- S_{ii} =απόσταση αγωγού i από το είδωλό του (feet)
- D_{ij} =απόσταση αγωγού i από τον αγωγό j (feet)
- S_{ij} =απόσταση αγωγού i από το είδωλό του αγωγού j (feet)
- RD_i =ακτίνα αγωγού i (feet)

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3.42) έως (3.43) μπορεί να εξαχθούν οι τιμές των συντελεστών δυναμικού:

$$\hat{\rho}_{ii} = 11.17689 \cdot \ln \left(\frac{S_{ii}}{RD_i} \right) \frac{\text{mile}}{\mu\text{F}} \quad (3.42)$$

$$\hat{\rho}_{ij} = 11.17689 \cdot \ln \left(\frac{S_{ij}}{D_{ij}} \right) \frac{\text{mile}}{\mu\text{F}} \quad (3.43)$$



Σχήμα 3.8: Αποστάσεις στις εναέριες γραμμές.

Εφόσον έχουμε απουσία ουδέτερου ο πίνακας που θα περιλαμβάνει τους συντελεστές δυναμικού θα έχει, όμοια με την περίπτωση της μήτρας αντιστάσεων, διαστάσεις 3×3 . Έτσι με τη χρησιμοποίηση των εξισώσεων (3.44), (3.45) και (3.46) υπολογίζεται η μήτρα εγκάρσιων αγωγιμοτήτων.

$$[p_{abc}] = \begin{bmatrix} \hat{p}_{11} & \hat{p}_{12} & \hat{p}_{13} \\ \hat{p}_{21} & \hat{p}_{22} & \hat{p}_{23} \\ \hat{p}_{31} & \hat{p}_{32} & \hat{p}_{33} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$[C_{abc}] = [p_{abc}]^{-1} \quad (3.45)$$

$$[Y_{abc}] = 0 + j \cdot \omega \cdot [C_{abc}] \frac{\mu S}{mile} \quad (3.46)$$

Όμοια με την ανάλυση των εξισώσεων (3.27) έως (3.33) της Ενότητας 3.4.2.1, στην περίπτωση που υπάρχει και ουδέτερος αγωγός πρέπει να ακολουθηθεί η μέθοδος μείωσης του Kron, η οποία αναλύεται στις εξισώσεις (3.47) έως (3.53).

Το αποτέλεσμα της εξίσωσης (3.53) μπορεί εν συνεχεία να τοποθετηθεί στην εξίσωση (3.45). Με αντικατάσταση του πίνακα $[C_{abc}]$ στην (3.46) υπολογίζεται τελικά η τελική τιμή της εγκάρσιας αγωγιμότητας για τις εναέριες γραμμές.

$$P_{\text{primitive}} = \begin{bmatrix} \hat{p}_{11} & \hat{p}_{12} & \hat{p}_{13} & \hat{p}_{1n} \\ \hat{p}_{21} & \hat{p}_{22} & \hat{p}_{23} & \hat{p}_{2n} \\ \hat{p}_{31} & \hat{p}_{32} & \hat{p}_{33} & \hat{p}_{3n} \\ \hat{p}_{n1} & \hat{p}_{n2} & \hat{p}_{n3} & \hat{p}_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$[\hat{p}_{ij}] = \begin{bmatrix} \hat{p}_{11} & \hat{p}_{12} & \hat{p}_{13} \\ \hat{p}_{21} & \hat{p}_{22} & \hat{p}_{23} \\ \hat{p}_{31} & \hat{p}_{32} & \hat{p}_{33} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$$[\hat{p}_{in}] = \begin{bmatrix} \hat{p}_{1n} \\ \hat{p}_{2n} \\ \hat{p}_{3n} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

$$[\hat{p}_{nj}] = [\hat{p}_{n1} \quad \hat{p}_{n2} \quad \hat{p}_{n3}] \quad (3.50)$$

$$[\hat{p}_{in}] = \begin{bmatrix} \hat{p}_{1n} \\ \hat{p}_{2n} \\ \hat{p}_{3n} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$[\hat{p}_{nn}] = [\hat{p}_{nn}] \quad (3.52)$$

$$[P_{abc}] = [\hat{p}_{ij}] - [\hat{p}_{in}] * [\hat{p}_{nn}]^{-1} * [\hat{p}_{nj}] \quad (3.53)$$

3.4.3.2 Υπόγειες γραμμές διανομής

Όπως στις εναέριες, έτσι και στις υπόγειες γραμμές είναι αναγκαίο να υπολογιστεί η μήτρα εγκάρσιων αγωγιμοτήτων ώστε να χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο της γραμμής που περιγράφηκε στην Ενότητα 3.4.1. Όπως θα γίνει εύκολα αντιληπτό, τόσο για τις περιπτώσεις των καλωδίων με ομόκεντρο ουδέτερο όσο και για των θωρακισμένων υπόγειων καλωδίων, ο υπολογισμός της συγκεκριμένης μήτρας είναι μια πολύ πιο εύκολη διαδικασία σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις που έχουν ήδη περιγραφεί.

Στα υπόγεια καλώδια με ομόκεντρο ουδέτερο ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη για την εύρεση της μήτρας εγκάρσιας αγωγιμότητας:

- R_b = ακτίνα του κύκλου που περνάει μέσα από το κέντρο του συνόλου των ελασμάτων του ουδετέρου (inches)
- d_c = διάμετρος του αγωγού φάσης (inches)
- d_s = διάμετρος των ελασμάτων του αγωγού ουδετέρου (inches)
- k = σύνολο ελασμάτων του αγωγού ουδετέρου
- RD_c = ακτίνα του αγωγού φάσης (inches)
- RD_s = ακτίνα των ελασμάτων του αγωγού ουδετέρου (inches)

Με τη βοήθεια της εξίσωσης (3.54) βρίσκονται τα διαγώνια στοιχεία της μήτρας:

$$Y_{\text{phase-g}} = 0 + j \cdot \frac{77.3619}{\ln\left(\frac{R_b}{RD_c}\right) - \frac{1}{k} \ln\left(\frac{k \cdot RD_s}{R_b}\right)} \frac{\mu S}{\text{mile}} \quad (3.54)$$

Να σημειωθεί ότι η μήτρα αγωγιμοτήτων αυτού του τύπου καλωδίων είναι μηδενική σε όλα τα στοιχεία της εκτός των διαγωνίων.

Στα θωρακισμένα υπόγεια καλώδια τα αντίστοιχα διαγώνια στοιχεία υπολογίζονται διαμέσου της εξίσωσης (3.55):

$$Y_{\text{phase}_g} = 0 + j \cdot \frac{77.3619}{\ln\left(\frac{R_p}{R_{Dc}}\right)} \frac{\mu S}{\text{mile}} \quad (3.55)$$

3.5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Οι μετασχηματιστές αποτελούν ένα απαραίτητο στοιχείο ενός συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ως γνωστόν, η τάση στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να παρέχεται στους καταναλωτές σε συγκεκριμένα επίπεδα, ώστε να είναι δυνατή η ασφαλής χρησιμοποίησή της από τα αντίστοιχα φορτία. Οι τάσεις όμως δεν έχουν σε όλα τα στάδια του συστήματος το ίδιο επίπεδο. Κατά τη παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας επικρατούν κατά περίπτωση διαφορετικά επίπεδα τάσης.

Στα δίκτυα μεταφοράς η τάση συνηθίζεται να είναι σε υψηλά επίπεδα. Αυτό συμβαίνει διότι υψηλή τιμή της τάσης συνεπάγεται μικρότερη τιμή του ρεύματος για την ίδια παρεχόμενη ισχύ. Με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιούνται οι απώλειες στα επιμέρους στοιχεία του δικτύου και κατά κύριο λόγο στις γραμμές μεταφοράς.

Το ίδιο όμως δεν μπορεί να συμβεί στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το στάδιο προτιμάται να υπάρχει επίπεδο τάσης στο οποίο μπορούν να τροφοδοτηθούν οι πελάτες που έχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, αλλά και οι πελάτες που απαιτούν χαμηλότερη ισχύ όπως οι οικιακοί καταναλωτές. Έτσι στα δίκτυα διανομής προτιμάται η μέση τάση.

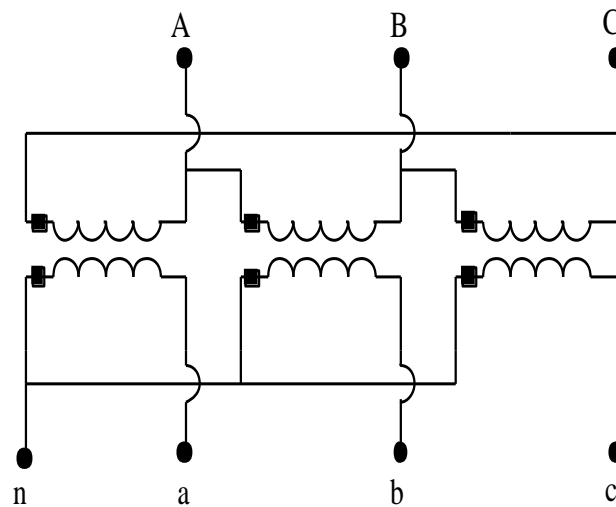
Οι μετασχηματιστές είναι τα στοιχεία του δικτύου που αναλαμβάνουν το έργο της ανύψωσης και του υποβιβασμού της τάσης σε όλα τα στάδια παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ισχύος. Εξυπακούεται ότι στο στάδιο της διανομής οι μετασχηματιστές αναλαμβάνουν τη διαδικασία υποβιβασμού της τάσης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η παροχή της σύμφωνα με τις προδιαγραφές των φορτίων του καταναλωτή.

Ο πρώτος μετασχηματιστής που συναντάται συνήθως σε ένα σύστημα διανομής, είναι ο μετασχηματιστής υποβιβασμού του υποσταθμού διανομής, ο οποίος διασυνδέει το σύστημα διανομής με το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μετασχηματιστές υπάρχουν όμως και σε τμήματα του δικτύου που απαιτείται υποβιβασμός της τάσης, όπως στην περίπτωση των οικιακών καταναλωτών που προαναφέρθηκαν.

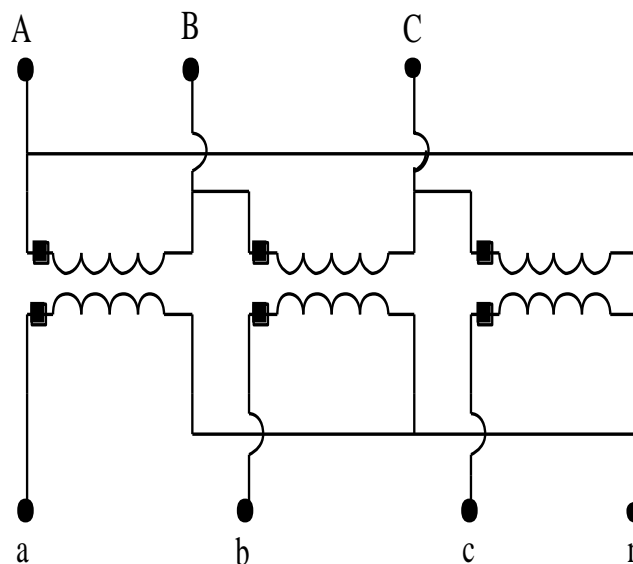
Η σωστή μοντελοποίηση ενός μετασχηματιστή είναι διαδικασία απαραίτητη για να υπάρξουν σωστά αποτελέσματα σε έναν αλγόριθμο ροής φορτίου. Υπάρχουν πολλές συνδεσμολογίες στους τριφασικούς μετασχηματιστές, οι βασικότερες όμως κατηγορίες που εμφανίζονται στα συστήματα διανομής είναι :

- τριγώνου - γειωμένου αστέρα (Delta - grounded Wye)
- γειωμένου αστέρα - γειωμένου αστέρα (grounded Wye - grounded Wye)
- τριγώνου - τριγώνου (Delta - Delta)
- ανοικτού αστέρα – ανοικτού τριγώνου (open Wye – open Delta)

Να σημειωθεί ότι όλες αυτές οι συνδεσμολογίες θα αναλυθούν για την περίπτωση των μετασχηματιστών υποβιβασμού (step down), μιας και αυτή η κατηγορία συναντάται στα δίκτυα διανομής. Σε μερικές συνδεσμολογίες όπως οι τύπου γειωμένου αστέρα - γειωμένου αστέρα, τόσο για την περίπτωση υποβιβασμού όσο και για την περίπτωση των ανύψωσης τάσης, ισχύουν οι ίδιες ακριβώς εξισώσεις. Στη περίπτωση όμως τριγώνου - γειωμένου αστέρα οι εξισώσεις των μετασχηματιστών ανύψωσης διαφέρουν από αυτές των μετασχηματιστών υποβιβασμού. Αυτό συμβαίνει διότι αλλάζουν οι συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων όπως αυτό φαίνεται και στα Σχήματα 3.9 και 3.10. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η τάση του πρωτεύοντος στο μετασχηματιστή υποβιβασμού προηγείται του δευτερεύοντος κατά 30 μοίρες, ενώ στο μετασχηματιστή ανύψωσης υστερεί η φάση του κατά 30 μοίρες [3.2].



Σχήμα 3.9: Τριγώνου - Γειωμένου αστέρα, υποβιβασμού.



Σχήμα 3.10: Τριγώνου - Γειωμένου αστέρα, ανύψωσης.

Οι εξισώσεις που θα περιγράφουν τους μετασχηματιστές, θα έχουν τη γενική μορφή:

$$[VLN_m] = [a_t] \cdot [VLN_n] + [b_t] \cdot [I_n] \quad (3.56)$$

$$[I_m] = [c_t] \cdot [VLN_n] + [d_t] \cdot [I_n] \quad (3.57)$$

$$[VLN_n] = [A_t] \cdot [VLN_m] - [B_t] \cdot [I_n] \quad (3.58)$$

Με τις εξισώσεις αυτές μπορεί να υπολογιστεί η τάση στο δευτερεύον (ζυγός n), εφόσον δίνεται το ρεύμα στο πρωτεύον (ζυγός m). Επίσης, με τα ίδια δεδομένα μπορεί να βρεθεί και το ρεύμα του πρωτεύοντος. Κατά την αντίστροφη διαδικασία, εφόσον είναι γνωστή η τάση στο πρωτεύον και το ρεύμα του δευτερεύοντος μπορεί να βρεθεί η τάση στο δευτερεύον. Όπως και στη μοντελοποίηση των γραμμών έτσι και στον μετασχηματιστή, οι εξισώσεις πήραν την κατάλληλη μορφή ώστε να είναι απευθείας εφαρμόσιμες στον αλγόριθμο backward and forward sweep που θα περιγραφεί στο Κεφάλαιο 4.

Επομένως για τις συνδεσμολογίες μετασχηματιστών που θα αναλυθούν, θα οριστούν απλά οι πίνακες που συμμετέχουν στις εξισώσεις (3.56) έως (3.58), καθώς και τα απαραίτητα μεγέθη για τον ορισμό αυτών. Να σημειωθεί ότι ο πίνακας $[c_t]$ θα θεωρηθεί μηδενικός σε όλες τις συνδεσμολογίες που θα αναλυθούν, καθώς είναι αμελητέο το ρεύμα το οποίο διαρρέει τον εγκάρσιο κλάδο του μετασχηματιστή σε σχέση με αυτό που διαρρέει την αντίσταση σειράς και φτάνει στο δευτερεύον.

Άρα για όλες τις περιπτώσεις θα θεωρηθεί:

$$[c_t] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

Επίσης να τονιστεί ότι τα μεγέθη Z_{t_a} , Z_{t_b} και Z_{t_c} , αναφέρονται στις εκφρασμένες ως προς τη χαμηλή τάση (ως προς το δευτερεύον) τιμές της σύνθετης αντίστασης σειράς της αντίστοιχης φάσης του μετασχηματιστή.

➤ **Μετασχηματιστές υποβιβασμού τριγώνου - γειωμένου αστέρα**

$$n_t = \frac{VLL_{Rated \ primary}}{VLN_{Rated \ secondary}} \quad (3.60)$$

Όπου $VLL_{Rated \ primary}$ και $VLN_{Rated \ secondary}$ είναι η ονομαστική πολική τάση του πρωτεύοντος και η ονομαστική φασική τάση του δευτερεύοντος, αντίστοιχα.

$$[a_t] = -\frac{n_t}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

$$[b_t] = -\frac{n_t}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 2 \cdot Z_{t_b} & Z_{t_c} \\ Z_{t_a} & 0 & 2 \cdot Z_{t_c} \\ 2 \cdot Z_{t_a} & Z_{t_b} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

$$[d_t] = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

$$[B_t] = \begin{bmatrix} Zt_a & 0 & 0 \\ 0 & Zt_b & 0 \\ 0 & 0 & Zt_c \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

$$[A_t] = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

➤ Μετασχηματιστές υποβιβασμού **γειωμένου αστέρα - γειωμένου αστέρα**

$$n_t = \frac{VLN_{\text{Rated primary}}}{VLN_{\text{Rated secondary}}} \quad (3.66)$$

Όπου $VLN_{\text{Rated primary}}$ είναι η ονομαστική φασική τάση του πρωτεύοντος.

$$[a_t] = n_t \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

$$[b_t] = n_t \cdot \begin{bmatrix} Zt_a & 0 & 0 \\ 0 & Zt_b & 0 \\ 0 & 0 & Zt_c \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

$$[d_t] = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

$$[B_t] = \begin{bmatrix} Zt_a & 0 & 0 \\ 0 & Zt_b & 0 \\ 0 & 0 & Zt_c \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

$$[A_t] = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

➤ Μετασχηματιστές **τριγώνου - τριγώνου**

$$n_t = \frac{VLL_{\text{Rated primary}}}{VLL_{\text{Rated secondary}}} \quad (3.72)$$

Όπου $VLL_{\text{Rated secondary}}$ είναι η ονομαστική πολική τάση του δευτερεύοντος.

$$[a_t] = \frac{n_t}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

$$[G1] = \frac{1}{Z_{tab} + Z_{tbc} + Z_{tca}} \cdot \begin{bmatrix} Z_{tca} & -Z_{tbc} & 0 \\ Z_{tca} & Z_{tab} + Z_{tca} & 0 \\ -Z_{tab} - Z_{tbc} & -Z_{tbc} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

$$[b_t] = \frac{n_t}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{tab} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{tbc} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{tca} \end{bmatrix} \cdot [G1] \quad (3.75)$$

$$[d_t] = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

$$[B_t] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{tab} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{tbc} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{tca} \end{bmatrix} \cdot [G1] \quad (3.77)$$

$$[A_t] = \frac{1}{3 \cdot n_t} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

➤ Μετασχηματιστές **ανοικτού αστέρα – ανοικτού τριγώνου**

$$n_t = \frac{V_{LN}^{\text{Rated primary}}}{V_{LL}^{\text{Rated secondary}}} \quad (3.79)$$

$$[a_t] = \begin{bmatrix} n_t & -n_t & 0 \\ 0 & n_t & -n_t \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

$$[b_t] = \begin{bmatrix} n_t \cdot Z_{tab} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -n_t \cdot Z_{tbc} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

$$[d_t] = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

$$[B_t] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 \cdot Z_{tab} & 0 & -Z_{tbc} \\ -Z_{tab} & 0 & -Z_{tbc} \\ -Z_{tab} & 0 & 2 \cdot Z_{tbc} \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

$$[A_t] = \frac{1}{3 \cdot n_t} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & -2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

3.6 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια έντονη τάση χρησιμοποίησης της εναλλακτικής και της πράσινης ενέργειας. Εξαιτίας της μείωσης της διαθεσιμότητας των ορυκτών πόρων και

της αύξησης της τιμής τους, όλο και περισσότερα κράτη στρέφονται προς τα φωτοβολταϊκά συστήματα, την αιολική ενέργεια καθώς και άλλες μορφές εναλλακτικής ενέργειας.

Είναι λοιπόν αναπόφευκτο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να διασπείρεται κατά μήκος ενός συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως κρίνεται αναγκαίο να μπορεί η ανάλυση ροής φορτίου να συμπεριλάβει στους υπολογισμούς της και τη διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στους ζυγούς του συστήματος. Το μοντέλο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό το στοιχείο έχει ως στόχο την αποφυγή της πολυπλοκότητας και τη συμβατότητα με τη χρησιμοποίηση του αλγορίθμου backward & forward sweeper που θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 4.

Οι γεννήτριες διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- τις γεννήτριες PV όπου είναι σταθερή η παραγωγή της ενεργού ισχύος και της τάσης εξόδου
- τις γεννήτριες PQ όπου είναι σταθερή η παραγωγή της μιγαδικής ισχύος και το ρεύμα μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η τάση του ζυγού που συνδέονται.

Λόγω τις ιδιομορφίας του αλγορίθμου ανάλυσης ροής φορτίου των ακτινικών δικτύων διανομής, θα χρησιμοποιηθεί και θα αναλυθεί μόνο η περίπτωση των γεννητριών PQ. Η εξίσωση η οποία διέπει το μοντέλο της διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ακόλουθη:

$$[I_{\text{cogenerator}}] = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{a_cogen} \\ \tilde{I}_{b_cogen} \\ \tilde{I}_{c_cogen} \end{bmatrix}_{\text{injected}} = \begin{bmatrix} \tilde{S}_a \\ \tilde{S}_b \\ \tilde{S}_c \end{bmatrix}_{\text{cogen.}} \cdot / \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix}_{\text{bus}} \quad (3.85)$$

Με την εξίσωση (3.85) γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ισχύς παραμένει σταθερή και ανάλογα με την τάση του συνδεδεμένου ζυγού αλλάζει και το εγχεόμενο ρεύμα της γεννήτριας.

3.7 ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ

Οι ρυθμιστές τάσης αναλαμβάνουν να ρυθμίσουν την τάση σε συγκεκριμένο σημείο του δικτύου. Το σημείο αυτό ονομάζεται **κέντρο ρύθμισης** και η τιμή ρύθμισης που προσπαθεί να εφαρμόσει ο ρυθμιστής στο συγκεκριμένο σημείο είναι η ονομαστική τάση του δικτύου στο συγκεκριμένο τμήμα. Η ρύθμιση αυτή φυσικά επηρεάζει τις τάσεις του δικτύου όχι μόνο στο κέντρο ρύθμισης, αλλά τόσο στα σημεία που έπονται αυτού όσο και στα σημεία που βρίσκονται μεταξύ του ρυθμιστή και του κέντρου ρύθμισης.

Ο ρυθμιστής τάσης δεν είναι τίποτε διαφορετικό από έναν αυτομετασχηματιστή, ο οποίος διαθέτει λήψεις (taps) και ένα μηχανισμό επιλογής της κατάλληλης λήψης. Διαφορετικές λήψεις είναι ουσιαστικά διαφορετικές τιμές των τυλιγμάτων του αυτομετασχηματιστή και έχουν ως αποτέλεσμα υποβιβασμό ή ανύψωση της τάσης κατά ένα ποσοστό.

Ένα αναλογικό κύκλωμα το οποίο ονομάζεται **αντισταθμιστής πτώσης τάσης** (line drop compensator) καλείται να εντοπίσει το ποσοστό της πτώσης τάσης και να εφαρμόσει την κατάλληλη λήψη στον αυτομετασχηματιστή έτσι ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή τιμής

(3.86) δίνει την αντιστοιχία της τιμής της ισοδύναμης αντίστασης στον αντισταθμιστή σε ohm σε σχέση με την $R' + j \cdot X'$.

$$R' + j \cdot X' = (R_{comp\Omega} + j \cdot X_{comp\Omega}) \cdot CT_s \quad (3.86)$$

Για τον υπολογισμό της \tilde{V}_{relay} πρέπει να εφαρμοστεί στο κύκλωμα του αντισταθμιστή ο νόμος τάσεων του Kirchhoff. Εφαρμόζοντας διαδοχικά τις εξισώσεις (3.87) έως (3.89) προκύπτει η τιμή της \tilde{V}_{relay} .

$$\tilde{I}_{comp} = \tilde{I}_{line} \cdot \frac{CT_s}{CT_p} \quad (3.87)$$

$$\tilde{V}_{drop} = (R_{comp\Omega} + j \cdot X_{comp\Omega}) \cdot \tilde{I}_{comp} \quad (3.88)$$

$$\tilde{V}_{relay} = \tilde{V}_{reg} - \tilde{V}_{drop} \quad (3.89)$$

Για κάθε ρυθμιστή παρέχονται ως δεδομένα η ονομαστική τάση του αντισταθμιστή του ($V_{comp_{nom}}$) και το εύρος ζώνης στο οποίο μπορεί να κινείται η τιμή της τάσης του κέντρου ρύθμισης σε σχέση με την ονομαστική (bandwidth). Η λήψη πρέπει επομένως να υπολογίζεται ώστε η τιμή στο κέντρο ρύθμισης να είναι τουλάχιστον όσο η ονομαστική μειωμένη κατά το μισό του εύρους ζώνης της. Επίσης ισχύει για τους τυπικούς ρυθμιστές ότι κάθε λήψη αντιστοιχεί σε $\frac{5}{8}\%$ ή αλλιώς 0.00625 p.u. αλλαγή της τάσης [3.2].

Επομένως για τη λήψη η οποία θα επιλεγεί ισχύει:

$$Tap = \frac{V_{comp_{nom}} - \frac{1}{2} \cdot bandwidth_{comp} - |V_{relay}|}{V_{comp_{nom}} \cdot 0.00625} \quad (3.90)$$

Εξυπακούεται ότι υπάρχει όριο στον αριθμό των λήψεων και δεν θα πρέπει να παραβιάζεται η συνθήκη:

$$0.9 \leq 1 - Tap \cdot 0.00625 \leq 1.1 \quad (3.91)$$

Δεδομένης της λήψης που έχει επιλεγεί είναι εύκολο να υλοποιηθούν οι εξισώσεις του ρυθμιστή. Σε αυτό βοηθάει το ότι έχουν ήδη διαμορφωθεί οι εξισώσεις του μετασχηματιστή οπότε θα υπάρχει η ίδια ακριβώς μοντελοποίηση και στον ρυθμιστή. Η μοντελοποίηση ακολουθεί θεώρηση τριφασικού ρυθμιστή σε συνδεσμολογία γειωμένου αστέρα, μιας και αυτή είναι η συνδεσμολογία που συνήθως συναντάται στα γειωμένα τμήματα του δικτύου. Φυσικά βάζοντας σε κάποια λήψη την τιμή μηδέν είναι ουσιαστικά σαν να αγνοείται η ύπαρξη ρυθμιστή για τη συγκεκριμένη φάση.

Συγκεκριμένα οι εξισώσεις μοντελοποίησης του ρυθμιστή είναι:

$$[VLN_m] = [a_{reg}] \cdot [VLN_n] + [b_{reg}] \cdot [I_n] \quad (3.92)$$

$$[I_m] = [c_{reg}] \cdot [VLN_n] + [d_{reg}] \cdot [I_n] \quad (3.93)$$

$$[VLN_n] = [A_{reg}] \cdot [VLN_m] - [B_{reg}] \cdot [I_n] \quad (3.94)$$

όπου οι αντίστοιχοι πίνακες ορίζονται ως ακολούθως:

$$a_{R_phase} = 1 - Tap_{phase} \cdot 0.00625 \quad (3.95)$$

$$[a_{reg}] = \begin{bmatrix} a_{R_a} & 0 & 0 \\ 0 & a_{R_b} & 0 \\ 0 & 0 & a_{R_c} \end{bmatrix} \quad (3.96)$$

$$[b_{reg}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.97)$$

$$[d_{reg}] = \begin{bmatrix} a_{R_a}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & a_{R_b}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & a_{R_c}^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.98)$$

$$[B_{reg}] = [a_{reg}]^{-1} * [b_{reg}] \quad (3.99)$$

$$[A_{reg}] = [a_{reg}]^{-1} \quad (3.100)$$

$$[c_{reg}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.101)$$

3.8 ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ

Οι διακόπτες στα δίκτυα διανομής έχουν το ρόλο της σύνδεσης και της αποσύνδεσης τμημάτων του δικτύου από την τροφοδοσία. Σε ένα ακτινικό δίκτυο το κλείσιμο κάποιων διακοπών μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία βρόχων, γεγονός το οποίο αναιρεί την ακτινική φύση του δικτύου. Σε μια τέτοια περίπτωση αλγόριθμοι που προορίζονται αυστηρά για δίκτυα ακτινικής τοπολογίας, δεν θα έχουν σωστά αποτελέσματα. Επομένως ο χρήστης θα πρέπει να φροντίζει οι διακόπτες που επιλέγει να είναι κλειστοί να μη δημιουργούν βρόχους στο δίκτυο.

Η ύπαρξη διακοπών μπορεί να εξυπηρετεί την αποσύνδεση μέρους του δικτύου για την προγραμματισμένη ή μη συντήρησή του, είτε την εναλλακτική τροφοδότηση τμημάτων του δικτύου από άλλη πηγή. Επίσης ανάλογα με τον τόπο λειτουργίας τους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

- Διακόπτες ελαίου
- Διακόπτες αέρος
- Διακόπτες κενού
- Διακόπτες SF6 (εξαφθοριούχου θείου)

Φυσικά όσο πιο υψηλό είναι το επίπεδο της τάσης τόσο πιο μεγάλη είναι η απαίτηση μείωσης της φθοράς εξαιτίας του ηλεκτρικού τόξου καθώς και η απαίτηση αύξησης της μόνωσης.

Σε κάθε περίπτωση η μοντελοποίηση των διακοπών είναι ίδια για όλους του διακόπτες ανεξαρτήτως της φύσεώς τους και του λόγου για τον οποίο έχουν τοποθετηθεί στο συγκεκριμένο σημείο του δικτύου.

- Ένας ανοικτός διακόπτης λειτουργεί ως ανοιχτοκύκλωμα και απομονώνει το συγκεκριμένο τμήμα του δικτύου.
- Ένας κλειστός διακόπτης λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα και μεταφέρει χωρίς καμία μεταβολή την τάση και το ρεύμα από τον αρχικό ζυγό, στον ζυγό με τον οποίο τον διασυνδέει ο διακόπτης.

Οι εξισώσεις του κλειστού διακόπτη είναι οι ακόλουθες:

$$[V_{1,abc}] = [V_{2,abc}] \quad (3.102)$$

$$[I_{1,abc}] = [I_{2,abc}] \quad (3.103)$$

3.9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] R. Zimmerman, *Comprehensive Distribution Power Flow: Modeling, Formulation, Solution Algorithms and Analysis*, Ph.D. Dissertation, Cornell University, Jan. 1995, pp. 21-41.
- [3.2] W. Kersting, *Distribution System Modeling Analysis*, New Mexico: CRC Press, 2002, pp. 77-125, pp. 162-180, pp. 199-245, pp. 251-261.
- [3.3] Μ. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος Ι*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1994, σελ. 30-35.
- [3.4] Ν. Μάργαρης, *Ανάλυση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων, Τόμος Α*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2008, σελ. 217-230.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ “BACKWARD AND FORWARD SWEEP”

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία για την ανάλυση ροής φορτίου ασύμμετρων ακτινικών δικτύων διανομής έχει την ονομασία: “Backward and Forward Sweep”. Η ελληνική μετάφραση της ονομασίας του αλγορίθμου αντιστοιχεί στην περιγραφή “πίσω και εμπρός εκκαθάριση”, η οποία και περιγράφει τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου.

Ουσιαστικά ο συγκεκριμένος αλγόριθμος σε κάθε επανάληψη διατρέχει από μια φορά το ακτινικό δίκτυο διανομής με την RBF σειρά διάσχισης που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.3 και με την BF σειρά διάσχισης, η οποία είναι η αντίστροφη της RBF. Η πρώτη διάσχιση αντιστοιχεί στην προς τα πίσω εκκαθάριση (Backward Sweep) και η δεύτερη στην προς τα εμπρός εκκαθάριση (Forward Sweep) [4.1].

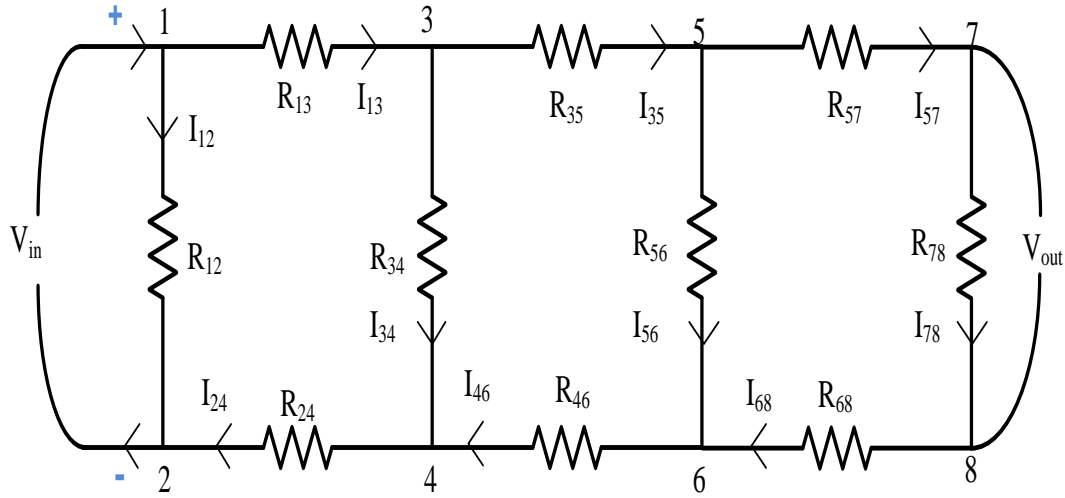
Ο αλγόριθμος αυτός, όπως άλλωστε και οι περισσότεροι που κάνουν ανάλυση ροής φορτίου στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, βασίζεται στη θεωρία των επαναληπτικών μεθόδων της αριθμητικής ανάλυσης. Χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτών των μεθοδολογιών είναι τα ακόλουθα γενικά βήματα:

- ❖ Η πρόβλεψη μιας αρχικής τιμής των άγνωστων μεγεθών που πρέπει να υπολογιστούν, η οποία στην περίπτωση αυτή είναι η τάση των ζυγών του δικτύου, εκτός φυσικά από την τάση του τροφοδότη, η οποία θεωρείται γνωστή.
- ❖ Με χρήση των εξισώσεων που συνδέουν τα ζητούμενα με τα ήδη γνωστά μεγέθη, υπολογίζονται οι νέες τιμές των προκαθορισμένων από το πρόβλημα μεταβλητών (αρχικές συνθήκες).
- ❖ Γίνεται εύρεση της τιμής του σφάλματος μεταξύ αρχικής και υπολογισθείσας τιμής μιας ή περισσοτέρων μεταβλητών οι οποίες ήταν εξαρχής γνωστές και ακολουθεί διόρθωση της αρχικής πρόβλεψης των ζητούμενων μεγεθών ή σύγκλιση εφόσον το σφάλμα βρίσκεται κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή.

Η αρχική ιδέα από την οποία προήλθε η εφαρμογή της μεθόδου backward and forward sweep είναι τα κλιμακωτά κυκλώματα ή αλλιώς κυκλώματα σκάλας (ladder circuits), τα οποία συναντώνται στη θεωρία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων [4.2]. Στο Σχήμα 4.1 αναπαρίσταται ένα τέτοιο κύκλωμα, στο οποίο γνωστή είναι η τάση εισόδου (V_{in}) και άγνωστη η τάση εξόδου (V_{out}).

Ένα τέτοιο κύκλωμα επιλύεται θεωρώντας μια τυχαία τιμή, ως πρόβλεψη, της V_{out} . Εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm στον κλάδο 7-8 υπολογίζεται ότι:

$$I_{78} = \frac{V_{out_προβλεψη}}{R_{78}} \quad (4.1)$$



Σχήμα 4.1: Κλιμακωτό κύκλωμα.

Από νόμο τάσεων και ρευμάτων Kirchhoff στον βρόχο 5-7-8-6-5 προκύπτει ότι:

$$V_{56} = \frac{V_{\text{out_πρόβλεψη}}}{R_{78}} \cdot (R_{57} + R_{78} + R_{68}) \quad (4.2)$$

Ομοίως με την (4.1) ισχύει για εφαρμογή νόμου Ohm στον κλάδο 5-6:

$$I_{56} = \frac{V_{56}}{R_{56}} \quad (4.3)$$

Επομένως με εφαρμογή νόμου τάσεων και ρευμάτων Kirchhoff στον βρόχο 3-5-6-4-3 προκύπτει ότι:

$$V_{34} = (I_{56} + I_{78}) \cdot (R_{35} + R_{46}) + V_{56} \quad (4.4)$$

Τέλος εφαρμόζοντας τους νόμους Ohm και Kirchhoff στον βρόχο 1-3-4-2-1 και στον κλάδο 3-4 προκύπτει ότι:

$$I_{34} = \frac{V_{34}}{R_{34}} \quad (4.5)$$

$$V_{12} = (I_{34} + I_{56} + I_{78}) \cdot (R_{13} + R_{24}) + V_{34} \quad (4.6)$$

Επομένως από τις εξισώσεις (4.1) έως (4.6) προκύπτει ότι η V_{in} μπορεί να εκφραστεί μόνο συναρτήσει της τιμής $V_{\text{out_πρόβλεψη}}$ και των αντιστάσεων του κυκλώματος.

Γνωρίζοντας τώρα την πραγματική τιμή της V_{in} είναι δυνατό να βρεθεί η αναλογία :

$$\lambda = \frac{V_{in \text{ πραγματικο}}}{V_{in \text{ πρόβλεψη}}} \quad (4.8)$$

Τέλος χρησιμοποιώντας το ότι το κύκλωμα είναι γραμμικό, προκύπτει:

$$V_{out \text{ πραγματικο}} = \lambda \cdot V_{out \text{ πρόβλεψη}} \quad (4.9)$$

Δυστυχώς όμως τα δίκτυα τα οποία πρόκειται να μελετηθούν δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως γραμμικά. Αυτό συμβαίνει διότι δεν υπάρχει γραμμικότητα σε πολλά στοιχεία τους, όπως είναι για παράδειγμα στα φορτία σταθερής έντασης και στα φορτία σταθερής ισχύος. Επομένως η εξίσωση (4.9) δεν μπορεί να εφαρμοστεί και είναι απαραίτητο να γίνουν αρκετές επαναλήψεις με κατάλληλη διόρθωση κάθε φορά, έτσι ώστε να οδηγηθεί σε σύγκλιση η μέθοδος. Σε κάθε περίπτωση η μέθοδος της σκάλας (ladder method) αποτέλεσε το εφαλτήριο για τη δημιουργία της μεθόδου backward and forward sweep [4.2].

4.2 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ “BACKWARD AND FORWARD SWEEP”

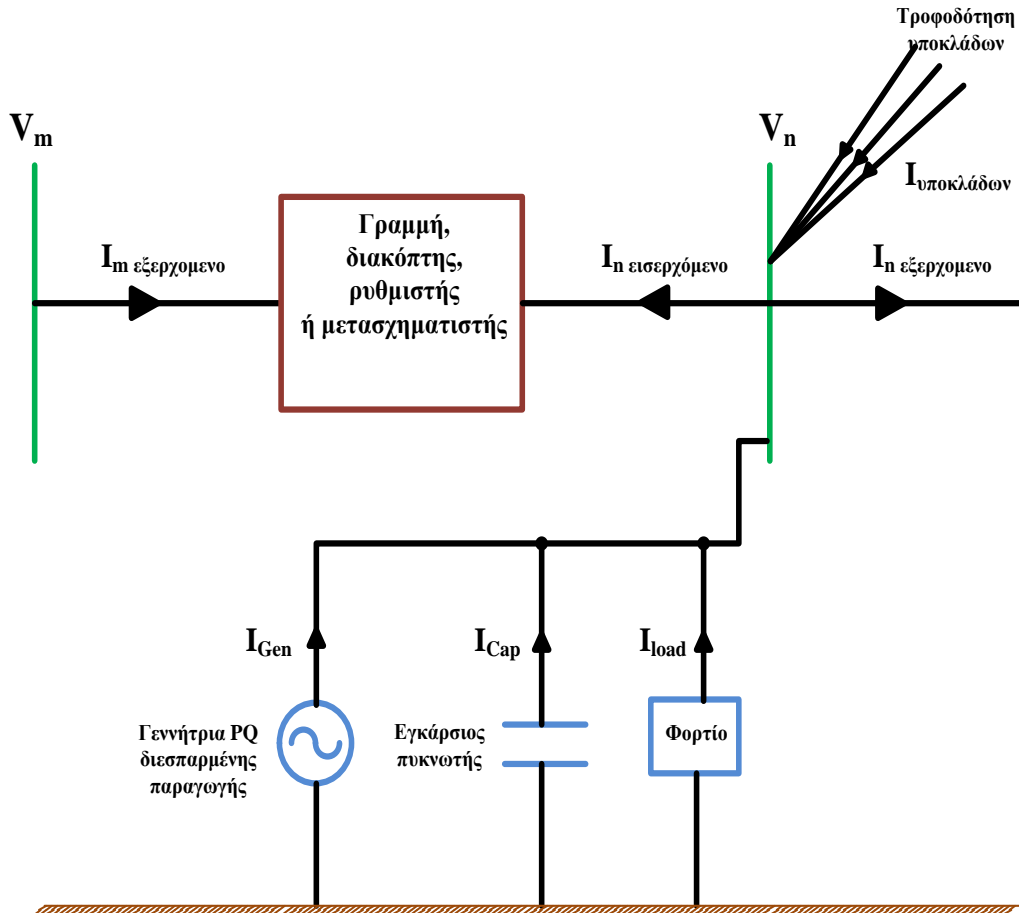
4.2.1 Βήματα Backward Sweep

Όπως δηλώνει και η ίδια η ονομασία του αλγορίθμου, το πρώτο στάδιο της εφαρμογής του είναι το Backward Sweep. Πριν από την εκκίνηση του αλγορίθμου έχει γίνει η αρχικοποίηση όλων των τάσεων των ζυγών με κάποιες τιμές πρόβλεψης, οι οποίες είναι κατά προτίμηση οι ονομαστικές τάσεις λειτουργίας του συστήματος στους συγκεκριμένους ζυγούς. Η κίνηση αυτή κρίνεται απαραίτητη καθώς η ακολουθούμενη μέθοδος απαιτεί μια οποιαδήποτε τιμή πρόβλεψης στα RBF άκρα του δικτύου.

Στη συνέχεια γίνεται διάσχιση του κάθε υποκλάδου του ακτινικού δικτύου με RBF (reverse breadth first) σειρά ξεκινώντας από το τέλος του (τελευταίος ζυγός του υποκλάδου) μέχρι και το πρώτο στοιχείο του. Η συγκεκριμένη διαδρομή απλοποιείται αρκετά με την ανάθεση δεικτών στους ζυγούς, διαδικασία που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.3.

Σε κάθε ζυγό γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff με βάση τα στοιχεία τα οποία είναι τοποθετημένα σε αυτόν (εγκάρσιοι πυκνωτές, φορτία, γεννήτριες διεσπαρμένης παραγωγής) αλλά και τις τυχόν αναχωρήσεις διαφορετικών υποκλάδων που ξεκινούν από τον εξεταζόμενο ζυγό. Η εφαρμογή του νόμου ρευμάτων είναι απαραίτητη ώστε από το ρεύμα εξόδου του ζυγού να βρεθεί το ρεύμα εισόδου στο ζυγό. Στο Σχήμα 4.2 φαίνονται τα ρεύματα και οι φορές τους για το ζυγό n. Η φορά των ρευμάτων καθορίζει και τα πρόσημα που θα έχουν στην εξίσωση του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff :

$$I_n \text{ εισερχόμενο} = I_{gen} + I_{cap} + I_{load} + \sum I_{\text{υποκλάδων}} - I_n \text{ εξερχόμενο} \quad (4.10)$$



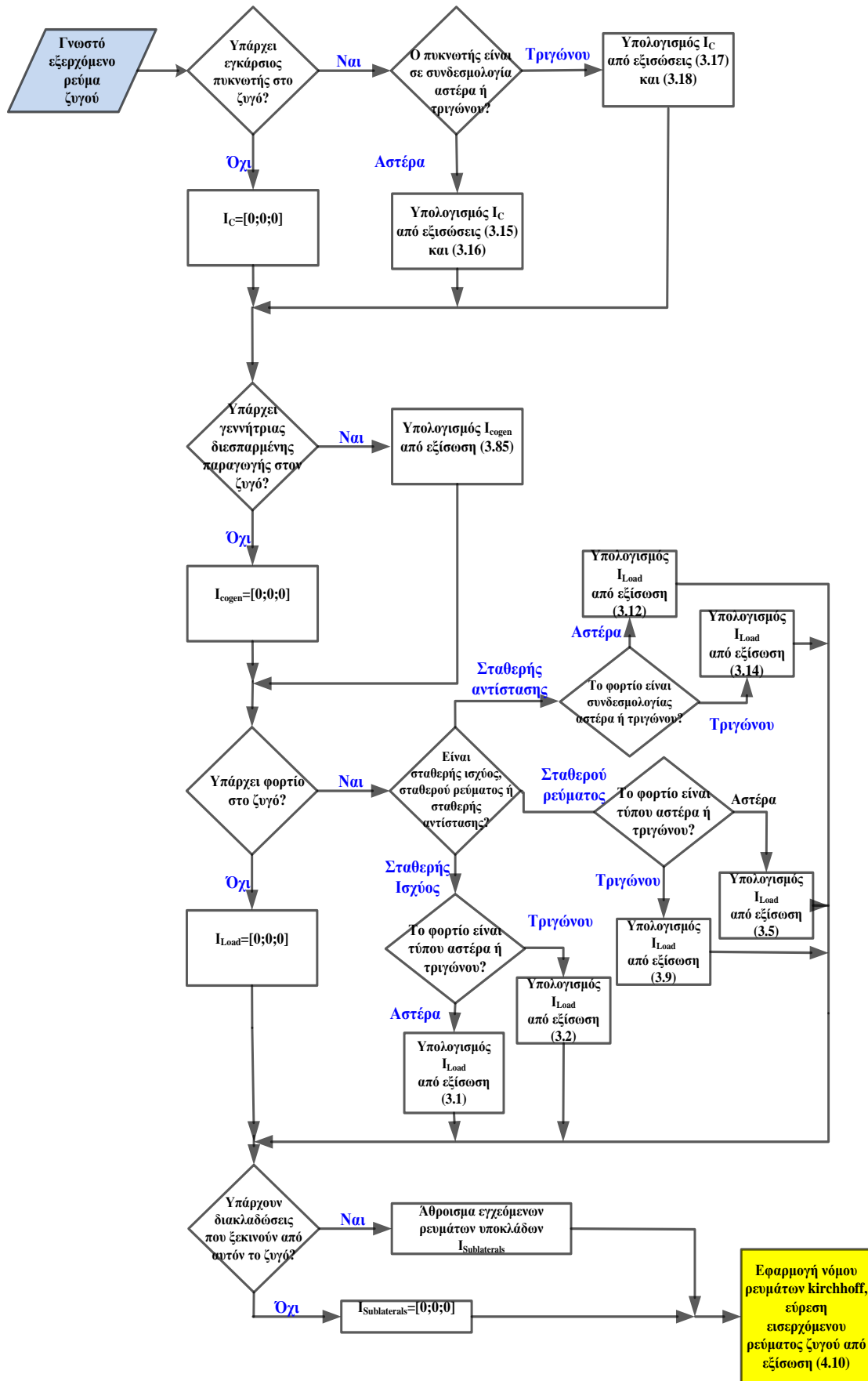
Σχήμα 4.2: Συνδεσμολογία ζυγού στο σύστημα.

Όσο και αν φαίνεται απλή εκ πρώτης όψεως, η εφαρμογή του νόμου του Kirchhoff στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι τόσο εύκολη. Προϋποθέτει ότι έχει προηγουμένως γίνει η εύρεση όλων αυτών των ρευμάτων που εμπλέκονται στην εξίσωση (4.10), μέσω των κατάλληλων εξισώσεων που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Η δυνατότητα επιλογής μεταξύ έξι διαφορετικών συνδυασμών ανάμεσα σε συνδεσμολογίες και τύπους φορτίων καθώς και η παρουσία γεννήτριας διεσπαρμένης παραγωγής ή και εγκάρσιου πυκνωτή για αντιστάθμιση στο ζυγό, μαζί με την εύρεση εγχεόμενων ρευμάτων σε υποκλάδους κάνει πιο πολύπλοκη την εύρεση του εισερχόμενου ρεύματος. Αυτός είναι και ο λόγος που το λογικό διάγραμμα της συγκεκριμένης διαδικασίας (Σχήμα 4.3) φαίνεται αρκετά «δαιδαλώδες».

Αφότου γίνει εύρεση του εισερχόμενου ρεύματος ακολουθεί ο υπολογισμός της τάσης του προηγούμενου ζυγού με τον οποίο διασυνδέεται ο εξεταζόμενος ζυγός στον ίδιο υποκλάδο, καθώς και ο υπολογισμός του εξερχόμενου ρεύματος. Για όλες τις περιπτώσεις κλάδων που ενώνουν δύο ζυγούς έχουν ήδη αναπτυχθεί οι σχετικές εξισώσεις στο Κεφάλαιο 2.

Συγκεκριμένα ισχύει:

1. Στην περίπτωση που υπάρχει γραμμή μεταξύ των δύο ζυγών χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.21) για τον υπολογισμό της τάσης του προηγούμενου ζυγού και η εξίσωση (3.22) για το εξερχόμενο ρεύμα του.



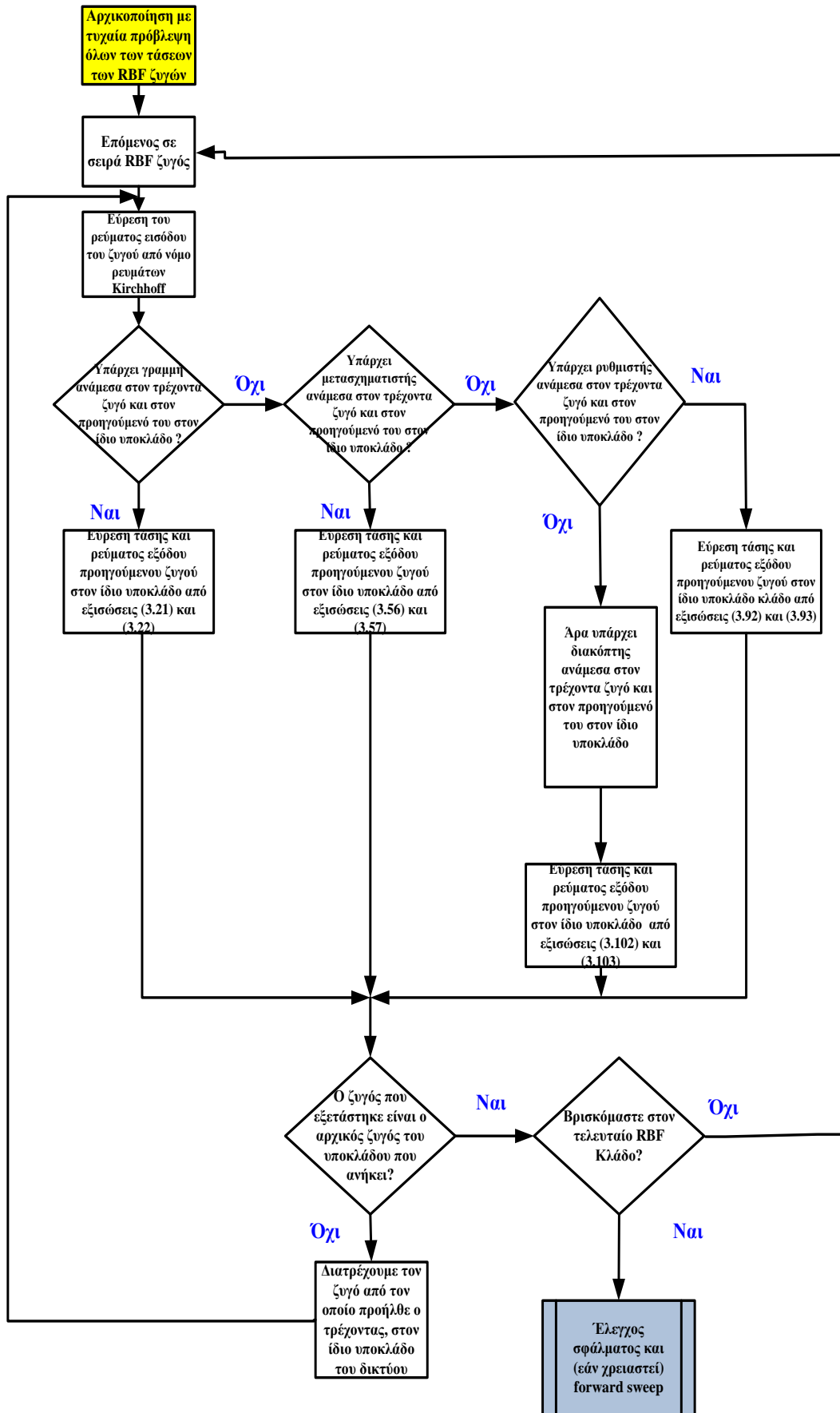
Σχήμα 4.3: Λογικό διάγραμμα εύρεσης ρευμάτων που σχετίζονται με τον ζυγό.

2. Εφόσον μεταξύ των δύο ζυγών υπάρχει μετασχηματιστής χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.56) για τον υπολογισμό της τάσης του προηγούμενου ζυγού και η εξίσωση (3.57) για το εξερχόμενο ρεύμα του.
3. Για την περίπτωση ύπαρξης ρυθμιστή γίνεται χρήση των εξισώσεων (3.92) για την τάση και (3.93) για το ρεύμα.
4. Τέλος, εάν είναι διακόπτης το στοιχείο που συνδέει τους δύο ζυγούς χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.102) για την τάση και (3.103) για το ρεύμα, οι οποίες ουσιαστικά εξισώσουν το ρεύμα και την τάση των δύο ζυγών.

Διαμέσου αυτών των εξισώσεων είναι δυνατό να γίνει ο υπολογισμός των τάσεων και των ρευμάτων όλων των ζυγών του δικτύου. Συγκεκριμένα όταν ένας υποκλάδος διασχίζεται ολόκληρος γίνεται μετάβαση στον επόμενο κατά RBF σειρά υποκλάδο. Όταν πλέον διασχιστεί και ο τελευταίος υποκλάδος, που ουσιαστικά θα είναι ο κεντρικός κορμός του δικτύου, θα έχει υπολογιστεί και η τάση του αρχικού ζυγού-τροφοδότη (feeder). Επειδή όμως από τα δεδομένα του προβλήματος είναι ήδη γνωστή η τιμή του εν λόγω μεγέθους, είναι δυνατό να υπολογιστεί το σφάλμα που προέκυψε από την πρόβλεψη που έγινε. Εφόσον το σφάλμα δεν υπερβαίνει κάποια μέγιστη τιμή τότε η λύση θεωρείται αποδεκτή, ειδάλως γίνεται το βήμα forward sweep και ακολούθως επαναλαμβάνεται ο αλγόριθμος.

Η επιλογή του μέγιστου σφάλματος που μπορεί να γίνει αποδεκτό είναι μια ιδιαίτερα κρίσιμη επιλογή. Αυτό συμβαίνει διότι μια ιδιαίτερα υψηλή τιμή δεν θα δώσει τόσο ακριβή αποτελέσματα, ενώ αντίθετα μια αρκετά χαμηλή τιμή μπορεί να οδηγήσει στην άπειρη επανάληψη του αλγορίθμου και στη μη σύγκλιση της λύσης του προβλήματος. Προκύπτει λοιπόν ότι η σωστή επιλογή του μέγιστου σφάλματος ώστε ο αλγόριθμος να τρέχει σε πραγματικό χρόνο και να έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα πρέπει να έχει μια ενδιάμεση τιμή. Ως εκ τούτου μια ικανοποιητική τιμή του εν λόγω ορίου είναι η 0.001 p.u. (ανά μονάδα). Να σημειωθεί επίσης ότι το σφάλμα αυτό αφορά το μέγιστο σφάλμα εκ των τριών φάσεων του ζυγού τροφοδοσίας.

Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται το λογικό διάγραμμα του βήματος Backward Sweep. Μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει τόσο την μετάβαση από αυτό το βήμα στον έλεγχο σφάλματος και εφόσον χρειαστεί στο βήμα forward sweep, όσο και την ενσωμάτωση της διαδικασίας εύρεσης των ρευμάτων μέσα στο συγκεκριμένο αλγόριθμο.



Σχήμα 4.3: Λογικό διάγραμμα Backward Sweep.

4.2.2 Βήματα Forward Sweep

Εφόσον το σφάλμα δεν είναι μέσα στα ανεκτά όρια, τότε είναι απαραίτητη η εκτέλεση της διαδικασίας forward sweep και η επανάληψη του αλγορίθμου. Η συγκεκριμένη διαδικασία θεωρεί σωστές τις τιμές των ρευμάτων που βρέθηκαν με την Backward Sweep και αλλάζει, με βάση τη σωστή τιμή της τάσης τροφοδοσίας, τις τιμές των τάσεων των ζυγών. Ουσιαστικά πρόκειται για την ανάστροφη πορεία από την οποία ακολουθήθηκε κατά την Backward Sweep και για αυτό το λόγο έχει και την αντίστοιχη ονομασία (Forward Sweep). Πλέον δεν χρησιμοποιείται η RBF σειρά των κλάδων του δικτύου, αλλά γίνεται χρήση της BF σειράς όπως αυτή έχει οριστεί στην Ενότητα 2.3.

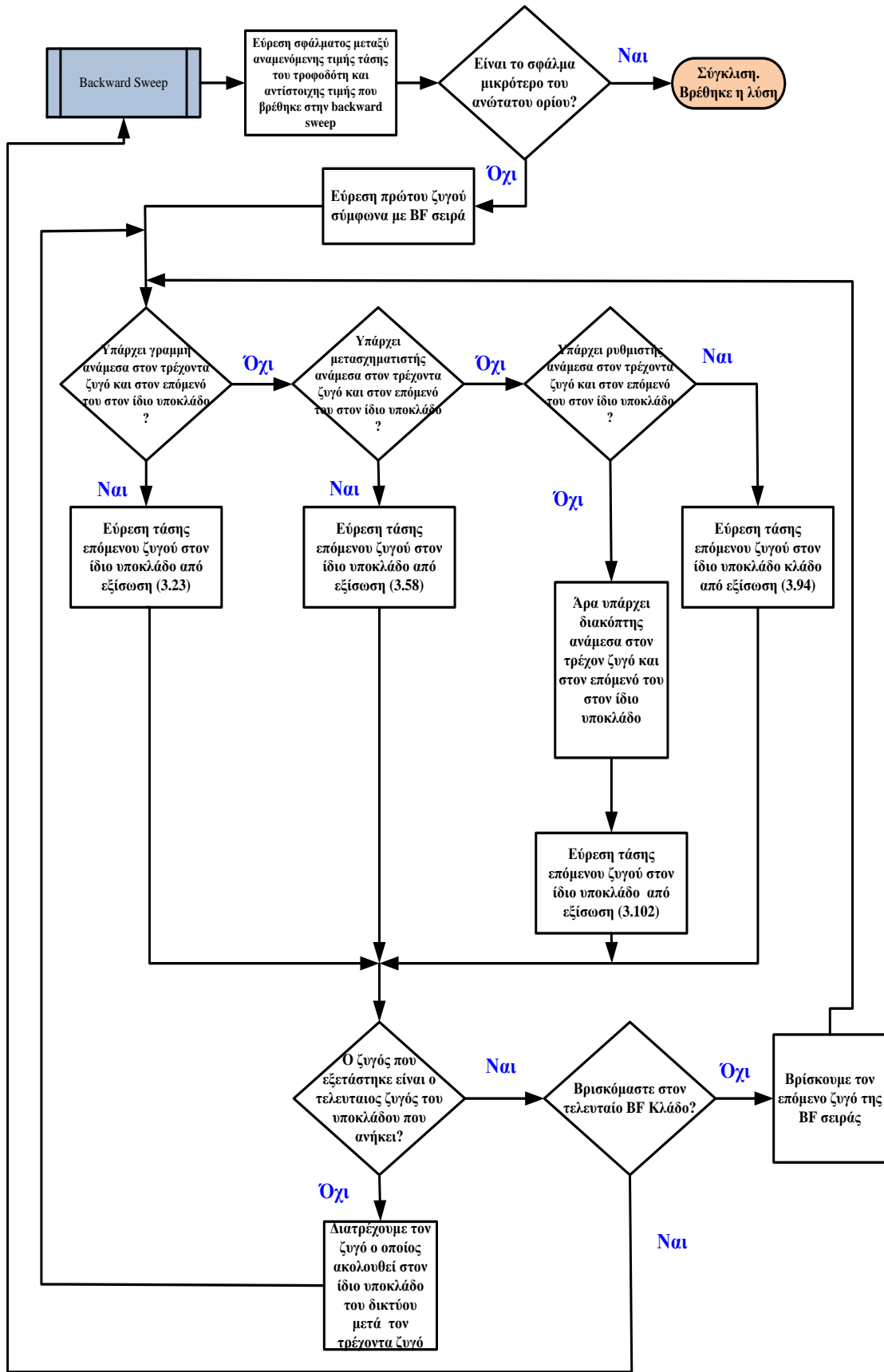
Οι εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται είναι αυτές που δίνουν την τιμή της τάσης του επόμενου ζυγού συναρτήσει της τάσης και του εξερχόμενου ρεύματος του προηγούμενου ζυγού. Συγκεκριμένα ισχύει:

5. Στην περίπτωση που υπάρχει γραμμή μεταξύ των δύο ζυγών χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.23) για τον υπολογισμό της τάσης του επόμενου ζυγού.
6. Εφόσον μεταξύ των δύο ζυγών υπάρχει μετασχηματιστής χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.58) για τον υπολογισμό της τάσης του επόμενου ζυγού.
7. Για την περίπτωση ύπαρξης ρυθμιστή γίνεται χρήση της εξίσωσης (3.94) ώστε να βρεθεί η αντίστοιχη τάση.
8. Τέλος εάν είναι διακόπτης το στοιχείο που συνδέει τους δύο ζυγούς χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.102) για την τάση του επόμενου ζυγού.

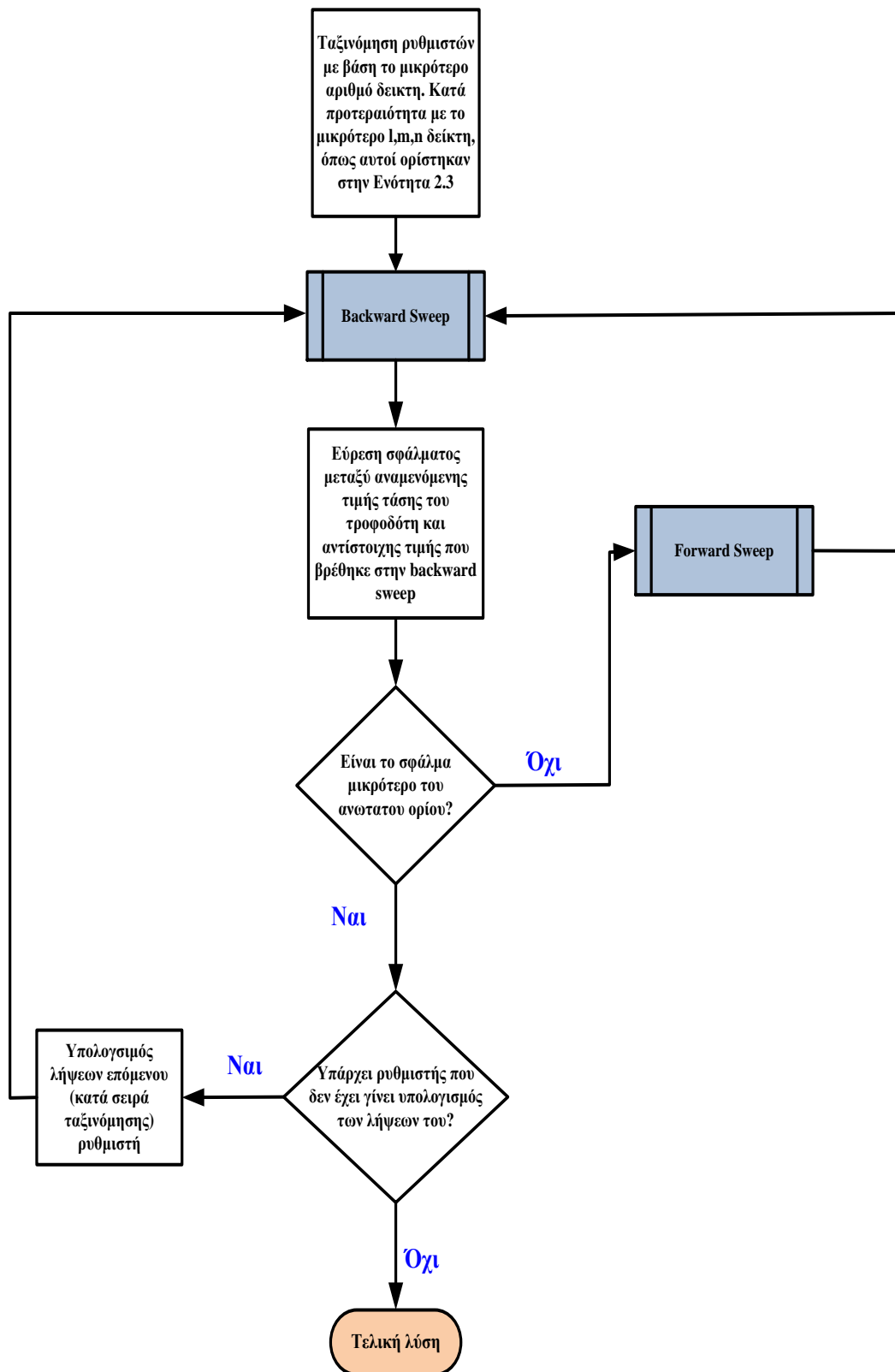
Με αυτό τον τρόπο διορθώνονται οι τάσεις ώστε να μην προκύπτει τόσο μεγάλο σφάλμα σε σχέση με την τάση τροφοδοσίας και ο αλγόριθμος οδηγείται πάλι στην Backward sweep ώστε να γίνει νέα επανάληψη του αλγορίθμου. Όταν το σφάλμα γίνει μικρότερο από την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, τότε έχει βρεθεί η λύση του συγκεκριμένου προβλήματος. Στο Σχήμα 4.4 γίνεται παρουσίαση του λογικού διαγράμματος των βημάτων Forward Sweep.

Υπάρχει όμως μια παράμετρος η οποία δεν έχει έως τώρα αναφερθεί. Στην περίπτωση παρουσίας ρυθμιστή, δεν είναι δυνατόν να είναι γνωστή η λήψη η οποία πρέπει να έχει επιλεγεί σε κάθε φάση προτού να γίνει η ανάλυση ροής φορτίου και να υπολογιστεί η τάση στο σημείο ρύθμισης. Ακόμη περισσότερο δεν είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι λήψεις ενός ρυθμιστή προτού καθοριστούν οι λήψεις ενός άλλου που προηγείται στην τοπολογία του δικτύου και ως εκ τούτου επηρεάζει την τάση του σημείου ρύθμισης του πρώτου.

Για αυτό ακριβώς το λόγο γίνεται εξ αρχής ταξινόμηση των ρυθμιστών με βάση του δείκτες l , m , n του ζυγού στον οποίο συνδέονται. Συγκεκριμένα προηγείται η ρύθμιση του ρυθμιστή με το μικρότερο δείκτη l . Εφόσον υπάρχει ισότητα των δεικτών l δύο ρυθμιστών, επιλέγεται αυτός με το μικρότερο m και εφόσον και εκεί υπάρχει ισότητα, προτεραιότητα έχει αυτός με το μικρότερο n . Η ταξινόμηση αυτή καθορίζει τη σειρά με την οποία θα γίνει η ρύθμισή τους, ενώ πριν επιτευχθεί η ρύθμιση ενός ρυθμιστή, θεωρείται ότι έχει μηδενική λήψη ($\text{tap}=0$). Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται ότι πριν και μετά την εύρεση λήψης κάθε ρυθμιστή ακολουθεί εκτέλεση του αλγορίθμου ανάλυσης ροής φορτίου ώστε να βρεθούν οι νέες τιμές τάσης και ρεύματος. Επομένως η ύπαρξη πολλών ρυθμιστών οδηγεί στην επιπλέον εκτέλεση ισάριθμων φορών του αλγορίθμου “Backward and Forward Sweep”.



Σχήμα 4.4: Λογικό διάγραμμα Forward Sweep.



Σχήμα 4.5: Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου.

4.3 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι αλγόριθμοι που πραγματοποιούν ανάλυση ροής φορτίου στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας συνηθίζεται να συνοδεύονται από πολλές τροποποιημένες εκδοχές τους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η μέθοδος Newton-Raphson και η ταχεία αποζευγμένη Newton-Raphson, η οποία βελτιστοποιεί το χρόνο εκτέλεσης της πρώτης με αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα στα δίκτυα μεταφοράς. Στη μέθοδο Backward and Forward Sweep υπάρχουν αρκετές τροποποιημένες εκδοχές της, οι οποίες βασίζονται στο ποια μεταβλητή επιλέγεται να υπολογίζεται - ενημερώνεται σε κάθε βήμα (backward ή forward sweep). Είναι χαρακτηριστικό μάλιστα ότι στη βιβλιογραφία [4.1] έχει οριστεί και συγκεκριμένη μεθοδολογία ονομασίας της μεθόδου που ακολουθείται, με βάση τις μεταβλητές που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος. Η ονομασία αποτελείται από τρία μέρη τα οποία έχουν τη μορφή {A-B-C} και ορίζεται σύμφωνα με τα ακόλουθα μέρη:

- Το πρώτο μέρος αφορά τις μεταβλητές οι οποίες ενημερώνονται (ή αλλιώς υπολογίζονται) κατά την διάρκεια της Forward Sweep.
- Το δεύτερο μέρος αφορά τις μεταβλητές οι οποίες ενημερώνονται (ή αλλιώς υπολογίζονται) κατά την διάρκεια της Backward Sweep.
- Το τρίτο μέρος αφορά το όνομα του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται. Για την περίπτωση του Backward and Forward Sweep αναφέρεται συντομογραφικά ως BFS.

Οι μεταβλητές οι οποίες υπολογίζονται σε κάθε στάδιο είναι δυνατό να είναι οι ακόλουθες:

- Τάση ζυγού η οποία συμβολίζεται με το γράμμα V
- Ισχύς η οποία συμβολίζεται με το γράμμα S
- Ρεύμα το οποίο συμβολίζεται με το γράμμα I

Οι εξισώσεις οι οποίες έχουν οριστεί έως τώρα για όλα τα στοιχεία των ακτινικών δικτύων αφορούσαν είτε ρεύμα, είτε τάση. Χρησιμοποιώντας όμως την γνωστή εξίσωση:

$$S = V \cdot I^* \quad (4.11)$$

δημιουργείται η αντίστοιχη τιμή της ισχύος. Κάνοντας χρήση της αρχής διατήρησης της ενέργειας είναι δυνατόν να χρησιμοποιείται η ισχύς αντί των του δεύτερου νόμου του Kirchhoff και του ρεύματος αντίστοιχα. Έτσι μπορεί εύκολα να αντικατασταθεί ο υπολογισμός του ρεύματος στην backward sweep που αναλύθηκε στην Ενότητα 4.2.1, με τον υπολογισμό της ισχύος.

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στην Ενότητα 4.2 γίνεται εύκολα αντιληπτό πως η μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε είναι η V-VI-BFS. Σε αυτήν υπολογίζονται ρεύματα και τάσεις κατά την backward sweep και μόνο τάσεις κατά την forward sweep. Εναλλακτικές μέθοδοι που είναι διαδεδομένες είναι οι:

1. VI-VI-BFS η οποία υπολογίζει το ρεύμα και στα δύο βήματα του BFS αλγορίθμου.
2. VS-VS-BFS η οποία χρησιμοποιεί τους τύπους και το μέγεθος της ισχύος και όχι του ρεύματος. Η ισχύς σε αυτή τη μεθοδολογία ενημερώνεται και στα δύο

στάδια εφαρμογής του αλγορίθμου. Εννοείται ότι συνοριακή συνθήκη της ισχύος είναι η ίδια με του ρεύματος, μιας και στα άκρα των υποκλάδων του δικτύου το ρεύμα το οποίο εξέρχεται είναι μηδέν.

3. V-VS-BFS είναι όμοια με την περίπτωση 2 με την διαφορά ότι η ισχύς δεν ενημερώνεται στο forward sweep.
4. VS-S-BFS όπου η ισχύς ενημερώνεται στο πρώτο βήμα του αλγορίθμου και τα ρεύματα με την ισχύ στο δεύτερο βήμα.
5. V-I-BFS η οποία στην backward sweep δεν υπολογίζει την τάση παρά μόνο τα ρεύματα.
6. V-S-BFS που είναι όμοια με την περίπτωση 5 με την διαφορά ότι χρησιμοποιεί την ισχύ αντί των ρευμάτων.

Από όλες τις μεθόδους που αναφέρθηκαν αξίζουν να επισημανθούν τα ακόλουθα:

- Όλες οι μέθοδοι χρησιμοποιούν ενημέρωση της τάσης κατά την forward sweep, καθώς με αυτό τον τρόπο μπορούν και χρησιμοποιούν την απόκλιση από την δοθείσα τάση του τροφοδότη ώστε να διορθώσουν τις τάσεις των ζυγών του δικτύου.
- Στο βήμα της backward sweep υπάρχει υποχρεωτικά είτε υπολογισμός των ρευμάτων, είτε της ισχύος, καθώς διαφορετικά δεν θα μπορούσε να γίνει ο υπολογισμός των υπολοίπων τάσεων του δικτύου.
- Οι μέθοδοι που κάνουν ενημέρωση του ρεύματος είτε της ισχύος κατά το βήμα forward sweep, μπορούν να χρησιμοποιούν ως συνθήκη τερματισμού το σφάλμα του ρεύματος ή της ισχύος εξόδου στα άκρα των υποκλάδων του δικτύου. Ως γνωστόν αυτές οι τιμές πρέπει να είναι μηδενικές.
- Η μέθοδος V-I-BFS είναι η πιο σύντομη αλγοριθμικά και επιτυγχάνει τον καλύτερο χρόνο εκτέλεσης ανά επανάληψη. Παρόλα αυτά επιλέχθηκε η μέθοδος V-VI-BFS η οποία κάνει αλλαγή της τάσης και στο backward sweep και φτάνει σε σύγκλιση με λιγότερες επαναλήψεις [4.1].

Το γενικότερο συμπέρασμα το οποίο ισχύει για τον BFS αλγόριθμο είναι ότι φτάνει σχετικά γρήγορα σε σύγκλιση και είναι κατάλληλος για χρήση σε μεγάλα ασύμμετρα ακτινικά δίκτυα διανομής. Στο Κεφάλαιο 6 θα δοθεί η ευκαιρία να επαληθευτεί η ικανότητά του να πραγματοποιεί ανάλυση ροής φορτίου σε διαφόρων μεγεθών ακτινικά δίκτυα διανομής σε αρκετά σύντομο χρόνο. Επίσης στο Κεφάλαιο 5 θα δοθεί ένα παράδειγμα χρησιμοποίησής του σε ένα μικρό αλλά αντιπροσωπευτικό ασύμμετρο ακτινικό δίκτυο διανομής.

4.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] R. Zimmerman, *Comprehensive Distribution Power Flow: Modeling, Formulation, Solution Algorithms and Analysis*, Ph.D. Dissertation, Cornell University, Jan. 1995, pp. 57-83.
- [4.2] W. Kersting, *Distribution System Modeling Analysis*, New Mexico: CRC Press, 2002, pp. 269-274.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ BFS

5.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο Κεφάλαιο 4 έγινε αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου “Backward and Forward Sweep”. Για να μπορέσει όμως κανείς να κατανοήσει πλήρως έναν αλγόριθμο, είναι χρήσιμο να έχει στη διάθεσή του ένα συγκεκριμένο αριθμητικό παράδειγμα. Η διαδικασία της βήμα προς βήμα επίλυσης συγκεκριμένου παραδείγματος, αναδεικνύει τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου και επιλύει τυχόν απορίες που έχουν δημιουργηθεί κατά την ανάλυσή του στο τμήμα της θεωρίας. Επίσης ένα τέτοιο παράδειγμα είναι χρήσιμο και για τη διαδικασία της αποσφαλμάτωσης (debugging) ενός προγράμματος που έχει φτιαχτεί από κάποιον άλλο προγραμματιστή. Εφόσον έχει γίνει κάποιο λάθος κατά τον προγραμματισμό, με το παράδειγμα του Κεφαλαίου αυτού μπορεί να εντοπιστεί σε ποιο σημείο υπάρχει σφάλμα υπολογισμού του αλγορίθμου.

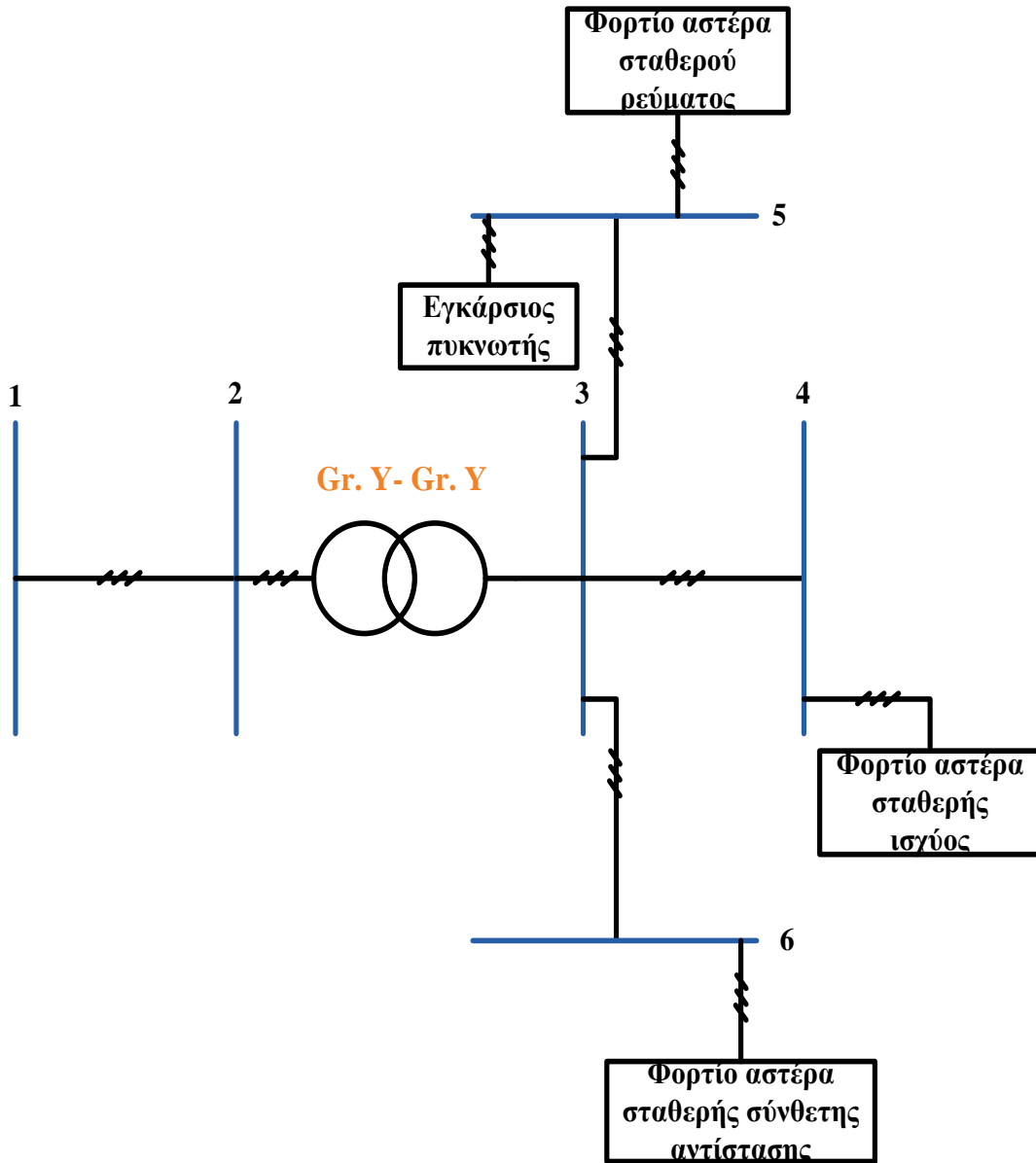
Για να είναι όμως χρήσιμο ένα τέτοιο παράδειγμα θα πρέπει να καλύπτει τις παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Να έχει μικρό μέγεθος ώστε να μπορεί να διασχίζεται γρήγορα το δίκτυο.
2. Να καλύπτει μια ευρεία γκάμα από τις περιπτώσεις που μπορεί να αναλύει ο αλγόριθμος. Για παράδειγμα θα πρέπει να μην περιέχει μόνο φορτία σταθερής ισχύος αλλά και φορτία σταθερής έντασης.

Το σύστημα το οποίο επιλέχθηκε αποτελείται από έξι ζυγούς (Σχήμα 5.1) με τα ακόλουθα δεδομένα:

1. Δύο επίπεδα τάσης 12400V (πολική) και 4160 V (πολική). Το πρώτο επίπεδο τάσης βρίσκεται στους ζυγούς 1 και 2. Έπειτα ο μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης που βρίσκεται μεταξύ των ζυγών 2 και 3 μετασχηματίζει την τάση από το πρώτο επίπεδο στο δεύτερο για όλους τους υπόλοιπους ζυγούς του δικτύου.
2. Ο μετασχηματιστής του δικτύου είναι τύπου γειωμένου αστέρα – γειωμένου αστέρα, ισχύος 6000 kVA και αντίστασης σειράς $0.01 + j \cdot 0.06$ p.u.
3. Έχει τρία τριφασικά ασύμμετρα φορτία συνδεδεμένα σε τρεις διαφορετικούς ζυγούς με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 5.1.
4. Για ευκολία έχει χρησιμοποιηθεί ένας τύπος γραμμής με την ίδια ακολουθία φάσεων σε όλο το υπό εξέταση σύστημα. Συγκεκριμένα πρόκειται για γραμμή τύπου 336,400 26/7 όσον αφορά τον αγωγό φάσης και 4/0 6/1 ACSR για τον αγωγό ουδέτερου. Η γραμμή είναι εναέρια και σε όλο το δίκτυο αποτελείται από τις τρεις φάσεις και τον ουδέτερο. Η ακολουθία των φάσεων είναι A-B-C και η γεωμετρία των γραμμών στο χώρο καθώς και οι σχετικές αποστάσεις φαίνονται στο Σχήμα 5.2.

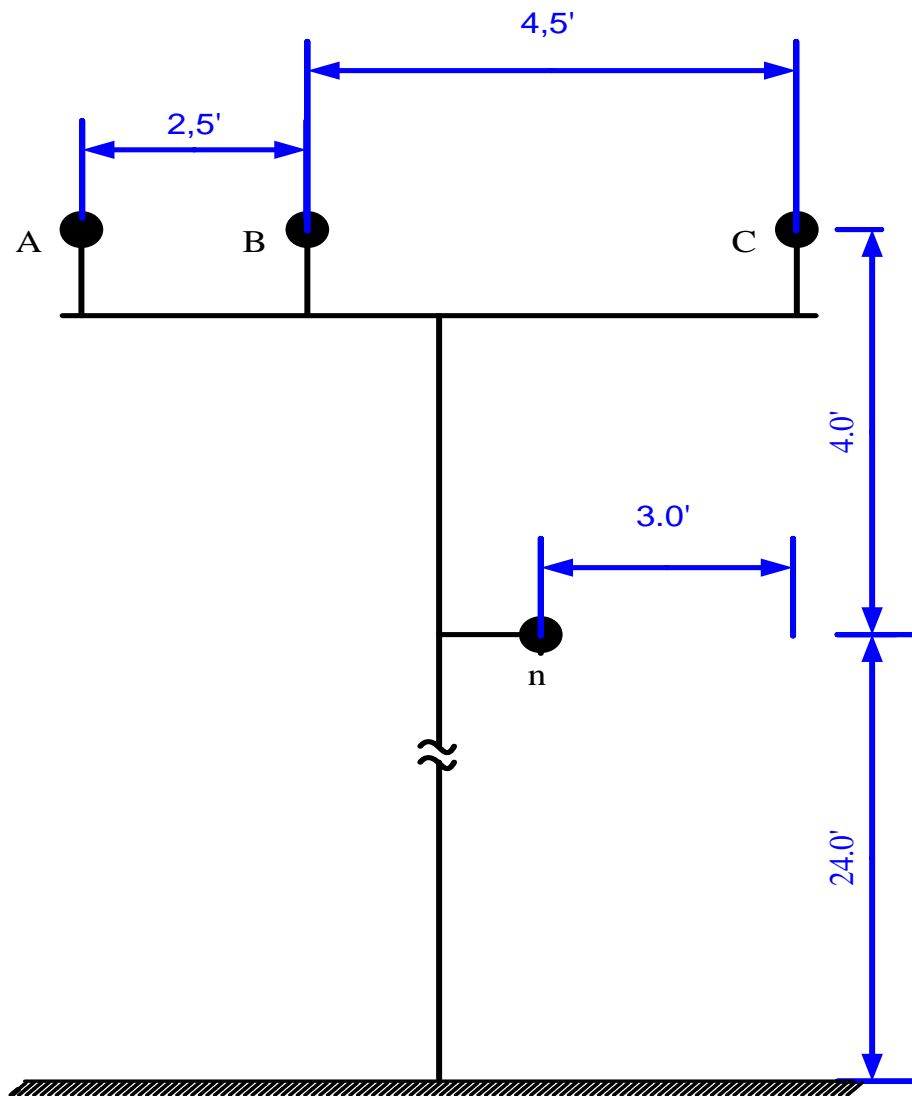
5. Έχει εγκατεστημένο εγκάρσιο τριφασικό πυκνωτή στο ζυγό 5 ισχύος 200 kVAr σε κάθε φάση.
6. Υπάρχουν διακλαδώσεις στον κύριο κορμό. Συγκεκριμένα ο ζυγός 3 συνεχίζει στον κύριο κορμό με τον ζυγό 4 αλλά διακλαδίζεται επίσης στους ζυγούς 5 και 6. Έτσι γίνεται επίδειξη επίλυσης δικτύων με διακλαδώσεις, πέρα των τυπικών παραδειγμάτων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία [5.1] και αποτελούνται από 4 ζυγούς δίχως διακλαδώσεις.
7. Οι ζυγοί 1 και 2 απέχουν μεταξύ τους 2000 ft, ενώ η απόσταση μεταξύ των ζυγών 3-5, 3-4 και 3-6 είναι 2500 ft αντιστοίχως.
8. Το όριο του σφάλματος για τη σύγκλιση της μεθόδου έχει καθοριστεί στην τιμή 0.001 ανά μονάδα.



Σχήμα 5.1: Μονογραμμικό σχέδιο υπό εξέταση συστήματος.

Πίνακας 5.1: Φορτία υπό εξέταση συστήματος.

Όνομα Ζυγού	Συνδεσμολογία Φορτίου	Τύπος φορτίου	Ισχύς φορτίων στην ονομαστική φόρτιση για κάθε φάση		
			$P_a(kW) + j \cdot Q_a(kVAr)$	$P_b(kW) + j \cdot Q_b(kVAr)$	$P_c(kW) + j \cdot Q_c(kVAr)$
4	γειωμένου αστέρα	σταθερού S	$425 + j \cdot 253$	$600 + j \cdot 290$	$800 + j \cdot 260$
5	γειωμένου αστέρα	σταθερού I	$600 + j \cdot 290$	$800 + j \cdot 260$	$425 + j \cdot 253$
6	γειωμένου αστέρα	σταθερού Z	$800 + j \cdot 260$	$425 + j \cdot 253$	$600 + j \cdot 290$



Σχήμα 5.2: Γεωμετρία της γραμμής

5.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

5.2.1 Υπολογισμός παραμέτρων δικτύου

Πριν ξεκινήσει η εκτέλεση του αλγορίθμου πρέπει να υπολογιστούν οι πίνακες παραμέτρων των μετασχηματιστών και των γραμμών του δικτύου. Αυτό γίνεται διότι δεν εξαρτάται η τιμή τους από την εκτέλεσή του. Επομένως θα ήταν άσκοπη απώλεια χρόνου και πόρων να υπολογίζονταν σε κάθε επανάληψη.

5.2.1.1 Υπολογισμός παραμέτρων γραμμής

Ακολουθεί ο υπολογισμός των παραμέτρων της γραμμής:

- ✓ Από βιβλιογραφία [5.1] για τον αγωγό φάσης (336,400 26/7) είναι γνωστό ότι
 - $GMR_{phase} = 0.0244 \text{ feet}$
 - $\hat{r}_{phase} = 0.306 \frac{\Omega}{\text{mile}}$
 - $diameter_{phase} = 0.721 \text{ inches}$
- ✓ Από βιβλιογραφία [5.1] για τον αγωγό ουδετέρου (4/0 6/1 ACSR) είναι γνωστό ότι
 - $GMR_{neutral} = 0.00814 \text{ feet}$
 - $\hat{r}_{neutral} = 0.592 \frac{\Omega}{\text{mile}}$
 - $diameter_{neutral} = 0.563 \text{ inches}$

Με βάση και τα επίπεδα τάσης εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι χρησιμοποιούνται τα αμερικάνικα πρότυπα, επομένως ως συχνότητα του συστήματος θεωρείται η τιμή 60 Hz.. Επομένως από την εξίσωση (3.25) και την εξίσωση (3.26) γίνεται ο υπολογισμός του πίνακα $Z_{primitive}$ όπως αυτός περιγράφεται στην εξίσωση (3.27).

Συγκεκριμένα για τα μη διαγώνια στοιχεία ισχύει:

$$\hat{z}_{ij} = \frac{0,158836}{100} \cdot 60 + j \cdot \frac{0.202237}{100} \cdot 60 \cdot \left(\ln \left(\frac{1}{D_{ij}} \right) + 7.6786 + \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{100}{60} \right) \right)$$

και για τα διαγώνια στοιχεία ισχύει:

$$\hat{z}_{ii} = \hat{r}_i + \frac{0,158836}{100} \cdot 60 + j \cdot \frac{0.202237}{100} \cdot 60 \cdot \left(\ln \left(\frac{1}{GMR_i} \right) + 7.6786 + \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{100}{60} \right) \right)$$

Εφαρμόζοντας διαδοχικά το πυθαγόρειο θεώρημα στο Σχήμα 5.2 γίνεται εύρεση των αποστάσεων μεταξύ κάθε φάσης και του ουδετέρου αλλά και των φάσεων μεταξύ τους.

Για παράδειγμα για το μη διαγώνιο στοιχείο \hat{z}_{12} ισχύει ότι:

$$\hat{z}_{12} = \frac{0,158836}{100} \cdot 60 + j \cdot \frac{0.202237}{100} \cdot 60 \cdot \left(\ln \left(\frac{1}{2.5} \right) + 7.6786 + \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{100}{60} \right) \right) \frac{\Omega}{\text{mile}} \Rightarrow$$

$$\hat{z}_{12} = 0.0953 + 0.8515j \frac{\Omega}{\text{mile}}$$

Όμοια για το διαγώνιο στοιχείο \hat{z}_{22} ισχύει:

$$\hat{z}_{22} = 0.3060 + \frac{0.158836}{100} \cdot 60 + j \cdot \frac{0.202237}{100} \cdot 60 \cdot \left(\ln\left(\frac{1}{0.244}\right) + 7.6786 + \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{100}{60}\right) \right) \Rightarrow$$

$$\hat{z}_{22} = 0.4013 + 1.4133i \frac{\Omega}{mile}$$

Εκτελώντας όλες τις πράξεις προκύπτει πως:

$$Z_{primitive} = \begin{bmatrix} 0.4013 + 1.4133i & 0.0953 + 0.8515i & 0.0953 + 0.7266i & 0.0953 + 0.7525i \\ 0.0953 + 0.8515i & 0.4013 + 1.4133i & 0.0953 + 0.7802i & 0.0953 + 0.7865i \\ 0.0953 + 0.7266i & 0.0953 + 0.7802i & 0.4013 + 1.4133i & 0.0953 + 0.7674i \\ 0.0953 + 0.7525i & 0.0953 + 0.7865i & 0.0953 + 0.7674i & 0.6873 + 1.5465i \end{bmatrix} \frac{\Omega}{mile}$$

Εν συνεχεία ακολουθώντας την ελαχιστοποίηση του Kron σύμφωνα με την εξίσωση (3.33) προκύπτει ότι:

$$[Z_{ABC}] = [\hat{z}_{ij}] - [\hat{z}_{in}] * [\hat{z}_{nn}]^{-1} * [\hat{z}_{nj}] \Rightarrow$$

$$[Z_{ABC}] = \begin{bmatrix} 0.4013 + 1.4133i & 0.0953 + 0.8515i & 0.0953 + 0.7266i \\ 0.0953 + 0.8515i & 0.4013 + 1.4133i & 0.0953 + 0.7802i \\ 0.0953 + 0.7266i & 0.0953 + 0.7802i & 0.4013 + 1.4133i \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} 0.0953 + 0.7525i \\ 0.0953 + 0.7865i \\ 0.0953 + 0.7674i \end{bmatrix} * [0.6873 + 1.5465i]^{-1} *$$

$$\begin{bmatrix} 0.0953 + 0.7525i & 0.0953 + 0.7865i & 0.0953 + 0.7674i \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$[Z_{ABC}] = \begin{bmatrix} 0.4576 + 1.0781i & 0.1560 + 0.5017i & 0.1535 + 0.3849i \\ 0.1560 + 0.5017i & 0.4666 + 1.0482i & 0.1580 + 0.4237i \\ 0.1535 + 0.3849i & 0.1580 + 0.4237i & 0.4615 + 1.0651i \end{bmatrix} \frac{\Omega}{mile}$$

Ο πίνακας $[Z_{ABC}]$ πολλαπλασιαζόμενος με την τιμή του μήκους της γραμμής σε πόδια (feet) και διαιρούμενος με τη σταθερά 5280, λαμβάνει τη τιμή της μήτρας σύνθετης αντίστασης σειράς που θα χρησιμοποιηθεί στις εξισώσεις της γραμμής.

Έτσι τελικά προκύπτει για τη γραμμή 1-2 που έχει μήκος 2000 feet :

$$[Z_{ABC}]_{12} = \begin{bmatrix} 0.1733 + 0.4084i & 0.0591 + 0.1900i & 0.0581 + 0.1458i \\ 0.0591 + 0.1900i & 0.1768 + 0.3970i & 0.0599 + 0.1605i \\ 0.0581 + 0.1458i & 0.0599 + 0.1605i & 0.1748 + 0.4034i \end{bmatrix} \Omega$$

Ενώ οι γραμμές 3-4, 3-5 και 3-6 που έχουν μήκος 2500 feet :

$$[Z_{ABC}]_{34} = \begin{bmatrix} 0.2166 + 0.5104i & 0.0738 + 0.2375i & 0.0727 + 0.1823i \\ 0.0738 + 0.2375i & 0.2209 + 0.4963i & 0.0748 + 0.2006i \\ 0.0727 + 0.1823i & 0.0748 + 0.2006i & 0.2185 + 0.5043i \end{bmatrix} \Omega$$

Όμοια με την ανάλυση για την εύρεση της μήτρας αντιστάσεων πρέπει να γίνει η εύρεση της μήτρας εγκάρσιας αγωγιμότητας. Να σημειωθεί ότι επειδή πρόκειται για μικρό σε αριθμό ζυγών και μήκος δίκτυο και επειδή έχει εναέριες γραμμές, θα μπορούσε να αγνοηθεί η μήτρα αυτή και να θεωρηθεί ίση με μηδέν.

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις (3.42) και (3.43) προκύπτει ο πίνακας $p_{\text{primitive}}$ της εξίσωσης (3.47). Συγκεκριμένα ισχύει:

$$\hat{p}_{ii} = 11.17689 \cdot \ln\left(\frac{S_{ii}}{RD_i}\right) \frac{\text{mile}}{\mu\text{F}}$$

και

$$\hat{p}_{ij} = 11.17689 \cdot \ln\left(\frac{S_{ij}}{D_{ij}}\right) \frac{\text{mile}}{\mu\text{F}}$$

Για παράδειγμα το μη διαγώνιο στοιχείο \hat{p}_{12} ισούται με:

$$\hat{p}_{12} = 11.17689 \cdot \ln\left(\frac{S_{12}}{D_{12}}\right) = 11.17689 \cdot \ln\left(\frac{672.6693}{30}\right) = 34.7608 \frac{\text{mile}}{\mu\text{F}}$$

Όμοια το διαγώνιο στοιχείο \hat{p}_{22} ισούται με:

$$\hat{p}_{22} = 11.17689 \cdot \ln\left(\frac{S_2}{RD_2}\right) = 11.17689 \cdot \ln\left(\frac{672}{0.3605}\right) = 84.1678 \frac{\text{mile}}{\mu\text{F}}$$

Εκτελώντας τις πράξεις για το κάθε στοιχείο προκύπτει ο πίνακας $p_{\text{primitive}}$:

$$p_{\text{primitive}} = \begin{bmatrix} 84.1678 & 34.7608 & 23.3283 & 24.8274 \\ 34.7608 & 84.1678 & 28.2160 & 27.9375 \\ 23.3283 & 28.2160 & 84.1678 & 26.1927 \\ 24.8274 & 27.9375 & 26.1927 & 85.2096 \end{bmatrix} \frac{\text{mile}}{\mu\text{F}}$$

Κάνοντας τώρα εφαρμογή της ελαχιστοποίηση του Kron σύμφωνα με την εξίσωση (3.53) προκύπτει ότι:

$$[P_{abc}] = [\hat{p}_{ij}] - [\hat{p}_{in}] * [\hat{p}_{nn}]^{-1} * [\hat{p}_{nj}] \Rightarrow$$

$$[P_{abc}] = \begin{bmatrix} 84.1678 & 34.7608 & 23.3283 \\ 34.7608 & 84.1678 & 28.2160 \\ 23.3283 & 28.2160 & 84.1678 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 24.8274 \\ 27.9375 \\ 26.1927 \end{bmatrix} * [85.2096]^{-1} *$$

$$\begin{bmatrix} 24.8274 & 27.9375 & 26.1927 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 76.9339 & 26.6206 & 15.6966 \\ 26.6206 & 75.0080 & 19.6282 \\ 15.6966 & 19.6282 & 76.1164 \end{bmatrix} \frac{\text{mile}}{\mu\text{F}}$$

Αντικαθιστώντας τον πίνακα $[p_{abc}]$ στην εξίσωση (3.45) και έπειτα στην (3.46) προκύπτει ότι:

$$[Y_{abc}] = j \cdot \omega \cdot [p_{abc}]^{-1} = j \cdot \omega \cdot \begin{bmatrix} 76.9339 & 26.6206 & 15.6966 \\ 26.6206 & 75.0080 & 19.6282 \\ 15.6966 & 19.6282 & 76.1164 \end{bmatrix}^{-1} \Rightarrow$$

$$[Y_{abc}] = \begin{bmatrix} 5.6765i & -1.8319i & -0.6982i \\ -1.8319i & 5.9809i & -1.1645i \\ 0.6982i & -1.1645i & 5.3971i \end{bmatrix} \frac{\mu\text{S}}{\text{mile}}$$

Όμοια με τη μήτρα αντιστάσεων σειράς, πολλαπλασιάζοντας τη μήτρα εγκάρσιων αγωγιμοτήτων $[Y_{abc}]$ με την τιμή του μήκους της γραμμής σε πόδια (feet) και διαιρώντας με τη σταθερά 5280, προκύπτει η τιμή της $[Y_{abc}]$ για το κάθε τμήμα, η οποία και θα χρησιμοποιηθεί στις εξισώσεις της γραμμής.

Έτσι τελικά προκύπτει για τη γραμμή 1-2 που έχει μήκος 2000 feet :

$$[Y_{abc}]_{12} = \begin{bmatrix} 2.150i & -0.694i & -0.264i \\ -0.694i & 2.265i & -0.441i \\ -0.264i & -0.441i & 2.044i \end{bmatrix} \mu S$$

Ενώ οι γραμμές 3-4, 3-5 και 3-6 που έχουν μήκος 2500 feet :

$$[Y_{abc}]_{34} = \begin{bmatrix} 2.688i & -0.867i & -0.331i \\ -0.867i & 2.832i & -0.551i \\ -0.331i & -0.551i & 2.555i \end{bmatrix} \mu S$$

5.2.1.2 Υπολογισμός παραμέτρων μετασχηματιστή

Έπειτα από τον υπολογισμό των παραμέτρων των γραμμών, σειρά έχει ο υπολογισμός των αντίστοιχων πινάκων του μετασχηματιστή. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.66) έως (3.71) προκύπτει ότι:

$$n_t = \frac{VLN_{Rated\ primary}}{VLN_{Rated\ secondary}} = \frac{\frac{12.47}{\sqrt{3}}}{\frac{4.16}{\sqrt{3}}} = 2.9976$$

$$[a_t] = n_t \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.9976 & 0 & 0 \\ 0 & 2.9976 & 0 \\ 0 & 0 & 2.9976 \end{bmatrix}$$

$$[b_t] = n_t \cdot \begin{bmatrix} Zt_a & 0 & 0 \\ 0 & Zt_b & 0 \\ 0 & 0 & Zt_c \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$[b_t] = 2.9976 \cdot \begin{bmatrix} 0.0288 + 0.1731i & 0 & 0 \\ 0 & 0.0288 + 0.1731i & 0 \\ 0 & 0 & 0.0288 + 0.1731i \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$[b_t] = \begin{bmatrix} 0.0865 + 0.5188i & 0 & 0 \\ 0 & 0.0865 + 0.5188i & 0 \\ 0 & 0 & 0.0865 + 0.5188i \end{bmatrix}$$

$$[c_t] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[d_t] = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2.9976} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2.9976} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2.9976} \end{bmatrix}$$

$$[A_t] = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2.9976} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2.9976} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2.9976} \end{bmatrix}$$

$$[B_t] = \begin{bmatrix} Zt_a & 0 & 0 \\ 0 & Zt_b & 0 \\ 0 & 0 & Zt_c \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$[B_t] = \begin{bmatrix} 0.0288 + 0.1731i & 0 & 0 \\ 0 & 0.0288 + 0.1731i & 0 \\ 0 & 0 & 0.0288 + 0.1731i \end{bmatrix}$$

5.2.2 Υπολογισμός RBF σειράς διάσχισης του δικτύου

Εκτός όμως από τις παραμέτρους των γραμμών και των μετασχηματιστών είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η RBF σειρά των ζυγών. Αρχικά γίνεται δεικτοδότηση των ζυγών σύμφωνα με όσα έχουν αναλυθεί στην Ενότητα 2.3. Οι δείκτες φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.2 και καθορίζουν την RBF σειρά.

Πίνακας 5.2: Δείκτες των ζυγών του δικτύου.

Όνομα Ζυγού	Δείκτες		
	l	m	n
1	1	1	0
2	1	1	1
3	1	1	2
4	1	1	3
5	2	1	1
6	2	2	1

Λαμβάνοντας υπόψη τον κανόνα καθορισμού της RBF σειράς, ο οποίος αναφέρει ότι προηγείται ο ζυγός με τον μεγαλύτερο δείκτη (κατά προτεραιότητα l,m,n), τα RBF άκρα είναι οι ζυγοί 6, 5 και 4 και η σειρά διάσχισης του δικτύου είναι οι ζυγοί 6, 5, 4, 3, 2, 1.

5.2.3 Αρχικοποίηση τάσεων

Προτού ξεκινήσει η μέθοδος πρέπει να τονιστεί ότι η φασική τάση του ζυγού τροφοδοσίας είναι η ακόλουθη:

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 12470 \angle 0^\circ \\ 12470 \angle -120^\circ \\ 12470 \angle 120^\circ \end{bmatrix} V \quad (5.1)$$

Με δεδομένη την τιμή της V_1 όπως έχει αναφερθεί και στην ανάλυση του αλγορίθμου στην Ενότητα 4.2.2, γίνεται ο υπολογισμός του σφάλματος μιας λύσης του αλγορίθμου ώστε να αποφασιστεί εάν η μέθοδος συγκλίνει ή εάν πρέπει να γίνουν περισσότερες επαναλήψεις. Επιπλέον έχει γίνει εξίσωση όλων των αρχικών τάσεων των ζυγών με την ονομαστική τους τιμή.

5.2.4 Επανάληψη 1

5.2.4.1 Backward Sweep

➤ Ζυγός 6 – Backward Sweep – 1^η Επανάληψη

Αρχικά διατρέχεται ο ζυγός 6 μιας και είναι ο πρώτος της RBF σειράς διάσχισης.

Γίνεται υπολογισμός του I_{load_6} με τις εξισώσεις (3.11) και (3.12) αφού είναι έχει φορτίο σταθερής σύνθετης αντίστασης και συνδεσμολογίας τριγώνου:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{load_inj,6} &= \begin{bmatrix} \bar{I}_{a_injected} \\ \bar{I}_{b_injected} \\ \bar{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix}^* \cdot / \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \cdot / \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \cdot * \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} \Rightarrow \\ \bar{I}_{load_inj,6} &= -1000 \cdot \begin{bmatrix} 800 + j \cdot 260 \\ 425 + j \cdot 253 \\ 600 + j \cdot 290 \end{bmatrix}^* \cdot / \begin{bmatrix} \frac{4160}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \\ \frac{4160}{\sqrt{3}} \angle -120^\circ \\ \frac{4160}{\sqrt{3}} \angle 120^\circ \end{bmatrix}^2 \cdot * \begin{bmatrix} \frac{4160}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \\ \frac{4160}{\sqrt{3}} \angle -120^\circ \\ \frac{4160}{\sqrt{3}} \angle 120^\circ \end{bmatrix} \Rightarrow \\ \bar{I}_{load_inj,6} &= \begin{bmatrix} 350.236 \angle 161.996^\circ \\ 205.933 \angle 29.235^\circ \\ 277.465 \angle -85.796^\circ \end{bmatrix} A \end{aligned}$$

Δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη γεννήτρια διεσπαρμένης παραγωγής, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής. Επίσης ο ζυγός αυτός είναι άκρο υποκλάδου γεγονός το οποίο συνεπάγει μηδενικό ρεύμα εξόδου. Επομένως αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν και γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_{6 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \bar{I}_{gen} + \bar{I}_{cap} + \bar{I}_{load} + \sum \bar{I}_{υποκλάδων} - \bar{I}_{6 \text{ εξερχόμενο}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{6 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \begin{bmatrix} 350.236 \angle 161.996^\circ \\ 205.933 \angle 29.235^\circ \\ 277.465 \angle -85.796^\circ \end{bmatrix} A$$

Ανάμεσα στο ζυγό 6 και στο ζυγό 3 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 3 προς το ζυγό 6 και η τάση του ζυγού 6 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_6 + Z_{ABC \ 3-6} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 3-6} \cdot \bar{V}_6 - \bar{I}_{6 \text{ εισερχ. inj.}} \right) \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_3 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 4160 \angle 0^\circ \\ 4160 \angle -120^\circ \\ 4160 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0.2166 + 0.5104i & 0.0738 + 0.2375i & 0.0727 + 0.1823i \\ 0.0738 + 0.2375i & 0.2209 + 0.4963i & 0.0748 + 0.2006i \\ 0.0727 + 0.1823i & 0.0748 + 0.2006i & 0.2185 + 0.5043i \end{bmatrix} \\ &* \left(\frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 2.688i & -0.867i & -0.331i \\ -0.867i & 2.832i & -0.551i \\ -0.331i & -0.551i & 2.555i \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 4160 \angle 0^\circ \\ 4160 \angle -120^\circ \\ 4160 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \right. \\ &\left. - \begin{bmatrix} 350.236 \angle 161.996^\circ \\ 205.933 \angle 29.235^\circ \\ 277.465 \angle -85.796^\circ \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 2490.460 \angle 2.597^\circ \\ 2420.564 \angle -119.648^\circ \\ 2500.468 \angle 121.171^\circ \end{bmatrix} V \end{aligned}$$

και επίσης:

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ προς } 6 = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 3-6} * (\bar{V}_3 + \bar{V}_6) - \bar{I}_6 \text{ εισερχ. inj.} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_3 \text{ εξερχ προς } 6 = & \\ \frac{1}{2} \cdot & \begin{bmatrix} 2.688i & -0.867i & -0.331i \\ -0.867i & 2.832i & -0.551i \\ -0.331i & -0.551i & 2.555i \end{bmatrix} * \left(\begin{bmatrix} 2490.460 \angle 2.597^\circ \\ 2420.564 \angle -119.648^\circ \\ 2500.468 \angle 121.171^\circ \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \right. \\ & \left. \begin{bmatrix} 4160 \angle 0^\circ \\ 4160 \angle -120^\circ \\ 4160 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} 350.236 \angle 161.996^\circ \\ 205.933 \angle 29.235^\circ \\ 277.465 \angle -85.796^\circ \end{bmatrix} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ προς } 6 = \begin{bmatrix} 350.233 \angle -18.003^\circ \\ 205.929 \angle -150.763^\circ \\ 277.462 \angle 94.205^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 5 – Backward Sweep – 1^η Επανάληψη

Γίνεται υπολογισμός του I_{load_5} με τις εξισώσεις (3.3) έως (3.5):

$$\begin{aligned} |\bar{I}_{load_inj.}| &= \left| - \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \right| = \left| - \begin{bmatrix} 600 + j \cdot 290 \\ 800 + j \cdot 260 \\ 425 + j \cdot 253 \end{bmatrix} ./ \right. \\ & \left. \begin{bmatrix} 4160 \angle 0^\circ \\ 4160 \angle -120^\circ \\ 4160 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right| = \begin{bmatrix} 277.465 \\ 350.236 \\ 205.933 \end{bmatrix} \text{ A} \end{aligned}$$

$$\text{Arg}(\bar{I}_{load_inj.}) = \begin{bmatrix} \text{Arg}(\tilde{V}_a) - \text{Arg}(\tilde{S}_{a,nom}) \\ \text{Arg}(\tilde{V}_b) - \text{Arg}(\tilde{S}_{b,nom}) \\ \text{Arg}(\tilde{V}_c) - \text{Arg}(\tilde{S}_{c,nom}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0^\circ - 25.796^\circ \\ -120^\circ - 18.004^\circ \\ 120^\circ - 30.765^\circ \end{bmatrix}$$

άρα προκύπτει ότι:

$$\bar{I}_{load_inj.} = - \begin{bmatrix} |\tilde{I}_{a_injected}| \\ |\tilde{I}_{b_injected}| \\ |\tilde{I}_{c_injected}| \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{a_injected})) \\ \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{b_injected})) \\ \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{c_injected})) \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} 277.465 \angle -25.796^\circ \\ 350.236 \angle -138.004^\circ \\ 205.933 \angle 89.235^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ο ζυγός 5 έχει εγκατεστημένο τριφασικό εγκάρσιο πυκνωτή όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 5.1. Είναι λοιπόν απαραίτητο να υπολογιστεί η τιμή του ρεύματος που απορροφά σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.15) και (3.16):

$$\bar{Y}_{shunt_capacitor} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_a \\ \tilde{Y}_b \\ \tilde{Y}_c \end{bmatrix} = -j \cdot \begin{bmatrix} |Q_{a,nom}| \\ |Q_{b,nom}| \\ |Q_{c,nom}| \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{Y}_{shunt_capacitor} = -j \cdot \begin{bmatrix} |20000| \\ |20000| \\ |20000| \end{bmatrix} ./ \left(\begin{bmatrix} 4160\angle 0^\circ \\ 4160\angle -120^\circ \\ 4160\angle 120^\circ \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 =$$

$$\begin{bmatrix} 0.0035i \\ 0.0035i \\ 0.0035i \end{bmatrix} \Omega^{-1}$$

$$\bar{I}_{shunt_capacitor_inj.} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_a \\ \tilde{Y}_b \\ \tilde{Y}_c \end{bmatrix} .* \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} = -j \cdot \begin{bmatrix} 0.0035i \\ 0.0035i \\ 0.0035i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 4160\angle 0^\circ \\ 4160\angle -120^\circ \\ 4160\angle 120^\circ \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} =$$

$$\begin{bmatrix} 8.327\angle 90^\circ \\ 8.327\angle -30^\circ \\ 8.327\angle -150^\circ \end{bmatrix} \text{A}$$

Σε αυτόν το ζυγό δεν υπάρχει εγκατεστημένη γεννήτρια διεσπαρμένης παραγωγής, επομένως το αντίστοιχο ρεύμα ισούται με μηδέν. Επίσης είναι άκρο υποκλάδου γεγονός το οποίο συνεπάγεται μηδενικό ρεύμα εξόδου.

Γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_{5 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \bar{I}_{gen} + \bar{I}_{cap} + \bar{I}_{load} + \sum \bar{I}_{υποκλάδων} - \bar{I}_{5 \text{ εξερχόμενο}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{5 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 8.327\angle 90^\circ \\ 8.327\angle -30^\circ \\ 8.327\angle -150^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 277.465\angle -25.796^\circ \\ 350.236\angle -138.004^\circ \\ 205.933\angle 89.235^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 273.944\angle 155.772^\circ \\ 347.753\angle 43.301^\circ \\ 201.800\angle -88.733^\circ \end{bmatrix} \text{A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 5 και στο ζυγό 3 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 3 προς το ζυγό 5 και η τάση του ζυγού 3 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_5 + Z_{ABC\ 3-5} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-5} \cdot \bar{V}_5 - \bar{I}_{5 \text{ εισερχ. inj.}} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_3 =$$

$$\begin{bmatrix} 4160\angle 0^\circ \\ 4160\angle -120^\circ \\ 4160\angle 120^\circ \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} +$$

$$\begin{bmatrix} 0.2166 + 0.5104i & 0.0738 + 0.2375i & 0.0727 + 0.1823i \\ 0.0738 + 0.2375i & 0.2209 + 0.4963i & 0.0748 + 0.2006i \\ 0.0727 + 0.1823i & 0.0748 + 0.2006i & 0.2185 + 0.5043i \end{bmatrix} * \left(\frac{1}{2} \cdot \right.$$

$$\begin{bmatrix} 2.688i & -0.867i & -0.331i \\ -0.867i & 2.832i & -0.551i \\ -0.331i & -0.551i & 2.555i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 4160\angle 0^\circ \\ 4160\angle -120^\circ \\ 4160\angle 120^\circ \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} -$$

$$\left. \begin{bmatrix} 273.944\angle 155.772^\circ \\ 347.753\angle 43.301^\circ \\ 201.800\angle -88.733^\circ \end{bmatrix} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_3 = \begin{bmatrix} 2514.455 \angle 0.895^\circ \\ 2468.941 \angle -117.345^\circ \\ 2428.656 \angle 120.594^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ. προς } 5 = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 3-5} * (\bar{V}_3 + \bar{V}_5) - \bar{I}_5 \text{ εισερχ. inj.} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_3 \text{ εξερχ. προς } 5 = & \\ \frac{1}{2} \cdot & \begin{bmatrix} 2.688i & -0.867i & -0.331i \\ -0.867i & 2.832i & -0.551i \\ -0.331i & -0.551i & 2.555i \end{bmatrix} * \left(\begin{bmatrix} 2514.455 \angle 0.895^\circ \\ 2468.941 \angle -117.345^\circ \\ 2428.656 \angle 120.594^\circ \end{bmatrix} + \right. \\ & \left. \begin{bmatrix} 4160 \angle 0^\circ \\ 4160 \angle -120^\circ \\ 4160 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right) - \begin{bmatrix} 273.944 \angle 155.772^\circ \\ 347.753 \angle 43.301^\circ \\ 201.800 \angle -88.733^\circ \end{bmatrix} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ. προς } 5 = \begin{bmatrix} 273.939 \angle -24.226^\circ \\ 347.751 \angle -136.698^\circ \\ 201.797 \angle 91.269^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 4 – Backward Sweep – 1^η Επανάληψη

Το φορτίο που είναι εγκατεστημένο στο ζυγό 4 είναι σταθερής ισχύος και συνδεσμολογίας γειωμένου αστέρα. Επομένως ο υπολογισμός του I_{load_4} γίνεται με την εξίσωση (3.1):

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{a_injected} \\ \bar{I}_{b_injected} \\ \bar{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = \left(- \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} \right)^* \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = \left(- \begin{bmatrix} 425 + j \cdot 253 \\ 600 + j \cdot 290 \\ 800 + j \cdot 260 \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} 4160 \angle 0^\circ \\ 4160 \angle -120^\circ \\ 4160 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right)^* \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} 205.933 \angle 149.235^\circ \\ 277.465 \angle 34.204^\circ \\ 350.236 \angle -78.004^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής. Επίσης ο ζυγός αυτός είναι άκρο υποκλάδου γεγονός το οποίο συνεπάγει μηδενικό ρεύμα εξόδου. Επομένως αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν και γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_4 \text{ εισερχόμενο inj.} = \bar{I}_{gen} + \bar{I}_{cap} + \bar{I}_{load} + \sum \bar{I}_{υποκλάδων} - \bar{I}_4 \text{ εξερχόμενο} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_4 \text{ εισερχόμενο inj.} = \begin{bmatrix} 205.933 \angle 149.235^\circ \\ 277.465 \angle 34.204^\circ \\ 350.236 \angle -78.004^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 4 και στο ζυγό 3 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 3 προς το ζυγό 4 και η τάση του ζυγού 3 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_4 + Z_{ABC\ 3-4} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-4} \cdot \bar{V}_4 - \bar{I}_4 \text{ εξερχ.ijn.}\right) \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_3 = & \begin{bmatrix} 4160\angle 0^\circ \\ 4160\angle -120^\circ \\ 4160\angle 120^\circ \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} + \\ & \begin{bmatrix} 0.2166 + 0.5104i & 0.0738 + 0.2375i & 0.0727 + 0.1823i \\ 0.0738 + 0.2375i & 0.2209 + 0.4963i & 0.0748 + 0.2006i \\ 0.0727 + 0.1823i & 0.0748 + 0.2006i & 0.2185 + 0.5043i \end{bmatrix} * \left(\frac{1}{2} \cdot \right. \\ & \begin{bmatrix} 2.688i & -0.867i & -0.331i \\ -0.867i & 2.832i & -0.551i \\ -0.331i & -0.551i & 2.555i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 4160\angle 0^\circ \\ 4160\angle -120^\circ \\ 4160\angle 120^\circ \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} - \\ & \left. \begin{bmatrix} 205.933\angle 149.235^\circ \\ 277.465\angle 34.204^\circ \\ 350.236\angle -78.004^\circ \end{bmatrix}\right) \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\bar{V}_3 = \begin{bmatrix} 2446.29\angle 0.307^\circ \\ 2496.096\angle -119.003^\circ \\ 2480.337\angle 122.793^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$\begin{aligned} \bar{I}_3 \text{ εξερχ. προς 4} = & \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 2.688i & -0.867i & -0.331i \\ -0.867i & 2.832i & -0.551i \\ -0.331i & -0.551i & 2.555i \end{bmatrix} * \left(\begin{bmatrix} 2446.29\angle 0.307^\circ \\ 2496.096\angle -119.003^\circ \\ 2480.337\angle 122.793^\circ \end{bmatrix} + \right. \\ & \left. \begin{bmatrix} 4160\angle 0^\circ \\ 4160\angle -120^\circ \\ 4160\angle 120^\circ \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right) - \begin{bmatrix} 205.933\angle 149.235^\circ \\ 277.465\angle 34.204^\circ \\ 350.236\angle -78.004^\circ \end{bmatrix} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ. προς 4} = \begin{bmatrix} 205.928\angle -30.763^\circ \\ 277.461\angle -145.794^\circ \\ 350.234\angle 101.997^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 3 – Backward Sweep – 1^η Επανάληψη

Ο ζυγός 3 δεν έχει εγκατεστημένο φορτίο επομένως το ρεύμα φορτίου θα είναι μηδενικό. Επίσης δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής. Επομένως και αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν.

Αντίθετα από το Σχήμα 5.1 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ο ζυγός 3 είναι ο τροφοδότης δύο υποκλάδων του δικτύου. Επομένως τα ρεύματα με τα οποία τροφοδοτεί τους ζυγούς 5 και 6 είναι τα ρεύματα υποκλάδων και αθροίζοντας τις ήδη γνωστές τιμές τους υπολογίζεται η συνολική εγχεόμενη τιμή του αντίστοιχου ρεύματος:

$$\Sigma \bar{I}_{\text{υποκλάδων 3}} = -(\bar{I}_3 \text{ εξερχ. προς 5} + \bar{I}_3 \text{ εξερχ. προς 6}) \Rightarrow$$

$$\Sigma \bar{I}_{\text{υποκλάδων } 3} = \begin{bmatrix} 623.265 \angle 159.266^\circ \\ 549.789 \angle 38.079^\circ \\ 479.106 \angle -87.031^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Τώρα πλέον είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί η εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_{3 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \bar{I}_{\text{gen}} + \bar{I}_{\text{cap}} + \bar{I}_{\text{load}} + \Sigma \bar{I}_{\text{υποκλάδων}} - \bar{I}_{3 \text{ εξερχόμενο}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{3 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \begin{bmatrix} 826.824 \angle 156.780^\circ \\ 826.829 \angle 36.780^\circ \\ 826.830 \angle -83.220^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 2 και στο ζυγό 3 υπάρχει μετασχηματιστής. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 2 προς το ζυγό 3 και η τάση του ζυγού 2 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.56) και (3.57). Το αρνητικό πρόσημο μπροστά από το ρεύμα $I_{3 \text{ εισερχ. inj.}}$ έχει τη σημασία της μετατροπής στην τιμή του μη εγγεόμενου ρεύματος.

$$[\text{VLN}_2] = [a_t] \cdot [\text{VLN}_3] + [b_t] \cdot [-I_{3 \text{ εισερχ. inj.}}] \Rightarrow$$

$$[\text{VLN}_2] = \begin{bmatrix} 2.9976 & 0 & 0 \\ 0 & 2.9976 & 0 \\ 0 & 0 & 2.9976 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2446.29 \angle 0.307^\circ \\ 2496.096 \angle -119.003^\circ \\ 2480.337 \angle 122.793^\circ \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} 0.0865 + 0.5188i & 0 & 0 \\ 0 & 0.0865 + 0.5188i & 0 \\ 0 & 0 & 0.0865 + 0.5188i \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 826.824 \angle 156.780^\circ \\ 826.829 \angle 36.780^\circ \\ 826.830 \angle -83.220^\circ \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{V}_2 = \begin{bmatrix} 7578.529 \angle 3.065^\circ \\ 7731.891 \angle -116.321^\circ \\ 7695.560 \angle 125.431^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$\begin{bmatrix} I_{2 \text{ εξερχ προς } 3} \\ I_{2 \text{ εξερχ προς } 3} \end{bmatrix} = [c_t] \cdot [\text{VLN}_3] + [d_t] \cdot [-I_{3 \text{ εισερχ. inj.}}] \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2446.29 \angle 0.307^\circ \\ 2496.096 \angle -119.003^\circ \\ 2480.337 \angle 122.793^\circ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{2.9976} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2.9976} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2.9976} \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 826.824 \angle 156.780^\circ \\ 826.829 \angle 36.780^\circ \\ 826.830 \angle -83.220^\circ \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{2 \text{ εξερχ προς } 3} = \begin{bmatrix} 275.829 \angle -23.220^\circ \\ 275.831 \angle -143.220^\circ \\ 275.831 \angle 96.780^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 2 – Backward Sweep – 1^η Επανάληψη

Ο ζυγός 2, όμοια με τον ζυγό 3, δεν έχει εγκατεστημένο φορτίο, επομένως το ρεύμα φορτίου θα είναι μηδενικό. Επίσης δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής, αλλά ούτε και διακλάδωση σε υποκλάδους. Επομένως και αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν.

Με αυτά τα δεδομένα μπορεί να γίνει εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_{2 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \bar{I}_{\text{gen}} + \bar{I}_{\text{cap}} + \bar{I}_{\text{load}} + \sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων}} - \bar{I}_{2 \text{ εξερχόμενο}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{2 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \begin{bmatrix} 275.829 \angle 156.780^\circ \\ 275.831 \angle 36.780^\circ \\ 275.831 \angle -83.220^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 1 και στο ζυγό 2 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 1 προς το ζυγό 2 και η τάση του ζυγού 1 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + Z_{ABC \ 1-2} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 1-2} \cdot \bar{V}_2 - \bar{I}_{2 \text{ εισερχ. inj.}} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_1 = \begin{bmatrix} 7578.529 \angle 3.065^\circ \\ 7731.891 \angle -116.321^\circ \\ 7695.560 \angle 125.431^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.1733 + 0.4084i & 0.0591 + 0.1900i & 0.0581 + 0.1458i \\ 0.0591 + 0.1900i & 0.1768 + 0.3970i & 0.0599 + 0.1605i \\ 0.0581 + 0.1458i & 0.0599 + 0.1605i & 0.1748 + 0.4034i \end{bmatrix} * \left(\frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 2.150i & -0.694i & -0.264i \\ -0.694i & 2.265i & -0.441i \\ -0.264i & -0.441i & 2.044i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 7578.529 \angle 3.065^\circ \\ 7731.891 \angle -116.321^\circ \\ 7695.560 \angle 125.431^\circ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 275.829 \angle 156.780^\circ \\ 275.831 \angle 36.780^\circ \\ 275.831 \angle -83.220^\circ \end{bmatrix} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_1 = \begin{bmatrix} 7645.744 \angle 3.370^\circ \\ 7782.156 \angle -116.005^\circ \\ 7753.958 \angle 125.780^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και επίσης:

$$\bar{I}_{1 \text{ εξερχ. προς 2}} = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 1-2} * (\bar{V}_1 + \bar{V}_2) - \bar{I}_{2 \text{ εισερχ. inj.}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{1 \text{ εξερχ. προς 2}} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 2.150i & -0.694i & -0.264i \\ -0.694i & 2.265i & -0.441i \\ -0.264i & -0.441i & 2.044i \end{bmatrix} * \left(\begin{bmatrix} 7645.744 \angle 3.370^\circ \\ 7782.156 \angle -116.005^\circ \\ 7753.958 \angle 125.780^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 7578.529 \angle 3.065^\circ \\ 7731.891 \angle -116.321^\circ \\ 7695.560 \angle 125.431^\circ \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} 275.829 \angle 156.780^\circ \\ 275.831 \angle 36.780^\circ \\ 275.831 \angle -83.220^\circ \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_1 \text{ εξερχ προς 2} = \begin{bmatrix} 275.818\angle -23.216^\circ \\ 275.822\angle -143.215^\circ \\ 275.823\angle 96.784^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

5.2.4.2 Υπολογισμός Σφάλματος

Γίνεται εύρεση σφάλματος μεταξύ της τάσης του ζυγού 1 όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση (3.24) και της τιμής της που ισχύει σύμφωνα με την εξίσωση (5.1)

$$\begin{aligned} \text{Σφάλμα} &= |\bar{V}_1 - \bar{V}_{1 \text{ θεωρ.}}| / |\bar{V}_{1 \text{ θεωρ.}}| = \left| \begin{bmatrix} 7645.744\angle 3.370^\circ \\ 7782.156\angle -116.005^\circ \\ 7753.958\angle 125.780^\circ \end{bmatrix} \right| - \\ & \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 12470\angle 0^\circ \\ 12470\angle -120^\circ \\ 12470\angle 120^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0867 \\ 0.1086 \\ 0.1299 \end{bmatrix} \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Εύκολα παρατηρεί κανείς ότι το μεγαλύτερο σφάλμα είναι μεγαλύτερο από το όριο 0.001 που έχει τεθεί ως προϋπόθεση σύγκλισης, επομένως πρέπει να γίνει και άλλη επανάληψη.

5.2.4.3 Forward Sweep

Κατά την Forward Sweep όλα τα ρεύματα διατηρούνται σταθερά από το προηγούμενο βήμα και γνωστή είναι μόνο η τάση τροφοδοσίας που ορίζεται στην εξίσωση (5.1). Όλες οι υπόλοιπες τάσεις του δικτύου υπολογίζονται διαμέσου των δύο αυτών δεδομένων.

➤ Ζυγός 1 – Forward Sweep – 1^η Επανάληψη

Μεταξύ των ζυγών 1 και 2 υπάρχει γραμμή. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.23) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 3.

$$\begin{aligned} \bar{V}_2 &= \bar{V}_1 + Z_{ABC1-2} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC1-2} \cdot \bar{V}_1 - \bar{I}_1 \text{ εξερχ προς 2} \right) \Rightarrow \\ \bar{V}_2 &= \\ & \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 12470\angle 0^\circ \\ 12470\angle -120^\circ \\ 12470\angle 120^\circ \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} 0.1733 + 0.4084i & 0.0591 + 0.1900i & 0.0581 + 0.1458i \\ 0.0591 + 0.1900i & 0.1768 + 0.3970i & 0.0599 + 0.1605i \\ 0.0581 + 0.1458i & 0.0599 + 0.1605i & 0.1748 + 0.4034i \end{bmatrix} * \\ & \left(\frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 2.150i & -0.694i & -0.264i \\ -0.694i & 2.265i & -0.441i \\ -0.264i & -0.441i & 2.044i \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 12470\angle 0^\circ \\ 12470\angle -120^\circ \\ 12470\angle 120^\circ \end{bmatrix} - \right. \\ & \left. \begin{bmatrix} 275.818\angle -23.216^\circ \\ 275.822\angle -143.215^\circ \\ 275.823\angle 96.784^\circ \end{bmatrix} \right) \Rightarrow \\ \bar{V}_2 &= \begin{bmatrix} 7134.853\angle -0.354^\circ \\ 7152.420\angle -120.369^\circ \\ 7146.237\angle 119.578^\circ \end{bmatrix} \text{ V} \end{aligned}$$

➤ Ζυγός 2 – Forward Sweep – 1^η Επανάληψη

Μεταξύ των ζυγών 2 και 3 υπάρχει μετασχηματιστής. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.58) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 3.

$$\begin{aligned}
 [VLN_3] &= [A_t] \cdot [VLN_2] - [B_t] \cdot [-I_3 \text{ εισερχόμενο inj.}] \Rightarrow \\
 [VLN_3] &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2.9976} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2.9976} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2.9976} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 7134.853 \angle -0.354^\circ \\ 7152.420 \angle -120.369^\circ \\ 7146.237 \angle 119.578^\circ \end{bmatrix} - \\
 &\begin{bmatrix} 0.0288 + 0.1731i & 0 & 0 \\ 0 & 0.0288 + 0.1731i & 0 \\ 0 & 0 & 0.0288 + 0.1731i \end{bmatrix} \cdot \\
 &\begin{bmatrix} 826.824 \angle 156.780^\circ \\ 826.829 \angle 36.780^\circ \\ 826.830 \angle -83.220^\circ \end{bmatrix} \Rightarrow \\
 \bar{V}_3 &= \begin{bmatrix} 2305.878 \angle -3.401^\circ \\ 2311.764 \angle -123.409^\circ \\ 2309.820 \angle 116.534^\circ \end{bmatrix} \text{ V}
 \end{aligned}$$

➤ Ζυγός 3 – Forward Sweep – 1^η Επανάληψη

Μεταξύ των ζυγών 3 και 4 υπάρχει γραμμή. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.23) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 4.

$$\begin{aligned}
 \bar{V}_4 &= \bar{V}_3 + Z_{ABC \ 3-4} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 3-4} \cdot \bar{V}_3 - \bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 4} \right) \Rightarrow \\
 \bar{V}_4 &= \\
 &\begin{bmatrix} 2305.878 \angle -3.401^\circ \\ 2311.764 \angle -123.409^\circ \\ 2309.820 \angle 116.534^\circ \end{bmatrix} + \\
 &\begin{bmatrix} 0.2166 + 0.5104i & 0.0738 + 0.2375i & 0.0727 + 0.1823i \\ 0.0738 + 0.2375i & 0.2209 + 0.4963i & 0.0748 + 0.2006i \\ 0.0727 + 0.1823i & 0.0748 + 0.2006i & 0.2185 + 0.5043i \end{bmatrix} * \\
 &\left(\frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 2.688i & -0.867i & -0.331i \\ -0.867i & 2.832i & -0.551i \\ -0.331i & -0.551i & 2.555i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2305.878 \angle -3.401^\circ \\ 2311.764 \angle -123.409^\circ \\ 2309.820 \angle 116.534^\circ \end{bmatrix} - \right. \\
 &\left. \begin{bmatrix} 205.928 \angle -30.763^\circ \\ 277.461 \angle -145.794^\circ \\ 350.234 \angle 101.997^\circ \end{bmatrix} \right) \Rightarrow \\
 \bar{V}_4 &= \begin{bmatrix} 2262.311 \angle -3.800^\circ \\ 2221.109 \angle -124.671^\circ \\ 2245.150 \angle 113.336^\circ \end{bmatrix} \text{ V}
 \end{aligned}$$

Μεταξύ των ζυγών 3 και 5 υπάρχει γραμμή. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.23) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 5.

$$\begin{aligned} \bar{V}_5 &= \bar{V}_3 + Z_{ABC\ 3-5} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-5} \cdot \bar{V}_3 - \bar{I}_3 \text{ εξερχ προς } 5 \right) \Rightarrow \\ \bar{V}_5 &= \begin{bmatrix} 2305.878 \angle -3.401^\circ \\ 2311.764 \angle -123.409^\circ \\ 2309.820 \angle 116.534^\circ \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} 0.2166 + 0.5104i & 0.0738 + 0.2375i & 0.0727 + 0.1823i \\ 0.0738 + 0.2375i & 0.2209 + 0.4963i & 0.0748 + 0.2006i \\ 0.0727 + 0.1823i & 0.0748 + 0.2006i & 0.2185 + 0.5043i \end{bmatrix} * \\ & \left(\frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 2.688i & -0.867i & -0.331i \\ -0.867i & 2.832i & -0.551i \\ -0.331i & -0.551i & 2.555i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2305.878 \angle -3.401^\circ \\ 2311.764 \angle -123.409^\circ \\ 2309.820 \angle 116.534^\circ \end{bmatrix} - \right. \\ & \left. \begin{bmatrix} 273.939 \angle -24.226^\circ \\ 347.751 \angle -136.698^\circ \\ 201.797 \angle 91.269^\circ \end{bmatrix} \right) \Rightarrow \\ \bar{V}_5 &= \begin{bmatrix} 2196.516 \angle -4.598^\circ \\ 2257.253 \angle -126.406^\circ \\ 2284.798 \angle 115.864^\circ \end{bmatrix} \text{ V} \end{aligned}$$

Μεταξύ των ζυγών 3 και 6 υπάρχει γραμμή. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.23) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 6.

$$\begin{aligned} \bar{V}_6 &= \bar{V}_3 + Z_{ABC\ 3-6} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-6} \cdot \bar{V}_3 - \bar{I}_3 \text{ εξερχ προς } 6 \right) \Rightarrow \\ \bar{V}_6 &= \begin{bmatrix} 2305.878 \angle -3.401^\circ \\ 2311.764 \angle -123.409^\circ \\ 2309.820 \angle 116.534^\circ \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} 0.2166 + 0.5104i & 0.0738 + 0.2375i & 0.0727 + 0.1823i \\ 0.0738 + 0.2375i & 0.2209 + 0.4963i & 0.0748 + 0.2006i \\ 0.0727 + 0.1823i & 0.0748 + 0.2006i & 0.2185 + 0.5043i \end{bmatrix} * \\ & \left(\frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 2.688i & -0.867i & -0.331i \\ -0.867i & 2.832i & -0.551i \\ -0.331i & -0.551i & 2.555i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2305.878 \angle -3.401^\circ \\ 2311.764 \angle -123.409^\circ \\ 2309.820 \angle 116.534^\circ \end{bmatrix} - \right. \\ & \left. \begin{bmatrix} 350.233 \angle -18.003^\circ \\ 205.929 \angle -150.763^\circ \\ 277.462 \angle 94.205^\circ \end{bmatrix} \right) \Rightarrow \\ \bar{V}_6 &= \begin{bmatrix} 2229.7139 \angle -6.429^\circ \\ 2293.994 \angle -123.807^\circ \\ 2215.650 \angle 115.0617^\circ \end{bmatrix} \text{ V} \end{aligned}$$

5.2.5 Επανάληψη 2

5.2.5.1 Backward Sweep

➤ Ζυγός 6 – Backward Sweep – 2^η Επανάληψη

Γίνεται υπολογισμός του I_{load_6} με τις εξισώσεις (3.11) και (3.12) αφού είναι έχει φορτίο σταθερής σύνθετης αντίστασης και συνδεσμολογίας τριγώνου:

$$\bar{I}_{load_inj.6} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{a_injected} \\ \tilde{I}_{b_injected} \\ \tilde{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix}^* ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} .* \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{load_inj.6} = \begin{bmatrix} 325.145 \angle 155.567^\circ \\ 196.691 \angle 25.428^\circ \\ 255.962 \angle -90.734^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής. Επίσης ο ζυγός αυτός είναι άκρο υποκλάδου γεγονός το οποίο συνεπάγει μηδενικό ρεύμα εξόδου. Επομένως αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν και γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_{6 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \bar{I}_{gen} + \bar{I}_{cap} + \bar{I}_{load} + \sum \bar{I}_{υποκλάδων} - \bar{I}_{6 \text{ εξερχόμενο}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{6 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \begin{bmatrix} 325.145 \angle 155.567^\circ \\ 196.691 \angle 25.428^\circ \\ 255.962 \angle -90.734^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 6 και στο ζυγό 3 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 3 προς το ζυγό 6 και η τάση του ζυγού 6 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_6 + Z_{ABC \ 3-6} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 3-6} \cdot \bar{V}_6 - \bar{I}_{6 \text{ εισερχ. inj.}} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_3 = \begin{bmatrix} 2314.333 \angle -3.888^\circ \\ 2313.207 \angle -123.330^\circ \\ 2303.611 \angle 116.204^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$\bar{I}_{3 \text{ εξερχ προς 6}} = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 3-6} * (\bar{V}_3 + \bar{V}_6) - \bar{I}_{6 \text{ εισερχ. inj.}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{3 \text{ εξερχ προς 6}} = \begin{bmatrix} 325.142 \angle -24.432^\circ \\ 196.688 \angle -154.570^\circ \\ 255.960 \angle 89.267^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 5 – Backward Sweep – 2^η Επανάληψη

Γίνεται υπολογισμός του I_{load_5} με τις εξισώσεις (3.3) έως (3.5):

$$|\bar{I}_{load_inj.}| = \left| - \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \right| = \begin{bmatrix} 277.465 \\ 350.236 \\ 205.933 \end{bmatrix} \text{ A}$$

$$\text{Arg}(\bar{I}_{load_inj.}) = \begin{bmatrix} \text{Arg}(\tilde{V}_a) - \text{Arg}(\tilde{S}_{a,nom}) \\ \text{Arg}(\tilde{V}_b) - \text{Arg}(\tilde{S}_{b,nom}) \\ \text{Arg}(\tilde{V}_c) - \text{Arg}(\tilde{S}_{c,nom}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -30.394^\circ \\ -144.410^\circ \\ 85.098^\circ \end{bmatrix}$$

άρα προκύπτει ότι:

$$\bar{I}_{load_inj.} = - \begin{bmatrix} |\tilde{I}_{a_injected}| \\ |\tilde{I}_{b_injected}| \\ |\tilde{I}_{c_injected}| \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{a_injected})) \\ \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{b_injected})) \\ \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{c_injected})) \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} 277.465 \angle -30.394^\circ \\ 350.236 \angle -144.410^\circ \\ 205.933 \angle 85.098^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ο ζυγός 5 έχει εγκατεστημένο τριφασικό εγκάρσιο πυκνωτή όπως περιγράφηκε και στην πρώτη επανάληψη. Είναι λοιπόν απαραίτητο να υπολογιστεί η τιμή του ρεύματος που απορροφά σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.15) και (3.16):

$$\bar{Y}_{shunt_capacitor} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_a \\ \tilde{Y}_b \\ \tilde{Y}_c \end{bmatrix} = -j \cdot \begin{bmatrix} |Q_{a,nom}| \\ |Q_{b,nom}| \\ |Q_{c,nom}| \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{Y}_{shunt_capacitor} = \begin{bmatrix} 0.0035i \\ 0.0035i \\ 0.0035i \end{bmatrix} \Omega^{-1}$$

$$\bar{I}_{shunt_capacitor_inj.} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_a \\ \tilde{Y}_b \\ \tilde{Y}_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.616 \angle 85.402^\circ \\ 7.826 \angle -36.406^\circ \\ 7.922 \angle -154.136^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Σε αυτόν το ζυγό δεν υπάρχει εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, επομένως το αντίστοιχο ρεύμα ισούται με μηδέν. Επίσης είναι άκρο υποκλάδου γεγονός το οποίο συνεπάγει μηδενικό ρεύμα εξόδου.

Γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_{5 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \bar{I}_{gen} + \bar{I}_{cap} + \bar{I}_{load} + \sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων}} - \bar{I}_{5 \text{ εξερχόμενο}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{5 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \begin{bmatrix} 274.236 \angle 151.038^\circ \\ 347.897 \angle 36.816^\circ \\ 201.996 \angle -92.970^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 5 και στο ζυγό 3 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 3 προς το ζυγό 5 και η τάση του ζυγού 3 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_5 + Z_{ABC \ 3-5} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 3-5} \cdot \bar{V}_5 - \bar{I}_{5 \text{ εισερχ. inj.}} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_3 = \begin{bmatrix} 2306.870 \angle -3.663^\circ \\ 2325.913 \angle -123.631^\circ \\ 2311.800 \angle 116.555^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ προς } 5 = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 3-5} * (\bar{V}_3 + \bar{V}_5) - \bar{I}_5 \text{ εισερχ.inj.} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ προς } 5 = \begin{bmatrix} 274.232 \angle -28.960^\circ \\ 347.895 \angle -143.183^\circ \\ 201.993 \angle 87.031^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 4 – Backward Sweep – 2^η Επανάληψη

Το φορτίο που είναι εγκατεστημένο στο ζυγό 4 είναι σταθερής ισχύος και συνδεσμολογίας γειωμένου αστέρα. Επομένως ο υπολογισμός του I_{load_4} γίνεται με την εξίσωση (3.1):

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{a_injected} \\ \tilde{I}_{b_injected} \\ \tilde{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = \left(- \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} \right)^* \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} 218.628 \angle 145.435^\circ \\ 300.034 \angle 29.533^\circ \\ 374.670 \angle -84.668^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής. Επίσης ο ζυγός αυτός είναι άκρο υποκλάδου γεγονός το οποίο συνεπάγει μηδενικό ρεύμα εξόδου. Επομένως αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν και γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_4 \text{ εισερχόμενο inj.} = \bar{I}_{gen} + \bar{I}_{cap} + \bar{I}_{load} + \sum \bar{I}_{υποκλάδων} - \bar{I}_4 \text{ εξερχόμενο} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_4 \text{ εισερχόμενο inj.} = \begin{bmatrix} 218.628 \angle 145.435^\circ \\ 300.034 \angle 29.533^\circ \\ 374.670 \angle -84.668^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 4 και στο ζυγό 3 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 3 προς το ζυγό 4 και η τάση του ζυγού 3 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_4 + Z_{ABC \ 3-4} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 3-4} \cdot \bar{V}_4 - \bar{I}_4 \text{ εισερχ.inj.} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_3 = \begin{bmatrix} 2309.056 \angle -3.403^\circ \\ 2320.920 \angle -123.544^\circ \\ 2330.383 \angle 116.485^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ προς } 4 = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 3-4} * (\bar{V}_3 + \bar{V}_4) - \bar{I}_4 \text{ εισερχ.inj.} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 4} = \begin{bmatrix} 218.623\angle -34.563^\circ \\ 3300.031\angle -150.466^\circ \\ 374.668\angle 95.333^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 3 – Backward Sweep – 2^η Επανάληψη

Ο ζυγός 3 δεν έχει εγκατεστημένο φορτίο επομένως το ρεύμα φορτίου θα είναι μηδενικό. Επίσης δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής. Επομένως και αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν.

Αντίθετα από το Σχήμα 5.1 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ο ζυγός 3 είναι ο τροφοδότης δύο υποκλάδων του δικτύου. Επομένως τα ρεύματα με τα οποία τροφοδοτεί τους ζυγούς 5 και 6 είναι τα ρεύματα υποκλάδων και αθροίζοντας τις ήδη γνωστές τιμές τους υπολογίζεται η συνολική εγγερόμενη τιμή του αντίστοιχου ρεύματος:

$$\sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων 3}} = -(\bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 5} + \bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 6}) \Rightarrow$$

$$\sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων 3}} = \begin{bmatrix} 598.910\angle 153.496^\circ \\ 542.104\angle 32.709^\circ \\ 457.866\angle -91.719^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Τώρα πλέον είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί η εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_3 \text{ εισερχόμενο inj.} = \bar{I}_{\text{gen}} + \bar{I}_{\text{cap}} + \bar{I}_{\text{load}} + \sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων}} - \bar{I}_3 \text{ εξερχόμενο} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_3 \text{ εισερχόμενο inj.} = \begin{bmatrix} 815.950\angle 151.343^\circ \\ 841.838\angle 31.578^\circ \\ 830.974\angle -88.546^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 2 και στο ζυγό 3 υπάρχει μετασχηματιστής. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 2 προς το ζυγό 3 και η τάση του ζυγού 2 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.56) και (3.57). Το αρνητικό πρόσημο μπροστά από το ρεύμα $I_3 \text{ εισερχ. inj.}$ έχει τη σημασία της μετατροπής στην τιμή του μη εγγερόμενου ρεύματος.

$$[\text{VLN}_2] = [a_t] \cdot [\text{VLN}_3] + [b_t] \cdot [-I_3 \text{ εισερχ. inj.}] \Rightarrow$$

$$\bar{V}_2 = \begin{bmatrix} 7174.678\angle -0.585^\circ \\ 7216.196\angle -120.640^\circ \\ 7241.996\angle 119.336^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$[I_2 \text{ εξερχ προς 3}] = [c_t] \cdot [\text{VLN}_3] + [d_t] \cdot [-I_3 \text{ εισερχ. inj.}] \Rightarrow$$

$$\bar{I}_2 \text{ εξερχ προς 3} = \begin{bmatrix} 272.201\angle -28.657^\circ \\ 280.838\angle -148.422^\circ \\ 277.213\angle 91.454^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 2 – Backward Sweep – 2^η Επανάληψη

Ο ζυγός 2, όμοια με τον ζυγό 3, δεν έχει εγκατεστημένο φορτίο, επομένως το ρεύμα φορτίου θα είναι μηδενικό. Επίσης δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής, αλλά ούτε και διακλάδωση σε υποκλάδους. Επομένως και αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν.

Με αυτά τα δεδομένα μπορεί να γίνει εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_{2 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \bar{I}_{\text{gen}} + \bar{I}_{\text{cap}} + \bar{I}_{\text{load}} + \sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων}} - \bar{I}_{2 \text{ εξερχόμενο}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{2 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \begin{bmatrix} 272.201 \angle 151.343^\circ \\ 280.838 \angle 31.578^\circ \\ 277.213 \angle -88.546^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 1 και στο ζυγό 2 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 1 προς το ζυγό 2 και η τάση του ζυγού 1 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + Z_{ABC \ 1-2} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 1-2} \cdot \bar{V}_2 - \bar{I}_{2 \text{ εισερχ. inj.}} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_1 = \begin{bmatrix} 7242.098 \angle -0.296^\circ \\ 7269.541 \angle -120.299^\circ \\ 7299.219 \angle 119.722^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$\bar{I}_{1 \text{ εξερχ προς 2}} = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 1-2} * (\bar{V}_1 + \bar{V}_2) - \bar{I}_{2 \text{ εισερχ. inj.}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{1 \text{ εξερχ προς 2}} = \begin{bmatrix} 272.190 \angle -28.653^\circ \\ 280.830 \angle -148.418^\circ \\ 277.206 \angle 91.458^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

5.2.5.2 Υπολογισμός Σφάλματος

Γίνεται εύρεση σφάλματος μεταξύ της τάσης του ζυγού 1 όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση (3.24) και της τιμής της που ισχύει σύμφωνα με την εξίσωση (5.1)

$$\text{Σφάλμα} = \frac{|\bar{V}_1 - \bar{V}_{1 \text{ θεωρ.}}|}{|\bar{V}_{1 \text{ θεωρ.}}|} = \begin{bmatrix} 0.0079 \\ 0.0110 \\ 0.0147 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

Εύκολα παρατηρεί κανείς ότι το μεγαλύτερο σφάλμα είναι μεγαλύτερο από το όριο (0.001) που έχει τεθεί ως προϋπόθεση σύγκλισης, επομένως πρέπει να γίνει και άλλη επανάληψη.

5.2.5.3 Forward Sweep

➤ Ζυγός 1 – Forward Sweep – 2^η Επανάληψη

Μεταξύ των ζυγών 1 και 2 υπάρχει γραμμή. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.23) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 3.

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 + Z_{ABC1-2} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC1-2} \cdot \bar{V}_1 - \bar{I}_1 \text{ εξερχ προς 2} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_2 = \begin{bmatrix} 7131.951 \angle -0.288^\circ \\ 7145.990 \angle -120.342^\circ \\ 7142.099 \angle 119.611^\circ \end{bmatrix} V$$

➤ Ζυγός 2 – Forward Sweep 2^η Επανάληψη

Μεταξύ των ζυγών 2 και 3 υπάρχει μετασχηματιστής. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.58) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 3.

$$[VLN_3] = [A_t] \cdot [VLN_2] - [B_t] \cdot [-I_3 \text{ εισερχόμενο inj.}] \Rightarrow$$

$$\bar{V}_3 = \begin{bmatrix} 2294.211 \angle -3.113^\circ \\ 2296.898 \angle -123.265^\circ \\ 2296.524 \angle 116.729^\circ \end{bmatrix} V$$

➤ Ζυγός 3 – Forward Sweep – 2^η Επανάληψη

Μεταξύ των ζυγών 3 και 4 υπάρχει γραμμή. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.23) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 4.

$$\bar{V}_4 = \bar{V}_3 + Z_{ABC3-4} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC3-4} \cdot \bar{V}_3 - \bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 4} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_4 = \begin{bmatrix} 2247.386 \angle -3.506^\circ \\ 2196.870 \angle -124.392^\circ \\ 2210.799 \angle 113.540^\circ \end{bmatrix} V$$

Μεταξύ των ζυγών 3 και 5 υπάρχει γραμμή. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.23) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 5.

$$\bar{V}_5 = \bar{V}_3 + Z_{ABC3-5} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC3-5} \cdot \bar{V}_3 - \bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 5} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_5 = \begin{bmatrix} 2183.502 \angle -4.026^\circ \\ 2227.554 \angle -126.065^\circ \\ 2269.438 \angle 116.034^\circ \end{bmatrix} V$$

Μεταξύ των ζυγών 3 και 6 υπάρχει γραμμή. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.23) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 6.

$$\bar{V}_6 = \bar{V}_3 + Z_{ABC3-6} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC3-6} \cdot \bar{V}_3 - \bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 6} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_6 = \begin{bmatrix} 2208.230 \angle -5.648^\circ \\ 2277.664 \angle -123.745^\circ \\ 2208.148 \angle 115.603^\circ \end{bmatrix} V$$

5.2.6 Επανάληψη 3

5.2.6.1 Backward Sweep

➤ Ζυγός 6 – Backward Sweep – 3^η Επανάληψη

Γίνεται υπολογισμός του $I_{load,6}$ με τις εξισώσεις (3.11) και (3.12) αφού είναι έχει φορτίο σταθερής σύνθετης αντίστασης και συνδεσμολογίας τριγώνου:

$$\bar{I}_{load_inj,6} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{a_injected} \\ \bar{I}_{b_injected} \\ \bar{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{S}_{a,nom} \\ \bar{S}_{b,nom} \\ \bar{S}_{c,nom} \end{bmatrix}^* ./ \begin{bmatrix} \bar{V}_{a,nom} \\ \bar{V}_{b,nom} \\ \bar{V}_{c,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \bar{V}_{a,nom} \\ \bar{V}_{b,nom} \\ \bar{V}_{c,nom} \end{bmatrix} .* \begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{load_inj,6} = \begin{bmatrix} 322.013 \angle 156.348^\circ \\ 195.291 \angle 25.490^\circ \\ 255.096 \angle -90.193^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής. Επίσης ο ζυγός αυτός είναι άκρο υποκλάδου γεγονός το οποίο συνεπάγεται μηδενικό ρεύμα εξόδου. Επομένως αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν και γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_6 \text{ εισερχόμενο inj.} = \bar{I}_{gen} + \bar{I}_{cap} + \bar{I}_{load} + \sum \bar{I}_{υποκλάδων} - \bar{I}_6 \text{ εξερχόμενο} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_6 \text{ εισερχόμενο inj.} = \begin{bmatrix} 322.013 \angle 156.348^\circ \\ 195.291 \angle 25.490^\circ \\ 255.096 \angle -90.193^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 6 και στο ζυγό 3 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 3 προς το ζυγό 6 και η τάση του ζυγού 6 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_6 + Z_{ABC\ 3-6} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-6} \cdot \bar{V}_6 - \bar{I}_6 \text{ εισερχ. inj.} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_3 = \begin{bmatrix} 2291.233 \angle -3.105^\circ \\ 2297.291 \angle -123.296^\circ \\ 2296.217 \angle 116.764^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 6} = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-6} * (\bar{V}_3 + \bar{V}_6) - \bar{I}_6 \text{ εισερχ. inj.} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 6} = \begin{bmatrix} 322.009 \angle -23.651^\circ \\ 195.288 \angle -154.508^\circ \\ 255.093 \angle 89.808^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 5 – Backward Sweep – 3^η Επανάληψη

Γίνεται υπολογισμός του $I_{load,5}$ με τις εξισώσεις (3.3) έως (3.5):

$$|\bar{I}_{load_inj.}| = \left| - \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix} \cdot / \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \right| = \begin{bmatrix} 277.465 \\ 350.236 \\ 205.933 \end{bmatrix} \text{ A}$$

$$\text{Arg}(\bar{I}_{load_inj.}) = \begin{bmatrix} \text{Arg}(\tilde{V}_a) - \text{Arg}(\tilde{S}_{a,nom}) \\ \text{Arg}(\tilde{V}_b) - \text{Arg}(\tilde{S}_{b,nom}) \\ \text{Arg}(\tilde{V}_c) - \text{Arg}(\tilde{S}_{c,nom}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 150.178^\circ \\ 35.930^\circ \\ -94.731^\circ \end{bmatrix}$$

άρα προκύπτει ότι:

$$\bar{I}_{load_inj.} = - \begin{bmatrix} |\tilde{I}_{a,injected}| \\ |\tilde{I}_{b,injected}| \\ |\tilde{I}_{c,injected}| \end{bmatrix} \cdot * \begin{bmatrix} \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{a,injected})) \\ \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{b,injected})) \\ \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{c,injected})) \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} 277.465 \angle 150.178^\circ \\ 350.236 \angle 35.930^\circ \\ 205.933 \angle -94.731^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ο ζυγός 5 έχει εγκατεστημένο τριφασικό εγκάρσιο πυκνωτή όπως περιγράφηκε και στην πρώτη επανάληψη. Είναι λοιπόν απαραίτητο να υπολογιστεί η τιμή του ρεύματος που απορροφά σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.15) και (3.16):

$$\bar{Y}_{shunt_capacitor} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_a \\ \tilde{Y}_b \\ \tilde{Y}_c \end{bmatrix} = -j \cdot \begin{bmatrix} |Q_{a,nom}| \\ |Q_{b,nom}| \\ |Q_{c,nom}| \end{bmatrix} \cdot / \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \cdot / \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{Y}_{shunt_capacitor} = \begin{bmatrix} 0.0035i \\ 0.0035i \\ 0.0035i \end{bmatrix} \Omega^{-1}$$

$$\bar{I}_{shunt_capacitor_inj.} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_a \\ \tilde{Y}_b \\ \tilde{Y}_c \end{bmatrix} \cdot * \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.570 \angle 85.974^\circ \\ 7.723 \angle -36.065^\circ \\ 7.868 \angle -153.966^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Σε αυτόν το ζυγό δεν υπάρχει εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, επομένως το αντίστοιχο ρεύμα ισούται με μηδέν. Επίσης είναι άκρο υποκλάδου γεγονός το οποίο συνεπάγει μηδενικό ρεύμα εξόδου.

Γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_{5 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \bar{I}_{gen} + \bar{I}_{cap} + \bar{I}_{load} + \sum \bar{I}_{υποκλάδων} - \bar{I}_{5 \text{ εξερχόμενο}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{5 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \begin{bmatrix} 274.255 \angle 151.602^\circ \\ 347.927 \angle 37.140^\circ \\ 202.021 \angle -92.813^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 5 και στο ζυγό 3 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 3 προς το ζυγό 5 και η τάση του ζυγού 3 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_5 + Z_{ABC\ 3-5} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-5} \cdot \bar{V}_5 - \bar{I}_5 \text{εισερχ.inj.}\right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_3 = \begin{bmatrix} 2293.639\angle -3.083^\circ \\ 2296.102\angle -123.262^\circ \\ 2296.788\angle 116.727^\circ \end{bmatrix} V$$

και

$$\bar{I}_3 \text{εξερχ προς 5} = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-5} * (\bar{V}_3 + \bar{V}_5) - \bar{I}_5 \text{εισερχ.inj.} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_3 \text{εξερχ προς 5} = \begin{bmatrix} 274.251\angle -28.397^\circ \\ 347.925\angle -142.859^\circ \\ 202.018\angle 87.189^\circ \end{bmatrix} A$$

➤ Ζυγός 4 – Backward Sweep – 3^η Επανάληψη

Το φορτίο που είναι εγκατεστημένο στο ζυγό 4 είναι σταθερής ισχύος και συνδεσμολογίας γειωμένου αστέρα. Επομένως ο υπολογισμός του I_{load_4} γίνεται με την εξίσωση (3.1):

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{a_injected} \\ \tilde{I}_{b_injected} \\ \tilde{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = \left(- \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix} ./ \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} \right)^* \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} 220.080\angle 145.729^\circ \\ 3303.344\angle 29.812^\circ \\ 380.491\angle -84.464^\circ \end{bmatrix} A$$

Δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής. Επίσης ο ζυγός αυτός είναι άκρο υποκλάδου γεγονός το οποίο συνεπάγει μηδενικό ρεύμα εξόδου. Επομένως αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν και γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_4 \text{εισερχόμενο inj.} = \bar{I}_{gen} + \bar{I}_{cap} + \bar{I}_{load} + \sum \bar{I}_{υποκλάδων} - \bar{I}_4 \text{εξερχόμενο} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_4 \text{εισερχόμενο inj.} = \begin{bmatrix} 220.080\angle 145.729^\circ \\ 3303.344\angle 29.812^\circ \\ 380.491\angle -84.464^\circ \end{bmatrix} A$$

Ανάμεσα στο ζυγό 4 και στο ζυγό 3 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 3 προς το ζυγό 4 και η τάση του ζυγού 3 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_4 + Z_{ABC\ 3-4} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-4} \cdot \bar{V}_4 - \bar{I}_4 \text{εισερχ.inj.}\right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_3 = \begin{bmatrix} 2293.902 \angle -3.106^\circ \\ 2298.028 \angle -123.252^\circ \\ 2297.735 \angle 116.790^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 4} = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 3-4} * (\bar{V}_3 + \bar{V}_4) - \bar{I}_4 \text{ εισερχ.inj.} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 4} = \begin{bmatrix} 220.075 \angle -34.270^\circ \\ 303.341 \angle -150.187^\circ \\ 380.489 \angle 95.537^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 3 – Backward Sweep – 3^η Επανάληψη

Όπως τονίστηκε και στις προηγούμενες επαναλήψεις, ο ζυγός 3 δεν έχει εγκατεστημένο φορτίο επομένως το ρεύμα φορτίου θα είναι μηδενικό. Επίσης δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής. Επομένως και αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν.

Αντίθετα από το Σχήμα 5.1 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ο ζυγός 3 είναι ο τροφοδότης δύο υποκλάδων του δικτύου. Επομένως τα ρεύματα με τα οποία τροφοδοτεί τους ζυγούς 5 και 6 είναι τα ρεύματα υποκλάδων και αθροίζοντας τις ήδη γνωστές τιμές τους υπολογίζεται η συνολική εγγεόμενη τιμή του αντίστοιχου ρεύματος:

$$\sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων 3}} = -(\bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 5} + \bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 6}) \Rightarrow$$

$$\sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων 3}} = \begin{bmatrix} 595.752 \angle 154.166^\circ \\ 540.630 \angle 32.958^\circ \\ 456.994 \angle -91.349^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Τώρα πλέον είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί η εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_3 \text{ εισερχόμενο inj.} = \bar{I}_{\text{gen}} + \bar{I}_{\text{cap}} + \bar{I}_{\text{load}} + \sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων}} - \bar{I}_3 \text{ εξερχόμενο} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_3 \text{ εισερχόμενο inj.} = \begin{bmatrix} 814.087 \angle 151.893^\circ \\ 843.678 \angle 31.828^\circ \\ 835.984 \angle -88.221^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 2 και στο ζυγό 3 υπάρχει μετασχηματιστής. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 2 προς το ζυγό 3 και η τάση του ζυγού 2 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.56) και (3.57). Το αρνητικό πρόσημο μπροστά από το ρεύμα $I_3 \text{ εισερχ. inj.}$ έχει τη σημασία της μετατροπής στην τιμή του μη εγγεόμενου ρεύματος.

$$[\text{VLN}_2] = [a_t] \cdot [\text{VLN}_3] + [b_t] \cdot [-I_3 \text{ εισερχ.inj.}] \Rightarrow$$

$$\bar{V}_2 = \begin{bmatrix} 7127.208 \angle -0.267^\circ \\ 7148.503 \angle -120.316^\circ \\ 7145.728 \angle 119.697^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$[\bar{I}_2 \text{ εξερχ. προς } 3] = [c_t] \cdot [VLN_3] + [d_t] \cdot [-I_3 \text{ εισερχ. inj.}] \Rightarrow$$

$$\bar{I}_2 \text{ εξερχ. προς } 3 = \begin{bmatrix} 271.580 \angle -28.107^\circ \\ 281.452 \angle -148.172^\circ \\ 278.885 \angle 91.779^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 2 – Backward Sweep – 3^η Επανάληψη

Ο ζυγός 2, όμοια με τον ζυγό 3, δεν έχει εγκατεστημένο φορτίο, επομένως το ρεύμα φορτίου θα είναι μηδενικό. Επίσης δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής, αλλά ούτε και διακλάδωση σε υποκλάδους. Επομένως και αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν.

Με αυτά τα δεδομένα μπορεί να γίνει εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_2 \text{ εισερχόμενο inj.} = \bar{I}_{\text{gen}} + \bar{I}_{\text{cap}} + \bar{I}_{\text{load}} + \sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων}} - \bar{I}_2 \text{ εξερχόμενο} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_2 \text{ εισερχόμενο inj.} = \begin{bmatrix} 271.580 \angle 151.893^\circ \\ 281.452 \angle 31.828^\circ \\ 278.885 \angle -88.221^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 1 και στο ζυγό 2 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 1 προς το ζυγό 2 και η τάση του ζυγού 1 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + Z_{ABC \ 1-2} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 1-2} \cdot \bar{V}_2 - \bar{I}_2 \text{ εισερχ. inj.} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_1 = \begin{bmatrix} 7193.826 \angle 0.025^\circ \\ 7202.275 \angle -119.975^\circ \\ 7203.630 \angle 120.093^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$\bar{I}_1 \text{ εξερχ. προς } 2 = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 1-2} * (\bar{V}_1 + \bar{V}_2) - \bar{I}_2 \text{ εισερχ. inj.} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_1 \text{ εξερχ. προς } 2 = \begin{bmatrix} 271.569 \angle -28.103^\circ \\ 281.443 \angle -148.168^\circ \\ 278.878 \angle 91.782^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

5.2.6.2 Υπολογισμός Σφάλματος

Γίνεται εύρεση σφάλματος μεταξύ της τάσης του ζυγού 1 όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση (3.24) και της τιμής της που ισχύει σύμφωνα με την εξίσωση (5.1)

$$\text{Σφάλμα} = |\bar{V}_1 - \bar{V}_{1 \text{ θεωρ.}}| / |\bar{V}_{1 \text{ θεωρ.}}| = \begin{bmatrix} 0.0009 \\ 0.0006 \\ 0.0017 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

Εύκολα παρατηρεί κανείς ότι το μεγαλύτερο σφάλμα είναι μεγαλύτερο από το όριο (0.001) που έχει τεθεί ως προϋπόθεση σύγκλισης, επομένως πρέπει να γίνει και άλλη επανάληψη.

5.2.6.3 Forward Sweep

➤ Ζυγός 1 – Forward Sweep – 3^η Επανάληψη

Μεταξύ των ζυγών 1 και 2 υπάρχει γραμμή. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.23) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 3.

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 + Z_{ABC1-2} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC1-2} \cdot \bar{V}_1 - \bar{I}_1 \text{ εξερχ προς 2} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_2 = \begin{bmatrix} 7132.956\angle - 0.292^\circ \\ 7145.804\angle - 120.341^\circ \\ 7141.737\angle 119.603^\circ \end{bmatrix} V$$

➤ Ζυγός 2 – Forward Sweep – 3^η Επανάληψη

Μεταξύ των ζυγών 2 και 3 υπάρχει μετασχηματιστής. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.58) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 3.

$$[VLN_3] = [A_t] \cdot [VLN_2] - [B_t] \cdot [-I_3 \text{ εισερχόμενο inj.}] \Rightarrow$$

$$\bar{V}_3 = \begin{bmatrix} 2295.869\angle - 3.130^\circ \\ 2297.182\angle - 123.279^\circ \\ 2296.604\angle 116.690^\circ \end{bmatrix} V$$

➤ Ζυγός 3 – Forward Sweep – 3^η Επανάληψη

Μεταξύ των ζυγών 3 και 4 υπάρχει γραμμή. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.23) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 4.

$$\bar{V}_4 = \bar{V}_3 + Z_{ABC3-4} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC3-4} \cdot \bar{V}_3 - \bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 4} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_4 = \begin{bmatrix} 2249.360\angle - 3.530^\circ \\ 2196.046\angle - 124.421^\circ \\ 2209.897\angle 113.436^\circ \end{bmatrix} V$$

Μεταξύ των ζυγών 3 και 5 υπάρχει γραμμή. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.23) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 5.

$$\bar{V}_5 = \bar{V}_3 + Z_{ABC3-5} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC3-5} \cdot \bar{V}_3 - \bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 5} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_5 = \begin{bmatrix} 2185.763\angle - 4.075^\circ \\ 2228.666\angle - 126.082^\circ \\ 2269.273\angle 115.997^\circ \end{bmatrix} V$$

Μεταξύ των ζυγών 3 και 6 υπάρχει γραμμή. Επομένως χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.23) μπορεί να υπολογιστεί η τάση του ζυγού 6.

$$\bar{V}_6 = \bar{V}_3 + Z_{ABC\ 3-6} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-6} \cdot \bar{V}_3 - \bar{I}_3 \text{ εξερχ προς 6} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_6 = \begin{bmatrix} 2212.905 \angle -5.667^\circ \\ 2277.550 \angle -123.729^\circ \\ 2208.595 \angle 115.527^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

5.2.7 Επανάληψη 4

5.2.7.1 Backward Sweep

➤ Ζυγός 6 – Backward Sweep – 4^η Επανάληψη

Γίνεται υπολογισμός του I_{load_6} με τις εξισώσεις (3.11) και (3.12) αφού είναι έχει φορτίο σταθερής σύνθετης αντίστασης και συνδεσμολογίας τριγώνου:

$$\bar{I}_{load_inj.6} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{a_injected} \\ \tilde{I}_{b_injected} \\ \tilde{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix}^* \cdot / \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \cdot / \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \cdot * \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{load_inj.6} = \begin{bmatrix} 322.694 \angle 156.328^\circ \\ 195.281 \angle 25.506^\circ \\ 255.147 \angle -90.269^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10):

$$\bar{I}_{6 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \bar{I}_{gen} + \bar{I}_{cap} + \bar{I}_{load} + \sum \bar{I}_{υποκλάδων} - \bar{I}_{6 \text{ εξερχόμενο}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{6 \text{ εισερχόμενο inj.}} = \begin{bmatrix} 322.694 \angle 156.328^\circ \\ 195.281 \angle 25.506^\circ \\ 255.147 \angle -90.269^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 6 και στο ζυγό 3 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 3 προς το ζυγό 6 και η τάση του ζυγού 6 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_6 + Z_{ABC\ 3-6} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-6} \cdot \bar{V}_6 - \bar{I}_{6 \text{ εισερχ. inj.}} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_3 = \begin{bmatrix} 2296.199 \angle -3.122^\circ \\ 2296.927 \angle -123.278^\circ \\ 2296.763 \angle 116.683^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$\bar{I}_{3 \text{ εξερχ προς 6}} = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-6} * (\bar{V}_3 + \bar{V}_6) - \bar{I}_{6 \text{ εισερχ. inj.}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ προς } 6 = \begin{bmatrix} 322.691 \angle -23.670^\circ \\ 195.278 \angle -154.492^\circ \\ 255.145 \angle 89.732^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 5 – Backward Sweep – 4^η Επανάληψη

Γίνεται υπολογισμός του I_{load_5} με τις εξισώσεις (3.3) έως (3.5):

$$|\bar{I}_{load_inj.}| = \left| - \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix} \cdot / \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \right| = \begin{bmatrix} 277.465 \\ 350.236 \\ 205.933 \end{bmatrix} \text{ A}$$

$$\text{Arg}(\bar{I}_{load_inj.}) = \begin{bmatrix} \text{Arg}(\tilde{V}_a) - \text{Arg}(\tilde{S}_{a,nom}) \\ \text{Arg}(\tilde{V}_b) - \text{Arg}(\tilde{S}_{b,nom}) \\ \text{Arg}(\tilde{V}_c) - \text{Arg}(\tilde{S}_{c,nom}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 150.129^\circ \\ 35.914^\circ \\ -94.769^\circ \end{bmatrix}$$

άρα προκύπτει ότι:

$$\bar{I}_{load_inj.} = - \begin{bmatrix} |\tilde{I}_{a_injected}| \\ |\tilde{I}_{b_injected}| \\ |\tilde{I}_{c_injected}| \end{bmatrix} \cdot * \begin{bmatrix} \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{a_injected})) \\ \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{b_injected})) \\ \exp(j \cdot \text{Arg}(\tilde{I}_{c_injected})) \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} 277.465 \angle 150.129^\circ \\ 350.236 \angle 35.914^\circ \\ 205.933 \angle -94.769^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ο ζυγός 5 έχει εγκατεστημένο τριφασικό εγκάρσιο πυκνωτή όπως περιγράφηκε και στην πρώτη επανάληψη. Είναι λοιπόν απαραίτητο να υπολογιστεί η τιμή του ρεύματος που απορροφά σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.15) και (3.16):

$$\bar{Y}_{shunt_capacitor} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_a \\ \tilde{Y}_b \\ \tilde{Y}_c \end{bmatrix} = -j \cdot \begin{bmatrix} |Q_{a,nom}| \\ |Q_{b,nom}| \\ |Q_{c,nom}| \end{bmatrix} \cdot / \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \cdot / \begin{bmatrix} \tilde{V}_{a,nom} \\ \tilde{V}_{b,nom} \\ \tilde{V}_{c,nom} \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\bar{Y}_{shunt_capacitor} = \begin{bmatrix} 0.0035i \\ 0.0035i \\ 0.0035i \end{bmatrix} \Omega^{-1}$$

$$\bar{I}_{shunt_capacitor_inj.} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_a \\ \tilde{Y}_b \\ \tilde{Y}_c \end{bmatrix} \cdot * \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.578 \angle 85.925^\circ \\ 7.727 \angle -36.082^\circ \\ 7.868 \angle -154.003^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Σε αυτόν το ζυγό δεν υπάρχει εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, επομένως το αντίστοιχο ρεύμα ισούται με μηδέν. Επίσης είναι άκρο υποκλάδου γεγονός το οποίο συνεπάγει μηδενικό ρεύμα εξόδου.

Γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_5 \text{ εισερχόμενο inj.} = \bar{I}_{gen} + \bar{I}_{cap} + \bar{I}_{load} + \sum \bar{I}_{υποκλάδων} - \bar{I}_5 \text{ εξερχόμενο} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_5 \text{ εισερχόμενο inj.} = \begin{bmatrix} 274.252 \angle 151.555^\circ \\ 347.926 \angle 37.124^\circ \\ 202.022 \angle -92.851^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 5 και στο ζυγό 3 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 3 προς το ζυγό 5 και η τάση του ζυγού 3 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_5 + Z_{ABC\ 3-5} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-5} \cdot \bar{V}_5 - \bar{I}_5 \text{ εισερχ. inj.} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_3 = \begin{bmatrix} 2295.938 \angle -3.132^\circ \\ 2297.204 \angle -123.279^\circ \\ 2296.609 \angle 116.689^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ. προς 5} = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-5} * (\bar{V}_3 + \bar{V}_5) - \bar{I}_5 \text{ εισερχ. inj.} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_3 \text{ εξερχ. προς 5} = \begin{bmatrix} 274.248 \angle -28.444^\circ \\ 347.924 \angle -142.874^\circ \\ 202.019 \angle 87.151^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 4 – Backward Sweep – 4^η Επανάληψη

Το φορτίο που είναι εγκατεστημένο στο ζυγό 4 είναι σταθερής ισχύος και συνδεσμολογίας γειωμένου αστέρα. Επομένως ο υπολογισμός του I_{load_4} γίνεται με την εξίσωση (3.1):

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{a_injected} \\ \tilde{I}_{b_injected} \\ \tilde{I}_{c_injected} \end{bmatrix} = \left(- \begin{bmatrix} \tilde{S}_{a,nom} \\ \tilde{S}_{b,nom} \\ \tilde{S}_{c,nom} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} \right)^* \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{load_inj.} = \begin{bmatrix} 219.887 \angle 145.705^\circ \\ 303.458 \angle 29.783^\circ \\ 380.647 \angle -84.569^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής. Επίσης ο ζυγός αυτός είναι άκρο υποκλάδου γεγονός το οποίο συνεπάγει μηδενικό ρεύμα εξόδου. Επομένως αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν και γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_4 \text{ εισερχόμενο inj.} = \bar{I}_{gen} + \bar{I}_{cap} + \bar{I}_{load} + \sum \bar{I}_{υποκλάδων} - \bar{I}_4 \text{ εξερχόμενο} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_4 \text{ εισερχόμενο inj.} = \begin{bmatrix} 219.887 \angle 145.705^\circ \\ 303.458 \angle 29.783^\circ \\ 380.647 \angle -84.569^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 4 και στο ζυγό 3 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 3 προς το ζυγό 4 και η τάση του ζυγού 3 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_4 + Z_{ABC\ 3-4} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-4} \cdot \bar{V}_4 - \bar{I}_{4\ εισερχ.inj.}\right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_3 = \begin{bmatrix} 2295.785\angle - 3.130^\circ \\ 2297.203\angle - 123.282^\circ \\ 2296.900\angle 116.687^\circ \end{bmatrix} \text{ V}$$

και

$$\bar{I}_{3\ εξερχ\ προς\ 4} = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC\ 3-4} * (\bar{V}_3 + \bar{V}_4) - \bar{I}_{4\ εισερχ.inj.} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{3\ εξερχ\ προς\ 4} = \begin{bmatrix} 219.882\angle - 34.294^\circ \\ 303.455\angle - 150.216^\circ \\ 380.645\angle 95.432^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

➤ Ζυγός 3 – Backward Sweep – 4^η Επανάληψη

Όπως τονίστηκε και στις προηγούμενες επαναλήψεις, ο ζυγός 3 δεν έχει εγκατεστημένο φορτίο επομένως το ρεύμα φορτίου θα είναι μηδενικό. Επίσης δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής. Επομένως και αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν.

Αντίθετα από το Σχήμα 5.1 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ο ζυγός 3 είναι ο τροφοδότης δύο υποκλάδων του δικτύου. Επομένως τα ρεύματα με τα οποία τροφοδοτεί τους ζυγούς 5 και 6 είναι τα ρεύματα υποκλάδων και αθροίζοντας τις ήδη γνωστές τιμές τους υπολογίζεται η συνολική εγχεόμενη τιμή του αντίστοιχου ρεύματος:

$$\sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων } 3} = -(\bar{I}_{3\ εξερχ\ προς\ 5} + \bar{I}_{3\ εξερχ\ προς\ 6}) \Rightarrow$$

$$\sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων } 3} = \begin{bmatrix} 596.424\angle 154.137^\circ \\ 540.633\angle 32.954^\circ \\ 457.049\angle - 91.408^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Τώρα πλέον είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί η εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_{3\ εισερχόμενο\ inj.} = \bar{I}_{gen} + \bar{I}_{cap} + \bar{I}_{load} + \sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων}} - \bar{I}_{3\ εξερχόμενο} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{3\ εισερχόμενο\ inj.} = \begin{bmatrix} 814.568\angle 151.869^\circ \\ 843.791\angle 31.815^\circ \\ 836.214\angle - 88.300^\circ \end{bmatrix} \text{ A}$$

Ανάμεσα στο ζυγό 2 και στο ζυγό 3 υπάρχει μετασχηματιστής. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 2 προς το ζυγό 3 και η τάση του ζυγού 2 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.56) και (3.57). Το αρνητικό πρόσημο

μπροστά από το ρεύμα I_3 εισερχ. inj. έχει τη σημασία της μετατροπής στην τιμή του μη εγγεόμενου ρεύματος.

$$[VLN_2] = [a_t] \cdot [VLN_3] + [b_t] \cdot [-I_3 \text{ εισερχ. inj.}] \Rightarrow$$

$$\bar{V}_2 = \begin{bmatrix} 7133.005 \angle -0.291^\circ \\ 7145.972 \angle -120.343^\circ \\ 7143.161 \angle 119.597^\circ \end{bmatrix} V$$

και

$$[I_2 \text{ εξερχ. προς 3}] = [c_t] \cdot [VLN_3] + [d_t] \cdot [-I_3 \text{ εισερχ. inj.}] \Rightarrow$$

$$\bar{I}_2 \text{ εξερχ. προς 3} = \begin{bmatrix} 271.741 \angle -28.131^\circ \\ 281.489 \angle -148.185^\circ \\ : 278.961 \angle 91.700^\circ \end{bmatrix} A$$

➤ Ζυγός 2 – Backward Sweep – 4^η Επανάληψη

Ο ζυγός 2, όμοια με τον ζυγό 3, δεν έχει εγκατεστημένο φορτίο, επομένως το ρεύμα φορτίου θα είναι μηδενικό. Επίσης δεν υπάρχει στο ζυγό αυτό εγκατεστημένη συμπαραγωγός γεννήτρια, ούτε εγκάρσιος πυκνωτής, αλλά ούτε και διακλάδωση σε υποκλάδους. Επομένως και αυτά τα ρεύματα τίθενται ίσα με μηδέν.

Με αυτά τα δεδομένα μπορεί να γίνει εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση (4.10).

$$\bar{I}_2 \text{ εισερχόμενο inj.} = \bar{I}_{\text{gen}} + \bar{I}_{\text{cap}} + \bar{I}_{\text{load}} + \sum \bar{I}_{\text{υποκλάδων}} - \bar{I}_2 \text{ εξερχόμενο} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_2 \text{ εισερχόμενο inj.} = \begin{bmatrix} 271.741 \angle 151.869^\circ \\ 281.489 \angle 31.815^\circ \\ 278.961 \angle -88.300^\circ \end{bmatrix} A$$

Ανάμεσα στο ζυγό 1 και στο ζυγό 2 υπάρχει γραμμή. Επομένως για να προσδιοριστεί το εξερχόμενο ρεύμα από το ζυγό 1 προς το ζυγό 2 και η τάση του ζυγού 1 χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.23) και (3.24).

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + Z_{ABC \ 1-2} * \left(\frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 1-2} \cdot \bar{V}_2 - \bar{I}_2 \text{ εισερχ. inj.} \right) \Rightarrow$$

$$\bar{V}_1 = \begin{bmatrix} 7199.694 \angle 0.001^\circ \\ 7199.666 \angle -120.003^\circ \\ 7201.092 \angle 119.993^\circ \end{bmatrix} V$$

και

$$\bar{I}_1 \text{ εξερχ. προς 2} = \frac{1}{2} \cdot Y_{ABC \ 1-2} * (\bar{V}_1 + \bar{V}_2) - \bar{I}_2 \text{ εισερχ. inj.} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_1 \text{ εξερχ. προς 2} = \begin{bmatrix} 271.729 \angle -28.128^\circ \\ 281.481 \angle -148.181^\circ \\ 278.954 \angle 91.703^\circ \end{bmatrix} A$$

5.2.7.2 Υπολογισμός Σφάλματος

Γίνεται εύρεση σφάλματος μεταξύ της τάσης του ζυγού 1 όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση (3.24) και της τιμής της που ισχύει σύμφωνα με την εξίσωση (5.1)

$$\text{Σφάλμα} = |\bar{V}_1 - \bar{V}_{1 \text{ θεωρ.}}| / |\bar{V}_{1 \text{ θεωρ.}}| = \begin{bmatrix} 0.0000283 \\ 0.0000463 \\ 0.0002442 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

Εύκολα παρατηρεί κανείς ότι το μεγαλύτερο σφάλμα είναι μικρότερο από το όριο (0.001) που έχει τεθεί ως προϋπόθεση σύγκλισης, επομένως η μέθοδος τερμάτισε μετά από τέσσερις επαναλήψεις.

5.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] W. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, New Mexico: CRC Press, 2002, pp. 274-285, pp. 303-309.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΚΤΙΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία μετατροπής ενός αλγορίθμου σε ένα ολοκληρωμένο λογισμικό είναι μια επίπονη διαδικασία, αλλά ταυτόχρονα είναι και η ουσιαστική υλοποίηση της λειτουργίας του. Πολλές φορές απλές έννοιες οι οποίες περιγράφονται μέσα σε μια πρόταση στον αλγόριθμο, μπορεί να κρύβουν αρκετές γραμμές κώδικα στο υλοποιούμενο λογισμικό. Η επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών, η δημιουργία των απαραίτητων συναρτήσεων και η χρησιμοποίηση των σωστών δομών δεδομένων είναι νευραλγικά σημεία στην υλοποίηση ενός λογισμικού. Η επιλογή λανθασμένων δομών εκτός από μειωμένη αποδοτικότητα, ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα και μειωμένη ακρίβεια στα τελικά αποτελέσματα.

Επομένως κρίνεται απαραίτητο να παρουσιαστούν αρκετά στοιχεία της δομής του λογισμικού και του σκεπτικού υλοποίησής του. Έτσι δίνεται η δυνατότητα σε κάποιον που επιθυμεί να αναπτύξει ένα παρεμφερές πρόγραμμα, να εντοπίσει τα βασικά στοιχεία τα οποία διέπουν την λειτουργία του και να επεκτείνει ή να βελτιστοποιήσει τα ήδη υπάρχοντα. Άλλωστε οι αρχές ενός λογισμικού ροής ισχύος, ως προς τις βασικές του λειτουργίες, είναι σχεδόν ίδιες, είτε πρόκειται για ακτινικά δίκτυα διανομής, είτε για τα δίκτυα μεταφοράς.

Κεντρικό χαρακτηριστικό του λογισμικού είναι ο σχεδιασμός του ώστε να είναι σε θέση να καλύπτει οσοδήποτε μεγάλα ακτινικά δίκτυα. Προς αυτή την κατεύθυνση βοηθά αρκετά η γενικότητα των εξισώσεων που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3 και η γενίκευση του αλγορίθμου όπως αυτός ορίστηκε στο Κεφάλαιο 4.

Φυσικά δεν είναι δυνατόν μέσα στα πλαίσια ενός κεφαλαίου να εξηγηθεί βήμα προς βήμα ολόκληρος ο κώδικας ενός λογισμικού. Με τη γενική περιγραφή όμως του τρόπου λειτουργίας καθίσταται δυνατή η κατανόηση της υλοποίησής του και ως εκ τούτου η αποδοτικότερη εκμετάλλευση των δεδομένων που προκύπτουν από αυτή.

Ζητούμενα από ένα τέτοιο λογισμικό είναι:

1. Η απλότητά του ως προς τον χειρισμό του από το χρήστη.
2. Η ταχεία εκτέλεση του.
3. Η προσθήκη δυνατότητας παραμετροποίησης.
4. Η αποφυγή λανθασμένων χειρισμών και ο έλεγχος εγκυρότητας δεδομένων του χρήστη.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί το λογισμικό που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

6.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

6.2.1 Περιβάλλον ανάπτυξης και απαιτήσεις συστήματος

Ένα γνωστό χαρακτηριστικό των αλγορίθμων είναι ότι μπορούν να υλοποιηθούν σε πολλά υπολογιστικά συστήματα και σε πολλές και διαφορετικής «φιλοσοφίας» γλώσσες προγραμματισμού. Για να υλοποιηθεί το συγκεκριμένο λογισμικό έγινε επιλογή του λογισμικού πακέτου MATLAB 2011a. Το MATLAB (MATrix LABoratory) είναι ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και διαθέτει για προγραμματισμό μια γλώσσα τέταρτης γενιάς. Η ύπαρξη πολλών ενσωματωμένων (built in) συναρτήσεων και ο απευθείας χειρισμός πράξεων μεταξύ πινάκων το καθιστά ιδιαίτερα εύχρηστο σε περιπτώσεις αλγορίθμων που χρησιμοποιούν επαναληπτικές μεθόδους [6.1].

Οι τυπικές απαιτήσεις συστήματος για τη χρήση του λογισμικού MATLAB είναι: 3-4 GB χώρος στο δίσκο και τουλάχιστον 1 GB RAM. Επίσης, το λειτουργικό σύστημα δεν θα πρέπει να είναι παλαιότερο του Windows XP Service Pack 3, ενώ ο επεξεργαστής (Intel ή AMD x86) θα πρέπει να υποστηρίζει το σύνολο εντολών SSE2.

Να σημειωθεί ότι τα προγράμματα τα οποία εκτελούνται στο περιβάλλον του MATLAB παρουσιάζουν μεγαλύτερους χρόνους εκτέλεσης από τα αντίστοιχα τα οποία γράφονται σε γλώσσες προγραμματισμού όπως η C. Σε κάθε περίπτωση, η ύπαρξη των ενσωματωμένων συναρτήσεων το καθιστά ως μια από τις γλώσσες προγραμματισμού με την μεγαλύτερη χρησιμότητα για τέτοιου είδους εφαρμογές [6.2].

6.2.2 Λειτουργίες λογισμικού

6.2.2.1 Γραφικό περιβάλλον

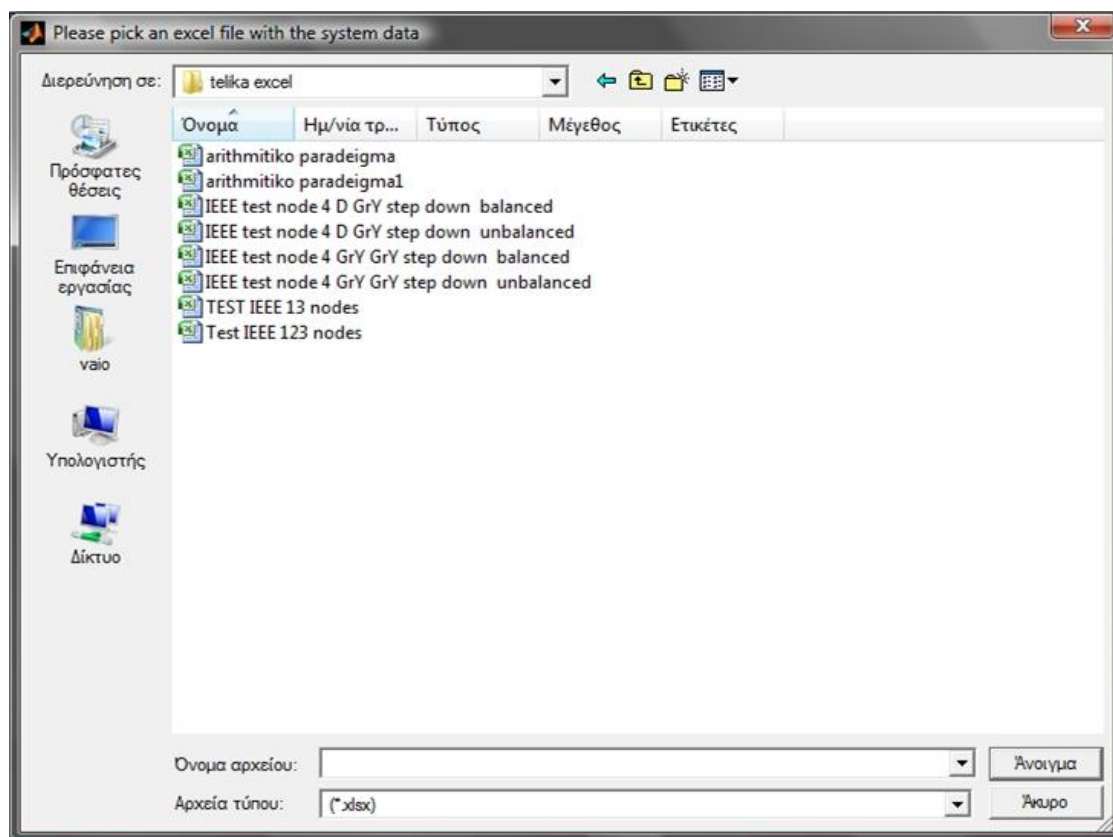
Το γραφικό περιβάλλον (GUI) ενός προγράμματος είναι αναμφίβολα ένα από τα σημαντικότερα μέρη του. Επίσης, η απλότητα στη χρήση είναι αρκετά σημαντικός στόχος που πρέπει να καλύπτει ένα λογισμικό. Ο ρόλος του γραφικού περιβάλλοντος είναι να εξυπηρετεί την επικοινωνία μεταξύ του χρήστη και του λογισμικού με τον απλούστερο και αποδοτικότερο τρόπο.

Για τη δημιουργία του γραφικού περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα GUIDE του MATLAB [6.2]. Η συνάρτηση αυτή τρέχει μέσα από ένα γραφικό περιβάλλον με το οποίο ο χρήστης είναι δυνατόν να σχεδιάζει το GUI του λογισμικού του. Υπάρχουν όμως σημεία στα οποία ο σχεδιαστής του λογισμικού καλείται να γράψει κώδικα ώστε να διασυνδέει τις συναρτήσεις που έχει υλοποιήσει με τα στοιχεία του γραφικού περιβάλλοντος.

Στο Σχήμα 6.2 φαίνεται η μορφή που έχει το GUI πριν εκτελεστεί η ανάλυση ροής φορτίου κάποιου δικτύου. Είναι φανερό πως ακόμη δεν έχει γίνει η φόρτωση κάποιου δικτύου και δεν υπάρχουν αποτελέσματα. Επίσης στο πάνω δεξιά μέρος του σχήματος διακρίνεται το panel “Tab Selector”. Ουσιαστικά αποτελείται από δύο κουμπιά (buttons) τα οποία ενεργοποιούν δύο διαφορετικά panel του GUI. Η διαδικασία δημιουργίας πολλαπλών καρτελών σε ένα GUI δεν υποστηρίζεται επίσημα από το MATLAB και για αυτό δεν υπάρχει ως επιλογή στο GUIDE [6.2]. Παρόλα αυτά μέσω προγραμματισμού και με τη δημιουργία συνθηκών, που αποκρύπτουν ή εμφανίζουν αντίστοιχα το κάθε περιεχόμενο, κατέστη δυνατή η υλοποίησή τους. Στο Σχήμα 6.2 φαίνεται η μορφή του παραθύρου καθώς έχει επιλεγεί το κουμπί “Basic Analysis” ενώ στο Σχήμα 6.3 αντιστοιχεί σε αυτή που προκύπτει με πάτημα του κουμπιού “Parameter”.

Στην καρτέλα των παραμέτρων (Σχήμα 6.3), ο χρήστης μπορεί να επιλέξει η ανάλυση να γίνει χωρίς να ληφθεί υπόψη η εγκάρσια αγωγιμότητα των γραμμών ή η ύπαρξη των ρυθμιστών του δικτύου. Όλες αυτές οι επιλογές μπορούν να ενεργοποιηθούν επιλέγοντας τα κατάλληλα check boxes. Επίσης μελλοντικά στη συγκεκριμένη καρτέλα μπορεί κανείς εύκολα να εισάγει, προγραμματίζοντας κατάλληλα το GUI, παραμέτρους όπως εκτέλεση της μεθόδου με διαφορετικό αλγόριθμο. Για αυτό το λόγο άλλωστε έχει δοθεί ολόκληρο panel για το καθορισμό των παραμέτρων.

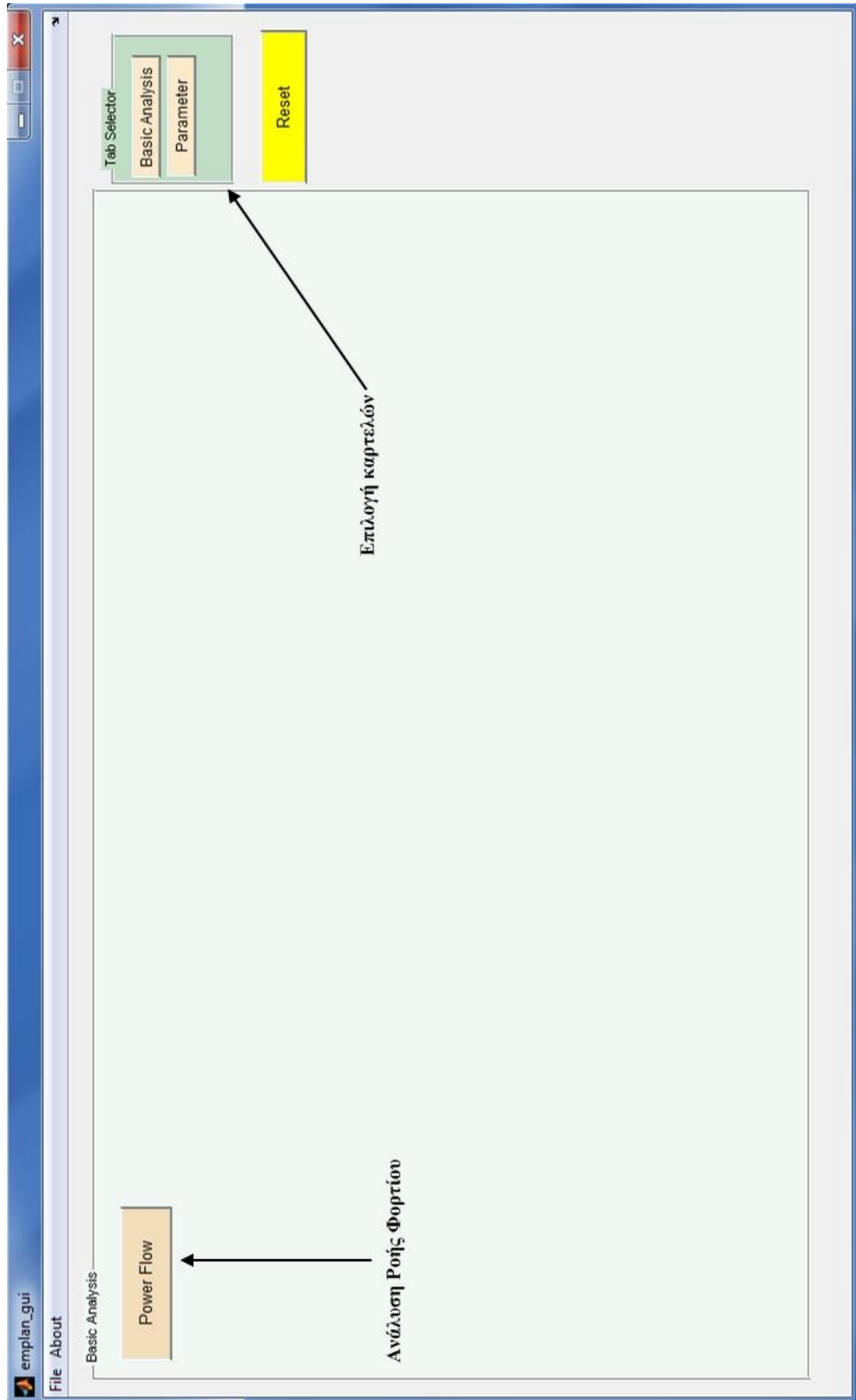
Αρχικά, από την καρτέλα της βασικής ανάλυσης είναι διαθέσιμη μόνο η εκτέλεση της ροής ισχύος με το αντίστοιχο κουμπί “POWER FLOW”. Πατώντας το συγκεκριμένο κουμπί ένα αναδυόμενο παράθυρο καλεί το χρήστη να επιλέξει το αρχείο excel στο οποίο είναι αποθηκευμένα τα δεδομένα του προς ανάλυση συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Η δομή του συγκεκριμένου αρχείου πρόκειται να περιγραφεί στην Ενότητα 6.2.2.2.



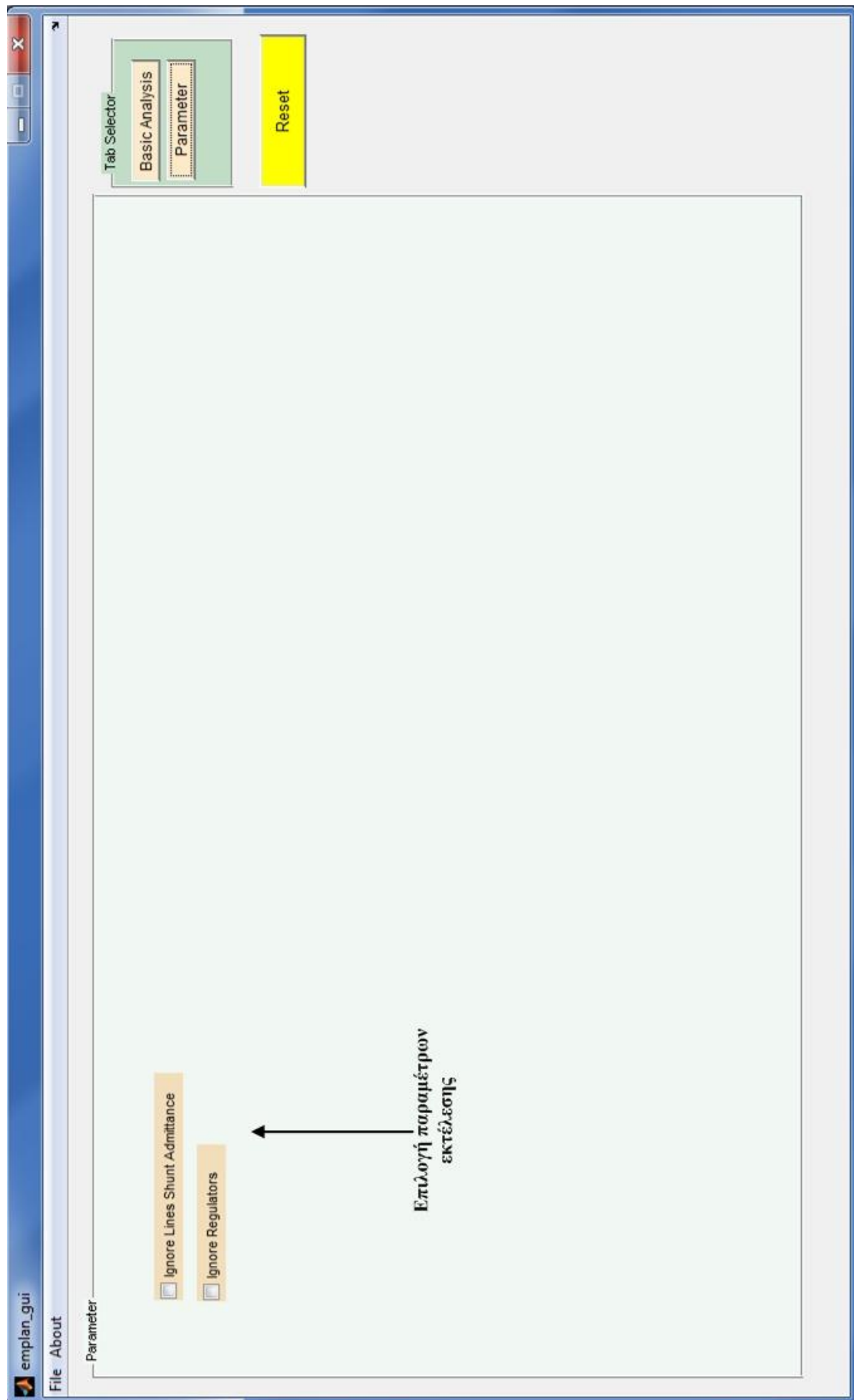
Σχήμα 6.1: Επιλογή αρχείου excel με δεδομένα εισόδου.

Αμέσως μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου ενεργοποιούνται 15 κουμπιά τα οποία τυπώνουν στο GUI συγκεκριμένα αποτελέσματα. Η λειτουργία των κουμπιών αυτών θα περιγραφεί στην Ενότητα 6.2.2.4. Στο Σχήμα 6.4 φαίνεται η παρουσία των κουμπιών μετά από μια ανάλυση ροής φορτίου και στο Σχήμα 6.5 απεικονίζεται ο τρόπος παρουσίασης αποτελεσμάτων στο GUI μετά από το πάτημα του κουμπιού “Bus Voltages p.u.”. Επίσης η παρουσία του κουμπιού “Reset” έχει το ρόλο της επαναφοράς του GUI στην αρχική του κατάσταση ώστε να γίνει νέα ανάλυση ροής φορτίου.

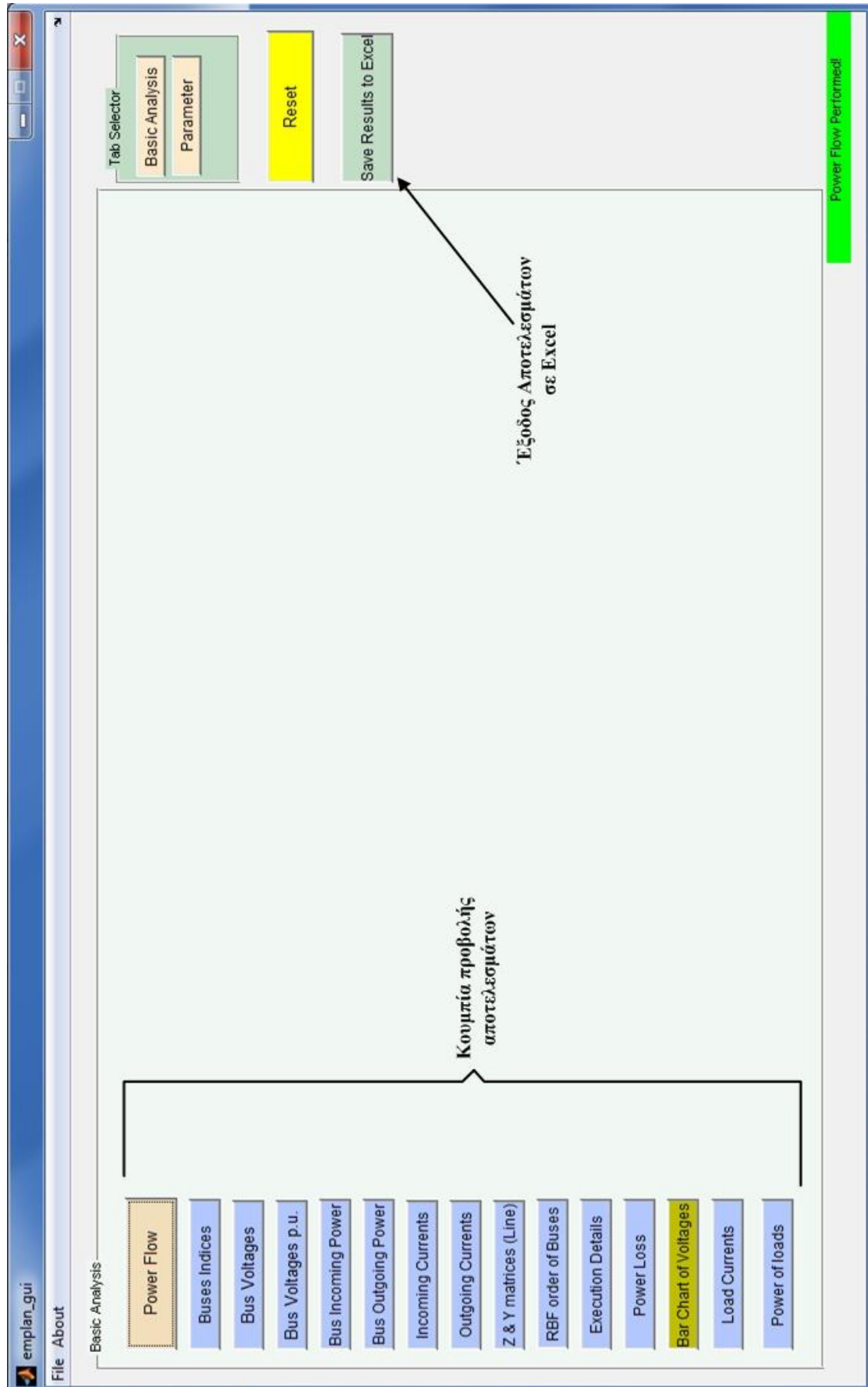
Εκτός όμως από τα παραπάνω έχουν προστεθεί και menu items στο γραφικό περιβάλλον. Αυτά περιλαμβάνουν στο αντικείμενο του File την εντολή “Exit”, με την οποία μπορεί να γίνει έξοδος από το λογισμικό και την εντολή About με την οποία εμφανίζει στην οθόνη ένα about box με βασικές πληροφορίες για το λογισμικό (Σχήμα 6.6).



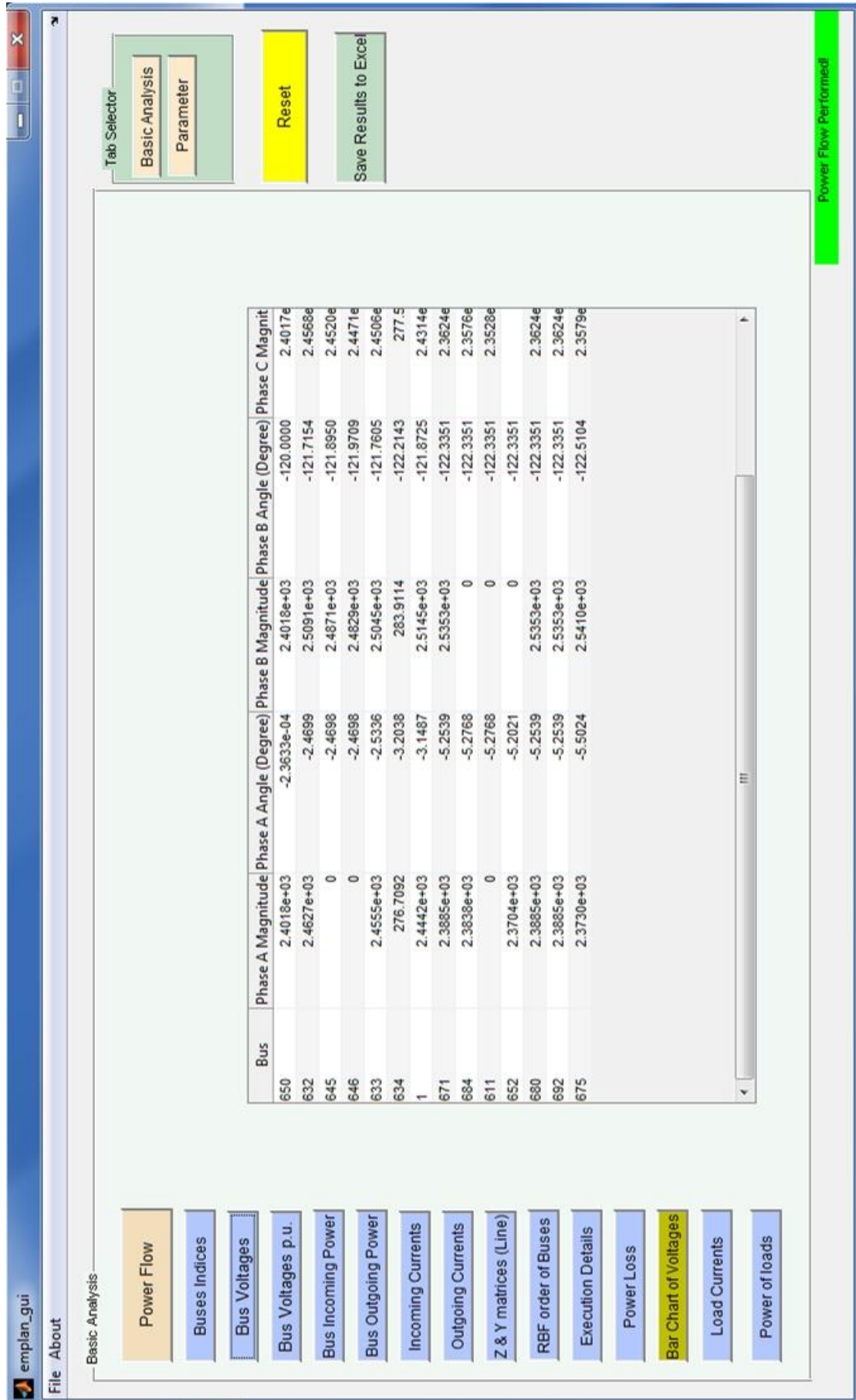
Σχήμα 6.2: Καρτέλα “Basic Analysis” πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου.



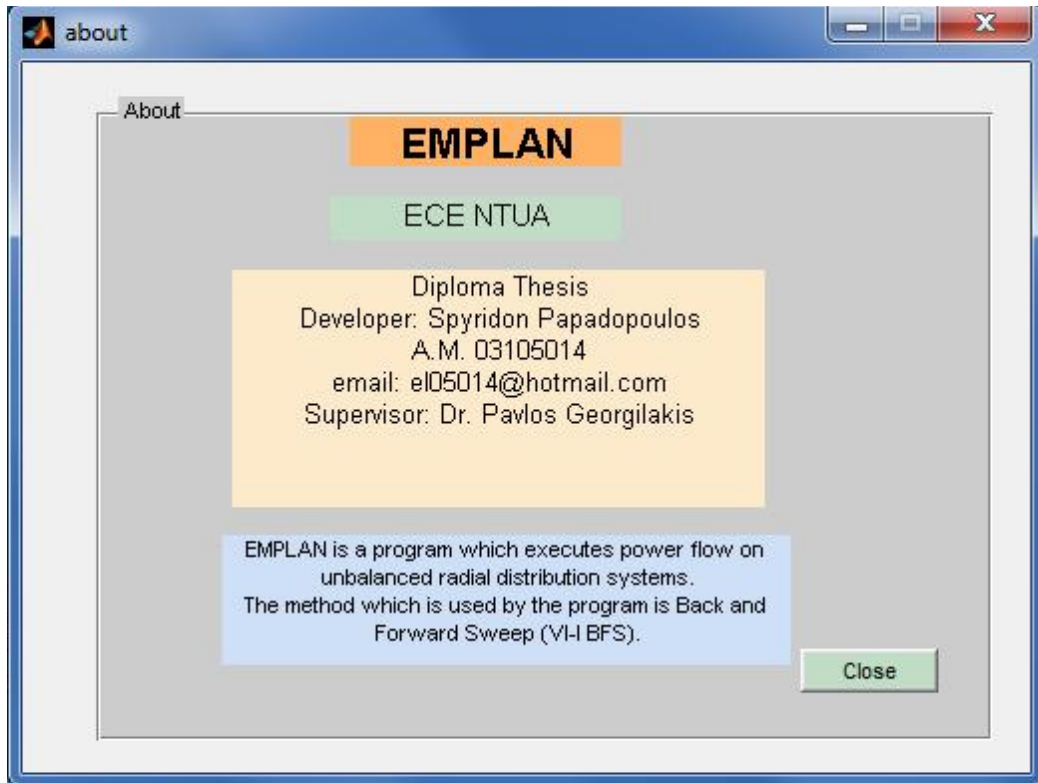
Σχήμα 6.3: Κορτέλα "Parameter".



Σχήμα 6.4: Μορφή GUI μετά την εκτέλεση μιας ανάλυσης ροής ισχύος.



Σχήμα 6.5: Απεικόνιση τάσεων ζυγών σε ανά μονάδα τιμές εντός του GUI.



Σχήμα 6.6: About Box του λογισμικού.

Το γραφικό περιβάλλον έχει δημιουργηθεί σε διαστάσεις που να υποστηρίζονται σε οθόνες από 19” και άνω, ούτως ώστε να έχει ικανοποιητικό χώρο εκτύπωσης των αποτελεσμάτων και να χωρούν τα συνολικά 19 διαφορετικά κουμπιά του .

6.2.2.2 Εισαγωγή Δεδομένων

Η εισαγωγή των δεδομένων σε ένα λογισμικό ανάλυσης ροής ισχύος είναι μια σημαντική διαδικασία η οποία λαμβάνει μεγάλο κομμάτι του χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου. Λόγω της φύσεως του προβλήματος ο χρήστης πρέπει να εισάγει πολλές πληροφορίες για τα στοιχεία του δικτύου. Κάτι τέτοιο υποδεικνύει άλλωστε και ο αρκετά μεγάλος αριθμός παραμέτρων των εξισώσεων των στοιχείων του δικτύου, όπως αυτές ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Στην Ενότητα 6.2.2.6 θα αποδειχθεί πως το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου εκτέλεσης του λογισμικού ανήκει στο διάβασμα των δεδομένων του δικτύου.

Ένας τρόπος εισαγωγής των δεδομένων θα μπορούσε να είναι η χειροκίνητη εισαγωγή των παραμέτρων μέσα στον κύριο κώδικα του λογισμικού. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα ελάχιστο χρόνο για διάβασμα δεδομένων και ως εκ τούτου σημαντικά λιγότερο χρόνο εκτέλεσης. Όμως αυτός ο τρόπος δεν είναι καθόλου αποδοτικός για το χρήστη. Πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι ο χρήστης δεν είναι απαραίτητα γνώστης προγραμματισμού και φυσικά θα πρέπει να έχει κατανοήσει πλήρως τον κώδικα πριν προχωρήσει στη καταχώρηση δεδομένων με αυτό τον τρόπο.

Επομένως εύλογα δημιουργείται η απαίτηση ύπαρξης ενός τρόπου εισαγωγής δεδομένων, ο οποίος θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από κάποιο μη πεπειραμένο χρήστη. Η λύση είναι η δημιουργία ενός αρχείου excel (λογιστικό φύλλο) με κατάλληλη κατηγοριοποίηση ούτως ώστε να μπορούν να εισαχθούν τα δεδομένα ενός οσοδήποτε

μεγάλου δικτύου και να διαβαστούν εκ των υστέρων από το πρόγραμμα κατά το στάδιο της ανάλυσης.

Δεδομένου ότι τα δεδομένα τα οποία πρέπει να εισαχθούν είναι αρκετά, έχει επιλεχθεί να γίνει κατηγοριοποίηση του αρχείου excel (book) σε επιμέρους φύλλα (sheets). Αναλυτικά κάθε αρχείο δεδομένων excel περιέχει 8 φύλλα τα οποία είναι τα ακόλουθα:

1. Το φύλλο με την ονομασία “topology” το οποίο περιέχει αναλυτικά στοιχεία για την τοπολογία του δικτύου. Σε αυτό το φύλλο εισάγονται αναλυτικά η σειρά εμφάνισης των ζυγών στο δίκτυο, από την οποία θα προκύψουν οι δείκτες σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην Ενότητα 2.3. Συγκεκριμένα για κάθε ζυγό του δικτύου, διασχίζοντάς από τον τροφοδότη μέχρι τον τελευταίο ζυγό, όπως περιγράφηκε στην προαναφερθείσα ενότητα, εισάγεται:

- ✓ Το όνομα του ζυγού από τον οποίο προήλθε, ενώ η τιμή μηδέν εισάγεται εάν είναι ο πρώτος ζυγός.
- ✓ Το όνομα του ζυγού ο οποίος ακολουθεί στον ίδιο υποκλάδο, ενώ η τιμή μηδέν εισάγεται εάν είναι ο τελευταίος.
- ✓ Ο αριθμός των υποκλάδων που ξεκινούν από το συγκεκριμένο ζυγό.
- ✓ Τα ονόματα των πρώτων ζυγών των υποκλάδων που ξεκινούν από τον εξεταζόμενο ζυγό.

Ακόμα εισάγεται :

- ✓ το όριο του σφάλματος κάτω από το οποίο θα θεωρείται ότι υπάρχει σύγκλιση της μεθόδου.
- ✓ Η συχνότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας η οποία και χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της μήτρας αντιστάσεων σειράς και των εγκάρσιων αγωγιμοτήτων των γραμμών του δικτύου.
- ✓ Ο αριθμός των ζυγών του δικτύου.
- ✓ Η τάση τροφοδοσίας του συστήματος κατά μέτρο και γωνία σε φασική τιμή.

2. Το φύλλο με την ονομασία “bus_details” στο οποίο εισάγονται τα δεδομένα τα οποία έχουν να κάνουν με τα στοιχεία των ζυγών. Ο χρήστης εισάγει:

- ✓ Την πληροφορία για το εάν ο ζυγός βρίσκεται σε γειωμένο τμήμα του δικτύου ή όχι (στήλη Β). Η τιμή ένα στην αντίστοιχη στήλη σημαίνει ότι βρίσκεται σε γειωμένο τμήμα και η τιμή μηδέν σε αγείωτο. Η χρησιμότητα αυτού του στοιχείου για τον αλγόριθμο έχει να κάνει με το εάν η τάση εκφράζεται σε φασική ή πολική τιμή και με το ότι οι εγκάρσιοι πυκνωτές αντιστάθμισης ισχύος σε αγείωτα συστήματα είναι συνδεσμολογίας τριγώνου σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [6.3]. Επομένως η πληροφορία αυτή καθορίζει και τη συνδεσμολογία των εγκάρσιων πυκνωτών αντιστάθμισης του ζυγού.
- ✓ Τη δήλωση ύπαρξης ή απουσίας πυκνωτή στη στήλη C. Με μηδέν δηλώνεται η απουσία, ενώ με ένα η ύπαρξή του. Επίσης, στις στήλες D-F ο χρήστης ορίζει την ονομαστική τιμή σε VAr της αέργου ισχύος των εγκατεστημένων πυκνωτών.
- ✓ Τη δήλωση ύπαρξης ή απουσίας γεννητριών PQ στη στήλη G. Με μηδέν δηλώνεται η απουσία, ενώ με ένα η ύπαρξή. Στις στήλες H-J εισάγει την ενεργό τιμή της παραγόμενης ισχύος των τριών φάσεων και στις στήλες K-M την αντίστοιχη άεργο τιμή.

- ✓ Την κατάλληλη τιμή από αντίστοιχη λίστα (drop down list) στις στήλες N και O για το εάν υπάρχει φορτίο και ποιας συνδεσμολογίας με δυνατές επιλογές:

- μη εγκατεστημένο φορτίο (no load).
- φορτίο γειωμένου αστέρα (wye grounded).
- φορτίο αγείωτου τριγώνου (delta ungrounded) .

και το τι τύπου φορτίο έχει συνδεθεί με δυνατές επιλογές:

- σταθερής ισχύος (S constant).
- σταθερού ρεύματος (I constant).
- σταθερής σύνθετης αντίστασης (Z constant).

αντίστοιχα. Εφόσον υπάρχει εγκατεστημένο φορτίο, στις στήλες P-R εισάγεται από το χρήστη η ονομαστική ενεργός ισχύς των τριών φάσεων του φορτίου και στις στήλες S-U η αντίστοιχη άεργος ισχύς. Να σημειωθεί ότι εφόσον το φορτίο είναι τύπου αστέρα οι φάσεις είναι κατά σειρά A-B-C ενώ εφόσον είναι τριγώνου είναι αντίστοιχα AB-BC-CA.

- ✓ Τις τιμές της ονομαστικής τάσης κατά μέτρο στις στήλες V-X. Οι τάσεις είναι A-B-C για γειωμένα τμήματα και AB-BC-CA για αγείωτα.

3. Το φύλλο με την ονομασία “kladoi” στο οποίο εισάγονται τα δεδομένα τα οποία έχουν να κάνουν με τους κλάδους. Ο χρήστης εισάγει την κατάλληλη τιμή στις στήλες C-F ώστε να καθορίσει τι τύπου κλάδος υπάρχει ανάμεσα σε δύο ζυγούς. Οι στήλες αυτές αντιστοιχούν σε μετασηματιστή, γραμμή, ρυθμιστή και διακόπτη. Βάζοντας την τιμή 1 σε κάποια στήλη ο χρήστης δηλώνει την παρουσία του αντίστοιχου κλάδου και βάζοντας την τιμή μηδέν αποκλείει να είναι το συγκεκριμένο στοιχείο. Τα μόνα στοιχεία τα οποία έχουν προβλεφθεί, στα πλαίσια του λογισμικού, να είναι δυνατό να συνυπάρχουν στον ίδιο κλάδο είναι ρυθμιστής και γραμμή. Ανάλογα τώρα με την περίπτωση του κλάδου ισχύουν τα ακόλουθα:

- ✓ Στην περίπτωση του μετασηματιστή, ο χρήστης εισάγει στις στήλες G, H τον τύπο του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος αντιστοιχώς που αντιστοιχεί:

- Στην τιμή μηδέν για γειωμένου αστέρα.
- Στην τιμή ένα για αγείωτου τριγώνου.

Επίσης στις στήλες I, J καλείται να εισάγει τις τιμές της τάσης του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος αντίστοιχα. Παράλληλα ο χρήστης εισάγει στις στήλες K-M, N-P, Q-S τις ανά μονάδα τιμές σύνθετης αντίστασης σειράς καθώς και της ισχύος του μετασηματιστή σε kVA για την κάθε φάση.

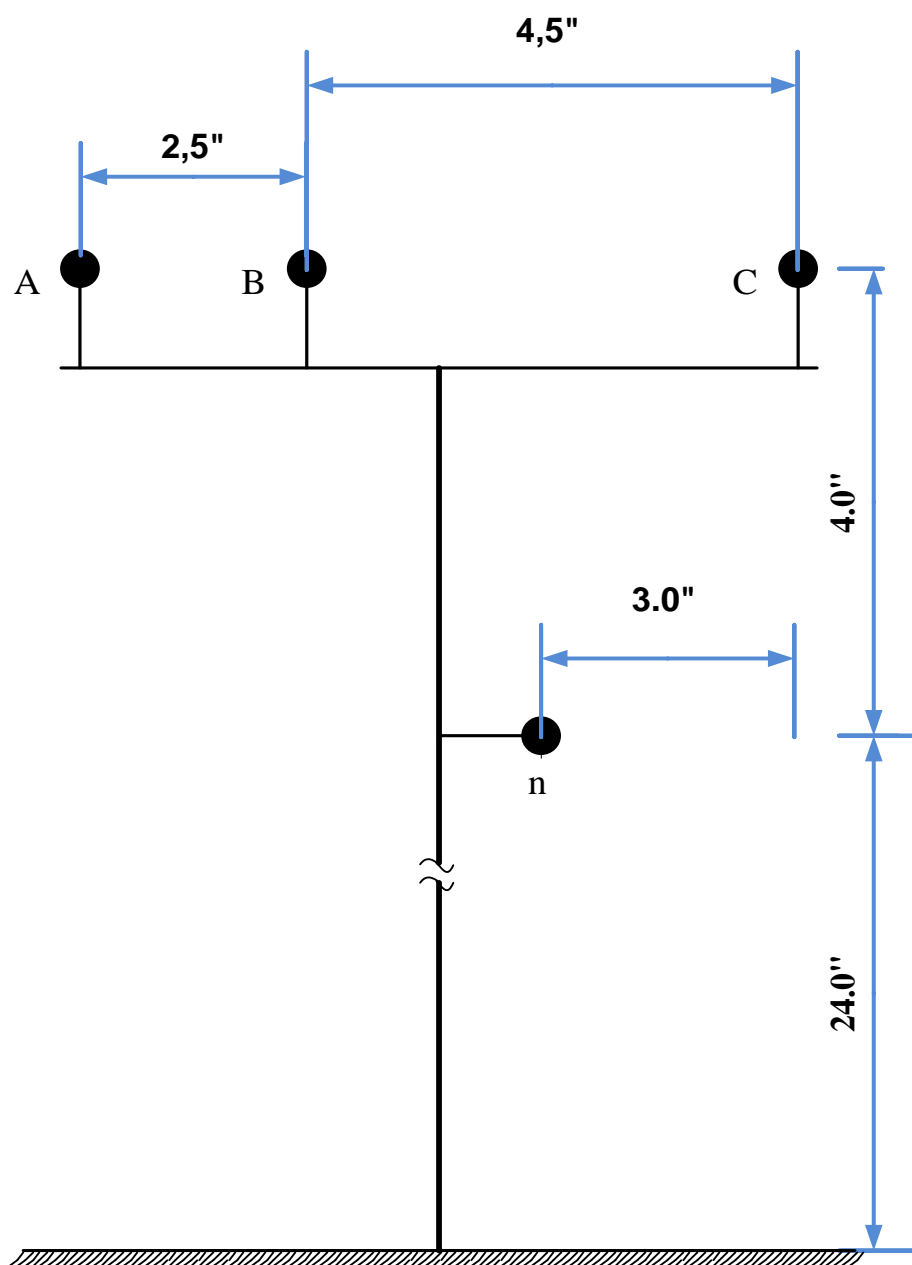
- ✓ Στην περίπτωση γραμμής ο χρήστης καλείται να εισάγει στην στήλη U το αναγνωριστικό (id) της γραμμής όπως αυτό έχει οριστεί από τον ίδιο στα φύλλα καθορισμού των παραμέτρων της γραμμής και στη στήλη V το μήκος της γραμμής σε feet.
- ✓ Στην περίπτωση ρυθμιστή, εισάγεται στις στήλες W-Y ο αριθμός 1 εάν ο ρυθμιστής ρυθμίζει την αντίστοιχη φάση (A-B-C) και ο αριθμός μηδέν εάν δεν την εξετάζει για ρύθμιση. Τέλος ο χρήστης εισάγει:

- Στη στήλη Z τη συνδεσμολογία του ρυθμιστή, δηλαδή εάν πρόκειται για γειωμένου αστέρα (τιμή 1) ή για αγείωτου τριγώνου (τιμή 2).
 - Στη στήλη AA το λόγο μετασχηματισμού του μετασχηματιστή τάσης του αντισταθμιστή του ρυθμιστή.
 - Στην στήλη AB την τιμή του εύρους ζώνης (bandwidth) όπως αυτό ορίστηκε στην Ενότητα 3.7.
 - Στη στήλη AC το λόγο μετασχηματισμού του μετασχηματιστή ρεύματος του αντισταθμιστή του ρυθμιστή.
 - Στις στήλες AD-AI τις τιμές της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης του αντισταθμιστή για την κάθε φάση.
 - Στις στήλες AJ-AL τις τιμές της ονομαστικής τάσης του αντισταθμιστή για την κάθε φάση.
4. Το φύλλο “more loads” το οποίο χρησιμοποιείται για να μπορεί ο χρήστης να εισάγει σε ένα ζυγό πολλά και ενδεχομένως διαφορετικού τύπου και συνδεσμολογίας φορτία. Χρησιμοποιείται όταν τα φορτία του ζυγού είναι περισσότερα από ένα και η χρήση του γίνεται ως εξής:
- ✓ Στη στήλη B ο χρήστης δηλώνει αν ο ζυγός της στήλης A έχει επιπλέον φορτία. Η τιμή μηδέν σημαίνει ότι δεν υπάρχει επιπλέον φορτίο και η τιμή ένα ότι υπάρχει.
 - ✓ Εφόσον υπάρχουν επιπλέον φορτία στο συγκεκριμένο ζυγό ο χρήστης εισάγει στη στήλη C τον αριθμό των επιπλέον φορτίων.
 - ✓ Στις στήλες D-I εισάγει ο χρήστης τα στοιχεία του πρώτου επιπλέον φορτίου με τον ίδιο τρόπο που έγινε η εισαγωγή στις στήλες N-U του φύλλου “bus_details”. Εφόσον υπάρχει και άλλο επιπλέον φορτίο γίνεται εισαγωγή των στοιχείων του στις στήλες L-S και ούτω καθεξής.
5. Το φύλλο με την ονομασία “Overhead_lines” στο οποίο ο χρήστης εισάγει τα δεδομένα για τον υπολογισμό των μητρών αντιστάσεων σειράς και των εγκάρσιων αγωγιμοτήτων των εναέριων γραμμών. Αναλυτικά:
- ✓ Στη στήλη A τοποθετείται το αναγνωριστικό της γραμμής, ένας κωδικός ο οποίος διαλέγεται από το χρήστη και τοποθετείται ως τρόπος σύνδεσης των μητρών που θα υπολογιστούν με τη στήλη U του φύλλου “kladoi”.
 - ✓ Στις στήλες B και D τοποθετούνται οι τιμές της GMR (feet) που αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.4.2.1 για τον αγωγό φάσης και τον ουδέτερο αγωγό, όπως αυτές δίνονται από τους πίνακες της βιβλιογραφίας [6.4].
 - ✓ Στις στήλες C και E εισάγονται οι τιμές της αντίστασης $\left(\frac{Ohm}{mile}\right)$ αγωγού φάσης και ουδέτερου αντίστοιχα όπως αυτές εντοπίζονται στους πίνακες της βιβλιογραφίας [6.4] για το συγκεκριμένο τύπο αγωγών.
 - ✓ Στις στήλες F και G ορίζονται οι τιμές της διαμέτρου των αγωγών φάσης και ουδέτερου διαμέσου των πινάκων της βιβλιογραφίας [6.4]. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις της Ενότητας 3.4.3.1.

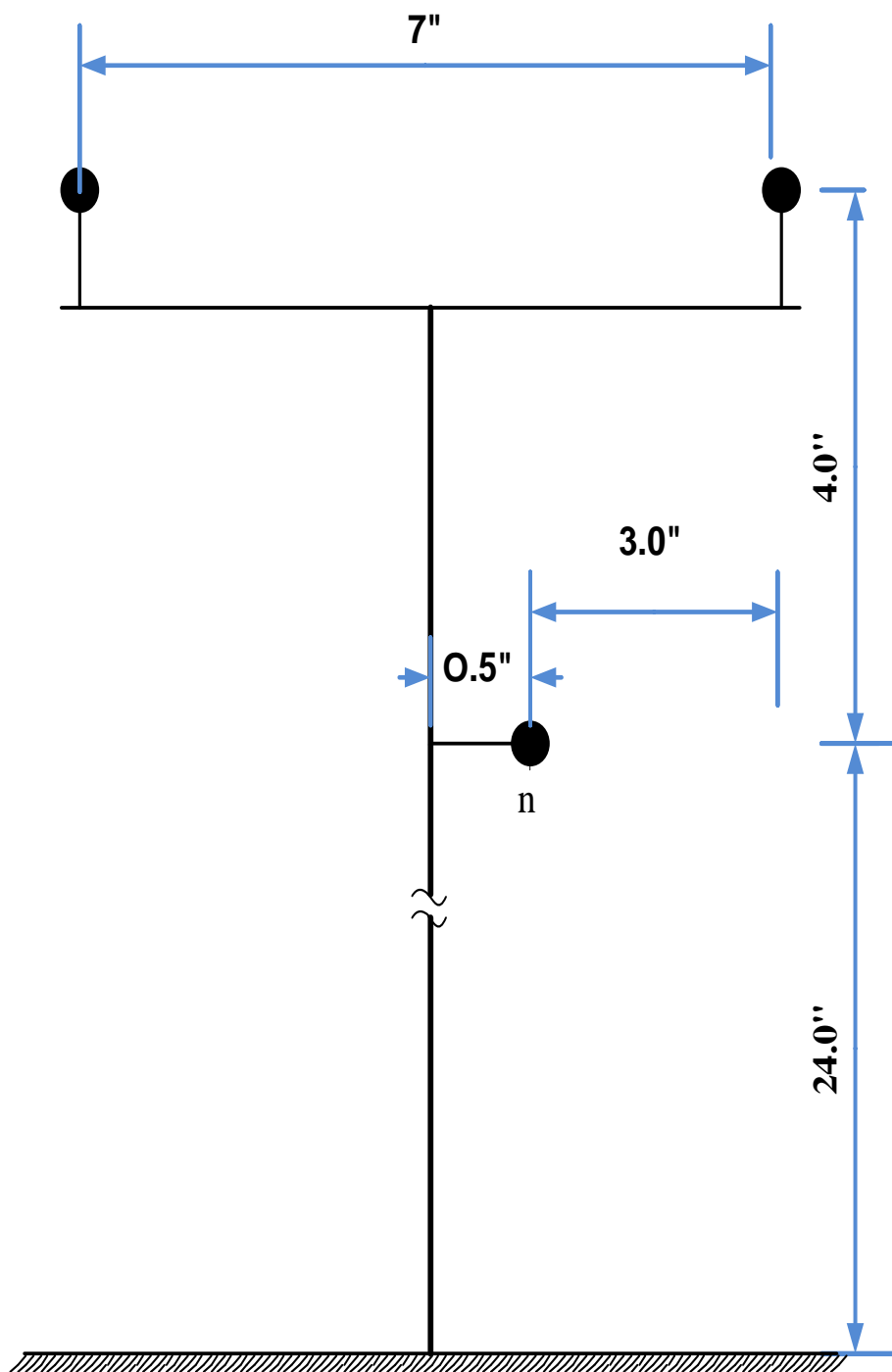
- ✓ Στη στήλη Η ορίζεται το αναγνωριστικό της τυποποίησης στην οποία ανήκει η γραμμή, με βάση τις αποστάσεις της από τη γη, την απόσταση μεταξύ των αγωγών φάσεων και την απόσταση ανάμεσα στον ουδέτερο και στις φάσεις. Οι δυνατές τιμές είναι 500, 505, 510 και οι αντίστοιχες αποστάσεις ορίζονται από τα Σχήματα 6.7, 6.8 και 6.9.
 - ✓ Στις στήλες I-K ορίζεται η σειρά εμφάνισης των φάσεων στη γραμμή από αριστερά προς τα δεξιά. Παραδείγματος χάριν η σειρά B-C-A περιγράφεται με τους αριθμούς 3, 1, 2 μιας και η φάση A είναι τρίτη, η φάση B πρώτη και η φάση C δεύτερη. Εάν μια φάση απουσιάζει παίρνει τον αριθμό μηδέν.
 - ✓ Τέλος στη στήλη L δίνεται από το χρήστη η πληροφορία ύπαρξης ουδετέρου ή απουσίας του από τη γραμμή.
6. Το φύλλο με την ονομασία “Underground_lines_520” στο οποίο ο χρήστης εισάγει τα δεδομένα για τον υπολογισμό των μητρών αντιστάσεων σειράς και των υπόγειων γραμμών με αναγνωριστικό τυποποίησης τον αριθμό 520. Οι αποστάσεις της συγκεκριμένης γεωμετρίας των γραμμών ορίζονται από το Σχήμα 6.10. Να σημειωθεί ότι σε όλες τις προσομοιώσεις που έγιναν στα test feeders της IEEE, τέτοιου τύπου γραμμές υπάρχουν μόνο στα υπόγεια θωρακισμένα καλώδια (tape shielded cables) όπως αυτά περιγράφηκαν στην Ενότητα 3.4.2.2. Επομένως τα στοιχεία τα οποία ζητούνται στην είσοδο για αυτή την τυποποίηση αφορούν μόνο αυτή την κατηγορία. Όλα τα παρακάτω μεγέθη που θα αναφερθούν παρέχονται φυσικά από τους πίνακες της βιβλιογραφίας [6.4], εκτός από όπου αναφέρεται ότι είναι επιλογή του χρήστη.
- ✓ Στη στήλη A τοποθετείται το αναγνωριστικό της γραμμής, ένας κωδικός ο οποίος διαλέγεται από το χρήστη και τοποθετείται ως τρόπος σύνδεσης των μητρών που θα υπολογιστούν με τη στήλη U του φύλλου “kladoi”.
 - ✓ Στις στήλες B και D τοποθετούνται οι τιμές της GMR (feet) που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 3.4.2.2 για τον αγωγό φάσης και τον αγωγό ουδετέρου.
 - ✓ Στις στήλες C και E εισάγονται οι τιμές της αντίστασης $\left(\frac{\text{Ohm}}{\text{mile}}\right)$ αγωγού φάσης και ουδετέρου, αντίστοιχα.
 - ✓ Στη στήλη F εισάγεται η τιμή του πάχους της ταινίας θωράκισης του καλωδίου (Tape thickness) (mils).
 - ✓ Στη στήλη G εισάγεται η εξωτερική διάμετρος της ταινίας θωράκισης (inches).
 - ✓ Στη στήλη H εισάγεται η διάμετρος του αγωγού φάσης (inches).
 - ✓ Τέλος στις στήλες J-K επιλέγεται από το χρήστη ποια από τις τρεις φάσεις βρίσκεται στο εσωτερικό του θωρακισμένου με ταινία καλωδίου.
7. Το φύλλο με την ονομασία “Underground_lines_515” στο οποίο ο χρήστης εισάγει τα δεδομένα για τον υπολογισμό των μητρών αντιστάσεων σειράς και των υπόγειων γραμμών με αναγνωριστικό τυποποίησης τον αριθμό 515. Οι αποστάσεις της συγκεκριμένης γεωμετρίας των γραμμών ορίζονται από το Σχήμα 6.11. Να σημειωθεί ότι σε όλες τις προσομοιώσεις που έγιναν στα test

feeders της IEEE, τέτοιου τύπου γραμμές υπάρχουν μόνο στα υπόγεια καλώδια με ομόκεντρο ουδέτερο (concentric neutral cables) όπως αυτά περιγράφηκαν στην Ενότητα 3.4.2.2. Επομένως τα στοιχεία τα οποία ζητούνται στην είσοδο για αυτή την τυποποίηση αφορούν μόνο αυτή την κατηγορία. Όλα τα παρακάτω μεγέθη που θα αναφερθούν παρέχονται φυσικά από τους πίνακες της βιβλιογραφίας [6.4], εκτός από όπου αναφέρεται ότι είναι επιλογή του χρήστη.

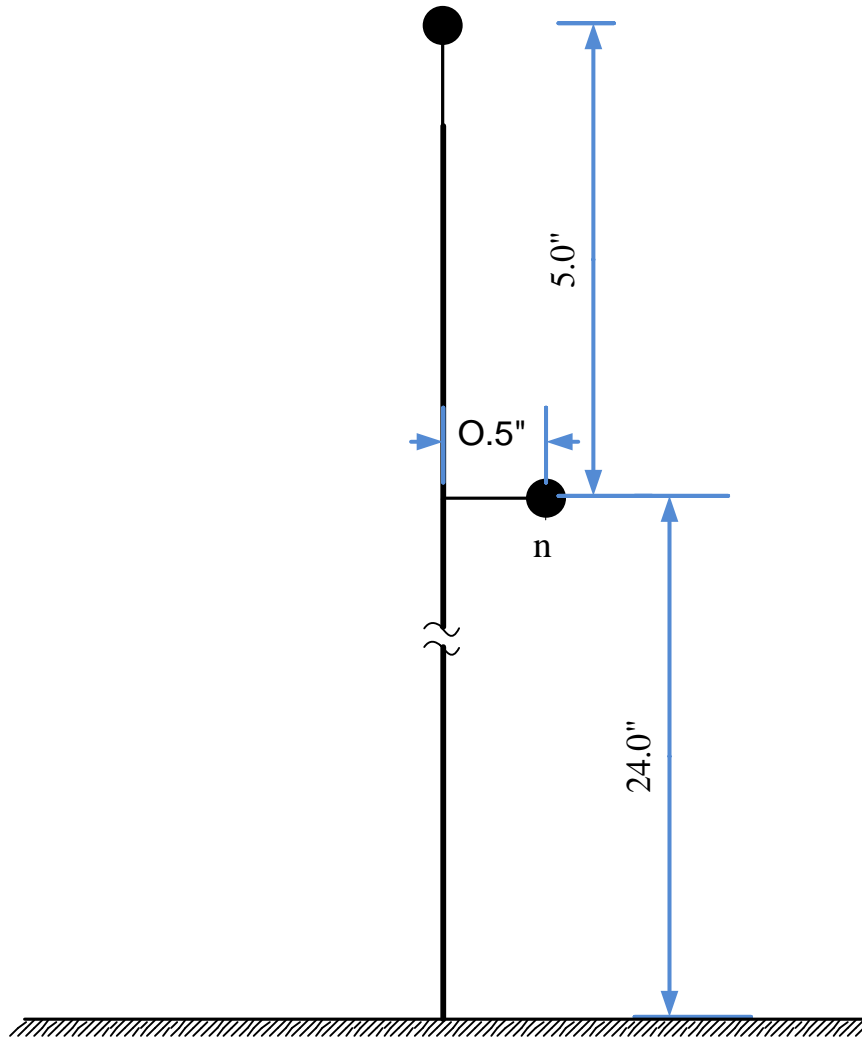
- ✓ Στη στήλη A τοποθετείται το αναγνωριστικό της γραμμής, ένας κωδικός ο οποίος διαλέγεται από το χρήστη και τοποθετείται ως τρόπος σύνδεσης των μητρών που θα υπολογιστούν με τη στήλη U του φύλλου “Kladoi”.
 - ✓ Στις στήλες B και D τοποθετούνται οι τιμές της GMR (feet) που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 3.4.2.2 για τον αγωγό φάσης και το ελασμάτων ουδετέρου.
 - ✓ Στις στήλες C και E εισάγονται οι τιμές της αντίστασης ($\frac{Ohm}{mile}$) αγωγού φάσης και ελασμάτων ουδετέρου, αντίστοιχα.
 - ✓ Στη στήλη F εισάγεται η ονομαστική διάμετρος του αγωγού ουδετέρου του καλωδίου (inches).
 - ✓ Στη στήλη G εισάγεται η διάμετρος των ελασμάτων του αγωγού ουδετέρου (inches)
 - ✓ Στη στήλη H εισάγεται το σύνολο ελασμάτων του αγωγού ουδετέρου (k).
 - ✓ Στη στήλη I εισάγεται η διάμετρος του αγωγού φάσης (inches).
 - ✓ Τέλος στις στήλες K-M ορίζεται η σειρά εμφάνισης των φάσεων στη γραμμή από αριστερά προς τα δεξιά. Παραδείγματός χάριν η σειρά B-C-A περιγράφεται με τους αριθμούς 3, 1, 2 μιας και η φάση A είναι τρίτη, η φάση B πρώτη και η φάση C δεύτερη.
8. Τέλος υπάρχει το φύλλο “Read” το οποίο δεν δέχεται κάποια είσοδο από το χρήστη. Ο ρόλος του είναι να συγκεντρώνει όλες τις εισόδους από τα προαναφερθέντα φύλλα. Η είσοδος των δεδομένων στο πρόγραμμα γίνεται με τη συνάρτηση xlsread του MATLAB, η οποία διαβάζει φύλλα και όχι ολόκληρα excel αρχεία [6.2]. Επομένως το διάβασμα των προηγούμενων επτά φύλλων καθίσταται ιδιαίτερα χρονοβόρο για το λογισμικό. Η δημιουργία του φύλλου “Read” έχει ως αποτέλεσμα η είσοδος να γίνεται με μια μόνο χρήση της συνάρτησης xlsread και άρα να δαπανάται αισθητά λιγότερος χρόνος. Σε κάθε περίπτωση ο χρόνος εκτέλεσης της εισαγωγής των δεδομένων εξακολουθεί να είναι η πιο χρονοβόρα διεργασία του λογισμικού.



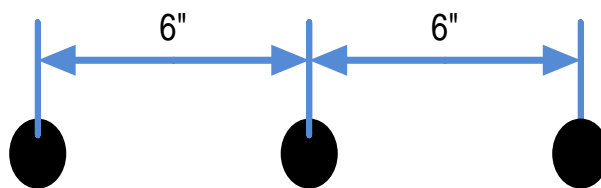
Σχήμα 6.7: Εναέρια γραμμή με Spacing Id=500.



Σχήμα 6.8: Εναέρια γραμμή με Spacing Id=505.



Σχήμα 6.9: Εναέρια γραμμή με Spacing Id=510.



Σχήμα 6.10: Υπόγεια γραμμή με Spacing Id=515.



Σχήμα 6.11: Υπόγεια γραμμή με Spacing Id=520.

6.2.2.3 Μελέτη και ανάλυση αποτελεσμάτων

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων ακολουθεί η εκτέλεση του αλγορίθμου όπως αυτός περιγράφηκε στην Ενότητα 4.2. Για να είναι δυνατή η γενίκευση του λογισμικού έπρεπε προγραμματιστικά να δημιουργηθούν οι κατάλληλες μεταβλητές ώστε να βρίσκονται όλες οι πληροφορίες του ζυγού συγκεντρωμένες. Η απλή χρήση πινάκων δεν εξασφαλίζει μια μονοσήμαντη αντιστοιχισή με τα στοιχεία του κάθε ζυγού ή κλάδου. Επομένως για την δημιουργία του λογισμικού χρησιμοποιήθηκε η εντολή `struct` η οποία υποστηρίζεται από το MATLAB για την δημιουργία δομών. Με αυτό τον τρόπο κατέστη δυνατό να δημιουργηθούν δομές για τους κλάδους και τους ζυγούς του συστήματος.

Η δημιουργία αυτών των δομών καθιστά εύκολη την επεξεργασία μετά το πέρας της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Κρατώντας στη μνήμη αυτές τις μεταβλητές μπορεί να εξαχθεί οποιοδήποτε μέγεθος προκύπτει έμμεσα ή άμεσα από την ανάλυση ροής φορτίου. Επομένως η παρουσίαση αυτών των δομών ουσιαστικά παρουσιάζει τον τρόπο ανάλυσης των αποτελεσμάτων και δίνει τη δυνατότητα σε χρήστες οι οποίοι δεν έχουν διαβάσει ολόκληρο τον αλγόριθμο να εκμεταλλευτούν προγραμματιστικά τα αποτελέσματά του.

Η δομή “`komvos`” περιέχει όλες τις πληροφορίες του κάθε ζυγού και συγκεκριμένα αποτελείται από τα πεδία:

1. “`name`” όπου εισάγεται ο αριθμός του ζυγού όπως παρουσιάζεται στα δεδομένα (φυσικός αριθμός).
2. “`inbranch`” όπου εισάγεται ο αριθμός του ζυγού από τον οποίο προήλθε ο τρέχον ζυγός ή μηδέν εάν είναι ο feeder (φυσικός αριθμός).
3. “`next`” που αντιστοιχεί στον αριθμό του ζυγού που ακολουθεί στον ίδιο υποκλάδο ή μηδέν εάν είναι ο τελευταίος (φυσικός αριθμός).
4. “`nsubs`” το οποίο αντιστοιχεί στον αριθμό των υποκλάδων που ξεκινούν από το συγκεκριμένο ζυγό (φυσικός αριθμός).
5. “`subbus`”, ο οποίος είναι πίνακας μεγέθους $1 \times nsubs$ και αναφέρει το όνομα του πρώτου ζυγού του αντίστοιχου υποκλάδου που ξεκινά από τον τρέχοντα ζυγό.
6. “`l`” όπου αποθηκεύεται ο δείκτης l του ζυγού.
7. “`m`” όπου αποθηκεύεται ο δείκτης m του ζυγού.
8. “`n`” όπου αποθηκεύεται ο δείκτης n του ζυγού.
9. “`Ground_id`” όπου εισάγεται η πληροφορία για το εάν ο ζυγός βρίσκεται σε γειωμένο ή μη γειωμένο τμήμα του δικτύου: μηδέν για μη γειωμένο και ένα για γειωμένο.
10. “`V_bus`” όπου αποθηκεύεται η τάση του ζυγού σε Volt και διαστάσεων 3×1 .
11. “`load_id_connection_type`” όπου αποθηκεύεται ο τύπος συνδεσμολογίας του φορτίου του ζυγού: 0 για απουσία φορτίου, 1 για φορτίο συνδεσμολογία γειωμένου αστέρα και 2 για φορτίου σε συνδεσμολογία τριγώνου.
12. “`load_id_type`” όπου αποθηκεύεται ο τύπος του φορτίου: 1 για φορτίου σταθερής ισχύος, 2 για φορτίο σταθερής έντασης και 3 για φορτίο σταθερής αντίστασης.
13. “`S_load`” όπου καταχωρείται η ονομαστική μιγαδική ισχύς (σε VA) του φορτίου του ζυγού (3×1).
14. “`I_load`” όπου αποθηκεύεται η τιμή του εγχεόμενου ρεύματος (σε A) του φορτίου στη φασική του τιμή (3×1).
15. “`I_delta_load`” όπου καταχωρείται το πολικό ρεύμα (σε A) των συνδεδεμένων κατά τρίγωνο φορτίων (3×1).

16. “Shunt_Capacitors_id” όπου καταχωρείται το δεδομένο ύπαρξης ή απουσίας εγκάρσιου πυκνωτή από το ζυγό: μηδέν για απουσία και ένα για ύπαρξη.
17. “YmatrixCap_Grounded” όπου αποθηκεύεται ο πίνακας της αγωγιμότητας (Ω^{-1}) του πυκνωτή όπως αυτός ορίστηκε για την περίπτωση συνδεσμολογίας γειωμένου αστέρα στην εξίσωση (3.15) (πίνακας διαστάσεων 3×3).
18. “YmatrixCap_Ungrounded” όπου αποθηκεύεται ο πίνακας της αγωγιμότητας (Ω^{-1}) του πυκνωτή όπως αυτός ορίστηκε για την περίπτωση συνδεσμολογίας τριγώνου στην εξίσωση (3.17) (πίνακας διαστάσεων 3×3).
19. “Cap_Sdata” όπου καταχωρείται η ονομαστική άεργος ισχύς (VA_r) του πυκνωτή για την κάθε φάση. (3×1)
20. “I_cap” όπου καταχωρείται το εγγεόμενο ρεύμα (σε A) από τον ζυγό στον πυκνωτή (3×1).
21. “Cogenerator_id” όπου καταχωρείται το δεδομένο ύπαρξης ή απουσίας γεννήτριας διεσπαρμένης παραγωγής από τον ζυγό: μηδέν για απουσία και ένα για ύπαρξη.
22. “S_cogenerator” όπου καταχωρείται η ονομαστική μιγαδική ισχύς (VA) της γεννήτριας διεσπαρμένης παραγωγής για την κάθε φάση (3×1).
23. “I_cogenerator” όπου καταχωρείται το εγγεόμενο ρεύμα (σε A) από το ζυγό προς τη γεννήτρια (3×1).
24. “V_nominal_of_bus” όπου εισάγεται η ονομαστική τάση (σε V) του ζυγού (3×1).
25. “I_k_tonos” όπου αποθηκεύεται το εγγεόμενο ρεύμα εισόδου του ζυγού σε Ampere (Σχήμα 4.2) (3×1).
26. “I_k” όπου αποθηκεύεται το ρεύμα εξόδου του ζυγού στον ίδιο υποκλάδο σε Ampere (Σχήμα 4.2) (3×1).
27. “Isum_reumatos_egx_se_ypokladous” όπου αποθηκεύεται το άθροισμα των εγγεόμενων ρευμάτων (σε A) στους υποκλάδους που ξεκινούν από τον συγκεκριμένο ζυγό (Σχήμα 4.2) (3×1).
28. “ExtraLoads” όπου καταχωρείται το δεδομένο ύπαρξης ή απουσίας επιπλέον φορτίων στο ζυγό: μηδέν για απουσία και ένα για ύπαρξη.
29. “NumOfExtraLoads” όπου εισάγεται ο αριθμός των επιπλέον φορτίων που έχουν εγκατασταθεί στο ζυγό.
30. “S_load_extra” όπου καταχωρείται η ονομαστική μιγαδική ισχύς (σε VA) του κάθε επιπλέον φορτίου του ζυγού ($3 \times \text{NumOfExtraLoads}$)
31. “I_load_extra” όπου αποθηκεύεται η τιμή του εγγεόμενου ρεύματος (σε A) του κάθε επιπλέον φορτίου στη φασική του τιμή. ($3 \times \text{NumOfExtraLoads}$)
32. “load_extra_connection” όπου αποθηκεύεται ο τύπος συνδεσμολογίας του φορτίου του ζυγού: 0 για απουσία φορτίου, 1 για φορτίο συνδεσμολογία γειωμένου αστέρα και 2 για φορτίο σε συνδεσμολογία τριγώνου (πίνακας $1 \times \text{NumOfExtraLoads}$).
33. “load_extra_type” όπου αποθηκεύεται ο τύπος του φορτίου: 1 για φορτίο σταθερής ισχύος, 2 για φορτίο σταθερής έντασης και 3 για φορτίο σταθερής αντίστασης (πίνακας $1 \times \text{NumOfExtraLoads}$).
34. “I_load_Sum” όπου καταχωρείται το άθροισμα των φασικών εγγεόμενων ρευμάτων (σε A) των επιπλέον φορτίων (3×1).

35. “I_delta_load_extra” όπου καταχωρείται το πολικό ρεύμα (σε A) των συνδεδεμένων κατά τρίγωνο επιπλέον φορτίων ($3 \times \text{NumOfExtraLoads}$).
36. “I_delta_load” όπου καταχωρείται το πολικό ρεύμα (σε A) των συνδεδεμένων κατά τρίγωνο φορτίων (3×1).

Η δομή των κλάδων περιέχει πληροφορίες πάνω στα στοιχεία τους, όπως οι παράμετροι των γραμμών, των μετασχηματιστών ή των ρυθμιστών του δικτύου. Η συγκεκριμένη δομή έχει την ονομασία “klados” και αποτελείται από 42 πεδία, στα οποία κατανέμονται τα χαρακτηριστικά του κάθε κλάδου. Το μεγάλο πλήθος πεδίων στη δομή των κλάδων οφείλεται στο ότι θα πρέπει να αποθηκεύει όλες τις παραμέτρους όλων των δυνατών στοιχείων. Η χρησιμότητα της συγκεκριμένης δομής είναι η αποθήκευση του τύπου και των παραμέτρων των στοιχείων όλων των κλάδων, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις εξισώσεις του αλγορίθμου BFS. Επομένως, μετά τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων δεν έχει κάποια χρησιμότητα και για αυτό δεν χρειάζεται να γίνει περαιτέρω ανάλυσή της.

Άρα γίνεται φανερό πως για τη μελέτη των αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται αποκλειστικά η δομή των κόμβων. Διαβάζοντας και κατανοώντας κάποιος πλήρως τη δομή αυτή, μπορεί να χρησιμοποιήσει τα συγκεκριμένα αποτελέσματα για να εξάγει περισσότερες πληροφορίες πάνω σε αυτό που τον ενδιαφέρει. Για παράδειγμα μελετώντας όλα τα εξερχόμενα ρεύματα των ζυγών θα μπορούσε κάποιος να εντοπίσει κλάδους στους οποίους το διερχόμενο ρεύμα υπερβαίνει κάποιο ανώτατο όριο και να προβεί σε ρυθμίσεις στη συγκεκριμένη περιοχή.

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται η εξαγωγή των αποτελεσμάτων και αναλύεται ο τρόπος παρουσιάσής τους. Είναι χαρακτηριστικό πως πολλά από τα αποτελέσματα τα οποία έχουν επιλεχθεί να παρουσιάζονται στα πλαίσια του λογισμικού, προκύπτουν έπειτα από απλή επεξεργασία των στοιχειωδών δεδομένων που εμπεριέχει, μετά την ανάλυση ροής φορτίου, η δομή “komnos”. Η εισερχόμενη ισχύς ενός ζυγού για παράδειγμα ανήκει στη συγκεκριμένη κατηγορία μιας και προκύπτει εύκολα από το γινόμενο της τάσης του ζυγού με τη συζυγή τιμή του εισερχόμενου στο ζυγό ρεύματος.

6.2.2.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Η εξαγωγή αποτελεσμάτων είναι ο λόγος της χρησιμοποίησης της ανάλυσης ροής ισχύος. Ένα λογισμικό το οποίο έχει στη διάθεσή του όλα τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του αλγορίθμου, θα πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να κάνει προεπισκόπησή τους στο γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής, αλλά και να μπορεί να τα αποθηκεύσει σε αρχείο excel για μελλοντική αναφορά στα αποτελέσματα.

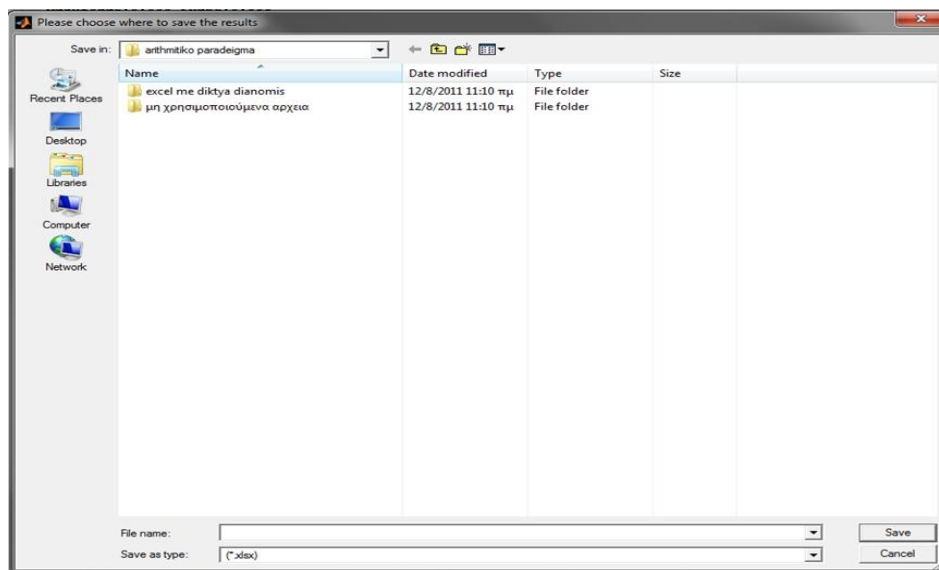
Στο Σχήμα 6.5 έγινε προεπισκόπηση των πλήκτρων εμφάνισης των αποτελεσμάτων στο GUI αλλά και της αποθήκευσης αυτών σε excel. Αναλυτικά στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού υπάρχουν τα ακόλουθα πλήκτρα:

1. “Buses Indices” που εμφανίζει τους δείκτες 1, m, n του κάθε ζυγού όπως αυτοί ορίστηκαν στην Ενότητα 2.3.
2. “Bus Voltages” που εμφανίζει τις τάσεις του κάθε ζυγού (μέτρο και γωνία) σε Volt.
3. “Bus Voltages p.u.” που εμφανίζει τις τάσεις του κάθε ζυγού (μέτρο και γωνία) σε Volt.
4. “Bus Incoming Power” που εμφανίζει την εισερχόμενη ισχύ σε κάθε ζυγό.
5. “Bus Outgoing Power” το οποίο εμφανίζει την εξερχόμενη ισχύ από κάθε ζυγό. Ο αριθμός των ισχύων που τυπώνεται είναι ο αριθμός των υποκλάδων

που ξεκινούν από τον εν λόγω ζυγό προσαυξημένος κατά ένα εφόσον δεν είναι ο τελευταίος κλάδος του υποκλάδου που ανήκει.

6. “Incoming Currents” που εμφανίζει τα εισερχόμενα ρεύματα κάθε ζυγού.
7. “Outgoing Currents” που εμφανίζει τα εξερχόμενα ρεύματα κάθε ζυγού. Ο αριθμός των ρευμάτων που τυπώνεται είναι ο αριθμός των υποκλάδων που ξεκινούν από τον εν λόγω ζυγό προσαυξημένος κατά ένα εφόσον δεν είναι ο τελευταίος κλάδος του υποκλάδου που ανήκει.
8. “Z & Y matrices (Line)” που τυπώνει στην οθόνη για τον κάθε τύπο γραμμής που έχει εισάγει ο χρήστης, τη μήτρα των αντιστάσεων σειράς και τη μήτρα των εγκάρσιων αγωγιμοτήτων.
9. “RBF order of Buses” όπου τυπώνεται η RBF σειρά των ζυγών του δικτύου όπως αυτή ορίστηκε στην Ενότητα 2.3.
10. “Execution Details” όπου τυπώνονται δύο πίνακες. Ο ένας αφορά στατιστικά στοιχεία των χρόνων εκτέλεσης των επιμέρους λειτουργιών του λογισμικού. Ο δεύτερος αφορά τα σφάλματα των εκάστοτε επαναλήψεων κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου “Backward and Forward Sweep”.
11. “Power Loss” όπου τυπώνονται οι απώλειες ισχύος σε κάθε κλάδο του συστήματος. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει εύκολα αφαιρώντας από την εξερχόμενη ισχύ του ζυγού αναχώρησης της γραμμής την εισερχόμενη ισχύ του ζυγού άφιξης της γραμμής αυτής.
12. “Bar Chart of Voltages” όπου εμφανίζεται ένα ραβδόγραμμα το οποίο δείχνει πόσες φάσεις βρίσκονται κάτω από 0.97 p.u. πόσες μεταξύ 0.97 p.u. και 1.03 και πόσες πάνω από 1.03. Όσες τάσεις έχουν την τιμή μηδέν απλά αγνοούνται της συγκεκριμένης παρουσίασης.
13. “Load Currents” όπου τυπώνεται το ρεύμα των φορτίων. Να σημειωθεί ότι δεν τυπώνεται το ρεύμα γραμμής αλλά το ρεύμα που διαρρέει το εκάστοτε φορτίο.
14. “Power of Loads” που εμφανίζει την ισχύ που απορροφούν τα εγκατεστημένα φορτία.

Η εκτύπωση σε excel ουσιαστικά τυπώνει σε διαφορετικές καρτέλες τα συγκεκριμένα αποτελέσματα. Στο Σχήμα 6.12 αναπαρίσταται το παράθυρο διαλόγου αποθήκευσης του excel ενώ στο Σχήμα 6.13 φαίνεται το excel που έχει δημιουργηθεί.



Σχήμα 6.12: Αποθήκευση αρχείου excel με αποτελέσματα.

apotermata123 bus - Microsoft Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Zygos	Phase A Magnitude (Ampere)	Phase A Angle (Degree)	Phase B Magnitude (Ampere)	Phase B Angle (Degree)	Phase C Magnitude (Ampere)	Phase C Angle (Degree)					
2	150	0	0	0	0	0	0					
3	149	628.0285503	-21.57770534	407.6810042	-139.5629359	501.4866301	101.5970758					
4	1	628.0292014	-21.5778108	407.6813726	-139.5631291	501.4869316	101.5969428					
5	2	0	0	8.925513494	-146.8779244	0	0					
6	3	0	0	0	0	46.5436726	93.00440165					
7	5	0	0	0	0	28.54932023	92.9943525					
8	6	0	0	0	0	19.23950194	92.98921524					
9	4	0	0	0	0	17.99485311	93.01716359					
10	7	610.0989138	-21.41206093	398.8305078	-139.4000725	455.5191176	102.4714784					
11	8	601.0627077	-21.31767395	398.8306833	-139.4001708	455.5192514	102.4714055					
12	12	0	0	8.95139331	-147.2914181	0	0					
13	9	46.21876146	-28.03004419	0	0	0	0					
14	14	28.07724282	-28.04740305	0	0	0	0					
15	10	9.310056121	-28.04497513	0	0	0	0					
16	11	18.76765051	-28.05143859	0	0	0	0					
17	13	555.187646	-20.76027927	389.9664009	-139.2198224	455.5194473	102.4712965					
18	34	0	0	0	0	46.39929826	92.32461799					
19	15	0	0	0	0	27.39168897	92.31628802					
20	17	0	0	0	0	9.127707989	92.3200282					
21	16	0	0	0	0	18.26466141	92.31015166					
22	18	228.8530169	-30.40727988	155.6082045	-155.0755	153.2205603	88.62712057					
23	19	37.24437931	-28.86177741	0	0	0	0					
24	20	18.62011224	-28.8710435	0	0	0	0					
25	135	135.8223932	-31.39789234	136.560356	-156.100522	98.10174612	86.59505281					
26	35	135.8223959	-31.39827559	136.5611861	-156.1009481	98.10223799	86.59440243					
27	36	18.55619472	-28.94724923	18.34876469	-147.9111124	0	0					
28	37	18.55646987	-28.94894785	0	0	0	0					
29	38	0	0	18.34900174	-147.9125923	0	0					
30	39	0	0	9.039253577	-147.9185048	0	0					
31	40	108.6176559	-34.92623312	108.5161107	-155.4005099	98.10258431	86.5940255					
32	41	0	0	0	0	9.200734339	92.17322679					
33	42	108.6181601	-34.92655001	108.5165422	-155.4009088	88.9506516	86.01705049					
34	43	0	0	19.13890114	-147.9747427	0	0					

Bus voltages p.u. Incoming Currents Outgoing currents Current of loads Power loss Outgoing Power Incoming Power

Σχήμα 6.13: Απεικόνιση αρχείου excel εξόδου.

6.2.2.5 Συναρτήσεις λογισμικού

Σε αυτήν την ενότητα θα περιγραφεί η δομή του λογισμικού, αναλύοντας από ποιες συναρτήσεις και scripts αποτελείται, ούτως ώστε να μπορεί κάποιος να χρησιμοποιήσει αυτοτελώς όποια δυνατότητα του λογισμικού επιθυμεί σε κάποια άλλη εφαρμογή. Κατά την ανάπτυξη του λογισμικού εκτιμήθηκε η δυνατότητα του MATLAB να καλεί διαφορετικές συναρτήσεις μέσα από μια άλλη συνάρτηση και έτσι αρκετά βήματα του αλγορίθμου διαιρέθηκαν σε μικρότερες συναρτήσεις. Από την άλλη όμως πλευρά, το κυρίως κομμάτι του αλγορίθμου εισήλθε σε ένα m file με τον τίτλο `emplan_main`.

Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικά οι συναρτήσεις οι οποίες αποτελούν το λογισμικό, μαζί με τα στοιχεία που παίρνουν ως είσοδο και τα δεδομένα που δίνουν ως έξοδο:

1. Η συνάρτηση με όνομα “`admit_spacid515.m`” η οποία δίνει τη μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας των υπόγειων γραμμών τύπου 515. Ως είσοδο παίρνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- ✓ Τη συχνότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (f, Hz).
- ✓ Τον κωδικό του τύπου της γραμμής. Η τιμή αυτή είναι προεπιλεγμένη στην τιμή 515 για αυτή τη συνάρτηση (`Spacing_Id`).
- ✓ Το σύνολο ελασμάτων του αγωγού ουδετέρου (k).
- ✓ Την ονομαστική διάμετρο του αγωγού ουδετέρου του καλωδίου (`d_outside, inches`).
- ✓ Τη διάμετρο των ελασμάτων του αγωγού ουδετέρου (`d_s, inches`).
- ✓ Τη διάμετρο του αγωγού φάσης (`d_c, inches`).
- ✓ Το μήκος της γραμμής σε feet (`length`).

Η συνάρτηση αυτή δίδει ως έξοδο τις τιμές των ακόλουθων παραμέτρων:

- ✓ Τη μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας ανά μήκος γραμμής ($\frac{\mu S}{mile}$). Το δεδομένο αυτό είναι πίνακας διαστάσεων 3×3 (`yabc`).
- ✓ Τη μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας (μS) με βάση το μήκος γραμμής που δόθηκε στην είσοδο. Το δεδομένο αυτό είναι πάλι πίνακας διαστάσεων 3×3 (`yabc_line`).

2. Η συνάρτηση με όνομα “`admit_spacid520.m`” η οποία δίνει τη μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας των υπόγειων γραμμών τύπου 520. Ως είσοδο παίρνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- ✓ Τη συχνότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (f, Hz).
- ✓ Τον κωδικό του τύπου της γραμμής. Η τιμή αυτή είναι προεπιλεγμένη στην τιμή 520 για αυτή τη συνάρτηση (`Spacing_Id`).
- ✓ Την εξωτερική διάμετρο της ταινίας θωράκισης (`d_s, inches`).
- ✓ Την ονομαστική διάμετρο του αγωγού ουδετέρου του καλωδίου (`d_outside, inches`).
- ✓ Τη διάμετρο του αγωγού φάσης (`d_c, inches`).
- ✓ Την τιμή του πάχους της ταινίας θωράκισης του καλωδίου (`Tape thickness`) (T, mils).
- ✓ Το μήκος της γραμμής σε feet (`length`).
- ✓ Ένα πίνακα διαστάσεων 1×3 ο οποίος δηλώνει ποια από τις τρεις φάσεις βρίσκεται στο μονοφασικό καλώδιο. Για τη φάση B η τιμή του πίνακα θα είναι [0 1 0], για τη φάση A η τιμή θα είναι [1 0 0] και για τη φάση C η τιμή θα είναι [0 0 1].

Η συνάρτηση αυτή δίδει ως έξοδο τις τιμές των ακόλουθων παραμέτρων:

- ✓ Τη μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας ανά μήκος γραμμής ($\frac{\mu S}{mile}$). Το δεδομένο αυτό είναι πίνακας διαστάσεων 3×3 (yabc).
 - ✓ Τη μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας με βάση το μήκος γραμμής που δόθηκε στην είσοδο (μS). Το δεδομένο αυτό είναι πάλι πίνακας διαστάσεων 3×3 (yabc_line).
3. Η συνάρτηση με όνομα “admittance_overhead.m” η οποία δίνει τη μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας των εναέριων γραμμών. Ως είσοδο παίρνει τα παρακάτω στοιχεία:
- ✓ Τη συχνότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (f, Hz).
 - ✓ Τον κωδικό του τύπου της γραμμής (Spacing_Id). Η τιμή αυτής της παραμέτρου μπορεί να είναι 500, 505, 510.
 - ✓ Τη διάμετρο των αγωγών φάσης (diameter_phase, inches).
 - ✓ Τη διάμετρο του αγωγού ουδετέρου (diameter_neutral, inches).
 - ✓ Τη διάμετρο του αγωγού φάσης (d_c, inches)
 - ✓ Την πληροφορία ύπαρξης ουδετέρου ή απουσίας του από την γραμμή. Με την τιμή μηδέν δηλώνεται η απουσία και με την τιμή ένα η ύπαρξη (oudeteros).
 - ✓ Τη σειρά εμφάνισης των φάσεων στη γραμμή από αριστερά προς τα δεξιά, σε πίνακα διαστάσεων 1×3 (“seira”). Παραδείγματός χάριν η σειρά B-C-A περιγράφεται με τους αριθμούς [3 1 2] μιας και η φάση A είναι τρίτη, η φάση B πρώτη και η φάση C δεύτερη. Εάν μια φάση απουσιάζει παίρνει τον αριθμό μηδέν.
 - ✓ Το μήκος της γραμμής σε feet (length).

Η συνάρτηση αυτή δίδει ως έξοδο τις τιμές των ακόλουθων παραμέτρων:

- ✓ Τη μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας ανά μήκος γραμμής ($\frac{\mu S}{mile}$). Το δεδομένο αυτό είναι πίνακας διαστάσεων 3×3 (yabc).
 - ✓ Τη μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας με βάση το μήκος γραμμής που δόθηκε στην είσοδο (μS). Το δεδομένο αυτό είναι πάλι πίνακας διαστάσεων 3×3 (yabc_line).
4. Η συνάρτηση με όνομα “spac_id_515.m” η οποία δίνει τη μήτρα αντιστάσεων σειράς των υπόγειων γραμμών τύπου 515. Ως είσοδο παίρνει τα παρακάτω στοιχεία:
- ✓ Τη συχνότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (f, Hz).
 - ✓ Τον κωδικό του τύπου της γραμμής (Spacing_Id). Η τιμή αυτή είναι προεπιλεγμένη στην τιμή 515 για αυτή τη συνάρτηση.
 - ✓ Την τιμή της GMR (feet) που αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.4.2.2 για τον αγωγό φάσης (GMR_of_phase).
 - ✓ Την τιμή της GMR (feet) που αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.4.2.2 για το έλασμα ουδετέρου (GMR_of_neutral_strand).
 - ✓ Την ονομαστική διάμετρο του αγωγού ουδετέρου του καλωδίου (inches) (d_od).
 - ✓ Τη διάμετρο των ελασμάτων του αγωγού ουδετέρου (inches). (d_s)
 - ✓ Την τιμή αντίστασης ($\frac{Ohm}{mile}$) του αγωγού φάσης (r_phase).
 - ✓ Την τιμή αντίστασης ($\frac{Ohm}{mile}$) του ελάσματος ουδετέρου (r_neutral_strand).

- ✓ Το σύνολο ελασμάτων του αγωγού ουδετέρου (k).
- ✓ Τη σειρά εμφάνισης των φάσεων στη γραμμή από αριστερά προς τα δεξιά, σε πίνακα διαστάσεων 1×3 (seira). Παραδειγματός χάριν η σειρά B-C-A περιγράφεται με τους αριθμούς [3 1 2] μιας και η φάση A είναι τρίτη, η φάση B πρώτη και η φάση C δεύτερη.
- ✓ Το μήκος της γραμμής σε feet (length).

Η συνάρτηση αυτή δίδει ως έξοδο τις τιμές των ακόλουθων παραμέτρων:

- ✓ Τη μήτρα αντιστάσεων σειράς ανά μήκος γραμμής ($\frac{\Omega}{mile}$). Το δεδομένο αυτό είναι πίνακας διαστάσεων 3×3 (zabc).
- ✓ Τη μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας με βάση το μήκος γραμμής που δόθηκε στην είσοδο (Ω). Το δεδομένο αυτό είναι πάλι πίνακας διαστάσεων 3×3 (zabc_line).

5. Η συνάρτηση “spac_id_520.m” η οποία δίνει τη μήτρα αντιστάσεων σειράς των υπόγειων γραμμών τύπου 520. Ως είσοδο παίρνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- ✓ Τη συχνότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (f, Hz).
- ✓ Τον κωδικό του τύπου της γραμμής (Spacing_Id). Η τιμή αυτή είναι προεπιλεγμένη στην τιμή 520 γι’ αυτή τη συνάρτηση.
- ✓ Την τιμή της GMR (feet) που αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.4.2.2 για τον αγωγό φάσης (GMR_of_phase).
- ✓ Την τιμή της GMR (feet) που αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.4.2.2 για τον αγωγό ουδετέρου (GMR_of_neutral).
- ✓ Την εξωτερική διάμετρο της ταινίας θωράκισης (inches). (diameter_over_the_shield)
- ✓ Την τιμή αντίστασης ($\frac{Ohm}{mile}$) του αγωγού φάσης (r_phase).
- ✓ Την τιμή αντίστασης ($\frac{Ohm}{mile}$) του αγωγού ουδετέρου (r_neutral).
- ✓ Τη σειρά εμφάνισης των φάσεων στη γραμμή από αριστερά προς τα δεξιά, σε πίνακα διαστάσεων 1×3 (seira). Παραδειγματός χάριν η σειρά B-C-A περιγράφεται με τους αριθμούς [3 1 2] μιας και η φάση A είναι τρίτη, η φάση B πρώτη και η φάση C δεύτερη.
- ✓ Το μήκος της γραμμής σε feet (length).
- ✓ Την τιμή του πάχους της ταινίας θωράκισης του καλωδίου (Tape thickness). (T, mils)

Η συνάρτηση αυτή δίδει ως έξοδο τις τιμές των ακόλουθων παραμέτρων:

- ✓ Τη μήτρα αντιστάσεων σειράς ανά μήκος γραμμής ($\frac{\Omega}{mile}$). Το δεδομένο αυτό είναι πίνακας διαστάσεων 3×3 (zabc).
- ✓ Τη μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας με βάση το μήκος γραμμής που δόθηκε στην είσοδο (Ω). Το δεδομένο αυτό είναι πάλι πίνακας διαστάσεων 3×3 (zabc_line).

6. Η συνάρτηση “overhead_lines.m” η οποία δίνει τη μήτρα αντιστάσεων σειράς των εναέριων γραμμών. Ως είσοδο παίρνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- ✓ Τη συχνότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (f, Hz).
- ✓ Την τιμή της GMR (feet) που αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.4.2.1 για τον αγωγό φάσης (GMR_phase).
- ✓ Την τιμή αντίστασης ($\frac{Ohm}{mile}$) του αγωγού φάσης (resist_phase).
- ✓ Τον κωδικό του τύπου της γραμμής (Spacing_Id). Η τιμή αυτής της παραμέτρου μπορεί να είναι 500, 505, 510.

- ✓ Την τιμή της GMR (feet) που αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.4.2.1 για τον αγωγό ουδετέρου (GMRneutral).
- ✓ Την τιμή αντίστασης $\left(\frac{\Omega \text{m}}{\text{mile}}\right)$ του αγωγού ουδετέρου (resist_neutral).
- ✓ Το μήκος της γραμμής σε feet (length).
- ✓ Την πληροφορία ύπαρξης ουδετέρου ή απουσίας του από την γραμμή. Με την τιμή μηδέν δηλώνεται η απουσία και με την τιμή ένα η ύπαρξη (oudeteros).
- ✓ Τη σειρά εμφάνισης των φάσεων στη γραμμή από αριστερά προς τα δεξιά, σε πίνακα διαστάσεων 1×3 (seira). Παραδειγματός χάριν η σειρά B-C-A περιγράφεται με τους αριθμούς [3 1 2] μιας και η φάση A είναι τρίτη, η φάση B πρώτη και η φάση C δεύτερη. Εάν μια φάση απουσιάζει παίρνει τον αριθμό μηδέν.

Η συνάρτηση αυτή δίδει ως έξοδο τις τιμές των ακόλουθων παραμέτρων:

- ✓ Τη μήτρα αντιστάσεων σειράς ανά μήκος γραμμής $\left(\frac{\Omega}{\text{mile}}\right)$. Το δεδομένο αυτό είναι πίνακας διαστάσεων 3×3 (zabc).
- ✓ Τη μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας με βάση το μήκος γραμμής που δόθηκε στην είσοδο (Ω). Το δεδομένο αυτό είναι πάλι πίνακας διαστάσεων 3×3 (zabc_line).

7. Η συνάρτηση “metasximatistes.m” η οποία δίνει τις μήτρες που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις (3.56)-(3.58) των μετασχηματιστών. Ως είσοδο παίρνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- ✓ Την τάση του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή (Volt).
- ✓ Την τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή (Volt).
- ✓ Τον τύπο της συνδεσμολογίας του πρωτεύοντος (primary_id):
 - Τιμή μηδέν για γειωμένο αστέρα
 - Τιμή ένα για αγείωτο τρίγωνο
- ✓ Τον τύπο της συνδεσμολογίας του δευτερεύοντος (secondary_id):
 - Τιμή μηδέν για γειωμένο αστέρα
 - Τιμή ένα για αγείωτο τρίγωνο
- ✓ Την ανά μονάδα σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή για κάθε φάση. (Zt1, Zt2, Zt3).
- ✓ Την ισχύ του μετασχηματιστή για κάθε φάση σε kVA (S1, S2, S3).

Η συνάρτηση αυτή δίδει ως έξοδο τις τιμές των ακόλουθων παραμέτρων:

- ✓ Τους διαστάσεων 3×3 πίνακες που περιλαμβάνονται στις εξισώσεις (3.56)-(3.58):
 - $[a_t]$ και $[b_t]$ που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της τάσης του πρωτεύοντος όταν είναι γνωστή η τάση και το ρεύμα του δευτερεύοντος σύμφωνα με την εξίσωση (3.56).
 - $[c_t]$ και $[d_t]$ που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του εξερχόμενου ρεύματος του πρωτεύοντος συναρτήσει της τάσης και του ρεύματος του δευτερεύοντος σύμφωνα με την εξίσωση (3.57).
 - $[A_t]$ και $[B_t]$ που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της τάσης του δευτερεύοντος από την τάση και το ρεύμα του πρωτεύοντος σύμφωνα με την εξίσωση (3.58).

8. Η συνάρτηση “regulators_function.m” η οποία υπολογίζει τις απαιτούμενες λήψεις των ρυθμιστών και παρέχει τους αντίστοιχους 3×3 πίνακες για τις εξισώσεις (3.92)-(3.94). Ως είσοδο παίρνει τα στοιχεία τα οποία διαβάστηκαν για τον ρυθμιστή στην Ενότητα 6.2.2.2 από το φύλλο “kladoi” του excel εισαγωγής στοιχείων. Η δομές “komvos” και “klados” εισάγονται στη συγκεκριμένη συνάρτηση αυτούσιες μιας και εκεί βρίσκονται τόσο οι τάση του πρωτεύοντος του ρυθμιστή όσο και οι παράμετροι ρύθμισής του αντίστοιχα. Η συνάρτηση αυτή δίδει ως έξοδο τις τιμές των ακόλουθων παραμέτρων:

- ✓ $[a_{reg}]$ και $[b_{reg}]$ που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της τάσης του πρωτεύοντος του ρυθμιστή όταν είναι γνωστή η τάση και το ρεύμα του δευτερεύοντος σύμφωνα με την εξίσωση (3.92).
- ✓ $[c_{reg}]$ και $[d_{reg}]$ που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του εξερχόμενου ρεύματος του πρωτεύοντος του ρυθμιστή συναρτήσει της τάσης και του ρεύματος του δευτερεύοντος σύμφωνα με την εξίσωση (3.93).
- ✓ $[A_{reg}]$ και $[B_{reg}]$ που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της τάσης του δευτερεύοντος του ρυθμιστή από την τάση και το ρεύμα του πρωτεύοντος σύμφωνα με την εξίσωση (3.94).

9. Η συνάρτηση “emplan_main.m” η οποία αποτελεί τη συνάρτηση εκτέλεσης του αλγορίθμου και ως είσοδο δέχεται, προαιρετικά, τα παρακάτω στοιχεία:

- ✓ Τη μεταβλητή “ignore_admittance” η οποία καθορίζει το εάν θα αγνοηθεί ή όχι η εγκάρσια αγωγιμότητα των γραμμών.
- ✓ Τη μεταβλητή “ignore_regulators” η οποία καθορίζει το εάν θα ληφθούν υπόψη οι ρυθμιστές στην ανάλυση ροής ισχύος.

Η έξοδος της συγκεκριμένης συνάρτησης περιλαμβάνει αρκετά στοιχεία μιας και αυτά υπολογίζονται για την περίπτωση που ζητηθούν από το χρήστη μέσω του γραφικού περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα τα στοιχεία εξόδου είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Η μεταβλητή “Indices_of_Buses” που είναι πίνακας του οποίου οι στήλες περιλαμβάνουν διαδοχικά το όνομα του ζυγού και τους δείκτες l, m, n. Ο αριθμός των γραμμών του συγκεκριμένου πίνακα είναι φυσικά όσος και ο αριθμός των ζυγών του δικτύου.
- ✓ Η μεταβλητή “Taseis_per_unit_output” η οποία περιέχει τις ανά μονάδα τιμές της τάσης όλων των ζυγών του δικτύου. Ο συγκεκριμένος πίνακας είναι έξι στηλών και εμφανίζει διαδοχικά το μέτρο της κάθε φάσης και ύστερα την τιμή της γωνίας της φάσης σε μοίρες.
- ✓ Η μεταβλητή “Reumata_ekserxomena” που έχει τα εξερχόμενα ρεύματα όλων των ζυγών.
- ✓ Η μεταβλητή “Reumata_eiserxomena” που έχει τα εισερχόμενα ρεύματα όλων των ζυγών.
- ✓ Η μεταβλητή “Taseis_no_per_unit_output” η οποία εμπεριέχει τις τιμές της τάσης όλων των ζυγών του δικτύου σε Volt.
- ✓ Η μεταβλητή “Grammes_matrices” η οποία έχει τις μήτρες αντίστασης σειράς και εγκάρσιας αγωγιμότητας για όλους τους τύπους γραμμών του δικτύου.

- ✓ Η μεταβλητή “Power_Loss” η οποία περιέχει όλες τις απώλειες ισχύος όλων των κλάδων.
 - ✓ Η μεταβλητή “RBFstr” η οποία έχει αποθηκευμένη την RBF σειρά του δικτύου, όπως αυτή περιγράφηκε στην Ενότητα 2.3.
 - ✓ Η μεταβλητή “Power_in” η οποία περιέχει τις εισερχόμενες ισχύς των ζυγών.
 - ✓ Η μεταβλητή “Power_out” η οποία περιέχει τις εξερχόμενες ισχύς των ζυγών.
 - ✓ Η μεταβλητή “χρονοι_str” στην οποία έχουν αποθηκευτεί οι χρόνοι εκτέλεσης διάφορων κομματιών του λογισμικού, όπως η διεργασία του διαβάσματος, η διεργασία της κύριας εκτέλεσης του αλγορίθμου κλπ.
 - ✓ Η μεταβλητή “statistics_of_execution” η οποία περιέχει στατιστικά για το σφάλμα της κάθε επανάληψης που έγινε μέχρι την σύγκλιση του αλγορίθμου.
 - ✓ Η μεταβλητή “load_current_str” η οποία περιέχει τα ρεύματα που διαρρέουν τα φορτία.
 - ✓ Τέλος υπάρχει και η μεταβλητή εξόδου “load_power_str” στην οποία έχει αποθηκευτεί η μιγαδική ισχύς που απορροφούν τα φορτία.
10. Η συνάρτηση “emplan_gui.m ” η οποία φροντίζει να απεικονίζονται όλα τα παραπάνω, να λαμβάνει τις οδηγίες από το χρήστη μέσω των κατάλληλων κουμπιών και να τις υλοποιεί.
11. Η συνάρτηση “about.m” η οποία συνδέεται με το αντίστοιχο πλήκτρο της “emplan_gui” και απεικονίζει το κατάλληλο about box εφόσον πατηθεί το αντίστοιχο κουμπί.

Στον Πίνακα 6.1 δίνεται το πλήθος γραμμών κώδικα της κάθε συνάρτησης. Να σημειωθεί ότι σε αυτές τις γραμμές συμπεριλαμβάνεται και η χρήση σχολίων που κάνουν πιο εύκολη την κατανόηση του κώδικα.

Πίνακας 6.1: Πλήθος γραμμών συναρτήσεων λογισμικού.

Όνομα συνάρτησης	Αριθμός γραμμών κώδικα
admit_spacid515.m	36
admit_spacid520.m	32
admittance_overhead.m	211
spac_id_515.m	118
spac_id_520.m	67
overhead_lines.m	165
metasximatistes.m	143
regulators_function.m	117
emplan_main.m	1451
emplan_gui.m	1539
about.m	81
Σύνολο:	3960

6.2.2.6 Απόδοση και υπολογιστικοί πόροι

Για τον υπολογισμό της απόδοσης ενός αλγορίθμου και των υπολογιστικών πόρων που απαιτεί για την εκτέλεσή του, υπάρχουν πολλές θεωρητικές και ακριβείς μεθοδολογίες. Σκοπός όμως αυτής της ενότητας δεν είναι η ακριβής μέτρηση, αλλά η απόκτηση μιας τάξης μεγέθους του συνολικού χρόνου εκτέλεσης και του χώρου που καταλαμβάνουν οι μεταβλητές του λογισμικού.

Επομένως επιλέχθηκε να γίνει μέτρηση των συγκεκριμένων τιμών με τα εργαλεία που έχει το MATLAB και να υπάρξει μεγαλύτερο δείγμα. Συγκεκριμένα έγινε επανάληψη 1000 εκτελέσεων (μέσω σχετικού script αρχείου) και από τα συνολικά αποτελέσματα εξήχθησαν οι μέσοι όροι των αντίστοιχων μεγεθών.

Το δίκτυο το οποίο επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι το μεγαλύτερο το οποίο κλήθηκε να εκτελεστεί από το συγκεκριμένο λογισμικό. Πρόκειται για το δίκτυο 123 ζυγών της IEEE, το οποίο περιγράφεται πλήρως στην Ενότητα 7.4.

Ο ολικός χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου χωρίζεται σε τρία μέρη:

1. Στο χρόνο διαβάσματος των δεδομένων από το αρχείο excel.
2. Στο χρόνο εκτέλεσης της ανάλυσης ροής φορτίου και τον υπολογισμό όλων των ρευμάτων και των τάσεων
3. Στο χρόνο προετοιμασίας όλων των αποτελεσμάτων που μπορεί να ζητηθούν από το χρήστη, όπως αυτά περιγράφηκαν στην Ενότητα 6.2.2.4.

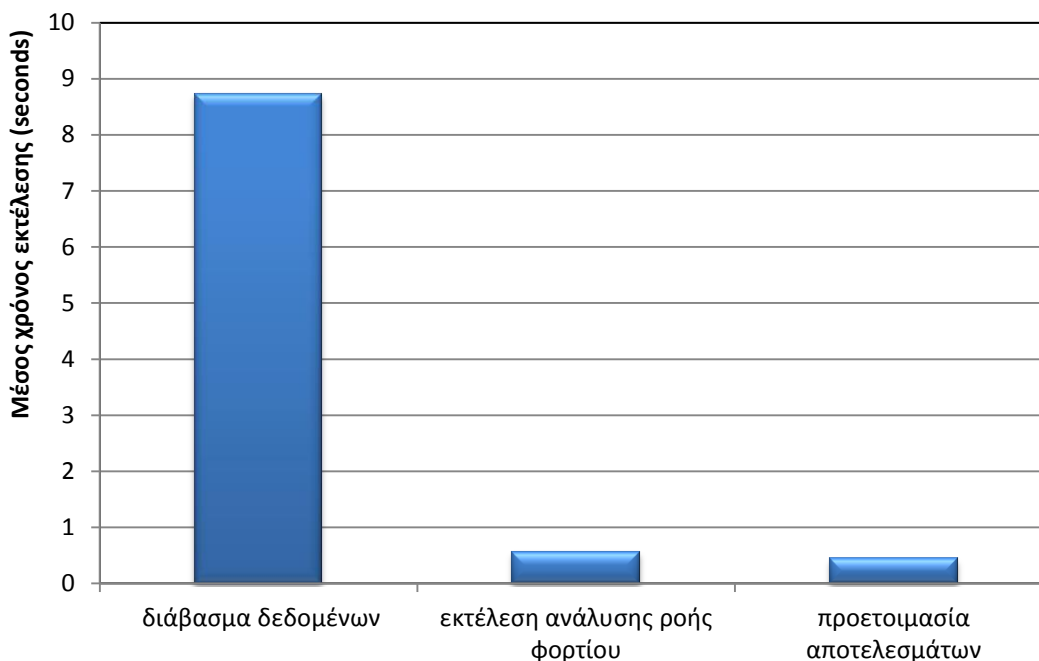
Οι εκτελέσεις της προσομοίωσης αυτή έγιναν σε υπολογιστή με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- ✓ Λογισμικό Windows 7, 64-bit
- ✓ Intel Core 2 Duo, 2.93 GHz, 4 GB RAM
- ✓ MATLAB R2009b

Από τις 1000 εκτελέσεις της συγκεκριμένης ανάλυσης, προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.2 και στο Σχήμα 6.14.

Πίνακας 6.2: Στατιστική ανάλυση χρόνων διεργασιών λογισμικού για το IEEE 123 bus test.

Διεργασία	Μέση τιμή (sec)	Μέγιστη τιμή (sec)	Ελάχιστη τιμή (sec)	Διακύμανση (sec)
Διάβασμα Δεδομένων	8.7355	10.7743	8.6582	0.0229
Εκτέλεση ανάλυσης ροής φορτίου	0.5633	0.9309	0.5491	$3.6562 \cdot 10^{-4}$
Προετοιμασία αποτελεσμάτων	0.4462	0.7922	0.4431	$2.8482 \cdot 10^{-4}$



Σχήμα 6.14: Μέσος χρόνος εκτέλεσης διεργασιών λογισμικού για το IEEE 123 bus test.

Εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί ότι η είσοδος και η έξοδος στο συγκεκριμένο λογισμικό, εξαιτίας του ότι διαβάζονται τα δεδομένα από αρχείο excel, είναι η πιο χρονοβόρα διεργασία. Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου ανάλυσης ροής φορτίου ενός μεγάλου σε έκταση δικτύου όπως αυτό που μελετήθηκε, μπορεί να χαρακτηριστεί ως ικανοποιητικά μικρός.

Τέλος, σημαντικό είναι να μελετηθεί ο χώρος που καταλαμβάνει ο αλγόριθμος για την αποθήκευση των μεταβλητών του. Αθροίζοντας όλες τις μεταβλητές που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος και χωρίς να ληφθούν υπόψη οι μεταβλητές του γραφικού περιβάλλοντος, υπολογίστηκε ότι συνολικά όλες οι καταλαμβάνουν 7.8697 Mbyte χώρου. Η ποσότητα αυτή της μνήμης που δεσμεύεται για τις μεταβλητές είναι φυσιολογική και δεν θέτει κανένα περιορισμό στα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα.

6.3 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Οι δυνατότητες επέκτασης ενός λογισμικού ανάλυσης ροής ισχύος είναι πολλές. Το εν λόγω λογισμικό θα μπορούσε να επεκταθεί ώστε να συμπεριλάβει στο εσωτερικό του και εναλλακτικές μεθόδους ανάλυσης ροής ισχύος. Οι τροποποιημένες μέθοδοι της Backward and Forward Sweep που περιγράφηκαν στην Ενότητα 4.3 θα μπορούσαν να εισαχθούν στην καρτέλα των παραμέτρων ώστε ο χρήστης να μπορέσει να συγκρίνει και να εξάγει τις διαφορές στα αποτελέσματα μεταξύ των μεθόδων αυτών. Επίσης ένα βήμα παραπέρα θα ήταν η προσθήκη και άλλων πιο εξειδικευμένων στοιχείων που συνδέονται στους ζυγούς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ασύμμετρη φόρτιση των επαγωγικών κινητήρων και η επίδρασή τους στη λειτουργία του δικτύου.

Επιπλέον η αναγνώριση ενός δικτύου μη ακτινικής τοπολογίας, θα μπορούσε να οδηγή στην εκτέλεση του αλγορίθμου Newton-Raphson ή της μεθόδου Gauss-Siedel των δικτύων μεταφοράς, τα οποία δίνουν αποτελέσματα παραπλήσια των πραγματικών σε τέτοιου είδους περιπτώσεις.

Τέλος η μεταφορά της εφαρμογής σε άλλη γλώσσα προγραμματισμού, η μετατροπή της σε εκτελέσιμο αρχείο που μπορεί να εκτελείται ως standalone εφαρμογή χωρίς την προϋπόθεση εγκατάστασης του MATLAB καθώς και η λειτουργία του σε διαδικτυακή εφαρμογή ανοιχτού κώδικα, είναι στοιχεία που πρόκειται να προσφέρουν στη διάδοση και στην ανάπτυξη του συγκεκριμένου αλγορίθμου, αλλά και του κλάδου του ηλεκτρολόγου μηχανικού γενικότερα, τόσο σε θέματα εκπαίδευσης όσο και σε θέματα σχεδίασης, ανάπτυξης και επέκτασης του δικτύου.

Επιπλέον αναφορά πάνω στα συγκεκριμένα θέματα θα γίνει στην Ενότητα 8.2 όπου θα συζητηθούν τυχόν επεκτάσεις της εργασίας συνολικά.

6.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] Γ. Γεωργίου, Χ. Ξενοφώντος, “Εισαγωγή στη MATLAB,” [Online]. Διαθέσιμο: <http://www2.ucy.ac.cy/~georgios/bookfiles/MATLABbook.pdf>, προσπελάστηκε τον Ιούλιο του 2011.
- [6.2] “MathWorks – MATLAB and Simulink for Technical Computing,” [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.mathworks.com>, προσπελάστηκε τον Ιούλιο 2010.
- [6.3] R. Zimmerman, *Comprehensive Distribution Power Flow: Modeling, Formulation, Solution Algorithms and Analysis*, Ph.D. Dissertation, Cornell University, Jan. 1995, pp. 28-30.
- [6.3] W. Kersting, *Distribution System Modeling Analysis*, New Mexico: CRC Press, 2002, pp. 303-309.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για να επαληθευτεί η ορθότητα ενός λογισμικού ανάλυσης ροής φορτίου είναι απαραίτητη η εφαρμογή του σε δίκτυα τα οποία έχουν ήδη αναλυθεί και έχουν επιβεβαιωθεί τα αποτελέσματά τους από κάποια έγκυρη πηγή. Η IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) έχει ήδη συστήσει μια επιτροπή για αυτό ακριβώς το σκοπό και έχει κοινοποιήσει μια σειρά από επαληθευμένες περιπτώσεις ανάλυσης ροής φορτίου ακτινικών ασύμμετρων δικτύων διανομής διαφόρων μεγεθών. Τα δίκτυα αυτά, τα οποία καλούνται και test cases, χρησιμοποιούνται από τους σχεδιαστές παρόμοιων λογισμικών ώστε να ελέγξουν τα αποτελέσματά τους και να βελτιώσουν τυχόν λάθη κατά τον προγραμματισμό ή τη μοντελοποίηση των στοιχείων του δικτύου.

Η ανάλυση των συγκεκριμένων δικτύων ήταν μια πρόκληση για το λογισμικό που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Για να επαληθευθεί ο τρόπος λειτουργίας του επιλέχθηκαν τρία δίκτυα από τα δημοσιευμένα της IEEE [7.1]:

- Το δίκτυο 4 ζυγών της IEEE το οποίο αποτελεί μια απλή περίπτωση, χωρίς διακλαδώσεις, δικτύου με ένα μόνο φορτίο και ένα μετασχηματιστή υποβιβασμού. Το ίδιο περίπου δίκτυο συναντάται με κάποιες μικρές παραλλαγές στη βιβλιογραφία [7.2] και έτσι η ανάλυσή του ήταν αναμενόμενο ότι θα ήταν αρκετά ακριβής. Ήταν λοιπόν μια ευκαιρία εκτός από την ανάλυση του συγκεκριμένου δικτύου να προστεθούν και τροποποιημένες εκδοχές του, οι οποίες προσφέρουν κάτι καινούριο στην όλη ανάλυση, για περαιτέρω έλεγχο του αλγορίθμου.
- Το δίκτυο 13 ζυγών της IEEE το οποίο αποτελεί μια πιο σύνθετη περίπτωση και καθοριστικής σημασίας για την επαλήθευση του αλγορίθμου. Περιέχει μεγάλη ποικιλία τόσο στις γραμμές όσο και στα φορτία όπως θα αναλυθεί στην Ενότητα 7.3.1.
- Τέλος το δίκτυο 123 ζυγών της IEEE επιλέχθηκε ως ένα μεγάλο μεγέθους δίκτυο για την επαλήθευση της λειτουργίας του λογισμικού και για την απόδειξη της ανταπόκρισής του σε αρκετά πολύπλοκα και ποικιλόμορφα δίκτυα.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η παρουσίαση των δεδομένων του κάθε δικτύου και στη συνέχεια θα παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής φορτίου που εφαρμόστηκε σε αυτό. Επίσης όταν κρίνεται αναγκαίο θα δίνονται και τροποποιημένες εκδοχές ούτως ώστε να εξάγονται διάφορα συμπεράσματα. Τέλος, μετά την ανάλυση του κάθε δικτύου θα επισημαίνονται τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν τόσο από το εκάστοτε δίκτυο όσο και από τις τροποποιημένες εκδοχές του.

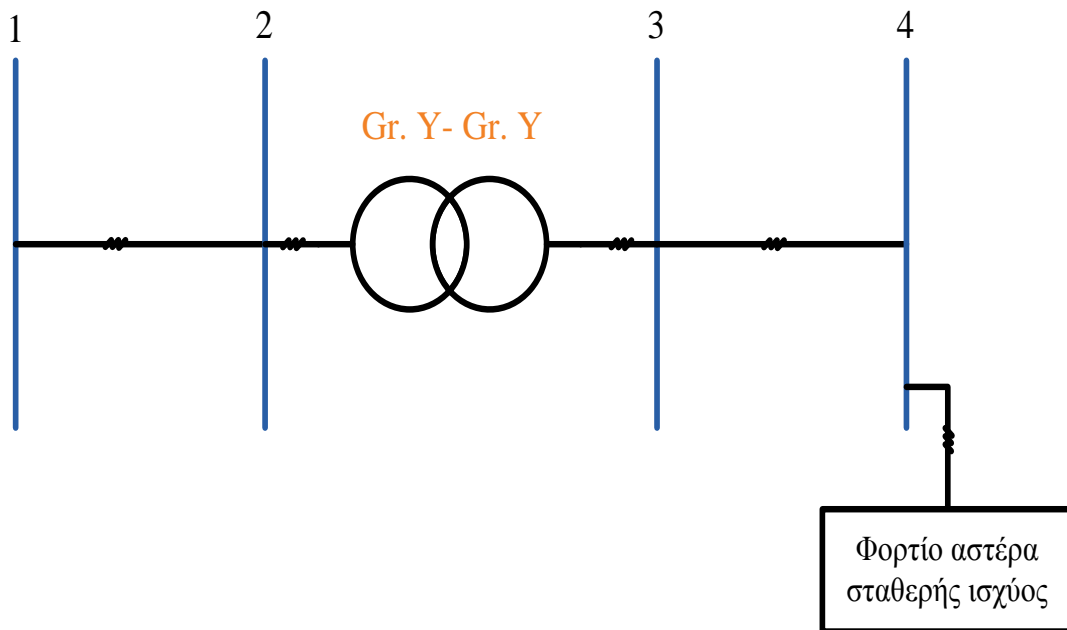
7.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 4 ΖΥΓΩΝ ΤΗΣ IEEE

7.2.1 Δεδομένα του συστήματος

Το δίκτυο αυτό περιλαμβάνει 4 ζυγούς και δεν έχει διακλαδώσεις. Το μοναδικό εγκατεστημένο φορτίο βρίσκεται στο ζυγό 4 και είναι σταθερής ισχύος (S constant). Το συγκεκριμένο test case της IEEE περιλαμβάνει ουσιαστικά και άλλες εκδοχές του συστήματος αυτού με την ύπαρξη διαφορετικής συνδεσμολογίας μετασχηματιστή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση θα μελετηθεί η εκδοχή του συστήματος με μετασχηματιστή γειωμένου αστέρα - γειωμένου αστέρα.

Επίσης το συγκεκριμένο σύστημα εμφανίζεται τόσο με εκδοχή συμμετρικού φορτίου όσο και με αυτή του ασύμμετρου. Στο σύστημα όμως που θα παρουσιαστεί έγινε επιλογή του ασύμμετρου φορτίου, ώστε να αποδειχθεί η ικανότητα του λογισμικού να αναλύει τα ασύμμετρα δίκτυα.

Στο Σχήμα 7.1 φαίνεται το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου. Εύκολα μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι παντού το δίκτυο είναι τριφασικό και δεν έχει απουσία κάποια φάσης σε κάποιο σημείο του δικτύου. Σε επόμενα δίκτυα παρουσιάζονται τέτοιου είδους περαιτέρω ασυμμετρίες και ανομοιομορφίες του δικτύου.



Σχήμα 7.1: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 4 ζυγών IEEE.

Ακολούθως παρουσιάζονται σε πίνακες τα δεδομένα του δικτύου. Ο Πίνακας 7.1 παρουσιάζει τα δεδομένα του μετασχηματιστή που είναι εγκατεστημένος για τον υποβιβασμό της τάσης του δικτύου. Στον Πίνακα 7.2 παρατίθενται τα δεδομένα των γραμμών με βάση τα οποία θα υπολογιστούν οι μήτρες αντιστάσεων σειράς και εγκάρσιων αγωγιμοτήτων όπως περιγράφηκαν στις Ενότητες 3.4.2 και 3.4.3, αντιστοίχα. Να σημειωθεί ότι οι γραμμές του δικτύου είναι όλες εναέριες και λόγω και του μικρού μήκους δεν είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν και οι μήτρες εγκάρσιων αγωγιμοτήτων στη μελέτη. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα της IEEE τις συγκεκριμένες μήτρες. Σε κάθε περίπτωση, για να θεωρηθεί πλήρης η μελέτη, θα υπολογιστούν κανονικά και οι συγκεκριμένες μήτρες.

Τέλος στον Πίνακα 7.3 παρουσιάζονται τα στοιχεία των εγκατεστημένων φορτίων του δικτύου. Υπάρχει μόνο ένα εγκατεστημένο φορτίο και βρίσκεται στο ζυγό 4 του δικτύου. Ο τύπος του φορτίου είναι σταθερής ισχύος και η συνδεσμολογία του γειωμένου αστέρα. Στις τροποποιημένες μεθόδους που θα παρουσιαστούν στην Ενότητα 7.2.3 θα αναλυθούν περιπτώσεις σύνδεσης διαφορετικών φορτίων.

Πίνακας 7.1: Δεδομένα μετασχηματιστή δικτύου 4 ζυγών IEEE.

Τοποθεσία μετασχηματιστή	Συνδεσμολογία	kVA	kVLL-high	kVLL-low	R %	X %
Μεταξύ ζυγών 2 και 3	Γειωμένου Αστέρα-Γειωμένου Αστέρα	6,000	12.47	4.16	1.0	6.0

Πίνακας 7.2: Δεδομένα γραμμών δικτύου 4 ζυγών IEEE.

Τοποθεσία γραμμής	Τύπος αγωγού φάσης	Τύπος αγωγού ουδετέρου	Spacing Id	Διαδοχή φάσεων	Μήκος γραμμής (feet)
Μεταξύ των ζυγών 1 και 2	336,400 26/7	4/0 6/1 ACSR	500	A B C N	2000
Μεταξύ των ζυγών 3 και 4	336,400 26/7	4/0 6/1 ACSR	500	A B C N	2500

Πίνακας 7.3: Δεδομένα εγκατεστημένων φορτίων δικτύου 4 ζυγών IEEE.

Τοποθεσία φορτίου	Συνδεσμολογία φορτίου	Τύπος φορτίου	Ονομαστική μιγαδική ισχύς S (kW+j·kVAr)		
			Φάση A	Φάση B	Φάση C
Ζυγός 4	Γειωμένου Αστέρα	Σταθερής Ισχύος	1275+ j·790.714	1800+ j·871.78	2375+ j·780.624

7.2.2 Αποτελέσματα

Στην Ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την εκτέλεση της ανάλυσης ροής φορτίου του δικτύου 4 ζυγών της IEEE. Αρχικά παρουσιάζονται οι μήτρες αντιστάσεων σειράς και εγκάρσιας αγωγιμότητας της γραμμής που ορίστηκε στον Πίνακα 7.2. Να σημειωθεί ότι οι δύο γραμμές είναι του ίδιου τύπου με διαφορετικό μόνο το μήκος της καθεμιάς, επομένως η τιμή των αντίστοιχων μητρών θα είναι ίση σε ανά απόσταση μονάδες, δηλαδή $\frac{\Omega}{mile}$ και $\frac{\mu S}{mile}$, αντίστοιχα. Επομένως, προκύπτει ότι:

$$[Z_{ABC}] = \begin{bmatrix} 0.4576 + 1.0781i & 0.1560 + 0.5017i & 0.1535 + 0.3849i \\ 0.1560 + 0.5017i & 0.4666 + 1.0482i & 0.1580 + 0.4237i \\ 0.1535 + 0.3849i & 0.1580 + 0.4237i & 0.4615 + 1.0651i \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{mile}}$$

$$[Y_{abc}] = \begin{bmatrix} 5.6765i & -1.8319i & -0.6982i \\ -1.8319i & 5.9809i & -1.1645i \\ 0.6982i & -1.1645i & 5.3971i \end{bmatrix} \frac{\mu S}{\text{mile}}$$

Στον Πίνακα 7.4 παρουσιάζονται οι τιμές των δεικτών των ζυγών του δικτύου, όπως αυτές ορίστηκαν στην Ενότητα 2.3. Εν συνεχεία παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.5 οι τιμές τάσης των ζυγών και για τις τρεις φάσεις σε μέτρο (Volt) και γωνία (μοίρες). Επίσης στον Πίνακα 7.6 παρατίθεται η τιμή των εισερχόμενων ρευμάτων των ζυγών του δικτύου πάλι κατά μέτρο και γωνία. Τέλος στον Πίνακα 7.7 παρουσιάζονται οι απώλειες ενεργού ισχύος των γραμμών για την κάθε φάση, γεγονός το οποίο θα φανεί αρκετά χρήσιμο στα συμπεράσματα της Ενότητας 7.2.5.

Πίνακας 7.4: Δείκτες ζυγών του δικτύου 4 ζυγών IEEE.

Ζυγός	Δείκτες		
	l	m	n
1	1	1	0
2	1	1	1
3	1	1	2
4	1	1	3

Πίνακας 7.5: Τάση ζυγών του δικτύου 4 ζυγών IEEE.

Ζυγός	Τάση Φάσης A		Τάση Φάσης B		Τάση Φάσης C	
	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)
1	7199.572	0	7199.361	-120	7199.919	120
2	7163.732	-0.14	7110.279	-120.18	7082.421	119.26
3	2305.496	-2.26	2254.578	-123.63	2202.97	114.79
4	2174.95	-4.12	1929.703	-126.8	1832.922	102.85

Πίνακας 7.6: Εισερχόμενα ρεύματα ζυγών του δικτύου 4 ζυγών IEEE.

Ζυγός	Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης A		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης B		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
1	230.06	-35.91	345.743	-152.64	455.002	84.65
2	230.073	-35.91	345.752	-152.64	455.011	84.65
3	689.666	-35.91	1036.426	-152.64	1363.94	84.65
4	689.671	-35.91	1036.429	-152.64	1363.942	84.65

Πίνακας 7.7: Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου 4 ζυγών IEEE.

Από Ζυγό	Προς Ζυγό	Απώλειες Φάσης A (kW)	Απώλειες Φάσης B (kW)	Απώλειες Φάσης C (kW)
1	2	4.304	21.682	19.915
2	3	13.719	30.982	53.657
3	4	48.555	243.407	223.606
Σύνολο:		66.578	296.071	297.178

7.2.3 Τροποποιημένες εκδοχές του συστήματος

Η ιδέα της προσομοίωσης τροποποιημένων εκδοχών του ήδη δημοσιευμένου δικτύου προήλθε από την ανάγκη επαλήθευσης δικτύων με διαφορετικού τύπου φορτία, αλλά με την απλότητα της δομής του συγκεκριμένου δικτύου. Δεν είναι άλλωστε τυχαίο ότι τα παραδείγματα τα οποία παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία [7.2] φέρουν την ίδια ακριβώς μορφή και μπορούν να χρησιμοποιούνται στη διαδικασία βήμα προς βήμα εκτέλεσης αλγορίθμων για εκπαιδευτικούς λόγους. Επομένως η δημιουργία τροποποιημένων εκδοχών προσθέτει ένα επιπλέον εργαλείο στον έλεγχο και στην αποσφαλμάτωση (debugging) ενός λογισμικού ανάλυσης ροής φορτίου.

Οι τροποποιημένες αυτές εκδοχές χρησιμοποιούν φορτία ίδιας συνδεσμολογίας και ίδιας ονομαστικής μιγαδικής ισχύος κάθε φάσης με το αρχικό δίκτυο, αλλά διαφορετικού τύπου. Συγκεκριμένα ενώ το φορτίο του πρότυπου δικτύου ήταν σταθερής ισχύος, στις τροποποιημένες εκδοχές μελετάται το ίδιο δίκτυο με φορτίο σταθερής αντίστασης και σταθερού ρεύματος. Αναλυτικά τα στοιχεία των συγκεκριμένων φορτίων παρουσιάζονται και στον Πίνακα 7.8.

Πίνακας 7.8: Δεδομένα φορτίων τροποποιημένων εκδοχών δικτύου 4 ζυγών IEEE.

Τροποποιημένη εκδοχή	Συνδεσμολογία φορτίου	Τύπος φορτίου	Ονομαστική μιγαδική ισχύς S (kW+j·kVAr)		
			Φάση A	Φάση B	Φάση C
1	Γειωμένου Αστέρα	Σταθερής Αντίστασης	1275+ j·790.714	1800+ j·871.78	2375+ j·780.624
2	Γειωμένου Αστέρα	Σταθερού Ρεύματος	1275+ j·790.714	1800+ j·871.78	2375+ j·780.624

Να σημειωθεί ότι με τους αριθμούς 1 και 2 που φαίνονται στον Πίνακα 7.8 θα συμβολίζονται από εδώ και στο εξής οι δύο τροποποιημένες εκδοχές, ούτως ώστε να μπορούν να διαχωρίζονται τα αποτελέσματα που θα δοθούν στην επόμενη ενότητα.

7.2.4 Αποτελέσματα τροποποιημένων εκδοχών

Οι τροποποιημένες εκδοχές δεν έχουν αλλάξει κάτι ως προς την τοπολογία του δικτύου ή ως προς τις ιδιότητες των γραμμών. Επομένως δεν αλλάζει κάτι στον πίνακα 7.4 ή στις μήτρες των γραμμών που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 7.3.2. Αντιθέτως, όλες οι τάσεις των ζυγών, τα ρεύματα και ως εκ τούτου και η ισχύς των ζυγών είναι πλέον διαφορετικά. Άλλωστε η προσομοίωση αυτή θα δώσει τη δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων πάνω στην αλλαγή της συμπεριφοράς του δικτύου σε διαφορετικού τύπου φορτία.

Ακολούθως παρατίθενται τα αποτελέσματα των τροποποιημένων εκδοχών:

Πίνακας 7.9: Τάση ζυγών τροποποιημένης εκδοχής 1 του δικτύου 4 ζυγών IEEE.

Ζυγός	Τάση Φάσης A		Τάση Φάσης B		Τάση Φάσης C	
	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)
1	7199.536	0	7199.11	-120	7200.164	120
2	7162.39	-0.11	7138.802	-120.19	7133.001	119.47
3	2320.627	-1.86	2301.381	-122.59	2286.192	116.37
4	2183.922	-3.36	2081.898	-125.33	2065.952	109.12

Πίνακας 7.10: Τάση ζυγών τροποποιημένης εκδοχής 2 του δικτύου 4 ζυγών IEEE.

Ζυγός	Τάση Φάσης A		Τάση Φάσης B		Τάση Φάσης C	
	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)
1	7199.725	0	7199.251	-120	7199.678	120
2	7160.801	-0.12	7128.776	-120.2	7118.365	119.4
3	2312.938	-2.05	2284.786	-122.96	2262.069	115.85
4	2170.014	-3.68	2028.58	-125.99	1999.471	107.22

Πίνακας 7.11: Εισερχόμενα ρεύματα ζυγών τροποποιημένης εκδοχής 1.

Ζυγός	Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης A		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης B		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
1	189.43	-35.15	240.79	-151.17	298.68	90.93
2	189.45	-35.15	240.8	-151.17	298.69	90.92
3	567.88	-35.15	721.81	-151.17	895.35	90.92
4	567.89	-35.15	721.81	-151.17	895.35	90.92

Πίνακας 7.12: Εισερχόμενα ρεύματα ζυγών τροποποιημένης εκδοχής 2.

Ζυγός	Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης A		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης B		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
1	208.33	-35.46	277.78	-151.83	347.23	1
2	208.34	-35.46	277.79	-151.83	347.24	2
3	624.53	-35.46	832.71	-151.83	1040.89	3
4	624.54	-35.47	832.72	-151.83	1040.9	4

Πίνακας 7.13: Απώλειες ενεργού ισχύος τροποποιημένης εκδοχής 1.

Από Ζυγό	Προς Ζυγό	Απώλειες Φάσης Α (kW)	Απώλειες Φάσης Β (kW)	Απώλειες Φάσης C (kW)
1	2	4.203	9.473	8.119
2	3	9.302	15.027	23.122
3	4	47.422	106.28	91.112
Σύνολο:		60.927	130.78	122.353

Πίνακας 7.14: Απώλειες ενεργού ισχύος τροποποιημένης εκδοχής 2.

Από Ζυγό	Προς Ζυγό	Απώλειες Φάσης Α (kW)	Απώλειες Φάσης Β (kW)	Απώλειες Φάσης C (kW)
1	2	4.763	12.988	11.065
2	3	11.25	20	31.25
3	4	53.717	145.763	124.194
Σύνολο:		69.73	178.751	166.509

7.2.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τις εκτελέσεις του δικτύου 4 ζυγών της IEEE και των τροποποιημένων μεθόδων αυτής προκύπτουν αρκετά χρήσιμα συμπεράσματα τόσο για την επίδραση του κάθε τύπου φορτίου στο ίδιο δίκτυο, όσο και στη γενικότερη συμπεριφορά των δικτύων σε ασύμμετρες φορτίσεις.

Από τα αποτελέσματα των Ενοτήτων 7.2.4 και 7.2.3 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Αν ληφθούν υπόψη οι μήτρες εγκάρσιας αγωγιμότητας των γραμμών του δικτύου, τότε το μέτρο του ρεύματος εξόδου από τον προς μελέτη κλάδο είναι ελαφρά υψηλότερο από το ρεύμα εισόδου. Κάτι τέτοιο είναι εμφανές στον Πίνακα 7.6 και συγκεκριμένα στην τιμή των ρευμάτων του κλάδων που βρίσκεται μεταξύ των ζυγών 1 και 2 και των ζυγών 3 και 4. Μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό ότι η μικρή αυτή αύξηση της τιμής του ρεύματος (διαφορά της τάξεως του 0.006%) προκύπτει από το εγγεόμενο ρεύμα από την εγκάρσια αγωγιμότητα (πυκνωτής) προς τη γραμμή. Σημαντικό είναι επίσης

πως παρά το ότι δεν αγνοείται η συγκεκριμένη μήτρα στη μελέτη, σε αντίθεση με ότι φαίνεται να κάνει η ανάλυση της IEEE στο συγκεκριμένο test case, η διαφορά με τα επίσημα αποτελέσματα του συγκεκριμένου δικτύου δεν υπερβαίνει σε καμία περίπτωση το 0.05%, το οποίο είναι και το όριο που θέτει η ίδια η επιτροπή ως όριο απόκλισης των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων.

2. Επίσης, παρατηρώντας τα ρεύματα του δικτύου στα δίκτυα των τριών διαφορετικών φορτίων, λαμβάνονται τα αναμενόμενα από τη θεωρία αποτελέσματα. Η απουσία ρυθμιστή έχει ως αποτέλεσμα η τάση στο ζυγό 4, ο οποίος είναι και ο ζυγός των εγκατεστημένων φορτίων, να μην είναι ίση με την ονομαστική αλλά χαμηλότερη. Επομένως στην περίπτωση των τριών τύπου φορτίου θα υπάρχουν διαφορετικά ρεύματα. Το φορτίο σταθερού ρεύματος, διατηρεί σταθερή την τιμή του μέτρου του ρεύματος ανεξάρτητα της τιμής της τάσης. Απεναντίας το φορτίο σταθερής ισχύος, επειδή η τιμή της τάσης του φορτίου είναι πλέον μικρότερη της ονομαστικής, διαρρέεται από μεγαλύτερο ρεύμα ώστε να διατηρεί σταθερή την τιμή της ισχύος. Τέλος το φορτίο σταθερής αντίστασης, του οποίου το ρεύμα προκύπτει με εφαρμογή του νόμου του Ohm, έχει μικρότερη τιμή ρεύματος από του ονομαστικού εφόσον έχει μειωθεί η τιμή της τάσης. Συνοψίζοντας, προκύπτει τελικά πως το υψηλότερο ρεύμα στη συγκεκριμένη περίπτωση εντοπίζεται στα φορτία σταθερής ισχύος, εν συνεχεία στα φορτία σταθερού ρεύματος και τέλος στα φορτία σταθερής αντίστασης.
3. Τέλος οι απώλειες ενεργού ισχύος στα τρία δίκτυα όπως ήταν αναμενόμενο είναι διαφορετικές. Όπως αναμενόταν το δίκτυο με τα μεγαλύτερα ρεύματα θα έχει αναλογικά και τις μεγαλύτερες απώλειες ενεργού ισχύος στους κλάδους του συστήματος. Παρόλα αυτά εξαιτίας της ασύμμετρης φόρτισης των δικτύων το συγκεκριμένο φαινόμενο επαληθεύεται μεν αθροιστικά μιας και οι συνολικές απώλειες είναι μεγαλύτερες στο φορτίο σταθερής ισχύος και μικρότερες στο φορτίο σταθερής αντίστασης, αλλά δεν επαληθεύεται πλήρως στην ξεχωριστή μελέτη της κάθε φάσεως. Συγκεκριμένα παρατηρείται στη φάση A οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος να είναι οριακά μεγαλύτερες στο φορτίο σταθερού ρεύματος από ότι στο φορτίο σταθερής ισχύος. Η συγκεκριμένη ανομοιομορφία έχει να κάνει με την ασύμμετρη φόρτιση και την ύπαρξη του μικρότερου φορτίου στη φάση A. Συχνά τέτοιου είδους ασυμμετρίες, όπως αναφέρονται και στην βιβλιογραφία [7.2], μπορούν να προκαλέσουν μειωμένη πτώση τάσης έως και μικρή αύξηση τάσης στην ελαφρά φορτισμένη φάση. Σε κάθε περίπτωση όμως τα αναμενόμενα αποτελέσματα επαληθεύονται στις αθροιστικές απώλειες ενεργού ισχύος.

Σε όλες τις εκτελέσεις που έγιναν τέθηκε ανώτερο αποδεκτό όριο σφάλματος για την σύγκλιση της μεθόδου η τιμή 0.0001 p.u. Επειδή όμως κάθε δίκτυο είχε άλλη μορφή, δεν βρέθηκε λύση σε όλα με τον ίδιο αριθμό επαναλήψεων. Για καθαρά στατιστικούς λόγους να σημειωθεί ότι χρειάστηκαν 14 επαναλήψεις για να βρεθεί λύση στο δίκτυο 4 ζυγών της IEEE με το φορτίο σταθερής ισχύος, ενώ απαιτήθηκαν 10 επαναλήψεις για την τροποποιημένη μέθοδο με το φορτίο σταθερής αντίστασης και 7 επαναλήψεις για την τροποποιημένη μέθοδο με το φορτίο σταθερού ρεύματος.

7.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 13 ΖΥΓΩΝ ΤΗΣ ΙΕΕΕ

7.3.1 Δεδομένα του συστήματος

Το σύστημα των 13 ζυγών της ΙΕΕΕ είναι ένα αντιπροσωπευτικό σύστημα των περισσότερων δυνατών περιπτώσεων που θα συναντηθούν σε ένα ακτινικό δίκτυο διανομής. Είναι χαρακτηριστικό ότι μετά την ανάλυση αυτού του δικτύου, δύσκολα κάποιο λογισμικό θα αντιμετωπίσει πρόβλημα σε επόμενο δίκτυο. Ήταν, λοιπόν, σημείο - κλειδί η επιτυχής ανάλυσή του και καθοριστική η συμβολή του στην αποσφαλμάτωση του κώδικα.

Τα στοιχεία του δικτύου τα οποία δεν υπήρχαν στο προηγούμενο test case και το καθιστούν ιδανικό δεύτερο στάδιο ελέγχου του λογισμικού είναι:

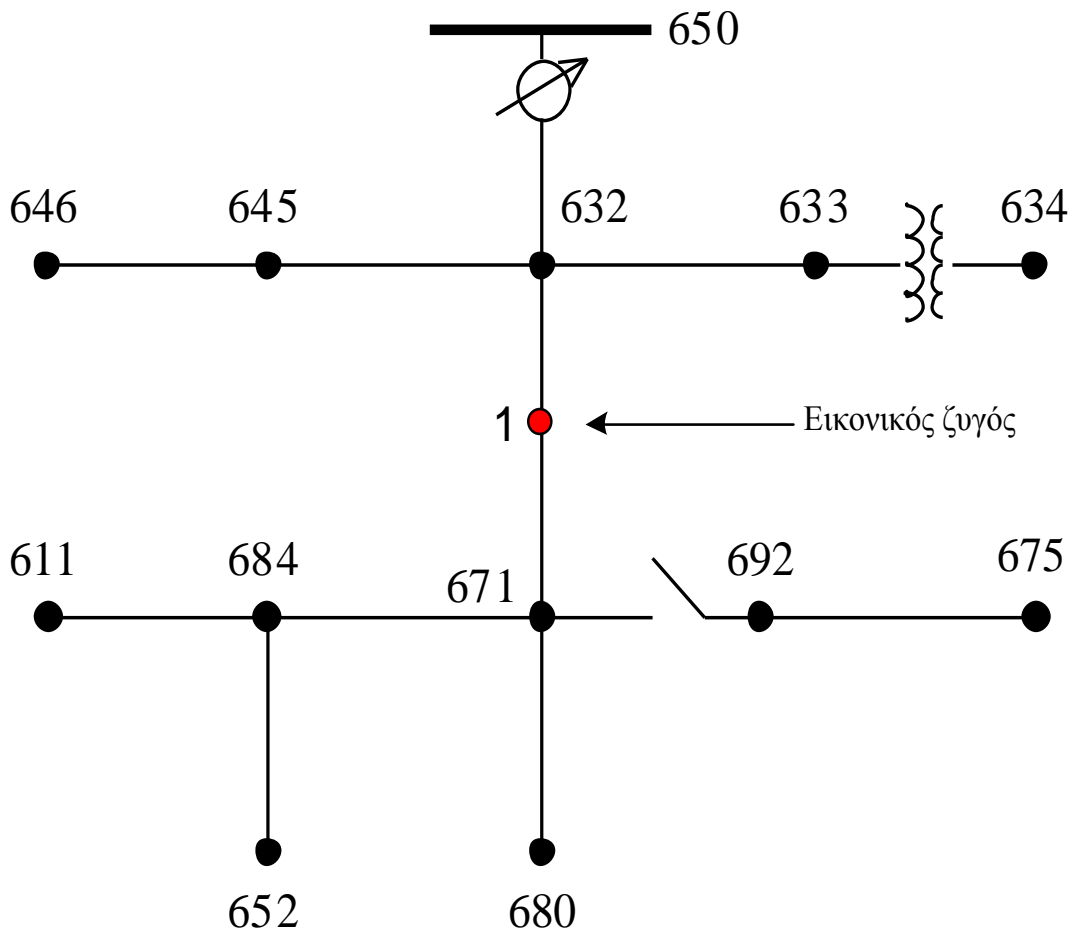
- ✓ Η ύπαρξη φορτίων όλων των συνδυασμών συνδεσμολογίας και τύπου φορτίων. Συγκεκριμένα εμφανίζονται φορτία:
 - Σταθερής ισχύος σε συνδεσμολογία γειωμένου αστέρα και αγείωτου τριγώνου.
 - Σταθερής σύνθετης αντίστασης σε συνδεσμολογία γειωμένου αστέρα και αγείωτου τριγώνου.
 - Σταθερού ρεύματος σε συνδεσμολογία γειωμένου αστέρα και αγείωτου τριγώνου.

Επίσης εκτός από τα συγκεντρωμένα φορτία τα οποία εμφανίστηκαν στο προηγούμενο δίκτυο υπάρχουν και φορτία διανεμημένου τύπου, όπως αυτά ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2.

- ✓ Η ύπαρξη τόσο εναέριων όσο και υπόγειων γραμμών στο δίκτυο. Έτσι δίνεται η ευκαιρία ανάλυσης και υπόγειων τμημάτων των δικτύων διανομής. Φυσικά μετά την προσθήκη και αυτών των κατηγοριών των γραμμών, δεν νοείται να μην ληφθεί υπόψη στην ανάλυση η μήτρα εγκάρσιων αγωγιμοτήτων των συγκεκριμένων γραμμών.
- ✓ Η ύπαρξη γραμμών με διαφορετική σειρά φάσεων, καθώς επίσης και η παρουσία γραμμών με δύο ή μια μόνο φάση. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά είναι χρήσιμα μιας και δίνεται η δυνατότητα να ελεγχθούν διεξοδικά οι συναρτήσεις που υπολογίζουν τις μήτρες αντιστάσεων σειράς και εγκάρσιων αγωγιμοτήτων των αντίστοιχων γραμμών.
- ✓ Η παρουσία ρυθμιστή η οποία είναι μιας πρώτης τάξεως ευκαιρία σε ένα σχετικά μικρό δίκτυο να επαληθευτεί ο τρόπος λειτουργίας του.
- ✓ Η παρουσία εγκάρσιων πυκνωτών η οποία δεν υπήρχε στο προηγούμενο δίκτυο που μελετήθηκε.
- ✓ Η ύπαρξη διακλαδώσεων προσθέτει περαιτέρω ποικιλομορφία στο συγκεκριμένο δίκτυο. Συγκεκριμένα το δίκτυο αυτό αποτελείται από 4 υποκλάδους συν τον κύριο κορμό του δικτύου.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι λόγω της παρουσίας ενός διανεμημένου φορτίου οι ζυγοί του συστήματος γίνονται 14. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της προσθήκης ενός μη υπαρκτού ζυγού (εικονικός) στον κλάδο στον οποίο είναι εγκατεστημένο το συγκεκριμένο φορτίο, βάσει της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 3.2. Παρόλα αυτά, το σύστημα εξακολουθεί να ονομάζεται «δίκτυο 13 ζυγών της ΙΕΕΕ», μιας και οι πραγματικοί

ζυγοί του εξακολουθούν να είναι 13 στον αριθμό. Στο Σχήμα 7.2 δίνεται το σχεδιάγραμμα του δικτύου και φαίνεται η θέση του εικονικού ζυγού μεταξύ των ζυγών 632 και 671.



Σχήμα 7.2: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 13 ζυγών IEEE.

Στον Πίνακα 7.15 παρουσιάζονται τα δεδομένα του μετασχηματιστή που βρίσκεται μεταξύ των κόμβων 633 και 634 και υποβιβάζει την τάση για την τροφοδότηση του ζυγού 634. Στον Πίνακα 7.16 παρουσιάζονται τα δεδομένα όλων των εναέριων τύπων γραμμών που υπάρχουν σε αυτό το δίκτυο και στον Πίνακα 7.17 όλων των υπογείων γραμμών. Ακόμα, στον Πίνακα 7.18 δίνεται η πληροφορία της απόστασης και του τύπου της κάθε γραμμής (με βάση το αναγνωριστικό της) που ενώνει δύο ζυγούς του δικτύου.

Πίνακας 7.15: Δεδομένα μετασχηματιστή δικτύου 13 ζυγών IEEE.

Τοποθεσία μετασχηματιστή	Συνδεσμολογία	kVA	kVLL-high	kVLL-low	R %	X %
Μεταξύ ζυγών 633 και 634	Γειωμένου Αστήρα-Γειωμένου Αστήρα	500	4.16	0.48	1.1	2

Πίνακας 7.16: Δεδομένα των τύπων εναέριων γραμμών δικτύου 13 ζυγών IEEE.

Αναγνωριστικό γραμμής	Τύπος αγωγού φάσης	Τύπος αγωγού ουδετέρου	Spacing Id	Διαδοχή φάσεων
601	556,500 26/7 ACSR	4/0 6/1 ACSR	500	B A C N
602	4/0 6/1 ACSR	4/0 6/1 ACSR	500	C A B N
603	1/0 ACSR	1/0 ACSR	505	C B N
604	1/0 ACSR	1/0 ACSR	505	A C N
605	1/0 ACSR	1/0 ACSR	510	C N

Πίνακας 7.17: Δεδομένα των τύπων υπόγειων γραμμών δικτύου 13 ζυγών IEEE.

Αναγνωριστικό γραμμής	Τύπος καλωδίου	Τύπος ουδετέρου	Spacing Id	Διαδοχή φάσεων
606	250,000 AA, CN	-	515	A B C
607	1/0 AA, TS	1/0 Cu	520	A N

Πίνακας 7.18: Δεδομένα γραμμών δικτύου 13 ζυγών IEEE.

Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Μήκος γραμμής (feet)	Αναγνωριστικό γραμμής
632	645	500	603
632	633	500	602
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607
632	1	500	601
1	671	1500	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
684	611	300	605
692	675	500	606

Πίνακας 7.19: Δεδομένα φορτίων δικτύου 13 ζυγών IEEE.

Τοποθεσία φορτίου	Συνδεσμολογία φορτίου	Τύπος φορτίου	Ονομαστική μιγαδική ισχύς S (kW+j·kVAr)		
			Φάση Α	Φάση Β	Φάση C
Ζυγός 634	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	160+ j·110	120+ j·90	120+ j·90
Ζυγός 645	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0	170+ j·125	0
Ζυγός 646	Αγείωτου τριγώνου	Σταθερής αντίστασης	0	230+ j·132	0
Ζυγός 652	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	128+ j·86	0	0
Ζυγός 671	Αγείωτου τριγώνου	Σταθερής ισχύος	385+ j·220	385+ j·220	385+ j·220
Ζυγός 675	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	485+ j·190	68+ j·60	290+ j·212
Ζυγός 692	Αγείωτου τριγώνου	Σταθερού ρεύματος	0	0	170+ j·151
Ζυγός 611	Γειωμένου αστέρα	Σταθερού ρεύματος	0	0	170+ j·80
Μεταξύ 632 και 671	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	17+ j·10	66+ j·38	117+ j·68

Πίνακας 7.20 Δεδομένα εγκάρσιων πυκνωτών δικτύου 13 ζυγών IEEE.

Τοποθεσία εγκάρσιων πυκνωτών	Συνδεσμολογία πυκνωτή	Ονομαστική ισχύς Q (kVAr)		
		Φάση Α	Φάση Β	Φάση C
Ζυγός 675	Γειωμένου αστέρα	200	200	200
Ζυγός 611	Γειωμένου αστέρα	0	0	100

Στους Πίνακες 7.19 και 7.20 αντίστοιχα παρουσιάζονται οι ονομαστικές ισχύες καθώς και οι συνδεσμολογίες και οι τύποι όλων των φορτίων και των εγκατεστημένων πυκνωτών αντίστοιχα. Προκύπτει ότι το δίκτυο αποτελείται από 8 συγκεντρωμένα φορτία (spot loads) και 1 διανεμημένο (distributed load) καθώς και 2 πυκνωτές, ένα τριφασικό και ένα μονοφασικό.

Τέλος στον Πίνακα 7.20 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του ρυθμιστή με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στην Ενότητα 3.7.

Πίνακας 7.20: Στοιχεία ρυθμιστή δικτύου 13 ζυγών IEEE

Ρυθμιστής 1			
Τοποθεσία :	650 - 632		
Εγκατεστημένος στις φάσεις:	A - B -C		
Τύπος σύνδεσης:	Τριφασικός γειωμένου αστέρα		
Φάσεις που επιτηρεί για τη ρύθμιση:	A-B-C		
Εύρος ζώνης ρύθμισης αντισταθμιστή:	2.0 Volts		
N_t :	20		
Primary CT Rating (CT_p):	700		
Ρυθμίσεις αντισταθμιστή:	Φάση A	Φάση B	Φάση C
R' – ισοδύναμη (V):	3	3	3
X' – ισοδύναμη (V):	9	9	9
Επίπεδο τάσης αντισταθμιστή (V):	122	122	122

7.3.2 Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την εκτέλεση της ανάλυσης ροής φορτίου του δικτύου 13 ζυγών της IEEE. Αρχικά παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.21 και 7.22 οι μήτρες σύνθετων αντιστάσεων σειράς και εγκάρσιας αγωγιμότητας όλων των τύπων των γραμμών που ορίστηκαν στους Πίνακες 7.16 και 7.17.

Εν συνεχεία στον Πίνακα 7.23 εισάγονται οι δείκτες των ζυγών όπως προέκυψαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 2.3. Οι δείκτες αυτοί ουσιαστικά καθορίζουν και την RBF σειρά της διάσχισης του δικτύου και η οποία φαίνεται στον Πίνακα 7.24. Στη συνέχεια παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.25 οι τάσεις των ζυγών του δικτύου ενώ στους Πίνακες 7.26 και 7.27 δίνονται τα εισερχόμενα και εξερχόμενα ρεύματα των ζυγών. Να σημειωθεί ότι τα εξερχόμενα ρεύματα είναι αρκετά σημαντικά στην περίπτωση διακλάδωσης. Αυτό συμβαίνει διότι χωρίς αυτά δεν είναι δυνατό να γνωρίζει κανείς το εισερχόμενο ρεύμα ενός υποκλάδου γνωρίζοντας μόνο τα εισερχόμενα των ζυγών, διότι σε αυτή την περίπτωση το εισερχόμενο αυτό ρεύμα αντιστοιχεί στο άθροισμα των ρευμάτων προς τα εγκατεστημένα στοιχεία του εν λόγω ζυγού καθώς και των ρευμάτων όλων των ζυγών που τροφοδοτεί.

Επιπλέον, στον Πίνακα 7.28 παρουσιάζεται η απώλεια ενεργού ισχύος κάθε κλάδου, ούτως ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το πόση ενεργός ισχύς χάνεται σε κάθε κλάδο. Τέλος, στον Πίνακα 7.29 παρουσιάζονται τα ρεύματα των φορτίων του δικτύου. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι στα συνδεδεμένα κατά αστέρα φορτία το ρεύμα αυτό αναφέρεται στο φασικό ρεύμα, ενώ στα συνδεδεμένα σε τρίγωνο φορτία αναφέρεται

στα πολικά ρεύματα. Με άλλα λόγια, το ρεύμα αυτό είναι το ρεύμα που διαρρέει κάθε κλάδο του φορτίου και όχι το ρεύμα γραμμής της κάθε φάσης που συνδέεται με το φορτίο.

Πίνακας 7.21: Μήτρες σύνθετων αντιστάσεων σειράς για κάθε τύπο γραμμής.

Αναγνωριστικό γραμμής	Μήτρα σύνθετης αντίστασης σειράς (Z) $\frac{\Omega}{\text{mile}}$		
601	0.34653+1.018i	0.15595+0.50168i	0.15801+0.42365i
	0.15595+0.50168i	0.33745+1.0478i	0.15349+0.38494i
	0.15801+0.42365i	0.15349+0.38494i	0.34137+1.0349i
602	0.75263+1.1814i	0.15801+0.42365i	0.15595+0.50168i
	0.15801+0.42365i	0.74747+1.1983i	0.15349+0.38494i
	0.15595+0.50168i	0.15349+0.38494i	0.74355+1.2113i
603	0	0	0
	0	1.3294+1.3471i	0.20657+0.45915i
	0	0.20657+0.45915i	1.3238+1.3569i
604	1.3238+1.3569i	0	0.20657+0.45915i
	0	0	0
	0.20657+0.45915i	0	1.3294+1.3471i
605	0	0	0
	0	0	0
	0	0	1.3294+1.3471i
607	1.34280+0.51221i	0	0
	0	0	0
	0	0	0
606	0.79816+0.44631i	0.31917+0.032819i	0.28492-0.014285i
	0.31917+0.032819i	0.7891+0.40414i	0.31917+0.032819i
	0.28492-0.014285i	0.31917+0.032819i	0.79816+0.44631i

Πίνακας 7.22: Μήτρες εγκάρσιων αγωγιμοτήτων για κάθε τύπο γραμμής.

Αναγνωριστικό γραμμής	Μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας (Y) $\frac{\mu\text{S}}{\text{mile}}$		
601	0+6.2998i	0-1.9958i	0-1.2595i
	0-1.9958i	0+5.9597i	0-0.74172i
	0-1.2595i	0-0.74172i	0+5.6386i
602	0+5.699i	0-1.0817i	0-1.6905i
	0-1.0817i	0+5.1795i	0-0.65879i
	0-1.6905i	0-0.65879i	0+5.4246i
603	0	0	0
	0	0+4.7097i	0-0.89988i
	0	0-0.89988i	0+4.6658i
604	0+4.6658i	0	0-0.89988i
	0	0	0
	0-0.89988i	0	0+4.7097i

Πίνακας 7.22 Συνέχεια...			
Αναγνωριστικό γραμμής	Μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας (Y) $\frac{\mu S}{mile}$		
605	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0+4.5211i
607	0+88.8361i	0	0
	0	0	0
	0	0	0
606	0+96.6098i	0	0
	0	0+96.6098i	0
	0	0	0+96.6098i

Πίνακας 7.23: Δείκτες ζυγών του δικτύου 13 ζυγών IEEE.

Ζυγός	Δείκτες		
	1	m	n
650	1	1	0
632	1	1	1
645	2	1	1
646	2	1	2
633	2	2	1
634	2	2	2
1	1	1	2
671	1	1	3
684	2	3	1
611	2	3	2
652	3	1	1
680	1	1	4
692	2	4	1
675	2	4	2

Πίνακας 7.24: RBF σειρά του δικτύου 13 ζυγών IEEE.

RBF σειρά	Δείκτες		
	1	m	n
652	3	1	1
675	2	4	2
611	2	3	2
634	2	2	2
646	2	1	2
680	1	1	4

Πίνακας 7.25: Τάσεις ζυγών του δικτύου 13 ζυγών IEEE.

Ζυγός	Τάση Φάσης Α		Τάση Φάσης Β		Τάση Φάσης C	
	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)
650	2401.755	0	2401.787	-120	2401.747	120
632	2462.705	-2.47	2509.078	-121.72	2456.803	117.84
645	0	-2.47	2487.063	-121.9	2452.027	117.87
646	0	-2.47	2482.876	-121.97	2447.058	117.92
633	2455.467	-2.53	2504.531	-121.76	2450.581	117.84
634	276.709	-3.2	283.911	-122.21	277.57	117.37
1	2444.247	-3.15	2514.487	-121.87	2431.358	117.36
671	2388.506	-5.25	2535.299	-122.34	2362.375	116.05
684	2383.814	-5.28	0	-122.34	2357.557	115.95
611	0	-5.28	0	-122.34	2352.776	115.81
652	2370.371	-5.2	0	-122.34	0	115.95
680	2388.506	-5.25	2535.299	-122.34	2362.375	116.05
692	2388.503	-5.25	2535.299	-122.34	2362.373	116.05
675	2372.994	-5.5	2541.019	-122.51	2357.857	116.07

Πίνακας 7.26: Εισερχόμενα ρεύματα των ζυγών του δικτύου 13 ζυγών IEEE.

Ζυγός	Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης A		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης B		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
650	593.39	-28.5	435.51	-140.8	627.28	93.72
632	556.31	-28.5	413.74	-140.8	584.16	93.71
645	0	0	143.03	-142.58	65.46	57.88
646	0	0	65.46	-122.12	65.46	57.88
633	80.96	-37.71	60.96	-159.08	62.35	80.5
634	701.69	-37.71	528.33	-159.08	540.4	80.5
1	476.56	-26.94	214.19	-134.49	473.32	100.09
671	471.22	-26.86	195.01	-132.72	437.23	101.18
684	63.35	-39.07	0	0	71.17	121.84
611	0	0	0	0	71.17	121.84
652	63.37	-39.1	0	0	0	0
680	0	0	0	0	0	0
692	227.99	-17.99	69.84	-55.04	177.52	109.73
675	204.4	-4.88	69.82	-55.05	123.26	112.27

Πίνακας 7.27: Εξερχόμενα ρεύματα των ζυγών του δικτύου 13 ζυγών IEEE.

Από ζυγό	Προς ζυγό	Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης A		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης B		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
		Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
650	632	593.388	-28.5	435.512	-140.8	627.283	93.72
632	1	476.563	-26.94	214.19	-134.49	473.318	100.09
632	633	80.964	-37.71	60.961	-159.08	62.353	80.5
632	645	0	0	143.032	-142.58	65.46	57.88

Πίνακας 7.27 Συνέχεια...							
Από ζυγό	Προς ζυγό	Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης Α		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης Β		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
		Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
645	646	0	0	65.462	-122.12	65.461	57.88
633	634	80.965	-37.71	60.962	-159.08	62.354	80.5
1	671	471.221	-26.86	195.006	-132.72	437.227	101.18
671	680	0.004	90.68	0.003	-40.93	0.003	-150.45
671	684	63.348	-39.07	0	0	71.175	121.84
671	692	227.994	-17.99	69.84	-55.04	177.522	109.73
684	611	0	0	0	0	71.175	121.84
684	652	63.348	-39.07	0	0	0	0
692	675	204.395	-4.88	69.84	-55.04	123.262	112.28

Πίνακας 7.28: Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου 13 ζυγών ΙΕΕΕ.

Από Ζυγό	Προς Ζυγό	Απώλειες Φάσης Α (kW)	Απώλειες Φάσης Β (kW)	Απώλειες Φάσης C (kW)
650	632	21.4351	-3.2033	41.0271
632	633	0.3514	0.1475	0.3013
633	634	2.4957	1.4149	1.4803
632	645	0	2.5463	0.2232
645	646	0	0.2731	0.2723
632	1	2.3645	-1.4538	8.568
1	671	8.1151	-4.7196	22.6455
671	692	0.0006	0	0.0003

Πίνακας 7.28 Συνέχεια...				
Από Ζυγό	Προς Ζυγό	Απώλειες Φάσης Α (kW)	Απώλειες Φάσης Β (kW)	Απώλειες Φάσης C (kW)
692	675	3.1882	0.347	0.5599
671	684	0.2136	0	0.3709
684	611	0	0	0.3826
684	652	0.8166	0	0
671	680	-0.0009	0.0013	-0.0004
Σύνολο:		38.9799	-4.6466	75.831

Πίνακας 7.29: Ρεύματα των φορτίων του δικτύου 13 ζυγών IEEE.

Από ζυγό	Ρεύμα φορτίου I ₁		Ρεύμα φορτίου I ₂		Ρεύμα φορτίου I ₃	
	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
645	0	0	84.843	-158.22	0	0
646	0	0	65.462	-122.12	0	0
634	701.693	-37.71	528.334	-159.08	540.404	80.5
1	5.379	-33.61	20.192	-151.8	37.106	87.2
671 (1)	105.558	-2.49	103.692	-124.02	107.075	115.83
671 (2)	2.752	-35.72	10.013	-152.27	19.095	85.89
611	0	0	0	0	78.227	90.61
652	63.366	-39.1	0	0	0	0
692	0	0	0	0	54.658	103.96
675	219.507	-26.9	35.689	-163.93	152.353	79.9

7.3.3 Τροποποιημένη εκδοχή του συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 7.2, είναι χρήσιμο να δίνεται μια τροποποιημένη εκδοχή ενός ήδη αναλυθέντος συστήματος με σκοπό την εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων. Έτσι, στο συγκεκριμένο σύστημα δημιουργήθηκε μια τροποποιημένη εκδοχή του με σκοπό την προβολή των μειονεκτημάτων της απουσίας των ρυθμιστών και των εγκάρσιων πυκνωτών.

Η τροποποιημένη εκδοχή του συγκεκριμένου συστήματος είναι ουσιαστικά η αφαίρεση του ρυθμιστή που επιτηρούσε και τις τρεις φάσεις στην αρχή του δικτύου καθώς και η αποσύνδεση των εγκάρσιων πυκνωτών αντιστάθμισης που ήταν εγκατεστημένοι. Τα αποτελέσματα αυτής της τροποποίησης αναμένεται να είναι αρνητικά για το δίκτυο. Συγκεκριμένα όπως αναφέρθηκε στις Ενότητες 3.3 και 3.7, η απουσία ρυθμιστών και εγκάρσιων πυκνωτών έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη πτώση τάσης στους ζυγούς του συστήματος και μειωμένο συντελεστή ισχύος. Τα δεδομένα αυτά με τη σειρά τους προκαλούν στο δίκτυο αρκετά μεγαλύτερα ρεύματα από τα ονομαστικά και ως εκ τούτου καταπόνηση και ακόμη μεγαλύτερες πτώσεις τάσης. Μένει λοιπόν η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της τροποποιημένης μεθόδου να επαληθεύσει τις προβλέψεις αυτές.

7.3.4 Αποτελέσματα τροποποιημένης εκδοχής

Τα αποτελέσματα του τροποποιημένου δικτύου 13 ζυγών IEEE φαίνονται στους Πίνακες 7.30 έως 7.34 και στο Σχήμα 7.3.

Πίνακας 7.30: Τάσεις ζυγών τροποποιημένου δικτύου 13 ζυγών IEEE.

Ζυγός	Τάση Φάσης Α		Τάση Φάσης Β		Τάση Φάσης C	
	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)
650	2401.782	0	2401.775	-120	2401.804	120
632	2281.308	-2.75	2363.096	-121.68	2233.603	117.8
645	0	-2.75	2340.611	-121.86	2229.663	117.82
646	0	-2.75	2336.703	-121.94	2225.08	117.87
633	2273.5	-2.82	2358.313	-121.73	2226.656	117.8
634	255.151	-3.61	266.712	-122.24	251.185	117.22
1	2258.029	-3.51	2364.025	-121.81	2196.6	117.3
671	2187.887	-5.9	2371.65	-122.21	2093.684	115.95
684	2183.901	-5.95	0	-122.21	2085.78	115.92
611	0	-5.95	0	-122.21	2077.882	115.84

Πίνακας 7.30 Συνέχεια...						
Ζυγός	Τάση Φάσης Α		Τάση Φάσης Β		Τάση Φάσης C	
	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)
652	2171.583	-5.88	0	-122.21	0	115.92
680	2187.887	-5.9	2371.65	-122.21	2093.684	115.95
692	2187.89	-5.9	2371.649	-122.21	2093.686	115.95
675	2167.728	-6.08	2374.516	-122.3	2084.194	116.07

Πίνακας 7.31: Εισερχόμενα ρεύματα ζυγών της τροποποιημένης εκδοχής 13 ζυγών ΙΕΕΕ

Ζυγός	Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης Α		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης Β		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
650	633.93	-35.86	476.23	-152.22	686.36	83.57
632	633.93	-35.87	476.23	-152.22	686.36	83.57
645	0	0	143.86	-144.03	60.6	57.31
646	0	0	60.6	-122.69	60.6	57.31
633	87.81	-38.12	64.89	-159.11	68.9	80.35
634	760.98	-38.12	562.41	-159.11	597.17	80.35
1	546.21	-35.5	269.71	-154.91	564.05	86.68
671	540.39	-35.52	248.27	-155.19	522.99	86.65
684	58.04	-39.75	0	0	78.23	90.64
611	0	0	0	0	78.23	90.64
652	58.05	-39.77	0	0	0	0
680	0	0	0	0	0	0
692	279.57	-35.88	38.18	-163.7	223.33	85.66
675	240.29	-27.47	38.19	-163.73	172.36	79.9

Πίνακας 7.32: Εξερχόμενα ρεύματα ζυγών της τροποποιημένης εκδοχής 13 ζυγών IEEE

Από ζυγό	Προς ζυγό	Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης Α		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης Β		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
		Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
650	632	633.929	-35.86	476.226	-152.22	686.358	83.57
632	1	546.207	-35.5	269.711	-154.91	564.054	86.68
632	633	87.805	-38.11	64.892	-159.11	68.903	80.35
632	645	0	0	143.859	-144.03	60.601	57.31
645	646	0	0	60.603	-122.69	60.602	57.31
633	634	87.806	-38.12	64.893	-159.11	68.904	80.35
1	671	540.387	-35.52	248.27	-155.19	522.985	86.65
671	680	0.003	90.72	0.003	-40.94	0.003	-150.64
671	684	58.035	-39.75	0	0	78.226	90.64
671	692	279.567	-35.88	38.177	-163.7	223.325	85.66
684	611	0	0	0	0	78.226	90.64
684	652	58.036	-39.75	0	0	0	0
692	675	240.285	-27.47	38.177	-163.7	172.346	79.9

Πίνακας 7.33: Απώλειες ενεργού ισχύος της τροποποιημένης εκδοχής 13 ζυγών IEEE

Από Ζυγό	Προς Ζυγό	Απώλειες Φάσης Α (kW)	Απώλειες Φάσης Β (kW)	Απώλειες Φάσης C (kW)
650	632	22.631	-1.608	58.835
632	633	0.406	0.166	0.37
633	634	2.935	1.603	1.808
632	645	0	2.584	0.163
645	646	0	0.234	0.233

Πίνακας 7.33 Συνέχεια...				
Από Ζυγό	Προς Ζυγό	Απώλειες Φάσης A (kW)	Απώλειες Φάσης B (kW)	Απώλειες Φάσης C (kW)
632	1	1.902	-1.014	12.36
1	671	6.872	-3.8	33.374
671	692	0	0	0
692	675	3.903	-0.181	1.751
671	684	0.129	0	0.518
684	611	0	0	0.462
684	652	0.686	0	0
671	680	-0.001	0.001	0
Σύνολο		39.463	-2.015	109.874

Πίνακας 7.34: Ρεύματα των φορτίων της τροποποιημένης εκδοχής 13 ζυγών IEEE

Από ζυγό	Ρεύμα φορτίου I_1		Ρεύμα φορτίου I_2		Ρεύμα φορτίου I_3	
	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
645	0	0	90.151	-158.19	0	0
646	0	0	60.603	-122.69	0	0
634	760.981	-38.12	562.405	-159.11	597.169	80.35
1	5.823	-33.97	21.477	-151.75	41.071	87.14
671 (1)	114.449	-2.36	113.559	-124.86	118.49	115.98
671 (2)	3.005	-36.36	10.704	-152.14	21.545	85.79
611	0	0	0	0	78.227	90.64
652	58.052	-39.77	0	0	0	0
692	0	0	0	0	54.658	104.11
675	240.292	-27.47	38.191	-163.73	172.358	79.9

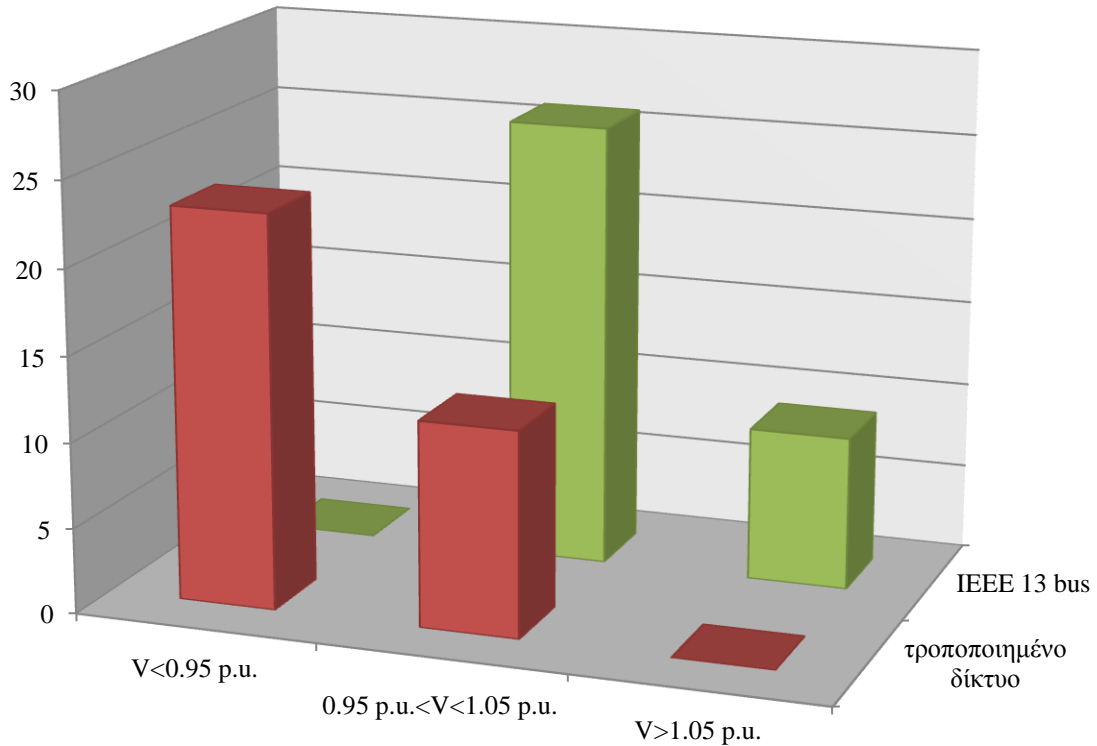
7.3.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Με βάση τα νέα στοιχεία που εισάγει το συγκεκριμένο δίκτυο της IEEE, όπως αυτά περιγράφηκαν στην Ενότητα 7.3.1, προκύπτουν αρκετά χρήσιμα δεδομένα για τον έλεγχο λογισμικού ανάλυσης ροής φορτίου ακτινικών ασύμμετρων δικτύων διανομής. Συγκεκριμένα η προσομοίωση της λειτουργίας του ρυθμιστή και των πυκνωτών είναι αρκετά χρήσιμη για τον έλεγχο και τη διαπίστωση της σωστής λειτουργίας των μοντέλων που τα υλοποιούν στον αλγόριθμο.

Εκτός όμως των συγκεκριμένων στοιχείων προκύπτουν και αρκετά συμπεράσματα από την προσομοίωση του συγκεκριμένου δικτύου, τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Στις περιπτώσεις απουσίας κάποιων φάσεων η αντίστοιχη στήλη και γραμμή στις μήτρες εγκάρσιας αγωγιμότητας και σύνθετων αντιστάσεων σειράς μηδενίζεται. Αυτό παρατηρείται στις γραμμές με αναγνωριστικό 603, 604, 605, 607, οι αντίστοιχες μήτρες των οποίων παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.21 και 7.22.
- ✓ Η απουσία του ρυθμιστή και των πυκνωτών προκαλεί μεγαλύτερα ρεύματα γραμμών και κατά επέκταση μεγαλύτερες απώλειες στο σύστημα όπως αυτό φάνηκε και από την τροποποιημένη μέθοδο της Ενότητας 7.3, αλλά και όπως αυτό αναπαρίσταται στο Σχήμα 7.3.
- ✓ Τα ρεύματα των φορτίων του τροποποιημένου δικτύου είναι μεγαλύτερα για τα φορτία σταθερής ισχύος, ίδια για τα φορτία σταθερού ρεύματος και μικρότερα για τα φορτία σταθερής σύνθετης αντίστασης, εν συγκρίσει με το πρωτότυπο δίκτυο. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο λόγω της μεγαλύτερης πτώσης τάσης, βάσει και της θεωρίας που περιγράφηκε στην Ενότητα 3.2.
- ✓ Η αισθητά μικρότερη φόρτιση της φάσης Β σε σχέση με τις φάσεις Α και C έχει ως αποτέλεσμα την, σε κάποιες περιπτώσεις, αρνητικού προσήμου απώλεια ενεργού ισχύος στη συγκεκριμένη φάση. Κάτι τέτοιο φυσικά δεν σημαίνει δημιουργία ισχύος από το μηδέν. Η ισχύς αυτή προκύπτει από τις άλλες φάσεις μεταξύ των οποίων υπάρχει σύνδεση μέσω των επαγωγικών αντιδράσεων. Κάτι τέτοιο άλλωστε αναφέρεται ως επίπτωση της ασύμμετρης φόρτισης και στη σχετική βιβλιογραφία [7.2].
- ✓ Η απόκλιση των αποτελεσμάτων από τα δημοσιευμένα στοιχεία της IEEE είναι μικρότερη από 0.003 p.u. και χαρακτηρίζεται ως ικανοποιητική. Σε κάθε περίπτωση, τυχόν απόκλιση ενδεχομένως να προκύπτει και από τον τρόπο αντιμετώπισης του κατανεμημένου φορτίου, ο οποίος ενδέχεται να διαφέρει από αλγόριθμο σε αλγόριθμο, όσο και από την αποδεκτή τιμή σφάλματος η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκλιση της μεθόδου.
- ✓ Τέλος να σημειωθεί πως η τελική επιλογή των λήψεων του ρυθμιστή έγινε στη λήψη 10 για τη φάση Α, στην λήψη 8 για τη φάση Β και στη λήψη 9 για τη φάση C, για το πρωτότυπο δίκτυο. Η ανομοιομορφία των επιλεγμένων λήψεων για την κάθε φάση τονίζει την επίπτωση της ασύμμετρης φόρτισης στο δίκτυο.
- ✓ Η εκτέλεση του πρωτότυπου δικτύου έγινε με 5 επαναλήψεις προ ρύθμισης του ρυθμιστή και με άλλες 5 επαναλήψεις για τη σύγκλιση μετά την επιλογή των λήψεων. Η τροποποιημένη μέθοδος χρειάστηκε 5 επαναλήψεις μέχρι την σύγκλιση.

Πλήθος φάσεων



Σχήμα 7.3: Κατανομή μη μηδενικών τάσεων όλων των φάσεων του πρωτότυπου δικτύου και της τροποποιημένης εκδοχής.

7.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 123 ΖΥΓΩΝ ΤΗΣ ΙΕΕΕ

7.4.1 Δεδομένα του συστήματος

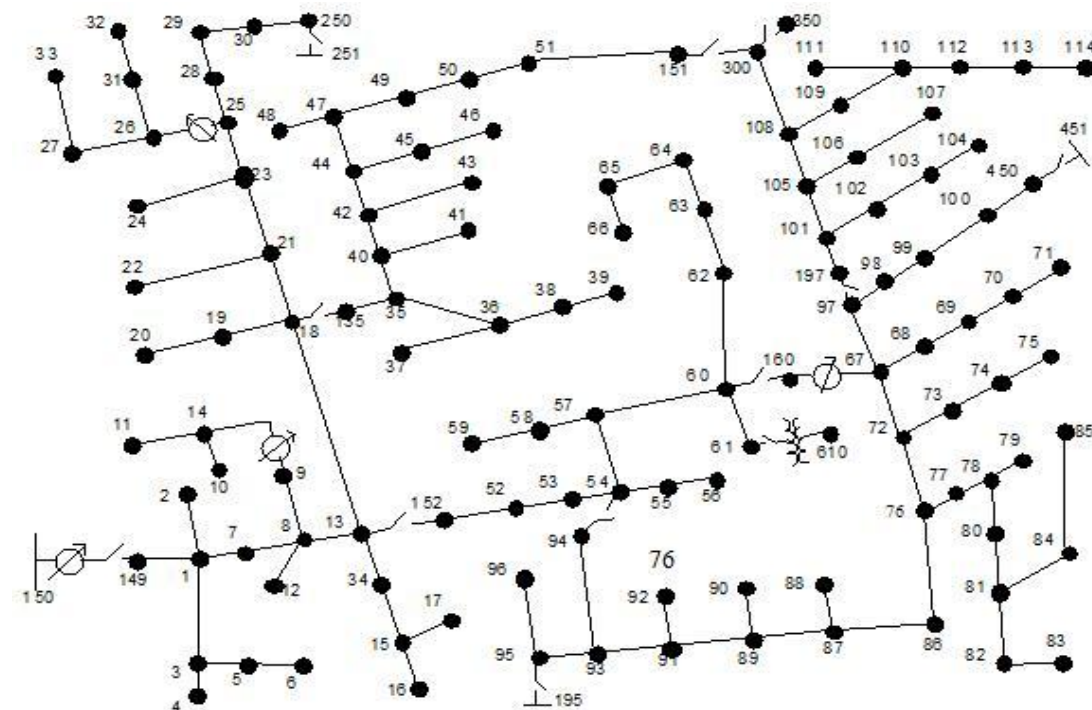
Η ανάγκη προσομοίωσης ενός δικτύου μεγάλης κλίμακας οδήγησε στην απόφαση να συμπεριληφθεί στη μελέτη το δίκτυο των 123 ζυγών της ΙΕΕΕ. Το συγκεκριμένο δίκτυο αποτελείται από:

- ✓ 85 φορτία τα οποία είναι συγκεντρωμένα σε ζυγούς (spot loads) και όχι διανεμημένου τύπου. Τα φορτία είναι διαφόρων συνδεσμολογιών και διαφόρων τύπων, περιλαμβάνοντας όλες τις κατηγορίες που αναφέρονται στην Ενότητα 3.2.
- ✓ 4 ρυθμιστές τάσης συνδεδεμένους κατά αστέρα οι οποίοι φροντίζουν για τη μείωση της πτώσης τάσης.

- ✓ 5 διακόπτες που βρίσκονται σε κλειστή κατάσταση και συνδέουν μέρη του δικτύου. Φυσικά η τοπολογία συνεχίζει να είναι ακτινική ώστε να μπορεί να γίνει χρήση του λογισμικού που αναπτύχθηκε.
- ✓ 117 γραμμές που διασυνδέουν ζυγούς. Οι γραμμές αυτές ανήκουν σε 12 κατηγορίες εκ των οποίων οι 11 είναι εναέριου τύπου και μια είναι υπόγειου τύπου.
- ✓ Τέλος οι ζυγοί του δικτύου είναι 125, αλλά η ύπαρξη κάποιων ζυγών στα άκρα μερικών υποκλάδων χωρίς κάποιο στοιχείο να είναι εγκατεστημένο σε αυτούς (πυκνωτής, φορτίο ή γεννήτρια διεσπαρμένης παραγωγής), οδήγησε στην αναφορά του δικτύου ως 123 ζυγών και όχι 125 που είναι στην πραγματικότητα.

Επομένως σύμφωνα με τα παραπάνω η προσομοίωση του συγκεκριμένου δικτύου πρόκειται να επιβεβαιώσει τη δυνατότητα του λογισμικού να αναλύει εκτός από δίκτυα μικρής και μεσαίας κλίμακας (4 και 13 ζυγών της IEEE αντιστοίχως) και δίκτυα μεγάλου μεγέθους.

Στους πίνακες 7.35 έως 7.42 φαίνονται τα δεδομένα του συστήματος που πρόκειται να αναλυθεί, ενώ στο Σχήμα 7.4 δίνεται το σχέδιο του δικτύου.



Σχήμα 7.4: Σχεδιάγραμμα δικτύου 123 ζυγών IEEE.

Πίνακας 7.35: Δεδομένα μετασχηματιστή δικτύου 123 ζυγών IEEE.

Τοποθεσία μετασχηματιστή	Συνδεσμολογία	kVA	kVLL-high	kVLL-low	R %	X %
Μεταξύ ζυγών 61 και 610	Τριγώνου- Τριγώνου	150	4.16	0.48	1.27	2.72

Πίνακας 7.36: Δεδομένα των τύπων εναέριων γραμμών του δικτύου 123 ζυγών της IEEE.

Αναγνωριστικό γραμμής	Τύπος αγωγού φάσης	Τύπος αγωγού ουδετέρου	Spacing Id	Διαδοχή φάσεων
1	336,400 26/7 ACSR	4/0 6/1 ACSR	500	A B C
2	336,400 26/7 ACSR	4/0 6/1 ACSR	500	C A B
3	336,400 26/7 ACSR	4/0 6/1 ACSR	500	B C A
4	336,400 26/7 ACSR	4/0 6/1 ACSR	500	C B A
5	336,400 26/7 ACSR	4/0 6/1 ACSR	500	B A C
6	336,400 26/7 ACSR	4/0 6/1 ACSR	500	A C B
7	336,400 26/7 ACSR	4/0 6/1 ACSR	505	A C
8	336,400 26/7 ACSR	4/0 6/1 ACSR	505	A B
9	1/0 ACSR	1/0 ACSR	510	A
10	1/0 ACSR	1/0 ACSR	510	B
11	1/0 ACSR	1/0 ACSR	510	C

Πίνακας 7.37: Δεδομένα των τύπων υπόγειων γραμμών του δικτύου 123 ζυγών της IEEE

Αναγνωριστικό γραμμής	Τύπος καλωδίου	Τύπος ουδετέρου	Spacing Id	Διαδοχή φάσεων
12	1/0 AA, CN	-	515	A B C

Πίνακας 7.38: Δεδομένα γραμμών του δικτύου 123 ζυγών της IEEE

Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Μήκος γραμμής (feet)	Αναγνωριστικό γραμμής
149	1	1	400
1	2	10	175
1	3	11	250
3	5	11	325
5	6	11	250
3	4	11	200
1	7	1	300
7	8	1	200
8	12	10	225

Πίνακας 7.38 Συνέχεια...			
Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Μήκος γραμμής (feet)	Αναγνωριστικό γραμμής
8	9	9	225
9	14	9	425
14	10	9	250
14	11	9	250
8	13	1	300
13	34	11	150
34	15	11	100
15	17	11	350
15	16	11	375
13	18	2	825
18	19	9	250
19	20	9	325
135	35	4	375
35	36	8	650
36	37	9	300
36	38	10	250
38	39	10	325
35	40	1	250
40	41	11	325
40	42	1	250
42	43	10	500
42	44	1	200
44	45	9	200
45	46	9	300
44	47	1	250
47	48	4	150
47	49	4	250
49	50	4	250
50	51	4	250
18	21	2	300
21	22	10	525
21	23	2	250
23	24	11	550
23	25	2	275
25	28	2	200
28	29	2	300
29	30	2	350
30	250	2	200
25	26	7	350
26	31	11	225
31	32	11	300
26	27	7	275

Πίνακας 7.38 Συνέχεια...			
Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Μήκος γραμμής (feet)	Αναγνωριστικό γραμμής
27	33	9	500
152	52	1	400
52	53	1	200
53	54	1	125
54	55	1	275
55	56	1	275
54	57	3	350
57	58	10	250
58	59	10	250
57	60	3	750
60	61	5	550
60	62	12	250
62	63	12	175
63	64	12	350
64	65	12	425
65	66	12	325
160	67	6	350
67	72	3	275
72	73	11	275
73	74	11	350
74	75	11	400
72	76	3	200
76	77	6	400
77	78	6	100
78	79	6	225
78	80	6	475
80	81	6	475
81	84	11	675
84	85	11	475
81	82	6	250
82	83	6	250
76	86	3	700
86	87	6	450
87	88	9	175
87	89	6	275
89	90	10	225
89	91	6	225
91	92	11	300
91	93	6	225
93	94	9	275
93	95	6	300
95	96	10	200

Πίνακας 7.38 Συνέχεια...			
Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Μήκος γραμμής (feet)	Αναγνωριστικό γραμμής
67	68	9	200
68	69	9	275
69	70	9	325
70	71	9	275
67	97	3	250
97	98	3	275
98	99	3	550
99	100	3	300
100	450	3	800
197	101	3	250
101	102	11	225
102	103	11	325
103	104	11	700
101	105	3	275
105	106	10	225
106	107	10	575
105	108	3	325
108	300	3	1000
108	109	9	450
109	110	9	300
110	111	9	575
110	112	9	125
112	113	9	525
113	114	9	325

Πίνακας 7.39: Δεδομένα φορτίων του δικτύου 123 ζυγών της IEEE

Τοποθεσία φορτίου	Συνδεσμολογία φορτίου	Τύπος φορτίου	Ονομαστική μιγαδική ισχύς S (kW+j·kVAr)		
			Φάση A	Φάση B	Φάση C
1	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i
2	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	20+10i	0+0i
4	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	40+20i
5	Γειωμένου αστέρα	Σταθερού ρεύματος	0+0i	0+0i	20+10i
6	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	0+0i	0+0i	40+20i
7	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	20+10i	0+0i	0+0i
9	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i

Πίνακας 7.39 Συνέχεια...					
Τοποθεσία φορτίου	Συνδεσμολογία φορτίου	Τύπος φορτίου	Ονομαστική μιγαδική ισχύς S (kW+j·kVAr)		
			Φάση Α	Φάση Β	Φάση C
10	Γειωμένου αστέρα	Σταθερού ρεύματος	20+10i	0+0i	0+0i
11	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	40+20i	0+0i	0+0i
12	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	20+10i	0+0i
16	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	40+20i
17	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	20+10i
19	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i
20	Γειωμένου αστέρα	Σταθερού ρεύματος	40+20i	0+0i	0+0i
22	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	0+0i	40+20i	0+0i
24	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	40+20i
28	Γειωμένου αστέρα	Σταθερού ρεύματος	40+20i	0+0i	0+0i
29	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	40+20i	0+0i	0+0i
30	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	40+20i
31	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	20+10i
32	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	20+10i
33	Γειωμένου αστέρα	Σταθερού ρεύματος	40+20i	0+0i	0+0i
34	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	0+0i	0+0i	40+20i
35	Αγείωτου τριγώνου	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i
37	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	40+20i	0+0i	0+0i
38	Γειωμένου αστέρα	Σταθερού ρεύματος	0+0i	20+10i	0+0i
39	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	20+10i	0+0i
41	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	20+10i
42	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	20+10i	0+0i	0+0i
43	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	0+0i	40+20i	0+0i
45	Γειωμένου αστέρα	Σταθερού ρεύματος	20+10i	0+0i	0+0i

Πίνακας 7.39 Συνέχεια...					
Τοποθεσία φορτίου	Συνδεσμολογία φορτίου	Τύπος φορτίου	Ονομαστική μιγαδική ισχύς S (kW+j·kVAr)		
			Φάση Α	Φάση Β	Φάση C
46	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	20+10i	0+0i	0+0i
47	Γειωμένου αστέρα	Σταθερού ρεύματος	35+25i	35+25i	35+25i
48	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	70+50i	70+50i	70+50i
49	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	35+25i	70+50i	35+20i
50	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	40+20i
51	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	20+10i	0+0i	0+0i
52	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i
53	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i
55	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	20+10i	0+0i	0+0i
56	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	20+10i	0+0i
58	Γειωμένου αστέρα	Σταθερού ρεύματος	0+0i	20+10i	0+0i
59	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	20+10i	0+0i
60	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	20+10i	0+0i	0+0i
62	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	0+0i	0+0i	40+20i
63	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i
64	Γειωμένου αστέρα	Σταθερού ρεύματος	0+0i	75+35i	0+0i
65	Αγείωτου τριγώνου	Σταθερής αντίστασης	35+25i	35+25i	70+50i
66	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	75+35i
68	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	20+10i	0+0i	0+0i
69	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i
70	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	20+10i	0+0i	0+0i
71	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i
73	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	40+20i
74	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	0+0i	0+0i	40+20i

Πίνακας 7.39 Συνέχεια...					
Τοποθεσία φορτίου	Συνδεσμολογία φορτίου	Τύπος φορτίου	Ονομαστική μιγαδική ισχύς S (kW+j·kVAr)		
			Φάση Α	Φάση Β	Φάση C
75	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	40+20i
76	Αγείωτου τριγώνου	Σταθερού ρεύματος	105+80i	70+50i	70+50i
77	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	40+20i	0+0i
79	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	40+20i	0+0i	0+0i
80	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	40+20i	0+0i
82	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i
83	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	20+10i
84	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	20+10i
85	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	40+20i
86	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	20+10i	0+0i
87	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	40+20i	0+0i
88	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i
90	Γειωμένου αστέρα	Σταθερού ρεύματος	0+0i	40+20i	0+0i
92	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	40+20i
94	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i
95	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	20+10i	0+0i
96	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	20+10i	0+0i
98	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i
99	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	40+20i	0+0i
100	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	0+0i	0+0i	40+20i
102	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	20+10i
103	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	40+20i
104	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	0+0i	40+20i
106	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	40+20i	0+0i

Πίνακας 7.39 Συνέχεια...

Τοποθεσία φορτίου	Συνδεσμολογία φορτίου	Τύπος φορτίου	Ονομαστική μιγαδική ισχύς S (kW+j·kVAr)		
			Φάση A	Φάση B	Φάση C
107	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0+0i	40+20i	0+0i
109	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	40+20i	0+0i	0+0i
111	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	20+10i	0+0i	0+0i
112	Γειωμένου αστέρα	Σταθερού ρεύματος	20+10i	0+0i	0+0i
113	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής αντίστασης	40+20i	0+0i	0+0i
114	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	20+10i	0+0i	0+0i

Πίνακας 7.40: Δεδομένα εγκάρσιων πυκνωτών του δικτύου 123 ζυγών της IEEE.

Τοποθεσία εγκάρσιων πυκνωτών	Συνδεσμολογία πυκνωτή	Ονομαστική ισχύς Q (kVAr)		
		Φάση A	Φάση B	Φάση C
Ζυγός 83	Γειωμένου αστέρα	200	200	200
Ζυγός 88	Γειωμένου αστέρα	50	0	0
Ζυγός 90	Γειωμένου αστέρα	0	50	0
Ζυγός 92	Γειωμένου αστέρα	0	0	50

Πίνακας 7.41: Δεδομένα ρυθμιστή του δικτύου 123 ζυγών της IEEE

Όνομα ρυθμιστή	1	2	3	4
Τοποθεσία :	150 - 149	9 - 14	25-26	160 - 67
Εγκατεστημένος στις φάσεις:	A - B -C	A	A-C	A-B-C
Τύπος σύνδεσης:	Τριφασικός γειωμένου αστέρα	Μεταξύ φάσης και γείωσης	Μεταξύ φάσης και γείωσης	Τριφασικός γειωμένου αστέρα
Φάσεις που επιτηρεί για τη ρύθμιση:	A	A	A-C	A-B-C
Εύρος ζώνης ρύθμισης αντισταθμιστή (Volt):	2	2	1	2
N _t :	20	20	20	20
Primary CT Rating (CT _p):	700	50	50	300

Πίνακας 7.41 Συνέχεια...							
Όνομα ρυθμιστή	1	2	3		4		
Ρυθμίσεις αντισταθμιστή:	Φάση Α	Φάση Α	Φάση Α	Φάση C	Φάση Α	Φάση Β	Φάση C
R' – ισοδύναμη (V):	3	0.4	0.4	0.4	0.6	1.4	0.2
X' – ισοδύναμη (V):	9	0.4	0.4	0.4	1.3	2.6	1.4
Επίπεδο τάσης αντισταθμιστή (V):	120	20	20	20	124	124	124

Να σημειωθεί ότι στο ρυθμιστή 1 υπάρχει εγκατεστημένος τριφασικός ρυθμιστής ο οποίος επιτηρεί μόνο την φάση Α. Αυτό σημαίνει ότι η λήψη που θα επιλεγεί για αυτή τη φάση θα εφαρμοστεί και στις άλλες. Αντίθετα στο ρυθμιστή 2 υπάρχει μονοφασικός ρυθμιστής επομένως μόνο στη φάση Α θα υπάρχει ρύθμιση.

Τέλος στον Πίνακα 7.42 φαίνονται τα δεδομένα των διακοπών με βάση το εάν είναι ανοιχτοί ή όχι καθώς και τη θέση τους στο δίκτυο. Φυσικά η κατάσταση τους είναι τέτοια ώστε να συνεχίζει να είναι ακτινικό το δίκτυο.

Πίνακας 7.42: Δεδομένα διακοπών του δικτύου 123 ζυγών της IEEE.

Από ζυγό	Προς Ζυγό	Κατάσταση
13	152	κλειστός
18	135	κλειστός
60	160	κλειστός
61	610	κλειστός
97	197	κλειστός
150	149	κλειστός
250	251	ανοιχτός
450	451	ανοιχτός
54	94	ανοιχτός
151	300	ανοιχτός
300	350	ανοιχτός

7.4.2 Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την εκτέλεση της ανάλυσης ροής φορτίου του δικτύου 123 ζυγών της IEEE. Αρχικά παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.42 και 7.43 οι μήτρες σύνθετων αντιστάσεων σειράς και εγκάρσιας αγωγιμότητας όλων των τύπων των γραμμών που ορίστηκαν στους Πίνακες 7.36 και 7.37.

Εν συνεχεία, στον Πίνακα 7.44 εισάγονται οι δείκτες των ζυγών όπως προέκυψαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 2.3. Οι δείκτες αυτοί ουσιαστικά καθορίζουν και την RBF σειρά της διάσχισης του δικτύου και η οποία φαίνεται στον Πίνακα 7.45. Έπειτα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.46 οι τάσεις των ζυγών του δικτύου ενώ στους Πίνακες 7.47 και 7.48 δίνονται τα εισερχόμενα και εξερχόμενα ρεύματα των ζυγών. Να σημειωθεί ότι τα εξερχόμενα ρεύματα είναι αρκετά σημαντικά στην περίπτωση διακλαδώσεων και ακόμη περισσότερο σε αυτό το δίκτυο το οποίο έχει πολλές διακλαδώσεις. Αυτό συμβαίνει διότι χωρίς αυτά δεν είναι δυνατό να υπολογιστεί το εισερχόμενο ρεύμα ενός υποκλάδου γνωρίζοντας μόνο τα εισερχόμενα των ζυγών, διότι σε αυτή την περίπτωση το εισερχόμενο αυτό ρεύμα αντιστοιχεί στο άθροισμα των ρευμάτων προς τα εγκατεστημένα στοιχεία του εν λόγω ζυγού καθώς και των ρευμάτων όλων των ζυγών που τροφοδοτεί.

Επιπλέον στον Πίνακα 7.49 παρουσιάζεται η απώλεια ενεργού ισχύος κάθε κλάδου, ούτως ώστε να μπορεί κανείς να βγάλει συμπεράσματα για το πόση ενεργός ισχύς χάνεται σε κάθε κλάδο. Τέλος στον Πίνακα 7.50 παρουσιάζονται τα ρεύματα των φορτίων του δικτύου. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί πάλι ότι στα συνδεδεμένα σε αστέρα φορτία το ρεύμα αυτό αναφέρεται στο φασικό ρεύμα, ενώ στα συνδεδεμένα σε τρίγωνο φορτία αναφέρεται στα πολικά ρεύματα. Με άλλα λόγια, το ρεύμα αυτό είναι το ρεύμα που διαρρέει κάθε κλάδο του φορτίου και όχι το ρεύμα γραμμής της κάθε φάσης που συνδέεται με το φορτίο.

Πίνακας 7.43: Μήτρες σύνθετων αντιστάσεων σειράς για κάθε τύπο γραμμής

Αναγνωριστικό γραμμής	Μήτρα σύνθετης αντίστασης σειράς (Z) $\frac{\Omega}{\text{mile}}$		
1	0.45755+1.0781i	0.15595+0.50168i	0.15349+0.38494i
	0.15595+0.50168i	0.46663+1.0482i	0.15801+0.42365i
	0.15349+0.38494i	0.15801+0.42365i	0.46147+1.0651i
2	0.46663+1.0482i	0.15801+0.42365i	0.15595+0.50168i
	0.15801+0.42365i	0.46147+1.0651i	0.15349+0.38494i
	0.15595+0.50168i	0.15349+0.38494i	0.45755+1.0781i
3	0.46147+1.0651i	0.15349+0.38494i	0.15801+0.42365i
	0.15349+0.38494i	0.45755+1.0781i	0.15595+0.50168i
	0.15801+0.42365i	0.15595+0.50168i	0.46663+1.0482i
4	0.46147+1.0651i	0.15801+0.42365i	0.15349+0.38494i
	0.15801+0.42365i	0.46663+1.0482i	0.15595+0.50168i
	0.15349+0.38494i	0.15595+0.50168i	0.45755+1.0781i
5	0.46663+1.0482i	0.15595+0.50168i	0.15801+0.42365i
	0.15595+0.50168i	0.45755+1.0781i	0.15349+0.38494i
	0.15801+0.42365i	0.15349+0.38494i	0.46147+1.0651i

Πίνακας 7.43 Συνέχεια...			
Αναγνωριστικό γραμμής	Μήτρα σύνθετης αντίστασης σειράς (Z) $\frac{\Omega}{\text{mile}}$		
6	0.45755+1.0781i	0.15349+0.38494i	0.15595+0.50168i
	0.15349+0.38494i	0.46147+1.0651i	0.15801+0.42365i
	0.15595+0.50168i	0.15801+0.42365i	0.46663+1.0482i
7	0.45755+1.0781i	0	0.15349+0.38494i
	0	0	0
	0.15349+0.38494i	0	0.46147+1.0651i
8	0.45755+1.0781i	0.15349+0.38494i	0
	0.15349+0.38494i	0.46147+1.0651i	0
	0	0	0
9	1.3294+1.3471i	0	0
	0	0	0
	0	0	0
10	0	0	0
	0	1.3294+1.3471i	0
	0	0	0
11	0	0	0
	0	0	0
	0	0	1.3294+1.3471i
12	1.5209+0.7521i	0.51979+0.27746i	0.49239+0.21566i
	0.51979+0.27746i	1.5329+0.71618i	0.51979+0.27746i
	0.49239+0.21566i	0.51979+0.27746i	1.5209+0.7521i

Πίνακας 7.44: Μήτρες εγκάρσιων αγωγιμοτήτων για κάθε τύπο γραμμής

Αναγνωριστικό γραμμής	Μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας (Y) $\frac{\mu S}{\text{mile}}$		
1	0+5.6765i	0-1.8319i	0-0.69821i
	0-1.8319i	0+5.9809i	0-1.1645i
	0-0.69821i	0-1.1645i	0+5.3971i
2	0+5.9809i	0-1.1645i	0-1.8319i
	0-1.1645i	0+5.3971i	0-0.69821i
	0-1.8319i	0-0.69821i	0+5.6765i
3	0+5.3971i	0-0.69821i	0-1.1645i
	0-0.69821i	0+5.6765i	0-1.8319i
	0-1.1645i	0-1.8319i	0+5.9809i
4	0+5.3971i	0-1.1645i	0-0.69821i
	0-1.1645i	0+5.9809i	0-1.8319i
	0-0.69821i	0-1.8319i	0+5.6765i
5	0+5.9809i	0-1.8319i	0-1.1645i
	0-1.8319i	0+5.6765i	0-0.69821i
	0-1.1645i	0-0.69821i	0+5.3971i

Πίνακας 7.44 Συνέχεια...			
Αναγνωριστικό γραμμής	Μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας (Y) $\frac{\mu S}{\text{mile}}$		
6	0+5.6765i 0-0.69821i 0-1.8319i	0-0.69821i 0+5.3971i 0-1.1645i	0-1.8319i 0-1.1645i 0+5.9809i
7	0+5.1154i 0 0-1.0549i	0	0 0-1.0549i 0 0 0+5.1704i
8	0+5.1154i 0-1.0549i 0	0-1.0549i 0+5.1704i	0 0 0
9	0+4.5211i 0 0	0	0 0 0
10	0 0 0+4.5211i 0	0	0 0 0
11	0 0 0	0	0 0 0 0+4.5211i
12	0+67.03i 0 0	0 0+67.03i	0 0 0 0+67.03i

Πίνακας 7.45: Δείκτες ζυγών του δικτύου 123 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Δείκτες		
	1	m	n
150	1	1	0
149	1	1	1
1	1	1	2
2	2	1	1
3	2	2	1
5	3	1	1
6	3	1	2
4	2	2	2
7	1	1	3
8	1	1	4
12	2	3	1
9	2	4	1
14	2	4	2
10	3	2	1
11	2	4	3

Πίνακας 7.45 Συνέχεια...			
Ζυγός	Δείκτες		
	1	m	n
13	1	1	5
34	2	5	1
15	2	5	2
17	3	3	1
16	2	5	3
18	2	6	1
19	3	4	1
20	3	4	2
135	3	5	1
35	3	5	2
36	4	1	1
37	5	1	1
38	4	1	2
39	4	1	3
40	3	5	3
41	4	2	1
42	3	5	4
43	4	3	1
44	3	5	5
45	4	4	1
46	4	4	2
47	3	5	6
48	4	5	1
49	3	5	7
50	3	5	8
51	3	5	9
151	3	5	10
21	2	6	2
22	3	6	1
23	2	6	3
24	3	7	1
25	2	6	4
28	3	8	1
29	3	8	2
30	3	8	3
250	3	8	4
26	2	6	5
31	3	9	1
32	3	9	2
27	2	6	6
33	2	6	7
152	1	1	6

Πίνακας 7.45 Συνέχεια...			
Ζυγός	Δείκτες		
	l	m	n
52	1	1	7
53	1	1	8
54	1	1	9
55	2	7	1
56	2	7	2
57	1	1	10
58	2	8	1
59	2	8	2
60	1	1	11
61	2	9	1
610	2	9	2
62	2	10	1
63	2	10	2
64	2	10	3
65	2	10	4
66	2	10	5
160	1	1	12
67	1	1	13
72	2	11	1
73	3	10	1
74	3	10	2
75	3	10	3
76	2	11	2
77	3	11	1
78	3	11	2
79	4	6	1
80	3	11	3
81	3	11	4
84	4	7	1
85	4	7	2
82	3	11	5
83	3	11	6
86	2	11	3
87	2	11	4
88	3	12	1
89	2	11	5
90	3	13	1
91	2	11	6
92	3	14	1
93	2	11	7
94	3	15	1
95	2	11	8
96	2	11	9

Πίνακας 7.45 Συνέχεια...

Ζυγός	Δείκτες		
	l	m	n
68	2	12	1
69	2	12	2
70	2	12	3
71	2	12	4
97	1	1	14
98	2	13	1
99	2	13	2
100	2	13	3
450	2	13	4
197	1	1	15
101	1	1	16
102	2	14	1
103	2	14	2
104	2	14	3
105	1	1	17
106	2	15	1
107	2	15	2
108	1	1	18
300	2	16	1
109	1	1	19
110	1	1	20
111	2	17	1
112	1	1	21
113	1	1	22
114	1	1	23

Πίνακας 7.46: RBF σειρά του δικτύου 123 ζυγών της ΙΕΕΕ

RBF σειρά	Δείκτες		
	l	m	n
37	5	1	1
85	4	7	2
79	4	6	1
48	4	5	1
46	4	4	2
43	4	3	1
41	4	2	1
39	4	1	3

Πίνακας 7.46 Συνέχεια...			
RBF σειρά	Δείκτες		
	l	m	n
94	3	15	1
92	3	14	1
90	3	13	1
88	3	12	1
83	3	11	6
75	3	10	3
32	3	9	2
250	3	8	4
24	3	7	1
22	3	6	1
151	3	5	10
20	3	4	2
17	3	3	1
10	3	2	1
6	3	1	2
111	2	17	1
300	2	16	1
107	2	15	2
104	2	14	3
450	2	13	4
71	2	12	4
96	2	11	9
66	2	10	5
610	2	9	2
59	2	8	2
56	2	7	2
33	2	6	7
16	2	5	3
11	2	4	3
12	2	3	1
4	2	2	2

Πίνακας 7.46 Συνέχεια...			
RBF σειρά	Δείκτες		
	l	m	n
2	2	1	1
114	1	1	23

Πίνακας 7.47: Τάσεις ζυγών του δικτύου 123 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Τάση Φάσης Α		Τάση Φάσης Β		Τάση Φάσης C	
	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)
150	2401.714	0	2401.799	-120	2401.797	120
149	2511.596	0	2511.685	-120	2511.684	120
1	2481.757	-0.64	2505.804	-120.31	2490.419	119.62
2	0	-0.64	2505.254	-120.31	0	119.62
3	0	-0.64	0	-120.31	2486.452	119.59
5	0	-0.64	0	-120.31	2483.303	119.57
6	0	-0.64	0	-120.31	2481.671	119.55
4	0	-0.64	0	-120.31	2485.231	119.58
7	2459.521	-1.1	2501.637	-120.56	2476.753	119.37
8	2445.095	-1.41	2498.71	-120.72	2467.697	119.2
12	0	-1.41	2498.011	-120.73	0	119.2
9	2441.614	-1.44	0	-120.72	0	119.2
14	2422.4	-1.47	0	-120.72	0	119.2
10	2421.61	-1.48	0	-120.72	0	119.2
11	2420.808	-1.49	0	-120.72	0	119.2
13	2425.998	-1.84	2493.471	-120.95	2454.147	118.92
34	0	-1.84	0	-120.95	2451.772	118.9
15	0	-1.84	0	-120.95	2450.842	118.89
17	0	-1.84	0	-120.95	2449.758	118.89
16	0	-1.84	0	-120.95	2448.518	118.88
18	2404.363	-2.26	2483.513	-121.2	2436.38	118.85
19	2401.203	-2.29	0	-121.2	0	118.85

Πίνακας 7.47 Συνέχεια...						
Ζυγός	Τάση Φάσης Α		Τάση Φάσης Β		Τάση Φάσης C	
	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)
20	2399.149	-2.31	0	-121.2	0	118.85
135	2404.364	-2.26	2483.513	-121.2	2436.379	118.85
35	2397.7	-2.35	2477.4	-121.29	2433.836	118.79
36	2395.457	-2.37	2476.284	-121.33	0	118.79
37	2393.568	-2.38	0	-121.33	0	118.79
38	0	-2.37	2474.728	-121.35	0	118.79
39	0	-2.37	2473.731	-121.35	0	118.79
40	2394.053	-2.38	2474.648	-121.33	2431.329	118.75
41	0	-2.38	0	-121.33	2430.315	118.74
42	2390.234	-2.42	2471.942	-121.38	2429.211	118.71
43	0	-2.42	2468.695	-121.41	0	118.71
44	2387.608	-2.45	2470.241	-121.41	2427.231	118.68
45	2386.34	-2.46	0	-121.41	0	118.68
46	2385.386	-2.47	0	-121.41	0	118.68
47	2385.115	-2.47	2467.666	-121.44	2424.825	118.63
48	2384.451	-2.48	2466.971	-121.45	2424.293	118.62
49	2384.457	-2.48	2466.346	-121.45	2424.067	118.61
50	2384.408	-2.49	2466.409	-121.44	2423.254	118.6
51	2384.013	-2.5	2466.6	-121.44	2423.22	118.6
151	2384.013	-2.5	2466.6	-121.44	2423.22	118.6
21	2403.035	-2.32	2483.64	-121.2	2433.58	118.83
22	0	-2.32	2480.215	-121.23	0	118.83
23	2402.029	-2.37	2484.556	-121.19	2430.889	118.82
24	0	-2.37	0	-121.19	2427.451	118.79
25	2400.434	-2.42	2485.643	-121.18	2428.784	118.82
28	2399.543	-2.45	2486.19	-121.18	2427.972	118.82
29	2399.143	-2.47	2486.556	-121.17	2426.895	118.81

Πίνακας 7.47 Συνέχεια...						
Ζυγός	Τάση Φάσης Α		Τάση Φάσης Β		Τάση Φάσης C	
	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)
30	2399.77	-2.48	2486.454	-121.16	2425.806	118.79
250	2399.77	-2.48	2486.454	-121.16	2425.806	118.79
26	2399.82	-2.45	0	-121.18	2412.513	118.81
31	0	-2.45	0	-121.18	2411.097	118.79
32	0	-2.45	0	-121.18	2410.152	118.79
27	2398.955	-2.47	0	-121.18	2412.44	118.82
33	2395.796	-2.49	0	-121.18	0	118.82
152	2425.998	-1.84	2493.471	-120.95	2454.147	118.92
52	2411.734	-2.22	2490.482	-121.19	2446.394	118.67
53	2405.265	-2.39	2488.647	-121.31	2442.59	118.54
54	2401.625	-2.5	2487.282	-121.38	2440.253	118.46
55	2401.149	-2.5	2487.104	-121.39	2440.41	118.46
56	2401.076	-2.49	2486.689	-121.4	2440.612	118.46
57	2394.19	-2.8	2480.545	-121.58	2434.068	118.24
58	0	-2.8	2478.983	-121.59	0	118.24
59	0	-2.8	2478.218	-121.6	0	118.24
60	2378.732	-3.47	2468.52	-121.97	2419.596	117.79
61	2397.207	-2.67	2430.194	-121.97	2439.173	117.01
610	480.689	27.91	489.049	-92.42	482.502	146.88
62	2376.882	-3.47	2465.79	-121.94	2414.656	117.78
63	2375.423	-3.46	2463.705	-121.94	2412.251	117.77
64	2374.623	-3.43	2459.169	-121.9	2407.066	117.74
65	2372.949	-3.44	2458.354	-121.86	2399.868	117.73
66	2373.518	-3.47	2458.929	-121.83	2396.262	117.73
160	2378.732	-3.47	2468.52	-121.97	2419.596	117.79
67	2499.447	-3.72	2481.818	-122.15	2492.529	117.65
72	2500.426	-3.81	2479.682	-122.25	2492.053	117.54

Πίνακας 7.47 Συνέχεια...						
Ζυγός	Τάση Φάσης Α		Τάση Φάσης Β		Τάση Φάσης C	
	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)
73	0	-3.81	0	-122.25	2486.894	117.5
74	0	-3.81	0	-122.25	2482.467	117.46
75	0	-3.81	0	-122.25	2480.019	117.44
76	2500.238	-3.87	2478.433	-122.34	2493.566	117.49
77	2503.045	-3.94	2481.196	-122.42	2495.729	117.41
78	2503.784	-3.96	2482.19	-122.44	2496.12	117.39
79	2503.063	-3.97	2482.508	-122.44	2496.002	117.4
80	2508.85	-4.02	2486.233	-122.5	2498.218	117.28
81	2514.074	-4.09	2491.717	-122.53	2499.623	117.18
84	0	-4.09	0	-122.53	2493.454	117.13
85	0	-4.09	0	-122.53	2490.56	117.11
82	2516.171	-4.13	2494.729	-122.56	2501.496	117.15
83	2519.019	-4.15	2497.414	-122.59	2503.483	117.11
86	2498.158	-3.9	2474.178	-122.5	2497.01	117.45
87	2496.95	-3.92	2472.263	-122.59	2498.338	117.43
88	2496.853	-3.95	0	-122.59	0	117.43
89	2495.918	-3.92	2471.625	-122.64	2499.312	117.42
90	0	-3.92	2471.433	-122.68	0	117.42
91	2495.438	-3.92	2470.838	-122.65	2499.834	117.41
92	0	-3.92	0	-122.65	2499.671	117.36
93	2494.685	-3.92	2470.45	-122.67	2500.065	117.41
94	2493.011	-3.94	0	-122.67	0	117.41
95	2494.59	-3.91	2469.535	-122.69	2500.51	117.41
96	0	-3.91	2468.92	-122.69	0	117.41
68	2495.787	-3.74	0	-122.15	0	117.65
69	2491.595	-3.78	0	-122.15	0	117.65
70	2488.621	-3.8	0	-122.15	0	117.65

Πίνακας 7.47 Συνέχεια...						
Ζυγός	Τάση Φάσης Α		Τάση Φάσης Β		Τάση Φάσης C	
	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)	Μέτρο (V)	Γωνία (°)
71	2486.943	-3.81	0	-122.15	0	117.65
97	2497.046	-3.77	2480.61	-122.17	2490.788	117.64
98	2496.565	-3.78	2479.991	-122.18	2490.292	117.63
99	2497.261	-3.77	2478.026	-122.18	2489.47	117.59
100	2497.739	-3.77	2477.868	-122.17	2488.499	117.57
450	2497.739	-3.77	2477.868	-122.17	2488.499	117.57
197	2497.046	-3.77	2480.61	-122.17	2490.788	117.64
101	2495.083	-3.81	2479.966	-122.18	2489.498	117.63
102	0	-3.81	0	-122.18	2486.057	117.6
103	0	-3.81	0	-122.18	2482.08	117.57
104	0	-3.81	0	-122.18	2477.793	117.53
105	2491.904	-3.85	2479.596	-122.23	2490.16	117.66
106	0	-3.85	2476.837	-122.25	0	117.66
107	0	-3.85	2473.309	-122.28	0	117.66
108	2488.361	-3.92	2481.143	-122.24	2489.809	117.7
300	2488.362	-3.92	2481.143	-122.24	2489.81	117.7
109	2478.494	-3.99	0	-122.24	0	117.7
110	2473.754	-4.03	0	-122.24	0	117.7
111	2471.988	-4.05	0	-122.24	0	117.7
112	2472.163	-4.04	0	-122.24	0	117.7
113	2467.14	-4.08	0	-122.24	0	117.7
114	2466.141	-4.09	0	-122.24	0	117.7

Πίνακας 7.48: Εισερχόμενα ρεύματα των ζυγών του δικτύου 123 ζυγών της IEEE

Ζυγός	Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης Α		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης Β		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
	Μέτρο (Α)	Γωνία (°)	Μέτρο (Α)	Γωνία (°)	Μέτρο (Α)	Γωνία (°)
150	656.76	-21.58	426.33	-139.56	524.43	101.6
149	628.03	-21.58	407.68	-139.56	501.49	101.6
1	628.03	-21.58	407.68	-139.56	501.49	101.6
2	0	0	8.93	-146.88	0	0
3	0	0	0	0	46.54	93
5	0	0	0	0	28.55	92.99
6	0	0	0	0	19.24	92.99
4	0	0	0	0	17.99	93.02
7	610.1	-21.41	398.83	-139.4	455.52	102.47
8	601.06	-21.32	398.83	-139.4	455.52	102.47
12	0	0	8.95	-147.29	0	0
9	46.22	-28.03	0	0	0	0
14	28.08	-28.05	0	0	0	0
10	9.31	-28.04	0	0	0	0
11	18.77	-28.05	0	0	0	0
13	555.19	-20.76	389.97	-139.22	455.52	102.47
34	0	0	0	0	46.4	92.32
15	0	0	0	0	27.39	92.32
17	0	0	0	0	9.13	92.32
16	0	0	0	0	18.26	92.31
18	228.85	-30.41	155.61	-155.08	153.22	88.63
19	37.24	-28.86	0	0	0	0
20	18.62	-28.87	0	0	0	0
135	135.82	-31.4	136.56	-156.1	98.1	86.6
35	135.82	-31.4	136.56	-156.1	98.1	86.59
36	18.56	-28.95	18.35	-147.91	0	0

Πίνακας 7.48 Συνέχεια...						
Ζυγός	Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης Α		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης Β		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
37	18.56	-28.95	0	0	0	0
38	0	0	18.35	-147.91	0	0
39	0	0	9.04	-147.92	0	0
40	108.62	-34.93	108.52	-155.4	98.1	86.59
41	0	0	0	0	9.2	92.17
42	108.62	-34.93	108.52	-155.4	88.95	86.02
43	0	0	19.14	-147.97	0	0
44	99.32	-35.49	89.57	-156.98	88.95	86.02
45	18.68	-29.03	0	0	0	0
46	9.37	-29.03	0	0	0	0
47	80.78	-36.98	89.57	-156.98	88.95	86.02
48	35.56	-38.02	36.79	-156.99	36.15	83.08
49	27.34	-34.95	34.88	-156.99	35.07	90.53
50	9.38	-29.06	0	-27.02	18.45	92.03
51	9.38	-29.06	0	0	0	0
151	0	0	0	0	0	0
21	55.84	-29.03	19.23	-147.78	55.29	92.23
22	0	0	19.23	-147.79	0	0
23	55.84	-29.03	0	-34.78	55.29	92.23
24	0	0	0	0	18.42	92.22
25	55.84	-29.03	0	-34.77	36.87	92.23
28	37.22	-29.02	0	-34.77	18.43	92.23
29	18.6	-29.03	0	-34.77	18.43	92.23
30	0	83.54	0	-34.77	18.44	92.23
250	0	0	0	0	0	0
26	18.62	-29.05	0	0	18.55	92.23

Πίνακας 7.48 Συνέχεια...						
Ζυγός	Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης Α		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης Β		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
	Μέτρο (Α)	Γωνία (°)	Μέτρο (Α)	Γωνία (°)	Μέτρο (Α)	Γωνία (°)
31	0	0	0	0	18.55	92.23
32	0	0	0	0	9.28	92.22
27	18.62	-29.06	0	0	0	0
33	18.62	-29.06	0	0	0	0
152	331.8	-14.12	244.01	-129.19	264.9	112.22
52	331.8	-14.12	244.01	-129.19	264.9	112.22
53	313.89	-13.27	244.01	-129.19	264.9	112.22
54	296.03	-12.29	244.01	-129.19	264.9	112.22
55	9.31	-29.06	8.99	-147.96	0	-155.48
56	0	0	8.99	-147.96	0	0
57	287.14	-11.76	235.52	-128.48	264.9	112.21
58	0	0	18.33	-148.16	0	0
59	0	0	9.02	-148.17	0	0
60	287.14	-11.76	218.34	-126.86	264.9	112.21
61	0	0	0	0	0	0
610	0	0	0	0	0	0
62	45.39	-41.34	52.28	-150.52	80.76	92.24
63	45.39	-41.35	52.29	-150.53	62.04	92.55
64	27.19	-49.18	52.29	-150.54	62.05	92.54
65	27.2	-49.2	18.04	-157.51	62.05	92.53
66	0	0	0	0	34.54	92.71
160	240.08	-5.7	171.74	-119.85	191	120.51
67	228.08	-5.7	170.67	-119.85	185.03	120.51
72	118.88	23.03	126.01	-107.84	132.86	134.31
73	0	0	0	0	55.26	90.9
74	0	0	0	0	37.28	90.89

Πίνακας 7.48 Συνέχεια...						
Ζυγός	Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης Α		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης Β		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
	Μέτρο (Α)	Γωνία (°)	Μέτρο (Α)	Γωνία (°)	Μέτρο (Α)	Γωνία (°)
75	0	0	0	0	18.03	90.88
76	118.88	23.03	126.01	-107.84	100.19	156.58
77	78.21	60.66	77.58	-57.15	77.7	-177.27
78	78.21	60.66	80.21	-44.17	77.7	-177.27
79	19.41	-30.54	0	0	0	0
80	80.97	74.53	80.2	-44.17	77.7	-177.27
81	80.97	74.53	86.59	-32.59	77.7	-177.27
84	0	0	0	0	26.92	90.56
85	0	0	0	0	17.96	90.55
82	80.97	74.53	86.59	-32.59	83.19	-158.4
83	87.34	85.85	86.59	-32.59	83.19	-158.4
86	32.56	5.99	57.58	-129.75	21.05	157.87
87	32.56	5.98	49.14	-126.26	21.05	157.86
88	21.04	36.44	0	0	0	0
89	17.94	-30.49	33.23	-114.03	21.05	157.86
90	0	0	21.19	-84.5	0	0
91	17.94	-30.49	18.11	-149.25	21.04	157.86
92	0	0	0	0	21.04	157.85
93	17.94	-30.5	18.11	-149.25	0	-148.29
94	17.94	-30.5	0	0	0	0
95	0	0	18.11	-149.25	0	0
96	0	0	9.06	-149.26	0	0
68	53.88	-30.35	0	0	0	0
69	44.92	-30.36	0	0	0	0
70	26.97	-30.37	0	0	0	0
71	17.98	-30.38	0	0	0	0

Πίνακας 7.48 Συνέχεια...						
Ζυγός	Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης Α		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης Β		Εισερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
	Μέτρο (Α)	Γωνία (°)	Μέτρο (Α)	Γωνία (°)	Μέτρο (Α)	Γωνία (°)
97	82.5	-30.55	54.18	-148.79	64.35	91.01
98	17.91	-30.33	18.04	-148.74	19.29	91.02
99	0	82.78	18.05	-148.74	19.29	91.01
100	0	82.78	0	-24.21	19.29	91.01
450	0	0	0	0	0	0
197	64.59	-30.61	36.13	-148.82	45.06	91.01
101	64.59	-30.61	36.13	-148.82	45.06	91.01
102	0	0	0	0	45.06	91
103	0	0	0	0	36.07	90.99
104	0	0	0	0	18.05	90.97
105	64.59	-30.61	36.13	-148.82	0	-156.79
106	0	0	36.14	-148.83	0	0
107	0	0	18.08	-148.84	0	0
108	64.59	-30.61	0	-24.23	0	-156.79
300	0	0	0	0	0	0
109	64.59	-30.61	0	0	0	0
110	46.55	-30.63	0	0	0	0
111	9.05	-30.61	0	0	0	0
112	37.5	-30.64	0	0	0	0
113	28.19	-30.65	0	0	0	0
114	9.07	-30.66	0	0	0	0

Πίνακας 7.49: Εξερχόμενα ρεύματα των ζυγών του δικτύου 123 ζυγών της ΙΕΕΕ

Από ζυγό	Προς ζυγό	Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης Α		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης Β		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
		Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
150	149	656.762	-21.58	426.333	-139.56	524.43	101.6
149	1	628.029	-21.58	407.681	-139.56	501.487	101.6
1	7	610.098	-21.41	398.83	-139.4	455.519	102.47
1	2	0	0	8.925	-146.88	0	0
1	3	0	0	0	0	46.543	93
3	4	0	0	0	0	17.995	93.02
3	5	0	0	0	0	28.549	93
5	6	0	0	0	0	19.239	92.99
7	8	601.062	-21.32	398.831	-139.4	455.519	102.47
8	13	555.187	-20.76	389.966	-139.22	455.519	102.47
8	9	46.219	-28.03	0	0	0	0
8	12	0	0	8.951	-147.29	0	0
9	14	27.902	-28.05	0	0	0	0
14	11	18.767	-28.05	0	0	0	0
14	10	9.31	-28.04	0	0	0	0
13	152	331.795	-14.12	244.011	-129.19	264.899	112.22
13	34	0	0	0	0	46.399	92.32
13	18	228.852	-30.41	155.607	-155.07	153.219	88.63
34	15	0	0	0	0	27.392	92.32
15	16	0	0	0	0	18.264	92.31
15	17	0	0	0	0	9.127	92.32
18	21	55.836	-29.03	19.226	-147.78	55.29	92.23
18	135	135.822	-31.4	136.56	-156.1	98.102	86.6
18	19	37.244	-28.86	0	0	0	0
19	20	18.62	-28.87	0	0	0	0
135	35	135.822	-31.4	136.56	-156.1	98.102	86.6
35	40	108.617	-34.93	108.516	-155.4	98.102	86.59
35	36	18.555	-28.94	18.348	-147.91	0	0
36	38	0	0	18.349	-147.91	0	0
36	37	18.556	-28.95	0	0	0	0
38	39	0	0	9.039	-147.91	0	0
40	42	108.618	-34.93	108.516	-155.4	88.95	86.02
40	41	0	0	0	0	9.2	92.18
42	44	99.318	-35.49	89.573	-156.98	88.951	86.02
42	43	0	0	19.138	-147.97	0	0
44	47	80.781	-36.98	89.573	-156.98	88.951	86.02
44	45	18.684	-29.03	0	0	0	0
45	46	9.374	-29.03	0	0	0	0
47	49	27.341	-34.95	34.877	-156.99	35.071	90.53

Πίνακας 7.49 Συνέχεια...							
Από ζυγό	Προς ζυγό	Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης Α		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης Β		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
		Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
47	48	35.558	-38.02	36.788	-156.99	36.152	83.08
49	50	9.379	-29.05	0.002	-27.02	18.455	92.04
50	51	9.379	-29.06	0.001	-27.02	0.001	-159.79
51	151	0	0	0	0	0	0
21	23	55.837	-29.03	0.005	-34.78	55.291	92.23
21	22	0	0	19.228	-147.79	0	0
23	25	55.837	-29.03	0.004	-34.78	36.868	92.24
23	24	0	0	0	0	18.423	92.23
25	26	18.619	-29.05	0	0	18.435	92.23
25	28	37.218	-29.02	0.003	-34.77	18.434	92.24
28	29	18.599	-29.03	0.003	-34.77	18.434	92.23
29	30	0.002	83.54	0.002	-34.77	18.435	92.23
30	250	0.001	83.54	0.001	-34.77	0.001	-143.62
26	27	18.619	-29.05	0	0	0.001	-142.27
26	31	0	0	0	0	18.551	92.23
31	32	0	0	0	0	9.277	92.23
27	33	18.62	-29.06	0	0	0	0
152	52	331.795	-14.12	244.011	-129.19	264.899	112.22
52	53	313.891	-13.27	244.011	-129.19	264.899	112.22
53	54	296.034	-12.29	244.011	-129.19	264.899	112.22
54	57	287.135	-11.76	235.516	-128.48	264.899	112.21
54	55	9.307	-29.06	8.991	-147.95	0.002	-155.48
55	56	0.001	96.1	8.992	-147.96	0.001	-155.48
57	60	287.135	-11.76	218.341	-126.86	264.899	112.21
57	58	0	0	18.332	-148.16	0	0
58	59	0	0	9.023	-148.16	0	0
60	160	240.081	-5.7	171.739	-119.85	191	120.51
60	61	0.002	91.85	0.002	-39.99	0.002	-149.38
60	62	45.384	-41.33	52.28	-150.52	80.753	92.25
61	610	0	0	0	0	0	0
62	63	45.389	-41.34	52.283	-150.52	62.041	92.56
63	64	27.185	-49.16	52.286	-150.53	62.043	92.55
64	65	27.192	-49.18	18.032	-157.47	62.048	92.54
65	66	0.01	86.54	0.01	-31.85	34.535	92.73
160	67	240.081	-5.7	171.739	-119.85	191	120.51
67	97	82.499	-30.54	54.176	-148.79	64.347	91.01
67	68	53.875	-30.35	0	0	0	0
67	72	118.879	23.03	126.01	-107.84	132.861	134.31
72	76	118.879	23.03	126.01	-107.84	100.19	156.58
72	73	0	0	0	0	55.26	90.9

Πίνακας 7.49 Συνέχεια...							
Από ζυγό	Προς ζυγό	Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης Α		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης Β		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
		Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
73	74	0	0	0	0	37.278	90.89
74	75	0	0	0	0	18.032	90.88
76	86	32.558	5.99	57.576	-129.75	21.048	157.87
76	77	78.212	60.67	77.579	-57.15	77.705	-177.27
77	78	78.211	60.66	80.206	-44.17	77.704	-177.27
78	80	80.975	74.53	80.205	-44.17	77.703	-177.27
78	79	19.405	-30.53	0.001	-28.88	0.001	-148.29
80	81	80.974	74.53	86.59	-32.59	77.701	-177.27
81	82	80.972	74.53	86.589	-32.59	83.19	-158.4
81	84	0	0	0	0	26.923	90.56
84	85	0	0	0	0	17.956	90.55
82	83	87.337	85.85	86.588	-32.59	83.189	-158.4
86	87	32.557	5.99	49.139	-126.26	21.047	157.87
87	89	17.937	-30.49	33.23	-114.03	21.046	157.86
87	88	21.035	36.44	0	0	0	0
89	91	17.938	-30.49	18.11	-149.25	21.045	157.86
89	90	0	0	21.186	-84.5	0	0
91	93	17.938	-30.49	18.111	-149.25	0.002	-148.29
91	92	0	0	0	0	21.043	157.85
93	95	0.001	78.21	18.111	-149.25	0.001	-148.29
93	94	17.938	-30.5	0	0	0	0
95	96	0	0	9.057	-149.26	0	0
68	69	44.916	-30.36	0	0	0	0
69	70	26.967	-30.37	0	0	0	0
70	71	17.982	-30.38	0	0	0	0
97	197	64.589	-30.61	36.133	-148.82	45.057	91.01
97	98	17.911	-30.33	18.044	-148.73	19.29	91.02
98	99	0.005	82.78	18.044	-148.74	19.29	91.02
99	100	0.003	82.78	0.004	-24.21	19.291	91.01
100	450	0.002	82.78	0.003	-24.21	0.003	-156.83
197	101	64.589	-30.61	36.133	-148.82	45.057	91.01
101	105	64.589	-30.61	36.134	-148.82	0.006	-156.79
101	102	0	0	0	0	45.06	91
102	103	0	0	0	0	36.066	90.99
103	104	0	0	0	0	18.048	90.97
105	108	64.59	-30.61	0.004	-24.23	0.005	-156.79
105	106	0	0	36.137	-148.82	0	0
106	107	0	0	18.081	-148.84	0	0
108	109	64.591	-30.61	0	0	0	0
108	300	0.003	82.66	0.003	-24.23	0.004	-156.79

Πίνακας 7.49 Συνέχεια...							
Από ζυγό	Προς ζυγό	Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης Α		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης Β		Εξερχόμενο ρεύμα Φάσης C	
		Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
109	110	46.548	-30.63	0	0	0	0
110	112	37.503	-30.64	0	0	0	0
110	111	9.045	-30.6	0	0	0	0
112	113	28.193	-30.65	0	0	0	0
113	114	9.067	-30.65	0	0	0	0

Πίνακας 7.50: Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου 132 ζυγών της ΙΕΕΕ

Από Ζυγό	Προς Ζυγό	Απώλειες Φάσης Α (kW)	Απώλειες Φάσης Β (kW)	Απώλειες Φάσης C (kW)
150	149	0	0	0
149	1	11.15356	0.43058	7.54754
1	2	0	0.00374	0
1	3	0	0	0.13668
3	5	0	0	0.0667
5	6	0	0	0.0233
3	4	0	0	0.01631
1	7	8.39201	0.16866	4.51008
7	8	5.4106	0.18438	2.97608
8	12	0	0.00473	0
8	9	0.11919	0	0
9	14	0.08436	0	0
14	10	0.00546	0	0
14	11	0.02217	0	0
8	13	6.68889	0.70063	4.33798
13	34	0	0	0.08152
34	15	0	0	0.01889
15	17	0	0	0.00734
15	16	0	0	0.0315
13	18	2.43176	0.34291	2.12751
18	19	0.08733	0	0
19	20	0.02837	0	0
18	135	-0.00012	0.00016	0.00002
135	35	0.55492	0.39656	0.07445
35	36	0.02973	0.00256	0
36	37	0.02601	0	0
36	38	0	0.02119	0
38	39	0	0.00669	0
35	40	0.24643	0.12604	0.10955

Πίνακας 7.50 Συνέχεια...				
Από Ζυγό	Προς Ζυγό	Απώλειες Φάσης Α (kW)	Απώλειες Φάσης Β (kW)	Απώλειες Φάσης C (kW)
40	41	0	0	0.00693
40	42	0.26534	0.11037	0.08336
42	43	0	0.04611	0
42	44	0.15075	0.06262	0.08582
44	45	0.01758	0	0
45	46	0.00664	0	0
44	47	0.12493	0.11722	0.08495
47	48	0.0125	0.01472	0.00693
47	49	0.01037	0.0301	0.00682
49	50	-0.00155	-0.00017	0.00972
50	51	0.0018	-0.00017	0.00029
51	151	0	0	0
18	21	0.01144	-0.00196	0.11542
21	22	0	0.04887	0
21	23	-0.00548	0.00011	0.11683
23	24	0	0	0.047
23	25	0.02128	0.00013	0.06941
25	28	0.01135	0.00009	0.01472
28	29	-0.00059	0.00014	0.0153
29	30	0.0002	0.00016	0.00995
30	250	0.00011	0.00009	-0.00021
25	26	0.0015	0	0.01589
26	31	0	0	0.0195
31	32	0	0	0.0065
26	27	0.00853	0	-0.00027
27	33	0.04365	0	0
13	152	0	0	0
152	52	3.52739	0.36369	1.72065
52	53	1.55086	0.27124	0.83744
53	54	0.84334	0.22553	0.50921
54	55	0.00312	0.00001	0.00014
55	56	-0.00032	0.00215	0.00014
54	57	1.5374	1.32493	1.37212
57	58	0	0.02131	0
58	59	0	0.00512	0
57	60	3.17905	2.29093	3.29944
60	61	-0.00041	0.00061	-0.00019
61	610	0	0	0
60	62	0.07236	0.1517	0.3409
62	63	0.06467	0.10614	0.12478
63	64	0.03235	0.24514	0.25602
64	65	0.02386	0.03079	0.39751

Πίνακας 7.50 Συνέχεια...				
Από Ζυγό	Προς Ζυγό	Απώλειες Φάσης Α (kW)	Απώλειες Φάσης Β (kW)	Απώλειες Φάσης C (kW)
65	66	0	-0.00001	0.11167
60	160	0	0	0
160	67	0.93233	0.42975	0.999
67	72	0.11769	0.39562	0.25578
72	73	0	0	0.21137
73	74	0	0	0.12246
74	75	0	0	0.03275
72	76	0.16767	0.28435	0.02093
76	77	0.10225	0.15275	0.16629
77	78	0.0342	0.03107	0.04344
78	79	0.00728	-0.0001	-0.00015
78	80	0.12733	0.13938	0.26137
80	81	0.17667	0.1207	0.26903
81	84	0	0	0.12319
84	85	0	0	0.03856
81	82	0.09181	0.11221	0.10171
82	83	0.08181	0.10196	0.13617
76	86	0.07382	0.19061	-0.03588
86	87	0.04479	0.08145	-0.00972
87	88	0.01948	0	0
87	89	0.01879	0.03069	-0.00912
89	90	0	0.02544	0
89	91	0.00887	0.00769	0.00106
91	92	0	0	0.03344
91	93	0.01018	0.00065	-0.00015
93	94	0.02229	0	0
93	95	0.00034	0.00846	-0.0002
95	96	0	0.00413	0
67	68	0.14632	0	0
68	69	0.13969	0	0
69	70	0.05951	0	0
70	71	0.02239	0	0
67	97	0.0937	0.03479	0.07709
97	98	0.00431	0.00696	0.00497
98	99	0.00025	0.02777	-0.0001
99	100	0.00014	-0.00034	0.01007
100	450	0.00036	-0.0009	0.00054
97	197	0	0	0
197	101	0.0596	0.00989	0.04385
101	102	0	0	0.11497
102	103	0	0	0.10644
103	104	0	0	0.05741

Πίνακας 7.50 Συνέχεια...				
Από Ζυγό	Προς Ζυγό	Απώλειες Φάσης Α (kW)	Απώλειες Φάσης Β (kW)	Απώλειες Φάσης C (kW)
101	105	0.13281	-0.01925	0.00018
105	106	0	0.07398	0
106	107	0	0.04733	0
105	108	0.11865	-0.00037	0.00022
108	300	0.00044	-0.00114	0.00069
108	109	0.4727	0	0
109	110	0.16366	0	0
110	111	0.01185	0	0
110	112	0.04427	0	0
112	113	0.10507	0	0
113	114	0.00673	0	0
Σύνολο:		50.41474	10.15207	34.9278

Πίνακας 7.51: Ρεύματα των φορτίων του δικτύου 123 ζυγών της ΙΕΕΕ

Από ζυγό	Ρεύμα φορτίου I ₁		Ρεύμα φορτίου I ₂		Ρεύμα φορτίου I ₃	
	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
1	18.02	-27.2	0	0	0	0
2	0	0	8.926	-146.88	0	0
5	0	0	0	0	9.31	93
6	0	0	0	0	19.24	92.99
4	0	0	0	0	17.995	93.02
7	9.091	-27.67	0	0	0	0
12	0	0	8.951	-147.29	0	0
9	18.316	-28.01	0	0	0	0
10	9.31	-28.04	0	0	0	0
11	18.768	-28.05	0	0	0	0
34	0	0	0	0	19.008	92.34
17	0	0	0	0	9.128	92.32
16	0	0	0	0	18.265	92.31
19	18.625	-28.85	0	0	0	0
20	18.62	-28.87	0	0	0	0
35	10.649	2.17	0	0	0	0
37	18.556	-28.95	0	0	0	0
38	0	0	9.31	-147.91	0	0
39	0	0	9.039	-147.92	0	0
41	0	0	0	0	9.201	92.17
42	9.355	-28.98	0	0	0	0
43	0	0	19.139	-147.97	0	0
45	9.31	-29.02	0	0	0	0

Πίνακας 7.51 Συνέχεια...						
Από ζυγό	Ρεύμα φορτίου I ₁		Ρεύμα φορτίου I ₂		Ρεύμα φορτίου I ₃	
	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
46	9.374	-29.03	0	0	0	0
47	17.908	-38.01	17.908	-156.98	17.908	83.09
48	35.558	-38.02	36.789	-156.99	36.152	83.08
49	18.038	-38.02	34.879	-156.99	16.63	88.86
50	0	0	0	0	18.455	92.03
51	9.379	-29.06	0	0	0	0
22	0	0	19.228	-147.79	0	0
24	0	0	0	0	18.423	92.22
28	18.62	-29.02	0	0	0	0
29	18.6	-29.04	0	0	0	0
30	0	0	0	0	18.436	92.23
31	0	0	0	0	9.274	92.23
32	0	0	0	0	9.278	92.22
33	18.62	-29.06	0	0	0	0
52	18.543	-28.78	0	0	0	0
53	18.593	-28.96	0	0	0	0
55	9.308	-29.07	0	0	0	0
56	0	0	8.992	-147.96	0	0
58	0	0	9.31	-148.16	0	0
59	0	0	9.023	-148.17	0	0
60	9.4	-30.04	0	0	0	0
62	0	0	0	0	18.72	91.21
63	18.827	-30.02	0	0	0	0
64	0	0	34.46	-146.92	0	0
65	10.316	-7.59	10.479	-128	20.667	111.42
66	0	0	0	0	34.539	92.71
73	0	0	0	0	17.983	90.93
74	0	0	0	0	19.246	90.9
75	0	0	0	0	18.033	90.88
76	31.732	-10.56	20.679	-127.87	20.679	111.31
77	0	0	18.024	-148.99	0	0
79	19.405	-30.54	0	0	0	0
80	0	0	17.988	-149.06	0	0
84	0	0	0	0	8.968	90.57
85	0	0	0	0	17.956	90.55
82	17.774	-30.69	0	0	0	0
83	0	0	0	0	8.932	90.54
86	0	0	9.038	-149.07	0	0
87	0	0	18.089	-149.16	0	0
88	17.911	-30.52	0	0	0	0

Πίνακας 7.51 Συνέχεια...						
Από ζυγό	Ρεύμα φορτίου I ₁		Ρεύμα φορτίου I ₂		Ρεύμα φορτίου I ₃	
	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)	Μέτρο (A)	Γωνία (°)
90	0	0	18.62	-149.24	0	0
92	0	0	0	0	17.891	90.79
94	17.939	-30.5	0	0	0	0
95	0	0	9.055	-149.25	0	0
96	0	0	9.057	-149.26	0	0
68	8.959	-30.31	0	0	0	0
69	17.949	-30.34	0	0	0	0
70	8.985	-30.37	0	0	0	0
71	17.982	-30.38	0	0	0	0
98	17.913	-30.34	0	0	0	0
99	0	0	18.047	-148.75	0	0
100	0	0	0	0	19.292	91
102	0	0	0	0	8.994	91.03
103	0	0	0	0	18.018	91
104	0	0	0	0	18.049	90.97
106	0	0	18.056	-148.81	0	0
107	0	0	18.082	-148.84	0	0
109	18.044	-30.56	0	0	0	0
111	9.046	-30.61	0	0	0	0
112	9.31	-30.61	0	0	0	0
113	19.127	-30.65	0	0	0	0
114	9.067	-30.66	0	0	0	0

7.4.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η έκταση ενός δικτύου όπως αυτό των 123 ζυγών της IEEE προσφέρεται κυρίως για συμπεράσματα πάνω στην απόδοση και στους υπολογιστικούς πόρους που αναλώνονται από την προσομοίωσή του. Συγκεκριμένα στατιστικά στοιχεία καταγράφηκαν για αυτό το δίκτυο στην Ενότητα 6.2.2.5 μετά από εκτέλεση 1000 επαναλήψεων σε συγκεκριμένο υπολογιστή.

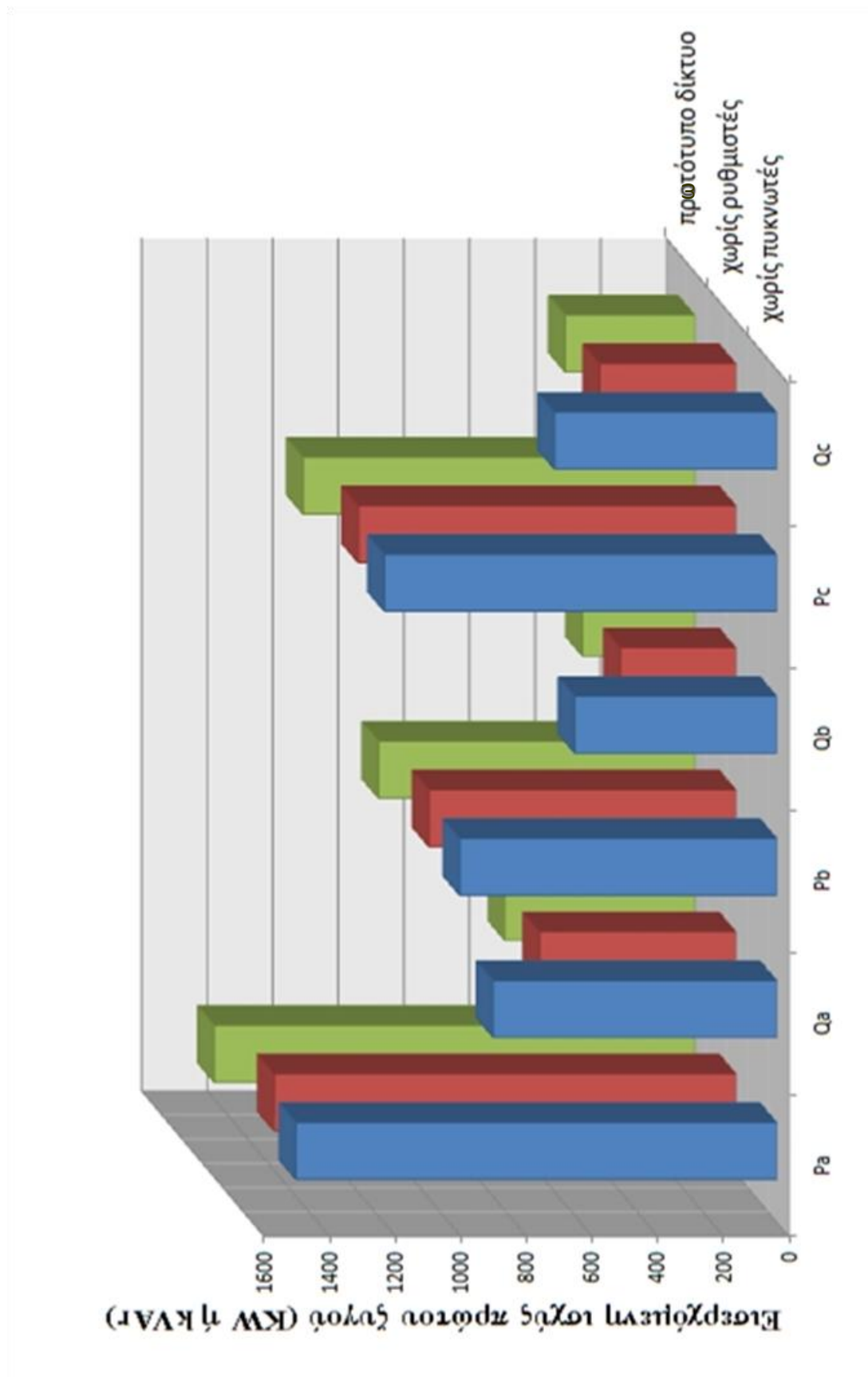
Εκτός όμως από αυτά τα στοιχεία, χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν και ως προς τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής φορτίου του εν λόγω δικτύου. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Η υψηλότερη απώλεια ενεργού ισχύος εμφανίζεται στον αρχικό κλάδο του συστήματος για τις φάσεις A και C. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο δεδομένου ότι το σύνολο του ρεύματος που τροφοδοτεί το σύστημα διέρχεται από τον πρώτο κλάδο, ο οποίος συνδέει τον άπειρο ζυγό με το υπόλοιπο σύστημα. Ως εκ τούτου είναι λογικό το μεγαλύτερο ρεύμα να προκαλεί μεγαλύτερες απώλειες στους κλάδους του δικτύου.

- ✓ Επίσης αναμενόμενη ήταν και με βάση αυτά που σχολιάστηκαν στην Ενότητα 7.3.5, η μη ύπαρξη των μεγαλύτερων απωλειών στον ίδιο κλάδο για όλες τις φάσεις του δικτύου. Σε συνέχεια του προηγούμενου συμπεράσματος, παρατηρείται ότι η φάση Β δεν έχει τις υψηλότερες απώλειες ενεργού ισχύος στον πρώτο κλάδο. Είναι λοιπόν φανερό πως η ασυμμετρία του συστήματος οδηγεί την λιγότερο επιβαρυσμένη, από πλευράς φόρτισης, γραμμή να έχει μικρότερο ρεύμα και άρα μικρότερες απώλειες.
- ✓ Η εκτέλεση του αλγορίθμου χρειάστηκε:
 - 4 επαναλήψεις για την ανάλυση ροής ισχύος χωρίς τους ρυθμιστές
 - 4 επαναλήψεις για την ανάλυση ροής ισχύος μετά τη ρύθμιση του ρυθμιστή 1
 - 1 επανάληψη για την ανάλυση ροής ισχύος μετά τη ρύθμιση του ρυθμιστή 2
 - 1 επανάληψη για την ανάλυση ροής ισχύος μετά τη ρύθμιση του ρυθμιστή 3
 - 4 επαναλήψεις για την ανάλυση ροής ισχύος μετά τη ρύθμιση του ρυθμιστή 4

Οι εκτελέσεις αυτές δείχνουν ότι μικρές αλλαγές που επηρεάζουν μικρότερα κομμάτια του δικτύου χρειάζονται λιγότερες επαναλήψεις για σύγκλιση της μεθόδου, από ότι μεγαλύτερες αλλαγές και σε τμήματα που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο ποσοστό το δίκτυο. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελούν οι 4 επαναλήψεις που χρειάστηκαν για τους ρυθμιστές 1 και 4, σε αντίθεση με τη μόνο 1 επανάληψη που χρειάστηκε για τους ρυθμιστές 2 και 3.

- ✓ Η απόκλιση των αποτελεσμάτων από τα δημοσιευμένα στοιχεία της IEEE είναι μικρότερη από 0.003 p.u. και χαρακτηρίζεται ως ικανοποιητική, με δεδομένο το μέγεθος του δικτύου και τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στη μελέτη, όπως η θεώρηση της διαδρομής των κύριων κορμών από το χρήστη και το αποδεκτό σφάλμα σύγκλισης του αλγορίθμου.
- ✓ Για λόγους εξοικονόμησης χώρου δεν δόθηκαν αναλυτικά αποτελέσματα για τροποποιημένες μεθόδους. Παρόλα αυτά έγινε εκτέλεση δύο τροποποιημένων μεθόδων του πρωτότυπου δικτύου της IEEE. Η μια είναι το αρχικό δίκτυο στο οποίο έχουν αφαιρεθεί όλοι οι πυκνωτές του και η άλλη τροποποιημένη εκδοχή είναι το αρχικό δίκτυο όπου έχουν όμως αφαιρεθεί όλοι οι ρυθμιστές του. Στο Σχήμα 7.5 παρουσιάζεται η εισερχόμενη ενεργός και άεργος ισχύς του πρώτου ζυγού της κάθε εκδοχής του συστήματος 123 ζυγών της IEEE. Από αυτή την παρουσίαση εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:
 1. Η απουσία των πυκνωτών έχει ως αναμενόμενο αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση αέργου ισχύος και επομένως τον αρκετά χαμηλότερο συντελεστή ισχύος. Η κατανάλωση ενεργού ισχύος δεν δείχνει να επηρεάζεται σε σχέση με αυτή την κίνηση, γεγονός το οποίο είναι απόλυτα λογικό.
 2. Η απουσία ρυθμιστών έχει ως αποτέλεσμα την παροχή μικρότερης ενεργού ισχύος και την μικρή αύξηση της αέργου ισχύος. Κάτι τέτοιο έχει φυσικά ως αποτέλεσμα την αύξηση τους συντελεστή ισχύος και των απωλειών.



Σχήμα 7.5 : Εισερχόμενη ενεργή και άεργος ισχύς του ζυγού τροφοδοσίας του συστήματος 123 ζυγών της IEEE

7.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [7.1] "IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee - Distribution Test Feeders," [Online]. Διαθέσιμο: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>, προσπελάστηκε το Μάιο 2010.
- [7.2] W. Kersting, *Distribution System Modeling Analysis*, New Mexico: CRC Press, 2002, pp. 274-285, pp. 303-309.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της ανάλυσης ροής φορτίου σε ασύμμετρα ακτινικά δίκτυα διανομής. Η ανάλυση αυτή είναι ένας θεμελιώδης υπολογισμός στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί ένας ενεργειακός ηλεκτρολόγος μηχανικός να απαιτεί σε καθημερινή βάση δεκάδες ή και εκατοντάδες εκτελέσεις της, ώστε να εξάγει συμπεράσματα για την ασφάλεια του δικτύου και τις επιπτώσεις από τη σύνδεση ή αποσύνδεση φορτίων ή και τη διασύνδεση συστημάτων. Επίσης στην περίπτωση σχεδιασμού και επέκτασης δικτύων διανομής, η προσομοίωση πριν την κατασκευή τους απαιτείται για να είναι βέβαιη η μελλοντική λειτουργία του δικτύου και η υλοποιησιμότητά τους.

Τα δίκτυα διανομής παρουσιάζουν συνήθως βροχοειδή δομή με ακτινική λειτουργία. Αυτό σημαίνει ότι έχουν τη δυνατότητα διαφορετικών συνδεσμολογιών και τροφοδοτήσεων από πολλές οδεύσεις, αλλά η λειτουργία η οποία επιλέγεται είναι συνήθως ακτινική. Κάτι τέτοιο συμβαίνει με επιλογή ανοίγματος και κλεισίματος των κατάλληλων διακοπών του δικτύου.

Η ασύμμετρη φόρτιση των φάσεων των δικτύων διανομής προκύπτει από τα διαφορετικού τύπου φορτία που δύναται να εξυπηρετεί η κάθε φάση. Το φαινόμενο μάλιστα εντείνεται από τα μονοφασικά ή διφασικά φορτία και έτσι καταλήγει το ρεύμα το οποίο διαρρέει την κάθε φάση να είναι διαφορετικό. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα η πτώση τάσης και επομένως η τάση των ζυγών, μετά τον άπειρο ζυγό, να είναι διαφορετική για τον ίδιο ζυγό ανάμεσα στις τρεις φάσεις του.

Για να καταστεί δυνατή η ανάλυση ροής φορτίου των ακτινικών δικτύων διανομής, η οποία ουσιαστικά υπολογίζει όλες τις τάσεις, τα ρεύματα και τις ενεργές και άεργες ισχύς του δικτύου για δεδομένες τιμές τάσης τροφοδοσίας, μοντελοποιήθηκαν με εξισώσεις όλα τα στοιχεία του δικτύου, τα οποία μπορεί να είναι:

- Εγκάρσιοι πυκνωτές αντιστάθμισης αέργου ισχύος.
- Γεννήτριες σταθερής ισχύος (PQ γεννήτριες).
- Φορτία τα οποία διακρίνονται σε:
 - ✓ Φορτία σταθερής ισχύος (S constant)
 - ✓ Φορτία σταθερού ρεύματος (I constant)
 - ✓ Φορτία σταθερής αντίστασης (Z constant)

Επίσης τα ανωτέρω φορτία μπορούν να είναι δύο διαφορετικών συνδεσμολογιών:

- ✓ Συνδεσμολογίας γειωμένου αστέρα, όπου το ένα άκρο του φορτίου συνδέεται σε μια φάση και το άλλο στη γείωση.
- ✓ Συνδεσμολογίας αγείωτου τριγώνου, όπου τα δύο άκρα τα φορτίου συνδέονται σε δύο διαφορετικές φάσεις του δικτύου.

Επιπλέον μοντελοποιήθηκαν και οι κλάδοι του δικτύου ώστε να είναι δυνατό να γίνεται εύρεση της τάσης και του ρεύματος από το ένα άκρο του κλάδου στο άλλο. Οι τύποι κλάδων, οι οποίοι μοντελοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθοι:

- Μετασχηματιστές, οι οποίοι υποβιβάζουν την τάση από την υψηλή του δικτύου μεταφοράς στη μέση του δικτύου διανομής. Επίσης μπορούν να υποβιβάζουν την τάση σε χαμηλή τιμή εντός του δικτύου διανομής για την παροχή ισχύος σε καταναλωτές χαμηλής τάσης. Οι συνδεσμολογίες που αναλύθηκαν αφορούν τις περιπτώσεις των μετασχηματιστών υποβιβασμού:
 - τριγώνου-γειωμένου αστέρα
 - γειωμένου αστέρα - γειωμένου αστέρα
 - τριγώνου – τριγώνου
 - ανοικτού αστέρα – ανοικτού τριγώνου
- Ρυθμιστές, οι οποίοι ρυθμίζουν την τάση σε επίπεδα παραπλήσια της ονομαστικής.
- Γραμμές, οι οποίες είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος κλάδου των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και των δικτύων διανομής ειδικότερα. Οι γραμμές διακρίθηκαν με βάση τη γεωμετρία τους σε:
 - Εναέριες γραμμές.
 - Υπόγειες γραμμές οι οποίες με τη σειρά τους διαχωρίζονται σε:
 - ✓ Υπόγειες γραμμές με καλώδια ομόκεντρου ουδετέρου.
 - ✓ Υπόγειες γραμμές με θωρακισμένα καλώδια.
- Διακόπτες οι οποίοι συνδέουν και αποσυνδέουν τμήματα του δικτύου.

Η μοντελοποίηση όλων αυτών των στοιχείων έκανε δυνατή την περιγραφή ολόκληρου του δικτύου με εξισώσεις και κατά επέκταση τη χρησιμοποίηση αλγορίθμου ανάλυσης ροής φορτίου.

Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Backward and Forward Sweep, η οποία είναι αρκετά διαδεδομένη για την ανάλυση ασύμμετρων ακτινικών δικτύων διανομής. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον τρόπο αντιμετώπισης των κλιμακωτών κυκλωμάτων που συναντώνται στη θεωρία των κυκλωμάτων. Η φύση του αλγορίθμου είναι επαναληπτική και βασίζεται στη διάσχιση του δικτύου με τον ακόλουθο τρόπο:

- Μια διάσχιση από τα άκρα των κλάδων προς την αρχή με δεδομένη μόνο τη τάση στα άκρα, των οποίων η αρχική τιμή προέκυψε από τυχαία πρόβλεψη (backward sweep) και τον υπολογισμό τάσεων και ρευμάτων.
- Μια ακόμη διάσχιση από την αρχή του δικτύου προς τα άκρα του (forward sweep), με δεδομένα τα ρεύματα τα οποία υπολογίστηκαν στην προηγούμενη διάσχιση, αλλά με αρχική τάση αυτή που είναι γνωστή από τα δεδομένα του προβλήματος και όχι αυτή που προέκυψε από την προηγούμενη διάσχιση.

Φυσικά για την αλγοριθμοποίηση των τρόπων διάσχισης ιδιαίτερα χρήσιμη στάθηκε η δεικτοδότηση του κάθε ζυγού με βάση τη μέθοδο που αναλύθηκε στην Ενότητα 2.3.

Για τη μέθοδο BFS (Backward and Forward Sweep) αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι έχει τη δυνατότητα ανάλυσης μεγάλων σε έκταση δικτύων και μάλιστα με ικανοποιητική ακρίβεια. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η εκτέλεση του αλγορίθμου για την ανάλυση του δικτύου των 123 ζυγών της IEEE έγινε σε χρόνο 0.5633 second σε έναν απλό προσωπικό υπολογιστή, όπως περιγράφηκε και στην Ενότητα 6.2.2.6.

Από όλα τα παραπάνω στοιχεία που μοντελοποιήθηκαν και αναλύθηκαν, υλοποιήθηκε ολοκληρωμένο λογισμικό σε MATLAB το οποίο αναλαμβάνει την ανάλυση ροής φορτίου σε ασύμμετρα ακτινικά δίκτυα διανομής με βάση συγκεκριμένο δίκτυο το

οποίο εισάγει ο χρήστης σε αρχείο excel. Οι εντολές δίνονται από το χρήστη μέσα από ειδικά κατασκευασμένο για το συγκεκριμένο σκοπό γραφικό περιβάλλον (GUI).

Για τον έλεγχο και τη παρουσίαση της λειτουργίας του λογισμικού έγινε προσομοίωση των ακόλουθων δικτύων:

- Δίκτυο 6 ζυγών, το οποίο δημιουργήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας και είχε ως σκοπό την παρουσίαση της βήμα προς βήμα εκτέλεσης ενός δικτύου με διακλαδώσεις που να περιλαμβάνει και τα τρία είδη φορτίων. Κάτι τέτοιο δεν είχε αναφερθεί ξανά στη βιβλιογραφία μιας και συνήθως αναφέρονται μόνο δίκτυα χωρίς διακλαδώσεις ως εκπαιδευτικά παραδείγματα και μόνο με φορτία σταθερής ισχύος.
- Δίκτυο 4 ζυγών της IEEE το οποίο είναι το απλούστερο παράδειγμα για επαλήθευση της λειτουργίας του λογισμικού. Το μικρό μέγεθος του δικτύου έδωσε τη δυνατότητα εκτέλεσης δύο τροποποιημένων εκδοχών του για την εξαγωγή επιπλέον συμπερασμάτων, πάνω στη συμπεριφορά του δικτύου σε διαφορετικού τύπου φορτία.
- Δίκτυο 13 ζυγών της IEEE το οποίο περιλαμβάνει πολλά είδη φορτίων μαζί με 4 διακλαδώσεις του κεντρικού κορμού. Χαρακτηρίζεται ως ένα μεσαίου μεγέθους δίκτυο και η παρουσία ρυθμιστή στην αρχή του το χαρακτηρίζει ως το δίκτυο το οποίο περιέχει τη μεγαλύτερη ποικιλία χαρακτηριστικών συγκριτικά με το μέγεθός του. Η προσομοίωση του δικτύου αυτού καθώς και της τροποποιημένης εκδοχής του έδωσε αρκετά χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την παρουσία ή μη ρυθμιστή σε ένα δίκτυο διανομής.
- Δίκτυο 123 ζυγών της IEEE, το οποίο είναι το μεγαλύτερο μέγεθος δίκτυο το οποίο προσομοιώθηκε και του οποίου οι τροποποιημένες εκδοχές επαλήθευσαν τα στοιχεία τα οποία εξήχθησαν από το προηγούμενο δίκτυο.

Από τις προσομοιώσεις αυτές προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- 1) Εφόσον λαμβάνονται υπόψη οι μήτρες εγκάρσιας αγωγιμότητας των γραμμών του δικτύου, το μέτρο του ρεύματος εξόδου από τον προς μελέτη κλάδο είναι ελαφρά υψηλότερο από το ρεύμα εισόδου. Η διαφορά αυτή είναι της τάξεως του 0.005 p.u. στην τιμή του ρεύματος στα εναέρια δίκτυα και επομένως για αυτό το λόγο συνήθως κάτι τέτοιο προς χάριν απλότητας αμελείται. Παρόλα αυτά στο λογισμικό που δημιουργήθηκε, εφόσον ο χρήστης δεν ζητήσει κάτι διαφορετικό, λαμβάνει υπόψη πάντα τη μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας των γραμμών.
- 2) Τα φορτία σταθερής ισχύος, με την προϋπόθεση απουσίας ρυθμιστή, απορροφούν το περισσότερο ρεύμα μιας και για αν αντισταθμίσουν την πτώση τάσης αναγκάζονται να διαρρέονται από μεγαλύτερο ρεύμα για να έχουν την ίδια ποσότητα ισχύος με την ονομαστική. Αντίθετα τα δίκτυα που έχουν φορτία σταθερής αντίστασης έχουν μικρότερη πτώση τάσης, αφού η μειωμένη τάση που εφαρμόζεται στο ζυγό του φορτίου έχει ως αποτέλεσμα την απορρόφηση μικρότερης τιμής ρεύματος. Τέλος τα φορτία σταθερού ρεύματος βρίσκονται ανάμεσα σε αυτές τις δύο κατηγορίες από άποψη πτώσης τάσεως όσο και απορροφούμενου ρεύματος.
- 3) Στις περιπτώσεις απουσίας κάποιων φάσεων η αντίστοιχη στήλη και γραμμή στις μήτρες εγκάρσιας αγωγιμότητας και σύνθετων αντιστάσεων σειράς μηδενίζεται.

- 4) Η αισθητά μικρότερη φόρτιση μιας φάσης σε σχέση με τις άλλες δύο έχει ως αποτέλεσμα την, σε κάποιες περιπτώσεις, αρνητικού προσήμου απώλειας ενεργού ισχύος στη συγκεκριμένη φάση ή και την αύξηση της τιμής της τάσης. Κάτι τέτοιο φυσικά δεν σημαίνει δημιουργία ισχύος από το μηδέν. Η ισχύς αυτή προκύπτει από τις άλλες φάσεις μεταξύ των οποίων υπάρχει σύνδεση μέσω των επαγωγικών αντιδράσεων. Κάτι τέτοιο άλλωστε αναφέρεται ως επίπτωση της ασύμμετρης φόρτισης και στη βιβλιογραφία.
- 5) Η απουσία των εγκάρσιων πυκνωτών αντιστάθμισης έχει ως αναμενόμενο αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση αέργου ισχύος και επομένως τον αρκετά χαμηλότερο συντελεστή ισχύος. Η κατανάλωση ενεργού ισχύος δεν έδειξε να επηρεάστηκε με αυτή την κίνηση.
- 6) Η απουσία ρυθμιστών έχει ως αποτέλεσμα την παροχή μικρότερης ενεργού ισχύος και την μικρή αύξηση της αέργου ισχύος, όπως αυτό φάνηκε στο δίκτυο των 123 ζυγών. Αυτό συνέβη διότι η απουσία ρυθμιστών προκάλεσε μεγαλύτερες πτώσεις τάσης και τα φορτία σταθερής αντίστασης και σταθερού ρεύματος απορροφούσαν μικρότερη ισχύ σε σχέση με πριν. Κάτι τέτοιο έχει φυσικά ως αποτέλεσμα την αύξηση τους συντελεστή ισχύος και των απωλειών.

Τέλος το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα παρουσίασης αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση του δικτύου. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν τόσο τα βασικά μεγέθη της ανάλυσης ροής φορτίου όπως τα ρεύματα, τις τάσεις και τις μιγαδικές ισχύς των ζυγών όσο και πιο εξειδικευμένα μεγέθη, όπως τα ρεύματα των φορτίων, οι μήτρες σύνθετης αντίστασης και εγκάρσιας αγωγιμότητας των γραμμών, τα στατιστικά στοιχεία της εκτέλεσης του αλγορίθμου, τη διακύμανση των τάσεων, κλπ. Η εξαγωγή μάλιστα σε excel του συνόλου των αποτελεσμάτων δίνει τη δυνατότητα να προβεί κάποιος σε επιπλέον στατιστική και τεχνική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, με σκοπό την εξαγωγή άλλων μεγεθών ή συμπερασμάτων.

8.2 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η ανάλυση ροής φορτίου αποτελεί το πλέον θεμελιώδες υπολογισμό στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, επομένως όπως τονίστηκε και στην Ενότητα 6.3 οι επεκτάσεις και οι ενσωματώσεις της σε άλλο λογισμικό είναι πραγματικά πολυάριθμες.

Η εργασία αυτή μπορεί να επεκταθεί και να χρησιμοποιηθεί για:

- Τη βελτιστοποίηση ενός ήδη υπάρχοντος ακτινικού δικτύου διανομής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εφαρμογή της συγκεκριμένης ανάλυσης ροής φορτίου σε επαναληπτικούς αλγορίθμους εύρεσης βέλτιστης θέσης εγκάρσιου πυκνωτή αντιστάθμισης καθώς και βέλτιστης θέσης ρυθμιστή τάσης, ακτινικών ασύμμετρων δικτύων διανομής.
- Τη σύγκριση μεθόδων ανάλυσης ροής φορτίου μεταξύ τους. Ενδεικτικά θα μπορούσαν να συγκριθούν τα αποτελέσματα που παρέχει στα δίκτυα διανομής η Newton-Raphson των δικτύων μεταφοράς, σε σχέση με τη μέθοδο Backward and Forward Sweep, ή τροποποιημένων εκδοχών αυτής.
- Την παροχή κινήτρων από το Διαχειριστή Ηλεκτρικής Ενέργειας σε «έξυπνα» σπίτια για τη μείωση κατανάλωσης ενέργειας σε συγκεκριμένες ώρες τις ημέρας. Οι επαναλαμβανόμενες ροές φορτίου για διάφορα σενάρια κατανάλωσης χιλιάδων «έξυπνων» καταναλωτών στο κεντρικό εξυπηρετητή

του Διαχειριστή, θα έδινε τη δυνατότητα εύρεσης της βέλτιστης λειτουργίας και απαίτησης ισχύος του συστήματος. Έτσι, ο Διαχειριστής Ηλεκτρικής Ενέργειας θα ήταν σε θέση να δώσει κατάλληλη εντολή στους υπολογιστές των συγκεκριμένων κατοικιών για αναβολή ενεργοβόρων διεργασιών (π.χ. θέρμανση νερού) για άλλο διάστημα της ημέρας από τις ώρες υπερφόρτωσης του δικτύου. Το κίνητρο θα μπορούσε να είναι μειωμένο τιμολόγιο για τον καταναλωτή και το κέρδος για το σύστημα θα ήταν οικονομική λειτουργία και ενδεχομένως αποφυγή του κόστους αγοράς ενέργειας από ενδεχόμενη διασύνδεση με άλλο σύστημα.

Τέλος, η ανάλυση της μεταβατικής κατάστασης, ο υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως και ο υπολογισμός των δεικτών αξιοπιστίας, θα μπορούσε να είναι αντικείμενο μελέτης για τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης ενός ασύμμετρου ακτινικού δικτύου διανομής.