



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Βέλτιστη Αναδιάταξη Τοπολογίας Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής
Ενέργειας»**

Μαγδαληνή Ζιγλή

Επιβλέπων καθηγητής:

Γεώργιος Αραμπατζής

Χανιά, Ιούλιος 2019

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	5
Περίληψη.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή στα δίκτυα διανομής.....	7
1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	7
1.2 Δίκτυα Διανομής	9
1.3 Εξοπλισμός και τοπολογίες δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	10
1.3.1 Βασικά στοιχεία δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	10
1.3.2 Τοπολογίες δικτύων διανομής	17
1.4 Προστασία και αξιοπιστία	21
1.4.1 Μέσα Προστασίας και Σχεδίαση προστασίας	21
1.4.2 Αξιοπιστία δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.....	22
1.4.3 Δείκτες Αξιοπιστίας	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Επαναδιαμόρφωση δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας	24
2.1 Ροή φορτίου δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	24
2.1.1 Εισαγωγή στην ανάλυση ροής φορτίου.....	24
2.1.2 Μοντελοποίηση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	25
2.1.3 Αναπαραστάσεις εξοπλισμού συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.....	26
2.2 Εξισώσεις ροών φορτίου	29
2.2.1 Σχηματισμός πίνακα αγωγιμοτήτων	29
2.2.2 Μιγαδικές εξισώσεις ροής φορτίου	31
2.2.3 Εξισώσεις ενεργού και άεργου ισχύος	32
2.2.4 Θεμελίωση του προβλήματος ροών φορτίου	32
2.2.5 Τεχνικές επίλυσης προβλήματος ροών φορτίου	35
2.3 Επαναδιαμόρφωση δικτύων διανομής	39
2.3.2 Βασικοί τύποι σφαλμάτων	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Ανάπτυξη λογισμικού για τη βέλτιστη αναδιάταξη τοπολογίας δικτύων διανομής.....	40
3.1 Στόχοι επαναδιαμόρφωσης δικτύου διανομής	40
3.2 Εισαγωγή στη Βελτιστοποίηση	41
3.2 Προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB	41
3.2.1 Περιγραφή λογισμικού MATPOWER	41

3.2.2	Περιγραφή λογισμικού PSO	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Παρουσίαση προβλήματος		43
4.1	Γενικά	43
4.2	Παράμετροι του προβλήματος	45
4.3	Εισαγωγή δεδομένων στο MATPOWER	45
4.5	Αντικειμενική συνάρτηση	49
4.6	Περιορισμοί προβλήματος και ποινή στην αντικειμενική συνάρτηση	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αποτελέσματα		52
5.1	Γενικά	52
5.2	Εφαρμογές και Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	52
5.2.1	Αποτελέσματα 1 ^{ης} εφαρμογής: Χαμηλά φορτία	52
5.2.2	Αποτελέσματα 2 ^{ης} εφαρμογής: Υψηλό φορτίο	67
5.2.3	Αποτελέσματα 3 ^{ης} δοκιμής: Σφάλμα σε γραμμή	73
5.3	Σύνοψη και σύγκριση αποτελεσμάτων	79
5.3.1	Χαμηλό φορτίο.....	79
5.3.2	Υψηλό φορτίο	80
5.3.3	Σφάλμα σε γραμμή	80
5.3.4	Συγκεντρωτικά διαγράμματα τάσεων και ενεργού και άεργου ισχύος	81
5.4	Σύνοψη της Εργασίας και Γενικά Συμπεράσματα	83
5.5	Βιβλιογραφία	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Παράρτημα		85
6.1	Σχεδιαστική απεικόνιση του Δικτύου Διανομής.....	85
6.2	Πίνακες με δεδομένα ζυγών και κλάδων	87
Περίληψη.....		4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή στα δίκτυα διανομής.....		5
1.1	Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	5
1.2	Δίκτυα Διανομής	7
1.3	Εξοπλισμός και τοπολογίες δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	8
1.3.1	Βασικά στοιχεία δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	9
1.3.2	Τοπολογίες δικτύων διανομής	15
1.4	Προστασία και αξιοπιστία.....	19
1.4.1	Μέσα Προστασίας και Σχεδίαση προστασίας	19
1.4.2	Αξιοπιστία	20
1.4.3	Δείκτες Αξιοπιστίας	21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Επαναδιαμόρφωση δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας	22
2.1 Ροή φορτίου δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	22
2.1.1 Εισαγωγή στην ανάλυση ροής φορτίου.....	22
2.1.2 Μοντελοποίηση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	24
2.1.3 Αναπαραστάσεις εξοπλισμού συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.....	24
2.2 Εξισώσεις ροών φορτίου	27
2.2.1 Σχηματισμός πίνακα αγωγιμοτήτων	27
2.2.2 Μιγαδικές εξισώσεις ροής φορτίου	29
2.2.3 Εξισώσεις ενεργού και άεργου ισχύος	30
2.2.4 Θεμελίωση του προβλήματος ροών φορτίου	30
2.2.5 Τεχνικές επίλυσης προβλήματος ροών φορτίου	33
2.3 Βασικοί τύποι σφαλμάτων.....	37
2.4 Στόχοι επαναδιαμόρφωσης για αποκατάσταση λειτουργίας	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Βελτιστοποίηση – Ανάπτυξη λογισμικού για τη βέλτιστη αναδιάταξη τοπολογίας δικτύων διανομής.....	39
3.1 Εισαγωγή στη Βελτιστοποίηση	39
3.2 Γραφικό περιβάλλον της MATLAB	39
3.2.1 Περιγραφή λογισμικού MATPOWER	39
3.2.2 Περιγραφή λογισμικού PSO.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Παρουσίαση προβλήματος.....	42
4.1 Γενικά	42
4.2 Παράμετροι του προβλήματος	43
4.3 Εισαγωγή δεδομένων	44
4.4 Ανάλυση ροής φορτίου.....	47
4.5 Αντικειμενική συνάρτηση	47
4.6 Περιορισμοί προβλήματος και ποινή στην αντικειμενική συνάρτηση	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αποτελέσματα	51
5.1 Γενικά	51
5.2 Δοκιμές και Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	51
5.2.1 Αποτελέσματα 1 ^{ης} εφαρμογής: Αλλαγή φορτίου.....	52
5.2.2 Αποτελέσματα 2 ^{ης} δοκιμής: Υψηλό φορτίο.....	75
5.2.3 Αποτελέσματα 3 ^{ης} δοκιμής: Σφάλμα σε γραμμή.....	87
5.3 Σύγκριση Δοκιμών	95

5.3.1	Αλλαγές φορτίου	95
5.3.2	Υψηλό φορτίο.....	96
5.3.3	Σφάλμα σε γραμμή.....	96
5.4	Σύνοψη της Εργασίας και Γενικά Συμπεράσματα.....	97
5.5	Βιβλιογραφία	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Παράρτημα		99
6.1	Σχεδιαστική απεικόνιση του Δικτύου Διανομής.....	99
6.2	Πίνακες με δεδομένα ζυγών και κλάδων	100

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Διπλωματική μου εργασία στα πλαίσια της φοίτησής μου στη σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, με θέμα την ανάπτυξη κατάλληλου αλγορίθμου για τη βέλτιστη επαναδιαμόρφωσης δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με τοποθέτηση διακοπών, με χρήση του λογισμικού MATPOWER.

Η εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2018-2019 υπό την επίβλεψη τ. κ. Αραμπατζή Γεώργιου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της και τη βοήθεια κατά την εκπόνησή της. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήρηξή της καθόλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

Χανιά, Ιούλιος 2019

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των δικτύων διανομής και η προσπάθεια της βέλτιστης δυνατής αναδιάταξης της τοπολογίας τους, προκειμένου να αποδώσουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα σε λειτουργικό επίπεδο, με χρήση του αλγορίθμου PSO και του λογισμικού MATPOWER σε περιβάλλον MATLAB. Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, γίνεται μια προσπάθεια ορισμού της ευρύτερης έννοιας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, και στη συνέχεια πιο συγκεκριμένα των δικτύων διανομής, όσον αφορά στο περιεχόμενό τους, αλλά και στον τρόπο λειτουργίας τους.

Στη συνέχεια, θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο θα πρέπει να γίνει η επαναδιαμόρφωση των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό τη βέλτιστη αποκατάσταση της λειτουργίας τους. Θα γίνει αναφορά στους βασικούς τύπους σφαλμάτων αλλά και στους στόχους επαναδιαμόρφωσης προκειμένου να είναι εφικτή η αποκατάσταση της λειτουργίας τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο, θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση προβλήματος ενός μοντέλου ροής, το οποίο βασίζεται στη βέλτιστη επαναδιαμόρφωση των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας, βασιζόμενο στη χρήση λογισμικού, με σκοπό τη βέλτιστη αναδιάταξη τοπολογίας δικτύων διανομής.

Στο επόμενο κεφάλαιο, θα μιλήσουμε γενικότερα για τη βελτιστοποίηση και στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε την αντικειμενική συνάρτηση, τις μεταβλητές ελέγχου, καθώς και τους περιορισμούς του προβλήματος.

Συνοψίζοντας, στο τελευταίο μέρος της εργασίας θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την χρήση του αλγορίθμου και θα επεξηγηθούν, οδηγώντας μας σε συγκεκριμένα συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο τα δίκτυα διανομής αποδίδουν το βέλτιστο αποτέλεσμα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Δίκτυα διανομής, βέλτιστη επαναδιαμόρφωση, MATPOWER, ακτινικά δίκτυα διανομής, βρόχοι, αποκατάσταση λειτουργίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή στα δίκτυα διανομής

1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

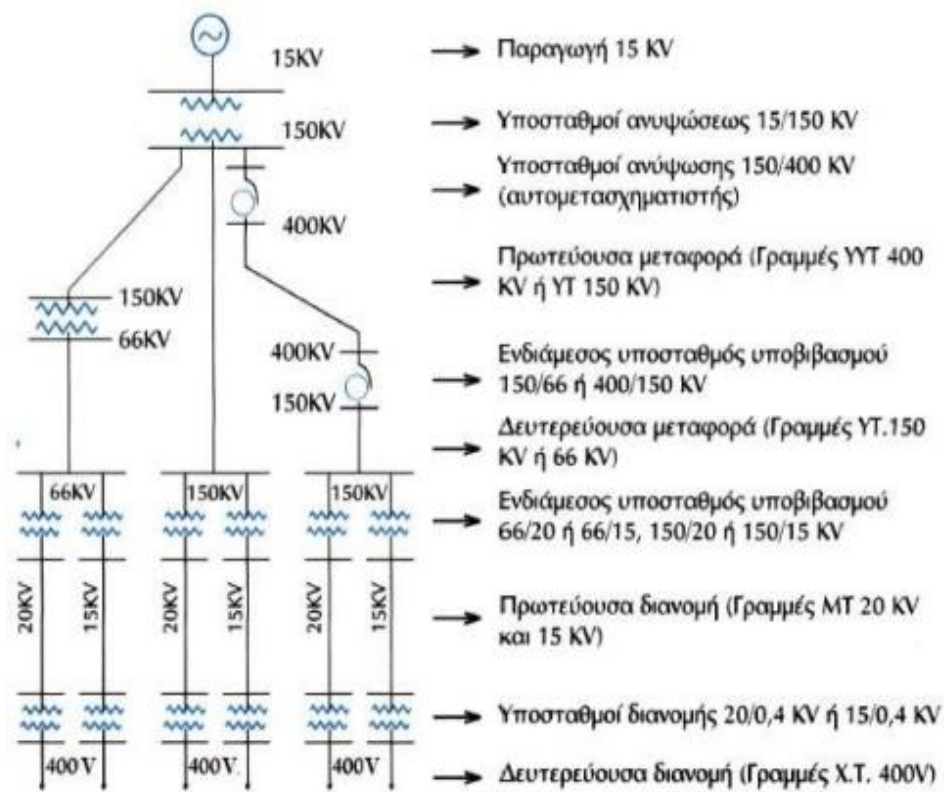
Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του είναι το γεγονός ότι η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να είναι διαθέσιμη οποιαδήποτε στιγμή υπάρχει ζήτηση, η παροχή της είναι οικονομική και οικολογική, καθώς επίσης θα πρέπει να παρέχεται ανελλιπώς και ποιοτικά προς τους καταναλωτές. Θα πρέπει, δηλαδή, να εξασφαλίζεται η σταθερή συχνότητα, η σταθερή τάση και η υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Για την πλήρη εξυπηρέτηση των αναγκών των καταναλωτών όσον αφορά στην ηλεκτρική ενέργεια, θα πρέπει να υπάρχουν στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας τα στάδια της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής.

Τα στάδια αυτά αναλύονται συνοπτικά παρακάτω:

- Το στάδιο της παραγωγής είναι προφανές ότι σχετίζεται με την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, κατά την οποία γίνεται μετατροπή μιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα στους σταθμούς παραγωγής. Εκεί βρίσκονται και οι μετασχηματιστές ανύψωσης της τάσης, οι οποίοι είναι χρήσιμοι στο επόμενο στάδιο, τη μεταφορά. Οι περισσότεροι σταθμοί παραγωγής στη σύγχρονη βιομηχανία της ηλεκτρικής ενέργειας, λειτουργούν μετατρέποντας τη θερμική ενέργεια των ορυκτών καυσίμων και της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων ροών και των υδατοπτώσεων σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω των θερμικών και υδροηλεκτρικών σταθμών. Σημαντική είναι η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από σταθμούς Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και συγκεκριμένα μέσω της εκμετάλλευσης της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας.
- Το δεύτερο στάδιο είναι το σύστημα μεταφοράς, το οποίο μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης, μέσω των γραμμών υψηλής και υπερύψηλης τάσεως. Αποτελείται από τις γραμμές υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεων των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διάφορων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται. Επιπλέον, μέσω διασυνδεδετικών γραμμών, είναι δυνατόν να ανταλλάσει ενέργεια με άλλα γειτονικά δίκτυα. Αυτή η ενέργεια μπορεί να διακινηθεί προς οποιαδήποτε κατεύθυνση επιθυμούμε μέσω των διαφόρων

- Το σύστημα διανομής διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των γραμμών μέσης και χαμηλής τάσεως και των υποσταθμών υποβιβασμού τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες λειτουργίας και ελέγχου που απαιτούνται ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να διανεμηθεί στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής φτάνουν μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης ενέργειας στον καταναλωτή. Μετά το μετρητή ξεκινά η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση..



8

1.2 Δίκτυα Διανομής

Τα δίκτυα διανομής αποτελούνται από:

- Γραμμές διανομής, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές
- Υποσταθμούς υποβιβασμού, οι οποίοι χρησιμεύουν στον μετασχηματισμό της ηλεκτρικής ενέργειας μέσης τάσης σε χαμηλή, ώστε να είναι δυνατό να διανεμηθεί και να χρησιμοποιηθεί από τους πελάτες.
- Εξοπλισμό που εξασφαλίζει την αποτελεσματική και ασφαλή λειτουργία του δικτύου διανομής, δηλαδή τη διατήρηση της ευστάθειας του δικτύου.

Όσον αφορά στο κατασκευαστικό κομμάτι, οι γραμμές διανομής διακρίνονται στις εναέριες και στις υπόγειες. Το κριτήριο με το οποίο γίνεται η επιλογή της γραμμής που θα χρησιμοποιηθεί στο δίκτυο είναι η χωροταξική δομή και τα ιδιαίτερα δομικά χαρακτηριστικά των περιοχών που μας ενδιαφέρουν. Πιο συγκεκριμένα:

- Η χρήση εναέριων καλωδίων είναι πιο οικονομική. Επίσης, σε περίπτωση βλάβης ή σφάλματος, η επιδιόρθωση και η αποκατάσταση μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύ πιο εύκολα. Επίσης, δεδομένου ότι οι εγκαταστάσεις τους είναι επίγειες και όχι υπόγειες, καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο, επομένως δεν ενδείκνυνται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Περισσότερο συναντώνται σε επαρχιακές περιοχές. Η σύγχρονη τεχνική που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των καλωδίων είναι σημαντικά βελτιωμένη, αφού παλαιότερα τα καλώδια ήταν γυμνά και εκτεθειμένα, αφού παλαιότερα τα καλώδια ήταν γυμνά και εκτεθειμένα.
- Τα υπόγεια καλώδια δε επηρεάζουν την αισθητική του περιβάλλοντα χώρου ιδιαίτερα, αφού δεν είναι εμφανή. Τέτοιου είδους γραμμές χρησιμοποιούνται στα κέντρα των πόλεων λόγω της έλλειψης χώρου.

Υπάρχουν τυποποιημένες μορφές δικτύων, οι οποίες έχουν προκύψει ορίζοντας συγκεκριμένους τύπους κατασκευών, μέσω των οποίων γίνεται εκάστοτε η επιλογή, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τα δομικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής, των αναγκών πελατών-καταναλωτών, κλπ. Αυτό γίνεται για λόγους απλοποίησης και ευκολίας, ώστε να μην πραγματοποιούνται άσκοπα δύσκολες και χρονοβόρες μελέτες σε δίκτυα αρκετά κοινότυπα μεταξύ τους, τα οποία διαθέτουν κοινά δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά, αλλά και για οικονομικούς λόγους. Το κατάλληλο δίκτυο που θα επιλεγεί πρέπει να

βασίζεται στους εθνικούς νόμους και κανονισμούς των εσωτερικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

1.3 Εξοπλισμός και τοπολογίες δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μια πολύπλοκη κατασκευή, η οποία περιλαμβάνει μια πληθώρα στοιχείων και εξοπλισμών, σκοπός των οποίων είναι η άρτια διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Παρόλο που η συνεισφορά του κάθε στοιχείου είναι μικρή, είναι εξαιρετικά απαραίτητη και καθοριστική ως προς το συνολικό αποτέλεσμα, δηλαδή προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανάγκες των πελατών. Όπως είναι φυσικό, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός τέτοιου δικτύου είναι πολυσύνθετη. Ωστόσο, εάν έχουμε κατανοήσει πλήρως τις λειτουργίες όλων των στοιχείων που το αποτελούν, τότε η μοντελοποίηση του γίνεται με μεγαλύτερη ευκολία. Για αυτό το λόγο, στη συνέχεια θα δούμε τα βασικά στοιχεία των οποίων ο συνδυασμός μπορεί να μας δώσει ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Συνοπτικά, αυτά είναι:

- οι γραμμές μεταφοράς (αγωγοί)
- οι μετασχηματιστές που αλλάζουν τα επίπεδα τάσης της μεταφερόμενης ενέργειας
- οι διακόπτες
- τα μέσα προστασίας που προσφέρουν ασφάλεια σε περίπτωση βλάβης
- ο εξοπλισμός ρύθμισης τάσης, ο οποίος χρησιμοποιείται για να διατηρεί την τάση μέσα στα επιτρεπτά όρια, καθώς το φορτίο μεταβάλλεται.
- οι υποσταθμοί διανομής

1.3.1 Βασικά στοιχεία δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

▪ Γραμμές διανομής

Αποτελούνται από ηλεκτρικούς αγωγούς, οι οποίοι είναι κατάλληλα μονωμένοι ώστε να εμποδίσουν τυχόν απώλειες της τάσης καθώς και ανεπιθύμητες γειώσεις. Όλες οι γραμμές διαθέτουν αντίσταση, η οποία δημιουργεί διαφορά δυναμικού στα άκρα τους και ηλεκτρικές απώλειες, κάθε φορά που περνά ηλεκτρική ενέργεια. Όλες οι γραμμές διανομής Μέσης Τάσης είναι τριφασικές. Οι περισσότερες γραμμές διανομής Χαμηλής Τάσης είναι τριφασικές, ενώ υπάρχουν και κάποιες μονοφασικές. Οι γραμμές διανομής διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

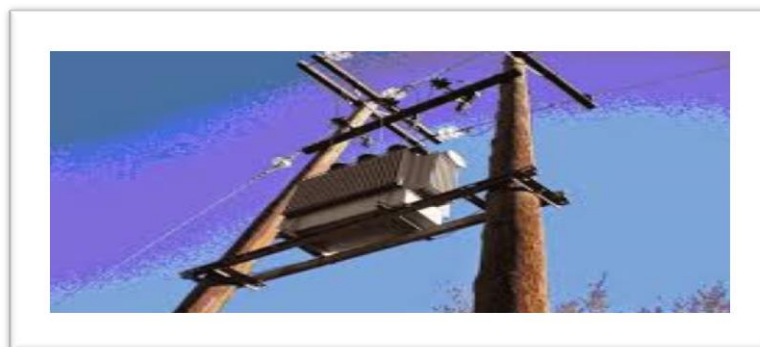
1. Μέσης τάσης: Πρόκειται για γραμμές οι οποίες πραγματοποιούν την πρωτεύουσα διανομή της ηλεκτρικής ισχύος, την οποία λαμβάνουν από τις γραμμές μεταφοράς και τις διανέμουν προς τους κοντινούς υποσταθμούς.
2. Χαμηλής τάσης: Πρόκειται για γραμμές οι οποίες πραγματοποιούν τη δευτερεύουσα διανομή της ηλεκτρικής ισχύος, την οποία λαμβάνουν από τους υποσταθμούς χαμηλής τάσης και διανέμουν προς τους καταναλωτές.



Εικόνα 1.3.1.1: Γραμμή μέσης τάσης, αναρτημένη στον ίδιο στύλο με γραμμή χαμηλής τάσης
(Διπλωματική εργασία: Μελέτη αντικεραυνικής συμπεριφοράς εναέριων γραμμών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή της Καλαμάτας, Νικόλαος Μακρυγιάννης)

■ Μετασχηματιστές

Υπάρχουν ποικίλα είδη μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Συνήθως πρόκειται για μετασχηματιστές ισχύος, οι οποίοι εναλλάσσουν τάση και ρεύμα, διατηρώντας, όμως, ίδια την συνολική ενεργειακή ροή. Οι ηλεκτρικές απώλειες είναι πολύ μικρές. Τα είδη των ηλεκτρικών απωλειών που μπορεί να υπάρξουν είναι είτε λόγω απωλειών πλήρους φορτίου, είτε λόγω απωλειών πυρήνα ή σιδήρου. Για τον υποβιβασμό του φορτίου στο επίπεδο διανομής χρησιμοποιούνται συνήθως μετασχηματιστές 150kV/20kV 20-75MVA, ενώ πλέον στο δίκτυο διανομής για τη μεταφορά ενέργειας στους καταναλωτές έχουμε μετασχηματιστές του επιπέδου 20kV/0,4kV 20kV/0,4kV 15-2000 kVA.



Εικόνα 1.3.1.2: Μετασχηματιστής σε κολώνα της ΔΕΗ

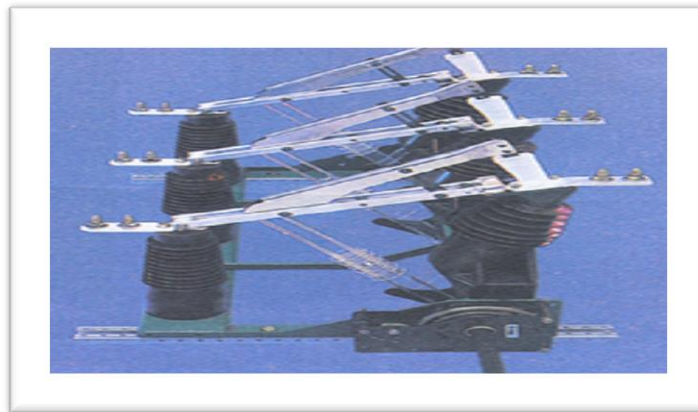
▪ Διακόπτες

Οι διακόπτες χρησιμοποιούνται σε ένα δίκτυο διανομής με σκοπό να γίνονται με ασφάλεια η χρήση και η συντήρηση των εγκαταστάσεων. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά και τη χρήση τους κατηγοριοποιούνται ως εξής:

➔ Αποζεύκτες

Οι αποζεύκτες χρησιμοποιούνται μόνο στην περίπτωση που το κύκλωμα έχει ήδη τεθεί εκτός τάσης ή διαρρέεται από αμελητέο, με σκοπό την απομόνωση τμημάτων του κυκλώματος από την παροχή. Διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες:

1. Ταχείας τήξεως, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη προστασία των Υ/Σ διανομής
2. Βραδείας τήξεως, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη προστασία όλων των διακλαδώσεων από τον κεντρικό κορμό της γραμμής.



Εικόνα 1.3.1.3: Διακόπτες - Αποζεύκτες

➔ Διακόπτες φορτίου

Οι διακόπτες φορτίου ονομάζονται οι συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την απομόνωση (αποσύνδεση) τμημάτων του κυκλώματος από την παροχή, ακόμα και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Δεν είναι δυνατό, όμως, να διακόψουν ρεύμα βραχυκύκλωσης. Στα Δίκτυα Διανομής διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

1. Διακόπτες απομόνωσης, οι οποίοι ενοποιούν δύο τμήματα γραμμών της ίδιας τροφοδοσίας
2. Διακόπτες διασύνδεσης, οι οποίοι παραμένουν ανοικτοί σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Στη περίπτωση που κλείσουν, τότε ενώνουν δύο διαφορετικές γραμμές τροφοδοσίας, δημιουργώντας έναν βρόγχο.

Τα παραπάνω δύο είδη διακοπών παίζουν σημαντικό ρόλο στην επαναδιαμόρφωση του δικτύου, σχετικά με τη λειτουργία του.



Εικόνα 1.3.1.4: Διακόπτες Φορτίου

→ Διακόπτες ισχύος

Οι διακόπτες ισχύος (Δ/I) είναι οι συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αποσύνδεση τμημάτων του κυκλώματος υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος, όπως και οι διακόπτες φορτίου. Είναι δυνατό, επίσης, να προκαλέσουν την παύση της λειτουργίας του κυκλώματος, σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, δηλαδή στην περίπτωση που το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας.

Γενικότερα, ο τρόπος λειτουργίας των (Δ/I) ελέγχεται από ηλεκτρικούς νόμους.



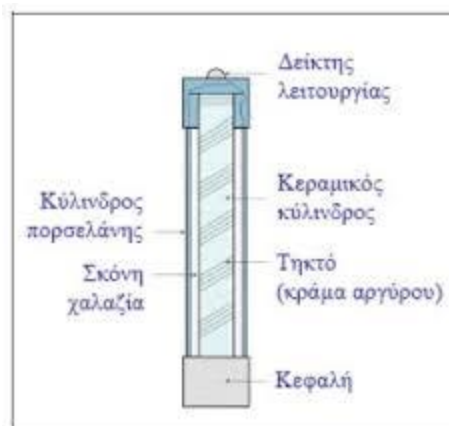
Εικόνα 1.3.4.5: Πυκνωτής σε κολώνα ΔΕΗ

▪ Μέσα προστασίας-Ασφάλειες

Οι ασφάλειες MT χρησιμοποιούνται για να προστατεύσουν ένα κύκλωμα MT όταν σε αυτό υπάρχει βραχυκύκλωμα αλλά και υπερφόρτιση που διαρκεί αρκετή ώρα. Οι ασφάλειες MT χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

➔ Ασφάλειες σκόνης

Οι ασφάλειες αυτές μειώνουν το ρεύμα βραχυκύκλωσης εξαιτίας της σκόνης χαλαζία. Η σκόνη βοηθά στη σβέση του τόξου, που δημιουργείται με την τήξη του αγωγού, λόγω της ψυκτικής της ικανότητας. Ταυτόχρονα όμως δημιουργείται και μια μεγάλη αντίσταση με αποτέλεσμα να μειώνεται ρεύμα βραχυκύκλωσης. Έτσι στην πραγματικότητα το ρεύμα αυτό παίρνει χαμηλότερη τιμή από αυτή που είχε υπολογιστεί αρχικά με αποτέλεσμα να υπάρχει μια επιπλέον προστασία του εξοπλισμού σε μια εγκατάσταση. Η ασφάλεια αυτή είναι ακριβότερη από την ασφάλεια εκτόνωσης, και χρησιμοποιείται σε εσωτερικούς χώρους.



Εικόνα 1.3.1.6: Βασικά μέρη ασφάλειας χαλαζία (Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία: Μέθοδοι Ρύθμισης της τάσης στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής, Χρήστος Πανουσόπουλος)

➔ Ασφάλειες εκτόνωσης

Κατά τη διάρκεια της σβέσης όμως δημιουργούνται τοξικά αέρια, τα οποία εκλύονται στο χώρο που βρίσκεται η ασφάλεια, αφού ο σωλήνας είναι ανοιχτός. Γι' αυτό τον λόγο δεν επιτρέπεται η χρήση της συγκεκριμένης ασφάλειας σε κλειστούς χώρους αλλά χρησιμοποιούνται μόνο σε εξωτερικούς χώρους, σε υπαίθριες εγκαταστάσεις. Οι ασφάλειες αυτές δεν μειώνουν το ρεύμα βραχυκύκλωσης όπως οι ασφάλειες σκόνης. Οι ασφάλειες εκτόνωσης είναι πολύ πιο φθηνές σε σχέση με τις ασφάλειες σκόνης γι' αυτό και προτιμούνται σε υπαίθριες εγκαταστάσεις.



Εικόνα 1.3.1.7: Ασφάλεια εκτόνωσης (Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία: Μέθοδοι Ρύθμισης της τάσης στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής, Χρήστος Πανουσόπουλος)

▪ Μέσα ρύθμισης τάσης

Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της πτώσης τάσης, τοποθετούνται αυτομετασχηματιστές κατά μήκος του Δικτύου Διανομής. Έτσι, τα επίπεδα της τάσης «ισομοιράζονται» και οι καταναλωτές στο τέλος της γραμμής μεταφοράς έχουν σχεδόν ίση τάση με εκείνους στο ξεκίνημά της. Όταν οι γραμμές είναι μεγάλου μήκους, τότε εγκαθίστανται περισσότεροι ρυθμιστές τάσης.



Εικόνα 1.3.1.8: Τριφασικός Αυτομετασχηματιστής Εικόνα 1.3.1.9: Αυτομετασχηματιστής

Προκειμένου να τεθεί υπό έλεγχο η τάση αλλά και να γίνεται με μεγαλύτερη ευκολία η διόρθωση του συντελεστή ισχύος των γραμμών του δικτύου, οι υποσταθμοί

και οι μετασχηματιστές διαθέτουν συστοιχίες πυκνωτών. Μεγαλύτερη είναι η χρήση των παράλληλων χωρητικών αντισταθμίσεων, παρά σε σειρά, καθώς η σύνδεση σε σειρά μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις. Οι πυκνωτές που εφαρμόζονται σε παράλληλη σύνδεση με τις γραμμές διανομής ονομάζονται και εγκάρσιοι πυκνωτές ή εγκάρσιες αντισταθμίσεις, λόγω της δυνατότητάς τους να παρέχουν άεργο ισχύ στο δίκτυο, εξισορροπώντας με αυτό τον τρόπο ένα μέρος της άεργου κατανάλωσης από τις αντιδράσεις των γραμμών. Το κόστος των πυκνωτών είναι μεγάλο επομένως η προσθήκη τους αυξάνει σημαντικά και το συνολικό κόστος του δικτύου. Επιπλέον οικονομική επιβάρυνση στην τοποθέτησή τους μπορεί να επιφέρει η θέση στην οποία θα τοποθετηθούν. Παρόλο που είναι περισσότερο αποτελεσματικοί εάν τοποθετηθούν κοντά στους καταναλωτές, το κόστος μεγαλώνει κατακόρυφα, επομένως προτιμάται η τοποθέτησή τους κοντά στους υποσταθμούς. Η τοποθέτησή τους μπορεί, επίσης, να γίνει κοντά σε ζυγούς του δικτύου, συμβάλλοντας έτσι, στη μείωση της πτώσης τάσης μεταξύ των γραμμών του, καθώς επίσης και στη μεταβολή του συντελεστή ισχύος προς τη μονάδα.

■ Υποσταθμοί διανομής

Τα δίκτυα διανομής ξεκινούν από τους υποσταθμούς Υψηλής Τάσης. Καθώς μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια Μέσης Τάσης στο δίκτυο, καταλήγει στους υποσταθμούς διανομής, στους οποίους γίνεται ο υποβιβασμός της ηλεκτρικής ενέργειας από Μέσης Τάση σε Χαμηλή Τάση και στη συνέχεια σε αυτή τη μορφή πλέον παρέχεται στο δευτερεύον σύστημα και στις οικιακές εγκαταστάσεις. Βασικό στοιχείο των υποσταθμών διανομής είναι ο μετασχηματιστής διανομής, ενώ απαραίτητα είναι και τα μέσα ρύθμισης τάσης αλλά και ο εξοπλισμός προστασίας προς αποφυγήν τυχόν ατυχημάτων, όπως διακόπτες, κλπ.



Εικόνα 1.3.1.10: Συμπαγής Υποσταθμός Διανομής MT(www.sabos.com)



Εικόνα 1.3.1.11: Υποσταθμός διανομής

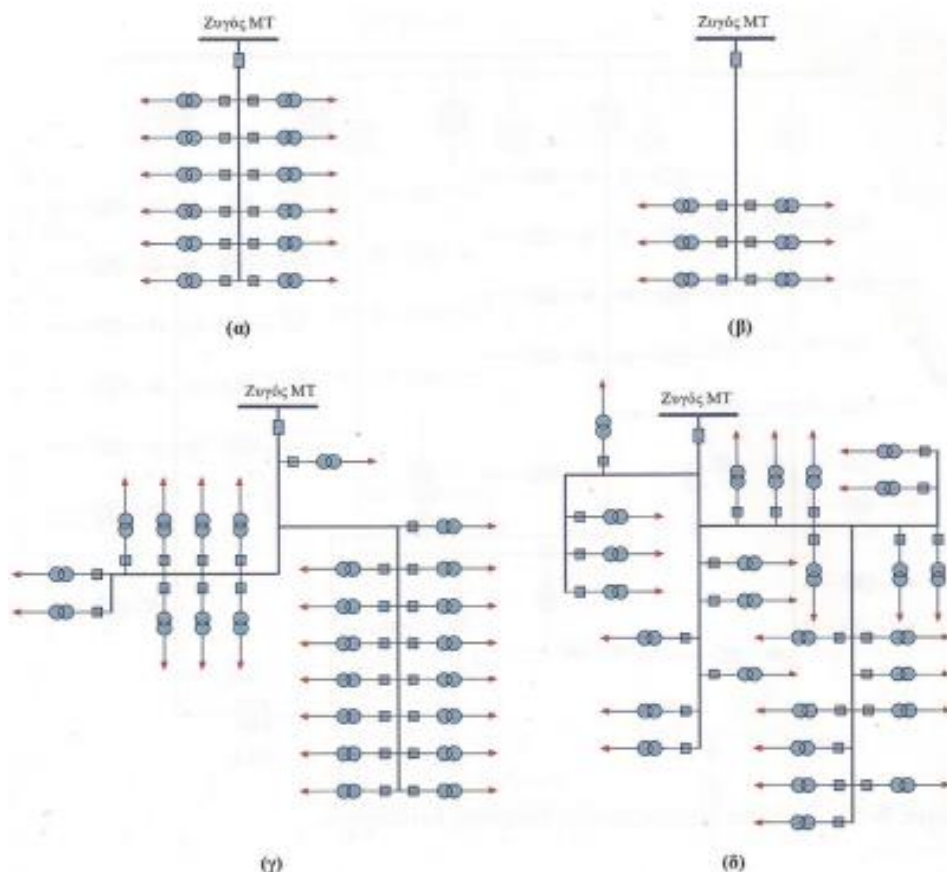
1.3.2 Τοπολογίες δικτύων διανομής

Τα Δίκτυα Διανομής κάθε περιοχής είναι διαφορετικά και ποικίλλουν, λόγω των ιδιαίτερων χωροταξικών και δομικών χαρακτηριστικών τους. Για αυτό το λόγο, παράγοντες όπως η τοποθεσία, το είδος του φορτίου που μεταφέρουν, κ.α., επηρεάζουν τον τρόπο λειτουργίας τους, αλλά και τη συνδεσμολογία μεταξύ των γραμμών. Οι βασικές τοπολογίες που συναντώνται στα δίκτυα διανομής είναι οι εξής:

- Ακτινικά Δίκτυα (Radial)
- Βροχοειδή Δίκτυα (Loop)
- Δικτυωτά Δίκτυα (Networks)

Ακτινικά Δίκτυα

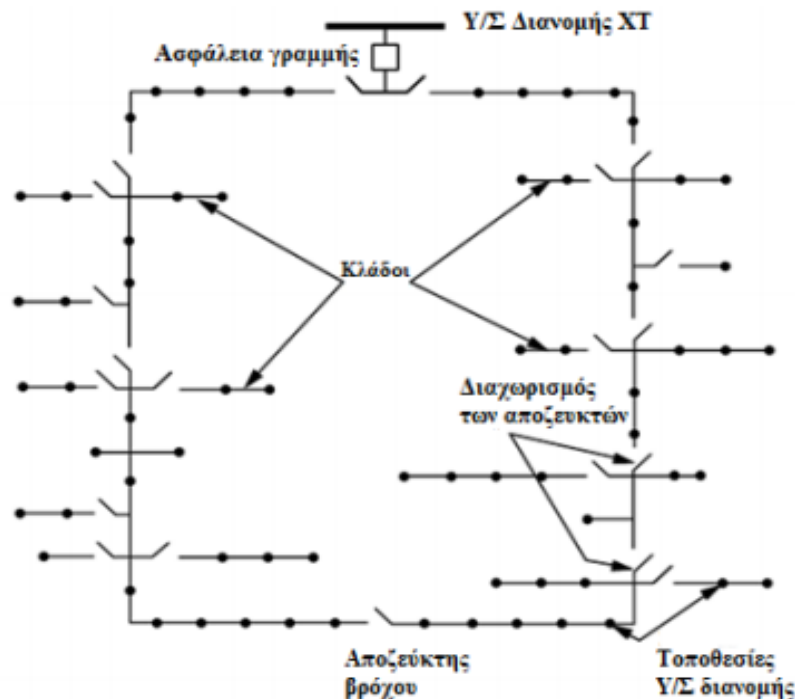
Τα ακτινικά δίκτυα προτιμώνται περισσότερο για τον σχεδιασμό των Δικτύων Διανομής από τα βροχοειδή και τα δικτυωτά. Βασικό τους γνώρισμα είναι η ύπαρξη ενός και μοναδικού αγωγού-μονοπατιού ανάμεσα σε καταναλωτή και υποσταθμό. Η κατεύθυνση της ηλεκτρικής ροής είναι από τον υποσταθμό προς τους καταναλωτές μέσω αυτού του αγωγού. Το γεγονός ότι υπάρχει μόνο ένας αγωγός από τον οποίο διαρρέεται η ηλεκτρική ροή, καθιστά αυτή την τοπολογία λιγότερο αξιόπιστη σε σχέση με τις υπόλοιπες, καθώς σε περίπτωση σφάλματος κάποιου στοιχείου του, θα υπάρξει απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλα αυτά, η τοπολογία αυτή υπερτερεί των υπολοίπων, καθώς προσφέρει τα εξής οφέλη: είναι πολύ πιο οικονομική σε σχέση με τις υπόλοιπες και εξαιρετικά απλή ως προς τον σχεδιασμό, τη δομή, την κατασκευή και την λειτουργικότητά της.



Εικόνα 1.3.2.1: Τυπικές μορφές ακτινικών δικτύων: (α) Απλή μορφή , (β) Υπεραστική Μορφή, (γ) Δενδροειδής μορφή , (δ) Σύνθετη δενδροειδής μορφή
(Μέθοδοι Ρύθμισης της τάσης στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής, Χρήστος Πανουσόπουλος)

Βροχοειδή Δίκτυα

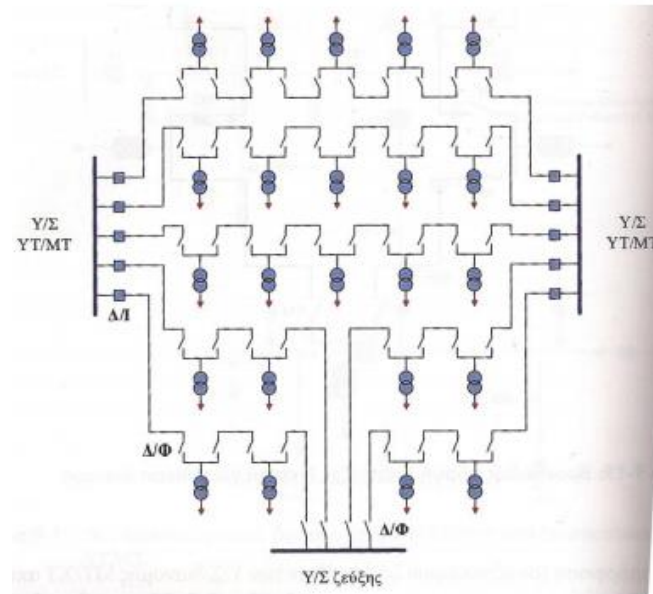
Άλλη μια βασική τοπολογία που χρησιμοποιείται στα Δίκτυα Διανομής είναι τα βροχοειδή δίκτυα. Πρόκειται για ένα κυκλικό σύστημα το οποίο, σε αντίθεση με το ακτινικό, αποτελείται από δύο μονοπάτια μεταξύ υποσταθμού και καταναλωτή. Αυτού του είδους τα δίκτυα τροφοδοσίας θεωρούνται πιο περίτεχνα σε σχέση με τα ακτινικά, καθώς η ροή της ηλεκτρικής ενέργειας ξεκινά από τις δύο πλευρές κατευθυνόμενη προς το κέντρο. Παρά την περιπλοκότητα που παρουσιάζουν στην κατασκευή τους, τα βροχοειδή δίκτυα μπορούν να αποδειχθούν πιο αξιόπιστα και λειτουργικά από τα ακτινικά, εάν ακολουθηθούν σωστά όλες οι προδιαγραφές κατασκευής τους. Βασικό πλεονέκτημα είναι ότι σε περίπτωση απώλειας κάποιου στοιχείου, η παροχή δε θα σταματήσει καθώς υπάρχουν δύο αγωγοί. Σημαντικό μειονέκτημα είναι η μικρή χωρητικότητά τους και το υψηλό κόστος τους.



Εικόνα 1.3.2.2: Βροχοειδές δίκτυο πρωτεύουσας διανομής (Παναγιώτης Α. Καραφώτης , Βέλτιστη επαναδιαμόρφωση ακτινικών δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας)

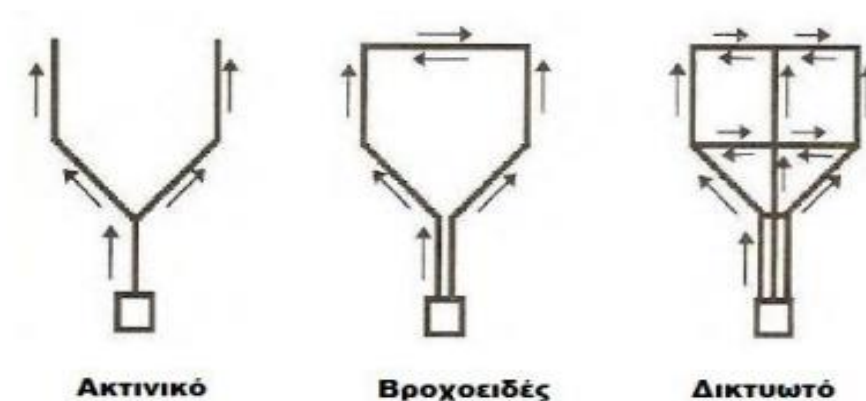
Δικτυωτά Δίκτυα

Τα Δικτυωτά Δίκτυα Διανομής είναι τα πιο πολύπλοκα, αφού περιλαμβάνουν μονοπάτια ανάμεσα σε όλα τα σημεία τους, αλλά ταυτόχρονα είναι και τα πιο αξιόπιστα. Η ηλεκτρική ισχύς ρέει ανάμεσα στα σημεία μέσα από διαφορετικά μονοπάτια. Εάν εμφανιστεί βλάβη, λοιπόν, σε κάποιο μονοπάτι, το σύστημα αυτομάτως ανακατευθύνει την ροή του. Τα δικτυωτά δίκτυα πολύ συχνά διαθέτουν πλέγματα ακτινικών τροφοδοσιών και ένα δευτερεύον δικτυωτό σύστημα, το οποίο χρησιμεύει στη σύνδεση των πελατών με την αρχική τάση που χρησιμοποιείται, μέσω ηλεκτρικά ισχυρών αγωγών. Όσον αφορά στο κόστος, συνήθως είναι πιο ακριβά σε σχέση με τα ακτινικά ή τα βροχοειδή. Παρά την αξιοπιστία τους, παρουσιάζουν και μια βασική αδυναμία. Η αυξημένη τους πολυπλοκότητα, καθιστά την ανάλυση και τον σχεδιασμό τους πιο δύσκολα.



Εικόνα 1.3.2.3: Δικτυακή μορφή ανάπτυξης δικτύου υπόγειας διανομής (Μέθοδοι Ρύθμισης της τάσης στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής, Χρήστος Πανουσόπουλος)

Στην επόμενη εικόνα φαίνονται οι διαφοροποιήσεις στη σύνδεση ενός υποσταθμού με ένα ακτινικό, ένα βροχοειδές και ένα δικτυωτό σύστημα τροφοδοσίας, ενώ τα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση της ηλεκτρικής ισχύος.



Εικόνα 1.3.2.4: Διαφοροποιήσεις στη σύνδεση ενός υποσταθμού μεταξύ ενός ακτινικού, ενός βροχοειδούς και ενός δικτυωτού συστήματος τροφοδοσίας. (Μέθοδοι Ρύθμισης της τάσης στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής, Χρήστος Πανουσόπουλος)

1.4 Προστασία και αξιοπιστία

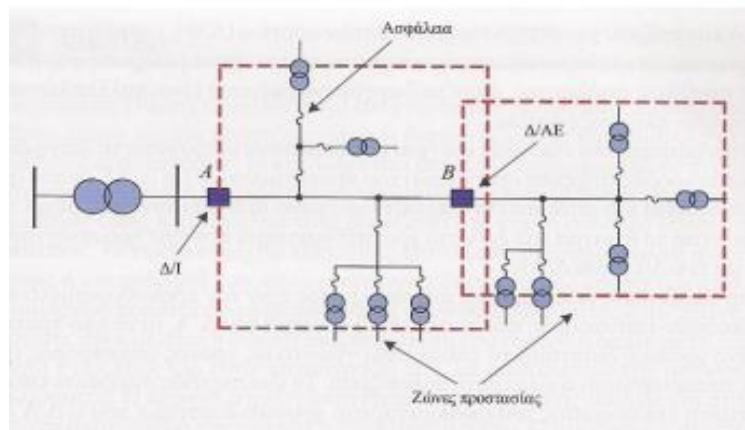
1.4.1 Μέσα Προστασίας και Σχεδίαση προστασίας

Τα μέσα προστασίας χρησιμοποιούνται με στόχο την καλύτερη δυνατή προστασία του ηλεκτρικού φορτίου και του ηλεκτρικού κυκλώματος. Χρησιμοποιούνται σε όλα τα επίπεδα της τάσης του ρεύματος και σκοπός τους είναι η προστασία όλης της εγκατάστασης. Πρακτικά, σε περίπτωση προβλήματος, λειτουργούν διακόπτοντας στην τροφοδοσία στο σημείο βλάβης, απομονώνοντας τη συσκευή, το κύκλωμα ή την εγκατάσταση που προκαλεί το σφάλμα έως ότου αυτό αποκατασταθεί. Η ύπαρξη μέσων προστασίας στα ΣΗΕ, προσδίδουν τα χαρακτηριστικά της ευστάθειας και της λειτουργικότητας, τα οποία είναι απαραίτητα σε τέτοιου είδους εγκαταστάσεις.

Διακρίνονται σε δύο είδη:

1. Προστασία εξοπλισμού: Σκοπός είναι να προστατέψει τον εξοπλισμό της εγκατάστασης, περιορίζοντας το σημείο στο οποίο έχει δημιουργηθεί το πρόβλημα, ελαχιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο την εξάπλωση της στις μηχανικές βλάβες του εξοπλισμού. Προκειμένου να συμβεί αυτό, η προστασία εξοπλισμού δίνει εντολή σε κάποιον διακόπτη που είναι κοντά στο σημείο του προβλήματος να ανοίξει, ώστε το σημείο αυτό να απομονωθεί, χωρίς να εξαπλωθεί και σε άλλα στοιχεία η βλάβη έως ότου να αποκατασταθεί το σφάλμα και να επανέλθει σε λειτουργία.
2. Προστασία συστήματος από αστάθεια: Αστάθεια μπορεί να προκύψει σε ένα σύστημα, όταν συμβεί κάποια σημαντική ανεπάρκεια, όπως η απώλεια μιας ολόκληρης μονάδας παραγωγής ή απρόσμενη αύξηση του φορτίου ζήτησης. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητο να υπάρχει ένας εξοπλισμός, ο οποίος θα καθιστά δυνατό να επαναφέρει την ευστάθεια στο σύστημα για να συνεχιστεί ομαλά η λειτουργία του.

Γενικότερα, ένα σύστημα προστασίας αποτελείται από Μετασχηματιστές Έντασης (ΜΕ), Μετασχηματιστές Τάσης (ΜΤ) και Ηλεκτρονόμους Προστασίας (Η/Ν). Η κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος δεν είναι μια εύκολη διαδικασία, καθώς οι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζονται είναι σημαντικής σημασίας. Ο πρώτος αφορά στο οικονομικό κομμάτι, το οποίο σχετίζεται με το κόστος επένδυσης, το κόστος κατασκευής αλλά και το κόστος συντήρησης μετά την κατασκευή του. Άλλος ένας ανασταλτικός παράγοντας είναι η συμβατότητα με τις ήδη υπάρχουσες διατάξεις, ώστε να υπάρχει μια ομοιομορφία, η οποία συνεπάγεται την ομαλή και απερέγκλιτη λειτουργία του δικτύου. Τέλος, σημαντικό ρόλο έχουν οι μετρήσεις και καταγραφές σφαλμάτων των ήδη υπαρχόντων συστημάτων με όμοιες τοπογραφικές και λειτουργικές προδιαγραφές, με στόχο την αποφυγή των ίδιων λαθών μελλοντικά, συνεπώς και τη βελτίωση της λειτουργίας.



Εικόνα 1.4.1.1: Μέσα προστασίας ακτινικής γραμμής με Δ/I και Δ/E

1.4.2 Αξιοπιστία δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας

Βασικό κριτήριο με το οποίο κατασκευάζονται τα δίκτυα διανομής είναι η διατήρηση της συνεχούς τροφοδότησης των καταναλωτών. Οι επιχειρήσεις παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι υποχρεωμένες να παρέχουν όσο το δυνατόν καλύτερη ποιότητα ρεύματος, έχοντας ταυτόχρονα το ελάχιστο δυνατό κόστος από τη χρήση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεχής τροφοδότηση ονομάζεται η κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών έχοντας πάντα εφαρμοσμένα τα μέτρα ασφαλείας για προσωπικό και εξοπλισμό. Η τροφοδότηση καλής ποιότητας θεωρείται πως είναι η διανομή ενέργειας εντός συγκεκριμένων ορίων τάσης και συχνότητας. Οι πιθανές διακοπές τροφοδότησης προκαλούν σφάλματα στους καταναλωτές, αλλά και στις ηλεκτρικές επιχειρήσεις, τα οποία σαφώς έχουν αντίκτυπο στο κόστος. Βέβαια, το μέγεθος του κόστους της ζημίας εξαρτάται από τη διάρκεια των διακοπών, τον τύπο του καταναλωτή (οικία, βιομηχανία, κ.λπ.) αλλά και τον χρόνο συχνότητάς τους. Συνήθως η διάρκεια των διακοπών είναι της τάξης των λεπτών, ενώ μπορεί να γίνουν και δευτερολέπτων. Όσο μικρότερος ο χρόνος του σφάλματος, τόσο δυσκολότερο είναι να εντοπιστεί το οικονομικό ποσό που κόστισε, ενώ σε σφάλματα της τάξεων του λεπτού τα κόστη είναι πιο υπολογίσιμα.

1.4.3 Δείκτες Αξιοπιστίας

Οι βασικοί δείκτες μέσω των οποίων ελέγχεται η ποιότητα της παροχής ηλεκτρικής ισχύος είναι οι εξής:

- Συχνότητα διακοπών του συστήματος (λ σε γεγ./έτος): Ο μέσος αριθμός των διακοπών σε ολόκληρο το σύστημα ανά έτος.
- Μέσος χρόνος διακοπών των καταναλωτών (r σε ώρες): Ο μέσος αριθμός των διακοπών ανά καταναλωτή, για δεδομένη μονάδα χρόνου
- Συνολικός χρόνος διακοπών (U σε ώρες/έτος): Ο συνολικός χρόνος διακοπής τροφοδότησης ανά ώρες, σε μονάδα χρόνου έτους.
- Μέσο διακοπτόμενο φορτίο – ΔΦ: Η μέση ισχύς (kVA) ανά μονάδα συνδεδεμένου φορτίου, για δεδομένη μονάδα χρόνου
- Μη Διανεμόμενη Ενέργεια Συστήματος- ΜΔΕΣ (E σε MWh/έτος): Πρόκειται για τη ζήτηση ενέργειας από τους καταναλωτές που δεν καλύπτεται λόγω των διακοπών, σε ετήσια βάση. Ο υπολογισμός της γίνεται αθροίζοντας τη Μη Διανεμόμενη Ενέργεια όλων των πελατών-καταναλωτών, η οποία ΜΔΕ κάθε καταναλωτή υπολογίζεται από τον συνολικό αναμενόμενο χρόνο αποκοπής και τη μέσης ζήτηση ισχύος του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Επαναδιαμόρφωση δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας

2.1 Ροή φορτίου δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Στα ακτινικά δίκτυα ο υπολογισμός της ροής ισχύος είναι σχετικά εύκολος, ενώ στα βροχοειδή μπορεί να αποτελέσει μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία. Μεγάλη σημασία δίνεται τόσο στο τεχνικό κομμάτι, το οποίο εστιάζει στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μεταφορά ισχύος, αλλά και στο οικονομικό κομμάτι.

Βασικά στοιχεία ενός δικτύου διανομής είναι οι ζυγοί και οι γραμμές τους. Η ροή ισχύος διοχετεύεται από τους υποσταθμούς προς τους ζυγούς, μέσω των γραμμών διανομής. Όσον αφορά στη ροή, δυσκολία συναντάται κατά τον υπολογισμό τόσο των τάσεων όσο και της ενεργού και άεργου ισχύος, τα οποία εξαρτώνται από την κατανάλωση των φορτίων, την παραγωγή της ενεργού ισχύος και τις τάσεις των γεννητριών.. Οι μελέτες ροής φορτίου θα δώσουν στοιχεία:

- Α. Για τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να αναπτυχθεί το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να γίνει ακόμα πιο αποδοτικό ως προς τη ζήτηση που απαιτούν οι καταναλωτές.
- Β. Για τις συνέπειες πιθανών σφαλμάτων στο σύστημα.
- Γ. Εάν οι τάσεις και οι ροές ισχύος ξεπερνούν τα καθορισμένα όρια των στοιχείων του δικτύου.
- Δ. Για την κατάλληλη επιλογή τοποθέτησης μικρών διεσπαρμένων γεννητριών, ώστε να δίνουν υψηλή απόδοση με χαμηλό κόστος καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας τους, αφού τα φορτία τους δεν είναι σταθερά και αλλάζουν κατά τη διάρκεια της ημέρας.

2.1.1 Εισαγωγή στην ανάλυση ροής φορτίου

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την ροή ισχύος σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο θα πρέπει να υπολογιστούν τα παρακάτω για ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας:

1. Η τάση κατά μέτρο και γωνία σε κάθε ζυγό του συστήματος
2. Το μέτρο των ροών ενεργού ισχύος στις γραμμές του συστήματος
3. Το μέτρο των ροών άεργου ισχύος στις γραμμές του συστήματος

Όπως γνωρίζουμε, ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατό να λειτουργήσει με περισσότερους από έναν τρόπους και ρυθμίσεις. Η ανάλυση βέλτιστης ροής φορτίου,

υπολογίζει τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάλυση αυτή, αποκτά ακόμα μεγαλύτερη σημασία σε περιπτώσεις αλλαγής της τοπολογίας του συστήματος, καθώς πριν προβούμε στην οποιαδήποτε αλλαγή, θα πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι το σύστημα μπορεί να ανταποκριθεί σε αυτές τις απαιτήσεις. Τέτοιες αλλαγές μπορεί να είναι η ένταξη νέων μονάδων παραγωγής, η ένταξη ή αποδέσμευση φορτίων στο δίκτυο, η διασύνδεση με άλλα συστήματα και η δημιουργία νέων αγωγών μεταφοράς, ή ακόμη και ο συνδυασμός αυτών.

Εκτός από τις περιπτώσεις υπολογισμού της ροής κατά τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος και τις πιθανές αλλαγές στη διάταξή του, η ανάλυση ροής φορτίου εφαρμόζεται και σε περιπτώσεις σφαλμάτων ύπαρξης βλαβών στο σύστημα. Τέτοιες βλάβες μπορεί να είναι βραχυκυκλώματα, βλάβη κάποιας μονάδας παραγωγής ή αποσύνδεση κάποιας γραμμής μεταφοράς.

Οι μελέτες ροών του φορτίου που μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες :

- Για μελέτες ανάπτυξης και επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Για τον έλεγχο των τάσεων και ροών, με σκοπό τη διατήρησή τους εντός των προκαθορισμένων ορίων λειτουργίας.
- Για τη μελέτη πιθανών διαταραχών, π.χ. απώλεια κάποιου στοιχείου του δικτύου
- Για την επιλογή της οικονομικότερης δυνατής λειτουργίας των γεννητριών του συστήματος, καθώς τα φορτία μεταβάλλονται συνεχώς μέσα στη μέρα, επομένως καθίσταται απαραίτητος ο συνεχής υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος κάθε γεννήτριας, ώστε το δίκτυο να τροφοδοτείται με το οικονομικότερο δυνατόν φορτίο.

Προκειμένου να γίνει μια συνολική μελέτη σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η ανάλυση των ροών του φορτίου είναι αναγκαία. Για να επιτευχθεί αυτό, γίνεται χρήση ειδικών εργαλείων λογισμικών υπολογισμού ροής ισχύος σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτά τα εργαλεία, το σύστημα πρέπει να περιγραφεί από ένα μαθηματικό μοντέλο και στη συνέχεια, με τη χρήση της κατάλληλης μεθόδου, θα εκτελεστεί η ανάλυσή ροής φορτίου όπου χρησιμοποιούνται όλες οι απαραίτητες εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν σχέσεις μεταξύ τάσεων και ισχύων στο σύστημα που εξετάζεται.

2.1.2 Μοντελοποίηση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Πρώτη και πολύ σημαντική διαδικασία για την προσομοίωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μοντελοποίηση των στοιχείων του. Αυτά τα στοιχεία είναι:

- Ηλεκτρικές Γραμμές
- Εγκάρσιοι πυκνωτές και πηνία
- Γεννήτριες
- Μετασχηματιστές

- Φορτία

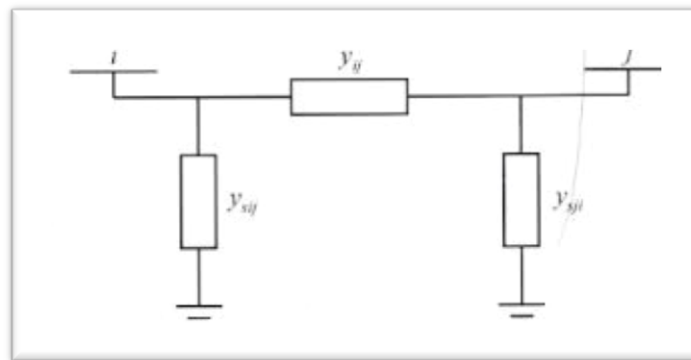
Για να γίνει ευκολότερη η μοντελοποίηση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας θεωρούμε συμμετρική την κατάσταση του συστήματος και η ανάλυση θα γίνεται σε μονοφασικά ισοδύναμα κυκλώματα. Οι παράμετροι τους εκφράζονται σε κοινό ανά μονάδα σύστημα, δηλαδή σε κοινή βάση ισχύος S_b και βασικές τάσεις V_b , εφαρμόζοντας παράλληλα και τους λόγους των μετασχηματιστών. Τα ονομαστικά μεγέθη των στοιχείων που δίνονται θα πρέπει να μετατραπούν πρώτα στην βάση ισχύος και τάσεων που έχουν επιλεγεί για το ανά μονάδα σύστημα.

2.1.3 Αναπαραστάσεις εξοπλισμού συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αναπαραστάσεις των στοιχείων των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στο μονοφασικό τους ισοδύναμο.

1. Γραμμές Μεταφοράς

Η αναπαράσταση των γραμμών μεταφοράς δίνεται από το παρακάτω κύκλωμα:



Εικόνα 2.1.3.1 : Ονομαστικό κύκλωμα Π γραμμής μεταφοράς (Βουρνάς & Κονταξής, 2010)

Το παραπάνω κύκλωμα ονομάζεται «ονομαστικό κύκλωμα Π». Σε αυτό το κύκλωμα παρουσιάζονται τρεις αγωγιμότητες, οι y_{ij} , y_{sij} και y_{sji} , όπου η αγωγιμότητα y_{ij} είναι η αγωγιμότητα της γραμμής ενώ οι αγωγιμότητες y_{sij} και y_{sji} είναι οι εγκάρσιες αγωγιμότητες. Πρόκειται για σύνθετες αγωγιμότητες και περιγράφονται με τις παρακάτω εξισώσεις:

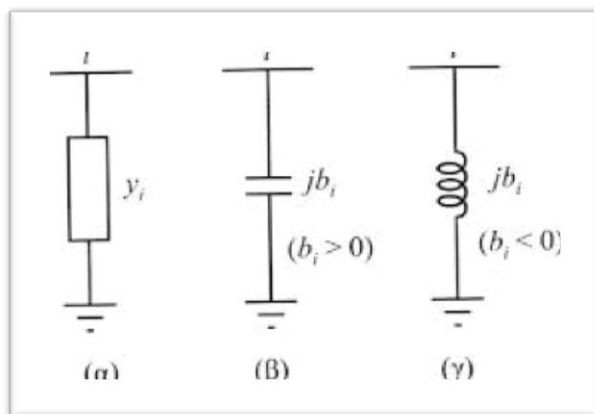
$$\begin{aligned} y_{ij} &= g_{ij} + jg_{ij} \\ y_{sij} &= g_{sij} + jg_{sij} \\ y_{sji} &= g_{sji} + jg_{sji} \end{aligned} \quad (2.2.1)$$

2. Εγκάρσιοι πυκνωτές και πηνία

Οι εγκάρσιες αγωγιμότητες απαρτίζουν πηνία και πυκνωτές οι οποίοι συνδέονται με σταθμούς υποβίβασης τάσης, με στόχο την αντιστάθμιση της άεργης ισχύος που υπάρχει στο σύστημα καθώς και την ρύθμιση της τάσης στον σταθμό αυτό. Στα διαγράμματα των μονοφασικών συστημάτων παρουσιάζονται ως απλή αγωγιμότητα y_i και είναι της μορφής

$$y_i = jb_i$$

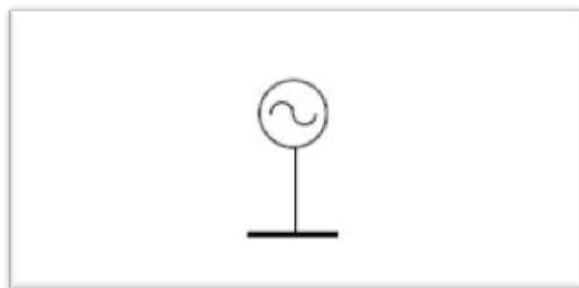
Όπου b_i : θετικό όταν η αγωγιμότητα αναφέρεται σε πυκνωτή
 b_i : αρνητικό όταν η αγωγιμότητα αναφέρεται σε πηνίο.



Εικόνα 2.1.3.2: Παράσταση εγκάρσιου στοιχείου (Βουρνάς & Κονταξής, 2010)

3. Γεννήτριες

Στις μελέτες ροών φορτίου, οι γεννήτριες αναπαριστώνται σε πηγές ενεργού και άεργου ισχύος, ενώ ταυτόχρονα συμπεριλαμβάνονται και δύο διατάξεις ελέγχου. Η πρώτη ονομάζεται Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης και λειτουργεί με σκοπό την διατήρηση του μέτρου της τερματικής τάσης της γεννήτριας σε σταθερή τιμή. Αυτό, προϋποθέτει την σωστή ρύθμιση του ρεύματος διεγέρσεως της γεννήτριας. Η δεύτερη διάταξη ονομάζεται Ρυθμιστής Στροφών και έχει ως στόχο την διατήρηση της ενεργού παραγωγής κοντά στην τιμή αναφοράς, με προϋπόθεση την προσαρμογή της παραγόμενης μηχανικής ισχύος της κινητήριας γεννήτριας. Στις σύγχρονες μελέτες ροής, οι σύγχρονες γεννήτριες συνήθως απεικονίζονται με σταθερή κατά μέτρο τερματική τάση και σταθερή παραγωγή πραγματικής ισχύος. Οι γεννήτριες παρουσιάζονται στο μονοφασικό σύστημα ως εξής:



Εικόνα 2.1.3.3: Παράσταση Γεννήτριας στην μελέτη ροής φορτίου (Βουρνάς & Κονταξής, 2010)

Η εξίσωση που περιγράφει μια γεννήτρια είναι:

$$S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi} \quad (2.2.4.1)$$

Όπου S_{Gi} : Η παραγόμενη μιγαδική ισχύς

P_{Gi} : Η παραγόμενη ενεργός ισχύς

Q_{Gi} : Η παραγόμενη άεργος ισχύς

4. Μετασχηματιστές

Στα ηλεκτρικά κυκλώματα χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών μετασχηματιστές, ένας εκ των οποίων είναι ο τύπος με ονομαστική σχέση μετασχηματισμού. Η σχέση αυτή αντιστοιχεί στο λόγο των βασικών τάσεων του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος. Στην περίπτωση αυτή, αναπαρίσταται όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, ενώ η αγωγιμότητα που περιγράφει αυτόν τον μετασχηματιστή δίνεται από την εξίσωση

$$y_{ij} = \frac{1}{R_{i\sigma} + jX_{i\sigma}} \quad (2.2.3.1)$$

Άλλος ένας τύπος μετασχηματιστή που χρησιμοποιείται είναι ο μετασχηματιστής ρύθμισης. Σε αυτή την περίπτωση δεν πρέπει να αμελείται η σχέση μετασχηματισμού, μετατρέποντας τις ανά μονάδα αντιστάσεις στο ένα από τα δύο τυλίγματα του.

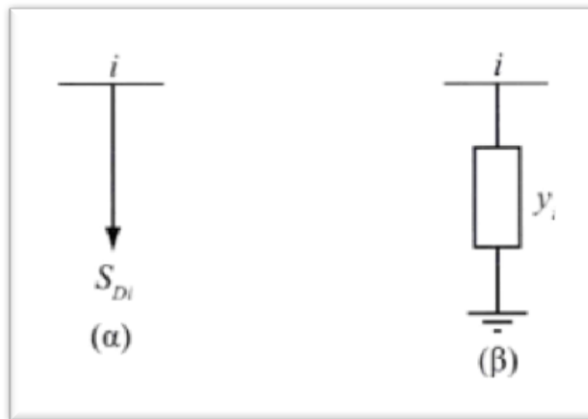


Εικόνα 2.1.3.4: Μονογραμμικό ισοδύναμο μετασχηματιστή με ονομαστική σχέση μετασχηματισμού (Βουρνάς & Κονταξής, 2010)

5. Φορτία

Στις μελέτες ροής φορτίου συμπεριλαμβάνονται οι εξής δύο τύποι φορτίου:

1. Φορτία σταθεράς ενεργού και άεργου ισχύος
2. Φορτία που παριστάνονται με σταθερά σύνθετη αγωγιμότητα



Εικόνα 2.1.3.5: Παράσταση Φορτίων (Βουρνάς & Κονταξής, 2010)

Η μιγαδική ισχύς του φορτίου σταθεράς ισχύος S_{Di} δίνεται από την εξίσωση:

$$S_{Di} = P_{Di} + jQ_{Di} \quad (2.2.5.1)$$

Όπου P_{Di} : Η ενεργός ισχύς που απορροφά το φορτίο

Q_{Di} : Η άεργος ισχύς που απορροφά το φορτίο

Συμπερασματικά, το φορτίο αγωγιμότητας εκφράζεται ως:

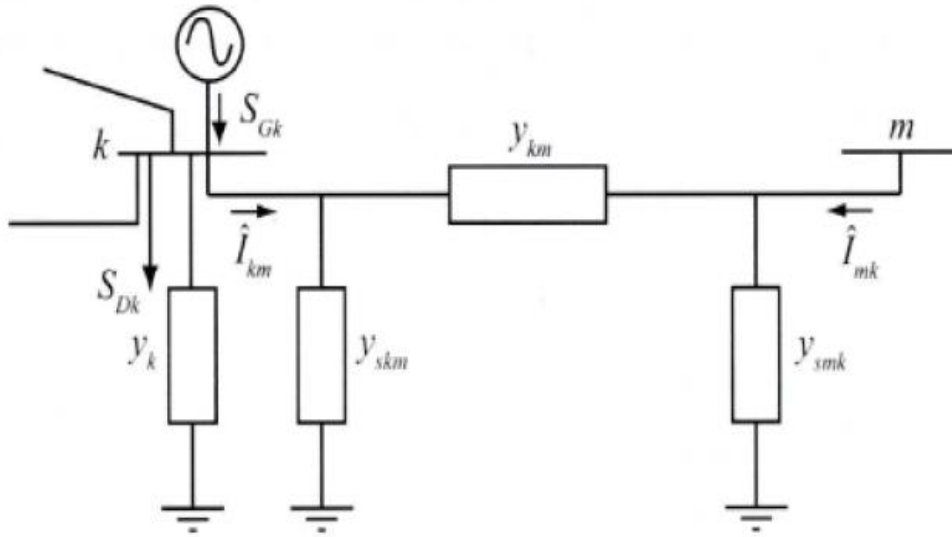
$$y_i = g_i + jb_i \quad (2.2.5.2)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα φορτία ισχύος παριστάνονται ως αρνητικές εγχύσεις ισχύος, ενώ αντίθετα, τα φορτία που παριστάνονται ως αγωγιμότητες προστίθενται στον πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου.

2.2 Εξισώσεις ροών φορτίου

2.2.1 Σχηματισμός πίνακα αγωγιμοτήτων

Η γενική μορφή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κοντά σε έναν ζυγό k απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.2.1.2 : Παράσταση φορτίων (Βουρνάς & Κονταξής, 2010)

Για να υπολογιστούν οι ροές φορτίου στο παραπάνω σύστημα, πρέπει να αναλυθεί η γενική μορφή του ζυγού k . Στο συγκεκριμένο σχήμα βλέπουμε έναν ζυγό στον οποίο είναι συνδεδεμένα μια γεννήτρια σταθερής ισχύος και αγωγιμότητας, ένα φορτίο και ένας επιπλέον ζυγός, ο οποίος συμβολίζεται με m , και συνδέεται με τον πρώτο ζυγό μέσω γραμμών μεταφοράς και ενδεχομένως με την παρέμβαση κάποιου μετασχηματιστή.

Η εγκάρσια αγωγιμότητα συμβολίζεται ως y_k και αναπαριστά όλους τους τυχαιούς συνδυασμούς πυκνωτή, αυτεπαγωγής ή φορτίου το οποίο έχει αγωγιμότητα. Ο αγωγός μεταφοράς που ενώνει τον ζυγό k με τον ζυγό m είναι το Ονομαστικό κύκλωμα Π , στο οποίο αναφερθήκαμε νωρίτερα στην παράγραφο

Εκτός από τις αγωγιμότητες που αναφέρθηκαν, στο ζυγό k θα δούμε συνδεδεμένη μια γεννήτρια S_{GK} , η οποία δίνει ρεύμα I_{GK} ενώ το αντίστοιχο φορτίο S_{DK} απορροφά ρεύμα I_{DK} . Όσον αφορά στην τάση στον ζυγό, συμβολίζεται με V_m ενώ το ρεύμα που διαπερνά τη γραμμή μεταφοράς από τον k προς τον m ζυγό δίνεται από την εξίσωση:

$$I_{km} = (y_{skm} + y_{km})V_k - y_{km}V_m \quad (2.2.1.1)$$

Το ρεύμα που απορροφάται από την εγκάρσια αγωγιμότητα y_k ισούται με $y_k V_k$.

Εφαρμόζοντας τον 1^ο Νόμο του Kirchhoff στον ζυγό k , έχουμε την παρακάτω εξίσωση:

$$I_{Gk} - I_{Dk} = y_k V_k + \sum_{m \in A(k)} I_{km} \quad (2.2.1.2)$$

Όπου $A(k)$ το σύνολο των δεικτών των ζυγών m που ενώνονται με τον ζυγό k .

$$A(k) = \{m: y_{km} \neq 0\} \quad (2.2.1.3)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (1) στη (2) έχουμε:

$$I_{Gk} - I_{Dk} = [y_k + \sum_{m \in A(k)} (y_{km} + y_{km})] V_k - \sum_{m \in A(k)} I_{km} \quad (2.2.1.4)$$

Επομένως, εάν έχουμε

$$Y_{kk} = y_k + \sum_{m \in A(k)} (y_{km} + y_{km}) \quad (2.2.1.5)$$

$$Y_{km} = -y_{km} \quad (2.2.1.6)$$

Τότε η εξίσωση (4) θα γίνει:

$$I_k = I_{Gk} - I_{Dk} = Y_{kk} V_k + \sum_{m \in A(k)} Y_{km} V_m = \sum_{m=1}^n y_{km} V_m \quad (2.2.1.7)$$

Όπου I_k συμβολίζεται η καθαρή έγχυση ρεύματος στον ζυγό k .

Πίνακας αγωγιμοτήτων ονομάζεται ένας πίνακας διαστάσεων $n \times n$, ο οποίος αποτελείται από διαγώνια στοιχεία Y_{kk} και από μη διαγώνια στοιχεία Y_{km} , όπου n συμβολίζεται ο αριθμός των ζυγών του συστήματος. Τα διαγώνια και μη διαγώνια στοιχεία αντίστοιχα του πίνακα αγωγιμοτήτων ορίζονται από τις σχέσεις (5) και (6). Το αντίστοιχο μη διαγώνιο στοιχείο του πίνακα μπορεί να πάρει μηδενικές τιμές, στην περίπτωση που δεν υπάρχει διασύνδεση μεταξύ των δύο ζυγών.

2.2.2 Μιγαδικές εξισώσεις ροής φορτίου

Οι μιγαδικές ισχείς παραγωγής S_{Gk} και φορτίου S_{Dk} είναι οι ουσιαστικές μεταβλητές, οι οποίες είτε χρησιμοποιούνται ως δεδομένα είτε ως ζητούμενα, και είναι αυτές που αλλάζουν στις μελέτες ροής φορτίου, ενώ τα ρεύματα παραμένουν σταθερά. Οι εξισώσεις αυτές είναι γνωστές από την ανάλυση δικτύων εξίσωσης των κόμβων ενός ηλεκτρικού δικτύου. Αυτές οι μιγαδικές ισχείς δίνονται από τις σχέσεις:

$$S_{Gk} = V_k I_{Gk}^* \quad (2.2.2.1)$$

$$S_{Dk} = V_k I_{Dk}^* \quad (2.2.2.2)$$

Συνδυάζοντας στις σχέσεις (7) παίρνουμε την παρακάτω εξίσωση:

$$S_k = S_{Gk} - S_{Dk} = Y_{kk}^* V_k^2 + V_k \sum_{m \in A(k)} Y_{km}^* V_m^* \quad (2.2.2.3)$$

Όπου $S_k = P_k + jQ_k$ η καθαρή έγχυση μιγαδικής ισχύος στον ζυγό k .

Γίνεται σαφές ότι όσοι είναι οι ζυγοί του συστήματος τόσες θα είναι και οι εξισώσεις της μορφής 2.3.2.3, καθώς σε ένα σύστημα n ζυγών θα υπάρχουν αντίστοιχα και n μιγαδικές εξισώσεις ροής φορτίου.

2.2.3 Εξισώσεις ενεργού και άεργου ισχύος

Το ισοζύγιο ισχύος στον ζυγό k δίνεται από την εξίσωση 2.2.3.1 και ονομάζεται μιγαδική εξίσωση φορτίου του ζυγού k .

$$\begin{aligned} V_k &= V_k e^{j\delta_k} \\ Y_{km} &= G_{km} + jB_{km} \end{aligned} \quad (2.2.3.1)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 2.2.2.3 στις εξισώσεις 2.2.3.1, προκύπτουν οι πραγματικές εξισώσεις ροής φορτίου σε υβριδική μορφή, στην περίπτωση που αυτές έχουν διαχωριστεί σε πραγματικά και φανταστικά μέρη:

$$P_{Gk} - P_{Dk} = V_k^2 G_{kk} - V_k \sum_{m \in A(k)} V_m \alpha_{km} \quad (2.2.3.2)$$

$$Q_{Gk} - Q_{Dk} = V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in A(k)} V_m \beta_{km} \quad (2.2.3.3)$$

Όπου οι συντελεστές α_{km} και β_{km} γράφονται αναλυτικά παρακάτω και ορίζονται ως συντελεστές για απλοποίηση της παράστασης και της επίλυσης των εξισώσεων ροής φορτίου σε λογισμικά, ενώ δεν ενδείκνυνται για επίλυση προβλημάτων χειρόγραφα.

2.2.4 Θεμελίωση του προβλήματος ροών φορτίου

Σε ένα πρόβλημα ροών φορτίου, στην γενική περίπτωση ενός ζυγού συναντάμε έξι ηλεκτρικά μεγέθη, τα οποία είναι και οι μεταβλητές του προβλήματος. Ανά ζυγό λοιπόν, τα μεγέθη που συναντάμε είναι τα εξής:

- ➔ P_G : παραγόμενη ενεργός ισχύς
- ➔ Q_G : παραγόμενη άεργος ισχύς
- ➔ P_D : ενεργός ισχύς φορτίου
- ➔ Q_D : άεργος ισχύς φορτίου
- ➔ V : μέτρο τάσης του ζυγού
- ➔ δ : φασική γωνία τάσης του ζυγού

Σε ένα σύστημα με n ζυγούς θα υπάρχουν $6 \times n$ μεταβλητές. Αυτές οι μεταβλητές ταξινομούνται σε τρεις ομάδες:

1. Φορτία ή μεταβλητές ζήτησης: Αυτά είναι οι μεταβλητές P_d και Q_d . Καλούνται και μεταβλητές διαταραχής και πρόκειται για τις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος. Μπορούν να αποτελέσουν στοιχεία διανύσματος διάστασης $2n$.
2. Ισχείς παραγωγής: Αυτά είναι οι μεταβλητές P_G και Q_G . Καλούνται και μεταβλητές ελέγχου, διότι οι μονάδες παραγωγής αποτελούν τα κύρια μέσα ελέγχου της λειτουργίας του συστήματος. Όπως και οι μεταβλητές ζήτησης, μπορούν να αποτελέσουν στοιχεία διανύσματος διάστασης $2n$.
3. Τάσεις και οι γωνίες των ζυγών ανήκουν στις μεταβλητές κατάστασης: Πρόκειται για εξαρτημένες μεταβλητές, ενώ και αυτές, μπορούν να αποτελέσουν τα στοιχεία ενός διανύσματος διάστασης $2n$.

Η ενεργός και άεργος ισχύς που θα εγχέεται σε κάθε ζυγό k θα είναι:

$$P_k = P_{Gk} + P_{Dk} \quad (2.2.4.1)$$

$$Q_k = Q_{Gk} + Q_{Dk} \quad (2.2.4.2)$$

Και όταν εισέρχεται στο δίκτυο χαρακτηρίζεται ως παραγωγή, ενώ όταν εξέρχεται από το δίκτυο χαρακτηρίζεται ως φορτίο.

Η επίλυση του προβλήματος ροών φορτίου γίνεται με την επίλυση $n - 1$ μιγαδικών εξισώσεων με $n - 1$ μιγαδικούς αγνώστους. Στο πρόβλημα αυτό οι εξισώσεις είναι μιγαδικές και μη γραμμικές.

Παρόλο που υπάρχει πληθώρα λογισμικών ειδικών στην επεξεργασία μιγαδικών αριθμών και εξισώσεων με σκοπό την επίλυση ενός συστήματος, πλέον έχουμε καταλήξει στο συμπέρασμα ότι οι πιο αποτελεσματικές μέθοδοι απαιτούν μετατροπή των δεδομένων τους σε πραγματικούς αριθμούς. Για αυτό το λόγο, λοιπόν, οι μιγαδικές εξισώσεις μετατρέπονται σε πραγματικές, με τον τρόπο που παρουσιάσαμε στις σχέσεις (2.2.3.2) και (2.2.3.3). Επιπλέον, δεδομένου ότι οι εξισώσεις περιέχουν ως άγνωστες μεταβλητές τις μεταβλητές ισχύος αντί του ρεύματος, είναι μη γραμμικές. Έτσι, προκειμένου να επιλυθούν, είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν πάνω τους επαναληπτικοί αλγόριθμοι.

Ένα μέγεθος που πρέπει, επίσης, να ορίζεται είναι αυτό της τάσης και του μέτρου της σε έναν ή περισσότερους ζυγούς γεννητριών του συστήματος που αναλύεται. Για να μπορέσει να γίνει αυτό, πρέπει να υπάρχει ίδιος αριθμός εξισώσεων και αγνώστων, και αυτό επιτυγχάνεται ελευθερώνοντας μία μεταβλητή. Το μέτρο της τάσης εξαρτάται από την άεργο ισχύ. Για αυτό το λόγο, όταν ορίσουμε το μέτρο της τάσης, θεωρούμε την άεργο παραγωγή της αντίστοιχης γεννήτριας άγνωστη και ορίζουμε μόνο την πραγματική της παραγωγή. Το ίδιο συμβαίνει και στον τρόπο ρύθμισης των σύγχρονων γεννητριών ώστε να έχουν σταθερή ενεργό παραγωγή και σταθερό μέτρο τάσης. Λαμβάνοντας υπόψη, λοιπόν, τον περιορισμό αυτό, το μέτρο της τάσης είναι δυνατόν να οριστεί εξ αρχής αποκλειστικά για τους ζυγούς που έχουν τη δυνατότητα παραγωγής άεργου ισχύος.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η γενική θεμελίωση της ανάλυσης ροών φορτίου. Οι ζυγοί χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Ζυγός ταλάντωσης ή ζυγός αναφοράς: Το μέτρο και η φάση τα τάσης θεωρούνται γνωστά. Επίσης, σε αυτό τον ζυγό η πραγματική και άεργος ισχύς αφήνονται ελεύθερες, ενώ πρέπει να έχει τη δυνατότητα παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος.
2. Ζυγός φορτίου ή ζυγός PQ: Η έγχυση πραγματικής ισχύος (P) και άεργου ισχύος (Q) θεωρούνται γνωστές. Γενικότερα, είναι δεδομένο ότι σε ζυγούς στους οποίους δε συνδέονται φορτία ή γεννήτριες, οι εγχύσεις P και Q δεν υπάρχουν, δηλαδή είναι μηδενικές. Παρόλα αυτά, και αυτοί οι ζυγοί θεωρούνται κατηγορίας PQ.
3. Ζυγός παραγωγής ή ζυγός PV: Η έγχυση πραγματικής ισχύος και το μέτρο της τάσης θεωρούνται γνωστά. Χαρακτηριστικό αυτού του ζυγού είναι ότι θα πρέπει να μπορεί να παράγει άεργο ισχύ (Q).

Παρακάτω θα δούμε τις μεταβλητές που πρέπει να οριστούν, προκειμένου να περιγραφεί πλήρως η κατάσταση λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, έχοντας γνωστά τα μέτρα των τάσεων στους ζυγούς παραγωγής, καθώς και την τάση στον ζυγό ταλάντωσης ελεγμένη κατά μέτρο και γωνία.

Θεωρούμε, λοιπόν, ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με συνολικό αριθμό ζυγών n. Ο αριθμός των ζυγών παραγωγής PV είναι m. Ο πρώτος ($1^{ος}$) ζυγός θα είναι ζυγός ταλάντωσης, οι ζυγοί 2 έως n-m θα είναι οι ζυγοί παραγωγής PV και τέλος, οι ζυγοί n-m+1 θα είναι οι ζυγοί του φορτίου PQ.

Οι μεταβλητές που θα πρέπει να προσδιοριστούν λοιπόν, με δεδομένους τους παραπάνω ζυγούς θα είναι:

1. Τα μέτρα των τάσεων όλων των ζυγών φορτίου V_{n-m+1} έως V_n
2. Οι φασικές γωνίες τάσεων όλων των ζυγών εκτός από τον ζυγό ταλάντωσης, δ_2 έως δ_n .

Οι μεταβλητές αυτές αποτελούν το διάνυσμα x. Το διάνυσμα αυτό λέγεται διάνυσμα κατάστασης και έχει διαστάσεις $[(n-m+1) \times 1]$ και απαιτούνται n-1+m ανεξάρτητες εξισώσεις, οι οποίες είναι οι εξής:

- n-1 εξισώσεις πραγματικής ισχύος (2.2.3.2) για κάθε ζυγό, εκτός από τον ζυγό ταλάντωσης. Οι εξισώσεις αυτές θα είναι:

$$b_P = f_P(x) \quad (2.2.4.3)$$

Όπου b_P , f_P είναι διανύσματα κατάστασης n-1, και ειδικότερα το στοιχείο που αντιστοιχεί στον ζυγό k ορίζεται:

$$b_{Pk} = P_{Gk} - P_{Dk} \quad (2.2.4.4)$$

$$f_{Pk} = V_k^2 G_{kk} - V_k \sum_{m \in A(k)} V_m a_{km} \quad (2.2.4.5)$$

- m εξισώσεις άεργου ισχύος (2.3.3.3), μία για κάθε ζυγό φορτίου. Οι εξισώσεις αυτές θα είναι της μορφής:

$$b_Q = f_Q(x) \quad (2.2.4.6)$$

Όπου b_Q, f_Q είναι τα διανύσματα με διάσταση m . Το στοιχείο που αντιστοιχεί στον ζυγό k ορίζεται :

$$b_{Qk} = Q_{Gk} - Q_{Dk} \quad (2.2.4.7)$$

$$f_{Qk} = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in A(k)} V_m \beta_{km} \quad (2.2.4.8)$$

Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται οι πραγματικές εξισώσεις του προβλήματος ρών φορτίου, οι οποίες γράφονται σε ενιαία μορφή πίνακα:

$$b = f(x) \quad (2.2.4.9)$$

Και

$$\rightarrow b = \begin{bmatrix} b_P \\ b_Q \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow f = \begin{bmatrix} f_P \\ f_Q \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow x = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix}$$

Όπου:

$$\delta = [\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n]^T$$

$$V = [V_{n-m+1}, \dots, V_n]^T$$

Η ροή ισχύος στον κάθε κλάδο ορίζεται ως εξής:

Έστω η γραμμή από τον ζυγό k προς τον ζυγό m (γραμμή km). Οι μιγαδικές ροές ισχύος στη γραμμή θα δίνονται από τον τύπο:

$$S_{km} = P_{km} + jQ_{km} = V_k[(y_{skm} + y_{km})V_k - y_{km}V_m]^* \quad (2.2.4.10)$$

Οι απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος στον κλάδο km δίνονται από το άθροισμα των εισερχόμενων ρών στα δύο άκρα και είναι:

$$P_{Lkm} + jQ_{Lkm} = S_{km} + S_{mk} = P_{km} + P_{mk} + j(Q_{km} + Q_{mk}) \quad (2.2.4.11)$$

2.2.5 Τεχνικές επίλυσης προβλήματος ρών φορτίου

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται συνοπτικά οι αριθμητικές μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου. Οι εξισώσεις ρών φορτίου γράφονται σε όλες τις περιπτώσεις υπό τη μορφή:

$$g(x) = 0 \quad (2.2.5.1)$$

Η διαδικασία επίλυσης του συστήματος, χρησιμοποιώντας τις επαναληπτικές αριθμητικές μεθόδους έχει τέσσερα βασικά βήματα:

1. Ορίζουμε έναν μετρητή επαναλήψεων $i = 0$ και παίρνουμε μια αρχική τιμή του διανύσματος $x = x^0$.
2. Αντικαθιστούμε το x^0 με την τιμή $x^{(i)}$ ώστε να γίνει ο υπολογισμός των $g(x^{(i)})$ και ελέγχουμε εάν ικανοποιούνται οι εξισώσεις (2.2.5.1).
3. Στην περίπτωση που δεν ικανοποιούνται, υπολογίζουμε νέα προσέγγιση $x^{(i+1)}$ και αυξάνουμε τον μετρητή επαναλήψεων κατά 1.
4. Στη συνέχεια, αντικαθιστούμε την $x^{(i)}$ στις εξισώσεις 2.2.5.1 και επαναλαμβάνουμε τα δύο τελευταία βήματα έως ότου να ικανοποιηθούν οι συνθήκες τερματισμού, δηλαδή να επιλυθούν οι εξισώσεις με βάση την ζητούμενη ακρίβεια.

Για την επίλυση μη γραμμικών συστημάτων σε προβλήματα ροής φορτίου χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι. Οι μέθοδοι αυτές είναι οι Gauss, Gauss-Seidel και Newton-Raphson και θα περιγραφούν παρακάτω.

2.2.5.1 Μέθοδος Gauss

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται σε αυτή τη διαδικασία είναι η ακόλουθη:

- Γράφονται οι εξισώσεις φορτίου:

$$x = H(x) \quad (2.2.5.1.1)$$

- Εν συνεχεία, χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις 2.3.5.1.1 για να προσδιοριστεί καλύτερα η προσέγγιση της λύσης στην επανάληψη $i + 1$:

$$x^{(i+1)} = H(x^{(i)}) \quad (2.2.5.1.2)$$

Αν η ακολουθία x^i συγκλίνει, τότε το όριό της είναι η λύση του συστήματος 2.2.5.1.1.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.2.5.1.2, εύκολα επαναδιατυπώνονται οι εξισώσεις 2.2.5.1.1 στην μορφή:

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left\{ \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{m \in A(k)} Y_{km} Y_m \right\} \quad (2.2.5.1.3)$$

Και η επαναληπτική διαδικασία περιγράφεται από την παράσταση

$$V_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left\{ \frac{P_k - jQ_k^{(i)}}{[V_k^{(i)}]^*} - \sum_{m \in A(k)} Y_{km} Y_m \right\} \quad (2.2.5.1.4)$$

Μολονότι η Μέθοδος Gauss υλοποιείται χωρίς δυσκολίες σε πρόγραμμα υπολογιστή, το βασικό της μειονέκτημα είναι ότι συγκλίνει με αργό ρυθμό, ενώ σε πολλές περιπτώσεις δε συγκλίνει καθόλου, αν και στην πραγματικότητα το πρόβλημα είναι επιλύσιμο.

2.2.5.2 Μέθοδος Gauss – Seidel

Η μέθοδος Gauss – Seidel αποτελεί μια βελτιωμένη μορφή της μεθόδου Gauss, την οποία περιγράψαμε προηγουμένως. Το σύστημα εξισώσεων παίρνει την μορφή:

$$x_k^{(i+1)} = h_k(x_1^{(i+1)}, \dots, x_{k-1}^{(i+1)}, x_{k+1}^{(i)}, \dots, x_N^{(i)}) \quad (2.2.5.2.1)$$

Για τον υπολογισμό του στοιχείου k του x στην επανάληψη $i + 1$, χρησιμοποιούνται μεταβλητές x_j με $j < k$ οι οποίες έχουν ήδη υπολογιστεί στο πλαίσιο της ίδιας επανάληψης.

Η εξίσωση επανάληψης 2.3.5.2.2 περιγράφει την διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων ρών φορτίου:

$$V_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left\{ \frac{P_k - jQ_k^{(i)}}{V_k^{(i)}} - \sum_{m \in A1(k)} Y_{km} V_m^{(i+1)} - \sum_{m \in A2(k)} Y_{km} V_m^{(i)} \right\} \quad (2.2.5.2.2)$$

Όπου:

- Το σύνολο $A1(k)$ είναι το υποσύνολο των ζυγών που συνδέονται με τον ζυγό k , στον οποίο η τάση έχει ήδη υπολογιστεί στην επανάληψη $i + 1$.
- Το σύνολο $A2(k)$ είναι το υποσύνολο των ζυγών που συνδέονται με τον ζυγό k , στον οποίο η τάση έχει ήδη υπολογιστεί στην επανάληψη i .

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κατά κόρον σε προγράμματα υπολογιστών καθώς είναι ιδιαίτερα απλή στην χρήση της. Απαιτείται μόνο η αντικατάσταση των μεταβλητών που υπολογίζονται, με την σειρά με την οποία υπολογίζονται σε κάθε επανάληψη.

2.2.5.3 Μέθοδος Newton – Raphson

Έστω ότι έχουμε ένα σύστημα N μη γραμμικών εξισώσεων με $N = n - 1 + m$ αγνώστους. Από το διάστημα αυτό μπορεί να υπολογιστεί το διάνυσμα κατάστασης x . Πιο συγκεκριμένα:

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_N) &= b_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_N) &= b_2 \\ &\vdots \\ f_N(x_1, x_2, \dots, x_N) &= b_N \end{aligned} \quad (2.2.5.3.1)$$

Έστω ότι η αρχική εκτίμηση της των N μεταβλητών του x και δεν ικανοποιούν την 2.2.5.3.1. Η μέθοδος Newton – Raphson ενδείκνυται για την γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από την τιμή $x^{(0)}$. Χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα Taylor μιας

συνάρτησης πολλών μεταβλητών, από το οποίο αμελούνται οι όροι δεύτερης ή μεγαλύτερης τάξης, πραγματοποιείται γραμμικοποίηση του συστήματος.

$$\begin{aligned} f_1(x_1, \dots, x_N) &\approx f_1(x_1^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) + \sum_{j=1}^N \frac{\theta_{f_1}}{\theta_{x_j}} [x_j - x_j^{(0)}] \\ &\vdots \\ f_N(x_1, \dots, x_N) &\approx f_N(x_1^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) + \sum_{j=1}^N \frac{\theta_{f_N}}{\theta_{x_j}} [x_j - x_j^{(0)}] \end{aligned} \quad (2.2.5.3.2)$$

Κάνοντας χρήση πινάκων, η σχέση (2.2.5.3.2) γίνεται:

$$b = f(x) \approx f(x^{(0)}) + J(x^{(0)})[x - x^{(0)}] \quad (2.2.5.3.3)$$

Όπου

$$J(x^{(0)}) = \begin{bmatrix} \frac{\theta_{f_1}}{\theta_{x_j}} \end{bmatrix} \quad (2.2.5.3.2)$$

Δηλαδή πρόκειται για τον Ιακωμβιανό πίνακα της f υπολογισμένο στην επανάληψη 0.

Στη συνέχεια, λύνοντας την 2.2.5.3.3 για την επανάληψη $l + 1$ παίρνουμε τον εξής τύπο:

$$x^{(l+1)} = x^{(l)} + J(x^{(l)})^{-1} [b - f(x^{(l)})] \quad (2.2.5.3.5)$$

Οι επαναλήψεις θα συνεχιστούν έως ότου το διάνυσμα $x^{(l)}$ να δώσει τιμή στη διαφορά $b - f(x^{(l)})$ μικρότερη από μια καθορισμένη ανοχή σύγκλισης.

Βασική προϋπόθεση της μεθόδου Newton – Raphson είναι η αντιστροφή του πίνακα J σε κάθε επανάληψη, διαδικασία η οποία, όμως, απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χώρο και χρόνο. Τα παραπάνω αρνητικά σημεία της μεθόδου, βέβαια, περιορίζονται τόσο από την μεγάλη ταχύτητα σύγκλισης όσο και από παραλλαγές της.

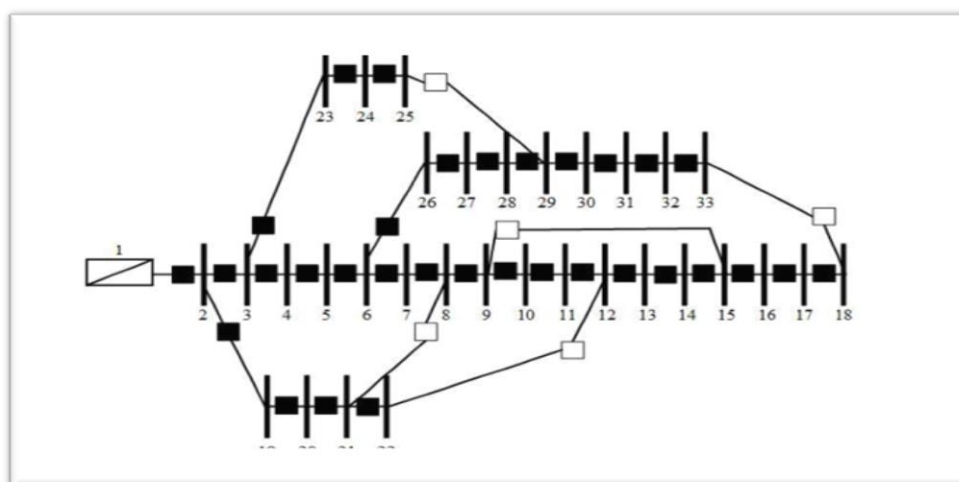
2.3 Επαναδιαμόρφωση δικτύων διανομής

2.3.2 Βασικοί τύποι σφαλμάτων

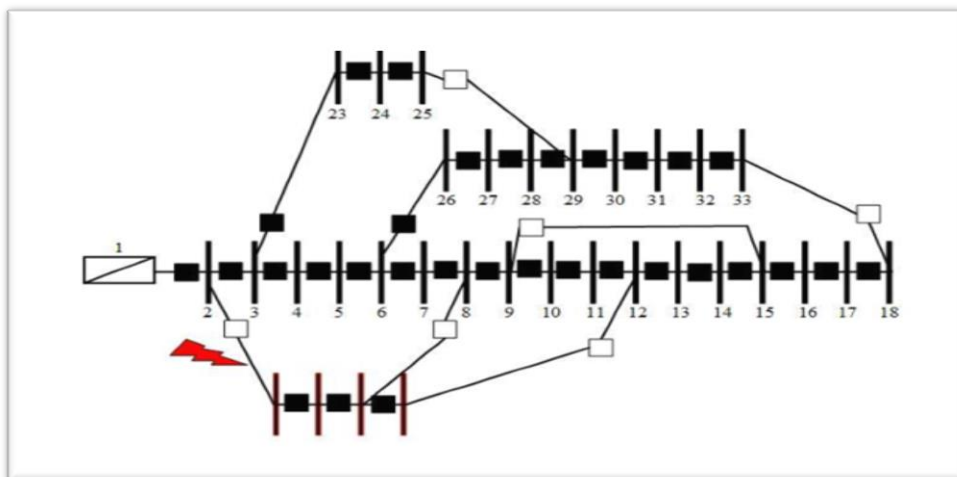
Οι βασικοί τύποι σφαλμάτων που θα συναντήσει κανείς στα Δίκτυα Διανομής είναι τρεις:

1. Σφάλμα Γραμμής
2. Σφάλμα Ζυγού
3. Σφάλμα Μετασηματιστή

Σε ένα Σύστημα Διανομής, τα σφάλματα μπορεί να προκύψουν και από άλλα στοιχεία, εκτός από τα βασικά που αναφέραμε. Όλα, όμως, είναι συνδεδεμένα με τα παραπάνω. Αναλόγως, λοιπόν, με το στοιχείο που οδηγεί στη διακοπή λειτουργίας, κάποια φορτία συνεχίζουν να εξυπηρετούνται και κάποια άλλα βγαίνουν εκτός λειτουργίας. Βέβαια, κάποιοι τύποι σφαλμάτων μπορεί να είναι πιο σοβαροί από άλλους, καθώς ενδέχεται να είναι δυσκολότερο να αποκατασταθούν και τελικά να δημιουργήσουν σημαντικό πρόβλημα στο δίκτυο. Για αυτό τον σκοπό, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι επαναδιαμόρφωσης, οι οποίοι αντιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά του κάθε σφάλματος και προσπαθούν να το αντιμετωπίσουν και να το επιδιορθώσουν. Βέβαια, κάποιοι αλγόριθμοι απευθύνονται αποκλειστικά σε σφάλματα συγκεκριμένου είδους με αποτέλεσμα να μην είναι ικανοί να αποκαταστήσουν προβλήματα που προκύπτουν σε άλλους τύπους, ή ακόμα και αν είναι διαμορφωμένοι να αποκαταστήσουν σφάλματα διαφόρων ειδών, η πολυπλοκότητα αυτών πολλές φορές το καθιστά εξαιρετικά δύσκολο.



Εικόνα 2.3.1: Αρχική τοπολογία δικτύου διανομής 33 ζυγών (Παναγιώτης Α. Καραφώτης , Βέλτιστη επαναδιαμόρφωση ακτινικών δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας)



Εικόνα 2.3.2 : Τοπολογία δικτύου διανομής 33 ζυγών μετά την εμφάνιση σφάλματος στη γραμμή 2-19 (Παναγιώτης Α. Καραφώτης , Βέλτιστη επαναδιαμόρφωση ακτινικών δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για αποκατάσταση λειτουργίας)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Ανάπτυξη λογισμικού για τη βέλτιστη αναδιάταξη τοπολογίας δικτύων διανομής

3.1 Στόχοι επαναδιαμόρφωσης δικτύου διανομής

Στην περίπτωση κάποιου σφάλματος, το Δίκτυο Διανομής πρέπει να είναι ικανό να συνεχίσει να ικανοποιεί όσο το δυνατόν περισσότερους καταναλωτές, προσφέροντάς τους τη ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να αντιμετωπιστεί το σφάλμα έγκαιρα. Εάν αυτό δεν είναι άμεσα εφικτό, είναι αναγκαία η πραγματοποίηση κάποιας επαναδιαμόρφωσης στο σύστημα, ώστε να μπορεί να συνεχιστεί ομαλά η λειτουργία του στο συντομότερο δυνατό διάστημα. Βασική προϋπόθεση της επαναδιαμόρφωσης αυτής είναι οι τιμές των τάσεων να κυμαίνονται στα επιτρεπτά όρια, να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες αλλά και να διατηρείται η ακτινική μορφή του δικτύου.

3.2 Εισαγωγή στη Βελτιστοποίηση

Βελτιστοποίηση καλείται ο κλάδος της επιστήμης ο οποίος επικεντρώνεται στον εντοπισμό των βέλτιστων λύσεων ενός προβλήματος. Όταν μία λύση πληροί τα κριτήρια και τους περιορισμούς, τότε έχουμε μία εφικτή λύση (feasible solution). Μεταξύ των εφικτών λύσεων, υπάρχει και η βέλτιστη, ο εντοπισμός της οποίας εντάσσεται στην κατηγορία της ολικής βελτιστοποίησης. (Global Optimization). Υπάρχουν και περιπτώσεις στις οποίες λύσεις που δεν είναι βέλτιστες, είναι αποδεκτές και γίνεται σύγκριση χαρακτηριστικών τους με αυτά της βέλτιστης, βρίσκοντας ότι κάποια ή και όλα από αυτά είναι επιθυμητά. Αυτού του είδους η σύγκριση ονομάζεται τοπική βελτιστοποίηση (Local Optimization). Ο όρος αυτός έχει δύο χρήσεις, καθώς χρησιμοποιείται και για να περιγράψει την αναζήτηση της λύσης τοπικά, δηλαδή σε ένα μέρος του χώρου λύσεων.

Πρώτο βήμα είναι η μοντελοποίηση του προβλήματος. Στο στάδιο αυτό, το πραγματικό πρόβλημα μοντελοποιείται μαθηματικά, βάσει των χαρακτηριστικών του, τα κριτήρια και τους περιορισμούς. Ως μεταβλητές του είναι οι παράμετροι που μας ενδιαφέρουν κάθε φορά και ως λύσεις είναι ένα σύνολο τιμών για τις παραμέτρους αυτές. Για τα δεδομένα του προβλήματος, κατασκευάζεται μία συνάρτηση τέτοια ώστε τα ακρότατά της (ολικά μέγιστα ή ελάχιστα) να δίνουν τις βέλτιστες λύσεις του προβλήματος. Η συνάρτηση αυτή καλείται Συνάρτηση Στόχου (objective function).

Η Συνάρτηση Στόχου βρίσκει τις εφικτές λύσεις σε συγκεκριμένο χώρο προς αναζήτηση, το γνωστό πεδίο ορισμού, το οποίο προκύπτει και από τους περιορισμούς του προβλήματος. Και οι περιορισμοί είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθούν μαθηματικά και να ληφθούν υπ' όψιν κατά την επίλυση του προβλήματος. Η μορφή τους συνήθως είναι ανισώσεις ή εξισώσεις.

3.2 Προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB

Για την ανάλυση ροής φορτίου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATPOWER ενώ για τη εύρεση της βέλτιστης αναδιάταξης ενός δικτύου διανομής εξειδικευμένου κώδικα Matlab που μοντελοποιεί τη μέθοδο Particle Swarm Optimiztion (PSO).

3.2.1 Περιγραφή λογισμικού MATPOWER

Το εργαλείο MATPOWER είναι ένα λογισμικό το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο m-files του Matlab, το οποίο αφορά στη επίλυση προβλημάτων ροής φορτίου και βέλτιστης ροής φορτίου. Δημιουργήθηκε από τους Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murrillo Sanchez και Deqiang Gan στο πανεπιστήμιο Cornell υπό την καθοδήγηση του Robert Thomas. Πρόκειται

για ένα εργαλείο το οποίο ενδείκνυται τόσο για ερευνητικούς όσο και για εκπαιδευτικούς σκοπούς, καθώς είναι ιδιαιτέρως εύκολο να χρησιμοποιηθεί ακόμη και από άτομα με βασικές γνώσεις προγραμματισμού, λόγω της απλότητας του χειρισμού του.

Το πρόγραμμα MATPOWER δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς περιλαμβάνει ένα σύνολο έτοιμων μοντέλων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με πολλαπλούς ζυγούς και ένα σύνολο εντολών για την προσομοίωση της ροής φορτίου με διάφορες μεθόδους. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιεί κάθε φορά το εκάστοτε σύστημα, προσθέτοντας ζυγούς και διάφορους περιορισμούς, καθώς επίσης μπορεί να εκτελεί προσομοιώσεις που του επιτρέπουν να ελέγχει τις ροές φορτίου και άλλα αποτελέσματα.

Για να πραγματοποιηθεί η εκτέλεση μιας ροής φορτίου σε ένα σύστημα που έχουμε ορίσει, ο χρήστης χρησιμοποιεί την εντολή «runpf», βάζοντας ως όρισμα της συνάρτησης το αρχείο μέσα στο οποίο έχει γίνει η μοντελοποίηση του συστήματος. Ακόμη, δίνεται η δυνατότητα να βρεθεί η βέλτιστη ροή φορτίου, αφαιρώντας εάν θέλουμε μονάδες παραγωγής, όπως π.χ. αποσύνδεση γεννητριών, με δεδομένη ζήτηση και συγκεκριμένο κόστος παραγωγής, χρησιμοποιούμε την εντολή «runopf»

Για την ανάπτυξη του λογισμικού της παρούσας εργασίας, για την επίλυση ροών φορτίου χρησιμοποιήθηκε η εντολή «runpf».

3.2.2 Περιγραφή λογισμικού PSO

Το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης διακοπών με σκοπό τη μείωση των απωλειών ενέργειας αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, αναζητά, δηλαδή το καλύτερο συνδυασμό καταστάσεων λειτουργίας των διακοπών του δικτύου, ώστε οι απώλειες της τάσης να ελαχιστοποιούνται.

Η μέθοδος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (PSO Particle Swarm Optimization), είναι ένας αλγόριθμος βασισμένος στην έννοια του πληθυσμού. Ο πληθυσμός καλείται σμήνος και τα μέλη του σωματίδια. Κάθε μέλος του πληθυσμού έχει από μία πιθανή λύση, ενώ ταυτόχρονα όλα τα μέλη επικοινωνούν μεταξύ τους και ελέγχουν τον χώρο λύσεων.

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο αλγόριθμος αυτός περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω:

Ο αριθμός των σωματιδίων επιλέγεται σύμφωνα με τη φύση και το εύρος του προβλήματος. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα έχουμε επιλέξει να εξετάσουμε ένα μοντέλο χώρου **12 διαστάσεων**, το κάθε σμήνος αποτελείται από **50 σωματίδια** και ο μέγιστος **αριθμός εποχών** είναι **20**. Ξεκινώντας, δίνονται αρχικές τιμές στα σωματίδια που βρίσκονται στο χώρο λύσεων. Σε κάθε επόμενη επανάληψη, καθένα σωματίδιο αποκτά μια νέα τιμή, η οποία σχετίζεται άμεσα τόσο με την καλύτερη προσωπική θέση του σωματιδίου (personal best position) όσο και με την καθολικά καλύτερη θέση του (global best position). Ως καθολικά καλύτερη θέση θεωρείται η καλύτερη προσωπική θέση από όλα τα σωματίδια. Η νέα θέση του κάθε σωματιδίου προκύπτει από την «ταχύτητα» του, η οποία και αρχικοποιείται στην αρχή του αλγορίθμου. Στόχος του αλγορίθμου είναι εύρεση του ολικού

ελάχιστου της συνάρτησης στόχου. Ως λύση του προβλήματος θεωρούμε την καλύτερη θέση των σωματιδίων που οδηγεί στη μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης από όλες τις καλύτερες θέσεις, δηλαδή η καθολικά καλύτερη.

Στο πρόβλημα που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο χρόνος προσομοίωσης των αποτελεσμάτων σύγκλισης του PSO ανά σενάριο κυμαίνεται περίπου στα 3 δευτερόλεπτα (1000 εκτελέσεις με 0.03 sec η καθεμία).

Στην πλειοψηφία των προβλημάτων τα σωματίδια πρέπει να βρίσκονται σε ένα συγκριμένο χώρο λύσεων. Για το λόγο αυτό, ορίζονται όρια για τη θέση του σωματιδίου, ώστε η κίνησή του να περιορίζεται εκεί. Ο έλεγχος της θέσης του κάθε σωματιδίου και εάν αυτή είναι εντός ορίων, γίνεται σε κάθε επανάληψη. Σε περίπτωση που είναι εκτός ορίων, το σωματίδιο παίρνει θέση στο σύνολο του χώρου. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι η καλύτερη θέση θα βρίσκεται εντός του χώρου λύσεων του προβλήματος που έχει τεθεί προς διερεύνηση.

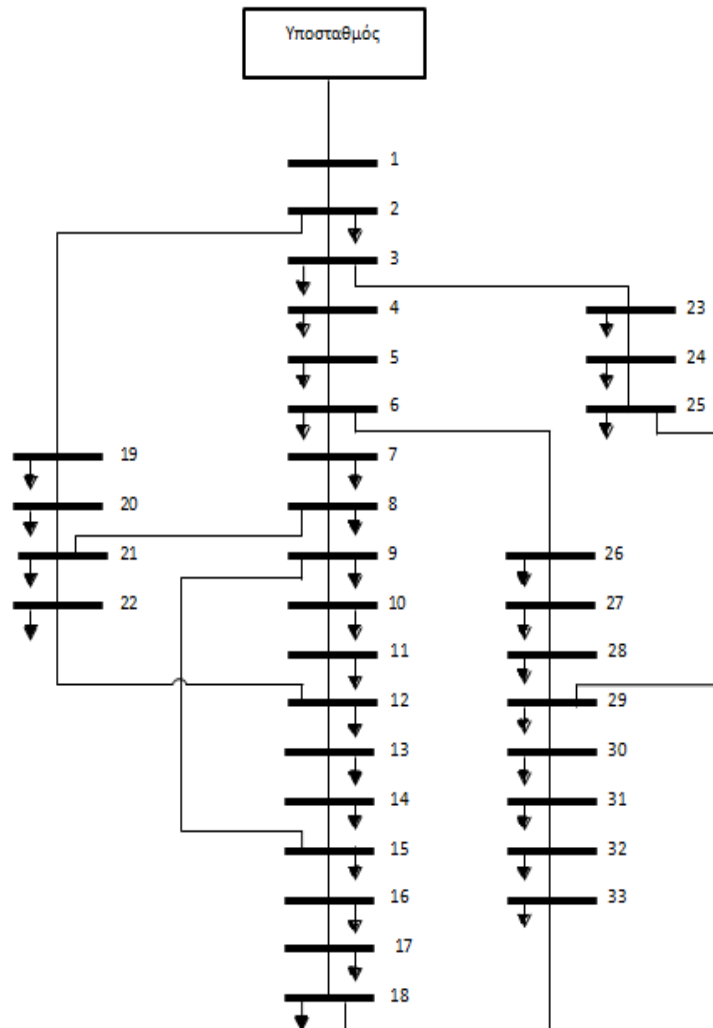
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Παρουσίαση προβλήματος

4.1 Γενικά

Το πρόβλημα το οποίο καλούμαστε να επιλύσουμε αφορά στην ανάλυση ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο αποτελείται από 33 ζυγούς και 37 κλάδους. Σε αυτό το δίκτυο έχουν προστεθεί 12 διακόπτες, οι οποίοι, ανάλογα με το εάν αυτοί είναι ανοικτοί ή κλειστοί, καθορίζουν εάν το δίκτυο θα είναι ακτινικό ή βροχοειδές. Το δίκτυο είναι ονομαστικής τάσης 12,66 kV ενώ τα όρια των τάσεων στους ζυγούς είναι $\pm 5\%$ της ονομαστικής τιμής. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου εύρεσης της βέλτιστης κατάστασης των διακοπών στο συγκεκριμένο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, ώστε το δίκτυο να διατηρείται ακτινικό, να υπάρχουν ελάχιστες απώλειες και οι τάσεις να παραμένουν εντός ορίων. Στην προσπάθεια για την εύρεση του καλύτερου

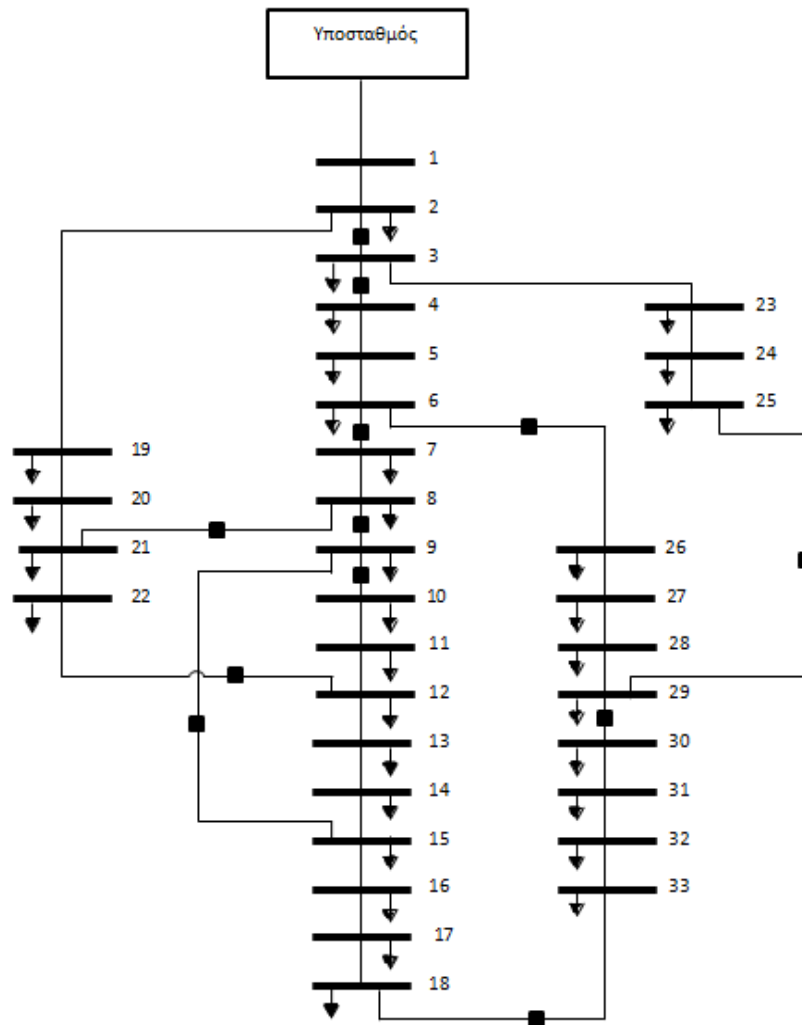
δυνατού αποτελέσματος, έχουν τεθεί και κάποιοι περιορισμοί, οι οποίοι θα αναφερθούν παρακάτω.

Το δίκτυο διανομής που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία απεικονίζεται σχεδιαστικά στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.1.1: Αρχική τοπολογία δικτύου διανομής 33 ζυγών

Οι διακόπτες που έχουν προστεθεί στο δίκτυο τοποθετήθηκαν στις γραμμές 2-3, 3-4, 6-7, 6-26, 8-9, 8-21, 9-10, 9-15, 12-22, 18-33, 25-29, 29-30 και 18-33 και συμβολίζονται s_1 , s_2 , s_3 , s_4 , s_5 , s_6 , s_7 , s_8 , s_9 , s_{10} , s_{12} και s_{11} αντίστοιχα. Οι ανοικτοί διακόπτες θα συμβολίζονται με λευκό σύμβολο, ενώ οι κλειστοί με μαύρο. Το δίκτυο μετά την προσθήκη των διακοπών παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1.2.



Εικόνα 4.1.2: Τοπολογία δικτύου διανομής μετά την προσθήκη των 12 διακοπών

4.2 Παράμετροι του προβλήματος

Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας το οποίο μελετάται στην παρούσα εργασία αποτελείται από 33 ζυγούς, τα στοιχεία το οποίου θα παρουσιαστούν στο [Παράρτημα](#).

Για να ελεγχθεί η λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου είναι απαραίτητο να γίνει η Ανάλυση Ροής Φορτίου. Αυτή θα πραγματοποιηθεί κάνοντας χρήση του λογισμικού MATPOWER σε περιβάλλον MATLAB.

4.3 Εισαγωγή δεδομένων στο MATPOWER

Τα αρχεία δεδομένων που χρησιμοποιούνται από το MATPOWER είναι αρχεία τύπου m-files και περιλαμβάνουν τις παρακάτω μεταβλητές: baseMVA, bus, branch, gen, areas, and gencost. Η μεταβλητή baseMVA είναι μια μεταβλητή κινητής υποδιαστολής, ενώ όλες οι υπόλοιπες που αναφέρθηκαν είναι πίνακες. Κάθε γραμμή του πίνακα δεδομένων

εισόδου αντιστοιχεί σε έναν ζυγό, γραμμή μεταφοράς ή γεννήτρια και ο αριθμός του είναι n_b , n_l και n_g αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα έχουμε τα εξής πεδία στο αρχείο εισόδου:

- Bus: περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τους κόμβους που υπάρχουν στο σύστημα καθώς και πληροφορίες για τα φορτία που είναι συνδεδεμένα στον εκάστοτε κόμβο.
- Branch: περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τους κλάδους μεταξύ των κόμβων.
- Gen: περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις γεννήτριες
- Gencost: περιέχει πληροφορίες σχετικά με τα κόστη λειτουργίας των γεννητριών για την επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου.

Οι στήλες είναι στις βασικές IEEE και PTI μορφές. Συνοπτικά, για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του λογισμικού, τα δεδομένα όπως ορίζονται στο MATPOWER παρουσιάζονται παρακάτω. Χρησιμοποιούνται τόσο για την περιγραφή οποιουδήποτε Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας στο περιβάλλον MATPOWER, όσο και για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν μετά την εκτέλεση των προσομοιώσεων ροής ισχύος.

Bus Data Format	Δεδομένα Ζυγών
1. Bus number (1 to 2997)	όνομα ζυγού
2. Bus type	είδος ζυγού
PQ bus = 1	ζυγός φορτίου
PV bus = 2	Ζυγός παραγωγής
Reference bus = 3	Ζυγός αναφοράς
Isolated bus = 4	Απομονωμένος ζυγός
3. Pd, real power demand (MW)	Ζήτηση ενεργού ισχύος
4. Qd, reactive power demand (MVar)	Ζήτηση άεργου ισχύος
5. Gs, shunt cinductance	Εγκάρσια αγωγιμότητα διακλαδώσεων
6. Bs, shunt susceptance (MVar)	Εγκάρσια χωρητικότητα
7. Area number, 1-100	
8. Vm, voltage magnitude (p.u.)	Μέτρο τάσης
9. Va, voltage angle (degrees)	Φασική γωνία της τάσης σε μοίρες
10. baseKV, base voltage (kV)	Βασική τάση (kV)
11. zone, loss zone (1-999)	
12. maxVm, maximum voltage magnitude (p.u.)	Μέγιστο μέτρο τάσης (α.μ.)
13. minVm, minimum voltage magnitude (p.u.)	Ελάχιστο μέτρο τάσης (α.μ.)

Πίνακας 1: Δεδομένα εισόδου ζυγών του MATPOWER (Zimmerman, Munillo-Sanchez, g.&Gan. 2011)

<u>Generator Data Format</u>	<u>Δεδομένα Γεννητριών</u>
1. Pg, real power output (MW)	Ενεργός ισχύς εξόδου
2. Qg, reactive power output (MVar)	Άεργος ισχύς εξόδου
3. Qmax, maximum reactive power output (MVar)	Μέγιστη άεργος ισχύς εξόδου
4. Qmin, minimum reactive power output (MVar)	Ελάχιστη άεργος ισχύς εξόδου
5. Vg, voltage magnitude serpoint (p.u.)	Μέτρο τάσης αναφοράς
6. mBase, total MVA base of this machine (machine impedance, p. u. on mBase)	Βασική ισχύς σύνθετη αντίσταση γεννητριών
Step up transformer impedance p.u. on mBase	Σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστών ανύψωσης (α.μ.)
Step up transformer off nominal trans ratio	Ονομαστικός λόγος μετασχηματισμού των Μ.Σ
7. Status, 0-machine in service κατάσταση >0 <=0 – machine out of service	Μηχανή σε λειτουργία <=0 εκτός λειτουργίας
8. Pmax, maximum real power output (MW)	Μέγιστη έξοδος ενεργού ισχύος
9. Pmin, minimum real power output (MW)	Ελάχιστη έξοδος ενεργού ισχύος
10. Pc1, lower real power output of PQ Capability curve (MW)	Ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος από την καμπύλη ικανότητας PQ
11. Pc2, upper real power output of PQ Capability curve (MW)	Άνω όριο εξόδου ενεργού ισχύος από την καμπύλη ικανότητας PQ
12. Qc1min, minimum reactive power output at Pc1 (MVar)	Ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος για ενεργό Pc1
13. Qc1max, maximum reactive power output at Pc1 (MVar)	Μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος στο σημείο Pc1
14. Qc2min, minimum reactive power output at Pc2(MVar)	Ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος για ενεργό Pc2
15. Qc2max, maximum reactive power output at Pc2 (MVar)	Μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος στο σημείο Pc2
16. RAMP AGC, ramp rate for load for load following/AGC (PW.min)	Μέγιστος ρυθμός αύξησης φορτίου/AGC
17. RAMP 10, ramp rate for 10 minutes reserves (MW)	Μέγιστος ρυθμός αύξησης ισχύος για 10 λεπτά
18. RAMP 30, ramp rate for 30 minutes reserves (MW)	Μέγιστος ρυθμός αύξησης ισχύος για 30 λεπτά
19. RAMP Q, ramp rate for reactive power (2 sec timescale) (MVar/min)	Μέγιστος ρυθμός αύξησης για άεργο ισχύ

Πίνακας 2: Δεδομένα εισόδου γεννητριών του MATPOWER (Zummerman, Munillo-Sanchez, g.&Gan. 2011)

<u>Branch Data Format</u>	<u>Δεδομένα Γραμμών Μεταφοράς</u>
1. F, from bus number	Ζυγός αναχώρησης (από)
2. T, to bus number (circuit identifier)	Ζυγός τέλους (προς)
3. R, resistance (p.u.)	Αντίσταση (α.μ.)
4. x, reactance (p.u.)	Επαγωγική αντίφραση (α.μ.)
5. B, total line charging susceptance(p.u)	Ολική χωρητικότητα (α.μ.)
6. RateA, MVA rating A (long term rating)	Μακροπρόθεσμο όριο μεταφερόμενης ισχύος
7. Rate B, MVA rating B (short term rating)	Βραχυπρόθεσμο όριο μεταφερόμενης ισχύος
8. Rate C, MVA rating C (emergency rating)	Όριο μεταφερόμενης ισχύος MVA έκτακτης ανάγκης
9. Ratio, transformer off nominal turns ratio (=0 for lines)	Ονομαστικός λόγος μετασχηματισμού M/Σ
10. Angie, transformer phase shift angle (degrees), positive => delay	Αντίσταση στο ζυγό κατεύθυνσης
(Gf, shunt conductance at from bus p.u.) (Bf, shunt susceptance at from bus p.u.) (Gt, shunt conductance at to bus p.u.) (Bt, shunt susceptance at to bus p.u.)	Αλλαγή φάσης μετασχηματιστή, θετική =>καθυστέρηση
11. Initial branch status, 1 – in service, 0 – out of service	Κατάσταση γραμμής μεταφοράς 1-σε λειτουργία, 0-εκτός λειτουργίας
12. Minimum angle defference, angle (Vf) - angle (Vt) (degrees)	Ελάχιστη διαφορά φάσης τάσεων (σε μοίρες)
13. Maximum angle difference, angle (Vf) - angle (Vt) (degrees)	Μέγιστη διαφορά τάσεων (σε μοίρες)

Πίνακας 3: Δεδομένα εισόδου γραμμών μεταφοράς του MATPOWER (Zimmerman, Munllo-Sanchez, g.&Gan. 2011)

<u>Area Data Format</u>	<u>Δεδομένα Περιοχής</u>
1. t, area number	Αριθμός περιοχής
2. price_ref_bus, reference bus for that area	Αναφορά τιμής ηλεκτρισμού (ζυγός αναφοράς για τη συγκεκριμένη περιοχή)

Πίνακας 4: Δεδομένα εισόδου περιοχής του MATPOWER (Zimmerman, Munllo-Sanchez, g.&Gan. 2011)

<u>Generator Cost Data</u>	<u>Δεδομένα κόστους παραγωγής από γεννήτριες</u>
1. Model	Μοντέλο κόστους
1=piecewise linear	Τμηματικά γραμμικό μοντέλο
2=polynomial	Πολυωνυμικό
2. Start up in US dollars	Κόστος εκκίνησης
3. Shutdown in US dollars	Κόστος τερματισμού
4. NCOST, number of cost coefficients for polynomial costfunction, or number of data points for piecewise linear	Αριθμός συντελεστών για πολυωνυμική συνάρτηση κόστους ή αριθμός σημείων για τμηματικά γραμμική συνάρτηση

Πίνακας 5: Δεδομένα εισόδου κόστους παραγωγής από γεννήτριες MATPOWER (Zimmermann, Murillo-Sanchez, & Gan, 2011)

4.5 Αντικειμενική συνάρτηση

Στο μοντέλο βέλτιστης αναδιάταξης τοπολογίας δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, έχει γίνει χρήση της ακόλουθης αντικειμενικής συνάρτησης:

$$TC_aug(i, 1) = Penalty * (\sum_{i=1}^{42} (| \sum_{k=1}^{42} result_branch(k, 14) + \sum_{m=1}^{42} result_branch(m, 16) |))$$

Όπου:

Penalty , είναι μεταβλητός αριθμός ο οποίος υποδεικνύει εάν η λύση είναι εντός ή εκτός των περιορισμών. Θα τον ονομάσουμε όρο ποινής, καθώς αυτός θα ορίζει εάν η λύση πληροί τις προϋποθέσεις των περιορισμών και εάν τελικά θα γίνεται δεκτή ή όχι. Ο όρος ποινής Penalty θα αναλυθεί εκτενέστερα στη συνέχεια .

Ο πρώτος όρος εντός του εξωτερικού αθροίσματος δηλώνει το ποσό της ενεργού ισχύος που εισέρχεται στην «είσοδο» ενός κλάδου, ενώ ο δεύτερος όρος δηλώνει το ποσό της ενεργού ισχύος που εισέρχεται στην «έξοδο» του κλάδου.

Τα διανύσματα των ενεργών ισχύων έχουν γίνει γνωστά από αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε δοκιμή μέσω του MATPOWER.

Με λίγα λόγια, η αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στην εύρεση μιας λύσης με τις λιγότερες δυνατές απώλειες δικτύου. Όλο τον όρο που περιλαμβάνεται στο εξωτερικό άθροισμα της αντικειμενικής συνάρτησης θα τον ονομάσουμε Συνάρτηση Στόχου.

Καταλυτικό ρόλο στην εύρεση της βέλτιστης λύσης παίζει ο σταθερός όρος Penalty, ο οποίος δηλώνει εάν μια λύση είναι εντός ή εκτός περιορισμών. Σε περίπτωση που δεν

παραβιάζεται κανένας περιορισμός, το Penalty είναι ίσο με 1, επομένως το γινόμενο δεν επηρεάζεται από αυτό και η αντικειμενική συνάρτηση μας δίνει μία εφικτή λύση. Αντιθέτως, σε περίπτωση που παραβιαστεί ένας εκ των περιορισμών που έχουν τεθεί στο πρόβλημα, ο συντελεστής Penalty να αυξάνει ανάλογα την τιμή του, με αποτέλεσμα η συγκεκριμένη λύση τελικά να απορρίπτεται.

4.6 Περιορισμοί προβλήματος και ποινή στην αντικειμενική συνάρτηση

Οι περιορισμοί που έχουν τεθεί στο πρόβλημα σχετίζονται τόσο με την τοπολογία του δικτύου όσο και με την τάση. Πιο συγκεκριμένα, η τοπολογία που προτιμούμε στο συγκεκριμένο δίκτυο είναι η ακτινική. Για το λόγο αυτό, επιβάλλεται πέναλτυ στην περίπτωση που μεταξύ κάποιων ζυγών δημιουργηθεί βροχοειδής συνδεσμολογία. Για την επεξεργασία της συνδεσμολογίας του δικτύου διανομής στο προγραμματιστικό περιβάλλον, δημιουργήθηκε ο πίνακας **Ajdacency_Matrix** διαστάσεων 33 επί 33, ο οποίος αποτελεί έναν πίνακα πρόσπτωσης των κλάδων, περιέχει, δηλαδή, την τοπολογία του δικτύου, υποδεικνύοντας με ποιούς κόμβους συνδέεται κάθε κλάδος.

Περισσότερες πληροφορίες για τους πίνακες πρόσπτωσης δίνονται στο ακόλουθο link:

<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/graph.adjacency.html>

Πιο συγκεκριμένα, τα κελιά του Adjacency_Matrix(u,w) που περιέχουν τον αριθμό 1 υποδεικνύουν ότι ο ζυγός u συνδέεται με τον ζυγό w με απλή γραμμή. Τα κελιά Adjacency_Matrix (u,w) που περιέχουν s_i υποδεικνύουν ότι ο ζυγός u συνδέεται με τον ζυγό w με τον διακόπτη i. Τα κελιά που περιέχουν 0 σημαίνει ότι οι αντίστοιχοι ζυγοί του δικτύου δεν συνδέονται με κάποιον τρόπο μεταξύ τους.

$$Adjacency_{Matrix(u,w)} = \begin{cases} 1, & \text{όταν οι ζυγοί } w \text{ και } u \text{ συνδέονται} \\ 0, & \text{όταν δε συνδέονται οι ζυγοί } w \text{ και } u \end{cases}$$

Για τη δημιουργία και επεξεργασία του πίνακα πρόσπτωσης χρησιμοποιήθηκε εξειδικευμένο λογισμικό σε Matlab ώστε να προσμετρούνται οι βρόχοι στο δίκτυο χρησιμοποιώντας ως είσοδο τον πίνακα Ajdacency_Matrix.

Ο επόμενος περιορισμός αφορά τις τάσεις των ζυγών ως προς το άνω και κάτω όριο. Δηλαδή, με το μέτρο της τάσης σε κάθε ζυγό να πρέπει να τηρείται μεταξύ του $\pm 5\%$ της ονομαστικής τιμής. Επιθυμούμε, δηλαδή, να είναι μεταξύ των τιμών 0.95 και 1.05 p.u.,

δεδομένου ότι πρόκειται για ένα δίκτυο διανομής. Σε αντίθετη περίπτωση, επιβάλλεται ποινή.

Οι περιορισμοί του προβλήματος σε συναρτησιακή μορφή περιγράφονται ως εξής:

$$num_of_loops < 1$$

$$0,95 \text{ pu} < V_i < 1,05 \text{ pu}$$

Οι μη εφικτές λύσεις αποκλείονται εξετάζοντας τους περιορισμούς και επιβάλλοντας πέναλτι στην αντικειμενική συνάρτηση.

Πιο συγκεκριμένα, οι περιορισμοί έχουν εισαχθεί στην αντικειμενική συνάρτηση ως όροι ποινής, όπως προαναφέρθηκε. Ο όρος ποινής στην περίπτωση βροχοειδούς συνδεσμολογίας δίνεται από τη μεταβλητή *loop_penalty*, ενώ στην περίπτωση που η τάση είναι εκτός ορίων δίνεται από τη μεταβλητή *voltage_penalty*. Η αρχική τιμή και των δύο αυτών όρων ποινής είναι 1. Σε περίπτωση που κάποιος από τους δύο περιορισμούς παραβιαστεί, οι μεταβλητές παίρνουν τιμή 10, αντιστοίχως. Μετά τον έλεγχο των περιορισμών, και οι δύο όροι ποινής προστίθενται στην μεταβλητή *penalty*, και αυτή με τη σειρά της πολλαπλασιάζεται με την Συνάρτηση Στόχου. Έτσι, εάν κάποιος περιορισμός έχει παραβιαστεί και επομένως έχει πάρει τιμή μεγαλύτερη από 1 (δηλαδή 10 ή 20), θα δίνεται αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερο από αυτό της συνάρτησης στόχου, και τελικά θα απορρίπτεται ως λύση του προβλήματος.

Συνοψίζοντας, κάθε φορά που σχηματίζεται κάποιο βροχοειδές δίκτυωμα ή η τιμή της τάσης βρίσκεται εκτός ορίων, η τιμή της ποινής αυξάνεται κατά 10, με αποτέλεσμα το τελικό κόστος που δίνεται από της λύση να δεκαπλασιάζεται, ώστε να μην είναι πλέον βέλτιστο το αποτέλεσμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αποτελέσματα

5.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας 33 ζυγών και 37 κλάδων, οι 12 από τους οποίους έχουν εξοπλιστεί χειροκίνητα με ένα διακόπτη. Είναι ονομαστικής τάσης 12,66 kV και τα όρια των τάσεων στους ζυγούς είναι $\pm 5\%$ της ονομαστικής. Η ενεργή και η άεργη ισχύς έχουν οριστεί αρχικά με τιμή 1,5 MW και 0,3 MVar αντίστοιχα. Όπως είναι γνωστό, η άεργος ισχύς προκύπτει εύκολα εφόσον γνωρίζουμε την ενεργή. Στο δεδομένο δίκτυο η άεργη ισχύς προέκυψε παίρνοντας το φορτίο κάθε κόμβου και διαιρώντας το με τον συνολικό αριθμό των κόμβων, δηλαδή $Q=0,2 \cdot P$. Τα στοιχεία του συστήματος δίνονται αναλυτικότερα στο **Παράρτημα**. Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου θα δίνει τη βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας των διακοπών με στόχο να διατηρεί το δίκτυο ακτινικό, τις τάσεις εντός ορίων και τις απώλειες ελάχιστες.

5.2 Εφαρμογές και Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται αναλυτικά τα διάφορα σενάρια που δοκιμάστηκαν χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο που εξετάζουμε. Το βασικό σενάριο πάνω στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές είναι η εισαγωγή 12 διακοπών και έλεγχος για τη βέλτιστη αναδιάταξή τους, έχοντας τις ελάχιστες απώλειες, διατηρώντας τάσεις εντός ορίων και το δίκτυο ακτινικό.

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, λοιπόν, με βάση τις παραπάνω προϋποθέσεις ήταν τα εξής:

- Εφαρμογές χαμηλών φορτίων.
- Εφαρμογές πολύ υψηλών φορτίων.
- Σφάλμα σε κάποια γραμμή του δικτύου, κλείνοντας τον αντίστοιχο διακόπτη.

5.2.1 Αποτελέσματα 1^{ης} εφαρμογής: Χαμηλά φορτία

- Σενάριο 1: $P=1,5 \text{ MW}$ και $Q=0,3 \text{ MVar}$.

Εφαρμόζουμε το φορτίο $P=1,5$ MW και $Q=0,3$ MVar στον αλγόριθμο. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής φορτίου που προκύπτουν για το δίκτυο από το λογισμικό MATPOWER είναι τα ακόλουθα:

Στην Εικόνα 5.2.1.1 εμφανίζονται τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται το σύστημα του δικτύου. Είναι εμφανή τα δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού και άεργου ισχύος, οι απώλειες, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς, κ.ά.

Στο πάνω ήμισυ του πίνακα φαίνονται τα εξής:

- ✘ Η συνολική ικανότητα των γεννητριών σε ενεργό και άεργο ισχύ
- ✘ Η ικανότητα των εν ενεργεία γεννητριών σε ενεργό και άεργο ισχύ
- ✘ Η παραγόμενη ισχύς (ενεργός και άεργος)
- ✘ Η ισχύς για εξυπηρέτηση του φορτίου σταθερό και ρυθμιζόμενο φορτίο (για τη βέλτιστη ροή φορτίου)
- ✘ Η ισχύς των εγκάρσιων στοιχείων
- ✘ Η φόρτιση των πυκνωτών και των γραμμών

Ενώ, στο κάτω ήμισυ δίνονται πληροφορίες για να τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή των ακόλουθων μεγεθών:

- ✘ Ενεργός τιμή της τάσης
- ✘ Φασική γωνία τάσης
- ✘ Απώλειες σε ενεργό και άεργο ισχύ

System Summary				
How many?		How much?	P (MW)	Q (MVar)
Buses	33	Total Gen Capacity	10.0	-10.0 to 10.0
Generators	1	On-line Capacity	10.0	-10.0 to 10.0
Committed Gens	1	Generation (actual)	1.3	0.3
Loads	33	Load	1.3	0.3
Fixed	33	Fixed	1.3	0.3
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0	0.0
Branches	37	Losses ($I^2 \cdot Z$)	0.02	0.01
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-	0.0
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			
Minimum			Maximum	
Voltage Magnitude	0.970 p.u. @ bus 18		1.000 p.u. @ bus 1	
Voltage Angle	-0.80 deg @ bus 18		0.00 deg @ bus 1	
P Losses ($I^2 \cdot R$)	-		0.00 MW @ line 5-6	
Q Losses ($I^2 \cdot X$)	-		0.00 MVar @ line 5-6	

Εικόνα 5.2.1.1: Αποτελέσματα: Περιγραφή του συστήματος

Στην Εικόνα 5.2.1.2 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της λειτουργίας των ζυγών.

Πιο συγκεκριμένα, στη πρώτη στήλη του πίνακα που εμφανίζεται, διακρίνεται ο κωδικός αριθμός του κάθε ζυγού στο ΣΗΕ. Στην επόμενη διπλή στήλη δίνεται το πλάτος της τάσης και η φασική γωνία της τάσης του ζυγού. Στις επόμενες διπλές στήλες, φαίνονται οι εγχύσεις ισχύος σε ενεργό και άεργο ισχύ γεννητριών καθώς και οι αντίστοιχες απορροφήσεις φορτίων.

Bus Data						
Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.000	0.000+	1.32	0.27	0.04	0.01
2	0.999	-0.013	-	-	0.04	0.01
3	0.995	-0.071	-	-	0.04	0.01
4	0.993	-0.107	-	-	0.04	0.01
5	0.991	-0.144	-	-	0.04	0.01
6	0.986	-0.309	-	-	0.04	0.01
7	0.985	-0.411	-	-	0.04	0.01
8	0.983	-0.426	-	-	0.04	0.01
9	0.980	-0.504	-	-	0.04	0.01
10	0.977	-0.575	-	-	0.04	0.01
11	0.977	-0.578	-	-	0.04	0.01
12	0.976	-0.583	-	-	0.04	0.01
13	0.973	-0.659	-	-	0.04	0.01
14	0.972	-0.704	-	-	0.04	0.01
15	0.972	-0.729	-	-	0.04	0.01
16	0.971	-0.746	-	-	0.04	0.01
17	0.970	-0.790	-	-	0.04	0.01
18	0.970	-0.797	-	-	0.04	0.01
19	0.999	-0.020	-	-	0.04	0.01
20	0.998	-0.065	-	-	0.04	0.01
21	0.997	-0.076	-	-	0.04	0.01
22	0.997	-0.087	-	-	0.04	0.01
23	0.995	-0.080	-	-	0.04	0.01
24	0.995	-0.095	-	-	0.04	0.01
25	0.994	-0.103	-	-	0.04	0.01
26	0.985	-0.316	-	-	0.04	0.01
27	0.985	-0.325	-	-	0.04	0.01
28	0.983	-0.388	-	-	0.04	0.01
29	0.982	-0.428	-	-	0.04	0.01
30	0.981	-0.437	-	-	0.04	0.01
31	0.980	-0.471	-	-	0.04	0.01
32	0.980	-0.480	-	-	0.04	0.01
33	0.980	-0.487	-	-	0.04	0.01
Total:			1.32	0.27	1.30	0.26

Εικόνα 5.2.1.2: Αποτελέσματα: Λειτουργία ζυγών

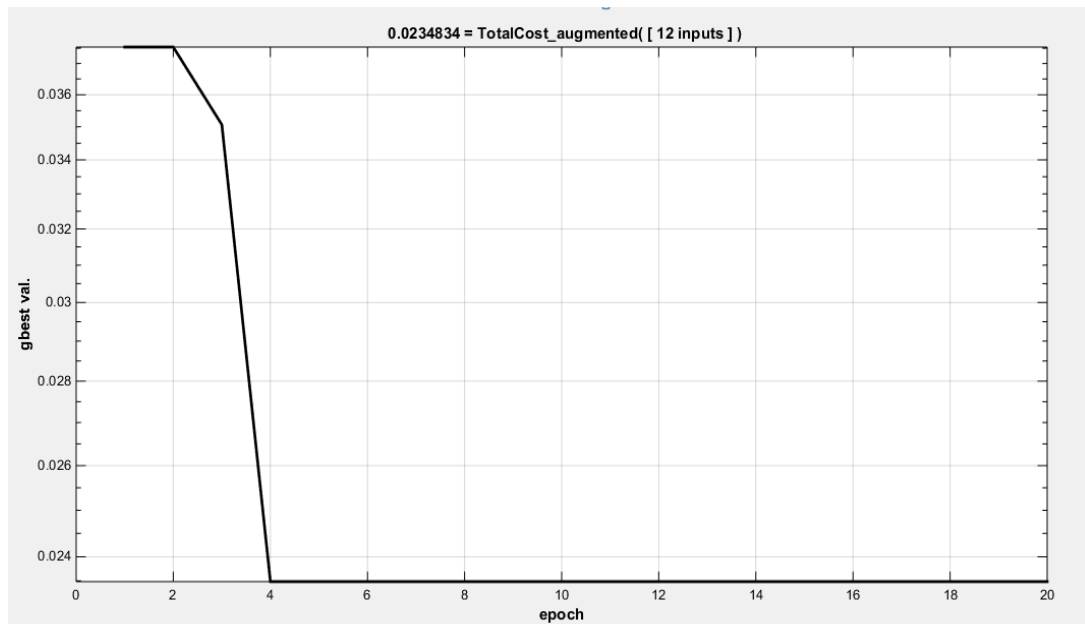
Στον επόμενο πίνακα της Εικόνας 5.2.1.3 δίνονται τα αποτελέσματα των γραμμών μεταφοράς.

Οι πρώτες τρεις στήλες αφορούν στην ταυτοποίηση της γραμμής μεταφοράς, δηλαδή στον κωδικό αριθμό της ίδιας, καθώς και στον αριθμό των ζυγών που συνδέει. Συνεχίζοντας, φαίνεται η ισχύς (ενεργός και άεργος) στην αρχή και στο πέρας της γραμμής. Τέλος, δίνονται οι απώλειες της ενεργού και άεργου ισχύος.

Branch Data									
Branch #	From Bus	To Bus	From Bus P (MW)	Injection Q (MVar)	To Bus P (MW)	Injection Q (MVar)	Loss ($I^2 \cdot Z$)		
							P (MW)	Q (MVar)	
1	1	2	1.28	0.27	-1.28	-0.26	0.001	0.00	
2	2	3	1.08	0.22	-1.08	-0.22	0.004	0.00	
3	3	4	0.92	0.19	-0.92	-0.19	0.002	0.00	
4	4	5	0.88	0.18	-0.88	-0.18	0.002	0.00	
5	5	6	0.84	0.17	-0.83	-0.17	0.004	0.00	
6	6	7	0.48	0.10	-0.48	-0.10	0.000	0.00	
7	7	8	0.44	0.09	-0.44	-0.09	0.001	0.00	
8	8	9	0.40	0.08	-0.40	-0.08	0.001	0.00	
9	9	10	0.36	0.07	-0.36	-0.07	0.001	0.00	
10	10	11	0.32	0.06	-0.32	-0.06	0.000	0.00	
11	11	12	0.28	0.06	-0.28	-0.06	0.000	0.00	
12	12	13	0.24	0.05	-0.24	-0.05	0.001	0.00	
13	13	14	0.20	0.04	-0.20	-0.04	0.000	0.00	
14	14	15	0.16	0.03	-0.16	-0.03	0.000	0.00	
15	15	16	0.12	0.02	-0.12	-0.02	0.000	0.00	
16	16	17	0.08	0.02	-0.08	-0.02	0.000	0.00	
17	17	18	0.04	0.01	-0.04	-0.01	0.000	0.00	
18	2	19	0.16	0.03	-0.16	-0.03	0.000	0.00	
19	19	20	0.12	0.02	-0.12	-0.02	0.000	0.00	
20	20	21	0.08	0.02	-0.08	-0.02	0.000	0.00	
21	21	22	0.04	0.01	-0.04	-0.01	0.000	0.00	
22	3	23	0.12	0.02	-0.12	-0.02	0.000	0.00	
23	23	24	0.08	0.02	-0.08	-0.02	0.000	0.00	
24	24	25	0.04	0.01	-0.04	-0.01	0.000	0.00	
25	6	26	0.32	0.06	-0.32	-0.06	0.000	0.00	
26	26	27	0.28	0.06	-0.28	-0.06	0.000	0.00	
27	27	28	0.24	0.05	-0.24	-0.05	0.000	0.00	
28	28	29	0.20	0.04	-0.20	-0.04	0.000	0.00	
29	29	30	0.16	0.03	-0.16	-0.03	0.000	0.00	
30	30	31	0.12	0.02	-0.12	-0.02	0.000	0.00	
31	31	32	0.08	0.02	-0.08	-0.02	0.000	0.00	
32	32	33	0.04	0.01	-0.04	-0.01	0.000	0.00	
33	21	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	
34	9	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	
35	12	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	
36	18	33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	
37	25	29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	
Total:							0.018	0.01	

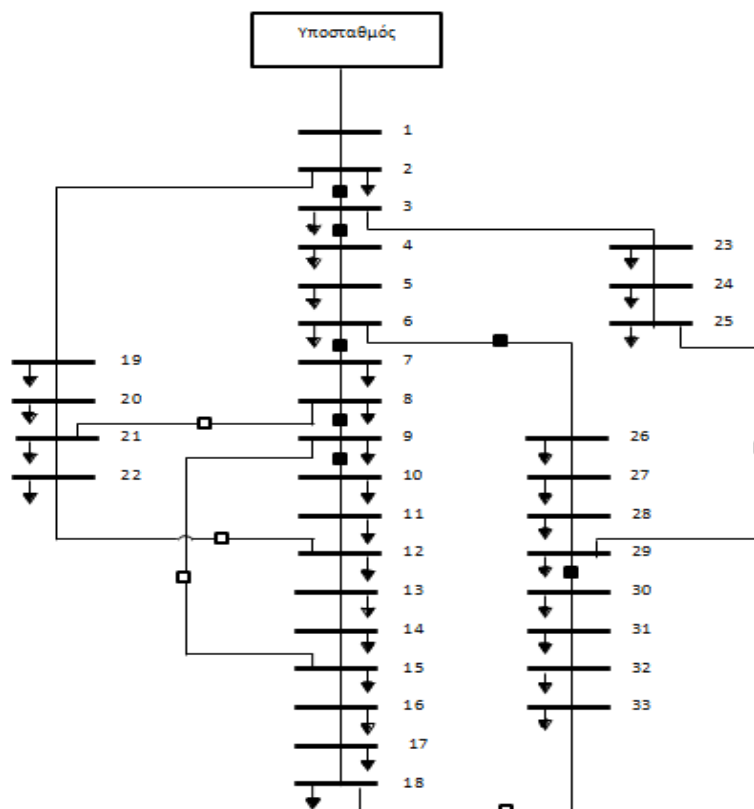
Εικόνα 5.2.1.3: Αποτελέσματα: Γραμμών Μεταφοράς

Στην Εικόνα 5.2.1.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα σύγκλισης των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου PSO. Παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει σε μία τιμή, το οποίο σημαίνει ότι έχει βρεθεί βέλτιστη λύση για την αποκατάσταση του δικτύου για το συγκεκριμένο φορτίο. Το βέλτιστο αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης είναι 0,0234834. Η κατάσταση των διακοπών σε κάθε δοκιμή προκύπτει από τα αποτελέσματα του PSO και η μορφή της τοπολογίας του δικτύου δίνεται στην Εικόνα 5.2.1.5.



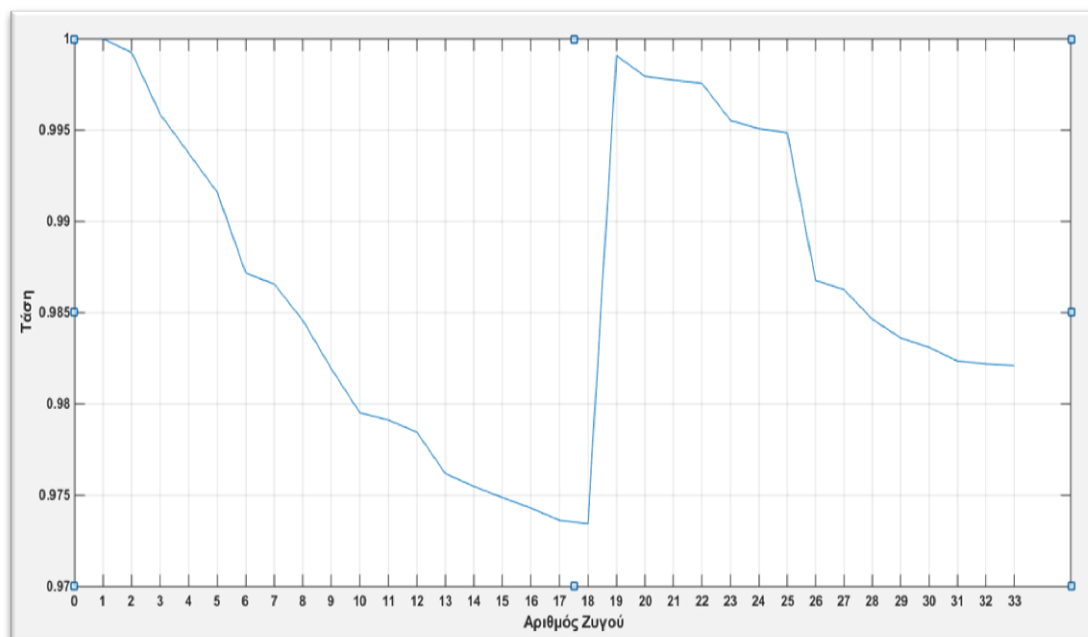
Εικόνα 5.2.1.4: Αποτελέσματα: Συγκλιση σφάλματος PSO

Το δίκτυο είναι ακτινικό, επομένως η ροή του διαρρέεται ομαλά, εξυπηρετώντας όλους τους καταναλωτές του δικτύου.



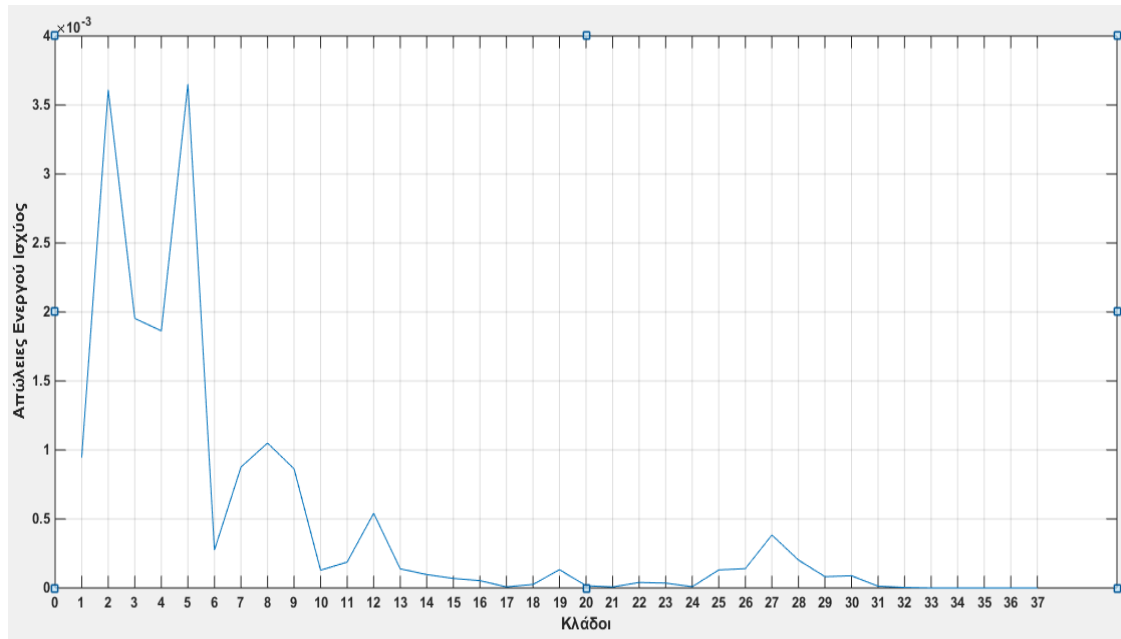
Εικόνα 5.2.1.5: Διαμόρφωση τοπολογίας δικτύου για φορτία $P=1,5$ MW και $Q=0,3$ MVar

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.2.1.6 παρουσιάζονται οι τάσεις του δικτύου διανομής, οι οποίες είναι εντός των ορίων των περιορισμών.

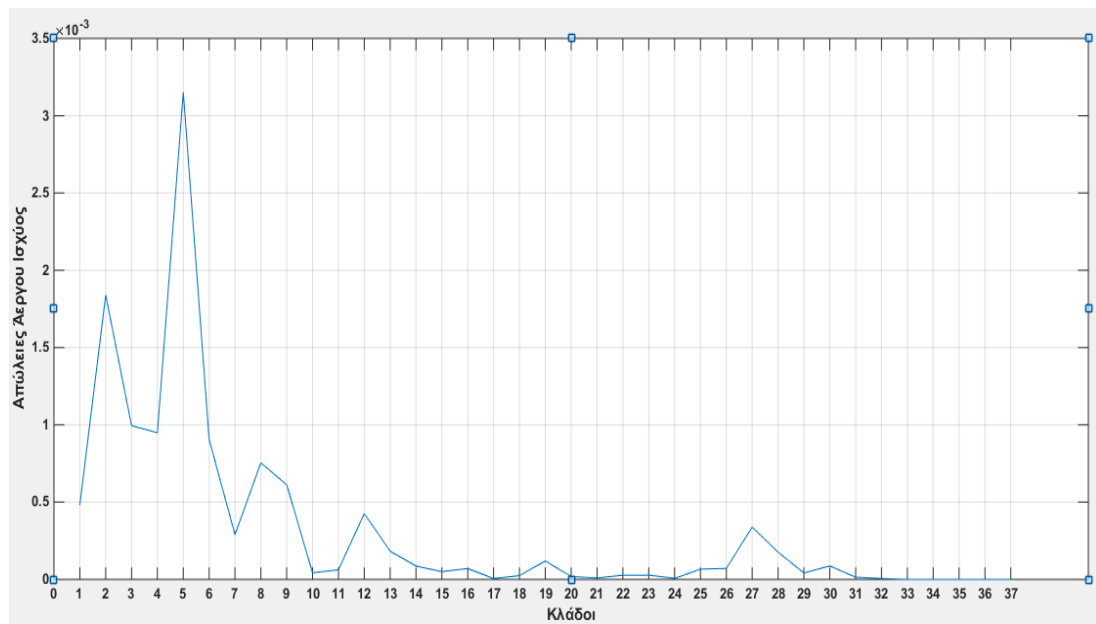


Εικόνα 5.2.1.6: Διάγραμμα Τάσης ανά Ζυγό

Τέλος, απαραίτητη προϋπόθεση για να θεωρηθεί το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεσματικό είναι οι απώλειες να είναι χαμηλές. Στα διαγράμματα των εικόνων 5.2.1.7 και 5.2.1.8 διακρίνονται οι απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα. Οι τιμές τους είναι πολύ χαμηλές τιμές, έως και μηδενικές μεταξύ κάποιων ζυγών, αποτέλεσμα το οποίο είναι ικανοποιητικό.



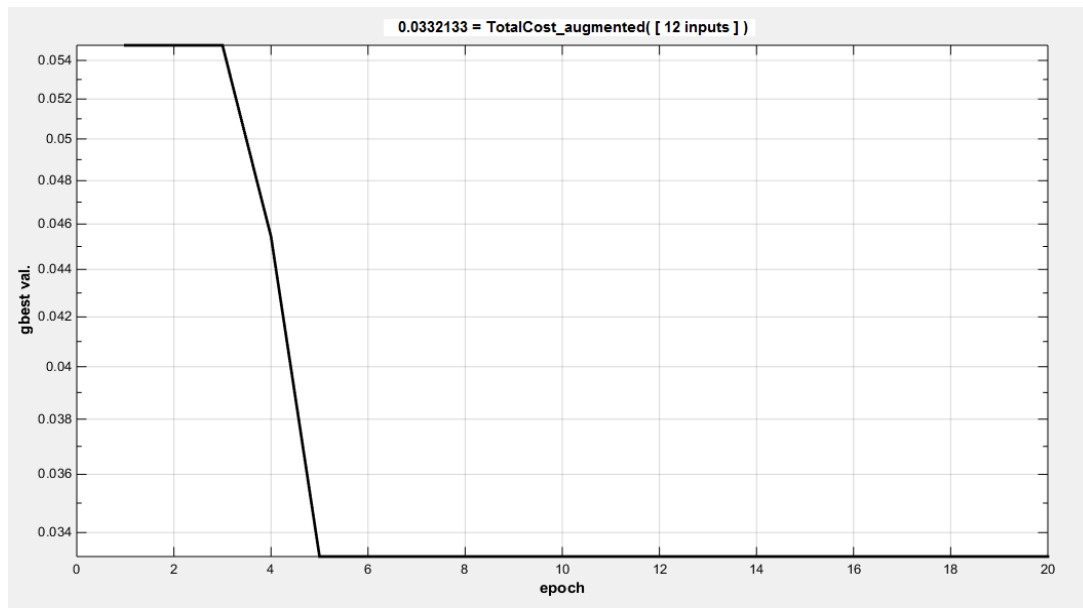
Εικόνα 5.2.1.7: Διάγραμμα Απωλειών Ενεργού Ισχύος ανά Κλάδο



Εικόνα 5.2.1.8: Διάγραμμα Απωλειών Άεργης Ισχύος ανά Κλάδο

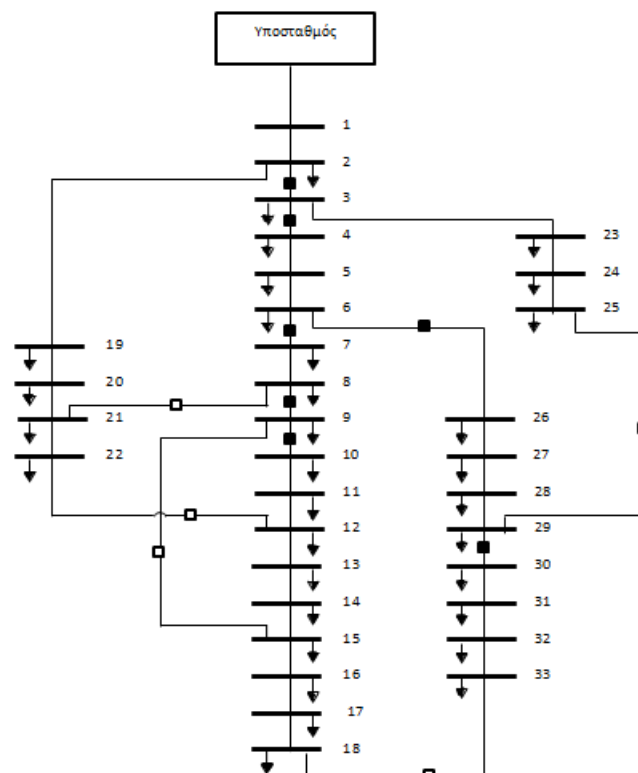
- Σενάριο 2: **P=2 MW** και **Q=0,4 MVar**. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον αλγόριθμο περιγράφονται παρακάτω.

Στην Εικόνα 5.2.1.9 παρουσιάζεται γραφικά η σύγκλιση των αποτελεσμάτων του PSO, δίνοντας ως βέλτιστη λύση της αντικειμενικής συνάρτησης την 0,0332133.



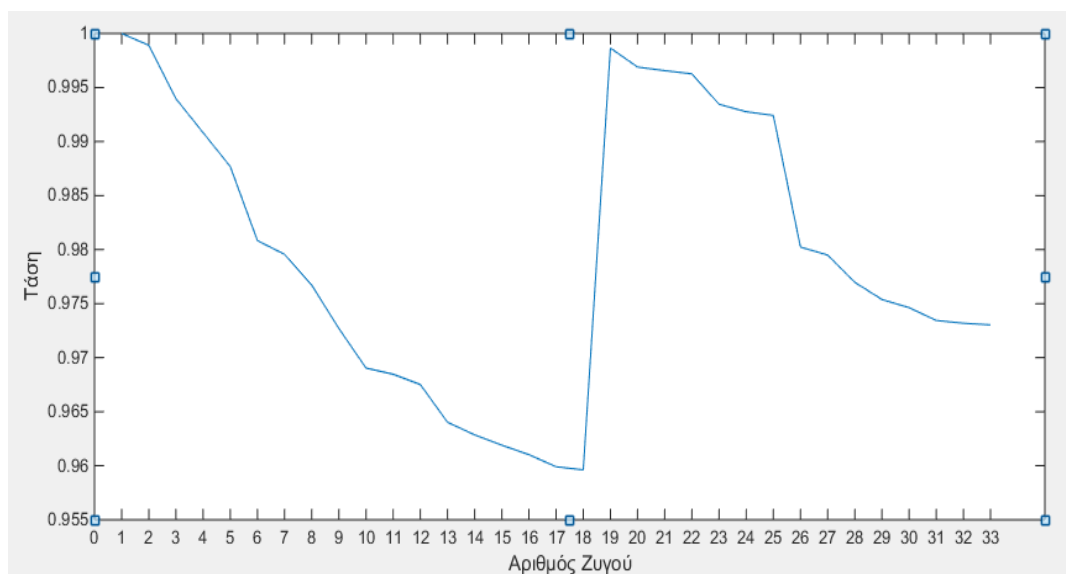
Εικόνα 5.2.1.9: Αποτελέσματα: Σύγκλιση σφάλματος PSO

Σύμφωνα με την κατάσταση των διακοπών που προέκυψε με τη χρήση του αλγορίθμου PSO διαπιστώνεται ότι και σε αυτή την περίπτωση δεν εμφανίζεται βρόχος στην τοπολογία του δικτύου, επομένως το δίκτυο διανομής διατηρείται ακτινικό, όπως φαίνεται στην εικόνα Εικόνα 5.2.1.10 .



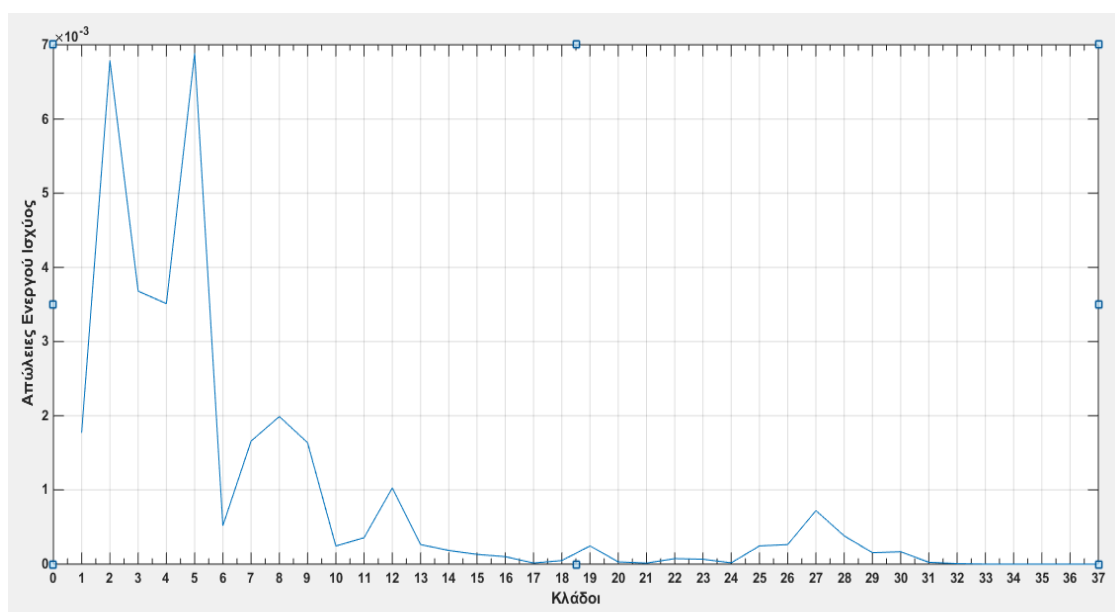
Εικόνα 5.2.1.10: Διαμόρφωση τοπολογίας δικτύου διανομής για φορτίο $P=2$ MW και $Q=0,4$ MVar.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.2.1.11 διακρίνονται οι τάσεις ανά ζυγό, οι οποίες βρίσκονται εντός των ορίων του περιορισμού, με τις τιμές δεν ξεπερνούν την τιμή 1 p.u.

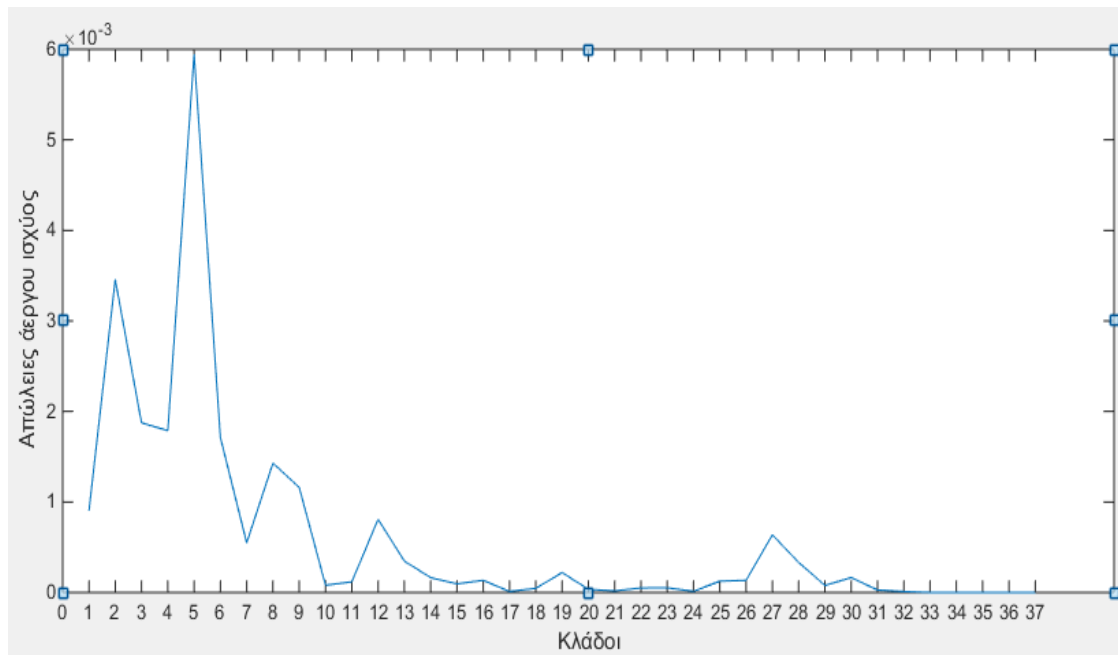


Εικόνα 5.2.1.11: Διάγραμμα Τάσεων ανά Ζυγό

Τέλος, στις Εικόνες 5.2.1.12 και 5.2.1.13 βλέπουμε τα διαγράμματα ενεργού και άεργου ισχύος οι οποίες φαίνεται να διατηρούνται χαμηλές και σε αυτή τη περίπτωση.



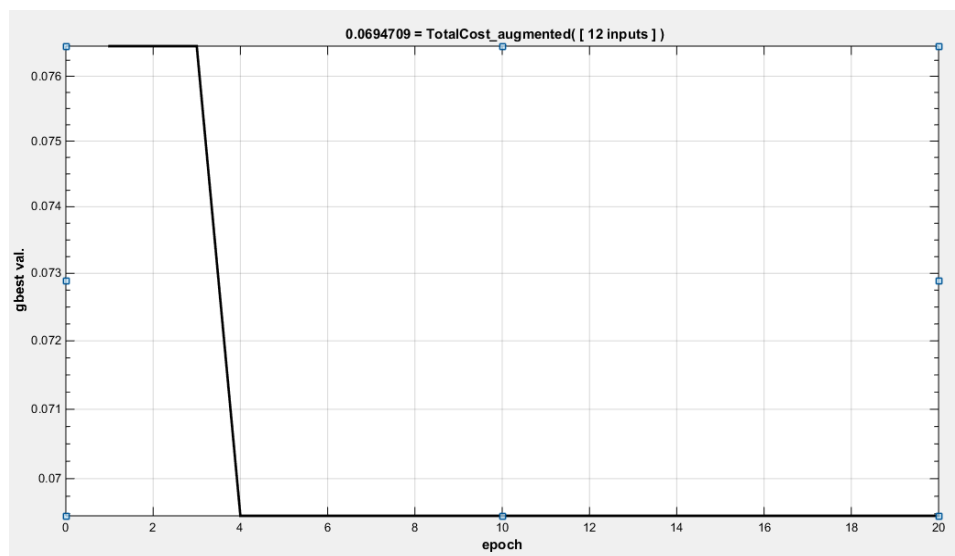
Εικόνα 5.2.1.12: Διάγραμμα Απωλειών Ενεργού Ισχύος ανά Κλάδο



Εικόνα 5.2.1.13: Διάγραμμα Απωλειών Άεργου Ισχύος ανά Κλάδο

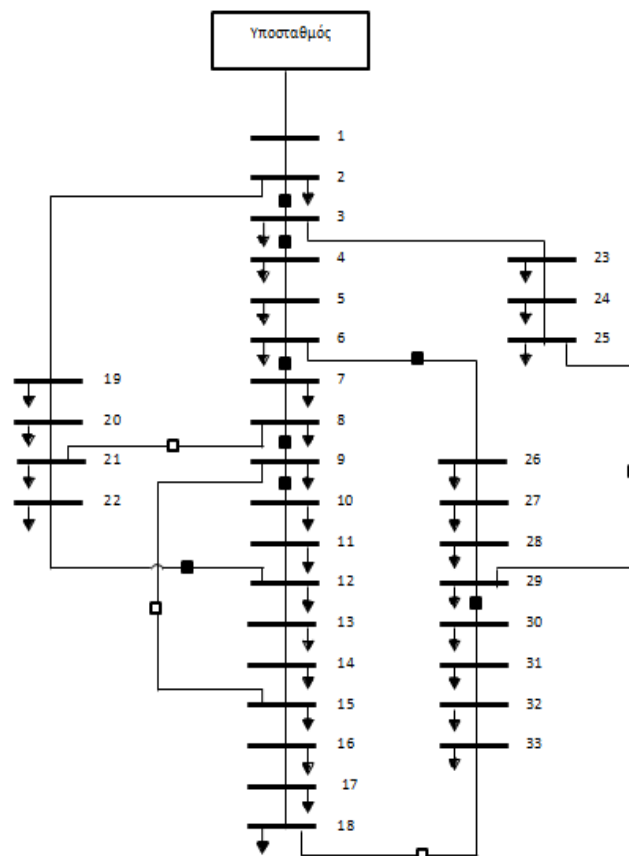
- Σενάριο 3: $P=3 \text{ MW}$ και $Q=0,6 \text{ MVar}$.

Στην Εικόνα 5.2.1.14 φαίνεται η σύγκλιση του αλγορίθμου PSO καθώς βρίσκει μία βέλτιστη λύση για το δίκτυο διανομής. Η αντικειμενική συνάρτηση έχει βέλτιστη τιμή 0,0694709 ενώ η τοπολογία που προκύπτει από τον αλγόριθμο φαίνεται στην εικόνα Εικόνα 5.2.1.15



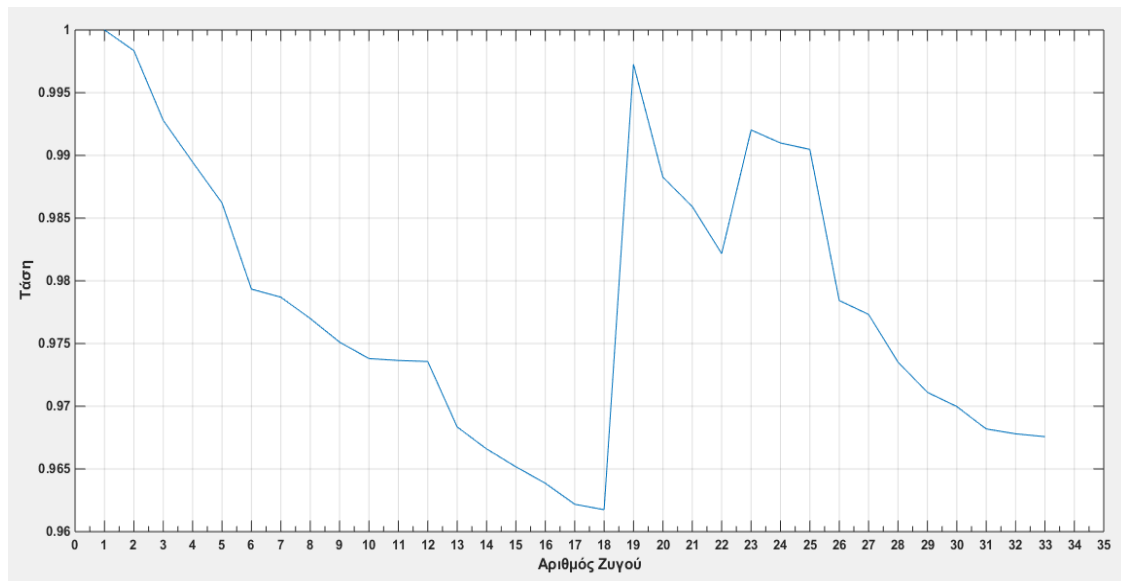
Εικόνα 5.2.1.14: Αποτελέσματα: Σύγκλιση σφάλματος PSO

Σχετικά με την τοπολογία του δικτύου, παρατηρείται ότι σε αυτό το σενάριο, προκειμένου να δοθεί το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα, ο διακόπτης της backup γραμμής 12-22 παραμένει κλειστός, με αποτέλεσμα τη δημιουργία βρόχου. Η αναγκαιότητα του δικτύου για διατήρηση των τάσεών του, οδήγησε το δίκτυο στη δημιουργία βρόχου.



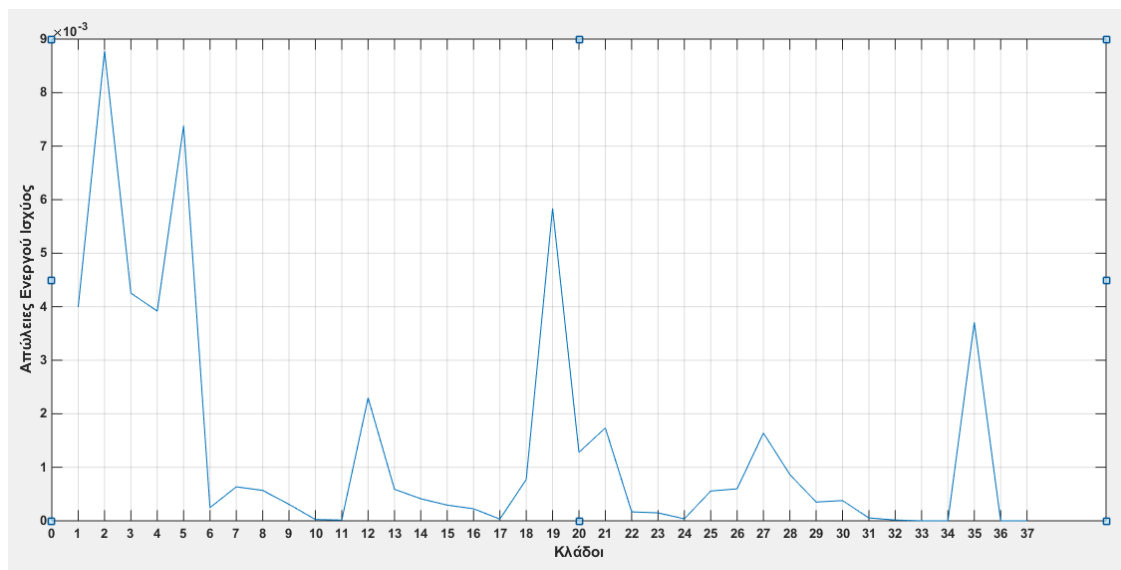
Εικόνα 5.2.1.15: Τοπολογία Δικτύου Διανομής για φορτίο $P=3 \text{ MW}$ και $Q=0,6 \text{ MVar}$.

Οι τάσεις, βρίσκονται εντός ορίων και αυτό φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 5.2.1.21, του οποίου οι τιμές δεν ξεπερνούν την τιμή 1 p.u. , επομένως βρίσκονται εντός των ορίων του περιορισμού που έχει τεθεί στο πρόβλημα.

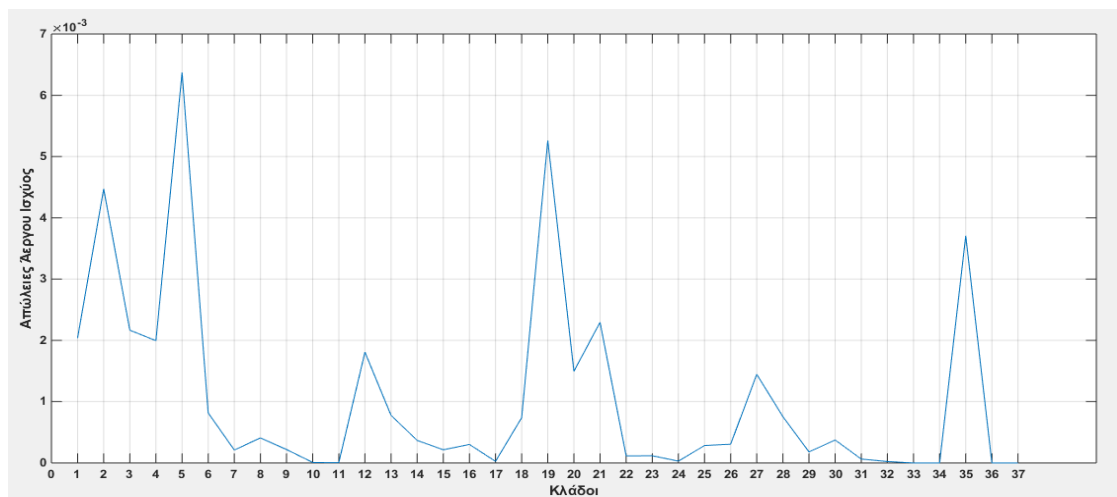


Εικόνα 5.2.1.16 Διάγραμμα Τάσης ανά Ζυγό

Στις εικόνες 5.2.1.17 και 5.2.1.18 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ενεργού και άεργου ισχύος, οι οποίες εμφανίζουν μικρή αύξηση σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο.



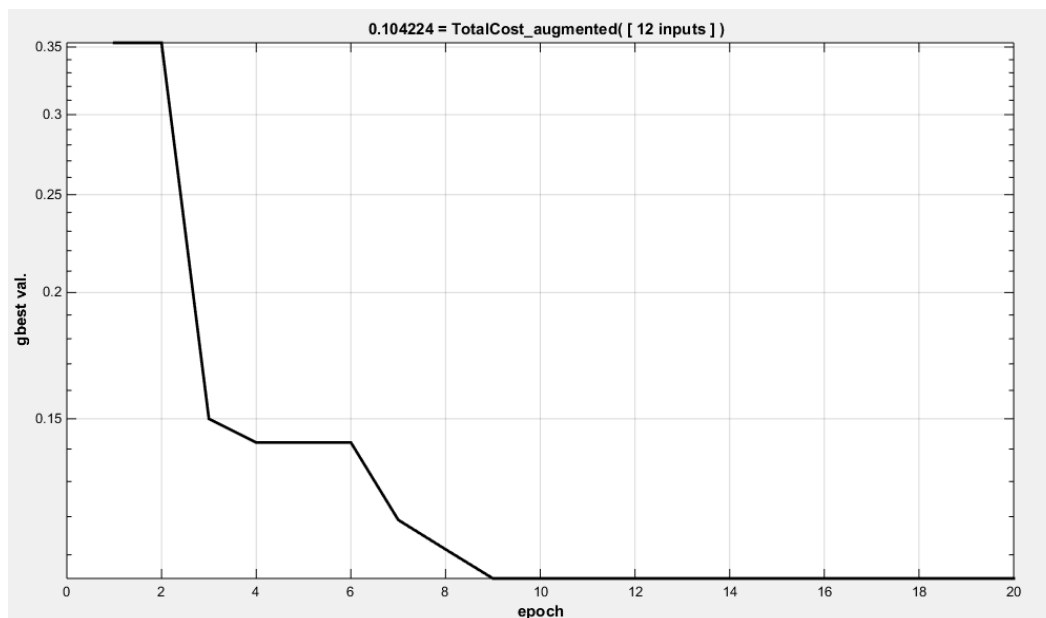
Εικόνα 5.2.1.17: Διάγραμμα Απωλειών Ενεργού Ισχύος ανά Κλάδο



Εικόνα 5.2.1.18: Διάγραμμα Απωλειών Άεργου Ισχύος ανά Κλάδο

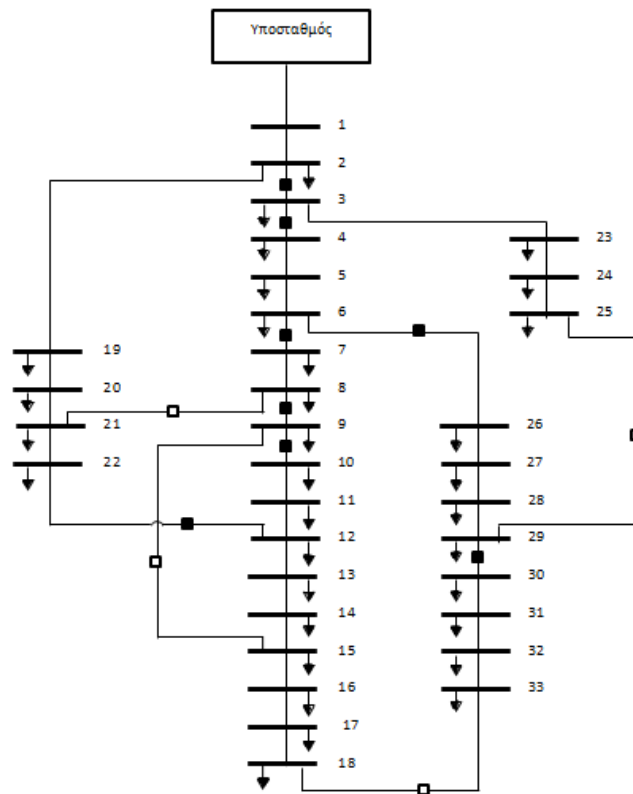
- Σενάριο 4: $P=3,5 \text{ MW}$ και $Q=0,7 \text{ MVar}$.

Στην Εικόνα 5.2.1.19, φαίνεται ότι ο αλγόριθμος PSO συγκλίνει σε βέλτιστη λύση και το βέλτιστο αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης είναι 0,104224. Από τον τρόπο με τον οποίο συγκλίνει ο αλγόριθμος, υποδεικνύεται η ύπαρξη βρόχου στο δίκτυο.



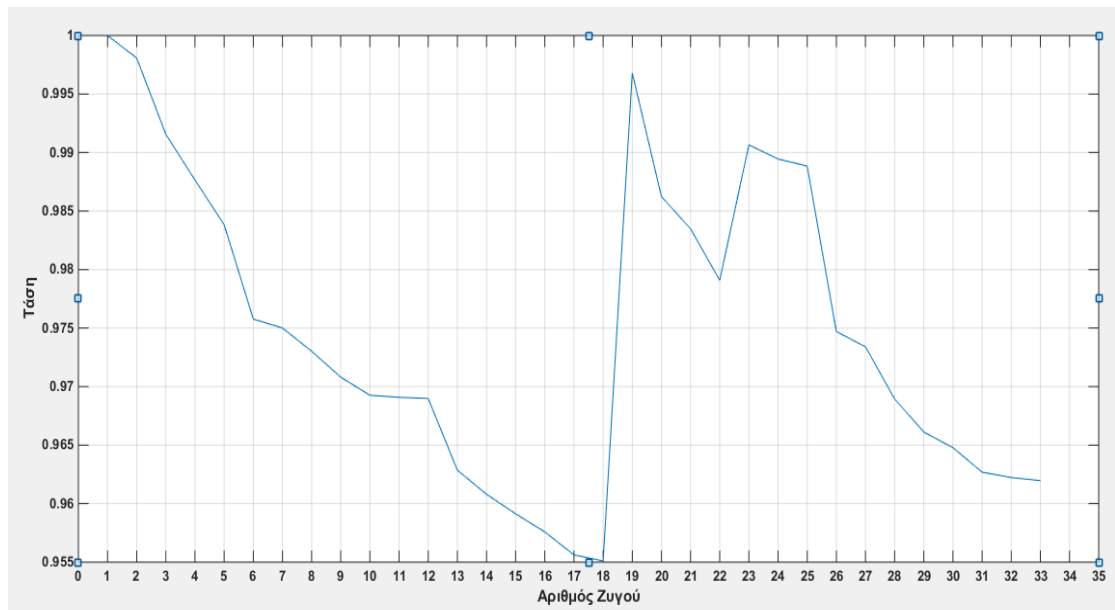
Εικόνα 5.2.1.19: Αποτελέσματα: Σύγκλιση σφάλματος PSO

Όσον αφορά στην τοπολογία του δικτύου, βασιζόμενοι στα αποτελέσματα του αλγορίθμου PSO το δίκτυο διανομής διαμορφώνεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2.1.20. Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, παρατηρείται η δημιουργία βρόχων, η οποία οφείλεται στην ανάγκη του δικτύου να μην βγουν εκτός λειτουργίας γραμμές του δικτύου.



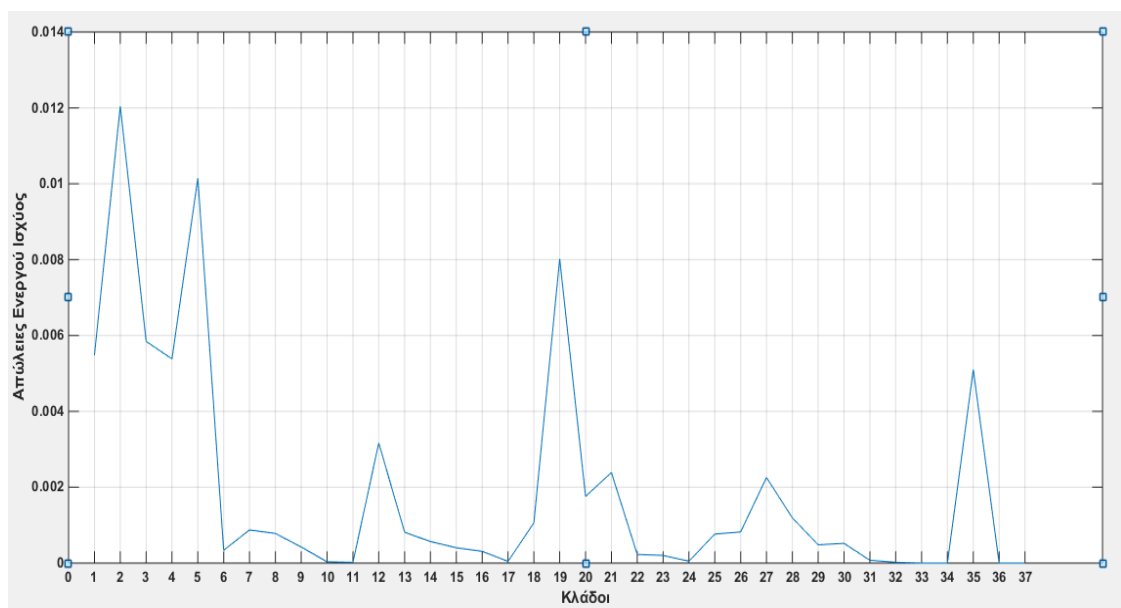
Εικόνα 5.2.1.20: Τοπολογία Δικτύου Διανομής για φορτίο $P=3,5$ MW και $Q = 0,7$ MVar

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.2.1.21 που ακολουθεί, φαίνονται οι τάσεις που προκύπτουν για τη συγκεκριμένη δοκιμή φορτίου στο δίκτυο διανομής. Και σε αυτή τη δοκιμή, οι τιμές της τάσεις διατηρούνται εντός ορίων.

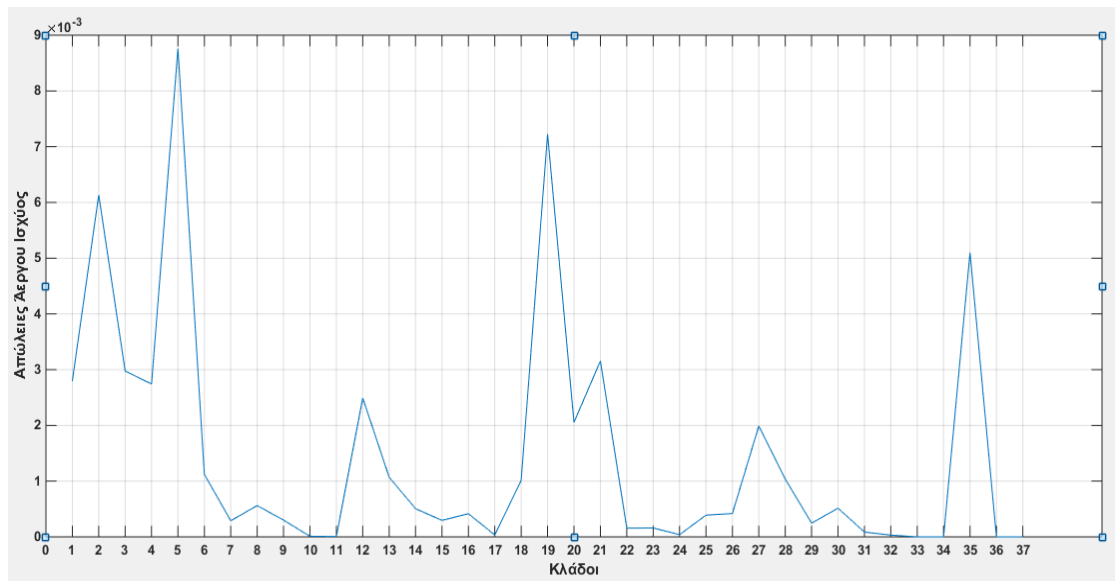


Εικόνα 5.2.1.21: Διάγραμμα Τάσης ανά Ζυγό

Τέλος, παρουσιάζονται οι απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε κλάδο του συστήματος, οι οποίες παρουσιάζονται μειωμένες σε σχέση με την προηγούμενη εφαρμογή.



Εικόνα 5.2.1.22: Διάγραμμα Απωλειών Ενεργού Ενέργειας ανά Κλάδο



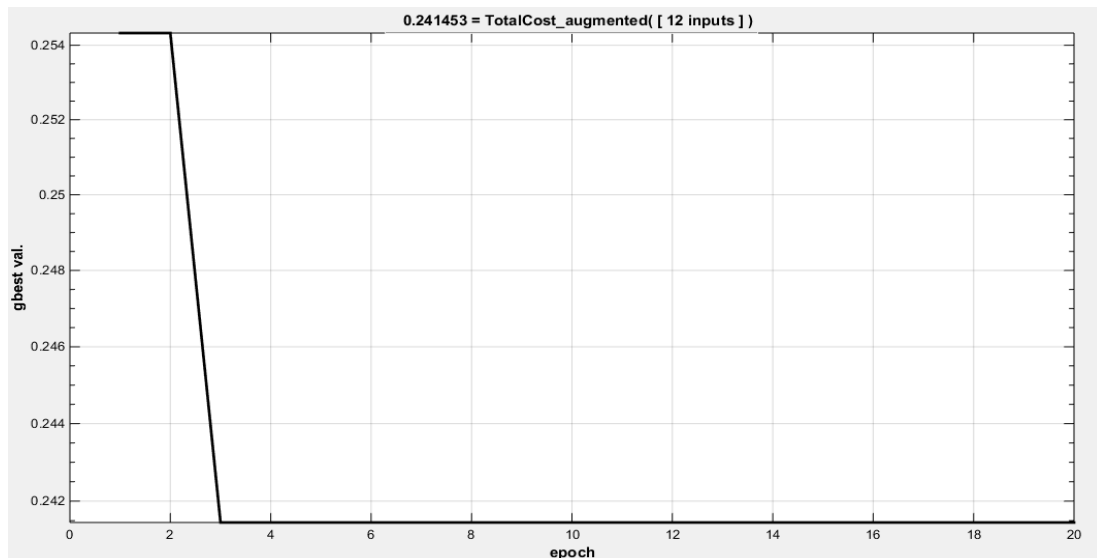
Εικόνα 5.2.1.23: Διάγραμμα Απωλειών Άεργου Ισχύος ανά Κλάδο

5.2.2 Αποτελέσματα 2^{ης} εφαρμογής: Υψηλό φορτίο

Σε αυτή την δοκιμή θα εφαρμοστούν τιμές που θεωρούνται υψηλές σε ένα δίκτυο διανομής ώστε να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο ανταποκρίνεται ο αλγόριθμος και το δίκτυο κάτω από αυτές τις συνθήκες.

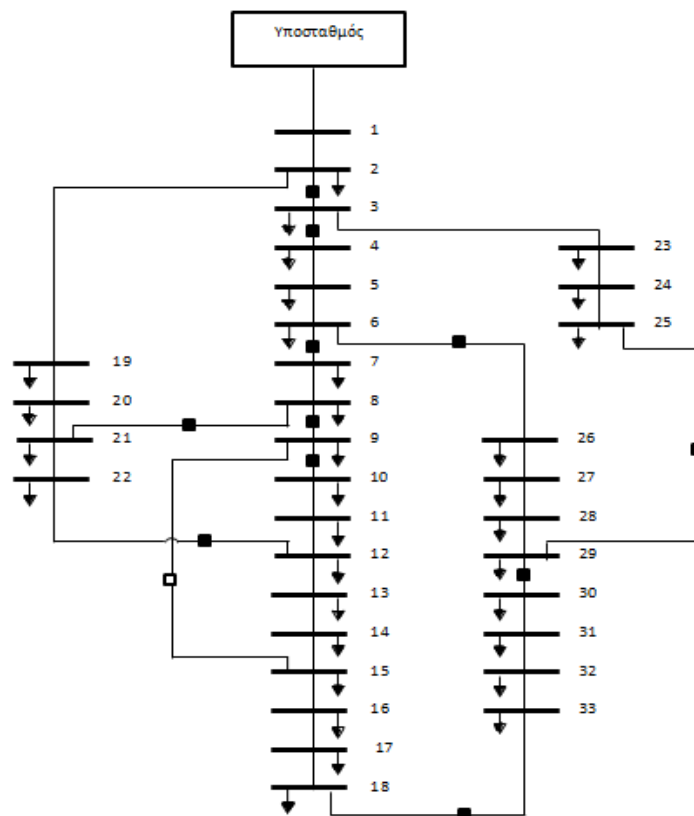
- Σενάριο 5: **P=4 MW** και **Q=0,8 MVar**.

Στην επόμενη εικόνα δίνεται η σύγκλιση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου PSO και η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης 0,241453. Η μορφή του διαγράμματος υποδεικνύει ότι υπάρχει κάποια αστοχία στο δίκτυο διανομής.



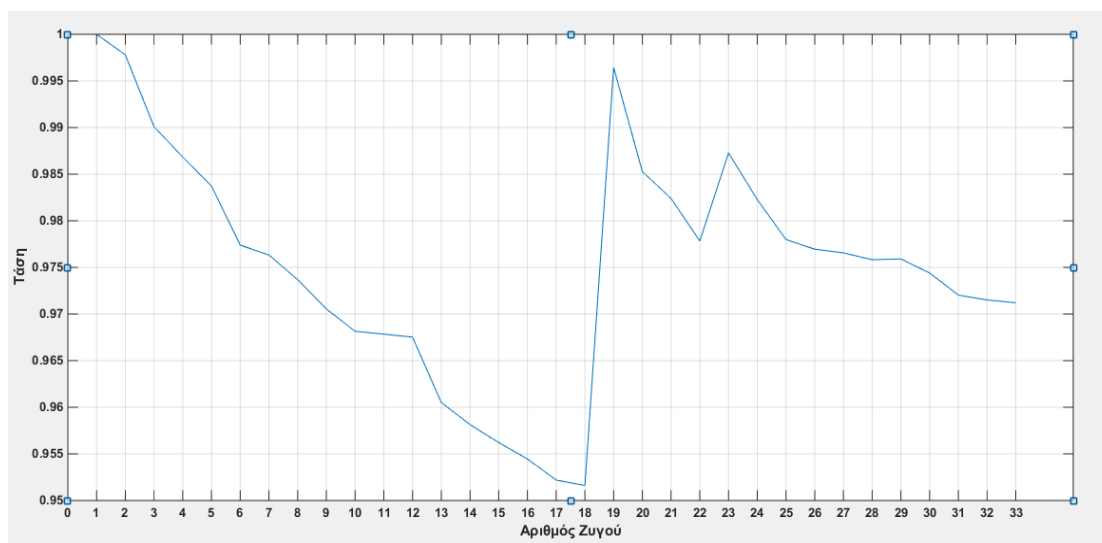
Εικόνα 5.2.2.1: Αποτελέσματα: Σύγκλιση σφάλματος PSO

Το φορτίο που τέθηκε σε αυτό το σενάριο στο δίκτυο είναι αρκετά υψηλό και για να αποδώσει το βέλτιστο αποτέλεσμα δημιούργησε βρόχους στο δίκτυο διανομής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου PSO, οι βρόχοι δημιουργήθηκαν διατηρώντας τους διακόπτες στις γραμμές 8-21, 12-22, 18-33 και 25-29 κλειστούς. Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει τη ροή του φορτίου προς τους ζυγούς του δικτύου. Η ακριβής απεικόνισή του δίνεται στην επομένη εικόνα.



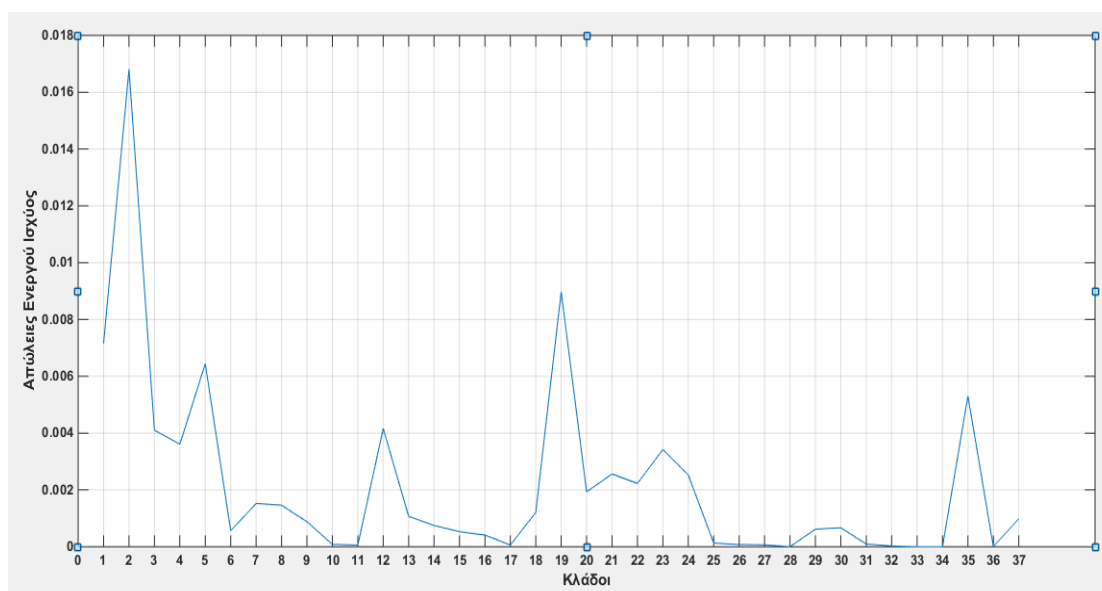
Εικόνα 5.2.2.2: Τοπολογία Δικτύου Διανομής για φορτίο $P=4$ MW και $Q=0,8$ MVar

Παρά το υψηλό φορτίο, οι τάσεις παραμένουν εντός ορίων σε όλο το δίκτυο διανομής, αλλά μειωμένες σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο. (Εικόνα 5.2.2.3).

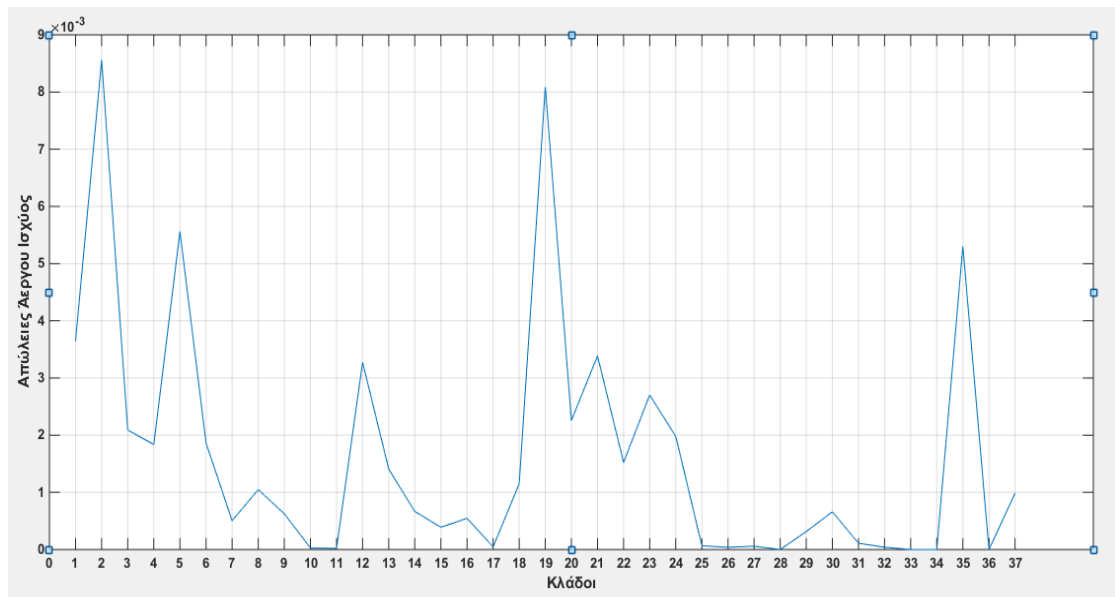


Εικόνα 5.2.2.3: Διάγραμμα Τάσεων ανά Ζυγό

Τέλος, απεικονίζονται διαγραμματικά οι απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος του συστήματος στις Εικόνες 5.2.2.4 και 5.2.2.5, οι οποίες φαίνονται αυξημένες σε σχέση με τις προηγούμενες εφαρμογές.



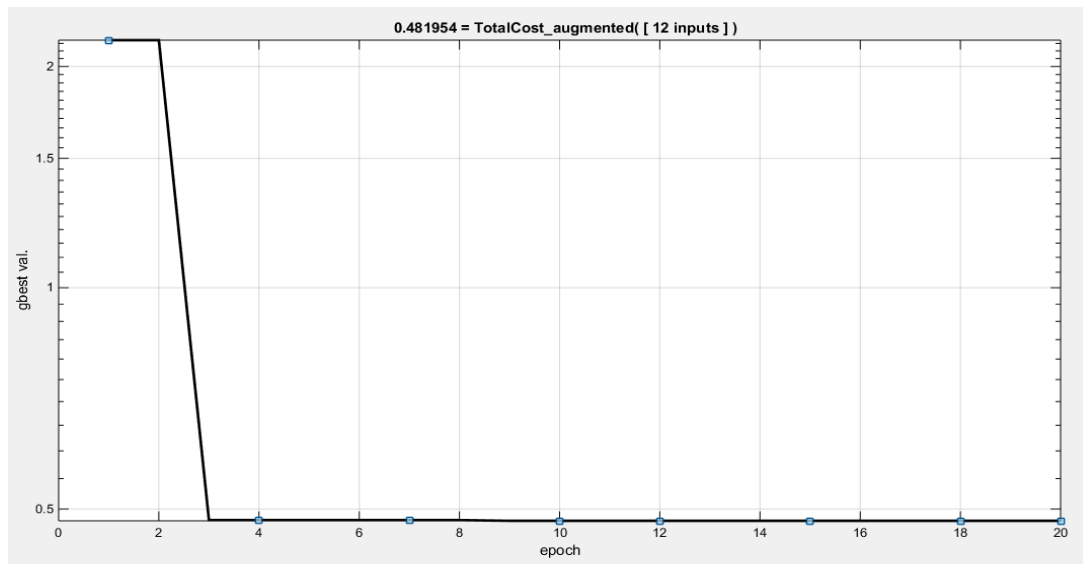
Εικόνα 5.2.2.4: Διάγραμμα Απωλειών Ενεργού Ισχύος ανά Κλάδο



Εικόνα 5.2.2.5: Διάγραμμα Απωλειών Άεργου Ισχύος ανά Κλάδο

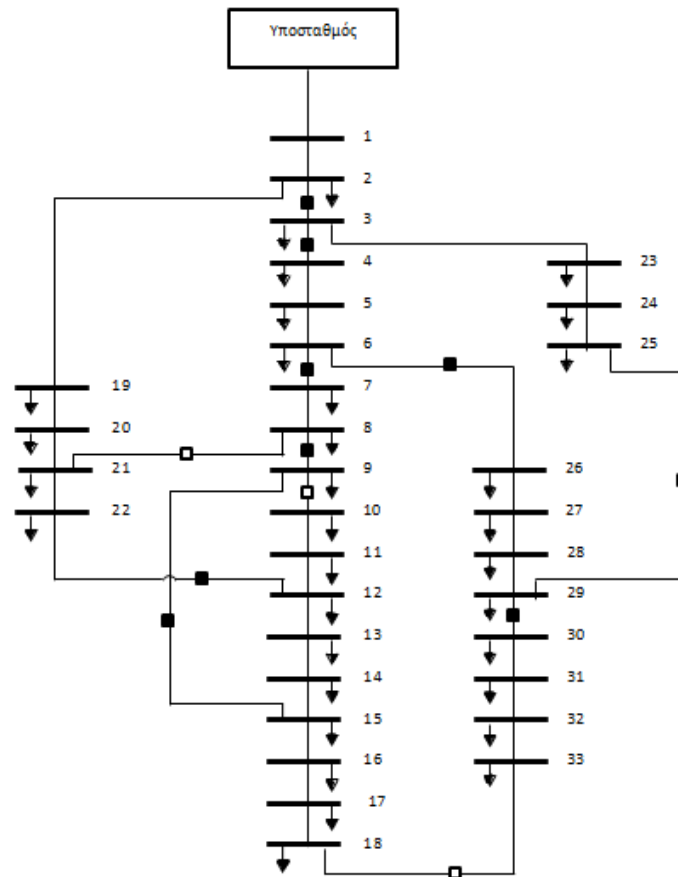
- Σενάριο 6: **P=5 MW** και **Q= 1 MVar**.

Στην επόμενη εικόνα δίνεται η σύγκλιση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου PSO. Η βέλτιστη τιμή που δίνεται για την αντικειμενική συνάρτηση σε αυτή την περίπτωση είναι 0,463171.



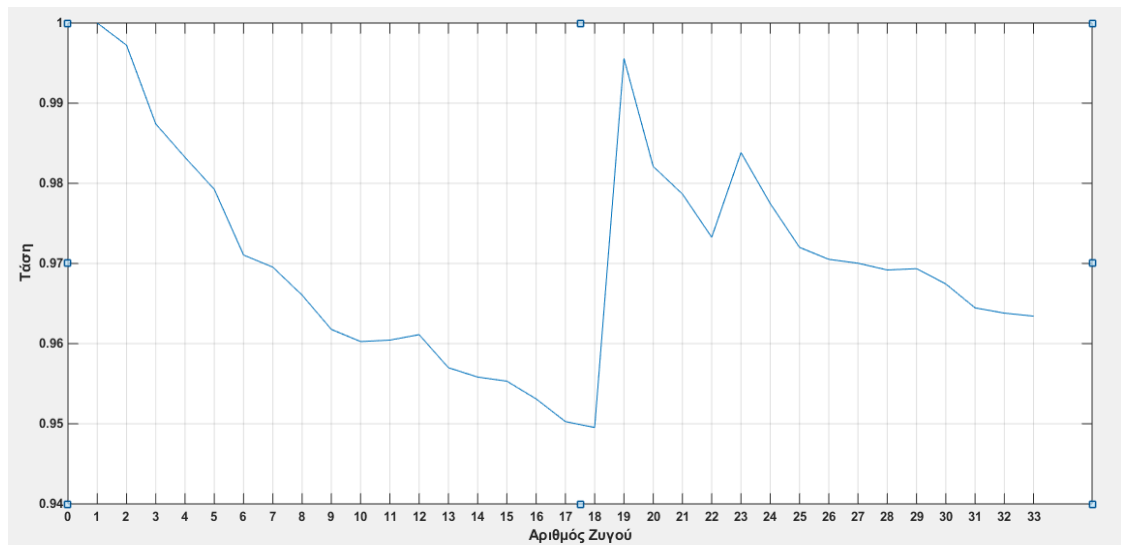
Εικόνα 5.2.2.6: Αποτελέσματα: Σύγκλιση σφάλματος PSO

Και αυτό το φορτίο που τέθηκε στο δίκτυο διανομής στη συγκεκριμένη δοκιμή είναι αρκετά υψηλό. Προκειμένου να αποδώσει το βέλτιστο αποτέλεσμα δημιουργήθηκαν βρόχοι. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου PSO, οι βρόχοι δημιουργήθηκαν κλείνοντας τους διακόπτες στις backup γραμμές 9-15, 12-22 και 25-29, γεγονός που κάνει τη μεταφορά της ροής του φορτίου προς τους ζυγούς του δικτύου πιο περίπλοκη, αλλά καθίσταται απαραίτητο για να κρατήσει την τάση στο δίκτυο. Η εικόνα του δικτύου διανομής που προκύπτει δίνεται παρακάτω.



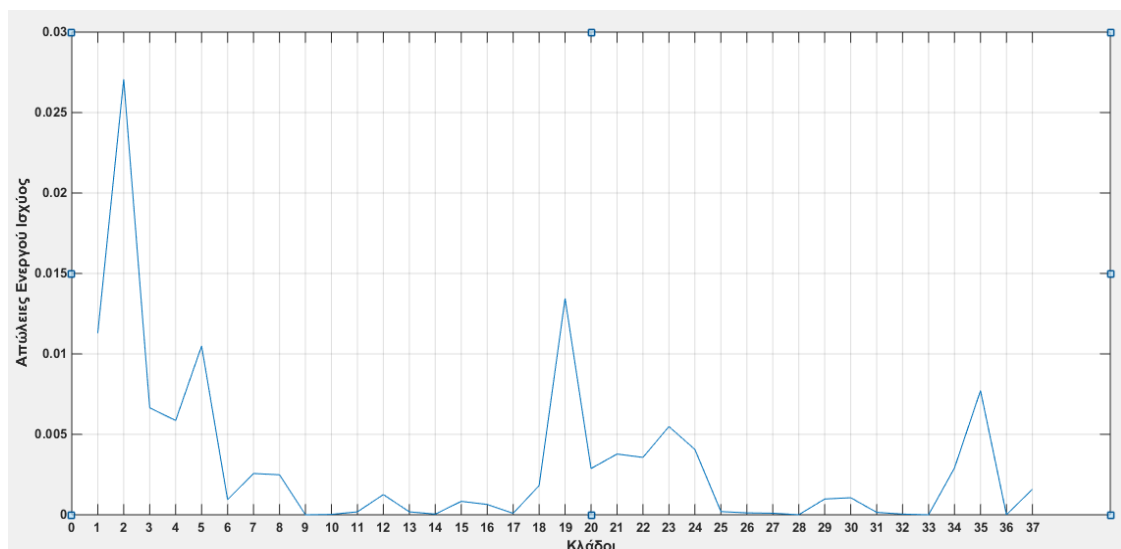
Εικόνα 5.2.2.7: Τοπολογία Δικτύου Διανομής για φορτίο $P=5 \text{ MW}$ και $Q=1 \text{ MVar}$.

Όμοια με την προηγούμενη δοκιμή με υψηλή φόρτιση, παρατηρείται ότι οι τάσεις παραμένουν εντός των περιοριστικών ορίων, χωρίς καμία να ξεπερνά τις τιμές 0,95p.u. και 1,05p.u. Παρόλα αυτά είναι χαμηλότερη σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια, το οποίο δηλώνει ότι το δίκτυο αρχίζει να λειτουργεί υπό πίεση. (Εικόνα 5.2.2.8)

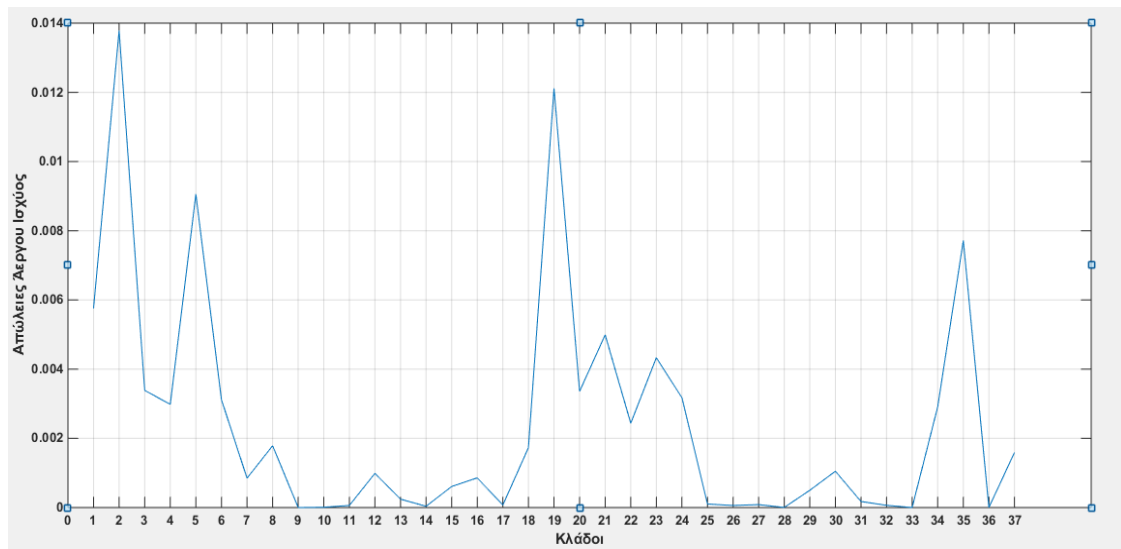


Εικόνα 5.2.2.8: Διάγραμμα Τάσης ανά Ζυγό

Τέλος, παρουσιάζονται οι απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος των ζυγών του συστήματος, υποψηλότερες σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια. (Εικόνες 5.2.2.8 και 5.2.2.9)



Εικόνα 5.2.2.9: Διάγραμμα Απωλειών Ενεργού Ισχύος ανά Κλάδο



Εικόνα 5.2.2.10: Διάγραμμα Απωλειών Άεργου Ισχύος ανά Κλάδο

5.2.3 Αποτελέσματα 3ης δοκιμής: Σφάλμα σε γραμμή

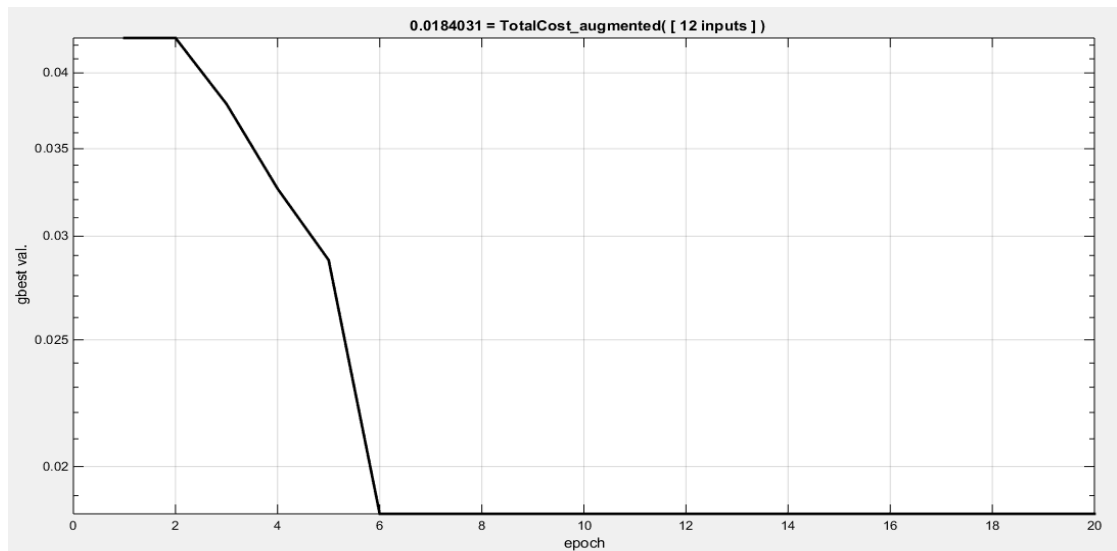
- Περίπτωση σφάλματος στην κεντρική γραμμή 9-10

Σενάριο 7:

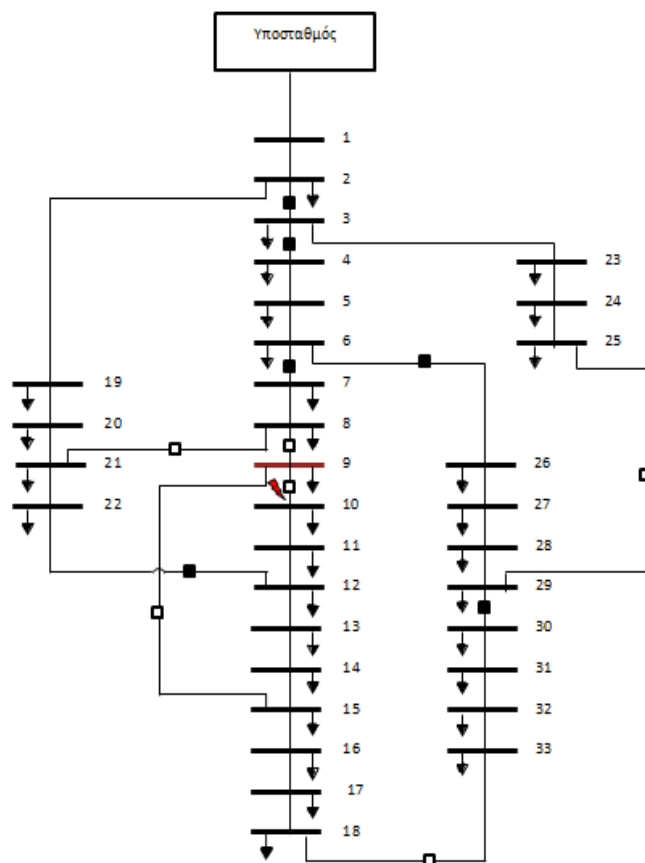
Σε περίπτωση σφάλματος στη γραμμή που συνδέει τους ζυγούς 9 και 10, ο διακόπτης της γραμμής 9-10 ανοίγει αυτόματα, ώστε να απομονωθεί το σφάλμα. Θα εφαρμόσουμε φορτία $P=1,5 \text{ MW}$ και $Q=0,3 \text{ MVar}$, με το οποίο όπως είδαμε στην πρώτη εφαρμογή της πρώτης δοκιμής, η απόδοση και η λειτουργία του δικτύου ήταν ικανοποιητική.

Σε κανονικές συνθήκες, δηλαδή σε ένα δίκτυο χωρίς τη χρήση back up γραμμών, ένα τέτοιο σφάλμα θα άφηνε χωρίς τροφοδοσία τους ζυγούς 9,10,11,12,13,14,15,16,17 και 18.

Για το λόγο, σε αυτή την περίπτωση γίνεται προσπάθεια αποκατάστασης της ροής του δικτύου μέσω των back up γραμμών. Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο PSO στο δίκτυο και κοιτάζοντας την Εικόνα 5.2.3.1, υπάρχει βέλτιστη λύση η οποία μπορεί να επαναφέρει τη ροή του δικτύου. Παίρνοντας τα αποτελέσματα της κατάστασης των διακοπών από τον αλγόριθμο, παίρνουμε την τοπολογία του δικτύου. Η αποκατάσταση του δικτύου επιτυγχάνεται κρατώντας τον διακόπτη s_9 κλειστό. Με αυτό τον τρόπο η ροή αποκαθίσταται σε όλο το δίκτυο, αφήνοντας, όμως, εκτός λειτουργίας τον καταναλωτή 9, ο οποίος δεν εξυπηρετείται, όπως φαίνεται στο δίκτυο Εικόνα 5.2.3.2. Με κόκκινο χρώμα έχει σημειωθεί ο ζυγός του οποίου το φορτίο δεν τροφοδοτείται.

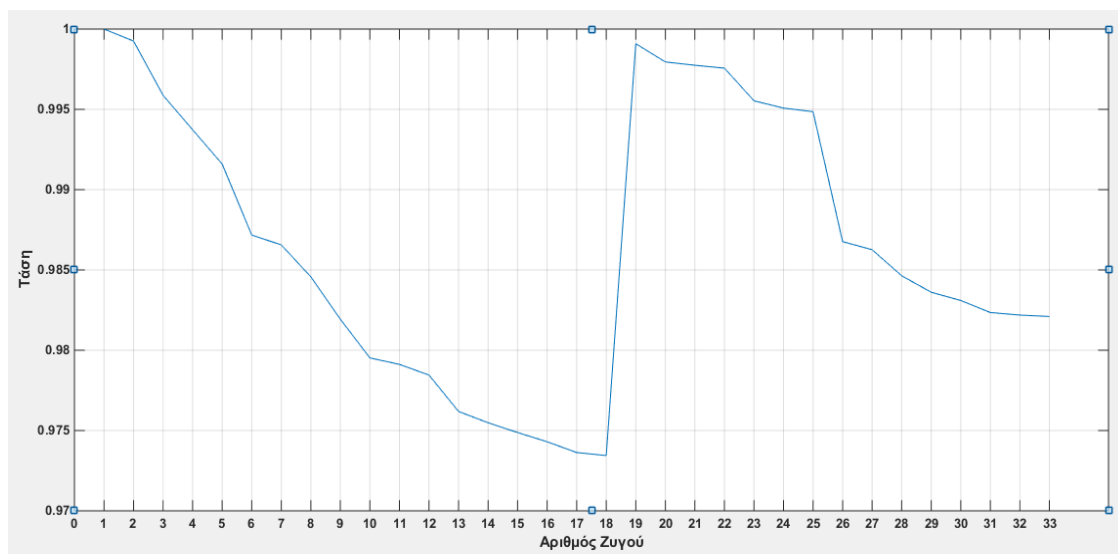


Εικόνα 5.2.3.1: Αποτελέσματα: Σύγκλιση σφάλματος PSO



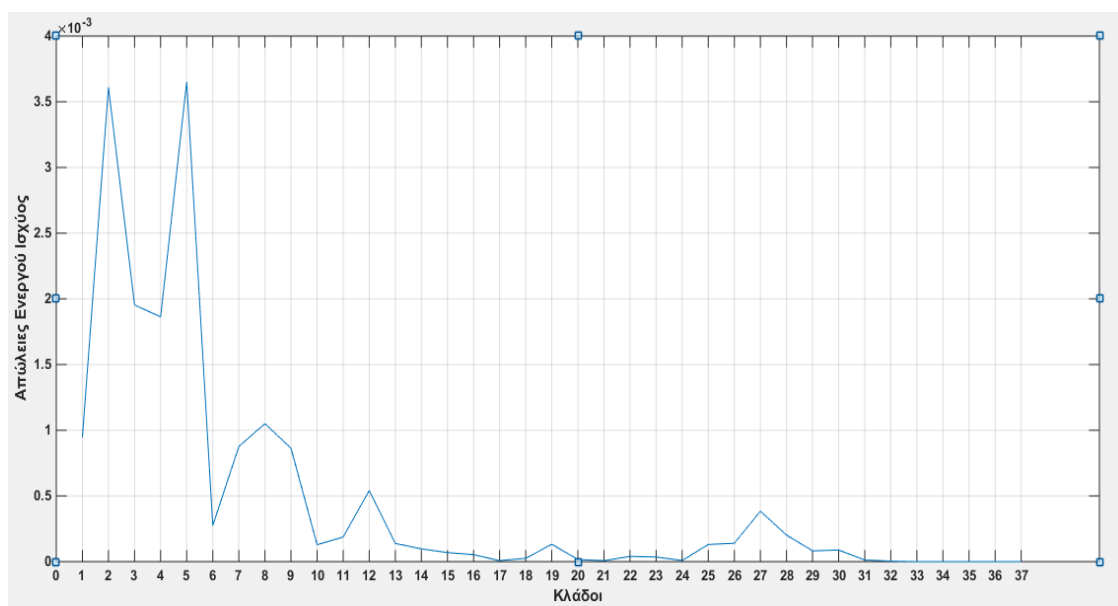
Εικόνα 5.2.3.2: Τοπολογία δικτύου διανομής 33 ζυγών για φορτίο $P=1,5$ MW και $Q=0,3$ MVar μετά την εμφάνιση σφάλματος στη γραμμή 9-10

Παρά το σφάλμα σε κεντρική γραμμή του δικτύου, οι τιμές της τάσης φαίνεται να είναι εντός ορίων (Εικόνα 5.2.3.3):

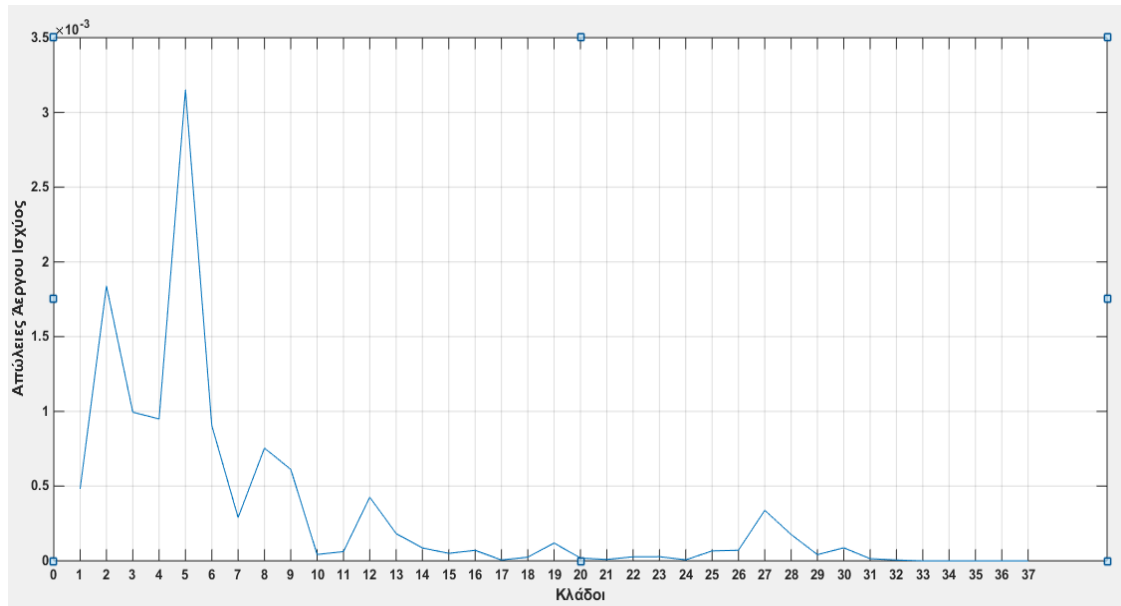


Εικόνα 5.2.3.3: Διάγραμμα Τάσης ανά Ζυγό

Τέλος, οι απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος που προκύπτουν από αυτό το σύστημα φαίνονται στις Εικόνες 5.2.3.5 και 5.2.3.6:



Εικόνα 5.2.3.5: Διάγραμμα Απωλειών Ενεργού Ισχύος ανά Κλάδο



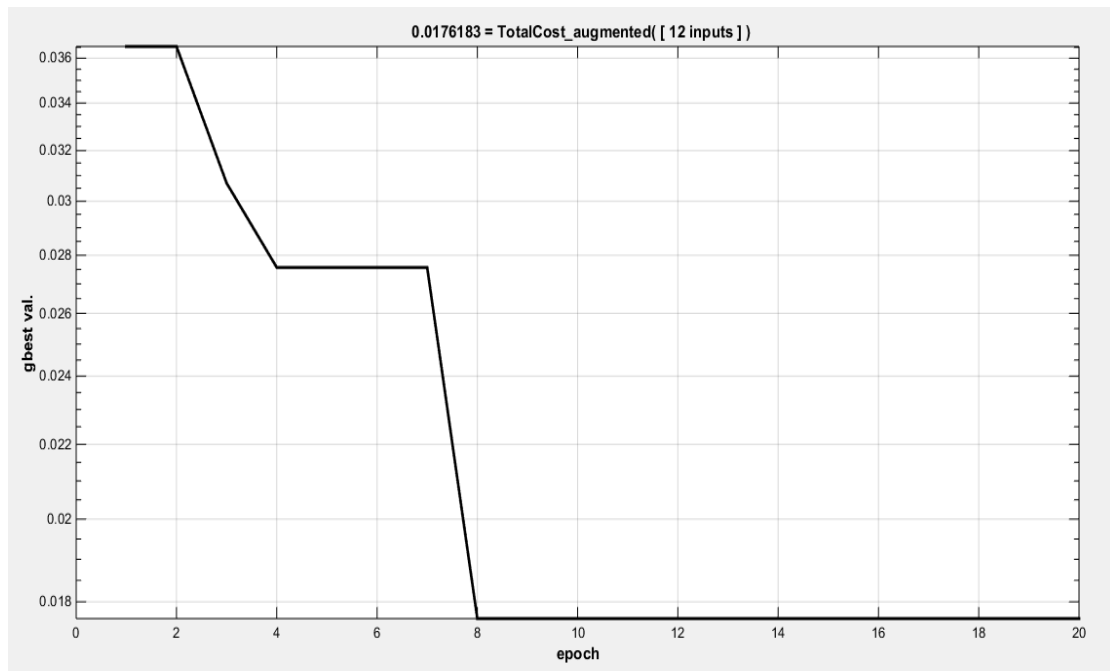
Εικόνα 5.2.3.6: Διάγραμμα Απωλειών Άεργου Ισχύος ανά Κλάδο

Σενάριο 8: Το παραπάνω πρόβλημα που προέκυψε στην αναδιαμόρφωση του δικτύου διανομής, οφείλεται στο γεγονός ότι δεν έχει συμπεριληφθεί στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος η συνθήκη που αφορά στην μέγιστη τροφοδοσία του δικτύου. Προκειμένου να επιλυθεί αυτό, προστίθεται ένας επιπλέον περιορισμός. Σε περίπτωση που το διάνυσμα της τάσης δίνει τιμή η οποία δεν ορίζεται, υπάρχει ένας επιπλέον όρος ποινής, το `new_voltage_penalty`, ο οποίος αυξάνεται, με αποτέλεσμα να απορρίπτει τη λύση αυτή και να συνεχίζεται η αναζήτηση μιας βέλτιστης.

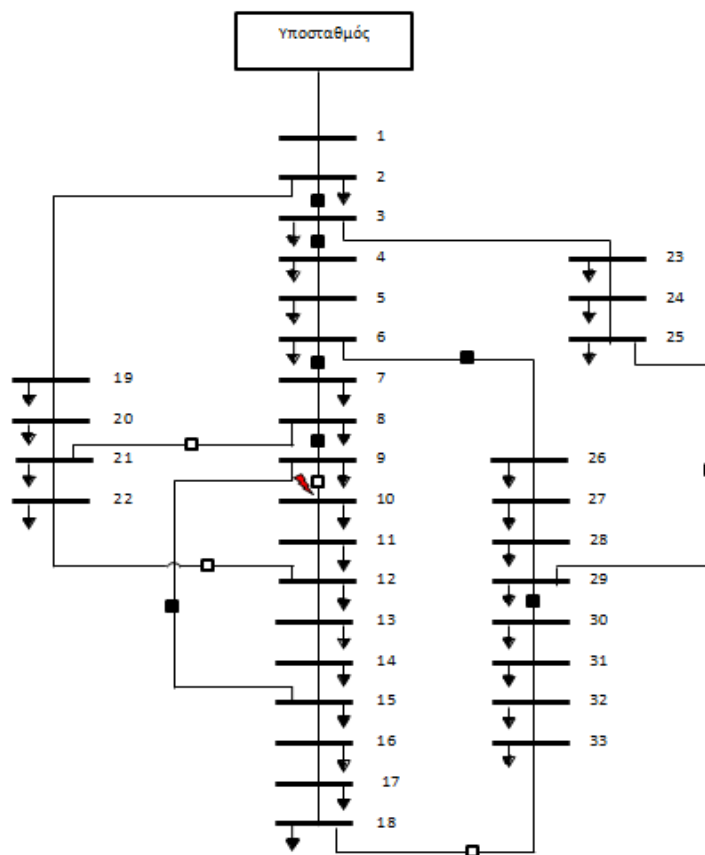
$$Voltage \neq NaN$$

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν στο δίκτυο διανομής μετά την εφαρμογή του κριτηρίου μέγιστης τροφοδοσίας. Όπως φαίνεται παρακάτω, η γραμμή 8-9 πλέον διαρρέεται από φορτίο, καθώς ο διακόπτης s_8 της γραμμής 9-15 είναι κλειστός και η ροή αποκαθίσταται.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκλιση του αλγορίθμου PSO φαίνονται στο διάγραμμα 5.2.3.7:

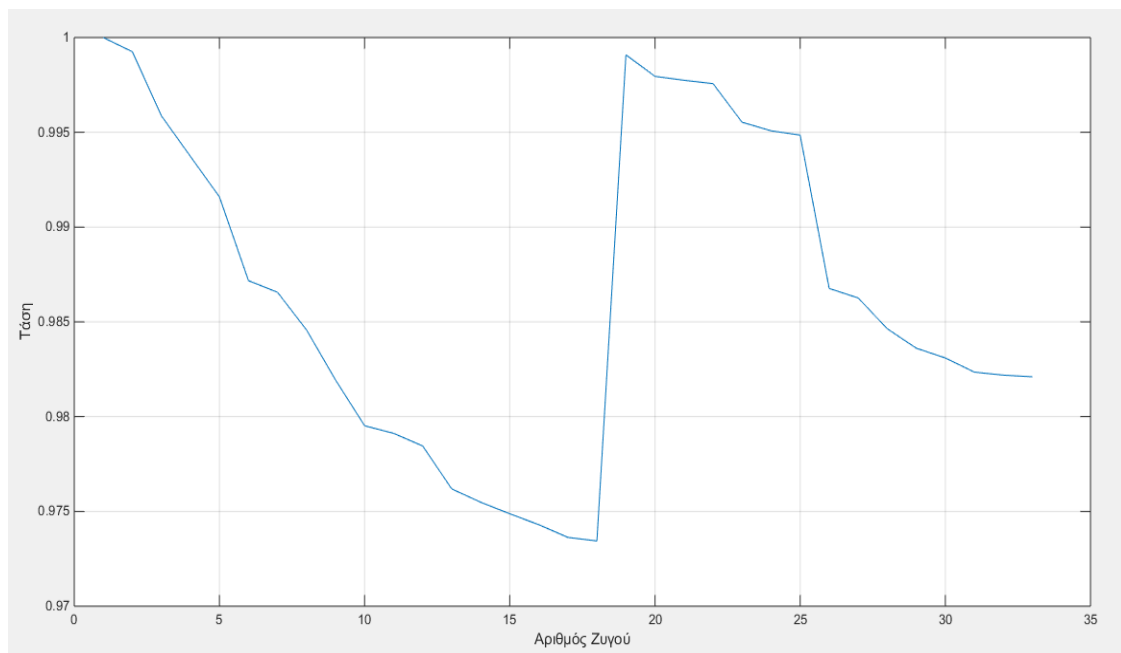


Εικόνα 5.2.3.7: Αποτελέσματα: Σύγκλιση σφάλματος PSO



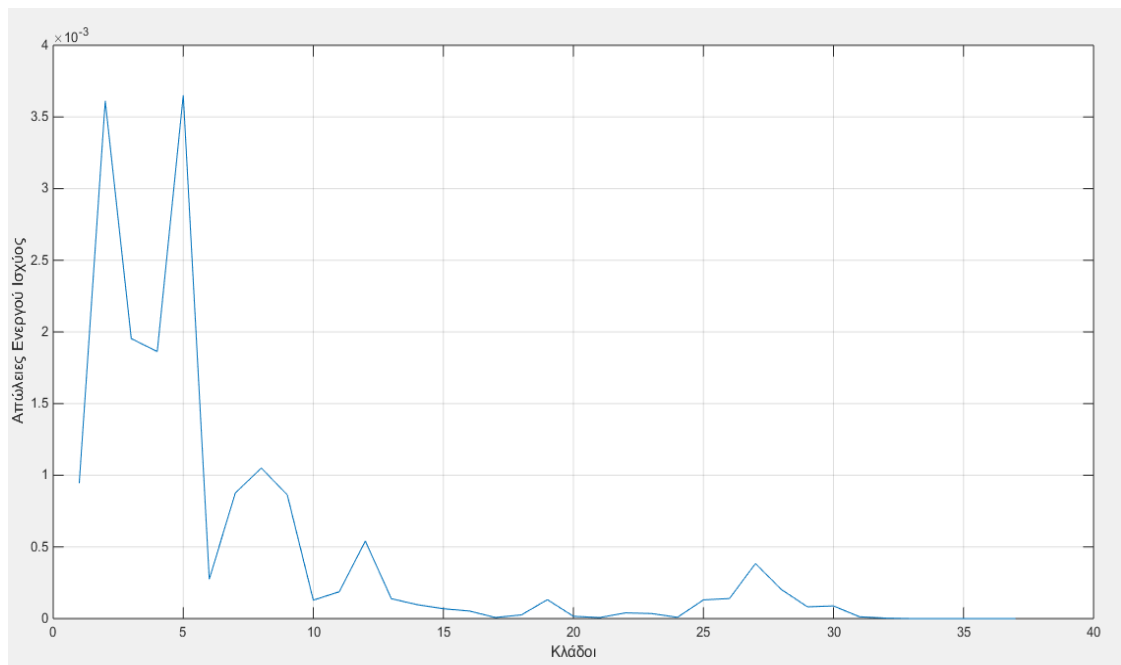
Εικόνα 5.2.3.8: Τοπολογία δικτύου διανομής 33 ζυγών για φορτίο $P=1,5$ MW και $Q=0,3$ MVar μετά την επιδιόρθωση του σφάλματος στη γραμμή 9-10

Οι τιμές της τάσης διατηρούνται εντός ορίων όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2.3.9.

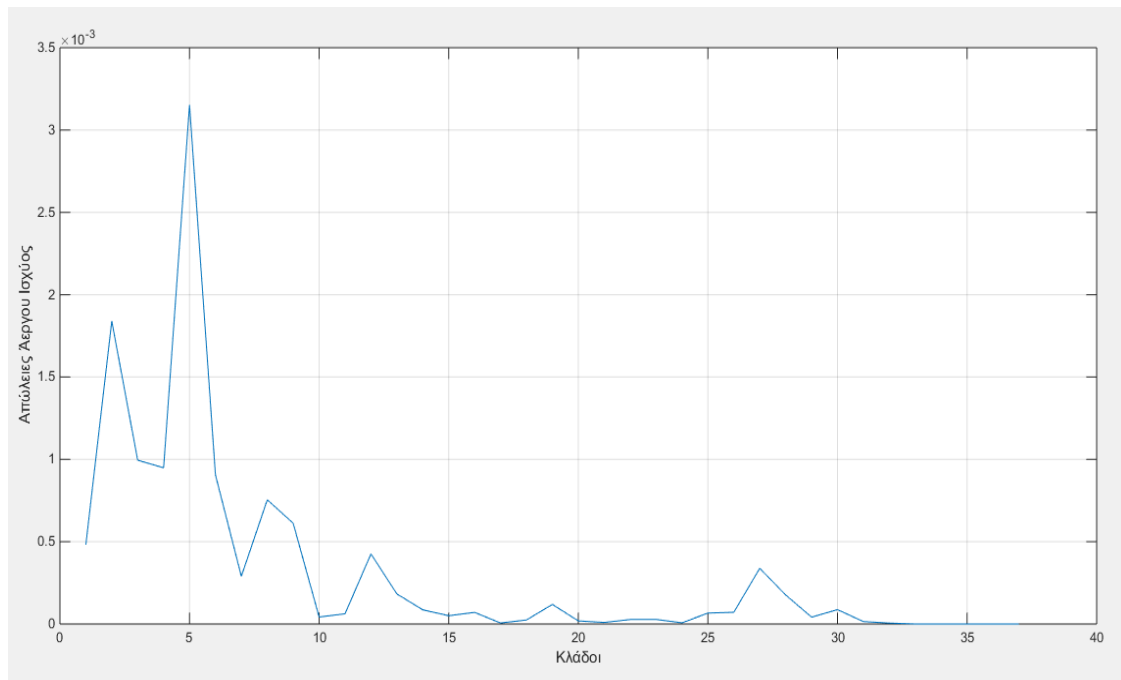


Εικόνα 5.2.3.9: Διάγραμμα τάσης ανά ζυγό

Τέλος, οι απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος που προκύπτουν από αυτό το σύστημα φαίνονται στις εικόνες 5.2.3.10 και 5.2.3.11:



Εικόνα 5.2.3.10: Διάγραμμα Ενεργού Ισχύος ανά Κλάδο



Εικόνα 5.2.3.11: Διάγραμμα Άεργου Ισχύος ανά Κλάδο

5.3 Σύνοψη και σύγκριση αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό σχολιάζονται οι εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν στο δίκτυο διανομής και παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 με σκοπό τη βέλτιστη αναδιάταξη της τοπολογίας του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας 33 ζυγών που παρουσιάστηκε αρχικά, οι οποίες υλοποιήθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB, με τη χρήση του λογισμικού MATPOWER και του αλγορίθμου PSO, ελέγχοντας κάθε φορά την αρτιότητα της λειτουργίας του σε διαφορετικές καταστάσεις.

5.3.1 Χαμηλό φορτίο

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της πρώτης εφαρμογής, δηλαδή της εφαρμογής διαφορετικών φορτίων ενεργού και άνεργου ισχύος στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας 33 ζυγών. Ξεκινώντας, έγινε δοκιμή με φορτία τα οποία κυμαίνονταν σε κανονικά πλαίσια για ένα δίκτυο διανομής. Παρόλα αυτά, αυτό δεν καθιστά αδύνατη την εμφάνιση να εμφανιστούν σφάλματων, είτε σε κάποια γραμμή, είτε σε κάποιο ζυγό.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα για τις πρώτες δύο δοκιμές που έγιναν, η πρώτη με φορτίο $P=1,5 \text{ MW}$ και $Q=0,3 \text{ MVar}$ και η δεύτερη με φορτίο $P=2 \text{ MW}$ και $Q=0,4 \text{ MVar}$,

φαίνεται ότι δε δημιουργούν σφάλματα και το δίκτυο διανομής λειτουργεί ομαλά, ικανοποιώντας όλους τους καταναλωτές.

Αντιθέτως, στις επόμενες δύο δοκιμές, το φορτίο των οποίων είναι ελαφρώς αυξημένο, παρατηρείται ότι υπάρχουν μικρά σφάλματα κατά τη λειτουργία του δικτύου, και συγκεκριμένα στην τοπολογία του, καθώς δημιουργούνται βρόχοι.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, τόσο για τη δοκιμή με φορτίο $P=0,3$ MW και $Q=0,6$ MVar, όσο και για τη δοκιμή με $P=3,5$ MW και $Q=0,7$ MVar, είναι εμφανές ότι υπάρχει σφάλμα στην τοπολογία, καθώς έχει δημιουργηθεί βρόχος στο δίκτυο κάτι το οποίο περιπλέκει τη ροή του ηλεκτρικού φορτίου προς τους καταναλωτές, τόσο όσον αφορά στον χρόνο παράδοσης του φορτίου στους καταναλωτές, όσο και στην οικονομική λειτουργία του δικτύου. Και στις δύο περιπτώσεις η δημιουργία βρόχου εμφανίζεται στη γραμμή 12-22, δηλαδή στον διακόπτη s_9 ο οποίος κλείνει.

Όσον αφορά στις απώλειες, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το εφαρμοζόμενο φορτίο, τόσο αυξάνονται και οι απώλειες του δικτύου. Η αύξηση των απωλειών είναι συνάρτηση των σφαλμάτων που εντοπίζονται στο δίκτυο.

5.3.2 Υψηλό φορτίο

Ως απόρροια των προηγούμενων εφαρμογών και παρατηρώντας ότι όσο το φορτίο της ενεργού ισχύος αυξάνεται, τόσο εμφανίζονται σφάλματα στη λειτουργία του δικτύου διανομής, έγινε εφαρμογή άλλων δύο δοκιμών, με φορτία υψηλότερα από τα προηγούμενα, οι τιμές των οποίων είναι αρκετά υψηλές για ένα δίκτυο διανομής, με σκοπό να παρατηρηθούν τα σφάλματα που θα εμφανιστούν αλλά και ο τρόπος με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί η αποκατάστασή τους στο δίκτυο.

Οι εφαρμογές έγιναν με φορτία $P=4$ MW, $Q=0,8$ MVar και $P=5$ MW, $Q=1$ MVar. Τόσο στην πρώτη περίπτωση όσο και στη δεύτερη, παρουσιάστηκαν σφάλματα στην τοπολογία του δικτύου δημιουργώντας 3 βρόχους αντίστοιχα σε κάθε εφαρμογή. Εκτός από το πρόβλημα που προέκυψε στην επαναδιαμόρφωση του δικτύου, αξίζει να σημειωθεί ότι και οι απώλειες του δικτύου αυξάνονται σημαντικά καθώς αυξάνονται τα φορτία που εφαρμόζονται.

5.3.3 Σφάλμα σε γραμμή

Τέλος, στο μοντέλο 33 ζυγών που εξετάζεται δοκιμάστηκε η λειτουργία του δημιουργώντας σφάλμα σε μία γραμμή κεντρικής ροής του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε το σφάλμα στην κεντρική γραμμή 9-10.

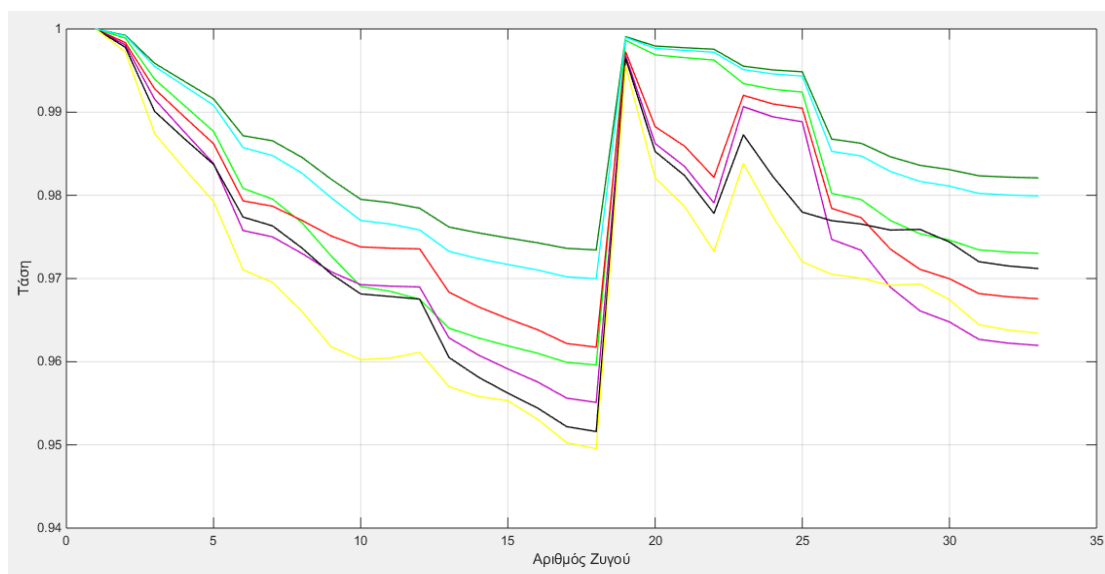
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση σφάλματος σε μία από τις κεντρικές γραμμές του δικτύου μπορεί να δημιουργηθούν αδυναμίες στη

λειτουργία του, καθώς, όπως φαίνεται, η ροή του φορτίου δεν έχει αποκατασταθεί πλήρως σε όλο το δίκτυο. Το φορτίο στη γραμμή 8-9 απορρίπτεται και ο καταναλωτής στον ζυγό 9 δεν ικανοποιούν το φορτίο τους. Επομένως, στην περίπτωση αυτή δεν είναι δυνατό να ικανοποιηθεί ο πρωταρχικός στόχος της επαναδιαμόρφωσης για την αποκατάσταση της λειτουργίας. Για τη βελτίωση αυτού του σφάλματος, εφαρμόστηκε το κριτήριο της μέγιστης τροφοδοσίας, με το οποίο το σφάλμα εξαλείφεται και η ροή του φορτίου πλέον εξυπηρετεί όλους τους καταναλωτές χωρίς προβλήματα, ενεργοποιώντας τον διακόπτη s_9 της back up γραμμής 12-22. Η τάση παρουσιάζεται μειωμένη, ενώ και οι απώλειες δε διαφέρουν ιδιαίτερα.

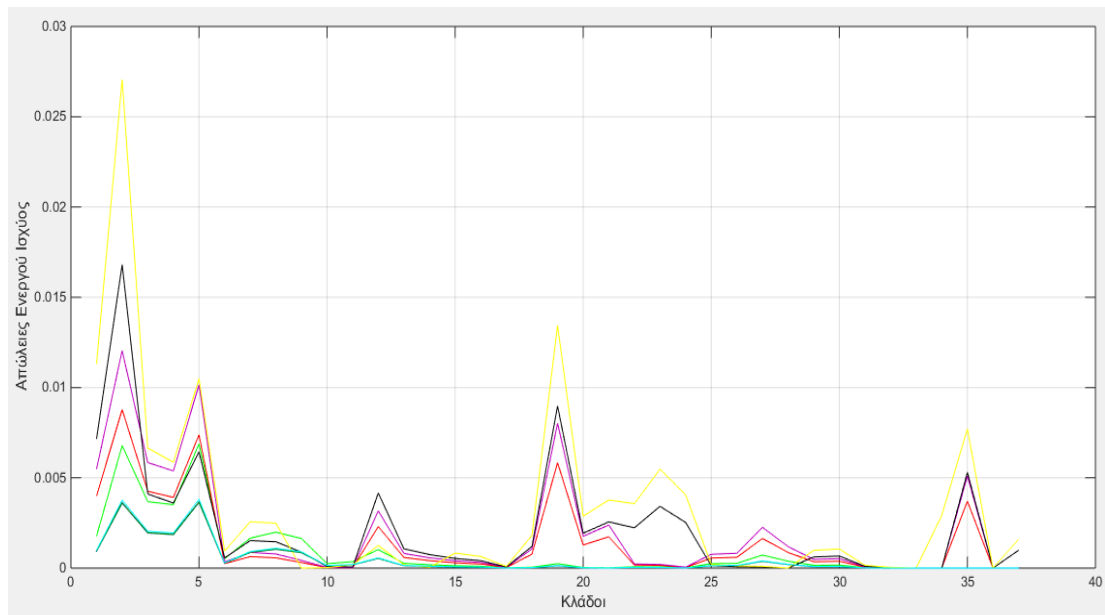
5.3.4 Συγκεντρωτικά διαγράμματα τάσεων και ενεργού και άεργου ισχύος

Τα αποτελέσματα όλων δοκιμών συνοψίζονται στα κάτωθι συγκεντρωτικά διαγράμματα τάσεων, ενεργού και άεργου ισχύος. Κάθε δοκιμή συμβολίζεται με ένα χρώμα σε κάθε διάγραμμα αντίστοιχα ως εξής:

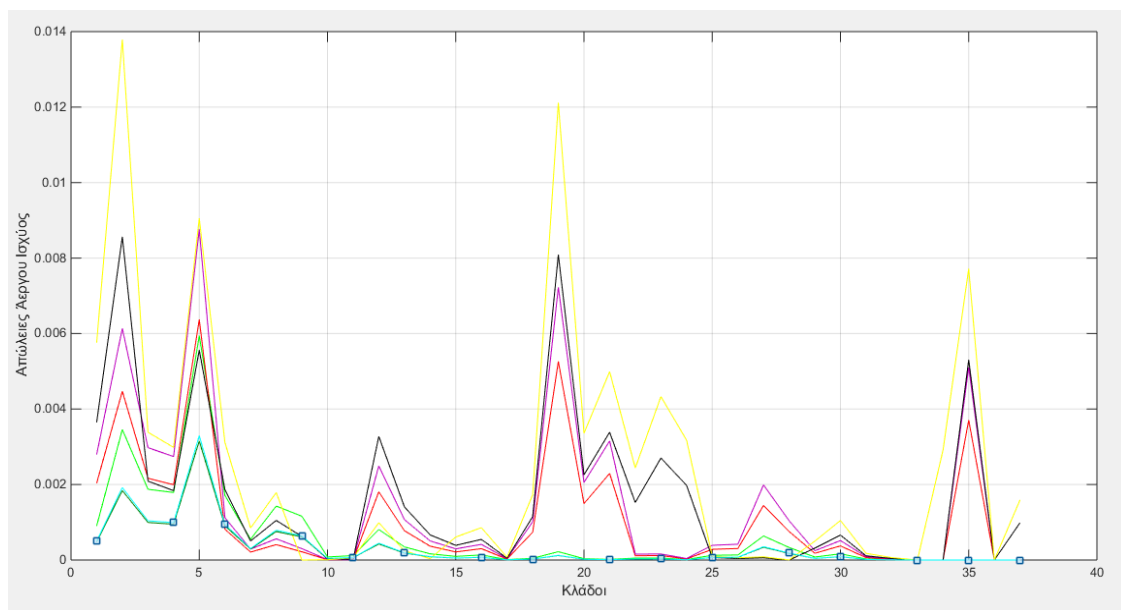
- Εφαρμογή φορτίου $P=1,5$ MW και $Q=0,3$ MVar : μπλε γραμμή
- Εφαρμογή φορτίου $P=2$ MW και $Q=0,4$ MVar: πράσινη γραμμή
- Εφαρμογή φορτίου $P=3$ MW και $Q=0,6$ MVar: κόκκινη γραμμή
- Εφαρμογή φορτίου $P=3,5$ MW και $Q=0,7$ MVar: μωβ γραμμή
- Εφαρμογή φορτίου $P=4$ MW και $Q=0,8$ MVar: μαύρη γραμμή
- Εφαρμογή φορτίου $P=5$ MW και $Q=1$ MVar: κίτρινη γραμμή,
- Εφαρμογή φορτίου σε δίκτυο με σφάλμα στη γραμμή 9-10: σκούρο πράσινο
- Εφαρμογή για αποκατάσταση του σφάλματος στη γραμμή 9-10 για ίδιο φορτίο συμβολίζεται: γαλάζια γραμμή.



Εικόνα 5.3.4.1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσεων για όλες τις εφαρμογές φορτίου στο δίκτυο διανομής



Εικόνα 5.3.4.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ενεργού ισχύος για όλες τις εφαρμογές φορτίου στο δίκτυο διανομής



Εικόνα 5.3.4.3: Συγκεντρωτικό διάγραμμα άεργου ισχύος για όλες τις εφαρμογές φορτίου στο δίκτυο διανομής

Κοιτώντας τα παραπάνω διαγράμματα, είναι εμφανές ότι καθώς το εφαρμοζόμενο φορτίο αυξάνεται, η τάση του δικτύου διανομής μειώνεται, ενώ οι απώλειες παρουσιάζουν αύξηση. Κατά την εφαρμογή υψηλότερων φορτίων η διαφορά γίνεται πλέον αισθητή. Κατά τη δημιουργία σφάλματος γραμμής οι απώλειες παραμένουν χαμηλές, ενώ οι τάσεις είναι αυξημένες.

Στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα 5.3.4.4 παρουσιάζονται τα ποσοστά των απωλειών ισχύος, οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των τάσεων, καθώς και οι βρόχοι για κάθε σενάριο.

	Απώλειες %	Τάση max	Τάση min	Βρόχοι
Σενάριο 1	1,2%	1	0,9734	0
Σενάριο 2	2,1%	1	0,9596	0
Σενάριο 3	2,7%	1	0,9617	1
Σενάριο 4	3,2%	1	0,9551	1
Σενάριο 5	3,1%	1	0,9516	3
Σενάριο 6	5,1%	1	0,9495	3
Σενάριο 7	1,3%	1	0,9734	1
Σενάριο 8	1,3%	1	0,9700	1

Εικόνα 5.3.4.4: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

- Είναι πλέον εμφανές ότι κατά την εφαρμογή χαμηλών φορτίων ο αλγόριθμος αποδίδει καλύτερα, καθώς διατηρεί την τάση του δικτύου σε υψηλά επίπεδα.
- Το δίκτυο δημιουργεί βρόχους όταν το φορτίο είναι αυξημένο. Το δίκτυο προσπαθεί κρατήσει την τάση υψηλή, γι' αυτό χρησιμοποιεί back up γραμμές για την αποκατάστασή του.
- Η δημιουργία βρόχων οδηγεί στην αύξηση των απωλειών ενεργού και άεργου ισχύος του δικτύου.

5.4 Σύνοψη της Εργασίας και Γενικά Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης αναδιάταξης της τοπολογίας δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Για να επιτευχθεί αυτό, τοποθετήθηκαν διακόπτες με σκοπό την αναζήτηση της βέλτιστης κατάστασής τους, ώστε να οδηγήσουν σε ομαλή κατάσταση λειτουργίας. Η εργασία πραγματοποιήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB, με τη βοήθεια του λογισμικού MATPOWER και του αλγορίθμου PSO. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα, η αντικειμενική συνάρτηση επιλέχθηκε με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που τέθηκαν για την αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν στη διατήρηση των τάσεων εντός συγκεκριμένων ορίων και στην διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου ως ακτινικής.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, ενώ αναλύονται τα Δίκτυα Διανομής και ζητήματα όπως ο εξοπλισμός, οι τοπολογίες τους και η αξιοπιστία τους.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρόβλημα υπολογισμού της ροής του φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας σε ΣΗΕ. Γίνεται ανάλυση των στοιχείων ενός ΣΗΕ ενώ εν συνεχεία γίνεται επεξήγηση των εξισώσεων ροών φορτίου και η θεμελίωση του προβλήματος ροών φορτίου. Τέλος, περιγράφονται διάφορες τεχνικές επίλυσης του προβλήματος ροών φορτίου.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του εργαλείου MATPOWER και του αλγορίθμου PSO. Το λογισμικό MATPOWER χρησιμοποιείται στην πλατφόρμα της MATLAB με σκοπό την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου. Γίνεται αναφορά στον τρόπο εισαγωγής δεδομένων στο λογισμικό και εξηγείται η λειτουργία των βασικών εντολών «runpf» και «runopf» στο περιβάλλον της Matlab. Στη συνέχεια περιγράφεται η λειτουργία του αλγορίθμου PSO, ο οποίος εφαρμόζεται στο πρόβλημα προκειμένου να υποδείξει τη βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας των διακοπών με σκοπό τη μείωση των απωλειών ενέργειας.

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται η αναλυτική παρουσίαση του προβλήματος, προβάλλοντας τις παραμέτρους του και τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό. Παρουσιάζεται, ακόμη, η ανάλυση ροής φορτίου για το συγκεκριμένο πρόβλημα ενώ περιγράφονται η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί του.

Στο 5^ο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι δοκιμές που έγιναν ενώ στη συνέχεια γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Μετά την παρατήρηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών, συμπεραίνουμε ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί ομαλά για χαμηλά φορτία, ενώ σε άλλες περιπτώσεις παρατηρήθηκαν μικρές αστοχίες, οι οποίες άλλοτε διορθώνονται ήδη μέσα από τη χρήση του προγράμματος, ενώ άλλες επιδέχονται περαιτέρω βελτίωση. Τα σημεία στα οποία μπορούν να γίνουν παρατηρήσεις καταλήγοντας σε συγκεκριμένα συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

- ✧ Η εφαρμογή πολύ υψηλού φορτίου στο δίκτυο διανομής οδηγεί στη δημιουργία βρόχων, με αποτέλεσμα την παρακώλυση της ομαλής επανατροφοδότησης της ροής του ηλεκτρικού φορτίου στο δίκτυο διανομής.
- ✧ Το σφάλμα σε μία κύρια γραμμή του δικτύου διανομής ενδέχεται να διαταράσσει την ομαλή λειτουργία του δικτύου διανομής, με αποτέλεσμα οι καταναλωτές των ζυγών κοντά στη γραμμή σφάλματος να μην ικανοποιούνται. Στην περίπτωση αυτή, καθίσταται απαραίτητη η περεταίρω μελέτη της λειτουργίας του αλγορίθμου σε τέτοιες περιπτώσεις, ώστε να οδηγείται στη δημιουργία ενός ή περισσότερων βρόχων με στόχο την αποκατάσταση της ροής σε όλους τους καταναλωτές του δικτύου.

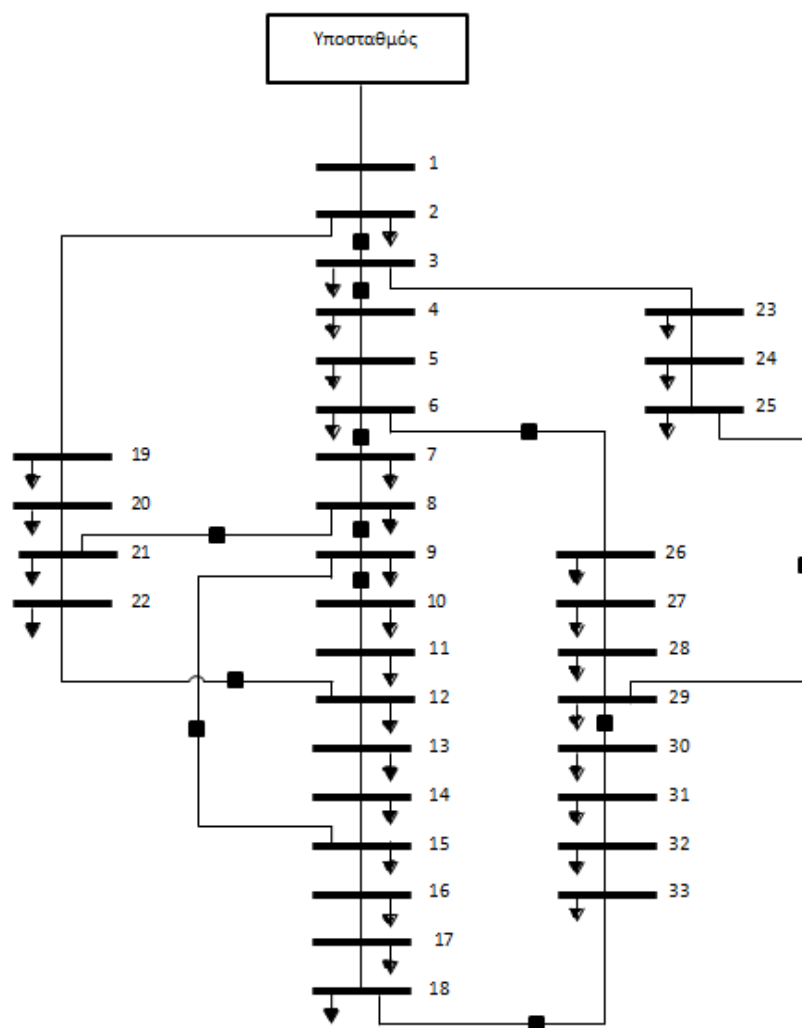
5.5 Βιβλιογραφία

- Παύλος Σ. Γεωργιάκης, «Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας»
- Φώτιος Κανέλλος, Σημειώσεις μαθήματος «Ηλεκτρική Οικονομία»
- Παναγιώτης Α. Καραφώτης, Διπλωματική Εργασία, «Βέλτιστη Επαναδιαμόρφωση Ακτινικών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας για Αποκατάσταση Λειτουργίας»
- Κωνσταντίνος Ραφαήλ Κουσουλίδης, Διπλωματική Εργασία, «Ανάπτυξη Λογισμικού για Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας»
- Ντόμαλης Στέφανος, Διπλωματική Εργασία, «Βέλτιστη Τοποθέτηση Μονάδων Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Δίκτυα Διανομής με ήδη Εγκατεστημένη Διανεμημένη Παραγωγή Ανεμογεννητριών για Εξομάλυνση Φορτίου-Διαχείριση Ενέργειας»
- Χρήστος Πανουσόπουλος, Μεταπτυχιακή εργασία, «Μέθοδοι ρύθμισης της τάσης στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας»
- Παναγιώτης Γ. Πεδιαδίτης, Διπλωματική Εργασία, «Αναλυτική Μέθοδος Βέλτιστης Τοποθέτησης Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής σε Ακτινικά Δίκτυα Διανομής»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Παράρτημα

6.1 Σχεδιαστική απεικόνιση του Δικτύου Διανομής

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.2 , όλες οι προσομοιώσεις έχουν λάβει χώρα σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας IEEE 33 ζυγών. Η Ανάλυση Ροής Φορτίου διεξάγεται χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATPOWER έκδοσης 7.0b1 . Η σχεδιαστική απεικόνιση του Δικτύου Διανομής φαίνεται παρακάτω.



6.2 Πίνακες με δεδομένα ζυγών και κλάδων

Παρακάτω δίνονται οι πίνακες με τα δεδομένα των ζυγών και των κλάδων του δικτύου διανομής πριν τις τροποποιήσεις που έγιναν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΖΥΓΩΝ ΣΗΕ-33

Α/Α	Τύπος Ζυγού	Μέτρο Τάσης [p.u.] V_m	Γωνία Τάσης[°] V_a	V_{min} [p.u.]	V_{max} [p.u.]	Φορτίο		Παραγωγή	
						Ενεργό [MW] P_d	Άεργο [MVar] Q_d	Ενεργός [MW]	Άεργος [MVar]
1	3	1	0	1	1	0.03947368	0.00789474	0	0
2	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
3	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
4	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
5	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
6	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
7	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
8	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
9	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
10	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
11	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
12	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
13	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
14	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
15	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
16	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
17	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
18	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
19	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
20	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
21	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
22	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
23	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
24	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
25	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
26	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
27	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
28	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
29	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
30	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
31	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
32	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0
33	1	1	0	0.9	1.1	0.03947368	0.00789474	0	0

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΛΑΔΩΝ ΣΗΕ-33

A/A	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Άφιξης	r [p.u.]	x [p.u.]	b [p.u.]	Όριο Φόρτισης [MVA]
1	1	2	0.0575259116	0.0293244886	0	360
2	2	3	0.307595167	0.15666764	0	360
3	3	4	0.228356656	0.116299674	0	360
4	4	5	0.237777928	0.121103899	0	360
5	5	6	0.510994811	0.441115179	0	360
6	6	7	0.116798814	0.386084969	0	360
7	7	8	0.44386045	0.146684835	0	360
8	8	9	0.642643047	0.461704714	0	360
9	9	10	0.651378001	0.461704714	0	360
10	10	11	0.122663712	0.0405551438	0	360
11	11	12	0.233597628	0.0772419507	0	360
12	12	13	0.915922324	0.720633708	0	360
13	13	14	0.337917936	0.444796338	0	360
14	14	15	0.368739846	0.328184702	0	360
15	15	16	0.465635443	0.340039282	0	360
16	16	17	0.804239697	1.07377542	0	360
17	17	18	0.456713311	0.358133116	0	360
18	2	19	0.102323747	0.0976443077	0	360
19	19	20	0.938508419	0.845668336	0	360
20	20	21	0.255497406	0.298485858	0	360
21	21	22	0.442300637	0.584805173	0	360
22	3	23	0.28151509	0.192356167	0	360
23	23	24	0.560284909	0.442425422	0	360
24	24	25	0.559037059	0.43743402	0	360
25	6	26	0.126656834	0.0645138749	0	360
26	26	27	0.177319567	0.0902819893	0	360
27	27	28	0.660736881	0.582559042	0	360
28	28	29	0.501760717	0.582559042	0	360
29	29	30	0.316642084	0.161284687	0	360
30	30	31	0.607952801	0.600840053	0	360
31	31	32	0.193728802	0.225798562	0	360
32	32	33	0.212758523	0.330805188	0	360
33	21	8	1.24785058	1.24785058	0	360
34	9	15	1.24785058	1.24785058	0	360
35	12	22	1.24785058	1.24785058	0	360
36	18	33	0.311962644	0.311962644	0	360
37	25	29	0.311962644	0.311962644	0	360

