

Βέλτιστη Αναδιαμόρφωση Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Διεσπαρμένη Παραγωγή

Κωνσταντίνα Μουδέρη



Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών
Πολυτεχνείο Κρήτης

Ιούλιος 2020

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια ο συνδυασμός της ανάπτυξης της τεχνολογίας για παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και της συνεχούς αυξανόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα όλο και περισσότερες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) να εντάσσονται στα δίκτυα διανομής. Παρ' όλα αυτά τα δίκτυα που χρησιμοποιούνται σήμερα δεν έχουν κατασκευαστεί με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι δυνατή η εγκατάσταση ΜΔΠ σε αυτά και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι απαραίτητες μελέτες για την διαχείριση της ισχύος και τεχνικών ελέγχου.

Μία συνηθισμένη μέθοδος για αποφυγή διαταραχών στο δίκτυο από την διείσδυση των ΜΔΠ είναι η περικοπή της ενεργού ισχύος τους. Όμως αυτό δεν συμφέρει οικονομικά τον διαχειριστή του δικτύου που πρέπει να κρατήσει όσο το δυνατόν χαμηλότερα αυτή την περικοπή. Μία μέθοδος που μπορεί να ακολουθηθεί είναι η αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου ανάλογα με τις ανάγκες κάθε χρονική στιγμή.

Στην παρούσα εργασία γίνεται επαναδιαμόρφωση του δικτύου αλλάζοντας ανάλογα την κατάσταση των διακοπών που έχουν τοποθετηθεί, την εγκάρσια χωρητική αγωγιμότητα που εφαρμόζεται και το ποσοστό περικοπής ΜΔΠ. Σκοπός είναι να διατηρείται το δίκτυο ακτινικό, να γίνεται ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου και να διατηρείται η τάση σε επιθυμητά όρια. Αρχικά γίνεται ο ορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης και ο ορισμός του προβλήματος και το μοντέλο αυτό υλοποιείται σε κώδικα MATLAB με την χρήση των open-source εργαλείων MATPOWER και του Particle Swarm Optimization Toolbox (Brian Birge).

Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε δύο δίκτυα διανομής με 33 και 136 ζυγούς με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στην εργασία.

Abstract

In recent years, renewable energy technology development and the increasing demand for electricity has resulted in the increased integration of dispersed electric power generation units in distribution networks. Nevertheless, the networks being used today have not been constructed in a way that would allow high penetration of dispersed generators. This results in the increasing need for the deployment of suitable studies, power management and control techniques.

A common method to prevent network disruptions from increased penetration of dispersed generators is to curtail their active power production. However, this is not economically viable for the owners and the network operator should limit power production curtailment to the highest possible extent. Another approach is to change the network topology according to the needs at any time.

In this Diploma Thesis, the network is reshaped by changing accordingly the status of the switches and the controlled shunt reactive impedances of the network. The major targets is to keep the network radial, limit the active power losses and maintain voltages within acceptable limits. The objective function and constraints of the problem are defined and the model is implemented in MATLAB code using open-source tools MATPOWER and Particle Swarm Optimization Toolbox (Brian Birge).

The proposed method was applied to two distribution networks of 33 and 136 busses and the obtained simulation results were evaluated.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2019-2020 με επιβλέποντα καθηγητή τον κ. Φώτιο Κανέλλο, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερα για την ανάθεση του θέματος, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Γρηγόρη και Καίτη για την στήριξη που μου παρείχαν καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου και τους φίλους μου που ήταν πάντα δίπλα μου.

Περιεχόμενα

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 | Εισαγωγή | 1 |
| 1.2 | Αντικείμενο της εργασίας | 3 |
| 1.3 | Δομή της εργασίας | 3 |
| 2 | Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας | 5 |
| 2.1 | Εισαγωγή | 5 |
| 2.2 | Δομή και τοπολογίες δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας | 6 |
| 2.2.1 | Η δομή | 6 |
| 2.2.2 | Οι τοπολογίες | 6 |
| 2.2.3 | Θεμελιώδη στοιχεία δικτύων διανομής | 8 |
| 2.3 | Στοιχεία δικτύων διανομής που εξασφαλίζουν την σωστή λειτουργία | 9 |
| 2.3.1 | Διακοπτικά Στοιχεία | 9 |
| 2.3.2 | Εγκάρσιες Αντισταθμίσεις | 11 |
| 2.3.3 | Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ | 11 |
| 2.3.4 | Κατανεμόμενα φορτία (dispatchable loads) | 11 |
| 2.4 | Τρόποι ελέγχου δικτύων διανομής | 11 |
| 3 | Διεσπαρμένη Παραγωγή | 15 |
| 3.1 | Εισαγωγή | 15 |
| 3.2 | Οφέλη στα δίκτυα διανομής από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής | 18 |
| 3.3 | Προβλήματα δικτύων διανομής λόγω υψηλής διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής | 18 |
| 3.4 | Ενεργά και παθητικά δίκτυα διανομής | 19 |
| 3.5 | Ρυθμιστικά πλαίσια | 19 |
| 4 | Λογισμικό Ανάπτυξης Κώδικα | 21 |
| 4.1 | Προγραμματιστικό Περιβάλλον MATLAB | 21 |
| 4.2 | Περιγραφή του εργαλείου MATPOWER | 21 |
| 4.2.1 | Εισαγωγή Δεδομένων | 22 |
| 4.2.2 | Μοντελοποίηση των δεδομένων | 24 |
| 5 | Βέλτιστη Επαναδιαμόρφωση Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας | 27 |
| 5.1 | Εισαγωγή | 27 |
| 5.2 | Διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος | 28 |
| 5.3 | Διατύπωση προβλήματος βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ενεργών δικτύων διανομής | 32 |
| 5.3.1 | Διακόπτες | 32 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.3.2 | Εγκάρσιες Αντισταθμίσεις | 32 |
| 5.3.3 | Περιορισμοί του προβλήματος | 33 |
| 6 | Επίλυση του Προβλήματος Βέλτιστης Επαναδιαμόρφωσης Δι- κτύων Διανομής με τον Αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων Particle Swarm Optimization | 35 |
| 6.1 | Εισαγωγή | 35 |
| 6.2 | Περιγραφή του αλγόριθμου PSO | 35 |
| 6.3 | Παραλλαγές του αλγόριθμου | 37 |
| 6.4 | Θετικά και αρνητικά της χρήσης του αλγόριθμου PSO | 37 |
| 6.5 | Περιγραφή του λογισμικού για το PSO | 38 |
| 6.6 | Εφαρμογή PSO στην βέλτιστη αναδιαμόρφωση δικτύων διανομής | 38 |
| 6.6.1 | Εφαρμογή του PSO | 38 |
| 6.6.2 | Αντικειμενική συνάρτηση | 39 |
| 7 | Εφαρμογές και Αποτελέσματα | 43 |
| 7.1 | Εισαγωγή | 43 |
| 7.2 | Εφαρμογή στο δίκτυο 33 ζυγών | 44 |
| 7.2.1 | Εκτέλεση μοντέλου χωρίς τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης . . . | 45 |
| 7.2.2 | Εκτέλεση του μοντέλου με επαναδιαμόρφωση του δικτύου με χρήση του αλγόριθμου PSO | 47 |
| 7.3 | Εφαρμογή στο δίκτυο 136 ζυγών | 51 |
| 7.3.1 | Εκτέλεση του μοντέλου χωρίς τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης . | 51 |
| 7.3.2 | Εκτέλεση του μοντέλου με επαναδιαμόρφωση του δικτύου με χρήση του αλγόριθμου PSO | 52 |
| 8 | Συμπεράσματα | 67 |
| 8.1 | Σύνοψη της εργασίας | 67 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. (Διπλωματική Εργασία «Βέλτιστη Επαναδιαμόρφωση Έξυπνων Δικτύων Διανομής με Εφαρμογές σε Προβλήματα Αποκατάστασης της Λειτουργίας τους», Α. Δ. Αναστασίου) | 2 |
| 2.1 | Ακτινικό Δίκτυο Διανομής MT (Διπλωματική Εργασία «Βέλτιστη Επαναδιαμόρφωση Τοπολογίας Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Διεσπαρμένη Παραγωγή», Δ. Ο. Σιάγκας) | 7 |
| 2.2 | Βροχοειδές Δίκτυο Διανομής MT (Διπλωματική Εργασία «Βέλτιστη Επαναδιαμόρφωση Τοπολογίας Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Διεσπαρμένη Παραγωγή», Δ. Ο. Σιάγκας) | 7 |
| 2.3 | Υποσταθμός διανομής σε στύλους | 9 |
| 2.4 | Ασφαλειοαποζεύκτες | 10 |
| 2.5 | Ακτινικό Δίκτυο Διανομής με εγκατεστημένα τα βασικά στοιχεία για την λειτουργία του (Διδακτορική Διατριβή «Βελτιστοποίηση Λειτουργίας και Προγραμματισμού Ανάπτυξης Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας», Ν. Χ. Κουτσούκης) | 12 |
| 3.1 | Φωτοβολταϊκό Πάρκο | 16 |
| 3.2 | Αιολικό Πάρκο | 17 |
| 3.3 | Υδροηλεκτρικό Εργοστάσιο Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας | 17 |
| 4.1 | Εκτέλεση ενός ΣΗΕ με MATPOWER | 21 |
| 4.2 | Μοντέλο γραμμής μεταφοράς | 25 |
| 5.1 | Τυπική Μορφή Εξεταζόμενων Δικτύων Διανομής (“A Comprehensive Centralized Approach for Voltage Constraints Management in Active Distribution Grid”, F. Capitanescu, I. Bilibin, E. R. Ramos) | 29 |
| 5.2 | Ισοδύναμο Π μοντέλο γραμμής δικτύου | 30 |
| 6.1 | Η κίνηση ενός σμήνους πουλιών | 36 |
| 6.2 | Διάγραμμα ροής προγράμματος | 39 |
| 6.3 | Ψευδοκώδικας υπολογισμού της τιμής του penalty | 41 |
| 7.1 | Δίκτυο Διανομής 33 ζυγών | 44 |
| 7.2 | Καμπύλες ζήτησης φορτίου και παραγωγής ΜΔΠ για κάθε ώρα σε ένα 24ωρο | 45 |
| 7.3 | Απώλειες ενεργού ισχύος σε MW των γραμμών του δικτύου ως προς τον χρόνο | 46 |
| 7.4 | Οι τάσεις των ζυγών του δικτύου ως προς τον χρόνο | 46 |

| | | |
|------|---|----|
| 7.5 | Απώλειες ενεργού ισχύος σε MW των γραμμών του δικτύου ως προς τον χρόνο εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο PSO για βέλτιστη επαναδιαμόρφωση δικτύου | 47 |
| 7.6 | Οι τάσεις των ζυγών του δικτύου ως προς τον χρόνο εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο PSO για βέλτιστη επαναδιαμόρφωση | 48 |
| 7.7 | Τοπολογία του δικτύου 33 ζυγών στην πρώτη ώρα λειτουργίας | 48 |
| 7.8 | Τοπολογία του δικτύου 33 ζυγών στην 24η ώρα λειτουργίας | 49 |
| 7.9 | Χωρητικότητα πρώτης συστοιχίας πυκνωτών C1 ως προς τον χρόνο | 50 |
| 7.10 | Χωρητικότητα δεύτερης συστοιχίας πυκνωτών C2 ως προς τον χρόνο | 50 |
| 7.11 | Χωρητικότητα τρίτης συστοιχίας πυκνωτών C3 ως προς τον χρόνο | 51 |
| 7.12 | Δίκτυο διανομής 136 ζυγών | 52 |
| 7.13 | Καμπύλες ζήτησης φορτίου και παραγωγής ΜΔΠ για κάθε ώρα σε ένα 24ωρο | 54 |
| 7.14 | Απώλειες ενεργού ισχύος σε MW των γραμμών του δικτύου ως προς τον χρόνο | 55 |
| 7.15 | Οι τάσεις των ζυγών του δικτύου ως προς τον χρόνο | 55 |
| 7.16 | Απώλειες ενεργού ισχύος σε MW των γραμμών του δικτύου ως προς τον χρόνο | 56 |
| 7.17 | Οι τάσεις των ζυγών του δικτύου ως προς τον χρόνο εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο PSO για βέλτιστη επαναδιαμόρφωση | 57 |
| 7.18 | Ο αριθμός των βρόχων που σχηματίζονται στο δίκτυο σε κάθε ώρα | 57 |
| 7.19 | Τοπολογία δικτύου 136 ζυγών στην 21η ώρα | 58 |
| 7.20 | Τοπολογία δικτύου 136 ζυγών στην 1η ώρα | 59 |
| 7.21 | Χωρητικότητα πρώτης συστοιχίας πυκνωτών C1 ως προς τον χρόνο | 63 |
| 7.22 | Χωρητικότητα δεύτερης συστοιχίας πυκνωτών C2 ως προς τον χρόνο | 63 |
| 7.23 | Χωρητικότητα τρίτης συστοιχίας πυκνωτών C3 ως προς τον χρόνο | 64 |
| 7.24 | Χωρητικότητα τέταρτης συστοιχίας πυκνωτών C4 ως προς τον χρόνο | 64 |
| 7.25 | Χωρητικότητα πέμπτης συστοιχίας πυκνωτών C5 ως προς τον χρόνο | 65 |
| 7.26 | Χωρητικότητα έκτης συστοιχίας πυκνωτών C6 ως προς τον χρόνο | 65 |
| 7.27 | Χωρητικότητα έβδομης συστοιχίας πυκνωτών C7 ως προς τον χρόνο | 66 |

Κατάλογος Πινάκων

| | | |
|------|---|----|
| 4.1 | Bus Data | 22 |
| 4.2 | Generator Data | 23 |
| 4.3 | Branch Data | 24 |
| 4.4 | Generator Cost Data | 24 |
| 6.1 | Μορφή διανύσματος παραμέτρων | 38 |
| 7.1 | Δεδομένα Διακοπών του δικτύου 33 ζυγών | 44 |
| 7.2 | Δεδομένα εγκάρσιων αντισταθμίσεων του δικτύου 33 ζυγών | 45 |
| 7.3 | Δεδομένα ΜΔΠ του δικτύου 33 ζυγών | 45 |
| 7.4 | Μορφή Διανύσματος εισόδου δικτύου 33 ζυγών | 47 |
| 7.5 | Καταστάσεις Διακοπών για κάθε σενάριο | 49 |
| 7.6 | Τοπολογίες δικτύου 33 ζυγών | 50 |
| 7.7 | Δεδομένα διακοπών του δικτύου 136 ζυγών | 53 |
| 7.8 | Δεδομένα εγκάρσιων αντισταθμίσεων του δικτύου 136 ζυγών | 53 |
| 7.9 | Δεδομένα ΜΔΠ του δικτύου 136 ζυγών | 54 |
| 7.10 | Σταθερές εγκάρσιες αντισταθμίσεις στο δίκτυο 136 ζυγών για εκτέλεση χωρίς την βέλτιστη επαναδιαμόρφωση | 54 |
| 7.11 | Μορφή Διανύσματος εισόδου δικτύου 136 ζυγών | 56 |
| 7.12 | Καταστάσεις Διακοπών για κάθε σενάριο στο δίκτυο 136 ζυγών | 60 |
| 7.13 | Τοπολογίες δικτύου 136 ζυγών | 62 |

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

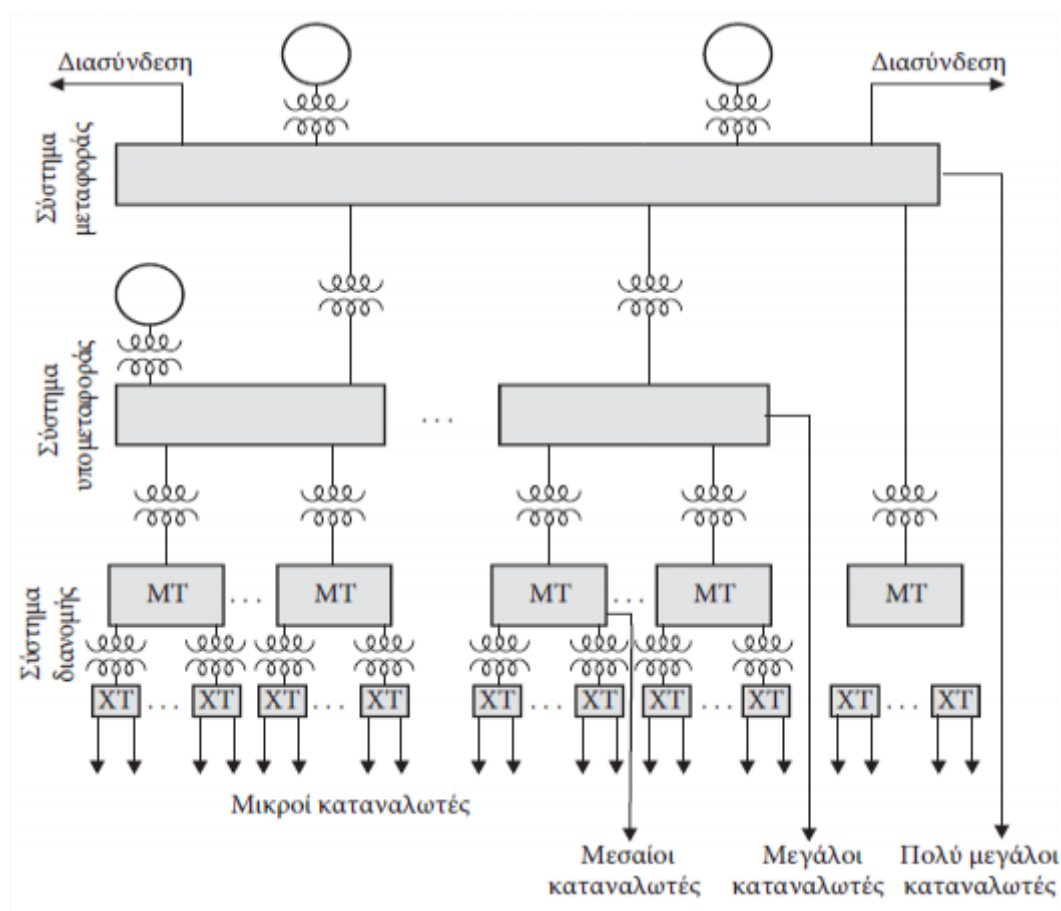
Οι εγκαταστάσεις με τα μέσα που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Αυτό πιο συγκεκριμένα, αποτελείται από τις μονάδες παραγωγής, τις συσκευές κατανάλωσης ενέργειας και το δίκτυο που τις συνδέει. Σκοπός ενός ΣΗΕ είναι να τροφοδοτεί με ενέργεια όπου υπάρχει ζήτηση, κρατώντας το κόστος στο ελάχιστο δυνατό και προσφέροντας σταθερή τάση. Οι λειτουργίες του ΣΗΕ χωρίζονται σε τρία στάδια, παραγωγή, μεταφορά και διανομή. Καθώς το κόστος αποθήκευσης της ενέργειας είναι μεγάλο και επειδή δεν είναι δυνατό να αποθηκευτούν μεγάλες ποσότητες πρέπει η ενέργεια που χρειάζονται οι καταναλωτές να παράγεται εκείνη την στιγμή. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται ο τρόπος που συνδέεται ένα ΣΗΕ.

Το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται σε θερμικούς και υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση των εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κυρίως των μονάδων που εκμεταλλεύονται τον ήλιο και τον αέρα.

Για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τους σταθμούς παραγωγής προς τους καταναλωτές χρησιμοποιούνται δίκτυα μεταφοράς με γραμμές υψηλής τάσης (ΥΤ) στα 150 kV και υπερυψηλής τάσης (ΥΥΤ) 400 kV. Οι γραμμές αυτές φτάνουν έως τους υποσταθμούς υψηλής τάσης – μέσης τάσης (ΥΤ/ΜΤ) από όπου και ξεκινάν τα δίκτυα διανομής (η μέση τάση λειτουργεί στα 20 kV). Από εκεί η ενέργεια φτάνει στους καταναλωτές περνώντας από τους υποσταθμούς διανομής και τις γραμμές χαμηλής τάσης (ΧΤ) 230/400 V.

Τα ΣΗΕ διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την δομή ή το μέγεθος όμως όλα βασίζονται σε κάποια κοινά χαρακτηριστικά. Χρησιμοποιούν τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα και λειτουργούν σε συχνότητα 50 ή 60 Hz και σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και συνεχές ρεύμα για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γραμμές μέσης τάσης αποτελούνται από τρεις αγωγούς φάσεων. Οι γραμμές χαμηλής τάσης διαθέτουν επιπλέον και ουδέτερο αγωγό. Γραμμές διανομής χαμηλής τάσης υπάρχουν ωστόσο και μονοφασικές με δύο αγωγούς.

Οι καταναλωτές οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος εμπορικής χρήσης συνδέονται στο δίκτυο χαμηλής τάσης, ενώ στην μεσαία ή υψηλή τάση συνδέονται συνήθως βιομηχανικοί καταναλωτές. Οι καταναλώσεις χωρίζονται ισομερώς στις τρεις φάσεις ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπημένη λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 1.1: Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. (Διπλωματική Εργασία «Βέλτιστη Επαναδιαμόρφωση Έξυπνων Δικτύων Διανομής με Εφαρμογές σε Προβλήματα Αποκατάστασης της Λειτουργίας τους», Α. Δ. Αναστασίου)

1.2 Αντικείμενο της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται η διατύπωση και η επίλυση του προβλήματος βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης για ενεργά δίκτυα διανομής με αντικειμενική συνάρτηση που ως βασικό στόχο έχει την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Κατά την λειτουργία του δικτύου πρέπει ταυτόχρονα να τηρούνται κάποια όρια που αφορούν την ομαλή λειτουργία προσφέροντας αξιοπιστία και όσο κατά το δυνατόν οικονομικότερη παροχή ρεύματος. Για τον έλεγχο του δικτύου γίνεται χρήση διακοπών που αλλάζουν την τοπολογία, εισάγονται εγκάρσιες αντισταθμίσεις στους ζυγούς και γίνεται περικοπή κάποιου ποσοστού της παραγωγής των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

1.3 Δομή της εργασίας

Η εργασία έχει χωριστεί σε οκτώ κεφάλαια. Κάθε ένα περιέχει τα παρακάτω.

- **Κεφάλαιο 2.** Γίνεται περιγραφή του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Περιγράφονται τα δομικά στοιχεία του και τα βασικά του χαρακτηριστικά.
- **Κεφάλαιο 3.** Περιγράφεται η διεσπαρμένη παραγωγή. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης της στα δίκτυα διανομής καθώς και οι τρόποι ελέγχου μετά από την διείσδυση τέτοιων μονάδων στο δίκτυο.
- **Κεφάλαιο 4.** Εδώ περιγράφεται το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος. Γίνεται αναλυτική περιγραφή του MATPOWER που χρησιμοποιήθηκε στο MATLAB.
- **Κεφάλαιο 5.** Δίνεται ο ορισμός του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος και στην συνέχεια δημιουργείται το μοντέλο του προβλήματος βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης για ενεργά δίκτυα διανομής.
- **Κεφάλαιο 6.** Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται ο ορισμός του Προβλήματος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για να γίνει η βέλτιστη επαναδιαμόρφωση του δικτύου.
- **Κεφάλαιο 7.** Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προήλθαν από την εφαρμογή του μοντέλου σε δίκτυα 33 και 136 ζυγών.
- **Κεφάλαιο 8.** Σε αυτό το κεφάλαιο δίνεται μία σύνοψη της εργασίας και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Κεφάλαιο 2

Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Εισαγωγή

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας αφορά τις διαδικασίες λειτουργίας και ελέγχου που πραγματοποιούνται έτσι ώστε να παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης.

Τα δίκτυα διανομής είναι τριφασικά και ξεκινούν από τους υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ, δηλαδή εκεί που σταματά το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν αναφερόμαστε στο δίκτυο διανομής, αναφερόμαστε ουσιαστικά στο σύνολο των γραμμών ηλεκτροδότησης μέσης και χαμηλής τάσης έως και τους μετρητές παροχής ενέργειας των καταναλωτών.

Τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζουν δύο επίπεδα τάσης, μέση τάση και χαμηλή. Ως συνέπεια, χωρίζονται σε δύο διαφορετικές βαθμίδες. Από την μία το τμήμα της μέσης τάσης, το οποίο ονομάζεται πρωτεύον δίκτυο ή δίκτυο διανομής μέσης τάσης. Αυτό αποτελεί την διανομή από τους υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ έως και τους μετασχηματιστές διανομής στους οποίους πραγματοποιείται ο υποβιβασμός από μέση τάση σε χαμηλή. Οι μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές που έχουν παροχή μέσης τάσης, τροφοδοτούνται άμεσα από το πρωτεύον δίκτυο με τριφασική παροχή. Από την άλλη, το τμήμα της χαμηλής τάσης, το οποίο ονομάζεται δευτερεύον δίκτυο ή δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης. Το συγκεκριμένο τμήμα τροφοδοτείται από μετασχηματιστές διανομής και διανέμει ενέργεια σε πελάτες χαμηλής τάσης με μονοφασική ή τριφασική παροχή.

Ο ρόλος των διαχειριστών δικτύων διανομής (Distribution System Operators – DSOs) είναι η λειτουργία, η συντήρηση και η ανάπτυξη των δικτύων διανομής. Ο ρόλος τους ποικίλει αφού κυμαίνεται από απλή διαχείριση έως την μερική ή και πλήρη δημιουργία τους. Ο Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε. (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας) είναι υπεύθυνος για το ελληνικό δίκτυο διανομής από το 2010. Αποτελεί θυγατρική εταιρεία της Δ.Ε.Η. όμως είναι ανεξάρτητη λειτουργικά αλλά και διοικητικά.

Μέχρι πριν από λίγα χρόνια υπήρχε απουσία σημαντικών, τόσο σε πλήθος όσο και σε μέγεθος, μονάδων παραγωγής στα δίκτυα διανομής (ΔΔ), πράγμα που απλοποιούσε σημαντικά τον σχεδιασμό και την λειτουργία τους μιας και η ροή ισχύος ήταν μονόπλευρη προς τους καταναλωτές. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια παρατηρούμε μία αύξηση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) εκ των οποίων το μεγαλύτερο

ποσοστό αφορά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) κάτι που έχει επηρεάσει σημαντικά των τρόπο λειτουργίας αλλά και την δομή των δικτύων διανομής. Τα δίκτυα τώρα μετατρέπονται από παθητικά σε ενεργητικά κάτι το οποίο δυσκολεύει την διατήρηση της αξιοπιστίας και της ποιότητας της ενέργειας που φτάνει στους καταναλωτές.

2.2 Δομή και τοπολογίες δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

2.2.1 Η δομή

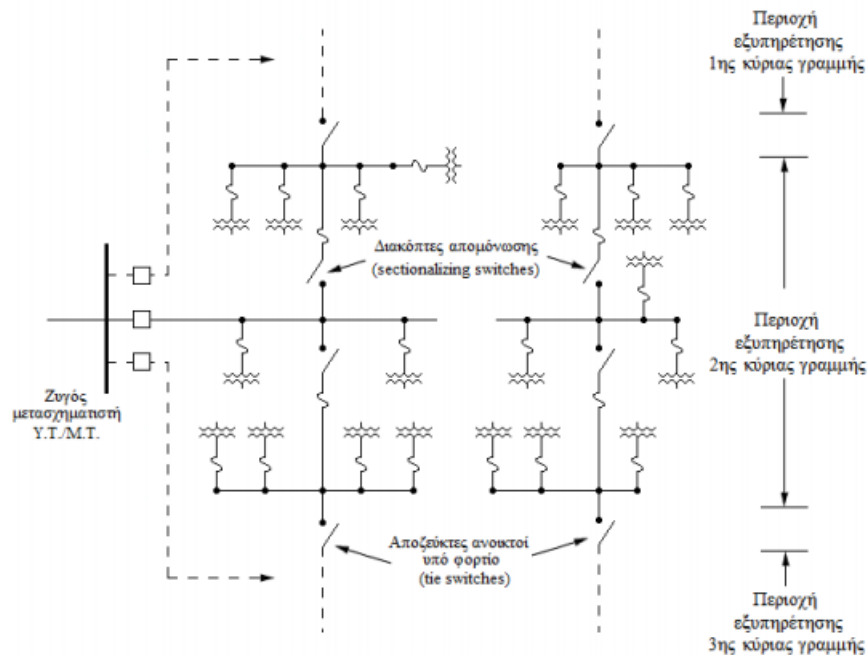
Παρακάτω περιγράφεται η γενική δομή των ΔΔ μέσης τάσης και των επιμέρους στοιχείων τους. Η μορφολογία τους επηρεάζεται από την χωροταξική διαμόρφωση της κάθε χώρας, τα χαρακτηριστικά δόμησης αλλά και το είδος και την πυκνότητα των φορτίων των καταναλωτών. Γι' αυτό τον λόγο συναντάμε σημαντικές διαφορές μεταξύ διαφορετικών ΔΔ ακόμη και εντός ίδιας χώρας που αφορούν τον τρόπο λειτουργίας αλλά και τοποθέτησης και διασύνδεσης των γραμμών.

Για την κατασκευή, ανάλογα με την τοποθέτησή τους σε σχέση με το έδαφος τα δίκτυα διανομής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Αρχικά, τα εναέρια ή υπέργεια δίκτυα διανομής. Οι γραμμές αυτές αποτελούνται από γυμνούς αγωγούς ή συνεστραμμένα καλώδια (κυρίως στην χαμηλή τάση). Έχουν μειωμένο κόστος κατασκευής ενώ παράλληλα είναι πιο εύκολα προσβάσιμα για τον εντοπισμό και την αποκατάσταση πιθανής βλάβης τους. Συναντώνται κυρίως σε περιοχές με μικρή πυκνότητα φορτίου όπως για παράδειγμα σε αγροτικές περιοχές. Η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από τα υπόγεια δίκτυα διανομής. Οι γραμμές αυτές τοποθετούνται κάτω από την επιφάνεια της γης. Τις συναντάμε κυρίως σε πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα λόγω του περιορισμένου χώρου εγκατάστασης.

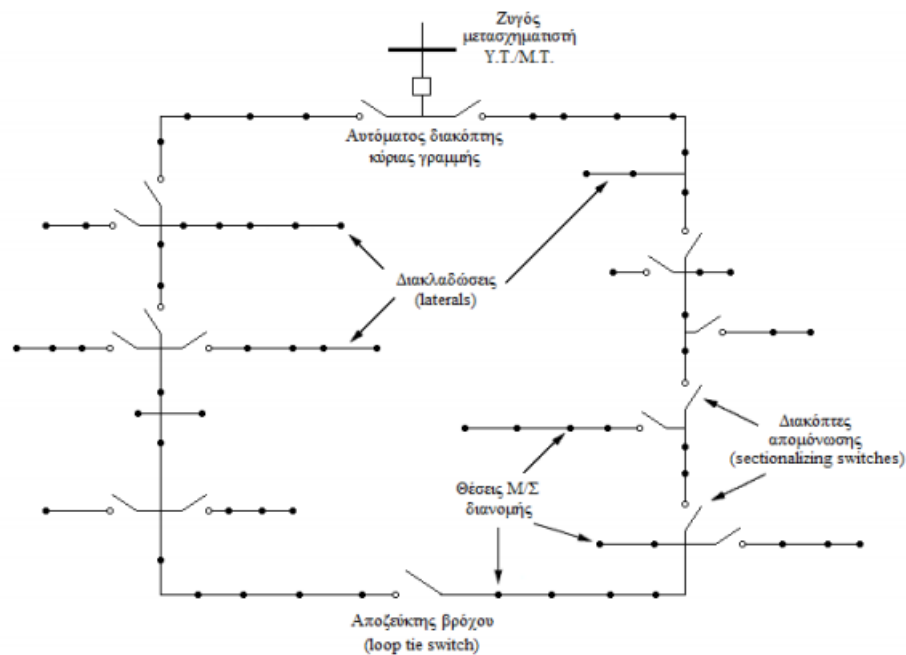
2.2.2 Οι τοπολογίες

Η βασική μορφή των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ακτινική ή βροχοειδής. Η ακτινική τοπολογία εφαρμόζεται συνήθως σε εναέρια δίκτυα. Όταν αναφερόμαστε σε ακτινική τοπολογία αυτό σημαίνει ότι όλα τα φορτία του δικτύου τροφοδοτούνται μόνο από το ένα τους άκρο. Η κεντρική τροφοδοσία διακλαδίζεται σε μικρότερες γραμμές, οι οποίες καταλήγουν στους μετασχηματιστές διανομής. Στον κύριο κορμό τοποθετούνται διακόπτες φορτίου, αποζεύκτες ή ΔΑΕ (Διακόπτες Αυτόματης Επαναφοράς) για να είναι δυνατή η απομόνωση ενός τμήματος του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος ή εργασιών συντήρησης του δικτύου. Οι διακλαδώσεις ελέγχονται από διακόπτες απομόνωσης ή ασφαλειοαποζεύκτες.

Αντιθέτως, στα βροχοειδή δίκτυα οι γραμμές δημιουργούν βρόχους με την χρήση των οποίων γίνεται τόσο εξοικονόμηση των γραμμών, όσο και εύκολη τροφοδότηση σε περίπτωση κάποιου σφάλματος. Η βασική τους δομή μοιάζει με εκείνη των ακτινικών δικτύων όμως τώρα οι γραμμές ξεκινάν και τερματίζουν στον ίδιο υποσταθμό, δημιουργώντας βρόχους. Υπό κανονικές συνθήκες όταν λειτουργούν φέρονται σαν ακτινικές γραμμές με έναν διακόπτη περίπου στο μέσο της κάθε γραμμής να παραμένει ανοιχτός. Βροχοειδή τοπολογία συναντάμε κυρίως σε υπόγεια δίκτυα διανομής και λιγότερο σε εναέρια.



Σχήμα 2.1: Ακτινικό Δίκτυο Διανομής MT (Διπλωματική Εργασία «Βέλτιστη Επαναδιαμόρφωση Τοπολογίας Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Διεσπαρμένη Παραγωγή», Δ. Ο. Σιάγκας)



Σχήμα 2.2: Βροχοειδές Δίκτυο Διανομής MT (Διπλωματική Εργασία «Βέλτιστη Επαναδιαμόρφωση Τοπολογίας Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Διεσπαρμένη Παραγωγή», Δ. Ο. Σιάγκας)

2.2.3 Θεμελιώδη στοιχεία δικτύων διανομής

Ανά περιοχές συναντάμε διαφορετικά δίκτυα διανομής όμως όλα τους βασίζονται σε κάποια βασικά χαρακτηριστικά που συναντάμε παντού και αποτελούνται από τα παρακάτω θεμελιώδη στοιχεία.

Υποσταθμοί μεταφοράς

Όταν αναφερόμαστε σε δίκτυα διανομής, αυτά ξεκινούν από τους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ και πιο συγκεκριμένα από την μεριά του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή. Σε αυτούς τους υποσταθμούς εκτός από τους μετασχηματιστές τοποθετείται και εξοπλισμός προστασίας και άλλα στοιχεία ελέγχου του δικτύου. Για παράδειγμα διακόπτες, χωρητικότητες σε σειρά ή και παράλληλα, γειώσεις και άλλες συσκευές. Ανάλογα με τον τρόπο που έχει σχεδιαστεί το δίκτυο ένας τέτοιος υποσταθμός μπορεί να βρίσκεται υπό την επίβλεψη εξειδικευμένων χειριστών ή να υπόκειται σε τηλεχειρισμό των στοιχείων του. Επίσης ο ζυγός των μετασχηματιστών με τις γραμμές μεταφοράς μπορούν να συνδεθούν με ποικίλους τρόπους.

Γραμμές μέσης τάσης

Οι γραμμές μέσης τάσης αποτελούν το πρωτεύον δίκτυο διανομής. Χωρίζονται στις γραμμές που αποτελούν τον βασικό κορμό του δικτύου και σε εκείνες που ξεκινούν από τις βασικές και πηγαίνουν έως και την κάλυψη του φορτίου και συνήθως είναι και οι μικρότερες. Πρόκειται για τις κύριες γραμμές διανομής (primary feeders) και τις μικρότερες που αποτελούν τις διακλαδώσεις (laterals).

Πάνω στις γραμμές διανομής τοποθετούνται διακοπτικά στοιχεία έτσι ώστε σε περίπτωση κάποιας βλάβης να θέτουν εκτός δικτύου όσο το δυνατόν μικρότερο τμήμα και να τροφοδοτούν το μεγαλύτερο τμήμα των καταναλωτών χωρίς πρόβλημα έως ότου γίνει αποκατάσταση της βλάβης.

Υποσταθμοί διανομής

Στο τέλος των γραμμών μέσης τάσης βρίσκονται οι μετασχηματιστές ΜΤ/ΧΤ. Τα κύρια στοιχεία που υπάρχουν σε αυτούς τους υποσταθμούς είναι οι μετασχηματιστές διανομής καθώς και διακοπτικοί μηχανισμοί και άλλα μέσα προστασίας. Ανάλογα με το είδος των γραμμών ποικίλει και ο τρόπος που γίνεται ο υποβιβασμός της τάσης. Σε εναέρια δίκτυα οι μικρότεροι μετασχηματιστές κατασκευάζονται έτσι ώστε να τοποθετούνται πάνω σε στύλους, ενώ στα υπόγεια μπορεί να τοποθετηθούν σε φρεάτια, υπόγειους θαλάμους ή ακόμα και σε εσωτερικά κτηρίων.

Γραμμές χαμηλής τάσης

Οι γραμμές αυτές ξεκινούν από τους μετασχηματιστές διανομής (ΜΤ/ΧΤ) και φτάνουν έως τους καταναλωτές ΧΤ. Έχουν ακτινική δομή εκτός από συγκεκριμένες περιπτώσεις που η αξιοπιστία του δικτύου είναι πιο σημαντική από το κόστος, όπως για παράδειγμα νοσοκομεία ή στρατιωτικές εγκαταστάσεις. Όταν γίνεται ο σχεδιασμός τους, γίνεται με τρόπο τέτοιο ώστε να μπορούν να εξυπηρετηθούν τα φορτία ακόμα και αν υπάρξει βλάβη σε κάποιο σημείο της γραμμής. Οι γραμμές πρέπει να είναι σχεδιασμένες με τρόπο τέτοιο ώστε να μπορούν να προσφέρουν καλά επίπεδα τάσης στους καταναλωτές



Σχήμα 2.3: Υποσταθμός διανομής σε στύλους

και σε περίπτωση βραχυκυκλώματος να μπορούν να το αντιμετωπίσουν χωρίς διακοπή της τροφοδότησης των καταναλωτών του δικτύου.

2.3 Στοιχεία δικτύων διανομής που εξασφαλίζουν την σωστή λειτουργία

Μετά την περιγραφή της βασικής δομής των δικτύων διανομής, θα γίνει ανάλυση σε αυτή την ενότητα των στοιχείων που είναι απαραίτητα για τα δίκτυα διανομής ώστε αυτά να λειτουργούν σωστά. Όπως για παράδειγμα σε κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο τάσης ή με όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες.

2.3.1 Διακοπτικά Στοιχεία

Η χρήση διακοπών στα δίκτυα διανομής είναι σημαντική καθώς μέσω αυτών είναι δυνατόν να απομονωθεί ένα τμήμα του δικτύου ανά πάσα στιγμή είτε για λόγους ασφαλείας είτε για συντήρηση ή επισκευή μίας βλάβης, ενώ ταυτόχρονα η παροχή ενέργειας στο υπόλοιπο δίκτυο συνεχίζει κανονικά.

Σε γενικές γραμμές υπάρχουν γραμμές στο δίκτυο που δεν συμμετέχουν στην παροχή ενέργειας αλλά όταν είναι απαραίτητο μία γραμμή τροφοδότησης να βγει εκτός τότε αυτές συμμετέχουν ενεργά για να καλύψουν τις ανάγκες ενέργειας. Αυτές οι γραμμές ονομάζονται γραμμές διασύνδεσης. Σ' ότι αφορά τους διακόπτες για αυτήν την περίπτωση όπως φαίνεται και από την γενική περιγραφή, υπάρχουν κάποιοι διακόπτες που υπό κανονικές συνθήκες είναι μόνιμα ανοικτοί (αποζεύκτες ανοικτοί), ενώ υπάρχουν και κάποιοι άλλοι διακόπτες που υπό κανονικές συνθήκες είναι μόνιμα κλειστοί (διακόπτες απομόνωσης). Όποτε είναι απαραίτητο η κατάσταση των παραπάνω διακοπών αλλάζει έτσι ώστε να πραγματοποιείται η αναδιαμόρφωση του δικτύου.

Στις μέρες μας, που τα δίκτυα διανομής έχουν γίνει πολύπλοκα με ροή ενέργειας και προς τις δύο κατευθύνσεις, η χρήση των διακοπών χρησιμοποιείται ακόμα και υπό κανονικές συνθήκες. Γίνεται αναδιαμόρφωση του δικτύου αλλάζοντας την βασική του



Σχήμα 2.4: Ασφαλειοαποζεύκτες

τοπολογία ώστε να λειτουργεί σωστά με τις επιθυμητές τάσεις και ελαχιστοποιώντας τις απώλειες ρεύματος. Η σωστή ρύθμιση των διακοπών μπορεί να αλλάξει τις παραπάνω τιμές ώστε να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Επιπροσθέτως, η αλλαγή τοπολογίας του δικτύου χρησιμοποιείται όχι μόνο για την ομαλή λειτουργία αλλά και για το να μειώσει το κατά δύναμιν το κόστος λειτουργίας. Έτσι η κίνηση των διακοπών το δικτύου μπορεί να έχει ως στόχο και την ελαχιστοποίηση των απωλειών τις ισχύος.

Μέσα προστασίας

Όταν υπάρχει ένα σφάλμα στο δίκτυο χρησιμοποιούνται τα μέσα προστασίας για να το απομονώσουν αυτόματα από το υπόλοιπο δίκτυο. Τέτοια μέσα προστασίας αποτελούν οι διακόπτες ισχύος που ελέγχονται από ηλεκτρονόμους προστασίας. Υπάρχουν για την προστασία των γραμμών διανομής που ξεκινούν από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ. Με την βοήθεια των ηλεκτρονόμων εντοπίζουν υπερεντάσεις που προκαλούνται από βραχυκύκλωμα και τις διακόπτουν. Όμοια λειτουργία έχουν και οι διακόπτες αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ) όμως λόγω της απλούστερης κατασκευής τους τοποθετούνται στα εναέρια δίκτυα, επάνω σε στύλους. Ένα άλλο πολύ σημαντικό μέσο προστασίας είναι οι ασφάλειες. Έχουν ένα στοιχείο που τήκεται όταν η θερμοκρασία φτάσει σε κάποιο όριο. Υπάρχουν οι ασφάλειες εκτόνωσης που χρησιμοποιούνται μόνο στα εναέρια δίκτυα ΜΤ και οι ασφάλειες κλειστού τύπου που χρησιμοποιούνται κυρίως στην ΧΤ και σε κάποιες περιπτώσεις στην ΜΤ. Τέλος, μία επίσης σημαντική κατηγορία μέσων προστασίας αποτελούν οι διακόπτες απομόνωσης. Εγκαθίστανται στην αρχή των μεγάλων διακλαδώσεων των γραμμών ΜΤ. Μόλις περάσει από αυτούς ρεύμα βραχυκύκλωσης μετράνε τους κύκλους λειτουργίας του διακόπτη ισχύος και στον τελευταίο κύκλο ανοίγουν, ενώ ο διακόπτης ισχύος είναι ανοιχτός. Έπειτα ο διακόπτης ισχύος κλείνει και παραμένει κλειστός ενώ ο διακόπτης απομόνωσης μένει ανοιχτός.

2.3.2 Εγκάρσιες Αντισταθμίσεις

Στην αρχή των γραμμών μεταφοράς ή κατά μήκος τους τοποθετούνται πολλές φορές εγκάρσιοι πυκνωτές οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να ρυθμίζουν την τάση στο δίκτυο καθώς μπορούν να παρέχουν άεργο ισχύ. Επίσης πολύ χρήσιμη λειτουργία είναι η τοποθέτηση πυκνωτών σε ζυγούς καθώς με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιούν ανύψωση τάσης αλλά και ρύθμιση του συντελεστή ισχύος ώστε να είναι κοντά στην μονάδα. Πολύ σύνηθες είναι οι αντισταθμίσεις αυτές να μπορούν να ρυθμίζουν την επίδρασή τους στο δίκτυο ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες.

2.3.3 Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ

Οι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ (Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο) αποτελούν μέσο ρύθμισης της τάσης του δικτύου. Πρόκειται για τους μετασχηματιστές ισχύος του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ. Το μέσο αυτό είναι το βασικότερο για την διατήρηση της τάσης των ζυγών στα επιτρεπτά όρια. Λειτουργεί βηματικά, δηλαδή η μεταβολή της τάσης εξόδου του Μ/Σ παίρνει διακριτές τιμές. Έχει την δυνατότητα να αλλάζει τον λόγο μετασχηματισμού μέσω μίας κινούμενης κεφαλής χωρίς να διακόπτεται η ροή ισχύος. Η κινούμενη αυτή κεφαλή συνήθως τοποθετείται από την πλευρά του πρωτεύοντος τυλίγματος. Με τους συγκεκριμένους μετασχηματιστές προσφέρεται η δυνατότητα για αύξηση ή μείωση της τάσης των ζυγών στους σταθμούς υποβιβασμού, μεταβάλλοντας έτσι την τάση σε όλο το δίκτυο. Όταν συμβαίνει κάποια παραβίαση των ορίων των τάσεων, το ΣΑΤΥΦ αλλάζει τον λόγο μετασχηματισμού και γίνεται αμέσως αποκατάσταση της λειτουργίας.

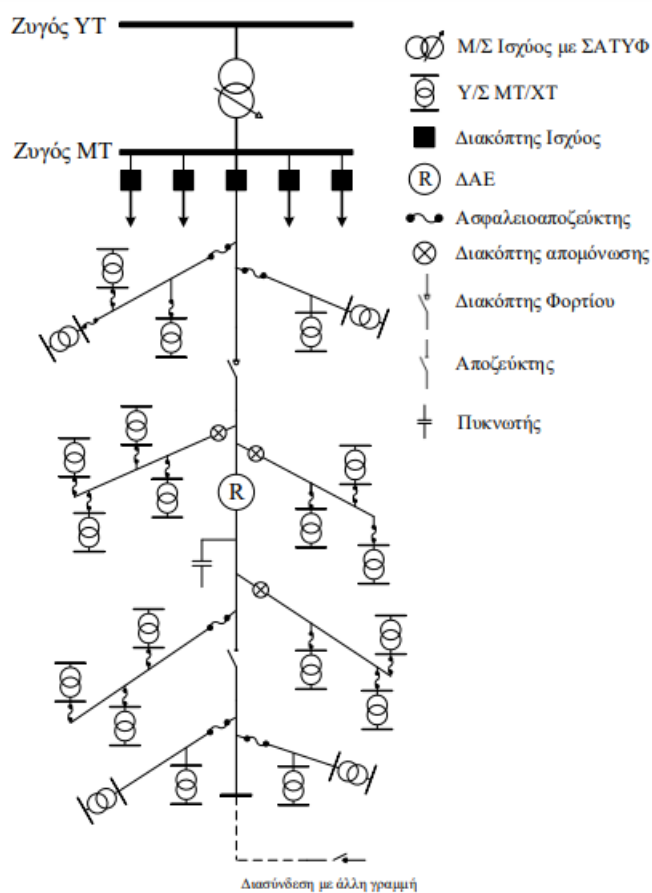
2.3.4 Κατανεμόμενα φορτία (dispatchable loads)

Τα κατανεμόμενα φορτία είναι φορτία που υπάρχουν στο δίκτυο όμως έχουν την ιδιαιτερότητα να είναι ευέλικτα ως προς την χρονική στιγμή που θα γίνει η κατανάλωση και επίσης σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να αποτελούν μπαταρίες οι οποίες ανάλογα και με την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου απορροφούν ενέργεια ή παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο.

2.4 Τρόποι ελέγχου δικτύων διανομής

Στην αμέσως προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν κάποια στοιχεία που προστίθενται στο δίκτυο για την αποτελεσματικότερη λειτουργία του. Ο τηλεχειρισμός των παραπάνω στοιχείων βοηθά σημαντικά στην διαχείριση ώστε να γίνεται ολόένα και ευκολότερη. Ταυτόχρονα, αναπτύσσονται νέες μέθοδοι που μεταβάλλουν ταυτόχρονα πολλά στοιχεία χειρισμού ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία. Τα συστήματα ελέγχου αποτελούν τον κεντρικό έλεγχο ή τον αποκεντρωμένο ανάλογα με το εύρος του δικτύου που επιδιώκουν έλεγχο.

Ο κεντρικός έλεγχος πραγματοποιείται λαμβάνοντας μετρήσεις από διάφορους ζυγούς του δικτύου ώστε να ελέγχεται εάν υπάρχει ή όχι κάποια διαταραχή. Σε περίπτωση που γίνει αντιληπτό ότι κάτι δεν λειτουργεί σωστά προσπαθεί να λυθεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο αλλάζοντας τις καταστάσεις των στοιχείων ελέγχου θα προσπαθήσει να επαναφέρει το δίκτυο σε επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας. Το θετικό του κεντρικού ελέγχου είναι ότι επαναφέρει ολόκληρο το δίκτυο, όμως ο μεγάλος



Σχήμα 2.5: Ακτινικό Δίκτυο Διανομής με εγκατεστημένα τα βασικά στοιχεία για την λειτουργία του (Διδακτορική Διατριβή «Βελτιστοποίηση Λειτουργίας και Προγραμματισμού Ανάπτυξης Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας», Ν. Χ. Κουτσούκης)

όγκος δεδομένων κάνει την βελτιστοποίηση να χρειάζεται αρκετό χρόνο για να δώσει τα αποτελέσματα. Η βέλτιστη ροή ισχύος αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής κεντρικού ελέγχου σε ένα δίκτυο διανομής.

Με τον αποκεντρωμένο έλεγχο επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός του προβλήματος σε μικρότερα. Έτσι τώρα η βελτιστοποίηση μοιράζεται σε μικρότερα τμήματα του δικτύου, έχει να επεξεργαστεί μικρότερο όγκο δεδομένων και ως αποτέλεσμα βγαίνουν πιο άμεσα τα αποτελέσματά της. Το κυριότερο μειονέκτημα που παρουσιάζει αυτή η μέθοδος είναι ότι καθώς η βελτιστοποίηση γίνεται μόνο τοπικά, εάν παρουσιαστεί κάποια μεγάλη διαταραχή σε ένα σημείο του δικτύου ενδεχομένως να είναι δύσκολη η εύρεση μίας αποτελεσματικής λύσης επειδή θα πρέπει οπωσδήποτε να συνεργαστούν παραπάνω σημεία ελέγχου για την επαναφορά του δικτύου.

Κεφάλαιο 3

Διεσπαρμένη Παραγωγή

3.1 Εισαγωγή

Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) κάνουν την εμφάνισή τους όλο και πιο έντονα τα τελευταία χρόνια. Αποτελούν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία συνδέεται άμεσα στο δίκτυο διανομής [8] και κάπως έτσι δημιουργείται αμφίδρομη διαδρομή του ηλεκτρικού ρεύματος. Άλλοι ορισμοί που χρησιμοποιούνται στην διεθνή βιβλιογραφία είναι οι λέξεις διάσπαρτη (dispersed), αποκεντρωμένη (decentralized) και ενσωματωμένη (embedded) παραγωγή.

Το μέγεθός τους μπορεί να κυμαίνεται ανάλογα με την παραγόμενη ισχύ τους από λίγα kW έως και μερικές δεκάδες MW. Η διεσπαρμένη παραγωγή αυξάνεται συνεχώς. Οι ΑΠΕ αποτελούν πολύ σημαντικό κομμάτι της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και έτσι πολλές χώρες επενδύουν ώστε μεγάλο μέρος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να βασίζεται σε αυτές. Επίσης, η αύξηση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που τοποθετούνται σε ένα δίκτυο μπορεί να τις καθιστά αρκετές ώστε να καλύψουν την αύξηση ζήτησης που παρατηρούμε χρόνο με τον χρόνο και έτσι να μην χρειαστεί η εγκατάσταση ενός μεγάλου σταθμού παραγωγής και γραμμών μεταφοράς.

Σ' ότι αφορά το οικονομικό κομμάτι της παραγωγής ενέργειας, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής αποτελούν μικρότερο οικονομικό ρίσκο σε σχέση με μεγάλους σταθμούς παραγωγής. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα περισσότερο ανταγωνισμό και επομένως χαμηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για τους καταναλωτές. Επίσης η διείσδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των δικτύων διανομής μπορεί να προσφέρει στους καταναλωτές ένα πιο σταθερό δίκτυο σ' ότι αφορά τις απώλειες, την ποιότητα ισχύος και την αξιοπιστία του δικτύου.

Οι ΜΔΠ ανάλογα με το μέγεθός τους ή με την τεχνολογία που χρησιμοποιούν χωρίζονται σε κάποιες κατηγορίες. Αρχικά αν κατηγοριοποιηθούν με βάση το μέγεθος χαρακτηρίζονται ως:

- Πολύ μικρές (micro), $\sim 1W-5kW$
- Μικρές (small), $5kW-5MW$
- Μεσαίες (medium), $5MW-50MW$
- Μεγάλες (large), $50MW-\sim 300MW$

Ένας εναλλακτικός τρόπος κατηγοριοποίησής τους όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι με βάση την τεχνολογία που χρησιμοποιούν για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:



Σχήμα 3.1: Φωτοβολταϊκό Πάρκο

- Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μικρά υδροηλεκτρικά, μονάδες εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας
- Μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού, όπως για παράδειγμα μηχανές εσωτερικής καύσης, κυψέλες καυσίμου, γεωθερμίας και βιομάζας
- Τέλος, συνδυασμός των δύο παραπάνω. Δηλαδή μονάδες ΑΠΕ σε συνδυασμό με συμβατικές μονάδες παραγωγής

Οι κυριότερες ΜΔΠ που εγκαθίστανται στα δίκτυα διανομής είναι:

- Φωτοβολταϊκά. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Συνήθως το δομικό υλικό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των φωτοβολταϊκών είναι το πυρίτιο (Si) ή κάποιο άλλο ημιαγώγιμο υλικό. Το μεγάλο θετικό αυτών των συστημάτων είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν από συσκευές πολύ μικρής ισχύος λιγότερο του ενός W έως και μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα τάξεως μερικών MW. Ένα τέτοιο έργο αποτελείται από πολλές μικρές κυψέλες. Επίσης ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα τους είναι η ανθόρυβη λειτουργία τους με μηδενική ρύπανση.
- Ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Για να μπορεί μία ανεμογεννήτρια να βρίσκεται σε λειτουργία και να παράγει ενεργό ισχύ πρέπει ο άνεμος να ξεπερνά ένα όριο ταχύτητας (ταχύτητα εκκίνησης). Εάν ο άνεμος αποκτήσει πολύ μεγάλη κινητική ενέργεια και ξεπεράσει ένα άνω όριο (ταχύτητα αποκοπής) η λειτουργία της ανεμογεννήτριας διακόπτεται λόγω του υψηλού κινδύνου πρόκλησης μηχανικών βλαβών και η παραγωγή ενεργού ισχύος γίνεται μηδενική. Η ανεμογεννήτρια παράγει την ονομαστική ισχύ όταν ο άνεμος έχει ταχύτητα μεγαλύτερη ή ίση με την ονομαστική ταχύτητα και μικρότερη από την ταχύτητα αποκοπής.
- Υδροηλεκτρικοί σταθμοί. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια του νερού σε ηλεκτρική με την βοήθεια υδροστροβίλων. Οι βασικότεροι παράγοντες που ορίζουν το πόση ενέργεια θα παραχθεί από ένα τέτοιο σταθμό αφορούν τον όγκο του νερού που πέφτει στον υδροστρόβιλο καθώς και η υψομετρική διαφορά που υπάρχει από την εκκίνηση της ροής του νερού μέχρι τον υδροστρόβιλο.



Σχήμα 3.2: Αιολικό Πάρκο



Σχήμα 3.3: Υδροηλεκτρικό Εργοστάσιο Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

3.2 Οφέλη στα δίκτυα διανομής από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής

Πέρα από τα οικονομικά ζητήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να επιφέρουν θετικές επιδράσεις σ' ένα δίκτυο σ' ότι αφορά την τελική του λειτουργικότητα. Ένα μέρος των φορτίων μπορεί να καλύπτεται από τις μονάδες αυτές, επομένως τα δίκτυα μεταφοράς μεταφέρουν μικρότερη ισχύ. Αυτό οδηγεί σε καλύτερη κατάσταση του εξοπλισμού τους καθώς καταπονείται λιγότερο. Επίσης η άεργος ισχύς που προσφέρουν στο δίκτυο είναι ελεγχόμενη. Άρα μπορεί να έχουν αποτελέσματα παρόμοια με τις χωρητικές αντισταθμίσεις.

Ένα πιο περίπλοκο κομμάτι είναι οι απώλειες ισχύος. Απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος υπάρχουν σ' ένα δίκτυο διανομής και οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να οδηγήσουν είτε σε αύξηση είτε σε μείωση αυτών των απωλειών. Έτσι έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που δίνουν τις θέσεις που θα πρέπει να τοποθετηθούν οι μονάδες αυτές ώστε να υπάρχει η μέγιστη μείωση απωλειών. Αυτό προσφέρει σημαντικό κέρδος στο δίκτυο καθώς ως γνωστών στο κομμάτι της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας παρατηρούνται οι μεγαλύτερες απώλειες ισχύος λόγω των μεγάλων αντιστάσεων των γραμμών.

Τέλος, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μπορούν με τον συνδυασμό μπαταριών να λειτουργήσουν ως εφεδρεία σε δίκτυα διανομής σε περιπτώσεις διακοπής της ηλεκτροδότησης.

3.3 Προβλήματα δικτύων διανομής λόγω υψηλής διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα στα δίκτυα διανομής από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής είναι η αμφίδρομη ροή ισχύος στις γραμμές τους. Πριν από την εγκατάσταση μίας μονάδας γίνεται μία μελέτη ώστε να διαπιστωθεί εάν δεν προκληθεί στο δίκτυο παραβίαση των ορίων τάσεων ή φόρτισης των γραμμών διανομής. Στην συνέχεια τοποθετούνται στο δίκτυο και ο διαχειριστής τα αντιμετωπίζει ως αρνητικά φορτία.

Τα σημαντικότερα προβλήματα που παρατηρούμε στο δίκτυο όταν υπάρχει μεγάλη διείσδυση ΜΔΠ είναι ανύψωση τάσης, συμφόρηση των γραμμών και επιπτώσεις στην προστασία του δικτύου. Η υψηλή διείσδυση ΜΔΠ και κυρίως οι ΑΠΕ οδηγούν σε ανεπιθύμητες διακυμάνσεις της τάσης που ελαττώνουν σημαντικά την ποιότητα του δικτύου. Η τάση πρέπει να κυμαίνεται εντός συγκεκριμένων ορίων. Επίσης οι ΜΔΠ είναι δυνατό να οδηγήσουν σε έντονη φόρτιση των γραμμών με αποτέλεσμα το ρεύμα που ρέει στις γραμμές να φτάνει πολύ κοντά στα τεχνικά τους όρια. Η προστασία του δικτύου είναι ένα ακόμη πολύ σημαντικό κομμάτι. Όταν σχεδιάστηκαν τα περισσότερα από τα σημερινά δίκτυα δεν είχε γίνει μελέτη εγκατάστασης ΜΔΠ. Οι διαχειριστές θεωρούσαν ότι η ροή ισχύος είναι μονόπλευρη από τους υποσταθμούς προς τους καταναλωτές. Σήμερα όμως με την ένταξη αυτών των μονάδων τα δεδομένα αλλάζουν. Η ροή ισχύος μπορεί να είναι και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αυτό το γεγονός μπορεί να έχει ως συνέπεια την μεταβολή της στάθμης βραχυκύκλωσης, αμφίδρομη ροή ρεύματος βραχυκύκλωσης ή εσφαλμένη λειτουργία των προστασιών.

3.4 Ενεργά και παθητικά δίκτυα διανομής

Μετά την εισαγωγή ΜΔΠ στα δίκτυα διανομής, προς αποφυγή των επιπτώσεων που προκαλούν στο δίκτυο, αναπτύχθηκαν κάποιες μέθοδοι ελέγχου. Σύμφωνα με αυτές τις μεθόδους τα δίκτυα χωρίζονται σε δύο θεμελιώδεις κατηγορίες, τα παθητικά και τα ενεργά.

Αρχικά αναπτύχθηκαν τα παθητικά δίκτυα διανομής. Σε αυτά τα δίκτυα μία μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής αντιμετωπίζεται σαν ένα αρνητικό φορτίο και λειτουργεί με σταθερό συντελεστή ισχύος. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται “fit and forget”. Δυστυχώς με αυτή την μέθοδο δεν είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν στο μέγιστο οι ΜΔΠ καθώς σε πολλές περιπτώσεις δεν πληρούν τα κριτήρια για την ένταξή τους στο δίκτυο και γι’ αυτό η διείσδυσή τους παραμένει σε χαμηλά ποσοστά. Παρ’ όλα αυτά, σήμερα τα περισσότερα δίκτυα είναι παθητικά όμως γίνεται μία προσπάθεια για την μετατροπή τους σε πιο σύγχρονες μορφές που θα προσφέρουν καλύτερα αποτελέσματα με περισσότερες δυνατότητες ελέγχου.

Σήμερα γίνεται προσπάθεια ώστε να γίνει μία σταδιακή μετατροπή των παθητικών δικτύων διανομής σε ευφυή δίκτυα (smart grids), τα οποία μπορούν να ελέγξουν τις ενέργειες χειρισμού όλων των συνδεδεμένων χρηστών σε αυτά ώστε να μπορούν να προσφέρουν οικονομική ενέργεια με μεγάλη αξιοπιστία. Ένα πρώτο βήμα γι’ αυτήν την εξέλιξη αποτελούν τα ενεργά δίκτυα διανομής. Όπως περιγράψαμε παραπάνω (ενότητα 2.4) μπορούμε να προσθέσουμε δύο είδη ελέγχου (κεντρικός και αποκεντρωμένος έλεγχος) στα δίκτυα ώστε να βελτιώσουμε την ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μεταφέρει το δίκτυο αλλά και να γίνεται καλύτερη οικονομική διαχείριση. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η αλλαγή κατάστασης των στοιχείων στο δίκτυο και αποκτά μεγαλύτερη ευελιξία και γίνεται δυνατή μεγαλύτερη διείσδυση ΜΔΠ σε σχέση με το παθητικό. Επίσης μπορεί να γίνει έλεγχος της ενεργού και άεργου ισχύος των ΜΔΠ είτε με περικοπή ενεργού ισχύος, είτε με έγχυση ή απορρόφηση άεργου ισχύος από τις ΜΔΠ για την βελτίωση των επιπέδων των τάσεων αλλά και μείωση των απωλειών άεργου ισχύος.

3.5 Ρυθμιστικά πλαίσια

Η κάθε χώρα έχει την δική της πολιτική για τα ρυθμιστικά πλαίσια που θα εφαρμόσει. Μεταξύ αυτών υπάρχουν και εκείνα που αφορούν τις ΜΔΠ και τον τρόπο που θα ενταχθούν στο δίκτυο. Κάποιοι τέτοιοι κανόνες αφορούν την σύνδεση και τον έλεγχο των ΜΔΠ στα δίκτυα διανομής, την διαχείριση των δικτύων, την αγοραπωλησία της ενέργειας που προσφέρουν οι ΜΔΠ και τον τρόπο που μπορεί μελλοντικά να γίνει η επέκταση των δικτύων με ΜΔΠ.

Οι «συμφωνίες σύνδεσης» είναι αυτές που καθορίζουν τα οικονομικά και ρυθμιστικά ζητήματα που προκύπτουν μεταξύ του διαχειριστή του δικτύου και του ιδιοκτήτη ΜΔΠ. Ανάλογα με το είδος της συμφωνίας οι ΜΔΠ χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη είναι αυτή που εφαρμόζεται η μέθοδος “fit and forget”. Σ’ αυτή την περίπτωση γίνεται εισαγωγή της μονάδας παραγωγής στο δίκτυο και στην συνέχεια δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στην παροχή ροής ισχύος που θα προσφέρει η μονάδα. Αυτές είναι οι σταθερές μονάδες (firm DG units), όμως υπάρχουν και οι μη σταθερές μονάδες (non-firm DG units). Σ’ αυτήν την περίπτωση είναι δυνατόν ο διαχειριστής να περικόπτει ποσοστό της παραγωγής όποτε το κρίνει απαραίτητο για την σωστή λειτουργία του δικτύου. Αυτό έχει οικονομικές συνέπειες στον ιδιοκτήτη της ΜΔΠ, όμως συνήθως

υπάρχει κάποια αποζημίωση για την ενέργεια που δεν αγοράζεται.

Υπάρχουν διάφορα ρυθμιστικά πλαίσια τα οποία μπορεί να έχουν διαφορετικούς στόχους. Ο αντικειμενικός στόχος μπορεί να είναι είτε η ελαχιστοποίηση των απωλειών, ή της περικοπής ενεργού ισχύος, ή ακόμα και των αποζημιώσεων που δίνονται στους ιδιοκτήτες.

Κεφάλαιο 4

Λογισμικό Ανάπτυξης Κώδικα

4.1 Προγραμματιστικό Περιβάλλον MATLAB

Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης της παρούσας εργασίας έγινε χρήση του λογισμικού MATLAB. Το MATLAB αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για μηχανικούς καθώς αποτελεί μία γλώσσα προγραμματισμού που μπορεί να αναπτύξει και να επιλύσει προβλήματα μαθηματικής ανάλυσης.

4.2 Περιγραφή του εργαλείου MATPOWER

Το εργαλείο MATPOWER είναι ένα δωρεάν, open-source πακέτο που αποτελείται από M-files του MATLAB. Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης που αφορούν την ροή φορτίου. Το MATPOWER αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο Cornell και χρησιμοποιείται ευρέως για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Με την εγκατάσταση του MATPOWER ο χρήστης έχει πρόσβαση σε κάποια έτοιμα μοντέλα Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας στα οποία μπορεί να επέμβει ώστε να δημιουργήσει τα σενάρια που θέλει και να παρακολουθήσει πώς διαμορφώνεται η ροή φορτίου και άλλα αποτελέσματα.

Η εντολή “runpf” είναι η βασική εντολή για την εκτέλεση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για παρακολούθηση της ροής φορτίου. Αντίστοιχα, για βέλτιστη ροή φορτίου χρησιμοποιείται η εντολή “runopf”. Ενώ τέλος, για βέλτιστη ροή φορτίου με ταυτόχρονο έλεγχο των γεννητριών και αποσύνδεση των πιο κοστοβόρων, υπάρχει η εντολή “runuopf”.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η εντολή “runpf”. Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 4.1) βλέπουμε την σύνταξή της. Επιστρέφει ένα flag SUCCESS το οποίο παίρνει την τιμή 1 όταν μπόρεσε να εκτελεστεί η ροή φορτίου στο σύστημα, ενώ παίρνει την τιμή 0 όταν υπάρχουν παραβιάσεις που δεν επιτρέπουν την ροή φορτίου. Η μεταβλητή RESULTS είναι ένα struct που περιέχει όλα τα αποτελέσματα για τα δεδομένα που έχουμε βάλει ως είσοδο στο MATPOWER, δηλαδή για παράδειγμα πίνακα για

```
runpf Runs a power flow.  
[RESULTS, SUCCESS] = runpf(CASEDATA, MPOPT, FNAME, SOLVEDCASE)
```

Σχήμα 4.1: Εκτέλεση ενός ΣΗΕ με MATPOWER

τα bus, branch, gen, gencost κτλ. Τα δεδομένα εισόδου της εντολής “runpf” είναι όλα προαιρετικά. Η μεταβλητή CASEDATA είναι το όνομα του αρχείου ή της δομής που περιέχει τα δεδομένα εισόδου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Το όρισμα MPOPT, όταν δίνεται, καθορίζει τον αλγόριθμο επίλυσης και τις επιλογές εξόδου. Το FNAME μπορεί να είναι το όνομα του αρχείου που επιθυμεί ο χρήστης να αποθηκευτεί η έξοδος. Τέλος, αν χρησιμοποιηθεί το όρισμα SOLVEDCASE εκεί δημιουργείται ένα αρχείο με αυτό το όνομα στο οποίο αποθηκεύεται η λύση. Το αρχείο έχει κατάληξη .m, εκτός και αν δοθεί το όνομα με κατάληξη .mat.

4.2.1 Εισαγωγή Δεδομένων

Για την εκτέλεση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να περασθούν κατάλληλα τα δεδομένα που είναι απαραίτητα. Δημιουργείται η δομή case εντός της οποίας εισάγονται οι μεταβλητές baseMVA, bus, branch, gen, και προαιρετικά gencost. Η μεταβλητή baseMVA είναι ένας αριθμός, ενώ οι υπόλοιπες είναι πίνακες. Το αρχείο του case φορτώνεται στην μεταβλητή mpc με την εντολή «mpc = loadcase(casefile)» και έτσι αυτή η μεταβλητή περιέχει όλα τα δεδομένα του συστήματος που θα τρέξει. Στην συνέχεια υπάρχει αναλυτική επεξήγηση των πινάκων που υπάρχουν στο αρχείο case (Πίνακες 4.1, 4.2, 4.3, 4.4).

Πίνακας 4.1: Bus Data

| Bus Data | Στήλη | Περιγραφή |
|----------|-------|--|
| BUS_I | 1 | Αριθμός ζυγού (θετικός ακέραιος) |
| BUS_TYPE | 2 | Τύπος ζυγού (1 = PQ, 2 = PV, 3 = ref, 4 = isolated) |
| PD | 3 | Ζήτηση ενεργού ισχύος (MW) |
| QD | 4 | Ζήτηση άεργου ισχύος (MVar) |
| GS | 5 | Εγκάρσια αγωγιμότητα διακλαδώσεων (MW ζητούμενη σε V=1.0 p.u.) |
| BS | 6 | Εγκάρσια χωρητικότητα (MVar εγγεόμενη σε V=1.0 p.u.) |
| BUS_AREA | 7 | Αριθμός περιοχής (θετικός ακέραιος) |
| VM | 8 | Μέτρο τάσης (p.u.) |
| VA | 9 | Φασική γωνία της τάσης (μοίρες) |
| BASE_KV | 10 | Βασική τάση (kV) |
| ZONE | 11 | Ζώνη απωλειών (θετικός ακέραιος) |
| VMAX | 12 | Μέγιστο μέτρο τάσης (p.u.) |
| VMIN | 13 | Ελάχιστο μέτρο τάσης (p.u.) |
| LAM_P | 14 | Πολλαπλασιαστής Lagrange της απόκλισης ενεργού ισχύος (u/MW) |
| LAM_Q | 15 | Πολλαπλασιαστής Lagrange της απόκλισης άεργου ισχύος (u/MVar) |
| MU_VMAX | 16 | Πολλαπλασιαστής Kuhn-Tucker του ανώτερου ορίου τάσης (u/p.u.) |
| MU_VMIN | 17 | Πολλαπλασιαστής Kuhn-Tucker του κατώτερου ορίου τάσης (u/p.u.) |

Πίνακας 4.2: Generator Data

| Generator Data | Στήλη | Περιγραφή |
|----------------|-------|--|
| GEN_BUS | 1 | Αριθμός Ζυγού |
| PG | 2 | Ενεργός ισχύς εξόδου (MW) |
| QG | 3 | Άεργος ισχύς εξόδου (MVar) |
| QMAX | 4 | Μέγιστη άεργος ισχύς εξόδου (MVar) |
| QMIN | 5 | Ελάχιστη άεργος ισχύς εξόδου (MVar) |
| VG | 6 | Μέτρο τάσης αναφοράς (p.u.) |
| MBASE | 7 | Βασική ισχύς MVA, default τιμή baseMVA |
| GEN_STATUS | 8 | Λειτουργία μηχανής (> 0 = σε λειτουργία, <= 0 = εκτός λειτουργίας) |
| PMAX | 9 | Μέγιστη έξοδος ενεργού ισχύος (MW) |
| PMIN | 10 | Ελάχιστη έξοδος ενεργού ισχύος (MW) |
| PC1 | 11 | Κάτω όριο εξόδου ενεργού ισχύος από την καμπύλη ικανότητας PQ (MW) |
| PC2 | 12 | Άνω όριο εξόδου ενεργού ισχύος από την καμπύλη ικανότητας PQ (MW) |
| QC1MIN | 13 | Ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος για PC1 (MVar) |
| QC1MAX | 14 | Μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος για PC1 (MVar) |
| QC2MIN | 15 | Ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος για PC2 (MVar) |
| QC2MAX | 16 | Μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος για PC2 (MVar) |
| RAMP_AGC | 17 | Μέγιστος ρυθμός αύξησης φορτίου / AGC (MW/min) |
| RAMP_10 | 18 | Μέγιστος ρυθμός αύξησης ισχύος για 10 λεπτά (MW) |
| RAMP_30 | 19 | Μέγιστος ρυθμός αύξησης ισχύος για 30 λεπτά (MW) |
| RAMP_Q | 20 | Μέγιστος ρυθμός αύξησης για άεργο ισχύ (MVar/min) |
| APF | 21 | Παράγοντας συμμετοχής της περιοχής |
| MU_PMAX | 22 | Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του ανώτερου ορίου της P_g (u/MW) |
| MU_PMIN | 23 | Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του κατώτερου ορίου της P_g (u/MW) |
| MU_QMAX | 24 | Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του ανώτερου ορίου της Q_g (u/MVar) |
| MU_QMIN | 25 | Kuhn-Tucker πολλαπλασιαστής του κατώτερου ορίου της Q_g (u/MVar) |

Πίνακας 4.3: Branch Data

| Branch Data | Στήλη | Περιγραφή |
|-------------|-------|--|
| F_BUS | 1 | Ζυγός αναχώρησης |
| T_BUS | 2 | Ζυγός άφιξης |
| BR_R | 3 | Αντίσταση (p.u.) |
| BR_X | 4 | Επαγωγική αντίδραση (p.u.) |
| BR_B | 5 | Ολική χωρητικότητα γραμμής (p.u.) |
| RATE_A | 6 | Μακροπρόθεσμο όριο MVA, 0 για απεριόριστο |
| RATE_B | 7 | Βραχυπρόθεσμο όριο MVA, 0 για απεριόριστο |
| RATE_C | 8 | Όριο μεταφερόμενης ισχύος MVA έκτακτης ανάγκης, 0 για απεριόριστο |
| TAP | 9 | Ονομαστικός λόγος μετασχηματισμού |
| SHIFT | 10 | Αλλαγή φάσης μετασχηματιστή (μοίρες), θετική => καθυστέρηση |
| BR_STATUS | 11 | Κατάσταση γραμμής μεταφοράς (1 = σε λειτουργία, 0 = εκτός λειτουργίας) |
| ANGMIN | 12 | Ελάχιστη διαφορά φάσης τάσεων (μοίρες) |
| ANGMAX | 13 | Μέγιστη διαφορά φάσης τάσεων (μοίρες) |

Πίνακας 4.4: Generator Cost Data

| Generator Cost Data | Στήλη | Περιγραφή |
|---------------------|-------|--|
| MODEL | 1 | Μοντέλο, 1 = τμηματικά γραμμικό μοντέλο, 2 = πολυωνυμικό |
| STARTUP | 2 | Κόστος εκκίνησης σε US dollars |
| SHUTDOWN | 3 | Κόστος τερματισμού σε US dollars |
| NCOST | 4 | Αριθμός σημείων για τμηματικά γραμμική συνάρτηση ή αριθμός συντελεστών για πολυωνυμική συνάρτηση κόστους |
| COST | 5 | Παράμετροι κόστους που ορίζουν την συνολική συνάρτηση κόστους |

4.2.2 Μοντελοποίηση των δεδομένων

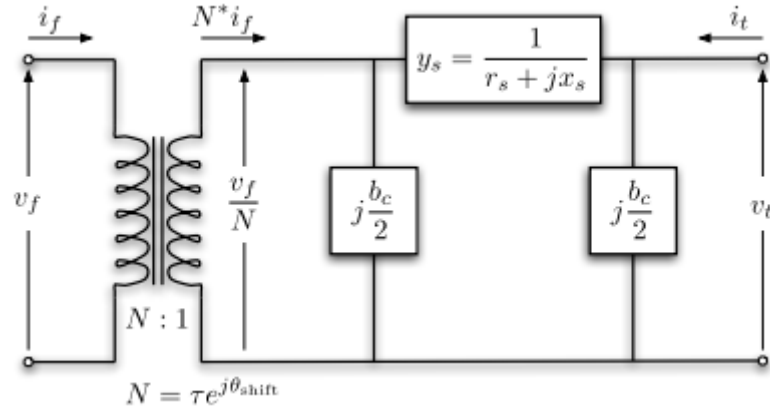
Το MATPOWER εκτελεί ανάλυση ροής ισχύος για AC μοντέλα και απλοποιημένα DC. Τα μεγέθη εκφράζονται ανά μονάδα και οι γωνίες σε ακτίνια. Οι γεννήτριες που δεν είναι συνδεδεμένες δεν λαμβάνονται υπόψιν και όλα τα buses αριθμούνται διαδοχικά ξεκινώντας από το 1.

Μορφή δεδομένων

Τα αρχεία που χρησιμοποιεί το MATPOWER είναι τύπου .m ή .mat και στο τέλος επιστρέφει μία δομή δεδομένων του MATLAB. Τα πεδία που περιέχει αυτή η δομή είναι baseMVA, bus, branch, gen και προαιρετικά gencost.

Γραμμές μεταφοράς

Όλες οι γραμμές μεταφοράς (εξαιρούνται οι γραμμές συνεχούς ρεύματος), οι μετασχηματιστές και οι μετασχηματιστές φάσης μοντελοποιούνται με το βασικό π μοντέλο με



Σχήμα 4.2: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς

σε σειρά αντίσταση $z_s = r_s + jx_s$ με συνολική χωρητικότητα φόρτισης b_c σε σειρά με ιδανικό μετασχηματιστή φάσης. Ο μετασχηματιστής που έχει ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού τ και αλλαγή φάσης με γωνία θ_{shift} είναι τοποθετημένος στην αρχή και το τέλος της γραμμής μεταφοράς όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Οι παράμετροι r_s, x_s, b_c, t και θ_{shift} αντιστοιχούν στις στήλες $BR_R(3), BR_X(4), BR_B(5), TAP(9)$, και $SHIFT(10)$ του πίνακα των γραμμών μεταφοράς (branch). Τα ρεύματα από άκρη σε άκρη της γραμμής μεταφοράς μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει ενός πίνακα αγωγιμοτήτων Y_{br} 2×2 και των τάσεων v_f και v_t .

$$\begin{bmatrix} i_f \\ i_t \end{bmatrix} = Y(b_r) \begin{bmatrix} v_f \\ v_t \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

Σύμφωνα με το π -μοντέλο ισχύει $y_s = 1/z_s$ και ο πίνακας αγωγιμοτήτων μπορεί να γραφεί ως

$$Y(b_r) = \begin{bmatrix} (y_s + j\frac{b_c}{2})\frac{1}{\tau^2} & -y_s\frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} \\ -y_s\frac{1}{\tau e^{j\theta_{shift}}} & y_s + j\frac{b_c}{2} \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Γεννήτριες

Μία γεννήτρια αποτελεί την έγχυση ισχύος σε ένα bus. Για μία γεννήτρια i ισχύει:

$$s_g^i = p_g^i + jq_g^i \quad (4.3)$$

Με $S_g = P_g + jQ_g$ να είναι ένα διάνυσμα $n_g \times 1$. Τα MW και MVAr πριν μετατραπούν στο ανά μονάδα σύστημα του p_g^i και q_g^i αντιστοιχούν στις στήλες PG (2) και QG (3) του πίνακα gen.

Φορτία

Τα φορτία στο MATPOWER μοντελοποιούνται ως σταθερές τιμές ενεργού και άεργου ισχύος σε έναν ζυγό (bus). Για τον ζυγό i , το φορτίο είναι:

$$s_d^i = p_d^i + jq_d^i \quad (4.4)$$

και $S_d = P_d + jQ_d$ είναι ένα διάνυσμα $n_b \times 1$ με τα φορτία σε κάθε ζυγό. Τα MW και MVA_r πριν μετατραπούν στο ανά μονάδα σύστημα του p_d^i και q_d^i αντιστοιχούν στις στήλες PD (3) και QD (4) του πίνακα bus. Σε αυτές τις στήλες μπορούν να υπάρξουν και αρνητικές τιμές για αναπαράσταση της διεσπαρμένης παραγωγής.

Εγκάρσια στοιχεία

Ένα στοιχείο εγκάρσια συνδεδεμένο, όπως ένας πυκνωτής ή ένα πηνίο μοντελοποιείται ως σταθερή σύνθετη αντίσταση στην γείωση ενός ζυγού. Η είσοδος του στοιχείου στον ζυγό i γίνεται ως εξής:

$$y_{sh}^i = g_{sh}^i + jb_{sh}^i \quad (4.5)$$

και $Y_{sh} = G_{sh} + jB_{sh}$ είναι ένα διάνυσμα $n_b \times 1$ αντιστάσεων των εγκάρσιων στοιχείων όλων των ζυγών. Οι παράμετροι g_{sh}^i και b_{sh}^i είναι στις στήλες GS (5) και BS (6) του πίνακα των ζυγών (bus) και αναπαρίστανται σε MW και MVA_r με ονομαστικό μέτρο τάσης 1.0 p.u. και γωνία 0.

Κεφάλαιο 5

Βέλτιστη Επαναδιαμόρφωση Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

5.1 Εισαγωγή

Στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως εφαρμόζεται το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal Power Flow) ώστε τα μεταβλητά στοιχεία του δικτύου να βρίσκονται στην καλύτερη δυνατή κατάσταση για να λειτουργεί σωστά το δίκτυο. Πρόκειται για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αρχικά πρέπει να δοθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν τα ηλεκτρικά μεγέθη του συστήματος. Στην συνέχεια με βάση τις μεταβλητές ελέγχου μπορούν να υπολογιστούν όλες οι μεταβλητές του συστήματος.

Στο πρόβλημα BPI προσδιορίζονται κάποιοι περιορισμοί ώστε να λειτουργεί το δίκτυο με κάποιες προϋποθέσεις. Κάθε δυνατή κατάσταση λειτουργίας, δηλαδή κάθε κατάσταση που τηρούνται οι περιορισμοί που έχουν τεθεί, αποτελεί μία εφικτή λύση. Το πρόβλημα δηλαδή αναζητά την βέλτιστη από ένα σύνολο εφικτών λύσεων.

Για να μπορεί να αξιολογείται σωστά μία πιθανή λύση δημιουργείται η αντικειμενική συνάρτηση. Η τιμή της εξαρτάται από το πόσο κατάλληλη είναι η συγκεκριμένη λύση για την επίλυση του προβλήματος. Στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της τιμής που παίρνει η αντικειμενική συνάρτηση. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα που χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου.

Η επίλυση του προβλήματος BPI αποτελεί εξαιρετικό εργαλείο για τον διαχειριστή του δικτύου διανομής αφού του επιτρέπει να βρει εκείνο το σημείο λειτουργίας που έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Δηλαδή για δίκτυα διανομής που έχουν εγκατεστημένες ΜΔΠ μπορούν να μεταβληθούν η τάση και η παραγωγή των γεννητριών ώστε να διατηρηθεί το δίκτυο σε κατάλληλα επίπεδα.

Παράλληλα, αναπτύσσονται μοντέλα τα οποία με τηλεχειρισμό ορισμένων στοιχείων του δικτύου προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και καλύτερα αποτελέσματα. Τα στοιχεία αυτά που διαχειρίζονται είναι συνήθως διακόπτες απομόνωσης και εγκάρσιες αντισταθμίσεις που έχουν περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Όταν μεταβάλλεται η βασική τοπολογία του δικτύου με τον χειρισμό ορισμένων διακοπών που θέτουν εντός ή εκτός λειτουργίας ορισμένες γραμμές αποτελεί την επαναδιαμόρφωση του δικτύου (network reconfiguration). Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος σε συνδυασμό με τον έλεγχο κάποιων νέων μεταβλητών, αποτελεί την βέλτιστη επαναδιαμόρφωση του

δικτύου.

5.2 Διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος

Για την ευκολότερη και πιο απλοποιημένη μέθοδο αναπαράστασης του δικτύου διανομής θα γίνουν κάποιες παραδοχές. Οι γραμμές θεωρείται ότι έχουν όλες την ίδια σύνθετη αντίσταση σε κάθε φάση. Οι γραμμές όπως και τα φορτία θεωρούνται όλα συμμετρικά. Τα μέτρα τους έχουν την ίδια τιμή σε κάθε φάση και η γωνία διαφέρει κατά 120° . Μετά από αυτή την παραδοχή είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το ανά μονάδα σύστημα στην αναπαράσταση των ηλεκτρικών μεγεθών και στην μονογραμμική αναπαράσταση του τριφασικού συστήματος.

Τα δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή είναι ενεργά ακτινικά δίκτυα διανομής με όλα τους τα στοιχεία να βρίσκονται στην μέση τάση. Δηλαδή, το δίκτυο ξεκινά από τον υποσταθμό υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ και αναπαριστά τους πελάτες ΜΤ ή φτάνει έως και πριν τους μετασχηματιστές ΜΤ/ΧΤ. Το δίκτυο της χαμηλής τάσης δεν εξετάζεται ξεχωριστά στην παρούσα εργασία.

Η μορφή των δικτύων που θα μελετηθούν είναι όπως στο σχήμα 5.1. Πρόκειται για ακτινικά δίκτυα που έχουν ένα μόνο σημείο τροφοδοσίας, στον ζυγό ταλάντωσης, και στην συνέχεια οι γραμμές του δικτύου μαζί με τις γραμμές (διακεκομμένες) που έχουν την δυνατότητα να βρεθούν εκτός από τον διακόπτη που τους συνδέει με τους ζυγούς. Επίσης φαίνονται οι ΜΔΠ (σύμβολο γεννήτριας) καθώς και οι χωρητικές αντισταθμίσεις (σύμβολο πυκνωτή). Τέλος, καθώς σε σχεδόν όλους τους ζυγούς υπάρχει συνδεδεμένο φορτίο, αυτό δεν εμφανίζεται στο σχήμα.

Αρχικά θα γίνει ένας ορισμός κάποιων συμβόλων έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει η μαθηματική μοντελοποίηση πιο εύκολα. Επομένως, θεωρείται ότι:

- N : το σύνολο των ζυγών του δικτύου
- L : το σύνολο των γραμμών του δικτύου
- G : το σύνολο των μη σταθερών ΜΔΠ του δικτύου

Καθώς θα τοποθετηθεί κατά το μέγιστο μία ΜΔΠ σε κάθε ζυγό μπορεί να θεωρηθεί το G υποσύνολο του N με τα στοιχεία του να είναι οι ζυγοί πάνω στους οποίους θα τοποθετηθούν οι ΜΔΠ.

Στην συνέχεια θα ορίσουμε τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν κάθε ζυγό N :

- Η τάση του ζυγού i :

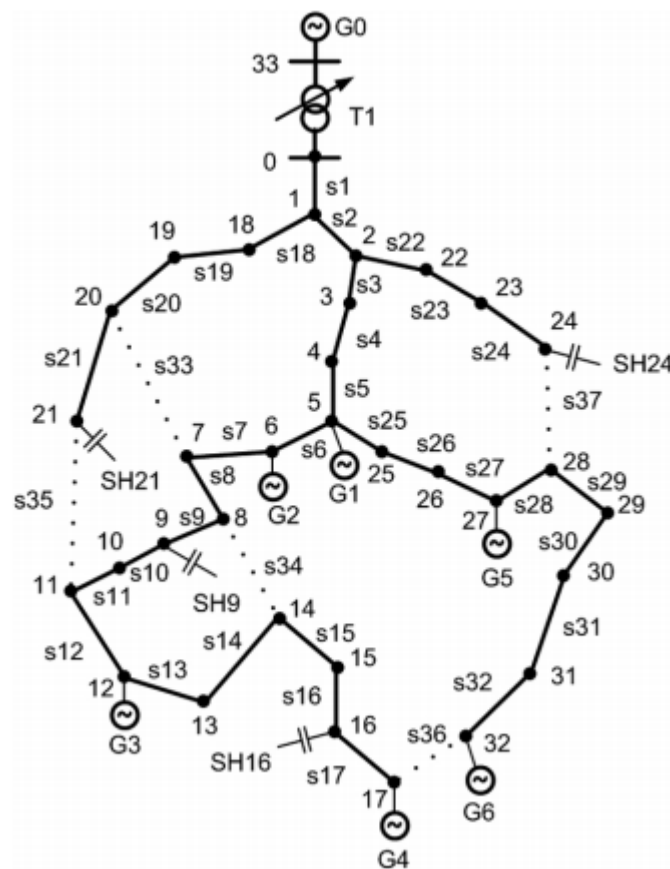
$$V_i = V_i \cdot e^{j\theta_i} = V_i \angle \theta_i, i \in N \quad (5.1)$$

Όπου V_i και θ_i το μέτρο και η γωνία της τάσης του ζυγού i .

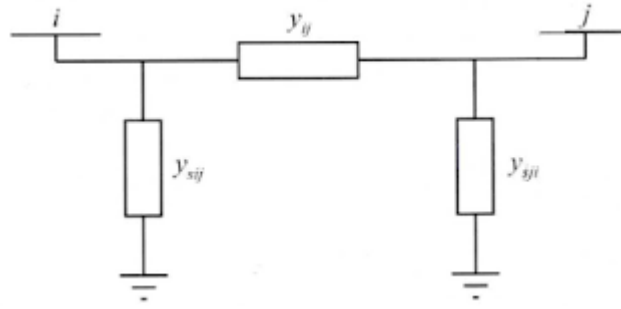
- Κατανάλωση ισχύος στο ζυγό i :

$$S_{d_i} = P_{d_i} + jQ_{d_i}, i \in N \quad (5.2)$$

Όπου P_{d_i} και Q_{d_i} η ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος από τον ζυγό i .



Σχήμα 5.1: Τυπική Μορφή Εξεταζόμενων Δικτύων Διανομής (“A Comprehensive Centralized Approach for Voltage Constraints Management in Active Distribution Grid”, F. Capitanescu, I. Bilibin, E. R. Ramos)



Σχήμα 5.2: Ισοδύναμο Π μοντέλο γραμμής δικτύου

- Παραγωγή ισχύος στον ζυγό i :

$$S_{gi} = P_{gi} + jQ_{gi}, i \in G \quad (5.3)$$

Όπου P_{gi} και Q_{gi} η παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς στον ζυγό i από ΜΔΠ.

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορεί να γίνει κατανοητό ότι η συνολική ισχύς που εφαρμόζεται σε κάθε ζυγό είναι η διαφορά της κατανάλωσης από την παραγωγή. Ανάλογα με το αν η παραγόμενη ισχύς ή η καταναλισκόμενη είναι μεγαλύτερη, η ισχύς στον ζυγό παίρνει θετική ή αρνητική τιμή.

- Συνολική έγχυση ισχύος:

$$S_i = S_{gi} - S_{di} \Leftrightarrow P_i + jQ_i = (P_{gi} - P_{di}) + j(Q_{gi} - Q_{di}) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} P_i = P_{gi} - P_{di} \\ Q_i = Q_{gi} - Q_{di} \end{cases} \quad (5.4)$$

$$(5.5)$$

Οι γραμμές μεταφοράς μοντελοποιούνται σύμφωνα με το Π μοντέλο όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται μία γραμμή που συνδέει τους ζυγούς i και j . Η αγωγιμότητα y_{ij} αποτελεί την αγωγιμότητα της γραμμής, ενώ οι y_{si} και y_{ji} είναι εγχάρσιες αγωγιμότητες. Αν χωριστούν τα πραγματικά από τα φανταστικά μέρη προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις.

- Αγωγιμότητα σειράς:

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}, i - j \in L \quad (5.6)$$

$$\text{Όπου } g_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}, b_{ij} = \frac{-x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}$$

με r_{ij} , x_{ij} η αντίσταση και αντίδραση σειράς της γραμμής $i - j$ αντίστοιχα.

- Εγχάρσιες αγωγιμότητες:

$$y_{si} = g_{si} + jb_{si} \quad (5.7)$$

$$y_{ji} = g_{ji} + jb_{ji} \quad (5.8)$$

Στην παρούσα εργασία οι εγχάρσιες αγωγιμότητες θεωρούνται μηδενικές έτσι ώστε οι εξισώσεις που θα προκύψουν να είναι απλοποιημένες.

- Ροή ισχύος σε γραμμή:

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* p.u. \quad (5.9)$$

Πρόκειται για την ισχύ που μεταφέρεται από τον ζυγό i στον ζυγό j . Όπου I_{ij}^* ο συζυγής της έντασης του ρεύματος που διαρρέει την γραμμή $i - j$. Υπολογίζεται από την σχέση:

$$I_{ij} = (V_i - V_j) y_{ij} \quad (5.10)$$

Εφαρμόζοντας την (5.10) στην (5.9) και χωρίζοντας το φανταστικό από το πραγματικό μέρος. Προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις για την ισχύ που εφαρμόζεται από τον ζυγό i στον ζυγό j :

$$P_{ij} = g_{ij} V_i^2 - g_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} - b_{ij} V_i V_j \sin \theta_{ij}, i - j \in L \quad (5.11)$$

$$Q_{ij} = -b_{ij} V_i^2 + b_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} - g_{ij} V_i V_j \sin \theta_{ij}, i - j \in L \quad (5.12)$$

Όπου: $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$.

Για κάθε ζυγό $i \in N$ από το ισοζύγιο ισχύος προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$S_i = \sum_{j \in N_i} S_{ij} \Leftrightarrow P_i + jQ_i = \sum_{j \in N_i} (P_{ij} + jQ_{ij}) \Leftrightarrow \begin{cases} P_i = \sum_{j \in N_i} P_{ij} \\ Q_i = \sum_{j \in N_i} Q_{ij} \end{cases} \quad (5.13)$$

Όπου N_i : το σύνολο των ζυγών που συνδέονται με γραμμές με τον ζυγό i

S_i : η συνολική έγχυση ισχύος στον ζυγό i

S_{ij} : η ροή ισχύος από τον ζυγό i στον ζυγό j

Τέλος, αντικαθιστώντας στις τελευταίες εξισώσεις τις σχέσεις (5.4), (5.5) και (5.11), (5.12) προκύπτουν οι βασικές εξισώσεις ροής ισχύος:

$$(5.13) \Leftrightarrow P_{gi} - P_{di} = \sum_{j \in N_i} (g_{ij} V_i^2 - g_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} - b_{ij} V_i V_j \sin \theta_{ij}) \quad (5.15)$$

$$(5.14) \Leftrightarrow Q_{gi} - Q_{di} = \sum_{j \in N_i} (-b_{ij} V_i^2 + b_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} - g_{ij} V_i V_j \sin \theta_{ij}) \quad (5.16)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι ένα μέρος των εξισώσεων του προβλήματος. Στην συνέχεια περιγράφονται και οι περιορισμοί από τον έλεγχο των μεταβλητών ελέγχου του κυκλώματος.

Συνήθως στα δίκτυα διανομής είναι ωφέλιμο να ελαχιστοποιείται η περικοπή ενεργού ισχύος από τις ΜΔΠ. Ο διαχειριστής του δικτύου έχει οικονομικό όφελος όταν συμβαίνει αυτό καθώς έχει οικονομικότερη παραγωγή ενέργειας σε συνδυασμό με μείωση της παρεχόμενης αποζημίωσης στους ιδιοκτήτες των μονάδων αυτών από την περικοπή που εφαρμόζει. Η αντικειμενική συνάρτηση που ικανοποιεί αυτό το κριτήριο είναι η παρακάτω[22]:

$$ObjectiveFunction = \min \sum_{i \in G} (P_{gi}^0 - P_{gi}) \quad (5.17)$$

όπου P_{gi}^0 : αρχική παραγωγή ενεργού ισχύος από την ΜΔΠ i

P_{gi} : παραγωγή ενεργού ισχύος ΜΔΠ i στην επιθυμητή κατάσταση

5.3 Διατύπωση προβλήματος βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ενεργών δικτύων διανομής

Μέχρι στιγμής, όλες οι εξισώσεις που προέκυψαν είχαν ως παράμετρο ότι το δίκτυο έχει σταθερή τοπολογία. Για να έρθουν σε μορφή κατάλληλη ώστε να γίνει η βέλτιστη επαναδιαμόρφωση πρέπει να γίνει εισαγωγή των ελεγχόμενων παραμέτρων.

Όπως και προηγουμένως αρχικά θα γίνει ο ορισμός κάποιων βασικών συνόλων:

- N : οι ζυγοί του δικτύου
- L : οι γραμμές του δικτύου
- G : οι μη σταθερές ΜΔΠ του δικτύου
- S : οι γραμμές του δικτύου στις οποίες έχουν τοποθετηθεί διακόπτες
- B : οι συστοιχίες εγκάρσιων αντισταθμίσεων

Όπως με τις ΜΔΠ έτσι και με τις εγκάρσιες αντισταθμίσεις θεωρείται ότι τοποθετείται το πολύ μία αντιστάθμιση ανά ζυγό, συνεπώς όμοια με το G , το B είναι υποσύνολο του N .

5.3.1 Διακόπτες

Οι διακόπτες υπάρχουν σε κάθε γραμμή μεταφοράς $i - j \in S$. Είναι προγραμματισμένοι να ανοίγουν/κλείνουν ταυτόχρονα για να συνδέουν ή να αποσυνδέουν μία γραμμή από το δίκτυο. Η αναπαράσταση της κατάστασής τους γίνεται με μία δυαδική μεταβλητή η οποία παίρνει την τιμή 0 όταν η γραμμή βρίσκεται εκτός και την τιμή 1 όταν είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο.

$$s_{ij} \in \{0, 1\}, i - j \in S \quad (5.18)$$

5.3.2 Εγκάρσιες Αντισταθμίσεις

Όταν γίνεται αναφορά σε εγκάρσιες αντισταθμίσεις, πρόκειται για συστοιχία πυκνωτών παράλληλα συνδεδεμένης στους ζυγούς. Στην παρούσα εργασία θα μπορεί να γίνεται μεταβολή της χωρητικότητας με διακριτά βήματα χρησιμοποιώντας διακόπτες. Για την αναπαράσταση αυτών των βημάτων γίνεται χρήση της μεταβλητής p_i :

$$p_i \in \{0, 1, \dots, p_i^{max}\}, i \in B \quad (5.19)$$

Όπου p_i^{max} ο αριθμός των διαθέσιμων βημάτων. Αν σε κάθε βήμα η άεργος ισχύς μεταβάλλεται κατά DQ_i τότε η άεργος ισχύς που παρέχει η αντιστάθμιση στον ζυγό είναι:

$$Q_i = p_i \Delta Q_i \quad (5.20)$$

5.3.3 Περιορισμοί του προβλήματος

Μετά από την ανάπτυξη των στοιχείων του δικτύου και την περιγραφή των μεταβλητών στοιχείων ελέγχου προκύπτουν κάποιοι περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο μοντέλο βελτιστοποίησης.

Πλέον κάποιοι από τους ζυγούς φέρουν εγκάρσιες αντισταθμίσεις οι οποίες αλλάζουν την εισροή έργου ισχύος. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την ροή ισχύος των ζυγών παίρνουν την παρακάτω μορφή:

$$P_{g_i} - P_{d_i} = \sum_{j \in N_i} (g_{ij} V_i^2 - g_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} - b_{ij} V_i V_j \sin \theta_{ij}) \quad (5.21)$$

$$Q_{g_i} - Q_{d_i} + Q_i = \sum_{j \in N_i} (-b_{ij} V_i^2 + b_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} - g_{ij} V_i V_j \sin \theta_{ij}) \quad (5.22)$$

$$\text{Όπου } \begin{cases} Q_i = 0 & , i \in N \setminus B \\ Q_i = p_i \Delta Q_i & , i \in N \end{cases}$$

Σ' ότι αφορά το μέτρο των τάσεων στους ζυγούς υπάρχει η εξίσωση:

$$V_{\min_i} \leq V_i \leq V_{\max_i}, i \in N \quad (5.23)$$

Για κάθε ζυγό $i \in N$ καθορίζεται η μέγιστη (V_{\max_i}) και η ελάχιστη (V_{\min_i}) τιμή που μπορεί να πάρει το μέτρο της τάσης του. Στις ΜΔΠ υπάρχει ένας περιορισμός στην τιμή που μπορεί να πάρει η ενεργός ισχύς παραγωγής της κάθε μονάδας $i \in G$.

$$P_{g_i} = (1 - k_i) P_{g_i} \quad (5.24)$$

Όπου k_i μία μεταβλητή που είναι υπεύθυνη για την ποσοστιαία περικοπή παραγόμενης ισχύος όποτε αυτό κρίνεται απαραίτητο για να λειτουργεί το σύστημα εντός των καθορισμένων σημείων λειτουργίας. Για τις ΜΔΠ είναι επιθυμητό να λειτουργούν με την μέγιστη δυνατή παροχή ενεργού ισχύος και γι' αυτό επιδιώκεται το k_i να παίρνει όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές κοντά στο μηδέν. Στην παρούσα εργασία το όριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν έως 15% περικοπή των ΜΔΠ δηλαδή $k_i \in [0, 0.15]$, πάντα επιλέγοντας την μικρότερη δυνατή τιμή για το k_i .

Στις γραμμές με τους διακόπτες θα προστεθεί και οι παράμετρος s_{ij} που δείχνει την κατάσταση του διακόπτη στην γραμμή $i - j \in S$. Συνεπώς για τις γραμμές που έχουν διακόπτες θα ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$-s_{ij} P_{ij}^{\max} \leq P_{ij} \leq s_{ij} P_{ij}^{\max} \quad (5.25)$$

$$-s_{ij} Q_{ij}^{\max} \leq Q_{ij} \leq s_{ij} Q_{ij}^{\max} \quad (5.26)$$

Οι τιμές των P_{ij} και Q_{ij} δεν επηρεάζονται όταν η γραμμή είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο, ενώ αντίστοιχα αν αποσυνδεθεί η γραμμή ($s_{ij} = 0$) τότε οι τιμές γίνονται μηδενικές. [22]

Εάν το πρόβλημα της παρούσας εργασίας εστίαζε στην ελαχιστοποίηση των απωλειών η εξίσωση της αντικειμενικής συνάρτησης θα ήταν η παρακάτω:

$$\text{ObjectiveFunction} = \min \sum_{i \in L} (P_{\text{losses}, i}) \quad (5.27)$$

όπου P_{losses} οι απώλειες ενεργού ισχύος των γραμμών του δικτύου

Κεφάλαιο 6

Επίλυση του Προβλήματος Βέλτιστης Επαναδιαμόρφωσης Δικτύων Διανομής με τον Αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων Particle Swarm Optimization

6.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος PSO είναι μία στοχαστική μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους J. Kennedy και R. Eberhart το 1995. Δημιουργήθηκε μετά από παρατήρηση της κοινωνικής συμπεριφοράς κάποιων οργανισμών, όπως για παράδειγμα η συμπεριφορά ενός σμήνους πουλιών ή ψαριών. Η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί πολύ ωφέλιμη για αρκετά προβλήματα βελτιστοποίησης καθώς είναι εύκολη η υλοποίησή της και με καλά αποτελέσματα. Βρίσκει το ολικό μέγιστο ή ελάχιστο για μη κυρτά και μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης και όπως έχει παρατηρηθεί, προσφέρει λύσεις αρκετά μεγάλης ακρίβειας.

6.2 Περιγραφή του αλγόριθμου PSO

Σκοπός της PSO είναι η εύρεση μίας βέλτιστης λύσης, δηλαδή η βελτιστοποίηση μίας αντικειμενικής συνάρτησης. Ο αλγόριθμος λειτουργεί με μία στοχαστική αναζήτηση βασισμένη σε έναν πληθυσμό. Αρχικά ο πληθυσμός αποτελείται από σωματίδια, όπου κάθε σωματίδιο αποτελεί μία πιθανή λύση. Κάθε σωματίδιο αναπαρίσταται με ένα διάνυσμα m -διαστάσεων x_{ij} , $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, m$ όπου N το μέγεθος του πληθυσμού και m ο αριθμός των διαστάσεων του διανύσματος. Ο αριθμός των διαστάσεων του διανύσματος ταυτίζεται με τον αριθμό των παραμέτρων που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν. Η ταχύτητα u_{ij} δείχνει τις αλλαγές που θα γίνουν για να κινηθεί το σωματίδιο από μία θέση σε μία άλλη. Σε κάθε επανάληψη τα σωματίδια αλλάζουν ταχύτητα και θέση, οι νέες τους τιμές εξαρτώνται από την βέλτιστη λύση που θέλει να επιτύχει κάθε σωματίδιο ξεχωριστά αλλά και από την βέλτιστη λύση που θέλει να



Σχήμα 6.1: Η κίνηση ενός σμήνους πουλιών

επιτύχει ο συνολικός πληθυσμός (personal best και global best). Σκοπός είναι όλα τα σωματίδια να κινηθούν στην περιοχή βέλτιστης λύσης και στην συνέχεια εντός της συγκεκριμένης περιοχής να γίνεται αναζήτηση της όσο το δυνατόν καλύτερης λύσης.

Η ταχύτητα του κάθε σωματιδίου διαμορφώνεται με βάση την σχέση 4.1:

$$v_i(k+1) = \varphi(k)v_i(k) + c_1r_1i(p_i - x_i(k)) + c_2r_2i(G - x_i(k)) \quad (6.1)$$

Και η θέση από την 4.2:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (6.2)$$

Όπου p_i η βέλτιστη θέση του σωματιδίου (personal best) και G η βέλτιστη θέση σύμφωνα με την θέση όλων των σωματιδίων (global best, best of personal bests). Τα $r_{1,2}$ αποτελούν τυχαίες μεταβλητές στο διάστημα $[0, 1]$, ενώ τα $c_{1,2}$ είναι συντελεστές βαρύτητας. Τέλος, η φ αποτελεί μία συνάρτηση που καλείται συνάρτηση αδράνειας (inertia function).

Το βάρος αδράνειας $\varphi(k)$, ελέγχει την επίδραση της ταχύτητας από το προηγούμενο βήμα. Για παράδειγμα, όσο μεγαλύτερη η τιμή του, τόσο η εξερεύνηση γίνεται σε νέες περιοχές. Αντίστοιχα, η τιμή μικραίνει όταν έχει βρει επιθυμητή περιοχή για βέλτιστη λύση και περνά σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια για όσο το δυνατόν καλύτερη λύση.

Στην συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά σε τι αντιστοιχεί κάθε όρος της εξίσωσης που δίνει την ταχύτητα ενός σωματιδίου την χρονική στιγμή $k+1$:

- $\varphi(k)v_i(k)$
Αποτελεί ένα είδος μνήμης. Η συνάρτηση φ ορίζει σε πόσο μεγάλη περιοχή θα κινηθεί το σωματίδιο, ενώ η ταχύτητα $v_i(k)$ την προηγούμενη χρονική στιγμή δεν επιτρέπει στο σωματίδιο να αλλάξει σε μεγάλο βαθμό την κατεύθυνσή του.
- $c_1r_1i(p_i - x_i(k))$
Ο δεύτερος όρος ονομάζεται γνωστικός όρος. Συγκρίνει την απόδοση του σωματιδίου με την προηγούμενη απόδοση που είχε το συγκεκριμένο σωματίδιο. Όταν περνάει σε μία λιγότερο αποδοτική κατάσταση ο ρόλος αυτού του όρου είναι να το επαναφέρει και πάλι στην επιθυμητή θέση.

- $c_2 r_2 i(G - x_i(k))$

Ο τρίτος όρος ονομάζεται κοινωνικός όρος. Ο ρόλος του είναι η ποσοτικοποίηση της απόδοσης του σωματιδίου σε σχέση με ολόκληρο το σμήνος. Από το συγκεκριμένο σωματίδιο γίνεται η αναζήτηση σε ολόκληρο το σμήνος για το σωματίδιο με την καλύτερη θέση.

6.3 Παραλλαγές του αλγόριθμου

Παραλλαγές του αρχικού αλγόριθμου άρχισαν σύντομα μετά την πρώτη παρουσίασή του, όπως για παράδειγμα η εκδοχή των Shi και Eberhart το 1998, για τον προσαρμοστικό PSO (Adaptive). Αυτή η μέθοδος ήταν που εισήγαγε στον αλγόριθμο τους συντελεστές αδράνειας και βοήθησε στο να γίνει αρκετά πιο αποτελεσματικός αυξάνοντας λίγο την πολυπλοκότητα του. Προσθέτοντας αδράνεια στα σωματίδια, αυτά αντιστέκονται στις απότομες αλλαγές, με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη εκκίνηση του αλγόριθμου και την καλύτερη εξερεύνηση του χώρου των λύσεων. Μία άλλη ευρέως διαδεδομένη παραλλαγή είναι ο διακριτός PSO (Discrete). Με αυτή την παραλλαγή ξεκίνησε να γίνεται χρήση της προηγούμενης θέσης, της προηγούμενης ταχύτητας και του σφάλματος θέσης. Με αυτή την μέθοδο οι ταχύτητες των σωματιδίων τείνουν σιγά σιγά προς το μηδέν δίνοντας καλύτερα αποτελέσματα στην εύρεση λύσης.

6.4 Θετικά και αρνητικά της χρήσης του αλγόριθμου PSO

Η μέθοδος PSO υπερτερεί από άλλες υπολογιστικές μεθόδους σ' ότι αφορά την ταχύτητα, την ποιότητα και την ευελιξία. Έχει την δυνατότητα να υπολογίσει τα ίδια αποτελέσματα με άλλες μεθόδους, όμως πολύ πιο γρήγορα καθώς χρησιμοποιεί λιγότερες συναρτήσεις υπολογισμού. Επίσης, και πολύ σημαντικό είναι η ποιότητα των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα που δίνει είναι πολύ ικανοποιητικά και για τοπικό και για ολικό βέλτιστο. Έχει την δυνατότητα να επιλύσει μεγάλο εύρος προβλημάτων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μη κυρτές συναρτήσεις ή για συναρτήσεις στις οποίες υπάρχει ασυνέχεια, πράγμα που δεν μπορούν να καταφέρουν άλλες τεχνικές. Τέλος, χρησιμοποιεί μικρή υπολογιστική ισχύ καθώς δεν χρειάζεται να μετασχηματιστεί στην πορεία της επίλυσης.

Γενικά, κάποια πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ικανότητα μνήμης. Καθώς «θυμάται» τόσο τα τοπικά όσο και τα ολικά βέλτιστα. Η απλότητα που έχει ο κώδικας της, αφού χρησιμοποιεί απλές εξισώσεις και επίσης είναι πολύ ευέλικτη αφού προσαρμόζεται εύκολα στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Ωστόσο προφανώς υπάρχουν και κάποια αρνητικά. Πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα αρχικοποίησης των σωματιδίων για να μπορεί να λειτουργήσει ο αλγόριθμος. Επίσης κάθε σωματίδιο θεωρεί ότι όλα τα σωματίδια του σμήνους έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, όμως αυτό στην πραγματικότητα δεν ισχύει. Τέλος, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αναζητεί μία βέλτιστη λύση, χωρίς όμως να υπολογίζει ότι ένα πρόβλημα ενδέχεται να έχει παραπάνω από μία λύσεις που το βελτιστοποιούν.

6.5 Περιγραφή του λογισμικού για το PSO

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου του PSO στο MATLAB έγινε χρήση του opensource κώδικα Particle Swarm Optimization Toolbox (PSOt) του Brian Birge. Το εργαλείο είναι απλό στην χρήση και προσφέρει την δυνατότητα σε αυτόν που το χρησιμοποιεί να βρει το ελάχιστο, το μέγιστο ή «απόσταση» μίας αντικειμενικής συνάρτησης που έχει δημιουργήσει ο χρήστης. Περιλαμβάνει επίσης έτοιμες στατικές και δυναμικές συναρτήσεις για τεστ του αλγόριθμου.

Ο χρήστης δημιουργεί μία συνάρτηση εντός της οποίας γίνεται αρχικοποίηση όλων των παραμέτρων που απαιτούνται για να υλοποιηθεί ο αλγόριθμος. Βασικές παραμέτρους αποτελούν το όνομα της αντικειμενικής συνάρτησης, ο αριθμός των σωματιδίων (particles), το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί, το εύρος τιμών που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές, ο αριθμός των μεταβλητών και ο αριθμός των επαναλήψεων που θα πραγματοποιηθούν.

Μία σημαντική συνάρτηση είναι η `pso_Trelea_vectorized` που υπάρχει στο εργαλείο του PSO που χρησιμοποιούμε. Αυτή η συνάρτηση είναι υπεύθυνη για την υλοποίηση του αλγορίθμου και τον εντοπισμό των αποτελεσμάτων. Παίρνει ως ορίσματα την αντικειμενική συνάρτηση που έχει δημιουργηθεί από τον χρήστη, τις διαστάσεις της μεταβλητής παραμέτρου και το range των τιμών που μπορεί να πάρει αυτή η παράμετρος. Στην συνέχεια έχει μία παράμετρο `minmax` που ανάλογα με την τιμή που της έχει δώσει ο χρήστης δείχνει εάν πρέπει να γίνει ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Μία ακόμη παράμετρο, την `psoparams` που πρόκειται για έναν πίνακα με τις βασικές παραμέτρους του PSO (όπως για παράδειγμα πλήθος σωματιδίων και εποχές). Έπειτα την `plotfcn` η τιμή της οποίας δείχνει τι θα εμφανιστεί στην οθόνη. Και τέλος, η `PSOseedValue` η οποία δίνει τις αρχικές θέσεις των σωματιδίων. Η συνάρτηση αυτή επιστρέφει το `pso_out` το οποίο δίνει τις κατάλληλες τιμές της μεταβλητής που έχει οριστεί ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να πάρει την ελάχιστη ή μέγιστη τιμή.

6.6 Εφαρμογή PSO στην βέλτιστη αναδιαμόρφωση δικτύων διανομής

6.6.1 Εφαρμογή του PSO

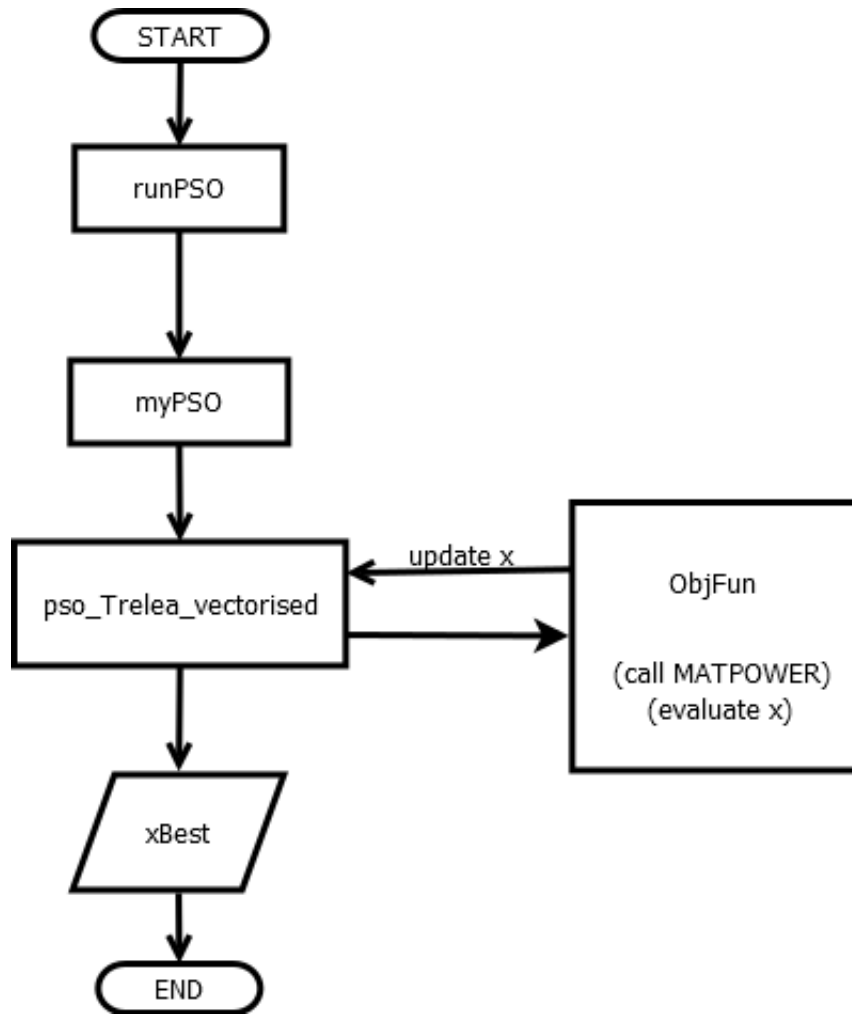
Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση του εργαλείου για να γίνει η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Αρχικά δημιουργήθηκε μία συνάρτηση `myPSO`. Στην συνάρτηση αυτή έγινε ο ορισμός όλων των παραμέτρων που απαιτούνται για να γίνει η χρήση του αλγόριθμου.

Έπειτα γράφτηκε ο κώδικας για την αντικειμενική συνάρτηση, η οποία είναι και αυτή που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί για να δοθεί η λύση του προβλήματος. Γίνεται εκτέλεσή της για όλες τις πιθανές λύσεις και ο αλγόριθμος ανάλογα με την έξοδο της αντικειμενικής κάθε φορά καταλήγει στο αποτέλεσμα του προβλήματος.

Το διάνυσμα εισόδου για τον αλγόριθμο PSO στο πρόβλημα της παρούσας εργασίας εξαρτάται από τον αριθμό των παραμέτρων αλλά πάντα έχει την μορφή του πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Μορφή διανύσματος παραμέτρων

| | | | |
|----------|------------|-------------------|------------------|
| Switches | Capacitors | Solar Curtailment | Wind Curtailment |
|----------|------------|-------------------|------------------|



Σχήμα 6.2: Διάγραμμα ροής προγράμματος

Τέλος, δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα ροής (Σχήμα 6.2) που παρουσιάζει τον τρόπο που συνδέονται οι συναρτήσεις μεταξύ τους, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω για να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

6.6.2 Αντικειμενική συνάρτηση

Για την επαναδιαμόρφωση ενός δικτύου αλλάζοντας συνεχώς τα μεταβαλλόμενα μέρη του εξοπλισμού του μπορούν να προκύψουν έντονες φθορές. Γι' αυτόν τον λόγο προστίθενται αθροιστικά στην αντικειμενική συνάρτηση ώστε να πραγματοποιούνται κατά το δυνατόν λιγότεροι χειρισμοί και να ελαχιστοποιηθούν οι φθορές που μπορούν να μεταφραστούν σε ζημιές στην λειτουργία. Στην παρούσα εργασία έχει χρησιμοποιηθεί η παρακάτω αντικειμενική συνάρτηση για την βέλτιστη επαναδιαμόρφωση του δικτύου:

$$Z = \min[(1 + w_p \cdot \text{penalty} + w_s \cdot \text{Switch}_{\text{operations}} + w_c \cdot \text{Capacitor}_{\text{operations}}) \cdot \text{losses}] \quad (6.3)$$

Όπου:

- *penalty* αφορά μία μεταβλητή η οποία αυξάνει την αντικειμενική όταν δεν ισχύουν οι περιορισμοί που έχουν τεθεί για την σωστή λειτουργία του δικτύου (παρακάτω θα γίνει περαιτέρω ανάλυση).

- $Switch_{operations}$ το σύνολο των αλλαγών που γίνονται στις καταστάσεις των διακοπών (κλείσιμο – άνοιγμα) προς το σύνολο των διακοπών που είναι τοποθετημένοι.
- $Capacitor_{operations}$ το σύνολο των μεταβάσεων που γίνονται για να αυξηθεί ή να μειωθεί η εγχάρσια αντιστάθμιση που προστίθεται στους ζυγούς προς τον μέγιστο αριθμό μεταβάσεων που μπορούν να γίνουν από την μία χρονική στιγμή στην άλλη. Ο αριθμός των πυκνωτών που αλλάζουν κατάσταση σε σχέση με την προηγούμενη τιμή τους.
- $losses$ οι απώλειες ισχύος που έχει το δίκτυο κατά την λειτουργία του.
- w_p , w_s και w_c είναι συντελεστές βαρών της αντικειμενικής συνάρτησης.

Η τιμή του penalty αφορά μία μεταβλητή που αυξάνεται ανάλογα με τις παραβιάσεις και τους περιορισμούς που έχουν τεθεί για την καλύτερη λειτουργία του δικτύου όπως ήδη προαναφέρθηκε. Στην συνέχεια φαίνονται πιο αναλυτικά αυτοί οι περιορισμοί.

1. Τα όρια των τάσεων κυμαίνονται ανάμεσα σε $0.95p.u.$ και $1.05p.u.$
2. Το δίκτυο πρέπει να παραμένει σε ακτινική μορφή και να μην δημιουργούνται βρόγχοι.
3. Δεν πρέπει να υπάρχουν φορτία στο δίκτυο που δεν εξυπηρετούνται.
4. Ιδανικά δεν πρέπει να γίνεται περικοπή των ΜΔΠ και όταν αυτό συμβαίνει πρέπει να είναι σε όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα.

Αρχικά, για να εξασφαλίζεται ότι το MATPOWER θα εκτελεί κάθε φορά επιτυχώς την προσημείωση του δικτύου δόθηκε μία πολύ μεγάλη τιμή σε μία μεταβλητή `not_success=100` εάν το MATPOWER επέστρεφε `success = 0`. Η μεταβλητή αυτή σε κάθε άλλη περίπτωση είναι 0 και πάντα προστίθεται στην έξοδο της αντικειμενικής. Έτσι κάθε φορά που λόγω κάποιων περιορισμών δεν είναι δυνατό να εκτελεστεί η ροή ισχύος για το δίκτυο, η αντικειμενική παίρνει μία πολύ μεγάλη τιμή. Η τιμή του penalty αυξάνεται ανάλογα με τις παραβιάσεις των περιορισμών που περιγράφηκαν παραπάνω. Όποτε η τάση βρισκόταν εκτός των επιθυμητών ορίων τότε η τιμή του αυξανόταν κατά 1. Όταν το δίκτυο σταματούσε να είναι ακτινικό, τιμή του penalty ανέβαινε τόσο, όσοι ήταν και οι βρόχοι που είχαν δημιουργηθεί. Ένας ακόμη περιορισμός που έχει τεθεί είναι να εξυπηρετούνται όλα τα φορτία, γι' αυτό όποτε κάποιο φορτίο μένει εκτός τότε το penalty αυξάνεται όσο είναι και το ποσοστό του φορτίου που δεν εξυπηρετείται ως προς το σύνολο των φορτίων που είναι συνδεδεμένα την τρέχουσα χρονική στιγμή. Για παράδειγμα αν το 1% των φορτίων την δεδομένη χρονική στιγμή δεν εξυπηρετείται, τότε το penalty θα αυξηθεί κατά 1. Με ακριβώς όμοιο τρόπο έγινε και η αύξηση του penalty κάθε φορά που υπήρχε περικοπή ενεργού ισχύος από τις ΜΔΠ. Τώρα όμως επειδή ήταν επιθυμητό να υπάρχει μικρότερη βαρύτητα σε σχέση με πριν η αύξηση του penalty γίνεται ακριβώς στο μισό για αντίστοιχη περικοπή. Δηλαδή αν κόβεται 1% της ενεργού ισχύος που προσφέρουν οι ΜΔΠ σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, τότε το penalty αυξάνεται κατά 0.5. Η τιμή του penalty που προκύπτει λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς που παραβιάζονται πολλαπλασιάζεται με το βάρος του penalty. Στο σχήμα 6.3 υπάρχει ο ψευδοκώδικας που δείχνει τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται η τιμή του.

```
penalty = 0;

if (Voltage > 0.95)
    penalty = penalty + 1;
elseif (Voltage > 1.05)
    penalty = penalty + 1;
end

if (Loops > 0)
    penalty = penalty + Loops;
end

if (Pgeneration < Pdemand)      % penalty if there are loads out of network
    penalty = penalty + ((abs(Pg - Pd))/Pd) * 100;
end

if (SolarCurtailment > 0)
    penalty = penalty + 0.5*(SolarCurtailment * 100);
end

if (WindCurtailment > 0)
    penalty = penalty + 0.5*(WindCurtailment * 100);
end
```

Σχήμα 6.3: Ψευδοκώδικας υπολογισμού της τιμής του penalty

Κεφάλαιο 7

Εφαρμογές και Αποτελέσματα

7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των εφαρμογών του μοντέλου της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Για την εφαρμογή των τεχνικών ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, έχει θεωρηθεί ότι στα δίκτυα διανομής που εξετάζονται υπάρχουν εγκατεστημένες ΜΔΠ, εγχάρσιες χωρητικότητες και διακόπτες για την επαναδιαμόρφωση. Τα δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν είναι 33 και 136 ζυγών.

Ως δεδομένα εισόδου στο δίκτυο έχουν χρησιμοποιηθεί ημερήσια δεδομένα φορτίου από τον ΑΔΜΗΕ για να σχηματισθεί η ημερήσια καμπύλη και στην συνέχεια προσαρμόστηκε στο επιθυμητό MW peak ανάλογα και με το μέγεθος του φορτίου. Όμοια δημιουργήθηκαν και οι καμπύλες για την ημερήσια παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες. Σε όλο το δίκτυο θεωρείται ότι κάθε στιγμή κάθε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση καθώς και κάθε εγκατάσταση ανεμογεννητριών συμβάλει το ίδιο στην παροχή ενέργειας. Ενώ και για κάθε φορτίο ισχύει ότι έχει το ίδιο ποσοστό ζήτησης σε κάθε χρονική στιγμή.

Δημιουργήθηκε ένα σενάριο για κάθε ώρα που αντιπροσωπεύει την ζήτηση φορτίου, την αιολική και ηλιακή παραγωγή. Για κάθε ώρα επιλύεται το μοντέλο της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης που ορίστηκε στο πέμπτο κεφάλαιο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αφορούν τον χειρισμό των διακοπών, των εγχάρσιων χωρητικοτήτων, την περικοπή ενεργού ισχύος των ΜΔΠ και τις απώλειες ενεργού ισχύος των γραμμών.

Τα όρια λειτουργίας των δικτύων για τα μοντέλα θεωρήθηκαν όλα κοινά και δίνονται παρακάτω:

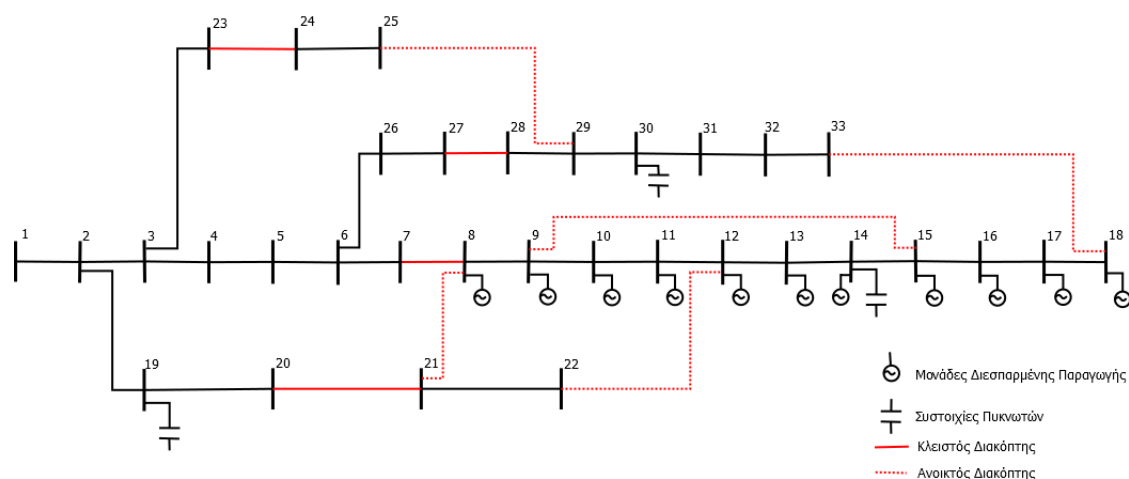
$$V_{min_i} = 0,95(p.u.), i \in N \setminus \{1\} \quad (7.1)$$

$$V_{max_i} = 1,05(p.u.), i \in N \setminus \{1\} \quad (7.2)$$

$$V_1 = 1(p.u.) \quad (7.3)$$

$$\cos\phi_i = 0,90, i \in N \quad (7.4)$$

Ο ζυγός $N = 1$ είναι το σημείο που το δίκτυο διανομής που εξετάζεται συνδέεται με το δίκτυο μεταφοράς στον υποσταθμό υποβιβασμού. Γι' αυτό η τάση στον ζυγό αυτό πρέπει να παραμένει σταθερή και ίση με 1p.u.



Σχήμα 7.1: Δίκτυο Διανομής 33 ζυγών

7.2 Εφαρμογή στο δίκτυο 33 ζυγών

Στο σχήμα 7.1 φαίνεται το δίκτυο των 33 ζυγών που εξετάστηκε. Η ονομαστική τάση είναι στα 12,66kV και ο ζυγός 1 συνδέεται με τον μετασχηματιστή στον υποσταθμό υποβιβασμού στο τέλος του δικτύου μεταφοράς. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται οι γραμμές στις οποίες έχει τοποθετηθεί διακόπτης και με διακεκομμένη γραμμή είναι οι διακόπτες που είναι ανοιχτοί στην αρχική τοπολογία του δικτύου.

Στο συγκεκριμένο δίκτυο έχει πραγματοποιηθεί εγκατάσταση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής ονομαστικής ισχύος 6,5MW. Στους πίνακες 7.1-7.3 φαίνονται πιο αναλυτικά τα στοιχεία του δικτύου.

Γενικά, τα προβλήματα εντοπίζονται σε δύο περιπτώσεις. Πρώτον, όταν πραγματοποιείται μέγιστη ζήτηση φορτίου ενώ η παραγωγή από τις ΜΔΠ είναι στο ελάχιστο παρατηρείται πτώση τάσης και παραβιάζονται οι περιορισμοί λειτουργίας. Αντίστοιχα, όταν υπάρχει μέγιστη παραγωγή από τις ΜΔΠ και ελάχιστη ζήτηση φορτίου παρατηρείται μη επιθυμητή αύξηση τάσης στους ζυγούς.

Πίνακας 7.1: Δεδομένα Διακοπών του δικτύου 33 ζυγών

| Τηλεχειριζόμενοι Διακόπτες | Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Άφιξης |
|----------------------------|------------------|--------------|
| S1 | 7 | 8 |
| S2 | 20 | 21 |
| S3 | 23 | 24 |
| S4 | 27 | 28 |
| S5 | 8 | 21 |
| S6 | 9 | 15 |
| S7 | 12 | 22 |
| S8 | 18 | 33 |
| S9 | 25 | 29 |

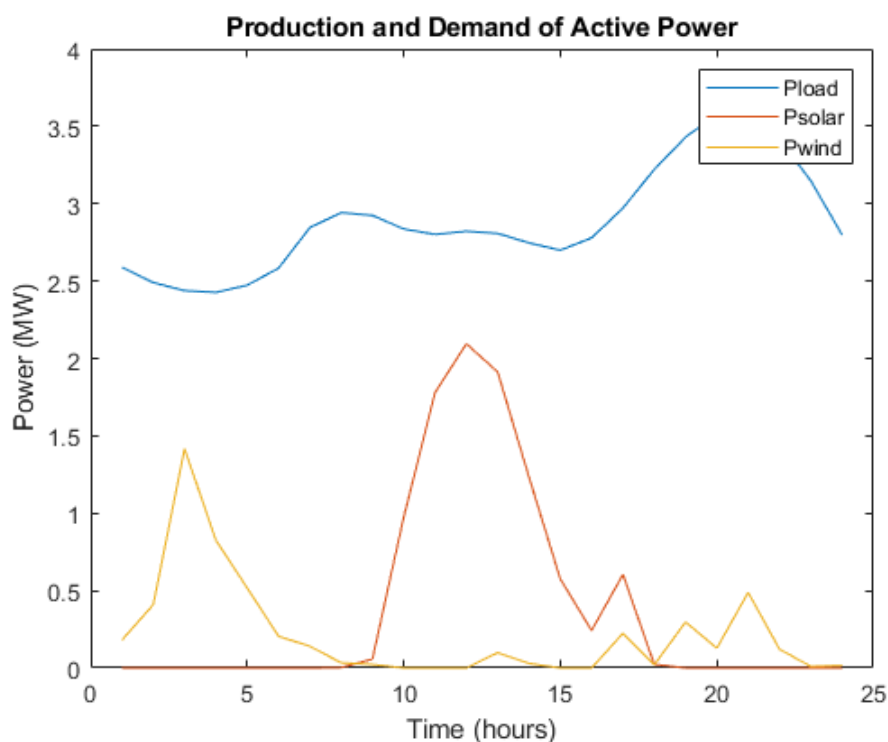
Στο δίκτυο οι εγκατεστημένες ΜΑΠ είναι μία ανεμογεννήτρια με εγκατεστημένη ισχύ $3,5MW$ και δέκα φωτοβολταϊκές μονάδες με $0,3MW$ εγκατεστημένη ισχύ έκαστη. Στον πίνακα 7.3 φαίνονται πιο αναλυτικά οι μονάδες και οι ζυγοί στους οποίους έχουν εγκατασταθεί.

Πίνακας 7.2: Δεδομένα εγχάρσιων αντισταθμίσεων του δικτύου 33 ζυγών

| Εγχάρσιες Αντισταθμίσεις | Ζυγός | Q (MVar) |
|--------------------------|-------|----------|
| C1 | 14 | 0,3 |
| C2 | 19 | 0,3 |
| C3 | 30 | 0,3 |

Πίνακας 7.3: Δεδομένα ΜΔΠ του δικτύου 33 ζυγών

| Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής | Ζυγός | Είδος | P (MW) | $\cos\phi$ |
|--------------------------------|--------|-------|--------|------------|
| G1 | 18 | A/Γ | 3,5 | 1 |
| G2-G11 | 8 - 17 | Φ/B | 0,3 | 1 |



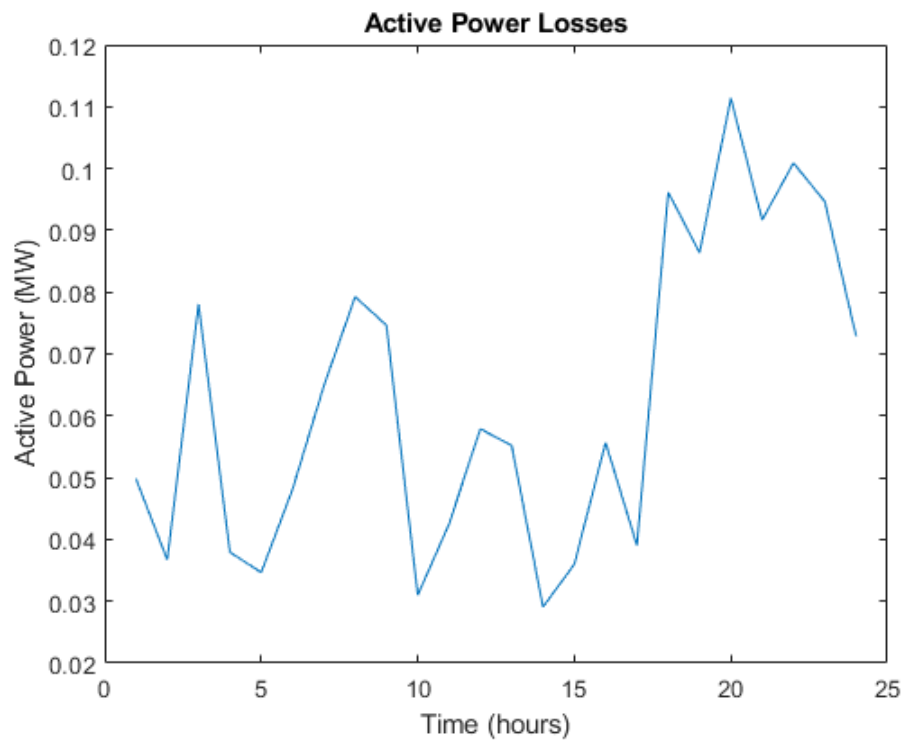
Σχήμα 7.2: Καμπύλες ζήτησης φορτίου και παραγωγής ΜΔΠ για κάθε ώρα σε ένα 24ωρο

7.2.1 Εκτέλεση μοντέλου χωρίς τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης

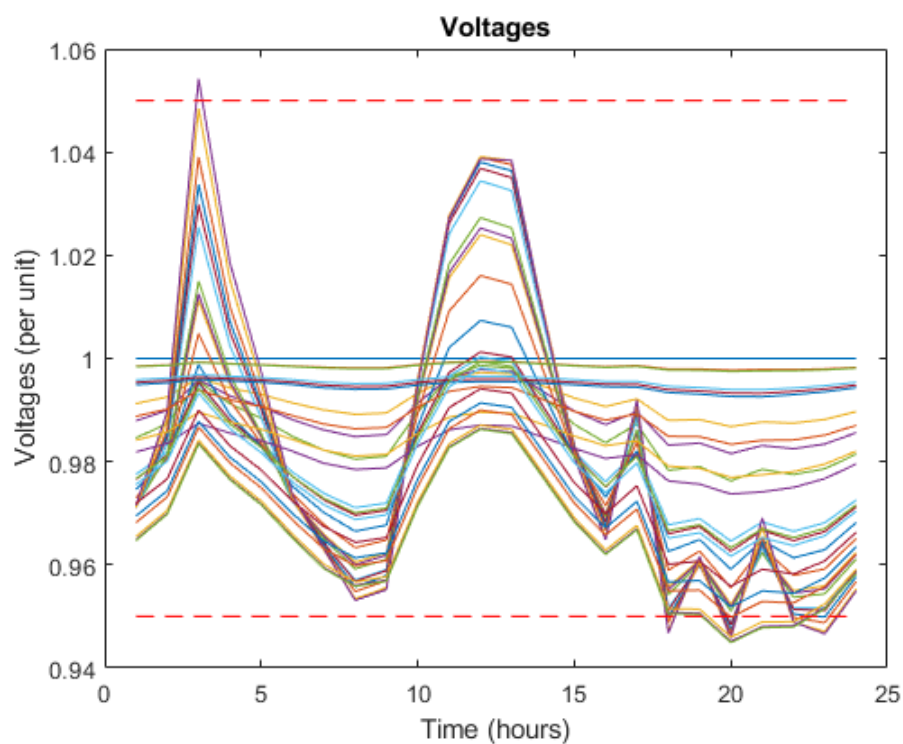
Αρχικά έγινε εκτέλεση του μοντέλου χωρίς κανέναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης και με σταθερή τοπολογία για όλο το 24ωρο ώστε να μπορεί μετέπειτα να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με χρήση και χωρίς του αλγόριθμου.

Οι διακόπτες S1, S2, S3 και S4 παρέμειναν κλειστοί διατηρώντας ακτινική την τοπολογία για όλο το 24ωρο και οι εγχάρσιες αντισταθμίσεις είχαν όλες σταθερή τιμή $Q = 300kVar$. Η περικοπή ισχύος από την παραγωγή των ΜΔΠ είναι μηδενική. Στο σχήμα 7.2 δίνονται οι καμπύλες με την ζήτηση του φορτίου και την παραγωγή των ΜΔΠ για κάθε ώρα. Το μοντέλο εκτελέστηκε για ένα 24ωρο με ένα σενάριο κάθε ώρα. Στην συνέχεια φαίνονται οι απώλειες στις γραμμές και το πώς διαμορφώνονται οι

τάσεις στους ζυγούς (Σχήμα 7.3-7.4).



Σχήμα 7.3: Απώλειες ενεργού ισχύος σε MW των γραμμών του δικτύου ως προς τον χρόνο



Σχήμα 7.4: Οι τάσεις των ζυγών του δικτύου ως προς τον χρόνο

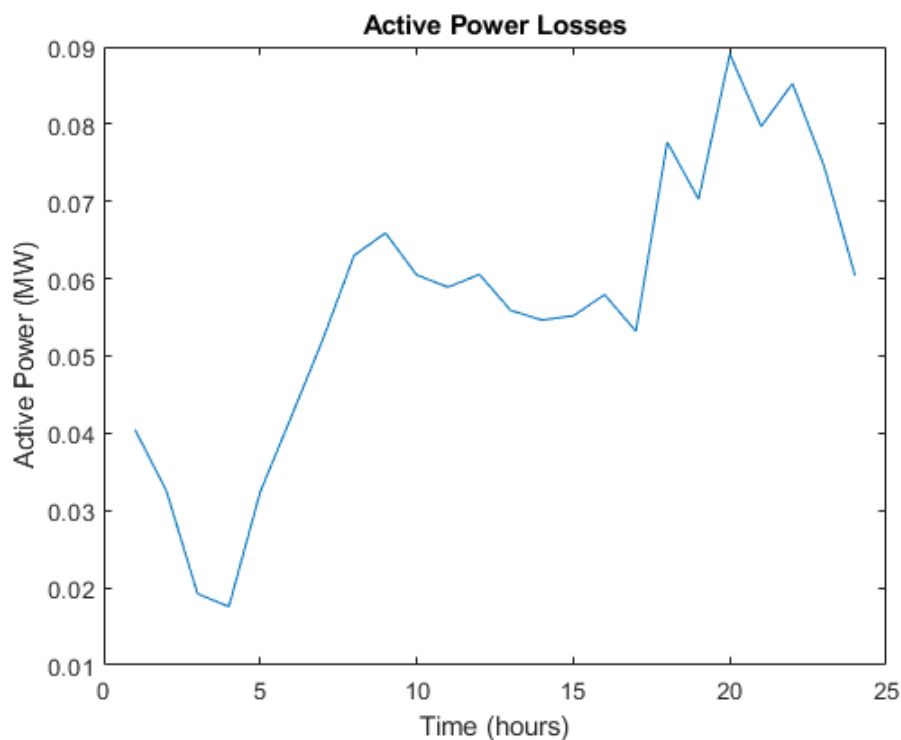
Οι συνολικές απώλειες στο δίκτυο είναι $1,50\text{MWh}$ και φαίνονται για κάθε ώρα στο σχήμα 7.3. Οι τάσεις των ζυγών παρουσιάζονται στο σχήμα 7.4 και όπως φαίνεται παραβιάζονται τα όρια για την σωστή λειτουργία του δικτύου καθώς ανεβαίνουν πάνω από το $1,05\text{p.u.}$ όταν υπάρχει μεγάλη παραγωγή σε συνδυασμό με χαμηλή ζήτηση φορτίου και πέφτουν κάτω από το $0,95\text{p.u.}$ όταν υπάρχει μεγάλη ζήτηση φορτίου με χαμηλή παραγωγή.

7.2.2 Εκτέλεση του μοντέλου με επαναδιαμόρφωση του δικτύου με χρήση του αλγόριθμου PSO

Έπειτα υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος PSO για την βέλτιστη επαναδιαμόρφωση του δικτύου και εκτελέστηκε για τα ίδια δεδομένα με προηγουμένως ώστε να μπορεί να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων σ' ό,τι αφορά την λειτουργία του δικτύου. Ο αλγόριθμος PSO εκτελέστηκε χρησιμοποιώντας 75 σωματίδια (particles) και 100 εποχές (epochs). Οι παράμετροι που λαμβάνει υπόψιν του ο αλγόριθμος για να υλοποιηθεί είναι ένας πίνακας 14 θέσεων όπως φαίνεται παρακάτω. Κάθε παράμετρος παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1 και στην συνέχεια γίνεται κανονικοποίηση των τιμών στις επιθυμητές τιμές. Δηλαδή οι διακόπτες παίρνουν τιμές 0 και 1, οι πυκνωτές τιμές από 0 έως 300 με βήμα 50 και η περικοπή των ΜΔΠ 0 έως 15, όσο δηλαδή και το ποσοστό που γίνεται περικοπή.

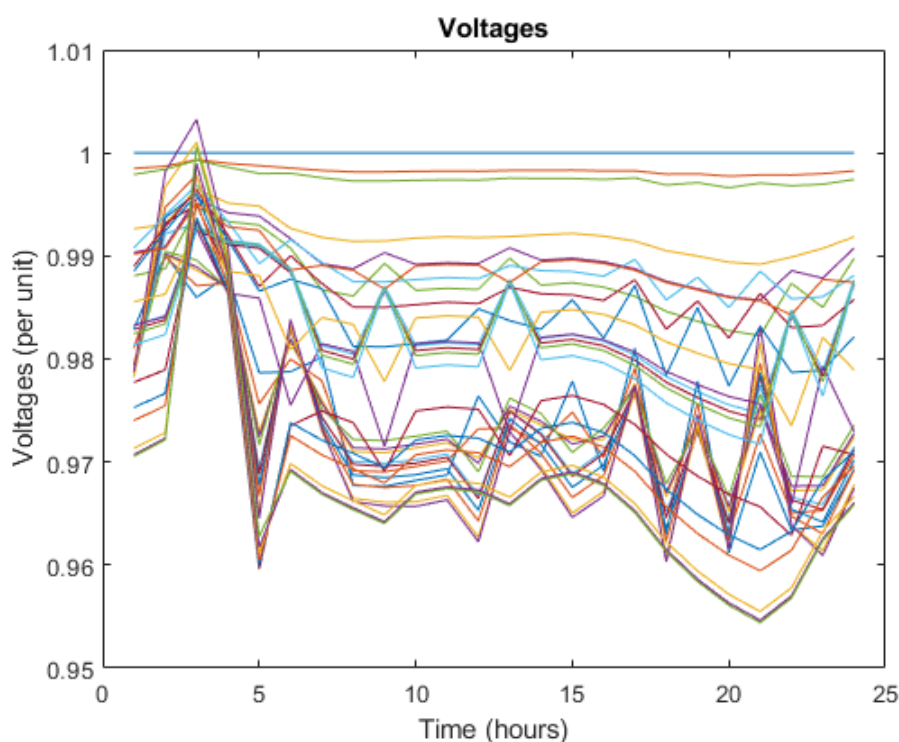
Πίνακας 7.4: Μορφή Διανύσματος εισόδου δικτύου 33 ζυγών

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------------|------------------|
| S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | C1 | C2 | C3 | Solar Curtailment | Wind Curtailment |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------------|------------------|

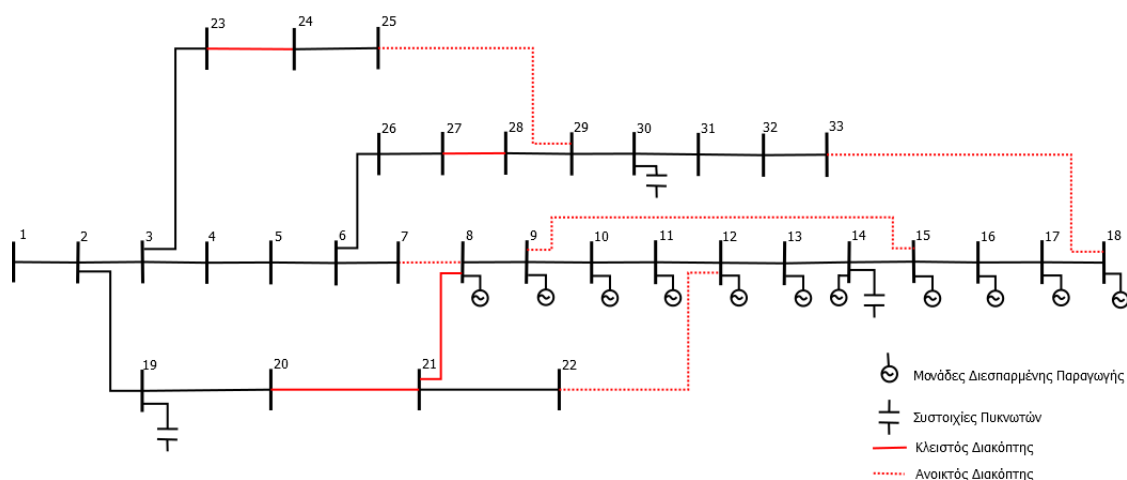


Σχήμα 7.5: Απώλειες ενεργού ισχύος σε MW των γραμμών του δικτύου ως προς τον χρόνο εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο PSO για βέλτιστη επαναδιαμόρφωση δικτύου

Στο αποτέλεσμα που προέκυψε όλα τα φορτία εξυπηρετούνται καθόλη την διάρκεια του 24ώρου. Στα σχήματα 7.5 και 7.6 φαίνονται τα αποτελέσματα για την λειτουργία του δικτύου για τις απώλειες των γραμμών και την τάση στους ζυγούς. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η διακύμανση των τάσεων γίνεται πολύ μικρότερη και σε επιθυμητά επίπεδα για την λειτουργία του δικτύου καθώς και οι απώλειες είναι λιγότερες τώρα σε σχέση με προηγούμενως αφού το άθροισμα των απωλειών του δικτύου για τις 24 ώρες είναι πλέον $1,36 MWh$.



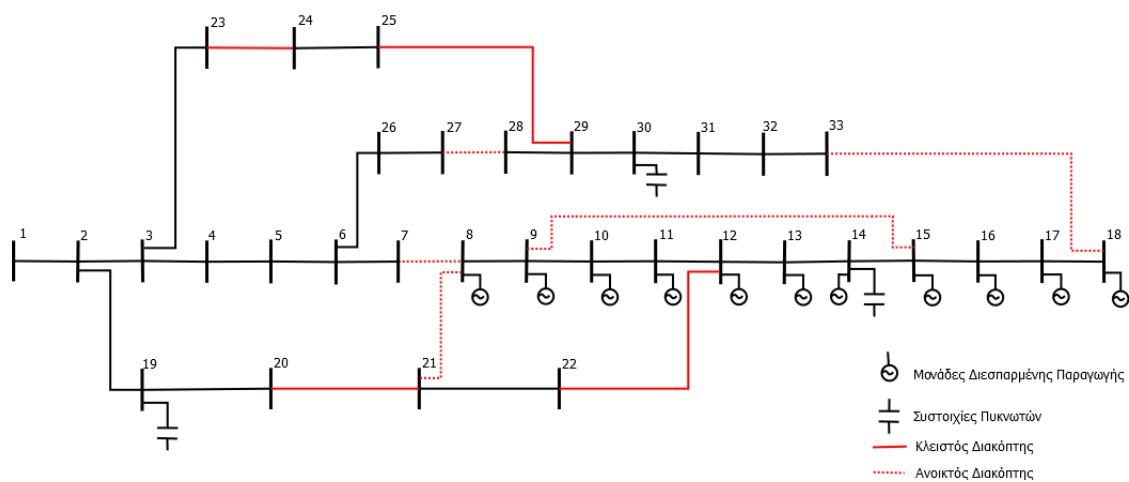
Σχήμα 7.6: Οι τάσεις των ζυγών του δικτύου ως προς τον χρόνο εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο PSO για βέλτιστη επαναδιαμόρφωση



Σχήμα 7.7: Τοπολογία του δικτύου 33 ζυγών στην πρώτη ώρα λειτουργίας

Η τοπολογία του δικτύου παραμένει ακτινική και για τις 24 ώρες που εκτελέστηκε ο αλγόριθμος. Ενδεικτικά στο σχήμα 7.7 και 7.8 φαίνεται η τοπολογία που είχε το δίκτυο

την πρώτη ώρα και στον πίνακα 7.5 φαίνονται όλες οι καταστάσεις των διακοπών για τα 24 σενάρια.



Σχήμα 7.8: Τοπολογία του δικτύου 33 ζυγών στην 24η ώρα λειτουργίας

Πίνακας 7.5: Καταστάσεις Διακοπών για κάθε σενάριο

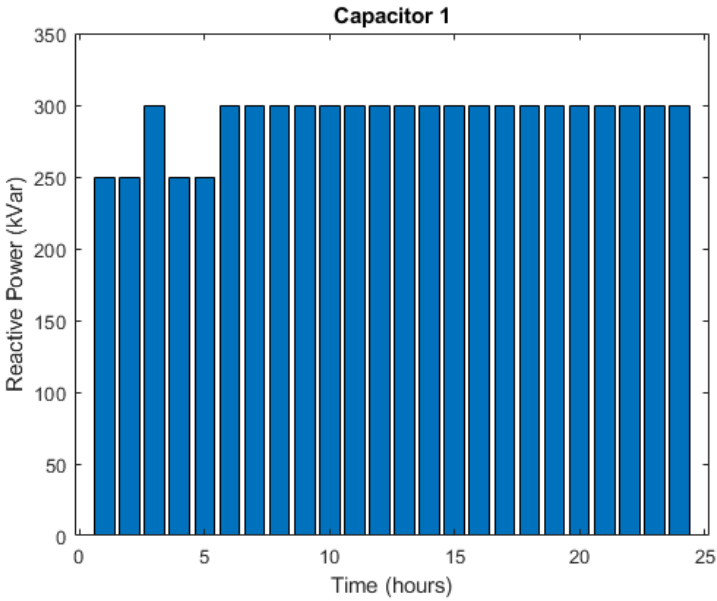
| Διακόπτης | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Ώρα | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 5 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 10 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 14 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 23 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |

Όπως παρατηρείται κατά την διάρκεια του 24ώρου δημιουργούνται 5 διαφορετικές τοπολογίες στο δίκτυο. Αυτές φαίνονται στον πίνακα 7.6.

Ταυτόχρονα με την σωστή λειτουργία του δικτύου είναι απαραίτητο να διατηρηθεί η περικοπή της ενεργού ισχύος των ΜΔΠ στο ελάχιστο δυνατό. Με τα παραπάνω

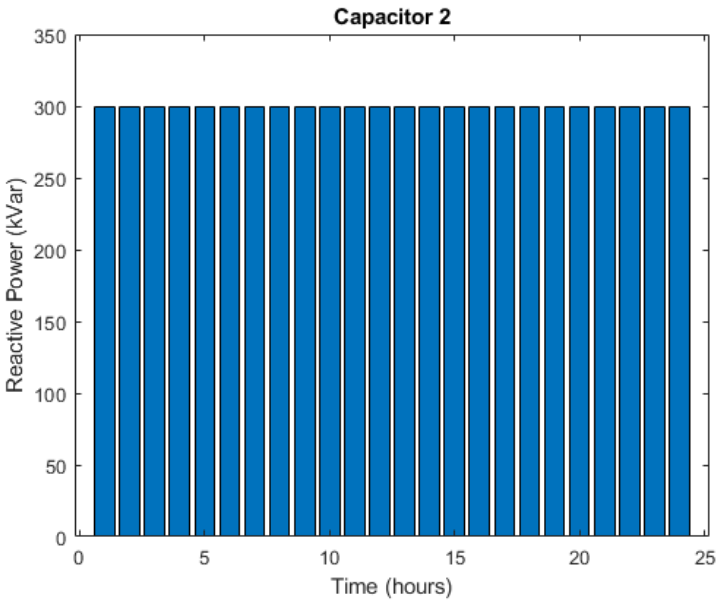
Πίνακας 7.6: Τοπολογίες δικτύου 33 ζυγών

| Διακόπτης | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Τοπολογία | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 5 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

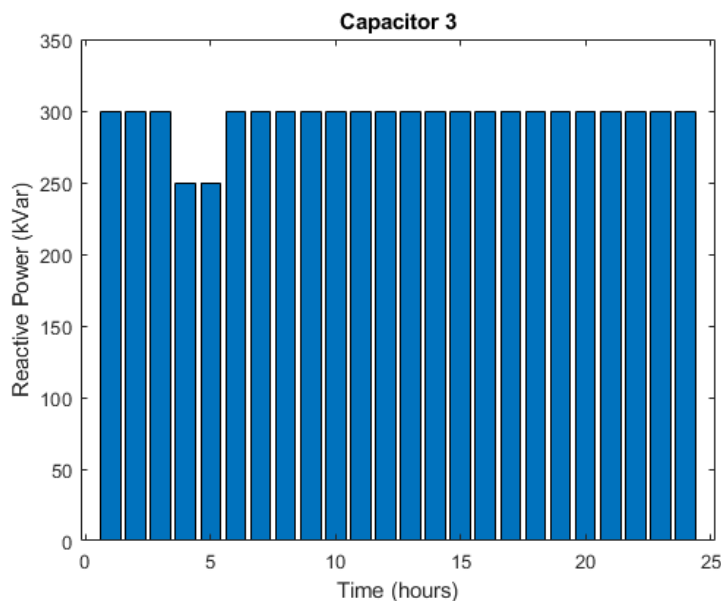


Σχήμα 7.9: Χωρητικότητα πρώτης συστοιχίας πυκνωτών C1 ως προς τον χρόνο

αποτελέσματα η περικοπή ενεργού ισχύος των ΜΔΠ παραμένει μηδενική και για τις



Σχήμα 7.10: Χωρητικότητα δεύτερης συστοιχίας πυκνωτών C2 ως προς τον χρόνο



Σχήμα 7.11: Χωρητικότητα τρίτης συστοιχίας πυκνωτών C3 ως προς τον χρόνο

24 ώρες. Επίσης γίνεται πάντα προσπάθεια το δίκτυο να παραμένει ακτινικό, πράγμα που επίσης επιτυγχάνεται κατά την διάρκεια όλου του 24ώρου. Στα σχήματα 7.9-7.11 φαίνονται οι τιμές που έχουν οι εγκαρσίες αντισταθμίσεις (σε MVar) για να προκύψουν τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

7.3 Εφαρμογή στο δίκτυο 136 ζυγών

Το δεύτερο μοντέλο που εξετάστηκε ήταν αυτό των 136 ζυγών όπως φαίνεται στο σχήμα 7.12. Είναι ένα πραγματικό δίκτυο διανομής στην Βραζιλία με ονομαστική τάση στα 13,8kV. Ο ζυγός 0 που είναι ο ζυγός στο τέρμα του δικτύου μεταφοράς έχει ονομαστική τάση 135kV. Όπως και στο δίκτυο των 33 ζυγών οι γραμμές στις οποίες έχει τοποθετηθεί διακόπτης αναπαρίστανται με κόκκινο χρώμα στο σχήμα και όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός η γραμμή είναι διακεκομμένη.

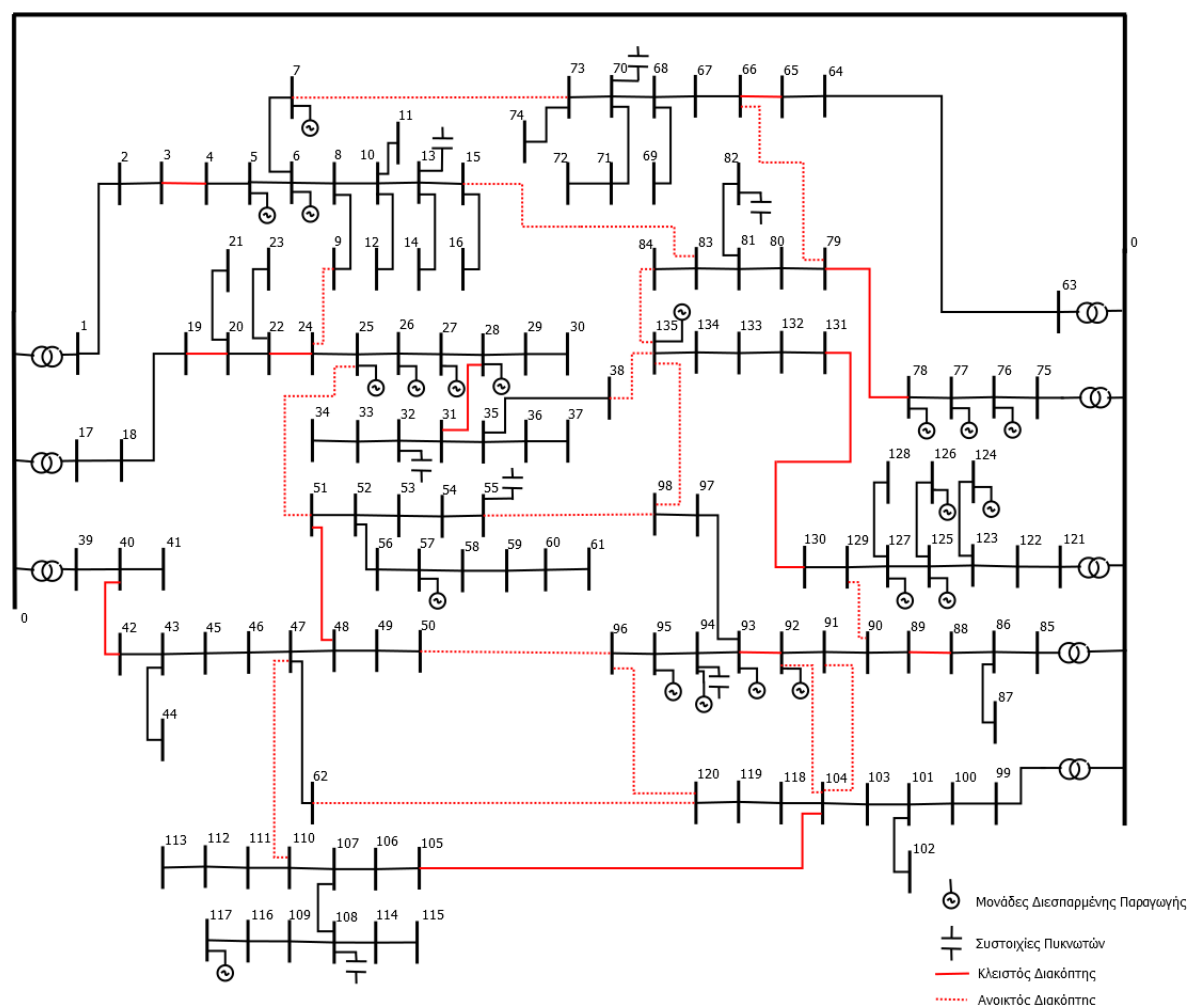
Στους πίνακες 7.7-7.9 φαίνονται τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Στο δίκτυο έχει γίνει εγκατάσταση ΜΔΠ εγκατεστημένης ισχύος 39MW και το δίκτυο λειτουργεί με φορτίο που φτάνει έως 18MW peak η ενεργός ισχύς της ζήτησης.

Στο δίκτυο είναι εγκατεστημένα δύο αιολικά πάρκα με εγκατεστημένη ισχύ 10MW το καθένα και 19 φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις με εγκατεστημένη ισχύ 1MW η καθεμία. Έχουν τοποθετηθεί 7 συστοιχίες εγκαρσιων αντισταθμίσεων που μπορούν να φτάσουν έως τα 500kVar αλλάζοντας την τιμή τους με βήμα 50kVar.

7.3.1 Εκτέλεση του μοντέλου χωρίς τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης

Όπως και στο δίκτυο των 33 ζυγών, έτσι και τώρα αρχικά έγινε εκτέλεση του δικτύου με σταθερή τοπολογία του σχήματος 7.12 και με σταθερές τιμές στις εγκαρσίες αντισταθμίσεις για όλα τα σενάρια, χωρίς καμία περικοπή ενεργού ισχύος από τις ΜΔΠ.

Οι διακόπτες S1-S12 παρέμειναν κλειστοί και οι υπόλοιποι ανοιχτοί διατηρώντας



Σχήμα 7.12: Δίκτυο διανομής 136 ζυγών

ακτινική την τοπολογία του δικτύου. Οι τιμές των εγχάρσιων αντισταθμίσεων φαίνονται στον πίνακα 7.10.

Στο σχήμα 7.13 παρουσιάζονται οι καμπύλες με την ζήτηση του φορτίου και την παραγωγή των ΜΔΠ για κάθε ώρα. Αυτό το μοντέλο όπως και το προηγούμενο εκτελέστηκε για ένα 24ωρο με ένα σενάριο κάθε ώρα. Στα σχήματα 7.14-7.15 φαίνονται οι απώλειες στις γραμμές και το πώς διαμορφώνονται οι τάσεις στους ζυγούς.

Παρατηρείται και πάλι ότι οι τάσεις των ζυγών παίρνουν τιμές μη επιθυμητές για την ομαλή λειτουργία του δικτύου καθώς ξεπερνούν τα όρια που έχουν τεθεί. Σκοπός της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης είναι να λειτουργεί το δίκτυο εντός των κατάλληλων ορίων λειτουργίας διατηρώντας τις απώλειες σε όσο το δυνατόν χαμηλό επίπεδο. Στην επόμενη ενότητα φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

7.3.2 Εκτέλεση του μοντέλου με επαναδιαμόρφωση του δικτύου με χρήση του αλγόριθμου PSO

Η βέλτιστη επαναδιαμόρφωση του δικτύου με χρήση του αλγόριθμου PSO έγινε χρησιμοποιώντας το παραπάνω δίκτυο 136 ζυγών με την ίδια ζήτηση φορτίου και τις ίδιες ποσότητες παραγωγής ενέργειας από τις ΜΔΠ. Η παράμετρος του PSO για τα σωμα-

Πίνακας 7.7: Δεδομένα διακοπών του δικτύου 136 ζυγών

| Τηλεχειριζόμενοι Διακόπτες | Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Άφιξης |
|----------------------------|------------------|--------------|
| S1 | 3 | 4 |
| S2 | 19 | 20 |
| S3 | 22 | 24 |
| S4 | 28 | 31 |
| S5 | 40 | 42 |
| S6 | 48 | 51 |
| S7 | 65 | 66 |
| S8 | 78 | 79 |
| S9 | 88 | 89 |
| S10 | 92 | 93 |
| S11 | 104 | 105 |
| S12 | 130 | 131 |
| S13 | 7 | 73 |
| S14 | 9 | 24 |
| S15 | 15 | 83 |
| S16 | 25 | 51 |
| S17 | 38 | 135 |
| S18 | 47 | 110 |
| S19 | 50 | 96 |
| S20 | 55 | 98 |
| S21 | 62 | 120 |
| S22 | 66 | 79 |
| S23 | 84 | 135 |
| S24 | 90 | 129 |
| S25 | 91 | 104 |
| S26 | 92 | 104 |
| S27 | 96 | 120 |
| S28 | 98 | 135 |

Πίνακας 7.8: Δεδομένα εγκάρσιων αντισταθμίσεων του δικτύου 136 ζυγών

| Εγκάρσιες Αντισταθμίσεις | Ζυγός | Q (MVar) |
|--------------------------|-------|----------|
| C1 | 13 | 0,5 |
| C2 | 32 | 0,5 |
| C3 | 55 | 0,5 |
| C4 | 70 | 0,5 |
| C5 | 82 | 0,5 |
| C6 | 94 | 0,5 |
| C7 | 108 | 0,5 |

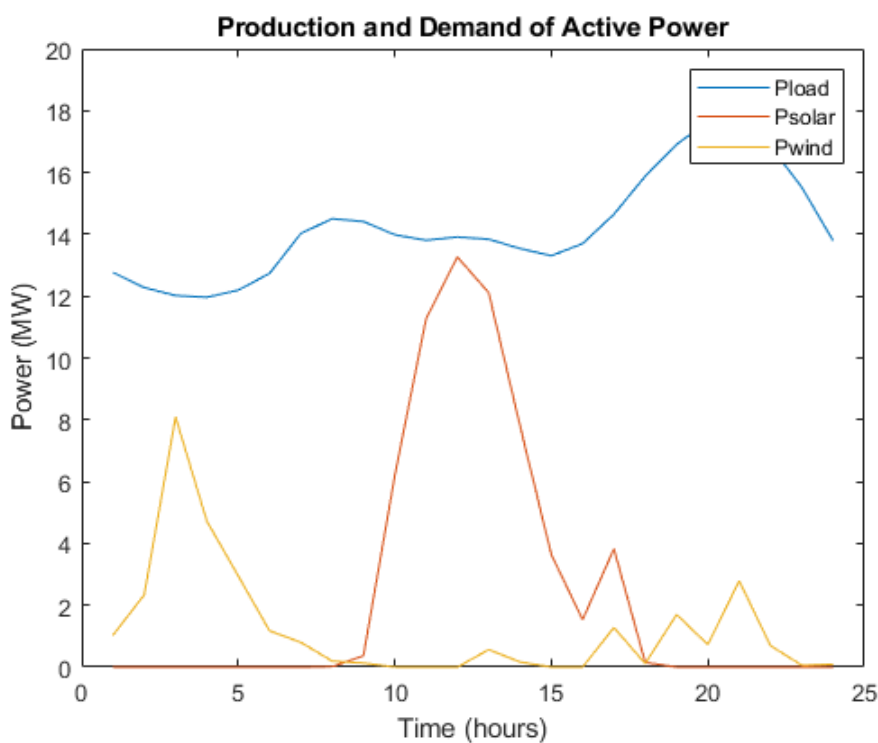
τίδια (particles) ήταν 150 και οι εποχές (epochs) ήταν 200. Οι παράμετροι που λαμβάνει υπόψιν του ο αλγόριθμος για να υλοποιηθεί είναι ένας πίνακας 37 θέσεων όπως φαίνεται παρακάτω. Κάθε παράμετρος παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1 και στην συνέχεια γίνεται κανονικοποίηση των τιμών στις επιθυμητές τιμές. Δηλαδή οι διακόπτες παίρνουν τιμές 0 και 1, οι πυκνωτές τιμές από 0 έως 500 με βήμα 50 και η περικοπή των ΜΔΠ 0 έως 15, όσο δηλαδή και το ποσοστό που γίνεται περικοπή.

Πίνακας 7.9: Δεδομένα ΜΔΠ του δικτύου 136 ζυγών

| Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής | Ζυγός | Είδος | P (MW) | cosφ |
|--------------------------------|---------|-------|--------|------|
| G1 | 117 | A/Γ | 10 | 1 |
| G2 | 135 | A/Γ | 10 | 1 |
| G3-G5 | 5-7 | Φ/B | 1 | 1 |
| G6-G9 | 25-28 | Φ/B | 1 | 1 |
| G10 | 57 | Φ/B | 1 | 1 |
| G11-G13 | 76-78 | Φ/B | 1 | 1 |
| G14-G17 | 92-95 | Φ/B | 1 | 1 |
| G18-21 | 124-127 | Φ/B | 1 | 1 |

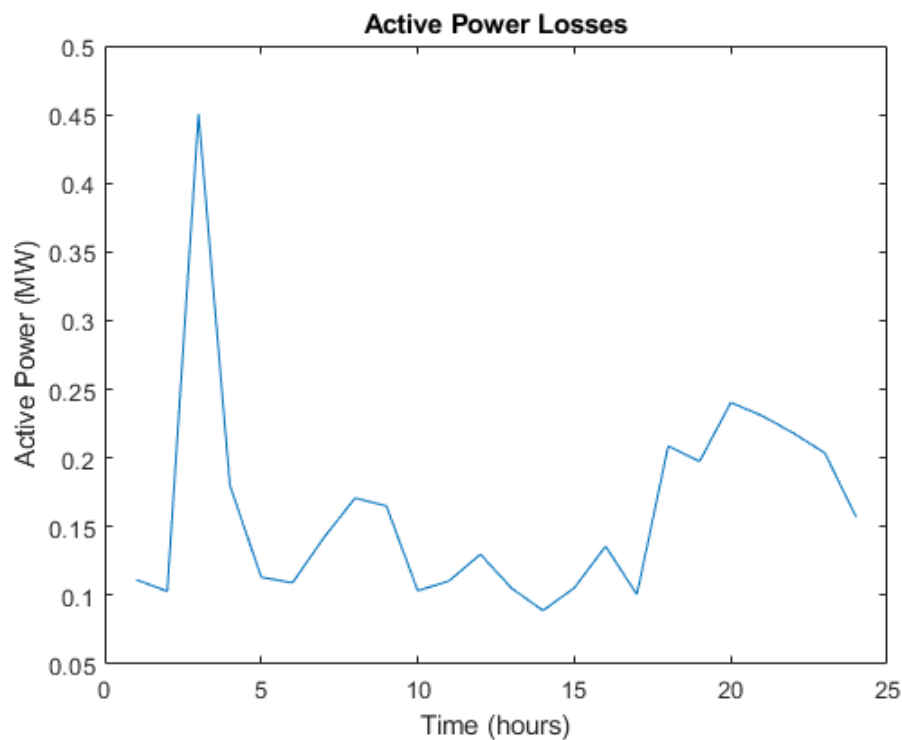
Πίνακας 7.10: Σταθερές εγκάρσιες αντισταθμίσεις στο δίκτυο 136 ζυγών για εκτέλεση χωρίς την βέλτιστη επαναδιαμόρφωση

| Εγκάρσιες Αντισταθμίσεις | Σταθερή άεργος ισχύς στο δίκτυο (kVar) |
|--------------------------|--|
| C1 | 500 |
| C2 | 500 |
| C3 | 500 |
| C4 | 500 |
| C5 | 350 |
| C6 | 400 |
| C7 | 500 |

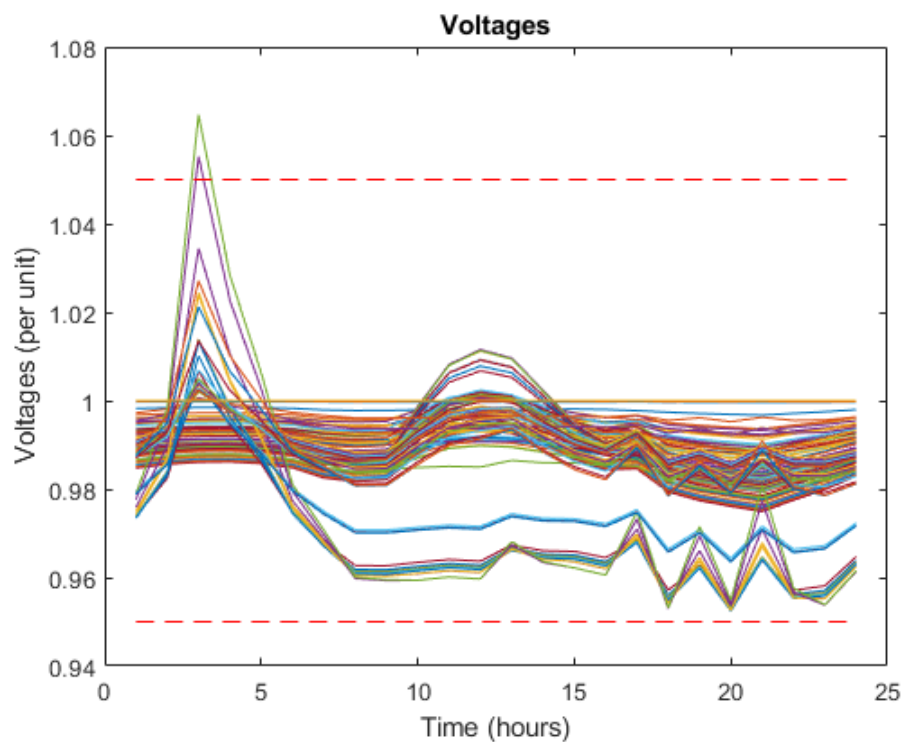


Σχήμα 7.13: Καμπύλες ζήτησης φορτίου και παραγωγής ΜΔΠ για κάθε ώρα σε ένα 24ωρο

Όπως στο δίκτυο των 33 ζυγών έτσι και σε αυτό το δίκτυο με βάση το αποτέλεσμα



Σχήμα 7.14: Απώλειες ενεργού ισχύος σε MW των γραμμών του δικτύου ως προς τον χρόνο



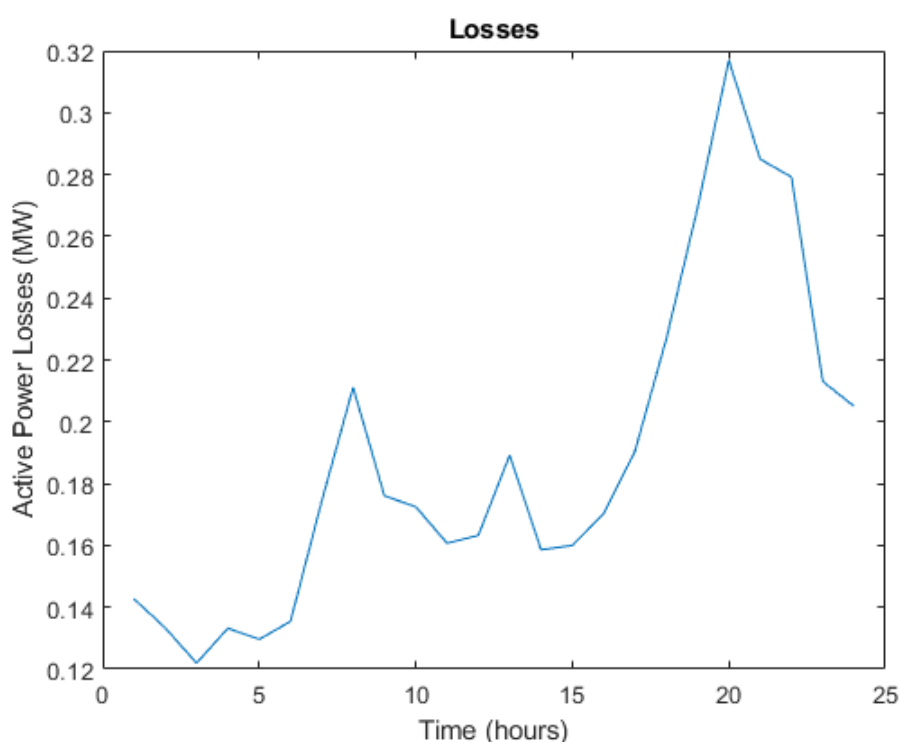
Σχήμα 7.15: Οι τάσεις των ζυγών του δικτύου ως προς τον χρόνο

που προέκυψε, εξυπηρετούνται όλα τα φορτία σε κάθε χρονική στιγμή. Στα σχήματα 7.16 και 7.17 φαίνονται οι τιμές των απωλειών σε κάθε ώρα σε MW και οι τιμές των

Πίνακας 7.11: Μορφή Διανύσματος εισόδου δικτύου 136 ζυγών

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|------------------|-----|-----|-----|
| S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | S14 |
| S15 | S16 | S17 | S18 | S19 | S20 | S21 | S22 | S23 | S24 | S25 | S26 | S27 | S28 |
| C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | Solar Curtailment | | | Wind Curtailment | | | |

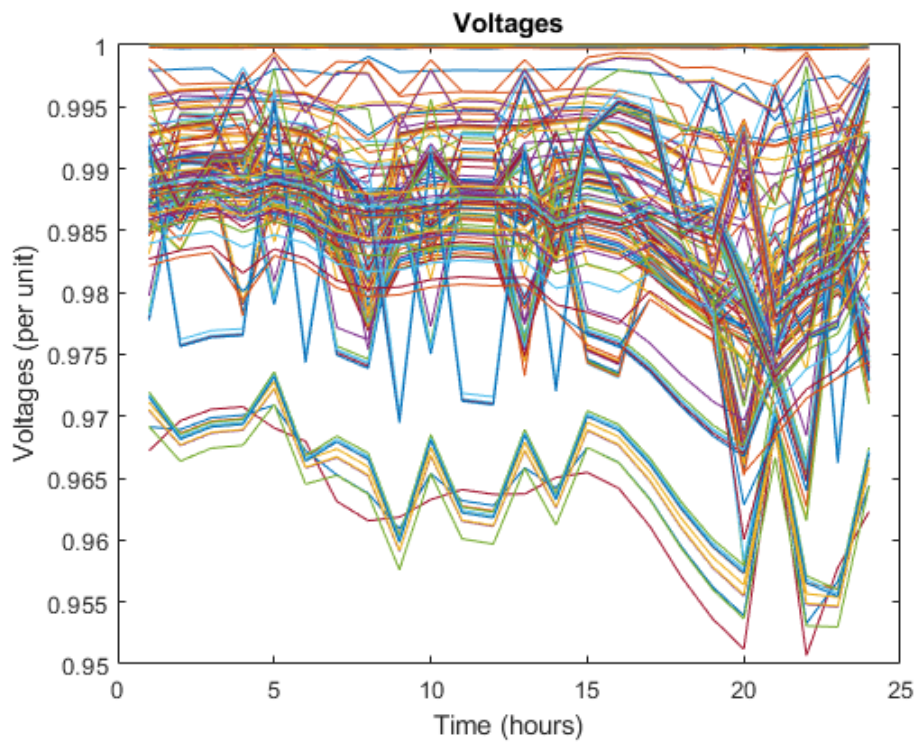
τάσεων των ζυγών σε ανά μονάδα τιμές. Και σε αυτό το μοντέλο τα αποτελέσματα είναι αρκετά ικανοποιητικά καθώς η λειτουργία του δικτύου γίνεται σε επιθυμητά όρια τάσεων. Το άθροισμα όλων των απωλειών για το 24ωρο είναι $4,52MWh$ ενώ ήταν $3,88MWh$ χωρίς την χρήση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης. Οι απώλειες είναι λίγο περισσότερες τώρα όμως το αποτέλεσμα θεωρείται ικανοποιητικό επειδή τώρα το σύστημα προσφέρει καλύτερη ποιότητα ενέργειας στους καταναλωτές.



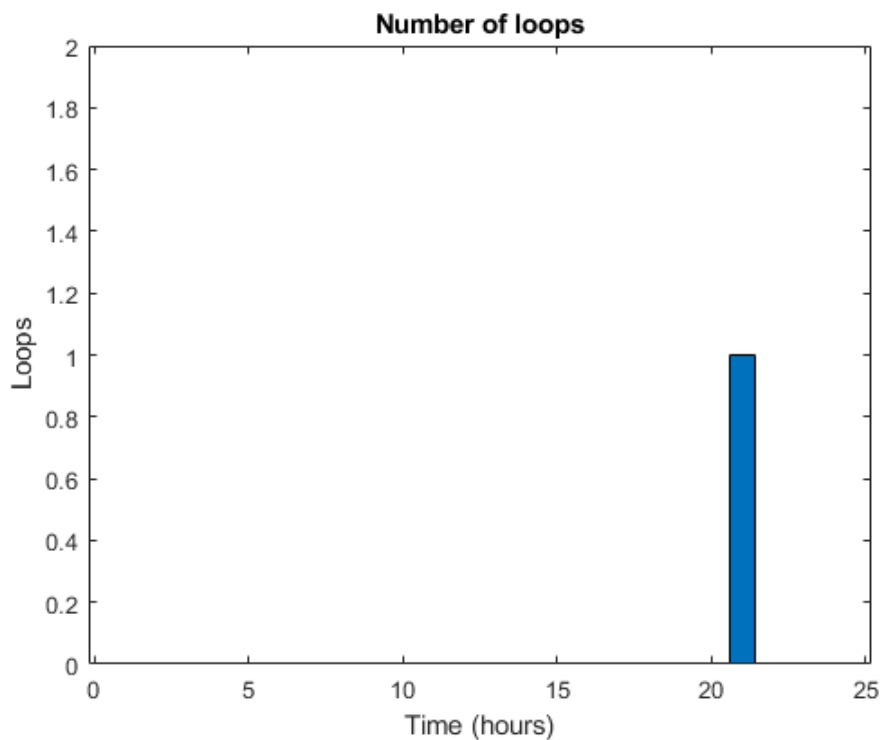
Σχήμα 7.16: Απώλειες ενεργού ισχύος σε MW των γραμμών του δικτύου ως προς τον χρόνο

Ταυτόχρονα οικονομικά ωφέλιμο είναι να παραμείνει η περικοπή ενεργού ισχύος από τις ΜΔΠ στο ελάχιστο. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης κρατά τα επίπεδα αυτά μηδενικά και σε αυτή την περίπτωση. Το δίκτυο επίσης παραμένει ακτινικό στο μεγαλύτερο μέρος των σεναρίων όμως όταν προσπαθεί να επαναφέρει την μεγάλη πτώση τάσης που υπάρχει λόγω της υψηλής ζήτησης φορτίου δημιουργεί έναν βρόχο στην τοπολογία του δικτύου. Στο σχήμα 7.18 φαίνεται ο αριθμός των βρόχων σε κάθε ώρα.

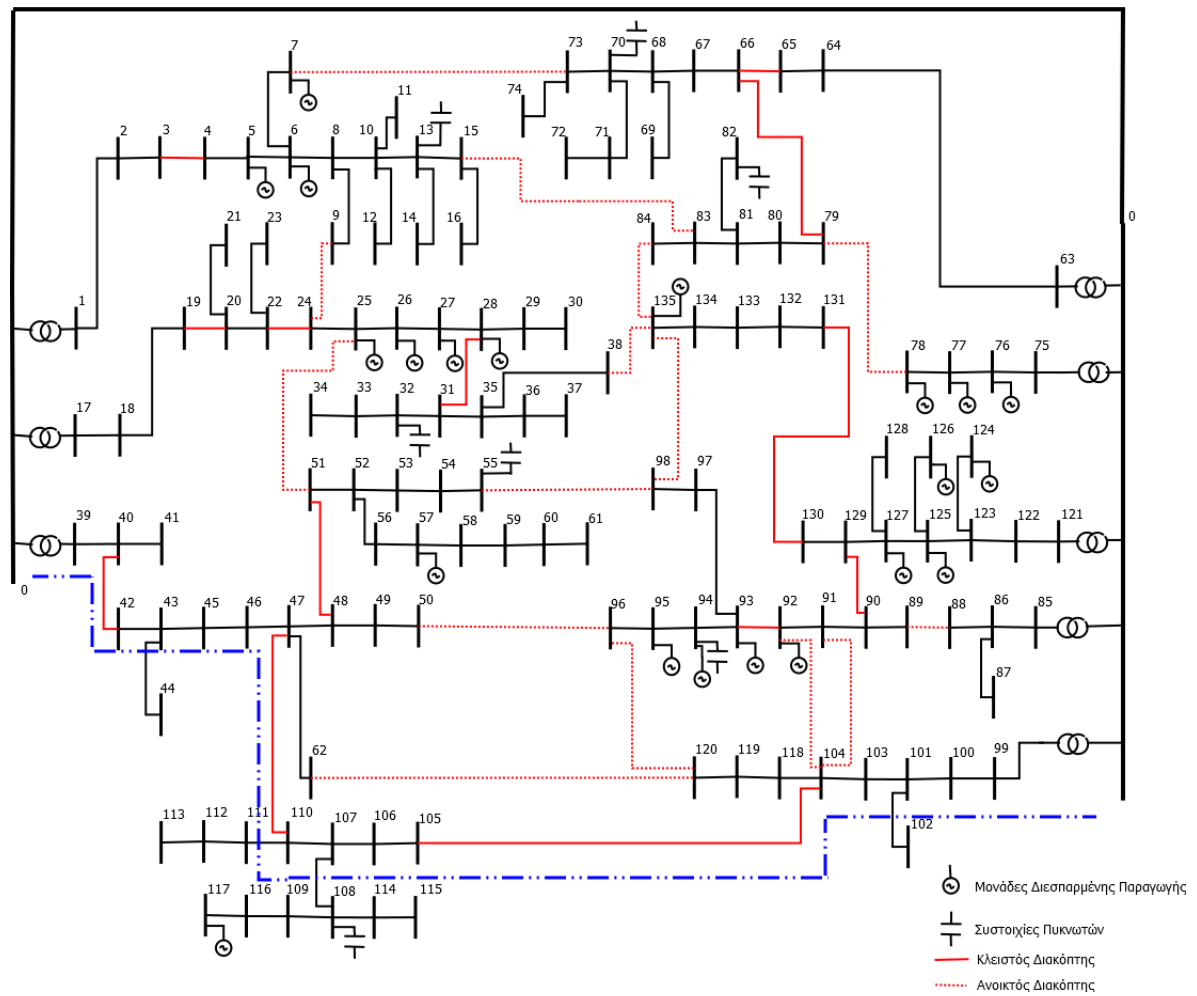
Στην ώρα 21 όπου δημιουργείται και ένας βρόχος φαίνεται στο σχήμα 7.19 η τοπολογία του δικτύου. Με μπλε διακεκομμένη γραμμή φαίνεται το 'μονοπάτι' που ξεκινά από τον ζυγό 0 και καταλήγει πάλι στον ζυγό 0, δηλαδή κλείνει εκεί ο βρόχος. Υπάρχει και σχήμα 7.20 που δείχνει την τοπολογία την πρώτη ώρα. Επίσης στον πίνακα 7.12 φαίνονται οι καταστάσεις των διακοπών για κάθε ώρα. Στην συνέχεια, στα σχήματα 7.21 – 7.27 δίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις τιμές των εγκάρσιων



Σχήμα 7.17: Οι τάσεις των ζυγών του δικτύου ως προς τον χρόνο εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο PSO για βέλτιστη επαναδιαμόρφωση

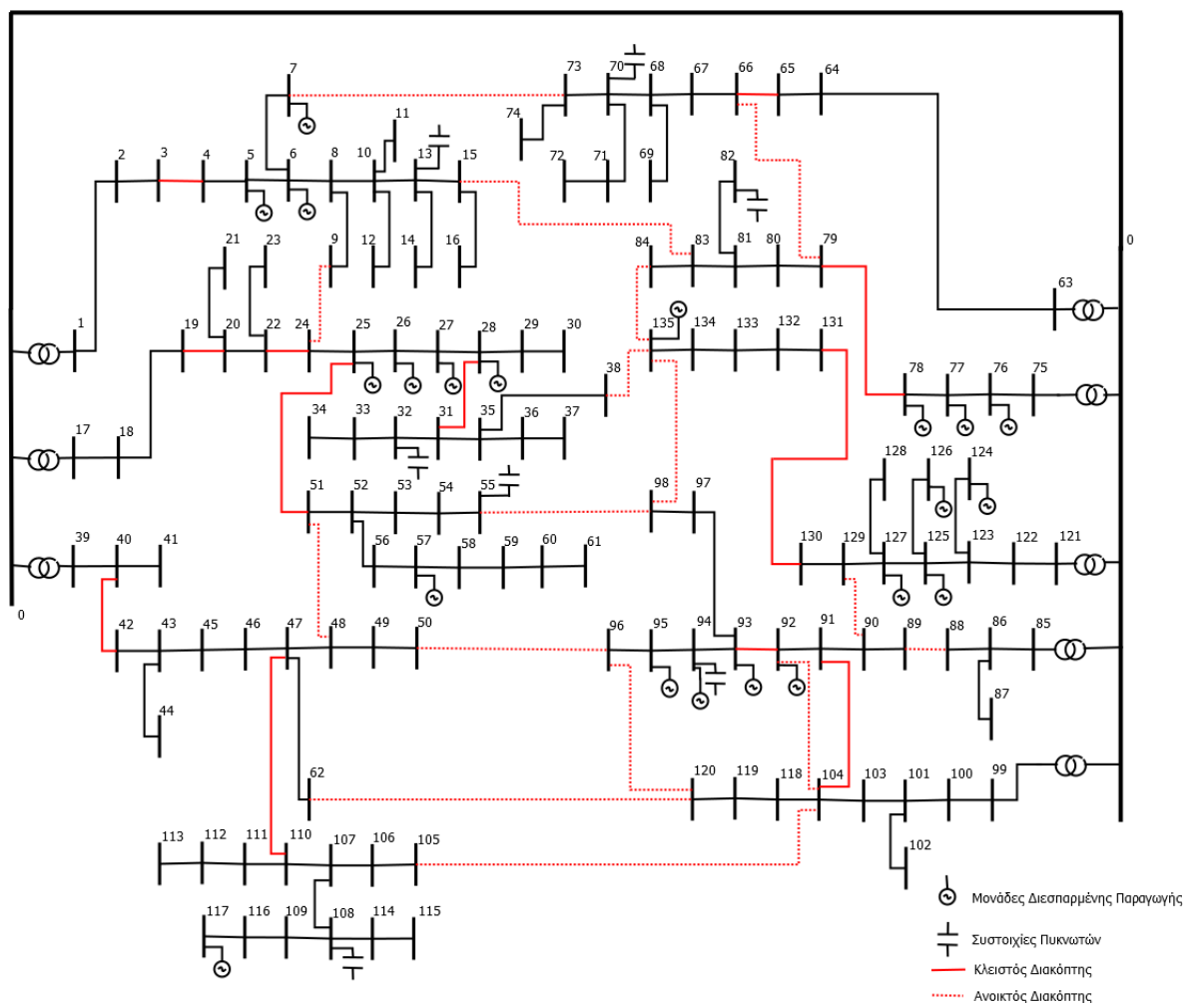


Σχήμα 7.18: Ο αριθμός των βρόχων που σχηματίζονται στο δίκτυο σε κάθε ώρα



Σχήμα 7.19: Τοπολογία δικτύου 136 ζυγών στην 21η ώρα

αντισταθμίσεων που έχουν τοποθετηθεί.



Σχήμα 7.20: Τοπολογία δικτύου 136 ζυγών στην 1η ώρα

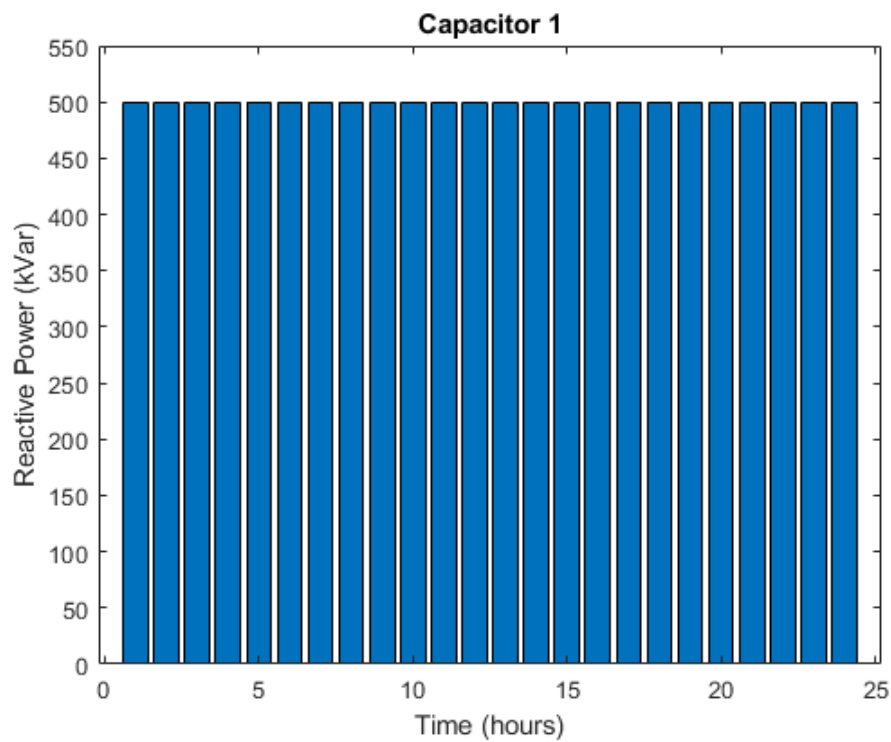
Πίνακας 7.12: Καταστάσεις Διακοπών για κάθε σενάριο στο δίκτυο 136 ζυγών

| Διακόπτης | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | S14 | S15 | S16 | S17 | S18 | S19 | S20 | S21 | S22 | S23 | S24 | S25 | S26 | S27 | S28 |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ωρεα | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 17 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 18 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 19 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 20 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 21 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 22 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 23 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 24 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

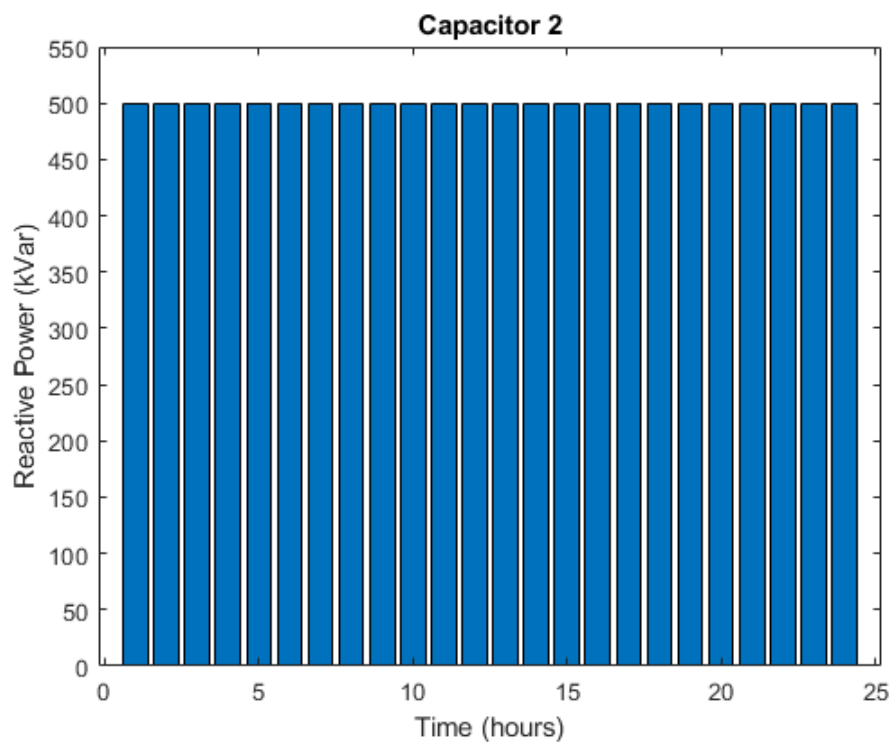
Κατά την διάρκεια του 24ώρου για το δίκτυο των 136 ζυγών δημιουργούνται 19 διαφορετικές τοπολογίες στο δίκτυο. Αυτές φαίνονται στον πίνακα 7.13.

Πίνακας 7.13: Τοπολογίες δικτύου 136 ζυγών

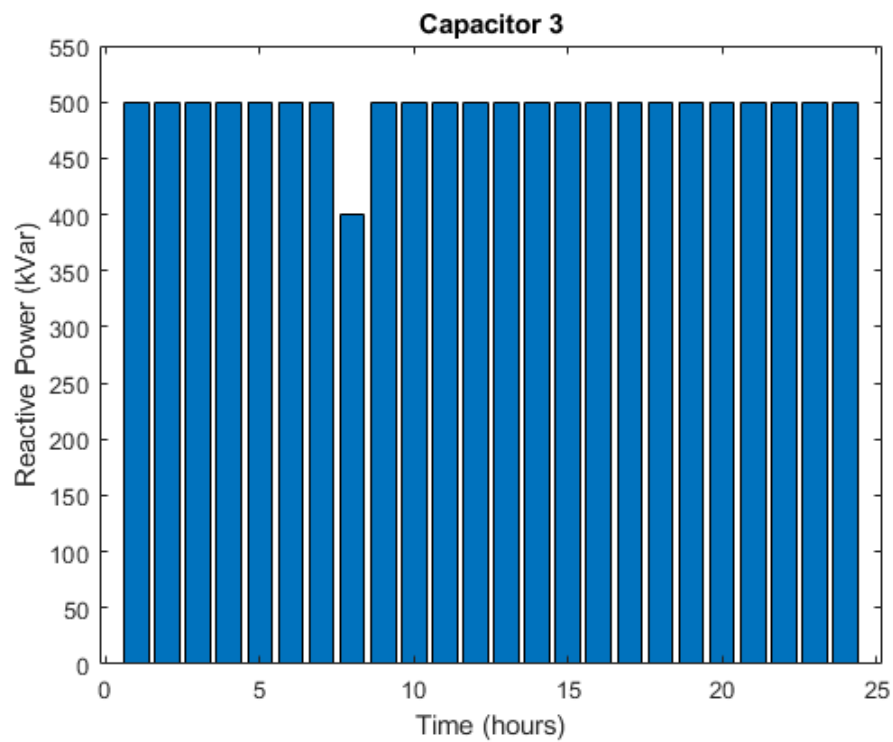
| Διασώπτης | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | S14 | S15 | S16 | S17 | S18 | S19 | S20 | S21 | S22 | S23 | S24 | S25 | S26 | S27 | S28 |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Τοπολογία | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |



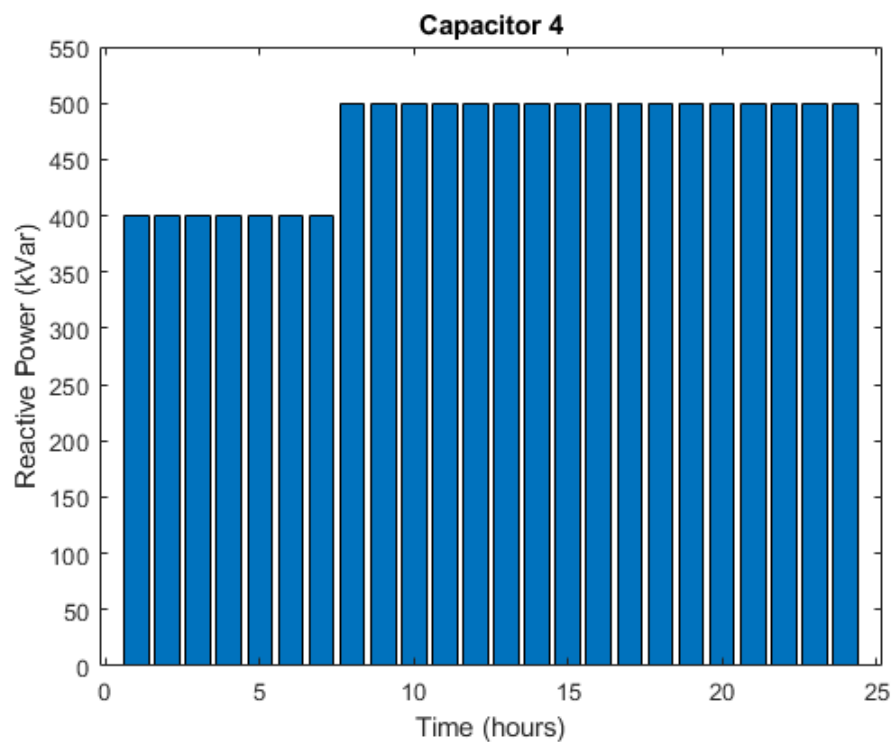
Σχήμα 7.21: Χωρητικότητα πρώτης συστοιχίας πυκνωτών C1 ως προς τον χρόνο



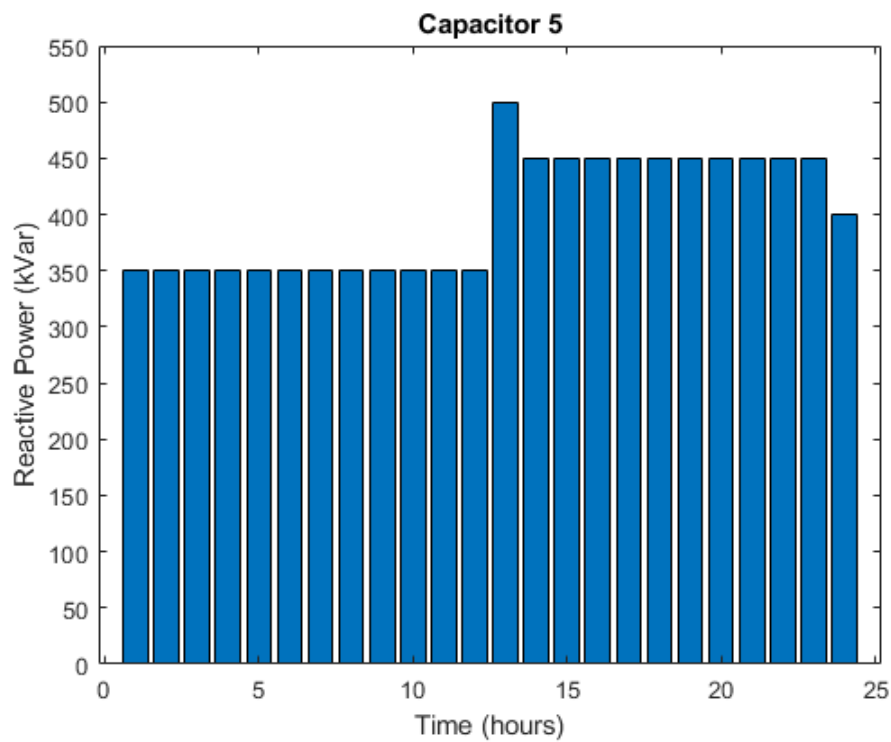
Σχήμα 7.22: Χωρητικότητα δεύτερης συστοιχίας πυκνωτών C2 ως προς τον χρόνο



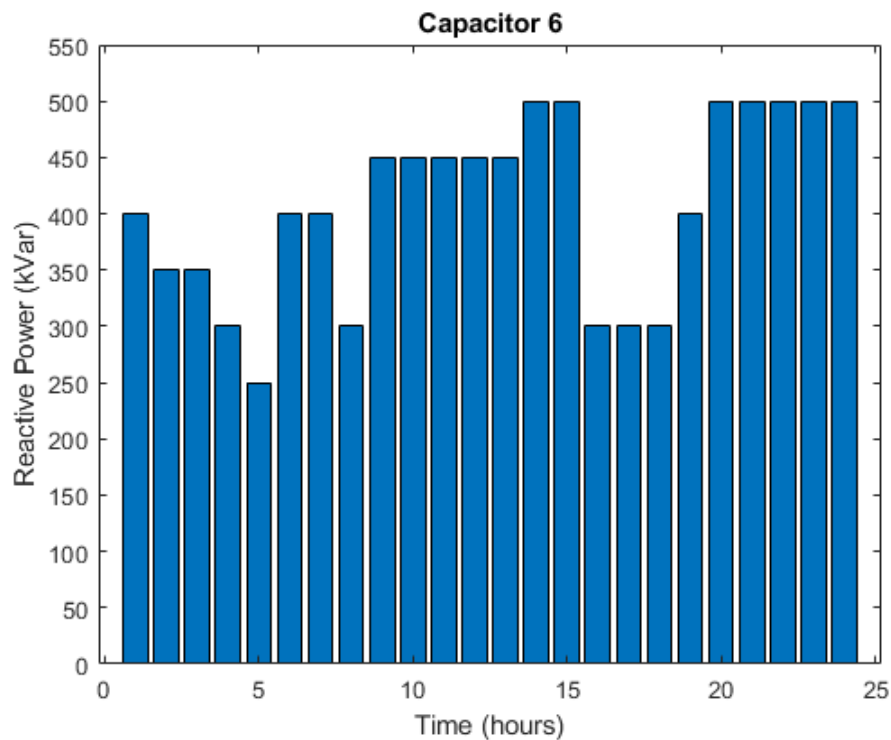
Σχήμα 7.23: Χωρητικότητα τρίτης συστοιχίας πυκνωτών C3 ως προς τον χρόνο



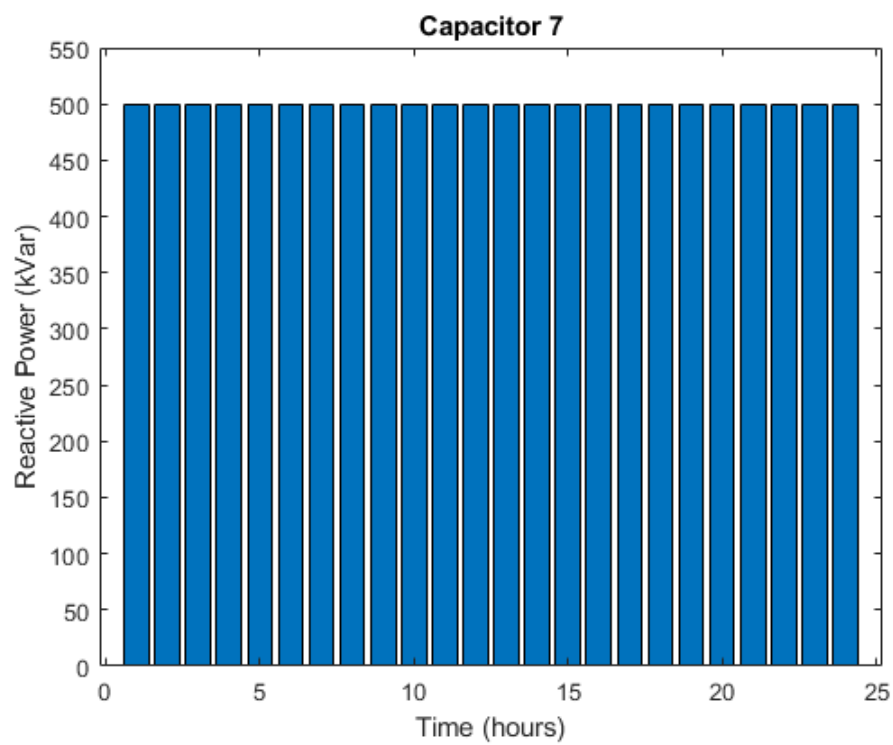
Σχήμα 7.24: Χωρητικότητα τέταρτης συστοιχίας πυκνωτών C4 ως προς τον χρόνο



Σχήμα 7.25: Χωρητικότητα πέμπτης συστοιχίας πυκνωτών C5 ως προς τον χρόνο



Σχήμα 7.26: Χωρητικότητα έκτης συστοιχίας πυκνωτών C6 ως προς τον χρόνο



Σχήμα 7.27: Χωρητικότητα έβδομης συστοιχίας πυκνωτών C7 ως προς τον χρόνο

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

8.1 Σύνοψη της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε εφαρμογή του προβλήματος βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των δικτύων διανομής (Optimal Network Reconfiguration Problem). Το πρόβλημα αυτό έχει ως λύση την αλλαγή καταστάσεων των στοιχείων ελέγχου του δικτύου με σκοπό την ελαχιστοποίηση μίας αντικειμενικής συνάρτησης ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη δυνατή κατάσταση λειτουργίας του δικτύου. Η αντικειμενική συνάρτηση που ορίστηκε στην παρούσα εργασία είχε ως στόχο να διατηρήσει σε χαμηλά επίπεδα τις απώλειες του δικτύου κρατώντας ταυτόχρονα χαμηλά την περικοπή ενεργού ισχύος των ΜΔΠ, έχοντας τάσεις εντός ορίων λειτουργίας, κάνοντας λίγους χειρισμούς των κινητών στοιχείων των δικτύου και κρατώντας το δίκτυο σε ακτινική μορφή.

Τα δίκτυα διανομής που υπάρχουν σήμερα κατά κύριο λόγο δεν έχουν κατασκευαστεί με τρόπο τέτοιο ώστε να γίνει εγκατάσταση σε αυτά ΜΔΠ. Τα τελευταία χρόνια με την αύξηση της εγκατάστασης τέτοιων μονάδων πρέπει να γίνεται και ο κατάλληλος έλεγχος για την ομαλή λειτουργία του δικτύου ώστε να αποφεύγονται οι διαταραχές. Σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζεται περικοπή της ενεργού ισχύος που παρέχουν οι ΜΔΠ στο δίκτυο όμως αυτό είναι οικονομικά ανώφελο. Ο διαχειριστής του δικτύου προσφέρει αποζημίωση στον ιδιοκτήτη των ΜΔΠ ακόμα και αν πραγματοποιηθεί περικοπή της ενέργειας που προσφέρουν, γι' αυτό τον λόγο πρέπει να μένει η περικοπή αυτή σε χαμηλά επίπεδα. Ο τηλεχειρισμός κάποιων στοιχείων του δικτύου βοηθά σημαντικά στην αποτελεσματικότερη λειτουργία του δικτύου. Η αλλαγή της τοπολογίας με την χρήση διακοπών, ο έλεγχος των εγκάρσιων αντισταθμίσεων βοηθούν στην αποτελεσματικότερη λειτουργία συμβάλλοντας στην μείωση των απωλειών των γραμμών διατηρώντας σε κατάλληλα επίπεδα την λειτουργία του δικτύου. Ο τηλεχειρισμός στα δίκτυα διανομής συμβάλλει σημαντικά στην βέλτιστη επαναδιαμόρφωσή τους χωρίς να υπάρξει διακοπή στην λειτουργία τους. Ο ορισμός του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης βασίστηκε στο μοντέλο της βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal Power Flow).

Για την διατύπωση και την λύση του προβλήματος έγινε χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος MATLAB. Χρησιμοποιήθηκε το open-source εργαλείο MATPOWER για την προσομοίωση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης PSO (Particle Swarm Optimization) για να βρεθεί η λύση της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του δικτύου. Το μοντέλο που φτιάχτηκε εφαρμόστηκε σε δίκτυα 33 και 136 ζυγών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν ο τηλεχειρι-

σμός των διακοπών για την αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου σε συνδυασμό με την αλλαγή των τιμών των εγκαρσίων αγωγιμοτήτων που εφαρμόζονται σε κάποιους ζυγούς του δικτύου, μπορούν να έχουν πολύ καλά αποτελέσματα σ' ό,τι αφορά τις απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου, την ελαχιστοποίηση περικοπής ενεργού ισχύος από τις ΜΔΠ και ταυτόχρονα την λειτουργία του δικτύου σε επιθυμητά όρια λειτουργίας.

Bibliography

- [1] URL: www.mathworks.com.
- [2] P. Hallberg et al. "Active distribution system management a key tool for the smooth intergration of distributed generation". In: *Eurelectric TF Active System Management* (2013).
- [3] M. J. Dolan E. M. Davidson I. Kockar G. W. Ault and S. D. J. McArthur. "Distribution power flow management utilizing an online optimal power flow technique". In: *IEEE Trans. Power Syst.* 27.2 (Jan 2012), pp. 790–799.
- [4] Birge B. "PSOt, A Particle Swarm Optimization Toolbox for Matlab". In: *IEEE Swarm Intelligence Symposium Proceedings* (2003), April 24–26.
- [5] M. E. Baran and F. F. Wu. "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing". In: *IEEE Trans. Power Deliv.* 4.2 (April 1989), pp. 1401–1497.
- [6] I. Bilibin and F. Capitanescu. "Contributions to thermal constraints management in radial active distribution systems". In: *Electr. Power Syst. Res.* 111 (Jun. 2014), pp. 169–176.
- [7] B. Birge. *Particle Swarm Optimization Toolbox version 1.0.0.0*.
- [8] *Directive 2009/72/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in electricity*.
- [9] J. Riquelme Santos E. Romero Ramos and J. Reyes. "A simpler and exact mathematical model for the computation of the minimal losses power tree". In: *Electr. Power Syst. Res.* 80.5 (May 2010), pp. 562–571.
- [10] I. Bilibin F. Capitanescu and E. Romero Ramos. "A comprehensive centralized approach for voltage constraints management in active distribution grid". In: *IEEE Trans. Power Syst.* 29.2 (Mar. 2014).
- [11] A. Keane L. F. Ochoa C. L. T. Borges G. W. Ault A. D. Alarcon-Rodriguez R. A. F. Currie F. Pilo C. Dent G. P. Harrison. "State-of-the-Art Techniques and Challenges Ahead for Distributed Generation Planning and Optimization". In: *IEEE Trans. Power Syst.* 28.2 (May 2013), pp. 1493–1502.
- [12] R. A. Romero J. R. Mantovani F. Casari. "Reconfiguracao de sistemas de distribuicao radiais utilizando o criterio de queda de tensao". In: *SBA Controle Automacao* 11.3 (Sep. 2000), pp. 150–159.
- [13] Eberhart R. Kennedy J. "Particle Swarm Optimization". In: *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. IV* (1995), 1942–1948.

- [14] R. Viral D. K. Khatod. “Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012), 5146–5165.
- [15] Dr. K. Thippeswamy M. R. Siddappaji. “Reliability Indices Evaluation and Optimal Placement Distributed Generation for Loss Reduction in Distribution System by using Fast Decoupled Method”. In: *International Conference of Energy, Communication, Data analytics and Soft Computing (ICECDS-2017)* (2017 IEEE), 978-1-5386-1887-5/17.
- [16] I. B. Hamida S. B. Salah F. Msahli M. F. Mimouni. “Optimal network reconfiguration and renewable DG integration considering time sequence variation in load and DGs”. In: *Renewable Energy* 121 (Jan. 2018), pp. 66–80.
- [17] C. E. Murillo-Sanchez R. D. Zimmerman. *MATPOWER User’s Manual Version 7.0*. URL: <https://matpower.org/doc/manuals/>.
- [18] T. Ackermann G. Andersson L. Soder. “Distributed Generation: a definition”. In: *Electric Power Systems Research* 57.3 (May 2001), 195–204.
- [19] T. Goren. *Electrical power distribution system engineering*. 3ed ed. CRC Press, 2014.
- [20] Α. Δ. Αναστασίου. *Βέλτιστη Επαναδιαμόρφωση Έξυπνων Δικτύων Διανομής με Εφαρμογές σε Προβλήματα Αποκατάστασης της Λειτουργίας τους*. Διπλωματική Εργασία: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2017.
- [21] Α. Πάσχος. *Ανίχνευση Ραδιοφάσματος Γνωστικών Ραδιοσυστημάτων με Επιταχυνόμενη Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων*. Διπλωματική Εργασία: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, έ 2014.
- [22] Δ. Ο. Σιάγκας. *Βέλτιστη Επαναδιαμόρφωση Τοπολογίας Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Διεσπαρμένη Παραγωγή*. Διπλωματική Εργασία: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2016.
- [23] Ν. Χ. Κουτσούκης. *Βελτιστοποίηση Λειτουργίας και Προγραμματισμού Ανάπτυξης Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Διδακτορική Διατριβή: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούνιος 2019.
- [24] Π. Σ. Γεωργιλάκης. *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ) [Online], 2015.