



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ
ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΓΙΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ
ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ
ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Κλαμενάκος

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Παναγιώτης Α. Καραφώτης, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2019



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ
ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΓΙΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ
ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ
ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Κλαμενάκος

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Παναγιώτης Α. Καραφώτης, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Μαρτίου 2019

.....
Παύλος Γεωργιλάκης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....
Ιωάννης Γκόνος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2019

.....
Ηλίας Κλαμενάκος

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

Copyright © Ηλίας Κλαμενάκος, 2019.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διατύπωση και επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ακτινικών δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με διανεμημένη παραγωγή. Στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι 1) η ελαχιστοποίηση των απωλειών ηλεκτρικής ισχύος του δικτύου διανομής, 2) η μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας του δικτύου και 3) η μέγιστη διείσδυση διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο.

Αρχικά αναλύεται το πρόβλημα της AC ροής ισχύος για ακτινικά δίκτυα διανομής, πάνω στο οποίο βασίστηκε το μαθηματικό μοντέλο της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εξισώσεις της ροής ισχύος τροποποιούνται κατάλληλα έτσι ώστε να περιλαμβάνουν την διακριτή συμπεριφορά των διακοπών ως ακέραιες μεταβλητές. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που προκύπτει μοντελοποιήθηκε ως πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς.

Στην παρούσα εργασία το προτεινόμενο μοντέλο υλοποιήθηκε σε περιβάλλον GAMS και εφαρμόστηκε σε δύο δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας 43 και 69 κόμβων. Υλοποιούνται και παρουσιάζονται δύο κατηγορίες δοκιμών για κάθε δίκτυο. Στην πρώτη συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν ανάλογα με το κριτήριο επαναδιαμόρφωσης στο οποίο δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα, μεταβάλλοντας τα βάρη της αντικειμενικής συνάρτησης. Στην δεύτερη περίπτωση, συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν ανάλογα με το μέγεθος της διανεμημένης παραγωγής που διεισδύει στο δίκτυο. Αναλύονται τα αποτελέσματά τους, ενώ παράλληλα προτείνονται και ορισμένες επεκτάσεις της εργασίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Δίκτυα διανομής, βέλτιστη επαναδιαμόρφωση, απώλειες ισχύος, αξιοπιστία, διανεμημένη παραγωγή

ABSTRACT

The scope of this diploma thesis is the formulation and solution of the optimal radial distribution network reconfiguration (DNR) problem including distributed generation (DG). The proposed optimization model seeks to 1) minimize the power losses of the distribution system, 2) maximize the reliability of the system and 3) maximize the DG integration.

First, the steady state operation of the network is analyzed using the AC power flow equations for radial distribution networks. Disjunctive formulations of the AC power flow equations are developed in order to efficiently model the binary nature of the switching actions to the optimal DNR problem. The proposed optimization model is formulated as a mixed integer quadratically constrained program (MIQCP).

The proposed model has been developed using GAMS and it was applied to a 43-bus and 69-bus distribution test system. For each network, two test cases are considered. In the first test case, different weighting coefficients are considered for each term of the objective function of the optimization problem. In the second test case, different amounts of DG in the distribution system are examined. The obtained results are presented and discussed. Future research on the topic is also proposed.

KEY WORDS

Distribution systems, optimal reconfiguration, power losses, reliability, distributed generation

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2018–2019 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Καραφώτη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και που ήταν πάντα δίπλα μου για την επίλυση αποριών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Δημήτρη και Ρούλα, που μου έδωσαν τις βάσεις για την απόκτηση γνώσεων και καλλιέργησαν μέσα μου την αγάπη για μάθηση, τους θείους και νονούς μου Γιάννη και Μαρία που στηρίζουν τις επιλογές μου και μου δείχνουν εμπιστοσύνη σε ότι κάνω, και τον καλό μου φίλο, Δημήτρη που ήταν κοντά μου σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ)	1
1.2 Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΔΗΕ)	3
1.3 Αντικείμενο της εργασίας	4
1.4 Δομή της εργασίας	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΔΗΕ	7
2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Εξοπλισμός και τοπολογίες ΔΔΗΕ	9
2.2.1 Βασικά στοιχεία ΔΔΗΕ	9
2.2.2 Τοπολογίες ΔΔΗΕ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΔΔΗΕ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	17
3.1 Αξιοπιστία ΔΔΗΕ	17
3.1.1 Εισαγωγή	17
3.1.2 Ανάγκη για εκτίμηση της αξιοπιστίας λειτουργίας του δικτύου	18
3.1.3 Κατηγορίες βλαβών	19
3.1.4 Κριτήρια αναγνώρισης βλαβών	20
3.1.5 Δείκτες αξιοπιστίας	21
3.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)	22
3.2.1 Εισαγωγή	22
3.2.2 Διείδυση ΑΠΕ στο σύστημα	23

3.2.3 Μονάδες διανεμημένης παραγωγή (ΜΔΠ)	24
3.2.4 Πλεονεκτήματα ΜΔΠ	25
3.2.5 Μειονεκτήματα ΜΔΠ	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΔΗΕ	29
4.1 Εισαγωγή	29
4.2 Ανάλυση ροής ισχύος ΔΔΗΕ	30
4.3 Ανάλυση αξιοπιστίας ΔΔΗΕ	32
4.4 Βέλτιστη επαναδιαμόρφωση ΔΔΗΕ	35
4.4.1 Αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος	36
4.4.2 Περιορισμοί του προβλήματος	36
4.5 Επίλυση προβλήματος	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	41
5.1 Εισαγωγή	41
5.2 Εφαρμογή στο δίκτυο των 43 κόμβων	42
5.2.1 Μεταβολή των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης	46
5.2.2 Μεταβολή της μέγιστης παραγωγής των ΜΔΠ του δικτύου	56
5.3 Εφαρμογή στο δίκτυο των 69 κόμβων	64
5.3.1 Μεταβολή των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης	69
5.3.2 Μεταβολή της μέγιστης παραγωγής των ΜΔΠ του δικτύου	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	87
6.1 Συμπεράσματα	87
6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	93

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΣΗΕ)

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύστημα των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή τάση, σταθερή συχνότητα και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης. Δεδομένου ότι η εξυπηρέτηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ενός συνόλου καταναλωτών προϋποθέτει τις διακεκριμένες φάσεις της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής, σε ένα ΣΗΕ είναι δυνατόν να διακριθούν τα ακόλουθα συστήματα:

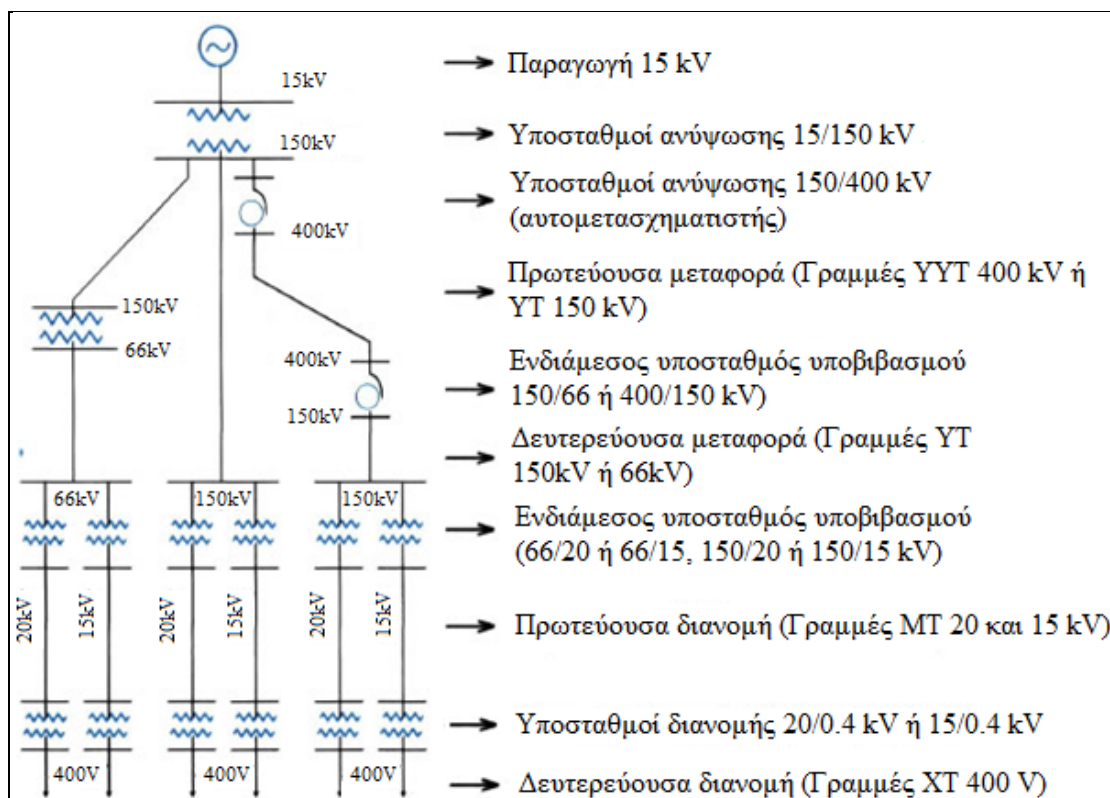
- **Σύστημα παραγωγής (ΣΠ)**, που περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής του ηλεκτρικού ρεύματος και τους μετασχηματιστές ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά του υπό υπερυψηλή (ΥΥΤ) και υψηλή τάση (ΥΤ). Η σύγχρονη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας έχει θεμελιωθεί στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων και της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων ροών και των υδατοπτώσεων σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω θερμικών και υδροηλεκτρικών σταθμών, αντίστοιχα.
- **Σύστημα μεταφοράς (ΣΜ)**, που διασυνδέει όλους τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής καθώς και διαφορετικά συστήματα μεταξύ τους και μεταφέρει τις μεγάλες ποσότητες ισχύος προς τα κέντρα κατανάλωσης. Αποτελεί τη ραχοκοκαλιά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και λειτουργεί στα μέγιστα δυνατά επίπεδα τάσης. Περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών ΥΥΤ και ΥΤ, τους υποσταθμούς ζεύξεων των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διάφορων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται.

- **Σύστημα υπομεταφοράς**, που μεταφέρει ισχύ σε μικρότερες ποσότητες και αποστάσεις υπό χαμηλότερη τάση από υποσταθμούς μεταφοράς σε υποσταθμούς διανομής μικρότερων κέντρων κατανάλωσης, στην ίδια περιοχή μείζονος φορτίου. Σημειώνεται ότι οι μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές τροφοδοτούνται συνήθως απευθείας από το σύστημα υπομεταφοράς. Όσο το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας επεκτείνεται και δημιουργείται αναγκαιότητα για μεταφορά υπό υψηλότερα επίπεδα τάσης, οι παλιότερες γραμμές μεταφοράς υποβιβάζονται σε λειτουργία υπομεταφοράς, καθιστώντας σχετικά δύσκολη τη διάκριση μεταξύ δικτύων υπομεταφοράς και μεταφοράς.
- **Σύστημα διανομής**, που περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέσης (ΜΤ) και χαμηλής τάσης (ΧΤ), στα οποία υπάγονται και υποσταθμοί διανομής μέσω των οποίων η ΜΤ υποβιβάζεται σε ΧΤ. Με τα δίκτυα διανομής η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται σε μικρότερες περιοχές φορτίου, και παρέχεται στους καταναλωτές ΜΤ και ΧΤ.

Ένα ΣΠ και ΣΜ μπορεί να λειτουργεί μεμονωμένο ή διασυνδεδεμένο με ένα ή περισσότερα άλλα γειτονικά συστήματα. Η διασύνδεση γίνεται συνήθως σε επίπεδο εθνικών συστημάτων, και προσφέρει ορισμένα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα στη λειτουργία του κάθε συστήματος.

Αξίζει, επιπλέον, να αναφερθεί πως τρία γενικά, αλλά ταυτόχρονα βασικά, χαρακτηριστικά σχεδίασης και αναφοράς ενός ηλεκτρικού δικτύου είναι η τάση, η ισχύς βραχυκύκλωσης και η στάθμη μόνωσης αυτού. Τάση του δικτύου είναι η μέγιστη τάση λειτουργίας των ηλεκτρικών γραμμών. Ισχύς βραχυκύκλωσης του δικτύου είναι η συμβατική ισχύς που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ, η οποία αποδίδεται στο δίκτυο σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος μέσα σε αυτό. Η στάθμη μόνωσης του δικτύου αναφέρεται συνήθως στην τιμή της κρουστικής αντοχής αυτού, δηλαδή της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης του εξοπλισμού των υποσταθμών σε κρουστικές υπερτάσεις τυποποιημένης μορφής [1], [2].

Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η δομή ενός ΣΗΕ και τα διάφορα τμήματά του.



Σχήμα 1.1: Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΔΔΗΕ)

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές MT και XT. Τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΔΗΕ) είναι τριφασικά και φτάνουν μέχρι τον μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας. Μετά τον μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, η οποία περιλαμβάνει το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης.

Διακρίνονται δύο βαθμίδες διανομής: η διανομή MT ή αλλιώς πρωτεύουσα διανομή, και η διανομή XT ή αλλιώς δευτερεύουσα διανομή. Τα δίκτυα διανομής MT τροφοδοτούνται από τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, από YT σε MT, και τροφοδοτούν τους υποσταθμούς διανομής και τους καταναλωτές MT. Οι καταναλωτές MT είναι κατά κύριο λόγο βιομηχανικοί καταναλωτές με τριφασικές παροχές και οι γραμμές διανομής που τους τροφοδοτούν αποτελούνται από τρεις αγωγούς φάσεων. Τα δίκτυα διανομής XT έχουν σαν αφετηρία τους υποσταθμούς διανομής, όπου η MT υποβιβάζεται σε XT μέσω μετασχηματιστών διανομής, που αποτελούν τον βασικό εξοπλισμό των υποσταθμών. Στα δίκτυα XT συνδέονται πελάτες οικιακής και εμπορικής χρήσης, που ενίοτε έχουν

μονοφασικές παροχές, που δημιουργούν ασύμμετρες φορτίσεις. Οι γραμμές διανομής ΧΤ αποτελούνται από τρεις αγωγούς φάσεων και διαθέτουν, επιπλέον, και ουδέτερο αγωγό.

Η κατασκευαστική διαμόρφωση των ΔΔΗΕ σχετίζεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δόμησης των περιοχών, και γενικότερα, του τρόπου χωροταξικής διαμόρφωσης κάθε χώρας. Τα δίκτυα κατηγοριοποιούνται σε εναέρια και υπόγεια, με κριτήριο τον τρόπο κατασκευής τους. Τα εναέρια δίκτυα είναι φθηνότερα στην κατασκευή τους και έχουν καλύτερη αποκατάσταση βλαβών σε σχέση με τα υπόγεια, καταλαμβάνουν, όμως, σημαντικό χώρο, η διάθεση του οποίου είναι συχνά αδύνατη σε σχετικά πυκνοκατοικημένες περιοχές. Τα υπόγεια δίκτυα έχουν ελάχιστη επίπτωση στην αισθητική του περιβάλλοντος χώρου, σε αντίθεση με τα εναέρια δίκτυα που επιβαρύνουν αισθητικά το περιβάλλον.

Η μορφή των ΔΔΗΕ είναι κατά κανόνα ακτινική (radial) ή βροχοειδής (meshed). Η ακτινική λειτουργία του δικτύου διανομής έγκειται στο γεγονός ότι όλα τα φορτία του δικτύου τροφοδοτούνται από το ένα μόνο άκρο τους. Έτσι, οι κλάδοι του δικτύου δεν συνδέονται μεταξύ τους, αλλά διαδίδονται ακτινικά από την κεντρική τροφοδοσία προς τα υπόλοιπα σημεία του δικτύου. Αντίθετα, στη βροχοειδή λειτουργία, τα δίκτυα διανομής είναι κλειστά, μέσω των βρόχων που σχηματίζουν οι γραμμές. Η βροχοειδής μορφή επιτρέπει οικονομία των γραμμών για τον ίδιο βαθμό εξυπηρέτησης και προσφέρει εναλλακτική τροφοδότηση σε περίπτωση βλαβών, ενώ η ακτινική απλοποιεί και διευκολύνει ζητήματα προστασίας του δικτύου και ροής της ενέργειας. Σημειώνεται, ότι πολλά ΔΔΗΕ έχουν σχεδιαστεί έτσι, ώστε να μετατρέπονται από ακτινικά σε βροχοειδή και αντίστροφα, με τον χειρισμό κατάλληλων διακοπών ή αποζευκτών.

1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διατύπωση και επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ακτινικών ΔΔΗΕ με μονάδες διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ). Στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας του ΔΔΗΕ, η μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας και η μέγιστη διείσδυση ΜΔΠ στο δίκτυο.

1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια:

- ✓ Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ΔΔΗΕ και της επαναδιαμόρφωσής του.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η έννοια της αξιοπιστίας ενός ΔΔΗΕ και τα βασικά χαρακτηριστικά της. Επίσης παρουσιάζεται η έννοια της διανεμημένης παραγωγής (ΔΠ) και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ).
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος επαναδιαμόρφωσης του ΔΔΗΕ.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου επαναδιαμόρφωσης του ΔΔΗΕ σε δίκτυα 43 και 69 κόμβων.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επέκτασής της.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή.

ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΔΗΕ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι νέες τεχνολογίες και προκλήσεις οδηγούν τους διαχειριστές των ΔΔΗΕ να προχωρήσουν σε σημαντικές αλλαγές τα επόμενα χρόνια. Τα νέα μέσα που έχουν αναπτυχθεί, όπως αισθητήρες και υλικό ελέγχου, έχουν σημαντικό ρόλο στο σύστημα διαχείρισης του ΔΔΗΕ, αφού δίνουν τη δυνατότητα για ευκολότερη αυτοματοποιημένη ανίχνευση και απομόνωση σφαλμάτων, αυτοματοποιημένη αποκατάσταση βλαβών, αυτοματοποιημένο έλεγχο της τάσης και της άεργου ισχύος, κ.ά. Όλα τα παραπάνω βοηθούν στη δημιουργία ενός οικονομικότερου αλλά και πιο ευέλικτου ΔΔΗΕ, με αποτέλεσμα να βρίσκουν όλο και περισσότερες εφαρμογές στις μέρες μας.

Η διαμόρφωση του δικτύου έχει ουσιαστικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, τα δίκτυα διανομής MT που βρίσκονται σε περιοχές αγροτικές είναι συνήθως εναέρια. Σε αυτά τα δίκτυα με μικρό αριθμό διακλαδώσεων, το πρόβλημα επιλογής της βέλτιστης συνδεσμολογίας είναι περιορισμένο, ενώ ο βαθμός εξυπηρέτησης που επιτυγχάνεται εξαρτάται κυρίως από την καλή επιλογή των προστασιών και των μέσων ρύθμισης της τάσης. Αντίθετα, σε ένα αστικό δίκτυο με πληθώρα διασυνδέσεων, υπάρχει ένα πλήθος πιθανών σχημάτων επαναδιαμόρφωσης και η επιλογή της βέλτιστης συνδεσμολογίας αποτελεί σύνθετο πρόβλημα, ενώ είναι περιορισμένες οι δυνατότητες επιλογής των προστασιών και των μέσων ρύθμισης της τάσης. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι ο καθορισμός της βέλτιστης λειτουργίας ενός ΔΔΗΕ αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα λόγω της πολυπλοκότητας και της μεταβαλλόμενης φόρτισης του ΔΔΗΕ.

Τα ΔΔΗΕ είναι, ίσως, το σημαντικότερο τμήμα ενός ΣΗΕ και αξίζει ιδιαίτερη προσοχή καθώς τα περισσότερα σφάλματα, που οδηγούν σε διακοπή, συμβαίνουν εκεί και υπάρχει και μεγάλες απώλειες ισχύος. Επομένως, στόχος είναι η βέλτιστη λειτουργία του ΔΔΗΕ με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Όλα τα παραπάνω συντελούν στην προσπάθεια εύρεσης της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔΗΕ, χωρίς να παραβιάζονται οι

λειτουργικοί περιορισμοί του δικτύου, κάτι που στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται με τον αγγλικό όρο Optimal Distribution Network Reconfiguration (ODNR). Το ODNR βελτιώνει την αξιοπιστία του δικτύου διανομής και οδηγεί σε οικονομικότερη και φιλικότερη προς το περιβάλλον λειτουργία του [3], [4].

Ένα ΔΔΗΕ λειτουργεί βέλτιστα όταν είναι σε θέση να τροφοδοτεί το φορτίο του με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες και να εξυπηρετεί βέλτιστα τους καταναλωτές [5]. Αυτό συμβάλει στην αξιοπιστία του δικτύου, δηλαδή στο να τροφοδοτούνται συνεχώς οι καταναλωτές, χωρίς διακοπές, καθώς και στη σταθερότητα της τάσης τροφοδότησης των καταναλωτών. Επιπλέον, ένα σύγχρονο ΔΔΗΕ λειτουργεί ακόμα πιο αποδοτικά όταν συνδέονται ΜΔΠ σε αυτό. Συνεπώς, οι παράγοντες που καθορίζουν τη βέλτιστη λειτουργία ενός δικτύου διανομής είναι οι απώλειες ισχύος, η αξιοπιστία, η σταθερότητα της τάσης και η διείσδυση ΜΔΠ στο δίκτυο [3].

Επομένως, τα σύγχρονα δίκτυα είναι πολύ αποδοτικότερα (έξυπνα δίκτυα). Γίνονται συνεχώς προσπάθειες για περαιτέρω αύξηση της αποδοτικότητας ενός δικτύου με διάφορους τρόπους:

- **Επαναδιαμόρφωση του ΔΔΗΕ μέσω διακοπών:** Με τη βοήθεια των διακοπών (κατάλληλα «ανοιγοκλεισίματα»), η τοπολογία του δικτύου γίνεται βέλτιστη και το δίκτυο αποδοτικότερο.
- **Βέλτιστη τοποθέτηση πυκνωτών:** Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε δίκτυα διανομής ΜΤ. Ο πυκνωτής αποτελεί μια πηγή αέργου ισχύος και αφού μειώνει την επαγωγική αντίδραση, τελικά μειώνει και τις απώλειες αέργου ισχύος της γραμμής διανομής ΜΤ. Σε ένα ΔΔΗΕ, οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση (αύξηση) του συντελεστή ισχύος καθώς και για τη ρύθμιση των τάσεων με την προσφορά άεργου ισχύος για αντιστάθμιση.
- **Διείσδυση ΜΔΠ:** Αυτή η μέθοδος παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, καθώς οι ΜΔΠ μπορούν να συνδεθούν σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου, είναι φιλικές προς το περιβάλλον, συμβάλλουν στη διατήρηση της τάσης σε επιθυμητά όρια και στη μείωση των απωλειών ενός ΔΔΗΕ. Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις ΜΔΠ και διακρίνονται στις ΑΠΕ (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, συστήματα εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας, μικρά υδροηλεκτρικά και συστήματα ηλιοθερμίας), μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (μηχανές εσωτερικής καύσης, γεωθερμία, βιομάζα, κυψέλες καυσίμου) και συνδυασμός των παραπάνω κατηγοριών παραγωγής. Ο στόχος είναι η

μέγιστη διείσδυση των ΜΔΠ σε ένα ΔΔΗΕ και αποτελεί βασικό τμήμα μελέτης της εργασίας αυτής [6].

2.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΔΔΗΕ

Το ΔΔΗΕ είναι το τελευταίο στάδιο της ηλεκτρικής ενέργειας, αφού προηγείται η παραγωγή και η μεταφορά της, και αποτελεί μια σύνθετη κατασκευή, αποτελούμενη από χιλιάδες στοιχεία που λειτουργούν όλα μαζί με κοινό στόχο τη μεταφορά της ενέργειας από τα σημεία παραγωγής στους καταναλωτές. Κάθε στοιχείο του ΔΔΗΕ έχει ξεχωριστό ρόλο και επηρεάζει τη συμπεριφορά των γειτονικών στοιχείων, οπότε χρειάζεται αρκετή μελέτη πριν σχεδιαστεί ένα δίκτυο διανομής. Στο σημείο αυτό θα αναλυθούν τα σημαντικότερα στοιχεία που δομούν ένα ΔΔΗΕ.

2.2.1 Βασικά στοιχεία ΔΔΗΕ

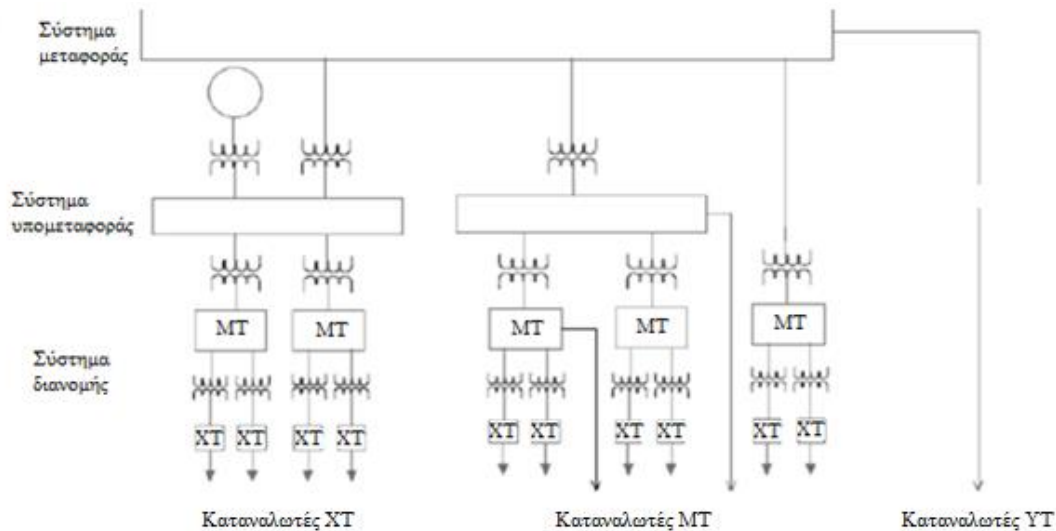
- **Γραμμές Διαμονής**

Οι γραμμές μεταφοράς και διανομής αποτελούνται από ηλεκτρικούς αγωγούς κατάλληλα προστατευόμενους με μόνωση από τις διαρροές τάσης και τις ανεπιθύμητες γειώσεις. Αυτοί οι αγωγοί είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά της ενέργειας από ένα σημείο σε ένα άλλο. Οι γραμμές μεταφοράς είναι πάντα τριφασικές (τρεις ξεχωριστοί αγωγοί για το εναλλασσόμενο ρεύμα) και σπανίως έχουν και τέταρτο ουδέτερο (αφόρτιστο) αγωγό. Τα κύρια μέρη του ΔΔΗΕ κατασκευάζονται ως τριφασικές γραμμές. Οι γραμμές διανομής στην ΜΤ είναι πάντοτε τριφασικές, ενώ οι γραμμές διανομής ΧΤ είναι συνήθως τριφασικές, αλλά υπάρχουν και μονοφασικές γραμμές διανομής. Ανεξάρτητα από τον τύπο του ή την χωρητικότητά του, κάθε ηλεκτρικός αγωγός έχει μια σύνθετη αντίσταση που προκαλεί πτώση τάσης και ηλεκτρικές απώλειες κατά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

- **Μετασηματιστές**

Οι μετασηματιστές (Μ/Σ) αποτελούν βασικό κομμάτι του εναλλασσόμενου συστήματος ενέργειας. Οι Μ/Σ πραγματοποιούν αλλαγές στα επίπεδα της τάσης και του ρεύματος έτσι ώστε να διατηρείται (εκτός από ένα μικρό μέρος των ηλεκτρικών απωλειών) η ίδια συνολική ροή ισχύος. Οι Μ/Σ είναι διαθέσιμοι σε ποικίλα μεγέθη, τύπους και ονομαστικές ικανότητες (kVA). Η χρήση τους στα ΣΗΕ περιλαμβάνει τρεις κύριες

εφαρμογές: 1) στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπου πραγματοποιούν ανύψωση της τάσης σε ΥΤ (20 kV/150 kV ή 20 kV/400 kV), 2) στη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας (150 kV/20 kV ή 400 kV/20 kV) και 3) στη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας (20 kV/400V). Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η δομή ενός τυπικού ΔΔΗΕ και η συμβολή των Μ/Σ σε αυτό.



Σχήμα 2.1 : Διάγραμμα δομής τυπικού ΔΔΗΕ

- **Υποσταθμοί διανομής**

Τα ΣΗΕ ξεκινούν από τους υποσταθμούς μεταφοράς ΥΤ/ΜΤ, και στη συνέχεια υπάρχουν οι υποσταθμοί διανομής όπου η τάση γίνεται πλέον χαμηλή και τροφοδοτούνται οι καταναλωτές. Στους υποσταθμούς βρίσκεται επίσης εγκατεστημένος εξοπλισμός προστασίας και χειρισμού του δικτύου, όπως αποζεύκτες, αυτόματοι διακόπτες, εν σειρά ή/και εν παραλλήλω χωρητικότητες, γειώσεις, μετρητικές και άλλες συσκευές. Κύρια στοιχεία τους είναι οι Μ/Σ διανομής, ενώ περιέχουν και εξοπλισμό ρύθμισης τάσης αλλά και μέσα προστασίας, όπως διακοπτικούς μηχανισμούς.

- **Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ**

Οι μεγάλοι μετασχηματιστές ισχύος είναι συνήθως εφοδιασμένοι με μηχανισμούς αλλαγής της τάσης εξόδου τους χωρίς διακοπή του φορτίου. Η μεταβολή αυτή επιτυγχάνεται με αλλαγή λήψεως στα τυλίγματα του Μ/Σ, δεδομένου ότι η τάση ανά σπείρα παραμένει σταθερή. Ο μηχανισμός αυτός, που βρίσκεται συνήθως στην πλευρά ΥΤ, καθώς εκεί ρέουν μικρότερα ρεύματα και υπάρχουν περισσότερες σπείρες επιτρέποντας ακριβέστερη ρύθμιση

της τάσης, ονομάζεται Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο ή ΣΑΤΥΦ. Τα ΣΑΤΥΦ είναι σχετικά αργοί διακριτοί μηχανισμοί, που μεταβάλλονται μόνο κατά ένα βήμα τη φορά, όταν η ελεγχόμενη τάση βρεθεί εκτός μιας νεκρής ζώνης περισσότερο από ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα.

- **Διακοπτικά στοιχεία**

Τα ΔΔΗΕ, για λόγους ασφάλειας, συντήρησης ή επισκευής, περιέχουν διάφορες συσκευές που χρησιμοποιούνται για σύνδεση και αποσύνδεση τμημάτων τους. Αυτά τα στοιχεία ονομάζονται διακοπτικά και διακρίνονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τη χρήση τους σε:

- **Αποζεύκτες (A/Z - Isolators or Disconnectors):** Χρησιμοποιούνται για απομόνωση τμημάτων κυκλώματος, αλλά μόνο όταν το κύκλωμα έχει ήδη τεθεί εκτός τάσης ή διαρρέεται από αμελητέο ρεύμα. Διακρίνονται σε ταχείας τήξης, όπου χρησιμοποιούνται για την προστασία των υποσταθμών διανομής και βραδείας τήξης, όπου χρησιμοποιούνται για την προστασία όλων των διακλαδώσεων από τον κορμό της γραμμής.
- **Διακόπτες Ισχύος (Βραχυκυκλώσεως, Δ/Ι - Circuit Breakers):** Πρόκειται για μέσα προστασίας που προκαλούν τη διακοπή λειτουργίας του κυκλώματος, σε περίπτωση που το ρεύμα υπερβεί τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή του στο δίκτυο (βραχυκύκλωμα). Η λειτουργία τους ελέγχεται από ηλεκτρονόμους (H/N).
- **Διακόπτες Φορτίου (Δ/Φ - Switches):** Χρησιμοποιούνται για αποσύνδεση μερών του κυκλώματος, ακόμα και κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.
- **Διακόπτες Απομόνωσης (Δ/Α - Sectionalizing Switches):** Οι διακόπτες απομόνωσης λειτουργούν σε σφάλματα που συμβαίνουν σε διακλαδώσεις δικτύων. Διεγείρονται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης και από τους κύκλους λειτουργίας του διακόπτη ισχύος στην αναχώρηση της γραμμής. Μετράνε με εσωτερικό μηχανισμό, αμέσως μόλις περάσει από αυτούς το ρεύμα βραχυκυκλώματος, τους κύκλους λειτουργίας. Στον τελευταίο κύκλο ανοίγουν, αφού ανοίξει ο διακόπτης ισχύος. Στην συνέχεια ο διακόπτης ισχύος κλείνει και μένει κλειστός, ενώ ο Δ/Α μένει ανοικτός. Η τροφοδότηση των λοιπών καταναλωτών ΜΤ υφίσταται μόνο τις διακοπές που προέρχονται από τους κύκλους λειτουργίας του διακόπτη ισχύος στην αναχώρηση της γραμμής.

Πλεονέκτημα των διακοπών απομόνωσης έναντι των ασφαλειών είναι ότι δεν χρειάζονται αλλαγή και έχουν πλήρη συνεργασία με τον διακόπτη ισχύος στην αναχώρηση. Η επανάξευξή τους γίνεται είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα αφού πρώτα αποκατασταθεί το σφάλμα από συνεργείο της ηλεκτρικής επιχείρησης.

- **Χωρητικές αντισταθμίσεις**

Οι εγκατεστημένες συστοιχίες πυκνωτών που διαθέτουν οι υποσταθμοί μεταφοράς και οι Μ/Σ διανομής είναι σε θέση να ρυθμίζουν την τάση αλλά και να διορθώνουν το συντελεστή ισχύος των γραμμών του δικτύου. Οι τρόποι σύνδεσης των συστοιχιών είναι σε σειρά ή παράλληλα με τις γραμμές. Οι πυκνωτές σειράς (series capacitors), δηλαδή οι πυκνωτές που συνδέονται σε σειρά με γραμμές, έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολύ περιορισμένο βαθμό σε ΔΔΗΕ εξαιτίας ενός πιο εξειδικευμένου τύπου συσκευής με περιορισμένο εύρος εφαρμογής. Αντίθετα, ευρεία χρήση συναντούν οι πυκνωτές που συνδέονται παράλληλα με τις γραμμές και ονομάζονται εγκάρσιοι πυκνωτές (shunt capacitors) ή εγκάρσιες αντισταθμίσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω της δυνατότητάς τους να παρέχουν άεργο ισχύ στο δίκτυο αντισταθμίζοντας έτσι μέρος της άεργου κατανάλωσης από τις αντιδράσεις των γραμμών. Με την τοποθέτησή τους σε κόμβους του δικτύου συμβάλλουν επίσης στη μείωση της πτώσης τάσης μεταξύ των γραμμών του αλλά και στη μεταβολή του συντελεστή ισχύος προς τη μονάδα. Το κόστος που συμπεριλαμβάνουν είναι μεγάλο και εξαρτάται από τον τύπο τους, αλλά και από τη θέση που θα τοποθετηθούν στο δίκτυο. Συνήθως τοποθετούνται κοντά στους υποσταθμούς γιατί το κόστος είναι μικρότερο από το να τοποθετηθούν κοντά στους καταναλωτές.

- **Ρυθμιστές τάσης**

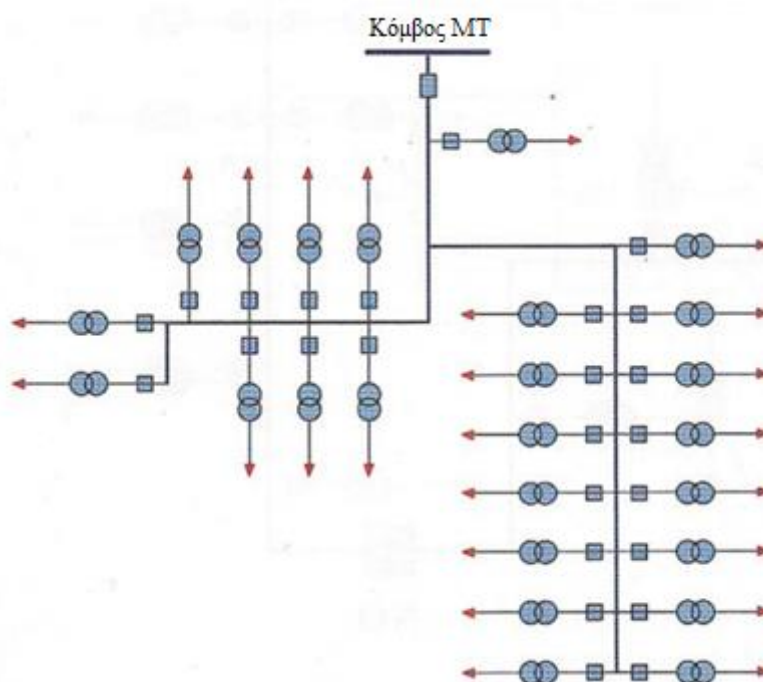
Οι ρυθμιστές τάσης είναι αυτομετασχηματιστές που τοποθετούνται κατά μήκος του ΔΔΗΕ, για την αντιμετώπιση του φαινομένου της πτώσης τάσης. Με τον τρόπο αυτό οι καταναλωτές στο τέλος μιας γραμμής διανομής έχουν παρόμοιο επίπεδο τάσης με εκείνους στην αρχή της γραμμής. Σε γραμμές μεγάλου μήκους που χαρακτηρίζονται από υψηλή φόρτιση τοποθετούνται περισσότεροι από ένας ρυθμιστές τάσης. Στις περιπτώσεις αυτές το ΣΑΤΥΦ δεν μπορεί να κρατήσει τις τάσεις εντός ορίων λόγω του μήκους των γραμμών και της υψηλής τους φόρτισης και μόνο η τοποθέτηση ρυθμιστών τάσης σε σειρά διορθώνουν το πρόβλημα ανυψώνοντας σταδιακά την τάση.

2.2.2 Τοπολογίες ΔΔΗΕ

Οι τρόποι σχεδιασμού ενός ΔΔΗΕ που έχουν επικρατήσει είναι το ακτινικό, το βροχοειδές και το δικτυωτό (τοπολογία primary network). Οι διαφορές μεταξύ αυτών των τοπολογιών είναι στο πως τα συστήματα τροφοδοσίας διασυνδέονται γύρω από έναν υποσταθμό.

- **Ακτινικά δίκτυα**

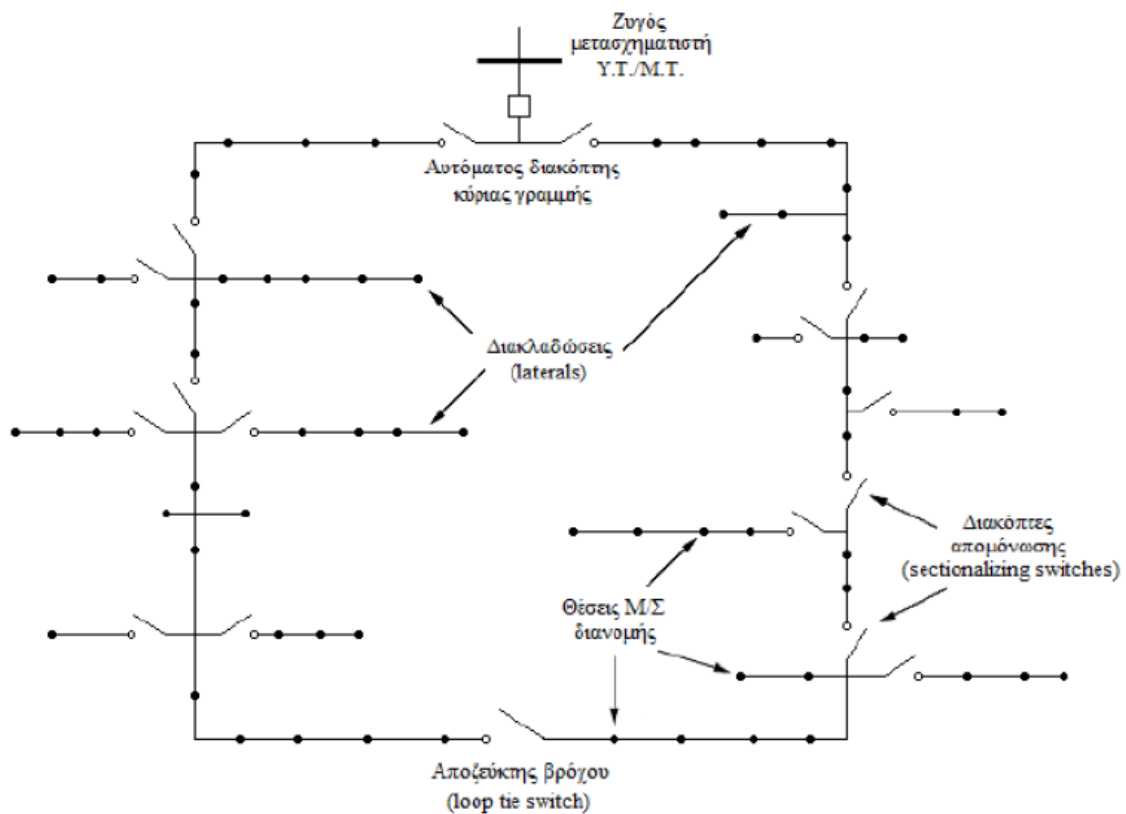
Τα πιο πολλά ΔΔΗΕ σχεδιάζονται ακτινικά. Η ακτινική λειτουργία του ΔΔΗΕ σημαίνει ότι κάθε κόμβος φορτίου τροφοδοτείται από έναν μόνο κόμβο παροχής ισχύος και επίσης η μορφή του δικτύου είναι δενδροειδής (χωρίς βρόχους). Το μειονέκτημα των ακτινικών δικτύων είναι ότι η ροή ισχύος ρέει προς τον καταναλωτή με μία αποκλειστικά διαδρομή με αποτέλεσμα, αν υπάρξει κάποιο σφάλμα και υπάρξει διακοπή στη γραμμή, ο καταναλωτής να έχει ολική απώλεια ηλεκτρικής ισχύος. Για αυτό τον λόγο τα ακτινικά δίκτυα είναι λιγότερο αξιόπιστα από τα βροχοειδή και τα δικτυωτά ΔΔΗΕ. Παρόλα αυτά η ακτινική τοπολογία παρουσιάζει και σημαντικά πλεονεκτήματα: είναι πολύ οικονομικότερη λύση σε σχέση με τις άλλες δύο εναλλακτικές και είναι απλούστερη στον σχεδιασμό, στην κατασκευή και στη λειτουργία της. Για τον λόγο αυτό στο πρόβλημα της παρούσας εργασίας θα μελετηθεί η επαναδιαμόρφωση ακτινικού ΔΔΗΕ. Η δομή ενός τυπικού ακτινικού ΔΔΗΕ φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Ακτινικό ΔΔΗΕ

- **Βροχοειδή δίκτυα**

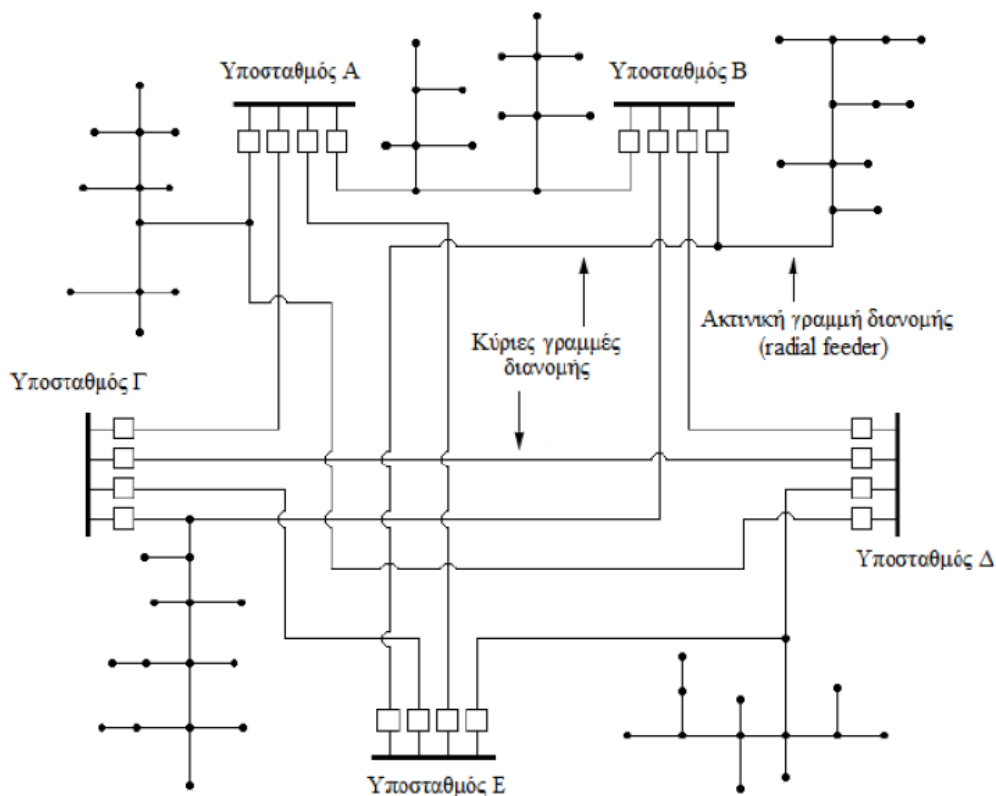
Μια εναλλακτική λύση για τον ακτινικό σχεδιασμό είναι το βροχοειδές σύστημα που αποτελείται από ένα σχέδιο διανομής με δυο μονοπάτια ανάμεσα στην πηγή ενέργειας (υποσταθμός) και κάθε καταναλωτή (Σχήμα 2.3). Το ΔΔΗΕ σχεδιάζεται έτσι ώστε η παροχή να διατηρείται ανεξάρτητα από το που βρίσκεται ένα «ανοιχτό» σημείο πάνω στον βρόχο. Ένα τέτοιο σύστημα τροφοδοσίας είναι ελάχιστα πιο περίπλοκο από ένα ακτινικό, καθώς η ενέργεια συνήθως ρέει από δυο πλευρές προς την μέση και σε όλες τις περιπτώσεις μπορεί να πάρει μόνο μια από τις δύο οδούς. Αλλά εάν σχεδιαστεί βάσει σωστών προδιαγραφών, το βροχοειδές ΔΔΗΕ είναι πιο αξιόπιστο από τα ακτινικά ΔΔΗΕ. Η παροχή υπηρεσιών δεν θα διακοπεί στην πλειοψηφία των καταναλωτών οποτεδήποτε ένα τμήμα βγει εκτός, επειδή δεν υπάρχει μονόπλευρη κατεύθυνση σε κανένα βρόχο. Το κύριο μειονέκτημα των βροχοειδών ΔΔΗΕ είναι η χωρητικότητα και το κόστος.



Σχήμα 2.3: Βροχοειδές ΔΔΗΕ

- **Δικτυωτά δίκτυα**

Τα δικτυωτά ΔΔΗΕ είναι τα πιο περίπλοκα, τα πιο αξιόπιστα και σε πολύ σπάνιες περιπτώσεις και τα πιο οικονομικά δίκτυα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 2.4). Ένα δίκτυο περιλαμβάνει πολλά μονοπάτια ανάμεσα σε όλα τα σημεία του. Η ροή ενέργειας ανάμεσα σε οποιαδήποτε δυο σημεία συνήθως χωρίζεται σε διαφορετικά μονοπάτια και αν εμφανιστεί βλάβη, το ΔΔΗΕ άμεσα και αυτόματα αλλάζει την κατεύθυνση ροής. Ένα ΔΔΗΕ σχεδόν πάντα περιλαμβάνει συμπλέγματα ακτινικών τροφοδοσιών και ένα δευτερεύον δικτυωτό σύστημα (ένα δικτυωτό πλέγμα από ηλεκτρικά ισχυρούς αγωγούς που συνδέουν όλους μαζί τους καταναλωτές σε βασική τάση χρησιμοποίησης). Τα δικτυωτά ΔΔΗΕ είναι πολύ πιο ακριβά από τα ακτινικά ΔΔΗΕ, αλλά όχι πάντα και απαιτούν μόλις μια μικρή ποσότητα χωρητικής αγωγιμότητας μεγαλύτερη από ένα βροχοειδές ΔΔΗΕ. Το κύριο μειονέκτημα αυτών των ΔΔΗΕ είναι ότι είναι πολύ πιο περίπλοκα από όλες τις υπόλοιπες μορφές διανομής και έτσι είναι πολύ δύσκολα στην ανάλυση και τη σχεδίαση.



Σχήμα 2.4: Δικτυωτό δίκτυο διανομής

ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΔΔΗΕ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΔΔΗΕ

3.1.1 Εισαγωγή

Ο όρος αξιοπιστία έχει μία ευρεία έννοια, όπως φαίνεται και από τον πλέον διαδεδομένο και κοινά αποδεκτό ορισμό του: Αξιοπιστία είναι η πιθανότητα του συστήματος να εκτελεί την αποστολή του επαρκώς για τη σχεδιαζόμενη χρονική περίοδο και τις επικρατούσες λειτουργικές συνθήκες. Χρειάζεται να αναγνωριστεί η γενικότητά του όρου και να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να εξεταστεί η συνολική ικανότητα του ΣΗΕ να πραγματοποιεί τον στόχο του. Για αυτό τον λόγο, συχνά γίνεται η θεώρηση ότι η εκτίμηση της αξιοπιστίας ενός ΣΗΕ υποδιαιρείται στις ακόλουθες κατηγορίες: επάρκεια του συστήματος και ασφάλεια αυτού.

Η επάρκεια του συστήματος σχετίζεται με την ύπαρξη εγκαταστάσεων ικανών να ικανοποιήσουν τη ζήτηση του φορτίου. Πρόκειται για εγκαταστάσεις απαραίτητες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και τη μεταφορά και διανομή αυτής μέχρι τα τελικά σημεία κατανάλωσης. Η επάρκεια αναφέρεται σε στατικές καταστάσεις οι οποίες δεν περιλαμβάνουν διαταραχές του συστήματος. Από την άλλη, η ασφάλεια σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να ανταποκρίνεται στις διαταραχές που δημιουργούνται, τοπικές ή πιο απομακρυσμένες.

Οι περισσότερες πιθανοτικές τεχνικές για τον υπολογισμό της αξιοπιστίας των συστημάτων αναφέρονται στην εκτίμηση της επάρκειας. Κάτι τέτοιο συμβαίνει λόγω της πολυπλοκότητας που παρατηρείται στη μοντελοποίηση του συστήματος στο πεδίο της ασφάλειας.

3.1.2 Ανάγκη για εκτίμηση της αξιοπιστίας λειτουργίας του ΔΔΗΕ

Με τις αλλαγές που υφίστανται τα ΣΗΕ στη δομή και τη λειτουργία τους, εγείρεται σημαντικό ερώτημα ως προς το αν διατηρείται η στάθμη Αξιοπιστίας Λειτουργίας των ΣΗΕ. Για να εκτιμηθούν τα θέματα αξιοπιστίας που ανακύπτουν στο τρέχον ΣΗΕ, πρέπει να αναγνωριστούν οι κύριες θεσμικές αλλαγές στις οποίες υπόκειται. Το παλιό μονοπωλιακό καθεστώς διαδέχεται ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον, στο οποίο εμπλέκονται πολλοί ανεξάρτητοι παραγωγοί, η διαχωρισμένη διαχείριση του ΣΜ και ΔΔΗΕ, πολλοί προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας και περισσότερο απαιτητικοί καταναλωτές.

Η ενίσχυση της παραγωγής τείνει να γίνει εξαρτώμενη από τους νόμους της αγοράς και όχι από ένα κεντρικό σχεδιασμό επάρκειας της παραγόμενης ισχύος. Οι παραγωγοί διαθέτουν εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος αλλά δεν είναι υπεύθυνοι για τη συνολική επάρκεια, ενδιαφέρονται μόνο για την εξυπηρέτηση των αναγκών που τους επιφέρουν κέρδος. Επιπλέον, η αύξηση των ΑΠΕ και των υπόλοιπων μορφών ΔΠ θέτουν με τη σειρά τους σε κίνδυνο την ευστάθεια του συστήματος, άρα και την αξιοπιστία λειτουργίας του.

Οι περιορισμοί στην επέκταση των ΣΜ και ΔΔΗΕ, τόσο λόγω των απαιτούμενων αυξημένων επενδύσεων, όσο και περιβαλλοντικών περιορισμών, επηρεάζουν δυσμενώς την αξιοπιστία λειτουργίας του ΣΗΕ.

Οι καταναλωτές από την πλευρά τους αναμένεται να εντείνουν τις πιέσεις τους για χαμηλότερες χρεώσεις και να απαιτούν αυξημένη αξιοπιστία. Οι απαιτήσεις αυτές στο πλαίσιο ενός ανταγωνιστικού περιβάλλοντος οδηγούν τους προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας σε προσπάθειες μείωσης του κόστους επενδύσεων και του κόστους λειτουργίας και συντήρησης των δικτύων για να συγκρατήσουν τα επίπεδα των τιμών. Η μη ελεγχόμενη περικοπή όμως των δαπανών αυτών μπορεί να αποβεί σε βάρος της αξιοπιστίας της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνοπτικά, οι νέες συνθήκες που επικρατούν στα ΣΗΕ και επηρεάζουν την αξιοπιστία λειτουργίας σχετίζονται με τα παρακάτω :

- Αύξηση εγκαταστάσεων ΜΔΠ, κυρίως ΑΠΕ
- Εξασφάλιση παροχής φυσικού αερίου στις νέες μονάδες
- Καθορισμός των απαιτήσεων για στρεφόμενη εφεδρεία
- Διασυνδέσεις με ΣΗΕ γειτονικών χωρών
- Πραγματική ικανότητα μεταφοράς του ΣΜ
- Δυνατότητες επέκτασης ΣΜ
- Περιβαλλοντικοί περιορισμοί

- Πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν σύμφωνα με τους κανόνες της αγοράς
- Αύξηση της στάθμης αβεβαιότητας για την πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου
- Αύξηση των απαιτήσεων των καταναλωτών για αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας
- Αύξηση των απαιτήσεων των καταναλωτών για οικονομική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο μόνος τρόπος με τον οποίο μπορούν όλες αυτές οι συχνά ανταγωνιστικές και ποικίλλες αβεβαιότητες να ισοσταθμιστούν μαζί σε ένα αντικειμενικό και συνεπές μοντέλο είναι με τη χρήση ποσοτικών τεχνικών εκτίμησης αξιοπιστίας. Τα αποτελέσματα των μελετών αυτών σχετίζονται με τους οικονομικούς στόχους του συστήματος και παίζουν σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό και τη λειτουργία του. Πρέπει πρώτα όμως να καθοριστούν οι κατηγορίες βλαβών των συστημάτων, οι διάφορες ζώνες του προβλήματος και να αφιερωθεί ο απαιτούμενος χρόνος για τη συλλογή δεδομένων και την ανάλυση μεθόδων και τεχνικών.

3.1.3 Κατηγορίες βλαβών

Οι βλάβες που συμβαίνουν στα ΔΔΗΕ διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Παθητικές Βλάβες (Passive Failures):** είναι οι καταστάσεις βλάβης των στοιχείων του ΔΔΗΕ, οι οποίες δεν προκαλούν την επενέργεια των διακοπών προστασίας του ΔΔΗΕ και τίθενται εκτός λειτουργίας μόνο τα στοιχεία που ανήκουν στον κλάδο όπου παρουσιάστηκε η βλάβη.
- **Ενεργές Βλάβες (Active Failures):** είναι οι καταστάσεις βλάβης των στοιχείων του ΔΔΗΕ που προκαλούν την ενεργοποίηση της πρωταρχικής ζώνης προστασίας και επομένως την πιθανή αποσύνδεση και άλλων κλάδων, εκτός από αυτόν όπου παρουσιάστηκε η βλάβη.
- **Μόνιμες Βλάβες (Permanent Failures):** είναι οι βλάβες που προκαλούν φθορά των στοιχείων και για την αποκατάστασή τους απαιτείται η επισκευή τους. Διαρκούν ένα αρκετά σημαντικό χρονικό διάστημα.

- **Παροδικές Βλάβες (Temporary Failures):** οι παροδικές βλάβες μπορούν να μην προκαλέσουν φθορά των στοιχείων και ο χρόνος επισκευής τους είναι σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο των μόνιμων βλαβών.
- **Μεταβατικές Βλάβες (Transient Failures):** πρόκειται για τις βλάβες που δεν προκαλούν φθορά των στοιχείων και η ομαλή λειτουργία του ΔΔΗΕ αποκαθίσταται με την αυτόματη λειτουργία των διακοπών προστασίας. Είναι μικρής χρονικής διάρκειας και η επίδρασή τους στους δείκτες αξιοπιστίας του ΔΔΗΕ είναι συνήθως αμελητέα.
- **Βλάβες Κοινής Αιτίας (Common Mode Failures):** είναι τα ενδεχόμενα βλάβης που προκαλούνται από ένα εξωτερικό αίτιο και θέτουν δύο ή περισσότερα στοιχεία εκτός λειτουργίας ενώ αυτές οι βλάβες δεν μπορούν να θεωρηθούν σαν επακόλουθο η μία της άλλης.
- **Συντήρηση (Maintenance):** είναι η προγραμματισμένη αποσύνδεση κλάδων του ΔΔΗΕ ώστε να λάβουν χώρα διαδικασίες συντήρησης σε ένα ή περισσότερα από τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στους αντίστοιχους κλάδους. Ο χρόνος αποσύνδεσης εξαρτάται από τον χρόνο που απαιτείται για τη συντήρησή του.

3.1.4 Κριτήρια αναγνώρισης των βλαβών

Για να είναι δυνατόν να αναγνωριστούν όλα τα πιθανά ενδεχόμενα βλάβης σε ένα ΔΔΗΕ, χωρίς να παραλειφθεί κάποιο, εφαρμόζονται τα ακόλουθα δύο κριτήρια:

- **Κριτήριο Ολικής Απώλειας Συνέχειας:** Τα ενδεχόμενα που προκαλούν ολική απώλεια της συνέχειας σε έναν κόμβο έχουν σαν αποτέλεσμα την πλήρη απομόνωσή του από τα σημεία παραγωγής με επακόλουθο την ολική απώλεια τροφοδότησης του φορτίου.
- **Κριτήριο Μερικής Απώλειας Συνέχειας:** Τα ενδεχόμενα που προκαλούν μερική απώλεια της συνέχειας σε έναν κόμβο έχουν σαν αποτέλεσμα την αποσύνδεση μερικών οδεύσεων τροφοδότησης του κόμβου από τα σημεία παραγωγής με επακόλουθο την υπερφόρτιση των οδεύσεων που παραμένουν σε λειτουργία και τη μερική απώλεια του φορτίου του κόμβου.

3.1.5 Δείκτες αξιοπιστίας

Προς το παρόν δεν υπάρχουν ευρέως αποδεκτές από τις ηλεκτρικές επιχειρήσεις διαδικασίες για την καταγραφή των διακοπών τροφοδότησης. Κάθε επιχείρηση έχει περισσότερο ή λιγότερο, τους δικούς της κανονισμούς για την καταγραφή των αστοχιών της λειτουργίας, και εφαρμόζει αντίστοιχες στατιστικές μεθόδους για την επεξεργασία των στοιχείων. Ένα γενικό σχήμα για την καταγραφή και τους υπολογισμούς θα ήταν χρήσιμο αλλά μη πρακτικό, λόγω των διαφορών στις τροφοδοτούμενες περιοχές, στα χαρακτηριστικά των φορτίων, στον αριθμό των καταναλωτών, και στην αναμενόμενη ποιότητα εξυπηρέτησης. Με πιθανές διαφορές στην ορολογία, οι παρακάτω δείκτες είναι οι γενικά χρησιμοποιούμενοι:

- **Συχνότητα διακοπών συστήματος – ΣΔΣ:** Ο μέσος αριθμός των διακοπών στη μονάδα του χρόνου (συνήθως ένα έτος).
- **Μέση συχνότητα διακοπών καταναλωτών – SAIFI:** Ο μέσος αριθμός των διακοπών ανά επηρεαζόμενο καταναλωτή, στη μονάδα του χρόνου.
- **Μέσο διακοπτόμενο φορτίο – ΜΔΦ:** Η μέση ισχύς (kVA) διακοπτόμενου φορτίου ανά μονάδα συνδεδεμένου φορτίου, στη μονάδα του χρόνου.
- **Μη Διανεμόμενη Ενέργεια συστήματος – ΜΔΕ (ENS):** Η ζήτηση ενέργειας που δεν καλύπτεται ετησίως λόγω διακοπών τροφοδότησης. Υπολογίζεται ως το άθροισμα της ΜΔΕ όλων των καταναλωτών. Η ΜΔΕ κάθε καταναλωτή υπολογίζεται από τον συνολικό αναμενόμενο χρόνο αποκοπής του και τη μέση ζήτηση ισχύος του.
- **Μέση Μη Διανεμόμενη Ενέργεια Καταναλωτών – ΜΔΕΚ:** Η μέση ζήτηση ενέργειας που δεν καλύπτεται ετησίως λόγω διακοπών τροφοδότησης, ανά επηρεαζόμενο καταναλωτή.
- **Μέση διάρκεια Διακοπής Καταναλωτή – SAIDI:** Η μέση διάρκεια διακοπής τροφοδότησης ανά επηρεαζόμενο καταναλωτή στη μονάδα του χρόνου.

3.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ)

3.2.1 Εισαγωγή

Σήμερα ένα από τα μεγάλα θέματα για το μέλλον της ανθρωπότητας είναι και το θέμα του περιβάλλοντος. Οι παρεμβάσεις του ανθρώπου, ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, δημιούργησαν προβλήματα και καταστροφικές προοπτικές για την ανθρωπότητα. Μια από τις παρεμβάσεις του ανθρώπου, που δημιουργούν τεράστια προβλήματα για το φυσικό περιβάλλον, είναι οι αναγκαίες σήμερα μεγάλες ποσότητες ενέργειας, που απαιτούνται στη σύγχρονη κοινωνία, όπως είναι η θέρμανση, ο ηλεκτρισμός, οι μεταφορές, αλλά και η παραγωγή αγαθών που βασίζονται σήμερα στην ηλεκτρική ενέργεια (βιομηχανία, βιοτεχνία, γεωργία, ορυκτός πλούτος).

Για να περιοριστεί η ρύπανση του φυσικού περιβάλλοντος από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται πολλές προτάσεις, μια από τις οποίες είναι οι ΑΠΕ. Οι ΑΠΕ ή ήπιες μορφές ενέργειας είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες. Δύο βασικά χαρακτηριστικά των ΑΠΕ είναι ότι για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας (συμβατικές μορφές ενέργειας), αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Επιπλέον, λόγω της «φιλικότητάς» τους προς το περιβάλλον, αποτελούν μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη.

Οι ΑΠΕ, ανεξάρτητα από τον ρυθμό εκμετάλλευσής τους συνεχίζουν να είναι άμεσα διαθέσιμες (όπως η αιολική ενέργεια) ή αναπληρώνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα (όπως η βιομάζα). Υπάρχουν όμως μόνο τρεις κύριες πηγές ενέργειας που είναι ανανεώσιμες: η ηλιακή, η γεωθερμία και η παλιρροϊκή. Όλες οι άλλες ανανεώσιμες πηγές προέρχονται από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη Γη. Για τον λόγο αυτό η αιολική, η υδροηλεκτρική, η βιομάζα, η κυματική και η θερμοκρασιακή διαφορά των ωκεανών θεωρούνται δευτερογενείς, ή έμμεσες μορφές ηλιακής ενέργειας.

Με την διείσδυση των ΑΠΕ στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο επιτυγχάνεται μείωση της ρύπανσης του ήδη αρκετά βεβαρημένου φυσικού περιβάλλοντος. Οι ΑΠΕ θεωρούνται η λύση στο επερχόμενο ενεργειακό “αδιέξοδο” που πρόκειται να βρεθεί αντιμέτωπος ο ενεργοβόρος ανθρώπινος πολιτισμός από την αναμενόμενη σταδιακή εξάντληση των ορυκτών καυσίμων μέσα στον επόμενο αιώνα. Για αυτούς τους λόγους τα τελευταία χρόνια διεξάγεται ολοένα και περισσότερη έρευνα για την καλύτερη και αποδοτικότερη εκμετάλλευση των ΑΠΕ.

Παρόλα αυτά υπάρχουν και κάποια ζητήματα που προβληματίζουν. Ένα σημαντικό θέμα που προκύπτει είναι ότι οι ΑΠΕ δεν έχουν τη δυνατότητα ακόμα να αντικαταστήσουν πλήρως τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας. Σημαντικό ρόλο στην παραπάνω διαπίστωση είναι τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν. Ένα βασικό μειονέκτημα είναι η εξάρτηση από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται, γεγονός που καθιστά κάποιες μορφές ΑΠΕ (αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική) ανίκανες στην παραγωγή ενέργειας τη στιγμή όπου υπάρχει ζήτηση για κατανάλωση. Επίσης, έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Για αυτό τον λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Η ηλιακή ενέργεια**, με υποτομείς τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, τα παθητικά ηλιακά συστήματα και τη φωτοβολταϊκή μετατροπή,
- **Η αιολική ενέργεια**, η οποία χρησιμοποιεί την κινητική ενέργεια του ανέμου,
- **Η υδραυλική ενέργεια**, με περιορισμό στα μικρά υδροηλεκτρικά, ισχύος κάτω των 10 MW,
- **Η γεωθερμική ενέργεια**, η ενέργεια από το θερμικό δυναμικό της γης,
- **Η βιομάζα**, θερμική ή χημική ενέργεια με την παραγωγή βιοκαυσίμων, τη χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών αγροτικών (φυτικών και ζωικών) και αστικών αποβλήτων,
- **Η θάλασσα**, ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκή ενέργεια και ενέργεια των ωκεανών από τη διαφορά θερμοκρασίας των νερών στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος.

3.2.2 Διείσδυση ΑΠΕ στο σύστημα

Γενικά, η διείσδυση των γεννητριών που τροφοδοτούνται από τις ΑΠΕ είναι ουσιαστικά η ίδια με τις γεννήτριες με ορυκτά καύσιμα και βασίζεται στην ίδια μεθοδολογία. Ωστόσο, οι ΑΠΕ είναι πολύ συχνά μεταβλητές και γεωγραφικά διασκορπισμένες.

Μια γεννήτρια ΑΠΕ μπορεί να οριστεί ως αυτόνομη ή διασυνδεδεμένη με το δίκτυο. Μία αυτόνομη γεννήτρια ανανεώσιμης ενέργειας παρέχει το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης με ή χωρίς άλλες γεννήτριες ή συσκευές αποθήκευσης. Από την άλλη πλευρά, σε ένα συνδεδεμένο με το δίκτυο σύστημα, η γεννήτρια ανανεώσιμης ενέργειας παρέχει ενέργεια σε ένα μεγάλο μέρος του δικτύου, το οποίο τροφοδοτείται επίσης από άλλες γεννήτριες. Εδώ, η ισχύς που παρέχεται από τη γεννήτρια ανανεώσιμης ενέργειας είναι μόνο ένα μικρό μέρος της ισχύος που παρέχεται στο δίκτυο σε σχέση με την ισχύ που παρέχεται από άλλες συνδεδεμένες γεννήτριες. Το σημείο σύνδεσης ονομάζεται σημείο κοινής σύζευξης (ΣΚΣ) [6].

3.2.3 Μονάδες διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ)

Οι μικρές γεννήτριες δεν μπορούν να συνδεθούν στο σύστημα μεταφοράς λόγω του υψηλού κόστους των Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ και του εξοπλισμού των διακοπών. Για αυτό τον λόγο, οι μικρές γεννήτριες πρέπει να είναι συνδεδεμένες στο ΔΔΗΕ. Αυτός ο τύπος γεννητριών είναι γνωστός ως ΜΔΠ.

Η ισχύς σε τέτοια συστήματα ισχύος μπορεί να ρέει από σημείο σε σημείο εντός του ΔΔΗΕ. Σαν αποτέλεσμα, μία τέτοια ασυνήθιστη ροή ισχύος μπορεί να δημιουργήσει πρόσθετες προκλήσεις στην αποτελεσματική λειτουργία και προστασία του ΔΔΗΕ. Λόγω της μείωσης των πόρων ορυκτών καυσίμων, της χαμηλής ενεργειακής απόδοσης και της ρύπανσης του περιβάλλοντος, η νέα προσέγγιση για την παραγωγή τοπικής ισχύος σε επίπεδο διανομής ΜΤ είναι με τη χρήση μονάδων ΑΠΕ όπως το φυσικό αέριο, η αιολική ενέργεια, τα ηλιακά φωτοβολταϊκά κύτταρα, το βιοαέριο, τα συστήματα συμπαραγωγής (τα οποία είναι συστήματα συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΘ), οι κινητήρες Stirling, και οι μικροτουρμπίνες.

Αυτές οι νέες πηγές ενέργειας συνδέονται (ή ενσωματώνονται) στο ΔΔΗΕ. Επιπλέον, το ΔΔΗΕ γίνεται «ενεργό» με την διείσδυση ΜΔΠ και επομένως αναφέρεται ως ενεργό δίκτυο διανομής. Ανάλογα με την τάξη μεγέθους της ισχύος παραγωγής, η ΜΔΠ χαρακτηρίζεται ως:

- Πολύ μικρή (micro) – Από 1 W έως 5 kW
- Μικρή (small) – Από 5 kW έως 5 MW
- Μεσαία (medium) – Από 5 MW έως 50 MW
- Μεγάλη (large) – Από 50 MW έως 300 MW

3.2.4 Πλεονεκτήματα ΜΔΠ

Η εγκατάσταση ΜΔΠ στα ΔΔΗΕ δεν παρουσιάζει μόνο οικονομικά πλεονεκτήματα, αλλά βελτιώνει και ορισμένα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, αποτελώντας έτσι μια ελκυστική επιλογή για τους διαχειριστές των δικτύων. Τα σημαντικότερα οφέλη για τα ΔΔΗΕ είναι τα ακόλουθα:

- Δίνεται η δυνατότητα εξυπηρέτησης μέρους των φορτίων των ΔΔΗΕ από τοπικές ΜΔΠ με αποτέλεσμα τη μείωση της εισροής ισχύος από το επίπεδο μεταφοράς. Παράλληλα, επιτυγχάνεται αποσυμφόρηση στα συστήματα μεταφοράς αλλά και στα δίκτυα διανομής και ελαχιστοποιείται η πιθανότητα παραβίασης των λειτουργικών ορίων τους. Έτσι επιτυγχάνεται ευκολότερος χειρισμός των δικτύων και καλύτερη συντήρηση του εξοπλισμού τους λόγω μειωμένης καταπόνησης.
- Εκτός από την παροχή ενεργού ισχύος, η ΜΔΠ μπορεί να προσφέρει στο δίκτυο και ελεγχόμενη άεργο ισχύ, παρέχοντας παρόμοια οφέλη με τις χωρητικότητες αντιστάθμισης, δηλαδή δυνατότητα ρύθμισης των επιπέδων τάσης και κάλυψη των αέργων καταναλώσεων των γραμμών του δικτύου.
- Η σύνδεση ΜΔΠ σε ένα ΔΔΗΕ επηρεάζει άμεσα το μέγεθος των απωλειών στις γραμμές του. Τα αποτελέσματα εξαρτώνται από το είδος και τα χαρακτηριστικά του δικτύου αλλά και το είδος και τη θέση σύνδεσης των ΜΔΠ. Έτσι, μετά από την ενσωμάτωση μίας νέας ΜΔΠ, οι απώλειες ενεργού και αέργου ισχύος ενός ΔΔΗΕ μπορεί είτε να μειωθούν είτε να αυξηθούν, ανάλογα με τις συνθήκες. Βέβαια, το συγκεκριμένο θέμα έχει προσελκύσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον με αποτέλεσμα να έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι με τους οποίους υπολογίζονται οι βέλτιστες θέσεις τοποθέτησης ΜΔΠ ώστε όχι μόνο να επιτυγχάνεται μείωση των απωλειών ισχύος, αλλά αυτή να είναι και η μέγιστη δυνατή. Εξασφαλίζεται με τον τρόπο αυτό σημαντικό κέρδος, αφού ως γνωστόν το στάδιο της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό απωλειών ενεργού ισχύος σε σχέση με το στάδιο της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της συγκριτικά μεγαλύτερης τιμής των αντιστάσεων των γραμμών του ΔΔΗΕ.
- Οι ΜΔΠ, με τη χρήση μέσων αποθήκευσης της παραγόμενης ισχύος, μπορούν να λειτουργήσουν για παροχή εφεδρείας στο ΔΔΗΕ και κάλυψη τοπικών φορτίων σε περιπτώσεις απότομης διακοπής της ηλεκτροδότησης.

3.2.5 Μειονεκτήματα ΜΔΠ

Από τις σημαντικότερες συνέπειες της σύνδεσης ΜΔΠ στα ΔΔΗΕ είναι η αμφίδρομη ροή ισχύος στις γραμμές του ΔΔΗΕ. Αυτή μπορεί να οδηγήσει όχι μόνο σε διαταραχές στην τάση λειτουργίας, αλλά και να προκαλέσει προβλήματα σχετικά με την προστασία του ΔΔΗΕ, καθιστώντας πιο πολύπλοκη την ανίχνευση και αντιμετώπιση υπερφορτίσεων και βραχυκυκλωμάτων.

Η ποιότητα τάσης αποτελεί σημαντικό στοιχείο αξιολόγησης ενός ΔΔΗΕ και σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της παρεχόμενης από αυτό τάσης. Η διασφάλισή της απαιτεί την τήρηση ορισμένων προϋποθέσεων:

- Διατήρηση συχνότητας και πλάτους τάσης σταθερών και εντός συγκεκριμένων ορίων από τις ονομαστικές τιμές.
- Περιορισμός των αρμονικών συνιστωσών.
- Διατήρηση συμμετρίας μεταξύ των φάσεων.
- Αποφυγή απότομων διαταραχών τάσης (βυθίσεις/ανυψώσεις, flicker).
- Αποφυγή διακοπών παροχής τάσης.

Με την εγκατάσταση ΜΔΠ στα ΔΔΗΕ εμφανίζεται συνεχής διακύμανση της παραγωγής ισχύος η οποία, σε συνδυασμό με την ήδη υπάρχουσα διακύμανση φορτίου οδηγεί σε συνεχή μετάβαση του συστήματος από μια κατάσταση λειτουργίας σε άλλη. Επομένως, προκαλούνται ταχείες μεταβολές στην τάση που μπορεί να οδηγήσουν σε παραβίαση των άνω προϋποθέσεων και πρόκληση διαταραχών, τοπικών ή ευρύτερων, προξενώντας πιθανότατα βλάβες σε εξοπλισμό του δικτύου ή και των καταναλωτών. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου απαιτείται διεξοδική ανάλυση ώστε να κατανοηθούν όλοι οι τρόποι με τους οποίους η εγκατάσταση μιας νέας ΜΔΠ επηρεάζει το υπάρχον δίκτυο.

Κατά τον σχεδιασμό πολλών σημερινών ΔΔΗΕ δεν είχε μελετηθεί το ενδεχόμενο άμεσης ενσωμάτωσης σε αυτά μονάδων παραγωγής. Εύλογα λοιπόν, η ροή ισχύος θεωρούνταν με κατεύθυνση αποκλειστικά από τους υποσταθμούς προς στους καταναλωτές. Με τη διείσδυση των ΜΔΠ δημιουργείται πλέον το ενδεχόμενο ροής ισχύος από τους καταναλωτές προς το δίκτυο ή ακόμα και από το δίκτυο διανομής προς το σύστημα μεταφοράς σε περιπτώσεις υψηλής παραγωγής και χαμηλής ζήτησης.

Όμως, τα συστήματα προστασίας και ελέγχου που είναι εγκατεστημένα, έχουν αναπτυχθεί χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους την αμφίδρομη ροή ισχύος. Ως αποτέλεσμα, πιθανά ρεύματα σφάλματος (fault currents) έχουν επιπλέον διόδους ροής στο δίκτυο που δεν

υπόκεινται σε έλεγχο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αδυναμία εντοπισμού υπάρχοντος σφάλματος σε περίπτωση υπερεντάσεως.

Μια λύση στο εν λόγω πρόβλημα είναι η εγκατάσταση μέσω προστασίας σχεδιασμένων για αμφίδρομη ανίχνευση σφαλμάτων. Στο πλαίσιο αυτό είναι απαραίτητη η συνδυασμένη δράση του εξοπλισμού προστασίας του δικτύου με αυτόν των ΜΔΠ ώστε να αποφευχθούν περιπτώσεις δημιουργίας τμημάτων δικτύου που είναι αποσυνδεδεμένα από το κυρίως δίκτυο και τροφοδοτούνται μόνο από ΜΔΠ (νησιδοποίηση).

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΔΗΕ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βέλτιστη επαναδιαμόρφωση ενός ΔΔΗΕ είναι η διαδικασία μεταβολής της τοπολογίας του δικτύου, με στόχο την ικανοποίηση στον μέγιστο δυνατό βαθμό των επιθυμητών στόχων. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επαναδιαμόρφωση των ΔΔΗΕ με ΜΔΠ, με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος, τη μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας, τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης ΜΔΠ, καθώς και συνδυασμό αυτών. Η μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου επιτυγχάνεται μέσω της σύνδεσης και απόξευξης γραμμών του δικτύου με τη βοήθεια των διακοπτικών μέσων που διαθέτει το εκάστοτε δίκτυο. Στόχος της επαναδιαμόρφωσης είναι οι μεταβλητές ελέγχου να λάβουν τιμές τέτοιες ώστε να επιτευχθεί η ασφαλής λειτουργία βάσει των τεχνικών χαρακτηριστικών του δικτύου.

Αρχικά προσδιορίζονται οι εξισώσεις που συνδέουν τα ηλεκτρικά μεγέθη του ΔΔΗΕ, καθώς και το σύνολο των τεχνικών περιορισμών του δικτύου. Σε ένα κλασικό ΔΔΗΕ, με δεδομένα τα στοιχεία των γραμμών του και τις καταναλώσεις των φορτίων του, οι μεταβλητές ελέγχου είναι η κατάσταση των διακοπτικών μέσων του δικτύου, τα μέτρα των τάσεων των κόμβων, και η παραγωγή ΜΔΠ. Ο υπολογισμός των μεταβλητών ελέγχου που οδηγεί το ΔΔΗΕ σε κατάσταση λειτουργίας, στην οποία οι περιορισμοί τηρούνται, ονομάζεται εφικτή λύση. Η μεθοδολογία και το λογισμικό που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας αναζητά την πιο κατάλληλη από ένα σύνολο εφικτών λύσεων που προκύπτουν από διαφορετικές αποτιμήσεις των μεταβλητών ελέγχου. Η καταλληλότητα μιας λύσης αξιολογείται με κριτήριο την τιμή που λαμβάνει μια συνάρτηση των μεγεθών του ΔΔΗΕ που ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση. Ο στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών του ΔΔΗΕ,

η μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας μέσω ορισμένων δεικτών και η μέγιστη παραγωγή/διείσδυση ΜΔΠ.

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΔΔΗΕ

Τα βασικότερα στοιχεία ενός ΔΔΗΕ είναι οι κόμβοι και οι γραμμές διανομής. Μέσω των γραμμών ρέει η ισχύς από τους υποσταθμούς και μεταξύ των κόμβων. Πρώτα όμως, παρατίθενται κάποια σύνολα του μαθηματικού προβλήματος:

- Ω_b : το σύνολο των κόμβων του ΔΔΗΕ
- Ω_b^S : το σύνολο των κόμβων που είναι υποσταθμοί
- Ω_b^{DG} : το σύνολο των κόμβων στους οποίους είναι συνδεδεμένη ΜΔΠ
- Ω_l : το σύνολο των κλάδων του ΔΔΗΕ
- Ω_{SW} : το σύνολο των κλάδων που έχουν διακόπτη (υποσύνολο του Ω_l)
- Ω_z : το σύνολο των ζωνών του ΔΔΗΕ

Κάθε κόμβος $i \in N$ χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη:

- Τάση του κόμβου i :

$$\tilde{V}_i = V_i \angle \theta_i, i \in N, \quad (4.1)$$

όπου V_i και θ_i το μέτρο και η γωνία της τάσης του κόμβου i , αντίστοιχα.

- Κατανάλωση ισχύος στον κόμβο i :

$$\tilde{S}_{di} = P_{di} + jQ_{di}, i \in N, \quad (4.2)$$

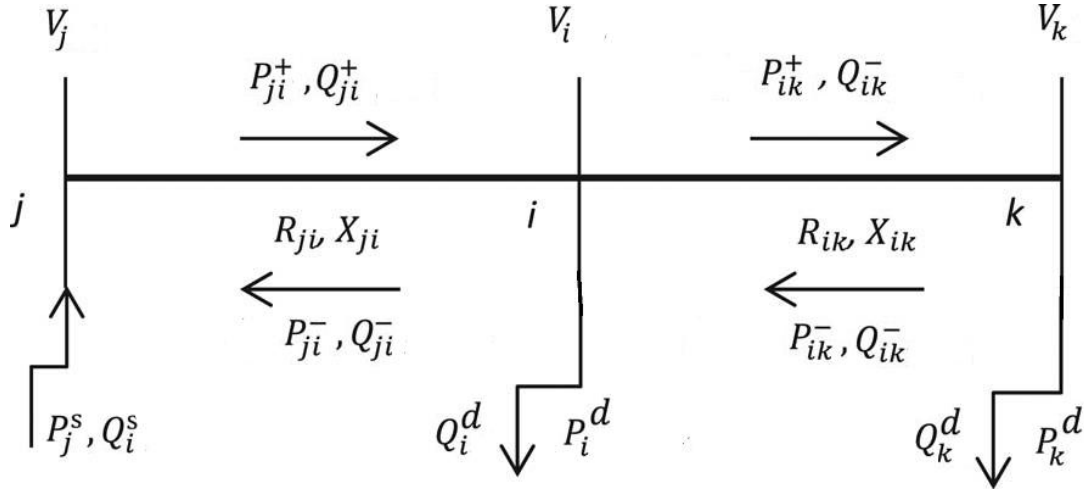
όπου P_{di} και Q_{di} η κατανάλωση ενεργού και αέργου ισχύος του κόμβου i , αντίστοιχα.

Έστω ότι μια γραμμή στο ΔΔΗΕ ενώνει τον κόμβο i με τον κόμβο j . Ο συγκεκριμένος κλάδος αναφέρεται ως γραμμή $i-j \in \Omega_l$. Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τον κλάδο $i-j$ είναι:

- R_{ij}, X_{ij} : η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση της γραμμής $i-j \in \Omega_l$.
- I_{ij} : το μέτρο της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τη γραμμή $i-j \in \Omega_l$.
- P_{ij}^+, P_{ij}^- : η ροή ενεργού ισχύος από τον κόμβο i στον κόμβο j και αντίστροφα
- Q_{ij}^+, Q_{ij}^- : η ροή αέργου ισχύος από τον κόμβο i στον κόμβο j και αντίστροφα
- y_{ij} : είναι δυαδική μεταβλητή που αφορά κάθε κλάδο $i-j \in \Omega_l$ και ορίζεται ως εξής:

$$y_{ij} = \begin{cases} \mathbf{1} , & \text{κλειστό κύκλωμα ή κλειστός διακόπτης για } i-j \in \Omega_l \\ \mathbf{0} , & \text{ανοικτός διακόπτης για } i-j \in \Omega_l \end{cases}$$

Τα παραπάνω βασίζονται στο μοντέλο του Σχήματος 4.1 που απεικονίζει τα μεγέθη αυτά σε ένα απλό ΔΔΗΕ τριών κόμβων.



Σχήμα 4.1 : Δίκτυο τριών κόμβων

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, έχει υποτεθεί ότι ο κόμβος j είναι υποσταθμός και παράγει ισχύ, ενώ οι κόμβοι i και ο k είναι κόμβοι φορτίου με κατανάλωση ισχύος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εξισώσεις που αφορούν το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος κάθε κόμβου i του δικτύου [7]:

$$\sum_{ji} (P_{ji}^+ - P_{ji}^-) - \sum_{ij} ((P_{ij}^+ - P_{ij}^-) + R_{ij} \cdot I_{ij}^2) + P_i^S + P_{i \in \Omega_{dg}}^{DG} \cdot h(i) = P_i^D, \quad i \in \Omega_b \quad (4.3)$$

$$\sum_{ji} (Q_{ji}^+ - Q_{ji}^-) - \sum_{ij} ((Q_{ij}^+ - Q_{ij}^-) + X_{ij} \cdot I_{ij}^2) + Q_i^S = Q_i^d, \quad i \in \Omega_b \quad (4.4)$$

Αν ο κόμβος i είναι υποσταθμός, τότε υπάρχει παραγωγή P_i^S . Αν στον κόμβο είναι συνδεδεμένη ΜΔΠ, τότε υπάρχει παραγωγή $P_{i \in \Omega_{dg}}^{DG} \cdot h(i)$ όπου $P_{i \in \Omega_{dg}}^{DG}$ είναι η μέγιστη παραγωγή της συνδεδεμένης ΜΔΠ και $0 \leq h(i) \leq 1$, όπου $h(i)$ είναι μια συνεχής μεταβλητή που εκφράζει το ποσοστό της μέγιστης παραγωγής της ΜΔΠ που παράγεται στον κόμβο i [3], [7].

Η πτώση τάσης ανάμεσα σε δύο κόμβους i, j δίνεται από τη σχέση (4.5) [7]:

$$V_i^2 - 2 \left(R_{ij} (P_{ij}^+ - P_{ij}^-) + X_{ij} (Q_{ij}^+ - Q_{ij}^-) \right) - V_j^2 + W_{ij}^2 = 0, ij \in \Omega_l \quad (4.5)$$

Η συνεχής μεταβλητή W_{ij}^2 υπάρχει για να δείξει ότι σε περίπτωση ανοιχτοκυκλώματος (δεν υπάρχει ροή ενεργού και αέργου ισχύος), δηλαδή ανοικτού διακόπτη, οι τάσεις ανάμεσα στους κόμβους i και j δεν είναι ίσες. Αντίθετα, διαφέρουν κατά μια ποσότητα ίση με τη σταθερή μεταβλητή αυτή. Η μεταβλητή αυτή εξαρτάται από τους παρακάτω περιορισμούς [7]:

$$W_{ij}^2 \geq -W^2(1 - y_{ij}), ij \in \Omega_l \quad (4.6)$$

$$W_{ij}^2 \leq W^2(1 - y_{ij}), ij \in \Omega_l \quad (4.7)$$

Προκύπτει ότι η παραπάνω μεταβλητή W_{ij}^2 έχει νόημα μόνο σε περίπτωση ανοικτού διακόπτη, γιατί σε περίπτωση κλάδου του κυκλώματος ή κλειστού διακόπτη ($y_{ij} = 1$), η μεταβλητή W_{ij}^2 μηδενίζεται.

Επίσης, ισχύει η σχέση της φαινόμενης ισχύος που συνδέει την τάση κάθε κόμβου με το ρεύμα και τις ροές ισχύος [3]:

$$V_j^2 \cdot I_{ij}^2 \geq (P_{ij}^+ - P_{ij}^-)^2 + (Q_{ij}^+ - Q_{ij}^-)^2, ij \in \Omega_l \quad (4.8)$$

Επιπλέον, υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί για την τάση κάθε κόμβου, το ρεύμα κάθε κλάδου και την παραγωγή στους υποσταθμούς [3]:

$$\underline{V}^2 \leq V_i^2 \leq \overline{V}^2, i \in \Omega_b \quad (4.9)$$

$$0 \leq I_{ij}^2 \leq \overline{I}_{ij}^2 \cdot y_{ij}, ij \in \Omega_l \quad (4.10)$$

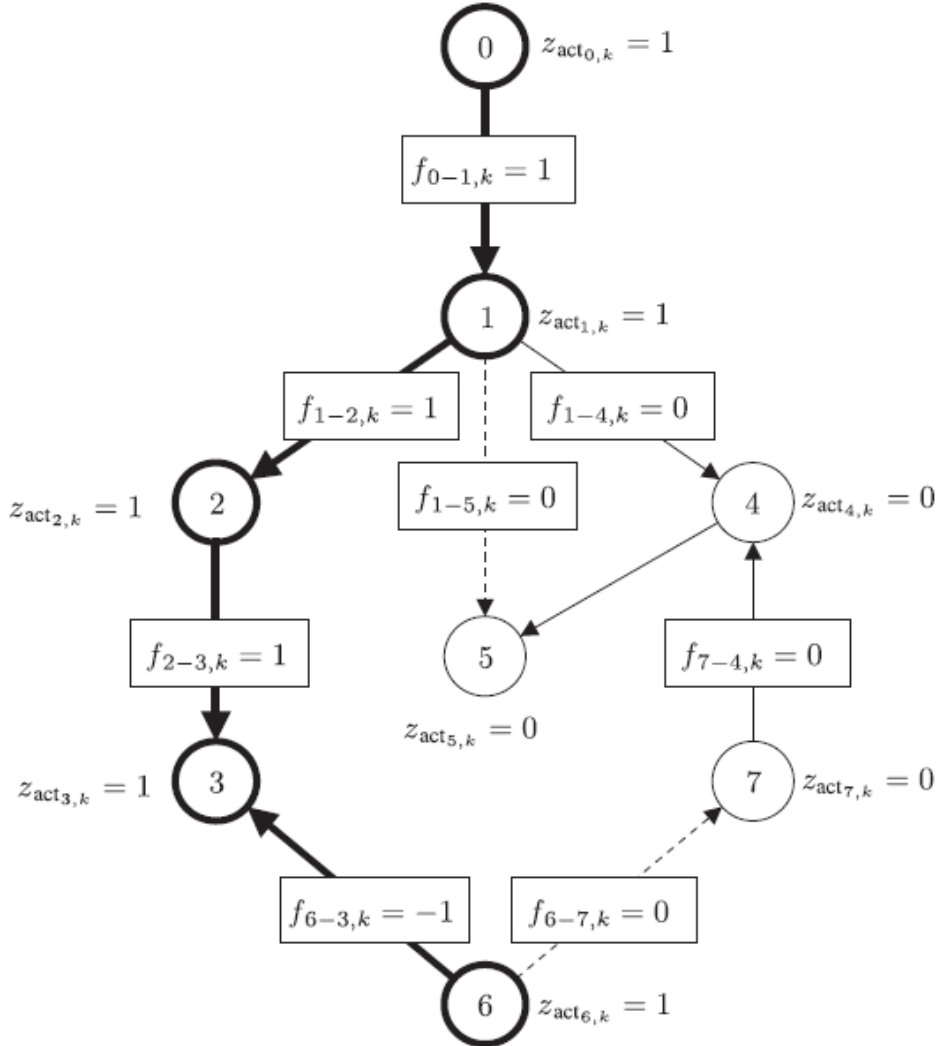
$$P_{min}^S \leq P^S \leq P_{max}^S \quad (4.11)$$

$$Q_{min}^S \leq Q^S \leq Q_{max}^S \quad (4.12)$$

4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΔΔΗΕ

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, μια παράμετρος του συγκεκριμένου προβλήματος βελτιστοποίησης είναι και η αξιοπιστία. Στόχος είναι η βελτιστοποίηση της αξιοπιστίας του ΔΔΗΕ μέσω των δεικτών SAIDI, SAIFI και ENS.

Πριν αναλυθούν οι εξισώσεις που παρουσιάζουν τους περιορισμούς του προβλήματος της αξιοπιστίας, πρέπει να κατανοηθεί το Σχήμα 4.2 που δείχνει τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών y_{ij} , z_{act} και f_{ij} που παίζουν καθοριστικό ρόλο στις εξισώσεις αξιοπιστίας.



Σχήμα 4.2 : Σχέση μεταξύ μεταβλητών y_{ij} , z_{act} , f_{ij}

Τα κυκλάκια στο Σχήμα 4.2 είναι οι ζώνες ενός δικτύου. Ζώνη ονομάζεται ένα σύνολο κόμβων που ενώνονται με κλάδους που δεν περιέχουν διακόπτη. Μόλις υπάρξει διακόπτης ακολουθεί άλλη ζώνη. Έτσι και στο Σχήμα 4.2, η ζώνη 1 επικοινωνεί με τη ζώνη 2 μέσω του διακόπτη y_{12} . Η ζώνη 0 θεωρείται υποσταθμός στο συγκεκριμένο παράδειγμα. Η bold διαδρομή στο διάγραμμα δείχνει το ελάχιστο μονοπάτι ενός κόμβου k , που ανήκει, από ότι φαίνεται στη ζώνη 6, από τον υποσταθμό. Οι ενιαίες γραμμές συμβολίζουν κλειστό διακόπτη, ενώ οι διακεκομμένες ανοικτό διακόπτη.

Είναι φανερό ότι, το ελάχιστο μονοπάτι του κόμβου k αποτελείται από τις ζώνες Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, Z_6 . Επομένως η δυαδική μεταβλητή $z_{act_{z,k}}$ παίρνει την τιμή 1 εφόσον η ζώνη z ανήκει στο ελάχιστο μονοπάτι του κόμβου k , πχ $z_{act_{2,k}} = 1$. Αντίθετα, μηδενίζεται. Όμοια,

ορίζεται και η μεταβλητή $f_{i,j,k}$ που, όπως προαναφέρθηκε, αφορά τους διακόπτες μεταξύ των ζωνών i, j . Αν ο διακόπτης ανήκει στο ελάχιστο μονοπάτι του κόμβου k , είναι σίγουρα κλειστός και η τιμή της μεταβλητής αυτής παίρνει την τιμή 1 ή -1 ανάλογα με την κατεύθυνση του διακόπτη, όπως έχει οριστεί στο σύνολο Ω_{sw} . Αντίθετα, αν δεν ανήκει στο ελάχιστο μονοπάτι, ισχύει $f_{i,j,k} = 0$.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι περιορισμοί του προβλήματος της αξιοπιστίας μέσω των εξισώσεων (4.13)–(4.23) [3], [8]:

$$\sum_{\substack{j \in \Omega_{sw} \\ z_i = z}} f_{ji,k} - \sum_{\substack{j \in \Omega_{sw} \\ z_i = z}} f_{ij,k} + f_{z,k}^S = f_{z,k}^D, \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (4.13)$$

$$|f_{ij,k}| \leq y_{ij}, \forall k \in \Omega_b, \forall ij \in \Omega_{sw} \quad (4.14)$$

$$z_{act_{zj,k}} \geq |f_{ij,k}|, \forall k \in \Omega_b, \forall ij \in \Omega_{sw} \quad (4.15)$$

$$z_{act_{zi,k}} \geq |f_{ij,k}|, \forall k \in \Omega_b, \forall ij \in \Omega_{sw} \quad (4.16)$$

$$\omega_{z_j,k} \geq \omega_{z_i,k} + y_{ij} - 1, \forall k \in \Omega_b, \forall ij \in \Omega_{sw} \quad (4.17)$$

$$\omega_{z_i,k} \geq \omega_{z_j,k} + y_{ij} - 1, \forall k \in \Omega_b, \forall ij \in \Omega_{sw} \quad (4.18)$$

$$\lambda_k = \sum_{z \in \Omega_z} \omega_{z,k} \cdot \lambda_z + \lambda_{fused_k}, \forall k \in \Omega_b \quad (4.19)$$

$$U_k = \left[\sum_{z \in \Omega_z} z_{act_{z,k}} \lambda_z r_z + (\omega_{z,k} - z_{act_{z,k}}) \lambda_z r_{sw} \right] + \lambda_{fused_k} r_z, \forall k \in \Omega_b \quad (4.20)$$

$$ENS = \sum_{k \in \Omega_b} P_k^D \cdot U_k \quad (4.21)$$

$$SAIDI = \frac{\sum_{k \in \Omega_b} N_k \cdot U_k}{\sum_{k \in \Omega_b} N_k} \quad (4.22)$$

$$SAIFI = \frac{\sum_{k \in \Omega_b} N_k \cdot \lambda_k}{\sum_{k \in \Omega_b} N_k} \quad (4.23)$$

Η σχέση (4.13) υπολογίζει το ελάχιστο μονοπάτι ενός κόμβου k , που ανήκει σε μια ζώνη z , σε ένα ακτινικό δίκτυο. Λαμβάνονται υπόψη οι μεταβλητές $f_{z,k}^S$ και $f_{z,k}^D$ που ορίζονται ως εξής:

$$f_{z,k}^S = \begin{cases} \mathbf{1}, & \text{αν η ζώνη } z \text{ είναι υποσταθμός} \\ \mathbf{0}, & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (4.24)$$

$$f_{z,k}^D = \begin{cases} \mathbf{1}, & \text{αν } z_k = z \\ \mathbf{0}, & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (4.25)$$

Η σχέση (4.14) ουσιαστικά εξηγεί πως ορίζεται η μεταβλητή $f_{i-j,k}$. Η μεταβλητή μηδενίζεται σε περίπτωση που ο διακόπτης είναι ανοικτός, ενώ αν ο διακόπτης είναι κλειστός ($y_{ij} = 1$), παίρνει την τιμή 1 ή -1 ανάλογα τη φορά που ορίστηκε.

Οι σχέσεις (4.15) και (4.16) δείχνουν ότι αν ο διακόπτης που ενώνει τις ζώνες Z_i και Z_j είναι κλειστός και ανήκει στο ελάχιστο μονοπάτι ενός κόμβου k ($f_{i-j,k} = 1$), τότε αναγκαστικά και οι ζώνες Z_i και Z_j θα ανήκουν στο μονοπάτι αυτό ($zact_{z_i,k} = zact_{z_j,k} = 1$). Αντίθετα, με ανοικτό διακόπτη, καμία από τις δύο ζώνες δεν ανήκει στο μονοπάτι.

Στις σχέσεις (4.17) και (4.18) εμφανίζεται η μεταβλητή $\omega_{z,k}$. Η μεταβλητή αυτή είναι δυαδική και ορίζεται ως εξής:

$$\omega_{z,k} = \begin{cases} \mathbf{1}, & \text{αν η ζώνη } z \text{ και ο κόμβος } k \text{ τροφοδοτούνται από τον ίδιο υποσταθμό} \\ \mathbf{0}, & \text{σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

Αποτέλεσμα αυτών των σχέσεων είναι ότι αν ο διακόπτης που ενώνει τις ζώνες Z_i και Z_j είναι κλειστός ($y_{ij} = 1$), τότε αναγκαστικά και ο κόμβος k θα τροφοδοτείται από τον ίδιο υποσταθμό με τις ζώνες Z_i και Z_j , δηλαδή ($\omega_{z_i,k} = \omega_{z_j,k} = 1$).

Στη συνέχεια οι σχέσεις (4.19), (4.20) και (4.21) υπολογίζουν τους δείκτες αξιοπιστίας λ_k , U_k και ENS για κάθε κόμβο k του δικτύου. Τέλος, οι σχέσεις (4.22) και (4.23) υπολογίζουν τους δείκτες αξιοπιστίας SAIDI και το SAIFI.

4.4 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΔΗΕ

Όπως επισημαίνεται και στα παραπάνω κεφάλαια, στόχος ενός ΔΔΗΕ είναι να λειτουργεί βέλτιστα. Αυτό σημαίνει να έχει τις ελάχιστες δυνατές απώλειες ηλεκτρικής ισχύος, βέλτιστη αξιοπιστία και μέγιστη διείσδυση ΜΔΠ. Για να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι, το ΔΔΗΕ αναδιαμορφώνεται κατάλληλα ανάλογα με τα κριτήρια που τίθενται σε κάθε περίπτωση (αυτό θα εξηγηθεί και παρακάτω). Η αναδιαμόρφωση του δικτύου γίνεται με χρήση διακοπών, οι οποίοι αυτόματα ανοιγοκλείνουν ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη τοπολογία του δικτύου. Επίσης, στη βέλτιστη λειτουργία συμβάλλουν και οι ΜΔΠ, οι οποίες αν συνδεθούν σε κατάλληλους κόμβους «ελαφραίνουν» το ΔΔΗΕ και μειώνουν τις απώλειες.

4.4.1 Αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι η σχέση (4.26):

$$\begin{aligned} \min \quad & c^{lss} \left(\sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij}^2 \right) + c^{ENS} ENS + c^{SAIDI} \left(\sum_{k \in \Omega_b} N_k (U_k - \overline{SAIDI}) \right) \\ & + c^{SAIFI} \left(\sum_{k \in \Omega_b} N_k (\lambda_k - \overline{SAIFI}) \right) + c^{DG} \left(\sum_{k \in \Omega_{DG}} (1 - h(k)) \right) \end{aligned} \quad (4.26)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από 5 όρους. Ο πρώτος όρος αφορά την ελαχιστοποίηση του κόστους των απωλειών του ΔΔΗΕ. Ο δεύτερος, ο τρίτος και ο τέταρτος όρος αφορούν την αξιοπιστία. Ο δεύτερος όρος αφορά την ελαχιστοποίηση του δείκτη ENS, δηλαδή την ελαχιστοποίηση της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας στους καταναλωτές. Ο τρίτος και ο τέταρτος όρος έχουν ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους αξιοπιστίας που προκλήθηκε από τα όρια που έχουν τεθεί για τους δείκτες αξιοπιστίας SAIDI και το SAIFI. Ο πέμπτος αφορά τους κόμβους, στους οποίους έχει συνδεθεί ΜΔΠ και ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς $1 - h(k)$, δηλαδή να γίνεται εκμεταλλεύσιμη όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια από ΜΔΠ.

Όλοι οι όροι πολλαπλασιάζονται με κάποιους συντελεστές που ονομάζονται βάρη. Ανάλογα με το κριτήριο που ενδιαφέρει περισσότερο, στο κριτήριο αυτό δίνεται περισσότερη βαρύτητα, επιλέγοντας μεγαλύτερη τιμή βάρους. Για παράδειγμα, αν επιδιώκεται το δίκτυο να έχει όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες ισχύος, τότε επιλέγεται μεγάλος συντελεστής βαρύτητας c^{lss} και αρκετά μικρότεροι οι υπόλοιποι συντελεστές βαρύτητας. Αντίθετα, αν επιδιώκεται ένα πιο ισορροπημένο αποτέλεσμα και ταυτόχρονη συνεισφορά των 4 όρων της αντικειμενικής συνάρτησης, τότε επιλέγονται κατάλληλα βάρη ώστε να μην υπερισχύει κανένα κριτήριο.

4.4.2 Περιορισμοί του προβλήματος

Υπάρχουν κάποιοι ακόμα περιορισμοί που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος [7]:

$$P_{ij}^+ \leq \overline{VI} a_{ij}^{P^+}, ij \in \Omega_l \quad (4.27)$$

$$P_{ij}^- \leq \overline{VI} a_{ij}^{P^-}, ij \in \Omega_l \quad (4.28)$$

$$Q_{ij}^+ \leq \bar{V}I a_{ij}^{Q+}, ij \in \Omega_l \quad (4.29)$$

$$Q_{ij}^- \leq \bar{V}I a_{ij}^{Q-}, ij \in \Omega_l \quad (4.30)$$

$$a_{ij}^{P+} + a_{ij}^{P-} \leq y_{ij}, ij \in \Omega_l \quad (4.31)$$

$$a_{ij}^{Q+} + a_{ij}^{Q-} \leq y_{ij}, ij \in \Omega_l \quad (4.32)$$

$$|\Omega_l| - |\Omega_{sw}| + \sum_{ij \in \Omega_{sw}} y_{ij} = |\Omega_b| - |\Omega_b^S| \quad (4.33)$$

Εισάγονται οι δυαδικές μεταβλητές $a_{ij}^{P+}, a_{ij}^{P-}, a_{ij}^{Q+}, a_{ij}^{Q-}$. Από τις σχέσεις (4.31) και (4.32) παρατηρείται ότι για τον κλάδο i-j αναγκαστικά θα είναι 1 η μία από τις δυο δυαδικές μεταβλητές της ενεργού και της αέργου ισχύος, αντίστοιχα, ή καμία από αυτές. Επομένως, εξασφαλίζεται ροή ενεργού και αέργου ισχύος πάντα προς μία κατεύθυνση όπως φαίνεται στις σχέσεις (4.27)–(4.30) [7]. Τέλος, η σχέση (4.33) αφορά την ακτινικότητα του δικτύου [3].

4.5 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης του ΔΔΗΕ με ΜΔΠ απαρτίζεται από την αντικειμενική συνάρτηση (4.26) και τους περιορισμούς (4.3) έως (4.23) και (4.27) έως (4.33).

Το ανωτέρω πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς (MIQCP). Το πρόβλημα αυτό βελτιστοποίησης επιλύθηκε στο λογισμικό GAMS με τη βοήθεια του επιλυτή CPLEX [3],[9].

Οι μεταβλητές σχεδίασης (άγνωστοι) του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι οι ακόλουθες:

- Οι θετικές μεταβλητές:
 - V_i : το μέτρο της τάσης του κόμβου i
 - I_{ij} : το μέτρο της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τον κλάδο i-j
 - P_{ij}^+ : η ροή ενεργού ισχύος από τον κόμβο i στον κόμβο j
 - P_{ij}^- : η ροή ενεργού ισχύος από τον κόμβο j στον κόμβο i
 - Q_{ij}^+ : η ροή αέργου ισχύος από τον κόμβο i στον κόμβο j

- Q_{ij}^- : η ροή αέργου ισχύος από τον κόμβο j στον κόμβο i
 - λ_k : ρυθμός βλαβών κόμβου k
 - U_k : χρόνος αποκατάστασης κόμβου k
- Οι δυναμικές μεταβλητές :
 - a_{ij}^{P+} : παίρνει την τιμή 1 αν υπάρχει ροή ενεργού ισχύος από τον κόμβο i στον κόμβο j . Αντίθετα, μηδενίζεται.
 - a_{ij}^{P-} : παίρνει την τιμή 1 αν υπάρχει ροή ενεργού ισχύος από τον κόμβο j στον κόμβο i . Αντίθετα, μηδενίζεται.
 - a_{ij}^{Q+} : παίρνει την τιμή 1 αν υπάρχει ροή αέργου ισχύος από τον κόμβο i στον κόμβο j . Αντίθετα, μηδενίζεται.
 - a_{ij}^{Q-} : παίρνει την τιμή 1 αν υπάρχει ροή αέργου ισχύος από τον κόμβο j στον κόμβο i . Αντίθετα, μηδενίζεται.
 - $\omega_{z,k}$: παίρνει την τιμή 1 εάν η ζώνη z και ο κόμβος k τροφοδοτούνται από τον ίδιο υποσταθμό. Αντίθετα, μηδενίζεται.
 - $z_{act,z,k}$: παίρνει την τιμή 1 εφόσον η ζώνη z ανήκει στο ελάχιστο μονοπάτι του κόμβου k . Αντίθετα, μηδενίζεται.
 - $f_{z,k}^S$: παίρνει την τιμή 1 αν η ζώνη z είναι υποσταθμός. Αντίθετα, μηδενίζεται.
 - $f_{z,k}^D$: παίρνει την τιμή αν $z_k = z$. Αντίθετα, μηδενίζεται.
 - Οι πραγματικές μεταβλητές :
 - $f_{ij,k}$: αφορά τους διακόπτες μεταξύ των ζωνών i, j . Αν ο διακόπτης ανήκει στο ελάχιστο μονοπάτι του κόμβου k , είναι σίγουρα κλειστός και η τιμή της μεταβλητής αυτής παίρνει την τιμή 1 ή -1 ανάλογα με την κατεύθυνση του διακόπτη, όπως έχει οριστεί στο σύνολο Ω_{sw} . Αντίθετα, αν δεν ανήκει στο ελάχιστο μονοπάτι, μηδενίζεται.
 - Q_{si} : η άεργος ισχύς που εγγέει στο δίκτυο ο υποσταθμός που βρίσκεται στον κόμβο i
 - W_{ij}^2 : η συνεχής μεταβλητή W_{ij}^2 υπάρχει για να δείξει ότι σε περίπτωση ανοιχτοκυκλώματος, δηλαδή ανοικτού διακόπτη, οι τάσεις ανάμεσα στους κόμβους i και j δεν είναι ίσες. Αντίθετα, διαφέρουν κατά μια ποσότητα ίση με τη σταθερή μεταβλητή αυτή.

Τα δεδομένα του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι τα ακόλουθα:

- $W^2 = 100$: σταθερά (εμφανίζεται στις σχέσεις (4.6), (4.7))
- $r_{sw} = 0.5$: σταθερά (εμφανίζεται στη σχέση (4.20))
- C_{lss} , C_{ENS} , C_{SAIDI} , C_{SAIFI} , C_{DG} : συντελεστές βαρύτητας, παίρνουν αρχική τιμή ανάλογα τη δοκιμή
- \overline{SAIDI} , \overline{SAIFI} : μέγιστες τιμές SAIDI, SAIFI, παίρνουν αρχική τιμή ανάλογα το δίκτυο που εξετάζεται

Τα αποτελέσματα του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι τα ακόλουθα:

- Οι θετικές μεταβλητές:
 - P_{Si} : η ενεργός ισχύς που εγχέει στο δίκτυο ο υποσταθμός που βρίσκεται στον κόμβο i
 - P_{loss} : οι απώλειες ενεργού ισχύος
 - SAIDI, SAIFI, ENS : δείκτες αξιοπιστίας
 - $h(k)$: συνεχής μεταβλητή από το 0 έως το 1 και δείχνει το ποσοστό της μέγιστης ισχύος που διεισδύει στο δίκτυο από ΜΔΠ συνδεδεμένη στον κόμβο k
- Η δυαδική μεταβλητή :
 - y_{ij} : παίρνει την τιμή 1 αν ο διακόπτης στον κλάδο $i-j$ είναι κλειστός. Αν ο διακόπτης είναι ανοιχτός, η μεταβλητή μηδενίζεται. Μέσω αυτής της μεταβλητής βρίσκεται η τοπολογία του δικτύου.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών του μοντέλου βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης ΔΔΗΕ με στόχο τις ελάχιστες απώλειες ισχύος του δικτύου, την μέγιστη αξιοπιστία του και τη μέγιστη διείσδυση ΜΔΠ σε αυτό. Τα δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα δίκτυα των 43 και των 69 κόμβων. Σε κάθε ένα από αυτά πραγματοποιήθηκαν κάποιες δοκιμές που χωρίζονται σε δυο μεγάλες περιπτώσεις:

- **Στην πρώτη περίπτωση**, μεταβάλλονται τα βάρη της αντικειμενικής συνάρτησης, ανάλογα με το κριτήριο που δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα.
- **Στη δεύτερη περίπτωση**, μεταβάλλεται η μέγιστη παραγωγή των ΜΔΠ που διεισδύουν στο ΔΔΗΕ.

Σε κάθε σενάριο επιλύεται το μοντέλο βελτιστοποίησης που ορίστηκε στο Κεφάλαιο 4. Τα αποτελέσματα της επίλυσης σε κάθε περίπτωση είναι η κατάσταση των διακοπών, οι απώλειες του δικτύου, η ισχύς που θα διεισδύσει από τις ΜΔΠ και οι δείκτες SAIDI, SAIFI και ENS.

Όλες οι εφαρμογές του μοντέλου που ακολουθούν έγιναν σε Η/Υ με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής Intel Core i3 – 3110M @ 2.40GHz
- Μνήμη RAM 4 GB
- Λειτουργικό σύστημα Windows 10.1

5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ 43 ΚΟΜΒΩΝ

Το ΔΔΗΕ των 43 κόμβων που εμφανίζεται στο Σχήμα 5.1 είναι ένα ακτινικό δίκτυο διανομής με 2 υποσταθμούς στους κόμβους 1 και 43, 9 ζώνες φορτίων, 32 απλούς κλάδους (χωρίς διακόπτες) και 15 διακόπτες που ενώνουν τις ζώνες μεταξύ τους [3]. Οι ανοιχτοί διακόπτες συμβολίζονται με λευκό κουτί, ενώ οι κλειστοί διακόπτες με μαύρο κουτί. Το ΔΔΗΕ είναι ονομαστικής τάσης 7.967 kV, ενώ τα όρια των τάσεων στους κόμβους είναι $\pm 5\%$ της ονομαστικής. Τα δεδομένα των κόμβων, των γραμμών και των ζωνών του δικτύου, παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 5.1α: Δεδομένα του δικτύου 43 κόμβων

Κλάδος		R (Ω)	X (Ω)	λ_{ij} (failure/year)	r_{ij} (h)
N1	N2	0.9	0.9		
N2	N3	0.9	0.9	0.1	2
N3	N4	0.9	0.9	0.1	2
N3	N5	0.9	0.9	0.1	2
N5	N6	0.9	0.9		
N6	N7	0.9	0.9	0.1	2
N6	N8	0.9	0.9	0.1	2
N8	N9	0.9	0.9	0.1	2
N8	N10	0.9	0.9		
N10	N11	0.9	0.9	0.1	2
N11	N12	0.9	0.9	0.1	2
N11	N13	0.9	0.9	0.1	2
N13	N14	0.9	0.9	0.1	2
N15	N16	0.9	0.9	0.1	2
N15	N18	0.9	0.9	0.1	2
N15	N17	0.9	0.9	0.1	2
N18	N19	0.9	0.9	0.1	2
N18	N20	0.9	0.9		
N20	N21	0.9	0.9	0.1	2
N21	N22	0.9	0.9	0.1	2
N21	N23	0.9	0.9	0.1	2
N21	N24	0.9	0.9		
N24	N25	0.9	0.9	0.1	2
N25	N26	0.9	0.9	0.1	2
N25	N27	0.9	0.9	0.1	2
N25	N28	0.9	0.9	0.1	2
N28	N29	0.9	0.9	0.1	2
N28	N30	0.9	0.9	0.1	2
N31	N32	0.9	0.9	0.1	3
N31	N33	0.9	0.9	0.1	3
N33	N34	0.9	0.9	0.1	3
N33	N35	0.9	0.9		
N35	N36	0.9	0.9	0.1	3
N36	N37	0.9	0.9	0.1	3

Πίνακας 5.1α: Δεδομένα του δικτύου 43 κόμβων (συνέχεια)

Κλάδος		R (Ω)	X (Ω)	λ_{ij} (failure/year)	r_{ij} (h)
N36	N38	0.9	0.9		
N38	N39	0.9	0.9	0.1	3
N39	N40	0.9	0.9	0.1	3
N39	N41	0.9	0.9	0.1	3
N41	N42	0.9	0.9	0.1	3
N17	N32	0.9	0.9		
N31	N43	0.9	0.9		
N4	N16	0.9	0.9		
N9	N23	0.9	0.9		
N12	N27	0.9	0.9		
N19	N34	0.9	0.9		
N22	N37	0.9	0.9		
N26	N40	0.9	0.9		

Στον Πίνακα 5.1α απεικονίζονται η ωμική και η επαγωγική αντίσταση κάθε κλάδου του δικτύου, καθώς επίσης το ποσοστό σφάλματος και ο χρόνος αποκατάστασης του κάθε κλάδου.

Πίνακας 5.1β: Δεδομένα του δικτύου 43 κόμβων

Κόμβος	P_L (MW)	Q_L (MW)	N_j	z_k
N1	0	0		10
N2	0	0	1	1
N3	0.1	0.02	100	1
N4	0	0	1	1
N5	0	0	1	1
N6	0.1	0.02	100	2
N7	0	0	1	2
N8	0	0	1	2
N9	0.1	0.02	100	2
N10	0	0	1	3
N11	0.1	0.02	100	3
N12	0	0	1	3
N13	0.1	0.02	100	3
N14	0	0	1	3
N15	0.1	0.02	100	4
N16	0	0	1	4
N17	0	0	1	4
N18	0	0	1	4
N19	0	0	1	4
N20	0	0	1	5
N21	0.1	0.02	100	5
N22	0	0	1	5
N23	0	0	1	5
N24	0	0	1	6
N25	0.1	0.02	100	6
N26	0	0	1	6
N27	0	0	1	6

Πίνακας 5.1β: Δεδομένα του δικτύου 43 κόμβων (συνέχεια)

N28	0.1	0.02	100	6
N29	0	0	1	6
N30	0	0	1	6
N31	0.1	0.02	100	7
N32	0	0	1	7
N33	0	0	1	7
N34	0	0	1	7
N35	0	0	1	8
N36	0.2	0.04	200	8
N37	0	0	1	8
N38	0	0	1	9
N39	0.2	0.04	200	9
N40	0	0	1	9
N41	0.2	0.04	200	9
N42	0	0	1	9
N43	0	0		11

Στον Πίνακα 5.1β απεικονίζονται η κατανάλωση ενεργού και αέργου ισχύος κάθε κόμβου, καθώς επίσης σε ποια ζώνη ανήκει ο κάθε κόμβος και πόσοι καταναλωτές είναι συνδεδεμένοι σε αυτόν.

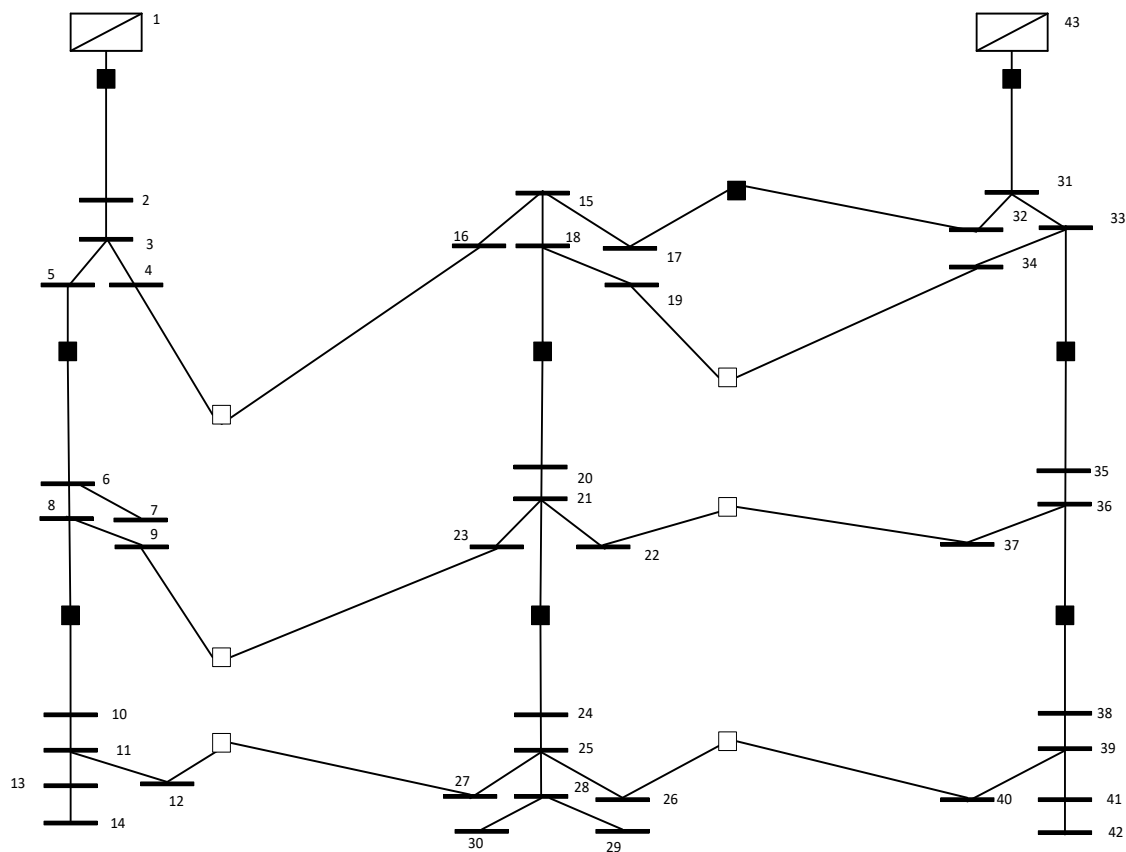
Πίνακας 5.1γ: Δεδομένα του δικτύου 43 κόμβων

Ζώνη	λ_z (failures/year)	r_z (h)
Z1	0.3	2
Z2	0.2	2
Z3	0.3	2
Z4	0.4	2
Z5	0.3	2
Z6	0.4	2
Z7	0.3	3
Z8	0.2	3
Z9	0.3	3

Στον Πίνακα 5.1γ παρουσιάζονται τα στοιχεία αξιοπιστίας για κάθε ζώνη του δικτύου.

Η αρχική τοπολογία του δικτύου απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1. Στον Πίνακα 5.2 απεικονίζεται η αρχική κατάσταση των διακοπών στο δίκτυο. Ανάλογα με τις δοκιμές που γίνονται θα παρουσιάζεται η μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου και όλων των υπόλοιπων στοιχείων του. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι δοκιμές θα χωριστούν στις δύο παρακάτω περιπτώσεις:

- Στην πρώτη περίπτωση, μεταβάλλονται τα βάρη της αντικειμενικής συνάρτησης, ανάλογα με το κριτήριο που δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα.
- Στη δεύτερη περίπτωση, μεταβάλλεται η μέγιστη παραγωγή των ΜΔΠ που διεισδύουν στο ΔΔΗΕ.



Σχήμα 5.1: Αρχική τοπολογία δικτύου 43 κόμβων

Πίνακας 5.2: Αρχική κατάσταση διακοπών στο δίκτυο 43 κόμβων

Ανοικτοί	Κλειστοί
4-16, 9-23, 12-27, 19-36, 22-37, 26-40	1-2, 5-6, 8-10, 18-20, 17-32, 21-24, 43-31, 33-35, 36-38

5.2.1 Μεταβολή των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης

Αρχικά θεωρούνται κάποια μεγέθη σταθερά στο πρόβλημα. Έπειτα από δοκιμές προέκυψε ότι οι μέγιστες τιμές των δεικτών SAIDI και SAIFI (που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4) θα έχουν τις ακόλουθες σταθερές τιμές: $\overline{SAIDI} = 2.55 \text{ h/year}$ και $\overline{SAIFI} = 1.75 \text{ faults/year}$. Συνολικά, η ζήτηση του δικτύου για όλες τις περιπτώσεις είναι 1.6 MW. Επίσης, για όλες τις δοκιμές επιλέχθηκαν συγκεκριμένοι κόμβοι, στους οποίους θα έχουν εγκατασταθεί ΜΔΠ με σταθερή μέγιστη παραγωγή που φαίνεται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Μέγιστη παραγωγή και θέση ΜΔΠ στο δίκτυο των 43 κόμβων

Κόμβος	Μέγιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)
14	0.10
20	0.10
29	0.05
30	0.05
42	0.10
Σύνολο	0.40

- *Πρώτη δοκιμή συντελεστών βαρών*

$$C_{lss} = 1000 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}, \quad C_{ENS} = 10 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}, \quad C_{SAIDI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{h}},$$

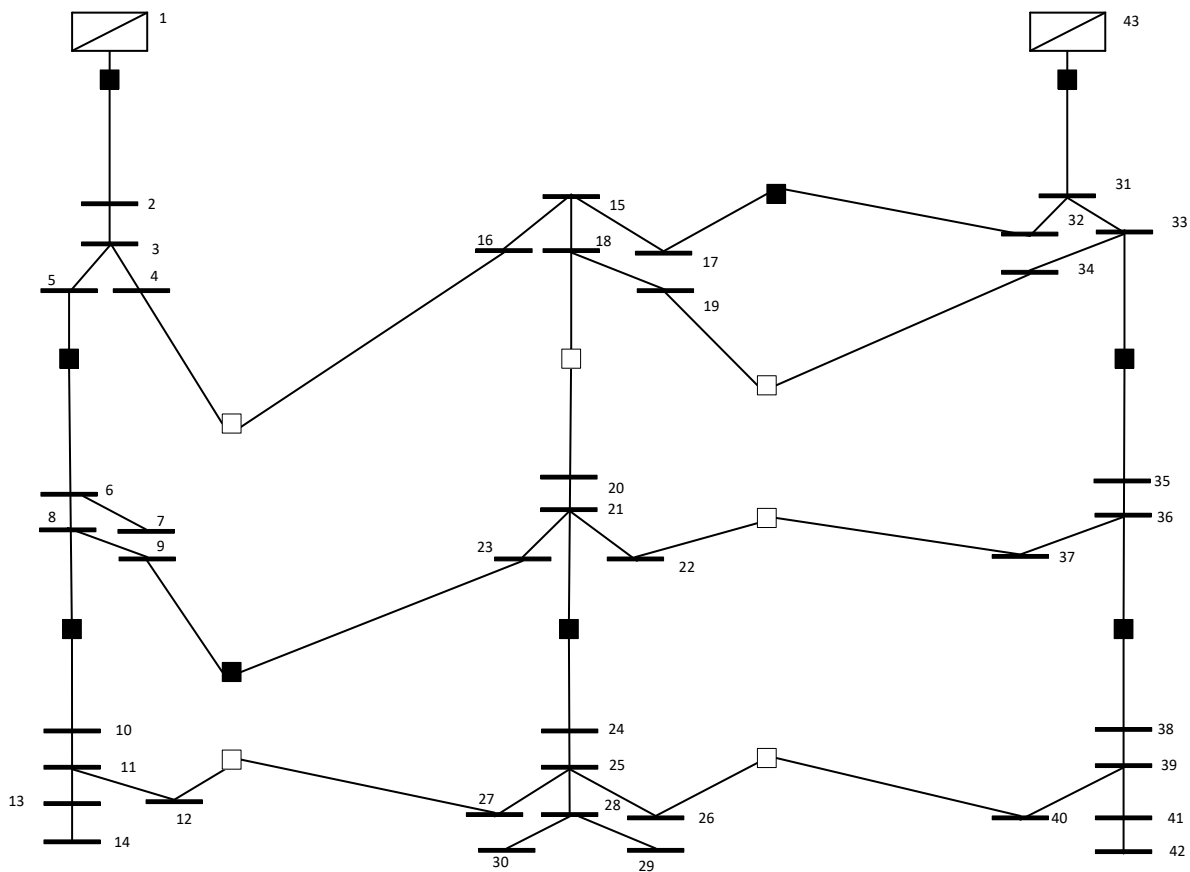
$$C_{SAIFI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{faults/year}}, \quad C_{DG} = 10 \text{ €}$$

Τα βάρη που επιλέγονται στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι κατάλληλα ώστε να προκύψει μια ισορροπημένη λύση χωρίς βαρύτητα σε κάποιο κριτήριο. Λαμβάνονται ισοδύναμα υπόψη οι απώλειες, η αξιοπιστία και η διείσδυση ΜΔΠ. Ο τρόπος επιλογής των συντελεστών έχει στόχο την ίδιας τάξης μεγέθους συνεισφορά κάθε όρου στην αντικειμενική συνάρτηση. Για να επιτευχθεί αυτή η ίδιας τάξης μεγέθους συνεισφορά, προτιμήθηκαν οι παραπάνω συντελεστές.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.4. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση απεικονίζεται στον Πίνακα 5.5 και το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα πρώτης δοκιμής συντελεστών βαρών
στο δίκτυο των 43 κόμβων

Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
18	2.164	1.400	3435



Σχήμα 5.2: Τοπολογία δικτύου 43 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της πρώτης δοκιμής
συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Πίνακας 5.5: Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της πρώτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Ανοικτοί	Κλειστοί
4-16, 12-27, 18-20, 19-34, 22-37, 26-40	1-2, 5-6, 8-10, 9-23, 17-32, 21-24, 43-31, 33-35, 36-38

Όλες οι ΜΔΠ λειτουργούν στο μέγιστο (η μεταβλητή h κάθε μονάδας ισούται με 1) και προσφέρουν συνολικά στο δίκτυο 0.4 MW. Η υπόλοιπη ζήτηση καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες των υποσταθμών στους κόμβους 1 και 43 ως εξής: $P_{S1} = 0.5$ MW και $P_{S43} = 0.7$ MW.

- **Δεύτερη δοκιμή συντελεστών βαρών**

$$C_{lss} = 100000 \frac{\text{€}}{\text{kW}}, \quad C_{ENS} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}, \quad C_{SAIDI} = 0.001 \frac{\text{€}}{\text{h}},$$

$$C_{SAIFI} = 0.001 \frac{\text{€}}{\text{faults/year}}, \quad C_{DG} = 10 \text{ €}$$

Τα βάρη που επιλέγονται στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι κατάλληλα ώστε να δοθεί μεγαλύτερο βάρος στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του ΔΔΗΕ. Για αυτό το λόγο, αυξάνεται κατάλληλα το C_{lss} και μειώνονται τα υπόλοιπα βάρη. Το C_{DG} διατηρείται σταθερό με πριν.

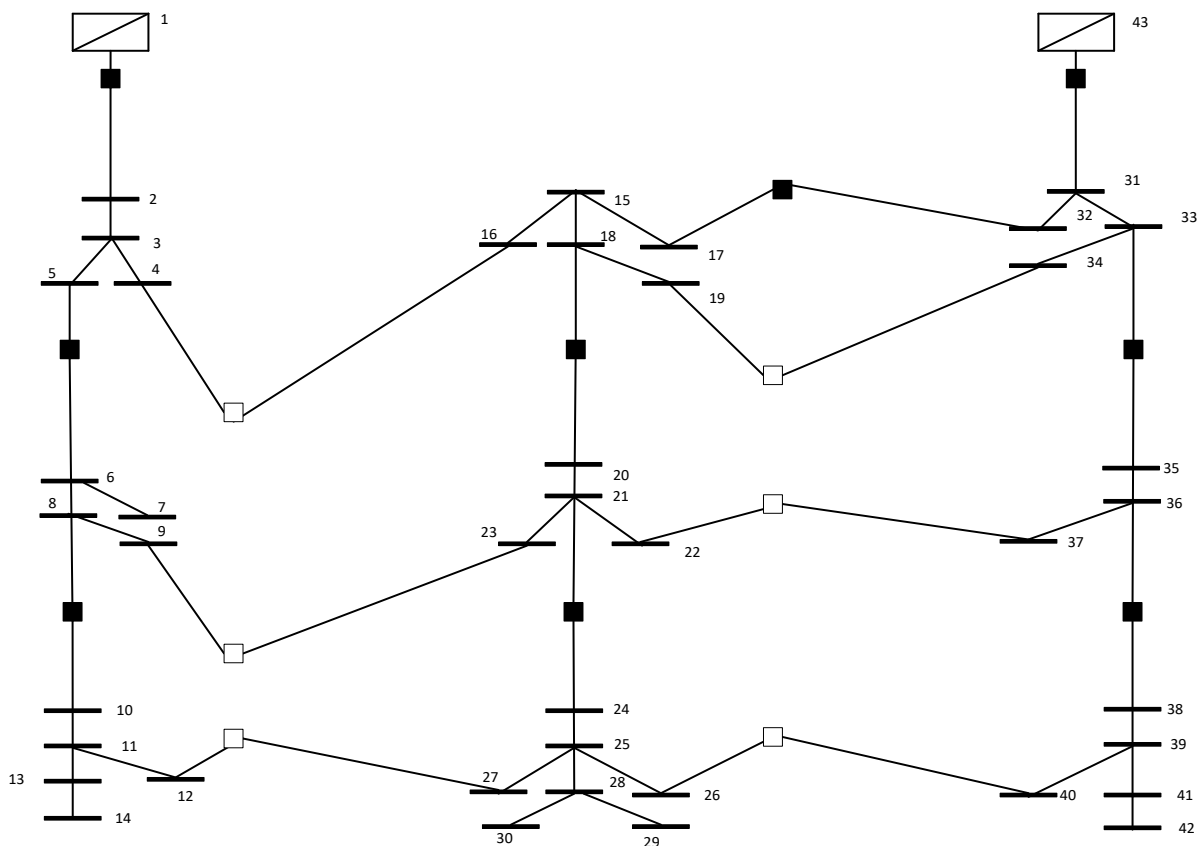
Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.6. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.7. και το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα δεύτερης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
17	2.447	1.569	3920

Πίνακας 5.7: Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της δεύτερης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Ανοικτοί	Κλειστοί
4-16, 9-23, 12-27, 19-34, 22-37, 26-40	1-2, 5-6, 8-10, 18-20, 17-32, 21-24, 43-31, 33-35, 36-38



Σχήμα 5.3: Τοπολογία δικτύου 43 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της δεύτερης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Όλες οι ΜΔΠ λειτουργούν στο μέγιστο (η μεταβλητή h κάθε μονάδας ισούται με 1) και προσφέρουν συνολικά στο δίκτυο 0.4 MW. Η υπόλοιπη ζήτηση καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες των υποσταθμών στους κόμβους 1 και 43 ως εξής: $P_{S1} = 0.4$ MW και $P_{S43} = 0.8$ MW.

Συνεπώς, οι απώλειες του δικτύου μειώθηκαν σε σχέση με πριν, ενώ οι δείκτες αξιοπιστίας χειροτέρεψαν. Είναι, επομένως, η βέλτιστη λύση από πλευράς απωλειών του δικτύου, κάτι που αναμενόταν.

- *Τρίτη δοκιμή συντελεστών βαρών*

$$C_{lss} = 0.001 \frac{\text{€}}{\text{kW}}, \quad C_{ENS} = 100 \frac{\text{€}}{\frac{\text{kWh}}{\text{year}}}, \quad C_{SAIDI} = 10 \frac{\text{€}}{\frac{\text{h}}{\text{year}}},$$

$$C_{SAIFI} = 10 \frac{\text{€}}{\frac{\text{faults}}{\text{year}}}, \quad C_{DG} = 10 \text{ €}$$

Τα βάρη που επιλέγονται στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι κατάλληλα ώστε να δοθεί μεγαλύτερο βάρος στην αξιοπιστία του ΔΔΗΕ. Για αυτό το λόγο αυξάνονται κατάλληλα τα C_{SAIDI} , C_{SAIFI} , C_{ENS} και μειώνεται ο συντελεστής των απωλειών. Το C_{DG} διατηρείται σταθερό με πριν.

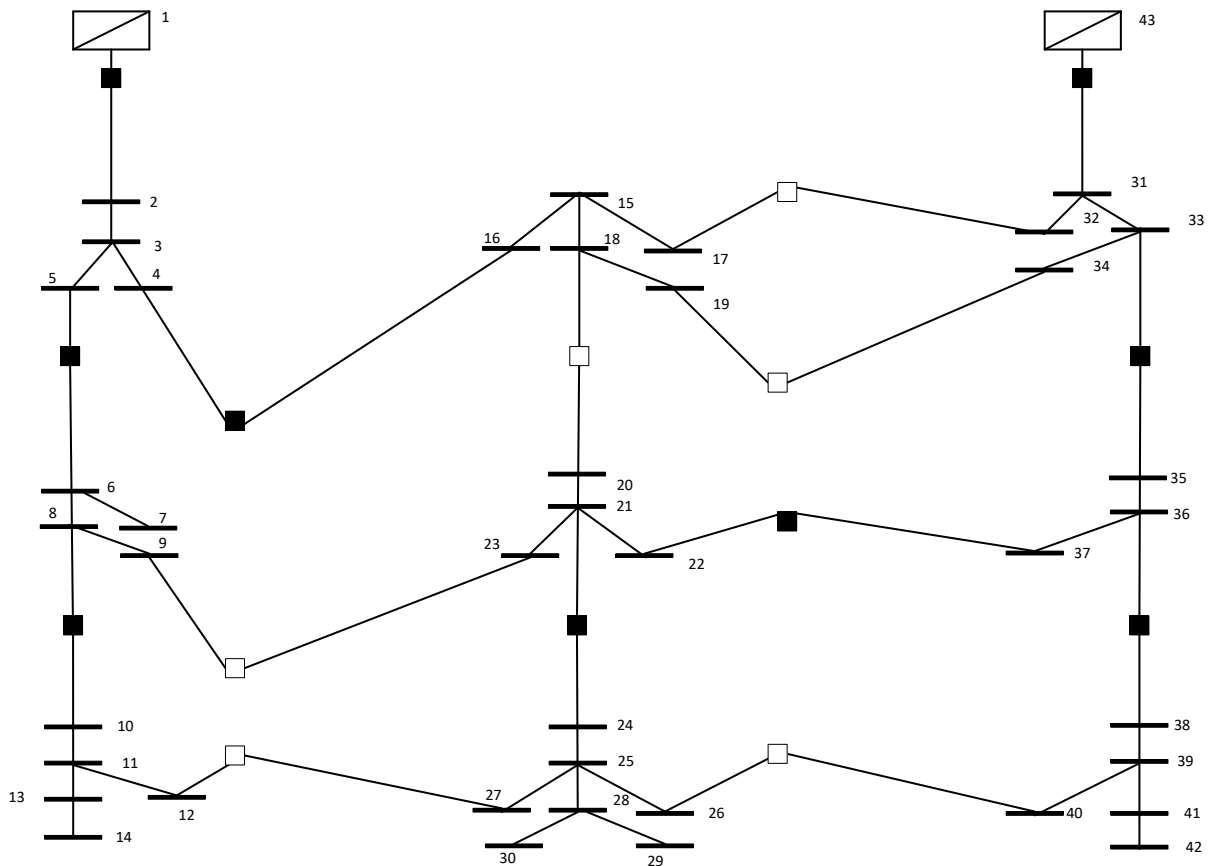
Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.8. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.9 και το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα τρίτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
20	2.070	1.363	3315

Πίνακας 5.9: Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της τρίτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Ανοικτοί	Κλειστοί
9-23, 12-27, 17-32, 18-20, 19-34, 26-40	1-2, 5-6, 4-16, 8-10, 21-24, 22-37, 43-31, 33-35, 36-38



Σχήμα 5.4: Τοπολογία δικτύου 43 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της τρίτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Όλες οι ΜΔΠ λειτουργούν στο μέγιστο (η μεταβλητή h κάθε μονάδας ισούται με 1) και προσφέρουν συνολικά στο δίκτυο 0.4 MW. Η υπόλοιπη ζήτηση καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες των υποσταθμών στους κόμβους 1 και 43 ως εξής: $P_{S1} = 0.5$ MW και $P_{S43} = 0.7$ MW.

Συνεπώς, οι απώλειες του δικτύου αυξήθηκαν σε σχέση με πριν, ενώ οι δείκτες αξιοπιστίας βελτιώθηκαν, δηλαδή μειώθηκε ο μέσος όρος σφαλμάτων (SAIFI), η μέση διάρκεια σφαλμάτων (SAIDI) και η μη τροφοδοτούμενη ενέργεια (ENS). Είναι, επομένως, η βέλτιστη λύση από πλευράς αξιοπιστίας του δικτύου, κάτι που αναμενόταν.

- **Τέταρτη δοκιμή συντελεστών βαρών**

$$C_{lss} = 1000 \frac{\text{€}}{\text{kW}}, \quad C_{ENS} = 10 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}, \quad C_{SAIDI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{h}},$$

$$C_{SAIFI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{faults}}, \quad C_{DG} = 10000 \text{ €}$$

Τα βάρη που επιλέγονται στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι κατάλληλα ώστε να δοθεί μεγαλύτερο βάρος στην διείσδυση των ΜΔΠ στο ΔΔΗΕ. Για αυτό το λόγο, αυξάνεται κατάλληλα το C_{DG} και επιλέγονται τα υπόλοιπα βάρη όπως και στην πρώτη δοκιμή που έδινε ένα ισορροπημένο αποτέλεσμα.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.10. Για τις δοκιμές 4 και 5, μεταβλήθηκε η μέγιστη παραγωγή των ΜΔΠ, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 5.11. Επίσης, στον πίνακα αυτό φαίνεται και το ποσοστό παραγωγής κάθε ΜΔΠ στη δοκιμή αυτή. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.12. Το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5.

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα τέταρτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
7	2.162	1.344	3460

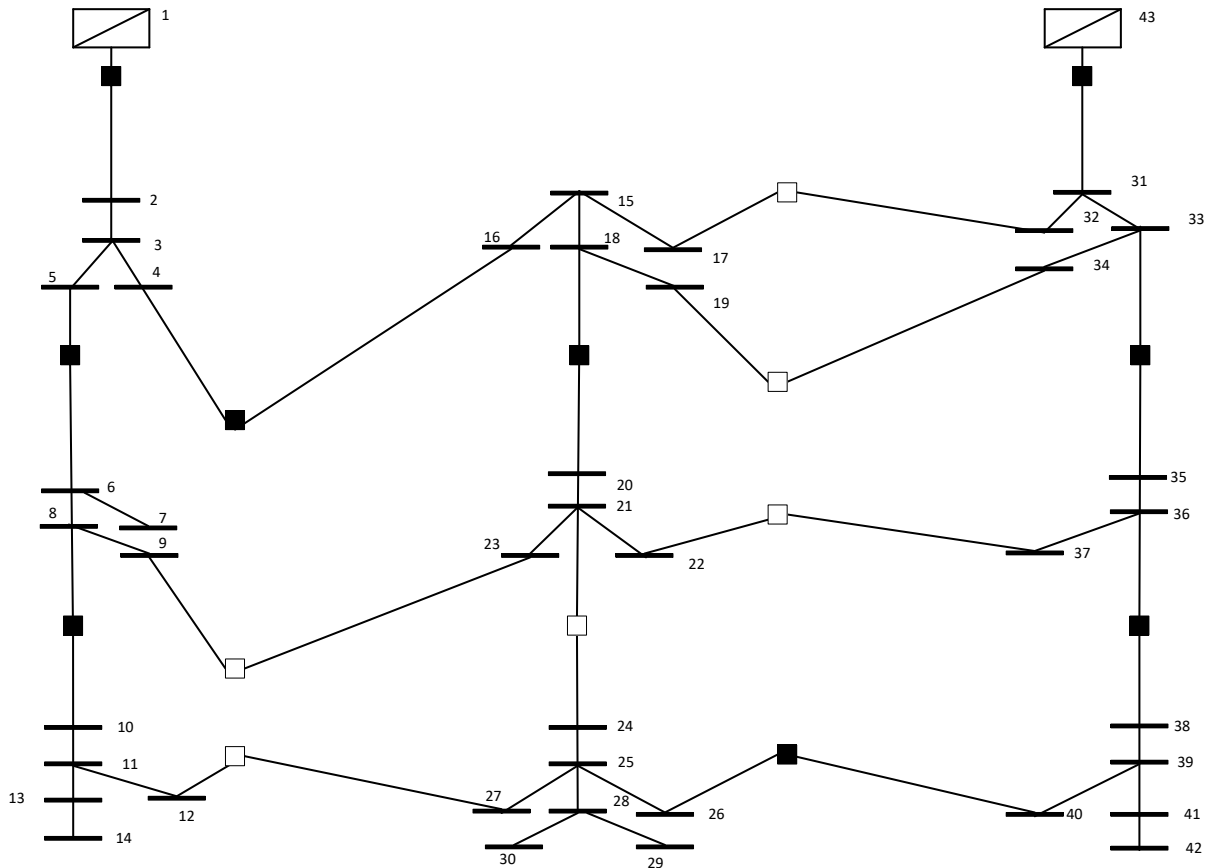
Πίνακας 5.11: Ποσοστό της μέγιστης ισχύος κάθε ΜΔΠ που διεισδύει στο δίκτυο για την τέταρτη δοκιμή συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Κόμβος	Μέγιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Ποσοστό Παραγωγής
14	0.30	100%
20	0.30	100%
29	0.20	100%
30	0.20	100%
42	0.30	100%
Σύνολο	1.30	

Πίνακας 5.12: Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της τέταρτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Ανοικτοί	Κλειστοί
9-23, 12-27, 17-32, 19-34, 21-24, 22-37	1-2, 5-6, 4-16, 8-10, 18-20, 26-40, 43-31, 33-35, 36-38

Όλες οι ΜΔΠ λειτουργούν στο μέγιστο (η μεταβλητή h κάθε μονάδας ισούται με 1) και προσφέρουν συνολικά στο δίκτυο 1.3 MW, κάτι που αναμενόταν από τη στιγμή που δόθηκε μεγάλο βάρος στην διείσδυση ΜΔΠ στη συγκεκριμένη δοκιμή. Η υπόλοιπη ζήτηση καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες των υποσταθμών στους κόμβους 1 και 43 ως εξής: $P_{S1} = 0.1$ MW και $P_{S43} = 0.2$ MW.



Σχήμα 5.5: Τοπολογία δικτύου 43 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της τέταρτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

- **Πέμπτη δοκιμή συντελεστών βαρών**

$$C_{lss} = 1000 \frac{\text{€}}{\text{kW}}, \quad C_{ENS} = 10 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}, \quad C_{SAIDI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{h}},$$

$$C_{SAIFI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{faults}}, \quad C_{DG} = 0.01 \text{ €}$$

Τα βάρη που επιλέγονται στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι κατάλληλα ώστε να μην δοθεί βάρος στη διείσδυση των ΜΔΠ στο δίκτυο. Για αυτό το λόγο μειώνεται αρκετά το C_{DG} και επιλέγονται τα υπόλοιπα βάρη όπως και στην πρώτη δοκιμή που έδινε ένα ισορροπημένο αποτέλεσμα.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.13. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.15. Το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6.

Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα πέμπτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
7	2.070	1.363	3315

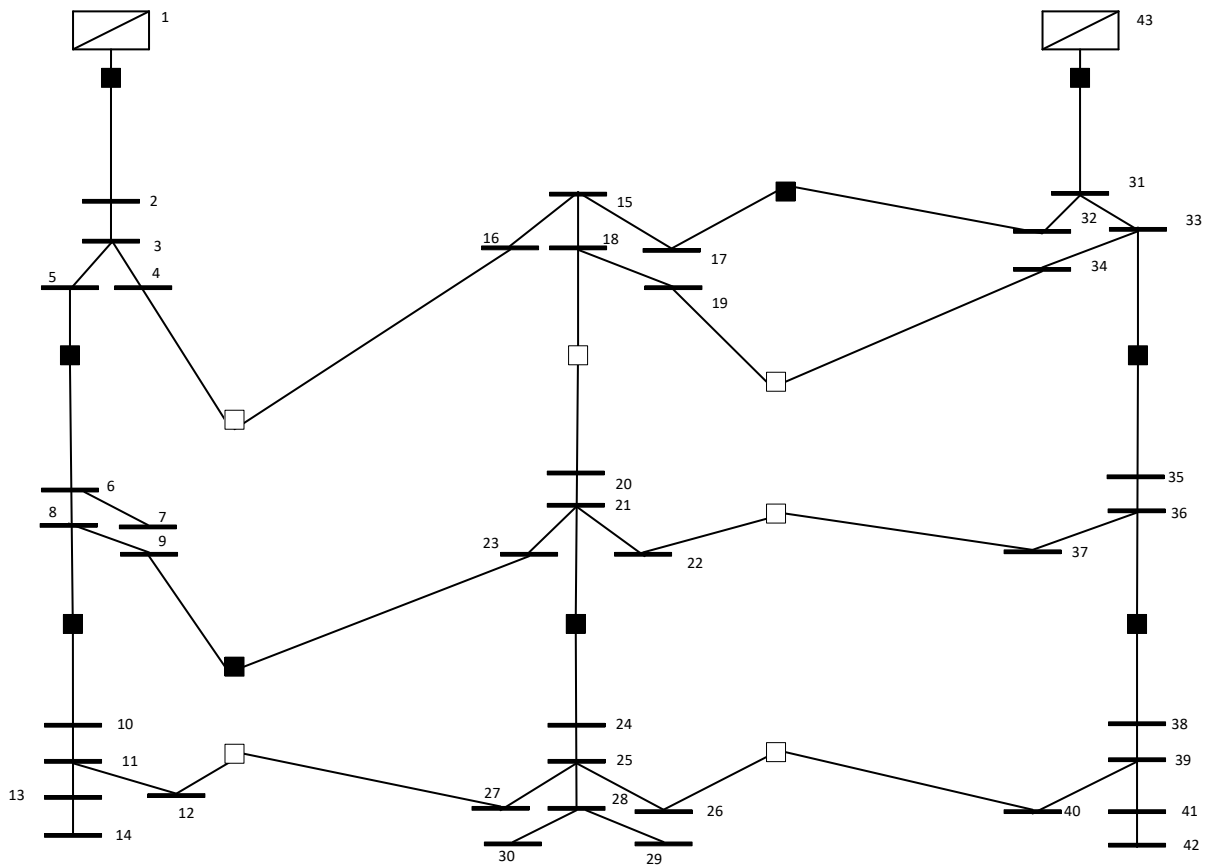
Στον Πίνακα 5.14 φαίνεται το ποσοστό παραγωγής κάθε ΜΔΠ στη δοκιμή αυτή.

Πίνακας 5.14: Ποσοστό της μέγιστης ισχύος κάθε ΜΔΠ που διεισδύει στο δίκτυο στην πέμπτη δοκιμή συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Κόμβος	Μέγιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Ποσοστό Παραγωγής
14	0.30	76.9%
20	0.30	68.3%
29	0.20	50.4%
30	0.20	50.4%
42	0.30	100%
Σύνολο	1.30	

Πίνακας 5.15: Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της πέμπτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Ανοικτοί	Κλειστοί
4-16, 12-27, 18-20, 19-34, 22-37, 26-40,	1-2, 5-6, 9-23, 8-10, 17-32, 21-24, 43-31, 33-35, 36-38



Σχήμα 5.6: Τοπολογία δικτύου 43 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της πέμπτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 43 κόμβων

Οι ΜΔΠ δεν λειτουργούν όλες στο μέγιστο και προσφέρουν συνολικά στο δίκτυο 0.94 MW, κάτι που αναμενόταν από τη στιγμή που μειώθηκε ο συντελεστής διείσδυσης ΜΔΠ στη συγκεκριμένη δοκιμή. Η υπόλοιπη ζήτηση καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες των υποσταθμών στους κόμβους 1 και 43 ως εξής: $P_{S1} = 0.16$ MW και $P_{S43} = 0.5$ MW.

Στον Πίνακα 5.16 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των πέντε σεναρίων της πρώτης περίπτωσης για το δίκτυο των 43 κόμβων.

Πίνακας 5.16: Συγκεντρωτικός πίνακας πρώτης περίπτωσης στο δίκτυο των 43 κόμβων

	Παράμετροι που ορίζουν το σενάριο						Αποτελέσματα του σεναρίου						
	C_{lss} (€/kW)	C_{ENS} (€/kWh/year)	C_{SAIDI} (€/h/year)	C_{SAIFI} (€/faults/year)	C_{DG} (€)	P_{DG} (MW)	Από λειες (kW)	ENS (kWh/ year)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/ year)	P_{DG} (MW)	h	Ps (MW)
1	1000	10	0.1	0.1	10	0.4	18	3435	2.164	1.400	0.4	1	1.2
2	10^5	0.1	0.001	0.001	10	0.4	17	3920	2.447	1.569	0.4	1	1.2
3	0.001	100	10	10	10	0.4	20	3315	2.070	1.363	0.4	1	1.2
4	1000	10	0.1	0.1	10^4	1.3	7	3460	2.162	1.344	1.3	1	0.3
5	1000	10	0.1	0.1	10^{-2}	1.3	7	3315	2.070	1.363	0.94	≠1	0.66

5.2.2 Μεταβολή της μέγιστης παραγωγής των ΜΔΠ του δικτύου

Πάλι κάποια μεγέθη θεωρούνται σταθερά στο πρόβλημα. Έπειτα από δοκιμές προέκυψε ότι μέγιστες τιμές των δεικτών SAIDI και SAIFI (που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4) θα έχουν τις ακόλουθες σταθερές τιμές : $\overline{SAIDI} = 2.55$ h/year και $\overline{SAIFI} = 1.75$ faults/year. Συνολικά, η ζήτηση του δικτύου για όλες τις περιπτώσεις είναι 1.6 MW. Επίσης, για όλες τις δοκιμές επιλέχθηκαν συγκεκριμένοι κόμβοι που θα έχουν εγκατασταθεί ΜΔΠ. Τέλος, σε όλες τις δοκιμές θεωρούνται:

$$C_{lss} = 1000 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}, \quad C_{ENS} = 10 \frac{\text{€}}{\text{kWh/year}}$$

$$C_{SAIDI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{h/year}}, \quad C_{SAIFI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{faults/year}}$$

που υπενθυμίζεται πως με τα βάρη αυτά προκύπτει μια ισορροπημένη περίπτωση με ταυτόχρονη βαρύτητα σε όλα τα κόστη. Μεταβάλλεται μόνο ο συντελεστής C_{DG} και η παραγωγή από τις ΜΔΠ.

- **Πρώτη δοκιμή μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ**

$$C_{DG} = 10 \text{ €} , \text{Μέγιστη Παραγωγή } DG = 0.8 \text{ MW}$$

Θεωρείται ότι η μέγιστη ισχύς που μπορούν να παράξουν οι ΜΔΠ είναι η μισή της ζήτησης του δικτύου.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.17. Στον Πίνακα 5.18 φαίνεται το ποσοστό παραγωγής κάθε ΜΔΠ στη δοκιμή αυτή. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.19. Το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7.

Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα πρώτης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 43 κόμβων

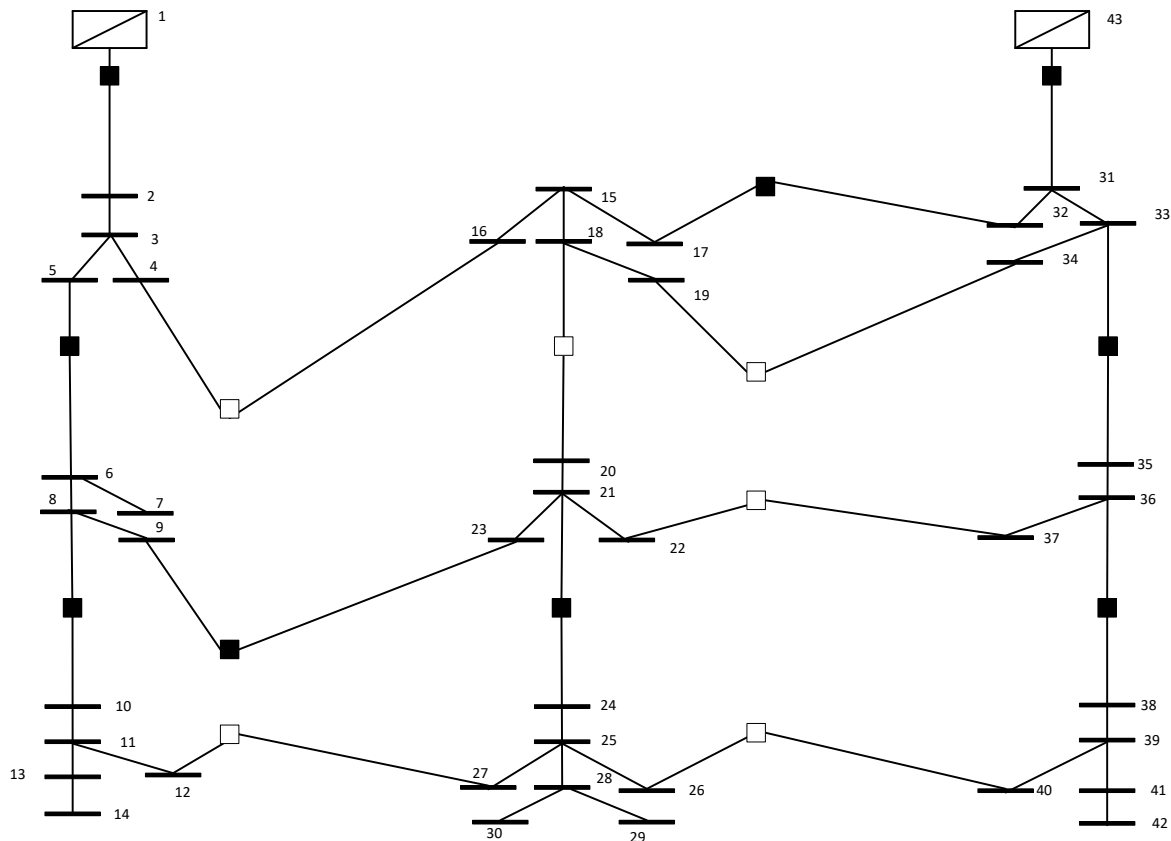
Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
10	2.070	1.363	3315

Πίνακας 5.18: Ποσοστό της μέγιστης ισχύος κάθε ΜΔΠ που διεισδύει στο δίκτυο στην πρώτη δοκιμή μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 43 κόμβων

Κόμβος	Μέγιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Ποσοστό Παραγωγής
14	0.20	100%
20	0.20	100%
29	0.10	100%
30	0.10	100%
42	0.20	100%
Σύνολο	0.80	

Πίνακας 5.19 : Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της πρώτης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 43 κόμβων

Ανοικτοί	Κλειστοί
4-16, 12-27, 18-20, 19-34, 22-37, 26-40,	1-2, 5-6, 9-23, 8-10, 17-32, 21-24, 43-31, 33-35, 36-38



Σχήμα 5.7: Τοπολογία δικτύου 43 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της πρώτης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 43 κόμβων

Συνεπώς όλες οι ΜΔΠ παράγουν το μέγιστο τους, δηλαδή συνολικά 0.8 MW. Η υπόλοιπη ζήτηση καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες του υποσταθμού στον κόμβο 1 και 43 ως εξής: $P_{S1} = 0.2 \text{ MW}$ και $P_{S43} = 0.6 \text{ MW}$.

- **Δεύτερη δοκιμή μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ**

$$C_{DG} = 10 \text{ € και } 10000 \text{ €}, \text{ Μέγιστη Παραγωγή } DG = 1.6 \text{ MW}$$

Στη δεύτερη δοκιμή θεωρείται ότι οι ΜΔΠ μπορούν να παράξουν έως και 1.6 MW, δηλαδή όσο και η ζήτηση. Επιλέγεται C_{DG} 10 € και 10000 € για να φανεί η επίδραση του συντελεστή βαρύτητας C_{DG} στα αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.20. Στον Πίνακα 5.21 φαίνεται το ποσοστό παραγωγής κάθε ΜΔΠ στη δοκιμή αυτή. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.22. Το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8 για $C_{DG} = 10 \text{ €}$ και στο Σχήμα 5.9 για $C_{DG} = 10000 \text{ €}$.

Πίνακας 5.20: Αποτελέσματα δεύτερης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 43 κόμβων ανάλογα την τιμή του C_{DG}

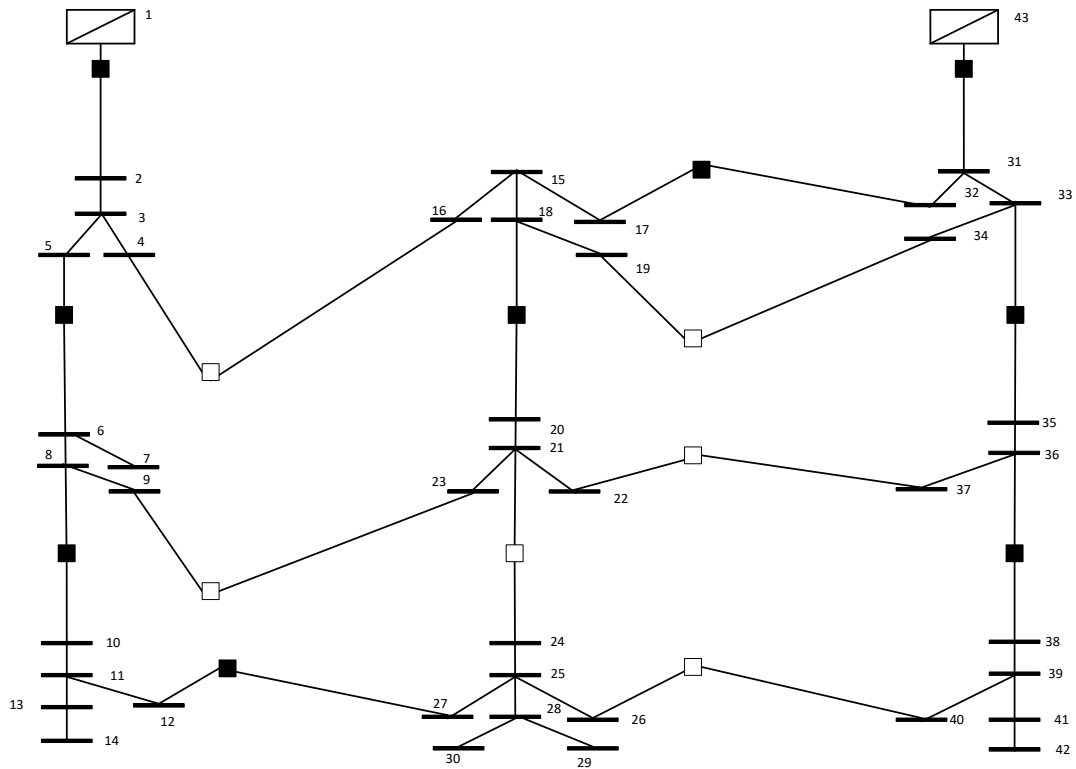
	Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
$C_{DG} = 10 \text{ €}$	6	2.117	1.381	3390
$C_{DG} = 10000 \text{ €}$	9	2.145	1.381	3435

Πίνακας 5.21: Ποσοστό της μέγιστης ισχύος κάθε ΜΔΠ που διεισδύει στο δίκτυο των 43 κόμβων στην δεύτερη δοκιμή μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ ανάλογα με τις τιμές του C_{DG}

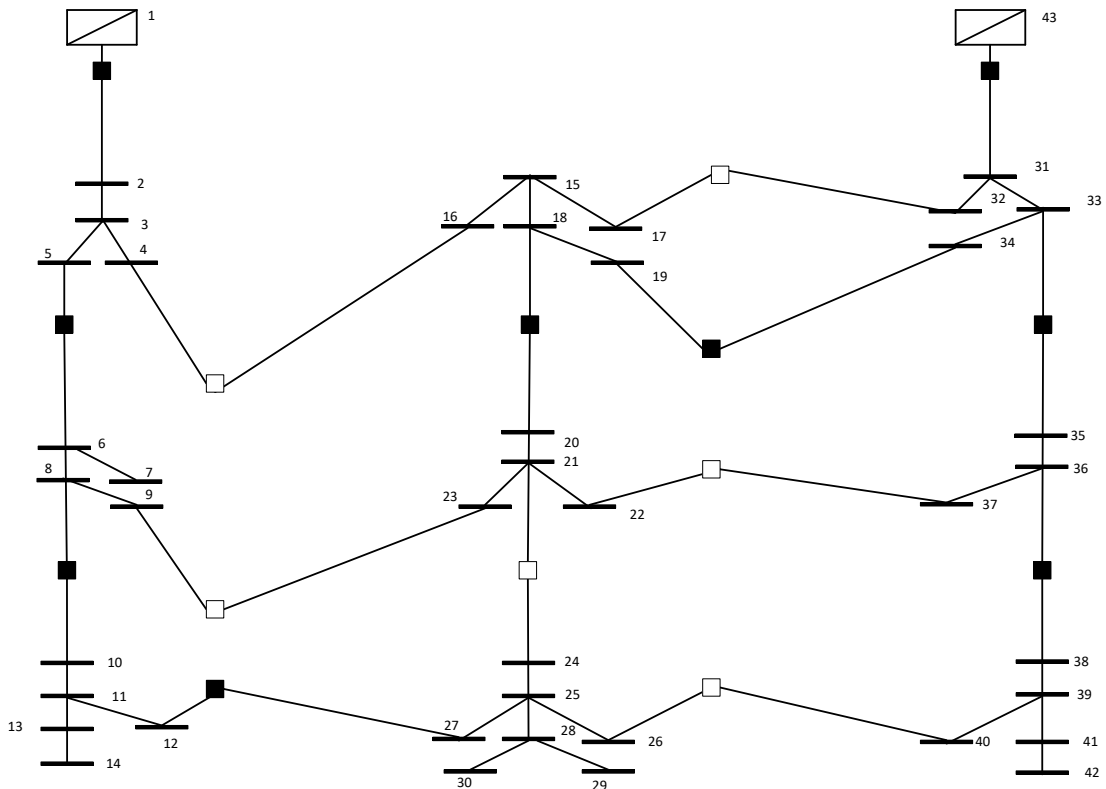
Κόμβος	Μέγιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Ποσοστό Παραγωγής ($C_{DG} = 10 \text{ €}$)	Ποσοστό Παραγωγής ($C_{DG} = 10000 \text{ €}$)
14	0.40	84.7%	75.6%
20	0.40	50%	100%
29	0.20	41.1%	100%
30	0.20	41.1%	100%
42	0.40	100%	100%
Σύνολο	1.60		

Πίνακας 5.22: Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της δεύτερης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 43 κόμβων ανάλογα με τις τιμές του C_{DG}

	Ανοικτοί	Κλειστοί
$C_{DG} = 10 \text{ €}$	4-16, 9-23, 19-34, 21-24, 22-37, 26-40	1-2, 5-6, 8-10, 12-27, 17-32, 18-20, 43-31, 33-35, 36-38
$C_{DG} = 10000 \text{ €}$	4-16, 9-23, 17-32, 21-24, 22-37, 26-40	1-2, 5-6, 8-10, 12-27, 18-20, 19-34, 43-31, 33-35, 36-38



Σχήμα 5.8: Τοπολογία δικτύου 43 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της δεύτερης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 43 κόμβων για $C_{DG} = 10 \text{ €}$



Σχήμα 5.9: Τοπολογία δικτύου 43 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της δεύτερης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 43 κόμβων για $C_{DG} = 10000 \text{ €}$

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ΜΔΠ παράγουν (σχεδόν) το μέγιστο τους όταν δοθεί βαρύτητα στην διείσδυση ΜΔΠ ($C_{DG} = 10000 \text{ €}$). Αυτό έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς το δίκτυο θα λειτουργούσε αποκλειστικά με τις ΜΔΠ και οι συμβατικές μονάδες των υποσταθμών δεν θα παράγουν τίποτα ($P_S = 0$). Από την άλλη, με $C_{DG} = 10 \text{ €}$ προκύπτει: $P_{DG} = 1.1 \text{ MW}$, $P_{S1} = 0.2 \text{ MW}$ και $P_{S43} = 0.3 \text{ MW}$. Ωστόσο προκύπτει ότι με λιγότερη βαρύτητα στις ΜΔΠ προκύπτει «καλύτερη» λύση από πλευράς απωλειών δικτύου και αξιοπιστίας. Οπότε, είναι προτιμότερο να υπάρχει παραγωγή από συμβατικές μονάδες και οι ΜΔΠ να παράγουν όσο χρειάζεται για να συμπληρώνουν τη ζήτηση με στόχο να μειώνουν τις απώλειες, να βελτιώνουν την αξιοπιστία και να διατηρούν τα μεγέθη του προβλήματος στα επιτρεπτά τους όρια.

- **Τρίτη δοκιμή μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ**

$$C_{DG} = 10 \text{ € και } 10000 \text{ €}, \text{ Μέγιστη Παραγωγή } DG = 2.5 \text{ MW}$$

Στη τρίτη δοκιμή θεωρείται ότι οι ΜΔΠ μπορούν να παράξουν έως και 2.5 MW, δηλαδή παραπάνω και από τη ζήτηση. Επιλέγεται $C_{DG} = 10 \text{ €}$ και 10000 € για να φανεί η επίδραση του συντελεστή βαρύτητας C_{DG} στα αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.23. Στον Πίνακα 5.24 φαίνεται το ποσοστό παραγωγής κάθε μονάδας ΜΔΠ στη δοκιμή αυτή. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.25. Το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10 για $C_{DG} = 10 \text{ €}$ και στο Σχήμα 5.11 για $C_{DG} = 10000 \text{ €}$.

Πίνακας 5.23 : Αποτελέσματα τρίτης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 43 κόμβων ανάλογα την τιμή του C_{DG}

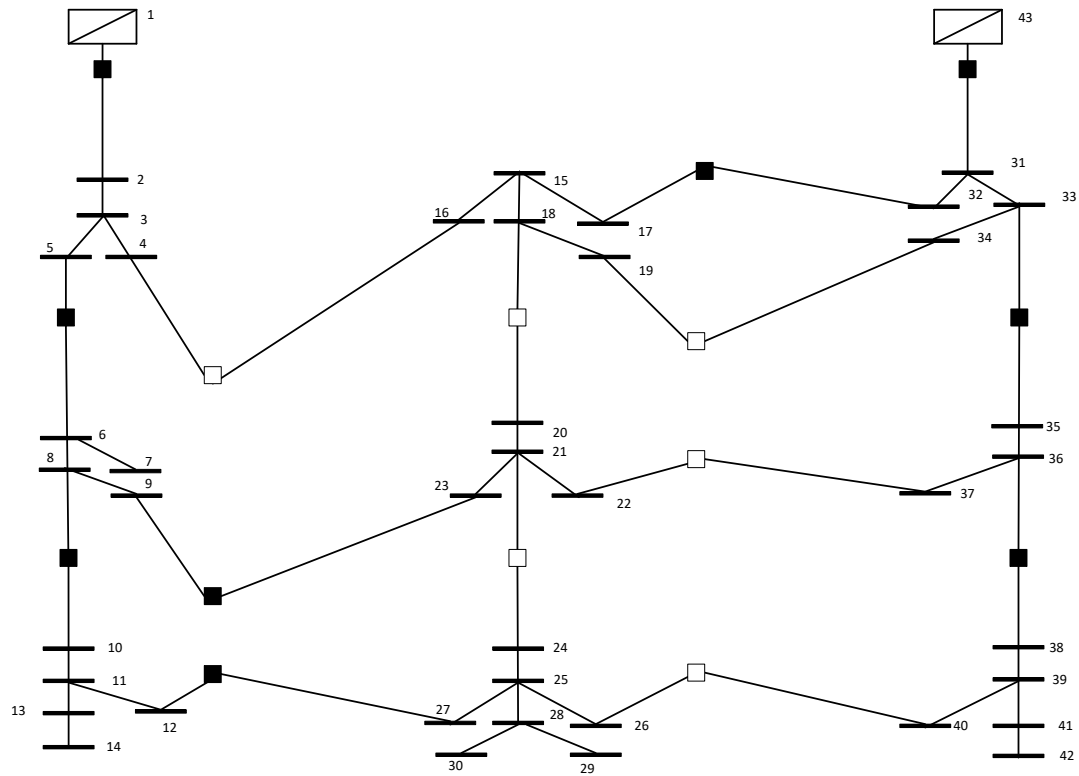
	Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
$C_{DG} = 10 \text{ €}$	6	2.144	1.363	3435
$C_{DG} = 10000 \text{ €}$	9	2.135	1.434	3415

Πίνακας 5.24: Ποσοστό της μέγιστης ισχύος κάθε ΜΔΠ που διεισδύει στο δίκτυο 43 κόμβων στην τρίτη δοκιμή μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ ανάλογα με τις τιμές του C_{DG}

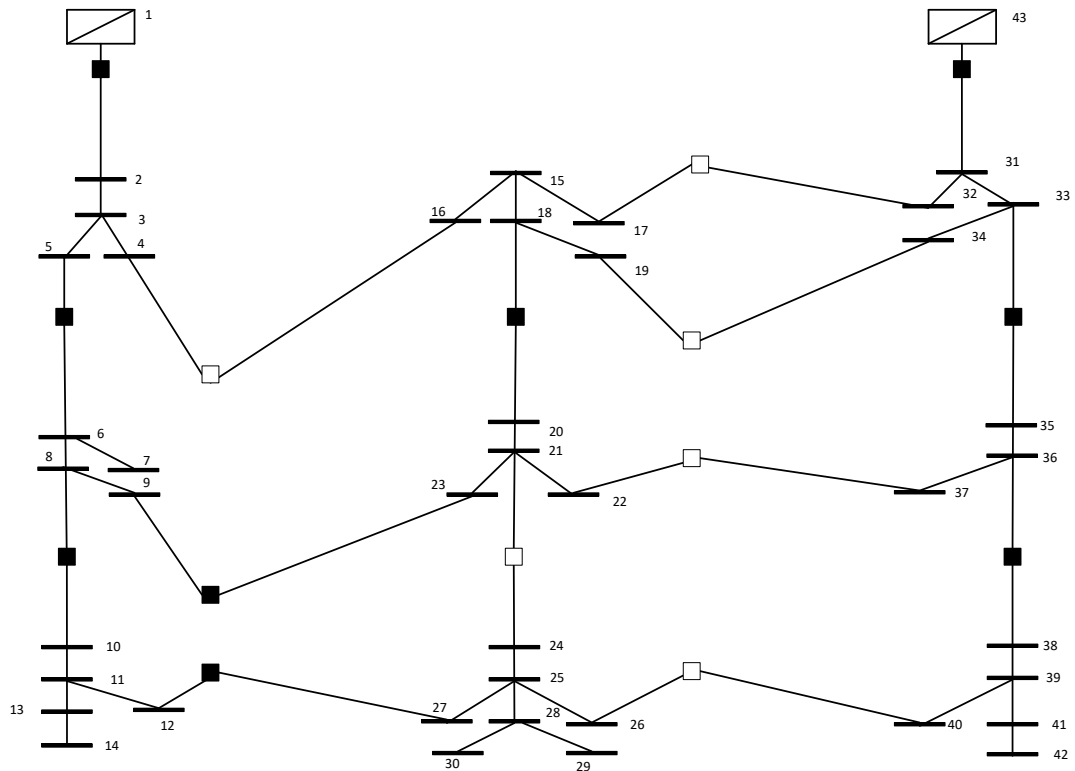
Κόμβος	Μέγιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Ποσοστό Παραγωγής ($C_{DG} = 10 \text{ €}$)	Ποσοστό Παραγωγής ($C_{DG} = 10000 \text{ €}$)
14	0.50	46.9%	54.8%
20	0.50	45.7%	74.6%
29	0.50	23.8%	25.5%
30	0.50	23.8%	25.5%
42	0.50	90.4%	100%
Σύνολο	2.50		

Πίνακας 5.25 : Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της τρίτης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 43 κόμβων ανάλογα με τις τιμές του C_{DG}

	Ανοικτοί	Κλειστοί
$C_{DG} = 10 \text{ €}$	4-16, 18-20, 19-34, 21-24, 22-37, 26-40	1-2, 5-6, 8-10, 9-23, 12-27, 17-32, 43-31, 33-35, 36-38
$C_{DG} = 10000 \text{ €}$	4-16, 17-32, 19-34, 21-24, 22-37, 26-40	1-2, 5-6, 8-10, 9-23, 12-27, 18-20, 43-31, 33-35, 36-38



Σχήμα 5.10 : Τοπολογία δικτύου 43 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της τρίτης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 43 κόμβων για $C_{DG} = 10 \text{ €}$



Σχήμα 5.11 : Τοπολογία δικτύου 43 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της τρίτης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 43 κόμβων για $C_{DG} = 10000 \text{ €}$

Αξιοσημείωτο είναι ότι όταν δοθεί βαρύτητα στην διείσδυση ΜΔΠ ($C_{DG} = 10000 \text{ €}$), το δίκτυο θα λειτουργούσε, όπως και πριν, αποκλειστικά με ΜΔΠ και οι συμβατικές μονάδες των υποσταθμών δεν παράγουν τίποτα ($P_S = 0$). Από την άλλη, με $C_{DG} = 10 \text{ €}$ προκύπτει: $P_{DG} = 1.15 \text{ MW}$, $P_{S1} = 0.1 \text{ MW}$ και $P_{S43} = 0.35 \text{ MW}$. Ωστόσο, με λιγότερη βαρύτητα στις ΜΔΠ προκύπτει «καλύτερη» λύση από πλευράς απωλειών δικτύου και αξιοπιστίας. Οπότε, είναι προτιμότερο να υπάρχει παραγωγή από συμβατικές μονάδες και οι ΜΔΠ να παράγουν όσο χρειάζεται για να συμπληρώνουν τη ζήτηση με στόχο να μειώνουν τις απώλειες, να βελτιώνουν την αξιοπιστία και να διατηρούν τα μεγέθη του προβλήματος στα επιτρεπτά τους όρια.

Στον Πίνακα 5.26 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των τριών σεναρίων της δεύτερης περίπτωσης για το δίκτυο των 43 κόμβων.

Πίνακας 5.26: Συγκεντρωτικός πίνακας δεύτερης περίπτωσης στο δίκτυο των 43 κόμβων

	Παράμετροι που ορίζουν το σενάριο						Αποτελέσματα του σεναρίου						
	C_{iss} (€/kW)	C_{ENS} (€/kWh/year)	C_{SAIDI} (€/h/year)	C_{SAIFI} (€/faults/year)	C_{DG} (€)	P_{DG} (MW)	Από λειες (kW)	ENS (kWh/ year)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/ year)	P_{DG} (MW)	h	P_S (MW)
1	1000	10	0.1	0.1	10	0.8	10	3315	2.070	1.363	0.8	1	0.8
2	1000	10	0.1	0.1	10	1.6	6	3390	2.117	1.381	1.1	≠1	0.5
					10^4		9	3435	2.145	1.381	≈1.6	≈1	→0
3	1000	10	0.1	0.1	10	2.5	6	3435	2.144	1.363	1.15	≠1	0.45
					10^4		9	3415	2.135	1.434	1.6	≠1	0

5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ 69 ΚΟΜΒΩΝ

Το ΔΔΗΕ των 69 κόμβων που εμφανίζεται στο Σχήμα 5.12 είναι ένα ακτινικό δίκτυο διανομής με 2 υποσταθμούς στους κόμβους Α και Β, 10 ζώνες φορτίων, 58 απλούς κλάδους (χωρίς διακόπτες) και 19 διακόπτες που ενώνουν τις ζώνες μεταξύ τους [10]. Οι ανοιχτοί διακόπτες συμβολίζονται με λευκό κουτί, ενώ οι κλειστοί διακόπτες με μαύρο κουτί. Το ΔΔΗΕ είναι ονομαστικής τάσης 11 kV, ενώ τα όρια των τάσεων στους κόμβους είναι $\pm 6\%$ της ονομαστικής. Τα δεδομένα των κόμβων, των γραμμών και των ζωνών του δικτύου παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 5.27α: Δεδομένα του δικτύου 69 κόμβων

Κλάδος		R (pu)	X (pu)	λ_{ij} (failure/year)	r_{ij} (h)
N2	N3	0.12091	0.11835	0.1	2
N3	N4	0.06041	0.05917	0.1	2
N4	N5	0.03025	0.02959	0.1	2
N5	N6	0.15107	0.14793	0.1	2
N6	N7	0.09066	0.08876	0.1	2
N7	N8	0.06041	0.05917	0.1	2
N8	N9	0.06041	0.05917	0.1	2
N10	N11	0.13388	0.09099	0.1	2
N11	N12	0.08926	0.06066	0.1	2
N12	N13	0.11157	0.07579	0.1	2
N13	N14	0.06694	0.04545	0.1	2
N14	N15	0.16066	0.10917	0.1	2
N7	N68	0.08926	0.06066	0.1	2
N68	N69	0.13388	0.09099	0.1	2
N16	N17	0.03025	0.02959	0.1	2
N17	N18	0.12091	0.11835	0.1	2
N18	N19	0.07554	0.07397	0.1	2
N19	N20	0.06645	0.06504	0.1	2
N20	N21	0.09364	0.09174	0.1	2
N21	N22	0.03926	0.03843	0.1	2
N23	N24	0.13388	0.09174	0.1	2
N24	N25	0.08926	0.06066	0.1	2
N25	N26	0.04463	0.03033	0.1	2
N26	N27	0.04463	0.03033	0.1	2
N27	N28	0.08926	0.06066	0.1	2
N28	N29	0.08926	0.06066	0.1	2
N30	N31	0.06041	0.05917	0.1	2
N31	N32	0.06041	0.05917	0.1	2
N32	N33	0.06645	0.06504	0.1	2
N33	N34	0.09669	0.09463	0.1	2
N34	N35	0.06347	0.06215	0.1	2
N35	N36	0.06041	0.05917	0.1	2
N36	N37	0.09066	0.08876	0.1	2
N37	N38	0.12091	0.11835	0.1	2
N39	N40	0.04463	0.03033	0.1	2
N40	N41	0.08926	0.06066	0.1	2
N41	N42	0.15174	0.10314	0.1	2
N42	N43	0.10711	0.07281	0.1	2
N40	N44	0.09818	0.06669	0.1	2
N44	N45	0.04463	0.03033	0.1	2
N42	N46	0.08926	0.06066	0.1	2
N47	N48	0.08926	0.06066	0.1	2
N48	N49	0.08926	0.06066	0.1	2
N49	N50	0.08926	0.06066	0.1	2
N51	N52	0.12091	0.11835	0.1	2
N52	N53	0.12091	0.11835	0.1	2
N53	N54	0.07554	0.07397	0.1	2
N54	N55	0.09066	0.08876	0.1	2
N55	N56	0.09066	0.08876	0.1	2

Πίνακας 5.27α: Δεδομένα του δικτύου 69 κόμβων (συνέχεια)

N57	N58	0.02231	0.01512	0.1	2
N58	N59	0.06694	0.04545	0.1	2
N59	N60	0.10711	0.07281	0.1	2
N61	N62	0.09818	0.06669	0.1	2
N62	N63	0.06694	0.04545	0.1	2
N63	N64	0.13388	0.09099	0.1	2
N62	N65	0.08926	0.06066	0.1	2
N65	N66	0.04463	0.03033	0.1	2
N66	N67	0.08926	0.06066	0.1	2
NA	N2	0.09066	0.08876		
NA	N10	0.09066	0.08876		
NA	N16	0.09066	0.08876		
NA	N23	0.09066	0.08876		
N21	N27	0.18298	0.12438		
N29	N64	0.03149	0.02021		
N22	N67	0.03149	0.02021		
N15	N67	0.03752	0.03000		
N9	N15	0.03752	0.03000		
N9	N50	0.05628	0.04500		
N61	N55	0.03752	0.03000		
N52	N59	0.02231	0.01512		
N45	N60	0.02099	0.01678		
N38	N43	0.02099	0.01678		
N35	N47	0.02099	0.01678		
N51	NB	0.03025	0.02959		
N57	NB	0.03025	0.02959		
N39	NB	0.03025	0.02959		
N30	NB	0.03025	0.02959		

Στον Πίνακα 5.27α απεικονίζονται η ωμική και η επαγωγική αντίσταση κάθε κλάδου του δικτύου, καθώς επίσης το ποσοστό σφάλματος και ο χρόνος αποκατάστασης του κάθε κλάδου.

Πίνακας 5.27β : Δεδομένα του δικτύου 69 κόμβων

Κόμβος	P_L (MW)	Q_L (MW)	N_j	z_k
NA	0	0		11
N2	0.096	0.086	1	1
N3	0.058	0.038	1	1
N4	0.144	0.125	1	1
N5	0.072	0.048	1	1
N6	0.017	0.010	1	1
N7	0.017	0.014	1	1
N8	0.012	0.010	1	1
N9	0.015	0.010	100	1
N10	0.019	0.010	1	2
N11	0.015	0.009	1	2
N12	0.048	0.038	1	2

Πίνακας 5.27β : Δεδομένα του δικτύου 69 κόμβων (συνέχεια)

N13	0.101	0.086	1	2
N14	0.024	0.014	1	2
N15	0.038	0.024	100	2
N68	0.096	0.058	1	1
N69	0.000	0.000	100	1
N16	0.058	0.029	1	3
N17	0.038	0.024	1	3
N18	0.014	0.009	1	3
N19	0.012	0.007	100	3
N20	0.029	0.019	1	3
N21	0.086	0.048	1	3
N22	0.048	0.029	1	3
N23	0.029	0.019	100	4
N24	0.096	0.077	1	4
N25	0.077	0.062	1	4
N26	0.096	0.058	100	4
N27	0.096	0.053	1	4
N28	0.115	0.067	1	4
N29	0.101	0.067	1	4
N30	0.077	0.048	1	9
N31	0.058	0.038	100	9
N32	0.012	0.008	1	9
N33	0.015	0.009	100	9
N34	0.048	0.029	1	9
N35	0.038	0.027	1	9
N36	0.058	0.038	1	9
N37	0.038	0.029	1	9
N38	0.029	0.024	100	9
N39	0.044	0.024	100	8
N40	0.058	0.034	1	8
N41	0.115	0.067	1	8
N42	0.086	0.058	1	8
N43	0.017	0.010	1	8
N44	0.015	0.010	1	8
N45	0.096	0.048	100	8
N46	0.000	0.000	1	8
N47	0.086	0.067	1	10
N48	0.000	0.000	1	10
N49	0.096	0.067	100	10
N50	0.265	0.086	1	10
N51	0.048	0.038	1	6
N52	0.019	0.011	1	6
N53	0.038	0.029	100	6
N54	0.030	0.023	1	6
N55	0.029	0.019	1	6
N56	0.000	0.000	1	6
N57	0.077	0.048	1	7
N58	0.230	0.115	100	7
N59	0.120	0.106	1	7
N60	0.024	0.010	1	7
N61	0.010	0.005	1	5

Πίνακας 5.27β : Δεδομένα του δικτύου 69 κόμβων (συνέχεια)

N62	0.135	0.125	1	5
N63	0.048	0.029	100	5
N64	0.000	0.000	1	5
N65	0.125	0.115	1	5
N66	0.144	0.125	1	5
N67	0.000	0.000	1	5
NB	0	0		12

Στον Πίνακα 5.27β απεικονίζονται η κατανάλωση ενεργού και αέργου ισχύος κάθε κόμβου, καθώς επίσης σε ποια ζώνη ανήκει ο κάθε κόμβος και πόσοι καταναλωτές είναι συνδεδεμένοι σε αυτόν.

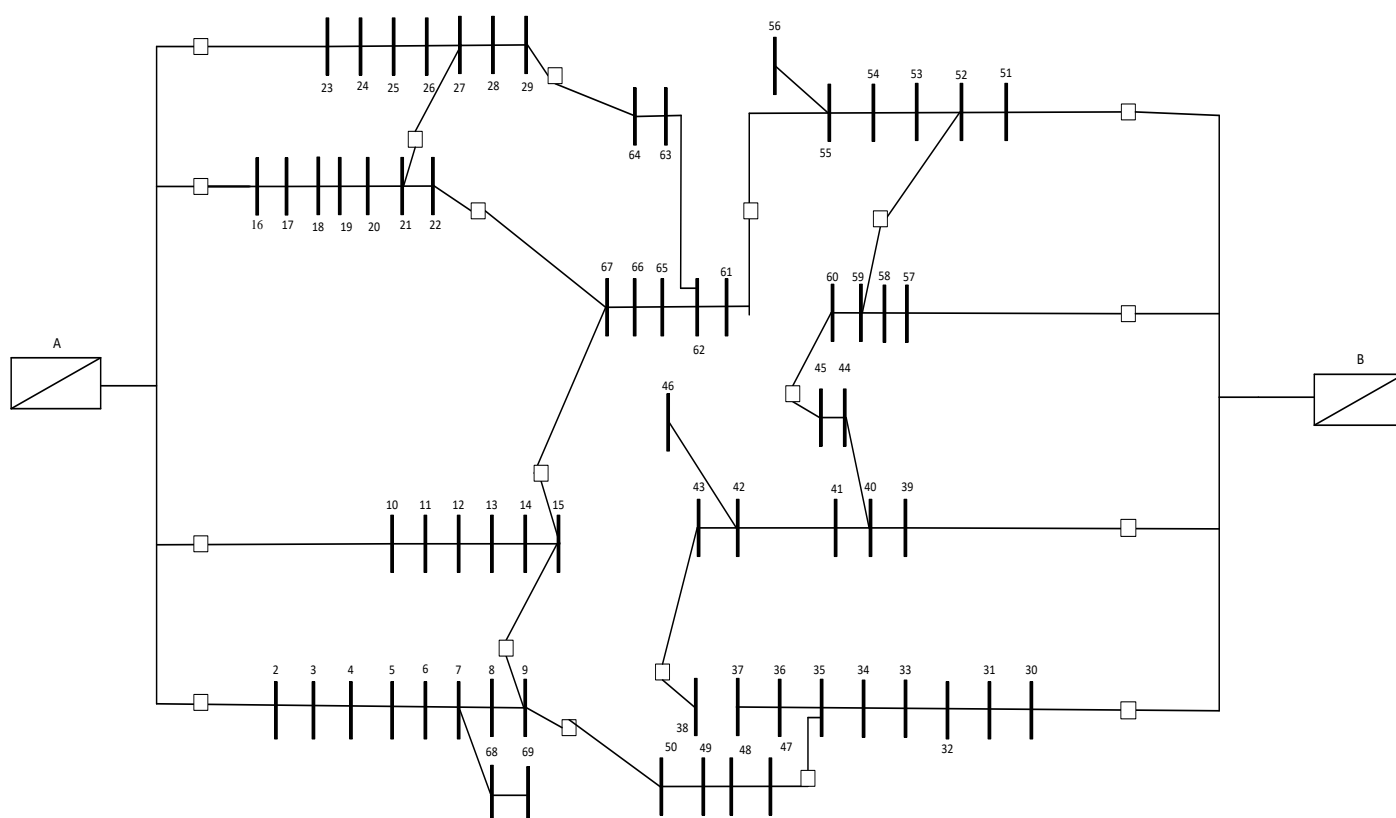
Πίνακας 5.27γ : Δεδομένα του δικτύου 69 κόμβων

Z _{ζώνη}	λ_z (failures/year)	r_z (h)
Z ₁	0.9	2
Z ₂	0.5	2
Z ₃	0.6	2
Z ₄	0.6	2
Z ₅	0.6	2
Z ₆	0.5	2
Z ₇	0.3	2
Z ₈	0.7	2
Z ₉	0.8	2
Z ₁₀	0.3	2

Στον Πίνακα 5.27γ παρουσιάζονται τα στοιχεία αξιοπιστίας για κάθε ζώνη του δικτύου.

Η αρχική τοπολογία του δικτύου απεικονίζεται στο Σχήμα 5.12. Ανάλογα με τις δοκιμές θα γίνουν θα παρουσιαστεί η μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου και όλων των υπόλοιπων στοιχείων του. Όπως και στο δίκτυο 43 κόμβων οι δοκιμές θα χωριστούν στις δύο παρακάτω περιπτώσεις:

- Στην πρώτη περίπτωση, μεταβάλλονται τα βάρη της αντικειμενικής συνάρτησης, ανάλογα με το κριτήριο που δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα.
- Στη δεύτερη περίπτωση, μεταβάλλεται η μέγιστη παραγωγή των ΜΔΠ που διεισδύουν στο ΔΔΗΕ.



Σχήμα 5.12 : Αρχική τοπολογία δικτύου 69 κόμβων

5.3.1 Μεταβολή των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης

Αρχικά θεωρούνται κάποια μεγέθη σταθερά στο πρόβλημα. Έπειτα από αρκετές δοκιμές προέκυψε ότι μέγιστες τιμές των δεικτών SAIDI και SAIFI (που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4) θα έχουν τις ακόλουθες σταθερές τιμές : $\overline{\text{SAIDI}} = 2.85 \text{ h/year}$ και $\overline{\text{SAIFI}} = 3.25 \text{ faults/year}$. Συνολικά, η ζήτηση του δικτύου για όλες τις περιπτώσεις είναι 4 MW. Επίσης, για όλες τις δοκιμές επιλέχθηκαν συγκεκριμένοι κόμβοι που θα έχουν εγκατασταθεί ΜΔΠ με σταθερή μέγιστη παραγωγή που φαίνεται στον Πίνακα 5.28.

Πίνακας 5.28 : Μέγιστη παραγωγή και θέση ΜΔΠ στο δίκτυο 69 κόμβων

Κόμβος	Μέγιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)
46	0.30
48	0.30
56	0.30
64	0.30
67	0.30
69	0.30
Σύνολο	1.80

- *Πρώτη δοκιμή συντελεστών βαρών*

$$C_{lss} = 100 \frac{\text{€}}{\text{kW}}, \quad C_{ENS} = 10 \frac{\text{€}}{\frac{\text{kWh}}{\text{year}}}, \quad C_{SAIDI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\frac{\text{h}}{\text{year}}},$$

$$C_{SAIFI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\frac{\text{faults}}{\text{year}}}, \quad C_{DG} = 10 \text{ €}$$

Τα βάρη που επιλέγονται στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι κατάλληλα ώστε να προκύψει μια ισορροπημένη λύση χωρίς να δίνεται βαρύτητα σε κάποιο κριτήριο. Λαμβάνονται ισοδύναμα υπόψη οι απώλειες, η αξιοπιστία και η διεύθυνση ΜΔΠ. Ο τρόπος επιλογής των συντελεστών έχει στόχο την ίδιας τάξης μεγέθους συνεισφορά κάθε όρου στην αντικειμενική συνάρτηση. Για να επιτευχθεί αυτή η ίδιας τάξης μεγέθους συνεισφορά, προτιμήθηκαν οι παραπάνω συντελεστές.

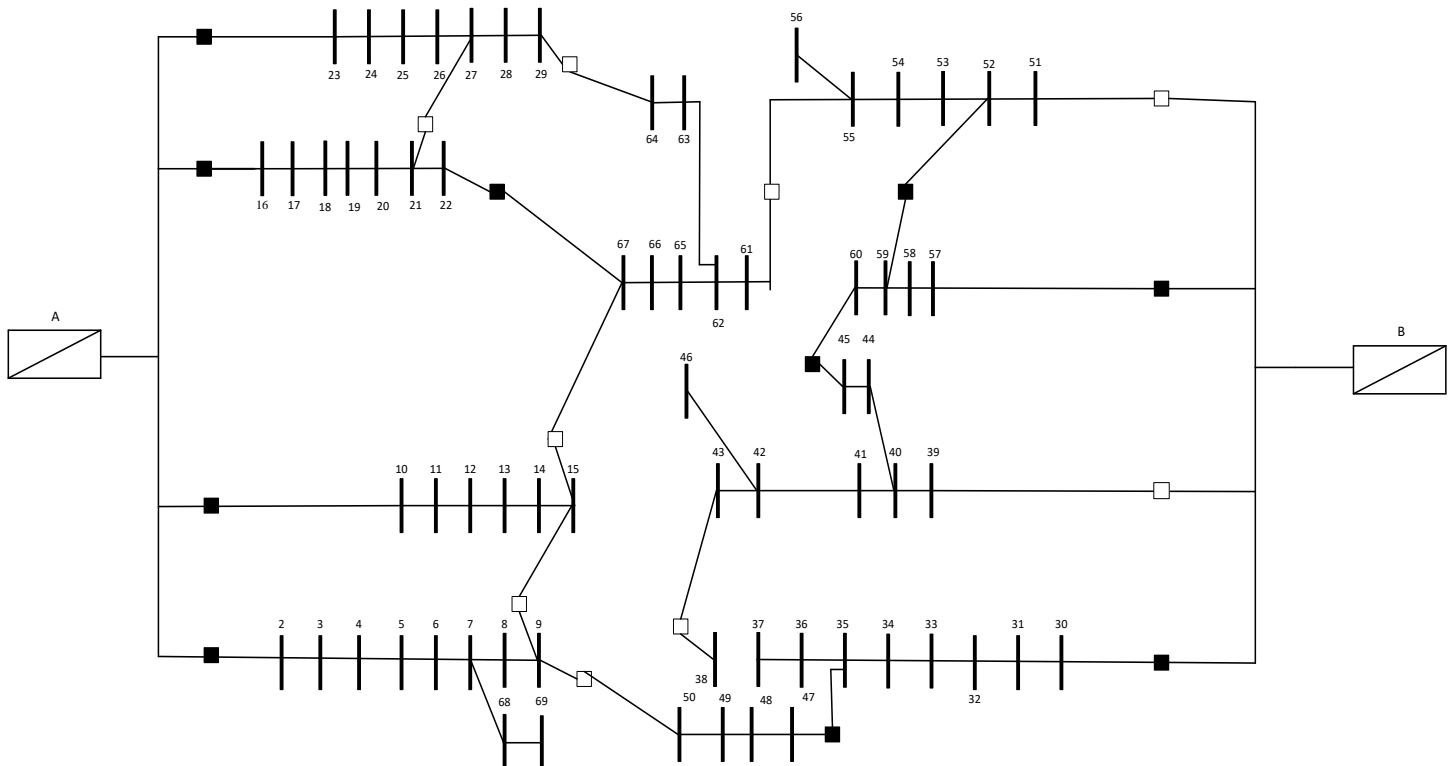
Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.29. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση απεικονίζεται στον Πίνακα 5.30 και το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.13.

Πίνακας 5.29 : Αποτελέσματα πρώτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
60	2.635	2.882	1150

Πίνακας 5.30 : Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της πρώτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Ανοικτοί	Κλειστοί
9-15, 9-50, 15-67, 21-27, 29-64, 38-43, 39-70, 51-B, 55-61	A-2, A-10, A-16, A-23, 22-67, 30-B, 35-47, 45-60, 52-59, 57-B,



Σχήμα 5.13 : Τοπολογία δικτύου 69 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της πρώτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Όλες οι ΜΔΠ λειτουργούν στο μέγιστο (η μεταβλητή h κάθε μονάδας ισούται με 1) και προσδίδουν συνολικά στο δίκτυο 1.8 MW. Η υπόλοιπη ζήτηση καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες των υποσταθμών στους κόμβους A και B ως εξής: $P_{SA} = 1.2$ MW και $P_{SB} = 1.0$ MW.

- Δεύτερη δοκιμή συντελεστών βαρών

$$C_{LSS} = 10000 \frac{\text{€}}{\text{kW}}, \quad C_{ENS} = 0.1 \frac{\text{€}}{\frac{\text{kWh}}{\text{year}}}, \quad C_{SAIDI} = 0.001 \frac{\text{€}}{\frac{\text{h}}{\text{year}}},$$

$$C_{SAIFI} = 0.001 \frac{\text{€}}{\frac{\text{faults}}{\text{year}}}, \quad C_{DG} = 10 \text{ €}$$

Τα βάρη που επιλέγονται στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι κατάλληλα ώστε να δοθεί ιδιαίτερο βάρος στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του ΔΔΗΕ. Για αυτό το λόγο αυξάνεται κατάλληλα το C_{LSS} και μειώνονται τα υπόλοιπα βάρη. Το C_{DG} διατηρείται σταθερό με πριν.

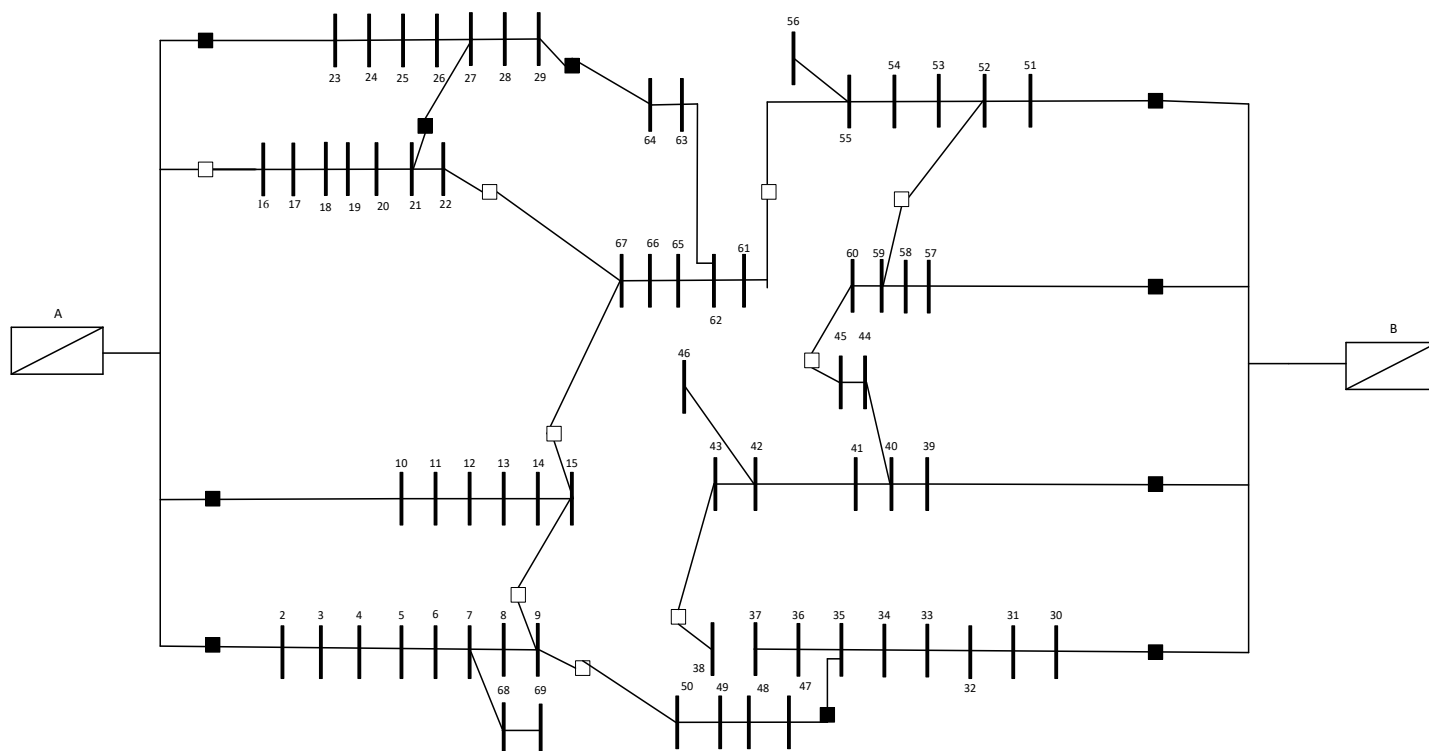
Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.31. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.32 και το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.14.

Πίνακας 5.31 : Αποτελέσματα δεύτερης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
30	2.645	2.882	1163

Πίνακας 5.32 : Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της δεύτερης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Ανοικτοί	Κλειστοί
A-16, 9-15, 9-50, 15-67, 22-67, 38-43, 45-60, 52-59, 55-61	A-2, A-10, A-23, 21-27, 29-64, 30-B, 35-47, 39-B, 51-B, 57-B,



Σχήμα 5.14 : Τοπολογία δικτύου 69 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της δεύτερης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Όλες οι ΜΔΠ λειτουργούν στο μέγιστο (η μεταβλητή h κάθε μονάδας ισούται με 1) και προσδίδουν συνολικά στο δίκτυο 1.8 MW. Η υπόλοιπη ζήτηση καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες των υποσταθμών στους κόμβους A και B ως εξής: $P_{SA} = 1.2$ MW και $P_{SB} = 1.0$ MW. Συνεπώς, οι απώλειες του ΔΔΗΕ μειώθηκαν σε σχέση με πριν, ενώ οι δείκτες αξιοπιστίας χειροτέρεψαν. Είναι, επομένως, η βέλτιστη λύση από πλευράς απωλειών του δικτύου, κάτι που αναμενόταν.

- **Τρίτη δοκιμή συντελεστών βαρών**

$$C_{LSS} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{kW}}, \quad C_{ENS} = 10 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}, \quad C_{SAIDI} = 100 \frac{\text{€}}{\text{h}},$$

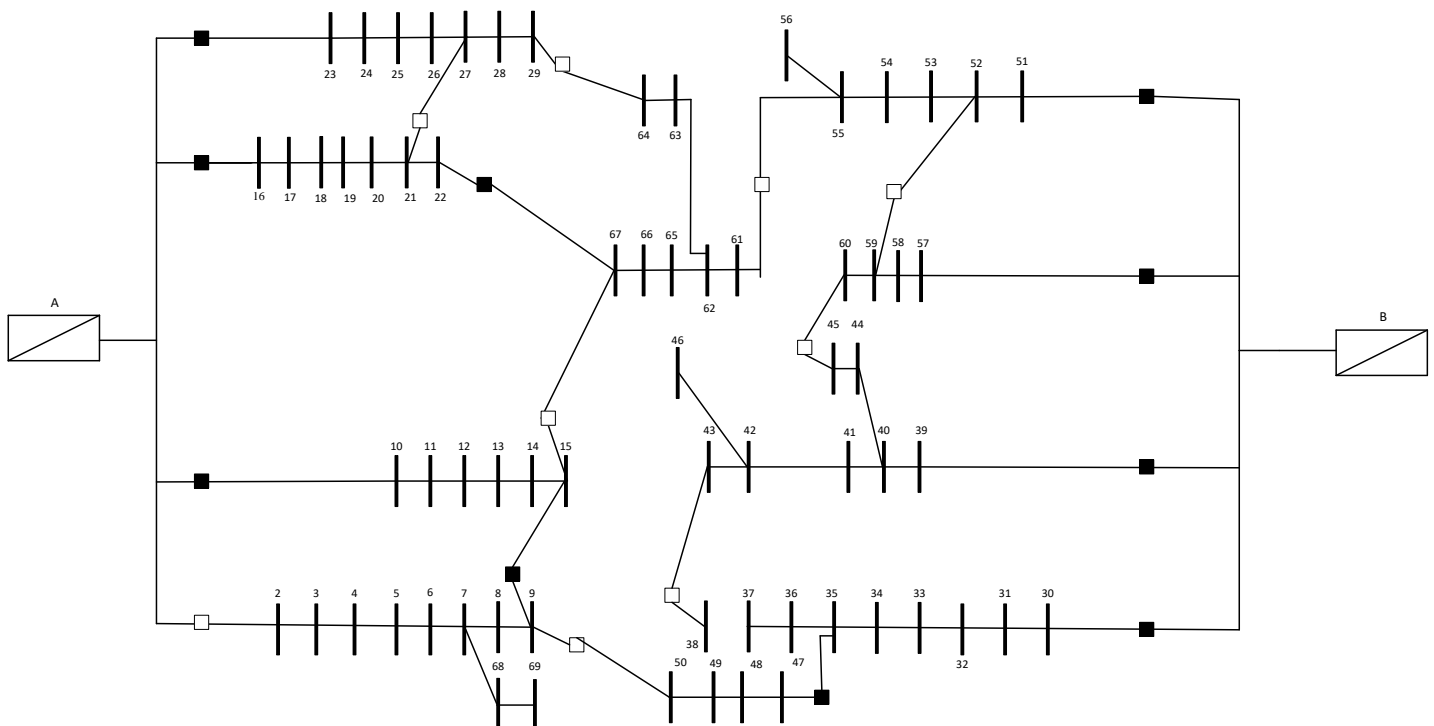
$$C_{SAIFI} = 100 \frac{\text{€}}{\text{faults}}, \quad C_{DG} = 10 \text{ €}$$

Τα βάρη που επιλέγονται στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι κατάλληλα ώστε να δοθεί ιδιαίτερο βάρος στην αξιοπιστία του ΔΔΗΕ. Για αυτό το λόγο αυξάνονται κατάλληλα τα C_{SAIDI} , C_{SAIFI} , C_{ENS} και μειώνεται ο συντελεστής των απωλειών C_{LSS} . Το C_{DG} διατηρείται σταθερό με πριν.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.33. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.34 και το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.15.

Πίνακας 5.33 : Αποτελέσματα τρίτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
80	2.470	2.568	1074



Σχήμα 5.15 : Τοπολογία δικτύου 69 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της τρίτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Πίνακας 5.34 : Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της τρίτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Ανοικτοί	Κλειστοί
A-2, 9-50, 15-67, 21-27, 29-64, 38-43, 45-60, 52-59, 55-61	A-10, A-16, A-23, 9-15, 22-67, 30-B, 35-47, 39-B, 51-B, 57-B,

Όλες οι ΜΔΠ λειτουργούν στο μέγιστο (η μεταβλητή h κάθε μονάδας ισούται με 1) και προσδίδουν συνολικά στο δίκτυο 1.8 MW. Η υπόλοιπη ζήτηση καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες των υποσταθμών στους κόμβους Α και Β ως εξής: $P_{S1} = 1.25$ MW και $P_{S43} = 0.95$ MW.

Συνεπώς, οι απώλειες του δικτύου αυξήθηκαν σε σχέση με πριν, ενώ οι δείκτες αξιοπιστίας βελτιώθηκαν, δηλαδή μειώθηκε ο μέσος όρος σφάλματος (SAIFI), η μέση διάρκεια σφάλματος (SAIDI) και η μη τροφοδοτούμενη ενέργεια (ENS). Είναι, επομένως, η καλύτερη λύση από πλευράς αξιοπιστίας του δικτύου, κάτι που αναμενόταν.

- **Τέταρτη δοκιμή συντελεστών βαρών**

$$C_{lss} = 100 \frac{\text{€}}{\text{kW}}, \quad C_{ENS} = 10 \frac{\text{€}}{\frac{\text{kWh}}{\text{year}}}, \quad C_{SAIDI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\frac{\text{h}}{\text{year}}},$$

$$C_{SAIFI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\frac{\text{faults}}{\text{year}}}, \quad C_{DG} = 10000 \text{ €}$$

Τα βάρη που επιλέγονται στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι κατάλληλα ώστε να δοθεί ιδιαίτερο βάρος στην διείσδυση των ΜΔΠ στο ΔΔΗΕ. Για αυτό το λόγο αυξάνεται κατάλληλα το C_{DG} και επιλέγονται τα υπόλοιπα βάρη όπως και στην πρώτη δοκιμή που έδινε ένα ισορροπημένο αποτέλεσμα.

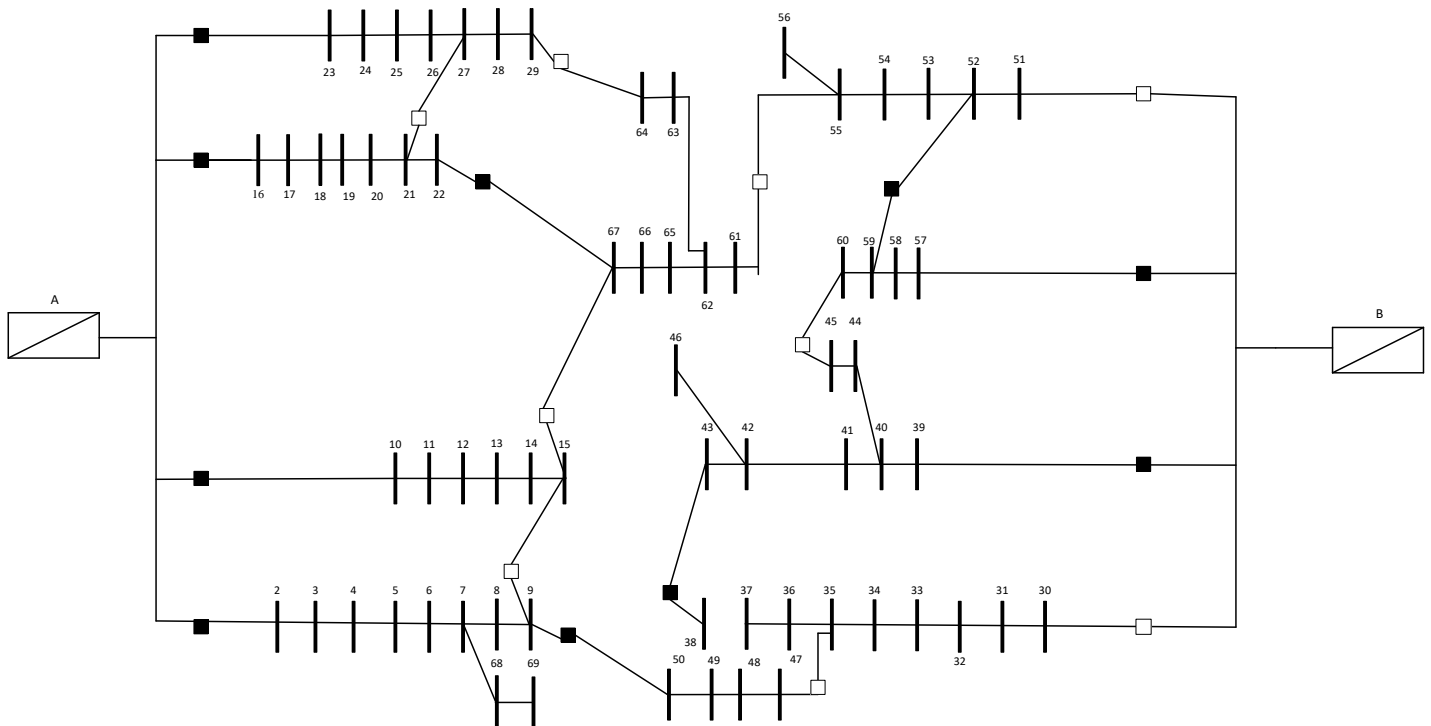
Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.35. Για τις δοκιμές 4 και 5, μεταβλήθηκε η μέγιστη παραγωγή των ΜΔΠ, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 5.36. Επίσης, στον πίνακα αυτόν φαίνεται και το ποσοστό παραγωγής κάθε ΜΔΠ στη δοκιμή αυτή. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.37. Το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16.

Πίνακας 5.35 : Αποτελέσματα τέταρτης δοκιμής συντελεστών βαρών
στο δίκτυο των 69 κόμβων

Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
100	2.944	2.822	1175

Πίνακας 5.36 : Ποσοστό της μέγιστης ισχύος κάθε ΜΔΠ που διεισδύει στο δίκτυο για την τέταρτη δοκιμή συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Κόμβος	Μέγιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Ποσοστό Παραγωγής
46	1.0	100%
48	0.50	100%
56	0.50	100%
64	0.50	100%
67	0.50	100%
69	0.50	100%
Σύνολο	3.50	



Σχήμα 5.16 : Τοπολογία δικτύου 69 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της τέταρτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Πίνακας 5.37 : Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της τέταρτης δοκιμής συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Ανοικτοί	Κλειστοί
9-15, 15-67, 21-27, 29-64, 30-B, 35-47, 45-60, 51-B, 55-61	A-2, A-10, A-16, A-23, 9-50, 22-67, 38-43, 39-B, 52-59, 57-B,

Όλες οι ΜΔΠ λειτουργούν στο μέγιστο (η μεταβλητή h κάθε μονάδας ισούται με 1) και προσδίδουν συνολικά στο δίκτυο 3.5 MW, κάτι που αναμενόταν από τη στιγμή που δόθηκε μεγάλο βάρος στην διείσδυση ΜΔΠ στη συγκεκριμένη δοκιμή. Ο υποσταθμός Α παράγει $P_{SA} = 0.67$ MW, ενώ ο Β δεν παράγει καθόλου. Συνεπώς, παρατηρείται πλεόνασμα 0.17 MW, τα οποία θα μπορούσαν να αποθηκευτούν σε περίπτωση που το δίκτυο διέθετε συσσωρευτές (storage systems).

- **Πέμπτη δοκιμή συντελεστών βαρών**

$$C_{LSS} = 100 \frac{\text{€}}{\text{kW}}, \quad C_{ENS} = 10 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}, \quad C_{SAIDI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{h}},$$

$$C_{SAIFI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{faults/year}}, \quad C_{DG} = 0.01 \text{ €}$$

Τα βάρη που επιλέγονται στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι κατάλληλα ώστε να μη δοθεί ιδιαίτερο βάρος στην διείσδυση των ΜΔΠ στο δίκτυο. Για αυτό το λόγο μειώνεται αρκετά το C_{DG} και επιλέγονται τα υπόλοιπα βάρη όπως και στην πρώτη δοκιμή που έδινε ένα ισορροπημένο αποτέλεσμα.

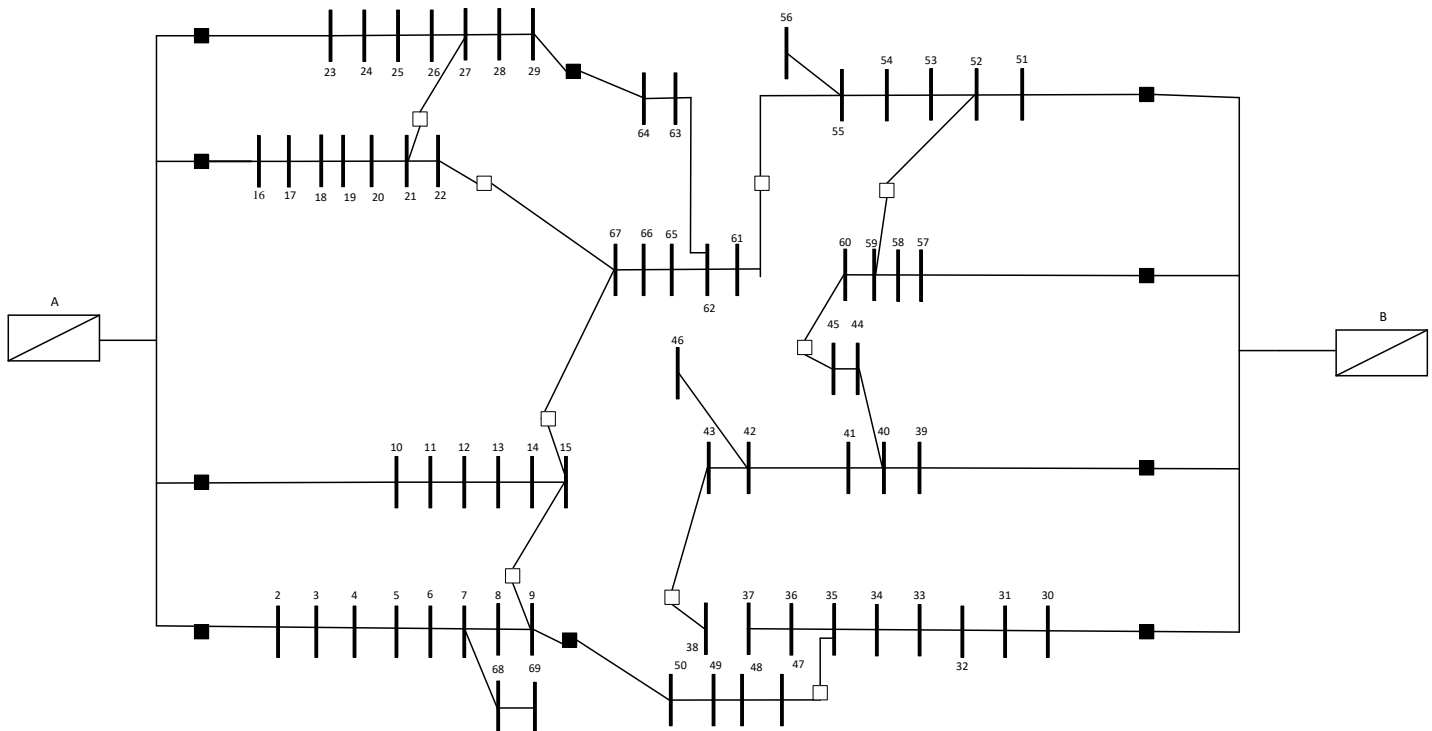
Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.38. Στον Πίνακα 5.39 φαίνεται το ποσοστό παραγωγής κάθε ΜΔΠ στη δοκιμή αυτή. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.40. Το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.17.

Πίνακας 5.39 : Ποσοστό της μέγιστης ισχύος κάθε ΜΔΠ που διεισδύει στο δίκτυο για την πέμπτη δοκιμή συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Κόμβος	Μέγιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Ποσοστό Παραγωγής
46	1.0	16.5%
48	0.50	36.5%
56	0.50	11.8%
64	0.50	97.5%
67	0.50	92.6%
69	0.50	84.3%
Σύνολο	3.50	

Πίνακας 5.38 : Αποτελέσματα πέμπτης δοκιμής συντελεστών βαρών
στο δίκτυο των 69 κόμβων

Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
30	2.584	2.663	1071



Σχήμα 5.17 : Τοπολογία δικτύου 69 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της πέμπτης δοκιμής
συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Πίνακας 5.40 : Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της πέμπτης δοκιμής
συντελεστών βαρών στο δίκτυο των 69 κόμβων

Ανοικτοί	Κλειστοί
9-15, 15-67, 21-27, 22-67, 35-47, 38-43, 45-60, 52-59, 55-61	A-2, A-10, A-16, A-23, 9-50, 29-64, 30-B, 39-B, 51-B, 57-B,

Οι ΜΔΠ δεν λειτουργούν όλες στο μέγιστο και προσδίδουν συνολικά στο δίκτυο 1.78 MW, κάτι που αναμενόταν από τη στιγμή που μειώθηκε πολύ ο συντελεστής διείσδυσης ΜΔΠ στη συγκεκριμένη δοκιμή. Η υπόλοιπη ζήτηση καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες των υποσταθμών στους κόμβους 1 και 43 ως εξής: $P_{S1} = 1.10 \text{ MW}$ και $P_{S43} = 1.12 \text{ MW}$.

Στον Πίνακα 5.41 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των πέντε σεναρίων της πρώτης περίπτωσης για το δίκτυο των 69 κόμβων.

Πίνακας 5.41 : Συγκεντρωτικός πίνακας πρώτης περίπτωσης στο δίκτυο των 69 κόμβων

	Παράμετροι που ορίζουν το σενάριο						Αποτελέσματα του σεναρίου						
	C_{lss} (€/kW)	C_{ENS} (€/kWh /year)	C_{SAIDI} (€/h/ year)	C_{SAIFI} (€/faults /year)	C_{DG} (€)	P_{DG} (MW)	Από λειες (kW)	ENS (kWh/ year)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/ year)	P_{DG} (MW)	h	P_s (MW)
1	100	10	0.1	0.1	10	1.80	60	1150	2.635	2.882	1.80	1	2.20
2	10^4	0.1	0.001	0.001	10	1.80	30	1163	2.645	2.882	1.80	1	2.20
3	0.1	10	100	100	10	1.80	80	1074	2.470	2.568	1.80	1	2.20
4	100	10	0.1	0.1	10^4	3.50	100	1175	2.944	2.822	3.50	1	0.67 >0.50
5	100	10	0.1	0.1	10^{-2}	3.50	30	1071	2.584	2.663	1.78	≠1	2.22

5.3.2 Μεταβολή της μέγιστης παραγωγής των ΜΔΠ του δικτύου

Θεωρούνται πάλι κάποια μεγέθη σταθερά στο πρόβλημα. Έπειτα από αρκετές δοκιμές προέκυψε ότι μέγιστες τιμές των δεικτών SAIDI και SAIFI (που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4) θα έχουν τις ακόλουθες σταθερές τιμές : $\overline{SAIDI} = 2.85$ h/year και $\overline{SAIFI} = 3.25$ faults/year. Συνολικά η ζήτηση του δικτύου για όλες τις περιπτώσεις είναι 4 MW. Επίσης, για όλες τις δοκιμές επιλέχθηκαν συγκεκριμένοι κόμβοι που θα έχουν εγκατασταθεί ΜΔΠ. Τέλος, σε όλες τις δοκιμές θεωρούνται:

$$C_{lss} = 100 \frac{\text{€}}{\text{kW}}, C_{ENS} = 10 \frac{\text{€}}{\text{kWh/year}},$$

$$C_{SAIDI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{h/year}}, C_{SAIFI} = 0.1 \frac{\text{€}}{\text{faults/year}}$$

που υπενθυμίζεται πως με τα βάρη αυτά προκύπτει μια ισορροπημένη περίπτωση με ταυτόχρονη βαρύτητα σε όλα τα κόστη. Μεταβάλλεται μόνο ο συντελεστής C_{DG} και η παραγωγή από τις ΜΔΠ.

- **Πρώτη δοκιμή μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ**

$$C_{DG} = 10 \text{ €} , \text{Μέγιστη Παραγωγή } DG = 2 \text{ MW}$$

Θεωρείται ότι η μέγιστη ισχύς που μπορούν να παράξουν οι ΜΔΠ είναι η μισή της ζήτησης του δικτύου.

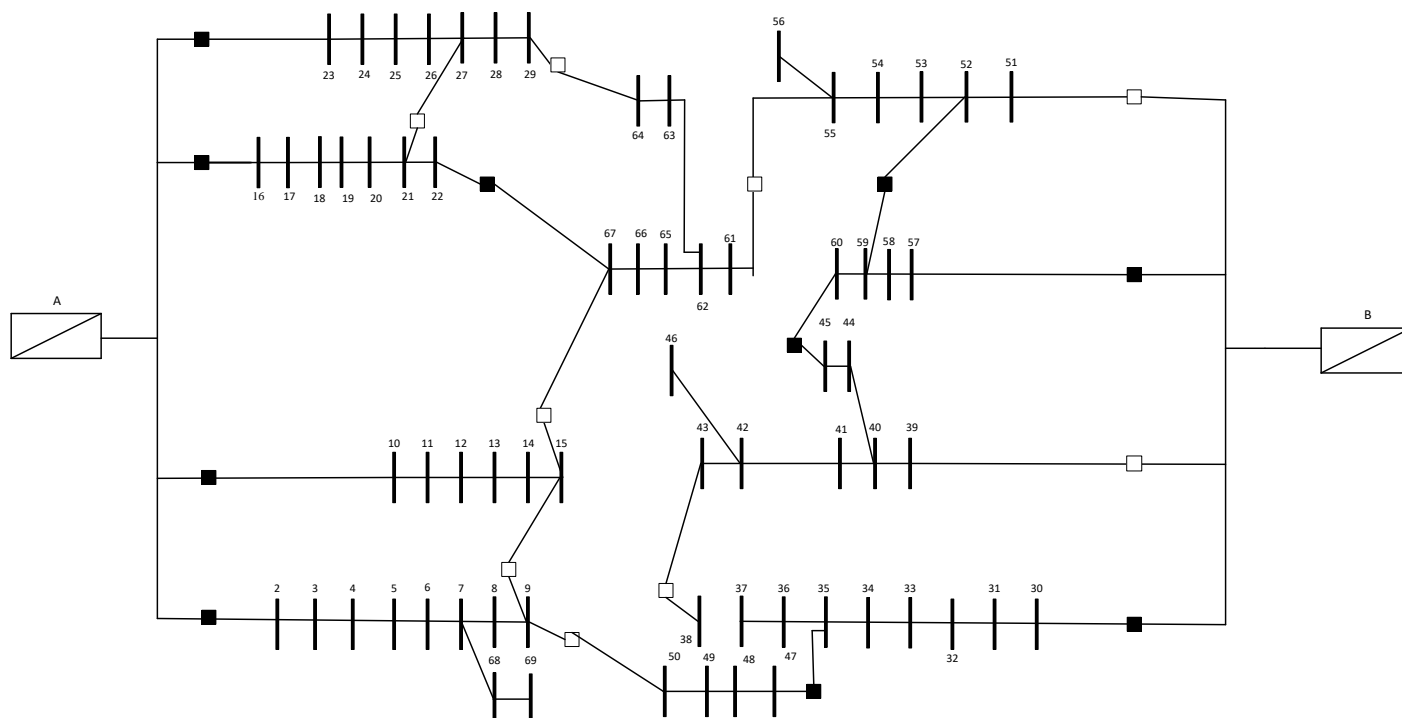
Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.42. Στον Πίνακα 5.43 φαίνεται το ποσοστό παραγωγής κάθε ΜΔΠ στη δοκιμή αυτή. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.44. Το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.18.

Πίνακας 5.42 : Αποτελέσματα πρώτης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ
στο δίκτυο των 69 κόμβων

Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
60	2.635	2.882	1150

Πίνακας 5.43 : Ποσοστό της μέγιστης ισχύος κάθε ΜΔΠ που διεισδύει στο δίκτυο για την
πρώτη δοκιμή μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 κόμβων

Κόμβος	Μέγιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Ποσοστό Παραγωγής
46	0.40	100%
48	0.30	100%
56	0.30	100%
64	0.30	100%
67	0.40	100%
69	0.30	100%
Σύνολο	2.0	



Σχήμα 5.18 : Τοπολογία δικτύου 69 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της πρώτης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 κόμβων

Πίνακας 5.44 : Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της πρώτης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 κόμβων

Ανοικτοί	Κλειστοί
9-15, 9-50, 15-67, 21-27, 29-64, 38-43, 39-70, 51-B, 55-61	A-2, A-10, A-16, A-23, 22-67, 30-B, 35-47, 45-60, 52-59, 57-B,

Συνεπώς όλες οι ΜΔΠ παράγουν το μέγιστο τους, δηλαδή συνολικά 2 MW. Η υπόλοιπη ζήτηση καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες του υποσταθμού στον κόμβο A και B ως εξής: $P_{SA} = 1.1 \text{ MW}$ και $P_{SB} = 0.9 \text{ MW}$.

- **Δεύτερη δοκιμή μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ**

$$C_{DG} = 10 \text{ € και } C_{DG} = 10000 \text{ € , Μέγιστη Παραγωγή } DG = 4 \text{ MW}$$

Στη δεύτερη δοκιμή θεωρείται ότι οι ΜΔΠ μπορούν να παράξουν έως και 4 MW, δηλαδή όσο και η ζήτηση. Επιλέγεται C_{DG} 10 € και 10000 € για να φανεί η επίδραση του C_{DG} στα αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.45. Στον Πίνακα 5.46 φαίνεται το ποσοστό παραγωγής κάθε ΜΔΠ στη δοκιμή αυτή. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.47. Το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.19 για $C_{DG} = 10 \text{ €}$ και στο Σχήμα 5.20 για $C_{DG} = 10000 \text{ €}$.

Πίνακας 5.45 : Αποτελέσματα δεύτερης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 κόμβων ανάλογα την τιμή του C_{DG}

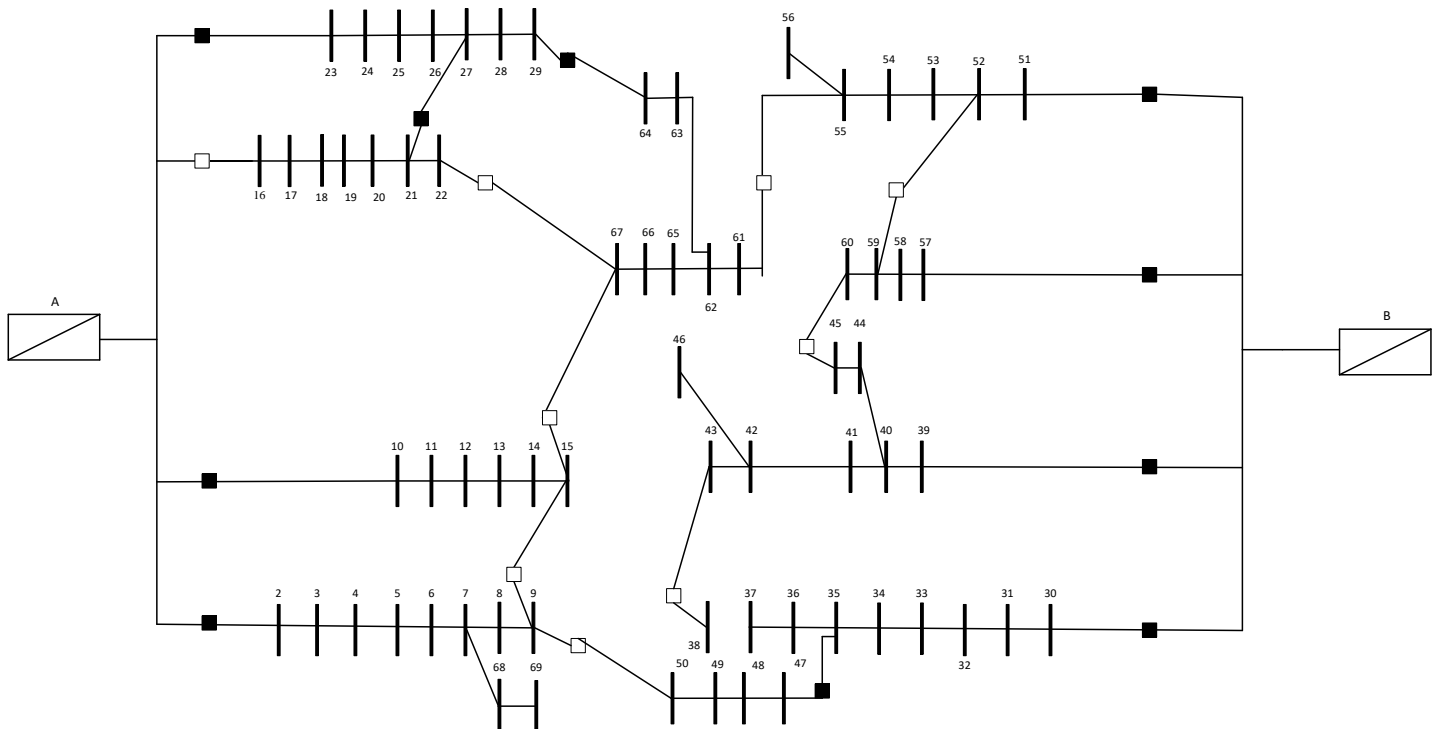
	Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
$C_{DG} = 10 \text{ €}$	30	2.645	2.882	1150
$C_{DG} = 10000 \text{ €}$	90	2.840	2.944	1166

Πίνακας 5.46 : Ποσοστό της μέγιστης ισχύος κάθε ΜΔΠ που διεισδύει στο δίκτυο των 69 κόμβων στη δεύτερη δοκιμή μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ ανάλογα με τις τιμές του C_{DG}

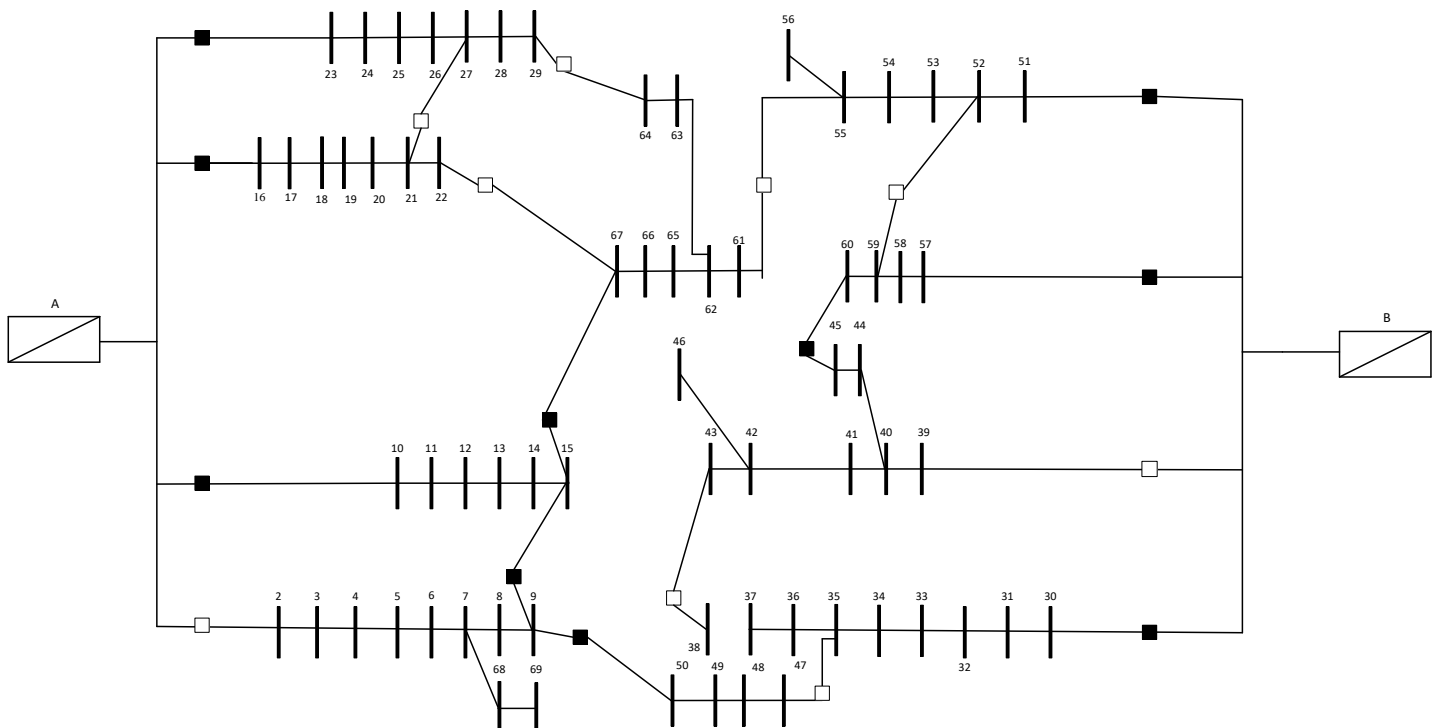
Κόμβος	Μέγιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Ποσοστό Παραγωγής ($C_{DG} = 10 \text{ €}$)	Ποσοστό Παραγωγής ($C_{DG} = 10000 \text{ €}$)
46	0.80	100%	100%
48	0.60	99.2%	100%
56	0.60	100%	100%
64	0.60	100%	100%
67	0.80	100%	100%
69	0.60	76.5%	100%
Σύνολο	4.0		

Πίνακας 5.47 : Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της δεύτερης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 κόμβων ανάλογα με τις τιμές του C_{DG}

	Ανοικτοί	Κλειστοί
$C_{DG} = 10 \text{ €}$	A-16, 9-15, 9-50, 15-67, 22-67, 38-43, 45-60, 52-59, 55-61	A-2, A-10, A-23, 21-27, 29-64, 30-B, 35-47, 39-B, 51-B, 57-B,
$C_{DG} = 10000 \text{ €}$	A-2, 21-27, 22-67, 29-64, 35-47, 38-43, 39-B, 52-59, 55-61	A-10, A-16, A-23, 9-15, 9-50, 15-67, 45-60, 30-B, 51-B, 57-B,



Σχήμα 5.19 : Τοπολογία δικτύου 69 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της δεύτερης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 κόμβων για $C_{DG} = 10 \text{ €}$.



Σχήμα 5.20 : Τοπολογία δικτύου 69 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της δεύτερης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 κόμβων για $C_{DG} = 10000 \text{ €}$

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ΜΔΠ παράγουν το μέγιστο τους όταν δοθεί βαρύτητα στην διείσδυση ΜΔΠ ($C_{DG} = 10000 \text{ €}$). Αυτό έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς το δίκτυο θα λειτουργούσε αποκλειστικά με τις ΜΔΠ και οι συμβατικές μονάδες των υποσταθμών δεν παράγουν τίποτα ($P_S = 0$). Από την άλλη, με $C_{DG} = 10$ προκύπτει : $P_{DG} = 3.85 \text{ MW}$, $P_{SA} = 0.15 \text{ MW}$ και $P_{SB} = 0 \text{ MW}$. Ωστόσο προκύπτει ότι με λιγότερη βαρύτητα στις ΜΔΠ προκύπτει «καλύτερη» λύση από πλευράς απωλειών δικτύου και αξιοπιστίας. Οπότε, είναι προτιμότερο να υπάρχει παραγωγή από συμβατικές μονάδες και οι ΜΔΠ να παράγουν όσο χρειάζεται για να συμπληρώνουν τη ζήτηση με στόχο να μειώνουν τις απώλειες, να βελτιώνουν την αξιοπιστία και να διατηρούν τα μεγέθη του προβλήματος στα επιτρεπτά τους όρια.

- **Τρίτη δοκιμή μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ**

$C_{DG} = 10 \text{ €}$ και $C_{DG} = 10000 \text{ €}$, Μέγιστη Παραγωγή ΑΠΕ = 8 MW

Στη τρίτη δοκιμή θεωρείται ότι οι ΜΔΠ μπορούν να παράξουν έως και 8 MW, δηλαδή παραπάνω και από τη ζήτηση. Επιλέγεται $C_{DG} 10 \text{ €}$ και 10000 € για να φανεί η επίδραση του C_{DG} στα αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 5.48. Στον Πίνακα 5.49 φαίνεται το ποσοστό παραγωγής κάθε ΜΔΠ στη δοκιμή αυτή. Η κατάσταση των διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση συνοψίζεται στον Πίνακα 5.50. Το δίκτυο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21 για $C_{DG} = 10 \text{ €}$ και $C_{DG} = 10000 \text{ €}$.

Πίνακας 5.48 : Αποτελέσματα της τρίτης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 κόμβων ανάλογα την τιμή του C_{DG}

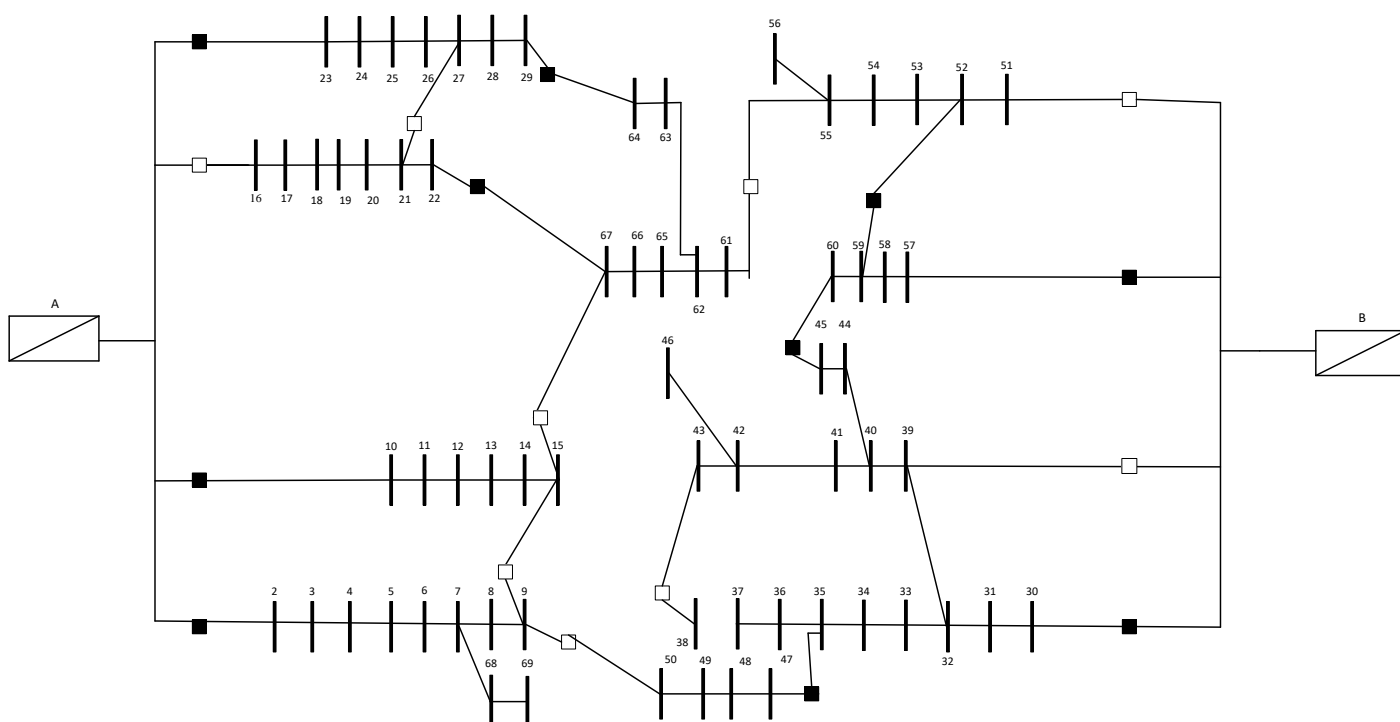
	Απώλειες (kW)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/year)	ENS (kWh/year)
$C_{DG} = 10 \text{ €}$	60	2.757	2.882	1112
$C_{DG} = 10000 \text{ €}$	60	2.757	2.882	1112

Πίνακας 5.50 : Κατάσταση διακοπών μετά την επαναδιαμόρφωση της τρίτης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 κόμβων

	Ανοικτοί	Κλειστοί
$C_{DG} = 10 \text{ €}$ και $C_{DG} = 10000 \text{ €}$	A-16, 9-15, 9-50, 15-67, 21-27, 38-43, 39-B, 51-B, 55-61	A-2, A-10, A-23, 22-67, 29-64, 30-B, 35-47, 45-60, 52-59, 57-B,

Πίνακας 5.49 : Ποσοστό της μέγιστης ισχύος κάθε ΜΔΠ που διεισδύει στο δίκτυο των 69 κόμβων στην τρίτη δοκιμή μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ ανάλογα με τις τιμές του C_{DG}

Κόμβος	Μέγιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Ποσοστό Παραγωγής ($C_{DG} = 10 \text{ €}$)	Ποσοστό Παραγωγής ($C_{DG} = 10000 \text{ €}$)
46	1.40	30.9%	30.9%
48	1.30	63.4%	63.4%
56	1.30	41.7%	41.7%
64	1.30	81.9%	81.9%
67	1.40	39.7%	39.7%
69	1.30	40.8%	40.8%
Σύνολο	8.0		



Σχήμα 5.21 : Τοπολογία δικτύου 69 κόμβων μετά την επαναδιαμόρφωση της τρίτης δοκιμής μέγιστης παραγωγής ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 κόμβων για $C_{DG} = 10 \text{ €}$ και $C_{DG} = 10000 \text{ €}$.

Αξιοσημείωτο είναι ότι, είτε δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στην διείσδυση ΜΔΠ ($C_{DG} = 10000 \text{ €}$), είτε όχι ($C_{DG} = 10 \text{ €}$), το δίκτυο λειτουργεί, όπως και πριν, αποκλειστικά με τις ΜΔΠ που παράγουν 4 MW και οι συμβατικές μονάδες των υποσταθμών δεν παράγουν τίποτα ($P_{SA} = P_{SB} = 0$).

Στον Πίνακα 5.51 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των τριών σεναρίων της δεύτερης περίπτωσης για το δίκτυο των 69 κόμβων.

Πίνακας 5.51: Συγκεντρωτικός πίνακας δεύτερης περίπτωσης στο δίκτυο των 69 κόμβων

	Παράμετροι που ορίζουν το σενάριο						Αποτελέσματα του σεναρίου						
	C_{iss} (€/kW)	C_{ENS} (€/kWh /year)	C_{SAIDI} (€/h /year)	C_{SAIFI} (€/faults /year)	C_{DG} (€)	P_{DG} (MW)	Από λειες (kW)	ENS (kWh/ year)	SAIDI (h/year)	SAIFI (faults/ year)	P_{DG} (MW)	h	P_s (MW)
1	100	10	0.1	0.1	10	2.0	60	1150	2.635	2.882	2.0	1	2.0
2	100	10	0.1	0.1	10	4.0	30	1150	2.645	2.882	3.85	≠1	0.15
					10^4		90	1166	2.840	2.944	4.0	1	0
3	100	10	0.1	0.1	10	8.0	60	1112	2.757	2.882	4.0	≠1	0
					10^4								

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των ΔΔΗΕ με ΜΔΠ, με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος του δικτύου και τη μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας. Η αντικειμενική συνάρτηση που επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση σχεδιάστηκε με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου, τη μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας, και τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης ΜΔΠ στο δίκτυο.

Αυτό που επιδιώκεται στην παρούσα εργασία είναι η διερεύνηση της εξέλιξης των ΔΔΗΕ και η μετατροπή τους σε σύγχρονα ευφυή ΔΔΗΕ. Τα ευφυή δίκτυα έχουν τη δυνατότητα τηλεχειρισμού και αλλαγής της τοπολογίας τους εύκολα, και από απόσταση, ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Στη συγκεκριμένη εργασία υποδεικνύεται η βέλτιστη τοπολογία του δικτύου για διάφορες περιπτώσεις ΔΔΗΕ και με διαφορετική βαρύτητα στα θεωρούμενα κριτήρια βελτιστοποίησης.

Έτσι προέκυψε το πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των ΔΔΗΕ που μελετάται στην παρούσα εργασία. Η μαθηματική διατύπωσή του βασίστηκε στο μοντέλο της ροής ισχύος το οποίο υπέστη διάφορες τροποποιήσεις. Έγινε αντικατάσταση των μη γραμμικών περιορισμών του ΔΔΗΕ με ένα συνδυασμό τετραγωνικών περιορισμών. Έτσι, το πρόβλημα βελτιστοποίησης μετατράπηκε σε γραμμικό, ώστε να μπορεί να επιλύεται από διαθέσιμους εμπορικούς επιλύτες βελτιστοποίησης. Επιπλέον, έγινε ενσωμάτωση εξισώσεων ελέγχου των διακοπτικών στοιχείων του ΔΔΗΕ. Τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζονται από διακριτή συμπεριφορά, με αποτέλεσμα την εισαγωγή δυαδικών και ακέραιων μεταβλητών στο μοντέλο, καθιστώντας το ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Κατά συνέπεια, το προτεινόμενο μοντέλο της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των ΔΔΗΕ είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς

περιορισμούς, το οποίο μπορεί να επιλυθεί από διαθέσιμους εμπορικούς επιλύτες βελτιστοποίησης

Το διατυπωθέν πρόβλημα της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης των ΔΔΗΕ υλοποιήθηκε στο λογισμικό GAMS και η επίλυσή του έγινε με χρήση του επιλύτη CPLEX. Για την εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό, αλλά και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων από αυτό χρησιμοποιήθηκαν αρχεία Excel, τα οποία διευκόλυναν την επεξεργασία των πληροφοριών.

Στη συνέχεια, το προτεινόμενο μοντέλο εφαρμόστηκε σε δίκτυα 43 και 69 κόμβων. Το πρόβλημα χωρίστηκε σε δυο κατηγορίες δοκιμών. Στην πρώτη μελετήθηκαν τα αποτελέσματα που προκύπτουν ανάλογα σε ποιο κριτήριο δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα για την επαναδιαμόρφωση. Στην δεύτερη περίπτωση, μελετήθηκαν τα αποτελέσματα που προκύπτουν ανάλογα με την ποσότητα των ΜΔΠ που διεισδύουν στο δίκτυο.

Στην πρώτη περίπτωση, επειδή χρησιμοποιήθηκε μία μόνο αντικειμενική συνάρτηση με διαφορετικούς όρους (κριτήρια) και συντελεστές βαρύτητας για κάθε όρο, το συμπέρασμα είναι ότι δεν υπάρχει τοπολογία δικτύου που να πετυχαίνει ταυτόχρονα βελτιστοποίηση και των τριών κριτηρίων (όρων) της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή να πετυχαίνει ταυτόχρονα βέλτιστη αξιοπιστία, ελάχιστες απώλειες και όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διείσδυση ΜΔΠ στο δίκτυο. Όμως, με μία μόνο αντικειμενική συνάρτηση, η βελτιστοποίηση είναι εφικτή για το κάθε κριτήριο ξεχωριστά, οπότε ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου παρουσιάστηκε αντίστοιχη μεθοδολογία και τοπολογία.

Στη δεύτερη περίπτωση, παρόλο που είναι εφικτό ένα ΔΔΗΕ να τροφοδοτηθεί αποκλειστικά από ΜΔΠ, τα αποτελέσματα για τις απώλειες και την αξιοπιστία ήταν καλύτερα όταν το ΔΔΗΕ τροφοδοτούνταν τόσο από συμβατικές μονάδες παραγωγής και όσο και από ΜΔΠ.

6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Επέκταση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να αποτελεί η εξέταση και η μελέτη του παρόντος προβλήματος σε ένα πιο περίπλοκο και μεγαλύτερο ΔΔΗΕ που ανταποκρίνεται περισσότερο στα πραγματικά δίκτυα διανομής. Επίσης, σαν επόμενο στάδιο, χρήσιμη προσθήκη στην εργασία θα ήταν και η εισαγωγή συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στο ΔΔΗΕ, ώστε να αποθηκεύεται η ενέργεια που παράγεται από ΜΔΠ και να χρησιμοποιείται σε ώρες που κανονικά δεν θα παραγόταν (για παράδειγμα, το βράδυ δεν παράγουν ενέργεια τα φωτοβολταϊκά, ενώ σε ώρες άπνοιας δεν παράγουν ενέργεια οι ανεμογεννήτριες). Τέλος, η εργασία θα επεκτεινόταν με προσθήκη τηλεχειριζόμενων διακοπών στο δίκτυο, ώστε να είναι πολύ πιο εύκολη η αλλαγή της τοπολογίας του ΔΔΗΕ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.
- [2] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985.
- [3] J.C. Lopez, M. Lavorato, and M.J. Rider, “Optimal reconfiguration of electrical distribution systems considering reliability indices improvement,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 78, pp. 837–845, June 2016.
- [4] P.L. Cavalcante, J.C. López, J.F. Franco, M.J. Rider, A.V. Garcia, M.R.R. Malveira, L.L. Martins, and L.C.M. Direito, “Centralized self-healing scheme for electrical distribution systems,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, pp. 145–155, Jan. 2016.
- [5] B. Amanulla, S. Chakrabarti, and S.N. Singh, “Reconfiguration of power distribution systems considering reliability and power loss,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 918–926, Apr. 2012.
- [6] M. Bollen and F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011.
- [7] P.M. de Quevedo, J. Contreras, M.J. Rider, and J. Allahdadian, “Contingency assessment and network reconfiguration in distribution grids including wind power and energy storage,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, pp. 1524–1533, Oct. 2015.

- [8] J.C. López, M. Lavorato, J.F. Franco, and M.J. Rider, “Robust optimisation applied to the reconfiguration of distribution systems with reliability constraints,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, pp. 917–927, Mar. 2016.
- [9] E. Castillo, A.J. Gonejo, P. Pedregal, R. Garcíá, and N. Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*. Hoboken, USA: John Wiley and Sons, 2002.
- [10] D. Das, “Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 28, pp. 331–338, June 2006.
- [11] Π.Σ. Γεωργιλάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015.
Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα : <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013>
- [12] R.A. Jabr, R. Singh, and B.C. Pal, “Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 1106–1115, May 2012.
- [13] M. Lavorato, J.F. Franco, M.J. Rider, and R. Romero, “Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 172–180, Feb. 2012.
- [14] M.E. Baran and F.F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, pp. 1401–1407, Apr. 1989.
- [15] C.L.T. Borges, “An overview of reliability models and methods for distribution systems with renewable energy distributed generation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 4008–4015, Aug. 2012.
- [16] N.C. Koutsoukis, D.O. Siagkas, P.S. Georgilakis, and N.D. Hatziargyriou, “Online reconfiguration of active distribution networks for maximum integration of

- distributed generation,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 14, pp. 437–448, Apr. 2017.
- [17] A. Bracale, P. Caramia, G. Carpinelli, A. Russo, and P. Verde, “Site and system indices for power-quality characterization of distribution networks with distributed generation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, pp. 1304–1316, July 2011.
- [18] P.S. Georgilakis and N.D. Hatziargyriou, “A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research,” *Electric Power Systems Research*, vol. 121, pp. 89–100, April 2015.
- [19] M. Lavorato, M.J. Rider, A.V. Garcia, and R. Romero, “A constructive heuristic algorithm for distribution system planning,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 1734–1742, Aug. 2010.
- [20] L.H. Macedo, J.F. Franco, R. Romero, M.A. Ortega-Vazquez, and M.J. Rider, “Increasing the hosting capacity for renewable energy in distribution networks,” *IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference*, 2017.
- [21] M.S. Nazar and M.R. Haghifam, “Multiobjective electric distribution system expansion planning using hybrid energy hub concept,” *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 899–911, June 2009.
- [22] ILOG Inc., *CPLEX optimization subroutine library guide and reference*. Incline Village, NV, 2008.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**A**

ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

A/Z	Αποζεύκτης
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΑ	Διακόπτης Απομόνωσης
ΔΔΗΕ	Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΔΙ	Διακόπτης Ισχύος
ΔΠ	Διανεμημένη Παραγωγή
ΔΦ	Διακόπτης Φορτίου
Η/Ν	Ηλεκτρονόμος
ΜΔΕΚ	Μέση Μη Διανεμομένη Ενέργεια Καταναλωτών
ΜΔΠ	Μονάδα Διανεμημένης Παραγωγής
ΜΔΦ	Μέσο Διακοπτόμενο Φορτίο
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
ΜΤ	Μέση Τάση

ΣΔΣ	Συχνότητα Διακοπών Συστήματος
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΗΘ	Συστήματα Συνδυασμένης Παραγωγής Θερμότητας και Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΚΣ	Σημείο Κοινής Σύνδεσης
ΣΜ	Σύστημα Μεταφοράς
ΣΠ	Σύστημα Παραγωγής
ΥΥΤ	Υπερυψηλή Τάση
ΥΤ	Υψηλή Τάση
ΧΤ	Χαμηλή Τάση

ΑΓΓΛΙΚΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ENS	Energy Not Supplied
ODNR	Optimal Distribution Network Reconfiguration
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index

«Υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ - ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνεΚ) (κωδικός έργου: Τ1ΕΔΚ-00450)»



ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης