



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

ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΟΝΙΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μιχαήλ Σ. Ζέρβας

Επίβλεψη : Πάυλος Σ. Γεωργιάκης, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Νικόλαος Κουτσούκης, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018



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

ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΟΝΙΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μιχαήλ Σ. Ζέρβας

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιάκης, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Νικόλαος Κουτσούκης, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 6^η Μαρτίου 2018.

.....
Παύλος Γεωργιάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

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

Αθήνα, Μάρτιος 2018

.....
Μιχαήλ Σ. Ζέρβας

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

Copyright © Μιχαήλ Ζέρβας, 2018.

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

Οι διακοπές ρεύματος σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας οφείλονται κυρίως σε σφάλματα που συμβαίνουν στα δίκτυα διανομής. Στην περίπτωση που το σφάλμα είναι μόνιμο, ακολουθεί ένας μηχανισμός αποκατάστασης, με στόχο την επισκευή της βλάβης και την αποκατάσταση των φορτίων του δικτύου. Ο μηχανισμός περιλαμβάνει τον εντοπισμό, την απομόνωση, τη μερική αποκατάσταση, την επισκευή και, ως τελικό βήμα, την ολική αποκατάσταση της λειτουργίας του δικτύου διανομής.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η υλοποίηση μιας μεθόδου, η οποία θα αυτοματοποιεί και θα βελτιστοποιεί τα στάδια του εντοπισμού, της απομόνωσης και της μερικής αποκατάστασης, ούτως ώστε να επιτευχθεί άμεσα η αποκατάσταση των υγιών φορτίων του δικτύου, μέχρι την επισκευή της βλάβης. Με αυτόν τον τρόπο, οι συνέπειες της διακοπής περιορίζονται σε ένα ελαχιστοποιημένο σύνολο καταναλωτών και η αξιοπιστία του δικτύου βελτιώνεται αισθητά.

Αρχικά παρουσιάζεται ένα σύνολο από αναβαθμίσεις, οι οποίες μπορούν να υλοποιήσουν την αυτοματοποίηση του δικτύου καθώς και μία μέθοδος για τη βέλτιστη απομόνωση του σφάλματος. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης για το στάδιο της μερικής αποκατάστασης, αναπαριστώντας το δίκτυο διανομής ως έναν κατευθυνόμενο γράφο. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος στοχεύει πρωτίστως στην ανατροφοδότηση των υγιών φορτίων επιτελώντας τους ελάχιστους δυνατούς διακοπτικούς χειρισμούς και κατά δεύτερο λόγο στην ίση κατανομή των φορτίων στους διαθέσιμους υποσταθμούς. Οι περιορισμοί του προβλήματος περιλαμβάνουν τους περιορισμούς λειτουργίας του δικτύου διανομής.

Για τις ανάγκες υλοποίησης της μεθόδου αναπτύχθηκε λογισμικό σε υπολογιστικό περιβάλλον GAMS και MATLAB. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε δίκτυα 44, 85, 137 και 880 κόμβων, στην περίπτωση που συμβαίνει ένα σφάλμα καθώς και στην περίπτωση που συμβαίνουν ταυτόχρονα δύο σφάλματα στο δίκτυο. Η αυτοματοποίηση του δικτύου διανομής και η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου δίνει τη δυνατότητα στον διαχειριστή του δικτύου να ελέγχει την κατάσταση του δικτύου διανομής σε πραγματικό χρόνο και να αντιμετωπίζει άμεσα και βέλτιστα τα μόνιμα σφάλματα, βελτιώνοντας την αξιοπιστία του δικτύου του.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Απομόνωση σφάλματος, ενδείκτες σφάλματος, εντοπισμός σφάλματος, κεντρικό σύστημα ελέγχου, μέθοδος μελών σφάλματος, μερική αποκατάσταση δικτύου διανομής, τηλεχειριζόμενοι διακόπτες.

ABSTRACT

Power outages in an electrical power system are usually due to faults that occur in a distribution network. A restoration procedure is being activated, in case the fault is permanent, in order to repair the damage. This procedure entails the fault location and isolation, the partial restoration of the network, the damage repair and the complete restoration of the network.

This Diploma Thesis aims at introducing a method, which automates and optimizes the procedures of the fault location, isolation and the network's partial restoration, in order to restore as soon as possible the non-faulted parts of the network, until the damage is repaired and until the network operation is completely restored. As a result, the implications of a power outage affect only a minimum group of customers and the network's reliability is improved.

The essential upgrades for the automation of the network, as well as a method for the optimization of the fault isolation are presented. Furthermore, an optimization model for the solution of the service restoration problem is introduced, using graph theory and spanning trees to represent the network. The main goal of the objective function is to minimize the switch operations and to equally distribute the loads to the adjacent feeders. The constraints of the optimization problem include the operational constraint of the network.

Appropriate software is developed under GAMS and MATLAB software environments. The method is tested on the 44, 85, 137 and 880 bus distribution networks considering single and multiple faults. The proposed method in joint with the distribution automation enables the real time operation of the network in case of permanent faults improving the reliability of the distribution network.

KEY WORDS

Distribution management system, fault isolation, fault location, fault member method, fault passage indicators, partial restoration, remote control units.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017-2018 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντας μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Νικόλαο Κουτσούκη, για τη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Αντικείμενο και καινοτομία της εργασίας	2
1.3 Δομή της εργασίας	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΟΝΙΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ	3
2.1 Εισαγωγή	3
2.2 Σφάλματα	3
2.2.1 Κατηγορίες σφαλμάτων	3
2.2.2 Αίτια και συνέπειες σφάλματος	5
2.3 Δείκτες αξιοπιστίας	5
2.3.1 Παράμετροι αξιοπιστίας	6
2.3.1.1 Δείκτης μέσης συχνότητας διακοπών του συστήματος	6
2.3.1.2 Δείκτης μέσης διάρκειας διακοπών του συστήματος	7
2.3.1.3 Δείκτης μέσης διάρκειας διακοπών του καταναλωτή	7
2.4 Εντοπισμός, απομόνωση και μερική αποκατάσταση της λειτουργίας του δικτύου διανομής	7
2.4.1 Υφιστάμενη μέθοδος εντοπισμού, απομόνωσης και αποκατάστασης λειτουργίας του δικτύου διανομής	7
2.5 Εκσυγχρονισμός των διαδικασιών εντοπισμού, απομόνωσης σφάλματος και της μερικής αποκατάστασης της λειτουργίας του δικτύου διανομής	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΝΔΕΙΚΤΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ	11
3.1 Εισαγωγή	11
3.2 Εξοπλισμός αυτοματοποίησης του δικτύου	11
3.2.1 Ενδείκτες σφάλματος απομακρυσμένης λειτουργίας	11
3.2.1.1 Προδιαγραφές λειτουργίας ενδεικτών σφάλματος	12
3.2.1.2 Επαναφορά ενδείκτη σφάλματος	12
3.2.1.3 Τύποι ενδεικτών σφάλματος	13
3.2.1.4 Γενική δομή και λειτουργία ενδεικτών σφάλματος	14

3.2.2	Παλμικός διακόπτης αυτόματης επαναφοράς	15
3.2.3	Τηλεχειριζόμενοι διακόπτες (ΤΔ)	16
3.2.3.1	Μηχανισμός λειτουργίας ΤΔ	17
3.3	Δίκτυο επικοινωνίας	17
3.3.1	Σύστημα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA)	18
3.3.2	Παγκόσμιο σύστημα κινητής επικοινωνίας (GSM)	18
3.3.3	Απομακρυσμένη μονάδα ελέγχου (Remote Terminal Unit)	18
3.3.4	Εξυπηρετητής	19
3.3.5	Λειτουργία δικτύου επικοινωνίας σε δίκτυα διανομής	19
3.4	Αυτόματος εντοπισμός και απομόνωση σφάλματος σε δίκτυα διανομής	20
3.4.1	Εντοπισμός σφάλματος	20
3.4.1.1	Ανίχνευση	20
3.4.1.2	Μέθοδος μελών σφάλματος	21
3.4.2	Απομόνωση σφάλματος	23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΟΝΙΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ 25

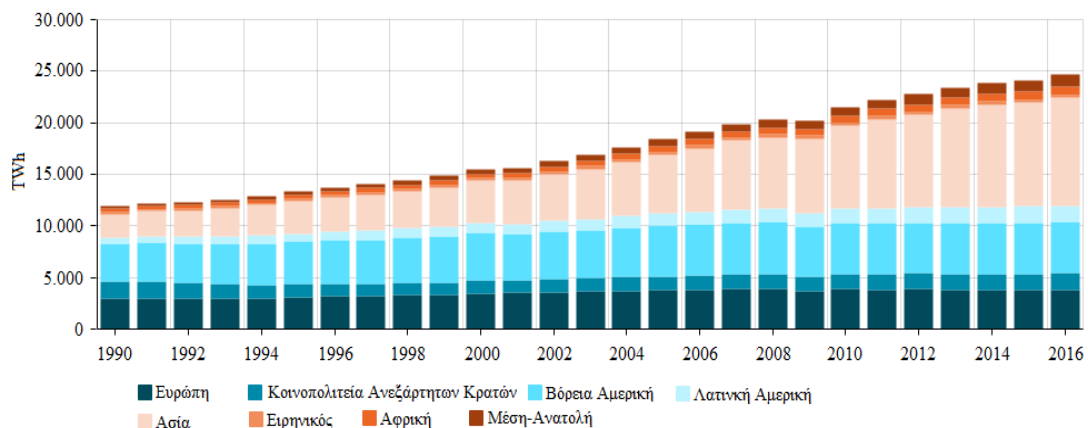
4.1	Εισαγωγή	25
4.2	Ανάλυση ροής ισχύος σε δίκτυα διανομής	25
4.2.1	Αναπαράσταση δικτύου διανομής ως γεννητικό δέντρο	26
4.2.2	Εξισώσεις ροής ισχύος κλάδου	27
4.2.2.1	Εξισώσεις ροής ισχύος σε κλάδους συστήματος διανομής	27
4.2.2.2	Απλοποιημένες εξισώσεις ροής ισχύος σε κλάδους συστήματος διανομής	28
4.3	Μοντέλο βελτιστοποίησης για μερική αποκατάσταση της λειτουργίας του δικτύου διανομής	28
4.3.1	Αντικειμενική συνάρτηση μοντέλου αποκατάστασης	29
4.3.2	Περιορισμοί μοντέλου αποκατάστασης	29
4.4	Μέθοδος αυτόματης αποκατάστασης του δικτύου διανομής	31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΡΙΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	35
5.1	Εισαγωγή	35
5.2	Το λογισμικό GAMS	35
5.2.1	Η δομή ενός μοντέλου GAMS	36
5.2.1.1	Δομικά στοιχεία εισόδου του GAMS	37
5.2.1.2	Δομικά στοιχεία εξόδου του GAMS	41
5.2.2	Ο επιλυτής CPLEX	43
5.3	Περιβάλλον λογισμικού MATLAB	44
5.3.1	Περιγραφή βασικών συναρτήσεων της εργασίας	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	51
6.1	Εισαγωγή	51
6.2	Δίκτυο 44 κόμβων	51
6.2.1	Σφάλμα σε μία γραμμή του δικτύου	52
6.2.2	Ταυτόχρονο σφάλμα σε δύο γραμμές του δικτύου	54
6.3	Δίκτυο 85 κόμβων	56
6.3.1	Σφάλμα σε μία γραμμή του δικτύου	57
6.3.2	Ταυτόχρονο σφάλμα σε δύο γραμμές του δικτύου	59
6.4	Δίκτυο 137 κόμβων	61
6.4.1	Σφάλμα σε μία γραμμή του δικτύου	62
6.4.2	Ταυτόχρονο σφάλμα σε δύο γραμμές του δικτύου	64
6.5	Δίκτυο 880 κόμβων	67
6.5.1	Σφάλμα σε μία γραμμή του δικτύου	67
6.5.2	Ταυτόχρονο σφάλμα σε δύο γραμμές του δικτύου	70
6.6	Σύγκριση αποτελεσμάτων	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75
7.1	Σύνοψη εργασίας και συμπεράσματα	75
7.2	Επεκτάσεις εργασίας	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	79

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σύγχρονη εποχή χαρακτηρίζεται από αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις, εξαιτίας της οικονομικής ανάπτυξης και της συνεχούς αύξησης του πληθυσμού. Η ηλεκτρική ενέργεια (ΗΕ) διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στην κάλυψη των αναγκών αυτών, καθώς μεταφέρεται εύκολα και αποδοτικά, δεν παράγει ρύπους κατά τη χρήση της, είναι άμεσα διαθέσιμη όποτε ζητηθεί και παράγεται σχετικά εύκολα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [1]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, η κατανάλωση της ΗΕ παρουσιάζει συνεχή αύξηση και αποτελεί όλο και μεγαλύτερη προτίμηση στην κάλυψη των καθημερινών αναγκών μιας κοινωνίας. Ως αποτέλεσμα, οι διαταραχές και οι διακοπές λειτουργίας σε μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) έχουν σημαντικό κοινωνικό και οικονομικό αντίκτυπο.



Σχήμα 1.1: Παγκόσμια ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στα έτη 1990-2016.

Οι διακοπές παροχής σε ένα ΣΗΕ οφείλονται κυρίως σε μόνιμα σφάλματα που προκύπτουν στο δίκτυο διανομής (ΔΔ). Ένα μόνιμο σφάλμα σε κάποιο σημείο του ΔΔ θέτει, λόγω της ακτινικότητάς του [2], εκτός λειτουργίας όλα τα φορτία της κύριας γραμμής στην οποία βρίσκεται. Ο χρόνος που παρεμβάλλεται μέχρι την επιδιόρθωση, μεταφράζεται σε χρόνο εκτός λειτουργίας για όλους τους καταναλωτές της γραμμής και όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκειά του τόσο πιο έντονες είναι οι συνέπειες της διακοπής. Είναι λοιπόν απαραίτητη η επιτάχυνση της αποκατάστασης στα υγιή φορτία του δικτύου, μέσα από μία σειρά αναβαθμίσεων, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος διακοπής παροχής και οι δυσμενείς επιπτώσεις που επιφέρει στους καταναλωτές.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια καινοτόμος μέθοδος για την αυτόματη αντιμετώπιση μόνιμων σφαλμάτων σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, το αντικείμενο της εργασίας είναι η αυτοματοποίηση του μηχανισμού εντοπισμού, απομόνωσης σφάλματος και μερικής αποκατάστασης του δικτύου, μέσω ανάπτυξης κατάλληλου λογισμικού, με στόχο την άμεση αποκατάσταση των όσων γίνεται περισσότερων φορτίων του δικτύου. Κατά τη διαδικασία, το σφάλμα περιορίζεται στη μικρότερη δυνατή περιοχή του δικτύου, επιτρέποντας στο υπόλοιπο δίκτυο να συνεχίσει απρόσκοπτα τη λειτουργία του. Με αυτόν τον τρόπο, οι δυσμενείς επιπτώσεις της διακοπής παροχής ισχύος περιορίζονται σε ένα μικρό σύνολο καταναλωτών.

Η εργασία εξετάζει την αναβάθμιση των υφιστάμενων δικτύων διανομής με σύγχρονο εξοπλισμό, που θα επιτρέπει τον απομακρυσμένο έλεγχο των δικτύων, επεκτείνοντας τις δυνατότητές τους. Τα δίκτυα αποκτούν ικανότητα αυτο-αποκατάστασης σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος και γίνονται ελέγξιμα ως προς την αξιοπιστία τους, χάρη στη διαρκή παρακολούθηση και καταγραφή των δεδομένων λειτουργίας τους. Για τον σκοπό αυτό, στα πλαίσια της εργασίας παρουσιάζεται ένα δίκτυο ασύρματης επικοινωνίας, το οποίο επιτρέπει την άμεση ανταλλαγή πληροφορίας για την κατάσταση του δικτύου και τη μεταφορά εντολών για απομακρυσμένους διορθωτικούς χειρισμούς.

Αυτές οι ενέργειες αποτελούν σκαλοπάτι για τη μετάβαση στα ευφυή δίκτυα [3], τα οποία αποτελούν τάση της εποχής για τη βελτίωση των υπηρεσιών διανομής. Ο ευρύτερος στόχος της εργασίας είναι η εισαγωγή και η εκμετάλλευση της σύγχρονης τεχνολογίας στη λειτουργία των ΔΔ.

1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται αναφορά στα είδη και τα αίτια των σφαλμάτων που εμφανίζονται στα δίκτυα διανομής και περιγράφεται η έννοια της αξιοπιστίας του δικτύου. Επιπλέον, παρουσιάζεται αναλυτικά η υφιστάμενη μέθοδος αντιμετώπισης μόνιμου σφάλματος σε ένα ΔΔ και επισημαίνονται οι λόγοι για τον εκσυγχρονισμό της διαδικασίας.

Στο **Κεφάλαιο 3** προτείνεται μια σειρά από αναβαθμίσεις στον εξοπλισμό των ΔΔ, με στόχο την αυτοματοποίηση του εντοπισμού και της απομόνωσης του σφάλματος. Βασικό ρόλο σε αυτό το εγχείρημα έχει η χρήση ενδεικτών σφάλματος απομακρυσμένης λειτουργίας καθώς και το προτεινόμενο δίκτυο επικοινωνίας.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται το μοντέλο βελτιστοποίησης για τη μερική αποκατάσταση λειτουργίας του ΔΔ, με βάση τη θεωρία γράφων και τις εξισώσεις ροής ισχύος.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον GAMS και MATLAB για τη βελτιστοποίηση της μερικής αποκατάστασης του δικτύου.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις. Επίσης, περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών και ο σχολιασμός τους. Οι προσομοιώσεις έγιναν σε δίκτυα 44, 85, 137 και 880 κόμβων.

Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μία σύνοψη των αποτελεσμάτων της εργασίας και προτείνονται ιδέες για μελλοντικές επεκτάσεις της.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΟΝΙΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα δίκτυα διανομής (ΔΔ) πάντα θα υπάρχει η πιθανότητα ενός μόνιμου σφάλματος, ανεξάρτητα από το επίπεδο πρόληψης και προστασίας του συστήματος. Ένα σφάλμα μπορεί να προκληθεί από ποικίλα αίτια και έχει δυσμενείς συνέπειες στην οικονομία και την καθημερινότητα του καταναλωτή, προκαλώντας διακοπές στην παροχή ισχύος. Η καθολική εξάρτηση των κοινωνιών από το ηλεκτρικό ρεύμα, σε συνδυασμό με την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, τις αναπτυξιακές πορείες των οικονομιών και τα υψηλά κόστη που επιφέρει μια διακοπή ρεύματος, καθιστούν επιτακτική ανάγκη την αύξηση αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ).

Είναι λοιπόν απαραίτητη η ύπαρξη ενός μηχανισμού αντιμετώπισης μόνιμου σφάλματος, ο οποίος θα αποκαθιστά την παροχή ισχύος με ταχύτητα και αποτελεσματικότητα. Ο μηχανισμός αυτός, η έννοια και οι δείκτες της αξιοπιστίας ενός δικτύου, αλλά και οι βασικές πληροφορίες γύρω από τα σφάλματα, παρατίθενται στο παρόν κεφάλαιο.

2.2 ΣΦΑΛΜΑΤΑ

Ως σφάλμα σε ένα ΣΗΕ, ορίζεται οποιαδήποτε διαταραχή στη λειτουργία του. Σε κανονικές συνθήκες, ένα σύστημα διανομής είναι συμμετρικά τριφασικό και διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Ωστόσο, εξαιτίας ξαφνικών εξωτερικών ή εσωτερικών αλλαγών στο σύστημα, οι κανονικές συνθήκες λειτουργίας διαταράσσονται. Για παράδειγμα, αυτό συμβαίνει όταν η μόνωση κάποιου εξοπλισμού του συστήματος σταματήσει να είναι αποτελεσματική ή ένα αγωγίμο αντικείμενο έρθει σε επαφή με κάποιο ενεργό σημείο του κυκλώματος, με αποτέλεσμα να προκύψει ένα βραχυκύκλωμα.

2.2.1 Κατηγορίες σφαλμάτων

Υπάρχουν πολλές κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται τα σφάλματα ενός τριφασικού συστήματος, οι γενικότερες εκ των οποίων αφορούν τη χρονική τους διάρκεια (μόνιμα ή παροδικά) αλλά και τη συμμετρία του συστήματος (συμμετρικά ή ασύμμετρα). Όσον αφορά τη χρονική διάρκεια, ένα σφάλμα μπορεί να είναι [4]:

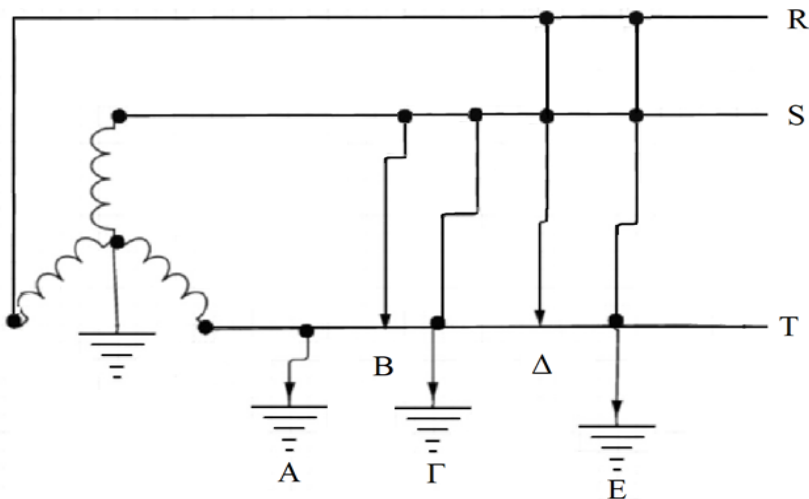
- **Παροδικό:** Στην περίπτωση αυτή το σφάλμα διαρκεί για μερικούς κύκλους του συστήματος, ενώ δεν απαιτείται κάποια ενέργεια επισκευής ώστε να απομακρυνθεί από το σύστημα, καθώς ο εξοπλισμός δεν έχει υποστεί ζημιά. Η πλειοψηφία των

σφαλμάτων σε ένα ΔΔ (60% με 90%) είναι παροδικής φύσης και απομακρύνονται χωρίς να υφίσταται κάποια διακοπή, με τη βοήθεια του κατάλληλου εξοπλισμού, π.χ. διακόπτες αυτόματης επαναφοράς.

- **Μόνιμο:** Ως μόνιμο χαρακτηρίζεται το σφάλμα του οποίου η αιτία επιφέρει μόνιμη ζημιά στον εξοπλισμό. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται κάποιου είδους επισκευή προτού να μπορέσει να αποκατασταθεί η ισχύς. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται και σφάλματα τα οποία αρχικά ήταν παροδικής φύσης, αλλά επέφεραν μόνιμη ζημιά στο σύστημα. Με αυτού του είδους τα σφάλματα ασχολείται η παρούσα εργασία.

Η διάκριση των σφαλμάτων με βάση τη συμμετρία τους, δημιουργεί δύο κύριες κατηγορίες [5].

- Το **συμμετρικό σφάλμα**, το οποίο είναι ένα ισορροπημένο σφάλμα, υπό την έννοια ότι όλες οι φάσεις επηρεάζονται το ίδιο ώστε το σύστημα να παραμένει συμμετρικό. Πρόκειται για το πιο σοβαρό είδος σφάλματος και συνεπάγεται μέγιστο ρεύμα, αλλά ευτυχώς, συμβαίνει σπάνια.
- Το **ασύμμετρο σφάλμα**, το οποίο, δυστυχώς, είναι αρκετά συνηθισμένο και προκαλεί ανισορροπία μεταξύ των τριών φάσεων. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται τα μονοφασικά βραχυκυκλώματα (μεταξύ φάσεως και γης), τα διαφασικά βραχυκυκλώματα με ή χωρίς γη, τα τριφασικά βραχυκυκλώματα και οι διακοπές αγωγών φάσεων. Η διαδρομή του ρεύματος σφάλματος από γραμμή σε γραμμή ή από γραμμή στη γη μπορεί είτε να περιέχει είτε να μην περιέχει αντίσταση. Τα είδη ασύμμετρων σφαλμάτων φαίνονται στο Σχήμα 2.1, όπου:

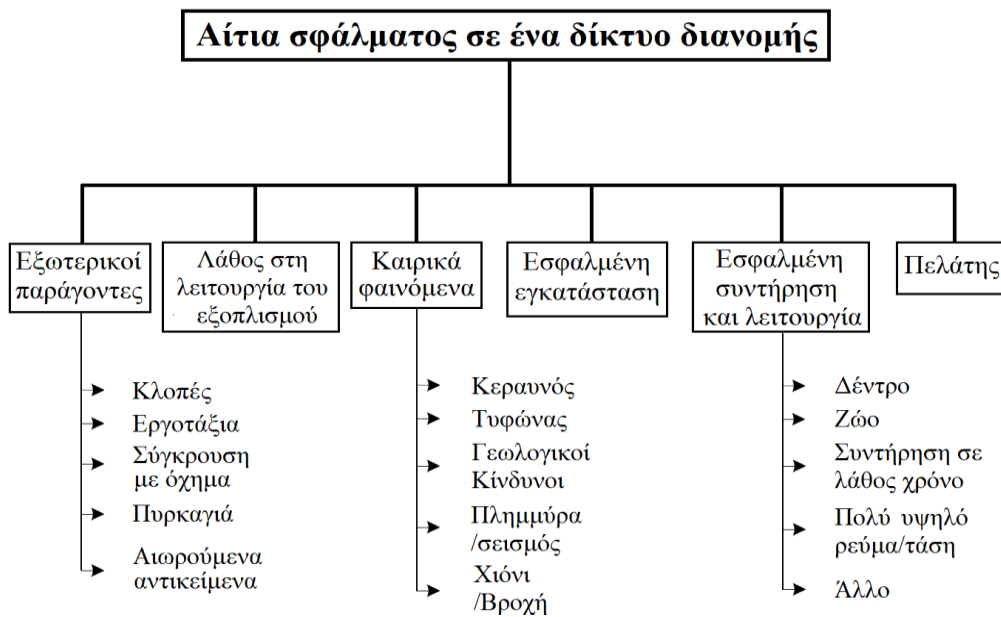


Σχήμα 2.1: Τύποι σφάλματος στο τριφασικό σύστημα.

- A: Μονοφασικό σφάλμα προς γη
- B: Διφασικό σφάλμα χωρίς γη
- Γ: Διφασικό σφάλμα προς γη
- Δ: Τριφασικό σφάλμα χωρίς γη
- E: Τριφασικό σφάλμα με γη

2.2.2 Αίτια και συνέπειες σφάλματος

Υπάρχουν πολλά αίτια σφάλματος που μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια ισχύος σε ένα ΔΔ. Στο Σχήμα 2.2 φαίνονται οι κυριότεροι παράγοντες που ευθύνονται για την ανάπτυξη σφάλματος στο δίκτυο, ενώ στον Πίνακα 2.1 απεικονίζονται οι σημαντικότερες συνέπειες αυτών [6], [7].



Σχήμα 2.2: Ταξινόμηση αιτίων σφάλματος.

Πίνακας 2.1: Συνέπειες διακοπής παροχής ρεύματος.

Άμεσες οικονομικές συνέπειες	Έμμεσες οικονομικές συνέπειες	Κοινωνικές συνέπειες
<ul style="list-style-type: none"> Απώλεια παραγωγής Κόστος επανεκκίνησης Ζημιά στον εξοπλισμό Απώλεια πρώτης ύλης 	<ul style="list-style-type: none"> Καθυστερήσεις στην παράδοση προϊόντων Καθυστερήση απόδοσης κέρδους 	<ul style="list-style-type: none"> Έκθεση σε κίνδυνο στην υγεία και την ασφάλεια Απώλεια ελεύθερου χρόνου Ανεπιθύμητες θερμοκρασίες

2.3 ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η αξιοπιστία είναι ένα μέγεθος που μπορεί να υπολογιστεί, να μετρηθεί, να αξιολογηθεί και να σχεδιαστεί, στα πλαίσια της λειτουργίας και της ανάπτυξης του δικτύου. Ως αξιοπιστία ορίζεται η ικανότητα ενός συστήματος να φέρει εις πέρας με επιτυχία τη λειτουργία για την οποία είναι σχεδιασμένο, κατά την προσδοκώμενη διάρκεια ζωής του και υπό τις συνθήκες λειτουργίας που θα συναντήσει.

Ίδανικά, από την πλευρά του καταναλωτή, η αξιοπιστία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μεταφράζεται σε αδιάκοπη παροχή ενέργειας από την παραγωγή στην κατανάλωση. Πρακτικά, για τους καταναλωτές τα κύρια στοιχεία αξιοπιστίας ενός συστήματος ενέργειας για τους καταναλωτές είναι η συχνότητα και η διάρκεια των διακοπών στο επίπεδο της κατανάλωσης, δηλαδή στα φορτία. Όσο λοιπόν το φορτίο μεγαλώνει, το σύστημα διανομής επεκτείνεται για να ικανοποιήσει τη ζήτηση και η ανάγκη για αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος είναι όλο και πιο επιτακτική.

2.3.1 Παράμετροι αξιοπιστίας

Το δίκτυο διανομής με ακτινική λειτουργία είναι ένα σύστημα που αποτελείται από ένα σύνολο εξαρτημάτων σε σειρά όπως: γραμμές, καλώδια, αποζεύκτες, ζυγοί κ.α. Για έναν καταναλωτή συνδεδεμένο σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος, θα πρέπει όλα τα εξαρτήματα μεταξύ του σημείου σύνδεσης και του σημείου παροχής να είναι σε λειτουργία.

Υπάρχουν τρεις βασικές παράμετροι αξιοπιστίας [8]:

- ο ρυθμός βλαβών $\lambda_s = \sum_i \lambda_i$, όπου λ_i είναι το i -οστό περιστατικό βλάβης,
- ο αναμενόμενος ετήσιος χρόνος εκτός λειτουργίας $U_s = \sum_i \lambda_i \cdot r_i$, όπου r_i είναι διάρκεια διακοπής της i -οστής βλάβης.
- ο μέσος χρόνος εκτός λειτουργίας $r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} = \frac{\sum_i \lambda_i r_i}{\sum_i \lambda_i}$.

Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των δεικτών φορτίου. Ωστόσο, οι κύριοι αυτοί δείκτες δεν αποτυπώνουν πάντα ενδελεχώς την απόδοση και την απόκριση του συστήματος. Για παράδειγμα, οι ίδιοι δείκτες αποτιμούνται ανεξάρτητα από το αν οι συνδεδεμένοι πελάτες (φορτία) στο σύστημα είναι είτε ένας είτε 100 ή αν το μέσο φορτίο είναι 10 kW ή 100 kW.

Για να αποτυπωθεί η δριμύτητα μιας διακοπής παροχής του συστήματος, υπολογίζονται επιπρόσθετοι δείκτες αξιοπιστίας, οι οποίοι σταθμίζουν το ίδιο κάθε καταναλωτή. Έτσι, για τους δείκτες αυτούς, ένας μικρός αστικός καταναλωτής είναι εξίσου σημαντικός με έναν μεγάλο βιομηχανικό καταναλωτή [9].

2.3.1.1 Δείκτης μέσης συχνότητας διακοπών του συστήματος

Ο δείκτης μέσης συχνότητας διακοπών του συστήματος (ΔΜΣΔΣ, System Average Interruption Frequency Index - SAIFI) ορίζεται ως εξής:

$$\Delta\text{ΜΣΔΣ} = \frac{\sum_i \lambda_i \cdot N_i}{\sum_i N_i} = \frac{\text{σύνολο βλαβών πελατών}}{\text{σύνολο εξυπηρετούμενων πελατών}} \left(\frac{\text{βλάβες}}{\text{πελάτη}} \cdot \text{έτος} \right)$$

όπου N_i είναι ο αριθμός των πελατών (καταναλωτών) στο φορτίο του δικτύου.

Ο ΔΜΣΔΣ είναι ένα μέγεθος που δείχνει πόσες διακοπές υφίσταται ένας μέσος πελάτης σε έναν χρόνο. Για έναν προκαθορισμένο αριθμό πελατών, ο μόνος τρόπος να βελτιωθεί ο δείκτης αυτός, είναι να μειωθεί ο αριθμός των βλαβών στις οποίες υπόκεινται οι πελάτες.

2.3.1.2 Δείκτης μέσης διάρκειας διακοπών του συστήματος

Ο δείκτης μέσης διάρκειας διακοπών του συστήματος (ΔΜΔΔΣ, System Average Interruption Duration Indicator - SAIDI) ορίζεται από τη σχέση:

$$\Delta\text{ΜΔΔ}\Sigma = \frac{\sum_i U_i \cdot N_i}{\sum_i N_i} = \frac{\text{συνολική διάρκεια πελατών εκτός λειτουργίας}}{\text{σύνολο εξυπηρετούμενων πελατών}} \left(\frac{\text{ώρες}}{\text{πελάτη}} \cdot \text{έτος} \right)$$

όπου U_i είναι η ετήσια διάρκεια διακοπών. Ο ΔΜΔΔΣ μετράει πόσες ώρες εκτός λειτουργίας θα βιώσει ένας μέσος πελάτης μέσα σε ένα έτος. Για έναν σταθερό αριθμό πελατών, ο ΔΜΔΔΣ μπορεί να βελτιωθεί είτε μειώνοντας τον αριθμό των διακοπών, είτε μειώνοντας τη διάρκεια των διακοπών αυτών.

2.3.1.3 Δείκτης μέσης διάρκειας διακοπών του πελάτη

Ο δείκτης μέσης διάρκειας διακοπών του πελάτη (ΔΜΔΔΠ, Customer Average Interruption Duration Indicator - CAIDI) ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση.

$$\Delta\text{ΜΔΔ}\Pi = \frac{\sum_i U_i \cdot N_i}{\sum_i \lambda_i \cdot N_i} = \frac{\text{συνολική διάρκεια πελατών εκτός λειτουργίας}}{\text{σύνολο βλαβών πελατών}} \left(\frac{\text{ώρες}}{\text{βλάβες}} \right)$$

Ο ΔΜΔΔΠ μετράει πόσο διαρκεί μια μέση βλάβη, δηλαδή μια μέση διακοπή παροχής. Ο δείκτης αυτός μπορεί να βελτιωθεί μειώνοντας τη διάρκεια των διακοπών αλλά και να μικρύνει από την αύξηση των βλαβών. Συνεπώς, η μείωση του ΔΜΔΔΠ δεν σημαίνει απαραίτητα βελτίωση της αξιοπιστίας.

2.4 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ, ΑΠΟΜΟΝΩΣΗ ΚΑΙ ΜΕΡΙΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Κάποια στιγμή αναπόφευκτα θα προκύψει ένα σφάλμα στο ΔΔ. Αν το σφάλμα αυτό είναι παροδικό τότε θα απορροφηθεί από το σύστημα με ελάχιστο ή καθόλου αντίκτυπο στην αξιοπιστία του δικτύου. Ωστόσο, αν συμβεί κάποιο μόνιμο σφάλμα στο δίκτυο, τότε χρειάζεται να ενεργοποιηθεί κάποιος μηχανισμός διαχείρισης που θα οδηγήσει αρχικά στην εξουδετέρωση του σφάλματος και έπειτα στη σταδιακή αποκατάστασή της λειτουργίας του δικτύου.

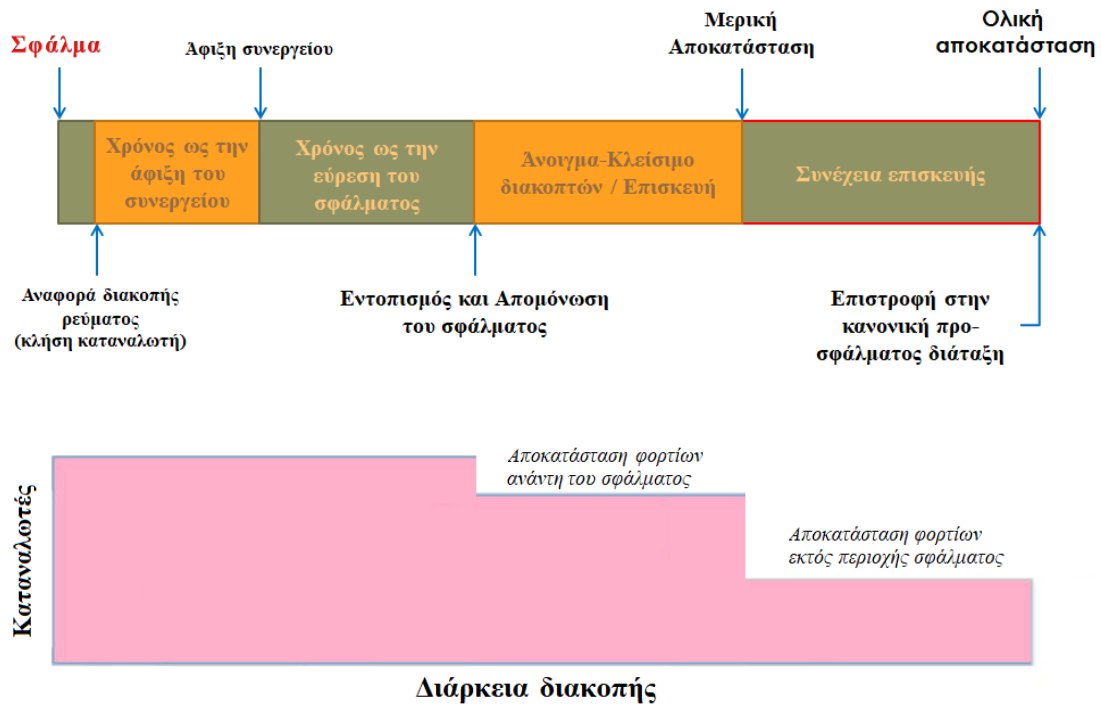
Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται εντοπισμός, απομόνωση και αποκατάσταση σφάλματος (ΕΑΑΣ) και με την πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξη της τεχνολογίας βελτιώνεται διαρκώς, τόσο σε ταχύτητα όσο και σε αποτελεσματικότητα.

2.4.1 Υφιστάμενη μέθοδος εντοπισμού, απομόνωσης και αποκατάστασης λειτουργίας του δικτύου διανομής

Τα ΔΔ δεν έχουν αφομοιώσει σε όλο το εύρος τους τα πλεονεκτήματα της εξέλιξης της τεχνολογίας. Ακόμα και σήμερα τα περισσότερα συστήματα διανομής βασίζονται στη

λειτουργία των διακοπών για την απόζευξη των γραμμών σε περίπτωση σφάλματος, στις κλήσεις των καταναλωτών για την αναφορά περιστατικών διακοπής παροχής και σε συνεργεία επισκευής για την εύρεση του πληγέντος κυκλώματος και την αποκατάσταση της ισχύος.

Σε αυτήν την περίπτωση, ο μηχανισμός ΕΑΑΣ είναι αρκετά αργός και μπορεί να διαρκέσει πολλές ώρες ως την πλήρη αποκατάσταση του δικτύου. Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται ποιοτικά η διάρκεια ολοκλήρωσης της συμβατικής διαδικασίας ΕΑΑΣ καθώς και τα στάδια αυτής [10].



Σχήμα 2.3: Στάδια μηχανισμού ΕΑΑΣ σε συμβατικό δίκτυο διανομής και ποιοτικό διάγραμμα αντιστοίχισης διάρκειας διακοπών παροχής πελατών.

Ειδικότερα όταν συμβεί ένα σφάλμα σε μία γραμμή ενός δικτύου διανομής, ο διακόπτης ισχύος (ΔΙ) της γραμμής θα ανοίξει αυτόματα, διακόπτοντας την παροχή σε όλο εύρος της γραμμής. Ο διαχειριστής του δικτύου ενημερώνεται για την ύπαρξη σφάλματος από τηλεφωνήματα καταναλωτών που υπέστησαν διακοπή ρεύματος και με αυτόν τον τρόπο γίνεται μία γενική εκτίμηση της θέσης του σφάλματος.

Στη συνέχεια, ο διαχειριστής στέλνει εξειδικευμένο προσωπικό στην τοποθεσία από όπου έλαβε τις τηλεφωνικές κλήσεις. Αφού το συνεργείο μεταβεί στην περιοχή, αναζητεί την ακριβή θέση του σφάλματος. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος, όπως [11]:

- I. **Εντοπισμός με βάση τους ενδείκτες σφάλματος.** Αν η γραμμή διαθέτει ενδείκτες σφάλματος ο εντοπισμός μπορεί να γίνει εποπτικά με τον έλεγχο των φωτεινών σηματοδοτών των ενδεικτών, οι οποίοι ενεργοποιούνται όταν διαρρέονται από ρεύμα σφάλματος.
- II. **Τμηματική τροφοδότηση της γραμμής.** Το συνεργείο επαναφέρει την παροχή στη γραμμή τμηματικά, ξεκινώντας από τον κύριο υποσταθμό και

απομονώνοντας κάθε φορά διαφορετικά τμήματα της γραμμής, έως ότου εντοπιστεί η περιοχή του σφάλματος.

- III. **Αναφορές καταναλωτών.** Οι καταναλωτές περιγράφουν το συμβάν του σφάλματος ως αυτόπτες μάρτυρες, υποδεικνύοντας το σημείο του σφάλματος.
- IV. **Εμπειρία προσωπικού.** Η προηγούμενη εμπειρία του συνεργείου επισκευής μπορεί να αποβεί χρήσιμη, για παράδειγμα, αν το συνεργείο έχει επισκευάσει βλάβη στην ίδια τοποθεσία κατά το παρελθόν.
- V. **Αναλυτική αναζήτηση.** Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στο εναέριο δίκτυο όταν καμία από τις παραπάνω προσπάθειες δεν τελεσφορήσει. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει εξέταση κάθε στύλου της περιοχής σφάλματος μέσω αναρρίχησης.

Αφού το συνεργείο εντοπίσει την τοποθεσία του σφάλματος, πραγματοποιεί τους κατάλληλους διακοπτικούς χειρισμούς και απομονώνει το εσφαλμένο τμήμα από το υπόλοιπο δίκτυο. Με το βήμα αυτό ολοκληρώνεται ο εντοπισμός και η απομόνωση του σφάλματος.

Στη συνέχεια πρέπει να αποκατασταθεί η παροχή στους καταναλωτές (εκτός του απομονωμένου τμήματος), οι οποίοι αποκόπηκαν κατά το άνοιγμα του ΔΙ της περιοχής. Το δίκτυο της γραμμής, ωστόσο, έχει ακτινική λειτουργία και η απομόνωση του εσφαλμένου τμήματος δημιούργησε μία περιοχή χωρίς πρόσβαση στον αρχικό υποσταθμό τροφοδότησης, κατάντη του σφάλματος. Επομένως, το κλείσιμο του ΔΙ δεν αρκεί για την ανατροφοδότηση όλων των υγιών φορτίων, παρά μόνο για τα φορτία ανάντη του σφάλματος, καθώς κατάντη η γραμμή είναι απομονωμένη από την παροχή. Για αυτό τον λόγο χρειάζεται να γίνει αναδιάταξη του δικτύου, ώστε να αποκατασταθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι καταναλωτές.

Η αναδιάταξη του δικτύου επιτυγχάνεται με την ύπαρξη κανονικά ανοικτών σημείων (ΚΑΣ) στο δίκτυο, τα οποία χωρίζουν κάθε βρόχο του δικτύου σε δύο ακτινικές γραμμές. Τα ΚΑΣ λοιπόν είναι γραμμές με διακόπτη, ο οποίος στην ομαλή λειτουργία του δικτύου είναι πάντα ανοικτός. Σε περίπτωση σφάλματος ο διακόπτης αυτός κλείνει, αν κριθεί απαραίτητο, παρέχοντας μία εναλλακτική διαδρομή για την τροφοδότηση αποκλεισμένων φορτίων, από τον ίδιο ή από άλλον υποσταθμό. Έτσι, το δίκτυο αναδιατάσσεται και επιτυγχάνεται η μερική του αποκατάσταση.

Το συνεργείο επισκευής μελετώντας λοιπόν την τοπολογία του δικτύου, επιλέγει τους κατάλληλους διακοπτικούς χειρισμούς, δημιουργώντας εφεδρικές διαδρομές για τη διανομή της ισχύος. Με το πέρας των επιλεγμένων αυτών διακοπτικών χειρισμών ολοκληρώνεται η διαδικασία της μερικής αποκατάστασης του δικτύου.

Στο σημείο αυτό απομένει να πραγματοποιηθεί η επισκευή του εσφαλμένου τμήματος της γραμμής από τους τεχνικούς, ώστε να αποκατασταθεί πλήρως η παροχή ισχύος στους καταναλωτές. Η επισκευή μπορεί να είναι εύκολη και άμεση, για παράδειγμα η απομάκρυνση κάποιου κλαδιού που βραχυκυκλώνει τις γραμμές ή πιο σύνθετη και χρονοβόρα, όπως η αντικατάσταση της μόνωσης και του καλωδίου.

Με την επιδιόρθωση της βλάβης, το απομονωμένο τμήμα είναι έτοιμο να ανατροφοδοτηθεί. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αντίστροφης διαδικασίας διακοπτικών χειρισμών που εφαρμόστηκαν κατά τη διάρκεια του μηχανισμού ΕΑΑΣ, ώστε το σύστημα να επανέλθει στη διάταξη πριν από το σφάλμα.

Έπειτα από όλα αυτά τα στάδια, η ισχύς αποκαθίσταται πλήρως, η διαδικασία ΕΑΑΣ ολοκληρώνεται και το δίκτυο διανομής συνεχίζει την ομαλή λειτουργία του.

2.5 ΕΚΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ, ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΡΙΚΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Ο μηχανισμός ΕΑΑΣ με συμβατικά μέσα είναι μία χρονοβόρα, δαπανηρή και ορισμένες φορές επικίνδυνη διαδικασία. Κάθε στάδιο μπορεί να διαρκέσει από μερικές ώρες έως και μέρες, αυξάνοντας σημαντικά τους χρόνους διακοπής παροχής του δικτύου. Η μεγάλη διάρκεια διακοπής παροχής, οδηγεί σε μεγάλες τιμές των δεικτών αξιοπιστίας ΔΜΣΔΣ και ΔΜΣΔΠ, θέτοντας την αξιοπιστία του δικτύου σε χαμηλά επίπεδα.

Από οικονομικής άποψης, αυτό σημαίνει περισσότερες χρηματικές απώλειες τόσο για τις εταιρίες παροχής όσο και για τους εμπορικούς και οικιακούς καταναλωτές, ενώ είναι εντονότερες και οι συνέπειες στην κοινωνική ζωή. Για τους λόγους αυτούς, είναι ανάγκη το δίκτυο να αναβαθμιστεί και να εκσυγχρονιστεί, έτσι ώστε να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία αντιμετώπισης των μόνιμων σφαλμάτων.

Η αυτοματοποίηση, λοιπόν, του ΔΔ πραγματοποιείται σήμερα από τις περισσότερες χώρες και αποτελεί συμφέρουσα τακτική για τους διαχειριστές του δικτύου [12], αλλά και το κοινωνικό σύνολο. Η αναβάθμιση αυτή ελαχιστοποιεί τη διάρκεια των σταδίων του μηχανισμού ΕΑΑΣ σε πολύ μεγάλο βαθμό, με αποτέλεσμα η μερική αποκατάσταση του δικτύου να επιτυγχάνεται μέσα σε δευτερόλεπτα, και η αξιοπιστία του δικτύου να βελτιώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό.

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΝΔΕΙΚΤΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αναβάθμιση και η αυτοματοποίηση των δικτύων διανομής με την εγκατάσταση ενδεικτών σφάλματος, τηλεχειριζόμενων διακοπών και κατάλληλου δικτύου επικοινωνιών, καθιστά εφικτό τον εντοπισμό και την απομόνωση ενός σφάλματος σε πολύ μικρό χρόνο, αυξάνοντας την αξιοπιστία του δικτύου. Η εγκατάσταση αυτού του είδους του εξοπλισμού αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά βήματα για την αναβάθμιση των υφιστάμενων δικτύων διανομής σε ευφυή δίκτυα.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται με ποιον τρόπο επιτυγχάνεται η διαδικασία του εντοπισμού και της απομόνωσης ενός σφάλματος με τη χρήση ενδεικτών σφάλματος, παλμικών διακοπών αυτόματης επαναφοράς και τηλεχειριζόμενων διακοπών φορτίου. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στους ενδείκτες σφάλματος, οι οποίοι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε όλα τα στάδια της διαδικασίας εντοπισμού και απομόνωσης σφάλματος. Επιπλέον, προτείνεται μια μέθοδος για την απομόνωση της περιοχής που έχει υποστεί ένα σφάλμα από το υπόλοιπο δίκτυο με χρήση ενδεικτών σφάλματος και γίνεται περιγραφή του δικτύου επικοινωνίας, με το οποίο επικοινωνεί το δίκτυο διανομής.

3.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

3.2.1 Ενδείκτες σφάλματος απομακρυσμένης λειτουργίας

Μετά την ανίχνευση ενός σφάλματος ακολουθεί ο εντοπισμός και η απομόνωσή του. Για να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία αυτή, στα δίκτυα διανομής, εγκαθίστανται ενδείκτες διέλευσης σφάλματος (Fault Passage Indicators, FPIs) ή, πιο απλά, ενδείκτες σφάλματος (ΕΣ), που επιτρέπουν την ευκολότερη εποπτεία του δικτύου και τον άμεσο εντοπισμό του σφάλματος [13].

Οι ΕΣ με απομακρυσμένη λειτουργία (Remote FPIs) είναι συσκευές που τοποθετούνται σε στρατηγικά τμήματα των γραμμών διανομής ΜΤ και υποδεικνύουν αν η γραμμή κατάντη του σημείου αυτού διαπερνάται από ρεύμα σφάλματος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του συνεχούς ελέγχου, από τη συσκευή, της τάσης και της ροής ρεύματος στη γραμμή.

Οποιαδήποτε αύξηση στο ρεύμα σε συνδυασμό με απουσία τάσης οδηγεί τη συσκευή σε ενεργοποίηση. Συγκεκριμένα ο ενδείκτης απομακρυσμένης λειτουργίας ειδοποιεί για την παρουσία σφάλματος οπτικά μέσω ενός φωτεινού σηματοδότη, ενώ μέσω ραδιοκυμάτων ανταλλάσσει τις απαραίτητες πληροφορίες με το σύστημα επικοινωνίας, ενημερώνοντας το κεντρικό σύστημα ελέγχου (ΚΣΕ).

Η περιοχή επιτήρησης των ΕΣ βρίσκεται μεταξύ του διακόπτη ισχύος (ΔΙ) και του υπόλοιπου τμήματος της γραμμής. Ελέγχοντας επομένως μια γραμμή κατά τη φορά του ρεύματος σφάλματος, παρατηρείται ότι το σφάλμα θα βρίσκεται πάντα μεταξύ του τελευταίου αναμένου και του πρώτου σβηστού ΕΣ. Συνεπώς, σε περίπτωση σφάλματος, θα ενεργοποιηθούν όλοι οι ενδείκτες μεταξύ του διακόπτη ισχύος και του σφάλματος, ειδοποιώντας παράλληλα το ΚΣΕ για την αλλαγή της κατάστασής τους.

3.2.1.1 Προδιαγραφές λειτουργίας ενδεικτών σφάλματος

Η μέτρηση για την ανίχνευση σφάλματος έγκειται σε δύο παραμέτρους: το μέγεθος του ρεύματος σφάλματος και το χρονικό παράθυρο μέτρησης. Ο ενδείκτης θα πρέπει να μπορεί να ανιχνεύει με βάση τα παρακάτω κριτήρια [14]:

- Για την ανίχνευση ισχυρών ρευμάτων σφάλματος, τα οποία κατά κανόνα είναι σφάλματα φάσης, θα πρέπει να ενεργοποιείται όταν το φασικό ρεύμα υπερβεί ένα όριο, σε απόλυτη τιμή, για ένα σταθερό διάστημα της τάξης των 20 με 30 ms. Η απόλυτη τιμή αυτού του ορίου θα πρέπει να διαμορφώνεται σε 8 διαφορετικές τιμές μεταξύ 100 και 800 A,
- Για την ανίχνευση χαμηλών ρευμάτων σφάλματος, τα οποία κατά κανόνα είναι σφάλματα γης, θα πρέπει να ενεργοποιείται όταν η αύξηση που ανιχνεύει στο φασικό ρεύμα σε ένα διάστημα της τάξης των 20 με 30 ms, υπερβεί ένα σχετικό όριο. Το όριο αυτό θα πρέπει να διαμορφώνεται σε τουλάχιστον 6 διαφορετικές τιμές μεταξύ των 6 και 80 A.

Παράλληλα, ο ΕΣ διαθέτει επιλεκτική λειτουργία, ώστε να μην αντιδρά σε κάποια ξαφνική μεταβολή (αύξηση / μείωση) του ρεύματος που δεν οφείλεται σε σφάλμα ούτε και σε εισροή μαγνητικά διεγερμένων ρευμάτων, τα οποία δημιουργούνται κατά την ενεργοποίηση της γραμμής.

3.2.1.2 Επαναφορά ενδείκτη σφάλματος

Μετά την ενεργοποίησή του, ο ενδείκτης σφάλματος θα συνεχίσει να σηματοδοτεί έως ότου [15]:

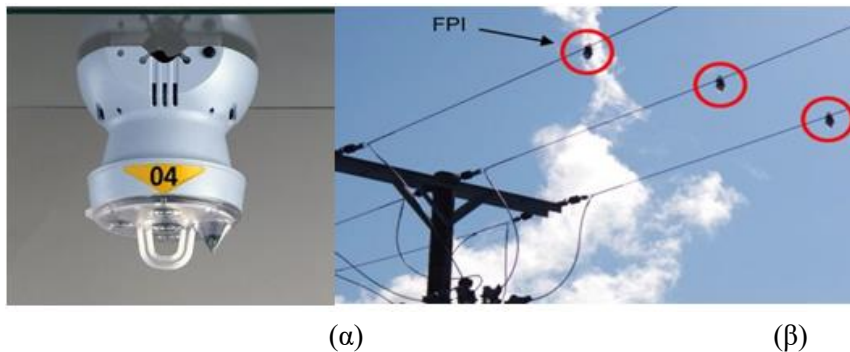
- Παρέλθει ένα χρονικό διάστημα προκαθορισμένο από τον χρήστη, 1 έως 4 ώρες αφότου συμβεί το σφάλμα (αυτόματη επαναφορά).
- Η τάση επανέλθει στα κανονικά επίπεδα. Απαιτείται μία καθυστέρηση 10 δευτερολέπτων, ώστε να αποφευχθούν λανθασμένες επαναφορές λόγω μικρής διάρκειας επανενεργοποίησης του κυκλώματος κατά τη διάρκεια των διακοπτικών αλλαγών (αυτόματη επαναφορά).
- Χρησιμοποιηθεί το πλήκτρο επαναρύθμισης (χειροκίνητη επαναφορά).
- Λάβει απομακρυσμένα εντολή από το κεντρικό σύστημα ελέγχου.

Επισημαίνεται πως η επαναφορά του ενδείκτη με βάση την τιμή του ρεύματος δεν είναι εφαρμόσιμη, καθώς κατά την αποκατάσταση της τάσης στα επίπεδα της MT, η τιμή του ρεύματος ενδέχεται να είναι αρκετά χαμηλή.

3.2.1.3 Τύποι ενδεικτών σφάλματος

Στο εμπόριο κυκλοφορούν διάφοροι τύποι ΕΣ, οι οποίοι χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, ως εξής [13]:

- i) **Εναέριοι ΕΣ:** Οι συσκευές εδώ αναλαμβάνουν τον έλεγχο των γραμμών ΜΤ σε εναέρια ΔΔ. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται οι Αποσπώμενοι ΕΣ (Clip On FPI), οι επί στύλου ΕΣ (Pole mounted FPI) και οι Κατευθυντήριοι ΕΣ (Directional Overhead FPI).
 - Οι **αποσπώμενοι** ΕΣ τοποθετούνται ένας ανά φάση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1(β) και ανιχνεύουν την ένταση του σφάλματος με εσωτερικό αισθητήρα ηλεκτρομαγνητικού (ΗΜ) πεδίου. Εφόσον η τιμή είναι μεγαλύτερη της ρύθμισης του ΕΣ σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, θα ενεργοποιηθεί, τόσο για σφάλματα φάσης όσο και για σφάλματα γης.



Σχήμα 3.1: Αποσπώμενος ΕΣ: (α) μόνος του, (β) επί τριφασικής γραμμής διανομής.

- Οι **επί στύλου** ΕΣ είναι τοποθετημένοι στους στύλους των εναέριων γραμμών μεταφοράς και ένα δείγμα τους φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Επί στύλου ΕΣ.

- Οι **κατευθυντήριοι** ΕΣ (Σχήμα 3.3) αφορούν δίκτυα με μη-γειωμένο ουδέτερο, όπου τα χωρητικά ρεύματα μπορεί να είναι μεγάλα. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρειάζεται να διακρίνεται η κατεύθυνση του ρεύματος σφάλματος.

Ο ΕΣ εδώ διαθέτει 3 αισθητήρες:

1. Αισθητήρα παραμένουσας τάσης.
2. Αισθητήρα ΗΜ πεδίου σε οριζόντια θέση για σφάλματα γης.
3. Αισθητήρα ΗΜ πεδίου σε κάθετη θέση για σφάλματα φάσης.



Σχήμα 3.3: Κατευθυντήριος ΕΣ.

Σημείωση: Και στις τρεις περιπτώσεις οι συσκευές είναι εφοδιασμένες είτε με μπαταρία λιθίου, είτε με επαναφορτιζόμενη μπαταρία φωτοηλεκτρικού κυττάρου.

- ii) Υπόγειοι ΕΣ: αυτού του τύπου οι ΕΣ αφορούν συστήματα άμεσα γειωμένα ή σε ορισμένες περιπτώσεις και απομονωμένα. Διαθέτουν λειτουργία αμπερομέτρου και παίρνουν τις μετρήσεις από αισθητήρες σε κάθε φάση.

Υπάρχει δυνατότητα να ρυθμιστεί :

- το επίπεδο του ρεύματος σφάλματος (φάσης ή γης)
- η διάρκεια του ρεύματος σφάλματος (π.χ. 50 ms)
- η φωτεινή σήμανση ώστε να μεταδίδεται και σε κάποια εξωτερική λάμπα.

Οι υπόγειοι ΕΣ (Σχήμα 3.4) είτε διαθέτουν εξωτερική τροφοδοσία (τυπικά 230 V ac), είτε όχι και χρησιμοποιούν μπαταρίες. Σε αυτήν την κατηγορία χρησιμοποιούνται κατευθυντήριοι ΕΣ που αναγνωρίζουν σφάλματα φάσης στη γραμμή ή τον ζυγό και σφάλματα γης.



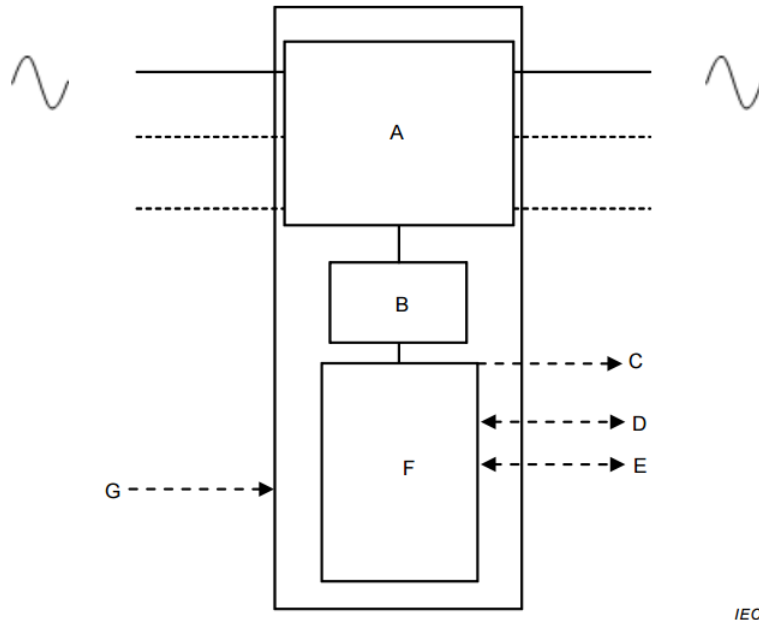
Σχήμα 3.4: Υπόγειος ΕΣ.

3.2.1.4 Γενική δομή και λειτουργία ενδεικτών σφάλματος

Οι προαναφερόμενοι ΕΣ διαθέτουν λειτουργία απομακρυσμένης ένδειξης μέσω ραδιοκυμάτων, ώστε να μην υπάρχουν καθυστερήσεις στον εντοπισμό και την απομόνωση ενός σφάλματος. Μπορούν να ανιχνεύσουν κάθε τύπο σφάλματος (φάσης και γης) και συχνά είναι προγραμματισμένοι με αλγόριθμο di/dt , ελέγχοντας για τυχόν αυξήσεις ρεύματος στην πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, καταγράφουν συνεχώς τις μετρήσεις ρεύματος (μέση, ελάχιστη, μέγιστη) και κάθε λεπτό ελέγχουν την κατάσταση της ΜΤ (παρουσία / απουσία). Η

επιτήρηση των καταγεγραμμένων δεδομένων και της λειτουργίας των ΕΣ γίνεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή ασύρματα συνδεδεμένο στην τοπική μονάδα ελέγχου, που θα περιγραφεί αναλυτικότερα παρακάτω και είναι συμβατή με το πρωτόκολλο επικοινωνίας SCADA.

Η γενική αρχιτεκτονική ενός ενδείκτη σφάλματος φαίνεται στο Σχήμα 3.5, όπου [16]:



Σχήμα 3.5: Γενική αρχιτεκτονική ενός ΕΣ.

- **A** είναι ο αισθητήρας ρεύματος ή/και τάσης, ο οποίος έχει δυνατότητα ελέγχου 1 έως 3 φάσεων.
- **B** είναι ο μηχανισμός για τη μεταφορά των σημάτων μεταξύ των αισθητήρων και των ηλεκτρονικών.
- **C** είναι οι τοπικές ενδείξεις (λάμπες, LED).
- **D** είναι οι αναλογικές, ψηφιακές ή/και επικοινωνιακές εισοδοί/έξοδοι για απομακρυσμένη επικοινωνία/εντολές (ενσύρματα ή ασύρματα).
- **E** είναι οι συνδέσεις στο πεδίο της συσκευής.
- **G** είναι το σημείο που γίνεται η τροφοδότηση.

Σημειώνεται ότι δεν είναι απαραίτητο να περιλαμβάνονται όλα τα παραπάνω σε έναν ΕΣ, ωστόσο είναι υποχρεωτικό να υπάρχει μία τουλάχιστον λειτουργία εκ των C και D.

3.2.2 Παλμικός διακόπτης αυτόματης επαναφοράς

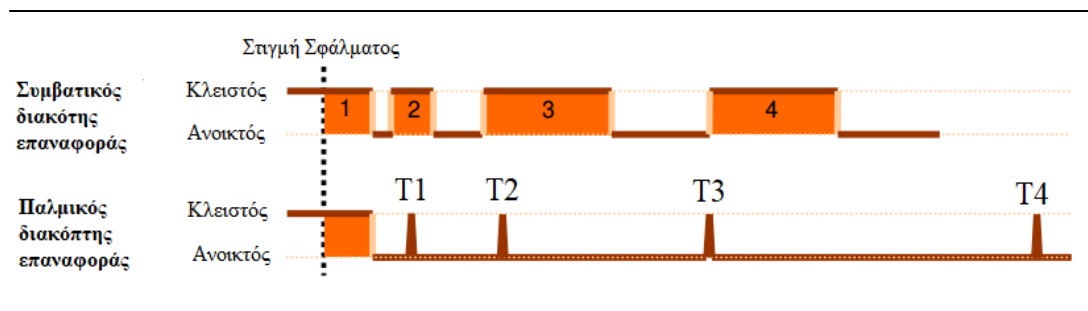
Η τεχνολογία διακοπτικής επαναφοράς μέσω παλμού, βασίζεται στις τελευταίες εξελίξεις του τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος και των υπολογιστικών τεχνικών. Σε αντίθεση με τον συμβατικό διακόπτη αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ), που χρησιμοποιείται ευρέως έως σήμερα στα δίκτυα διανομής και επιχειρεί την επαναφορά του κυκλώματος μέσω διακοπτικών ενεργειών, ο παλμικός διακόπτης αυτόματης επαναφοράς (ΠΔΑΕ) στέλνει έναν κρουστικό παλμό για να εξακριβώσει αν πρόκειται για παροδικό ή μόνιμο σφάλμα [17].

Αυτή η καινοτομία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση του μόνιμου σφάλματος, όπου το κλείσιμο του διακόπτη ακόμα και σε δοκιμαστικό επίπεδο είναι ικανό να απελευθερώσει αξιοσημείωτα ποσά ενέργειας στην περιοχή του σφάλματος, προκαλώντας προβλήματα και διακυμάνσεις στην τάση του συστήματος. Ο ΠΔΑΕ λοιπόν επιβεβαιώνει αν το σφάλμα στη γραμμή έχει ξεπεραστεί, στέλνοντας έναν τυποποιημένο κρουστικό παλμό ρεύματος της τάξεως των 5 ms, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται δραστικά η ενέργεια που αναπτύσσεται στα στοιχεία του κυκλώματος ($I^2 \cdot t$).

Ειδικότερα τη στιγμή που συμβαίνει ένα σφάλμα στο ΔΔ, ο διακόπτης επαναφοράς που επιτηρεί την περιοχή θα ανοίξει μόλις το αντιληφθεί. Αρχικά, τόσο ο συμβατικός όσο και ο παλμικός ΔΑΕ ανοίγουν στιγμιαία. Στη συνέχεια διαφοροποιείται η λειτουργία των δύο, καθώς ο συμβατικός ΔΑΕ επιχειρεί γρήγορη επαναφορά μέσω ζεύξης ενώ ο ΠΔΑΕ αποστέλλει τον παλμό ελέγχου που αναφέρθηκε παραπάνω. Εφόσον το σφάλμα δεν έχει παρέλθει ακόμη, το κλείσιμο του συμβατικού ΔΑΕ, παρότι ταχύ, καταπονεί πολύ περισσότερο το κύκλωμα επιτρέποντας τη διέλευση ρεύματος σφάλματος, σε αντίθεση με τον ΠΔΑΕ.

Ο έλεγχος συνεχίζεται με ένα άνοιγμα διαρκείας (τάξης δευτερολέπτων) και για τους δύο διακόπτες, το οποίο στην περίπτωση του συμβατικού ΔΑΕ ακολουθείται από επαναφορά διάρκειας 5 s, ενώ για τον ΠΔΑΕ από έναν ακόμα παλμό ελέγχου μηδαμινής διάρκειας. Αν το σφάλμα παραμένει, ο συμβατικός ΔΑΕ ανοίγει παρατεταμένα για μερικά δευτερόλεπτα και επιχειρεί επαναφορά διάρκειας 5 ή 10 s για τρίτη φορά την ίδια στιγμή που ο ΠΔΑΕ στέλνει τον τρίτο παλμό. Εφόσον με το πέρας αυτών των ενεργειών το σφάλμα δεν έχει απομακρυνθεί, πρόκειται για μόνιμο σφάλμα και οι διακόπτες ανοίγουν πλέον μόνιμα.

Συμπερασματικά, ο ΠΔΑΕ μπορεί να υλοποιεί πολλαπλούς ελέγχους για να διαπιστώσει την παρουσία σφάλματος, συμβάλλοντας σημαντικά στην ανίχνευσή του. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως διακόπτης ισχύος, όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν, είτε ως διακόπτης διασύνδεσης και αφορά εναέριες γραμμές διανομής. Τα στοιχεία του συστήματος πρακτικά καταπονούνται μόνο κατά τη στιγμή που συμβαίνει το σφάλμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού, τη μείωση των ζημιών και τη βελτίωση της ασφάλειας λειτουργίας του συστήματος και της ποιότητας εξυπηρέτησως.



Σχήμα 3.6: Συγκριτικό γράφημα λειτουργίας διακοπών αυτόματης επαναφοράς.

3.2.3 Τηλεχειριζόμενοι διακόπτες (ΤΔ)

Ένας ακόμη τρόπος να μειωθεί ο χρόνος αποκατάστασης λειτουργίας των δικτύων διανομής είναι με τη χρήση τηλεχειριζόμενων διακοπών (ΤΔ) [18]. Η εγκατάσταση ΤΔ

φορτίου σε κλάδους που αποτελούν κανονικά κλειστά σημεία (ΚΚΣ) και κανονικά ανοικτά σημεία (ΚΑΣ) του δικτύου, επιτρέπει τη μείωση του χρόνου απομόνωσης και αποκατάστασης ενός σφάλματος αντίστοιχα, διότι οι διακοπτικοί χειρισμοί των διαδικασιών αυτών επιτελούνται πλέον άμεσα.

Το υψηλό κόστος των ΤΔ καθιστά την αναβάθμιση όλων των διακοπτών φορτίου σε τηλεχειριζόμενους αρκετά δαπανηρή. Η επιλογή των σημείων που θα τοποθετηθούν οι ΤΔ πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιστοποιηθεί ο συμβιβασμός μεταξύ κόστους και οφέλους [19]. Ωστόσο, κρίνεται απαραίτητη η χρήση τους στα ΚΑΣ του δικτύου διανομής που θα χρησιμοποιηθούν για την αποκατάσταση σε περίπτωση σφάλματος.

3.2.3.1 Μηχανισμός λειτουργίας ΤΔ

Ο ΤΔ φορτίου μπορεί να λειτουργεί από απόσταση μέσω εντολών από το ΚΣΕ, αλλά και τοπικά μέσω μονωτικού ακοντίου ή πίνακα ελέγχου [20]. Ο μηχανισμός λειτουργίας του διακόπτη διασφαλίζει την ταχεία απόζευξη και ζεύξη του, με ταχύτητα μετακίνησης των επαφών ανεξάρτητη από τον τρόπο ενέργειας του χειριστή και οι διακοπτικοί χειρισμοί πραγματοποιούνται με τη βοήθεια ενός κινητήρα.

Η μόνωση του ΤΔ φορτίου μπορεί να είναι τύπου SF6 ή κενού και ο διακόπτης είναι εξοπλισμένος με:

- 1) Έναν κινητήρα για να εκτελεί τις λειτουργίες άνοιγμα/κλείσιμο.
- 2) Επαφές που υποδεικνύουν την κατάσταση (θέση) του διακόπτη, στερεωμένες απευθείας στον μηχανισμό λειτουργίας.
- 3) Επαφές χαμηλής πίεσης για τον διακόπτη με SF6.
- 4) Επαφές λαβής ασφάλισης.
- 5) Δρομολογητή (router) GSM/GPRS για επικοινωνία με το ΚΣΕ.

Η επικοινωνία του ΤΔ με το ΚΣΕ γίνεται μέσω μιας απομακρυσμένης μονάδας ελέγχου (ΑΜΕ), που είναι συμβατή με το σύστημα έλεγχου και παρακολούθησης SCADA του παρόχου.

Παρατηρείται λοιπόν ότι οι ΤΔ βελτιώνουν τους χρόνους αντίδρασης του συστήματος στην περίπτωση σφάλματος και κατά συνέπεια μειώνουν τον χρόνο διακοπής παροχής, αυξάνοντας τη συνολική αξιοπιστία του δικτύου.

3.3 ΔΙΚΤΥΟ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

Η ανάπτυξη του δικτύου επικοινωνίας αποτελεί ένα από τα κυριότερα ζητήματα, όσον αφορά τον αυτοματισμό του συστήματος διανομής. Η διαθεσιμότητα των στοιχείων κατάστασης των ΕΣ είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη σωστή και αποτελεσματική απομόνωση του σφάλματος. Σε περίπτωση που μερικές καταστάσεις των ΕΣ χαθούν λόγω επικοινωνιακής αστοχίας, είναι πιθανό να γίνει λανθασμένη ταυτοποίηση του εσφαλμένου τμήματος της γραμμής, εξαιτίας της έλλειψης εφεδρείας των καταστάσεων αυτών [21].

Υπάρχουν παραπάνω από ένας τρόποι για να δομηθεί το δίκτυο επικοινωνίας στα ΔΔ. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται η χρήση απομακρυσμένων μονάδων ελέγχου (ΑΜΕ),

ασύρματης επικοινωνίας μέσω GSM/GPRS, εξυπηρετητών (server) και συστήματος SCADA, τα οποία αναλύονται στις επόμενες ενότητες.

3.3.1 Σύστημα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA)

Ένα σύστημα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA) δίνει τη δυνατότητα στον χειριστή να εποπτεύει και να ελέγχει διεργασίες οι οποίες βρίσκονται καταναμημένες μεταξύ διάφορων απομακρυσμένων σημείων [22]. Ένα σύστημα SCADA δεν αποτελεί πλήρες σύστημα ελέγχου, αλλά επικεντρώνεται περισσότερο στην εποπτεία. Ως τέτοιο, είναι καθαρά ένα πακέτο λογισμικού, που τοποθετείται πάνω στο υλικό με το οποίο αλληλεπιδρά.

Η λειτουργία του συστήματος περιλαμβάνει την ακόλουθη διαδικασία: συλλέγει πληροφορίες, τις στέλνει σε ένα κεντρικό σημείο επεξεργασίας, εκτελεί την απαραίτητη ανάλυση και έλεγχο και τέλος παρουσιάζει την πληροφορία σε διάφορες οθόνες χειρισμού και εποπτείας σε πραγματικό χρόνο ή κατά απαίτηση.

Ο έλεγχος είναι είτε αυτόματος, είτε ενεργοποιείται ύστερα από εντολή του χειριστή. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά δίνουν τη δυνατότητα στους χειριστές να ελέγχουν και να παρατηρούν διαδικασίες σε μεγάλο γεωγραφικό εύρος, από μια κεντρική τοποθεσία. Όταν λοιπόν μια διαδικασία ή ένα σύστημα καλύπτει μια μεγάλη γεωγραφική έκταση όπως είναι ένα ΔΔ, τα πλεονεκτήματα ενός SCADA γίνονται αρκετά πιο ορατά. Αποφεύγοντας την αποστολή προσωπικού σε διάφορα σημεία για ρυθμίσεις και μετρήσεις, η εποπτεία και ο έλεγχος του συστήματος επιτελούνται από μια τοποθεσία και κυρίως με μεγάλες ταχύτητες απόκρισης.

3.3.2 Παγκόσμιο σύστημα κινητής επικοινωνίας (GSM)

Το παγκόσμιο σύστημα κινητής επικοινωνίας (Global System for Mobile Communications–GSM) είναι ένα κυψελοειδές ψηφιακό σύστημα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς (2G) που κάνει χρήση ΗΜ σημάτων, μέσω της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης με διαχωρισμό του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων, σε έναν αριθμό καναλιών και τη διαίρεση αυτών σε χρονοθυρίδες για τη μετάδοση σημάτων [23]. Με βάση το πρότυπο GSM αναπτύχθηκαν τεχνολογίες όπως η General Packet Radio Service που είναι μια μη φωνητική υπηρεσία η οποία επιτρέπει την αποστολή και λήψη δεδομένων μέσω των δικτύων κινητής τηλεφωνίας GSM, επιτρέποντας τη σύγκλιση κινητής τηλεφωνίας και διαδικτύου.

3.3.3 Απομακρυσμένη μονάδα ελέγχου (Remote Terminal Unit)

Η συσκευή που επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ του κεντρικού υπολογιστικού σταθμού, στον οποίο είναι εγκατεστημένο το σύστημα SCADA και των αισθητήρων του συστήματος, ονομάζεται απομακρυσμένη μονάδα ελέγχου (ΑΜΕ). Κάθε τέτοια μονάδα περιλαμβάνει :

- Μικροϋπολογιστή, ο οποίος περιέχει έναν μικροεπεξεργαστή (CPU) και μία μνήμη αποθήκευσης του προγράμματος και των δεδομένων (ROM, RAM).
- Ρολόι πραγματικού χρόνου, για την καταγραφή του χρόνου λήψης κάθε μέτρησης.

- Ψηφιακές εισόδους, που εξομοιώνουν τη λειτουργία ενός διακόπτη δύο θέσεων.
- Αναλογικές εισόδους.
- Αναλογικές εξόδους.
- Διαμορφωτή – αποδιαμορφωτή, για ανταλλαγή δεδομένων με τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές (HY).
- Μονάδα τροφοδοσίας.

Σκοπός της ΑΜΕ είναι να συλλέγει τα απαραίτητα δεδομένα του δικτύου, να αποθηκεύει τις μετρήσεις και να επικοινωνεί με την κεντρική τερματική μονάδα, δηλαδή το ΚΣΕ σε τακτά χρονικά διαστήματα, μεταφέροντας τις αποθηκευμένες μετρήσεις και λαμβάνοντας σχετικές εντολές.

3.3.4 Εξυπηρετητής

Ο εξυπηρετητής (server) είναι ένα υπολογιστικό σύστημα το οποίο έχει κεντρικό ρόλο σε ένα δίκτυο επικοινωνίας, παρέχοντας βασικές υπηρεσίες στα μέλη που απαρτίζουν το δίκτυο αυτό [23]. Βασική λειτουργία ενός εξυπηρετητή (ή διακομιστή) είναι η οργάνωση και ο έλεγχος του δικτύου, καθώς και η διαχείριση των δεδομένων του. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του μοντέλου πελάτη – εξυπηρετητή, το οποίο συντονίζει την ανταλλαγή δεδομένων μέσα από ένα σύνολο κανόνων που διέπουν την επικοινωνία.

3.3.5 Λειτουργία δικτύου επικοινωνίας σε δίκτυα διανομής

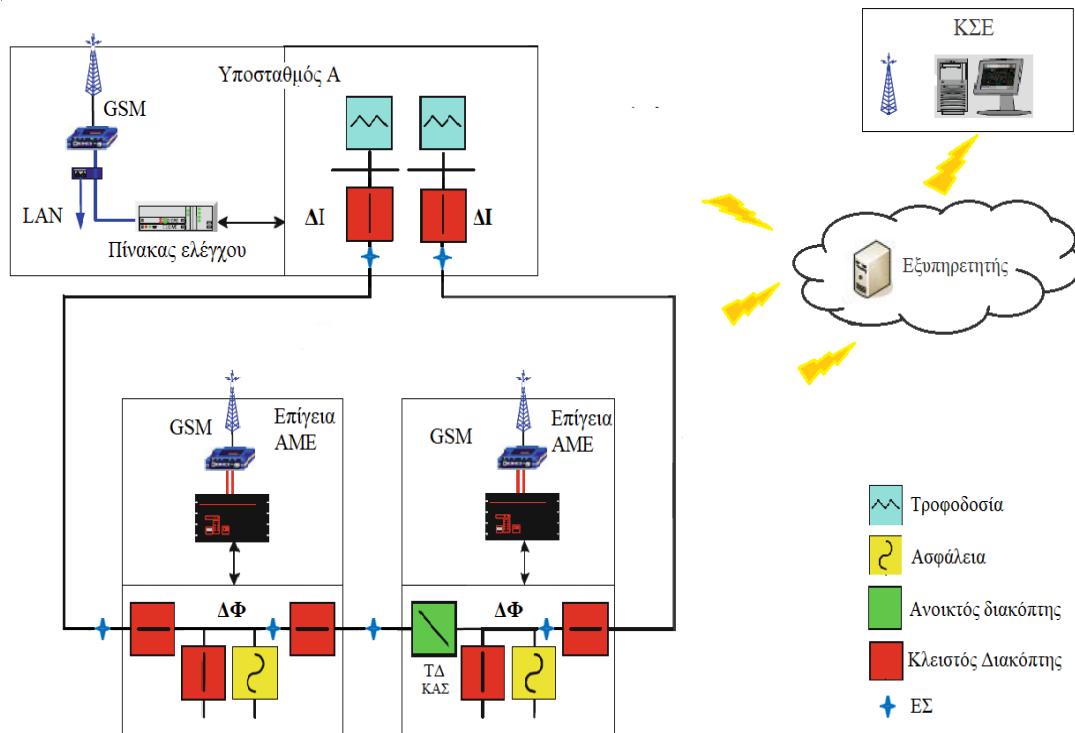
Το δίκτυο επικοινωνίας που αναπτύσσεται σε ένα αυτοματοποιημένο ΔΔ, έχει ως στόχο τον άμεσο, συνεχή και αποτελεσματικό έλεγχο του δικτύου. Υπάρχουν πολλοί τρόποι υλοποίησης ενός τέτοιου δικτύου, τόσο από άποψης μοντέλου ελέγχου όσο και από επιλογή συσκευών.

Στην προκειμένη περίπτωση, μόλις συμβεί ένα σφάλμα και επιβεβαιωθεί πως είναι μόνιμο, το ρεύμα σφάλματος θα ενεργοποιήσει ένα πλήθος ΕΣ [24]. Με το που ανιχνεύσει το σφάλμα, ο ΕΣ θα ενεργοποιήσει τη φωτεινή του ένδειξη για 1 δευτερόλεπτο και θα μεταφερθεί σήμα στην ΑΜΕ.

Η ΑΜΕ θα αντιληφθεί το σήμα εισόδου της, αποθηκεύοντας ένα αρχείο καταγραφής στη μνήμη της με χρονικό προσδιορισμό που παίρνει τιμή από το εσωτερικό ρολόι της συσκευής. Έπειτα, ξεκινά μια αποστολή δεδομένων προς τον εξυπηρετητή μέσω GSM δικτύου, ο οποίος κάνει λήψη όλων των αποθηκευμένων συμβάντων από τη μνήμη της ΑΜΕ, καταχωρώντας τα δεδομένα σε μια βάση δεδομένων.

Στη συνέχεια, ο εξυπηρετητής ενημερώνει το σύστημα SCADA στο ΚΣΕ για την κατάσταση των ΕΣ. Συνεπώς οι μηχανικοί στο ΚΣΕ διαθέτουν τις πληροφορίες που χρειάζονται, ώστε να έχουν την απαραίτητη εποπτεία του συμβάντος για να αποκλείσουν την περιοχή σφάλματος και να αποκαταστήσουν την παροχή στους περισσότερους καταναλωτές, μέσα σε λίγα μόνο λεπτά. Αυτό συμβαίνει με τον τηλεχειρισμό των ΔΦ, ύστερα από εντολή του ΚΣΕ στις αντίστοιχες ΑΜΕ, οι οποίες μέσω μηχανών οδήγησης (κινητήρες) επιτελούν τις καθορισμένες διακοπτικές ενέργειες. Με το πέρας του σταδίου της μερικής αποκατάστασης, αποστέλλεται συνεργείο επισκευής στο σημείο του σφάλματος για την ολική αποκατάσταση

του δικτύου. Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται συνοπτικά η λειτουργία του δικτύου επικοινωνίας που περιγράφηκε παραπάνω [25].



Σχήμα 3.7: Γενική τοπολογία δικτύου επικοινωνίας.

3.4 ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Ο εντοπισμός και η απομόνωση του σφάλματος αποτελούν τα δύο πρώτα βήματα για την αποκατάσταση λειτουργίας του ΔΔ ύστερα από ένα σφάλμα. Με την αυτοματοποίηση του ΔΔ δίνεται η δυνατότητα απομόνωσης του σφάλματος μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα, το οποίο συνεπάγεται αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου.

Η γενική ιδέα της διαδικασίας του εντοπισμού και απομόνωσης παραμένει ακριβώς ίδια με τα μερικώς αυτοματοποιημένα δίκτυα. Ωστόσο, η συμμετοχή του ανθρώπινου παράγοντα στη διαδικασία είναι ελάχιστη, λόγω του αναβαθμισμένου εξοπλισμού και του συστήματος επικοινωνίας, ενώ πλέον υπάρχει διαρκής έλεγχος και εποπτεία της λειτουργίας του συστήματος.

3.4.1 Εντοπισμός σφάλματος

3.4.1.1 Ανίχνευση

Το πρώτο βήμα αφότου συμβεί ένα σφάλμα είναι να ανιχνευθεί από το δίκτυο [26]. Αυτό συμβαίνει μέσω του διακόπτη ισχύος στον κύριο υποσταθμό και για την ακρίβεια, μέσω του ενσωματωμένου ηλεκτρονόμου προστασίας που διαθέτει. Μόλις ο ηλεκτρονόμος

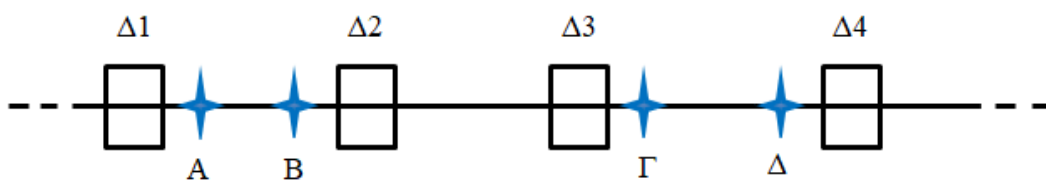
ανιχνεύσει το σφάλμα, ειδοποιεί με σήμα τον ΔΙ, ο οποίος ανοίγει, τερματίζοντας τόσο τις συνέπειες του σφάλματος στην περιοχή, όσο και το σήμα σφάλματος από τον ηλεκτρονόμο. Ο ΔΙ θα παραμείνει ανοικτός, διότι εξετάζεται η περίπτωση του μόνιμου σφάλματος. Αυτές οι συνθήκες αποτελούν την αρχική κατάσταση του αλγορίθμου αυτο-αποκατάστασης του δικτύου.

Στη συνέχεια, η απομακρυσμένη μονάδα ελέγχου της γραμμής στέλνει τα δεδομένα που έχει συλλέξει στο κεντρικό σύστημα ελέγχου, ώστε να υπάρξει μια επισκόπηση της κατάστασης του δικτύου. Τα δεδομένα αυτά έχουν να κάνουν με τις θέσεις των διακοπών φορτίου και την κατάσταση λειτουργίας των ενδεικτών σφάλματος. Μόλις ολοκληρωθεί η συλλογή των δεδομένων, τελειώνει η φάση της ανίχνευσης και ξεκινά ο εντοπισμός του σφάλματος.

3.4.1.2 Μέθοδος μελών σφάλματος

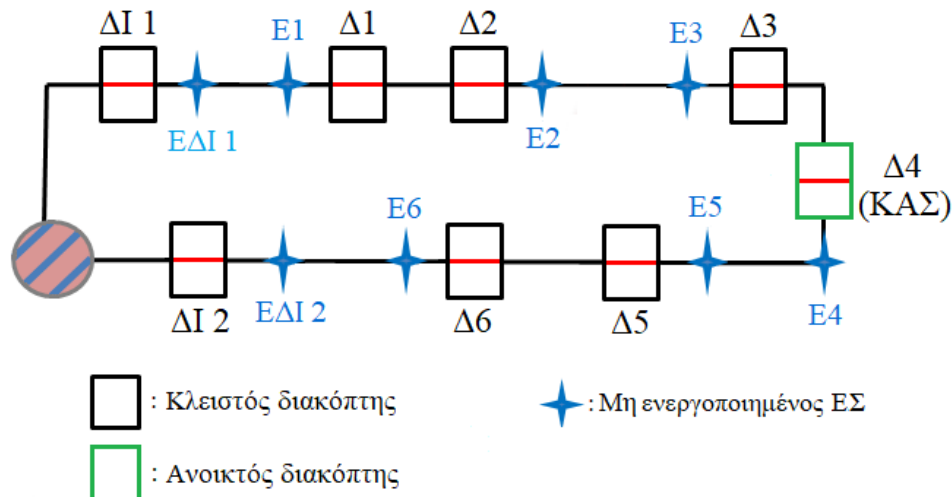
Ο εντοπισμός του σφάλματος στηρίζεται στη μέθοδο των μελών σφάλματος [27]. Ως μέλος σφάλματος (ΜΣ) μπορεί να χαρακτηριστεί ένας ΔΦ ή ένας ΔΙ εκατέρωθεν του σφάλματος. Σε κάθε τέτοιο διακόπτη είναι αντιστοιχισμένος ένας ΕΣ, που θεωρείται ως ο προσωπικός του ΕΣ (ΠΕΣ). Οι ΕΣ στα αριστερά και δεξιά του αποτελούν τον αριστερό ΕΣ (ΑΕΣ) και τον δεξιό ΕΣ (ΔΕΣ) αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, ο ΑΕΣ αποτελεί τον ΠΕΣ του διακόπτη στα αριστερά στον οποίο είναι αντιστοιχισμένος, ενώ ο ΔΕΣ αποτελεί τον ΠΕΣ του διακόπτη στα δεξιά στον οποίο είναι αντιστοιχισμένος. Ακολουθεί ένα παράδειγμα για να γίνει περισσότερο κατανοητός ο ονομαστικός προσδιορισμός των ΕΣ.

Έστω ένα τμήμα μίας γραμμής του ΔΔ με τέσσερις διαδοχικούς ΔΦ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Όσον αφορά τον Δ2, ο ΠΕΣ του είναι ο Β, ο ΑΕΣ του είναι ο Α και ο ΔΕΣ του είναι ο Γ. Παράλληλα όσον αφορά τον Δ3, ο ΠΕΣ του είναι ο Γ, ο ΑΕΣ του είναι ο Β και ο ΔΕΣ του είναι ο Δ. Σε κάθε διακόπτη δηλαδή που συμμετέχει στη μέθοδο των μελών σφάλματος ως υποψήφιο μέλος σφάλματος, είναι αντιστοιχισμένοι τρεις ΕΣ.



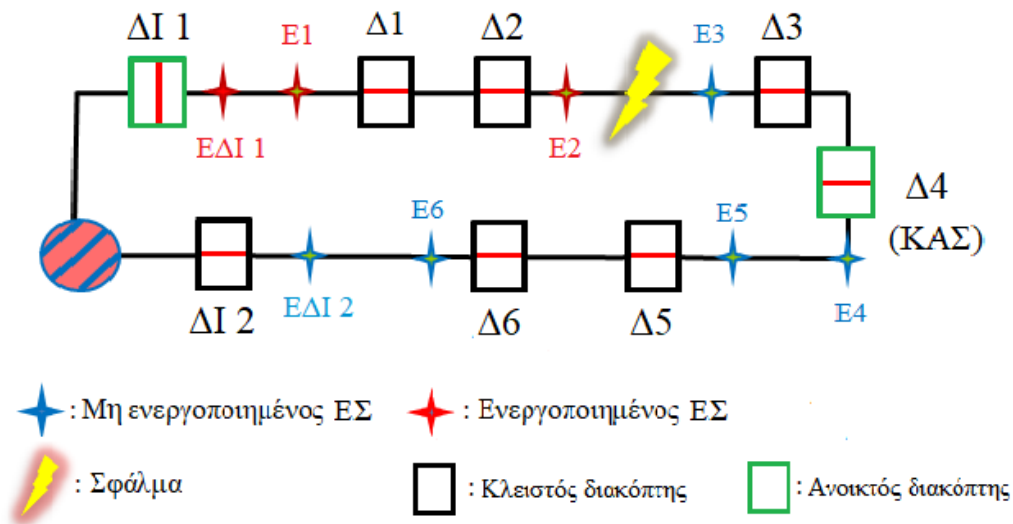
Σχήμα 3.8: Γραμμή δικτύου με ενδείκτες σφάλματος.

Ένα αναλυτικότερο παράδειγμα σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος παρατίθεται παρακάτω. Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται ένα δίκτυο διανομής ΜΤ με δύο κύριες γραμμές, οι οποίες συνδέονται μέσω μιας εφεδρικής γραμμής, στην οποία ανήκει ο διακόπτης Δ4. Ο Δ4 είναι ανοικτός και αποτελεί ένα κανονικά ανοικτό σημείο (ΚΑΣ), διασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την ακτινική λειτουργία του δικτύου.



Σχήμα 3.9: Δίκτυο διανομής με ΕΣ.

Έστω ότι συμβαίνει σφάλμα στη γραμμή μεταξύ των διακοπών Δ2 και Δ3. Αρχικά ο ΔΙ θα ανοίξει μόνιμα, ενώ οι ΕΣ από το σημείο του ΔΙ έως και το σφάλμα θα έχουν ενεργοποιηθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Παρατηρώντας το Σχήμα 3.9 φαίνεται ότι ο ΠΕΣ του ΔΙ θα είναι ο Ε1, ο ΠΕΣ του Δ2 θα είναι ο Ε2, ο ΠΕΣ του Δ3 ο Ε3, κ.ο.κ. Αντίστοιχα, ο ΑΕΣ του ΔΙ είναι ο ΕΔΙ 1 και ο ΔΕΣ του ΔΙ ο Ε2, ενώ ο Δ2 έχει ΑΕΣ τον Ε1 και ΔΕΣ τον Ε3, κ.ο.κ.



Σχήμα 3.10: Ανίχνευση σφάλματος και ενεργοποίηση ΕΣ.

Για να καθοριστεί αν κάποιος ΔΦ αποτελεί «Μέλος Σφάλματος» στα δεξιά ή τα αριστερά του σφάλματος, η κατάσταση των ΑΕΣ, ΠΕΣ και ΔΕΣ του συγκεκριμένου ΔΦ αντικαθίσταται στις εξισώσεις (3.1) και (3.2). Αν ο εκάστοτε ΕΣ έχει ενεργοποιηθεί παίρνει λογική τιμή «1», ενώ αν δεν έχει ενεργοποιηθεί παίρνει λογική τιμή «0». Στον Πίνακα 3.1 παρατίθενται οι τιμές των ΕΣ των ΔΦ 1 έως 5 στον Πίνακα 3.10.

$$\text{Σφάλμα}_{\text{δεξιά}} = \text{ΑΕΣ} \cdot \text{ΠΕΣ} \cdot \overline{\text{ΔΕΣ}} \quad (3.1)$$

$$\text{Σφάλμα}_{\text{αριστερά}} = \text{ΑΕΣ} \cdot \overline{\text{ΠΕΣ}} \cdot \text{ΔΕΣ} \quad (3.2)$$

Πίνακας 3.1: Τιμές των ΕΣ για τους διακόπτες φορτίου 1-5 του Σχήματος 3.10.

	ΑΕΣ	ΠΕΣ	ΔΕΣ	Σφάλμα _{δεξιά}	Σφάλμα _{αριστερά}
Δ1	1	1	1	0	0
Δ2	1	1	0	1	0
Δ3	1	0	0	0	1
Δ4	0	0	0	0	0
Δ5	0	0	0	0	0

Επομένως όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11 και τον Πίνακα 3.1, η (3.1) αληθεύει, δηλαδή παίρνει την τιμή 1 για τον Δ2 και η (3.2) αληθεύει για τον Δ3. Αυτό επιβεβαιώνεται αφού ο ΑΕΣ (E1) και ο ΠΕΣ (E2) του Δ2 είναι ενεργοποιημένοι, διαρρέονται δηλαδή από ρεύμα σφάλματος (λογικό «1»), ενώ ο ΔΕΣ (E3) δεν έχει ενεργοποιηθεί (λογικό «0») και λόγω του συμπληρώματος που παίρνει ο όρος ΔΕΣ στην (3.1), δίνει επίσης λογική τιμή «1», επαληθεύοντας την εξίσωση. Επίσης, ο Δ3 επαληθεύει την (3.2), καθώς ο ΑΕΣ του (E2) είναι ενεργοποιημένος (λογικό «1») ενώ οι ΠΕΣ (E3) και ΔΕΣ (E4) δεν είναι ενεργοποιημένοι (λογικό «0») και συνεπώς λόγω του συμπληρώματος στους όρους ΠΕΣ και ΔΕΣ στην (3.2), επαληθεύει την εξίσωση.

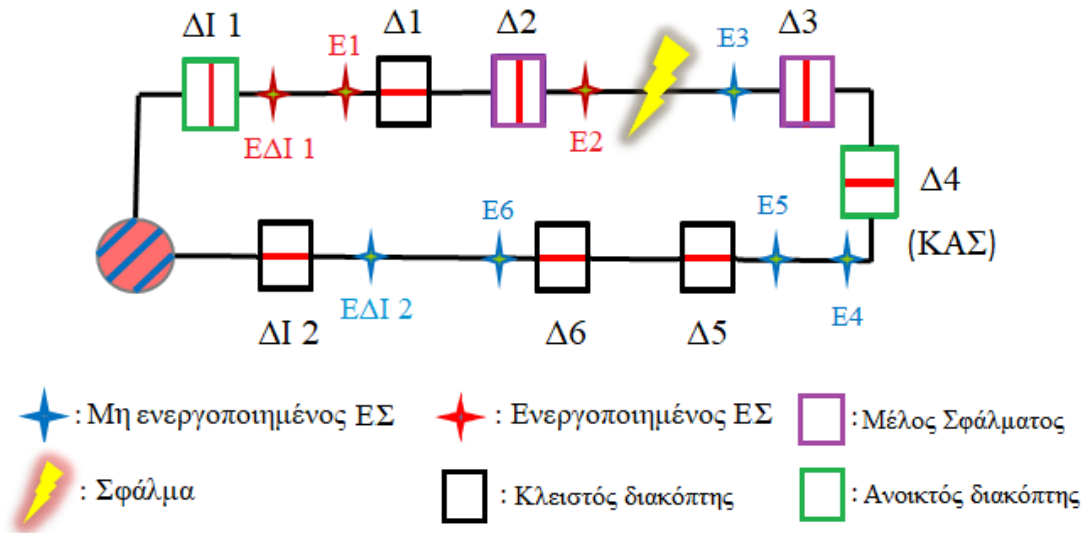
Επιπλέον, παρατηρείται ότι κανένας άλλος ΔΦ δεν επαληθεύει κάποια από τις δύο εξισώσεις, καθώς τουλάχιστον ένας όρος μηδενίζεται. Σημειώνεται επίσης πως η μέθοδος αυτή καλύπτει τις περιπτώσεις που το σφάλμα δεν βρίσκεται κοντά στον ΔΙ ή σε κάποιο ΚΑΣ. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται κάποιες επιπλέον συνθήκες επεκτείνοντας τη μέθοδο, ωστόσο για λόγους απλότητας δεν αναλύονται στην παρούσα εργασία.

Συνεπώς οι διακόπτες Δ2 και Δ3 χαρακτηρίστηκαν ως «Μέλη Σφάλματος» από τη μέθοδο εντοπισμού στο ΚΣΕ ολοκληρώνοντας τη διαδικασία εντοπισμού σφάλματος.

3.4.2 Απομόνωση σφάλματος

Αμέσως μετά τον προσδιορισμό των διακοπών μελών σφάλματος ακολουθεί το στάδιο της απομόνωσης του σφάλματος. Σε αυτή τη φάση το ΚΣΕ δίνει εντολή στους διακόπτες που είναι μέλη σφάλματος να ανοίξουν μέσω τηλεχειρισμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11. Επομένως, οι διακόπτες εκατέρωθεν του σφάλματος ανοίγουν απομονώνοντας το εσφαλμένο τμήμα από το υπόλοιπο δίκτυο.

Το στάδιο αυτό παίζει σημαντικό ρόλο για την αποκατάσταση του δικτύου, αφού πλέον δίνεται η δυνατότητα με κατάλληλους διακοπτικούς χειρισμούς να ανατροφοδοτηθούν τα «υγιή» φορτία και να επιτευχθεί η μερική αποκατάσταση του δικτύου. Στο Κεφάλαιο 4 θα αναλυθεί μια μεθοδολογία για τη μερική αποκατάσταση του δικτύου, το οποίο είναι το επόμενο βήμα στη διαδικασία αυτο-αποκατάστασής του.



Σχήμα 3.11: Απομόνωση του σφάλματος μέσω της μεθόδου μελών σφάλματος.

ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΟΝΙΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το επόμενο βήμα μετά την ανίχνευση, τον εντοπισμό και την απομόνωση ενός σφάλματος, είναι η μερική αποκατάσταση του δικτύου διανομής (ΔΔ). Η μερική αποκατάσταση έχει ως στόχο να επαναφέρει την παροχή ενέργειας στους καταναλωτές που αποκόπηκαν από την τροφοδοσία, εξαιτίας της απομόνωσης της περιοχής που έγινε το σφάλμα, ενώ βρίσκονται εκτός αυτής. Ουσιαστικά πρόκειται για φορτία του δικτύου τα οποία απομονώθηκαν από την τροφοδοσία με το άνοιγμα του ΔΙ, επειδή βρίσκονται στην ίδια γραμμή με την περιοχή που υπέστη το σφάλμα.

Με την ολοκλήρωση του σταδίου της απομόνωσης, το εσφαλμένο τμήμα του δικτύου έχει περιορισθεί μεταξύ των διακοπών οι οποίοι αποτελούν μέλη σφάλματος και είναι σε ανοικτή θέση. Συνεπώς, είναι πλέον εφικτό να ανατροφοδοτηθούν τα υπόλοιπα φορτία της γραμμής, τα οποία βρίσκονται εκτός της περιοχής σφάλματος, χωρίς κίνδυνο. Στόχος της μερικής αποκατάστασης λειτουργίας ενός δικτύου διανομής είναι να επαναφέρει στο δίκτυο όσο το δυνατόν περισσότερα φορτία, με όσο το δυνατόν λιγότερους διακοπτικούς χειρισμούς και χωρίς να παραβιάζει κάποιον περιορισμό λειτουργίας (π.χ. ακτινικότητα του δικτύου). Στη διαδικασία αυτή σημαντικό ρόλο παίζει η ανάπτυξη μιας μεθόδου αποκατάστασης, η οποία έχοντας ως δεδομένο τη διαμόρφωση του δικτύου, αποφαινεται για τους απαραίτητους διακοπτικούς χειρισμούς που πρέπει να εφαρμοστούν, ώστε να τροφοδοτηθούν όσο το δυνατόν περισσότερα φορτία.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για τη μερική αποκατάσταση λειτουργίας του δικτύου διανομής. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην δυνατότητα προσομοίωσης του ΔΔ από έναν κατευθυνόμενο γράφο, καθώς και στις εξισώσεις ροής ισχύος που διέπουν το δίκτυο. Επιπλέον, γίνεται εκτενής αναφορά στην αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου και στους περιορισμούς που τη συνοδεύουν, καθώς και ολοκληρωμένη παρουσίαση της μεθόδου αποκατάστασης σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος.

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Η αποκατάσταση του δικτύου πρακτικά επιτυγχάνεται μέσω της αναδιάταξής του. Όταν συμβεί ένα σφάλμα, ορισμένοι διακόπτες θα ανοίξουν και ορισμένοι θα κλείσουν, μεταβάλλοντας τις συνδέσεις μεταξύ των ζυγών, αλλά διατηρώντας πάντα την ακτινικότητα

του δικτύου. Έτσι, απαιτείται η διαχείριση ενός προβλήματος αναδιάταξης του δικτύου, που έχει ως στόχο την εξισορρόπηση του φορτίου, μέσω διακοπτικών αλλαγών.

Για να περιγραφεί αυτού του είδους το πρόβλημα ως πρόβλημα βελτιστοποίησης, αξιοποιείται το γεγονός ότι μία ακτινική διάταξη αντιστοιχεί σε ένα γεννητικό δέντρο (spanning tree) ενός γράφου που αναπαριστά την τοπολογία του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο πρόκειται για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης γεννητικού δέντρου, που διατυπώνεται ως εξής [28]: δεδομένου ενός γράφου (δίκτυο), αναζητείται ένα γεννητικό δένδρο, τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση, ενώ ικανοποιούνται οι περιορισμοί του προβλήματος. Συνεπώς, έχουμε να κάνουμε με ένα συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, εφόσον η λύση του περιλαμβάνει την εξέταση όλων των πιθανών γεννητικών δέντρων.

4.2.1 Αναπαράσταση δικτύου διανομής ως γεννητικό δένδρο

Για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος βελτιστοποίησης που θα περιγραφεί αναλυτικά στη συνέχεια, παρατίθενται στην ενότητα αυτή οι απαραίτητες πληροφορίες, σχετικά με την προσομοίωση του δικτύου.

Το ΔΔ μπορεί να προσομοιωθεί ως ένας κατευθυνόμενος γράφος, στον οποίο οι ζυγοί αποτελούν τους κόμβους και οι γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας τους κλάδους [29]. Κάθε υπογράφημα, δηλαδή κάθε υποσύνολο κόμβων και κλάδων διανομής, που περιλαμβάνει όλες τις κορυφές ενός γραφήματος, ονομάζεται γεννητικό δέντρο. Ως ρίζα του δέντρου λαμβάνεται ο κύριος υποσταθμός [30].

Έστω ο γράφος ενός δικτύου διανομής $G = (N, E)$, όπου N είναι το σύνολο των κόμβων, E το σύνολο των ακμών και $T := (N, E_T)$ ένα γεννητικό δέντρο, όπου $E_T \subseteq E$ με n συνδέσεις. Όλες οι ακμές του συνόλου E_T που συνδέονται με τη ρίζα, θα έχουν κατεύθυνση από τη ρίζα προς τους συνδεδεμένους κόμβους και όχι αντίστροφα. Οι γραμμές εκτός του γεννητικού δέντρου (E_T/E) αποτελούν τις εφεδρικές συνδέσεις του δικτύου, οι οποίες στο πραγματικό κύκλωμα διαθέτουν διακόπτη και θα χρησιμοποιηθούν, αν κριθεί απαραίτητο, στη διαδικασία αποκατάστασης.

Κάθε σύνδεση υποδηλώνεται ως (i, j) όταν έχει κατεύθυνση από τον κόμβο i στον κόμβο j . Για κάθε τέτοιο σύνδεσμο (i, j) , ονομάζεται ο κόμβος i πρόγονος του κόμβου j και ο j ονομάζεται απόγονος του i . Έστω $\pi(j) \subseteq N$ το σύνολο όλων των προγόνων του κόμβου j και $\delta(i) \subseteq N$ το σύνολο όλων των απογόνων του κόμβου i . Η ακτινικότητα του δικτύου επιβάλλει κάθε απόγονος να τροφοδοτείται από ακριβώς έναν πρόγονο.

Επομένως, σε έναν συνεκτικό γράφο ενός ΔΔ κάθε κόμβος αναπαριστά είτε έναν κόμβο παραγωγής, είτε έναν κόμβο φορτίου. Κάθε ακμή αναπαριστά ένα ενεργό (κλειστός διακόπτης γραμμής) ή ένα ανενεργό (ανοικτός διακόπτης γραμμής) τμήμα του δικτύου. Το γεννητικό δέντρο, δηλαδή η τοπολογία του δικτύου, αποτελείται μόνο από τις ακμές και τους κόμβους που συμμετέχουν στην τροφοδότηση του φορτίου. Συνεπώς, κατά τη διαδικασία της αποκατάστασης σε περίπτωση σφάλματος, το αρχικό γεννητικό δένδρο T του γράφου μετατρέπεται σε ένα γεννητικό δένδρο T' μέσω του ανοίγματος ή/και κλεισίματος διακοπών. Στη θεωρία γράφων, ο συνδυασμός των διακοπτικών αυτών χειρισμών αντιστοιχεί στη διαδικασία των κυκλικών ανταλλαγών, κατά την οποία προστίθεται μία ακμή στο γεννητικό δέντρο T , η οποία δημιουργεί κύκλο και παράλληλα αφαιρείται μία ακμή για τη μετάβαση στο νέο γεννητικό δέντρο T' [31].

4.2.2 Εξισώσεις ροής ισχύος κλάδου

Σύμφωνα με τα προηγούμενα θα περιγραφούν οι εξισώσεις που χρειαζόμαστε για να προσομοιωθεί και για να αναδιαταχθεί το δίκτυο με βέλτιστο τρόπο μέσω προγραμματιστικού αλγορίθμου, ώστε να επιτύχουμε την αυτο-αποκατάστασή του.

4.2.2.1 Εξισώσεις ροής ισχύος σε κλάδους συστήματος διανομής

Η ροή ισχύος σε ένα ακτινικό ΔΔ μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο επαναληπτικών εξισώσεων κλάδου (DistFlow branch equations) [29]. Οι εξισώσεις αυτές έχουν ως στόχο να εκφράσουν την ενεργό και άεργο ισχύ σε ένα κόμβο j του γράφου. Συγκεκριμένα, η ενεργός ισχύς του κόμβου j (p_j) ισούται με την ενεργό ισχύ του φορτίου του κόμβου (p_j^L), μείον την ενεργό ισχύ παραγωγής στον κόμβο αυτόν (p_j^F), δηλαδή: $p_j = p_j^L - p_j^F$. Αντίστοιχα, η άεργος ισχύς του κόμβου j (q_j) ισούται με την άεργο ισχύ του φορτίου του κόμβου (q_j^L), μείον την άεργο ισχύ παραγωγής στον κόμβο αυτόν (q_j^F), δηλαδή: $q_j = q_j^L - q_j^F$.

Στις εξισώσεις συμμετέχουν η ενεργός (P_{ij}) και άεργος (Q_{ij}) ισχύς αναχώρησης και η ενεργός (P_{ik}) και άεργος (Q_{ik}) ισχύς άφιξης του συνόλου των κόμβων $i \in \pi(j)$ και $k \in \delta(j)$, δηλαδή του συνόλου των προγόνων του κόμβου j και του συνόλου των απογόνων του κόμβου j , αντίστοιχα. Επίσης, περιλαμβάνονται το ρεύμα άφιξης στον κόμβο j (I_{ij}), η τάση του κόμβου i (u_i) καθώς και η σύνθετη αντίσταση $z_{ij} = r_{ij} + ix_{ij}$ του κλάδου (i, j).

Οι εξισώσεις ροής κλάδου, δεδομένου ότι $|I_{ij}|^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{u_i^2}$, είναι οι ακόλουθες:

$$p_j = \sum_{i \in \pi(j)} \left(P_{ij} - r_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{u_i^2} \right) - \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk}, \quad \forall j \in N \quad (4.1)$$

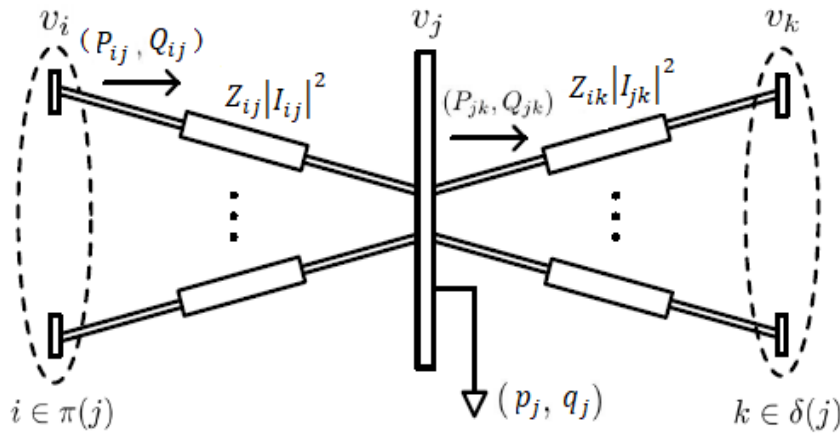
$$q_j = \sum_{i \in \pi(j)} \left(Q_{ij} - x_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{u_i^2} \right) - \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk}, \quad \forall j \in N \quad (4.2)$$

Στα δεύτερα μέλη των εξισώσεων υπάρχουν δύο όροι αθροίσματος. Το πρώτο άθροισμα εκφράζει τη συνολική εξερχόμενη ροή ισχύος από τους προγόνους του κόμβου j μείον τις απώλειες των γραμμών που τις συνδέουν, οι οποίες υπολογίζονται από το γινόμενο: $|I_{ij}|^2 \cdot z_{ij}$. Το δεύτερο άθροισμα εκφράζει την εξερχόμενη ροή ισχύος από τον εξεταζόμενο κόμβο j . Συνεπώς, αφαιρώντας τον δεύτερο όρο από τον πρώτο προκύπτει η ισχύς στον κόμβο j .

Στο Σχήμα 4.1 φαίνονται οι μεταβλητές και οι παράμετροι που συμμετέχουν στις παραπάνω εξισώσεις. Η ενεργός και η άεργος ισχύς του κόμβου j αποτελούν μεταβλητές, αν ο j είναι η ρίζα του γεννητικού δέντρου, δηλαδή αν $j \in N^F$, όπου N^F το σύνολο των κόμβων παραγωγής του συστήματος και άρα ισχύει: $p_j = p_j^F$ και $q_j = q_j^F$. Στην περίπτωση αυτή το σύνολο $\pi(j)$ είναι κενό. Αντίθετα, αν ο κόμβος j δεν ανήκει στους κόμβους παραγωγής, δηλαδή $j \in N \setminus N^F$, η ισχύς στον κόμβο είναι ισχύς φορτίου ($p_j = p_j^L$ και $q_j = q_j^L$) και αποτελεί παράμετρο του συστήματος.

Επιπλέον μεταβλητές του συστήματος αποτελούν η ενεργός και η άεργος ισχύς άφιξης και αναχώρησης στον κόμβο j : $P_{ij}-Q_{ij}$, $P_{jk}-Q_{jk}$. Τόσο η τάση στον ζυγό αναχώρησης

u_i , όσο και η σύνθετη αντίσταση του κλάδου $Z_{ij} = r_{ij} + ix_{ij}$ αποτελούν παραμέτρους του δικτύου. Σημειώνεται ότι οι κόμβοι j αφορούν οποιονδήποτε κόμβο του γράφου, δηλαδή $j \in N$. Z_{ik}



Σχήμα 4.1: Απεικόνιση των μεταβλητών και των παραμέτρων της ροής ισχύος στους κλάδους ενός δικτύου διανομής.

4.2.2.2 Απλοποιημένες εξισώσεις ροής ισχύος στους κλάδους του συστήματος διανομής

Οι εξισώσεις 4.1 και 4.2 μπορούν να απλοποιηθούν, θεωρώντας ότι η τάση σε κάθε ζυγό του δικτύου είναι ίση με 1 α.μ., δηλαδή $u_i = 1$ α.μ., οπότε προκύπτουν οι απλοποιημένες εξισώσεις:

$$p_j = \sum_{i \in \pi(j)} [(P_{ij} - r_{ij}(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2))] - \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk}, \quad \forall j \in N \quad (4.3)$$

$$q_j = \sum_{i \in \pi(j)} [(Q_{ij} - x_{ij}(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2))] - \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk}, \quad \forall j \in N \quad (4.4)$$

Αυτές είναι λοιπόν οι εξισώσεις ροής ισχύος κλάδου. με τις οποίες προσομοιώνεται προσεγγιστικά η λειτουργία του ΔΔ.

4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΡΙΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Η αποκατάσταση της τροφοδοσίας στα υγιή τμήματα του δικτύου χρειάζεται να επιτευχθεί όσο το δυνατόν ταχύτερα. Αυτό συνεπάγεται μια γρήγορη και έγκαιρη λήψη απόφασης για κάθε διακοπτικό χειρισμό που θα οδηγήσει σε απομόνωση την περιοχή του σφάλματος και θα αποκαταστήσει την τροφοδοσία στα υγιή φορτία. Οι διακοπτικοί αυτοί χειρισμοί είναι σημαντικό να είναι όσο το δυνατόν λιγότεροι και, επίσης, αν υπάρχει διαθέσιμη εφεδρική πηγή τροφοδοσίας, να γίνει ορθολογικός καταμερισμός του φορτίου [32].

Επομένως, η διαδικασία της μερικής αποκατάστασης χρειάζεται να μοντελοποιηθεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης με κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμούς, οι οποίοι θα φροντίζουν ώστε να ικανοποιούνται οι παραπάνω συνθήκες.

4.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση μοντέλου αποκατάστασης

Για να εκφραστεί η θέση των διακοπών (ανοικτή / κλειστή), χρησιμοποιείται η δυαδική μεταβλητή y_{ij} , η οποία αναφέρεται στο σύνολο των γραμμών του δικτύου που διαθέτουν διακόπτη E^S , όπου $E^S \subseteq E$. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η μεταβλητή y_{ij} παίρνει τιμή «1», ενώ όταν είναι ανοικτός, η τιμή της γίνεται «0». Η μεταβλητή αυτή συνοδεύεται από δύο δείκτες, οι οποίοι υποδηλώνουν τα άκρα του κλάδου του διακόπτη, για παράδειγμα, η y_{23} αναφέρεται στον κλάδο με διακόπτη που ενώνει τον κόμβο 2 με τον κόμβο 3. Το πλήθος των μεταβλητών y_{ij} θα είναι ίσο με το πλήθος των διακοπών του δικτύου.

Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου αποκατάστασης έχει ως στόχο κυρίως την ελαχιστοποίηση των διακοπτικών χειρισμών για την ανατροφοδότηση των υγιών φορτίων καθώς και τον καταμερισμό τους στους κύριους υποσταθμούς του δικτύου. Η αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από τρεις όρους ως ακολούθως:

$$\min \sum_{(i,j) \in A} y_{ij} + \sum_{(i,j) \in K} (1 - y_{ij}) + 0,001 \cdot \left(\sum_{i \in N^F} p_i^F + \sum_{i \in N^F} q_i^F \right) \quad (4.5)$$

Ο πρώτος όρος εκφράζει το σύνολο των διακοπών που θα μεταβούν από την ανοικτή στην κλειστή θέση, δηλαδή τους διακόπτες στα κανονικά ανοικτά σημεία (ΚΑΣ), οι οποίοι πιθανόν να κλείσουν για την ανατροφοδότηση των φορτίων. Έστω A το σύνολο των ΚΑΣ, με $A \subseteq E^S$ και K το σύνολο των κανονικά κλειστών σημείων (ΚΚΣ), με $K \subseteq E^S$. Συνεπώς, ο πρώτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης θα είναι το άθροισμα της μεταβλητής y για κάθε κλάδο $i - j$, όπου $(i, j) \in A$. Ελαχιστοποιώντας λοιπόν τον όρο αυτόν, ελαχιστοποιούνται οι διακοπτικοί χειρισμοί των κανονικά ανοικτών διακοπών.

Ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης εκφράζει το σύνολο των διακοπών που θα μεταβούν από την κλειστή στην ανοικτή θέση. Ο όρος αυτός θα είναι λοιπόν ένα άθροισμα της παράστασης $(1 - y_{ij})$, για κάθε κλάδο $i - j$, όπου $(i, j) \in K$, διότι κάθε διακόπτης με το άνοιγμά του παίρνει την τιμή «0» και άρα η παράσταση $(1 - y_{ij})$ ελαχιστοποιείται όσο οι διακόπτες του συνόλου K παραμένουν κλειστοί.

Ο τελευταίος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης αναπαριστά το σύνολο της ροής ισχύος από τους κύριους υποσταθμούς. Το βάρος του όρου αυτού είναι σχετικά μικρό, π.χ. 10^{-3} , σε σχέση με το βάρος των δύο προηγούμενων όρων, δίνοντας έτσι προτεραιότητα στους προηγούμενους δύο όρους της αντικειμενικής συνάρτησης. Καθίσταται δηλαδή η ελαχιστοποίηση των διακοπτικών χειρισμών ως ο σημαντικότερος στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης. Τα δύο αθροίσματα του όρου αυτού περιλαμβάνουν την ενεργό και άεργο ισχύ, αντίστοιχα, των κόμβων παραγωγής, δηλαδή των κόμβων για τους οποίους ισχύει $i \in N^F$. Με την ελαχιστοποίηση των δύο αυτών αθροισμάτων παράγονται αποτελέσματα με ισορροπημένη κατανομή τροφοδοσίας από τους κύριους υποσταθμούς του ΔΔ.

4.3.2 Περιορισμοί μοντέλου αποκατάστασης

Για την υλοποίηση του μοντέλου αποκατάστασης χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι περιορισμοί [33].

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in E^S \quad (4.6)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in E \quad (4.7)$$

$$0 \leq p_{ij} \leq M \cdot z_{ij} \quad (4.8)$$

$$0 \leq q_{ij} \leq M \cdot z_{ij} \quad (4.9)$$

$$z_{if} = 0, \quad f \in N^F \quad (4.10)$$

$$z_{ij} + z_{ji} = 1, \quad \forall (i, j) \in E \setminus E^S \quad (4.11)$$

$$z_{ij} + z_{ji} = y_{ij}, \quad \forall (i, j) \in E^S \quad (4.12)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in E} z_{ji} = 1, \quad i \in N \setminus N^F \quad (4.13)$$

$$p_{ij}^2 + q_{ij}^2 \leq S_{ij}^2 \quad (4.14)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in E} [p_{ji} - p_{ij} - r_{ij} \cdot (p_{ji}^2 + q_{ji}^2)] = p_i^L - p_i^F \quad (4.15)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in E} [q_{ji} - q_{ij} - x_{ij} \cdot (p_{ji}^2 + q_{ji}^2)] = q_i^L - q_i^F \quad (4.16)$$

Η μεταβλητή y_{ij} στην (4.6), που περιγράφηκε στην ενότητα της αντικειμενικής συνάρτησης, είναι δυαδική και σχετίζεται με κάθε κλάδο που αντιπροσωπεύει γραμμή με διακόπτη. Όταν ο διακόπτης της γραμμής $i - j$ είναι ανοικτός, τότε $y_{ij} = y_{ji} = 0$, ενώ όταν ο διακόπτης της γραμμής αυτής είναι κλειστός, τότε $y_{ij} = y_{ji} = 1$,

Η μεταβλητή z_{ij} στην (4.7) είναι επίσης δυαδική και σχετίζεται με κάθε γραμμή $i - j$ του δικτύου, ορίζοντας την κατεύθυνση της ροής ισχύος και αν αυτή υπάρχει. Για παράδειγμα, σε μία γραμμή $i - j$, όπου η ροή ισχύος έχει κατεύθυνση από τον κόμβο i στον κόμβο j , θα είναι: $z_{ij} = 1$, ενώ αν δεν υπάρχει ροή ισχύος από τον κόμβο i στον κόμβο j , θα είναι: $z_{ij} = 0$. Η μεταβλητή αυτή υποδηλώνει τόσο την κατεύθυνση της ροής ισχύος όσο και την ύπαρξή της.

Ειδικότερα, όταν η μεταβλητή z_{ij} ισούται με «0» η ενεργός και η άεργος ισχύς του κλάδου $i - j$ είναι ίση με 0 ($p_{ij} = q_{ij} = 0$), ενώ αν ισούται με «1», η ενεργός και άεργος ροή ισχύος από τον κόμβο i στον j υπάρχει και είναι μεγαλύτερη του μηδενός, σύμφωνα με τις (4.8) και (4.9), αντίστοιχα. Η σταθερά M στις (4.8) και (4.9) παίρνει μία αρκετά μεγάλη τιμή, ώστε να είναι πάντα μεγαλύτερη από τις α.μ. τιμές ισχύος του δικτύου.

Σύμφωνα με την (4.10), ένας υποσταθμός δεν έχει προγόνους και η ροή ισχύος έχει κατεύθυνση πάντα από έναν κύριο υποσταθμό προς τα φορτία. Συνεπώς, σε οποιοδήποτε σύνδεσμο με απόγονο έναν υποσταθμό, η μεταβλητή z ισούται με το «0».

Επίσης, η ροή ισχύος σε κάθε γραμμή του ΔΔ που δεν διαθέτει διακόπτη και συνδέει δύο κόμβους $i - j$, θα έχει κατεύθυνση είτε από τον κόμβο i προς τον κόμβο j είτε αντίθετα, αλλά πάντα μία και μόνο από τις δύο, σύμφωνα με την (4.11).

Αντίθετα, αν η γραμμή $i - j$ διαθέτει διακόπτη (4.12), τότε διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Αν ο διακόπτης είναι ανοικτός ($y_{ij} = 0$), δεν υπάρχει ροή ισχύος σε καμία κατεύθυνση της γραμμής, δηλαδή $z_{ij} = z_{ji} = y_{ij} = 0$. Αν όμως ο διακόπτης είναι κλειστός ($y_{ij} = 1$), τότε η κατεύθυνση της ροής ισχύος διέπεται από τους ίδιους κανόνες με την περίπτωση που η γραμμή δεν διαθέτει διακόπτη (4.11).

Η λειτουργία ενός ΔΔ είναι ακτινική, επομένως κάθε κόμβος που δεν αποτελεί κύριο υποσταθμό, μπορεί να είναι απόγονος ενός μόνο κόμβου, σύμφωνα με την (4.13).

Οι δυνατότητες του παρόντος μοντέλου επίλυσης ενισχύονται εκφράζοντας τα όρια της ροής ισχύος της γραμμής με βάση την ικανότητα της γραμμής S_{ij} (4.14), η οποία αναπαριστά το θερμικό όριο της.

Ο υπολογισμός της ενεργού και αέργου ισχύος στους κόμβους επιτυγχάνεται μέσω των (4.15) και (4.16), αντίστοιχα. Αυτή τη φορά ο έλεγχος γίνεται από την πλευρά του προγόνου i , θεωρώντας: $P_{ij} = p_{ij} - p_{ji}$, $Q_{ij} = q_{ij} - q_{ji}$. Επιπλέον, η ισχύς των κόμβων των προγόνων αντικαθίστανται από τις σχέσεις: $p_i = p_i^L - p_i^F$ και $q_i = q_i^L - q_i^F$. Η σχέση αυτή περιγράφει το ισοζύγιο σε έναν κόμβο i .

Σημειώνεται πως οι μεταβλητές με μονό δείκτη, αν δεν αναφέρεται διαφορετικά, ορίζονται για όλους τους ζυγούς i του συνόλου N . Αντίστοιχα, οι μεταβλητές με διπλό δείκτη ορίζονται στο σύνολο $E ((i, j) \in E)$, εφόσον δεν υπαγορεύεται διαφορετικά.

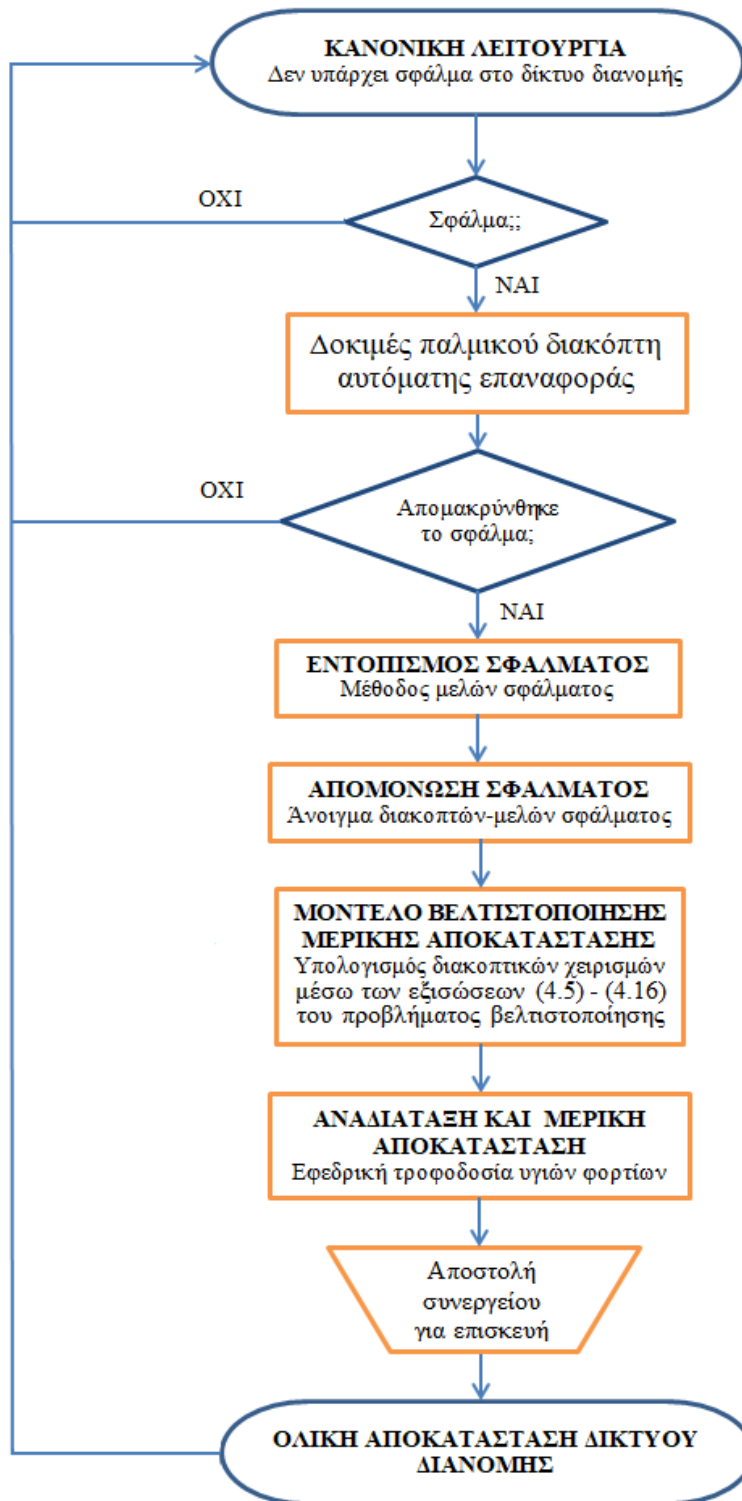
Το πρόβλημα βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση την (4.5) και περιορισμούς τους (4.6)–(4.16) είναι ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς (Mixed Integer Quadratically Constrained Programming – MIQCP).

Ειδικότερα η αντικειμενική συνάρτηση, η οποία είναι γραμμική, συνοδεύεται από περιορισμούς οι οποίοι περιλαμβάνουν τετραγωνικούς όρους, ενώ στο πρόβλημα βελτιστοποίησης περιέχονται τόσο ακέραιες όσο και συνεχείς μεταβλητές [34]. Με αυτόν τον τρόπο είναι εφικτό το μοντέλο επίλυσης να ενισχυθεί με τον περιορισμό (4.14) και να περιλαμβάνονται οι απώλειες στις απλοποιημένες εξισώσεις ροής ισχύος σε κλάδο ως τετραγωνικοί όροι. Η μεταβλητή ελέγχου του προβλήματος είναι η κατάσταση των διακοπών (y_{ij}).

4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Η διαδικασία αντιμετώπισης ενός μόνιμου σφάλματος σε ένα δίκτυο διανομής, με δυνατότητα αυτόματης αποκατάστασης απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Το μόνιμο σφάλμα σε μία περιοχή του δικτύου ανιχνεύεται από τους διακόπτες ισχύος, οι οποίοι ανοίγουν αυτόματα ώστε να τερματιστεί το σφάλμα στην περιοχή και απομονώνει το τμήμα αυτό από το υπόλοιπο δίκτυο, που συνεχίζει κανονικά τη λειτουργία του. Παράλληλα οι ενδείκτες σφάλματος, που διαπεράστηκαν από ρεύμα σφάλματος, έχουν ενεργοποιηθεί και το κεντρικό σύστημα ελέγχου (ΚΣΕ) ενημερώνεται για όλες αυτές τις μεταβολές μέσω του ασύρματου δικτύου επικοινωνίας.

Μόλις το ΚΣΕ συλλέξει τα δεδομένα, λαμβάνοντας υπόψιν την κατάσταση των ενδεικτών σφάλματος, υπολογίζει αυτόματα την θέση του σφάλματος [26]. Η εκτίμηση της πιθανής θέσης του σφάλματος περιορίζεται μεταξύ των δύο κοντινότερων διακοπών φορτίου εκατέρωθεν του σφάλματος. Το ΚΣΕ δίνει εντολή να ανοίξουν αυτοί οι διακόπτες μέσω τηλεχειρισμού, απομονώνοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια το εσφαλμένο τμήμα. Η κίνηση αυτή επιτρέπει την ανατροφοδότηση των υγιών φορτίων που αποκόπηκαν από το δίκτυο με το άνοιγμα του διακόπτη ισχύος.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής αποκατάστασης σφάλματος σε δίκτυο διανομής

Το μοντέλο βελτιστοποίησης αναλαμβάνει να υπολογίσει τους διακοπτικούς χειρισμούς που χρειάζεται να πραγματοποιηθούν για να αποκατασταθεί μερικώς το ΔΔ, ανατροφοδοτώντας τα υγιή φορτία. Οι υπολογισμοί αυτοί γίνονται με βάση τις εξισώσεις (4.5)–(4.16) και τον αναθεωρημένο γράφο του δικτύου, ο οποίος δεν περιλαμβάνει πλέον το τμήμα που απομονώθηκε από το άνοιγμα των διακοπών φορτίου. Το μοντέλο,

χρησιμοποιώντας τους τηλεχειριζόμενους διακόπτες διασύνδεσης στα ΚΑΣ του δικτύου, επαναφέρει με βέλτιστο τρόπο την τροφοδοσία στα υγιή φορτία, όπου αυτό είναι εφικτό, επιτελώντας όσο το δυνατόν λιγότερους διακοπτικούς χειρισμούς.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ, ΑΠΟΜΟΝΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΡΙΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγική περιγραφή στις πλατφόρμες του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη ενός μηχανισμού αντιμετώπισης του μόνιμου σφάλματος. Ο μηχανισμός αυτός αποτελείται από τον εντοπισμό και την απομόνωση του σφάλματος, στάδια τα οποία εκτελούνται από το λογισμικό MATLAB, καθώς επίσης και από τη μερική αποκατάσταση της λειτουργίας του δικτύου, μέσω του λογισμικού GAMS.

Αρχικά γίνεται αναφορά στις βασικές λειτουργίες του συστήματος μοντελοποίησης GAMS και στον μηχανισμό βελτιστοποίησής του. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το λογισμικό MATLAB και περιγράφονται οι κυριότερες συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο οι δύο πλατφόρμες επικοινωνούν, ανταλλάσσοντας δεδομένα, για την παραγωγή του τελικού αποτελέσματος.

5.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS

Το GAMS (general algebraic modeling system) είναι ένα υπολογιστικό περιβάλλον, το οποίο προσδιορίζει, αναλύει και επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης, χρησιμοποιώντας μία ισχυρή γλώσσα προγραμματισμού με περιεκτικό τρόπο γραφής [35]. Το πρόγραμμα απαιτεί εξοικείωση για την αντίληψη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών λειτουργιών του, αλλά εφόσον αυτές γίνουν κατανοητές, μπορεί να αποτελέσει ένα πολυχρηστικό και ισχυρό εργαλείο για την επίλυση μαθηματικών προγραμματιστικών προβλημάτων.

Αναλυτικά τα κυριότερα χαρακτηριστικά του GAMS είναι:

1. Η πυκνότητα της γλώσσας, η ικανότητα δηλαδή να επιλύει με το ίδιο μέγεθος κώδικα, από μικρά (μερικές μεταβλητές και εξισώσεις περιορισμών) μέχρι μεγάλα προβλήματα (χιλιάδες μεταβλητές και εξισώσεις περιορισμών). Αυτό επιτυγχάνεται μέσα από τη χρήση αθροισμάτων, συνόλων και δεικτών.
2. Ο διαχωρισμός της διαδικασίας μοντελοποίησης του προβλήματος από την τεχνική επίλυσης που χρησιμοποιείται. Συγκεκριμένα, ο χρήστης αναλαμβάνει να διατυπώσει το προς επίλυση πρόβλημα σε σημειογραφία του GAMS και στη συνέχεια ένας από τους πολλούς τύπους επιλυτών του προγράμματος υπολογίζει τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Συνεπώς, ο χρήστης απλώς μοντελοποιεί το πρόβλημα, χωρίς να απασχολείται με τις αλγοριθμικές τεχνικές επίλυσης, καθιστώντας τη διαδικασία ευκολότερη και αρκετά απλούστερη.

3. Το πρόγραμμα απεικονίζει σχεδόν αυτούσια την αμιγώς μαθηματική περιγραφή ενός προγραμματιστικού προβλήματος, καθιστώντας τον κώδικα του εύκολο στην ανάγνωση και στην κατανόηση του προβλήματος.
4. Η αυστηρότητα των γραμματικών κανόνων που διέπουν το πρόγραμμα. Ακόμα και ένα μεμονωμένο λάθος μπορεί να οδηγήσει πολλά λάθη στο αποτέλεσμα.
5. Στο GAMS τα κεφαλαία και τα πεζά γράμματα είναι πανομοιότυπα.
6. Οι ονομασίες που δίνει ο χρήστης στα στοιχεία του GAMS για να είναι έγκυρες, πρέπει να ξεκινούν με ένα γράμμα και να ακολουθούνται έως το πολύ από εννέα ακόμα επιπλέον γράμματα ή ψηφία.

5.2.1 Η δομή ενός μοντέλου GAMS

Κάθε μοντέλο επίλυσης GAMS περιλαμβάνει εντολές και εξισώσεις για να διατυπώσει ένα πρόβλημα και να ορίσει τα δεδομένα και τις μεταβλητές του. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα βασικά δομικά στοιχεία εισόδου και εξόδου του μοντέλου.

Πίνακας 5.1: Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός GAMS μοντέλου.

Τύπος	Δομικά στοιχεία
<u>Είσοδος</u>	Set Δήλωση Ανάθεση μελών
	Data (Parameters, Tables, Scalars) Δήλωση Ανάθεση τιμών
	Variables Δήλωση Ανάθεση τύπου
	Ανάθεση ορίων των μεταβλητών και/ή αρχικών τιμών (προαιρετικό)
	Εξισώσεις Δήλωση Περιγραφή
	Επιλογή: Model, Solve
	Display (προαιρετικό)
<u>Έξοδος</u>	Αντίγραφο κειμένου κώδικα (Echo print)
	Χάρτες καταγραφής (Reference Maps)
	Κατάλογος εξισώσεων (Equation Listing)
	Στατιστικά στοιχεία του μοντέλου (Model Statistics)
	Αναφορά κατάστασης (Status Reports)
	Αναφορές λύσης (Solution Reports)

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1, τα δομικά χαρακτηριστικά του μοντέλου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: αυτά που αφορούν την είσοδο και αυτά που αφορούν την έξοδο. Τα πρώτα εισάγονται στο πρόγραμμα από τον χρήστη, ενώ τα δεύτερα εξάγονται από το πρόγραμμα αυτόματα σε κάθε εκτέλεσή του.

5.2.1.1 Δομικά στοιχεία εισόδου του GAMS

Η δεσμευμένη λέξη ‘Set’ ή ‘Sets’, χρησιμοποιείται στο GAMS για να δηλώσει ο χρήστης τους δείκτες και για να προσδιορίσει το σύνολο των πιθανών τιμών τους. Για παράδειγμα, μια εντολή ‘Set’ μπορεί να οριστεί ως εξής:

Sets

```
i buses /i1*i5/
C Cities /Athens, Chania, Arta, Mirina/;
```

Οι δύο δείκτες που ορίζονται εδώ είναι ο *i* και ο *C*, ενώ το κείμενο που ακολουθεί τα ονόματα αυτά (*buses* και *Cities*) αποτελεί σχόλιο και δεν λαμβάνεται υπόψη από το πρόγραμμα. Ο προσδιορισμός των τιμών των συνόλων γίνεται μεταξύ των δύο συμβόλων ‘/’, ενώ το σύμβολο ‘*’ είναι χρήσιμο στην περίπτωση που τα στοιχεία του συνόλου είναι διαδοχικοί αριθμοί, όπως το σύνολο *i* τα στοιχεία του οποίου είναι από το 1 έως το 5. Τα σύνολα μπορούν να είναι είτε στατικά (σταθερού μεγέθους) είτε δυναμικά (μεταβλητού μεγέθους) και η εντολή πάντα τερματίζεται με το σύμβολο του ερωτηματικού της ελληνικής αλφαβήτου ‘;’. Σημειώνεται πως αν πρέπει να χρησιμοποιηθεί το ίδιο σύμβολο δύο φορές, τότε απαιτείται να υπάρχουν δύο διαφορετικοί δείκτες. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή **alias**, η οποία αντιστοιχεί τον υπάρχον δείκτη σε έναν δεύτερο, π.χ.:

```
alias(i,j);
```

Ο προσδιορισμός των συνόλων των δεικτών ακολουθείται από τις εντολές εισόδου των δεδομένων του προβλήματος (data). Οι παράμετροι και οι πίνακες αποτελούν δομές του GAMS για τον ορισμό δεδομένων πινάκων με δύο ή περισσότερες διαστάσεις. Τα δύο αυτά είδη δεδομένων εισόδου είναι ισοδύναμα, με τη διαφορά ότι για τον ορισμό μονοδιάστατου πίνακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο η δομή της παραμέτρου.

Η δεσμευμένη λέξη του προγράμματος για τις παραμέτρους είναι η: ‘**Parameter**’ ή ‘**Parameters**’ και χρησιμοποιείται για τη δήλωση δεδομένων σε μορφή διανυσμάτων στο πρόγραμμα, όπως για παράδειγμα:

Parameter

```
P(i) ενεργός ισχύς φορτίου α.μ.
/i1 0
i2 0.01
i3 0.009
i4 0.012
i5 0.01/;
```

Στο παράδειγμα αυτό, η παράμετρος *P(i)* ορίζεται σε όρους του συνόλου *i* και για κάθε τιμή του συνόλου παίρνει μία τιμή. Οι αναθέσεις των τιμών της παραμέτρου γίνονται μεταξύ των δύο συμβόλων ‘/’ και η εντολή τερματίζεται με το σύμβολο του ελληνικού ερωτηματικού.

Η δεσμευμένη λέξη ‘**Table**’ ή ‘**Tables**’ ορίζει την εντολή για τη δημιουργία πίνακα, δύο ή περισσότερων δεικτών. Μετά την ονομασία του πίνακα ακολουθούν, προαιρετικά,

σχόλια όπως φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα όπου ορίζονται ως πίνακας, οι αντιστάσεις των γραμμών ενός δικτύου.

Table $R(i,i)$ ωμική αντίσταση δικτύου 5 ζυγών α.μ.

	$i1$	$i2$	$i3$	$i4$	$i5$
$i1$	0	0.005752	0.005563	0	0
$i2$	0.005752	0	0.004539	0	0
$i3$	0.005563	0.004539	0	0.007569	0
$i4$	0	0	0.007569	0	0.005469
$i5$	0	0	0	0.005469	0

Υπάρχει ένας επιπλέον τύπος δεδομένων, ο οποίος ορίζεται από τη δεσμευμένη λέξη ‘**Scalar**’ και χρησιμοποιείται για τη δήλωση βαθμωτών μεγεθών ως εξής:

Scalar M συντελεστής μέγιστης ισχύος /20/;

Για τον ορισμό των μεταβλητών βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται η δεσμευμένη από το πρόγραμμα λέξη ‘**Variable**’ ή ‘**Variables**’ με τον ακόλουθο τρόπο:

Variables

L	μεταβλητή αντικειμενικής συνάρτησης
$Pslack(i)$	ενεργή ισχύς στον ζυγό αναφοράς
$y(i,j)$	μεταβλητή κατάστασης διακοπών ;

Αμέσως μετά το όνομα της μεταβλητής ακολουθούν σε παρένθεση οι διαστάσεις της, με βάση τα ορισμένα σύνολα δεικτών. Σε κάθε πρόγραμμα του GAMS πρέπει να ορίζεται μία βαθμωτή μεταβλητή (εδώ η L), η οποία θα αντιπροσωπεύει την αντικειμενική συνάρτηση. Μετά τον ορισμό μπορούν να ακολουθούν σχόλια και αφού ορισθούν όλες οι μεταβλητές, η εντολή τερματίζεται με το σύμβολο ‘;’. Μετά τον ορισμό πρέπει σε κάθε μεταβλητή να ανατεθεί ένας τύπος, οι οποίοι καθορίζουν το εύρος τιμών τους. Οι επιτρεπτοί τύποι μεταβλητών καθώς και τα όρια αυτών, φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Επιτρεπόμενοι τύποι μεταβλητών.

Τύπος μεταβλητής	Επιτρεπόμενο εύρος μεταβλητής
free (προεπιλογή)	$-\infty$ έως $+\infty$
positive (θετική)	0 έως $+\infty$
negative (αρνητική)	$-\infty$ έως 0
binary (δυναδική)	0 ή 1
integer (ακέραια)	0, 1, ..., 100 (προεπιλογή)

Έπειτα ακολουθεί η εντολή για τον ορισμό των εξισώσεων και ανισώσεων, την οποία αντιλαμβάνεται το πρόγραμμα μέσω της δεσμευμένης λέξης ‘**Equation**’ ή ‘**Equations**’. Με την εντολή αυτή ορίζονται οι περιορισμοί του προβλήματος και η συντακτική μορφή ορισμού εξίσωσης είναι η ακόλουθη:

Equations

object αντικειμενική συνάρτηση
Real(i) ενεργή ισχύς σε ζυγό *i*
S(i,j) θερμικό όριο γραμμής

$$\begin{aligned}
 \text{object ..} \quad & L = e = \text{sum}((i,j), \text{SON}(i,j)) + \text{sum}((i,j), \text{SOFF}(i,j)) + \\
 & \quad \quad \quad 0.001 * (\text{sum}(i, \text{Pslack}(i)) + \text{sum}(i, \text{Qslack}(i))) \quad ; \\
 \text{Real(i) ..} \quad & \text{PiL}(i) - \text{Pslack}(i) = l = \text{sum}(j, \text{pij}(j,i) - \text{pij}(i,j) - (R(i,j) * \\
 & \quad \quad \quad (\text{sqr}(\text{pij}(j,i)) + \text{sqr}(\text{qij}(j,i))))) \quad ; \\
 \text{S(i,j) ..} \quad & (\text{sqr}(\text{pij}(i,j)) + \text{sqr}(\text{qij}(i,j))) = l = \text{sqr}(S) \quad ;
 \end{aligned}$$

Όπως φαίνεται στο παράδειγμα, αρχικά δηλώνονται όλοι οι προσδιορισμοί με κάποιο σχόλιο και στη συνέχεια ακολουθεί ο ορισμός του καθενός. Ο ορισμός ενός περιορισμού αποτελείται κατά σειρά από το όνομα του, τα σύνολα δεικτών που χρησιμοποιεί, το σύμβολο ‘..’, το οποίο συνδέει τα ονόματα των περιορισμών με την εξίσωση ή την ανίσωση που τους ορίζει και το σύμβολο τερματισμού ‘;’. Οι τελεστές που χρησιμοποιούνται είναι τρεις:

1. Ο ‘=e=’, που υποδηλώνει ισότητα.
2. Ο ‘=l=’, που υποδηλώνει την ανισότητα ‘μικρότερο ή ίσο (≤)’.
3. Ο ‘=g=’, που υποδηλώνει την ανισότητα ‘μεγαλύτερο ή ίσο (≥)’.

Στη συνέχεια ακολουθεί η εντολή ‘**Model**’, η οποία προσδιορίζει ποιες εξισώσεις θα συμπεριληφθούν στο μοντέλο επίλυσης. Η σύνταξη της εντολής περιλαμβάνει τη δεσμευμένη από το πρόγραμμα λέξη ‘**Model**’, μετά από την οποία εισάγεται το όνομα που δίνει ο χρήστης στο μοντέλο και ακολούθως, ανάμεσα σε δύο καθέτους, παρατίθεται η λίστα με τα ονόματα των εξισώσεων. Σε περίπτωση που πρόκειται να συμπεριληφθούν όλες οι δηλωμένες εξισώσεις, ο χρήστης μπορεί απλώς να πληκτρολογήσει εντός των καθέτων την λέξη ‘all’, για παράδειγμα:

Model outage /all/;

Μόλις μοντέλο έχει δηλωθεί και έχουν αποσαφηνιστεί οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιήσει, όλα είναι έτοιμα για να κληθεί ο επιλυτής του προβλήματος. Αυτό συμβαίνει με την εντολή ‘**Solve**’, το όνομα του μοντέλου που πρόκειται να επιλυθεί από το πρόγραμμα, τη δεσμευμένη λέξη ‘using’ και την επιλογή μιας διαδικασίας επίλυσης, κατάλληλης για το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια επιλέγεται αν θα ελαχιστοποιηθεί ή θα μεγιστοποιηθεί η μεταβλητή βελτιστοποίησης, με τις δεσμευμένες λέξεις ‘minimizing’ ή ‘maximizing’ αντίστοιχα. Ενδεικτικά, μερικοί επιλυτές που χρησιμοποιεί το GAMS φαίνονται στον Πίνακα 5.3. Στο παράδειγμα που ακολουθεί χρησιμοποιείται η διαδικασία επίλυσης *miqcp*, για πρόβλημα βελτιστοποίησης μεικτού-ακεραίου τετραγωνικά περιορισμένου προγραμματισμού (*mixed integer quadratic constrained programming*) και ο σκοπός της επίλυσης είναι η ελαχιστοποίηση της μεταβλητής της αντικειμενικής συνάρτησης *L*:

Solve outage USING *miqcp* minimizing *L*;

Πίνακας 5.3: Βασικοί τύποι επιλυτών του GAMS.

Είδος επιλυτή	Περιγραφή μοντέλου	Προδιαγραφές
lp	Γραμμικός προγραμματισμός	Μοντέλο με γραμμικούς περιορισμούς και αντικειμενικές συναρτήσεις.
nlp	Μη γραμμικός προγραμματισμός	Μοντέλο με μη γραμμικούς όρους και χωρίς μεταβλητές διακριτών τιμών.
miqp	Μεικτός-ακέραιος προγραμματισμός	Μοντέλο με δυαδικές και/ή ακέραιες μεταβλητές, αλλά χωρίς μη γραμμικούς όρους.
qp	Τετραγωνικά περιορισμένος προγραμματισμός	Μοντέλο με γραμμικούς και τετραγωνικούς όρους, αλλά χωρίς μη γραμμικούς όρους ή μεταβλητές διακριτών τιμών.
miqp	Μεικτός ακέραιος τετραγωνικά περιορισμένος προγραμματισμός	Μοντέλο που περιλαμβάνει τόσο τετραγωνικούς όρους όσο και μεταβλητές διακριτών τιμών, αλλά όχι μη γραμμικούς όρους.

Αν ο χρήστης επιθυμεί να λάβει στην οθόνη τιμές τόσο από τα δεδομένα εισόδου όσο και από τις τιμές βελτιστοποίησης που παράγει το πρόγραμμα, μπορεί να χρησιμοποιήσει την εντολή **'display'**. Για παράδειγμα η εντολή που ακολουθεί, εκτυπώνει στην οθόνη τις βέλτιστες τιμές για όλα τα στοιχεία του πίνακα z :

display z.l;

Επιπλέον πολύ σημαντική είναι η λειτουργία του συμβόλου '\$', το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία κατάλληλων υποσυνόλων, όταν ο χρήστης επιθυμεί να προσδιορίσει ένα εύρος τιμών μικρότερο των αρχικά προσδιορισμένων συνόλων. Για παράδειγμα, η παρακάτω εξίσωση "y", εκτελείται μόνο για τα ζεύγη δεικτών, τα οποία παίρνουν τιμή «1» στον πίνακα με όνομα Switch(i,j) :

$$y(i,j)$(Switch1(i,j) eq 1) .. y(i,j) = e = z(i,j) + z(j,i) \quad ;$$

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει επίσης πολλές συναρτήσεις, οι οποίες χρησιμεύουν αρκετά στην έκφραση των εξισώσεων. Ενδεικτικά, μερικές από αυτές βρίσκονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Εξισώσεις του προγράμματος GAMS.

Όνομα συνάρτησης	Περιγραφή
abs(x)	Απόλυτη τιμή της μεταβλητής x
sin(x)	Συνάρτηση ημιτόνου της μεταβλητής x (rad)
cos(x)	Συνάρτηση συνημίτονου της μεταβλητής x (rad)
exp(x)	Εκθετική συνάρτηση της μεταβλητής x
sqr(x)	Το τετράγωνο της μεταβλητής x
round(x)	Στρογγυλοποιεί την x στον κοντινότερο ακέραιο

5.2.1.2 Δομικά στοιχεία εξόδου του GAMS

Μόλις ο χρήστης συντάξει τον κώδικά του και αναπτύξει το μοντέλο βελτιστοποίησης, το GAMS δημιουργεί αυτόματα το εκτελέσιμο αρχείο με κατάληξη ‘.gsm’, δίνοντας τη δυνατότητα στον χρήστη να το εκτελέσει επιλέγοντας την ένδειξη ‘Run Gams’ στην πλατφόρμα του προγράμματος. Αν στον κώδικα δεν υπάρχουν λάθη, με την εκτέλεση του δημιουργείται ένα αρχείο εξόδου με την κατάληξη ‘.lst’, το οποίο περιέχει μια αναλυτική περιγραφή της βέλτιστης λύσης ή τα αίτια που αυτή δεν βρέθηκε.

Ανεξάρτητα από το αν υπάρχουν λάθη στον κώδικα που εμποδίζουν τη βελτιστοποίηση, η πρώτη ενότητα των στοιχείων εξόδου από την εκτέλεση του προγράμματος είναι ένα **αντίγραφο του αρχείου εισόδου** που δημιούργησε ο χρήστης (Echo Print) με αριθμημένες σειρές. Αν το πρόγραμμα ανακαλύψει κάποιο λάθος στον κώδικα, τότε εισάγει ένα κωδικοποιημένο μήνυμα μέσα στο αντίγραφο του κώδικα, στην αμέσως επόμενη γραμμή από αυτή που βρίσκεται το λάθος.

Η επόμενη ενότητα δεδομένων εξόδου είναι οι **χάρτες καταγραφής** (Reference Maps), οι οποίοι αποτελούν το τελευταίο στάδιο αν έχουν εντοπισθεί λάθη. Πρόκειται για ένα κείμενο, το οποίο περιέχει περιλήψεις και αναλύσεις του αρχείου εισόδου για λόγους αποσφαλμάτωσης και έγγραφης καταχώρησης. Στη λίστα φαίνονται, με αλφαβητική σειρά, το είδος κάθε στοιχείου και μία κωδικοποιημένη αναφορά για κάθε εμφάνισή του στο αρχείο εισόδου.

```

33 bus example
Equation Listing      SOLVE minimLoss Using MIQCP From line 119

---- loss =E= objective function

loss..  L + (0)*pij(i1,i2) + (0)*pij(i2,i1) + (0)*pij(i2,i3) + (0)*pij(i2,i19)
        + (0)*pij(i3,i2) + (0)*pij(i3,i4) + (0)*pij(i3,i23) + (0)*pij(i4,i3)
        + (0)*pij(i4,i5) + (0)*pij(i5,i4) + (0)*pij(i5,i6) + (0)*pij(i6,i5)
        + (0)*pij(i6,i7) + (0)*pij(i6,i26) + (0)*pij(i7,i6) + (0)*pij(i7,i8)
        + (0)*pij(i8,i7) + (0)*pij(i8,i9) + (0)*pij(i8,i21) + (0)*pij(i9,i8)
        + (0)*pij(i9,i10) + (0)*pij(i9,i15) + (0)*pij(i10,i9) + (0)*pij(i10,i11)
        + (0)*pij(i11,i10) + (0)*pij(i11,i12) + (0)*pij(i12,i11)
        + (0)*pij(i12,i13) + (0)*pij(i12,i22) + (0)*pij(i13,i12)
        + (0)*pij(i13,i14) + (0)*pij(i14,i13) + (0)*pij(i14,i15) + (0)*pij(i15,i9)
        + (0)*pij(i15,i14) + (0)*pij(i15,i16) + (0)*pij(i16,i15)
        + (0)*pij(i16,i17) + (0)*pij(i17,i16) + (0)*pij(i17,i18)
        + (0)*pij(i18,i17) + (0)*pij(i18,i33) + (0)*pij(i19,i2) + (0)*pij(i19,i20)
        + (0)*pij(i20,i19) + (0)*pij(i20,i21) + (0)*pij(i21,i8) + (0)*pij(i21,i20)
        + (0)*pij(i21,i22) + (0)*pij(i22,i12) + (0)*pij(i22,i21) + (0)*pij(i23,i3)
        + (0)*pij(i23,i24) + (0)*pij(i24,i23) + (0)*pij(i24,i25)
        + (0)*pij(i25,i24) + (0)*pij(i25,i29) + (0)*pij(i26,i6) + (0)*pij(i26,i27)
        + (0)*pij(i27,i26) + (0)*pij(i27,i28) + (0)*pij(i28,i27)
        + (0)*pij(i28,i29) + (0)*pij(i29,i25) + (0)*pij(i29,i28)
        + (0)*pij(i29,i30) + (0)*pij(i30,i29) + (0)*pij(i30,i31)

```

Σχήμα 5.1: Δείγμα καταλόγου εξισώσεων του αρχείου εξόδου του GAMS.

Εφόσον ο κώδικας που εισήγαγε ο χρήστης στο πρόγραμμα δεν περιλαμβάνει κάποιο λάθος, το GAMS είναι σε θέση να παράγει ένα μοντέλο. Αν το μοντέλο αυτό συμπίπτει με το

μοντέλο που ο χρήστης σκόπευε εξαρχής να δημιουργήσει, είναι μία ερώτηση που μόνο ο χρήστης μπορεί να την απαντήσει. Ο **κατάλογος εξισώσεων** (Equation Listing) είναι πιθανότατα ο καλύτερος τρόπος για να διερευνηθεί αυτό το ερώτημα. Συγκεκριμένα ο κατάλογος αυτός, που αποτελεί προϊόν της εντολής ‘solve’, απεικονίζει τις εξισώσεις που παράγονται στο μοντέλο επίλυσης, με τις εκάστοτε τιμές των συνόλων και των παραμέτρων που λαμβάνουν σε κάθε βήμα εκτέλεσης. Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται ένα παράδειγμα.

Η τελευταία ενότητα του αρχείου εξόδου που παράγει το πρόγραμμα, προτού να καλέσει τον επιλυτή, είναι ένα σύνολο από **στατιστικά στοιχεία του μοντέλου** (Model Statistics), αναφορικά με το μέγεθος του μοντέλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.

```

Model Statistics      SOLVE minimLoss Using MIQCP From line 119

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS      8      SINGLE EQUATIONS      3,399
BLOCKS OF VARIABLES      7      SINGLE VARIABLES      4,423
NON ZERO ELEMENTS      13,118  NON LINEAR N-Z      148
DERIVATIVE POOL          10     CONSTANT POOL         50
CODE LENGTH              447    DISCRETE VARIABLES    148

GENERATION TIME      =      0.094 SECONDS      5 MB  24.1.3 r41464 WEX-WEI

EXECUTION TIME      =      0.094 SECONDS      5 MB  24.1.3 r41464 WEX-WEI
GAMS 24.1.3 r41464 Released Jul 26, 2013 WEX-WEI x86_64/MS Windows 01/19/18 14:58:53 Page 7
33 bus example
Solution Report      SOLVE minimLoss Using MIQCP From line 119

```

Σχήμα 5.2: Στατιστικά στοιχεία μοντέλου GAMS.

Μόλις ο επιλυτής εκτελεσθεί, το πρόγραμμα εκτυπώνει μία σύντομη σύνοψη της λύσης, η οποία περιλαμβάνει τις **αναφορές κατάστασης** (Status Reports) και συγκεκριμένα την κατάσταση του επιλυτή (Solver Status) και την κατάσταση του μοντέλου (Model Status), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.

```

              S O L V E      S U M M A R Y

MODEL  minimLoss      OBJECTIVE  L
TYPE   MIQCP          DIRECTION  MINIMIZE
SOLVER CPLEX          FROM LINE  119

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      8 Integer Solution
**** OBJECTIVE VALUE          0.0132

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.813      1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT     143      2000000000
EVALUATION ERRORS          0          0

```

Σχήμα 5.3: Αναφορές κατάστασης μοντέλου GAMS

Η επιθυμητή κατάσταση του επιλυτή είναι: ‘1 Normal Completion’ (κανονική ολοκλήρωση). Για την κατάσταση του μοντέλου, στον ακέραιο προγραμματισμό που χρησιμοποιεί το παράδειγμα του σχήματος, η επιθυμητή κατάσταση είναι: ‘8 Integer Solution’, που σημαίνει ότι βρέθηκε ακέραια εφαρμόσιμη λύση.

Στην περίπτωση που οι αναφορές κατάστασης είναι αποδεκτές, ο χρήστης μπορεί να εξετάσει τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, στην τελευταία ενότητα των δεδομένων εξόδου, δηλαδή στις **αναφορές λύσης** (Solution Reports). Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τα όρια των τιμών των αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4. Στο τέλος υπάρχει μία πολύ σημαντική περίληψη των αναφορών, η οποία παρέχει μία καταμέτρηση του συνόλου των μη-βέλτιστων, των ανέφικτων και των μη οριοθετούμενων στοιχείων (Σχήμα 5.5).

```

---- EQU Real   Real power load at bus i
      LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
i1      .          .          .          EPS
i2     -0.010     -0.010     -0.010     -0.004
i3     -0.009     -0.009     -0.009     -0.022
i4     -0.012     -0.012     -0.012     -0.028
i5     -0.006     -0.006     -0.006     -0.033
i6     -0.006     -0.006     -0.006     -0.043
i7     -0.020     -0.020     -0.020     -0.045
i8     -0.020     -0.020     -0.020     -0.050
i9     -0.006     -0.006     -0.006     -0.056
i10    -0.006     -0.006     -0.006     -0.033
i11    -0.004     -0.004     -0.004     -0.033
i12    -0.006     -0.006     -0.006     -0.032
i13    -0.006     -0.006     -0.006     -0.036
i14    -0.012     -0.012     -0.012     -0.037
i15    -0.006     -0.006     -0.006     -0.064
i16    -0.006     -0.006     -0.006     -0.066
i17    -0.006     -0.006     -0.006     -0.070
i18    -0.009     -0.009     -0.009     -0.071
i19    -0.009     -0.009     -0.009     -0.006
i20    -0.009     -0.009     -0.009     -0.017
i21    -0.009     -0.009     -0.009     -0.020
i22    -0.009     -0.009     -0.009     -0.024
i23    -0.009     -0.009     -0.009     -0.031
i24    -0.042     -0.042     -0.042     -0.048
i25    -0.042     -0.042     -0.042     -0.061
i26    -0.006     -0.006     -0.006     -0.044
i27    -0.006     -0.006     -0.006     -0.044
i28    -0.006     -0.006     -0.006     -0.045
i29    -0.012     -0.012     -0.012     -0.065
i30    -0.020     -0.020     -0.020     -0.068
i31    -0.015     -0.015     -0.015     -0.073
i32    -0.021     -0.021     -0.021     -0.074
i33    -0.006     -0.006     -0.006     -0.071
    
```

Σχήμα 5.4: Δείγμα αναφοράς λύσης μοντέλου GAMS.

```

**** REPORT SUMMARY :           0      NONOPT
                                0      INFEASIBLE
                                0      UNBOUNDED
                                0      ERRORS
    
```

Σχήμα 5.5: Περίληψη αναφορών του μοντέλου GAMS.

5.2.2 Ο επιλυτής CPLEX

Ο επιλυτής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ονομάζεται CPLEX και είναι κατάλληλος για την επίλυση προβλημάτων μεικτού-ακέραιου τετραγωνικά περιορισμένου προγραμματισμού (Mixed-Integer Quadratically Constrained Program – MIQCP). Τα χαρακτηριστικά αυτού του είδους των προβλημάτων είναι τα εξής:

- Περιλαμβάνουν μεταβλητές με συνεχείς αλλά και διακριτές τιμές.
- Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί είτε να περιέχει ένα τετραγωνικό όρο είτε όχι.
- Υπάρχει στο μοντέλο τουλάχιστον ένας περιορισμός με τετραγωνικό όρο.

Ο CPLEX μπορεί να επιλύσει τέτοιου είδους προβλήματα, όταν ισχύουν οι κάτωθι συνθήκες:

- Η αντικειμενική συνάρτηση είναι γραμμική.
- Η αντικειμενική συνάρτηση περιέχει τετραγωνικούς όρους.
- Οι περιορισμοί που περιέχουν έναν τετραγωνικό όρο τύπου SOCP.
- Ο τετραγωνικός όρος σε έναν περιορισμό περιλαμβάνει μόνο πολλαπλασιασμό δυαδικών τιμών.

5.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MATLAB

Το MATLAB (Matrix Laboratory) είναι μία προγραμματιστική πλατφόρμα, η οποία έχει σχεδιαστεί με γλώσσα προγραμματισμού 4^{ης} γενιάς [36]. Η κύρια λειτουργία του υπολογιστικού αυτού συστήματος, είναι η γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, η οποία είναι βασισμένη σε άλγεβρα μητρών, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την ευκολότερη έκφραση των υπολογιστικών μαθηματικών. Περιλαμβάνει υπολογιστικό, απεικονιστικό και προγραμματιστικό περιβάλλον και χρησιμοποιείται κυρίως για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, καθώς και για προγραμματισμό.

Επιπλέον αποτελεί ένα σύγχρονο περιβάλλον γλώσσας προγραμματισμού με εκλεπτυσμένες δομές δεδομένων, το οποίο διαθέτει εργαλεία αποσφαλμάτωσης και ενσωματωμένη δυνατότητα επεξεργασίας, υποστηρίζοντας παράλληλα τον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό. Αυτοί οι παράγοντες καθιστούν το MATLAB ένα άριστο εργαλείο για της ανάγκες της έρευνας.

Η έκδοση του MATLAB που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η R2017a. Η έκδοση αυτή υποστηρίζεται από λειτουργικά συστήματα Windows 7 Service Pack 1 ή νεότερα και απαιτούνται 4-6 GB διαθέσιμου αποθηκευτικού χώρου για μία τυπική εγκατάσταση και 2 GB RAM [37].

5.3.1 Περιγραφή βασικών συναρτήσεων της εργασίας

Σκοπός του προγραμματιστικού μέρους της εργασίας είναι η προσομοίωση του μηχανισμού εντοπισμού, απομόνωσης του σφάλματος και μερικής αποκατάστασης του δικτύου διανομής. Το MATLAB είναι εξαιρετικά χρήσιμο σε αυτή τη διαδικασία, διότι επιτρέπει την αλληλεπίδραση τόσο με τον χρήστη, όσο και με άλλα προγράμματα. Συγκεκριμένα το MATLAB μπορεί να καλεί άλλα προγράμματα αυτόματα, χωρίς ο χρήστης να χρειαστεί να τα εκτελεί.

Ο κώδικας MATLAB που αναπτύχθηκε, χωρίζεται σε πέντε στάδια:

1. Την φόρτωση των δεδομένων του υπό εξέταση ΔΔ στο MATLAB, μέσω αρχείου Microsoft Excel.
2. Την προσομοίωση του σταδίου εντοπισμού και απομόνωσης του σφάλματος, αποκλειστικά με τη χρήση του λογισμικού MATLAB.
3. Τη μεταφορά δεδομένων στο πρόγραμμα GAMS.
4. Την προσομοίωση του σταδίου μερικής αποκατάστασης αποκλειστικά μέσω GAMS και τη μεταφορά των αποτελεσμάτων εκ νέου στο MATLAB.

5. Την παρουσίαση των διακοπτικών χειρισμών σε ένα νέο αρχείο Microsoft Excel.

Η προσομοίωση του μηχανισμού αντιμετώπισης μόνιμου σφάλματος σε ένα ΔΔ, όσον αφορά τον χρήστη του λογισμικού, περιλαμβάνει αλληλεπίδραση αποκλειστικά με το λογισμικό MATLAB. Αρχικά ο χρήστης εκτελεί το αρχείο MATLAB Main_v1.m, το οποίο αποτελεί το κύριο σώμα κώδικα του λογισμικού.

Με την εκτέλεση λοιπόν του αρχείου και τη βοήθεια της εντολής **'uigetfile'**, ζητείται από τον χρήστη να επιλέξει ένα αρχείο Excel, στο οποίο είναι φορτωμένα τα δεδομένα του ΔΔ που επιθυμεί να εξετάσει. Σημειώνεται ότι τα δεδομένα του δικτύου πρέπει να είναι κατάλληλα οργανωμένα στο Excel αρχείο, ώστε να είναι επιτυχώς διαχειρίσιμα από τον κώδικα του MATLAB.

Η οργάνωση των δεδομένων του αρχείου Excel, με σειρά ανάγνωσης από το Main_v1.m, έχει ως εξής:

- i. Αρχικά, περιλαμβάνεται ένα φύλλο εργασίας με την ονομασία **'baseMVA'**, το οποίο περιέχει την τιμή της βασικής ισχύος του δικτύου σε MVA αποθηκευμένη στο κελί **'A2'**.
- ii. Το επόμενο φύλλο εργασίας ονομάζεται **'bus_data'** και εκεί είναι αποθηκευμένα τα δεδομένα όλων των ζυγών του δικτύου. Ειδικότερα, η στήλη **'A'** περιέχει την αριθμητική ονομασία όλων των ζυγών, ενώ η στήλη **'B'** καθορίζει ποιοι ζυγοί είναι ζυγοί παραγωγής και ποιοι ζυγοί φορτίου, αντιστοιχίζοντας την τιμή **«3»** και **«1»** σε κάθε κελί, αντίστοιχα. Στις στήλες **'C'** και **'D'** είναι αποθηκευμένη η ενεργός και η άεργος ισχύς φορτίου κάθε ζυγού, αντίστοιχα. Οι τιμές ισχύος για τους ζυγούς παραγωγής είναι πάντα **«0»** και η μονάδα μέτρησης της ενεργού και αέργου ισχύος είναι σε MW και MVA_r, αντίστοιχα.
- iii. Τα δεδομένα των γραμμών του δικτύου βρίσκονται στο φύλλο εργασίας **'branch_data'**. Οι ζυγοί αναχώρησης των γραμμών συμπληρώνουν τη στήλη **'A'**, ενώ οι ζυγοί άφιξης τη στήλη **'B'**. Η αντίσταση και η αντίδραση κάθε γραμμής βρίσκονται στις στήλες **'C'** και **'D'**, αντίστοιχα, σε ανά μονάδα αναγόμενες τιμές. Η στήλη **'K'** υποδεικνύει τα κανονικά ανοικτά σημεία (ΚΑΣ) και τα κανονικά κλειστά σημεία (ΚΚΣ) του δικτύου, αντιστοιχίζοντας σε κάθε γραμμή την τιμή **«1»** ή **«0»** για κάθε περίπτωση.
- iv. Οι γραμμές με ή χωρίς διακόπτη καταχωρούνται στο φύλλο εργασίας με το όνομα **'Switches'**. Οι στήλες **'A'** και **'B'** περιέχουν τους ζυγούς άφιξης και αναχώρησης κάθε γραμμής αντίστοιχα, ενώ η στήλη **'C'** υποδεικνύει την ύπαρξη διακόπτη για κάθε γραμμή, λαμβάνοντας τιμή **«1»** όταν αυτή περιέχει διακόπτη και **«0»** όταν δεν περιέχει διακόπτη.

Συνεπώς, μόλις ο χρήστης επιλέξει το αρχείο Excel, τα δεδομένα του δικτύου αντιγράφονται ως δεδομένα εισόδου στο MATLAB, μέσω της εντολής **'xlsread'**, η οποία τα αναζητεί στις παραπάνω θέσεις του αρχείου. Τα χαρακτηριστικά του δικτύου οργανώνονται σε πίνακες και διανύσματα του MATLAB, ολοκληρώνοντας το στάδιο εισαγωγής δεδομένων στο λογισμικό.

Στη συνέχεια το πρόγραμμα ζητάει από τον χρήστη να προσδιορίσει τη γραμμή στην οποία συνέβη το σφάλμα, με βάση τους ζυγούς που συνδέει. Στο σημείο αυτό ξεκινά ο

αλγόριθμος απομόνωσης του σφάλματος, ο οποίος με χρήση των αναδρομικών συναρτήσεων ‘*riso*’ και ‘*empros*’ που περιγράφονται στον Πίνακα 5.5, διατρέχει το δίκτυο αναζητώντας τους πλησιέστερους διακόπτες που θα πρέπει να ανοίξουν, ώστε να απομονωθεί πλήρως το σφάλμα. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στη δημιουργία ενός νέου δικτύου, το οποίο είναι πανομοιότυπο με το αρχικό, χωρίς όμως να περιέχει τα απομονωμένα τμήματα. Το νέο αυτό δίκτυο πρέπει να μεταφερθεί στο GAMS, όπου θα πραγματοποιηθεί η μερική αποκατάστασή του.

Η επικοινωνία MATLAB και GAMS επιτυγχάνεται μέσω της βιβλιοθήκης εντολών ‘*GDXMRW*’ (*gams data eXchange matlab read/write*), η οποία χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των δύο προγραμμάτων [38]. Ειδικότερα, το MATLAB με την εντολή ‘*wgdx*’ δημιουργεί ένα, προσπελάσιμο από το GAMS, αρχείο *GDX* (.*gdx*), στο οποίο εξάγει τα δεδομένα του νέου δικτύου. Η σύνταξη της εντολής, η οποία εξάγει τα δεδομένα σε ένα αρχείο ‘*FileName.gdx*’, είναι η εξής:

```
wgdx('fileName', s1, s2 ...);
```

Σημειώνεται πως τα εξαγόμενα δεδομένα είναι διαμορφωμένα σε μία ειδική δομή δεδομένων (*struct*), της μορφής:

```
Bus.name = 'i';
Bus.ts = 'Set of Buses';
Bus.type = 'set';
Bus.val = buses;
```

Έπειτα, μέσω MATLAB, δίνεται εντολή στο GAMS να εκτελέσει τον κώδικα μερικής αποκατάστασης. Η εντολή αυτή συντάσσεται ως εξής:

```
gams('Restoration');
```

Το GAMS εκτελεί τον κώδικα μερικής αποκατάστασης που βρίσκεται στο αρχείο *Restoration.gms*, το οποίο περιγράφεται στον Πίνακα 5.5 και αποθηκεύει σε νέο *GDX* αρχείο τα βελτιστοποιημένα αποτελέσματα, τα οποία το MATLAB οργανώνει πάλι σε ειδική δομή και τα εισάγει με την εντολή ‘*rgdx*’, όπως φαίνεται στο παράδειγμα:

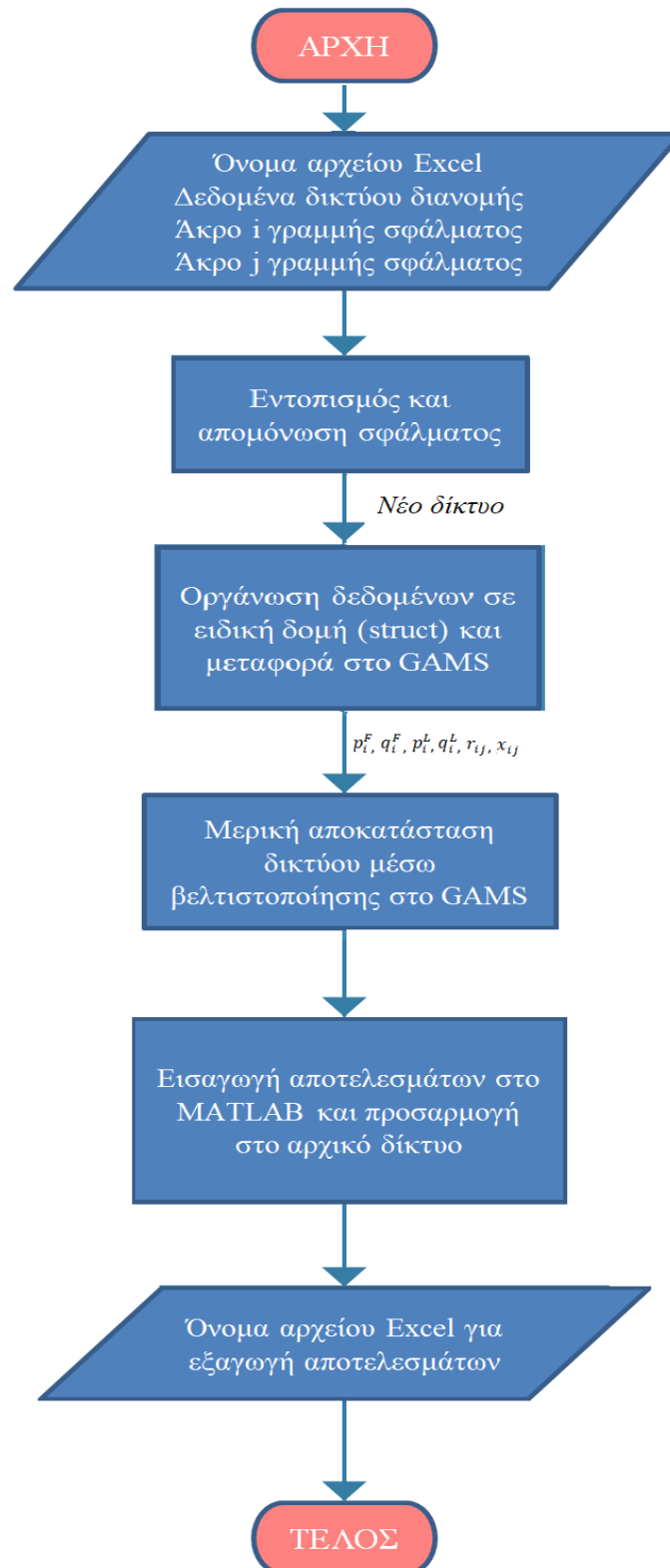
```
xs = struct ('name', 'modelstat', 'form', 'full');
x = rgdx('fileName', structure);
```

Τα αποτελέσματα είναι πλέον έτοιμα προς εξαγωγή σε ένα αρχείο Microsoft Excel. Το MATLAB δημιουργεί ένα τέτοιο αρχείο με την εντολή ‘*uiputfile*’ και καταχωρεί τα αποτελέσματα του αλγορίθμου μερικής αποκατάστασης.

Πίνακας 5.5: Περιγραφή αρχείων που παίρνουν μέρος στην αυτοματοποίηση του μηχανισμού απομόνωσης και μερικής αποκατάστασης σφάλματος.

Όνομα αρχείου	Λειτουργία
Main_v1.m	Το αρχείο αυτό εκτελείται από τον χρήστη και πραγματοποιεί όλες τις απαραίτητες διεργασίες, όπως π.χ. την ανάγνωση των δεδομένων εισόδου του δικτύου, την απομόνωση του σφάλματος, την κλήση συναρτήσεων MATLAB και την επικοινωνία με το λογισμικό GAMS, για τη μερική αποκατάσταση του δικτύου.
piiso.m	Το αρχείο αυτό αποτελεί μία συνάρτηση του MATLAB και καλείται μέσω του Main_v1.m στο στάδιο της απομόνωσης. Μέσω αναδρομής, εντοπίζει τους διακόπτες που μπορούν να απομονώσουν το σφάλμα, ανάντη της γραμμής σφάλματος. Η αναζήτηση αφορά την περιοχή μεταξύ του σφάλματος και της αρχικής του τροφοδοσίας. Οι μεταβλητές εισόδου είναι: ο ζυγός αναχώρησης της γραμμής σφάλματος, οι ζυγοί παραγωγής, ο πίνακας με τα ΚΚΣ του αρχικού δικτύου και ο πίνακας με τις γραμμές του δικτύου που διαθέτουν διακόπτη. Επιπλέον, στην είσοδο περιλαμβάνονται και οι τρεις μεταβλητές εξόδου: οι τιμές των απομονωμένων ζυγών και οι ζυγοί άφιξης και αναχώρησης των γραμμών με διακόπτη που πρόκειται να ανοίξουν.
emprom.m	Το αρχείο αυτό αποτελεί συνάρτηση του MATLAB και καλείται μέσω του Main_v1.m στο στάδιο της απομόνωσης. Στόχος της συνάρτησης αυτής είναι να εντοπίζει τους διακόπτες που μπορούν να απομονώσουν το σφάλμα κατάντη της γραμμής σφάλματος. Η αναζήτηση περιλαμβάνει την περιοχή κατάντη του σφάλματος και επιστρέφει ως μεταβλητές εξόδου: τους ζυγούς που θα απομονωθούν, τους ζυγούς αναχώρησης των γραμμών με διακόπτες που πρόκειται να ανοίξουν και τους ζυγούς άφιξης των γραμμών αυτών. Οι μεταβλητές εισόδου είναι: ο ζυγός άφιξης της γραμμής σφάλματος, οι ζυγοί παραγωγής, ο πίνακας με τα ΚΚΣ του αρχικού δικτύου, ο πίνακας με τις γραμμές του δικτύου που διαθέτουν διακόπτη καθώς και οι τρεις μεταβλητές εξόδου, λειτουργώντας με αναδρομή.
Restoration.gms	Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει κώδικα γραμμένο σε περιβάλλον GAMS. Στόχος του προγράμματος είναι η μερική αποκατάσταση του δικτύου μετά την απομόνωση του σφάλματος. Τα δεδομένα εισόδου είναι: ο συνολικός αριθμός των ζυγών του νέου δικτύου, οι ζυγοί παραγωγής του νέου δικτύου, η σύνθετη αντίσταση των γραμμών του νέου δικτύου, τα ΚΚΣ του νέου δικτύου, οι γραμμές με διακόπτη του νέου δικτύου, οι γραμμές χωρίς διακόπτη του νέου δικτύου, η ισχύς φορτίου των ζυγών του νέου δικτύου και τα ΚΚΣ του αρχικού δικτύου. Η εκτέλεση του προγράμματος επιστρέφει ως έξοδο: τις τιμές της ισχύος παραγωγής του δικτύου, τις γραμμές με κλειστούς διακόπτες και τα ΚΚΣ. Τα δεδομένα εξόδου αφορούν το αναδιαταγμένο δίκτυο. Το αρχείο αυτό καλείται μέσω του Main_v1.m στο στάδιο της αποκατάστασης.

Στο Σχήμα 5.6 συνοψίζεται η διαδικασία αυτή με ένα διάγραμμα ροής:



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα ροής προσομοίωσης μερικής αποκατάστασης του δικτύου διανομής σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

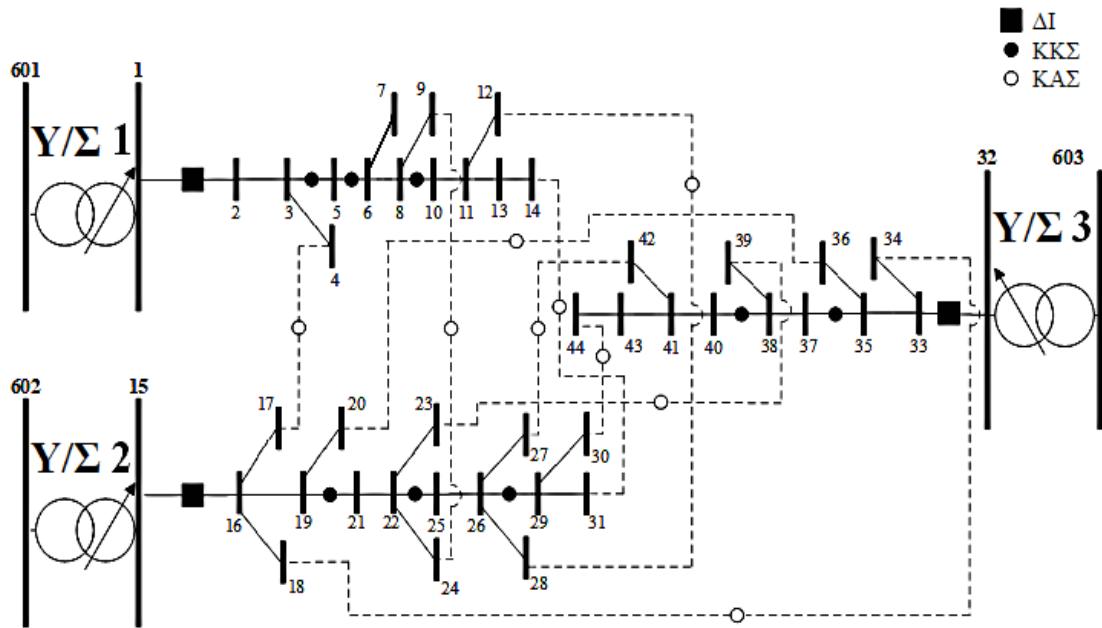
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου εντοπισμού, απομόνωσης και μερικής αποκατάσταση σφάλματος (ΕΑΑΣ), η οποία περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 και στο Κεφάλαιο 4, στα δίκτυα διανομής (ΔΔ) 44, 85, 135 και 880 κόμβων. Ειδικότερα, σε κάθε περίπτωση το δίκτυο υποβάλλεται σε δοκιμή τόσο μονού όσο και ταυτόχρονου διπλού μόνιμου σφάλματος. Κάθε δοκιμή περιλαμβάνει αναλυτική παρουσίαση της αναδιάταξης του δικτύου, ενώ γίνεται αναφορά και στον χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου καθώς και στην ποιότητα των αποτελεσμάτων. Οι προσομοιώσεις έχουν γίνει υπό τις παραδοχές ότι:

- Κάθε διακόπτης σε γραμμή σύνδεσης δύο κόμβων $i - j$, είναι τοποθετημένος αμέσως μετά τον κόμβο i , όταν ο κόμβος i τροφοδοτεί τον κόμβο j .
- Οι χειρισμοί των διακοπών ισχύος που βρίσκονται εκτός περιοχής σφάλματος μετά τη διαδικασία απομόνωσης, δεν υπολογίζονται από τη μέθοδο, καθώς αποτελούν υποχρεωτικές ενέργειες κατά την ανίχνευση σφάλματος και τη μερική αποκατάσταση του δικτύου. Συνεπώς, δεν χρειάζεται να υπολογιστούν.
- Σε κάθε γραμμή με διακόπτη είναι τοποθετημένος ένας δείκτης σφάλματος.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών τίθενται υπό σύγκριση στο τέλος του κεφαλαίου. Το σύνολο των δοκιμών σε δίκτυα διαφορετικού εύρους και ο έλεγχος για δύο περιπτώσεις σφάλματος οδηγούν στην εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος για την αποδοτικότητα του λογισμικού. Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν σε H/Y Intel Core i7 2,5 GHz και RAM 8 Gb.

6.2 ΔΙΚΤΥΟ 44 ΚΟΜΒΩΝ

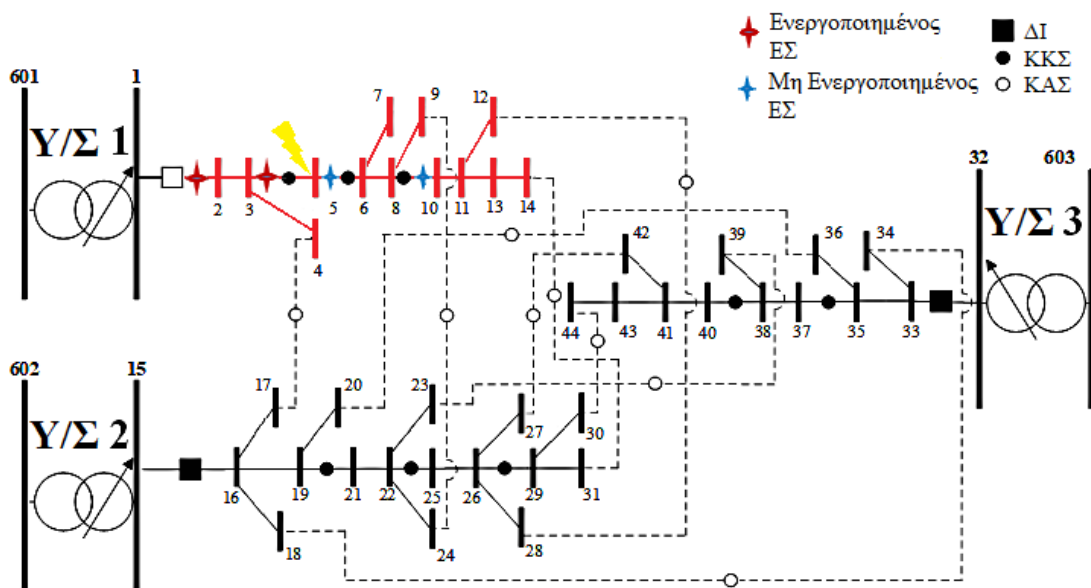
Το δίκτυο διανομής 44 κόμβων φαίνεται στο Σχήμα 6.1 και τα δεδομένα μπορούν να βρεθούν στο [39]. Πρόκειται για ένα δίκτυο με ονομαστική τάση 7,967 kV, που αποτελείται 3 κύριους υποσταθμούς, οι οποίοι μέσω των κόμβων 1, 15 και 32 τροφοδοτούν τα φορτία του. Επίσης, το δίκτυο διαθέτει 9 κανονικά ανοικτά σημεία (ΚΑΣ), δηλαδή γραμμές σύνδεσης με διακόπτη σε ανοικτή θέση, τα οποία αποτελούν εναλλακτικές διαδρομές σε περίπτωση σφάλματος και η ικανότητα κάθε γραμμής είναι 10 MVA.



Σχήμα 6.1: Δίκτυο διανομής 44 κόμβων.

6.2.1 Σφάλμα σε μία γραμμή του δικτύου

Η πρώτη δοκιμή της μεθόδου αφορά την περίπτωση σφάλματος σε μία γραμμή του ΔΔ 44 κόμβων. Έστω ότι συμβαίνει σφάλμα στη γραμμή διασύνδεσης των κόμβων 3–5. Αρχικά, ο διακόπτης ισχύος (ΔΙ) που βρίσκεται στην γραμμή 1–2 ανιχνεύει την ύπαρξη μόνιμου σφάλματος και ανοίγει, διακόπτοντας την τροφοδοσία των φορτίων στους κόμβους 2–14, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Βάσει των ενδείξεων των ενδεικτών σφάλματος, η περιοχή που έγινε το μόνιμο σφάλμα εντοπίζεται και απομονώνεται, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Μετά την απομόνωση του σφάλματος, επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.



Σχήμα 6.2: Το δίκτυο των 44 κόμβων αμέσως μετά το σφάλμα στη γραμμή 3–5.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εκτέλεση της μεθόδου παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.1 και 6.2. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.1, για την απομόνωση του σφάλματος απαιτείται το άνοιγμα των διακοπών που είναι εγκατεστημένοι στις γραμμές 3–5 και 5–6, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τη μέθοδο μελών σφάλματος, η οποία περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Συγκεκριμένα, το ρεύμα σφάλματος έχει ενεργοποιήσει τους ΕΣ που αντιστοιχούν στον ΔΙ της γραμμής 1–2 και τον διακόπτη φορτίου (ΔΦ) της γραμμής 3–5, ενώ όλοι οι υπόλοιποι ΕΣ, συμπεριλαμβανομένου και του ΕΣ της γραμμής 5–6, θα παραμείνουν απενεργοποιημένοι. Συνεπώς, η εξίσωση μελών σφάλματος που αφορά σφάλμα κατάντη του ΕΣ (3.1) επαληθεύεται μόνο από τον ΕΣ της γραμμής 3–5 και η εξίσωση μελών σφάλματος που αφορά σφάλμα ανάντη του ΕΣ (3.2) επαληθεύεται μόνο από τον ΕΣ της γραμμής 5–6, υποδεικνύοντας τους ίδιους διακοπτικούς χειρισμούς.

Στη συνέχεια, στόχος είναι η ανατροφοδότηση των φορτίων των κόμβων 2–4 και 6–14. Για την τροφοδότηση των κόμβων 2–4, κλείνει ο ΔΙ της γραμμής 1–2. Τα φορτία των κόμβων 6–14 μεταφέρονται σε μια διπλανή γραμμή, κλείνοντας τον διακόπτη της γραμμής 14–31 και τροφοδοτούνται πλέον από τον υποσταθμό (Υ/Σ) 3. Στον Πίνακα 6.2 φαίνεται η ενεργός και η άεργος ισχύς για κάθε έναν από τους τρεις Υ/Σ, όπως προέκυψαν από την προτεινόμενη μέθοδο αλλά και από την προσομοίωση λειτουργίας του δικτύου με τη βοήθεια του MATPOWER. Οι τιμές της ισχύος αφορούν την τοπολογία του δικτύου του Σχήματος 6.3.

Πίνακας 6.1: Διακοπτικοί χειρισμοί απομόνωσης και μερικής αποκατάστασης του δικτύου 44 κόμβων λόγω σφάλματος στη γραμμή 3–5.

i	j	y_{ij}	Στάδιο αλγορίθμου
3	5	0	Απομόνωση σφάλματος
5	6	0	
14	31	1	Μερική αποκατάσταση

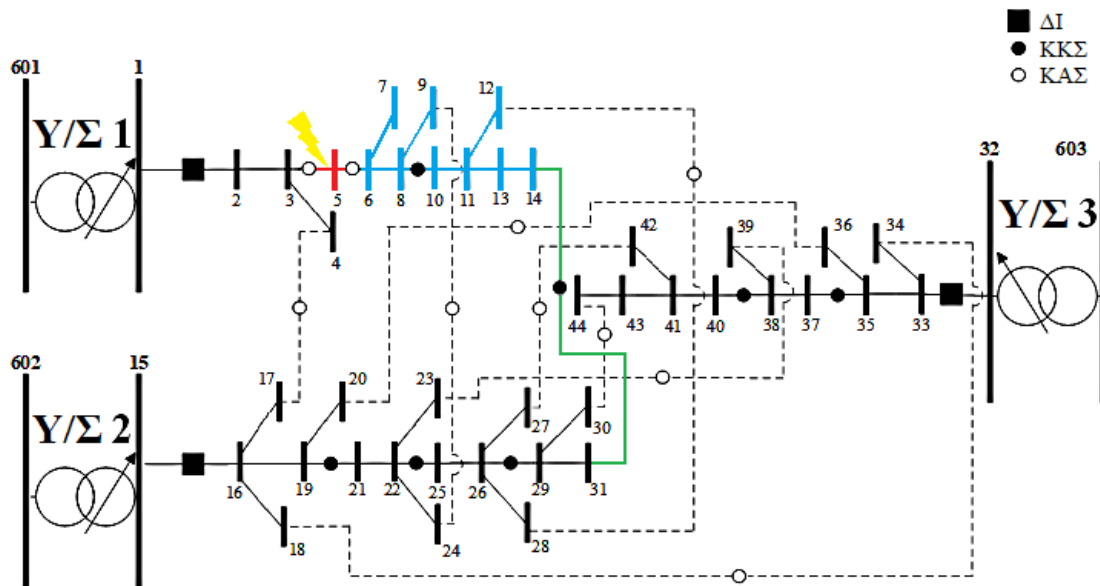
Πίνακας 6.2: Τιμές ισχύος των Υ/Σ του δικτύου 44 κόμβων μετά τη μερική αποκατάστασή του, λόγω σφάλματος στη γραμμή 3–5.

Υ/Σ	p^F (MW)	q^F (MVA _r)	MATPOWER	
			p^F (MW)	q^F (MVA _r)
1	0,100	0,020	0,100	0,020
15	0,805	0,165	0,810	0,170
32	0,702	0,142	0,700	0,140

Το αναδιαταγμένο δίκτυο φαίνεται στο Σχήμα 6.3, όπου με κόκκινο χρώμα διακρίνεται η απομονωμένη περιοχή που προέκυψε από το άνοιγμα των διακοπών 3–5 και 5–6. Η περιοχή αυτή δεν μπορεί να ανατροφοδοτηθεί έως ότου επισκευαστεί σε αντίθεση με το γαλάζιο τμήμα του δικτύου, το οποίο αρχικά απομονώθηκε αλλά έπειτα ανατροφοδοτήθηκε με το κλείσιμο του διακόπτη του ΚΑΣ της εφεδρικής γραμμής 14–31. Η γραμμή αυτή διακρίνεται με πράσινο χρώμα.

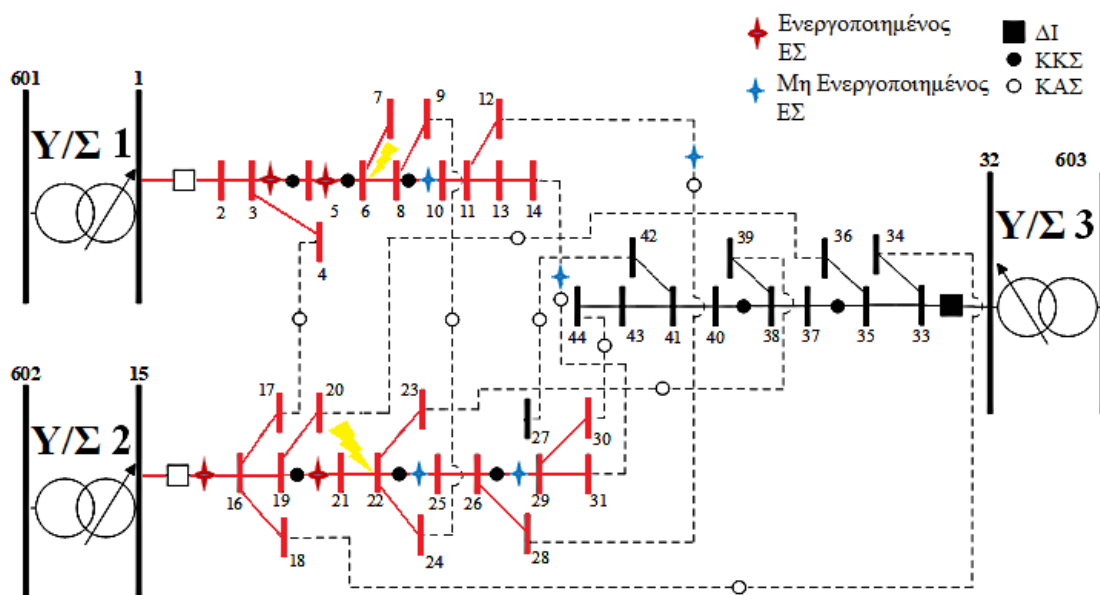
Το λογισμικό της μεθόδου μερικής αποκατάστασης του δικτύου χρειάστηκε 0,264 sec για να υπολογίσει τους παραπάνω διακοπτικούς χειρισμούς και τις τιμές ενεργού και άεργου ισχύος των υποσταθμών. Το χρονικό αυτό διάστημα είναι αρκετά ικανοποιητικό και

καθιστά τη μερική αποκατάσταση του δικτύου άμεση. Η ορθότητα των αποτελεσμάτων επιβεβαιώνεται και από τον υπολογισμό της ροής ισχύος μέσω του λογισμικού MATPOWER, καθώς οι τιμές είναι σχεδόν ίδιες.



Σχήμα 6.3: Το δίκτυο διανομής 44 κόμβων, μετά τη μερική αποκατάσταση του σφάλματος.

6.2.2 Ταυτόχρονο σφάλμα σε δύο γραμμές του δικτύου.



Σχήμα 6.4: Το δίκτυο των 44 κόμβων αμέσως μετά το σφάλμα στις γραμμές 6–8 και 21–22.

Σε αυτήν την υποενότητα εξετάζεται η συνύπαρξη μόνιμου σφάλματος σε δύο σημεία του δικτύου του Σχήματος 6.1. Έστω λοιπόν ότι συμβαίνει μόνιμο σφάλμα στις γραμμές σύνδεσης των κόμβων 6–8 και 21–22, την ίδια χρονική στιγμή. Αρχικά, οι ΔΙ των γραμμών 1–2 και 15–16 ανοίγουν και σταματά η τροφοδοσία των φορτίων στους κόμβους 2 έως 14 και 16 έως 31, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Οι περιοχές του σφάλματος απομονώνονται, σύμφωνα με τις ενδείξεις των ΕΣ των γραμμών, όπως περιγράφηκε στο

Κεφάλαιο 3 και στη συνέχεια επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.

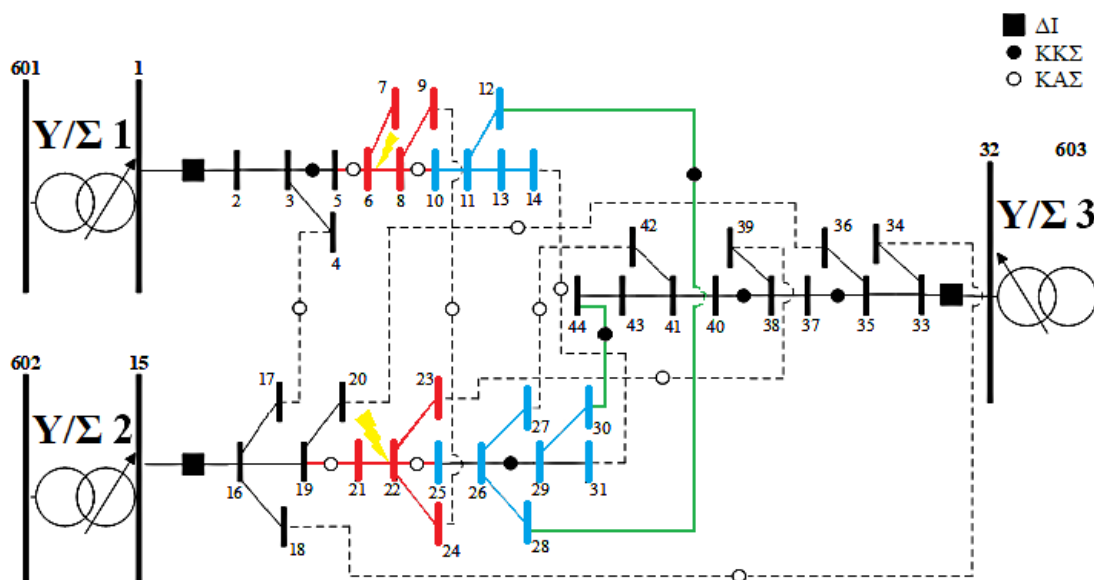
Οι διακοπτικοί χειρισμοί που προτείνονται από τη μέθοδο φαίνονται στον Πίνακα 6.3, ενώ τα αποτελέσματα των τιμών ισχύος παραγωγής που προέκυψαν από αυτήν αλλά και από την προσομοίωση λειτουργίας του δικτύου μέσω του MATPOWER, απεικονίζονται στον Πίνακα 6.4. Οι εξισώσεις της μεθόδου μελών σφάλματος του Κεφαλαίου 3 επιβεβαιώνουν τις διακοπτικές ενέργειες απομόνωσης, αφού μόνο οι ΕΣ των ΔΦ στις γραμμές 5–6, 18–21 και 8–10, 22–25 επαληθεύουν τις εξισώσεις της μεθόδου (3.1) και (3.2), αντίστοιχα.

Πίνακας 6.3: Διακοπτικοί χειρισμοί απομόνωσης και μερικής αποκατάστασης του δικτύου 44 κόμβων λόγω σφάλματος στις γραμμές 6–8 και 21–22.

i	j	y_{ij}	Στάδιο αλγορίθμου
5	6	0	Απομόνωση σφάλματος
8	10	0	
19	21	0	
22	25	0	
12	28	1	Μερική αποκατάσταση
30	44	1	

Πίνακας 6.4: Τιμές ισχύος των Υ/Σ του δικτύου 44 κόμβων μετά τη μερική αποκατάστασή του, λόγω σφάλματος στις γραμμές 6–8 και 21–22.

Υ/Σ	p^F (MW)	q^F (MVar)	MATPOWER	
			p^F (MW)	q^F (MVar)
1	0,100	0,020	0,100	0,020
15	0,100	0,020	0,100	0,020
32	1,104	0,224	1,110	0,230

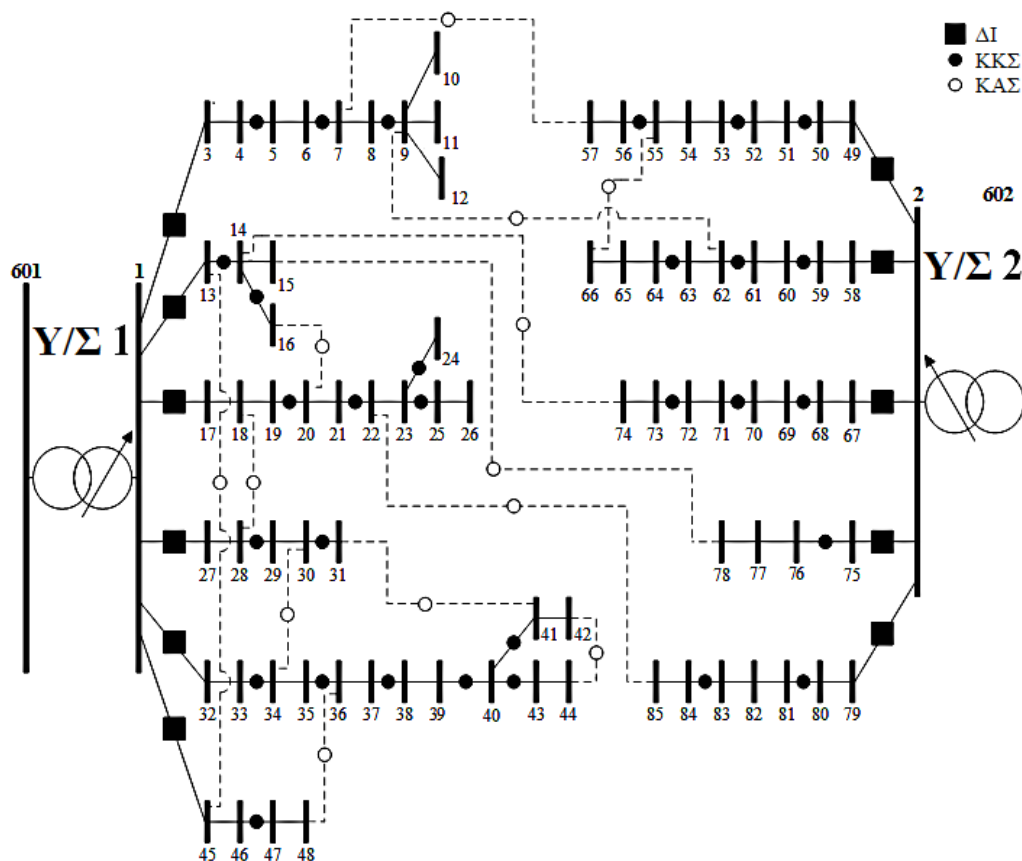


Σχήμα 6.5: Το δίκτυο 44 κόμβων, μετά τη μερική αποκατάσταση του διπλού σφάλματος.

Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται το δίκτυο μετά την μερική αποκατάσταση του. Με τη βοήθεια της μεθόδου και οι δύο γαλάζιες περιοχές, που αντιπροσωπεύουν τα απομονωμένα υγιή φορτία, μεταφέρθηκαν σε άλλη γραμμή και πλέον τροφοδοτούνται από τον Υ/Σ 3. Η μεταφορά επετεύχθη με το κλείσιμο των ΔΦ των ΚΑΣ του δικτύου 12–28 και 30–44, που διακρίνονται με πράσινο χρώμα. Οι περιοχές ανάντη των σφαλμάτων ανατροφοδοτήθηκαν με το κλείσιμο των ΔΙ των γραμμών 1–2 και 15–16.

Ο χρόνος που χρειάστηκε το λογισμικό της μεθόδου για να υπολογίσει τις διακοπτικές ενέργειες και τις τιμές ισχύος παραγωγής είναι 0,265 sec. Η ύπαρξη επιπλέον σφάλματος στους υπολογισμούς πρακτικά δεν καθυστέρησε την παραγωγή των αποτελεσμάτων, με τον χρόνο εκτέλεσης να παραμένει εξαιρετικά γρήγορος. Επιπλέον, οι τιμές των ισχύων παραγωγής επιβεβαιώνονται και από τους υπολογισμούς της ροής ισχύος μέσω MATPOWER, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.4.

6.3 ΔΙΚΤΥΟ 85 ΚΟΜΒΩΝ

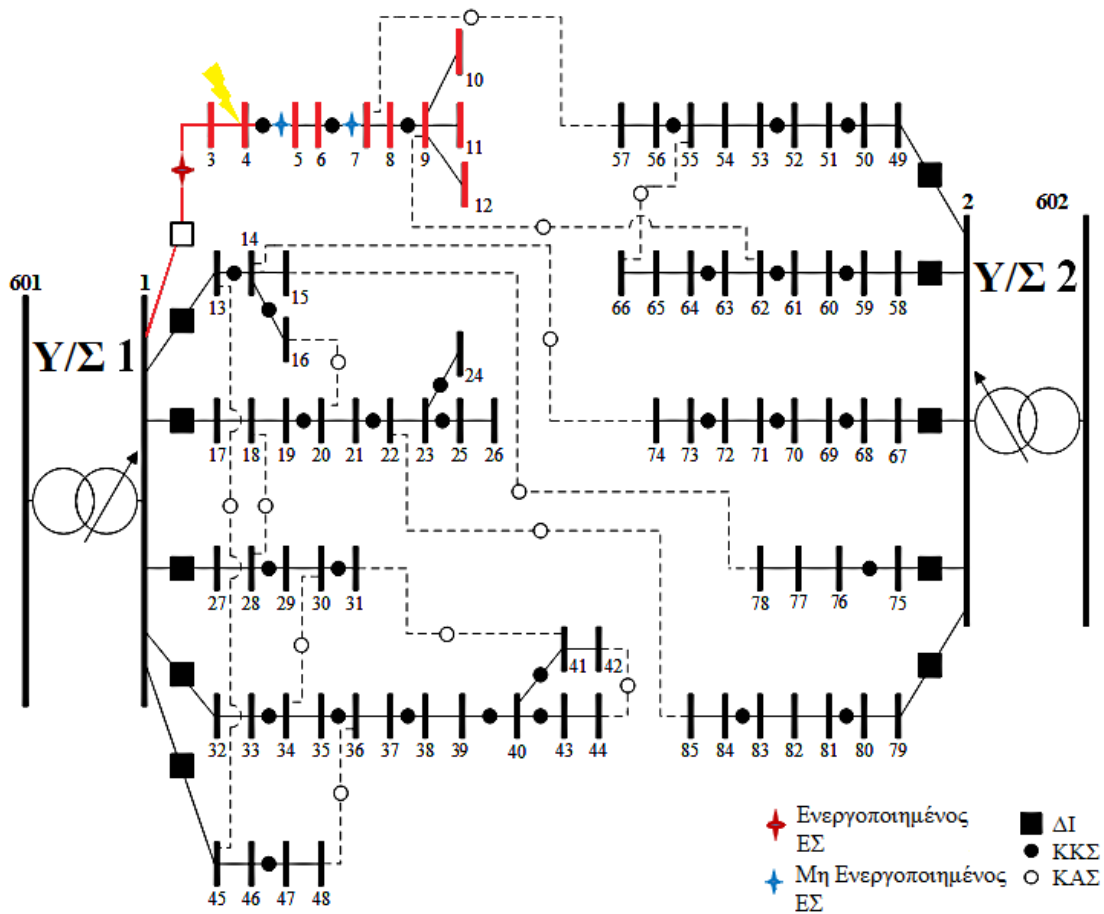


Σχήμα 6.6: Δίκτυο διανομής 85 κόμβων.

Οι δοκιμές συνεχίζονται σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο 85 κόμβων, τα δεδομένα του οποίου μπορούν να βρεθούν στο [40][41] και αναπαριστάται στο Σχήμα 6.6. Η ικανότητα κάθε γραμμής είναι 10 MVA και η ονομαστική τάση του δικτύου είναι 11,4 kV. Τα φορτία του τροφοδοτούνται από 2 υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ, μέσω των κόμβων 1 και 2 και διαθέτει 13 εφεδρικές συνδέσεις που αποτελούν τα ΚΑΣ του δικτύου. Οι συνδέσεις αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν σε περίπτωση σφάλματος ως εναλλακτικές διαδρομές διανομής.

6.3.1 Σφάλμα σε μία γραμμή του δικτύου

Αρχικά, εξετάζεται η αντίδραση του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος σε μία μόνο γραμμή. Έστω λοιπόν ότι συμβαίνει σφάλμα στην γραμμή σύνδεσης των κόμβων 3–4. Ο ΔΙ στη γραμμή 1–3 αντιλαμβάνεται το ρεύμα σφάλματος και ανοίγει, διακόπτοντας την τροφοδότηση των φορτίων στους κόμβους 3 ως 12, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7. Στη συνέχεια ακολουθεί ο εντοπισμός και η απομόνωση του σφάλματος, με τη βοήθεια των ΕΣ του δικτύου, σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία της απομόνωσης, επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, με στόχο τη μερική αποκατάσταση του σφάλματος.



Σχήμα 6.7: Το δίκτυο των 85 κόμβων αμέσως μετά το σφάλμα στη γραμμή 3–4.

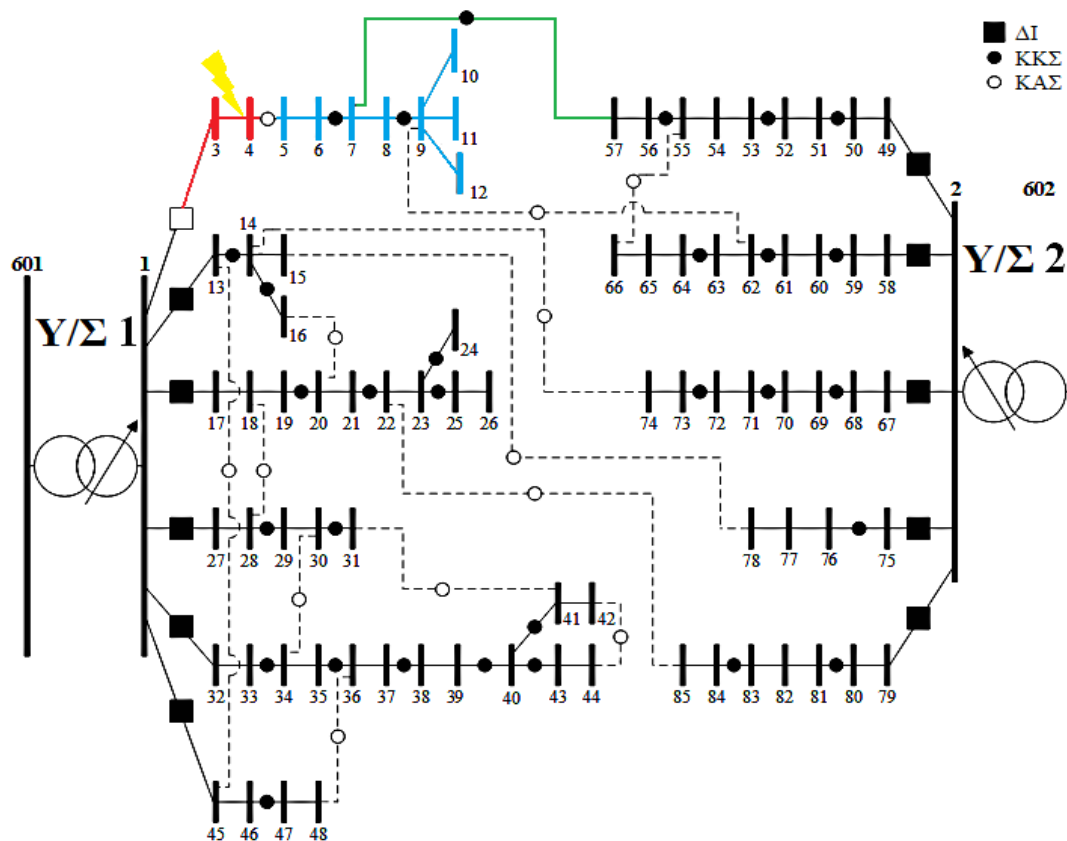
Στον Πίνακα 6.5 φαίνονται οι διακοπτικοί χειρισμοί που προέκυψαν από την εκτέλεση του λογισμικού της μεθόδου, ενώ στον Πίνακα 6.6 παρατίθενται οι τιμές ενεργού και αέργου ισχύος των υποσταθμών του δικτύου, όπως προέκυψαν από τη μέθοδο άλλα και την προσομοίωση λειτουργίας του δικτύου μέσω MATPOWER. Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.5, για την απομόνωση του σφάλματος χρειάστηκε να ανοίξουν οι διακόπτες των γραμμών 1–3 και 4–5.

Πίνακας 6.5: Διακοπτικοί χειρισμοί απομόνωσης και μερικής αποκατάστασης του δικτύου 85 κόμβων λόγω σφάλματος στη γραμμή 3–4.

i	j	y_{ij}	Στάδιο αλγορίθμου
1	3	0	Απομόνωση σφάλματος
4	5	0	
7	57	1	Μερική αποκατάσταση

Πίνακας 6.6: Τιμές ισχύος των Υ/Σ του δικτύου 85 κόμβων μετά τη μερική αποκατάστασή του, λόγω σφάλματος στη γραμμή 3–4.

Υ/Σ	p^F (MW)	q^F (MVar)	MATPOWER	
			p^F (MW)	q^F (MVar)
1	13,078	9,790	13,080	9,790
2	15,235	11,021	15,230	11,020



Σχήμα 6.8: Το δίκτυο διανομής 85 κόμβων, μετά τη μερική αποκατάσταση του σφάλματος.

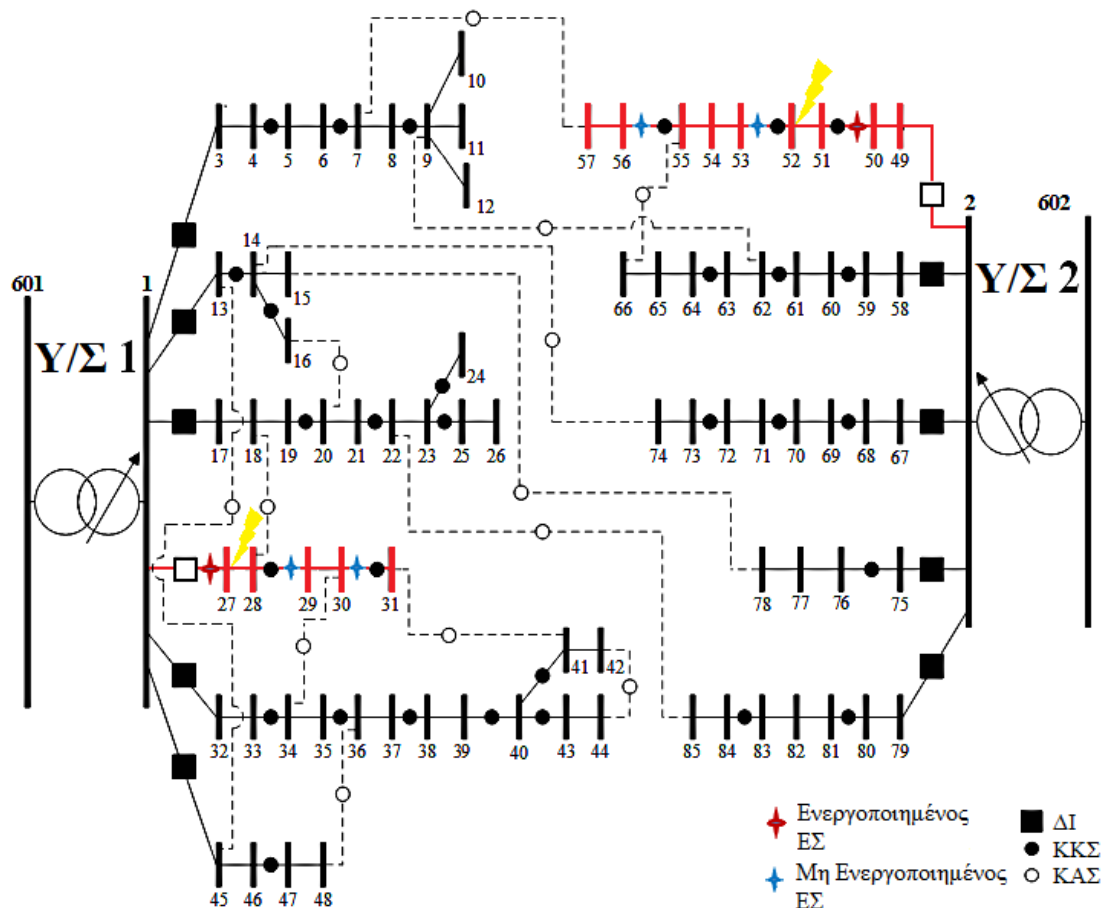
Το αναδιαταγμένο δίκτυο που προκύπτει παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.8. Το εσφαλμένο κομμάτι της γραμμής που απομόνωσε η μέθοδος φαίνεται με κόκκινο χρώμα. Η απομόνωση του σφάλματος επιτρέπει την ανατροφοδότηση των υγιών φορτίων 5 ως 12, που φαίνονται με γαλάζιο χρώμα. Τα φορτία αυτά, μεταφέρονται σε διπλανή γραμμή με το

κλείσιμο του διακόπτη της γραμμής 7–57 (πράσινο χρώμα) και πλέον τροφοδοτούνται από τον (Υ/Σ) 2.

Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι 0,423 sec, καθιστώντας τη μερική αποκατάσταση του δικτύου και σε αυτήν την περίπτωση άμεση. Η μέθοδος αποκατέστησε το υγιές τμήμα του δικτύου με μία μόνο διακοπτική μεταβολή, ενώ τα αποτελέσματα της μεθόδου, για τις τιμές ισχύος παραγωγής μετά την μερική αποκατάσταση, επιβεβαιώθηκαν από τον υπολογισμό ροής ισχύος μέσω του λογισμικού MATPOWER.

6.3.2 Ταυτόχρονο σφάλμα σε δύο γραμμές του δικτύου.

Σε αυτήν την υποενότητα εξετάζεται η περίπτωση ταυτόχρονου διπλού μόνιμου σφάλματος στις γραμμές του δικτύου 85 κόμβων. Στην παρούσα εκδοχή θεωρήθηκε ότι συνέβη μόνιμο σφάλμα στις γραμμές σύνδεσης των κόμβων 27-28 και 51-52 ταυτόχρονα. Τα εν λόγω σφάλματα προκάλεσαν το άνοιγμα των ΔΙ 1–27 και 2–49, διακόπτοντας την παροχή ισχύος στους κόμβους 27 έως 31 και 49 έως 57, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9. Η απομόνωση του σφάλματος και η μερική αποκατάσταση του δικτύου πραγματοποιούνται σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3 και το Κεφάλαιο 4 αντίστοιχα.



Σχήμα 6.9: Το δίκτυο των 85 κόμβων αμέσως μετά το σφάλμα στις γραμμές 27–28 και 21–22.

Οι διακοπτικοί χειρισμοί που χρειάστηκαν για την απομόνωση καθώς και τη μερική αποκατάσταση του δικτύου, από την προτεινόμενη μέθοδο, φαίνονται στον Πίνακα 6.7. Σημειώνεται ότι ο ΔΙ 1–27 είναι ήδη ανοικτός και η παρουσία του στον Πίνακα 6.7 σημαίνει ότι δεν κλείνει κατά το στάδιο της μερικής αποκατάστασης του δικτύου. Αντίστοιχα, στον Πίνακα 6.8 παρατίθενται οι τιμές ισχύος του δικτύου μετά τη μερική αποκατάστασή του, σύμφωνα με τη μεθοδολογία αλλά και με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης λειτουργίας του δικτύου μέσω του λογισμικού MATPOWER.

Πίνακας 6.7: Διακοπτικοί χειρισμοί απομόνωσης και μερικής αποκατάστασης του δικτύου 85 κόμβων λόγω σφάλματος στις γραμμές 27–28 και 51–52.

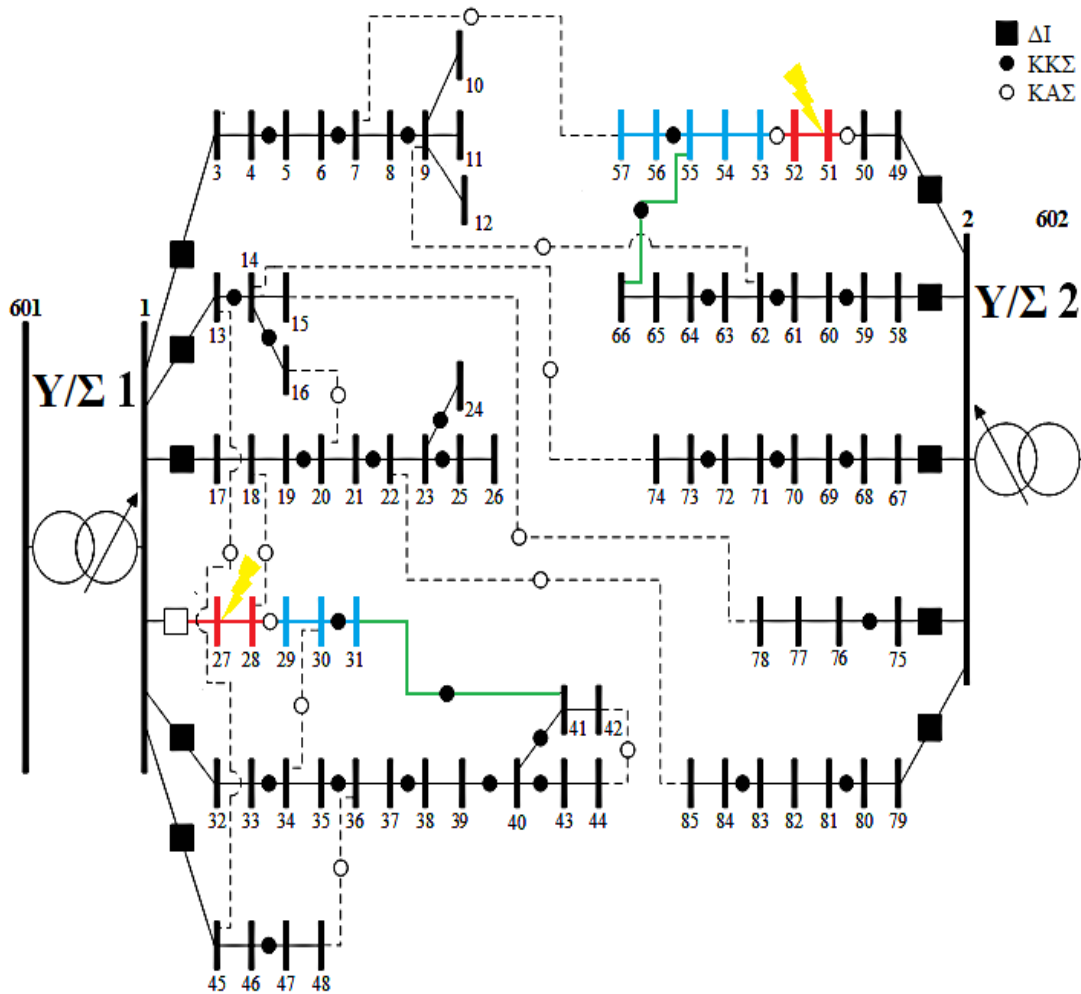
i	j	y_{ij}	Στάδιο αλγορίθμου
1	27	0	Απομόνωση σφάλματος
28	29	0	
50	51	0	
52	53	0	
31	41	1	Μερική αποκατάσταση
55	66	1	

Πίνακας 6.8: Τιμές ισχύος των Υ/Σ του δικτύου 85 κόμβων μετά τη μερική αποκατάστασή του, λόγω σφάλματος στις γραμμές 27–28 και 51–52.

Υ/Σ	p^F (MW)	q^F (MVA _r)	MATPOWER	
			p^F (MW)	q^F (MVA _r)
1	16,324	12,167	16,220	12,090
2	11,754	8,472	11,750	8,470

Το αναδιαμορφωμένο δίκτυο μετά την μερική αποκατάστασή του φαίνεται στο Σχήμα 6.10. Οι απομονωμένες περιοχές διακρίνονται με κόκκινο χρώμα και χρειάζεται επισκευή της γραμμής ούτως ώστε να ανατροφοδοτηθούν. Με γαλάζιο χρώμα επισημαίνονται τα τμήματα του δικτύου στα οποία αποκαταστάθηκε η ισχύς με τη βοήθεια της μεθόδου, η οποία υπέδειξε το κλείσιμο των διακοπών των γραμμών 31–41 και 55–66, που φαίνονται με πράσινο χρώμα. Μετά από αυτές τις ενέργειες, τα φορτία των κόμβων 29 έως 31 και 53 έως 57 τροφοδοτούνται από τους ίδιους υποσταθμούς που τους παρείχαν ισχύ πριν τα σφάλματα. Επίσης, ο ΔΙ 2–49 έχει κλείσει, ανατροφοδοτώντας τους κόμβους 49–50.

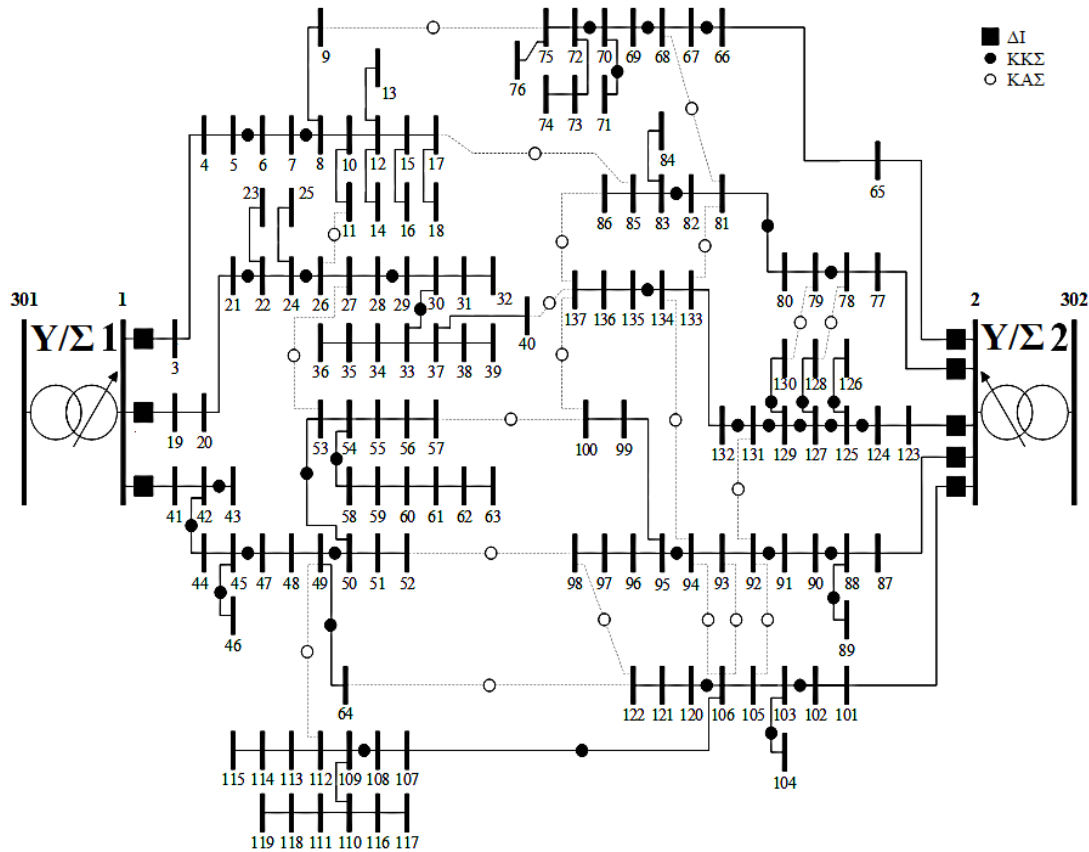
Η ολοκλήρωση της εκτέλεσης του αλγορίθμου χρειάστηκε 0,440 sec για να παράγει τα παραπάνω αποτελέσματα. Και σε αυτή την περίπτωση η χρονική διάρκεια των υπολογισμών είναι αρκετά μικρή και η διαδικασία απομόνωσης του σφάλματος και μερικής αποκατάστασης του δικτύου επιτυγχάνεται άμεσα. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της ισχύος παραγωγής επιβεβαιώνονται από το MATPOWER, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.8 και η μερική αποκατάσταση του δικτύου χρειάστηκε μόνο 2 διακοπτικές αλλαγές.



Σχήμα 6.10: Το δίκτυο 85 ζυγών, μετά τη μερική αποκατάσταση του διπλού σφάλματος.

6.4 ΔΙΚΤΥΟ 137 ΚΟΜΒΩΝ

Σε αυτήν την ενότητα θα εξεταστεί η μεθοδολογία απομόνωσης σφάλματος και αποκατάστασης δικτύου σε ένα πυκνότερο δίκτυο, το οποίο αποτελείται από 137 κόμβους [41][42] και φαίνεται στο Σχήμα 6.11. Η ονομαστική τάση του δικτύου είναι 13,8 kV και αποτελείται από 2 υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ, οι οποίοι μέσω των κόμβων 1 και 2 τροφοδοτούν το φορτίο του ΔΔ. Επιπλέον περιλαμβάνει 21 ΚΑΣ, διαθέσιμα για εφεδρική τροφοδότηση σε περίπτωση βλάβης και η ικανότητα κάθε γραμμής είναι 10 MVA.



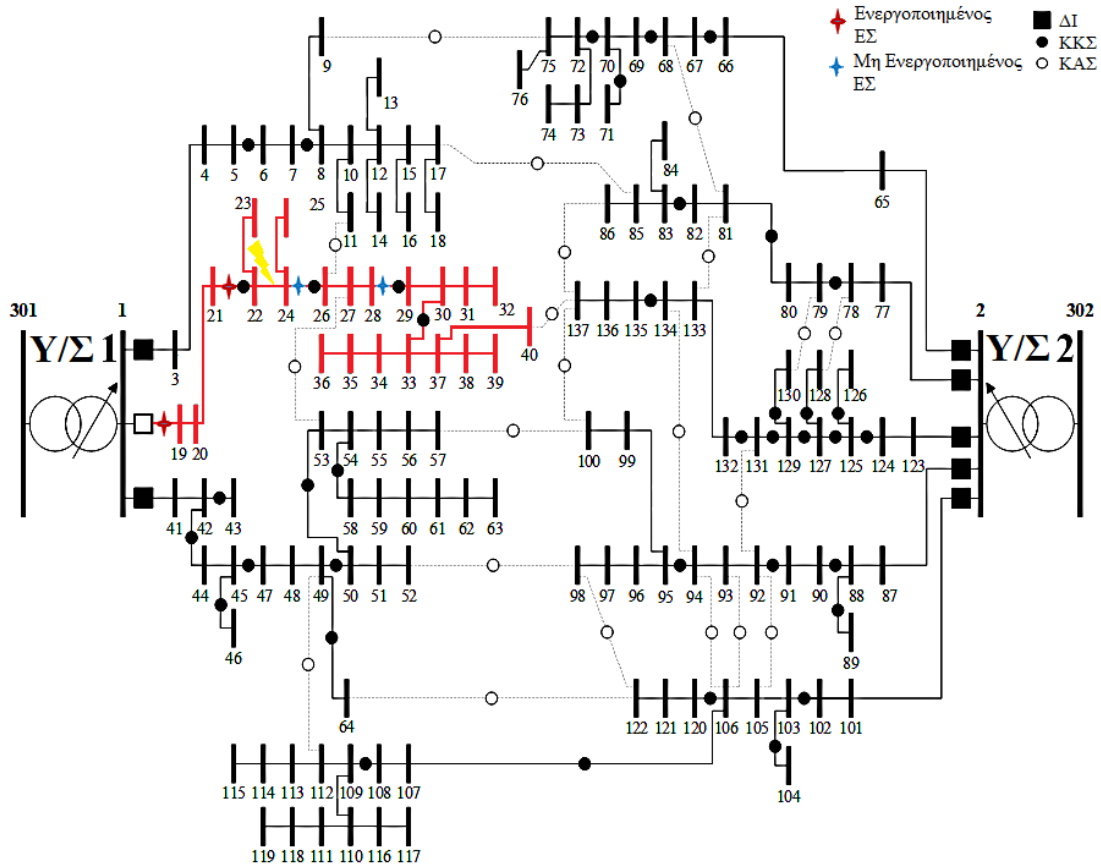
Σχήμα 6.11: Δίκτυο 137 κόμβων.

6.4.1 Σφάλμα σε μία γραμμή του δικτύου

Έστω ότι συμβαίνει μόνιμο σφάλμα στη γραμμή σύνδεσης των ζυγών 22-24. Ο ΔΙ της γραμμής 1–19 ανοίγει αυτόματα μόλις αντιληφθεί το ρεύμα σφάλματος, διακόπτοντας τη διανομή ισχύος στους κόμβους 19 έως 40, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.12. Η περιοχή του σφάλματος εντοπίζεται και απομονώνεται με τη βοήθεια των ΕΣ, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3. Στη συνέχεια, η λειτουργία του δικτύου αποκαθίσταται μερικώς, με την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.

Η εκτέλεση της μεθόδου υποδεικνύει τους απαραίτητους διακοπτικούς χειρισμούς, οι οποίοι φαίνονται στον Πίνακα 6.9. Για την απομόνωση, λοιπόν, του σφάλματος ανοίγουν οι διακόπτες των γραμμών 21–22 και 24–26, όπως επιβεβαιώνεται και από τις εξισώσεις μελών σφάλματος του Κεφαλαίου 3. Συγκεκριμένα, οι μόνοι ενεργοποιημένοι ΕΣ είναι αυτοί της γραμμής 1–19 και της γραμμής 21–22. Επομένως οι ΕΣ των γραμμών 21–22 και 24–26 είναι οι μόνοι που επαληθεύουν τις εξισώσεις μελών σφάλματος και συνεπώς, οι αντίστοιχοι ΔΦ χρειάζεται να ανοίξουν για την απομόνωση του σφάλματος.

Η ανατροφοδότηση των φορτίων των κόμβων 19 έως 21 και 26 έως 40 επιτυγχάνεται με το κλείσιμο του ΔΙ και το κλείσιμο του διακόπτη της εφεδρικής γραμμής 11-26, αντίστοιχα. Έτσι η παροχή ισχύος στα υγιή φορτία των κόμβων 26 έως 40 συνεχίζεται από τον Υ/Σ 1. Στον Πίνακα 6.10 φαίνονται οι τιμές της ενεργής και της αέργου ισχύος για τους δύο Υ/Σ.



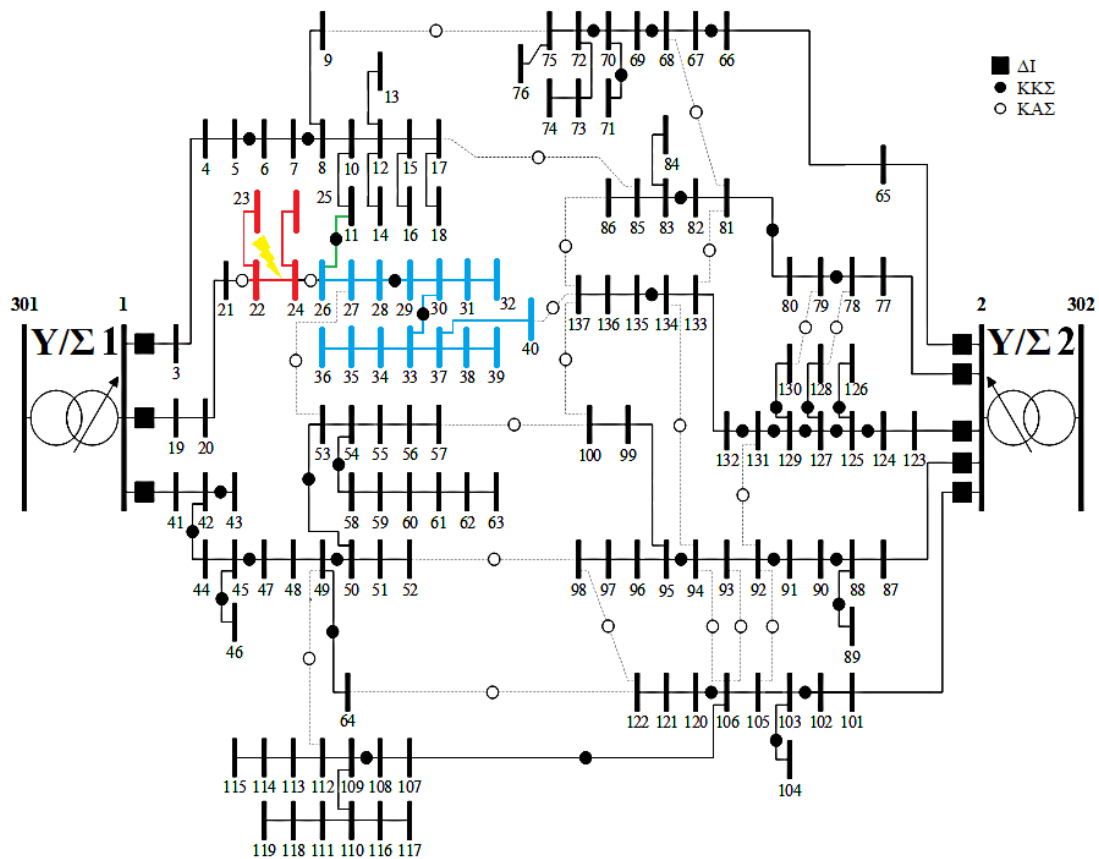
Σχήμα 6.12: Το δίκτυο των 137 κόμβων αμέσως μετά το σφάλμα στη γραμμή 22–24

Πίνακας 6.9: Διακοπτικοί χειρισμοί απομόνωσης και μερικής αποκατάστασης του δικτύου 137 κόμβων λόγω σφάλματος στις γραμμές 22–24.

i	j	y_{ij}	Στάδιο αλγορίθμου
21	22	0	Απομόνωση σφάλματος
24	26	0	
11	26	1	Μερική αποκατάσταση

Πίνακας 6.10: Τιμές ισχύος των Y/Σ του δικτύου 137 κόμβων μετά τη μερική αποκατάστασή του, λόγω σφάλματος στις γραμμές 22–24.

Y/Σ	p^F (MW)	q^F (MVA _r)	MATPOWER	
			p^F (MW)	q^F (MVA _r)
1	6,861	2,979	6,860	2,980
2	10,939	4,762	10,940	4,760



Σχήμα 6.13: Το δίκτυο 137 κόμβων, μετά τη μερική αποκατάσταση του σφάλματος.

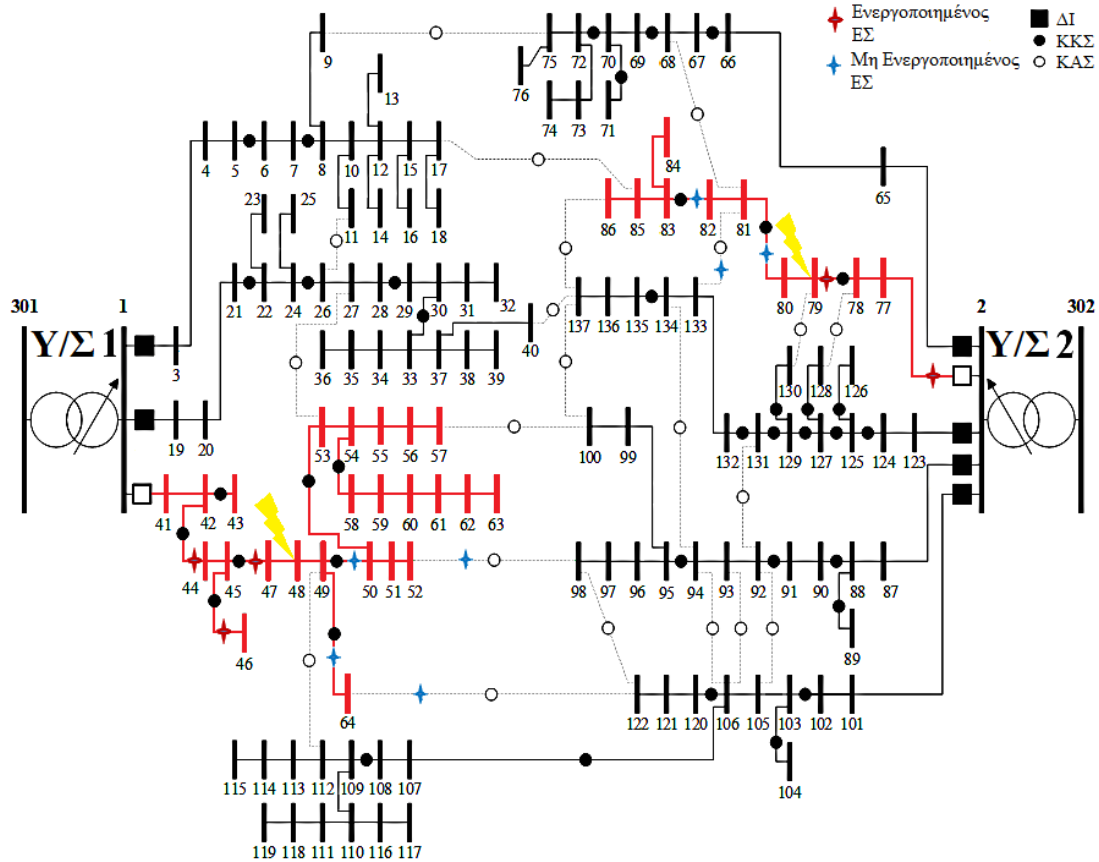
Η μερική αποκατάσταση του δικτύου οδήγησε λοιπόν στην ανατροφοδότηση 15 ζυγών, που φαίνονται στο Σχήμα 6.13 με γαλάζιο χρώμα. Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η εφεδρική γραμμή του ΚΑΣ που έκλεισε για να επιτευχθεί η διαδικασία. Οι ζυγοί 22 έως 25, που διακρίνονται με κόκκινο χρώμα, θα παραμείνουν εκτός λειτουργίας μέχρι να επισκευαστεί η βλάβη.

Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι 0,743 sec και αποτελεί εξαιρετικά σύντομο χρονικό διάστημα, επιτρέποντας την άμεση αντιμετώπιση του σφάλματος. Τα αποτελέσματα είναι επίσης ικανοποιητικά, καθώς η μερική αποκατάσταση πραγματοποιήθηκε με ένα μόνο διακοπτικό χειρισμό και οι τιμές ενεργού και αέργου ισχύος επιβεβαιώνονται από τα αποτελέσματα του λογισμικού MATPOWER.

6.4.2 Ταυτόχρονο σφάλμα σε δύο γραμμές του δικτύου.

Η αντίδραση του δικτύου του Σχήματος 6.11 σε περίπτωση διπλού και ταυτόχρονου μόνιμου σφάλματος εξετάζεται σε αυτήν την υποενότητα. Θεωρήθηκε ότι προέκυψε μόνιμο σφάλμα στις γραμμές διασύνδεσης των κόμβων 47–48 και 79–80 την ίδια χρονική στιγμή. Μόλις οι ΔΙ στις γραμμές 1–41 και 2–77 αντιληφθούν το ρεύμα σφάλματος ανοίγουν αυτόματα, διακόπτοντας την παροχή στους κόμβους 41 έως 64 και 77 έως 86, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.14. Κάθε σφάλμα εντοπίζεται και απομονώνεται με τη βοήθεια των ενδείξεων των ΕΣ, όπως προβλέπεται στο Κεφάλαιο 3. Έπειτα ακολουθεί η μερική αποκατάσταση του

δικτύου, μέσω της επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.



Σχήμα 6.14: Το δίκτυο των 137 κόμβων αμέσως μετά το σφάλμα στις γραμμές 47–48 και 79–80.

Πίνακας 6.11: Διακοπτικοί χειρισμοί απομόνωσης και μερικής αποκατάστασης του δικτύου 137 κόμβων λόγω σφάλματος στις γραμμές 47–48 και 79–80.

i	j	y_{ij}	Στάδιο αλγορίθμου
45	47	0	Απομόνωση σφάλματος
49	50	0	
49	64	0	
78	79	0	
80	81	0	
52	98	1	Μερική αποκατάσταση
64	122	1	
68	81	1	

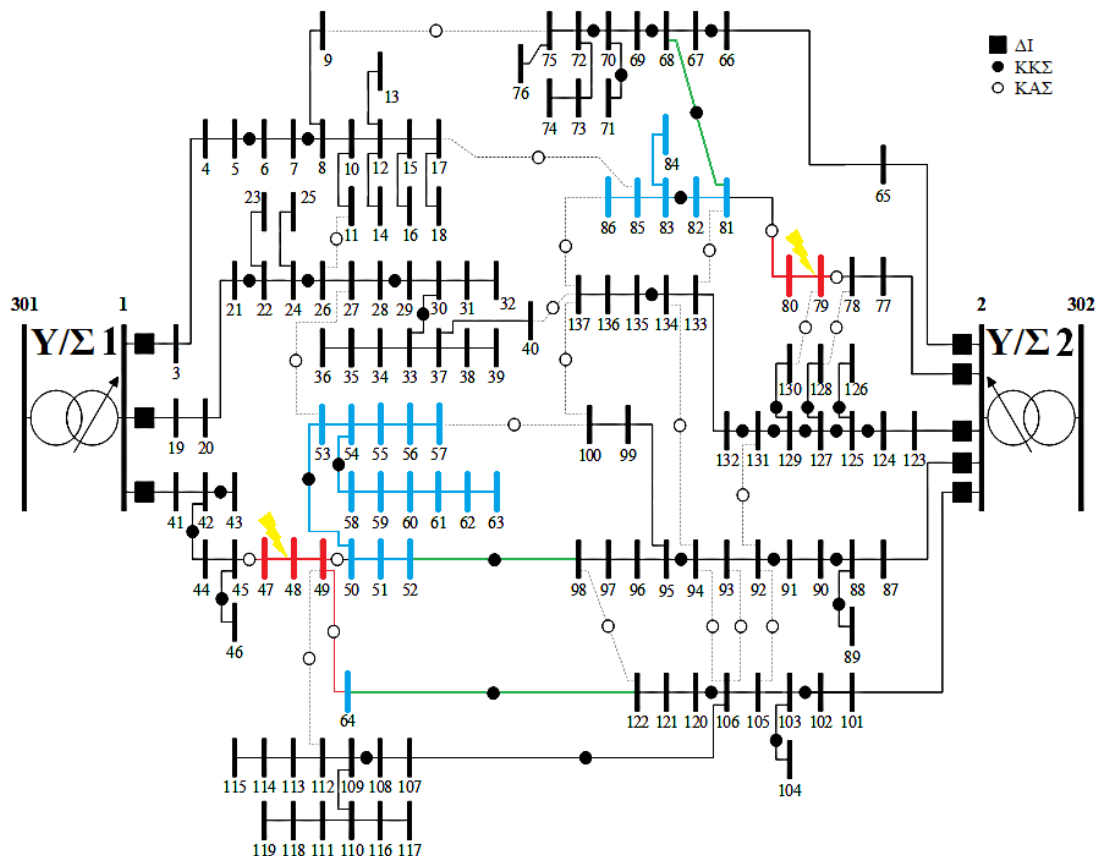
Στον Πίνακα 6.11 φαίνονται οι διακοπτικοί χειρισμοί που υπέδειξε η προτεινόμενη μέθοδος για την απομόνωση του σφάλματος και την μερική αποκατάσταση του δικτύου. Η απομόνωση των σφαλμάτων επιτυγχάνεται μέσω του ανοίγματος των διακοπών των γραμμών 45–47, 49–50, 49–64, 78–79 και 80–81. Ακολουθεί η μερική αποκατάσταση του

δικτύου, η οποία περιλαμβάνει το κλείσιμο των ΔΙ που άνοιξαν κατά τον εντοπισμό, ανατροφοδοτώντας τους κόμβους 41–46 και 77–78 καθώς και το κλείσιμο των ΚΑΣ των γραμμών 52–98, 64–122 και 68–81, όπως υποδεικνύεται από τη μέθοδο.

Επιπλέον στον Πίνακα 6.12 φαίνονται οι τιμές της ενεργής και της αέργου ισχύος των κύριων υποσταθμών του δικτύου, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση λειτουργίας μέσω του λογισμικού MATPOWER.

Πίνακας 6.12: Τιμές ισχύος των Υ/Σ του δικτύου 137 κόμβων μετά τη μερική αποκατάστασή του, λόγω σφάλματος στις γραμμές 47–48 και 79–80.

Υ/Σ	p^F (MW)	q^F (MVar)	MATPOWER	
			p^F (MW)	q^F (MVar)
1	5,032	2,225	5,030	2,220
2	12,189	5,308	12,190	5,310



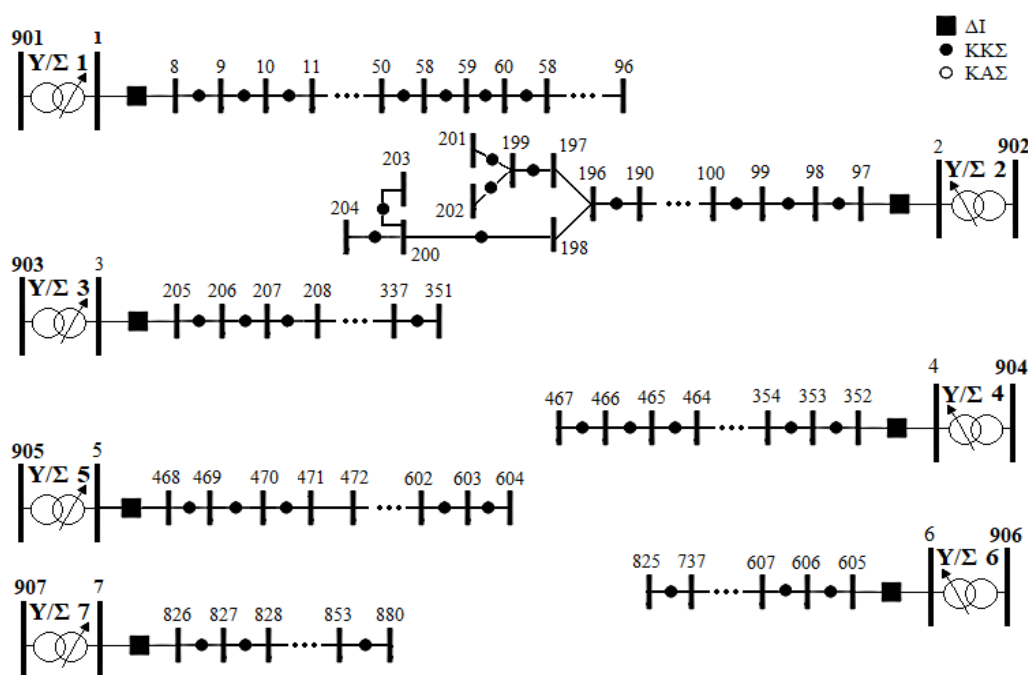
Σχήμα 6.15: Το δίκτυο 137 κόμβων, μετά τη μερική αποκατάσταση του διπλού σφάλματος.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου για τη μερική αποκατάσταση του δικτύου φαίνονται στο Σχήμα 6.14. Με κόκκινο χρώμα διακρίνονται οι περιοχές σφάλματος που απομονώθηκαν και διέκοψαν την παροχή ισχύος στα υγιή φορτία των κόμβων 47 έως 49 και 79, 80 έως ότου επισκευαστεί η βλάβη. Οι νέες συνδέσεις που προέκυψαν με το κλείσιμο των διακοπών των

ΚΑΣ διακρίνονται με πράσινο χρώμα ενώ με γαλάζιο χρώμα αναπαριστώνται οι υγιείς περιοχές που ανατροφοδοτήθηκαν. Οι κόμβοι 50 έως 64 τροφοδοτούνται πλέον από τον Υ/Σ 2.

Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι αρκετά ικανοποιητικός, καθώς χρειάστηκαν μόλις 0,820 sec για τους παραπάνω υπολογισμούς και τα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από τον υπολογισμό της ροής ισχύος μέσω του λογισμικού MATPOWER, καθώς οι τιμές είναι σχεδόν ίδιες.

6.5 ΔΙΚΤΥΟ 880 ΚΟΜΒΩΝ



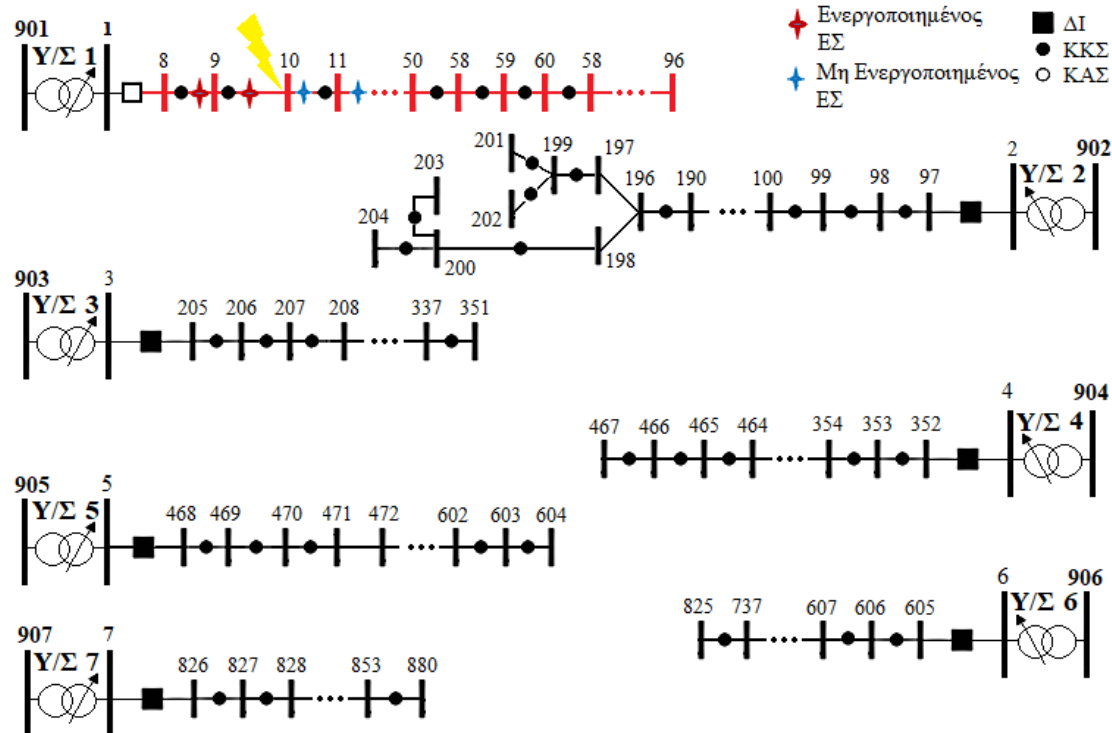
Σχήμα 6.16: Δίκτυο 880 κόμβων.

Η τελευταία δοκιμή του αλγορίθμου πραγματοποιείται σε ένα πυκνότερο δίκτυο, το οποίο αποτελείται από 880 κόμβους [41], περιέχει 900 κλάδους, 873 διακόπτες, 7 κύριους υποσταθμούς και 27 ΚΑΣ. Στο Σχήμα 6.16 παρατίθεται το δίκτυο τμηματικά, καθώς είναι αδύνατο να αναπαρασταθεί ολόκληρο λόγω μεγέθους, ώστε να γίνει κατανοητή η γενική δομή και ο τρόπος τροφοδότησής του. Η ονομαστική τάση του δικτύου είναι 13,8 kV και η ικανότητα κάθε γραμμής ανέρχεται στα 50,68 MVA.

6.5.1 Σφάλμα σε μία γραμμή του δικτύου

Η μέθοδος εξετάζεται αρχικά για την περίπτωση μονού σφάλματος στο δίκτυο. Έστω λοιπόν ότι συνέβη μόνιμο σφάλμα στη γραμμή 9–10. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.16, η γραμμή αυτή ανήκει στην περιοχή τροφοδοσίας του Υ/Σ 1, μέσω του κόμβου 1. Συνεπώς, ο ΔΙ της γραμμής 1–8 ανοίγει αυτόματα, διακόπτοντας την παροχή ισχύος στους κόμβους 8 ως 96, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.17. Στη συνέχεια, οι ενδείξεις των ΕΣ κατά μήκος της

γραμμής θα οδηγήσουν στην απομόνωση της περιοχής που συνέβη το σφάλμα, με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 3. Η απομόνωση της συγκεκριμένης περιοχής επιτρέπει την μερική αποκατάσταση του δικτύου, σύμφωνα με το μοντέλο βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4.



Σχήμα 6.17: Το δίκτυο των 880 κόμβων αμέσως μετά το σφάλμα στη γραμμή 9–10.

Η εκτέλεση του λογισμικού υπέδειξε τους διακοπτικούς χειρισμούς του Πίνακα 6.13 για την απομόνωση του σφάλματος και την μερική αποκατάσταση του δικτύου. Συγκεκριμένα, οι ΕΣ στις γραμμές 1–8, 8–9 και 9–10 έχουν ενεργοποιηθεί από το ρεύμα σφάλματος, με αποτέλεσμα οι ΔΦ των γραμμών 9–10 και 10–11 να αποτελούν μέλη σφάλματος, επαληθεύοντας τις εξισώσεις της μεθόδου.

Πίνακας 6.13: Διακοπτικοί χειρισμοί απομόνωσης και μερικής αποκατάστασης του δικτύου 880 κόμβων λόγω σφάλματος στη γραμμή 9–10.

i	j	y_{ij}	Στάδιο αλγορίθμου
9	10	0	Απομόνωση σφάλματος
10	11	0	
11	471	1	Μερική αποκατάσταση

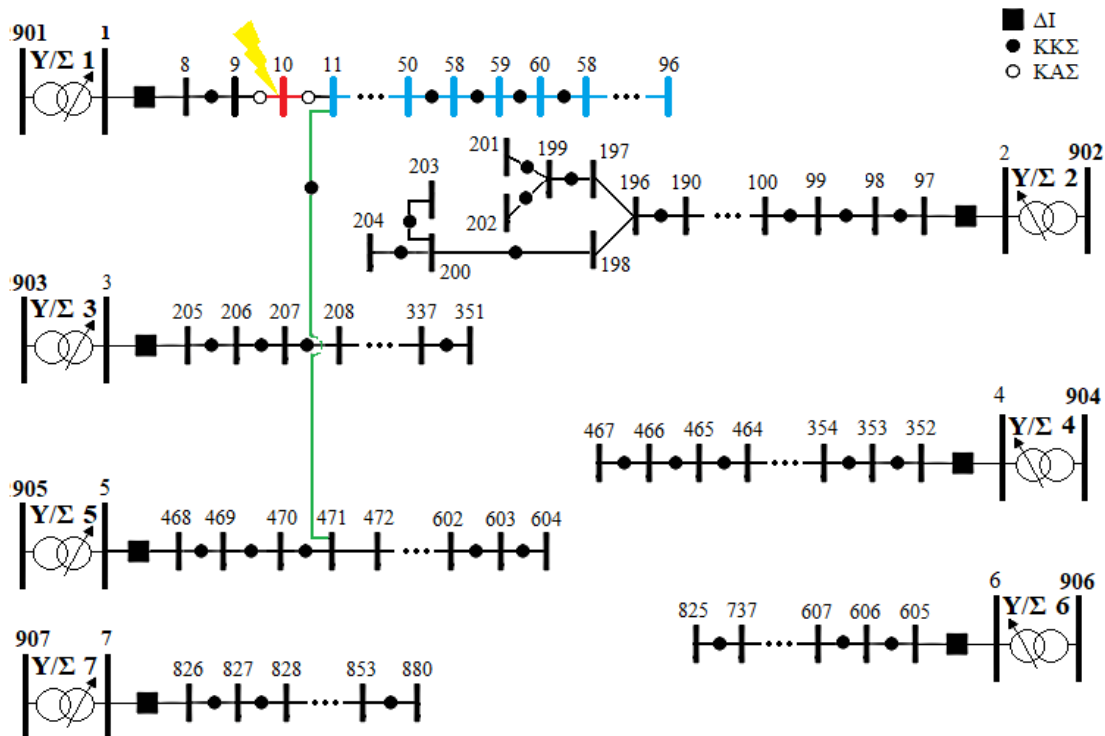
Μόλις το σφάλμα απομονωθεί, ο ΔΙ της γραμμής 1–8 κλείνει, επαναφέροντας την παροχή ισχύος στους κόμβους 8 και 9. Τα φορτία των κόμβων 11 ως 96 μεταφέρονται σε άλλη γραμμή, κλείνοντας τον διακόπτη της γραμμής 11–471 και τροφοδοτούνται πλέον από τον Υ/Σ 2. Στον Πίνακα 6.14 παρατίθενται οι τιμές παραγωγής ισχύος για την κάλυψη των

αναγκών του αναδιαμορφωμένου δικτύου, όπως υπολογίστηκαν από τη μέθοδο και την προσομοίωση ροής ισχύος μέσω του λογισμικού MATPOWER.

Πίνακας 6.14: Τιμές ισχύος των Υ/Σ του δικτύου 880 κόμβων μετά τη μερική αποκατάστασή του, λόγω σφάλματος στη γραμμή 9–10.

Υ/Σ	p^F (MW)	q^F (MVar)	MATPOWER	
			p^F (MW)	q^F (MVar)
1	0,150	0,122	0,150	0,120
2	14,377	8,647	14,300	8,560
3	21,063	11,83	20,960	11,720
4	17,557	11,038	17,460	10,940
5	33,013	19,148	32,840	18,960
6	33,389	21,324	33,230	21,160
7	7,459	4,345	7,410	4,290

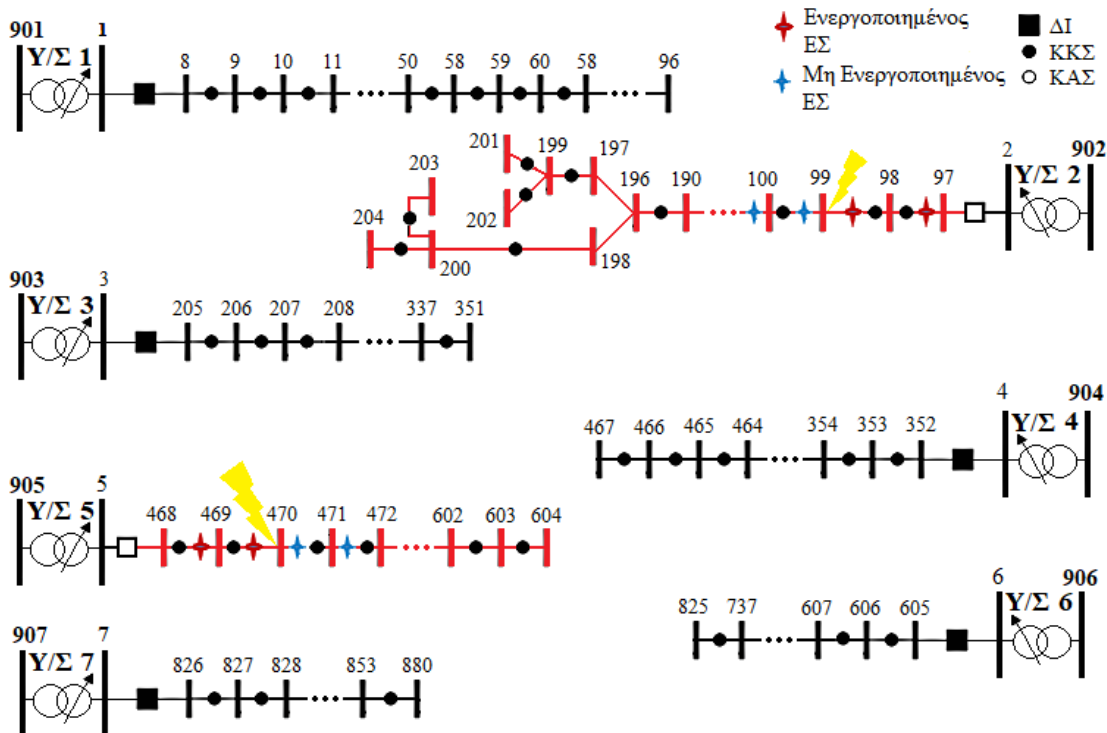
Στο Σχήμα 6.18 φαίνεται με κόκκινο χρώμα η απομονωμένη περιοχή, η οποία χρειάζεται επισκευή προτού να ανατροφοδοτηθεί. Με γαλάζιο χρώμα διακρίνεται η περιοχή που ανατροφοδοτήθηκε, χάρη στο κλείσιμο του διακόπτη του ΚΑΣ της γραμμής 11–471. Η γραμμή αυτή διακρίνεται με πράσινο χρώμα.



Σχήμα 6.18: Το δίκτυο 880 κόμβων, μετά τη μερική αποκατάσταση του σφάλματος.

Ο αλγόριθμος χρειάστηκε 39,805 sec για να υποδείξει τα παραπάνω αποτελέσματα. Το χρονικό αυτό διάστημα είναι σαφώς μεγαλύτερο από τις προηγούμενες εφαρμογές και η καθυστέρηση οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα του δικτύου, η οποία αύξησε το πλήθος των δεδομένων και των υπολογισμών σε πολύ μεγάλο βαθμό. Παρόλα αυτά, η μερική αποκατάσταση του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί σε λιγότερο από ένα λεπτό, επιταχύνοντας σε πολύ μεγάλο βαθμό τη διαδικασία, η οποία σε ένα συμβατικό σύστημα διαρκεί ώρες ή και μέρες. Συνεπώς, η μέθοδος σε αυτή τη δοκιμή είναι επίσης αποδοτική από άποψη χρόνου εκτέλεσης και τα αποτελέσματα της παραγωγής ισχύος είναι σχεδόν ίδια με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση λειτουργίας μέσω του λογισμικού MATPOWER.

6.5.2 Ταυτόχρονο σφάλμα σε δύο γραμμές του δικτύου.



Σχήμα 6.19: Το δίκτυο των 880 κόμβων αμέσως μετά το σφάλμα στις γραμμές 98–99 και 469–470.

Η εφαρμογή της μεθόδου για την περίπτωση διπλού μόνιμου σφάλματος στο δίκτυο 880 κόμβων του Σχήματος 6.16, θεωρήθηκε ότι αφορά ταυτόχρονο σφάλμα στις γραμμές σύνδεσης των ζυγών φορτίου 98–99 και 469–470, αντίστοιχα. Μόλις συμβεί το σφάλμα, ανοίγουν αυτόματα οι ΔΙ στις γραμμές 2–97 και 5–468, σταματώντας την παροχή ισχύος στους κόμβους 97 ως 204 και 468 ως 604, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.19. Η περιοχές των δύο σφαλμάτων απομονώνονται με βάση τις ενδείξεις των ΕΣ του δικτύου, σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3 και στη συνέχεια επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.

Στον Πίνακα 6.15 παρουσιάζονται οι διακοπτικές αλλαγές τις οποίες πρότεινε η μέθοδος, για την απομόνωση και τη μερική αποκατάσταση του δικτύου. Το άνοιγμα των διακοπών των γραμμών κατά την απομόνωση, έθεσε εκτός δικτύου τα φορτία των κόμβων 99 και 470. Οι διακοπτικοί χειρισμοί για την απομόνωση των σφαλμάτων επιβεβαιώνονται

και από τη μέθοδο μελών σφάλματος του Κεφαλαίου 3, καθώς οι ΕΣ στις γραμμές 2–97, 97–98, 98–99, 5–468, 468–469 και 469–470 είναι ενεργοποιημένοι, προσδιορίζοντας ως μέλη σφάλματος τους ΔΦ στις γραμμές 98–99, 99–100 και 469–470, 470–471, αντίστοιχα.

Μόλις ολοκληρωθεί η απομόνωση των σφαλμάτων, απομένει η ανατροφοδότηση των κόμβων 97,98 και 100 ως 204 για τη μία γραμμή και 468, 469 και 471 ως 604 για την άλλη. Στους κόμβους 97, 98, 468 και 469 η ροή ισχύος επανέρχεται με το κλείσιμο των ΔΙ των γραμμών 2–97 και 5–468 αντίστοιχα. Η ισχύς στους κόμβους 100 ως 204 και 471 ως 604 αποκαθίσταται με το κλείσιμο των διακοπών των ΚΑΣ 196–351 και 11–471, αντίστοιχα.

Την τροφοδοσία των υγιών φορτίων των αποκομμένων γραμμών, που διακρίνονται με γαλάζιο χρώμα, αναλαμβάνουν πλέον οι Υ/Σ 1 και 3. Στον Πίνακα 6.16 απεικονίζονται οι τιμές ισχύος των ζυγών παραγωγής του δικτύου, μετά τη μερική του αποκατάσταση. Ο πίνακας περιλαμβάνει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προτεινόμενη μέθοδο και από την προσομοίωση λειτουργίας μέσω του λογισμικού MATPOWER, για άμεση σύγκριση.

Πίνακας 6.15: Διακοπτικοί χειρισμοί απομόνωσης και μερικής αποκατάστασης του δικτύου 880 κόμβων λόγω σφάλματος στις γραμμές 98–99 και 469–470.

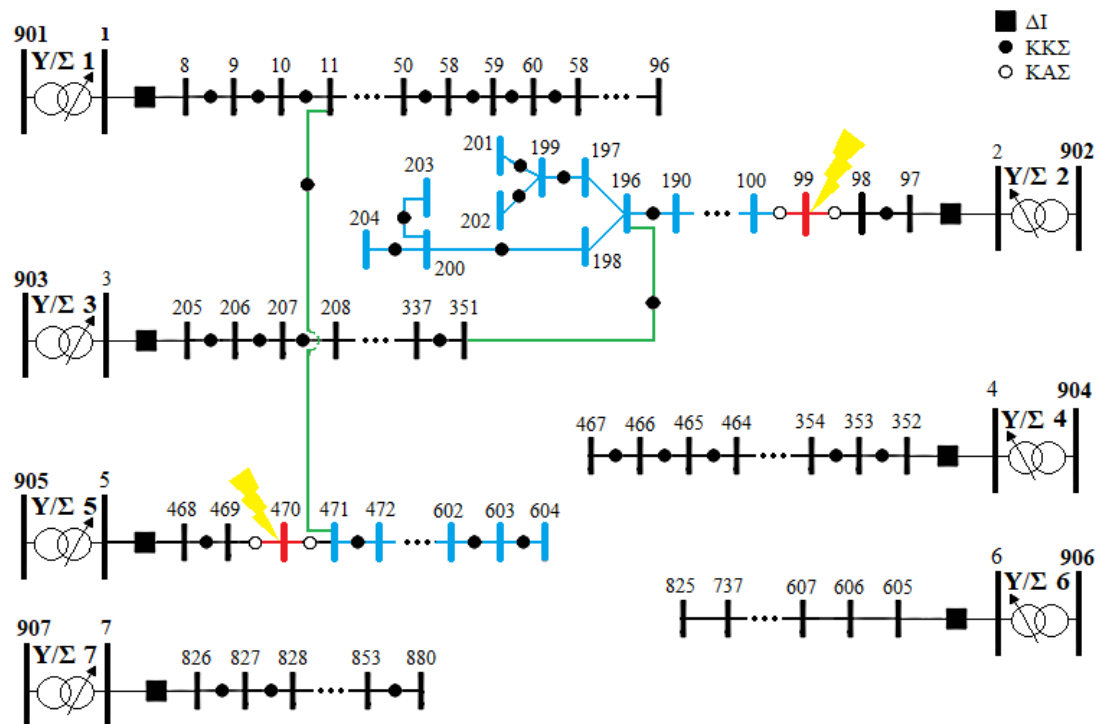
i	j	y_{ij}	Στάδιο αλγορίθμου
98	99	0	Απομόνωση σφάλματος
99	100	0	
469	470	0	
470	471	0	
11	471	1	Μερική αποκατάσταση
196	351	1	

Πίνακας 6.16: Τιμές ισχύος των Υ/Σ του δικτύου 880 κόμβων μετά τη μερική αποκατάστασή του, λόγω σφάλματος στις γραμμές 98–99 και 469–470.

Υ/Σ	p^F (MW)	q^F (MVar)	MATPOWER	
			p^F (MW)	q^F (MVar)
1	32,812	19,045	32,780	19,010
2	0,180	0,134	0,100	0,100
3	35,329	20,437	35,400	20,460
4	17,474	10,953	17,460	10,940
5	0,209	0,146	0,210	0,150
6	33,239	21,168	33,230	21,160
7	7,418	4,303	7,410	4,290

Στο Σχήμα 6.20 φαίνεται τμηματικά η διάταξη του δικτύου με τους προτεινόμενους διακοπτικούς χειρισμούς. Ο αλγόριθμος χρειάστηκε 47,799 sec για να επιτελέσει τους παραπάνω υπολογισμούς, παρουσιάζοντας τη μεγαλύτερη καθυστέρηση συγκριτικά με τις προηγούμενες εφαρμογές. Ο λόγος είναι η πολύ μεγάλη πυκνότητα του δικτύου, αλλά και η υπολογιστική επιβάρυνση εξαιτίας της ύπαρξης δύο μετώπων σφάλματος προς αποκατάσταση. Παρόλα αυτά, η χρονική καθυστέρηση κρίνεται αρκετά μικρή, διότι καθιστά

την μερική αποκατάσταση του δικτύου εφικτή σε χρόνο της τάξεως του ενός λεπτού. Επίσης, τα αποτελέσματα παραγωγής ισχύος επαληθεύονται και από τα αποτελέσματα της ροής ισχύος με τη βοήθεια του λογισμικού MATPOWER, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.16.

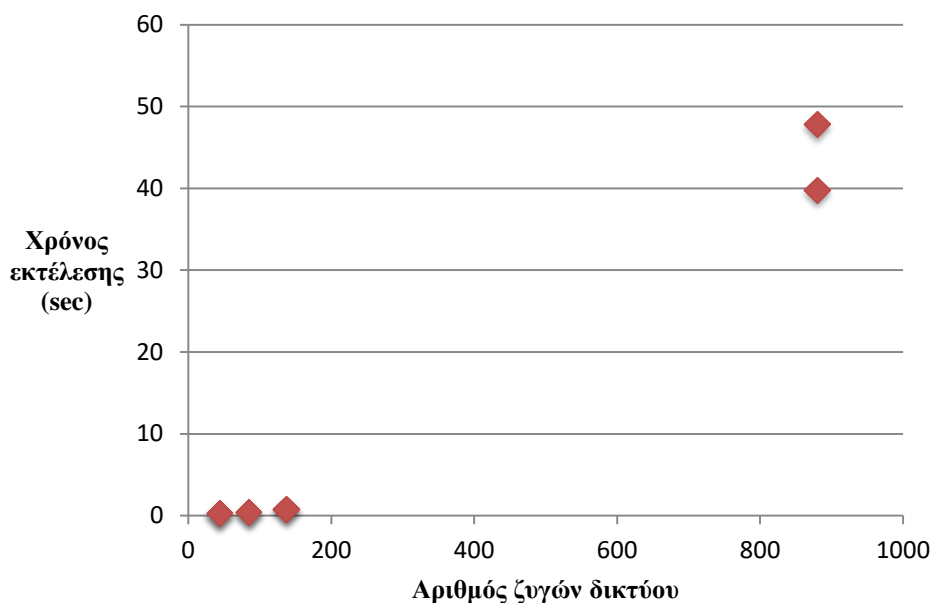


Σχήμα 6.20: Το δίκτυο 880 κόμβων μετά τη μερική αποκατάσταση του διπλού σφάλματος.

6.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

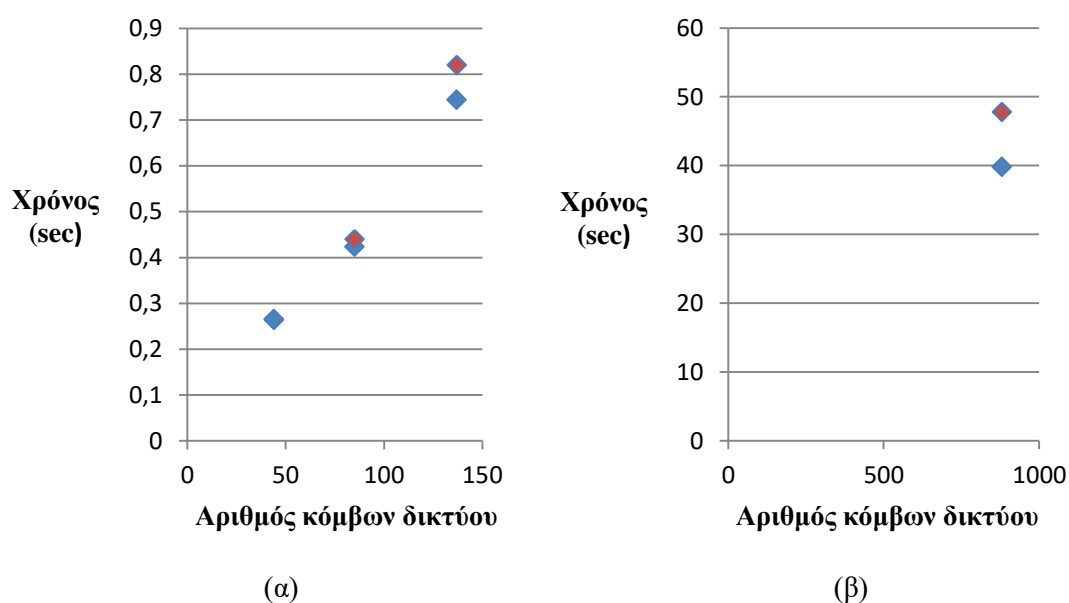
Τα συνολικά αποτελέσματα των δοκιμών κρίνονται ικανοποιητικά τόσο από άποψη διακοπτικών χειρισμών, όσο και από άποψη χρόνου. Στο Σχήμα 6.21 απεικονίζεται η χρονική διάρκεια των δοκιμών σε σχέση με το πλήθος των κόμβων. Ο χρόνος που απαιτείται για την εφαρμογή του μοντέλου σε δίκτυα έως και 137 ζυγών είναι πρακτικά αμελητέος και ουσιαστικά δεν διαφέρει ανάλογα με την πυκνότητα του δικτύου. Η χρονοκαθυστέρηση είναι αξιοσημείωτη μόνο στην περίπτωση του δικτύου των 880 κόμβων.

Η μεγάλη αύξηση στον χρόνο εκτέλεσης, ωστόσο, οφείλεται σε δύο παράγοντες: το μεγάλο πλήθος του συνολικού αριθμού κόμβων του δικτύου και το μεγάλο πλήθος κύριων Υ/Σ που τροφοδοτούν το δίκτυο. Το δίκτυο αυτό διαθέτει 7 Υ/Σ, τους περισσότερους δηλαδή σε σχέση με τα υπόλοιπα δίκτυα, τα οποία αποτελούνται από 2 ως 3. Συνεπώς, αυξάνονται οι εναλλακτικές πηγές τροφοδότησης και άρα οι υπολογισμοί του μοντέλου για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Παρόλα αυτά ο χρόνος παραμένει σε επίπεδα χαμηλότερα του ενός λεπτού, επιταχύνοντας εξαιρετικά τη διαδικασία.



Σχήμα 6.21: Διάγραμμα σχέσης χρόνου εκτέλεσης-κόμβων.

Η δοκιμή υπό ταυτόχρονο διπλό μόνιμο σφάλμα επιβαρύνει το μοντέλο με επιπλέον καθυστέρηση στην παραγωγή των αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.22, όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η περίπτωση διπλού σφάλματος. Αιτία είναι η περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων του δικτύου κατά το στάδιο της απομόνωσης, η οποία είναι παρατηρήσιμη στα τρία μεγαλύτερα δίκτυα. Σημειώνεται ότι ο αλγόριθμος είναι φτιαγμένος με τέτοιο τρόπο, ώστε η διπλή περίπτωση σφάλματος να μην επηρεάζει χρονικά το στάδιο της μερικής αποκατάστασης του δικτύου.



Σχήμα 6.22: Διάγραμμα σχέσης χρόνου-πλήθους σφαλμάτων, (α) στα δίκτυα 44, 85 και 137 κόμβων, (β) στο δίκτυο 880 κόμβων.

Επιπλέον τονίζεται ότι σε κάθε δοκιμή οι διακοπτικοί χειρισμοί ήταν οι ελάχιστοι δυνατοί και ο καταμερισμός των φορτίων ήταν ορθολογικά κατανεμημένος, ικανοποιώντας τους στόχους της ανάπτυξης του μοντέλου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν τα στάδια του μηχανισμού αντιμετώπισης του μόνιμου σφάλματος σε ένα δίκτυο διανομής (ΔΔ). Αρχικά, παρουσιάστηκαν τα είδη και τα αίτια ενός σφάλματος καθώς και οι ευρύτερες συνέπειες μιας διακοπής παροχής στο ΔΔ. Παράλληλα έγινε μια εισαγωγή στις παραμέτρους και τους δείκτες αξιοπιστίας, οι οποίοι αποτυπώνουν τη δριμύτητα μιας διακοπής σε ένα σύστημα διανομής.

Στη συνέχεια περιγράφηκε ο μηχανισμός αντιμετώπισης μόνιμου σφάλματος σε ένα συμβατικό ΔΔ. Ο υφιστάμενος μηχανισμός περιλαμβάνει τον εντοπισμό, την απομόνωση και την αποκατάσταση του σφάλματος (ΕΑΑΣ). Σε πρώτη φάση, το σφάλμα εξουδετερώνεται με τη διακοπή της παροχής σε όλη την κύρια γραμμή στην οποία βρίσκεται, με το άνοιγμα του διακόπτη ισχύος. Στη συνέχεια, μέσω μίας χρονοβόρας διαδικασίας, αποστέλλεται ειδικό συνεργείο στην περιοχή, το οποίο καλείται να εντοπίσει το ακριβές σημείο του σφάλματος. Μετά τον εντοπισμό, η ομάδα επιτελεί χειροκίνητα κατάλληλους διακοπτικούς μηχανισμούς, με στόχο την παράκαμψη του σημείου του σφάλματος και την μερική αποκατάσταση του δικτύου. Μόλις, λοιπόν, ανατροφοδοτηθούν τα υγιή φορτία της κύριας αυτής γραμμής, το συνεργείο επισκευάζει τη βλάβη και στη συνέχεια επαναφέρει όλους τους καταναλωτές στο δίκτυο, αποκαθιστώντας το ολικά.

Η διαδικασία αυτή βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στον ανθρώπινο παράγοντα και η ταχύτητα επίτευξής της εξαρτάται από πλήθος ασταθών παραγόντων, όπως: οι καιρικές συνθήκες της περιοχής, η εμπειρία του συνεργείου, η άμεση ειδοποίηση από τους καταναλωτές, κ.α. Ως αποτέλεσμα, η διακοπή παροχής στο ΔΔ διαρκεί για ώρες ή και μέρες, πλήττοντας την αξιοπιστία του δικτύου και δημιουργώντας δυσμενείς οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες.

Η παρούσα εργασία ερευνά μία μέθοδο επιτάχυνσης της διαδικασίας, η οποία βασίζεται στην αυτοματοποίηση των σταδίων αντιμετώπισης. Όπως και στα συμβατικά δίκτυα, ο μηχανισμός περιλαμβάνει τον εντοπισμό, την απομόνωση του σφάλματος και τη μερική αποκατάσταση του δικτύου. Η επιτάχυνση των βημάτων αυτών στοχεύει στην άμεση ανατροφοδότηση των υγιών φορτίων του δικτύου και επομένως στη βελτίωση της αξιοπιστίας του. Για την επίτευξη αυτού του στόχου προτάθηκαν οι ακόλουθες αναβαθμίσεις στη λειτουργία των ΔΔ:

- Προσθήκη ενδεικτών σφάλματος (ΕΣ) απομακρυσμένης λειτουργίας στις γραμμές του δικτύου που διαθέτουν διακόπτη.
- Αντικατάσταση των διακοπών αυτόματης επαναφοράς με παλμικούς διακόπτες αυτόματης επαναφοράς.

- Εγκατάσταση τηλεχειριζόμενων διακοπών στο δίκτυο.
- Εισαγωγή δικτύου επικοινωνίας στο δίκτυο διανομής για απομακρυσμένο έλεγχο.
- Εισαγωγή, στο κεντρικό σύστημα ελέγχου (ΚΣΕ), του λογισμικού που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας και αυτοματοποιεί τη διαδικασία εντοπισμού, απομόνωσης σφάλματος και μερικής αποκατάστασης του ΔΔ.

Πλέον, ο εντοπισμός του σφάλματος γίνεται άμεσα από τις ενδείξεις των ΕΣ και τη βοήθεια της μεθόδου μελών σφάλματος, που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Το ΔΔ βρίσκεται σε διαρκή επικοινωνία με το ΚΣΕ, χάρη στο εγκατεστημένο δίκτυο επικοινωνίας, μεταφέροντας διαρκώς το σήμα κατάστασης των ΕΣ. Σε περίπτωση σφάλματος, ορισμένοι ενδείκτες θα ενεργοποιηθούν και θα εισαχθούν ως δεδομένα εισόδου στο λογισμικό, στο ΚΣΕ. Εκεί θα υπολογίζονται άμεσα οι διακοπτικοί χειρισμοί απομόνωσης του σφάλματος και μερικής αποκατάστασης του δικτύου με χρήση Η/Υ, ανατροφοδοτώντας γρήγορα, βέλτιστα και με ασφάλεια, χάρη στους τηλεχειριζόμενους διακόπτες, τα υγιή τμήματα του δικτύου.

Στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκε ένα λογισμικό για την προσομοίωση της διαδικασίας. Το λογισμικό αυτό αποτελείται από ένα σύνολο συναρτήσεων στο υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB και GAMS που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Τα στάδια εντοπισμού και απομόνωσης εκτελούνται μέσω MATLAB, ενώ η μερική αποκατάσταση υπολογίζεται ως μοντέλο βελτιστοποίησης στην υπολογιστική πλατφόρμα GAMS.

Το μοντέλο βελτιστοποίησης στηρίζεται στην παρατήρηση ότι ένα ΔΔ λειτουργεί ως ένας κατευθυνόμενος γράφος και σε συνδυασμό με τις εξισώσεις ροής ισχύος που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4 προσομοιώνει τη λειτουργία του δικτύου. Η βελτιστοποίηση γίνεται με γνώμονα κυρίως την ελαχιστοποίηση του αριθμού των διακοπτικών χειρισμών και κατά δεύτερο λόγο τον ισορροπημένο καταμερισμό του φορτίου στους υποσταθμούς του δικτύου. Επιπλέον, το μοντέλο υπολογίζει την παραγωγή ισχύος κάθε υποσταθμού του δικτύου μετά τη μερική αποκατάστασή του. Παράλληλα, τα αποτελέσματα της ροής ισχύος του προτεινόμενου μοντέλου συγκρίνονται με αυτά του εργαλείου προσομοίωσης λειτουργίας του δικτύου MATPOWER.

Η προσομοίωση πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου σε περιβάλλον MATLAB και GAMS. Αρχικά τα δεδομένα του δικτύου εισάγονται στο MATLAB και έπειτα το απομονωμένο δίκτυο εισάγεται στο μοντέλο βελτιστοποίησης GAMS για τη διαδικασία μερικής αποκατάστασης του δικτύου. Τα αποτελέσματα επιστρέφουν στο MATLAB και αφού επεξεργαστούν, εξάγονται σε αρχείο Excel.

Το προτεινόμενο λογισμικό ελέγχθηκε σε τέσσερα δίκτυα: 44, 85, 137 και 880 κόμβων. Οι προσομοιώσεις για τα δίκτυα των 44, 85 και 137 κόμβων χρειάστηκαν λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο για την παραγωγή των αποτελεσμάτων, ενώ στο δίκτυο των 880 ζυγών χρειάστηκαν λιγότερο από ένα λεπτό. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την προτεινόμενη μέθοδο και την εφαρμογή της είναι τα ακόλουθα:

1. Ο χρόνος παραγωγής των αποτελεσμάτων είναι ανάλογος με το πλήθος των συνδέσεων του δικτύου, το πλήθος των υποσταθμών που διαθέτει και το πλήθος των σφαλμάτων που συμβαίνουν στις γραμμές του δικτύου. Όπως παρατηρήθηκε στα διαγράμματα χρόνου του Κεφαλαίου 6, οι χρόνοι προσομοίωσης μεγάλωναν με την αύξηση κάθε ενός από αυτούς τους παράγοντες.
2. Το ταυτόχρονο διπλό σφάλμα παρουσιάζει αξιοσημείωτη χρονική επιβάρυνση μόνο για πυκνότερα δίκτυα της τάξης των 880 κόμβων. Συγκεκριμένα, μόνο σε

αυτό το δίκτυο παρουσιάστηκε αξιοσημείωτη χρονική απόκλιση μεταξύ των προσομοιώσεων μονού και διπλού σφάλματος, η οποία έφτανε τα 8 sec.

3. Η παραγωγή των αποτελεσμάτων είναι ταχεία για κάθε δίκτυο και συντελεί στην άμεση επίτευξη της μερικής αποκατάστασής του. Παρόλη τη χρονική καθυστέρηση στο δίκτυο των 880 ζυγών, ο υπολογισμός των χειρισμών για τη μερική αποκατάσταση των δικτύων κυμαίνεται σε χρονικά πλαίσια μικρότερα του ενός λεπτού. Αυτό σημαίνει πως η μερική αποκατάσταση σε ένα δίκτυο είναι εφικτή σε αντίστοιχο χρόνο, με την προσθήκη μιας επιπλέον καθυστέρησης για τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων από το δίκτυο επικοινωνίας. Ακόμα και έτσι, η μερική αντιμετώπιση του σφάλματος συντελείται άμεσα και πολύ γρηγορότερα από ότι σε ένα συμβατικό δίκτυο, όπου η διαδικασία χρειάζεται από ώρες έως μέρες.
4. Η αναβάθμιση του δικτύου, με βάση τις προτεινόμενες ενέργειες, οδηγεί σε σημαντική μείωση του χρόνου που οι καταναλωτές δεν τροφοδοτούνται με ηλεκτρικό ρεύμα, μειώνοντας σημαντικά τους δείκτες αξιοπιστίας που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Συνεπώς, η αξιοπιστία του δικτύου βελτιώνεται και οι δυσμενείς επιπτώσεις μιας διακοπής περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό.
5. Η βελτίωση της αξιοπιστίας, εκτός από αναβάθμιση των υπηρεσιών, μεταφράζεται και σε εξοικονόμηση χρημάτων τόσο για τις εταιρίες παροχής όσο και για τους ίδιους τους καταναλωτές, μειώνοντας τα διαφυγόντα κέρδη που δημιουργεί μια διακοπή.
6. Η συνεχής καταγραφή της κατάστασης και της λειτουργίας του δικτύου, λειτουργεί από μόνη της ευεργετικά στην προστασία των δικτύων διανομής, καθώς δημιουργεί ιστορικό που επιτρέπει τον ευκολότερο εντοπισμό των ευαίσθητων σημείων του δικτύου.
7. Το μοντέλο κατάφερε να διεκπεραιώσει την αποκατάσταση του δικτύου επιτελώντας τους ελάχιστους δυνατούς διακοπτικούς χειρισμούς, ικανοποιώντας το βασικό του κριτήριο βελτιστοποίησης.

7.2 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στα πλαίσια της εργασίας παρουσιάστηκε μία σύγχρονη μέθοδος που αυτοματοποιεί και βελτιστοποιεί την αντιμετώπιση του μόνιμου σφάλματος σε ένα ΔΔ. Ορισμένες επεκτάσεις της που μπορεί να υποστηρίξει είναι οι ακόλουθες:

- Στην εργασία περιγράφεται ένα πλήθος αναβαθμίσεων για τον εκσυγχρονισμό των ΔΔ και τη βελτίωση της αξιοπιστίας τους. Οι αναβαθμίσεις αυτές μπορούν να επεκταθούν περαιτέρω προς την κατεύθυνση της δημιουργίας ενός ολοκληρωμένου ευφυούς δικτύου, το οποίο αποτελεί εξέλιξη του παρόντος μοντέλου και να μελετηθούν οι επιπλέον βελτιώσεις στην αξιοπιστία του.
- Το μοντέλο ελέγχου που παρουσιάστηκε στη μέθοδο είναι ένα μοντέλο κεντρικού ελέγχου του δικτύου. Η τεχνολογική εξέλιξη δημιουργεί μία νέα τάση, η οποία στοχεύει στον αποκεντρωμένο έλεγχο με τη δημιουργία micro grids, τα οποία θα ρυθμίζουν τοπικά τη λειτουργία τους. Το προτεινόμενο μοντέλο της

εργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την ανάπτυξη μιας τέτοιας μεθόδου ελέγχου.

- Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι η μείωση του χρόνου της διακοπής της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές, με εκσυγχρονισμό του ΔΔ. Ωστόσο, ο εκσυγχρονισμός του δικτύου απαιτεί ένα επενδυτικό κόστος. Θα ήταν λοιπόν χρήσιμη μία οικονομική μελέτη, η οποία θα ερευνούσε τον χρόνο απόσβεσης του κόστους επένδυσης και θα ερευνούσε αν αποτελεί συμφέρουσα κίνηση.
- Το μοντέλο βελτιστοποίησης αντιμετωπίζει το πρόβλημα της μερικής αποκατάστασης ως ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς. Από τη βιβλιογραφία προκύπτει πως το πρόβλημα αποκατάστασης μπορεί να παραμετροποιηθεί, επίσης, ως πρόβλημα τετραγωνικά περιορισμένου προγραμματισμού. Η αντίστοιχη μελέτη στα ίδια δίκτυα, με επίλυση για αυτό το είδος προγραμματισμού, θα ήταν χρήσιμη για την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς and Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2010, pp. 13-14, 33-34.
- [2] R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, L. Goel, and K. S. So, “A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 2, p. 815, 1991.
- [3] S. M. M. Weeratunga, “Effective fault isolation methods to improve 33kV Network reliability,” MA Thesis, Dept. El. Eng., Univ. Moratuwa, Sri Lanka, 2009.
- [4] Π.Σ. Γεωργιλάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015, pp. 267-268, 276-287.
- [5] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ασύμμετρες και Μεταβατικές καταστάσεις*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1993, pp. 61-72.
- [6] L. Wang, “The Fault Causes of Overhead Lines in Distribution Network,” in *Proc. 2016 MATEC Web of Conf.*, vol. 2017, no. 2016, pp. 1–3, 2017.
- [7] P. Linares and L. Rey, “The costs of electricity interruptions in Spain: Are we sending the right signals?,” *Energy Policy*, vol. 61, pp. 752–753, 2013.
- [8] Ε. Διαλυνάς, *Ανάλυση αξιοπιστίας τεχνολογικών συστημάτων*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρίας, 1998, p. 225.
- [9] P. Mazidi and G. N Sreenivas, “Reliability Analysis of A Radial Distributed Generation Distribution System,” *Int. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 3, pp. 82–88, Jan. 2013.
- [10] A. Zidan, M. Khairalla, A. M. Abdrabou, T. Khalifa, K. Shaban, A. Abdrabou, R. El Shatshat, and A. M. Gaouda, “Fault Detection, Isolation, and Service Restoration in Distribution Systems: State-of-the-Art and Future Trends,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2170–2173, 2017.
- [11] A. Panagoda, K. T. M. U. Hemapala, and N. De Silva, “Distribution System Fault Localization, Fault Restoration and Network Reconfiguration using Multi Agent Based System,” in *Annual Sessions of IES*, 2016, p. 136.
- [12] F. M. Angerer, “New developments in Faulted Circuit Indicators help utilities reduce cost and improve service,” in *Rural Electric Power Conference*, 2008, no. 8, pp. B4-2-B4-3.
- [13] M. J. Domínguez, “News in Fault Passage Indicators in Overhead and Underground Mv Lines,” in *CIREN 17th International Conference on Electricity Distribution*, 2003, no. 65, pp. 1–4.
- [14] *Technical Specification of Clip On Fault Passage Indicator for 33 KV and 11 KV Lines*, CESUD Standard RAPDRP-01, 2014.
- [15] *Fault passage indicator for medium voltage underground networks*, ΔΕΔΔΗΕ ΔΔ-ΧΧΧ, Ιούν. 2017.

- [16] *Current and voltage sensors or detectors, to be used for fault passage indication purposes – Part 2: System aspects*, IEC International Standard IEC 62689-2, May 2016
- [17] E. Zeqo, R. Bualoti, and O. Metko, “Impact of replacement of conventional recloser with PulseCloser,” *ATI*, vol. 4, no. April, pp. 26–28, 2011.
- [18] P. M. S. Carvalho, L. A. F. M. Ferreira, and A. J. Cerejo da Silva, “A decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution systems,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2 I, pp. 1031–1036, 2005.
- [19] P. S. Georgilakis, C. Prévé, and Y. Chollot, “Managing MV Networks for Quality of Service,” *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 15, no. 3, p. 47, 2002.
- [20] *Τεχνική περιγραφή εναέριου τηλεχειριζόμενου διακόπτη φορτίου SF₆ ή κενού*, ΔΕΔΔΗΕ ΔΔ-370, Οκτ. 2014.
- [21] J. H. Teng, W. H. Huang, and S. W. Luan, “Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 4, pp. 1660–1661, 2014.
- [22] Γ. Κορρές. *Συστήματα τηλεμετρήσεων*. [Online]. Διαθέσιμο: <http://ecourses.dbnet.ntua.gr/fsr/11544/SCADA.pdf> SCADA
- [23] A. S. Tanenbaum and D. J. Wetherall, *Computer Networks*, vol. V. London: Pearson, 1996, pp. 4-5, 65-69.
- [24] S. Hodgson, “The use GSM and web based SCADA for monitoring Fault Passage Indicators,” in *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Smart Solutions for a Changing World*, pp. 1–3, 2010.
- [25] J. D. McDonald, B. Wojszczyk, B. Flynn, and I. Voloh, *Distribution Systems, Substations, and Integration of Distributed Generation*, vol. I. NY: Springer New York, pp. 17–25, 2013.
- [26] E. Coster and T. Berry, “Self healing distribution networks using smart controllers,” in *22 nd International Conference on Electricity Distribution*, no. 196, pp. 1–3, 2013.
- [27] E. J. Coster, W. C. M. Kerstens, and O. Schroedel, “Implementation of an automatic FLIR-scheme in a 20 kV distribution grid,” in *12th IET International Conference on Developments in Power System Protection*, pp. 4–6, 2014.
- [28] F. Pereira, K. Vittori, and G. M. Da Costa, “Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction Based on Ant Colony Behavior,” in *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, p. 1, June 2006.
- [29] M. Farivar, “Optimization and control of power flow in distribution networks,” Ph.D. dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, 2016.
- [30] Σ. Δ. Νικολόπουλος, Λ. Γεωργιάδης, και Λ. Πάλλης, *Αλγοριθμική θεωρία γραφημάτων*. Ζωγράφου: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015, p. 80.
- [31] J. Li, X. Y. Ma, C. C. Liu, and K. P. Schneider, “Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 3021–3029, 2014.
- [32] D. Shirmohammadi, “Service restoration in distribution networks via network reconfiguration,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 7, no. 2, pp. 952–958, 1992.
- [33] J. A. Taylor and F. S. Hover, “Convex models of distribution system reconfiguration,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1407–1414, 2012.
- [34] “MIQCP: mixed integer programs with quadratic terms in the constraints” [online], διαθέσιμο: <https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/>

-
- [35] E. Castillo, A. J. Gonejo, P. Pedregal, R. Garcíá, and N. Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [36] “The Language of Technical Computing”, [online], διαθέσιμο: <https://uk.mathworks.com/help/matlab/>
- [37] “System requirements for MATLAB R2017b”, [online], διαθέσιμο: <https://uk.mathworks.com/support/sysreq.html>
- [38] “GDXMRW” , [online], διαθέσιμο: https://www.gams.com/latest/docs/T_GDXMRW.html
- [39] P. L. Cavalcante, J. C. Lopez, J. F. Franco, M. J. Rider, A.V. Garcia, M. R. R. Malveira, L. L. Martins, L.C. M. Direito, “Centralized self-healing scheme for electrical distribution systems,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 145–155, 2016.
- [40] C.-T. Su, C.-F. Chang, and J.-P. Chiou, “Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 75, no. 2–3, pp. 190–199, Aug. 2005.
- [41] “REDS: Repository of Distribution Systems”, [online], διαθέσιμο: <http://www.dejazzer.com/reds.html>
- [42] M. A. N. Guimar and C. A. Castro, “Reconfiguration of Distribution Systems for Loss Reduction using Tabu Search,” in *15th PSCC*, p. 1.