



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

Μελέτη τοπολογίας Δικτύων Διανομής με χρήση δεδομένων έξυπνων μετρητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Σουμαλάς

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



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

Μελέτη τοπολογίας Δικτύων Διανομής με χρήση δεδομένων έξυπνων μετρητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Σουμαλάς

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Σταύρος Παπαθανασίου
Αναπ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Πάυλος Γεωργιάκης
Επικ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

.....
Κωνσταντίνος Σουμαλάς

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

Copyright © Κωνσταντίνος Σουμαλάς, 2016

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 ερμηνεύονται ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργη Μεσσίνη, για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η συνεχής βοήθεια του καθώς και οι υποδείξεις και η υπομονετική καθοδήγησή του με βοήθησαν να ολοκληρώσω την εργασία αυτή.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου , οι οποίοι με στήριξαν και με ενθάρρυναν καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μια προσπάθεια προσδιορισμού τοπολογιών Δικτύων Διανομής (ΔΔ) με χρήση δεδομένων έξυπνων μετρητών. Η εφαρμογή της εύρεσης τοπολογίας κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για τα Δίκτυα Διανομής Χαμηλής Τάσης, για τα οποία πληροφορίες σχετικές με την τοπολογία του δικτύου συχνά δεν είναι διαθέσιμες. Η μοναδική πληροφορία που είναι διαθέσιμη για τα δίκτυα Χαμηλής Τάσης περιορίζεται συνήθως σε ποιον καταναλωτή συνδέεται ο κάθε έξυπνος μετρητής. Για τον λόγο αυτόν, αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα μελέτης της τοπολογίας των Δικτύων Διανομής, χρησιμοποιώντας τους όρους ευαισθησίας που προκύπτουν από τα δεδομένα των έξυπνων μετρητών.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας πραγματοποιείται συνοπτική παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας και των προτερημάτων εγκατάστασης έξυπνων μετρητών στους χρήστες του ηλεκτρικού δικτύου. Έπειτα παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων διανομής.

Στο δεύτερο μέρος, παρουσιάζεται, αρχικά, η κλασική θεωρία ευαισθησίας που χρησιμοποιείται στην ανάλυση δικτύων Υψηλής Τάσης (ΥΤ), η οποία βασίζεται στον πίνακα Jacobian. Ωστόσο, η συγκεκριμένη ανάλυση ευαισθησίας δεν είναι η καταλληλότερη για τα Δίκτυα Διανομής. Γι' αυτό τον λόγο παρουσιάζεται εναλλακτική, καταλληλότερη μέθοδος υπολογισμού των όρων ευαισθησίας για ακτινικά Δίκτυα Διανομής, που βασίζεται στα χαρακτηριστικά της τοπολογίας των δικτύων. Από αυτήν την ανάλυση ευαισθησίας προκύπτει η συσχέτιση μεταξύ τοπολογίας και όρων ευαισθησίας.

Όμως, όπως προαναφέρθηκε, οι τοπολογίες των δικτύων Χαμηλής Τάσης (ΧΤ) είναι συνήθως άγνωστες. Ως αποτέλεσμα, και δεδομένης της σχέσης της τοπολογίας με τους όρους ευαισθησίας του δικτύου, στην παρούσα εργασία, μελετάται η αντίστροφη διαδικασία: γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού της τοπολογίας από τον πίνακα ευαισθησίας, όπως αυτός υπολογίζεται από δεδομένα έξυπνων μετρητών.

Στο τρίτο στάδιο της εργασίας, προτείνεται μέθοδος υπολογισμού των όρων ευαισθησίας των ζυγών φορτίου του δικτύου, χρησιμοποιώντας δεδομένα που προκύπτουν από την προσομοίωση ροής φορτίου στο εργαλείο της MATLAB, MATPOWER, ελλείψει πραγματικών δεδομένων από έξυπνους μετρητές. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται γραμμικό μοντέλο υπολογισμού του πειραματικού πίνακα ευαισθησίας, που θεωρείται ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά την μη γραμμική σχέση μεταξύ τάσης και εγχύσεων ισχύος, στα δίκτυα διανομής.

Το τέταρτο μέρος της εργασίας περιλαμβάνει την αναλυτική περιγραφή και σύγκριση των δύο προτεινόμενων μεθόδων εύρεσης τοπολογίας, που βασίζονται στην ακολουθία Prufer και στον αλγόριθμο Neighbor joining, αντίστοιχα.

Λέξεις κλειδιά: τοπολογία, Δίκτυα Διανομής (ΔΔ), έξυπνοι μετρητές, ανάλυση ευαισθησίας, πίνακας Jacobian, Υψηλή Τάση (ΥΤ), ακτινικά, Χαμηλή Τάση (ΧΤ), ζυγοί φορτίου, MATPOWER, ακολουθία Prufer, Neighbor joining

Abstract

This diploma thesis presents an initial attempt to determine Distribution Networks' topologies, by utilizing smart meters data. The application of topology inference is very important for Low Voltage Distribution Networks since frequently there is no available information regarding the network topology. The knowledge that utilities have about the Low Voltage electricity grid is usually limited to which meter is connected to which customer. For this reason, two models were designed for topology inference in Distribution Networks. Each of them uses the sensitivity terms that are estimated by smart meter data.

The first part of this thesis includes a summary of the operational features, as well as, the advantages of installing smart meters in the electrical grid. Afterwards, the basic structure of distribution grids is presented.

In the second part the classical sensitivity theory used in HV (High Voltage Networks) network analysis, which is based on the Jacobian Matrix, is presented. However this specific sensitivity analysis is not the most suitable for Distribution Networks (DNs). As a result, an alternative, more suitable sensitivity analysis method of computing the sensitivity terms of the radial Distribution Networks is presented, which is based on grid topology information. The second sensitivity analysis method based on grid topology information reveals the relationship between network topology and sensitivity terms.

It was previously mentioned that network topologies in Low Voltage (LV) grids are, often, unknown. As a result, and considering the relationship that is presented above between grid topologies and sensitivity factors, in this diploma thesis, the inverse procedure is considered: it is attempted to determine the grid topology by using the sensitivity matrix that is estimated by smart meter data.

The third section of this thesis includes a proposed computational method of the sensitivity terms of the PQ buses, based on data produced by the simulation of the power flow problem in the MATLAB toolbox, MATPOWER, due to lack of real measurements. Specifically, a linear model of computing the sensitivity matrix is proposed. It is assumed that the proposed model approximates well enough the nonlinear relationship between the voltages and the power profiles in distribution grids.

In the fourth section, two methods of topology estimation are presented in detail and compared. These methods are based on the Prufer sequence and Neighbor Joining algorithms, respectively.

Key words: topology, Distribution Networks (DNs), smart meters, sensitivity analysis, Jacobian matrix, High Voltage (HV), radial, Low Voltage (LV), PQ buses, MATPOWER, Prufer sequence, Neighbor joining

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	5
Περίληψη	7
Abstract.....	8
Κεφάλαιο 1:Ευφυή δίκτυα και έξυπνοι μετρητές	12
Κεφάλαιο 2:Διαμόρφωση των Δικτύων Διανομής	14
2.1:Εισαγωγή	14
2.2:Εξοπλισμός Δικτύων Διανομής.....	14
2.3: Δίκτυο Μέσης Τάσης (ΜΤ).....	15
2.3.1:Δομή του δικτύου Μέσης Τάσης	15
2.3.2:Επίπεδα Τάσεων στο δίκτυο Μέσης Τάσης.....	20
2.3.3:Γραμμές διανομής και βασική τυποποίησή δικτύων Μέσης Τάσης.....	21
2.4:Δίκτυο Χαμηλής Τάσης (ΧΤ).....	22
2.4.1:Δομή του δικτύου Χαμηλής Τάσης.....	22
2.4.2:Γραμμές διανομής Χαμηλής Τάσης	24
2.5:Είδη ζυγών συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....	25
2.6:Τοπολογία δικτύων ΧΤ που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση	25
Κεφάλαιο 3:Ανάλυση ευαισθησίας Δικτύων Διανομής	26
3.1:Ορισμός ευαισθησίας σε ένα σύστημα.....	26
3.2:Κλασική θεωρία ευαισθησίας σε δίκτυα διανομής και προσέγγιση ευαισθησίας για δεδομένη τοπολογία δικτύου.....	26
3.2.1:Εισαγωγή	26
3.2.2:Αναλυτική περιγραφή κλασικής θεωρίας ευαισθησίας.....	27
3.2.3:Υπολογισμός πίνακα Jacobian και πίνακα ευαισθησίας μέσω Jacobian από το MATPOWER 29	
3.3:Θεωρία ανάλυσης ευαισθησίας με δεδομένη την τοπολογία του δικτύου διανομής	30
3.4:Υπολογισμός θεωρητικού πίνακα ευαισθησίας με δεδομένη την τοπολογία του δικτύου	36
3.4.1: Υπολογισμός θεωρητικού πίνακα ευαισθησίας.....	36
3.4.2:Αλγόριθμος Dijkstra	36
3.4.3: Παραδείγματα υπολογισμού πίνακα ευαισθησίας με τις δύο μεθόδους	39
3.4.4:Συμπεράσματα	50
Κεφάλαιο 4:Ανάλυση ευαισθησίας με χρήση δεδομένων των έξυπνων μετρητών των καταναλωτών....	51
4.1:Εισαγωγή	51

4.2:Μεταβολές μόνο ενεργού ισχύος στους ζυγούς φορτίου.....	52
4.3:Μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου	55
4.4:Υποθέσεις	58
4.5:Συμπεράσματα	67
Κεφάλαιο 5:Εύρεση τοπολογίας με βάση την ακολουθία <i>Prüfer</i>	69
5.1:Ακολουθία <i>Prüfer</i>	69
5.2:Αλγόριθμος κωδικοποίησης <i>Prüfer</i>	69
5.2.1:Επεξήγηση αλγορίθμου κωδικοποίησης <i>Prüfer</i>	69
5.2.2:Ψευδοκώδικας αλγορίθμου κωδικοποίησης <i>Prüfer</i>	70
5.2.3:Παράδειγμα	70
5.3:Αλγόριθμος αποκωδικοποίησης <i>Prüfer</i>	72
5.3.1:Επεξήγηση αλγορίθμου αποκωδικοποίησης <i>Prüfer</i>	72
5.3.2:Ψευδοκώδικας αλγορίθμου αποκωδικοποίησης <i>Prüfer</i>	73
5.3.3:Παράδειγμα	73
5.4:Αλγόριθμος εύρεσης τοπολογίας <i>Prüfer</i>	77
5.4.1:Επεξήγηση αλγορίθμου εύρεσης τοπολογίας <i>Prüfer</i>	77
5.4.2:Ψευδοκώδικας εύρεσης τοπολογίας <i>Prüfer</i>	79
5.4.3:Ψευδοκώδικας εύρεσης φύλλων	81
5.4.4:Παράδειγμα	82
5.5:Εύρεση τοπολογίας από πίνακα ευαισθησίας	84
5.5.1:Θεωρητικός υπολογισμός πίνακα μήκους μονοπατιών από πίνακα ευαισθησίας	84
5.5.2:Υποθέσεις για τον υπολογισμό του πίνακα μήκους μονοπατιών και την εύρεση τοπολογίας	85
5.6:Εφαρμογές αλγορίθμου εύρεσης τοπολογίας <i>Prüfer</i>	95
5.6.1:Εφαρμογή του αλγορίθμου χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του έξυπνου μετρητή στο ζυγό M/Σ.....	97
5.6.2:Εφαρμογή του αλγορίθμου χωρίς να ληφθούν υπόψιν οι μετρήσεις του μετρητή στο ζυγό M/Σ.....	111
5.6.3:Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο προηγούμενων μεθόδων	112
Κεφάλαιο 6:Εύρεση τοπολογιών δικτύων διανομής με χρήση του αλγορίθμου Neighbor Joining	114
6.1:Εισαγωγή	114
6.2: Φυλογενετικά δέντρα	114
6.3: Αλγόριθμος Neighbor joining	115

6.3.1:Επεξήγηση αλγορίθμου Neighbor joining	115
6.3.2:Παράδειγμα	117
6.4: Αλγόριθμος BIONJ.....	120
6.5: Εφαρμογές του αλγορίθμου Neighbor joining (BIONJ) σε Δίκτυα Διανομής.....	120
6.6:Συμπεράσματα	134
Κεφάλαιο 7:Συμπεράσματα.....	135
Βιβλιογραφία	138
Παράρτημα-Κώδικας σε MATLAB.....	141

Κεφάλαιο 1: Ευφυή δίκτυα και έξυπνοι μετρητές

Τα Ευφυή Δίκτυα είναι ηλεκτρικά δίκτυα που μπορούν να συνδυάσουν με «έξυπνο» τρόπο τις δράσεις όλων των χρηστών που συνδέονται σε αυτά, όπως των μονάδων παραγωγής, των καταναλωτών καθώς και των χρηστών που κάνουν και τα δύο, ώστε να διανέμεται πιο αποτελεσματικά η ηλεκτρική ενέργεια. Σκοπός και διαρκές αντικείμενο έρευνας του τομέα των Ευφυών Δικτύων είναι η μελέτη, αναβάθμιση και βελτιστοποίηση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Ο «έξυπνος» συνδυασμός των δράσεων των χρηστών προς επίτευξη αυτών των στόχων επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας προηγμένες εφαρμογές ελέγχου και πληροφορικής.[1]

Μέχρι πρόσφατα, η συλλογή δεδομένων κατανάλωσης γινόταν από υπαλλήλους των εταιριών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι, πηγαίνοντας στην τοποθεσία των αναλογικών μετρητών, παρατηρούσαν τους μετρητές, λάμβαναν μετρήσεις ενέργειας και πραγματοποιούσαν έλεγχο για βλάβες. Ακόμα και σήμερα όμως, οι περισσότερες εφαρμογές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας δεν έχουν αυτοματοποιηθεί, κι έτσι είναι αδύνατη η ρύθμιση και ο απομακρυσμένος έλεγχός τους. Ωστόσο, πλέον, η τοποθέτηση έξυπνων ψηφιακών μετρητών στους χρήστες του δικτύου παρέχει τέτοιες δυνατότητες, όπως επίσης, και εξοικονόμηση κόστους για τους καταναλωτές, από την παρατήρηση των προφίλ κατανάλωσής τους.

Οι ψηφιακοί μετρητές είναι ηλεκτρονικές συσκευές που καταγράφουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο και στέλνουν τις μετρήσεις μέσω ασυρμάτων δικτύων απευθείας στον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποστολή των μετρήσεων επιτυγχάνεται μέσω ενσωματωμένων στους μετρητές GSM/GPRS modems, που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες. Τα GSM/GPRS modems παρέχουν τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ του μετρητή και της κεντρικής μονάδας ελέγχου. Τα ασύρματα δίκτυα παρέχονται από εταιρίες τηλεπικοινωνιών. Σημειώνεται ότι πέρα από μέτρηση ενέργειας είναι δυνατή και η μέτρηση τάσης από έναν ψηφιακό μετρητή, με αυξημένο όμως κόστος λόγω αυξημένης χρήσης του τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Επίσης, οι μετρήσεις είναι δυνατό να λαμβάνονται σε διαστήματα μίας ώρας ή λιγότερο (ανά τέταρτο) και αποστέλλονται στο τέλος ορισμένου χρονικού διαστήματος (μέρα ή μήνας) στον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας.

Το 2014 εγκρίθηκε η εγκατάσταση πιλοτικά 45.000 έξυπνων μετρητών, εξοπλισμένων με GSM/GPRS modems, σε εμπορικούς, βιομηχανικούς και οικιακούς καταναλωτές στην Ελλάδα. Τους έξυπνους μετρητές παρέιχε ο ΔΕΔΔΗΕ (Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας). Αυτό το σχέδιο αποτελεί την πρώτη μαζική τοποθέτηση έξυπνων μετρητών στο δίκτυο Χαμηλής Τάσης στην Ελλάδα και καλύπτει περισσότερο από το 10% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, καθώς και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ένταξη των έξυπνων μετρητών στο δίκτυο οδηγεί σε μια προχωρημένη υποδομή καταγραφής μετρήσεων, μειώνοντας την ανάγκη για επίσκεψη και επί τόπου καταγραφή, ενώ παράλληλα βελτιώνεται και η ποιότητα ισχύος του δικτύου και η επίβλεψη της συμπεριφοράς των φορτίων. Σημειώνεται ότι οι καταναλωτές λαμβάνουν ημερήσια ενημέρωση για την κατανάλωσή τους, με τις μετρήσεις να λαμβάνονται ανά 15 λεπτά.



Εικόνα 1.1:Εξυπνος μετρητής

[1] [2] [3] [4] [5] [6]

Κεφάλαιο 2: Διαμόρφωση των Δικτύων Διανομής

2.1: Εισαγωγή

Κατασκευαστικά, τα Δίκτυα Διανομής (ΔΔ) Μέσης Τάσης (ΜΤ) και Χαμηλής Τάσης (ΧΤ) διακρίνονται σε εναέρια και σε υπόγεια καλωδιακά.

Τα εναέρια δίκτυα είναι πολύ πιο φτηνά από τα υπόγεια, αλλά και πιο εύκολα στην εκμετάλλευσή τους. Καταλαμβάνουν όμως περισσότερο χώρο, για αυτό συναντώνται κυρίως στην ύπαιθρο. Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη της τεχνικής των καλωδίων επιτρέπει τη χρησιμοποίηση εναέριων καλωδίων αντί γυμνών αγωγών, κυρίως στη ΧΤ αλλά και στη ΜΤ. Το κόστος των εναέριων δικτύων ΧΤ με καλώδια δεν υπερτερεί των γυμνών αγωγών, ενώ τα πρώτα έχουν μικρότερη δαπάνη εγκατάστασης, αφού μπορούν να στηριχθούν και σε προσόψεις κτιρίων. Οι λόγοι αυτοί έχουν οδηγήσει στην επικράτηση των καλωδίων στη ΧΤ.

Τα υπόγεια καλωδιακά δίκτυα απαντώνται κυρίως στις πόλεις όπου υπάρχει μεγάλη πυκνότητα φορτίου. Κατασκευάζονται σε μεγαλύτερες διατομές από αυτές των εναέριων ώστε να αντέχουν να μεταφέρουν μεγαλύτερη ισχύ. Στα περίχωρα των πόλεων συναντώνται μικρά δίκτυα τόσο ΜΤ όσο και ΧΤ τα οποία αποτελούνται από τμήματα υπόγεια και εναέρια.

2.2: Εξοπλισμός Δικτύων Διανομής

Η ανάγκη για χειρισμούς και η προστασία των χειριστών και της εγκατάστασης οδήγησε σε ορισμένα βασικά είδη διακοπών, που χρησιμοποιούνται στους πίνακες ΜΤ των ηλεκτρικών εταιριών καθώς και σε εκείνους των καταναλωτών ΜΤ. Οι διακόπτες είναι οι εξής:

- Οι Αποζεύκτες (Isolators ή Disconnectors).
- Οι Διακόπτες Φορτίου (Switches).
- Οι Διακόπτες Ισχύος (Circuit Breakers)

Αποζεύκτες (Α/Ζ) ονομάζονται οι συσκευές που απομονώνουν από την παροχή ένα κύκλωμα που έχει ήδη τεθεί εκτός τάσης λειτουργίας ή διαρρέεται από αμελητέο ρεύμα. Το ρεύμα αυτό οφείλεται κυρίως στα χωρητικά ρεύματα των μονωτήρων, των ζυγών και των μετασχηματιστών. Οι αποζεύκτες δεν έχουν ισχύ διακοπής.

Διακόπτες Φορτίου (Δ/Φ) ονομάζονται οι συσκευές που έχουν την ικανότητα να διακόπτουν ή να αποκαθιστούν εντάσεις υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος. Δεν μπορούν όμως να διακόπτουν τα ρεύματα βραχυκύκλωσης. Στα δίκτυα διανομής υπάρχουν δύο είδη τέτοιων διακοπών τα οποία είναι:

- Οι Διακόπτες Απομόνωσης (Sectionalizing Switches). Οι διακόπτες αυτοί συνδέουν δύο τμήματα γραμμών της ίδιας γραμμής τροφοδοσίας.

- Οι Διακόπτες Διασύνδεσης (Tie Switches). Σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, οι διακόπτες αυτοί είναι ανοικτοί. Όταν κλείσουν μπορούν να συνδέσουν δύο διαφορετικές γραμμές τροφοδοσίας δημιουργώντας κάποιο βρόχο.

Και τα δύο αυτά είδη διακοπών φορτίου συμβάλλουν στην επαναδιαμόρφωση του δικτύου όσον αφορά τη λειτουργία του.

Διακόπτες Ισχύος (Δ/I) ονομάζονται οι συσκευές που έχουν την ικανότητα να διακόπτουν ή να αποκαθιστούν τις εντάσεις υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος, όπως βέβαια και οι Δ/Φ . Επιπλέον προστατεύουν την εγκατάσταση σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Οι Δ/I έχουν μεγαλύτερη ισχύ διακοπής από τους Δ/Φ .

Τα Μέσα Προστασίας που χρησιμεύουν για την αυτόματη απομόνωση τμημάτων του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος και στην προστασία στοιχείων του κυκλώματος είναι:

- Οι Δ/I , όταν δέχονται εντολές από Ηλεκτρονόμους Προστασίας.
- Οι Ασφάλειες (ΑΣΦ).

Στην πράξη χρησιμοποιούνται συνδυασμοί των παραπάνω στοιχείων όπως είναι:

- $\Delta/\Phi - A/Z$, ώστε όταν βρίσκεται ανοικτός ο Δ/Φ να μπορεί να απομονώσει ο A/Z . Αντίστροφα, όταν ο A/Z κλείσει να ακολουθήσει και ο Δ/Φ .
- $A/Z - \Delta/I$, ώστε με το άνοιγμα των επαφών του Δ/I και την ενδεχόμενη δημιουργία τόξου να εξασφαλίζεται βέβαιη απομόνωση του κυκλώματος μέσω του A/Z .
- $\Delta/\Phi - \text{ΑΣΦ}$, ώστε με τον Δ/Φ να υπάρχει δυνατότητα χειρισμών, αλλά και προστασία έναντι βραχυκυκλώματος μέσω των ΑΣΦ.

2.3: Δίκτυο Μέσης Τάσης (ΜΤ)

2.3.1: Δομή του δικτύου Μέσης Τάσης

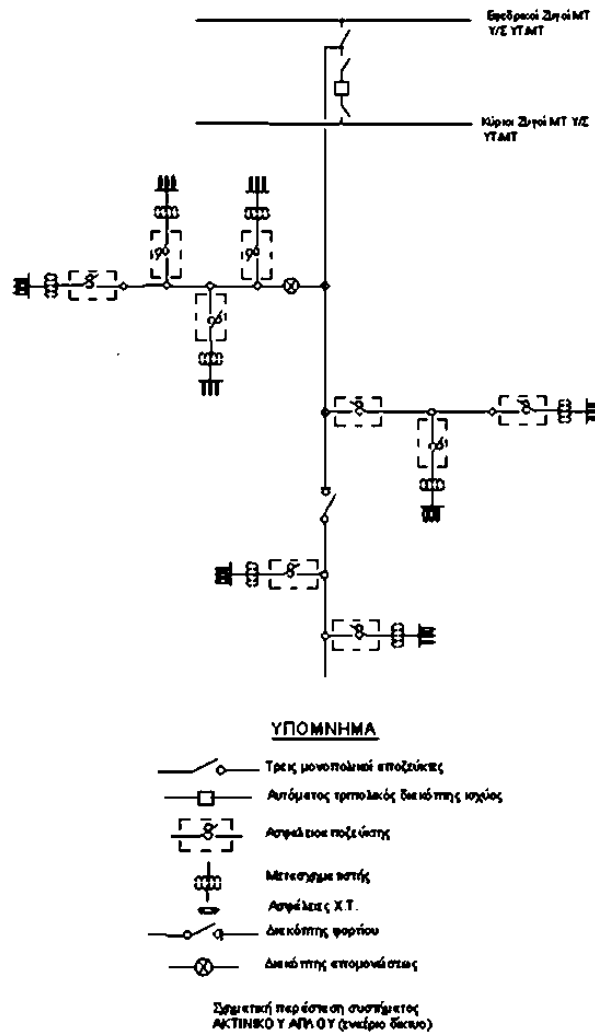
Το δίκτυο ΜΤ περιλαμβάνει τις πύλες αναχωρήσεων ΜΤ στους υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ, τις γραμμές ΜΤ καθώς και τον εξοπλισμό που αφορά στη λειτουργία και τον έλεγχο τους (Διακόπτες Αυτόματης Επαναφοράς, Διακόπτες Απομόνωσης, Ασφαλειοαποζεύκτες, πυκνωτές ΜΤ, ρυθμιστές τάσης κλπ.), τα υποβρύχια καλώδια ΜΤ και τον εξοπλισμό ζεύξης τους καθώς και τους υποσταθμούς Διανομής ΜΤ/ΧΤ.

Η δομή του ελληνικού δικτύου ΜΤ μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως εξής:

- ακτινικό δίκτυο (κυρίως σε νησιά και δυσπρόσιτα σημεία)
- βροχοειδές δίκτυο
- δίκτυο αραχνοειδούς δομής (αστικό δίκτυο κυρίως στην Αττική)

Το ακτινικό δίκτυο εφαρμόζεται κυρίως στα εναέρια δίκτυα και αποτελείται από μία κεντρική γραμμή, τον “κορμό”, που κατασκευάζεται από αγωγούς μεγάλης διατομής και τις διακλαδώσεις, οι οποίες συνδέονται συνήθως με τον υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ. Οι διακλαδώσεις κατασκευάζονται με αγωγούς μικρότερης διατομής από ότι ο κορμός, αφού σε αυτές μεταφέρεται μικρότερη ισχύ από ότι στον κορμό.

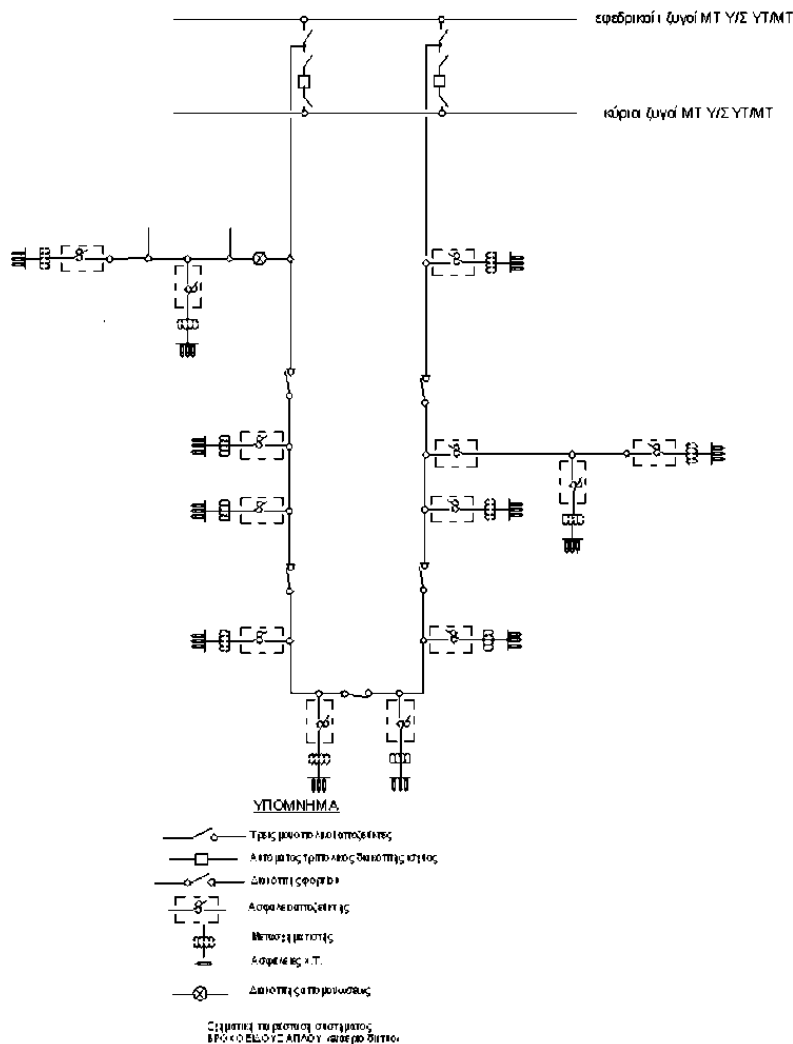
Η τροφοδότηση της γραμμής του κορμού στο ένα άκρο της, γίνεται από τους ζυγούς ΜΤ του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ μέσω ενός Δ/Ι εξοπλισμένου με τις κατάλληλες προστασίες, ενώ στο άλλο άκρο της μπορεί να διασυνδέεται μετά από χειρισμό με άλλη γραμμή του ίδιου ή και άλλου υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ. Κατά μήκος του κορμού μπορούν να εγκαθίστανται όλα τα είδη των διακοπών. Ειδικότερα οι Α/Ζ και οι Δ/Φ εγκαθίστανται ώστε ο κορμός να απομονώνεται κατά τμήματα ενώ τα υπόλοιπα τμήματα να τροφοδοτούνται κανονικά. (Εικόνα 2.1):



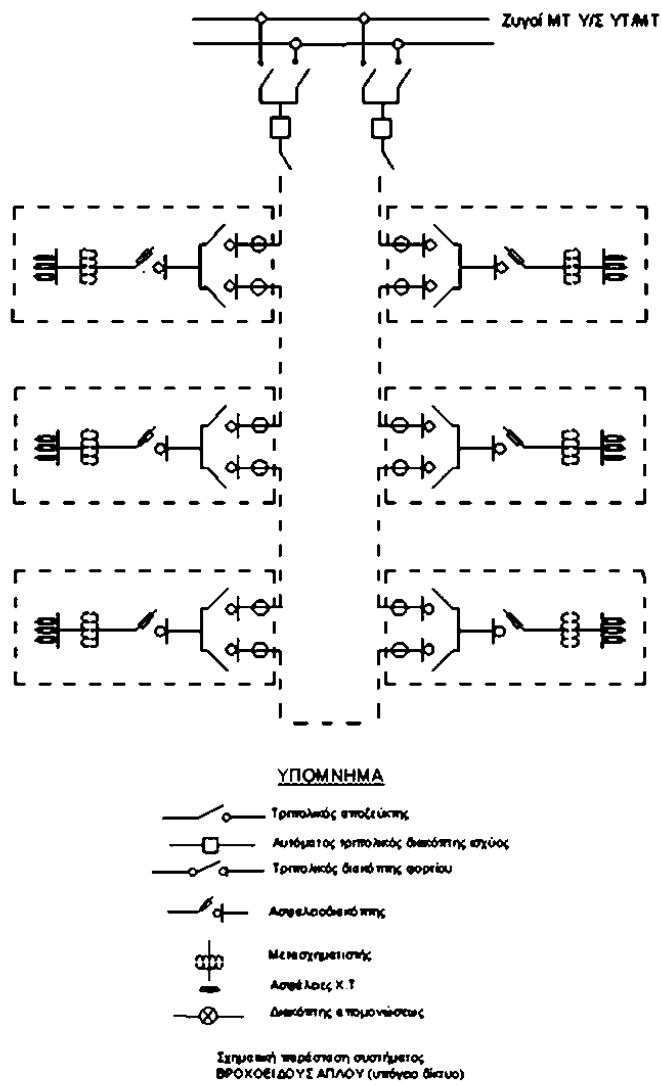
Εικόνα 2.1 :Ακτινικό απλό εναέριο δίκτυο ΜΤ. [8]

Στα υπόγεια δίκτυα MT η δυσκολία εύρεσης της βλάβης, αλλά και η δύσκολη και χρονοβόρα αποκατάσταση της, σε σχέση με τα εναέρια, οδήγησε σε δίκτυα με πιο σύνθετες τοπολογίες από την ακτινική. Σε αυτές τις τοπολογίες ακολουθείται ο κανόνας να υπάρχει δυνατότητα, μετά από βλάβη, να είναι δυνατή η επανατροφοδότηση των υποσταθμών MT/ΧΤ από άλλη οδό, μετά την εκτέλεση ορισμένων χειρισμών ή και αυτόματα, χωρίς να προηγείται κατά ανάγκη επισκευή της βλάβης.

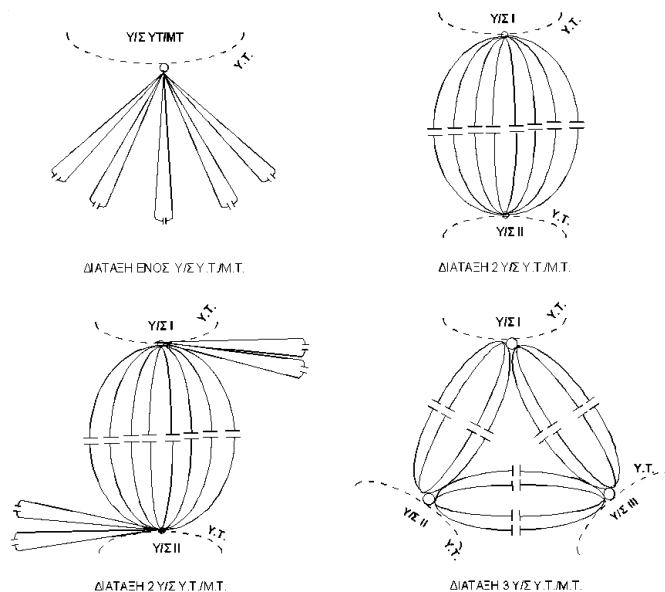
Τέτοια τοπολογία παρουσιάζεται στο βροχοειδές δίκτυο το οποίο είναι όμοιο με το ακτινικό με τη διαφορά ότι οι γραμμές του σχηματίζουν τμήματα βρόχου, που αρχίζουν και τελειώνουν στον ίδιο ή και σε διαφορετικό υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ. Στις Εικόνα 2.2 και Εικόνα 2.3 παρουσιάζονται το εναέριο και υπόγειο βροχοειδές δίκτυο αντίστοιχα. Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται η δομή του βροχοειδούς δικτύου με έναν, δύο ή τρεις Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ.



Εικόνα 2.2: Βροχοειδές απλό εναέριο δίκτυο MT. [8]



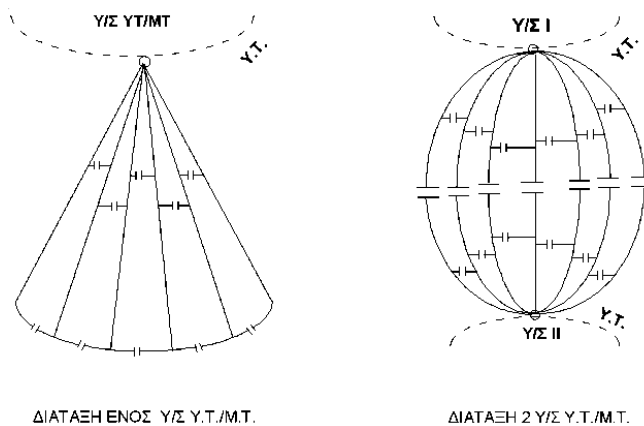
Εικόνα 2.3: Βροχειδές απλό υπόγειο δίκτυο ΜΤ. [8]



Εικόνα 2.4:Βροχοειδές σύστημα στη ΜΤ. [8]

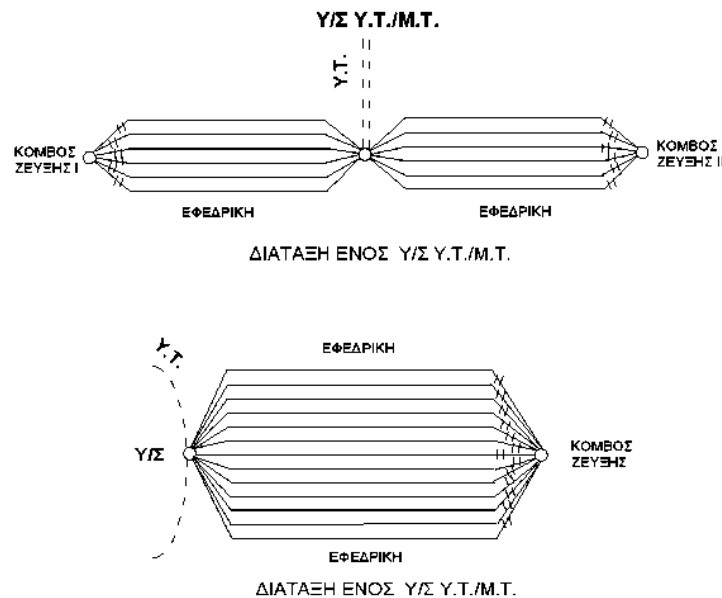
Κατά την λειτουργία ενός βροχοειδούς ΔΔ δεν ενδείκνυται ο παραλληλισμός των υποσταθμών τροφοδοσίας, δηλαδή η ταυτόχρονη τροφοδότηση μίας γραμμής από δύο ή περισσότερους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ. Έτσι, στα βροχοειδή σχήματα ένας από τους Δ/Φ εισόδου ή εξόδου σε έναν υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ πρέπει να παραμένει ανοικτός.[8]

Παρόμοια τοπολογία παρουσιάζει το αραχνοειδές δίκτυο το οποίο είναι στην ουσία βροχοειδές με τη διαφορά ότι οι συνεργαζόμενες γραμμές είναι τρεις και υπάρχουν πλευρικές συνδέσεις. Σε περίπτωση βλάβης μίας εκ των γραμμών, οι άλλες δύο αναλαμβάνουν την κάλυψη των φορτίων. Στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζεται η δομή του αραχνοειδούς δικτύου με έναν ή δύο υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ.



Εικόνα 2.5:Αραχνοειδές σύστημα στη ΜΤ. [8]

Τέλος, υπάρχει και το δίκτυο ατρακτοειδούς δομής (Εικόνα 2.6) όπου ομάδες γραμμών που αναχωρούν από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ απολήγουν σε έναν υποσταθμό ζεύξης. Ο αριθμός των γραμμών δεν πρέπει να υπερβαίνει τις έξι, αλλιώς μειώνεται η αξιοπιστία του δικτύου. Στα ατρακτοειδή σχήματα παραμένουν συχνά ανοιχτοί οι διακόπτες των ζυγών ΜΤ των υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ ή του υποσταθμού Ζεύξης για κάθε γραμμή. Σε περίπτωση σφάλματος σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής προκαλείται άνοιγμα του Δ/Ι που προστατεύει την γραμμή στην αναχώρησή της από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ. Στη συνέχεια αφού η θέση του σφάλματος εντοπιστεί, το αντίστοιχο τμήμα απομονώνεται, με το άνοιγμα των εκατέρωθεν Δ/Φ, και τα λουπά τμήματα επανατροφοδοτούνται.[8]



Εικόνα 2.6:Ατρακτοειδές σύστημα στη ΜΤ. [8]

2.3.2:Επίπεδα Τάσεων στο δίκτυο Μέσης Τάσης

Α. Διασυνδεδεμένο σύστημα

Το σύνολο των δικτύων ΜΤ της ηπειρωτικής χώρας λειτουργεί στα 20 kV, με μόνη εξαίρεση την Αττική όπου μαζί με το σύστημα των 20 kV εξακολουθεί να συνυπάρχει και το παλαιό σύστημα 22/6,6 kV.

Στα διασυνδεδεμένα με το ηπειρωτικό σύστημα νησιά το δίκτυο ΜΤ λειτουργεί επίσης στα 20 kV εκτός της πόλης της Κέρκυρας, όπου οι εργασίες αλλαγής τάσης από 15 kV σε 20 kV βρίσκονται σε εξέλιξη, και τα Κύθηρα, τα οποία τροφοδοτούνται από το ηπειρωτικό σύστημα μέσω υποβρύχιας διασύνδεσης στα 20 kV, η οποία όμως υποβιβάζεται με ΑΜΣ 20/15 kV στα 15 kV επί του νησιού.

B. Μη διασυνδεδεμένα νησιά

Στα νησιά η κατάσταση σήμερα έχει ως εξής:

Στη Κρήτη σημαντικό τμήμα του δικτύου ΜΤ λειτουργεί στα 20 kV (νομός Ρεθύμνου, Λασιθίου, εκτός της Σητείας, και μεγάλα τμήματα των νομών Ηρακλείου και Χανίων), ενώ στα 15 kV λειτουργούν τα δίκτυα της πόλης των Χανίων και το μεγαλύτερο τμήμα της πόλης Ηρακλείου.

Στη Ρόδο όλοι οι Υ/Σ λειτουργούν στα 15 kV, εκτός των Υ/Σ Αφάντου και Γενναδίου που λειτουργούν στα 20 kV. Παρότι δεν υπάρχει μέχρι σήμερα συγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα αναβάθμισης της τάσης στα 20 kV, θα πρέπει άμεσα να συνδυασθεί με την αναβάθμιση του συστήματος της Ρόδου από τα 66 kV στα 150 kV.

Τα δίκτυα των υπολοίπων μη διασυνδεδεμένων νησιών λειτουργούν στα 15 kV εκτός από την Κω και τη Λέσβο όπου το δίκτυο λειτουργεί στα 20 kV.

Τέλος, σε κάποια μικρά νησιά όπως η Αμοργός, η Ανάφη, η Δονούσα και το Αγαθονήσι υπάρχουν γραμμές ΜΤ 6,6 kV.

Γ. Δίκτυο Μέσης Τάσης Αττικής

Η ευρύτερη περιοχή της Αθήνας (λεκανοπέδιο Αθηνών) ηλεκτροδοτείται από δύο συστήματα διανομής μέσης τάσης που είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους: Το σύστημα 20 kV, το οποίο είναι το κυρίαρχο δίκτυο ΜΤ στο οποίο εντάσσονται όλες οι νέες γραμμές ΜΤ και υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ, καθώς και το παλιό σύστημα των 22/6,6 kV.

Το σύστημα 22/6,6 kV

Το σύστημα 22/6,6 kV είναι το πρώτο που εγκαταστάθηκε στο λεκανοπέδιο Αθηνών. Τροφοδοτείται από 6 Υ/Σ 150/22 kV (Ρουφ, Χαλκηδόνα, ΑΗΣ Αγ. Γεωργίου, Ν. Σμύρνη, Ψυχικό, Ελευθερία) συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1150 MVA.

Το δίκτυο 22 kV είναι ουσιαστικά ένα δίκτυο υπομεταφοράς, από το οποίο τροφοδοτούνται σήμερα 65 συνολικά Υ/Σ 22/6,6 kV στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας. Εκτός από τη λειτουργία του ως δίκτυο υπομεταφοράς, το σύστημα Υ/Σ 22/6,6 kV ηλεκτροδοτεί κατευθείαν από το δίκτυο 22 kV ορισμένους πελάτες ΜΤ και ορισμένους Υ/Σ Διανομής. Δηλαδή το σύστημα 22/6,6 kV τροφοδοτεί τρία είδη φορτίων: τους πελάτες ΜΤ στα 6,6 kV, τους Υ/Σ 22/0,4 kV και τους Υ/Σ 6,6/0,4 kV.

Το σύστημα 22/6,6 kV περιλαμβάνει παλιό εξοπλισμό, που απαιτεί αυξημένες δαπάνες συντήρησης, υπάρχει δυσκολία εύρεσης ανταλλακτικών και αρκετοί Υ/Σ είναι χαμηλά φορτισμένοι, ενώ προβλέπεται η σταδιακή κατάργησή του με μεταφορά των φορτίων του στο σύστημα των 20 kV .

2.3.3:Γραμμές διανομής και βασική τυποποίησή δικτύων Μέσης Τάσης

Στη ΜΤ, οι γραμμές διανομής είναι πάντοτε τριφασικές.Στα εναέρια δίκτυα ΜΤ χρησιμοποιούνται αγωγοί ACSR διατομής 95 mm² στους κορμούς και 35 mm² στις διακλαδώσεις, ενώ έχουν καταργηθεί οι

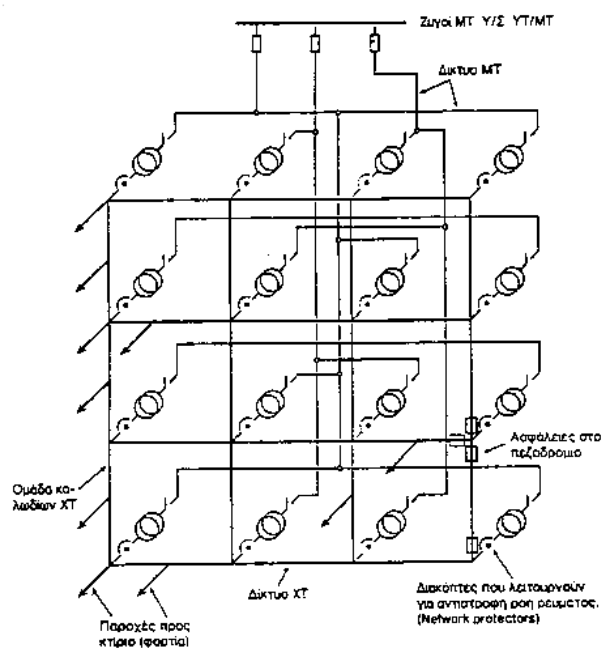
αγωγοί διατομής 16 mm². Στα υπόγεια δίκτυα MT εγκαθίστανται καλώδια XLPE αλουμινίου διατομής 3x240mm².

Τα τυποποιημένα μεγέθη των Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ είναι τα ακόλουθα: 50, 100, 160, 250, 400, 630 και 1000 kVA.

2.4:Δίκτυο Χαμηλής Τάσης (ΧΤ)

2.4.1:Δομή του δικτύου Χαμηλής Τάσης

Στην πλειοψηφία τους τα ΔΔ ΧΤ, τόσο τα εναέρια όσο και τα υπόγεια καλωδιακά, λειτουργούν ακτινικά. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές, που συναντώνται τα κλειστά δίκτυα λειτουργίας. Τα κλειστά δίκτυα λειτουργίας είναι κυρίως υπόγεια και έρχονται να καλύψουν την απαίτηση του πολύ υψηλού βαθμού συνέχειας στην τροφοδότηση των καταναλωτών, όπως συμβαίνει στις μεγαλουπόλεις. Αυτά τα δίκτυα είναι ουσιαστικά δικτυωτά πλέγματα ΧΤ (Εικόνα 2.7)



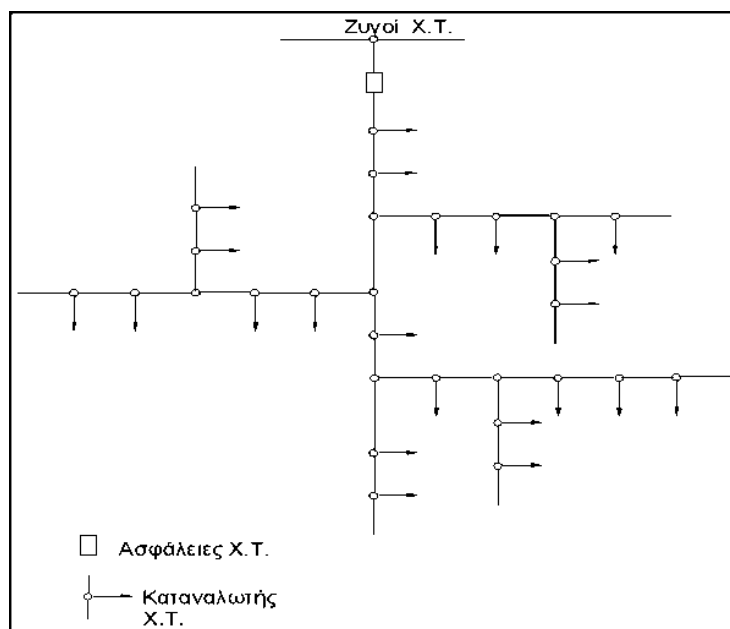
Εικόνα 2.7:Σχηματική διάταξη κλειστού δικτύου ΧΤ. [7]

Στο κλειστό δίκτυο πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα όσον αφορά την προστασία έναντι σφαλμάτων που συμβαίνουν στη γραμμή ΜΤ, όσο και στο ίδιο το δίκτυο. Στην περίπτωση που συμβεί σφάλμα (βραχυκύκλωμα) σε μία γραμμή ΜΤ προκαλείται αυτόματα άνοιγμα των Δ/Ι ΧΤ των υποσταθμών ΜΤ/ΧΤ, ώστε να αποφευχθεί η αντιστροφή ροή ρεύματος στους υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ και ουσιαστικά η ανακύκλωση του βραχυκυκλώματος. Η τροφοδοσία βέβαια δεν χρειάζεται να διακοπεί, εφόσον οι υπόλοιπες γραμμές ΜΤ επαρκούν και εφόσον η νέα διαμόρφωση του δικτύου που θα προκύψει δεν επιτρέπει την ύπαρξη τοπικών υπερφορτίσεων. Η προστασία στη ΧΤ γίνεται μέσω ΑΣΦ, οι οποίες απομονώνουν τη γραμμή ΧΤ που έγινε το σφάλμα. Τα κλειστά δίκτυα έχουν γενικά τις

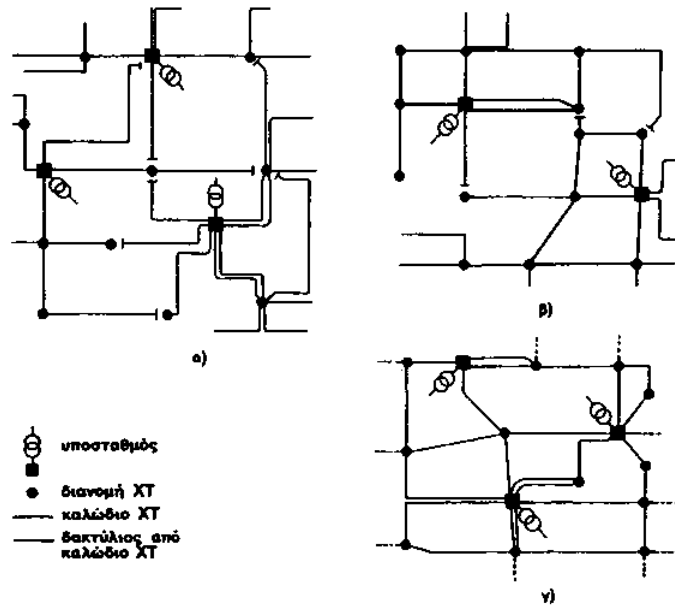
λιγότερες απώλειες, αλλά απαιτούν πολύ στενή παρακολούθηση της ανακατανομής φορτίων με το χρόνο.

Η ακτινική λειτουργία των ΔΔ ΧΤ, υλοποιείται σε διάφορες τοπολογίες. Πρώτα στα εναέρια δίκτυα των οποίων η τοπολογία περιγράφεται από το ακτινικό σχήμα (Εικόνα 2.8) και κατόπιν στα υπόγεια καλωδιακά δίκτυα. Τα βασικά σχήματα που περιγράφουν τις τοπολογίες των υπόγειων ΔΔ ΧΤ είναι:

- Το ακτινικό (Εικόνα 2.9α,2.10), στο οποίο μπορεί να χρησιμοποιούνται καλώδια πολλών διατομών, ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί φόρτισης και πτώσης τάσης. Το ακτινικό δίκτυο έχει την απλούστερη και φθηνότερη κατασκευή και αποτελείται από δίκτυα και υποδίκτυα σε μορφή δέντρου. Στο ακτινικό δίκτυο κάθε καταναλωτής έχει μόνο μία παροχή ισχύος, χωρίς όμως την ύπαρξη εφεδρείας. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι σε περιόδους αιχμής, μπορεί να παρουσιαστεί μεγάλη πτώση τάσης.
- Το δακτυλιοειδές (Εικόνα 2.9β), στο οποίο οι γραμμές ξεκινούν από έναν υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ και αποτελούν τμήματα δακτυλίων, για λόγους αύξησης της εφεδρείας και μείωσης της πτώσης τάσης. Η επιμέρους τροφοδότηση των καταναλωτών γίνεται ακτινικά με καλώδια προερχόμενα από τους δακτυλίους, μικρότερης διατομής ή και ίδιας για λόγους ομοιομορφίας. Στο δακτυλιοειδές δίκτυο, ακόμα και σε περίπτωση σφάλματος σε μία γραμμή, δεν σταματά η παροχή ισχύος προς τον καταναλωτή.
- Το διασυνδεδεμένο (Εικόνα 2.9γ), στο οποίο ενώνονται όλοι οι υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ μεταξύ τους. Το δίκτυο διαμορφώνεται ώστε να υπάρχει δυνατότητα διπλής τροφοδότησης μετά από χειρισμούς λόγω της ύπαρξης βρόχων. Η αυξημένη εφεδρεία και η διατήρηση μικρής πτώσης τάσης στα καλώδια είναι τα κύρια πλεονεκτήματα του.



Εικόνα 2.8 Ακτινικό σύστημα στη ΧΤ (εναέρια δίκτυα).[8]



Εικόνα 2.9 Υπόγεια καλωδιακά δίκτυα XT ακτινικής λειτουργίας. [8]

Το διασυνδεδεμένο δίκτυο προσφέρει το μεγαλύτερο βαθμό εξυπηρέτησης από τα άλλα δύο σχήματα, το οποίο όμως οδηγεί σε μεγαλύτερη δαπάνη κατασκευής, λόγω αυξημένης πολυπλοκότητας. Ένα άλλο πλεονέκτημα του διασυνδεδεμένου δικτύου είναι η δυνατότητα επέκτασής του, κάτι που το κάνει να βρίσκει εφαρμογές σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα φορτίου. Το δακτυλιοειδές από άποψη εξυπηρέτησης και κατασκευής βρίσκεται μεταξύ των άλλων δύο σχημάτων.

2.4.2:Γραμμές διανομής Χαμηλής Τάσης

Στα περισσότερα είδη Δικτύων Διανομής XT οι γραμμές είναι τριφασικές (με ουδέτερο)(400V), με εξαίρεση περιπτώσεις εναέριων δικτύων που μπορεί να υπάρξουν μονοφασικές γραμμές (μία φάση και ουδέτερος)(240V).

Τα διαθέσιμα είδη εναέριων γραμμών των δικτύων XT είναι:

- συνεστραμμένα καλώδια διατομής $3 \times 70 \text{ mm}^2 \text{ Al} + 54,6 \text{ mm}^2 \text{ AAAC}$ καθώς και συνεστραμμένα καλώδια διατομής $4 \times 120 \text{ mm}^2 \text{ Al}$
- αγωγοί Al διατομής $4 \times 50 \text{ mm}^2, 4 \times 35 \text{ mm}^2$ και $4 \times 16 \text{ mm}^2$

ενώ στα υπόγεια δίκτυα XT χρησιμοποιείται καλώδιο διατομής $3 \times 150 \text{ mm}^2 \text{ Al} + 50 \text{ mm}^2 \text{ Cu XLPE}$.

Όπως προαναφέρθηκε, το κόστος των εναέριων δικτύων XT με καλώδια δεν υπερτερεί των γυμνών αγωγών, ενώ τα πρώτα έχουν μικρότερη δαπάνη εγκατάστασης, αφού μπορούν να στηριχθούν και σε προσόψεις κτιρίων. Οι λόγοι αυτοί έχουν οδηγήσει στην επικράτηση των συνεστραμμένων καλωδίων στα νέα εναέρια δίκτυα XT.[7],[11]

2.5:Είδη ζυγών συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ορίζονται τρία είδη ζυγών:

- οι **ζυγοί φορτίου**(PQ buses), όπου είναι γνωστή η ενεργός και άεργος ισχύς φορτίου και άγνωστη η τάση
- οι **ζυγοί παραγωγής**(PV buses) όπου είναι γνωστή η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης και άγνωστη η άεργος ισχύς και η γωνία της τάσης
- ο **ζυγός ταλάντωσης ή ζυγός αναφοράς**(slack bus) ο οποίος είναι ουσιαστικά ζυγός παραγωγής χρησιμεύει για να αντισταθμίζει τις - άγνωστες αρχικά - απώλειες του δικτύου και για την άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Σ' αυτόν το ζυγό επιβάλλεται σταθερή κατά μέτρο και γωνία τάση. [9]

Στα δίκτυα ΧΤ που εξετάζονται στην διπλωματική εργασία ,διακρίνονται ο ζυγός αναφοράς που αποτελεί τον ζυγό του Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ καθώς και ζυγοί φορτίου.

2.6:Τοπολογία δικτύων ΧΤ που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση

Όπως προαναφέρθηκε,στα δίκτυα διανομής ΧΤ συναντάται κυρίως ακτινική τοπολογία.Έτσι,και τα δίκτυα που εξετάζονται ακολούθως,θεωρούνται ακτινικά.Η ακτινική τοπολογία δικτύου είναι η απλούστερη,διότι περιλαμβάνει μια σειρά από δίκτυα και υποδίκτυα που είναι οργανωμένα σαν ακτινικά δέντρα. Έτσι, είναι δυνατή η αναπαράστασή τους από ένα δέντρο.Ένα δέντρο αποτελεί στην ουσία έναν μη κατευθυνόμενο γράφο χωρίς βρόχους,και μπορεί να χωριστεί σε τμήματα, ρίζας (*Root*), Φύλλων (*Leaves*) και γονέων (*Parents*)/ενδιάμεσων κόμβων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία,η ρίζα θα αποτελεί τον ζυγό του εκάστοτε υποσταθμού ΜΤ/ΧΤ ή αλλιώς τον ζυγό αναφοράς του δικτύου,ενώ τα φύλλα αποτελούν τους ζυγούς φορτίου του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό με την χρήση μιας απλής δομής δεδομένων ή μέσω ενός πίνακα γειννιάσης (*connectivity matrix*) μπορεί να απεικονιστεί πλήρως το δίκτυο[24].

[7] [8] [9] [10] [11] [24]

Κεφάλαιο 3:Ανάλυση ευαισθησίας Δικτύων Διανομής

3.1:Ορισμός ευαισθησίας σε ένα σύστημα

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι η μελέτη του πώς αντιδρά ένα συγκεκριμένο σύστημα σε μια μεταβολή των εισόδων του.Πιο συγκεκριμένα,είναι μια τεχνική ανάλυσης των επιδράσεων που έχει η μεταβολή συστηματικά μεταβαλλόμενων μεταβλητών εισόδου ενός μοντέλου στην εξοδό του.Χάρη στην ανοχή στις τιμές των παθητικών στοιχείων,όπως αντιστάσεις,πυκνωτές,πηνία,καθώς και σε επίπεδα αναφοράς τάσεων και ρευμάτων,η ανάλυση ευαισθησίας είναι μια χρήσιμη τεχνική στην ανάλυση ροής ισχύος σε δίκτυα διανομής.Βοηθά στον προσδιορισμό της επίδρασης κάθε μεταβολής εισόδου εντός ορίου ανοχής στο σύστημα και στο αποτέλεσμα που έχει στη συνολική λειτουργία του μοντέλου.

3.2:Κλασική θεωρία ευαισθησίας σε δίκτυα διανομής και προσέγγιση ευαισθησίας για δεδομένη τοπολογία δικτύου

3.2.1:Εισαγωγή

Η κλασική θεωρία ευαισθησίας που χρησιμοποιείται στην ανάλυση δικτύων υψηλής τάσης για την εφαρμογή πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ρύθμισης τάσης βασίζεται στον πίνακα Jacobian και φανερώνει τις σχέσεις μεταξύ των τάσεων των κόμβων(πλάτος και γωνία) και των εγχύσεων ισχύος(ενεργού και αέργου).Οι σχέσεις που αναφέρονται παραπάνω αναπαρίστανται από την ακόλουθη έκφραση πινάκων:

$$\begin{bmatrix} [\Delta E] \\ [\Delta \theta] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial V} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [1] & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P^*] \\ [\Delta Q^*] \end{bmatrix} \quad (3.2.1)$$

όπου τα $[\Delta E]$ και $[\Delta \theta]$ είναι αντίστοιχα,οι πίνακες των μέτρων των τάσεων στους κόμβους (σε ενεργό τιμή) και των μεταβολών στη φάση τους που αντιστοιχούν στις εγχύσεις ενεργού ή αέργου ισχύος στους κόμβους, που εκφράζονται σε μητρική μορφή $[\Delta P^*]$ και $[\Delta Q^*]$.Ο πίνακας $I = \begin{bmatrix} [1] & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix}$ είναι ο μοναδιαίος πίνακας.

Η εξίσωση (3.2.1) μπορεί να ξαναγραφτεί ως εξής:

$$\begin{bmatrix} [\Delta E] \\ [\Delta \theta] \end{bmatrix} = [s] \begin{bmatrix} [\Delta P^*] \\ [\Delta Q^*] \end{bmatrix} \quad (3.2.2)$$

όπου :

$$[s] = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial V} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [1] & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \quad (3.2.3)$$

είναι ο πίνακας Ευαισθησίας.

3.2.2: Αναλυτική περιγραφή κλασικής θεωρίας ευαισθησίας

Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα ευαισθησίας λαμβάνονται από τον αντίστροφο του πίνακα Jacobian που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τάσεων των ζυγών του δικτύου με τη μέθοδο ροής φορτίου Newton-Raphson. Η μέθοδος Newton-Raphson είναι μια επαναληπτική μέθοδος προσέγγισης ροής φορτίου, στην οποία οι τάσεις των ζυγών παίρνουν κάποιες αρχικές τιμές και μεταβάλλονται επαναλαμβανόμενα μέχρι η μεταβολή στις μετρούμενες τιμές της τάσης να είναι μικρότερη από μια προκαθορισμένη τάση κατωφλίου. Η επαναληπτική αυτή μέθοδος περιγράφεται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \vdots \\ \Delta\theta_n \\ \frac{\Delta|E_2|}{|E_2|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta|E_n|}{|E_n|} \end{bmatrix} = [J^{-1}] \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (3.2.4)$$

όπου $\Delta\theta_i$: η απόλυτη τιμή της μεταβολής της φάσης στον ζυγό i

$\frac{\Delta|E_i|}{|E_i|}$: η απόλυτη τιμή της Εκατοστιαίας Πτώσης Τάσης στον ζυγό i

$[J^{-1}]$: ο αντίστροφος του πίνακα Jacobian

Σε συμβατικές εφαρμογές ροής ισχύος, οι μεταβολές ισχύος ΔP_j και ΔQ_j δίνονται από τις διαφορές μεταξύ της εγχυόμενης στον ζυγό j ισχύος και των τιμών που υπολογίζονται βάσει των μετρημένων τιμών των τάσεων στην τελευταία επανάληψη και της μήτρας αγωγιμότητας Y . Επίσης, ορίζεται ένας ζυγός αναφοράς η τάση του οποίου ορίζεται σε μια προκαθορισμένη τιμή. Στην περίπτωση ενός δικτύου Μέσης Τάσης ο ζυγός αυτός είναι ο ζυγός του μετασχηματιστή που βρίσκεται στην πλευρά Μέσης Τάσης.

Μόλις η μέθοδος επίλυσης ροής φορτίου συγκλίνει, ο πίνακας Jacobian προσδιορίζει τις μερικές παραγώγους των P_j , Q_j ως προς το μέτρο της τάσης $|E_i|$ και ως προς τη φάση θ_i , σε συνάρτηση με την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Μια έκφραση του πίνακα Jacobian είναι η εξής:

$$[J] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_n} & |E_2| \frac{\partial P_2}{\partial |E_2|} & \dots & |E_n| \frac{\partial P_2}{\partial |E_n|} \\ \vdots & J_{11} & \vdots & \vdots & J_{12} & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & |E_2| \frac{\partial P_n}{\partial |E_2|} & \dots & |E_n| \frac{\partial P_n}{\partial |E_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_n} & |E_2| \frac{\partial Q_2}{\partial |E_2|} & \dots & |E_n| \frac{\partial Q_2}{\partial |E_n|} \\ \vdots & J_{21} & \vdots & \vdots & J_{22} & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & |E_2| \frac{\partial Q_n}{\partial |E_2|} & \dots & |E_n| \frac{\partial Q_n}{\partial |E_n|} \end{array} \right] \quad (3.2.5)$$

Από τις σχέσεις (3.2.4),(3.2.5) προκύπτει ότι η μεταβολή του μέτρου της τάσης στο ζυγό i είναι:

$$\Delta |E_i| \approx \sum_j \left(\frac{\partial |E_i|}{\partial P_j} \Delta P_j + \frac{\partial |E_i|}{\partial Q_j} \Delta Q_j \right) \quad (3.2.6)$$

όπου ΔP_j και ΔQ_j είναι οι μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος στον κόμβο j , και οι όροι $\partial |E_i| / \partial P_j$, $\partial |E_i| / \partial Q_j$ δείχνουν πώς μεταβάλλεται η τάση στον ζυγό i λόγω μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος στον κόμβο j . Οι όροι αυτοί ονομάζονται όροι ευαισθησίας.

Από τη ροή φορτίου λαμβάνεται ο πίνακας Jacobian, κι έπειτα υπολογίζεται ο αντίστροφός του:

$$[J^{-1}] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \frac{\partial \theta_2}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial \theta_n}{\partial P_2} & \frac{\partial \theta_2}{\partial Q_2} & \dots & \frac{\partial \theta_n}{\partial Q_2} \\ \vdots & J'_{11} & \vdots & \vdots & J'_{21} & \vdots \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial P_n} & \dots & \frac{\partial \theta_n}{\partial P_n} & \frac{\partial \theta_2}{\partial Q_n} & \dots & \frac{\partial \theta_n}{\partial Q_n} \\ \hline \frac{1}{|E_2|} \frac{\partial |E_2|}{\partial P_2} & \dots & \frac{1}{|E_n|} \frac{\partial |E_n|}{\partial P_2} & \frac{1}{|E_2|} \frac{\partial |E_2|}{\partial Q_2} & \dots & \frac{1}{|E_n|} \frac{\partial |E_n|}{\partial Q_2} \\ \vdots & J'_{12} & \vdots & \vdots & J'_{22} & \vdots \\ \frac{1}{|E_2|} \frac{\partial |E_2|}{\partial P_n} & \dots & \frac{1}{|E_n|} \frac{\partial |E_n|}{\partial P_n} & \frac{1}{|E_2|} \frac{\partial |E_2|}{\partial Q_n} & \dots & \frac{1}{|E_n|} \frac{\partial |E_n|}{\partial Q_n} \end{array} \right] \quad (3.2.7)$$

Για ακτινικά δίκτυα, χρειάζεται μόνο το μέτρο της τάσης για τον έλεγχο των τάσεων στους κόμβους. Επομένως, για ακτινικά δίκτυα, ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος, για όλους τους κόμβους του δικτύου, θα προκύπτει από τη ροή φορτίου ως εξής:

$$[s_{P-all}] = [J'_{12}] \begin{bmatrix} |E_2| \\ \vdots \\ |E_n| \end{bmatrix} \quad (3.2.8)$$

ενώ ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος θα είναι ίσος με:

$$[s_{Q-all}] = [J'_{22}] \begin{bmatrix} |E_2| \\ \vdots \\ |E_n| \end{bmatrix} \quad (3.2.9)$$

Έστω ότι οι κόμβοι του δικτύου, πλην του ζυγού αναφοράς, ανήκουν στο σύνολο $nodes = \{2, \dots, n\}$. Έστω το σύνολο των ζυγών φορτίου $loads$, για το οποίο προφανώς ισχύει ότι: $loads \subset nodes$. Τότε,

ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος, που αντιστοιχεί στους ζυγούς φορτίου, θα είναι:

$$[s_{P-Jac}] = [s_{P-all}(loads, loads)] \quad (3.2.10)$$

ενώ ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος, που αντιστοιχεί στους ζυγούς φορτίου, θα είναι ίσος με:

$$[s_{Q-Jac}] = [s_{Q-all}(loads, loads)] \quad (3.2.11)$$

Δηλαδή και στις δύο περιπτώσεις λαμβάνονται από τις (3.2.8), (3.2.9) μόνον οι γραμμές και στήλες που αντιστοιχούν στους ζυγούς φορτίου.

Πλέον, η σχέση (3.2.6) γράφεται σε μητρική μορφή για όλους τους ζυγούς φορτίου ($\forall i \in loads$):

$$[\Delta E] \approx [s_{P-Jac}][\Delta P] + [s_{Q-Jac}][\Delta Q] \quad (3.2.12)$$

Στην ουσία, ο πίνακας Jacobian αποτελεί ένα χαρακτηριστικό του δικτύου, καθώς μέσα από αυτόν εκφράζεται η ροή φορτίου του. Ωστόσο, παρόλο που η μέθοδος που περιγράφεται παραπάνω είναι γενικά έγκυρη, η υπολογιστική της πολυπλοκότητα είναι πολύ υψηλή για πρακτική ανάλυση τάσης σε Δίκτυα Διανομής, καθώς θα πρέπει να πραγματοποιούνται υπολογισμοί ροής φορτίου για κάθε μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας. Επιπλέον, η σχετικά υψηλή αναλογία R/X στα Δίκτυα Διανομής Χαμηλής Τάσης καθιστά τη μέθοδο Newton-Raphson λιγότερο κατάλληλη για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου. Ακόμη, είναι πιθανό σε ορισμένες περιπτώσεις η μέθοδος Newton-Raphson να μην συγκλίνει, με αποτέλεσμα να μην προκύπτει ο πίνακας Jacobian, και να χρησιμοποιούνται διαφορετικές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος ροής φορτίου από τη Newton-Raphson. Τέλος, στα ακτινικά δίκτυα, απαιτούνται μόνο τα πλάτη των τάσεων για τον έλεγχο της τάσης στους κόμβους. Για τους λόγους αυτούς, η θεωρία που παρουσιάζεται ακολούθως, όταν είναι δεδομένη η τοπολογία του δικτύου, είναι καταλληλότερη για ακτινικά Δίκτυα Διανομής [12], [13], [14], [15], [18].

3.2.3: Υπολογισμός πίνακα Jacobian και πίνακα ευαισθησίας μέσω Jacobian από το MATPOWER

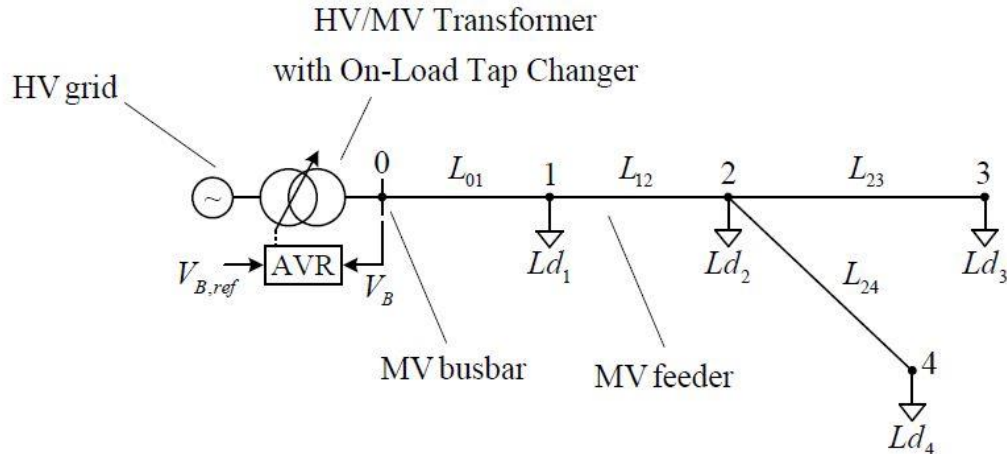
```
J = makeJac(mpc)

[J, Ybus, Yf, Yt] = makejac(mpc)
```

Η συνάρτηση *makeJac* σχηματίζει τον πίνακα Jacobian της ροής ισχύος, και κατ'επιλογήν, τις μήτρες αγωγιμότητας του συστήματος. Η αρίθμηση των ζυγών πρέπει να είναι διαδοχική ξεκινώντας από το 1 (εσωτερική αρίθμηση). Έτσι, μόλις λαμβάνεται ο πίνακας Jacobian, υπολογίζεται ο αντίστροφός του και ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 3.2.2, προκύπτουν οι πίνακες ευαισθησίας λόγω ενεργού και αέργου ισχύος των σχέσεων (3.2.10) και (3.2.11) αντίστοιχα [16].

3.3:Θεωρία ανάλυσης ευαισθησίας με δεδομένη την τοπολογία του δικτύου διανομής

Έστω το δίκτυο της Εικόνας 3.1,που είναι ένα μονοφασικό Δίκτυο Διανομής Μέσης Τάσης 4 κόμβων:



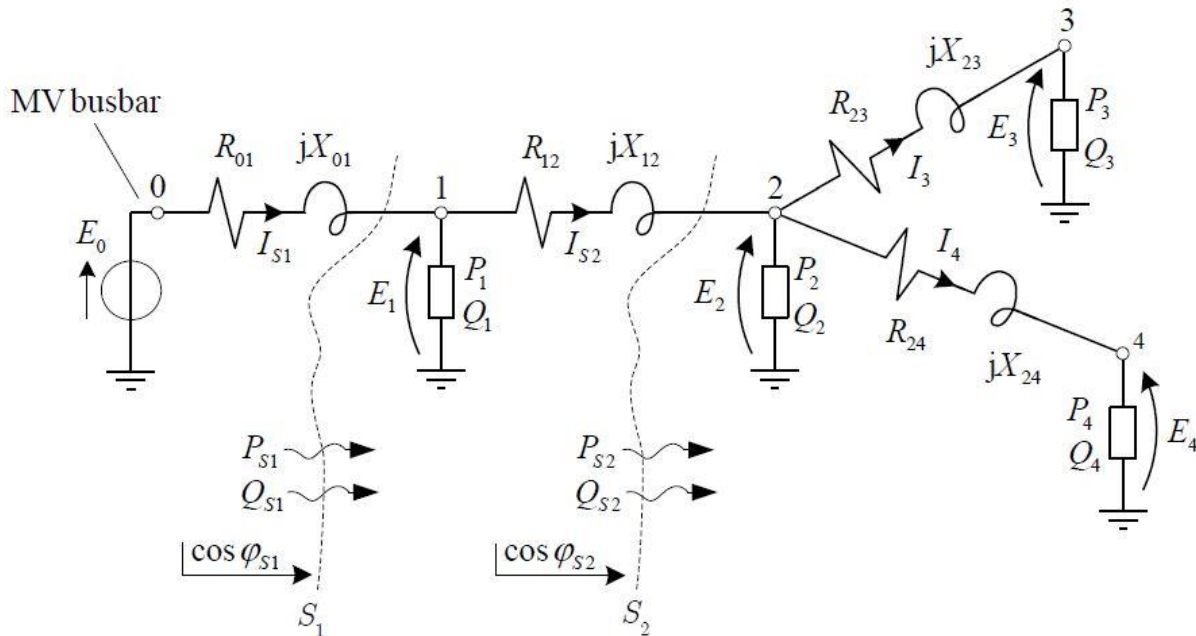
Εικόνα 3.1:Το δοκιμαστικό Δίκτυο Διανομής ΜΤ 4 κόμβων[17]

Ο μετασχηματιστής ΥΤ/ΜΤ του πρωτεύοντος υποσταθμού είναι εξοπλισμένος με ένα Σύστημα Αλλαγής Τάσεως Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) (on-load tap changer-OLTC) που οδηγείται από τον Αυτόματο Ρυθμιστή Τάσης (Automatic Voltage Regulator-AVR).Αυτό το σύστημα επιτρέπει τη ρύθμιση τάσης κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς Μέσης Τάσης,και θέτει ένα σημείο αναφοράς τάσης στον ζυγό αναφοράς.

Τα γενικά φορτία L_{d1}, \dots, L_{d4} αναπαριστώνται χρησιμοποιώντας PQ μοντέλα.Θετική ενεργός (ή άεργος) ισχύς αντιστοιχεί σε απορροφώμενη ισχύ από τα φορτία.Αρνητική ενεργός (ή άεργος) ισχύς αντιστοιχεί σε εγχυόμενη στο δίκτυο ισχύ(σε αυτή την περίπτωση,το γενικό φορτίο είναι στην πραγματικότητα μια γεννήτρια).Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στην Εικόνα 3. 2.

Οι γραμμές L_{o1}, \dots, L_{o4} αναπαρίστανται χρησιμοποιώντας το RL ισοδύναμο κύκλωμα ευθείας ακολουθίας,αλλά οι εγκάρσιες αγωγιμότητες αμελούνται(όπως εξηγείται παρακάτω).Ο κόμβος 0 αναπαριστά τον ζυγό αναφοράς Μέσης Τάσης,ο οποίος είναι ταυτόχρονα και ο ζυγός του μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ,και ρυθμίζεται σε μία σταθερή τιμή τάσης E_o από τον Αυτόματο Ρυθμιστή Τάσης(Automatic Voltage Regulator-AVR) του επαγωγέα ρύθμισης τάσης(on-load tap changer-OLTC).Αυτή η τάση συμπίπτει με την ονομαστική φασική τάση: $E_o = E_n = \frac{V_n}{\sqrt{3}} = 1 pu$.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι,σε σταθερή κατάσταση,η συνθήκη αυτή,ότι δηλαδή η τάση στον ζυγό αναφοράς παραμένει ίση με την ονομαστική,οδηγεί σε απόζευξη μεταξύ των διαφορετικών αναχωρήσεων γραμμών από τον ζυγό αναφοράς.Ως αποτέλεσμα,κάθε αναχώρηση λειτουργεί χωρίς την επίδραση από άλλες γραμμές.Έτσι,τα φορτία και οι γεννήτριες που είναι συνδεδεμένα σε άλλες αναχωρήσεις γραμμών,δεν επηρεάζουν τα προφίλ τάσης της γραμμής που εξετάζεται.[13]



Εικόνα 3.2:Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα[17]

Επειδή ο ζυγός αναφοράς είναι ρυθμισμένος στην τάση E_0 , ο γενικός κόμβος i μπορεί να χαρακτηριστεί χρησιμοποιώντας τη διαφορά V_{0i} , που είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ του μέτρου της τάσης στον ζυγό αναφοράς και της τάσης στον κόμβο i , E_i :

$$V_{0i} = E_0 - E_i \quad (3.3.1)$$

Στα ακτινικά δίκτυα, η (2.3.1) μπορεί να υπολογιστεί ως το άθροισμα των διαφορών δυναμικού μεταξύ γειτονικών κόμβων από τον i -οστό κόμβο προς τον ζυγό αναφοράς ΜΤ. Για παράδειγμα, εάν $i = 3$ (βλ. Εικόνα 2.3-2) η (2.3.1) γίνεται:

$$V_{03} = E_0 - E_3 \quad (3.3.2)$$

Προσθαφαιρώντας τις τάσεις E_1 και E_2 στη σχέση (2.3.2) προκύπτει:

$$V_{03} = (E_0 - E_1) + (E_1 - E_2) + (E_2 - E_3) = V_{01} + V_{12} + V_{23} \quad (3.3.3)$$

όπου V_{03} είναι το άθροισμα των διαφορών δυναμικού: V_{01} , V_{12} , V_{23} .

Η τάση V_{23} μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψιν τις παραμέτρους δικτύου και τη ροή ισχύος στη γραμμή ως εξής:

$$V_{23} = E_2 - E_3 = R_{23}I_3 \cos\varphi_3 + X_{23}I_3 \sin\varphi_3 = \frac{R_{23}E_3 I_3 \cos\varphi_3 + X_{23}E_3 I_3 \sin\varphi_3}{E_3} \leftrightarrow$$

$$V_{23} = \frac{R_{23}P_3 + X_{23}Q_3}{E_3} \quad (3.3.4)$$

όπου $\cos\varphi_3, P_3, Q_3$ είναι ο συντελεστής ισχύος, η ενεργός και άεργος ισχύς, αντίστοιχα, του φορτίου $Ld3$. Τα I_3, R_{23}, X_{23} είναι το ρεύμα, η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση της γραμμής $L3$. Φυσιολογικά, οι τάσεις των κόμβων είναι κοντά στην ονομαστική φασική τάση E_n . Εφαρμόζοντας αυτή την υπόθεση στην (2.3.4) :

$$V_{23} \cong \frac{R_{23}P_3 + X_{23}Q_3}{E_n} \quad (3.3.5)$$

Ομοίως, για τους κόμβους 1 και 2:

$$V_{12} = E_1 - E_2 = R_{12}I_2 \cos\varphi_{S2} + X_{12}I_2 \sin\varphi_{S2} = \frac{R_{12}E_2 I_2 \cos\varphi_{S2} + X_{12}E_2 I_2 \sin\varphi_{S2}}{E_2} \leftrightarrow$$

$$V_{12} \cong \frac{R_{12}P_{S2} + X_{12}Q_{S2}}{E_n} \quad (3.3.6)$$

όπου P_{S2}, Q_{S2} είναι η ενεργός και άεργος ισχύς κατά μήκος του τμήματος $S2$ και το $\cos\varphi_{S2}$ είναι ο συντελεστής ισχύος αυτού του τμήματος. Για τις P_{S2} και Q_{S2} ισχύει:

$$P_{S2} = P_2 + P_3 + P_4 + P_{R23} + P_{R24} \quad (3.3.7)$$

$$Q_{S2} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_{X23} + Q_{X24} \quad (3.3.8)$$

όπου οι P_{R23}, P_{R24} είναι οι απώλειες ισχύος στις αντιστάσεις R_{23} και R_{24} αντίστοιχα, ενώ οι Q_{X23}, Q_{X24} είναι η άεργος ισχύς που απορροφούν οι αντιδράσεις X_{23}, X_{24} αντίστοιχα. Αυτές οι απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος είναι αμελητέες μπροστά στις τιμές ισχύος των φορτίων. Εφαρμόζοντας αυτές τις υποθέσεις στις σχέσεις (3.3.6), (3.3.7) και (3.3.8):

$$P_{S2} \cong P_2 + P_3 + P_4 \quad (3.3.9)$$

$$Q_{S2} \cong Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (3.3.10)$$

$$V_{12} \cong \frac{R_{12}(P_2 + P_3 + P_4) + X_{12}(Q_2 + Q_3 + Q_4)}{E_n} \quad (3.3.11)$$

Τελικά, η διαφορά δυναμικού V_{01} είναι:

$$V_{01} = E_0 - E_1 = \frac{R_{01}P_{S1} + X_{01}Q_{S1}}{E_n} \quad (3.3.12)$$

όπου:

$$P_{S1} \cong P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (3.3.13)$$

$$Q_{S1} \cong Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (3.3.14)$$

είναι, αντίστοιχα, η ενεργός και άεργος ισχύς κατά μήκος του τμήματος $S1$.

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3.3.3),(3.3.5),(3.3.6) και (3.3.12) ,προκύπτει ότι η διαφορά δυναμικού V_{03} είναι συνάρτηση της ενεργού και αέργου ισχυος που αντιστοιχεί σε κάθε ένα από τα φορτία,δηλαδή P_1, \dots, P_4 και Q_1, \dots, Q_4 :

$$V_{03} = E_0 - E_3 \leftrightarrow E_3 = E_0 - V_{03} \leftrightarrow E_3 = E_0 - (V_{01} + V_{12} + V_{23}) \quad (3.3.15)$$

Το ίδιο ισχύει και για την τάση E_3 ,καθώς η τάση E_0 είναι σταθερή:

$$E_3 = f(P_1, \dots, P_4, Q_1, \dots, Q_4) \quad (3.3.16)$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι μια πιθανή μεταβολή στην ενεργό ή άεργο ισχύ ενός γενικού κόμβου,έστω j ,που ορίζεται ως εξής:

$$\Delta P_j = P_j^{final} - P_j^0 \quad (3.3.17)$$

$$\Delta Q_j = Q_j^{final} - Q_j^0 \quad (3.3.18)$$

όπου P_j^{final} (Q_j^{final}) και P_j^0 (Q_j^0) είναι οι τελικές και αρχικές τιμές ισχύος,αντίστοιχα,προκαλεί μια μεταβολή της τάσης στον κόμβο 3 ,που ορίζεται ως εξής:

$$\Delta E_3 = E_3^{final} - E_3^0 \quad (3.3.19)$$

Σε αυτή την περίπτωση,εξετάζεται η περίπτωση που υπάρχουν μόνο μεταβολές στην άεργο ισχύ ($\Delta P_j = 0$) λόγω της αρχικής υπόθεσης ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο η άεργος ισχύς για τον έλεγχο της τάσης στους κόμβους.

Η μεταβολή ΔE_3 μπορεί να υπολογιστεί έπειτα από γραμμικοποίηση της (3.3.16),λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τις μεταβολές αέργου ισχύος:

$$\Delta E_3 = \frac{\partial E_3}{\partial Q_1} \Delta Q_1 + \frac{\partial E_3}{\partial Q_2} \Delta Q_2 + \frac{\partial E_3}{\partial Q_3} \Delta Q_3 + \frac{\partial E_3}{\partial Q_4} \Delta Q_4 \quad (3.3.20)$$

Οι όροι $\frac{\partial E_i}{\partial Q_j}$ δείχνουν το "κέρδος" από τη μεταβολή τάσης ΔE_i στον κόμβο i όταν υπάρχει

μεταβολή της αέργου ΔQ_j στον κόμβο j .Με άλλα λόγια είναι όροι Ευαισθησίας.

Σύμφωνα με την (3.3.15) προκύπτει:

$$\frac{\partial E_3}{\partial Q_1} = -\frac{X_{01}}{E_n} \quad \frac{\partial E_3}{\partial Q_2} = -\frac{X_{01} + X_{12}}{E_n}$$

$$\frac{\partial E_3}{\partial Q_2} = -\frac{X_{01} + X_{12} + X_{23}}{E_n} \quad \frac{\partial E_3}{\partial Q_4} = -\frac{X_{01} + X_{12}}{E_n} \quad (3.3.21)$$

Το αρνητικό πρόσημο στους όρους ευαισθησίας έχει μια σημαντική επίπτωση. Εάν υπάρχει έγχυση αέργου ισχύος σε οποιονδήποτε κόμβο, δηλαδή αν $\Delta Q_j < 0$, όπου $j = 1, \dots, 4$, τότε $\Delta E_3 > 0$, δηλαδή στον κόμβο 3 η τάση αυξάνεται. Τότε, για να μειωθεί η τάση στο δίκτυο σε οποιονδήποτε κόμβο, πρέπει να μειωθεί ή ισοδύναμα να απορροφηθεί άεργος ισχύς απ' το δίκτυο, δηλαδή πρέπει $\Delta Q_j > 0$. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας, για παράδειγμα, διεσπαρμένες γεννήτριες.

Αν η παραπάνω ανάλυση που επικεντρώνεται στον κόμβο 3 επεκταθεί σε όλους τους κόμβους του δικτύου, η σχέση (3.3.20) θα πάρει τη γενική μητρική μορφή:

$$\begin{bmatrix} \Delta E_1 \\ \Delta E_2 \\ \Delta E_3 \\ \Delta E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial E_1}{\partial Q_2} & \frac{\partial E_1}{\partial Q_3} & \frac{\partial E_1}{\partial Q_4} \\ \frac{\partial E_2}{\partial Q_1} & \frac{\partial E_2}{\partial Q_2} & \frac{\partial E_2}{\partial Q_3} & \frac{\partial E_2}{\partial Q_4} \\ \frac{\partial E_3}{\partial Q_1} & \frac{\partial E_3}{\partial Q_2} & \frac{\partial E_3}{\partial Q_3} & \frac{\partial E_3}{\partial Q_4} \\ \frac{\partial E_4}{\partial Q_1} & \frac{\partial E_4}{\partial Q_2} & \frac{\partial E_4}{\partial Q_3} & \frac{\partial E_4}{\partial Q_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \end{bmatrix} \quad (3.3.22)$$

η οποία σε συμπαγή μορφή γράφεται:

$$[\Delta E] = [s_{Q-theor}][\Delta Q] \quad (3.3.23)$$

όπου $[s_{Q-theor}]$ είναι ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος, $[\Delta Q]$ είναι ο πίνακας μεταβολών αέργου ισχύος και $[\Delta E]$ είναι ο πίνακας τάσεων των κόμβων.

Υπολογίζοντας τις μερικές παραγώγους που περιέχονται στον $[s_{Q-theor}]$, προκύπτει:

$$[s_{Q-theor}] = -\frac{1}{E_n} \begin{bmatrix} X_{01} & X_{01} & X_{01} & X_{01} \\ X_{01} & X_{01} + X_{12} & X_{01} + X_{12} & X_{01} + X_{12} \\ X_{01} & X_{01} + X_{12} & X_{01} + X_{12} + X_{23} & X_{01} + X_{12} \\ X_{01} & X_{01} + X_{12} & X_{01} + X_{12} & X_{01} + X_{12} + X_{24} \end{bmatrix} \quad (3.3.24)$$

Αναλύοντας τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει ο ακόλουθος εμπειρικός κανόνας για την κατασκευή του πίνακα ευαισθησίας:

“Το στοιχείο (i, j) του πίνακα ευαισθησίας είναι το αριθμητικό άθροισμα των επαγωγικών αντιδράσεων των κλάδων στους οποίους ρέει η ισχύς που απορροφάται τόσο από τον κόμβο i όσο και από τον κόμβο j , πολλαπλασιασμένο με $-1/E_n$ ”.

Στην ουσία, δηλαδή, το στοιχείο (i, j) του πίνακα ευαισθησίας είναι το αριθμητικό άθροισμα των επαγωγικών αντιδράσεων των κλάδων του κοινού μονοπατιού από τον ζυγό αναφοράς προς τους δύο κόμβους-φορτία i και j , πολλαπλασιασμένο με $-1/E_n$.

Για παράδειγμα, στη σχέση (3.3.24), το στοιχείο (2,4) είναι ίσο με $-(X_{01} + X_{12})/E_n$, καθώς η ισχύς που απορροφάται από τους κόμβους 2 και 4 ρέει στους κλάδους 01 και 12.

Αν ληφθούν υπόψιν και οι μεταβολές ενεργού ισχύος στα φορτία, η μητρική εξίσωση (3.3.23) γίνεται:

$$[\Delta E] = [s_{Q-theor}][\Delta Q] + [s_{P-theor}][\Delta P] \quad (3.3.25)$$

όπου:

$$[\Delta P] = [\Delta P_1 \Delta P_2 \Delta P_3 \Delta P_4]^T \quad (3.3.26)$$

είναι ο πίνακας μεταβολών ενεργού ισχύος, και $[s_{P-theor}]$ είναι ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος, που είναι ίδιος με τον πίνακα της (3.3.24) αν αντικατασταθούν οι επαγωγικές αντιδράσεις με τις αντίστοιχες ωμικές αντιστάσεις. Επίσης, ο εμπειρικός κανόνας είναι ίδιος αν αντικατασταθούν οι αντιδράσεις με αντιστάσεις. Έτσι, ο πίνακας ευαισθησίας $[s_{P-theor}]$ λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος είναι ο εξής:

$$[s_{P-theor}] = -\frac{1}{E_n} \begin{bmatrix} R_{01} & R_{01} & R_{01} & R_{01} \\ R_{01} & R_{01} + R_{12} & R_{01} + R_{12} & R_{01} + R_{12} \\ R_{01} & R_{01} + R_{12} & R_{01} + R_{12} + R_{23} & R_{01} + R_{12} \\ R_{01} & R_{01} + R_{12} & R_{01} + R_{12} & R_{01} + R_{12} + R_{24} \end{bmatrix} \quad (3.3.27)$$

Τυπικά, στα Δίκτυα Διανομής Μέσης Τάσης, η αντίσταση δεν είναι αμελητέα συγκριτικά με την αντίδραση. Επομένως, ο πίνακας ευαισθησίας $[s_{P-theor}]$ δεν είναι αμελητέος συγκριτικά με τον πίνακα ευαισθησίας $[s_{Q-theor}]$, κι έτσι, ενδεχόμενη έγχυση ενεργού ισχύος οδηγεί σε μεταβολή της τάσης. Επομένως, η λεγόμενη $P\theta - QV$ αποσύζευξη, που είναι τυπική στα δίκτυα Υψηλής Τάσης, δεν υπάρχει στα Δίκτυα Διανομής Μέσης Τάσης, καθώς η ενεργός ισχύς είναι «συζευγμένη» με τις μεταβολές της τάσης. Αν δεν ληφθούν προληπτικά μέτρα, σε συγκεκριμένες συνθήκες δικτύου, η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση μπορεί να ξεπεραστεί σε οποιονδήποτε κόμβο. Όταν γίνεται έγχυση ισχύος, η τάση αυξάνεται σε όλους τους κόμβους δικτύου, αλλά κάποιοι κόμβοι επηρεάζονται περισσότερο από άλλους εξαιτίας της έγχυσης ισχύος. Αυτή η επιρροή μπορεί να φανεί από την ανάλυση ευαισθησίας.

Επίσης, στην παραπάνω θεωρητική προσέγγιση, όπως προαναφέρθηκε, για τις γραμμές έχει χρησιμοποιηθεί το ισοδύναμο RL κύκλωμα σειράς. Οι εγκάρσιες χωρητικότητες έχουν αγνοηθεί, καθώς αυτά τα στοιχεία θεωρείται ότι παράγουν συνέχεια άεργο ισχύ ($\Delta Q_{cap} = 0$). Αυτή η υπόθεση δημιουργεί ένα αμελητέο σφάλμα.

Η εξίσωση (2.3.25) επιτρέπει τον υπολογισμό της φασικής μεταβολής τάσης συναρτήσει των μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος. Για τριφασικά συμμετρικά δίκτυα, πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της (3.3.25) με $\sqrt{3}$, και πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας το δεξί μέλος με 3, προκύπτει η έκφραση της πολικής μεταβολής τάσης συναρτήσει των τριφασικών μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος:

$$[\Delta E_{line-to-line}] = [s_{Q-theor,t}][\Delta Q_t] + [s_{P-theor,t}][\Delta P_t] \quad (3.3.28)$$

όπου $[\Delta E_{line-to-line}]$ είναι το διάνυσμα της πολικής μεταβολής φάσης, και $[\Delta Q_t]$, $[\Delta P_t]$ είναι οι πίνακες τριφασικών μεταβολών αέργου κι ενεργού ισχύος αντίστοιχα. Η μορφή των πινάκων ευαισθησίας είναι ίδια με πριν, με τη διαφορά ότι στη θέση του όρου $-1/E_n$ εισάγεται ο όρος $-1/V_n$, όπου $V_n = \sqrt{3}E_n$, δηλαδή η V_n είναι η ονομαστική πολική τάση του δικτύου [13],[17].

Η ανάλυση που έγινε για το δοκιμαστικό ακτινικό δίκτυο MT, καθώς και ο εμπειρικός κανόνας υπολογισμού του πίνακα ευαισθησίας μπορούν να επεκταθούν και στα ακτινικά δίκτυα διανομής Χαμηλής Τάσης. Μία διαφορά μεταξύ των δικτύων διανομής MT και ΧΤ, είναι ότι στην ΧΤ η αναλογία R/X είναι πολύ υψηλή, κάτι που όμως δεν επηρεάζει την παραπάνω θεωρία με δεδομένη την τοπολογία του δικτύου[14].

3.4:Υπολογισμός θεωρητικού πίνακα ευαισθησίας με δεδομένη την τοπολογία του δικτύου

3.4.1: Υπολογισμός θεωρητικού πίνακα ευαισθησίας

Με δεδομένη την τοπολογία του δικτύου, και κατ'επέκτασιν με δεδομένες τις αντιστάσεις και αντιδράσεις των γραμμών, χρησιμοποιώντας τον εμπειρικό κανόνα που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, υπολογίζεται ο θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας του δικτύου. Υπενθυμίζεται ο εμπειρικός κανόνας: κάθε στοιχείο (i, j) του πίνακα ευαισθησίας είναι το αριθμητικό άθροισμα των ωμικών αντιστάσεων/επαγωγικών αντιδράσεων (σε περίπτωση που υπολογίζονται οι όροι ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού/αέργου ισχύος στα φορτία, αντίστοιχα) των κλάδων του κοινού μονοπατιού από τον ζυγό αναφοράς προς τους δύο κόμβους-φορτία i και j , πολλαπλασιασμένο με $-1/E_n$. Έτσι, αρχικά είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των μονοπατιών από τον ζυγό αναφοράς προς τα φορτία, ώστε στη συνέχεια να βρεθούν τα κοινά μονοπάτια μεταξύ τους. Για τον υπολογισμό των μονοπατιών επιλέχθηκε ο αλγόριθμος Dijkstra.

3.4.2:Αλγόριθμος Dijkstra

3.4.2.1:Επεξήγηση αλγορίθμου Dijkstra

Ο αλγόριθμος Dijkstra δείχνει σε έναν γράφο με μη αρνητικά βάρη στις ακμές τη συντομότερη διαδρομή από έναν κόμβο-κοινή αφετηρία προς κάθε άλλο κόμβο του γράφου[18].

3.4.2.2:Ψευδοκώδικας

procedure *Dijkstra*

begin

$S := \{1\};$

for $i := 2$ **to** n **do begin** $D[i] := \text{cost}[1, i]; P[i] := 1$ **end;**

for $i := 2$ **to** $n-1$ **do**

begin

Select w from $V-S$ such that $D[w]$ is minimum;

$S := S + \{w\};$

for all v in $V-S$ **do**

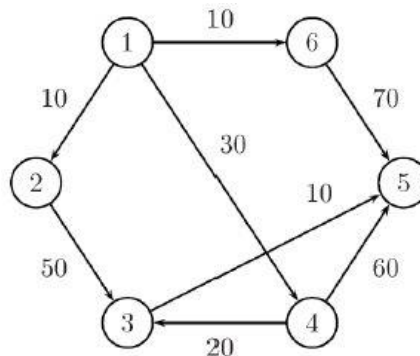
```

begin
  if D[v]>D[w]+C[w,v] then
    begin
      P[v]:=w;D[v]:=D[w]+C[w,v]
    end
  end
end
end
end
end

```

3.4.2.3: Παράδειγμα

Έστω ο κάτωθι γράφος[19]:



Ζητείται να υπολογιστούν οι συντομότερες διαδρομές από τον κόμβο 1 προς τους κόμβους 2,3,4,5,6.

Αρχικοποίηση-Επανάληψη 1:

Βήμα	S	W	Απόσταση D					Γονέας P				
			2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
-	{1}	-	10	∞	30	∞	10	1	1	1	1	1

Επανάληψη 2:

Οι μικρότερες αποστάσεις από τον κόμβο 1 είναι αυτές των κόμβων 2,6 που απέχουν 10 από τον 1. Επιλέγεται ο κόμβος 2 επειδή έχει μικρότερο label.

Βήμα	S	W	Απόσταση D					Γονέας P				
			2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
-	{1}	-	10	∞	30	∞	10	1	1	1	1	1
2	{1,2}	2		60	30	∞	10		2			

Άρα το συντομότερο μονοπάτι από τον κόμβο 1 προς τον κόμβο 2 είναι το μονοπάτι {1,2}. Ο κόμβος 2 γίνεται γονέας του 3.

Επανάληψη 3:

Η αμέσως επόμενη μικρότερη απόσταση από το υποδέντρο {1,2} είναι αυτή του κόμβου 6, που απέχει 10 από το υποδέντρο {1,2}.

Βήμα	S	W	Απόσταση D					Γονέας P				
			2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
-	{1}	-	10	∞	30	∞	10	1	1	1	1	1
2	{1,2}	2		60	30	∞	10		2			
3	{1,2,6}	6		60	30	80					6	

Άρα το συντομότερο μονοπάτι από τον κόμβο 1 προς τον κόμβο 6 είναι το μονοπάτι {1,2,6}. Ο κόμβος 6 γίνεται γονέας του 5.

Επανάληψη 4:

Η αμέσως επόμενη μικρότερη απόσταση από το υποδέντρο {1,2,6} είναι αυτή του κόμβου 4, που απέχει 30 από το υποδέντρο {1,2,6}.

Βήμα	S	W	Απόσταση D					Γονέας P				
			2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
-	{1}	-	10	∞	30	∞	10	1	1	1	1	1
2	{1,2}	2		60	30	∞	10		2			
3	{1,2,6}	6		60	30	80					6	
4	{1,2,6,4}	4		50		80			4			

Άρα το συντομότερο μονοπάτι από τον κόμβο 1 προς τον κόμβο 4 είναι το μονοπάτι {1,2,6,4}. Ο κόμβος 4 γίνεται γονέας του 3.

Επανάληψη 5:

Η αμέσως επόμενη μικρότερη απόσταση από το υποδέντρο {1,2,6,4} είναι αυτή του κόμβου 3, που απέχει 50 από το υποδέντρο {1,2,6,4}.

Βήμα	S	W	Απόσταση D					Γονέας P				
			2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
-	{1}	-	10	∞	30	∞	10	1	1	1	1	1
2	{1,2}	2		60	30	∞	10		2			
3	{1,2,6}	6		60	30	80					6	
4	{1,2,6,4}	4		50		80			4			
5	{1,2,6,4,3}	3				60						3

Άρα το συντομότερο μονοπάτι από τον κόμβο 1 προς τον κόμβο 3 είναι το μονοπάτι {1,2,6,4,3}. Ο κόμβος 3 γίνεται γονέας του 5.

Επανάληψη 6:

Η αμέσως επόμενη μικρότερη απόσταση από το υποδέντρο {1,2,6,4,3} είναι αυτή του κόμβου 5, που απέχει 60 από το υποδέντρο {1,2,6,4,3}.

Βήμα	S	W	Απόσταση D					Γονέας P				
			2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
-	{1}	-	10	∞	30	∞	10	1	1	1	1	1
2	{1,2}	2		60	30	∞	10		2			
3	{1,2,6}	6		60	30	80					6	
4	{1,2,6,4}	4		50		80			4			
5	{1,2,6,4,3}	3				70					3	
6	{1,2,6,4,3,5}	5										

Άρα το συντομότερο μονοπάτι από τον κόμβο 1 προς τον κόμβο 5 είναι το μονοπάτι {1,2,6,4,3,5}.

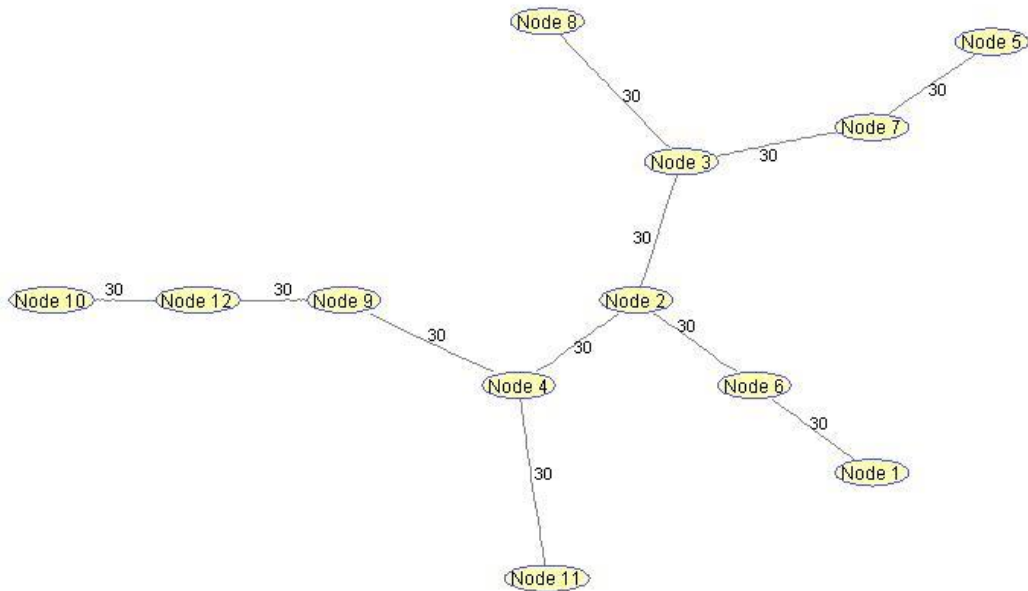
3.4.3: Παραδείγματα υπολογισμού πίνακα ευαισθησίας με τις δύο μεθόδους

Με βάση τα παραπάνω, για τον υπολογισμό του θεωρητικού πίνακα ευαισθησίας που οφείλεται μόνο σε μεταβολές ενεργού ισχύος στους κόμβους φορτίων, ακολουθείται η εξής διαδικασία: χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Dijkstra, με τα βάρη των ακμών να αντιστοιχούν στις αντιστάσεις τους, εντοπίζεται το συντομότερο μονοπάτι από τον ζυγό αναφοράς προς κάθε φύλλο-φορτίο. Έπειτα, από την τομή ανά δύο αυτών των υποσυνόλων-συντομότερων μονοπατιών, εντοπίζονται τα κοινά μονοπάτια από τον ζυγό αναφοράς προς τα φύλλα. Τότε, κάθε στοιχείο (i, j) του πίνακα ευαισθησίας θα προκύπτει ως το αριθμητικό άθροισμα των αντιστάσεων των κλάδων του κοινού μονοπατιού από τον ζυγό αναφοράς προς τους δύο κόμβους-φορτία i και j , πολλαπλασιασμένο με $-1/E_n$.

Αντίστοιχα, για τον υπολογισμό του θεωρητικού πίνακα ευαισθησίας που οφείλεται μόνο σε μεταβολές αέργου ισχύος στους κόμβους φορτίων, ακολουθείται η ίδια διαδικασία, με τη διαφορά ότι στη θέση των αντιστάσεων χρησιμοποιούνται οι επαγωγικές αντιδράσεις των γραμμών.

Παράδειγμα 1

Δίνεται το αρχικό μονοφασικό δίκτυο Χαμηλής Τάσης 12 κόμβων:



Εικόνα 3.3:Τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης 12 κόμβων

Οι κόμβοι του παραπάνω δέντρου, που αναπαριστούν τους ζυγούς ενός δικτύου Χαμηλής Τάσης, διακρίνονται σε:

- Ζυγό αναφοράς (slack bus): Η ρίζα του δέντρου αντιστοιχεί στον ζυγό αναφοράς/ζυγό του Μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ και είναι: $root = \{1\}$.
- Ζυγούς φορτίου (PQ): Τα φύλλα του παραπάνω δέντρου αντιστοιχούν σε ζυγούς φορτίου και είναι τα εξής: $leaves = \{5\ 8\ 10\ 11\}$.
- Ζυγούς διασύνδεσης: Οι ενδιάμεσοι κόμβοι του δέντρου αντιστοιχούν στους ζυγούς διασύνδεσης του δικτύου, που είναι πυλώνες της ΔΕΗ. Είναι οι εξής: $intermediate\ nodes = \{2\ 3\ 4\ 6\ 7\ 9\ 12\}$.

Στο παραπάνω δίκτυο, σχετικά με τα είδη των γραμμών :

- οι υπέργειες γραμμές μεταξύ των πυλώνων είναι : συνεστραμμένα καλώδια Al (αργιλίου), διατομής $4 \times 120\ mm^2$, με αντίσταση γραμμής $R = 0.284\ Ohm / km$ και επαγωγική αντίδραση $X = 0.083\ Ohm / km$.
- οι γραμμές υπηρεσίας (service lines) μεταξύ πυλώνων και καταναλωτών είναι : καλώδια Cu (χαλκού), διατομής $4 \times 16\ mm^2$, με αντίσταση γραμμής $R = 1.380\ Ohm / km$ και επαγωγική αντίδραση $X = 0.082\ Ohm / km$. [11]

και τα μήκη των γραμμών είναι όλα ίσα με $length = 30\ m$.

Επιπλέον, η βασική ισχύς του δικτύου έχει οριστεί: $S_b = 1 \text{ MVA}$, ενώ η φασική ονομαστική τάση είναι: $E_n = V_b = 400 \text{ V}$. Έτσι, η βασική αντίσταση του δικτύου είναι:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{(400 \text{ V})^2}{10^6 \text{ VA}} = 0.16 \text{ Ohm} \quad (3.4.1)$$

και η ονομαστική τάση του δικτύου σε ανά μονάδα τιμές:

$$E_n(\text{pu}) = \frac{E_n}{V_b} = \frac{400 \text{ V}}{400 \text{ V}} = 1 \text{ pu} \quad (3.4.2)$$

Έτσι, οι συνολικές τιμές των αντιστάσεων και επαγωγικών αντιδράσεων ανά είδος γραμμής, σε ανά μονάδα τιμές, είναι:

- Για τις υπέργειες γραμμές:

$$R_{\text{pole-to-pole}}(\text{pu}) = \frac{R_{\text{pole-to-pole}}(\text{Ohm/km}) * \text{length}(\text{m})}{1000 * Z_b(\text{Ohm})} \leftrightarrow$$

$$R_{\text{pole-to-pole}}(\text{pu}) = \frac{0.284 (\text{Ohm/km}) * 30\text{m}}{1000 * 0.16 \text{ Ohm}} = 0.0532 \text{ pu} \quad (3.4.3)$$

$$X_{\text{pole-to-pole}}(\text{pu}) = \frac{X_{\text{pole-to-pole}}(\text{Ohm/km}) * \text{length}(\text{m})}{1000 * Z_b(\text{Ohm})} \leftrightarrow$$

$$X_{\text{pole-to-pole}}(\text{pu}) = \frac{0.083 (\text{Ohm/km}) * 30\text{m}}{1000 * 0.16 \text{ Ohm}} = 0.0156 \text{ pu} \quad (3.4.4)$$

- Για τις γραμμές καταναλωτών:

$$R_{\text{pole-to-load}}(\text{pu}) = \frac{R_{\text{pole-to-load}}(\text{Ohm/km}) * \text{length}(\text{m})}{1000 * Z_b(\text{Ohm})} \leftrightarrow$$

$$R_{\text{pole-to-load}}(\text{pu}) = \frac{1.38 (\text{Ohm/km}) * 30\text{m}}{1000 * 0.16 \text{ Ohm}} = 0.2587 \text{ pu} \quad (3.4.5)$$

$$X_{\text{pole-to-load}}(\text{pu}) = \frac{X_{\text{pole-to-load}}(\text{Ohm/km}) * \text{length}(\text{m})}{1000 * Z_b(\text{Ohm})} \leftrightarrow$$

$$X_{\text{pole-to-load}}(\text{pu}) = \frac{0.082 (\text{Ohm/km}) * 30\text{m}}{1000 * 0.16 \text{ Ohm}} = 0.0154 \text{ pu} \quad (3.4.6)$$

Α) Πίνακες ευαισθησίας με την θεωρητική μέθοδο για δεδομένη τοπολογία δικτύου

Με χρήση του αλγορίθμου *Dijkstra* προκύπτουν τα συντομότερα μονοπάτια από τη ρίζα του δέντρου προς τα φύλλα του:

Πίνακας 3. 1: Πίνακας συντομότερων μονοπατιών από *Dijkstra*

<i>Path {1,5}</i>	<i>Path {1,8}</i>	<i>Path {1,10}</i>	<i>Path {1,11}</i>
{1 6 2 3 7 5}	{1 6 2 3 8}	{1 6 2 4 9 12 10}	{1 6 2 4 11}

Έπειτα, υπολογίζονται όλα τα κοινά μονοπάτια, από τη ρίζα, μεταξύ των φύλλων του δέντρου:

Πίνακας 3. 2: Πίνακας κοινών μονοπατιών μεταξύ φύλλων

	5	8	10	11
5	{1 6 2 3 7 5}	{1 6 2 3}	{1 6 2}	{1 6 2}
8	{1 6 2 3}	{1 6 2 3 8}	{1 6 2}	{1 6 2}
10	{1 6 2}	{1 6 2}	{1 6 2 4 9 12 10}	{1 6 2 4}
11	{1 6 2}	{1 6 2}	{1 6 2 4}	{1 6 2 4 11}

Αθροίζοντας τις αντιστάσεις των κοινών μονοπατιών και πολλαπλασιάζοντας με $-1/E_n (pu) = -1pu$ προκύπτουν οι όροι ευαισθησίας που οφείλονται σε μεταβολές ενεργού ισχύος στους ζυγούς φορτίου :

Πίνακας 3. 3: Θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος

	5	8	10	11
5	-0.4718	-0.1598	-0.1065	-0.1065
8	-0.1598	-0.4185	-0.1065	-0.1065
10	-0.1065	-0.1065	-0.5250	-0.1598
11	-0.1065	-0.1065	-0.1598	-0.4185

ή ισοδύναμα:

$$[S_{P-theor}] = \begin{bmatrix} -0.4718 & -0.1598 & -0.1065 & -0.1065 \\ -0.1598 & -0.4185 & -0.1065 & -0.1065 \\ -0.1065 & -0.1065 & -0.5250 & -0.1598 \\ -0.1065 & -0.1065 & -0.1598 & -0.4185 \end{bmatrix}$$

Αντίστοιχα, αθροίζοντας τις αντιδράσεις των κοινών μονοπατιών και πολλαπλασιάζοντας με $-1/E_n (pu) = -1pu$ προκύπτουν οι όροι ευαισθησίας που οφείλονται σε μεταβολές αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου :

Πίνακας 3. 4: Θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος

	5	8	10	11
5	-0.0776	-0.0467	-0.0311	-0.0311
8	-0.0467	-0.0621	-0.0311	-0.0311
10	-0.0311	-0.0311	-0.0932	-0.0467
11	-0.0311	-0.0311	-0.0467	-0.0621

ή ισοδύναμα:

$$[S_{Q-theor}] = \begin{bmatrix} -0.0776 & -0.0467 & -0.0311 & -0.0311 \\ -0.0467 & -0.0621 & -0.0311 & -0.0311 \\ -0.0311 & -0.0311 & -0.0932 & -0.0467 \\ -0.0311 & -0.0311 & -0.0467 & -0.0621 \end{bmatrix}$$

Β) Πίνακες ευαισθησίας μέσω Jacobian, δεδομένων των μετρήσεων των έξυπνων μετρητών των καταναλωτών

Έστω ότι τα φορτία αναφοράς στους ζυγούς καταναλωτών είναι τα εξής:

Φορτία	5	8	10	11
$P(kw)$	4.9	7.5	7.1	4.7
$Q(kVar)$	3.3	5	4.4	3.5
$Cos\phi$	0.83	0.83	0.85	0.8

Θεωρείται επίσης ότι η ενεργός ισχύς σε κάθε ζυγό φορτίου αυξομειώνεται ανά στιγμιότυπο το πολύ κατά 500 W.

Οι πίνακες ευαισθησίας μέσω Jacobian προκύπτουν από το MATPOWER, για τη δεδομένη ροή φορτίου, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.3.3, κατά το στιγμιότυπο αναφοράς:

Πίνακας 3.5: Πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος μέσω Jacobian

	5	8	10	11
5	0.5012	0.1720	0.1158	0.1160
8	0.1721	0.4449	0.1158	0.1160
10	0.1159	0.1159	0.5568	0.1721
11	0.1159	0.1159	0.1719	0.4452

ή ισοδύναμα:

$$[S_{P-Jac}] = \begin{bmatrix} 0.5012 & 0.1720 & 0.1158 & 0.1160 \\ 0.1721 & 0.4449 & 0.1158 & 0.1160 \\ 0.1159 & 0.1159 & 0.5568 & 0.1721 \\ 0.1159 & 0.1159 & 0.1719 & 0.4452 \end{bmatrix}$$

και:

Πίνακας 3. 6: Πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος μέσω Jacobian

	5	8	10	11
5	0.0829	0.0503	0.0338	0.0339
8	0.0503	0.0665	0.0338	0.0339
10	0.0339	0.0339	0.0992	0.0503
11	0.0339	0.0339	0.0502	0.0665

ή ισοδύναμα:

$$[S_{Q-Jac}] = \begin{bmatrix} 0.0829 & 0.0503 & 0.0338 & 0.0339 \\ 0.0503 & 0.0665 & 0.0338 & 0.0339 \\ 0.0339 & 0.0339 & 0.0992 & 0.0503 \\ 0.0339 & 0.0339 & 0.0502 & 0.0665 \end{bmatrix}$$

Γ) Σύγκριση όρων ευαισθησίας μεταξύ των δύο μεθόδων

Τα θετικά πρόσημα στους πίνακες ευαισθησίας μέσω Jacobian, έναντι των πινάκων της προτεινόμενης μεθόδου, οφείλονται στο γεγονός ότι στον υπολογισμό της μήτρας Jacobian, σε ακτινικά δίκτυα διανομής, λαμβάνεται υπόψη μόνο το μέτρο της τάσης. Τα σφάλματα (%) μεταξύ των όρων ευαισθησίας των δύο μεθόδων, ως προς την μέθοδο με Jacobian, υπολογίζονται ως εξής:

$$error_{Jac-theor}^P(i, j) = \frac{s_{P-Jac}(i, j) - |s_{P-theor}(i, j)|}{s_{P-Jac}(i, j)} 100\% \quad (3.4.7)$$

$$error_{Jac-theor}^Q(i, j) = \frac{s_{Q-Jac}(i, j) - |s_{Q-theor}(i, j)|}{s_{Q-Jac}(i, j)} 100\% \quad (3.4.8)$$

Έτσι, συγκρίνοντας τους πίνακες ευαισθησίας (3. 5), (3. 6) με τις απόλυτες τιμές των πινάκων (3. 3), (3. 4) αντίστοιχα, προκύπτουν:

Πίνακας 3.7: Πίνακας σφαλμάτων ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος

$$[error_{Jac-theor}^P] = \begin{bmatrix} 5.8716 & 7.1361 & 8.0319 & 8.1585 \\ 7.1685 & 5.9243 & 8.0319 & 8.1585 \\ 8.1255 & 8.0935 & 5.7073 & 7.2018 \\ 8.1255 & 8.0935 & 7.0739 & 5.9909 \end{bmatrix}$$

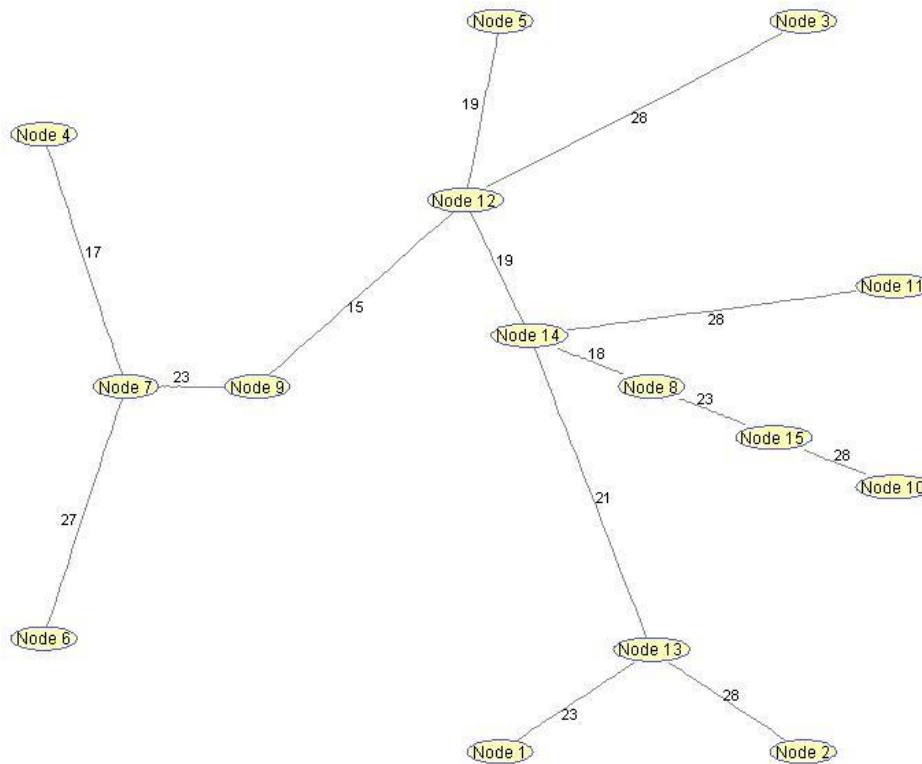
Πίνακας 3. 8: Πίνακας σφαλμάτων ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος

$$[error_{Jac-theor}^Q] = \begin{bmatrix} 6.3913 & 7.1361 & 8.0319 & 8.1585 \\ 7.1685 & 6.6543 & 8.0319 & 8.1585 \\ 8.1255 & 8.0935 & 6.0978 & 7.2018 \\ 8.1255 & 8.0935 & 7.0739 & 6.7204 \end{bmatrix}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για τη συγκεκριμένη ροή φορτίου, τα σφάλματα στον υπολογισμό των όρων ευαισθησίας ενεργού ισχύος κυμαίνονται από 5.7073(%) έως 8.1585 (%). Αντίστοιχα, τα σφάλματα στον υπολογισμό των όρων ευαισθησίας αέργου ισχύος κυμαίνονται από 6.0978(%) έως 8.1585 (%). Παρατηρείται ότι τα σφάλματα των πινάκων 3. 7, 3. 8, πέραν των διαγώνιων στοιχείων, είναι μεταξύ τους ίσα.

Παράδειγμα 2

Δίνεται το αρχικό μονοφασικό δίκτυο Χαμηλής Τάσης 15 κόμβων:



Εικόνα 3.4:Τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης 15 κόμβων

Οι κόμβοι του παραπάνω δέντρου, που αναπαριστούν τους ζυγούς ενός δικτύου Χαμηλής Τάσης, διακρίνονται σε:

- Ζυγό αναφοράς (slack bus): Η ρίζα του δέντρου αντιστοιχεί στον ζυγό αναφοράς/ζυγό του Μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ και είναι : $root = \{1\}$.
- Ζυγούς φορτίου (PQ): Τα φύλλα του παραπάνω δέντρου αντιστοιχούν σε ζυγούς φορτίου και είναι τα εξής: $leaves = \{2, 3, 4, 5, 6, 10, 11\}$.
- Ζυγούς διασύνδεσης: Οι ενδιάμεσοι κόμβοι του δέντρου αντιστοιχούν στους ζυγούς διασύνδεσης του δικτύου, που είναι πυλώνες της ΔΕΗ. Είναι οι εξής: $intermediate\ nodes = \{7, 8, 9, 12, 13, 14, 15\}$.

Στο παραπάνω δίκτυο, σχετικά με τα είδη των γραμμών :

- οι υπέργειες γραμμές μεταξύ των πυλώνων είναι : συνεστραμμένα καλώδια Al (αργιλίου), διατομής $4 \times 120 \text{ mm}^2$, με αντίσταση γραμμής $R = 0.284 \text{ Ohm/km}$ κι επαγωγική αντίδραση $X = 0.083 \text{ Ohm/km}$.

- οι γραμμές υπηρεσίας(service lines) μεταξύ πυλώνων και καταναλωτών είναι :καλώδια *Cu*(χαλκού),διατομής $4 \times 16 \text{ mm}^2$, με αντίσταση γραμμής $R = 1.380 \text{ Ohm /km}$ κι επαγωγική αντίδραση $X = 0.082 \text{ Ohm /km}$. [11]

και τα μήκη των γραμμών είναι αυτά που αναγράφονται στην Εικόνα 3.4.

Επιπλέον,η βασική ισχύς του δικτύου έχει οριστεί: $S_b = 1 \text{ MVA}$,ενώ η φασική ονομαστική τάση είναι: $E_n = V_b = 400 \text{ V}$.Έτσι,η βασική αντίσταση του δικτύου και η ονομαστική τάση του δικτύου σε ανά μονάδα τιμές,από τις σχέσεις (3.4.1), (3.4.2) είναι: $Z_b = 0.16 \text{ Ohm}$, $E_n(pu) = 1 pu$, αντίστοιχα.

Έτσι,οι συνολικές τιμές των αντιστάσεων και επαγωγικών αντιδράσεων ανά είδος γραμμής,σε ανά μονάδα τιμές,υπολογίζονται ως εξής:

- Για τις υπέργειες γραμμές:

$$R_{pole-to-pole}(pu) = \frac{R_{pole-to-pole}(\text{Ohm/km}) * line_length(m)}{1000 * Z_b(\text{Ohm})}, \quad (3.4.9)$$

$$X_{pole-to-pole}(pu) = \frac{X_{pole-to-pole}(\text{Ohm/km}) * line_length(m)}{1000 * Z_b(\text{Ohm})}, \quad (3.4.10)$$

- Για τις γραμμές καταναλωτών:

$$R_{pole-to-load}(pu) = \frac{R_{pole-to-load}(\text{Ohm/km}) * line_length(m)}{1000 * Z_b(\text{Ohm})}, \quad (3.4.11)$$

$$X_{pole-to-load}(pu) = \frac{X_{pole-to-load}(\text{Ohm/km}) * line_length(m)}{1000 * Z_b(\text{Ohm})} \quad (3.4.12)$$

όπου *line_length*:το μήκος κάθε γραμμής.

Α)Πίνακες ευαισθησίας με την θεωρητική μέθοδο για δεδομένη τοπολογία δικτύου

Με χρήση του αλγορίθμου *Dijkstra* προκύπτουν τα συντομότερα μονοπάτια από τη ρίζα του δέντρου προς τα φύλλα του:

Πίνακας 3. 9:Πίνακας συντομότερων μονοπατιών από *Dijkstra*

<i>Path {1,2}</i>	<i>Path {1,3}</i>	<i>Path {1,4}</i>	<i>Path {1,5}</i>	<i>Path {1,6}</i>	<i>Path {1,10}</i>	<i>Path {1,11}</i>
{1 13 2 }	{1 13 14 12 3}	{1 13 14 12 9 7 4}	{1 13 14 12 5}	{1 13 14 12 9 7 6}	{1 13 14 8 15 10}	{1 13 14 11}

Έπειτα,υπολογίζονται όλα τα κοινά μονοπάτια, από τη ρίζα, μεταξύ των φύλλων του δέντρου:

Πίνακας 3. 10:Πίνακας κοινών μονοπατιών μεταξύ φύλλων

	2	3	4	5	6	10	11
2	{1 13 2 }	{1 13}	{1 13}	{1 13}	{1 13}	{1 13}	{1 13}
3	{1 13}	{1 13 14 12 3}	{1 13 14 12}	{1 13 14 12}	{1 13 14 12}	{1 13 14}	{1 13 14}
4	{1 13}	{1 13 14 12}	{1 13 14 12 9 7 4}	{1 13 14 12}	{1 13 14 12 9 7}	{1 13 14}	{1 13 14}
5	{1 13}	{1 13 14 12}	{1 13 14 12}	{1 13 14 12 5}	{1 13 14 12}	{1 13 14}	{1 13 14}
6	{1 13}	{1 13 14 12}	{1 13 14 12 9 7}	{1 13 14 12}	{1 13 14 12 9 7 6}	{1 13 14}	{1 13 14}
10	{1 13}	{1 13 14}	{1 13 14}	{1 13 14}	{1 13 14}	{1 13 14 8 15 10}	{1 13 14}
11	{1 13}	{1 13 14}	{1 13 14}	{1 13 14}	{1 13 14}	{1 13 14}	{1 13 14 11}

Αθροίζοντας τις αντιστάσεις των κοινών μονοπατιών και πολλαπλασιάζοντας με $-1/E_n (pu) = -1pu$ προκύπτει οι όροι ευαισθησίας που οφείλονται σε μεταβολές ενεργού ισχύος στους ζυγούς φορτίου:

Πίνακας 3. 11:Θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος

	2	3	4	5	6	10	11
2	-0.2823	-0.0408	-0.0408	-0.0408	-0.0408	-0.0408	-0.0408
3	-0.0408	-0.3533	-0.1118	-0.1118	-0.1118	-0.0781	-0.0781
4	-0.0408	-0.1118	-0.3259	-0.1118	-0.1793	-0.0781	-0.0781
5	-0.0408	-0.1118	-0.1118	-0.2757	-0.1118	-0.0781	-0.0781
6	-0.0408	-0.1118	-0.1793	-0.1118	-0.4122	-0.0781	-0.0781
10	-0.0408	-0.0781	-0.0781	-0.0781	-0.0781	-0.3924	-0.0781
11	-0.0408	-0.0781	-0.0781	-0.0781	-0.0781	-0.0781	-0.3196

Ή ισοδύναμα:

$$[S_{p-theor}] = \begin{bmatrix} -0.2823 & -0.0408 & -0.0408 & -0.0408 & -0.0408 & -0.0408 & -0.0408 & -0.0408 \\ -0.0408 & -0.3533 & -0.1118 & -0.1118 & -0.1118 & -0.0781 & -0.0781 & -0.0781 \\ -0.0408 & -0.1118 & -0.3259 & -0.1118 & -0.1793 & -0.0781 & -0.0781 & -0.0781 \\ -0.0408 & -0.1118 & -0.1118 & -0.2757 & -0.1118 & -0.0781 & -0.0781 & -0.0781 \\ -0.0408 & -0.1118 & -0.1793 & -0.1118 & -0.4122 & -0.0781 & -0.0781 & -0.0781 \\ -0.0408 & -0.0781 & -0.0781 & -0.0781 & -0.0781 & -0.3924 & -0.0781 & -0.0781 \\ -0.0408 & -0.0781 & -0.0781 & -0.0781 & -0.0781 & -0.0781 & -0.3196 & -0.0781 \end{bmatrix}$$

Αντίστοιχα,αθροίζοντας τις αντιδράσεις των κοινών μονοπατιών και πολλαπλασιάζοντας με $-1/E_n (pu) = -1pu$ προκύπτουν οι όροι ευαισθησίας που οφείλονται σε μεταβολές αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου :

Πίνακας 3.4-12:Θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος

	2	3	4	5	6	10	11
2	-0.0263	-0.0119	-0.0119	-0.0119	-0.0119	-0.0119	-0.0119
3	-0.0119	-0.0470	-0.0327	-0.0327	-0.0327	-0.0228	-0.0228
4	-0.0119	-0.0327	-0.0611	-0.0327	-0.0524	-0.0228	-0.0228
5	-0.0119	-0.0327	-0.0327	-0.0424	-0.0327	-0.0228	-0.0228
6	-0.0119	-0.0327	-0.0524	-0.0327	-0.0662	-0.0228	-0.0228
10	-0.0119	-0.0228	-0.0228	-0.0228	-0.0228	-0.0584	-0.0228
11	-0.0119	-0.0228	-0.0228	-0.0228	-0.0228	-0.0228	-0.0372

Ή ισοδύναμα:

$$[S_{Q-theor}] = \begin{bmatrix} -0.0263 & -0.0119 & -0.0119 & -0.0119 & -0.0119 & -0.0119 & -0.0119 \\ -0.0119 & -0.0470 & -0.0327 & -0.0327 & -0.0327 & -0.0228 & -0.0228 \\ -0.0119 & -0.0327 & -0.0611 & -0.0327 & -0.0524 & -0.0228 & -0.0228 \\ -0.0119 & -0.0327 & -0.0327 & -0.0424 & -0.0327 & -0.0228 & -0.0228 \\ -0.0119 & -0.0327 & -0.0524 & -0.0327 & -0.0662 & -0.0228 & -0.0228 \\ -0.0119 & -0.0228 & -0.0228 & -0.0228 & -0.0228 & -0.0584 & -0.0228 \\ -0.0119 & -0.0228 & -0.0228 & -0.0228 & -0.0228 & -0.0228 & -0.0372 \end{bmatrix}$$

Β) Πίνακες ευαισθησίας μέσω Jacobian, δεδομένων των μετρήσεων των ψηφιακών μετρητών των καταναλωτών

Έστω ότι τα φορτία αναφοράς στους ζυγούς καταναλωτών είναι τα εξής:

Φορτία	2	3	4	5	6	10	11
$P(kV)$	5.7	6.2	7.9	4.9	7.6	7.1	4.7
$Q(kVar)$	3.5325	4.65	4.8960	3.2928	5.7	4.4002	3.5250
$cos\phi$	0.85	0.8	0.85	0.83	0.8	0.85	0.8

Θεωρείται επίσης ότι η ενεργός ισχύς σε κάθε ζυγό φορτίου αυξομειώνεται ανά στιγμιότυπο το πολύ κατά 500 W.

Οι πίνακες ευαισθησίας μέσω Jacobian προκύπτουν από το MATPOWER, για τη δεδομένη ροή φορτίου, κατά το στιγμιότυπο αναφοράς, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.3.3:

Πίνακας 3. 13: Πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος μέσω Jacobian

	2	3	4	5	6	10	11
2	0.3011	0.0458	0.0457	0.0458	0.0457	0.0458	0.0458
3	0.0459	0.3751	0.1205	0.1207	0.1204	0.0851	0.0852
4	0.0459	0.1206	0.3459	0.1207	0.1914	0.0851	0.0852
5	0.0459	0.1206	0.1205	0.2935	0.1204	0.0851	0.0852
6	0.0459	0.1206	0.1915	0.1207	0.4365	0.0851	0.0852
10	0.0459	0.0850	0.0850	0.0851	0.0849	0.4163	0.0852
11	0.0459	0.0850	0.0850	0.0851	0.0849	0.0851	0.3400

Ή ισοδύναμα:

$$[S_{P-Jac}] = \begin{bmatrix} 0.3011 & 0.0458 & 0.0457 & 0.0458 & 0.0457 & 0.0458 & 0.0458 \\ 0.0459 & 0.3751 & 0.1205 & 0.1207 & 0.1204 & 0.0851 & 0.0852 \\ 0.0459 & 0.1206 & 0.3459 & 0.1207 & 0.1914 & 0.0851 & 0.0852 \\ 0.0459 & 0.1206 & 0.1205 & 0.2935 & 0.1204 & 0.0851 & 0.0852 \\ 0.0459 & 0.1206 & 0.1915 & 0.1207 & 0.4365 & 0.0851 & 0.0852 \\ 0.0459 & 0.0850 & 0.0850 & 0.0851 & 0.0849 & 0.4163 & 0.0852 \\ 0.0459 & 0.0850 & 0.0850 & 0.0851 & 0.0849 & 0.0851 & 0.3400 \end{bmatrix}$$

και:

Πίνακας 3. 14: Πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος μέσω Jacobian

	2	3	4	5	6	10	11
2	0.0286	0.0134	0.0134	0.0134	0.0134	0.0134	0.0134
3	0.0134	0.0504	0.0352	0.0353	0.0352	0.0249	0.0249
4	0.0134	0.0352	0.0651	0.0353	0.0559	0.0249	0.0249
5	0.0134	0.0352	0.0352	0.0455	0.0352	0.0249	0.0249
6	0.0134	0.0352	0.0560	0.0353	0.0705	0.0249	0.0249
10	0.0134	0.0249	0.0248	0.0249	0.0248	0.0624	0.0249
11	0.0134	0.0249	0.0248	0.0249	0.0248	0.0249	0.0400

Η ισοδύναμα:

$$[s_{Q-Jac}] = \begin{bmatrix} 0.0286 & 0.0134 & 0.0134 & 0.0134 & 0.0134 & 0.0134 & 0.0134 \\ 0.0134 & 0.0504 & 0.0352 & 0.0353 & 0.0352 & 0.0249 & 0.0249 \\ 0.0134 & 0.0352 & 0.0651 & 0.0353 & 0.0559 & 0.0249 & 0.0249 \\ 0.0134 & 0.0352 & 0.0352 & 0.0455 & 0.0352 & 0.0249 & 0.0249 \\ 0.0134 & 0.0352 & 0.0560 & 0.0353 & 0.0705 & 0.0249 & 0.0249 \\ 0.0134 & 0.0249 & 0.0248 & 0.0249 & 0.0248 & 0.0624 & 0.0249 \\ 0.0134 & 0.0249 & 0.0248 & 0.0249 & 0.0248 & 0.0249 & 0.0400 \end{bmatrix}$$

Γ) Σύγκριση όρων ευαισθησίας μεταξύ των δύο μεθόδων

Από τις σχέσεις (3.4.7),(3.4.8) προκύπτουν:

Πίνακας 3. 15: Πίνακας σφαλμάτων ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος

$$[error_{Jac-theor}^P] = \begin{bmatrix} 6.2224 & 10.7997 & 10.7278 & 10.8583 & 10.6755 & 10.8203 & 10.9169 \\ 11.0354 & 5.8008 & 7.1923 & 7.3279 & 7.1379 & 8.1913 & 8.2907 \\ 11.0354 & 7.2670 & 5.7830 & 7.3279 & 6.3354 & 8.1913 & 8.2907 \\ 11.0354 & 7.2670 & 7.1923 & 6.0563 & 7.1379 & 8.1913 & 8.2907 \\ 11.0354 & 7.2670 & 6.3903 & 7.3279 & 5.5710 & 8.1913 & 8.2907 \\ 11.0354 & 8.1700 & 8.0960 & 8.2303 & 8.0422 & 5.7539 & 8.2907 \\ 11.0354 & 8.1700 & 8.0960 & 8.2303 & 8.0422 & 8.1913 & 5.9972 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 3. 16: Πίνακας σφαλμάτων ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος

$$[error_{Jac-theor}^Q] = \begin{bmatrix} 8.0221 & 10.7997 & 10.7278 & 10.8583 & 10.6755 & 10.8203 & 10.9169 \\ 11.0354 & 6.6182 & 7.1923 & 7.3279 & 7.1379 & 8.1913 & 8.2907 \\ 11.0354 & 7.2670 & 6.1987 & 7.3279 & 6.3354 & 8.1913 & 8.2907 \\ 11.0354 & 7.2670 & 7.1923 & 6.8409 & 7.1379 & 8.1913 & 8.2907 \\ 11.0354 & 7.2670 & 6.3903 & 7.3279 & 6.0542 & 8.1913 & 8.2907 \\ 11.0354 & 8.1700 & 8.0960 & 8.2303 & 8.0422 & 6.3484 & 8.2907 \\ 11.0354 & 8.1700 & 8.0960 & 8.2303 & 8.0422 & 8.1913 & 7.1332 \end{bmatrix}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για τη συγκεκριμένη ροή φορτίου, τα σφάλματα στον υπολογισμό των όρων ευαισθησίας ενεργού ισχύος κυμαίνονται από 5.5710 (%) έως 11.0354 (%). Αντίστοιχα, τα

σφάλματα στον υπολογισμό των όρων ευαισθησίας ενεργού ισχύος κυμαίνονται από 6.0542(%) έως 11.0354 (%). Παρατηρείται ότι τα σφάλματα των πινάκων 3. 15,3. 16, πέραν των διαγώνιων στοιχείων, είναι μεταξύ τους ίσα.

3.4.4: Συμπεράσματα

Παρατηρείται ότι και στα δύο παραδείγματα, τα μεγαλύτερα στοιχεία στους θεωρητικούς πίνακες ευαισθησίας είναι τα διαγώνια, που ονομάζονται αυτοευαισθησίες. Είναι λογικό το γεγονός ότι τα στοιχεία αυτά είναι μεγαλύτερα, καθώς, αντιστοιχούν στα μεγαλύτερα δυνατά κοινά μονοπάτια, που είναι τα συντομότερα μονοπάτια από τον ζυγό αναφοράς προς τα φορτία, όπως φαίνονται αντίστοιχα για τα δύο παραδείγματα στους Πίνακες 3. 1 και 3. 5. Άρα, όλες οι τιμές ευαισθησίας που αντιστοιχούν σε ένα φορτίο θα είναι μικρότερες ή ίσες με την αντίστοιχη τιμή αυτοευαισθησίας. Πρακτικά, η αυτοευαισθησία ενός κόμβου δείχνει πώς επηρεάζεται η τάση σε έναν κόμβο φορτίου εάν μεταβληθεί το φορτίο στον ίδιο κόμβο. Αυτός είναι ο λόγος που και στους πίνακες ευαισθησίας που προκύπτουν από τον πίνακα Jacobian οι όροι με τις μεγαλύτερες τιμές ανά φορτίο είναι οι αυτοευαισθησίες.

Όσον αφορά τα σφάλματα μεταξύ των όρων ευαισθησίας, όπως προκύπτουν από την Jacobian καθώς και από την θεωρητική μέθοδο για δεδομένη τοπολογία δικτύου, παρατηρείται ότι τα σφάλματα για μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος, πέραν των διαγώνιων στοιχείων, είναι μεταξύ τους ίσα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις αυτοευαισθησίες περιέχονται εκτός από τμήματα μεταξύ πυλώνων, που αποτελούνται από γραμμές ίδιου τύπου, και τμήματα μεταξύ πυλώνων της ΔΕΗ και καταναλωτών που αποτελούνται από γραμμές διαφορετικού είδους. Έτσι, το τμήμα από τον τελευταίο πυλώνα προς τον εκάστοτε καταναλωτή θα έχει διαφορετική αντίσταση κι επαγωγική αντίδραση απ' ό,τι τα υπόλοιπα τμήματα του δικτύου, από την κατάλληλη άθροιση των οποίων προκύπτουν οι μη διαγώνιοι όροι ευαισθησίας με την θεωρητική μέθοδο. Κάποια σφάλματα ξεπερνούν το 10%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο πίνακας Jacobian υπολογίζεται εκ νέου σε κάθε στιγμιότυπο στο οποίο μεταβάλλονται τα φορτία των ζυγών, ενώ ο πίνακας ευαισθησίας που προκύπτει από τη δεδομένη τοπολογία, υπολογίζεται μόνο μία φορά και είναι πάντα ο ίδιος, για τη συγκεκριμένη τοπολογία με τα αντίστοιχα είδη γραμμών. Πιθανώς, η σύγκριση των πινάκων των δύο μεθόδων σε άλλο στιγμιότυπο, μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερα ή μεγαλύτερα σφάλματα.

[11] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [26]

Κεφάλαιο 4:Ανάλυση ευαισθησίας με χρήση δεδομένων των έξυπνων

μετρητών των καταναλωτών

4.1:Εισαγωγή

Τα δίκτυα Χαμηλής Τάσης είναι τα πιο ανεξερεύνητα και χειροκίνητα ελεγχόμενα στοιχεία του ηλεκτρικού δικτύου. Η πληροφορία για την τοπολογία του δικτύου συχνά δεν είναι διαθέσιμη. Η μοναδική πληροφορία που είναι διαθέσιμη για τα δίκτυα Χαμηλής Τάσης περιορίζεται συνήθως σε ποιον καταναλωτή συνδέεται ο κάθε έξυπνος μετρητής. Επίσης, συνήθως αγνοούνται τόσο τα ακριβή μήκη μεταξύ των κατοικιών όσο και τα μήκη μεταξύ καταναλωτών και υποσταθμών. Επιπλέον, συνήθως δεν είναι γνωστή η φάση στην οποία συνδέεται κάθε κατοικία. Αυτές οι πληροφορίες σχετικά με την τοπολογία του δικτύου είναι απαραίτητες για την εφαρμογή τόσο της κλασικής θεωρίας ευαισθησίας που βασίζεται στη μήτρα Jacobian, όσο και της θεωρίας ευαισθησίας για δεδομένη τοπολογία, που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για αυτούς τους λόγους, σε αυτό το κεφάλαιο προτείνεται μέθοδος υπολογισμού του πίνακα ευαισθησίας βασιζόμενη σε πραγματικές μετρήσεις που λαμβάνονται από έξυπνους μετρητές που είναι συνδεδεμένοι στους καταναλωτές.

Ωστόσο, λόγω της μη γραμμικής σχέσης μεταξύ τάσης και ισχύος, είναι σημαντική η κατασκευή γραμμικού μοντέλου υπολογισμού των όρων ευαισθησίας. Η μη γραμμική αυτή εξάρτηση μεταξύ της τάσης ενός καταναλωτή και των προφίλ ισχύος των καταναλωτών στην Χαμηλή Τάση αναπαρίσταται από τη σχέση:

$$V_i^{(k)} = f(V_0^{(k)}, P^{(k)}, Q^{(k)}) \quad (4.1.1)$$

όπου: $V_i^{(k)}$: το μέτρο της τάσης στον ζυγό i κατά το στιγμιότυπο k

$V_0^{(k)}$: το μέτρο της τάσης στον ζυγό του μετασχηματιστή κατά το στιγμιότυπο k

$P^{(k)}$: το διάνυσμα με την κατανάλωση ενεργού ισχύος όλων των καταναλωτών κατά το στιγμιότυπο k

$Q^{(k)}$: το διάνυσμα με την κατανάλωση αέργου ισχύος όλων των καταναλωτών κατά το στιγμιότυπο k

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάστηκε η θεωρητική προσέγγιση ευαισθησίας, όταν είναι γνωστή η τοπολογία του δικτύου. Σε αυτό το κεφάλαιο, εξετάζεται η περίπτωση που δεν είναι γνωστή η τοπολογία του δικτύου, αλλά είναι δεδομένες οι μετρήσεις από τους έξυπνους μετρητές των καταναλωτών. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται μοντέλο υπολογισμού του πειραματικού πίνακα ευαισθησίας, ο οποίος συγκρίνεται στη συνέχεια με τον θεωρητικό πίνακα ευαισθησίας.

Έστω N το πλήθος των ζυγών του συστήματος και M το πλήθος των ζυγών φορτίου.

Τόσο από την κλασική θεωρία ευαισθησίας(βλ.σχέση (3.2.12)),όσο και από την θεωρία ευαισθησίας (βλ.σχέση (3.3.25)) για δεδομένη τοπολογία,οι τάσεις των ζυγών του δικτύου προκύπτουν από τη μητρική σχέση:

$$[\Delta V] = [s_p][\Delta P] + [s_Q][\Delta Q] \quad (4.1.2)$$

όπου: $[\Delta V]$: ο πίνακας των τιμών των στοιχειωδών μεταβολών τάσης στους ζυγούς φορτίου,λόγω μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου,διαστάσεων $(M \times 1)$

$[s_p]$: ο πίνακας ευαισθησίας λόγω των μεταβολών ενεργού ισχύος στους ζυγούς φορτίου , διαστάσεων $(M \times M)$

$[\Delta P]$: ο πίνακας των τιμών των στοιχειωδών μεταβολών ενεργού ισχύος στους ζυγούς φορτίου, διαστάσεων $(M \times 1)$

$[s_Q]$: ο πίνακας ευαισθησίας λόγω των μεταβολών αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου , διαστάσεων $(M \times M)$

$[\Delta Q]$: ο πίνακας των τιμών των στοιχειωδών μεταβολών αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου, διαστάσεων $(M \times 1)$

Έτσι,θεωρείται ότι η επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων του συστήματος (4.1.1) ,και πιο συγκεκριμένα η εύρεση των όρων ευαισθησίας,μπορεί να προσεγγιστεί απ' το παραπάνω γραμμικό σύστημα εξισώσεων (4.1.2).

Ακολούθως,παρουσιάζεται η προτεινόμενη μέθοδος για τον υπολογισμό του πειραματικού πίνακα ευαισθησίας,τόσο στην περίπτωση μόνο μεταβολών ενεργού ισχύος στους ζυγούς φορτίου του δικτύου,όσο και στην περίπτωση μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου.

4.2:Μεταβολές μόνο ενεργού ισχύος στους ζυγούς φορτίου

Σε αυτή την περίπτωση,έχει θεωρηθεί ότι στα στιγμιότυπα που εξετάζονται,η άεργος ισχύς παραμένει σταθερή,κι επομένως, δεν υπάρχουν μεταβολές αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου.Έτσι,οι μεταβολές της τάσης θα οφείλονται αποκλειστικά σε μεταβολές της ενεργού ισχύος στους ζυγούς φορτίου.Δηλαδή,έχει θεωρηθεί ότι στα διάφορα στιγμιότυπα,για κάθε ζυγό φορτίου ισχύει:

$$QLoads(i)^{(k)} = QLoads(i)^{(Initial)} \leftrightarrow$$

$$PLoads(i)^{(k)} \cdot \tan(\varphi_i^{(k)}) = PLoads(i)^{(Initial)} \cdot \tan(\varphi_i^{(Initial)}), i = 1, \dots, M, \quad (4.2.1)$$

όπου $QLoads(i)$:η μέτρηση αέργου ισχύος που λαμβάνεται στο αντίστοιχο στιγμιότυπο μετρήσεων για το φορτίο i

$PLoads(i)$: η μέτρηση ενεργού ισχύος που λαμβάνεται στο αντίστοιχο στιγμιότυπο μετρήσεων για το φορτίο i

$\tan(\varphi_i)$: η εφαπτομένη της γωνίας του συντελεστή ισχύος του φορτίου i στο αντίστοιχο στιγμιότυπο μετρήσεων

Initial: το στιγμιότυπο από το οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις αναφοράς

k : το k -οστό στιγμιότυπο μετρήσεων

Σε αυτή την περίπτωση, από την εξίσωση (4.1.2) προκύπτει ότι το προς επίλυση σύστημα για ένα στιγμιότυπο μετρήσεων είναι το εξής:

$$[\Delta V] = [s_p][\Delta P] \quad (4.2.2)$$

το οποίο αποτελείται από M εξισώσεις της μορφής:

$$\Delta V_i^{(k)} = \sum_{j=1}^M s_p(i, j) \cdot \Delta P_j^{(k)}, i = 1, \dots, M \quad (4.2.3)$$

Από την προτεινόμενη θεωρητική ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου, προκύπτει ότι ο θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας είναι συμμετρικός. Βάσει αυτού, αν υποθεθεί ότι και ο πειραματικός πίνακας ευαισθησίας θα προκύπτει συμμετρικός, για να προσδιοριστεί πλήρως ο συγκεκριμένος πίνακας από την επίλυση του γραμμικού συστήματος (4.1.2), αρκούν $M(M + 1)/2$ εξισώσεις της μορφής (4.2.3), δηλαδή $M(M + 1)/2$ στιγμιότυπα μετρήσεων. Αυτό εξηγείται ως εξής: ο πίνακας ευαισθησίας είναι διαστάσεων $M \times M$ κι επομένως περιέχει M^2 στοιχεία συνολικά. Λόγω συμμετρίας του άνω με το κάτω μέρος της διαγωνίου, οι άγνωστοι θα είναι ίσοι με το άθροισμα του πλήθους των στοιχείων της διαγωνίου, M , και του πλήθους των στοιχείων του άνω μέρους του πίνακα. Αυτό το άθροισμα είναι στην ουσία μία αριθμητική πρόοδος με πρώτο στοιχείο το 1, δηλαδή συνολικά, το πλήθος των άγνωστων στοιχείων θα είναι $M(M + 1)/2$.

Πρακτικά όμως, για ένα δίκτυο N ζυγών και M ζυγών φορτίου, ο πίνακας ευαισθησίας δεν προκύπτει συμμετρικός, παρότι οι τιμές των συμμετρικών στοιχείων του $s_p(i, j), s_p(j, i)$ είναι πολύ κοντά. Καθώς δεν υπάρχει κάποιο κριτήριο που να εξασφαλίζει την συμμετρία του πίνακα ευαισθησίας, λαμβάνοντας πραγματικές μετρήσεις από έξυπνους μετρητές, αυτή η υπόθεση απορρίφθηκε.

Εφόσον ο πίνακας ευαισθησίας δεν είναι συμμετρικός, για τον προσδιορισμό του απαιτούνται M^2 εξισώσεις, όσες και τα στοιχεία του. Επειδή από ένα στιγμιότυπο μετρήσεων προκύπτουν μόνο M εξισώσεις, όσες και οι ζυγοί φορτίου, χρειάζονται πλέον M στιγμιότυπα μετρήσεων από έξυπνους μετρητές, το καθένα απ'τα οποία θα δίνει M εξισώσεις. Από τις M^2 αυτές μετρήσεις, για τον προσδιορισμό κάθε γραμμής αγνώστων του πίνακα ευαισθησίας επιλέγονται οι M μετρήσεις που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο ζυγό φορτίου. Έτσι, ο πίνακας ευαισθησίας θα προκύψει από την επίλυση M συστημάτων M εξισώσεων, που η κάθε μία είναι της μορφής (4.2.2):

$$\Delta V_i^{(k)} = \sum_{j=1}^M s_p(i, j) \cdot \Delta P_j, i = 1, \dots, M, k = 1, \dots, M \quad (4.2.4)$$

όπου k : το αντίστοιχο k -οστό στιγμιότυπο μετρήσεων

Για κάθε γραμμή του πίνακα ευαισθησίας επιλύεται το εξής σύστημα (4.2.5):

$$\begin{aligned}
\mathbf{1)} \Delta V_1^{(1)} &= s_P(1,1) \cdot \Delta P_1^{(1)} + s_P(1,2) \cdot \Delta P_2^{(1)} + \dots + s_P(1,M-1) \cdot \Delta P_{M-1}^{(1)} + s_P(1,M) \cdot \Delta P_M^{(1)} \\
\mathbf{2)} \Delta V_1^{(2)} &= s_P(1,1) \cdot \Delta P_1^{(2)} + s_P(1,2) \cdot \Delta P_2^{(2)} + \dots + s_P(1,M-1) \cdot \Delta P_{M-1}^{(2)} + s_P(1,M) \cdot \Delta P_M^{(2)} \\
&\vdots \\
\mathbf{M)} \Delta V_1^{(M)} &= s_P(1,1) \cdot \Delta P_1^{(M)} + s_P(1,2) \cdot \Delta P_2^{(M)} + \dots + s_P(1,M-1) \cdot \Delta P_{M-1}^{(M)} + s_P(1,M) \cdot \Delta P_M^{(M)}
\end{aligned}$$

Έστω οι πίνακες:

$$[\Delta Pmatrix] = \begin{bmatrix} \Delta P_1^{(1)} & \Delta P_2^{(1)} & \dots & \Delta P_{M-1}^{(1)} & \Delta P_M^{(1)} \\ \Delta P_1^{(2)} & \Delta P_2^{(2)} & \dots & \Delta P_{M-1}^{(2)} & \Delta P_M^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \Delta P_1^{(M)} & \Delta P_2^{(M)} & \dots & \Delta P_{M-1}^{(M)} & \Delta P_M^{(M)} \end{bmatrix}_{(M \times M)} \quad (4.2.6)$$

$$[\Delta Vmatrix_1] = [\Delta V_1^{(1)} \quad \Delta V_1^{(2)} \quad \dots \quad \Delta V_1^{(M)}]_{(M \times 1)}^T \quad (4.2.7)$$

$$[s_{P_1}] = [s_P(1,1) \quad s_P(1,2) \quad \dots \quad s_P(1,M-1) \quad s_P(1,M)]_{(M \times 1)}^T \quad (4.2.8)$$

Τότε, το σύστημα (4.2.5) γράφεται σε μητρική μορφή:

$$[\Delta Pmatrix][s_{P_1}] = [\Delta Vmatrix_1] \leftrightarrow [s_{P_1}] = [\Delta Pmatrix]^{-1}[\Delta Vmatrix_1] \quad (4.2.9)$$

και γενικά, για οποιονδήποτε ζυγό φορτίου i :

$$[\Delta Pmatrix][s_{P_i}] = [\Delta Vmatrix_i] \leftrightarrow [s_{P_i}] = [\Delta Pmatrix]^{-1}[\Delta Vmatrix_i], \quad i = 1, \dots, M \quad (4.2.10)$$

Σημειώνεται ότι η μήτρα $\Delta Pmatrix$ είναι αντιστρέψιμη, καθώς οι μετρήσεις ενεργού ισχύος των διαφόρων σιγμιοτύπων είναι γραμμικώς ανεξάρτητες μεταξύ τους.

Η συγκεκριμένη υπόθεση έχει νόημα, αν ληφθεί υπόψιν η σχετικά υψηλή αναλογία R/X στα Δίκτυα Διανομής Χαμηλής Τάσης. Λόγω του μεγάλου αυτού λόγου, η επαγωγική αντίδραση είναι αμελητέα σε σχέση με την αντίσταση, και ως αποτέλεσμα, οι όροι του πίνακα $[s_{Q-real}]$ αναμένεται να έχουν αμελητέα επίδραση σε σχέση με τους όρους του πίνακα $[s_{P-real}]$ στη μεταβολή της τάσης. Έτσι, πιθανή μεταβολή αέργου ισχύος σε έναν ζυγό αναμένεται να μην επιφέρει σημαντική μεταβολή της τάσης. Επομένως, στη ΧΤ, θεωρητικά, ενδιαφέρουν περισσότερο οι όροι ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος.

4.3:Μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου

Σε αυτή την περίπτωση,υποτίθεται ότι υπάρχουν μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου του δικτύου.

Για τις τάσεις των ζυγών του συστήματος ισχύει η (4.1.2): $[\Delta V] = [s_P][\Delta P] + [s_Q][\Delta Q]$

Όπως προαναφέρθηκε,από κάθε στιγμιότυπο μετρήσεων προκύπτουν M εξισώσεις.Για κάθε εξίσωση ενός στιγμιότυπου,της μορφής :

$$\Delta V_i^{(k)} = \sum_{j=1}^M s_P(i,j) \cdot \Delta P_j^{(k)} + \sum_{j=1}^M s_Q(i,j) \cdot \Delta Q_j^{(k)}, i = 1, \dots, M \quad (4.3.1)$$

προκύπτουν $2M$ άγνωστοι.Οι M άγνωστοι κάθε γραμμής αντιστοιχούν στα στοιχεία ευαισθησίας $s_P(i,j)$ του πρώτου πίνακα ευαισθησίας $[s_P]$ και οι υπόλοιποι M άγνωστοι στα στοιχεία ευαισθησίας $s_Q(i,j)$ του πίνακα ευαισθησίας $[s_Q]$. Επομένως,για τον υπολογισμό των στοιχείων μίας γραμμής,που περιέχει M στοιχεία των πινάκων ευαισθησίας $[s_P]$ και $[s_Q]$ αντίστοιχα,απαιτούνται $2M$ εξισώσεις,μία από κάθε στιγμιότυπο,και όλες θα αφορούν στον ίδιο ζυγό.Άρα,για τον προσδιορισμό όλων των στοιχείων τους,χρειάζονται συνολικά $2M$ στιγμιότυπα, M εξισώσεων το καθένα.Επομένως,χρειάζονται $2M^2$ εξισώσεις συνολικά,της μορφής:

$$\Delta V_i^{(k)} = \sum_{j=1}^M s_P(i,j) \cdot \Delta P_j^{(k)} + \sum_{j=1}^M s_Q(i,j) \cdot \Delta Q_j^{(k)}, i = 1, \dots, M, k = 1, \dots, 2M \quad (4.3.2)$$

Δηλαδή,για κάθε γραμμή του πίνακα ευαισθησίας επιλύεται το εξής σύστημα εξισώσεων (4.3.3):

$$\mathbf{1)} \Delta V_1^{(1)} = s_P(1,1) \cdot \Delta P_1^{(1)} + s_P(1,2) \cdot \Delta P_2^{(1)} + \dots + s_P(1,M-1) \cdot \Delta P_{M-1}^{(1)} + s_P(1,M) \cdot \Delta P_M^{(1)} + s_Q(1,1) \cdot \Delta Q_1^{(1)} + s_Q(1,2) \cdot \Delta Q_2^{(1)} + \dots + s_Q(1,M-1) \cdot \Delta Q_{M-1}^{(1)} + s_Q(1,M) \cdot \Delta Q_M^{(1)}$$

$$\mathbf{2)} \Delta V_1^{(2)} = s_P(1,1) \cdot \Delta P_1^{(2)} + s_P(1,2) \cdot \Delta P_2^{(2)} + \dots + s_P(1,M-1) \cdot \Delta P_{M-1}^{(2)} + s_P(1,M) \cdot \Delta P_M^{(2)} + s_Q(1,1) \cdot \Delta Q_1^{(2)} + s_Q(1,2) \cdot \Delta Q_2^{(2)} + \dots + s_Q(1,M-1) \cdot \Delta Q_{M-1}^{(2)} + s_Q(1,M) \cdot \Delta Q_M^{(2)}$$

⋮

$$\mathbf{2M)} \Delta V_1^{(2M)} = s_P(1,1) \cdot \Delta P_1^{(2M)} + s_P(1,2) \cdot \Delta P_2^{(2M)} + \dots + s_P(1,M-1) \cdot \Delta P_{M-1}^{(2M)} + s_P(1,M) \cdot \Delta P_M^{(2M)} + s_Q(1,1) \cdot \Delta Q_1^{(2M)} + s_Q(1,2) \cdot \Delta Q_2^{(2M)} + \dots + s_Q(1,M-1) \cdot \Delta Q_{M-1}^{(2M)} + s_Q(1,M) \cdot \Delta Q_M^{(2M)}$$

Έστω οι πίνακες:

$$[\Delta Pmatrix] = \begin{bmatrix} \Delta P_1^{(1)} & \Delta P_2^{(1)} & \dots & \Delta P_{M-1}^{(1)} & \Delta P_M^{(1)} \\ \Delta P_1^{(2)} & \Delta P_2^{(2)} & \dots & \Delta P_{M-1}^{(2)} & \Delta P_M^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \Delta P_1^{(2M)} & \Delta P_2^{(2M)} & \dots & \Delta P_{M-1}^{(2M)} & \Delta P_M^{(2M)} \end{bmatrix}_{(2M \times M)} \quad (4.3.4)$$

$$[\Delta Qmatrix] = \begin{bmatrix} \Delta Q_1^{(1)} & \Delta Q_2^{(1)} & \dots & \Delta Q_{M-1}^{(1)} & \Delta Q_M^{(1)} \\ \Delta Q_1^{(2)} & \Delta Q_2^{(2)} & \dots & \Delta Q_{M-1}^{(2)} & \Delta Q_M^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \Delta Q_1^{(2M)} & \Delta Q_2^{(2M)} & \dots & \Delta Q_{M-1}^{(2M)} & \Delta Q_M^{(2M)} \end{bmatrix}_{(2M \times M)} \quad (4.3.5)$$

Τότε ορίζεται ο πίνακας $PQmatrix$:

$$[PQmatrix] = [\Delta Pmatrix \quad \Delta Qmatrix]_{(2M \times 2M)} \quad (4.3.6)$$

$$[\Delta Vmatrix_1] = [\Delta V_1^{(1)} \quad \Delta V_1^{(2)} \quad \dots \quad \Delta V_1^{(2M)}]_{(2M \times 1)}^T \quad (4.3.7)$$

$$[s_{PQ_1}] = [s_P(1,1) \quad s_P(1,2) \quad \dots \quad s_P(1,M) \quad s_Q(1,1) \quad s_Q(1,2) \quad \dots \quad s_Q(1,M)]_{(2M \times 1)}^T \quad (4.3.8)$$

Τότε, το σύστημα (4.3.3) γράφεται σε μητρική μορφή:

$$[PQmatrix] [s_{PQ_1}] = [\Delta Vmatrix_1] \quad (4.3.9)$$

και γενικά, για οποιονδήποτε ζυγό φορτίου i :

$$[PQmatrix] [s_{PQ_i}] = [\Delta Vmatrix_i] \quad , i = 1, \dots, M \quad (4.3.10)$$

Για να επιλυθεί το γραμμικό σύστημα της μορφής (4.3.10), πρέπει ο πίνακας $PQmatrix$ να είναι αντιστρέψιμος. Καθώς ο $PQmatrix$ είναι τετραγωνικός, ισοδύναμα, πρέπει η ορίζουσά του να είναι διάφορη του 0. Ακόμα μία ισοδύναμη έκφραση, με δεδομένο ότι κάθε γραμμή του πίνακα $PQmatrix$ αντιστοιχεί στις μεταβολές ισχύος στους ζυγούς για ένα στιγμιότυπο, είναι ότι οι γραμμές του πίνακα πρέπει να είναι γραμμικώς ανεξάρτητες μεταξύ τους. Επομένως, πρέπει να εξασφαλιστεί η γραμμική ανεξαρτησία μεταξύ των μετρήσεων ισχύος των διαφόρων στιγμιοτύπων.

Όπως προαναφέρθηκε, οι πειραματικές τιμές που έχουν χρησιμοποιηθεί δεν αντιστοιχούν σε πραγματικές μετρήσεις έξυπνων μετρητών, αλλά σε τυχαίες κάθε φορά μετρήσεις, όπως προκύπτουν από την προσομοίωση της ροής φορτίου στο MATPOWER. Έτσι, η αρχική τιμή αέργου ισχύος του καταναλωτή i , $QLoads(i)^{(Initial)}$, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$QLoads(i)^{(Initial)} = PLoads(i)^{(Initial)} \cdot \tan(\varphi_i^{(Initial)}) \quad , i = 1, \dots, M \quad (4.3.11)$$

όπου $\varphi_i^{(Initial)}$: η γωνία του συντελεστή ισχύος του ζυγού i κατά το στιγμιότυπο αναφοράς

$PLoads(i)^{(Initial)}$: η αρχική τιμή ενεργού ισχύος του καταναλωτή i

Αντίστοιχα,για την ισχύ ενός ζυγού i σε κάποιο στιγμιότυπο k ισχύει ότι:

$$QLoads(i)^{(k)} = PLoads(i)^{(k)} \cdot \tan(\varphi_i^{(k)}), i = 1, \dots, M, k = 1, \dots, 2M \quad (4.3.12)$$

Δηλαδή,δεδομένης της ενεργού ισχύος και του συντελεστή ισχύος του ζυγού φορτίου που εξετάζεται,υπολογίζεται η αντίστοιχη άεργος ισχύς.

Οι μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος σε κάθε στιγμιότυπο μετρήσεων k , για τον ζυγό φορτίου i , προκύπτουν σε σχέση με την ισχύ αναφοράς ως εξής:

$$\Delta P_i^{(k)} = PLoads(i)^{(k)} - PLoads(i)^{(Initial)} \quad (4.3.13)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = QLoads(i)^{(k)} - QLoads(i)^{(Initial)} \quad (4.3.14)$$

Πλέον διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

- 1) οι συντελεστές ισχύος στους ζυγούς φορτίου παραμένουν σταθεροί ανά στιγμιότυπο
- 2) οι συντελεστές ισχύος στους ζυγούς φορτίου μεταβάλλονται ανά στιγμιότυπο

1) Οι συντελεστές ισχύος στους ζυγούς φορτίου παραμένουν σταθεροί

Σε αυτή την περίπτωση,ισχύει ότι:

$$\forall k: \varphi_i^{(k)} = \varphi_i^{(Initial)} \leftrightarrow \cos(\varphi_i^{(k)}) = \cos(\varphi_i^{(Initial)}) \quad (4.3.15)$$

Παρατηρείται,επομένως,ότι εάν εξετάζονται στιγμιότυπα στα οποία ο συντελεστής ισχύος διατηρείται σταθερός,θα υπάρχει γραμμική εξάρτηση μεταξύ των τιμών ισχύος των ζυγών,για τα διάφορα στιγμιότυπα μετρήσεων,λόγω της σχέσης (4.3.12).Σε αυτή την περίπτωση,ο πίνακας $PQmatrix$ δεν είναι αντιστρέψιμος ($\det(PQmatrix) = 0$),άρα το σύστημα (4.3.10) δεν έχει μοναδική λύση. Έτσι, επιλέγονται γραμμικώς ανεξάρτητα μεταξύ τους στιγμιότυπα.

2) Οι συντελεστές ισχύος στους ζυγούς φορτίου μεταβάλλονται ανά στιγμιότυπο

Για να είναι αντιστρέψιμος ο πίνακας $PQmatrix$,πρέπει οι μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος στους κόμβους καταναλωτών να είναι γραμμικώς ανεξάρτητες μεταξύ τους,για τα διάφορα στιγμιότυπα μετρήσεων.Επομένως,πρέπει σε κάθε στιγμιότυπο μετρήσεων,με δεδομένη την ενεργό ισχύ των ζυγών, να μεταβάλλεται ο συντελεστής ισχύος του κάθε ζυγού,σε σχέση με τον αντίστοιχο συντελεστή στα υπόλοιπα στιγμιότυπα. Σε αυτή την περίπτωση, ο πίνακας $PQmatrix$ θα είναι αντιστρέψιμος ($\det(PQmatrix) \neq 0$),οπότε το σύστημα της μορφής (4.3.10) θα έχει μοναδική λύση,της μορφής:

$$[s_{PQ}] = [PQmatrix]^{-1}[\Delta Vmatrix_i], i = 1, \dots, M \quad (4.3.16)$$

Μόλις επιλυθεί το γραμμικό σύστημα (4.3.10) για κάθε ζυγό φορτίου του δικτύου,σύμφωνα με την (4.3.16),θα προκύψει ο συνολικός πειραματικός πίνακας ευαισθησίας του δικτύου:

$$[s_{PQreal}] = \begin{bmatrix} SPQ_1 \\ SPQ_2 \\ \vdots \\ SPQ_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_p(1,1) & s_p(1,2) & \dots & s_p(1,M) & s_Q(1,1) & s_Q(1,2) & \dots & s_Q(1,M) \\ s_p(2,1) & s_p(2,2) & \dots & s_p(2,M) & s_Q(2,1) & s_Q(2,2) & \dots & s_Q(2,M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_p(M,1) & s_p(M,2) & \dots & s_p(M,M) & s_Q(M,1) & s_Q(M,2) & \dots & s_Q(M,M) \end{bmatrix}, (4.3.17)$$

Ο πίνακας (4.3.17) έχει διαστάσεις $(M \times 2M)$, και περιέχει τόσο τους όρους ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος όσο και τους όρους ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου στους ζυγούς φορτίου.

Ο πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος προκύπτει από τον πίνακα (4.3.17) ως εξής:

$$[s_{P-real}] = [s_{PQreal}(1 \dots M, 1 \dots M)] = \begin{bmatrix} s_p(1,1) & s_p(1,2) & \dots & s_p(1,M) \\ s_p(2,1) & s_p(2,2) & \dots & s_p(2,M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_p(M,1) & s_p(M,2) & \dots & s_p(M,M) \end{bmatrix}_{(M \times M)} \quad (4.3.18)$$

ενώ ο πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος είναι ο εξής:

$$[s_{Q-real}] = [s_{PQreal}(1 \dots M, M+1 \dots 2M)] = \begin{bmatrix} s_Q(1,1) & s_Q(1,2) & \dots & s_Q(1,M) \\ s_Q(2,1) & s_Q(2,2) & \dots & s_Q(2,M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_Q(M,1) & s_Q(M,2) & \dots & s_Q(M,M) \end{bmatrix}_{(M \times M)} \quad (4.3.19)$$

4.4:Υποθέσεις

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, από τους έξυπνους μετρητές των καταναλωτών λαμβάνονται συνήθως μόνο μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας, από τις οποίες μπορεί να ληφθεί η ισχύς. Ωστόσο, είναι δυνατή και η λήψη επιπρόσθετων μετρήσεων, όπως μετρήσεων τάσης, με μεγαλύτερο όμως κόστος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι πειραματικές τιμές που έχουν χρησιμοποιηθεί δεν αντιστοιχούν σε πραγματικά δεδομένα έξυπνων μετρητών δικτύων Χαμηλής Τάσης, αλλά σε μετρήσεις, όπως προκύπτουν από την προσομοίωση της ροής φορτίου στο MATPOWER. Υποτίθεται ότι λαμβάνονται μετρήσεις τάσης, ενεργού και αέργου ισχύος σε κάθε στιγμιότυπο μετρήσεων.

Λόγω της σχετικά υψηλής αναλογίας R/X στα Δίκτυα Διανομής Χαμηλής Τάσης, η μέθοδος Newton-Raphson δεν είναι κατάλληλη για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου. Όμως, λόγω έλλειψης πραγματικών δεδομένων, για την προσομοίωση της ροής φορτίου σε δίκτυο ΧΤ επιλέγεται ο προκαθορισμένος τρόπος επίλυσης του προβλήματος ροής φορτίου στο MATPOWER, που είναι η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson, με γραμμές που αντιστοιχούν σε δίκτυα ΧΤ. Αυτές οι μετρήσεις θεωρείται ότι προσομοιώνουν ικανοποιητικά τις πραγματικές.

Τα δίκτυα ΧΤ που συναντώνται συχνότερα είναι τριφασικά, ασύμμετρα, ακτινικά δίκτυα. Η σύνδεση μονοφασικών καταναλωτών στα δίκτυα ΧΤ καθιστούν τα δίκτυα εκ φύσεως ασύμμετρα. Ωστόσο, στην

παρούσα ανάλυση, στην προσομοίωση ροής φορτίου στο MATPOWER, αναλύονται μονοφασικά δίκτυα ΧΤ.

Ακόμη, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, σε σταθερή κατάσταση, διατηρώντας την τάση στον ζυγό αναφοράς ίση με την ονομαστική, επιτυγχάνεται απόζευξη μεταξύ των διαφορετικών αναχωρήσεων γραμμών από τον ζυγό αναφοράς. Ως αποτέλεσμα, κάθε αναχώρηση λειτουργεί χωρίς την επίδραση από άλλες γραμμές. Έτσι, τα φορτία και οι γεννήτριες που συνδέονται σε άλλες αναχωρήσεις γραμμών, δεν επηρεάζουν τις τάσεις του δικτύου της γραμμής που εξετάζεται, δηλαδή, οι ζυγοί φορτίου μιας αναχώρησης δεν παρουσιάζουν «ευαισθησία» ως προς τις μεταβολές φορτίου σε άλλες αναχωρήσεις.

Στην μελέτη θεωρείται ότι οι μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος που λαμβάνονται υπόψιν στον υπολογισμό των όρων ευαισθησίας, είναι αρκετά μικρές. Τα όρια στα οποία οι ευαισθησίες φτάνουν στη μη γραμμική περιοχή δεν είναι γνωστά, και αποτελεί αντικείμενο μελέτης του κάθε δικτύου ξεχωριστά. Ωστόσο, θεωρείται ότι μικρές μεταβολές ισχύος εξασφαλίζουν τη γραμμική προσεγγιστική σχέση μεταξύ της τάσης κάποιου ζυγού φορτίου και τις καταναλώσεις ισχύος όλων των ζυγών φορτίου (4.1.2).

Πιο συγκεκριμένα, η ενεργός ισχύς των καταναλωτών κατά το στιγμιότυπο αναφοράς έχει θεωρηθεί ότι κυμαίνεται από 4 έως 8 kW:

$$4kW \leq PLoads(i)^{(Initial)} \leq 8kW \quad (4.4.1)$$

ενώ οι αντίστοιχοι συντελεστές ισχύος από 0.85 έως 0.9 επαγωγικοί :

$$0.85 \leq \cos(\varphi_i^{(Initial)}) \leq 0.9 \quad (4.4.2)$$

και από τη σχέση (4.3.11) υπολογίζεται η άεργος ισχύς του κάθε καταναλωτή κατά το στιγμιότυπο αναφοράς, $QLoads(i)^{(Initial)}$. Σημειώνεται ότι οι μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος, $\Delta P_i^{(k)}$ και $\Delta Q_i^{(k)}$, υποτίθεται ότι είναι αρκετά μικρές, ώστε να μην ξεπερνούν οι ευαισθησίες τα όρια της γραμμικής περιοχής. Έτσι, έχει υποτεθεί πως η ενεργός ισχύς στους ζυγούς φορτίου μπορεί να μεταβληθεί το πολύ κατά $\pm 500 W$:

$$|\Delta P_i^{(k)}| \leq 500 W \quad (4.4.3)$$

ενώ ο συντελεστής ισχύος σε κάθε καταναλωτή μεταβάλλεται από στιγμιότυπο σε στιγμιότυπο μετρήσεων μεταξύ 0.85 και 0.9 (επαγωγικοί), λόγω των μεταβολών ενεργού ισχύος:

$$0.85 \leq \cos(\varphi_i^{(k)}) \leq 0.9 \quad (4.4.4)$$

Επομένως, από τη σχέση (4.3.13) υπολογίζεται η ενεργός ισχύς κάθε καταναλωτή i στο στιγμιότυπο k :

$$PLoads(i)^{(k)} = \Delta P_i^{(k)} + PLoads(i)^{(Initial)} \quad (4.4.5)$$

και από τη σχέση (4.3.12) υπολογίζεται η άεργος ισχύς του κάθε ζυγού σε κάθε στιγμιότυπο, $QLoads(i)^{(k)}$. Από τη σχέση (4.3.14) υπολογίζονται πλέον οι μεταβολές αέργου σε κάθε στιγμιότυπο $\Delta Q_i^{(k)}$. Έτσι, προκύπτουν οι μετρήσεις μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος που χρησιμοποιούνται

για τον υπολογισμό του πειραματικού πίνακα ευαισθησίας. Σημειώνεται ότι στα δίκτυα που εξετάζονται έχει επιλεγεί βασική τάση: $V_b = 400V$, και βασική ισχύς: $S_b = 1MVA$.

Ένα σημαντικό ζήτημα που εμφανίζεται, τόσο στην πραγματικότητα, όσο και στην προσομοίωση, είναι η επιλογή των κατάλληλων δεδομένων μεταξύ του πολύ μεγάλου πλήθους των διαθέσιμων. Στα επόμενα κεφάλαια, από τον πειραματικό πίνακα ευαισθησίας γίνεται προσπάθεια εξαγωγής της τοπολογίας του δικτύου. Δεδομένης της σχέσης, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μεταξύ του πίνακα ευαισθησίας και της τοπολογίας του δικτύου, είναι ιδιαίτερα σημαντική η επιλογή των κατάλληλων δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν, ώστε μέσα από αυτά να προκύψει η σωστή τοπολογία. Στην πραγματικότητα, δεν υπάρχει κάποιος τρόπος επιλογής των «σωστών» δεδομένων και είναι αντικείμενο μελέτης.

Ωστόσο, καθαρά για λόγους προσομοίωσης και καλύτερης προσέγγισης στην παρούσα εργασία, καθώς δεν έχουν ληφθεί πραγματικά δεδομένα, από το σύνολο των μετρήσεων της προσομοίωσης επιλέγονται τα κατάλληλα στιγμιότυπα ως εξής:

Το δείγμα των στιγμιότυπων επιλέγεται να είναι αρκετά μεγάλο. Συμβατικά, στην προτεινόμενη μέθοδο, από τη ροή φορτίου στο MATPOWER λαμβάνονται $L = N^2$ στιγμιότυπα. Έπειτα, βάσει της προτεινόμενης θεωρίας του προηγούμενου κεφαλαίου με δεδομένη την τοπολογία του δικτύου, για L στιγμιότυπα, υπολογίζονται οι μεταβολές των τάσεων των ζυγών φορτίου σύμφωνα με τη σχέση (3.3.25):

$$[\Delta V_{matrix_{theor}}] = [s_{Q-theor}][\Delta Q_{matrix}] + [s_{P-theor}][\Delta P_{matrix}] = \begin{bmatrix} \Delta V_{theor}^{(1)} \\ \Delta V_{theor}^{(2)} \\ \vdots \\ \Delta V_{theor}^{(L)} \end{bmatrix}_{(L \times M)} \quad (4.4.6)$$

Επιπλέον, υπολογίζονται και οι μεταβολές των τάσεων των διαφόρων στιγμιότυπων από τις τάσεις του στιγμιότυπου αναφοράς. Οι τάσεις των ζυγών φορτίου, που προσομοιώνουν τις πραγματικές μετρήσεις, λαμβάνονται από την προσομοίωση στο MATPOWER, και πιο συγκεκριμένα από την 8^η στήλη των δεδομένων των ζυγών της δομής των αποτελεσμάτων της ροής φορτίου, για κάθε στιγμιότυπο k :

$$\Delta V_{real}^{(k)} = results^{(k)}.bus(load_{buses}, 8) - results^{(Initial)}.bus(load_{buses}, 8), k = 1, \dots, L \quad (4.4.7)$$

Κάθε διάνυσμα της μορφής (4.4.7) θα είναι διαστάσεων $(1 \times M)$.

Για το σύνολο των στιγμιότυπων, η σχέση (4.4.7) γράφεται σε μητρική μορφή:

$$[\Delta V_{matrix_{real}}] = \begin{bmatrix} \Delta V_{real}^{(1)} \\ \Delta V_{real}^{(2)} \\ \vdots \\ \Delta V_{real}^{(N^2)} \end{bmatrix}_{(N^2 \times M)} \quad (4.4.8)$$

Έπειτα, υπολογίζονται τα σφάλματα των τάσεων, όπως προκύπτουν από τη θεωρητική μέθοδο, ως προς τις μετρούμενες από την προσομοίωση μεταβολές τάσης στους ζυγούς καταναλωτών:

$$error^{(k)} = \frac{|\Delta V_{real}^{(k)} - \Delta V_{theor}^{(k)}|}{\Delta V_{real}^{(k)}} 100\% \quad (4.4.9)$$

Κάθε διάνυσμα της μορφής (4.4.9) θα είναι διαστάσεων $(1 \times M)$.

Για το σύνολο των στιγμιотύπων, η σχέση (4.4.9) γράφεται σε μητρική μορφή:

$$[error_{matrix}] = \begin{bmatrix} error^{(1)} \\ error^{(2)} \\ \vdots \\ error^{(L)} \end{bmatrix}_{(L \times M)} \quad (4.4.10)$$

Στη συνέχεια, από αυτόν τον πίνακα υπολογίζεται το μέγιστο σφάλμα που αντιστοιχεί σε κάθε στιγμιότυπο, $maxerror^{(k)}$, και κατασκευάζεται ένας νέος πίνακας που περιέχει τα μέγιστα σφάλματα:

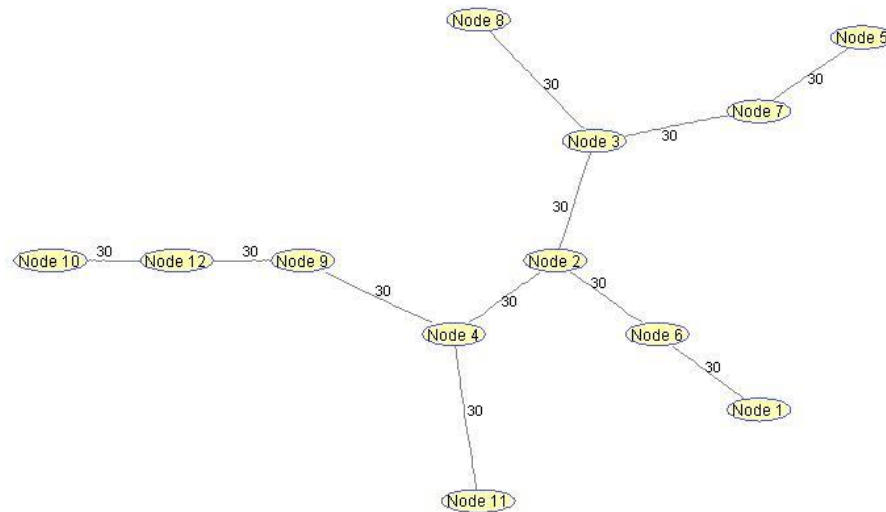
$$[maxerror_{matrix}] = \begin{bmatrix} maxerror^{(1)} \\ maxerror^{(2)} \\ \vdots \\ maxerror^{(L)} \end{bmatrix}_{(L \times 1)} \quad (4.4.11)$$

Για λόγους προσομοίωσης, είναι επιθυμητή η όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση μεταξύ πειραματικού και θεωρητικού πίνακα ευαισθησίας. Αυτή η προσέγγιση είναι χρήσιμη, καθώς μια σημαντική εφαρμογή του πειραματικού πίνακα ευαισθησίας είναι η εύρεση της τοπολογίας του δικτύου Χαμηλής Τάσης από το οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις. Έτσι, δεδομένης της σχέσης μεταξύ τοπολογίας και θεωρητικού πίνακα ευαισθησίας, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, επιλέγονται τα $2M$ στιγμιότυπα με τα μικρότερα σφάλματα από τον πίνακα $maxerror_{matrix}$, που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των όρων ευαισθησίας. Αυτή η επιλογή γίνεται καθαρά για λόγους διευκόλυνσης κι επαλήθευσης της διαδικασίας εύρεσης τοπολογίας από τον πειραματικό πίνακα ευαισθησίας, και σύγκρισής της με την αρχική τοπολογία που προκύπτει από τον κώδικα της MATLAB, και από την οποία προκύπτει ο θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας.

Αυτή η προσέγγιση, βέβαια, δεν έχει πρακτική εφαρμογή στην πραγματικότητα. Ο πειραματικός πίνακας ευαισθησίας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό αγνώστων τοπολογιών, με αποτέλεσμα να μην είναι διαθέσιμος ο θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας και να μην μπορεί να γίνει τέτοια «βολική» επιλογή των στιγμιотύπων.

Παράδειγμα 1

Δίνεται το αρχικό μονοφασικό δίκτυο Χαμηλής Τάσης 12 κόμβων:



Εικόνα 4.1: Τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης 12 κόμβων

που είναι το ίδιο με το δίκτυο του πρώτου παραδείγματος της ενότητας 3.4.3.

Κατά το στιγμιότυπο αναφοράς, η ενεργός και άεργος ισχύς κάθε καταναλωτή είναι:

$$[P_{Loads}^{(Initial)}] = [4.9 \quad 7.5 \quad 7.1 \quad 4.7] \text{ (kW)}$$

$$[Q_{Loads}^{(Initial)}] = [2.6 \quad 4 \quad 3.4 \quad 2.9] \text{ (kVAr)}$$

Οι πίνακες ευαισθησίας που προκύπτουν με τη θεωρητική μέθοδο δεδομένης τοπολογίας είναι οι εξής:

Πίνακας 4. 1: Θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος

$$[S_{P-theor}] = \begin{bmatrix} -0.4718 & -0.1598 & -0.1065 & -0.1065 \\ -0.1598 & -0.4185 & -0.1065 & -0.1065 \\ -0.1065 & -0.1065 & -0.5250 & -0.1598 \\ -0.1065 & -0.1065 & -0.1598 & -0.4185 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

Πίνακας 4. 2: Θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών άεργου ισχύος

$$[S_{Q-theor}] = \begin{bmatrix} -0.0776 & -0.0467 & -0.0311 & -0.0311 \\ -0.0467 & -0.0621 & -0.0311 & -0.0311 \\ -0.0311 & -0.0311 & -0.0932 & -0.0467 \\ -0.0311 & -0.0311 & -0.0467 & -0.0621 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

και οι πίνακες ευαισθησίας που προκύπτουν από τη μήτρα Jacobian είναι οι εξής:

Πίνακας 4. 3: Πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος μέσω Jacobian

$$[S_{P-Jac}] = \begin{bmatrix} 0.5012 & 0.1720 & 0.1158 & 0.1160 \\ 0.1721 & 0.4449 & 0.1158 & 0.1160 \\ 0.1159 & 0.1159 & 0.5569 & 0.1722 \\ 0.1159 & 0.1159 & 0.1719 & 0.4452 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

Πίνακας 4. 4: Πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος μέσω Jacobian

$$[S_{Q-Jac}] = \begin{bmatrix} 0.0829 & 0.0503 & 0.0338 & 0.0339 \\ 0.0503 & 0.0665 & 0.0338 & 0.0339 \\ 0.0339 & 0.0339 & 0.0993 & 0.0503 \\ 0.0339 & 0.0339 & 0.0502 & 0.0665 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

1) Έστω ότι οι μεταβολές αέργου ισχύος είναι μηδενικές κατά τα στιγμιότυπα που εξετάζονται

Σε αυτή την περίπτωση, υποτίθεται ότι λαμβάνονται μετρήσεις από 4 μετρητές για το συγκεκριμένο δίκτυο ΧΤ, άρα υπάρχουν 4 ζυγοί φορτίου. Επομένως, απαιτούνται 4 στιγμιότυπα για τον προσδιορισμό των όρων ευαισθησίας. Έστω ότι, από το σύνολο των μετρήσεων, οι κατάλληλες μετρήσεις τάσης των ζυγών φορτίου που λαμβάνονται από την προσομοίωση στο MATPOWER είναι οι εξής:

$$[\Delta V_{matrix}_{real}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} -0.0296 & -0.0203 & -0.0586 & -0.179 \\ 0.0394 & 0.1172 & 0.1880 & 0.0988 \\ 0.0610 & 0.1299 & 0.2415 & 0.1067 \\ -0.1091 & -0.0966 & -0.1645 & -0.0622 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

όπου η κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα στιγμιότυπο μετρήσεων, ενώ κάθε στήλη αντιστοιχεί σε έναν ζυγό φορτίου, χωρίς να είναι γνωστό σε ποιον ακριβώς. Το μόνο που είναι γνωστό είναι ότι οι μετρήσεις κάθε στήλης αφορούν σε έναν συγκεκριμένο καταναλωτή. Σημειώνεται ότι οι τάσεις δίνονται σε ανά μονάδα τιμές.

Οι μεταβολές ενεργού ισχύος σε ανά μονάδα τιμές για τα αντίστοιχα στιγμιότυπα είναι οι εξής:

$$[\Delta P_{matrix}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0.0400 & 0.0100 & 0.1100 & -0.0100 \\ 0.0800 & -0.2200 & -0.3200 & -0.0900 \\ 0.0500 & -0.2200 & -0.4300 & -0.0600 \\ 0.1400 & 0.1300 & 0.2800 & -0.0200 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

ενώ οι μεταβολές αέργου είναι μηδενικές.

Επομένως, το σύστημα (4.2.10) έχει λύση:

Πίνακας 4. 5: Πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος

$$[S_{P-real}] = \begin{bmatrix} -0.4486 & -0.1526 & -0.1024 & -0.1018 \\ -0.1524 & -0.3982 & -0.1017 & -0.1016 \\ -0.1018 & -0.1018 & -0.5000 & -0.1525 \\ -0.1017 & -0.1018 & -0.1533 & -0.3978 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

ενώ ο πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου δεν υπολογίζεται.

Σύγκριση όρων ευαισθησίας πειραματικής μεθόδου με τους όρους των δύο προηγούμενων μεθόδων

Τα θετικά πρόσημα στους πίνακες ευαισθησίας μέσω Jacobian,έναντι των πινάκων της προτεινόμενης μεθόδου,οφείλονται στο γεγονός ότι στον υπολογισμό της μήτρας Jacobian,σε ακτινικά δίκτυα διανομής, λαμβάνεται υπόψιν μόνο το μέτρο της τάσης.Τα σφάλματα(%)των όρων ευαισθησίας που προκύπτουν με χρήση πειραματικών δεδομένων,ως προς την μέθοδο με Jacobian, και τη θεωρητική μέθοδο δεδομένης τοπολογίας υπολογίζονται ως εξής:

$$error_{jac-real}^P(i,j) = \frac{S_{P-jac}(i,j) - |S_{P-real}(i,j)|}{S_{P-jac}(i,j)} 100\% \quad (4.4.11)$$

$$error_{theor-real}^P(i,j) = \frac{|S_{P-theor}(i,j)| - |S_{P-real}(i,j)|}{|S_{P-theor}(i,j)|} 100\% \quad (4.4.12)$$

Έτσι, αντίστοιχα,προκύπτουν:

Πίνακας 4. 6:Πίνακας σφαλμάτων ευαισθησίας μεταξύ πειραματικής μεθόδου-μεθόδου Jacobian

$$[error_{jac-real}^P] = \begin{bmatrix} 10.4935 & 11.3299 & 11.5921 & 12.2127 \\ 11.4459 & 10.4888 & 12.2132 & 12.3612 \\ 12.2054 & 12.1509 & 10.2063 & 11.4322 \\ 12.2371 & 12.1643 & 10.8490 & 10.6408 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 4. 7:Πίνακας σφαλμάτων ευαισθησίας μεταξύ πειραματικής-θεωρητικής μεθόδου

$$[error_{theor-real}^P] = \begin{bmatrix} 4.8976 & 4.5038 & 3.8563 & 4.4027 \\ 4.5950 & 4.8397 & 4.5317 & 4.5644 \\ 4.4280 & 4.4025 & 4.7566 & 4.5470 \\ 4.4625 & 4.4171 & 4.0477 & 4.9347 \end{bmatrix}$$

2)Έστω ότι υπάρχουν μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος κατά τα στιγμιότυπα που εξετάζονται

Υποτίθεται ότι λαμβάνονται μετρήσεις από 4 μετρητές για το συγκεκριμένο δίκτυο ΧΤ,άρα υπάρχουν 4 ζυγοί φορτίου.Επομένως,απαιτούνται $2 \cdot 4 = 8$ στιγμιότυπα για τον προσδιορισμό των όρων ευαισθησίας.Έστω ότι,από το σύνολο των μετρήσεων,οι κατάλληλες μετρήσεις τάσης των ζυγών φορτίου που λαμβάνονται από την προσομοίωση στο MATPOWER είναι οι εξής:

$$[\Delta V_{matrix_{real}}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} -0.0878 & -0.0759 & -0.1528 & -0.0615 \\ -0.0758 & -0.0755 & -0.0664 & -0.0320 \\ -0.1302 & -0.1770 & -0.3349 & -0.1896 \\ -0.1562 & -0.0693 & -0.1667 & -0.1425 \\ -0.2783 & -0.2969 & -0.3716 & -0.0632 \\ -0.1569 & -0.1343 & -0.2267 & -0.0834 \\ -0.1180 & -0.1275 & -0.3101 & -0.1754 \\ -0.3929 & -0.3329 & -0.4389 & -0.3036 \end{bmatrix}_{(8 \times 4)}$$

όπου η κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα στιγμιότυπο μετρήσεων, ενώ κάθε στήλη αντιστοιχεί σε έναν ζυγό φορτίου, χωρίς να είναι γνωστό σε ποιον ακριβώς. Το μόνο που είναι γνωστό είναι ότι οι μετρήσεις κάθε στήλης αφορούν σε έναν συγκεκριμένο καταναλωτή. Σημειώνεται ότι οι τάσεις δίνονται σε ανά μονάδα τιμές.

Αντίστοιχα, οι μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος σε ανά μονάδα τιμές για τα αντίστοιχα στιγμιότυπα είναι οι εξής:

$$[\Delta Pmatrix] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0.0400 & 0.0100 & 0.1100 & -0.0100 \\ 0.0700 & 0.1000 & -0.0500 & -0.0400 \\ -0.0500 & 0.1300 & 0.3900 & 0.1700 \\ 0.1600 & -0.1300 & 0.1100 & 0.1800 \\ 0.2600 & 0.4400 & 0.4600 & -0.3500 \\ 0.1400 & 0.1300 & 0.2800 & -0.0200 \\ 0.0100 & 0.0300 & 0.4000 & 0.2000 \\ 0.4100 & 0.3200 & 0.4100 & 0.2100 \end{bmatrix}_{(8 \times 4)}$$

$$[\Delta Qmatrix] = \begin{bmatrix} 0.0003 & 0.0004 & 0.0010 & -0.0004 \\ 0.0002 & 0.0001 & 0.0009 & -0.0002 \\ 0.0003 & 0.0007 & 0.0010 & -0.0004 \\ 0.0005 & 0.0005 & 0.0006 & -0.0001 \\ 0.0006 & 0.0003 & 0.0013 & -0.0004 \\ 0.0005 & 0.0001 & 0.0008 & -0.0005 \\ 0.0001 & 0.0006 & 0.0008 & -0.0005 \\ 0.0007 & 0.0002 & 0.0010 & 0.0002 \end{bmatrix}_{(8 \times 4)}$$

Έτσι, προκύπτει η μήτρα $PQmatrix$:

$$[PQmatrix] = [\Delta Pmatrix \ \Delta Qmatrix] \leftrightarrow \begin{bmatrix} 0.0400 & 0.0100 & 0.1100 & -0.0100 & 0.0003 & 0.0004 & 0.0010 & -0.0004 \\ 0.0700 & 0.1000 & -0.0500 & -0.0400 & 0.0002 & 0.0001 & 0.0009 & -0.0002 \\ -0.0500 & 0.1300 & 0.3900 & 0.1700 & 0.0003 & 0.0007 & 0.0010 & -0.0004 \\ 0.1600 & -0.1300 & 0.1100 & 0.1800 & 0.0005 & 0.0005 & 0.0006 & -0.0001 \\ 0.2600 & 0.4400 & 0.4600 & -0.3500 & 0.0006 & 0.0003 & 0.0013 & -0.0004 \\ 0.1400 & 0.1300 & 0.2800 & -0.0200 & 0.0005 & 0.0001 & 0.0008 & -0.0005 \\ 0.0100 & 0.0300 & 0.4000 & 0.2000 & 0.0001 & 0.0006 & 0.0008 & -0.0005 \\ 0.4100 & 0.3200 & 0.4100 & 0.2100 & 0.0007 & 0.0002 & 0.0010 & 0.0002 \end{bmatrix}_{(8 \times 8)}$$

Επομένως, το σύστημα (4.3.16) έχει λύση:

$$[s_{PQreal}] = \begin{bmatrix} -0.4483 & -0.1522 & -0.1014 & -0.1014 & -0.0745 & -0.0449 & -0.0300 & -0.0300 \\ -0.1519 & -0.3981 & -0.1013 & -0.1013 & -0.0447 & -0.0597 & -0.0298 & -0.0298 \\ -0.1024 & -0.1022 & -0.5010 & -0.1531 & -0.0303 & -0.0302 & -0.0900 & -0.0452 \\ -0.1014 & -0.1015 & -0.1521 & -0.3975 & -0.0303 & -0.0302 & -0.0452 & -0.0598 \end{bmatrix}_{(4 \times 8)}$$

Από τις σχέσεις (4.3.18), (4.3.19) προκύπτουν οι πίνακες ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου:

Πίνακας 4. 8:Πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος

$$[s_{P-real}] = \begin{bmatrix} -0.4483 & -0.1522 & -0.1014 & -0.1014 \\ -0.1519 & -0.3981 & -0.1013 & -0.1013 \\ -0.1024 & -0.1022 & -0.5009 & -0.1530 \\ -0.1014 & -0.1015 & -0.1521 & -0.3975 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

Πίνακας 4. 9:Πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος

$$[s_{Q-real}] = \begin{bmatrix} -0.0743 & -0.0448 & -0.0299 & -0.0299 \\ -0.0447 & -0.0596 & -0.0297 & -0.0297 \\ -0.0301 & -0.0301 & -0.0897 & -0.0450 \\ -0.0302 & -0.0301 & -0.0451 & -0.0597 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

Σύγκριση πειραματικών πινάκων ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος (4. 5),(4. 8)

Τα σφάλματα των πινάκων ευαισθησίας μεταξύ των δύο περιπτώσεων 1),2) προκύπτουν ως εξής:

$$error_{real1-real2}^P(i,j) = \frac{|s_{P-real1}(i,j)| - |s_{P-real2}(i,j)|}{s_{P-real1}(i,j)} 100\% \quad (4.4.13)$$

Πίνακας 4. 10:Πίνακας σφαλμάτων ευαισθησίας μεταξύ πινάκων (4. 5),(4. 8)

$$[error_{real1-real2}^P] = \begin{bmatrix} 0.0764 & 0.2497 & 1.0031 & 0.4209 \\ 0.3308 & 0.0342 & 0.4374 & 0.3324 \\ -0.6126 & -0.4013 & -0.1890 & -0.3546 \\ 0.2728 & 0.2892 & 0.7671 & 0.0744 \end{bmatrix}$$

Παρατηρείται ότι τα σφάλματα μεταξύ των δύο περιπτώσεων είναι αρκετά μικρά.Έτσι,για τις ίδιες μεταβολές ενεργού ισχύός,αναμένεται να δώσουν παρόμοιες μεταβολές τάσης.

Σύγκριση όρων ευαισθησίας πειραματικής μεθόδου με τους όρους των δύο προηγούμενων μεθόδων

Τα σφάλματα(%)των όρων ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος με χρήση πειραματικών δεδομένων,ως προς την μέθοδο με Jacobian, και τη θεωρητική μέθοδο δεδομένης τοπολογίας υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.4.11),(4.4.12) ενώ τα αντίστοιχα σφάλματα λόγω μεταβολών αέργου υπολογίζονται ως εξής:

$$error_{jac-real}^Q(i,j) = \frac{s_{Q-jac}(i,j) - |s_{Q-real}(i,j)|}{s_{Q-jac}(i,j)} 100\% \quad (4.4.14)$$

$$error_{theor-real}^Q(i,j) = \frac{|s_{Q-theor}(i,j)| - |s_{Q-real}(i,j)|}{|s_{Q-theor}(i,j)|} 100\% \quad (4.4.15)$$

Έτσι, αντίστοιχα,προκύπτουν οι ακόλουθοι πίνακες:

Πίνακας 4. 11:Πίνακας σφαλμάτων ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος μεταξύ πειραματικής μεθόδου-μεθόδου Jacobian

$$[error_{jac-real}^P] = \begin{bmatrix} 10.5710 & 11.5253 & 12.4730 & 12.5918 \\ 11.7443 & 10.5297 & 12.5746 & 12.6860 \\ 11.6538 & 11.8082 & 10.0416 & 11.1100 \\ 12.5173 & 12.4148 & 11.5236 & 10.7182 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 4. 12:Πίνακας σφαλμάτων ευαισθησίας λόγω αέργου ισχύος μεταξύ πειραματικής μεθόδου-μεθόδου Jacobian

$$[error_{jac-reactive}^Q] = \begin{bmatrix} 10.3975 & 10.9790 & 11.6994 & 11.8942 \\ 11.3553 & 10.4237 & 12.1727 & 12.2421 \\ 11.0389 & 11.2028 & 9.6104 & 10.5424 \\ 10.9647 & 11.2587 & 10.1903 & 10.3456 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 4. 13:Πίνακας σφαλμάτων ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος μεταξύ πειραματικής-θεωρητικής μεθόδου

$$[error_{theor-real}^P] = \begin{bmatrix} 4.9799 & 4.7143 & 4.8142 & 4.8155 \\ 4.9165 & 4.8832 & 4.9247 & 4.9181 \\ 3.8275 & 4.0295 & 4.5819 & 4.1998 \\ 4.7675 & 4.6896 & 4.7737 & 5.0170 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 4. 14:Πίνακας σφαλμάτων ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος μεταξύ πειραματικής-θεωρητικής μεθόδου

$$[error_{theor-real}^Q] = \begin{bmatrix} 4.2671 & 4.1259 & 3.9729 & 4.0559 \\ 4.4974 & 4.0258 & 4.4876 & 4.4348 \\ 3.1582 & 3.3707 & 3.7258 & 3.5881 \\ 3.0774 & 3.4315 & 3.3387 & 3.8747 \end{bmatrix}$$

4.5:Συμπεράσματα

Από τον Πίνακα 4. 10,στον οποίο παρουσιάζονται τα σφάλματα μεταξύ των όρων ευαισθησίας,λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος, όπως υπολογίζονται στην περίπτωση μηδενικών μεταβολών αέργου (Πίνακας 4.5) και στην περίπτωση μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος(Πίνακας 4.8),παρατηρείται ότι τα σφάλματα είναι πολύ μικρά.Συγκεκριμένα,το μέγιστο σφάλμα που παρουσιάζεται κατ'άπολυτη

τιμή είναι 1.0031%. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η ύπαρξη μεταβολών αέργου στα στιγμιότυπα που λαμβάνονται δεν επηρεάζει σημαντικά τον υπολογισμό των όρων ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος. Έτσι, σε περίπτωση που αναζητείται ο πίνακας ευαισθησίας λόγω ενεργού ισχύος, μπορεί να υπολογιστεί είτε χρησιμοποιώντας στην επίλυση στιγμιότυπα στα οποία μεταβάλλεται μόνο η ενεργός ισχύς, είτε ισοδύναμα, χρησιμοποιώντας στην επίλυση στιγμιότυπα στα οποία μεταβάλλεται τόσο η ενεργός όσο και η άεργος ισχύς.

Παρατηρώντας τους Πίνακες 4.11 και 4.12, παρατηρείται ότι τα σφάλματα μεταξύ πειραματικών πινάκων ευαισθησίας και πινάκων ευαισθησίας από τη μέθοδο Jacobian ξεπερνούν, στην πλειοψηφία τους, το 10%. Τα σφάλματα αυτά είναι σημαντικά, αλλά και αναμενόμενα. Η μέθοδος Jacobian εξαρτάται από τα αποτελέσματα της ροής φορτίου σε κάθε στιγμιότυπο. Έτσι, κάθε φορά που αλλάζουν οι συνθήκες φόρτισης των ζυγών φορτίου, ο πίνακας Jacobian, από τον οποίο προκύπτουν οι πίνακες ευαισθησίας όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, πρέπει να υπολογίζεται ξανά. Δηλαδή, ο πίνακας Jacobian πρέπει να υπολογίζεται για κάθε στιγμιότυπο μετρήσεων από αυτά που εξετάζονται. Εδώ έγκειται και το σημαντικό πλεονέκτημα της πειραματικής μεθόδου υπολογισμού έναντι της μεθόδου Jacobian: ο πειραματικός πίνακας ευαισθησίας υπολογίζεται μόνο μία φορά για τα επιλεγμένα στιγμιότυπα μετρήσεων, ενώ ο Jacobian υπολογίζεται εκ νέου για κάθε επανάληψη-στιγμιότυπο. Πιθανώς, η σύγκριση των πινάκων των δύο μεθόδων σε άλλο στιγμιότυπο, μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερα ή μεγαλύτερα σφάλματα.

Παρατηρώντας τους Πίνακες 4.13 και 4.14, παρατηρείται ότι το μέγιστο σφάλμα μεταξύ πειραματικών πινάκων και πινάκων ευαισθησίας για δεδομένη τοπολογία δικτύου είναι 5.0170%. Έτσι, ο πειραματικός πίνακας ευαισθησίας προσεγγίζει ικανοποιητικά τον θεωρητικό, και ως αποτέλεσμα, μπορεί να θεωρηθεί ότι στον πειραματικό πίνακα ευαισθησίας περιέχεται η ίδια πληροφορία σχετικά με την τοπολογία του δικτύου που περιέχεται και στον θεωρητικό πίνακα.

[11] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22]

Κεφάλαιο 5:Εύρεση τοπολογίας με βάση την ακολουθία Prüfer

5.1:Ακολουθία Prüfer

Η ακολουθία Prüfer για ένα αριθμημένο δέντρο T , n κόμβων, είναι μια ακολουθία από $n - 2$ αριθμούς, καθένας από τους οποίους κυμαίνεται από 1 έως n , με επαναλήψεις αριθμών να επιτρέπονται. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν n^{n-2} ακολουθίες Prüfer για κάποιο δεδομένο n . Αυτό αποδεικνύεται, εύκολα, ως εξής: εξ'ορισμού, υπάρχουν n τρόποι επιλογής κάθε στοιχείου μιας ακολουθίας Prüfer, μήκους $n - 2$. Καθώς υπάρχουν $n - 2$ στοιχεία της ακολουθίας που πρέπει να προσδιοριστούν, συνολικά υπάρχουν n^{n-2} τρόποι επιλογής ολόκληρης της ακολουθίας. Θεωρώντας δεδομένο ένα δέντρο με αριθμημένους κόμβους, του οποίου οι κόμβοι έχουν αρίθμηση $1, 2, \dots, n$, ο αλγόριθμος κωδικοποίησης Prüfer παράγει μια μοναδική ακολουθία Prüfer μήκους $n - 2$. Ο αλγόριθμος αποκωδικοποίησης Prüfer παρέχει τον αντίστροφο αλγόριθμο, ο οποίος βρίσκει ένα μοναδικά αριθμημένο δέντρο T , με n κόμβους για μία δεδομένη ακολουθία Prüfer μήκους $n - 2$ στοιχείων. [27]

Μια σημαντική παρατήρηση είναι η εξής:

- 1) Οποιαδήποτε κορυφή v του δέντρου T εμφανίζεται $d(v) - 1$ φορές στην ακολουθία Prüfer P , όπου $d(v)$ είναι ο βαθμός της κορυφής v , δηλαδή το πλήθος των εφαπτόμενων ακμών στην κορυφή v .
- 2) Οι κορυφές βαθμού 1, δηλαδή τα φύλλα του δέντρου T , δεν εμφανίζονται ποτέ στην P .

5.2:Αλγόριθμος κωδικοποίησης Prüfer

5.2.1:Επεξήγηση αλγορίθμου κωδικοποίησης Prüfer

Θεωρώντας δεδομένο ένα δέντρο T με αριθμημένους κόμβους, του οποίου οι κόμβοι έχουν αρίθμηση $1, 2, \dots, n$, ο αλγόριθμος κωδικοποίησης Prüfer παράγει μια μοναδική ακολουθία Prüfer μήκους $n - 2$, ως εξής:

Βήμα 1: Με την προϋπόθεση ότι υπάρχουν παραπάνω από δύο κόμβοι στο δέντρο T , τότε ακολουθεί το δεύτερο βήμα.

Βήμα 2: Εντοπίζονται οι κόμβοι βαθμού 1, δηλαδή τα φύλλα του δέντρου T , και από αυτούς επιλέγεται το φύλλο με το ελάχιστο label, έστω v .

Βήμα 3: Εντοπίζεται ο μοναδικός γειτονικός κόμβος του επιλεγμένου φύλλου, έστω v' , και εισάγεται στην ακολουθία Prüfer.

Βήμα 4: Αφαιρείται το φύλλο με το ελάχιστο label, v , από το δέντρο T .

5.2.2: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου κωδικοποίησης *Prüfer*

Algorithm: *Prüfer* encoding

Input: A labeled tree with vertices labeled $1, 2, 3, \dots, n$

Output: A *Prüfer* sequence

Repeat $n - 2$ times

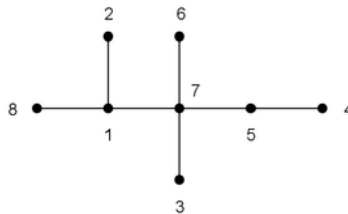
v = the leaf with the lowest label

Print the label of v 's unique neighbor in the output

Remove v from the tree

5.2.3: Παράδειγμα

Έστω το ακόλουθο αριθμημένο δέντρο $T[27]$:



Το δέντρο έχει 8 κόμβους, κι έτσι, η αντίστοιχη ακολουθία *Prüfer* θα έχει 6 στοιχεία.

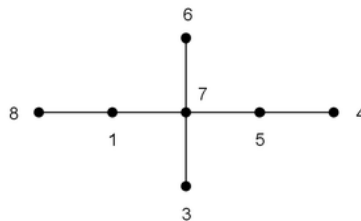
Επανάληψη 1:

Βήμα 1: Υπάρχουν 8 κόμβοι στο δέντρο T , οπότε ακολουθεί το δεύτερο βήμα.

Βήμα 2: Οι κόμβοι βαθμού 1 είναι οι εξής: 8, 2, 6, 4, 3. Από αυτούς, ο 2 έχει το ελάχιστο label.

Βήμα 3: Ο 2 έχει γειτονικό κόμβο τον 1, οπότε ο 1 προστίθεται στην ακολουθία *Prüfer*.

Βήμα 4: Αφαιρώντας το φύλλο 2, μένει το δέντρο T ως εξής:



Μέχρι στιγμής, η ακολουθία *Prüfer* είναι η εξής: $P = \{1\}$.

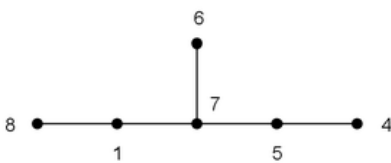
Επανάληψη 2:

Βήμα 1: Υπάρχουν 7 κόμβοι στο δέντρο T , οπότε ακολουθεί το δεύτερο βήμα.

Βήμα 2: Οι κόμβοι βαθμού 1 είναι οι εξής: 8, 6, 4, 3. Από αυτούς, ο 3 έχει το ελάχιστο label.

Βήμα 3: Ο 3 έχει γειτονικό κόμβο τον 7, οπότε ο 7 προστίθεται στην ακολουθία *Prüfer*.

Βήμα 4: Αφαιρώντας το φύλλο 3, μένει το δέντρο T ως εξής:



Σε αυτό το στάδιο, η ακολουθία *Prüfer* είναι η εξής: $P = \{1,7\}$.

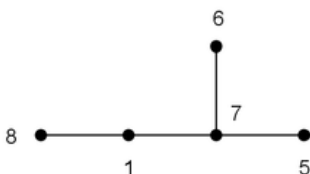
Επανάληψη 3:

Βήμα 1: Υπάρχουν 6 κόμβοι στο δέντρο T , οπότε ακολουθεί το δεύτερο βήμα.

Βήμα 2: Οι κόμβοι βαθμού 1 είναι οι εξής: 8, 6, 4. Από αυτούς, ο 4 έχει το ελάχιστο label.

Βήμα 3: Ο 4 έχει γειτονικό κόμβο τον 5, οπότε ο 5 προστίθεται στην ακολουθία *Prüfer*.

Βήμα 4: Αφαιρώντας το φύλλο 4, μένει το δέντρο T ως εξής:



Σε αυτό το στάδιο, η ακολουθία *Prüfer* είναι η εξής: $P = \{1,7,5\}$.

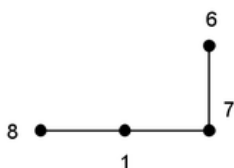
Επανάληψη 4:

Βήμα 1: Υπάρχουν 5 κόμβοι στο δέντρο T , οπότε ακολουθεί το δεύτερο βήμα.

Βήμα 2: Οι κόμβοι βαθμού 1 είναι οι εξής: 8, 6, 5. Από αυτούς, ο 5 έχει το ελάχιστο label.

Βήμα 3: Ο 5 έχει γειτονικό κόμβο τον 7, οπότε ο 7 προστίθεται στην ακολουθία *Prüfer*.

Βήμα 4: Αφαιρώντας το φύλλο 5, μένει το δέντρο T ως εξής:



Σε αυτό το στάδιο, η ακολουθία *Prüfer* είναι η εξής: $P = \{1,7,5,7\}$.

Επανάληψη 5:

Βήμα 1: Υπάρχουν 4 κόμβοι στο δέντρο T , οπότε ακολουθεί το δεύτερο βήμα.

Βήμα 2: Οι κόμβοι βαθμού 1 είναι οι εξής: 8, 6. Από αυτούς, ο 6 έχει το ελάχιστο label.

Βήμα 3: Ο 6 έχει γειτονικό κόμβο τον 7, οπότε ο 7 προστίθεται στην ακολουθία *Prüfer*.

Βήμα 4: Αφαιρώντας το φύλλο 6, μένει το δέντρο T ως εξής:



Σε αυτό το στάδιο, η ακολουθία *Prüfer* είναι η εξής: $P = \{1,7,5,7,7\}$.

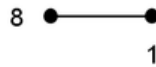
Επανάληψη 6:

Βήμα 1:Υπάρχουν 3 κόμβοι στο δέντρο T , οπότε ακολουθεί το δεύτερο βήμα.

Βήμα 2:Οι κόμβοι βαθμού 1 είναι οι εξής:8,7.Από αυτούς,ο 7 έχει το ελάχιστο label.

Βήμα 3:Ο 7 έχει γειτονικό κόμβο τον 1,οπότε ο 1 προστίθεται στην ακολουθία *Prüfer*.

Βήμα 4:Αφαιρώντας το φύλλο 7,μένει το δέντρο T ως εξής:



Σε αυτό το στάδιο, η ακολουθία *Prüfer* είναι η εξής: $P = \{1,7,5,7,7,1\}$.

Επανάληψη 7:

Βήμα 1:Υπάρχουν 2 κόμβοι στο δέντρο T , οπότε η διαδικασία σταματάει.

Η ακολουθία *Prüfer* για το δοσμένο δέντρο T είναι επομένως: $P = \{1,7,5,7,7,1\}$.

5.3:Αλγόριθμος αποκωδικοποίησης *Prüfer*

5.3.1:Επεξήγηση αλγορίθμου αποκωδικοποίησης *Prüfer*

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο αλγόριθμος αποκωδικοποίησης *Prüfer* παρέχει τον αντίστροφο αλγόριθμο,ο οποίος βρίσκει ένα μοναδικά αριθμημένο δέντρο T , με n κόμβους για μία δεδομένη ακολουθία *Prüfer* μήκους $n - 2$ στοιχείων.

Έστω $P = \{a_1, a_2, \dots, a_{n-2}\}$ μία δοσμένη ακολουθία *Prüfer* μήκους $n - 2$ στοιχείων.Υποτίθεται ότι η ακολουθία δεν είναι άδεια.

Βήμα 1:Η ακολουθία *Prüfer* έχει μήκος $n - 2$,επομένως,το δέντρο T θα έχει n κόμβους.Σχεδιάζονται οι n κόμβοι με αρίθμηση $1,2, \dots, n$.Αυτοί θα αποτελούν το δέντρο T .

Βήμα 2:Κατασκευάζεται μια λίστα με αριθμούς $\{1,2, \dots, n\}$.

Βήμα 3:Αν υπάρχουν μόνο δύο στοιχεία στη λίστα,συνδέονται με μία ακμή και σταματά η εκτέλεση του αλγορίθμου.Διαφορετικά,ακολουθεί το βήμα 4.

Βήμα 4:Εντοπίζεται το μικρότερο στοιχείο της λίστας που δεν ανήκει στην ακολουθία *Prüfer*,καθώς και το πρώτο στοιχείο της ακολουθίας *Prüfer*.Έπειτα,οι αντίστοιχοι κόμβοι ενώνονται μέσω ακμής στο δέντρο.

Βήμα 5: Το μικρότερο στοιχείο της λίστας που δεν ανήκει στην ακολουθία *Prüfer* διαγράφεται από τη λίστα, ενώ, το πρώτο στοιχείο της ακολουθίας *Prüfer* διαγράφεται από την ακολουθία. Στη συνέχεια, ακολουθεί το βήμα 3.

5.3.2: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου αποκωδικοποίησης *Prüfer*

Algorithm: Prüfer Decoding

Input: A Prüfer sequence $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_{n-2}\}$

Output: A labeled tree with vertices labeled by $1, 2, 3, \dots, n$

P = the input Prüfer sequence

$n = |P| + 2$

$V = \{1, 2, 3, \dots, n\}$

Start with n isolated vertices labeled $1, 2, 3, \dots, n$

for $i = 1$ to $n - 2$ do

v = the smallest element in V that does not occur in P

Connect v to p_i

Remove v from V

Remove p_i from P

Connect the last two vertices remained in V

5.3.3: Παράδειγμα

Έστω η ακολουθία *Prüfer* $P = \{1, 7, 5, 7, 7, 1\}$ [28].

Βήμα 1: Η ακολουθία *Prüfer* έχει μήκος βεπομένως, το δέντρο T θα έχει 8 κόμβους:

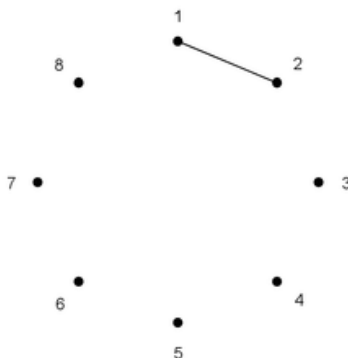


Βήμα 2: Κατασκευάζεται η λίστα με αριθμούς $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$.

Επανάληψη 1:

Βήμα 3: Υπάρχουν 8 στοιχεία στη λίστα άρα ακολουθεί το βήμα 4.

Βήμα 4: Το μικρότερο στοιχείο της λίστας που δεν ανήκει στην ακολουθία *Prüfer* είναι το 2, και το πρώτο στοιχείο της ακολουθίας *Prüfer* είναι το 1. Έτσι, οι κόμβοι 2 και 1 ενώνονται μέσω ακμής και προκύπτει ο ακόλουθος γράφος:

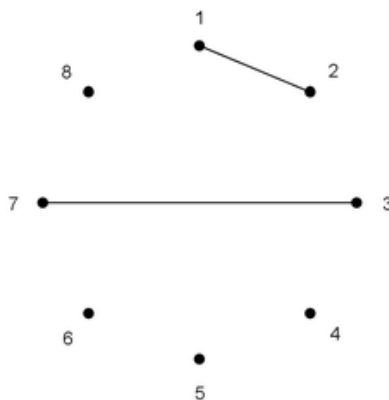


Βήμα 5: Το 2 διαγράφεται από τη λίστα, οπότε η λίστα που προκύπτει είναι η εξής: $\{1, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$, ενώ το 1 διαγράφεται από την ακολουθία *Prüfer*, οπότε στην ακολουθία *Prüfer* απομένουν: $P = \{7, 5, 7, 7, 1\}$. Ακολουθεί το βήμα 3.

Επανάληψη 2:

Βήμα 3: Υπάρχουν 7 στοιχεία στη λίστα άρα ακολουθεί το βήμα 4.

Βήμα 4: Το μικρότερο στοιχείο της λίστας που δεν ανήκει στην ακολουθία *Prüfer* είναι το 3, και το πρώτο στοιχείο της ακολουθίας *Prüfer* είναι το 7. Έτσι, οι κόμβοι 3 και 7 ενώνονται μέσω ακμής και προκύπτει ο ακόλουθος γράφος:

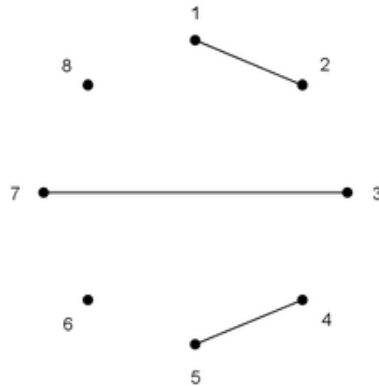


Βήμα 5: Το 3 διαγράφεται από τη λίστα, οπότε η λίστα που προκύπτει είναι η εξής: $\{1, 4, 5, 6, 7, 8\}$, ενώ το 7 διαγράφεται από την ακολουθία *Prüfer*, οπότε στην ακολουθία *Prüfer* απομένουν: $P = \{5, 7, 7, 1\}$. Ακολουθεί το βήμα 3.

Επανάληψη 3:

Βήμα 3: Υπάρχουν 6 στοιχεία στη λίστα άρα ακολουθεί το βήμα 4.

Βήμα 4: Το μικρότερο στοιχείο της λίστας που δεν ανήκει στην ακολουθία *Prüfer* είναι το 4, και το πρώτο στοιχείο της ακολουθίας *Prüfer* είναι το 5. Έτσι, οι κόμβοι 4 και 5 ενώνονται μέσω ακμής και προκύπτει ο ακόλουθος γράφος:

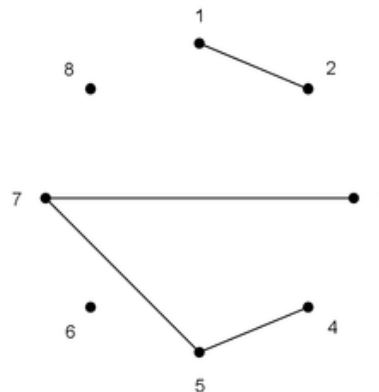


Βήμα 5: Το 4 διαγράφεται από τη λίστα, οπότε η λίστα που προκύπτει είναι η εξής: $\{1,5,6,7,8\}$, ενώ το 5 διαγράφεται από την ακολουθία *Prüfer*, οπότε στην ακολουθία *Prüfer* απομένουν: $P = \{7,7,1\}$. Ακολουθεί το βήμα 3.

Επανάληψη 4:

Βήμα 3: Υπάρχουν 5 στοιχεία στη λίστα άρα ακολουθεί το βήμα 4.

Βήμα 4: Το μικρότερο στοιχείο της λίστας που δεν ανήκει στην ακολουθία *Prüfer* είναι το 5, και το πρώτο στοιχείο της ακολουθίας *Prüfer* είναι το 7. Έτσι, οι κόμβοι 5 και 7 ενώνονται μέσω ακμής και προκύπτει ο ακόλουθος γράφος:

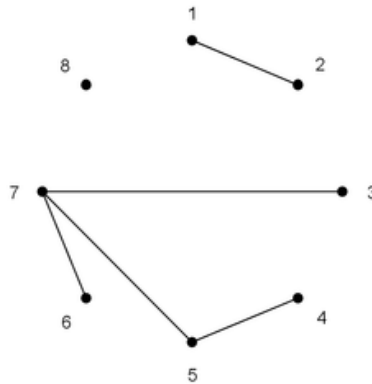


Βήμα 5: Το 5 διαγράφεται από τη λίστα, οπότε η λίστα που προκύπτει είναι η εξής: $\{1,6,7,8\}$, ενώ το 7 διαγράφεται από την ακολουθία *Prüfer*, οπότε στην ακολουθία *Prüfer* απομένουν: $P = \{7,1\}$. Ακολουθεί το βήμα 3.

Επανάληψη 5:

Βήμα 3: Υπάρχουν 4 στοιχεία στη λίστα άρα ακολουθεί το βήμα 4.

Βήμα 4: Το μικρότερο στοιχείο της λίστας που δεν ανήκει στην ακολουθία *Prüfer* είναι το 6, και το πρώτο στοιχείο της ακολουθίας *Prüfer* είναι το 7. Έτσι, οι κόμβοι 6 και 7 ενώνονται μέσω ακμής και προκύπτει ο ακόλουθος γράφος:

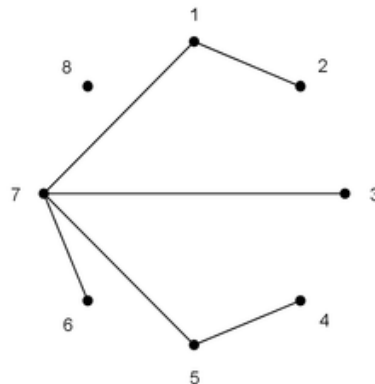


Βήμα 5: Το 6 διαγράφεται από τη λίστα, οπότε η λίστα που προκύπτει είναι η εξής: $\{1, 7, 8\}$, ενώ το 7 διαγράφεται από την ακολουθία *Prüfer*, οπότε στην ακολουθία *Prüfer* απομένουν: $P = \{1\}$. Ακολουθεί το βήμα 3.

Επανάληψη 6:

Βήμα 3: Υπάρχουν 3 στοιχεία στη λίστα άρα ακολουθεί το βήμα 4.

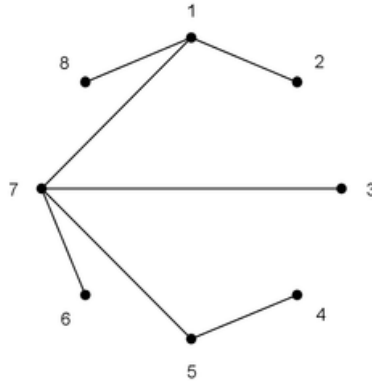
Βήμα 4: Το μικρότερο στοιχείο της λίστας που δεν ανήκει στην ακολουθία *Prüfer* είναι το 7, και το πρώτο στοιχείο της ακολουθίας *Prüfer* είναι το 1. Έτσι, οι κόμβοι 7 και 1 ενώνονται μέσω ακμής και προκύπτει ο ακόλουθος γράφος:



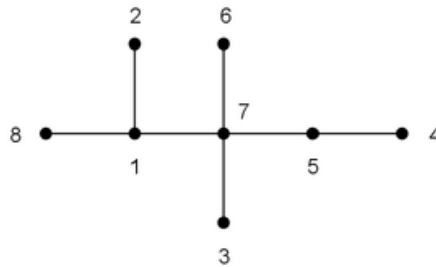
Βήμα 5: Το 7 διαγράφεται από τη λίστα, οπότε η λίστα που προκύπτει είναι η εξής: $\{1, 8\}$, ενώ το 1 διαγράφεται από την ακολουθία *Prüfer*, οπότε η ακολουθία *Prüfer* μένει κενή. Ακολουθεί το βήμα 3.

Επανάληψη 7:

Βήμα 3: Υπάρχουν 2 μόνο στοιχεία στη λίστα, $\{1, 8\}$, άρα ενώνονται μέσω μίας ακμής: και σταματά η εκτέλεση του αλγορίθμου.



Έπειτα, σταματά η εκτέλεση του αλγορίθμου, και το δέντρο είναι πλήρες. Αλλάζοντας τις θέσεις των κόμβων, το δέντρο T που προκύπτει είναι το ακόλουθο:



5.4: Αλγόριθμος εύρεσης τοπολογίας Prüfer

5.4.1: Επεξήγηση αλγορίθμου εύρεσης τοπολογίας Prüfer

Στο πρόβλημα εύρεσης τοπολογίας, η βασική υπόθεση είναι ότι υπάρχει μήκος μονοπατιού μεταξύ όλων των φύλλων του δέντρου T , που αντιπροσωπεύεται από έναν πίνακα. Το κυριότερο σημείο για τη μέθοδο αυτή είναι ότι υπάρχει μοναδικό δέντρο T για κάποιον δοσμένο πίνακα μονοπατιών μεταξύ φύλλων. Αυτό μπορεί εύκολα να φανεί απ' το γεγονός ότι εάν υπήρχε άλλο μήκος μονοπατιού μεταξύ δύο φύλλων, τότε θα υπήρχε κύκλος, που έρχεται σε αντίθεση με τον ορισμό του δέντρου. Η ιδέα, επομένως, είναι η συνδεση αυτής της σχέσης μοναδικότητας μεταξύ του πίνακα μήκους μονοπατιών, της ακολουθίας Prüfer και του αριθμημένου δέντρου.

Οι κόμβοι φύλλων αριθμούνται ως εξής: $1, 2, 3, \dots, r$ και υποδηλώνονται από το σύνολο R . Το ζητούμενο είναι η εύρεση του ακριβούς πλήθους των εσωτερικών κόμβων που συνδέουν τους κόμβους φύλλων μεταξύ τους και παράγουν την ακολουθία Prüfer.

Η διαδικασία έχει ως εξής: ξεκινώντας από το φύλλο με το ελάχιστο label, έστω l , ελέγχεται εάν κάποιος κόμβος είναι γειτονικός του, δηλαδή αν υπάρχει κάποιος κόμβος που απέχει απόσταση 1 από αυτόν.

Πρακτικά, στην πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου, δεν θα υπάρχει γειτονικός κόμβος με το φύλλο με το ελάχιστο label, καθώς στην αρχή όλοι οι υπάρχοντες κόμβοι είναι φύλλα του δέντρου, οπότε είναι αδύνατο κάποιος από αυτούς να είναι ταυτόχρονα και ενδιάμεσος κόμβος του δέντρου. Καθώς το ελάχιστο label μεταξύ των φύλλων είναι πλήρως ορισμένο, και ίσο με l , αν m είναι ο πρώτος εσωτερικός κόμβος που συνδέεται στο φύλλο με το ελάχιστο label, και το μέγιστο label μεταξύ των φύλλων είναι r , τότε ο m θα έχει label $r + 1$. Έτσι, παράγονται μοναδικά labels κατ'αυξουσα σειρά για κάθε εσωτερικό κόμβο που ανακαλύπτεται. Ο m , που είναι ο γειτονικός ενδιάμεσος του l , βρίσκεται πλέον στα μονοπάτια μεταξύ όλων των υπόλοιπων φύλλων του R (εκτός του l) και του l , κι επομένως, το μήκος μονοπατιού από και προς το m μειώνεται κατά ένα συγκριτικά με τα μήκη μονοπατιών από και προς το l . Όσον αφορά την κωδικοποίηση *Prüfer*, το l αφαιρείται από το σύνολο των εναπομείναντων φύλλων R , και ο μοναδικός του γείτονας m προστίθεται στην ακολουθία *Prüfer*. Η κορυφή m εισάγεται, επιπλέον στον πίνακα μονοπατιών με κατάλληλα μήκη μονοπατιών ως προς τις υπόλοιπες κορυφές, ενώ αντιθετα ο κόμβος l απομακρύνεται από τον πίνακα.

Πλέον, υπάρχουν δύο πιθανά σενάρια σχετικά με τον κόμβο m :

- 1) Ο m συνδέεται σε άλλον κόμβο φύλλου με ελάχιστο label (πέρα από τον l) του συνόλου R . Αυτό μπορεί να ελεγχθεί παρατηρώντας αν στον πίνακα μονοπατιών υπάρχει μονοπάτι με μήκος 1, μεταξύ ενός κόμβου φύλλου και του m .
- 2) Ο m γίνεται κόμβος φύλλου μετά την απομάκρυνση του l .

Σε κάθε περίπτωση, κάθε νέος κόμβος που ανακαλύπτεται, όπως ο m , εισάγεται στο σύνολο των νέων, ενδιάμεσων κόμβων που ανακαλύπτονται, έστω S .

Η διαδικασία συνεχίζεται για το αμέσως επόμενο φύλλο με το ελάχιστο label, $l + 1$. Υπάρχουν δύο πιθανά σενάρια για το φύλλο αυτό:

- 1) Το φύλλο με label $l + 1$ συνδέεται σε κάποιον ενδιάμεσο κόμβο του S . Επομένως, εξετάζεται εάν υπάρχει μήκος μονοπατιού μεταξύ του κόμβου $l + 1$ και κάποιου κόμβου του S ίσο με 1. Στην προκειμένη περίπτωση, ο μόνος κόμβος που έχει ανακαλυφθεί είναι ο m . Έτσι, αν το μήκος μονοπατιού μεταξύ του φύλλου $l + 1$ και του m είναι 1, τότε ο $l + 1$ απομακρύνεται από τη μήτρα μήκους μονοπατιών και ο γειτονικός του ενδιάμεσος m εισάγεται ξανά στην ακολουθία *Prüfer*.
- 2) Το φύλλο με label $l + 1$ δε συνδέεται σε κάποιον ενδιάμεσο κόμβο του S . Σε αυτή την περίπτωση, ομοίως με πριν, θεωρείται νέος ενδιάμεσος κόμβος, έστω m_2 , με label $r + 2$. Ο m_2 , που είναι ο γειτονικός ενδιάμεσος του $l + 1$, βρίσκεται πλέον στα μονοπάτια μεταξύ όλων των υπόλοιπων φύλλων του R (εκτός του $l + 1$) και του $l + 1$, κι επομένως, το μήκος μονοπατιού από και προς το m_2 μειώνεται κατά ένα συγκριτικά με τα μήκη μονοπατιών από και προς το $l + 1$. Όσον αφορά την κωδικοποίηση *Prüfer*, το $l + 1$ αφαιρείται από το σύνολο των εναπομείναντων φύλλων R , και ο μοναδικός του γείτονας m_2 προστίθεται στην ακολουθία *Prüfer*. Η κορυφή m_2 εισάγεται στον πίνακα μονοπατιών με κατάλληλα μήκη μονοπατιών ως προς τις υπόλοιπες κορυφές, ενώ αντιθετα, ο κόμβος $l + 1$ απομακρύνεται από τον πίνακα.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τον αμέσως επόμενο κόμβο με το ελάχιστο label του συνόλου R .

Μόλις η παραπάνω διαδικασία επαναληφθεί για όλα τα φύλλα του συνόλου R , το σύνολο των νέων, ενδιάμεσων κόμβων που ανακαλύφθηκαν, S , σχηματίζει δύο υποσύνολα, τα φύλλα και τους ενδιάμεσους κόμβους. Ο λόγος που αυτά τα νέα φύλλα που προκύπτουν δεν εξετάστηκαν νωρίτερα με τα υπόλοιπα αρχικά φύλλα, είναι ότι σίγουρα θα έχουν μεγαλύτερα label από αυτά των αρχικών, που έχουν labels $1, 2, \dots, r$. Επομένως, με βάση την αρχή του αλγορίθμου *Prüfer*, σύμφωνα με την οποία εξετάζεται σε κάθε επανάληψη το φύλλο με τη μικρότερη αρίθμηση, τα νέα φύλλα δεν μπορούν να εξεταστούν προτού ολοκληρωθεί η διαδικασία για τα αρχικά φύλλα.

Το υποσύνολο των νέων φύλλων του S , έστω R' , προκύπτει από τον έλεγχο της τριγωνικής ανισότητας στον πίνακα μονοπατιών, μεταξύ όλων των νέων κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, από τον έλεγχο της τριγωνικής ανισότητας στον πίνακα μονοπατιών, εντοπίζονται οι κόμβοι του S που δεν είναι φύλλα όπως εξηγείται ακολούθως: αν ένας ενδιάμεσος κόμβος του S , έστω w , βρίσκεται στο μονοπάτι μεταξύ δύο άλλων ενδιάμεσων κόμβων του S , έστω u και v , δηλαδή αν στον πίνακα μονοπατιών ισχύει: $dist(u, w) + dist(w, v) = dist(u, v)$, τότε ο w θα είναι ενδιάμεσος κόμβος και θα βρίσκεται στο μονοπάτι μεταξύ των u και v . Με αυτή τη διαδικασία εντοπίζονται όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι του συνόλου S . Επομένως, ένας κόμβος του S θα θεωρείται κόμβος φύλλου αν δεν εμφανίζεται ως ενδιάμεσος κόμβος κανενός ζεύγους κορυφών του S , και θα ανήκει στο σύνολο R' των νέων φύλλων.

Εφόσον η απομάκρυνση ενός κόμβου φύλλου σε ένα δέντρο δεν αλλάζει τις ιδιότητες του δέντρου, ο κόμβος με το αμέσως επόμενο ελάχιστο label ορίζεται πλήρως από το νέο σύνολο φύλλων R' . Ο αλγόριθμος σταματάει να εκτελείται όταν μένουν ακριβώς δύο κόμβοι φύλλων στο σύνολο R' με μήκος μονοπατιού μεταξύ τους ίσο με 1.

Επομένως, με δεδομένα το πλήθος και την αρίθμηση των φύλλων, καθώς και τον πίνακα μήκους μονοπατιών μεταξύ των φύλλων, που παρέχει την απαιτούμενη πληροφορία για το δέντρο, μπορεί να εξαχθεί η ακολουθία *Prüfer* που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο δέντρο-δίκτυο Χαμηλής Τάσης. Έπειτα, με εφαρμογή του αλγορίθμου αποκωδικοποίησης *Prüfer*, προκύπτει η αντίστοιχη τοπολογία.

Ακολούθως, παρατίθενται συνοπτικές περιγραφές τόσο του αλγορίθμου εύρεσης τοπολογίας με βάση την ακολουθία *Prüfer*, όσο και του αλγορίθμου εύρεσης των κόμβων φύλλων από το σύνολο των νέων ενδιάμεσων κόμβων που ανακαλύπτονται [23].

5.4.2: Ψευδοκώδικας εύρεσης τοπολογίας *Prüfer*

Algorithm:Prufer Topology Discovery

Inputs:Leaf nodes $R=\{1,2,\dots,r\}$;

Path matrix $D[1\dots r,1\dots r]$;

Output:Prufer sequence

Last_node= r ;

$P=\{\}$;

$S=\{\}$;

Nodes= $\{R\ S\}$; %remaining nodes at the end of each iteration

```

while ( R not empty )
    k=leaf with the lowest label from R;
    if (k has a neighbor in P,say Pi)
        m=Pi;
        Append m to Prufer sequence;
        Remove k from Path matrix;
        Remove k from R;
        Remove k from Nodes;
    else
        increment Last_node;
        m=Last_node;
        Consider m as the neighbor of k;
        Append m to Prufer sequence;
        Remove k from Path matrix;
        Remove k from R;
        Remove k from Nodes;
        Add m to the Path matrix with appropriate path lengths to the rest of the vertices:
         $D(m,[Nodes])=D(k,[Nodes]) -1;$ 
         $D([Nodes],m)=D([Nodes],k) -1;$ 
        Append m to S;
        Append m to Nodes;
    end
end
R'=getleaves(Nodes,D);
while ( (number of nodes in R' not equal to 2) or (path length between the last two nodes in R' not
equal to 1) )
    k=leaf with the lowest label from R';
    if (k has a neighbor in P,say Pi)
        m=Pi;
        Append m to Prufer sequence;
        Remove k from Path matrix;
        Remove k from R';
        Remove k from Nodes;
    else
        increment Last_node;
        m=Last_node;
        Consider m as the neighbor of k;
        Append m to Prufer sequence;
        Remove k from Path matrix;
        Remove k from R';
        Remove k from Nodes;
        Add m to the Path matrix with appropriate path lengths to the rest of the vertices:

```



```

        D(m,[Nodes])=D(k,[Nodes]) -1;
        D([Nodes],m)=D([Nodes],k) -1;
        Append m to S;
        Append m to Nodes;
    end
R'=getleaves(Nodes,D);
end
Print(P);

```

5.4.3:Ψευδοκώδικας εύρεσης φύλλων

Algorithm: Get leaves

Inputs:Intermediate remaining nodes set Nodes

Path length matrix D[[Nodes],[Nodes]]

Mark all nodes in Nodes as leaf nodes;

Output:Set of leaf nodes R'

Intermediate_nodes={};

for i=[Nodes]

for j=[Nodes]

for w=[Nodes]

if (i not equal j not equal w)

if (D(i,j)=D(i,w)+D(w,j))

 % Mark w as an intermediate node/non-leaf node

 Append w to Intermediate_nodes;

end

end

end

end

end

R'=return all non- intermediate/ leaf nodes from Nodes;

5.4.4:Παράδειγμα

Δίνεται ο ακόλουθος πίνακας μήκους μονοπατιών που αντιστοιχεί σε δέντρο με 8 φύλλα, με αρίθμηση {1,2,3,4,5,6,7,8}:

5.1:Πίνακας μήκους μονοπατιών D , [23]

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	2	2	4	5	6	6	4
2	2	0	2	4	5	6	6	4
3	2	2	0	4	5	6	6	4
4	4	4	4	0	3	4	4	2
5	5	5	5	3	0	3	3	3
6	6	6	6	4	3	0	2	4
7	6	6	6	4	3	2	0	4
8	4	4	4	2	3	4	4	0

Από τον αλγόριθμο εύρεσης τοπολογίας *Prüfer* προκύπτει η εξής ακολουθία *Prüfer*:

$$P = \{9 \ 9 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 12 \ 10 \ 13 \ 11 \ 10\}$$

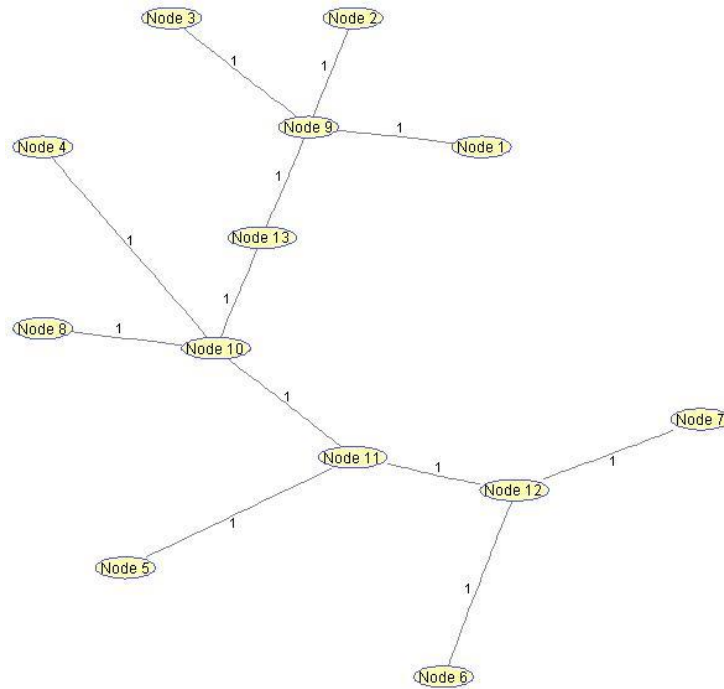
Εφόσον η ακολουθία *Prüfer* έχει 11 στοιχεία, οι κόμβοι του δέντρου θα είναι: $n - 2 = 11 \Leftrightarrow n = 13$

Από τον αλγόριθμο αποκωδικοποίησης *Prüfer*, προκύπτουν οι ακμές του αντίστοιχου δέντρου, και κατ'επέκτασιν ο πίνακας γειτνίασης:

5.2:Πίνακας γειτνίασης

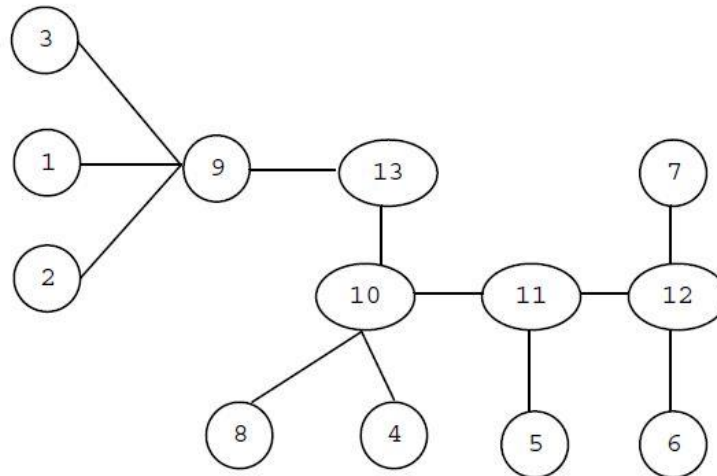
(1,9)	1
(2,9)	1
(3,9)	1
(4,10)	1
(8,10)	1
(11,10)	1
(5,11)	1
(12,11)	1
(6,12)	1
(7,12)	1
(9,13)	1
(10,13)	1

Επομένως, το δέντρο που προκύπτει είναι το εξής:



Εικόνα 5.1: Τοπολογία δέντρου που αντιστοιχεί στον πίνακα D

Παρατηρείται οπτικά ότι η ευρισκόμενη τοπολογία της Εικόνας 5. 1 ταυτίζεται πράγματι με την ευρισκόμενη τοπολογία του [23].



Εικόνα 5.2: Τοπολογία δέντρου που αντιστοιχεί στον πίνακα D , [23]

5.5:Εύρεση τοπολογίας από πίνακα ευαισθησίας

5.5.1:Θεωρητικός υπολογισμός πίνακα μήκους μονοπατιών από πίνακα ευαισθησίας

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο,θεωρητικά,το κάθε στοιχείο του πίνακα ευαισθησίας προκύπτει ως το άθροισμα των αντιστάσεων του κοινού μονοπατιού,που ξεκινάει από τη ρίζα του δέντρου(ζυγός αναφοράς του δικτύου Χαμηλής Τάσης), μεταξύ δύο φύλλων.Σε αυτόν τον πίνακα τα διαγώνια στοιχεία,που ονομάζονται αυτοευαισθησίες,αναπαριστούν την απόσταση του αντίστοιχου φύλλου από την ρίζα.Έτσι,με το κάθε στοιχείο του πίνακα μονοπατιών, $D(i,j)$, που δείχνει τις αποστάσεις μεταξύ των φύλλων i,j ,θα προκύπτει ως εξής:

- Η απόσταση του φύλλου i από τον πλησιέστερο στη ρίζα κοινό ενδιάμεσο κόμβο μεταξύ των φύλλων i,j , θα είναι ίση με την απόσταση του φύλλου i από τη ρίζα μείον την απόσταση του κοινού μονοπατιού των φύλλων i,j από τη ρίζα
- Η απόσταση του φύλλου j από τον πλησιέστερο στη ρίζα κοινό ενδιάμεσο κόμβο μεταξύ των φύλλων i,j , θα είναι ίση με την απόσταση του φύλλου j από τη ρίζα μείον την απόσταση του κοινού μονοπατιού των φύλλων i,j από τη ρίζα
- Η απόσταση μεταξύ δύο φύλλων i,j θα είναι ίση με την απόσταση του φύλλου i από τον πλησιέστερο στη ρίζα κοινό ενδιάμεσο κόμβο μεταξύ των φύλλων i,j συν την απόσταση του φύλλου j από τον πλησιέστερο στη ρίζα κοινό ενδιάμεσο κόμβο μεταξύ των φύλλων i,j

Τα παραπάνω εκφράζονται ισοδύναμα ως εξής:

$$D(i,j) = \text{autosensitivity}(i) - \text{sensitivity}(i,j) + \text{autosensitivity}(j) - \text{sensitivity}(j,i) , (5.1)$$

Προφανώς,τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα μήκους μονοπατιών θα είναι ίσα με 0:

$$D(i,i) = 0 \quad (5.2)$$

Επιπλέον,πρέπει να σημειωθεί ότι σε έναν πίνακα μήκους μονοπατιών,όπως δίνεται αρχικά,δεν μπορεί να υπάρχει 1.Ο αρχικός πίνακας μήκους μονοπατιών εξ'ορισμού αναφέρεται στις αποστάσεις μεταξύ των φύλλων του αντίστοιχου δέντρου.Έτσι,αν υπάρχει 1,θα σημαίνει ότι τα αντίστοιχα φύλλα είναι γειτονικοί κόμβοι,κάτι που είναι αδύνατο αφού έρχεται σε σύγκρουση με τον ορισμό των φύλλων , σύμφωνα με τον οποίον έχουν μόνο μία γειτονική ακμή(ισοδύναμα βαθμό 1).Επομένως,σε περίπτωση που προκύψει πίνακας μήκους μονοπατιών με άσσο ή άσσους ανάμεσα στα στοιχεία του,απορρίπτεται καθώς δεν υπάρχει δέντρο που να τον ικανοποιεί.

Μία από τις βασικές προϋποθέσεις του αλγορίθμου εύρεσης τοπολογίας με βάση την ακολουθία *Prüfer* είναι ότι όλες οι ακμές του δέντρου είναι μεταξύ τους ίσες.Έτσι,η απόσταση μεταξύ δύο οποιονδήποτε κόμβων θεωρείται δεδομένη και έστω ότι είναι ίση με 1.Ισοδύναμα η κάθε ακμή του δέντρου θεωρείται ότι έχει μήκος ίσο με 1.Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του πίνακα αποστάσεων μεταξύ φύλλων για τις διάφορες περιπτώσεις δεδομένων,καθώς και ο τρόπος εύρεσης της τοπολογίας σε κάθε περίπτωση.

5.5.2:Υποθέσεις για τον υπολογισμό του πίνακα μήκους μονοπατιών και την εύρεση τοπολογίας

Στα δίκτυα Χαμηλής Τάσης που εξετάζονται,για να είναι δυνατή η εύρεση της τοπολογίας βάσει των μετρήσεων των έξυπνων μετρητών των καταναλωτών με τη χρήση του αλγόριθμου εύρεσης τοπολογίας *Prüfer*,έχει γίνει η θεώρηση ότι από τον ζυγό του μετασχηματιστή εξετάζεται κάθε φορά μόνο μία αναχώρηση γραμμής,ανεξάρτητα από τις άλλες αναχωρήσεις. Έτσι, οι μεταβολές των φορτίων στις διάφορες αναχωρήσεις γραμμών δεν επηρεάζουν τις υπόλοιπες. Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο,σε σταθερή κατάσταση, διατηρώντας την τάση στον ζυγό αναφοράς ίση με την ονομαστική,επιτυγχάνεται απόζευξη μεταξύ των διαφορετικών αναχωρήσεων γραμμών από τον ζυγό αναφοράς.Ως αποτέλεσμα,κάθε αναχώρηση λειτουργεί χωρίς την επίδραση από άλλες γραμμές. Ισοδύναμα,η ρίζα του δέντρου που αναπαριστά το δίκτυο ΧΤ είναι φύλλο[13].

Έτσι,στα δίκτυα που εξετάζονται , για να συμπεριληφθεί ο ζυγός αναφοράς στην ευρισκόμενη τοπολογία,θα πρέπει η ρίζα να αντιμετωπιστεί ως φύλλο.Διαφορετικά,δεν θα φαίνεται στον πίνακα μήκους μονοπατιών,και άρα ο αλγόριθμος εύρεσης τοπολογίας *Prüfer* θα την αγνοεί κατά τον εντοπισμό της τοπολογίας,με αποτέλεσμα να καταλήξει σε λανθασμένη τοπολογία.Η ρίζα μπορεί να συμπεριληφθεί με δύο τρόπους στον πίνακα μήκους μονοπατιών:

1)Πέραν των μετρητών των καταναλωτών μιας γραμμής, υπάρχει μετρητής και στον ζυγό του μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ.Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από αυτόν,μπορούν να συνυπολογιστούν για τον υπολογισμό του πίνακα ευαισθησίας.Όμως,ο πίνακας ευαισθησίας που προκύπτει θα παρουσιάζει κάποια απόκλιση σε σχέση από αυτόν που υπολογίζεται χωρίς τις μετρήσεις στον ζυγό αναφοράς,παρά το γεγονός ότι η τάση στον ζυγό αναφοράς παραμένει αμετάβλητη.Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο πίνακας ευαισθησίας προκύπτει από την επίλυση ενός γραμμικού συστήματος εξισώσεων,και σε αυτή την περίπτωση εισάγονται δύο επιπλέον στιγμιότυπα-εξισώσεις στην επίλυση.Με αυτό τον τρόπο είναι πιθανό να επηρεάζεται και ο πίνακας μήκους μονοπατιών,με αποτέλεσμα να είναι πιθανή η εμφάνιση σφαλμάτων μεταξύ ευρισκόμενης και πραγματικής τοπολογίας.Το μέγεθος των σφαλμάτων αυτών καθώς και το κατά πόσο επηρεάζουν στον υπολογισμό της τοπολογίας του δικτύου θα εξεταστούν σε επόμενο κεφάλαιο.

2)Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τον μετρητή στο ζυγό του Μ/Σ δεν λαμβάνονται υπόψιν στον υπολογισμό του πίνακα ευαισθησίας.Γνωρίζοντας ότι κάθε μη διαγώνιο στοιχείο του πίνακα μήκους μονοπατιών περιέχει όλες τις αποστάσεις μεταξύ των φύλλων,αν η ρίζα θεωρηθεί φύλλο,οι αποστάσεις της ως προς τα υπόλοιπα φύλλα θα είναι οι αυτοευαισθησίες του πίνακα ευαισθησίας.Έτσι ,μπορεί να τοποθετηθούν απευθείας στον πίνακα μήκους μονοπατιών οι αυτοευαισθησίες στη γραμμή και στήλη που αντιστοιχούν στον ζυγό αναφοράς.

Για τα δίκτυα Χαμηλής Τάσης που εξετάζονται, υποτίθεται ότι τόσο οι αποστάσεις μεταξύ πυλώνων όσο και οι αποστάσεις μεταξύ πυλώνων και καταναλωτών δεν μπορεί να είναι μικρότερες των 10 m. Δηλαδή πρέπει:

$$Distance_{pole-to-pole} \geq 10m \quad (5.3)$$

$$Distance_{pole-to-load} \geq 10m \quad (5.4)$$

Επιπλέον, έχει υποτεθεί ότι όλα τα μήκη των γραμμών είναι μεταξύ τους ίσα. Όσον αφορά στα είδη των γραμμών, στα δίκτυα χαμηλής τάσης στην Ελλάδα, χρησιμοποιούνται 5 είδη υπέργειων γραμμών μεταξύ των πυλώνων, και 5 είδη γραμμών υπηρεσίας (service lines), από τους πυλώνες προς τους καταναλωτές. Ωστόσο, πλέον στις εναέρια γραμμές χρησιμοποιούνται συνεστραμμένα καλώδια συνήθως. Τα είδη των γραμμών που χρησιμοποιούνται φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 5.3: Τυπικά είδη γραμμών δικτύου ΧΤ[11]

	Line type	R_{ph} (Ω/km)	X_{ph} (Ω/km)	$R_{neutral}$ (Ω/km)	R_0 (Ω/km)	X_0 (Ω/km)
1	OL - Twisted cable 4x120 mm ² Al	0.284 ⁽¹⁾	0.083		1.136	0.417
2	OL - Twisted cable 3x70 mm ² Al + 54.6 mm ² AAAC	0.497 ⁽¹⁾	0.086	0.630	2.387	0.447
3	OL - Al conductors 4x50 mm ² equiv. Cu	0.397 ⁽¹⁾	0.279			
4	OL - Al conductors 4x35 mm ² equiv. Cu	0.574 ⁽¹⁾	0.294			
5	OL - Al conductors 4x16 mm ² equiv. Cu	1.218 ⁽¹⁾	0.318			
6	UL - 3x150 mm ² Al + 50 mm ² Cu	0.264 ⁽²⁾	0.071	0.387 ⁽²⁾		
7	SC - 4x6 mm ² Cu	3.690 ⁽³⁾	0.094		13.64	0.472
8	SC - 4x16 mm ² Cu	1.380 ⁽³⁾	0.082		5.52	0.418
9	SC - 4x25 mm ² Cu	0.871 ⁽³⁾	0.081		3.48	0.409
10	SC - 3x50 mm ² Al + 35 mm ² Cu	0.822 ⁽²⁾	0.077	0.524 ⁽²⁾	2.04	0.421
11	SC - 3x95 mm ² Al + 35 mm ² Cu	0.410 ⁽²⁾	0.071	0.524 ⁽²⁾		

OL: Overhead line, UL: Underground line, SC: Service connection

⁽¹⁾: Ohmic resistance at 50 °C conductor temperature

⁽²⁾: Ohmic resistance at temperature 90 °C for phase conductors and 20 °C for the neutral

⁽³⁾: Ohmic resistance at temperature 70 °C for all conductors

Ανάλογα με τα δεδομένα που δίνονται κάθε φορά, προτείνεται η αντίστοιχη μεθοδολογία υπολογισμού του πίνακα μήκους μονοπατιών μεταξύ φύλλων, από τον οποίο εξάγεται η τοπολογία του δικτύου.

5.5.2.1: Υπόθεση 1: Τα μήκη των γραμμών είναι γνωστά & ίσα, Τα είδη των γραμμών είναι γνωστά

Εκτός από τις μετρήσεις των έξυπνων μετρητών, είναι γνωστά τόσο τα μήκη όσο και τα είδη των γραμμών του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ότι όλες οι γραμμές έχουν το ίδιο μήκος, έστω $length$ ($σε m$), και δίνονται οι αντιστάσεις των γραμμών σε (αμ) τιμές (δίνονται οι αντιστάσεις γιατί για τον υπολογισμό του πίνακα μήκους μονοπατιών χρησιμοποιείται ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος), $R_{pole-to-pole}(pu)$, $R_{pole-to-load}(pu)$.

Γνωρίζοντας ότι, θεωρητικά, τα στοιχεία του πίνακα ευαισθησίας αντιστοιχούν στο άθροισμα των αντιστάσεων των κοινών μονοπατιών μεταξύ των φύλλων ξεκινώντας από την ρίζα του δέντρου, δηλαδή αντιστοιχούν πρακτικά σε αποστάσεις, λαμβάνονται οι απόλυτες τιμές του πειραματικού πίνακα ευαισθησίας για την εύρεση της τοπολογίας. Έπειτα, τα στοιχεία του πίνακα ομαδοποιούνται με εύρος που προκύπτει από οπτική παρατήρηση των στοιχείων του πίνακα, και υπολογίζεται ο μέσος όρος των στοιχείων κάθε ομάδας. Ύστερα, τα στοιχεία κάθε ομάδας αντικαθίστανται στον πίνακα ευαισθησίας από τον μέσο όρο της ομάδας. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται μια πρώτη προσπάθεια εξάλειψης των σφαλμάτων των μετρήσεων και προσέγγισης του θεωρητικά αναμενόμενου πίνακα ευαισθησίας, με βάση τα δεδομένα των γραμμών, όπως έχουν παρουσιαστεί παραπάνω, καθώς και της προτεινόμενης θεωρίας ευαισθησίας που έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο νέος προσεγγιστικός πίνακας ευαισθησίας που προκύπτει θα είναι συμμετρικός.

Στη συνέχεια,διαιρώντας όλα τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα ευαισθησίας με την αντίσταση ενός τμήματος μεταξύ δύο πυλώνων του δικτύου, $R_{pole-to-pole}(pu)$,εντοπίζεται κατά προσέγγιση το πλήθος των ακμών μεταξύ πυλώνων που περιέχονται στο ελάχιστο κοινό μονοπάτι (ελάχιστο μη μηδενικό στοιχείο) του πίνακα.Έπειτα,ανάλογα με το πλήθος των ακμών που περιέχονται στο μικρότερο μη μηδενικό στοιχείο του πίνακα,εντοπίζεται το μικρότερο στοιχείο ευαισθησίας,έστω $sensitivity_{min}(pu)$,που θα βρίσκεται και πιο κοντά στην αντίσταση ενός τμήματος μεταξύ δύο πυλώνων του δικτύου, $R_{pole-to-pole}(pu)$.Αυτό το στοιχείο θα βρίσκεται μεταξύ των μη διαγώνιων στοιχείων του πίνακα,καθώς σε κάθε αυτοευαισθησία, εκτός των τμημάτων μεταξύ των πυλώνων που οδηγούν στο φορτίο από τον ζυγό του Μ/Σ,εμπεριέχεται και το αντίστοιχο τμήμα του δικτύου μεταξύ πυλώνα και καταναλωτή. Επιπλέον,αυτό το στοιχείο θα αντιστοιχεί στη συνολική αντίσταση μεταξύ δύο πυλώνων,με το σφάλμα των μετρήσεων και της παραπάνω προσέγγισης να εμπεριέχονται σε αυτό. Αυτό το σφάλμα της μέτρησης ως προς την πραγματική αντίσταση του δικτύου, υπολογίζεται ως εξής:

$$error = \frac{|R_{pole-to-pole} - sensitivity_{min}|}{R_{pole-to-pole}}, (pu) \quad (5.5)$$

Έτσι,ο νέος συμμετρικός πίνακας που προκύπτει,συμπεριλαμβανομένου αυτού του σφάλματος, είναι ο ακόλουθος:

$$[sensitivity_{new}] = [sensitivity] + error \cdot [sensitivity] = (1 + error)[sensitivity], (pu) \quad (5.6)$$

Ύστερα από αυτή τη δεύτερη προσέγγιση,από τα διαγώνια στοιχεία,έστω $diag([sensitivity_{new}])$, αφαιρείται το αντίστοιχο τμήμα πυλώνα-καταναλωτή, $R_{pole-to-load}(pu)$:

$$diag([sensitivity_{new}]) - R_{pole-to-load}, (pu) \quad (5.7)$$

Πλέον,όλα τα στοιχεία του πίνακα,διαγώνια και μη, θα αποτελούνται αποκλειστικά από τμήματα μεταξύ πυλώνων, δηλαδή,θα είναι σχεδόν ακέραια πολλαπλάσια της αντίστασης $R_{pole-to-pole}$. Επομένως,διαιρώντας όλα τα στοιχεία του πίνακα με την $R_{pole-to-pole}$,και θεωρώντας ότι αυτή η αντίσταση αντιπροσωπεύει μία ακμή του δέντρου που προσομοιώνει το δίκτυο ΧΤ μεταξύ ενδιάμεσων κόμβων,ή ισοδύναμα,μία υπέργεια γραμμή, θα προκύψουν όλα τα μονοπάτια κατά μήκος των υπέργειων γραμμών μεταξύ των καταναλωτών ως σχεδόν ακέραιοι. Επισημαίνεται ότι για τα διαγώνια στοιχεία υπολείπεται,και άρα πρέπει να προστεθεί, ακόμη μία ακμή,αυτή μεταξύ πυλώνα και καταναλωτή ΧΤ,που αφαιρέθηκε προηγουμένως.Σε αυτή την περίπτωση,η ακμή αυτή μπορεί να θεωρηθεί εξαρχής ως 1,ή διαφορετικά,να προκύψει από τη στρογγυλοποίηση του ποσοστού της διαφοράς μεταξύ της συνολικής αντίστασης μιας γραμμής υπηρεσίας και της συνολικής αντίστασης μιας υπέργειας γραμμής:

$$error_{pole-to-load} = round\left(\frac{|R_{pole-to-load} - R_{pole-to-pole}|}{R_{pole-to-load}}\right), (pu) \quad (5.8)$$

Για να προκύπτει αυτό το σφάλμα 1,θα πρέπει να είναι κατάλληλος ο συνδυασμός των αντιστάσεων των εναέριων γραμμών με τις γραμμές καταναλωτών.

Τέλος, λόγω της θεώρησης του αλγορίθμου Prufer ότι οι ακμές του δέντρου είναι μεταξύ τους ίσες, και αντιστοιχούν σε 1, όλα τα στοιχεία του πίνακα ευαισθησίας στρογγυλοποιούνται ώστε να είναι ακέραιοι. Έπειτα από αυτή την τρίτη προσέγγιση, ο τελικός πίνακας ευαισθησίας, έστω $sensitivity_{final}$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα αποστάσεων D , σύμφωνα με την σχέση (5.1):

$$D(i, j) = autosensitivity_{final}(i) - sensitivity_{final}(i, j) + autosensitivity_{final}(j) - sensitivity_{final}(j, i)$$

από τον οποίο εξάγεται η τοπολογία του δικτύου, χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο.

Για την επαλήθευση ότι η ευρισκόμενη τοπολογία είναι η πραγματική, μπορεί να εφαρμοστεί στην ευρισκόμενη τοπολογία η ίδια ροή φορτίου από την οποία ελήφθησαν οι πειραματικές μετρήσεις.

5.5.2.2: Υπόθεση 2: Τα μήκη των γραμμών είναι άγνωστα & ίσα, Τα είδη των γραμμών είναι γνωστά

Σε αυτή την περίπτωση, εκτός από τις πειραματικές μετρήσεις, είναι γνωστά τα είδη των γραμμών, ενώ δεν είναι γνωστά τα μήκη τους. Έτσι, διαιρώντας τις αντιστάσεις με $1000 \cdot Z_b$, υπολογίζονται οι αντιστάσεις του δικτύου σε αμ ανά m:

$$R_{pole-to-pole}(pu/m) = \frac{R_{pole-to-pole}(pu)}{1000 \cdot Z_b} \quad (5.9)$$

$$R_{pole-to-load}(pu/m) = \frac{R_{pole-to-load}(pu)}{1000 \cdot Z_b} \quad (5.10)$$

Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, αρχικά λαμβάνονται οι απόλυτες τιμές του πειραματικού πίνακα ευαισθησίας. Έπειτα, τα στοιχεία του πίνακα ομαδοποιούνται με εύρος που προκύπτει από οπτική παρατήρηση του πίνακα ευαισθησίας, και υπολογίζεται ο μέσος όρος των στοιχείων κάθε ομάδας. Ύστερα, τα στοιχεία κάθε ομάδας αντικαθίστανται στον πίνακα ευαισθησίας από τον μέσο όρο της ομάδας. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται μια πρώτη προσπάθεια εξάλειψης των σφαλμάτων των μετρήσεων και προσέγγισης του θεωρητικά αναμενόμενου πίνακα ευαισθησίας, με βάση τα δεδομένα των γραμμών, όπως έχουν παρουσιαστεί παραπάνω, καθώς και της προτεινόμενης θεωρίας ευαισθησίας που έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο νέος προσεγγιστικός πίνακας ευαισθησίας που προκύπτει θα είναι συμμετρικός.

Ακολούθως, τα μη διαγώνια στοιχεία του πίνακα, που αποτελούνται αποκλειστικά από αντιστάσεις που αντιστοιχούν σε τμήματα του δικτύου μεταξύ πυλώνων, διαιρούνται με την αντίσταση $R_{pole-to-pole}(pu/m)$ που αντιστοιχεί σε 1m. Έτσι, τα μη διαγώνια στοιχεία που προκύπτουν, αναπαριστούν τη συνολική απόσταση του κοινού μονοπατιού μεταξύ των δύο αντίστοιχων φύλλων, από την ρίζα, και μετρώνται σε m. Στη συνέχεια, απ' όλες τις τιμές αποστάσεων που προκύπτουν, εντοπίζεται η μικρότερη τιμή απόστασης που μπορεί να ανταποκρίνεται σε πραγματική απόσταση μεταξύ δύο πυλώνων της ΔΕΗ. Για παράδειγμα, υποτίθεται ότι η απόσταση μεταξύ δύο πυλώνων θα είναι μεγαλύτερη ή ίση με 10m. Επομένως, επιλέγεται η μικρότερη απόσταση, min_length από τα στοιχεία του πίνακα που είναι μεγαλύτερη ή ίση των 10m. Η απόσταση αυτή δεν θα είναι ακέραιος

λόγω των σφαλμάτων των μετρήσεων. Μια δεύτερη προσέγγιση αποτελεί η στρογγυλοποίηση αυτού του μήκους, με στόχο την προσέγγιση της πραγματικής απόστασης. Αυτό το μήκος θα αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ δύο πυλώνων, κι επειδή είναι δεδομένο ότι όλες οι αποστάσεις μεταξύ των ενδιάμεσων κόμβων του δικτύου είναι ίδιες για τα δίκτυα που εξετάζονται, διαιρώντας όλα τα μη διαγώνια στοιχεία του παραπάνω πίνακα με αυτό το μήκος, προκύπτουν σχεδόν ακέραια πολλαπλάσια της απόστασης αυτής.

Όσον αφορά τις αυτοευαισθησίες του αρχικού πίνακα (*sensitivity*), αποτελούνται από αντιστάσεις τμημάτων μεταξύ ενδιάμεσων κόμβων, και από τη συνολική αντίσταση ενός τμήματος μεταξύ ενδιάμεσου κόμβου και φορτίου. Καθώς έχει θεωρηθεί ότι όλες οι γραμμές έχουν τα ίδια μήκη, τα τμήματα μεταξύ πυλώνων-καταναλωτών θα έχουν συνολική αντίσταση:

$$R_{pole-to-load}(pu) = min_length(m) \cdot R_{pole-to-load}(pu/m) \quad (5.11)$$

ενώ τα τμήματα μεταξύ των πυλώνων, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, θα έχουν συνολική αντίσταση:

$$R_{pole-to-pole}(pu) = min_length(m) \cdot R_{pole-to-pole}(pu/m) \quad (5.12)$$

Επομένως, ομοίως πλέον με την προηγούμενη περίπτωση, από τη σχέση (5.7), από τα διαγώνια στοιχεία αφαιρείται το αντίστοιχο τμήμα πυλώνα-καταναλωτή, $R_{pole-to-load}$:

$$diag([sensitivity_{new}]) - R_{pole-to-load}, (pu)$$

Τα διαγώνια στοιχεία που προκύπτουν, αποτελούνται πλέον μόνο από τμήματα μεταξύ ενδιάμεσων κόμβων, κι έτσι, διαιρώντας τα με την αντίσταση $R_{pole-to-pole}$, θα προκύψουν σχεδόν ακέραιοι που θα δείχνουν τα μήκη από τον ζυγό του ΜΣ μέχρι τον πυλώνα πριν το αντίστοιχο φορτίο, με τη θεώρηση ότι κάθε ακμή αντιπροσωπεύεται από το 1.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει έλεγχος των διαγώνιων αυτών στοιχείων. Αν υπάρχει αρνητικό στοιχείο, σημαίνει ότι το επιλεγμένο μήκος είναι πολύ μεγάλο, και κατ'επέκτασιν, ότι αντιστοιχεί σε δύο ή περισσότερα τμήματα μεταξύ πυλώνων, κι όχι σε ένα, όπως έχει υποθεθεί μέχρι στιγμής. Έτσι, αρχικά, το επιλεγμένο μήκος διαιρείται με 2, και αν υπάρχει πάλι αρνητικό στοιχείο μεταξύ των παραπάνω στοιχείων, το επιλεγμένο μήκος διαιρείται με 3 και ούτω καθεξής. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να μην υπάρχει αρνητικό στοιχείο μεταξύ των διαγώνιων, και το αποδεκτό μήκος που θα προκύψει από αυτές τις διαιρέσεις θα είναι ίσο με το μήκος μίας ακμής.

Ακόμη, από τα παραπάνω διαγώνια στοιχεία υπολείπεται, και άρα πρέπει να προστεθεί, ακόμη μία ακμή, αυτή μεταξύ πυλώνα και καταναλωτή ΧΤ, που αφαιρέθηκε προηγουμένως. Σε αυτή την περίπτωση, η ακμή αυτή μπορεί να θεωρηθεί εξαρχής ως 1, ή διαφορετικά, για κατάλληλο συνδυασμό γραμμών, θα προκύψει από τη στρογγυλοποίηση του ποσοστού της διαφοράς μεταξύ της συνολικής αντίστασης μιας γραμμής υπηρεσίας (service line) και της συνολικής αντίστασης μιας υπέργειας γραμμής, από τη σχέση (5.8):

$$error_{pole-to-load} = round\left(\frac{|R_{pole-to-load} - R_{pole-to-pole}|}{R_{pole-to-load}}\right), (pu)$$

Για να προκύπτει αυτό το σφάλμα 1, θα πρέπει να είναι κατάλληλος ο συνδυασμός των αντιστάσεων των εναέριων γραμμών με τις γραμμές καταναλωτών.

Τέλος, λόγω της θεώρησης του αλγορίθμου Prufer ότι οι ακμές του δέντρου είναι μεταξύ τους ίσες, και αντιστοιχούν σε 1, όλα τα στοιχεία του πίνακα ευαισθησίας στρογγυλοποιούνται ώστε να είναι ακέραιοι. Έπειτα από αυτή την τρίτη προσέγγιση, ο τελικός πίνακας ευαισθησίας, έστω $sensitivity_{final}$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα αποστάσεων D , σύμφωνα με την σχέση (5.1):

$$D(i, j) = autosensitivity_{final}(i) - sensitivity_{final}(i, j) + autosensitivity_{final}(j) - sensitivity_{final}(j, i)$$

από τον οποίο εξάγεται η τοπολογία του δικτύου, χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο.

Για την επαλήθευση ότι η ευρισκόμενη τοπολογία είναι η πραγματική, μπορεί να εφαρμοστεί στην ευρισκόμενη τοπολογία η ίδια ροή φορτίου από την οποία ελήφθησαν οι πειραματικές μετρήσεις.

5.5.2.3: Υπόθεση 3: Τα μήκη των γραμμών είναι γνωστά & ίσα, Τα είδη των γραμμών είναι άγνωστα

Σε αυτή την περίπτωση, για την εύρεση της τοπολογίας, είναι γνωστά τα μήκη των γραμμών, έστω $length$, ενώ το είδος τους είναι άγνωστο. Ωστόσο, στα δίκτυα χαμηλής τάσης που εξετάζονται, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιούνται 5 είδη υπέργειων γραμμών μεταξύ των πυλώνων, και 5 είδη γραμμών υπηρεσίας (service lines), από τους πυλώνες προς τους καταναλωτές.

Αρχικά, λαμβάνονται οι απόλυτες τιμές του πειραματικού πίνακα ευαισθησίας. Έπειτα, τα στοιχεία του πίνακα ομαδοποιούνται με εύρος που προκύπτει από οπτική παρατήρησή του, και υπολογίζεται ο μέσος όρος των στοιχείων κάθε ομάδας. Εν συνεχεία, τα στοιχεία κάθε ομάδας αντικαθίστανται στον πίνακα ευαισθησίας από τον μέσο όρο της ομάδας. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται μια πρώτη προσπάθεια εξάλειψης των σφαλμάτων των μετρήσεων και προσέγγισης του θεωρητικά αναμενόμενου πίνακα ευαισθησίας, με βάση τα δεδομένα των γραμμών, όπως έχουν παρουσιαστεί παραπάνω, καθώς και της προτεινόμενης θεωρίας ευαισθησίας που έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο νέος προσεγγιστικός πίνακας ευαισθησίας που προκύπτει θα είναι συμμετρικός.

Από την υπόθεση ότι όλες οι γραμμές του δικτύου έχουν το ίδιο μήκος, συνάγεται ότι όλα τα στοιχεία του πίνακα ευαισθησίας θα είναι πολλαπλάσια αυτού του μήκους. Ως αποτέλεσμα, διαιρώντας όλα τα στοιχεία του πίνακα με αυτό το μήκος, τα στοιχεία που θα προκύψουν θα αντιπροσωπεύουν τις ανά μονάδα τιμές των αντιστάσεων των κοινών μονοπατιών των αντίστοιχων φύλλων από την ρίζα, που αντιστοιχούν σε απόσταση 1m.

Έπειτα, από τον πίνακα που προκύπτει, από τα μη διαγώνια στοιχεία, που αποτελούνται μόνο από τμήματα μεταξύ ενδιάμεσων ζυγών του δικτύου, εντοπίζεται η μικρότερη δυνατή τιμή της αντίστασης ανά m, έστω $sensitivity_{min}(pu/m)$. Αυτή μπορεί να αντιστοιχεί σε μία ή περισσότερες ακμές του δέντρου. Έτσι, ελέγχεται ποια από τα είδη των υπέργειων γραμμών είναι δυνατό να ανταποκρίνονται στο πραγματικό δίκτυο σύμφωνα με αυτή την ελάχιστη ευαισθησία, κι επίσης υπολογίζεται και το

αντίστοιχο πλήθος ακμών.Μόλις καθοριστεί/ελεγχθεί το πλήθος των ακμών που περιέχονται στην ελάχιστη ευαισθησία,κι εφόσον υπάρχουν μόνο 5 είδη υπέργειων γραμμών που χρησιμοποιούνται στα εξεταζόμενα δίκτυα,ελέγχεται η διαφορά αυτής της ελάχιστης αντίστασης $sensitivity_{min}$ με τις αντιστάσεις των 5 ειδών υπέργειων γραμμών που χρησιμοποιούνται.Στην ελάχιστη από αυτές τις διαφορές,θα αντιστοιχεί η πραγματική αντίσταση που χρησιμοποιείται στις υπέργειες γραμμές, $R_{pole_to_pole}(pu/m)$.

Ύστερα, υπολογίζεται το σφάλμα της μέτρησης ως προς την πραγματική αντίσταση του δικτύου, ως εξής:

$$error = \frac{|R_{pole-to-pole}(pu/m) - sensitivity_{min}(pu/m)|}{R_{pole-to-pole}(pu/m)}, (pu) \quad (5.13)$$

Έτσι,ο νέος συμμετρικός πίνακας που προκύπτει,συμπεριλαμβανομένου αυτού του σφάλματος, είναι ο ακόλουθος:

$$[sensitivity_{new}] = [sensitivity] + error \cdot [sensitivity] = (1 + error)[sensitivity], \left(\frac{pu}{m}\right), (5.14)$$

Το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί για την εύρεση της τοπολογίας είναι, πλέον, ο προσδιορισμός της αντίστασης των τμημάτων ανάμεσα στους πυλώνες και τους καταναλωτές.Από τον πίνακα ευαισθησίας η πληροφορία για τις αντιστάσεις των τμημάτων αυτών περιέχεται στις αυτοευαισθησίες.

Η αυτοευαισθησία ενός καταναλωτή, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αντιπροσωπεύει τη συνολική αντίσταση του μονοπατιού κατά μήκος των υπέργειων γραμμών,από τη ρίζα μέχρι και τον πυλώνα στον οποίο συνδέεται ο καταναλωτής, και της αντίστασης από τον τελευταίο αυτόν πυλώνα προς τον καταναλωτή.Με βάση όμως τα δεδομένα της υπόθεσης ,δεν μπορεί να εξαχθεί αυτή η πληροφορία σχετικά με την αντίσταση $R_{pole-to-load}(pu/m)$.

Γι'αυτό το λόγο,προτείνεται η εύρεση του πίνακα μήκους μονοπατιών μεταξύ φύλλων,και κατ'επέκτασιν η εύρεση της τοπολογίας,για κάθε ένα από τα αποδεκτά υπαρκτά είδη γραμμών υπηρεσίας.Για να είναι αποδεκτό ένα είδος γραμμής ,πρέπει η ανά μονάδα τιμή της αντίστασής της που αντιστοιχεί σε 1m,να είναι μικρότερη από τις αντιστάσεις σε pu/m των συνολικών μονοπατιών προς τα φύλλα,δηλαδή πρέπει να είναι μικρότερη από όλα τα διαγώνια στοιχεία.

Επομένως,η διαδικασία για κάθε αποδεκτή τιμή της $R_{pole-to-load}(pu/m)$ είναι η εξής:

Από τα διαγώνια στοιχεία αφαιρείται το αντίστοιχο τμήμα πυλώνα-καταναλωτή, $R_{pole-to-load}(pu/m)$:

$$diag([sensitivity_{new}]) - R_{pole-to-load}, (pu/m) \quad (5.15)$$

Πλέον,όλα τα στοιχεία του πίνακα,διαγώνια και μη, θα αποτελούνται αποκλειστικά από τμήματα μεταξύ πυλώνων,δηλαδή,θα είναι σχεδόν ακέραια πολλαπλάσια της αντίστασης $R_{pole-to-pole}(pu/m)$. Επομένως,διαιρώντας όλα τα στοιχεία του πίνακα με την $R_{pole-to-pole}(pu/m)$,και θεωρώντας ότι αυτή η αντίσταση αντιπροσωπεύει μία ακμή του δέντρου που προσομοιώνει το δίκτυο ΧΤ μεταξύ

ενδιάμεσων κόμβων,ή ισοδύναμα,μία υπέργεια γραμμή, θα προκύψουν όλα τα μονοπάτια κατά μήκος των υπέργειων γραμμών μεταξύ των καταναλωτών ως σχεδόν ακέραιοι.

Επισημαίνεται ότι για τα διαγώνια στοιχεία υπολείπεται,και άρα πρέπει να προστεθεί, ακόμη μία ακμή,αυτή μεταξύ πυλώνων και καταναλωτή ΧΤ,που αφαιρέθηκε προηγουμένως.Σε αυτή την περίπτωση,η ακμή αυτή μπορεί να θεωρηθεί εξαρχής ως 1,ή διαφορετικά,να προκύψει από τη στρογγυλοποίηση του ποσοστού της διαφοράς μεταξύ της συνολικής αντίστασης μιας γραμμής υπηρεσίας και της συνολικής αντίστασης μιας υπέργειας γραμμής:

$$error_{pole-to-load} = round\left(\frac{|R_{pole-to-load}(pu/m) - R_{pole-to-pole}(pu/m)|}{R_{pole-to-load}(pu/m)}\right), (pu)$$

που θα πρέπει να προκύπτει πάλι 1,δηλαδή ο συνδυασμός γραμμών καταναλωτών και εναέριων πρέπει να είναι κατάλληλος.

Τέλος,λόγω της θεώρησης του αλγορίθμου Prufer ότι οι ακμές του δέντρου είναι μεταξύ τους ίσες,και αντιστοιχούν σε 1,όλα τα στοιχεία του πίνακα ευαισθησίας στρογγυλοποιούνται ώστε να είναι ακέραιοι. Έπειτα από αυτή την τρίτη προσέγγιση,ο τελικός πίνακας ευαισθησίας,έστω $sensitivity_{final}$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα αποστάσεων D ,σύμφωνα με την σχέση (5.1):

$$D(i,j) = autosensitivity_{final}(i) - sensitivity_{final}(i,j) + autosensitivity_{final}(j) - sensitivity_{final}(j,i)$$

από τον οποίο εξάγεται η τοπολογία του δικτύου,χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο.

Για τις διάφορες τοπολογίες δικτύων που προκύπτουν,ανάλογα με τα δεδομένα του δικτύου,μπορεί να εξεταστεί αν κάποια είναι η πραγματική,αν εφαρμοστεί σε κάθε μία από αυτές η ίδια ροή φορτίου από την οποία ελήφθησαν τα πειραματικά δεδομένα.Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι εφαρμόζονται στα φορτία της ευρισκόμενης τοπολογίας οι τιμές των καταναλώσεων που λαμβάνονται από τα διάφορα στιγμιότυπα των έξυπνων μετρητών.Για αυτές τις τιμές ισχύος,από τη ροή φορτίου προκύπτουν οι τιμές των τάσεων στους ζυγούς φορτίου.Αν αυτές οι τιμές των τάσεων έχουν σχετικά μικρή απόκλιση από τις δεδομένες,τότε η ευρισκόμενη τοπολογία θα προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική.Διαφορετικά,η ευρισκόμενη τοπολογία δεν θα ανταποκρίνεται στην πραγματική.

5.5.2.4:Υπόθεση 4:Τα μήκη των γραμμών είναι άγνωστα & ίσα, Τα είδη των γραμμών είναι άγνωστα

Σε αυτή την περίπτωση,είναι άγνωστα τόσο το μήκος όσο και το είδος των γραμμών.Ωστόσο,είναι δεδομένο είναι ότι τα μήκη μεταξύ των πυλώνων και μεταξύ πυλώνων-καταναλωτών είναι ίσα. Επιπλέον,στα δίκτυα που εξετάζονται χρησιμοποιούνται τα 5 είδη γραμμών υπηρεσίας και 5 είδη υπέργειων γραμμών που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Αρχικά ,λαμβάνονται οι απόλυτες τιμές του πειραματικού πίνακα ευαισθησίας. Έπειτα,τα στοιχεία του πίνακα ομαδοποιούνται με εύρος που προκύπτει από οπτική παρατήρηση του πίνακα ευαισθησίας,και υπολογίζεται ο μέσος όρος των στοιχείων κάθε ομάδας.Υστερα,τα στοιχεία κάθε ομάδας

αντικαθίστανται στον πίνακα ευαισθησίας από τον μέσο όρο της ομάδας. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται μια πρώτη προσπάθεια εξάλειψης των σφαλμάτων των μετρήσεων και προσέγγισης του θεωρητικά αναμενόμενου πίνακα ευαισθησίας, με βάση τα δεδομένα των γραμμών, καθώς και της προτεινόμενης θεωρίας ευαισθησίας που έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο νέος προσεγγιστικός πίνακας ευαισθησίας που προκύπτει θα είναι συμμετρικός.

Ακολούθως, από τα μη διαγώνια στοιχεία του πίνακα, που αποτελούνται αποκλειστικά από αντιστάσεις που αντιστοιχούν σε τμήματα του δικτύου μεταξύ πυλώνων, επιλέγεται η μικρότερη δυνατή τιμή αντίστασης που μπορεί να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Για παράδειγμα, αν υποθεθεί ότι η απόσταση μεταξύ δύο πυλώνων, έστω $length$, θα είναι μεγαλύτερη ή ίση των 10m, η μικρότερη δυνατή τιμή από τα μη διαγώνια στοιχεία, έστω $sensitivity_{min}$, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση της ελάχιστης τιμής αντίστασης μεταξύ των 5 ειδών υπέργειων γραμμών, επί το μήκος αυτό. Η μικρότερη τιμή αντίστασης για υπέργειες γραμμές είναι περίπου: $min(R_{pole-to-pole}) = 0.0018(pu/m)$. Δηλαδή, πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη:

$$sensitivity_{min}(pu) \geq length(m) \cdot \min(R_{pole-to-pole})(pu/m) \leftrightarrow$$

$$sensitivity_{min}(pu) \geq 0.0177pu \quad (5.16)$$

Όμως, η μικρότερη αυτή τιμή της αντίστασης $sensitivity_{min}(pu)$ που εντοπίζεται, μπορεί να αντιστοιχεί στη συνολική αντίσταση, σε ανά μονάδα τιμές, ενός ή περισσότερων τμημάτων μεταξύ πυλώνων. Έστω ότι το πλήθος των τμημάτων μεταξύ πυλώνων είναι num_of_lines . Άρα:

$$R_{pole-to-pole}(pu) = sensitivity_{min}(pu) / num_of_lines \quad (5.17)$$

Αρχικά, γίνεται η υπόθεση ότι η μικρότερη αυτή ευαισθησία αντιστοιχεί σε μία μόνο υπέργεια γραμμή μεταξύ δύο πυλώνων, δηλαδή: $num_of_lines = 1$. Επομένως:

$$R_{pole-to-pole}(pu) = sensitivity_{min}(pu) \quad (5.18)$$

Έπειτα, έχοντας υπολογίσει τη συνολική αντίσταση μεταξύ των πυλώνων, $R_{pole-to-pole}(pu)$, καθώς δεν είναι γνωστά ούτε τα είδη των γραμμών ούτε το μήκος τους, βρίσκεται η τοπολογία του δικτύου για κάθε αποδεκτό συνδυασμό αντιστάσεων υπέργειων γραμμών και αντιστάσεων των γραμμών των καταναλωτών.

Για κάθε ένα από τα 5 είδη υπέργειων γραμμών, με αντίσταση $R_{pole-to-pole-real}(pu/m)$ υπολογίζεται το μήκος των γραμμών :

$$length(m) = round\left(R_{pole-to-pole}(pu) / R_{pole-to-pole-real}(pu/m)\right) \quad (5.19)$$

Ύστερα, υπολογίζεται το σφάλμα της μέτρησης ως προς την πραγματική αντίσταση του δικτύου, ως εξής:

$$error = \frac{|R_{pole-to-pole-real}(pu) - R_{pole-to-pole}(pu)|}{R_{pole-to-pole-real}(pu/m)}, (pu) \quad (5.20)$$

Έτσι, ο νέος συμμετρικός πίνακας που προκύπτει, συμπεριλαμβανομένου αυτού του σφάλματος, είναι όμοιος με τον πίνακα (5.14):

$$[sensitivity_{new}] = [sensitivity] + error \cdot [sensitivity] = (1 + error)[sensitivity], (pu/m)$$

Επειδή έχει θεωρηθεί εξαρχής ότι τα μήκη όλων των γραμμών του δικτύου είναι μεταξύ τους ίσα, καθώς και ότι ένας καταναλωτής δεν μπορεί να απέχει λιγότερο από 10m από έναν πυλώνα της ΔΕΗ, όπως και ότι η απόσταση μεταξύ δύο πυλώνων είναι μεγαλύτερη ή ίση των 10m, εάν το μήκος που προκύπτει από την παραπάνω επιλογή αντίστασης είναι μικρότερο των 10m, τότε επιλέγεται άλλο είδος υπέργειας γραμμής, ώστε να πληρούνται οι προϋποθέσεις (σχέσεις (5.3), (5.4)). Για κάθε αποδεκτό είδος υπέργειας γραμμής, και κατ'επέκτασιν αποδεκτό μήκος γραμμών, εντοπίζεται κάθε φορά η τοπολογία του δικτύου για κάθε ένα από τα αποδεκτά είδη γραμμών καταναλωτών.

Ένα είδος γραμμής καταναλωτών είναι αποδεκτό μόνο όταν η συνολική αντίσταση ενός τέτοιου τμήματος του δικτύου:

$$R_{pole-to-load}(pu) = length(m) \cdot R_{pole-to-load-real}(pu/m) \quad (5.21)$$

δεν υπερβαίνει τις αυτοευαισθησίες του πίνακα ευαισθησίας. Αυτή η προϋπόθεση πρέπει να καλύπτεται, διότι τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα ευαισθησίας αποτελούνται από τις συνολικές αντιστάσεις του αντίστοιχου τμήματος μεταξύ πυλώνα-κατοικίας και τα τμήματα μεταξύ των πυλώνων από τον ζυγό του ΜΣ μέχρι την κατοικία αυτή.

Εφόσον πληρούνται οι προαναφερθείσες υποθέσεις, το πρόβλημα εύρεσης των διαφόρων τοπολογιών ανάγεται πλέον στην πρώτη περίπτωση, που είναι γνωστά τα μήκη των γραμμών και το είδος τους.

Για τις διάφορες τοπολογίες δικτύων που προκύπτουν, ανάλογα με τα δεδομένα του δικτύου, μπορεί να εξεταστεί αν κάποια είναι η πραγματική, αν εφαρμοστεί σε κάθε μία από αυτές η ίδια ροή φορτίου από την οποία ελήφθησαν τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι εφαρμόζονται στα φορτία της ευρισκόμενης τοπολογίας οι τιμές των καταναλώσεων που λαμβάνονται από τα διάφορα στιγμιότυπα. Για αυτές τις τιμές ισχύος, από τη ροή φορτίου προκύπτουν οι τιμές των τάσεων στους ζυγούς φορτίου. Αν αυτές οι τιμές των τάσεων έχουν πολύ μικρή απόκλιση από τις αρχικές, τότε η ευρισκόμενη τοπολογία θα είναι η πραγματική. Διαφορετικά, η ευρισκόμενη τοπολογία δεν θα ανταποκρίνεται στην πραγματική.

Σε περίπτωση που εξεταστούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί υπέργειων γραμμών και γραμμών καταναλωτών, με την υπόθεση ότι η ελάχιστη ευαισθησία του πίνακα, δηλαδή το ελάχιστο κοινό μονοπάτι μεταξύ δύο ζυγών φορτίου ως προς τον ζυγό αναφοράς, αντιστοιχεί σε μία μόνο ακμή του δικτύου ΧΤ: $num_of_lines = 1$, και δεν έχει βρεθεί η πραγματική τοπολογία, τότε η υπόθεση αυτή είναι λανθασμένη. Έτσι, υποτίθεται πλέον ότι η ελάχιστη ευαισθησία αντιστοιχεί σε δύο τμήματα μεταξύ πυλώνων: $num_of_lines = 2$.

Άρα, από τη σχέση (5.17):

$$R_{pole-to-pole}(pu) = sensitivity_{min}(pu)/num_of_lines \leftrightarrow$$

$$R_{pole-to-pole}(pu) = sensitivity_{min}(pu)/2$$

Για την υπόθεση αυτή ελέγχονται ξανά όλοι οι συνδυασμοί υπέργειων γραμμών και γραμμών καταναλωτών. Εάν και πάλι δεν βρεθεί τοπολογία που να ικανοποιεί τις παραπάνω προϋποθέσεις, το πλήθος των τμημάτων αυξάνεται εκ νέου πχ. $num_of_lines = 3$ κτλ. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί τοπολογία που να προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική.

5.6: Εφαρμογές αλγορίθμου εύρεσης τοπολογίας *Prüfer*

Από τις σχέσεις (5.9), (5.10) και τον Πίνακα 5.3 προκύπτουν οι ακόλουθοι πίνακες:

Πίνακας 5.4: Τυπικές αντιστάσεις εναέριων γραμμών δικτύου ΧΤ

Είδος εναέριας γραμμής	$R_{pole-to-pole}(Ohm/km)$	$R_{pole-to-pole}(pu/m)$
Twisted cable 4x120 mm ² Al	0.284	0.0018
Al conductors 4x50 mm ² equiv. Cu	0.397	0.0025
Twisted cable 3x70 mm ² Al + 54.6 mm ² AAAC	0.497	0.0031
Al conductors 4x35 mm ² equiv. Cu	0.574	0.0036
Al conductors 4x16 mm ² equiv. Cu	1.218	0.0076

Πίνακας 5.5: Τυπικές αντιστάσεις γραμμών υπηρεσίας δικτύου ΧΤ

Είδος γραμμής υπηρεσίας	$R_{pole-to-load}(Ohm/km)$	$R_{pole-to-load}(pu/m)$
3x95 mm ² Al + 35 mm ² Cu	0.410	0.0026
3x50 mm ² Al + 35 mm ² Cu	0.822	0.0051
4x25 mm ² Cu	0.871	0.0054
4x16 mm ² Cu	1.380	0.0086
4x6 mm ² Cu	3.690	0.0231

Στο δίκτυο που εξετάζεται ακολούθως, όσον αφορά τα είδη των γραμμών του δικτύου Χαμηλής Τάσης, θεωρείται ότι :

- οι υπέργειες γραμμές μεταξύ των πυλώνων είναι συνεστραμμένα καλώδια Al(αργιλίου), διατομής $4 \times 120 \text{ mm}^2$, με αντίσταση γραμμής $R = 0.284 \text{ Ohm / km}$ κι επαγωγική αντίδραση $X = 0.083 \text{ Ohm / km}$.
- οι γραμμές υπηρεσίας(service lines) μεταξύ πυλώνων και καταναλωτών είναι καλώδια Cu(χαλκού), διατομής $4 \times 16 \text{ mm}^2$, με αντίσταση γραμμής $R = 1.380 \text{ Ohm / km}$ κι επαγωγική αντίδραση $X = 0.082 \text{ Ohm / km}$.

Επίσης, όλα τα μήκη των γραμμών είναι ίσα με $length = 30 \text{ m}$. Η βασική τάση του δικτύου και η βασική ισχύς έχουν οριστεί αντίστοιχα: $V_b = 400 \text{ V}$, $S_b = 1 \text{ MVA}$. Επομένως, η βασική αντίσταση του δικτύου είναι: $Z_b = V_b^2 / S_b = 0.16 \text{ Ohm}$.

Κάθε τμήμα του δικτύου μεταξύ πυλώνων θα έχει συνολική αντίσταση:

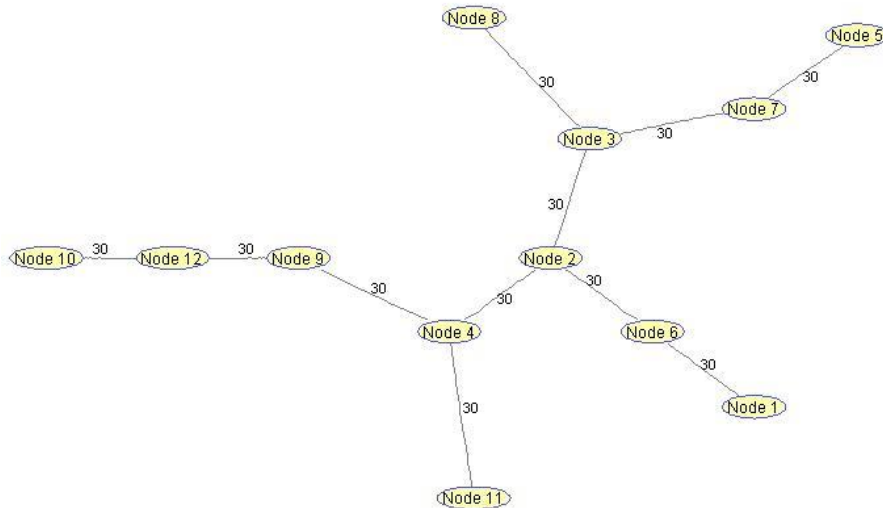
$$R_{pole-to-pole}(pu) = \frac{length(m) \cdot R_{pole-to-pole}(Ohm/km)}{1000 \cdot Z_b(Ohm)} = 0.0532 pu \quad (5.22)$$

ενώ κάθε τμήμα του δικτύου μεταξύ πυλώνα-καταναλωτή θα έχει συνολική αντίσταση:

$$R_{pole-to-load}(pu) = \frac{length(m) \cdot R_{pole-to-load}(Ohm/km)}{1000 \cdot Z_b(Ohm)} = 0.2587 pu \quad (5.23)$$

Από τον ζυγό του Μ/Σ εξετάζεται μόνο μία αναχώρηση γραμμής. Με αυτόν τον τρόπο, η ρίζα του δέντρου που αναπαριστά το δίκτυο ΧΤ αντιμετωπίζεται ως φύλλο.

Το αρχικό μονοφασικό δίκτυο χαμηλής τάσης 12 κόμβων που εξετάζεται είναι το εξής:



Εικόνα 5.3: Πραγματική τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης 12 κόμβων

Ο κόμβος 1, δηλαδή η ρίζα του δέντρου, αντιστοιχεί στον ζυγό του μετασχηματιστή και είναι ο ζυγός αναφοράς του δικτύου. Τα φύλλα του δέντρου, που αντιστοιχούν στους ζυγούς φορτίου είναι τα εξής:

$$leaves = \{5 \ 8 \ 10 \ 11\}$$

5.6.1:Εφαρμογή του αλγορίθμου χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του έξυπνου μετρητή στο ζυγό Μ/Σ

Οι μετρήσεις του ζυγού αναφοράς λαμβάνονται υπόψιν για τον υπολογισμό του πίνακα ευαισθησίας, επομένως, στον πίνακα ευαισθησίας, εκτός των καταναλωτών, περιέχεται και ο ζυγός του Μ/Σ.

Ο θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος, για δεδομένη τοπολογία δικτύου είναι ο εξής:

Πίνακας 5.6:Θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας 1^{ης} μεθόδου

$$[S_{P-theor}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.4718 & -0.1598 & -0.1065 & -0.1065 \\ 0 & -0.1598 & -0.4185 & -0.1065 & -0.1065 \\ 0 & -0.1065 & -0.1065 & -0.5250 & -0.1598 \\ 0 & -0.1065 & -0.1065 & -0.1598 & -0.4185 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Οι μεταβολές τάσεων στους ζυγούς αναφοράς και καταναλωτών ανά στιγμιότυπο μετρήσεων είναι:

$$[\Delta V_{matrix_{real}}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -0.0878 & -0.0759 & -0.1528 & -0.0615 \\ 0 & -0.0758 & -0.0755 & -0.0664 & -0.0320 \\ 0 & -0.1302 & -0.1770 & -0.3349 & -0.1896 \\ 0 & -0.1562 & -0.0693 & -0.1667 & -0.1425 \\ 0 & -0.2783 & -0.2969 & -0.3716 & -0.0632 \\ 0 & -0.1569 & -0.1343 & -0.2267 & -0.0834 \\ 0 & -0.1180 & -0.1275 & -0.3101 & -0.1754 \\ 0 & -0.3929 & -0.3329 & -0.4389 & -0.3036 \\ 0 & -0.1966 & -0.2579 & -0.3486 & -0.2980 \\ 0 & -0.3420 & -0.3344 & -0.2701 & -0.2055 \end{bmatrix}_{(10 \times 5)}$$

Σημειώνεται ότι κάθε γραμμή αφορά σε ένα στιγμιότυπο μετρήσεων, η πρώτη στήλη αντιστοιχεί στις μετρήσεις του ζυγού αναφοράς, ενώ κάθε μία από τις υπόλοιπες στήλες αντιστοιχεί στις μετρήσεις ενός καταναλωτή.

Ο πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω ενεργού ισχύος είναι:

Πίνακας 5.7:Πειραματικός πίνακας ευαισθησίας 1^{ης} μεθόδου

$$[S_{P-real}] = \begin{bmatrix} 0 & -0.0001 & -0.0001 & -0.0002 & 0.0002 \\ 0 & -0.4487 & -0.1525 & -0.1018 & -0.1017 \\ 0 & -0.1524 & -0.3984 & -0.1018 & -0.1017 \\ 0 & -0.1019 & -0.1020 & -0.5005 & -0.1527 \\ 0 & -0.1016 & -0.1016 & -0.1523 & -0.3977 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Ο πίνακας ευαισθησίας, έπειτα από ομαδοποίηση των απόλυτων τιμών των στοιχείων του και αντικατάσταση του καθενός από τον μέσο όρο της αντίστοιχης ομάδας, είναι ο εξής:

Πίνακας 5.8:Κανικοποιημένος πειραματικός πίνακας ευαισθησίας 1^{ης} μεθόδου

$$[S_{Pnew}] = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0001 \\ 0.0001 & 0.4487 & 0.1525 & 0.1018 & 0.1018 \\ 0.0001 & 0.1525 & 0.3980 & 0.1018 & 0.1018 \\ 0.0001 & 0.1018 & 0.1018 & 0.5005 & 0.1525 \\ 0.0001 & 0.1018 & 0.1018 & 0.1525 & 0.3980 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

5.6.1.1: Υπόθεση 1: Τα μήκη των γραμμών είναι γνωστά & ίσα, Τα είδη των γραμμών είναι γνωστά

Ο τελικός πίνακας ευαισθησίας, όπως προκύπτει από την περιγραφόμενη μέθοδο, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα αποστάσεων μεταξύ των φύλλων του δέντρου, είναι ο εξής:

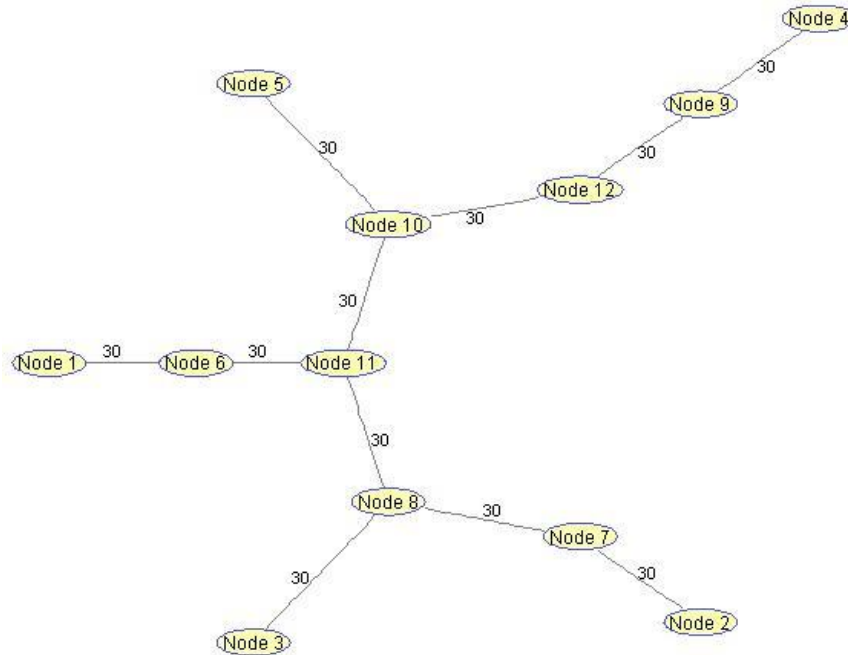
$$[S_{Pfinal}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 3 & 2 & 2 \\ 0 & 3 & 4 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & 2 & 6 & 3 \\ 0 & 2 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Ο πίνακας αποστάσεων μεταξύ των φύλλων του δέντρου είναι ο ακόλουθος:

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 4 & 6 & 4 \\ 5 & 0 & 3 & 7 & 5 \\ 4 & 3 & 0 & 6 & 4 \\ 6 & 7 & 6 & 0 & 4 \\ 4 & 5 & 4 & 4 & 0 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Οι κόμβοι του ευρισκόμενου δέντρου είναι: $N_{found} = 12$

Η τοπολογία που εξάγεται με τη βοήθεια του αλγορίθμου *Prüfer* είναι:



Εικόνα 5.4:Ευρισκόμενη τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης 12 κόμβων από Υπόθεση 1

Αν εφαρμοστεί στην ευρισκόμενη τοπολογία η ίδια ροή φορτίου από την οποία ελήφθησαν τα πειραματικά δεδομένα, οι τιμές των μεταβολών των τάσεων στους ζυγούς φορτίου που προκύπτουν, για τα επιλεγμένα στιγμιότυπα, είναι οι εξής:

$$[\Delta V_{matrix_{found}}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -0.0878 & -0.0759 & -0.1528 & -0.0615 \\ 0 & -0.0758 & -0.0755 & -0.0664 & -0.0320 \\ 0 & -0.1302 & -0.1770 & -0.3349 & -0.1896 \\ 0 & -0.1562 & -0.0693 & -0.1667 & -0.1425 \\ 0 & -0.2783 & -0.2969 & -0.3716 & -0.0632 \\ 0 & -0.1569 & -0.1343 & -0.2267 & -0.0834 \\ 0 & -0.1180 & -0.1275 & -0.3101 & -0.1754 \\ 0 & -0.3929 & -0.3329 & -0.4389 & -0.3036 \\ 0 & -0.1966 & -0.2579 & -0.3486 & -0.2980 \\ 0 & -0.3420 & -0.3344 & -0.2701 & -0.2055 \end{bmatrix}_{(10 \times 5)}$$

Ακολούθως παρουσιάζεται ο πίνακας των σφαλμάτων (%) των μεταβολών τάσης μεταξύ πραγματικών μετρήσεων και των μετρήσεων που προκύπτουν από την ίδια ροή φορτίου στην ευρισκόμενη τοπολογία::

$$[error_{found}] = 10^{-7} \cdot \begin{bmatrix} 0.1194 & 0.0084 & 0.0173 & 0.0108 \\ 0.0236 & 0.1297 & 0.1070 & 0.0498 \\ -0.0165 & 0.5453 & -0.0161 & -0.0080 \\ -0.0181 & -0.0091 & -0.0047 & -0.0087 \\ -0.0043 & -0.0850 & 0 & -0.0051 \\ 0.0016 & 0.2158 & 0.0087 & 0.0077 \\ -0.0019 & -0.0067 & -0.0053 & -0.0023 \\ -0.0072 & -0.0062 & -0.0049 & 0.1048 \\ 0.0152 & 0.0099 & -0.0032 & 0.0009 \\ 0.0177 & -0.3344 & -0.0248 & -0.1138 \end{bmatrix}_{(10 \times 4)}$$

Στον πίνακα σφαλμάτων δε λαμβάνονται υπόψιν οι πρώτες στήλες των πινάκων τάσης, καθώς αντιστοιχούν στο ζυγό αναφοράς, στον οποίο δε μεταβάλλεται η τάση. Επομένως, δεν ορίζεται το σφάλμα της τάσης για τον ζυγό αναφοράς. Παρατηρείται ότι τα σφάλματα των μετρήσεων που αφορούν τους ζυγούς φορτίου είναι πάρα πολύ μικρά. Χαρακτηριστικά, το μέγιστο σφάλμα είναι $5.4534 \cdot 10^{-8} \%$. Συνάγεται, λοιπόν, ότι η ευρισκόμενη τοπολογία αντιστοιχεί στην πραγματική.

5.6.1.2: Υπόθεση 2: Τα μήκη των γραμμών είναι άγνωστα & ίσα, Τα είδη των γραμμών είναι γνωστά

Ο τελικός πίνακας ευαισθησίας, όπως προκύπτει από την περιγραφόμενη μέθοδο, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα αποστάσεων μεταξύ των φύλλων του δέντρου, είναι ο εξής:

$$[S_{pfinal}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 3 & 2 & 2 \\ 0 & 3 & 4 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & 2 & 6 & 3 \\ 0 & 2 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

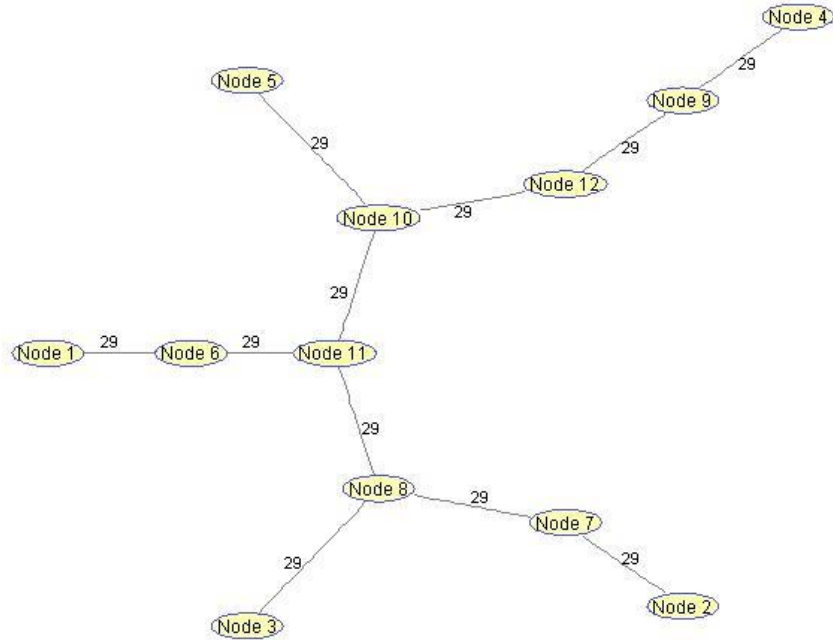
Ο πίνακας αποστάσεων μεταξύ των φύλλων του δέντρου είναι ο ακόλουθος:

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 4 & 6 & 4 \\ 5 & 0 & 3 & 7 & 5 \\ 4 & 3 & 0 & 6 & 4 \\ 6 & 7 & 6 & 0 & 4 \\ 4 & 5 & 4 & 4 & 0 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Το μήκος των γραμμών που προκύπτει από την μέθοδο, έπειτα από στρογγυλοποίηση, είναι: $length_{found} = 29m$.

Οι κόμβοι του ευρισκόμενου δέντρου είναι: $N_{found} = 12$.

Η τοπολογία που εξάγεται με τη βοήθεια του αλγορίθμου *Prüfer* είναι:



Εικόνα 5.5:Ευρισκόμενη τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης 12 κόμβων από Υπόθεση 2

Αν εφαρμοστεί στην ευρισκόμενη τοπολογία η ίδια ροή φορτίου από την οποία ελήφθησαν οι μετρήσεις, οι τιμές των μεταβολών των τάσεων στους ζυγούς φορτίου που προκύπτουν, για τα επιλεγμένα στιγμιότυπα, είναι οι εξής:

$$[\Delta V_{matrix_{found}}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -0.0848 & -0.0733 & -0.1476 & -0.0594 \\ 0 & -0.0733 & -0.0729 & -0.0641 & -0.0309 \\ 0 & -0.1258 & -0.1710 & -0.3236 & -0.1832 \\ 0 & -0.1510 & -0.0669 & -0.1610 & -0.1377 \\ 0 & -0.2689 & -0.2868 & -0.3590 & -0.0610 \\ 0 & -0.1516 & -0.1298 & -0.2190 & -0.0805 \\ 0 & -0.1140 & -0.1231 & -0.2996 & -0.1695 \\ 0 & -0.3796 & -0.3217 & -0.4241 & -0.2933 \\ 0 & -0.1900 & -0.2492 & -0.3368 & -0.2880 \\ 0 & -0.3305 & -0.3231 & -0.2610 & -0.1986 \end{bmatrix}_{(10 \times 5)}$$

Ακολούθως παρουσιάζεται ο πίνακας των σφαλμάτων (%) των μεταβολών τάσης, που αφορούν στους ζυγούς φορτίου, μεταξύ πραγματικών μετρήσεων και των μετρήσεων που προκύπτουν από την ίδια ροή φορτίου στην ευρισκόμενη τοπολογία:

$$[error_{found}] = \begin{bmatrix} 3.3922 & 3.3594 & 3.3554 & 3.3577 \\ 3.3511 & 3.3187 & 3.3142 & 3.3482 \\ -3.3642 & 3.1033 & -3.3751 & -3.3591 \\ -3.3781 & -3.3706 & -3.3808 & -3.3741 \\ -3.3675 & -3.7720 & -3.3713 & -3.3808 \\ 3.3679 & 4.1228 & 3.3665 & 3.3635 \\ -3.3718 & -3.3856 & -3.3786 & -3.3675 \\ -3.3654 & -3.3684 & -3.3887 & 3.1625 \\ 3.3792 & 3.3820 & 3.3695 & 3.3658 \\ 3.3423 & -3.4035 & -3.3765 & -3.4306 \end{bmatrix} (10 \times 4)$$

Παρατηρείται ότι τα σφάλματα είναι σχετικά μικρά, και κυμαίνονται κατ'άπολυτη τιμή από 3.1033 % έως 4.1228 % . Συνάγεται, λοιπόν, ότι η ευρισκόμενη τοπολογία προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική. Το σφάλμα, δεδομένου του είδους των γραμμών, οφείλεται στον υπολογισμό του μήκους των γραμμών, το οποίο έχει υπολογιστεί προσεγγιστικά.

5.6.1.3: Υπόθεση 3: Τα μήκη των γραμμών είναι γνωστά & ίσα, Τα είδη των γραμμών είναι άγνωστα

Διαιρώντας τον πίνακα ευαισθησίας των μέσων όρων με το μήκος $length = 30m$, μένουν οι ευαισθησίες σε μ/m τιμές. Από τα μη διαγώνια στοιχεία αυτού του πίνακα εντοπίζεται η μικρότερη τιμή ευαισθησίας . Αυτή μπορεί να αντιστοιχεί σε μία ή περισσότερες ακμές του δέντρου. Έτσι, ελέγχεται ποια από τα είδη των υπέργειων γραμμών είναι δυνατό να ανταποκρίνονται στο πραγματικό δίκτυο σύμφωνα με αυτή την ελάχιστη ευαισθησία, κι επίσης υπολογίζεται και το αντίστοιχο πλήθος ακμών.

Η ελάχιστη τιμή ευαισθησίας αυτού του πίνακα είναι: $sensitivity_{min} = 0.0034 pu/m$. Με βάση αυτή την ελάχιστη ευαισθησία, τον Πίνακα 5.4, και λαμβάνοντας υπόψιν τα σφάλματα, από τα είδη εναέριων γραμμών που χρησιμοποιούνται, είναι πιθανό να χρησιμοποιούνται:

- Al conductors $4 \times 35 \text{ mm}^2$ equiv. Cu με : $R_{pole-to-pole}(pu/m) = 0.0036 pu/m$ άρα στην ελάχιστη ευαισθησία περιέχεται η αντίσταση που αντιστοιχεί σε μία ακμή.
- Συνεστραμμένο καλώδιο Al $4 \times 120 \text{ mm}^2$ με: $R_{pole-to-pole}(pu/m) = 0.0018 pu/m$, άρα στην ελάχιστη ευαισθησία περιέχεται η συνολική αντίσταση δύο ακμών.

Πραγματική τοπολογία όπως προκύπτει από τη διερεύνηση

Έπειτα από σχετική διερεύνηση μεταξύ των δύο περιπτώσεων αντίστασης εναέριων γραμμών και κι εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, προκύπτει ότι:

- οι υπέργειες γραμμές μεταξύ των πυλώνων είναι συνεστραμμένα καλώδια Al (αργιλίου), διατομής $4 \times 120 \text{ mm}^2$, με αντίσταση γραμμής $R = 0.284 \text{ Ohm / km}$ κι επαγωγική αντίδραση $X = 0.083 \text{ Ohm / km}$.

- οι γραμμές υπηρεσίας(service lines) μεταξύ πυλώνων και καταναλωτών είναι καλώδια Cu(χαλκού), διατομής $4 \times 16 \text{ mm}^2$, με αντίσταση γραμμής $R = 1.380 \text{ Ohm /km}$ κι επαγωγική αντίδραση $X = 0.082 \text{ Ohm /km}$.

και άρα στην ελάχιστη τιμή ευαισθησίας $sensitivity_{min}$ περιέχεται η συνολική αντίσταση δύο ακμών.

Πιο συγκεκριμένα, για:

- $R_{pole-to-pole}(pu/m) = 0.0018 pu/m$
- $R_{pole-to-load}(pu/m) = 0.0086 pu/m$

Η αντίσταση $R_{pole-to-load}(pu/m)$ είναι μικρότερη από τις αυτοευαισθησίες των φορτίων(όλα τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα ευαισθησίας (pu/m) που αντιστοιχούν στα φορτία):

$$\begin{matrix} 0.0156 & 0.0139 & 0.0174 & 0.0139 \end{matrix}$$

οπότε το συγκεκριμένο είδος γραμμής καταναλωτών είναι αποδεκτό.

Ο τελικός πίνακας ευαισθησίας, όπως προκύπτει από την περιγραφόμενη μέθοδο, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα αποστάσεων μεταξύ των φύλλων του δέντρου, είναι ο εξής:

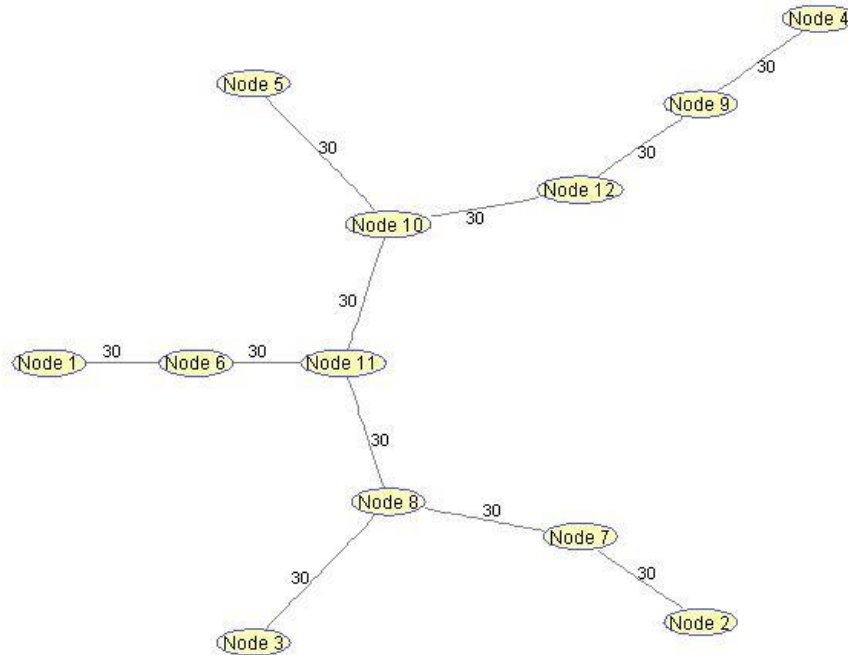
$$[S_{Pfinal}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 3 & 2 & 2 \\ 0 & 3 & 4 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & 2 & 6 & 3 \\ 0 & 2 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Ο πίνακας αποστάσεων μεταξύ των φύλλων του δέντρου είναι ο ακόλουθος:

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 4 & 6 & 4 \\ 5 & 0 & 3 & 7 & 5 \\ 4 & 3 & 0 & 6 & 4 \\ 6 & 7 & 6 & 0 & 4 \\ 4 & 5 & 4 & 4 & 0 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Οι κόμβοι του ευρισκόμενου δέντρου είναι: $N_{found} = 12$

Η τοπολογία που εξάγεται με τη βοήθεια του αλγορίθμου *Prüfer* είναι:



Εικόνα 5.6:Τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης 12 κόμβων για τον παραπάνω συνδυασμό γραμμών από Υπόθεση 3

Αν εφαρμοστεί στην ευρισκόμενη τοπολογία η ίδια ροή φορτίου από την οποία ελήφθησαν τα πειραματικά δεδομένα, οι τιμές των μεταβολών των τάσεων στους ζυγούς φορτίου που προκύπτουν, για τα επιλεγμένα στιγμιότυπα, είναι οι εξής:

$$[\Delta V_{matrix_{found}}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -0.0878 & -0.0759 & -0.1528 & -0.0615 \\ 0 & -0.0758 & -0.0755 & -0.0664 & -0.0320 \\ 0 & -0.1302 & -0.1770 & -0.3349 & -0.1896 \\ 0 & -0.1562 & -0.0693 & -0.1667 & -0.1425 \\ 0 & -0.2783 & -0.2969 & -0.3716 & -0.0632 \\ 0 & -0.1569 & -0.1343 & -0.2267 & -0.0834 \\ 0 & -0.1180 & -0.1275 & -0.3101 & -0.1754 \\ 0 & -0.3929 & -0.3329 & -0.4389 & -0.3036 \\ 0 & -0.1966 & -0.2579 & -0.3486 & -0.2980 \\ 0 & -0.3420 & -0.3344 & -0.2701 & -0.2055 \end{bmatrix}_{(10 \times 5)}$$

Ακολούθως παρουσιάζεται ο πίνακας των σφαλμάτων (%) των μεταβολών τάσης μεταξύ πραγματικών μετρήσεων και των μετρήσεων που προκύπτουν από την ίδια ροή φορτίου στην ευρισκόμενη τοπολογία::

$$[error_{found}] = 10^{-6} \cdot \begin{bmatrix} 0.0098 & 0.0007 & 0.0003 & 0.0003 \\ 0.0024 & 0.0130 & 0.0095 & 0.0047 \\ -0.0033 & 0.1023 & -0.0029 & -0.0017 \\ -0.0012 & -0.0005 & -0.0002 & -0.0001 \\ 0 & -0.0128 & -0.0009 & -0.0013 \\ 0.0003 & 0.0432 & 0.0004 & 0.0004 \\ -0.0001 & -0.0005 & -0.0008 & -0.0005 \\ -0.0009 & -0.0010 & -0.0010 & 0.0168 \\ 0.0013 & 0.0008 & -0.0002 & 0.0001 \\ 0.0002 & 0 & -0.0004 & -0.0025 \end{bmatrix}_{(10 \times 4)}$$

Παρατηρείται ότιστα σφάλματα είναι πολύ μικρά.Πιο συγκεκριμένα,τα σφάλματα κυμαίνονται από 0 έως $1.0225 \cdot 10^{-7}\%$. κατ'απόλυτη τιμή .Συνάγεται, λοιπόν,ότι η ευρισκόμενη τοπολογία, αντιστοιχεί στην πραγματική .

Παραδείγματα λανθασμένων τοπολογιών που προκύπτουν από τη διερεύνηση

Ενδεικτικά,παρατίθενται κάποιες τοπολογίες που προκύπτουν από τη διερεύνηση και δεν αντιστοιχούν στην πραγματική,μαζί με τα αντίτοιχα σφάλματα της ροής φορτίου:

1)Για $R_{pole-to-pole}(pu/m) = 0.0036 pu/m, R_{pole-to-load}(pu/m) = 0.0026 pu/m$

Η αντίσταση $R_{pole-to-load}$ είναι μικρότερη από τις αυτοευαισθησίες των φορτίων(pu/m):

$$0.0158 \quad 0.0140 \quad 0.0176 \quad 0.0140$$

οπότε το συγκεκριμένο είδος γραμμής καταναλωτών είναι αποδεκτό.

Ο τελικός πίνακας ευαισθησίας,όπως προκύπτει από την περιγραφόμενη μέθοδο,που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα αποστάσεων μεταξύ των φύλλων του δέντρου,είναι ο εξής:

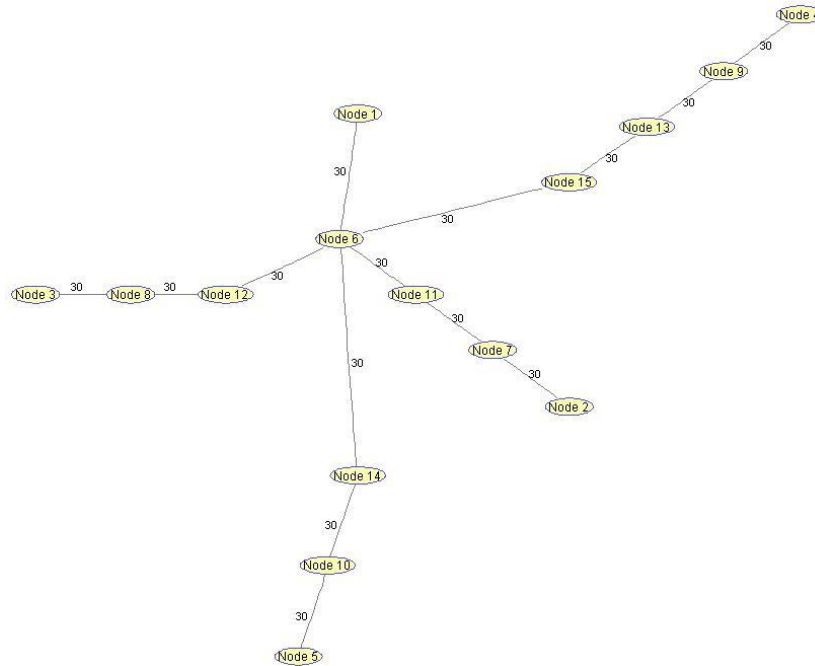
$$[S_{pfinal}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 5 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 4 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Ο πίνακας αποστάσεων μεταξύ των φύλλων του δέντρου είναι ο ακόλουθος:

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 4 & 4 & 5 & 4 \\ 4 & 0 & 6 & 7 & 6 \\ 4 & 6 & 0 & 7 & 6 \\ 5 & 7 & 7 & 0 & 7 \\ 4 & 6 & 6 & 7 & 0 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Οι κόμβοι του ευρισκόμενου δέντρου είναι: $N_{found} = 15$.

Η τοπολογία που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου για τον συγκεκριμένο συνδυασμό γραμμών είναι η εξής:



Εικόνα 5.7:Τοπολογία δικτύου ΧΤ 15 κόμβων για τον παραπάνω συνδυασμό γραμμών από Υπόθεση 3

Ο πίνακας σφαλμάτων(%) μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων της ροής φορτίου στην παραπάνω τοπολογία είναι:

$$[error_{found}] = \begin{bmatrix} 120.8438 & 1.2900 & 87.0065 & 26.2196 \\ 15.0508 & 306.3182 & 279.9850 & 52.9794 \\ -19.6342 & 539.4828 & -9.5979 & -8.2938 \\ -4.3986 & -0.0092 & -46.6489 & -14.3993 \\ -20.9759 & -135.7722 & -15.6960 & -24.6740 \\ 23.6499 & 317.8990 & 10.2380 & 23.9966 \\ -12.6975 & -15.8399 & -34.9854 & -12.8279 \\ -2.8283 & -10.4569 & -82.2086 & 275.9562 \\ 6.6153 & 52.1589 & 2.1182 & 19.9141 \\ 24.4610 & -213.7344 & -43.9985 & -196.3260 \end{bmatrix}_{(10 \times 4)}$$

Προφανώς, τα σφάλματα είναι τεράστια και η τοπολογία της Εικόνας 5.7 δεν αντιστοιχεί στην πραγματική.

2) Για $R_{pole-to-pole} (pu/m) = 0.0036 pu/m, R_{pole-to-load} (pu/m) = 0.0231 pu/m$

Η αντίσταση $R_{pole-to-load}$ δεν είναι μικρότερη από τις αυτοευαισθησίες των φορτίων (pu/m):

0.0158 0.0140 0.0176 0.0140

οπότε το συγκεκριμένο είδος γραμμής καταναλωτών δεν είναι αποδεκτό.

Για το συγκεκριμένο συνδυασμό υπέργειων γραμμών και γραμμών καταναλωτών δεν προκύπτει τοπολογία.

3) Για $R_{pole-to-pole}(pu/m) = 0.0018 pu/m, R_{pole-to-load}(pu/m) = 0.0051 pu/m$

Η αντίσταση $R_{pole-to-load}$ είναι μικρότερη από τις αυτοευαισθησίες των φορτίων (pu/m):

$$0.0158 \quad 0.0140 \quad 0.0176 \quad 0.0140$$

οπότε το συγκεκριμένο είδος γραμμής καταναλωτών είναι αποδεκτό.

Ο τελικός πίνακας ευαισθησίας, όπως προκύπτει από την περιγραφόμενη μέθοδο, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα αποστάσεων μεταξύ των φύλλων του δέντρου, είναι ο εξής:

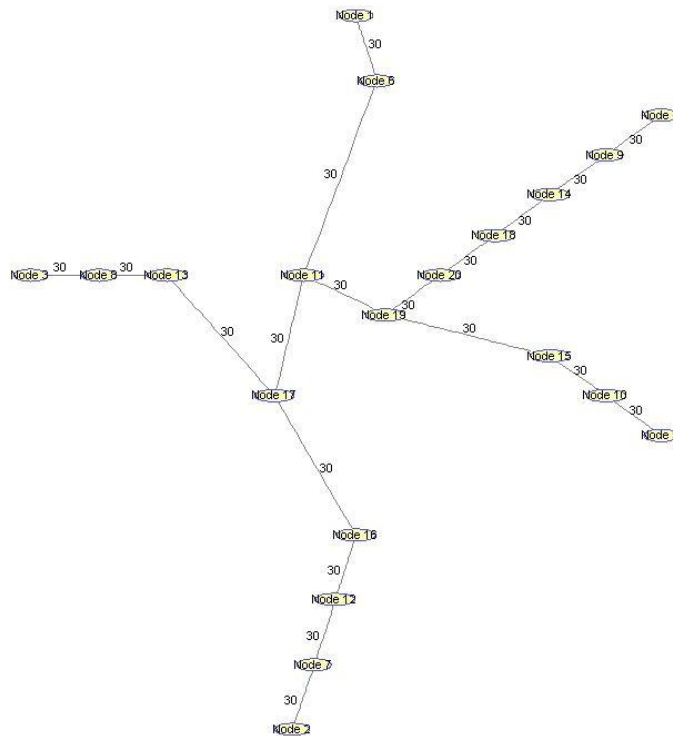
$$[S_{pfinal}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & 3 & 2 & 2 \\ 0 & 3 & 6 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & 2 & 8 & 3 \\ 0 & 2 & 2 & 3 & 6 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Ο πίνακας αποστάσεων μεταξύ των φύλλων του δέντρου είναι ο ακόλουθος:

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 7 & 6 & 8 & 6 \\ 7 & 0 & 7 & 11 & 9 \\ 6 & 7 & 0 & 10 & 8 \\ 8 & 11 & 10 & 0 & 8 \\ 6 & 9 & 8 & 8 & 0 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Οι κόμβοι του ευρισκόμενου δέντρου είναι: $N_{found} = 20$.

Η τοπολογία που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου για τον συγκεκριμένο συνδυασμό γραμμών είναι η εξής:



Εικόνα 5.8: Τοπολογία δικτύου ΧΤ 20 κόμβων για τον παραπάνω συνδυασμό γραμμών από Υπόθεση 3

Ο πίνακας σφαλμάτων(%) μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων της ροής φορτίου στην παραπάνω τοπολογία είναι:

$$[error_{found}] = \begin{bmatrix} 22.5710 & 0.0658 & 15.4898 & 10.4064 \\ 1.7905 & 58.1730 & 52.5654 & 21.8778 \\ -6.8222 & 135.5681 & -6.7074 & -1.2298 \\ -2.7790 & -0.6604 & -11.1692 & -3.0531 \\ -7.6684 & -17.9715 & -3.3290 & -4.2821 \\ 2.6135 & 326.9577 & 0.2896 & 9.7856 \\ -4.1252 & -3.2617 & -9.0646 & -2.8425 \\ -5.0206 & -0.9069 & -12.5432 & 121.3807 \\ 3.5449 & 10.0750 & 0.8036 & 7.3566 \\ 0.1646 & -43.5731 & -8.3292 & -59.6626 \end{bmatrix}_{(10 \times 4)}$$

Προφανώς, τα σφάλματα είναι τεράστια και η τοπολογία της Εικόνας 5.8 δεν αντιστοιχεί στην πραγματική.

Ομοίως, και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις, είτε προκύπτουν πολύ μεγάλα σφάλματα, είτε δεν είναι αποδεκτοί οι συνδυασμοί γραμμών εξ'αρχής.

5.6.1.4: Υπόθεση 4: Τα μήκη των γραμμών είναι άγνωστα & ίσα, Τα είδη των γραμμών είναι άγνωστα

Πραγματική τοπολογία όπως προκύπτει από τη διερεύνηση

Έπειτα από σχετική διερεύνηση μεταξύ των δύο περιπτώσεων αντίστασης εναέριων γραμμών και κι εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, προκύπτει ότι:

- Το πλήθος γραμμών μεταξύ πυλώνων που αντιστοιχούν στην ελάχιστη τιμή ευαισθησίας $sensitivity_{min}$ του πίνακα ευαισθησίας είναι: $num_of_lines = 2$
- Μήκος γραμμής: $length = 29m$.
- Οι υπέργειες γραμμές μεταξύ των πυλώνων είναι συνεστραμμένα καλώδια Al, διατομής $4 \times 120mm^2$, με αντίσταση γραμμής $R = 0.284 Ohm/km$ κι επαγωγική αντίδραση $X = 0.083 Ohm/km$. Δηλαδή:

$$R_{pole-to-pole}(pu) = \frac{R_{pole-to-pole}(Ohm/km)}{1000 \cdot Z_b} \leftrightarrow$$

$$R_{pole-to-pole}(pu) = 0.0509 pu$$

- Οι γραμμές υπηρεσίας μεταξύ πυλώνων και καταναλωτών είναι καλώδια Cu, διατομής $4 \times 16 mm^2$, με αντίσταση γραμμής $R = 1.380 Ohm/km$ κι επαγωγική αντίδραση $X = 0.082 Ohm/km$. Δηλαδή:

$$R_{pole-to-load}(pu) = \frac{R_{pole-to-load}(Ohm/km)}{1000 \cdot Z_b} \leftrightarrow$$

$$R_{pole-to-load}(pu) = 0.2501 pu$$

Πράγματι, η $R_{pole_to_load}(pu) = 0.2501 pu$ είναι μικρότερη από τις αυτοευαισθησίες των φορτίων:

0.4487 0.3980 0.5005 0.3980

οπότε το συγκεκριμένο είδος γραμμής καταναλωτών είναι αποδεκτό.

Ο τελικός πίνακας ευαισθησίας, όπως προκύπτει από την περιγραφόμενη μέθοδο, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα αποστάσεων μεταξύ των φύλλων του δέντρου, είναι ο εξής:

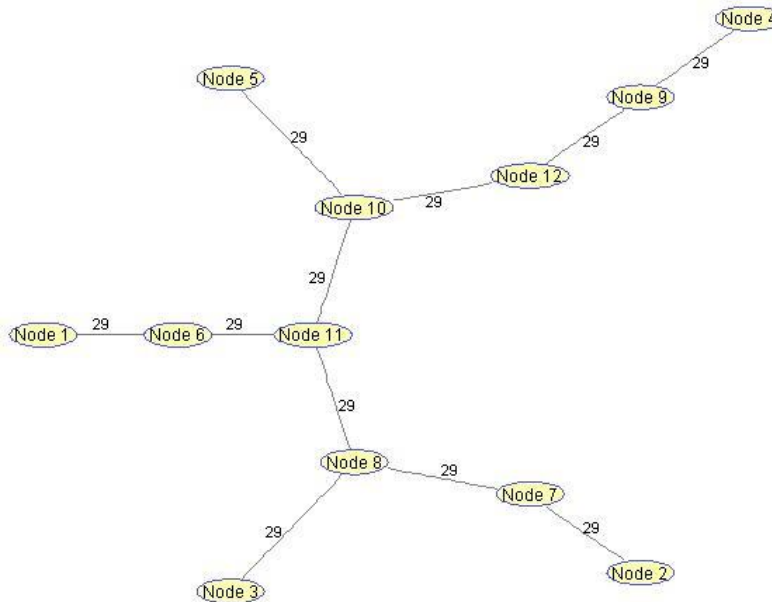
$$[S_{pfinal}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 3 & 2 & 2 \\ 0 & 3 & 4 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & 2 & 6 & 3 \\ 0 & 2 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Ο πίνακας αποστάσεων μεταξύ των φύλλων του δέντρου είναι ο ακόλουθος:

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 4 & 6 & 4 \\ 5 & 0 & 3 & 7 & 5 \\ 4 & 3 & 0 & 6 & 4 \\ 6 & 7 & 6 & 0 & 4 \\ 4 & 5 & 4 & 4 & 0 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Οι κόμβοι του ευρισκόμενου δέντρου είναι: $N_{found} = 12$

Η τοπολογία που εξάγεται με τη βοήθεια του αλγορίθμου *Prüfer* είναι:



Εικόνα 5.9: Τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης 12 κόμβων για τον παραπάνω συνδυασμό γραμμών από Υπόθεση 4

Αν εφαρμοστεί στην ευρισκόμενη τοπολογία η ίδια ροή φορτίου από την οποία ελήφθησαν τα πειραματικά δεδομένα, οι τιμές των μεταβολών των τάσεων στους ζυγούς φορτίου που προκύπτουν, για τα επιλεγμένα στιγμιότυπα, είναι οι εξής:

$$[\Delta V_{matrix}_{found}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -0.0878 & -0.0759 & -0.1528 & -0.0615 \\ 0 & -0.0758 & -0.0755 & -0.0664 & -0.0320 \\ 0 & -0.1302 & -0.1770 & -0.3349 & -0.1896 \\ 0 & -0.1562 & -0.0693 & -0.1667 & -0.1425 \\ 0 & -0.2783 & -0.2969 & -0.3716 & -0.0632 \\ 0 & -0.1569 & -0.1343 & -0.2267 & -0.0834 \\ 0 & -0.1180 & -0.1275 & -0.3101 & -0.1754 \\ 0 & -0.3929 & -0.3329 & -0.4389 & -0.3036 \\ 0 & -0.1966 & -0.2579 & -0.3486 & -0.2980 \\ 0 & -0.3420 & -0.3344 & -0.2701 & -0.2055 \end{bmatrix}_{(10 \times 5)}$$

$$[error_{found}] = \begin{bmatrix} 3.3922 & 3.3594 & 3.3554 & 3.3577 \\ 3.3511 & 3.3187 & 3.3142 & 3.3482 \\ -3.3642 & 3.1033 & -3.3751 & -3.3591 \\ -3.3781 & -3.3706 & -3.3808 & -3.3741 \\ -3.3675 & -3.7720 & -3.3713 & -3.3808 \\ 3.3679 & 4.1228 & 3.3665 & 3.3635 \\ -3.3718 & -3.3856 & -3.3786 & -3.3675 \\ -3.3654 & -3.3684 & -3.3887 & 3.1625 \\ 3.3792 & 3.3820 & 3.3695 & 3.3658 \\ 3.3423 & -3.4035 & -3.3765 & -3.4306 \end{bmatrix}_{(10 \times 4)}$$

Παρατηρείται ότι τα σφάλματα είναι σχετικά μικρά, και κυμαίνονται κατ'άπολυτη τιμή από 3.1033 % έως 4.1228 % .Συνάγεται, λοιπόν, ότι η ευρισκόμενη τοπολογία προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική. Το σφάλμα, δεδομένου του είδους των γραμμών, οφείλεται στον υπολογισμό του μήκους των γραμμών, το οποίο έχει υπολογιστεί προσεγγιστικά. Τα σφάλματα είναι ίδια με της Υπόθεσης 2.

Όπως και στην Υπόθεση 3, οι υπόλοιποι συνδυασμοί γραμμών είτε δεν είναι εξαρχής αποδεκτοί είτε οδηγούν σε εντελώς διαφορετικές τοπολογίες.

5.6.2: Εφαρμογή του αλγορίθμου χωρίς να ληφθούν υπόψιν οι μετρήσεις του μετρητή στο ζυγό Μ/Σ

Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τον μετρητή στο ζυγό του ΜΣ δεν λαμβάνονται υπόψιν στον υπολογισμό του πίνακα ευαισθησίας. Αντ' αυτού, τοποθετούνται απευθείας στον πίνακα μήκους μονοπατιών οι αυτοευαισθησίες στη γραμμή και στήλη που αντιστοιχούν στον ζυγό αναφοράς. Ο θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος του δικτύου είναι ο εξής:

Πίνακας 5.9: Θεωρητικός πίνακας ευαισθησίας 2^{ης} μεθόδου

$$[S_{P-theor}] = \begin{bmatrix} -0.4718 & -0.1598 & -0.1065 & -0.1065 \\ -0.1598 & -0.4185 & -0.1065 & -0.1065 \\ -0.1065 & -0.1065 & -0.5250 & -0.1598 \\ -0.1065 & -0.1065 & -0.1598 & -0.4185 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

Πλέον, απαιτούνται δύο στιγμιότυπα μετρήσεων λιγότερα για τον υπολογισμό του πειραματικού πίνακα ευαισθησίας, δηλαδή, έχουν επιλεγεί τα 8 πρώτα στιγμιότυπα του πίνακα μεταβολών τάσεων της Ενότητας (5.6.1). Έτσι, ο πίνακας $[\Delta V_{matrix_{real}}]$ θα έχει πλέον διαστάσεις (8x4).

Σημειώνεται ότι κάθε γραμμή του αφορά σε ένα στιγμιότυπο μετρήσεων, ενώ κάθε μία από τις στήλες αντιστοιχεί στις μετρήσεις ενός καταναλωτή.

Ο πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω ενεργού ισχύος είναι:

Πίνακας 5.10: Πειραματικός πίνακας ευαισθησίας 2^{ης} μεθόδου

$$[S_{P-real}] = \begin{bmatrix} -0.4483 & -0.1522 & -0.1014 & -0.1014 \\ -0.1519 & -0.3981 & -0.1013 & -0.1013 \\ -0.1024 & -0.1022 & -0.5010 & -0.1531 \\ -0.1014 & -0.1015 & -0.1521 & -0.3975 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

Ο πίνακας ευαισθησίας, έπειτα από ομαδοποίηση των απόλυτων τιμών των στοιχείων του και αντικατάσταση του καθενός από τον μέσο όρο της αντίστοιχης ομάδας, είναι ο εξής:

Πίνακας 5.11: Κανικοποιημένος πειραματικός πίνακας ευαισθησίας 2^{ης} μεθόδου

$$[S_{Pnew}] = \begin{bmatrix} 0.4483 & 0.1523 & 0.1016 & 0.1016 \\ 0.1523 & 0.3978 & 0.1016 & 0.1016 \\ 0.1016 & 0.1016 & 0.5010 & 0.1523 \\ 0.1016 & 0.1016 & 0.1523 & 0.3978 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

Από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου για κάθε υπόθεση δεδομένων, προέκυψε ότι ο πίνακας μήκους μονοπατιών προκύπτει ο ίδιος με της αντίστοιχης υπόθεσης της προηγούμενης ενότητας. Ως αποτέλεσμα, σε κάθε περίπτωση προκύπτει η ίδια τοπολογία βάσει του αλγορίθμου εύρεσης τοπολογίας *Prüfer*. Από την εφαρμογή της δεδομένης ροής φορτίου στην ευρισκόμενη κάθε φορά τοπολογία, προκύπτει ότι οι μετρούμενες μεταβολές τάσης για τους ζυγούς φορτίων, ταυτίζονται με τις αντίστοιχες μεταβολές τάσης των ζυγών φορτίου των υποθέσεων δεδομένων της Ενότητας (5.6.1), για τα πρώτα 8 στιγμιότυπα μετρήσεων. Έτσι, ο πίνακας $[\Delta V_{matrix}_{found}]$ θα έχει πλέον διαστάσεις (8x4) και θα περιλαμβάνει τις 8 πρώτες γραμμές, που αφορούν στους ζυγούς φορτίου, του αντίστοιχου κάθε φορά πίνακα της προηγούμενης Ενότητας. Επομένως, τα σφάλματα της ροής φορτίου θα είναι ίδια με τα αντίστοιχα σφάλματα των υποθέσεων της Ενότητας (5.6.1), για τα πρώτα 8 στιγμιότυπα μετρήσεων. Έτσι, και ο πίνακας $[error_{found}]$ θα έχει διαστάσεις επίσης (8x4). Άρα, οι τοπολογίες που εντοπίζονται είναι ίδιες σε κάθε υπόθεση δεδομένων για υπολογισμό του πίνακα μήκους μονοπατιών είτε λαμβάνοντας μετρήσεις και για τον ζυγό αναφοράς, είτε εισάγοντας απευθείας τις αυτοευαισθησίες στον πίνακα μήκους μονοπατιών.

5.6.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο προηγούμενων μεθόδων

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από την εφαρμογή των δύο προηγούμενων μεθόδων, συμπεραίνεται ότι σε κάθε περίπτωση η ευρισκόμενη τοπολογία και με τους δύο τρόπους υπολογισμού του πίνακα μήκους μονοπατιών είναι η ίδια. Επίσης, τα σφάλματα στις μεταβολές των τάσεων στους καταναλωτές μεταξύ πραγματικής και ευρισκόμενης τοπολογίας και στις δύο μεθόδους είναι ίδια. Η μόνη διαφορά έγκειται στον πίνακα ευαισθησίας. Όπως αναφέρθηκε και στην θεωρητική προσέγγιση του ζητήματος στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο πίνακας ευαισθησίας προκύπτει από την επίλυση ενός γραμμικού συστήματος εξισώσεων, και στην περίπτωση που λαμβάνονται υπόψιν στον υπολογισμό του οι μετρήσεις στον ζυγό του μετασχηματιστή, εισάγονται δύο επιπλέον στιγμιότυπα-εξισώσεις στην

επίλυση. Έτσι, παρουσιάζεται κάποια απόκλιση μεταξύ των τιμών ευαισθησίας των φορτίων μεταξύ των δύο μεθόδων.

Πίνακας 5.12: Πειραματικός πίνακας ευαισθησίας 1^{ης} μεθόδου

$$[S_{P-real1}] = \begin{bmatrix} 0 & -0.0001 & -0.0001 & -0.0002 & 0.0002 \\ 0 & -0.4487 & -0.1525 & -0.1018 & -0.1017 \\ 0 & -0.1524 & -0.3984 & -0.1018 & -0.1017 \\ 0 & -0.1019 & -0.1020 & -0.5005 & -0.1527 \\ 0 & -0.1016 & -0.1016 & -0.1523 & -0.3977 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

Πίνακας 5.13: Πειραματικός πίνακας ευαισθησίας 2^{ης} μεθόδου

$$[S_{P-real2}] = \begin{bmatrix} -0.4483 & -0.1522 & -0.1014 & -0.1014 \\ -0.1519 & -0.3981 & -0.1013 & -0.1013 \\ -0.1024 & -0.1022 & -0.5010 & -0.1531 \\ -0.1014 & -0.1015 & -0.1521 & -0.3975 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

Από τον πρώτο πίνακα λαμβάνονται οι ευαισθησίες των φορτίων μόνο οπότε προκύπτει:

Πίνακας 5.14: Πειραματικός πίνακας ευαισθησίας ζυγών φορτίου 1^{ης} μεθόδου

$$[S_{P-real1-loads}] = \begin{bmatrix} -0.4487 & -0.1525 & -0.1018 & -0.1017 \\ -0.1524 & -0.3984 & -0.1018 & -0.1017 \\ -0.1019 & -0.1020 & -0.5005 & -0.1527 \\ -0.1016 & -0.1016 & -0.1523 & -0.3977 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

Συγκρίνοντας τα αντίστοιχα στοιχεία των δύο πινάκων μεταξύ τους ως εξής:

$$error_{sens}(i, j) = \frac{S_{P-real1-loads}(i, j) - S_{P-real2}(i, j)}{S_{P-real1-loads}(i, j)} 100\% \quad (5.24)$$

προκύπτει ο πίνακας των σφαλμάτων (%) μεταξύ των δύο μεθόδων:

Πίνακας 5.15: Πίνακας σφαλμάτων ευαισθησίας μεταξύ των δύο μεθόδων

$$[error_{sens}] = \begin{bmatrix} 0.0864 & 0.1820 & 0.3879 & 0.3143 \\ 0.3501 & 0.0746 & 0.4563 & 0.3985 \\ -0.5290 & -0.2413 & -0.0981 & -0.2344 \\ 0.2152 & 0.1213 & 0.1370 & 0.0485 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

Όπως παρατηρείται, τα σφάλματα μεταξύ των τιμών ευαισθησίας των δύο πινάκων είναι πάρα πολύ μικρά και δεν επηρεάζουν το αποτέλεσμα του αλγορίθμου εύρεσης τοπολογίας. Επομένως, οι δύο μέθοδοι υπολογισμού του πίνακα μήκους μονοπατιών είναι ισοδύναμες.

[23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [22] [11] [13]

Κεφάλαιο 6:Εύρεση τοπολογιών δικτύων διανομής με χρήση του

αλγορίθμου Neighbor Joining

6.1:Εισαγωγή

Πέραν του αλγορίθμου εύρεσης τοπολογίας *Prüfer*, με δεδομένες τις αποστάσεις μεταξύ των φύλλων ενός δέντρου, η τοπολογία μπορεί να προκύψει από αλγορίθμους αναπαράστασης φυλογενετικών δέντρων, όπως είναι ο αλγόριθμος Neighbor joining.

6.2: Φυλογενετικά δέντρα

Ένα φυλογενετικό ή εξελικτικό δέντρο είναι ένα διάγραμμα με διακλαδώσεις ή αλλιώς δέντρο που δείχνει τις εξελικτικές σχέσεις μεταξύ διαφόρων βιολογικών ειδών ή άλλων ουσιών, κοινώς την φυλογενεσία τους, βασισμένο σε ομοιότητες και διαφορές στα φυσικά ή γενετικά τους χαρακτηριστικά. Οι ομάδες των ταξινομημένων αυτών βιολογικών ειδών ή ουσιών του δέντρου φαίνεται να είναι απόγονοι μιας κοινής ρίζας. Τα φυλογενετικά δέντρα έχουν καίριο ρόλο στον τομέα της φυλογενετικής.

Σε ένα φυλογενετικό δέντρο με ρίζα, κάθε κόμβος με απογόνους αναπαριστά τον πιο πρόσφατο κοινό πρόγονο των απογόνων, και τα μήκη των ακμών σε μερικά δέντρα μπορούν να ερμηνευτούν ως εκτιμήσεις χρόνου. Κάθε κόμβος αποτελεί μια ταξινομητική μονάδα. Οι εσωτερικοί κόμβοι γενικά αποκαλούνται υποθετικές ταξινομητικές μονάδες, καθώς δεν είναι δυνατή η απευθείας παρατήρησή τους. Αυτά τα δέντρα είναι χρήσιμα σε διάφορους τομείς της φυλογενετικής, όπως είναι η βιοπληροφορική, η συστηματική βιολογία, καθώς και σε συγκριτικές μεθόδους φυλογενετικής.

Τα δέντρα που δεν έχουν ρίζα παρουσιάζουν μόνο τη συσχέτιση μεταξύ των φύλλων του δέντρου και δεν απαιτείται η γνώση της ρίζας [30], [32].

Ο τρόπος με τον οποίο ταξινομούνται σε ομάδες τα διάφορα βιολογικά είδη ή άλλες ουσίες με βάση τα κοινά τους χαρακτηριστικά αφορά στο αντικείμενο του clustering. Πιο συγκεκριμένα, το clustering είναι η διαδικασία ομαδοποίησης δεδομένων έτσι ώστε τα δεδομένα μίας ομάδας (που ονομάζεται cluster=σύμπλεγμα) να παρουσιάζουν μεταξύ τους περισσότερες ομοιότητες ή κοινά χαρακτηριστικά σε σχέση με δεδομένα που ανήκουν σε άλλες ομάδες (clusters). Η μέθοδος ιεραρχικού clustering (Hierarchical cluster analysis-HCA) χρησιμοποιείται για την κατασκευή ιεραρχικής δομής clusters. Υπάρχουν δύο στρατηγικές ιεραρχικού clustering:

- η «από κάτω προς τα πάνω» προσέγγιση : κάθε δεδομένο αντιμετωπίζεται ως ένα μοναδικό σύμπλεγμα, κι έπειτα ,ζεύγη συμπλεγμάτων (clusters) ενώνονται διαδοχικά, καθώς ένα σύμπλεγμα ανεβαίνει στην ιεραρχία, μέχρι όλα τα συμπλέγματα να έχουν ομαδοποιηθεί σε ένα.
- η «από πάνω προς τα κάτω» προσέγγιση : όλα τα δεδομένα ξεκινούν από ένα σύμπλεγμα, και οι διαχωρισμοί πραγματοποιούνται αναδρομικά, καθώς ένα σύμπλεγμα μετακινείται προς τα

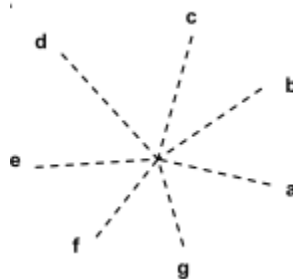
κάτω στην ιεραρχία,μέχρι να μείνουν μόνο συμπλέγματα που αποτελούνται από ένα μοναδικό δεδομένο το καθένα.

6.3: Αλγόριθμος Neighbor joining

6.3.1:Επεξήγηση αλγορίθμου Neighbor joining

Στον τομέα της βιοπληροφορικής,ο αλγόριθμος Neighbor Joining είναι μία μέθοδος clustering «από κάτω προς τα πάνω»για την κατασκευή φυλογενετικών δέντρων που δημιουργήθηκε από τους Naruya Saitou και Masatoshi Nei το 1987.Ο αλγόριθμος συνήθως χρησιμοποιείται για δέντρα που βασίζονται σε ακολουθίες δεδομένων DNA ή πρωτεϊνών,και απαιτεί τη γνώση των αποστάσεων μεταξύ των ταξινομημένων ομάδων των διαφόρων στοιχείων(taxa),για την εύρεση του αντίστοιχου φυλογενετικού δέντρου.

Ο αλγόριθμος Neighbor joining λαμβάνει ως είσοδο τον πίνακα αποστάσεων μεταξύ των φύλλων του δέντρου,ή διαφορετικά τον πίνακα μήκους μονοπατιών,έστω D ,όπως ονομάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.Ο αλγόριθμος εκκινεί με ένα μη προσδιορισμένο δέντρο,που υποτίθεται ότι είναι τοπολογίας αστέρα, δηλαδή όλοι οι κόμβοι ταξινομημένων ομάδων συνδέονται σε έναν κεντρικό κόμβο,όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1,στην οποία δίνονται 7 συμπλέγματα βιολογικών ουσιών ή στοιχείων.



Εικόνα 6.1:7 taxa σε τοπολογία αστέρα

Τα βήματα που παρουσιάζονται ακολούθως επαναλαμβάνονται μέχρι το δέντρο να είναι πλήρως προσδιορισμένο και όλα τα μήκη των κλάδων να είναι γνωστά:

Βήμα 1:Βάσει της δεδομένης μήτρας μήκους μονοπατιών, D ,υπολογίζεται ο πίνακας Q ως εξής:

$$Q(i, j) = (n - 2)D(i, j) - \sum_{k=1}^n D(i, k) - \sum_{k=1}^n D(j, k), \quad i \neq j \quad (6.1)$$

όπου n : το πλήθος των ταξινομημένων ομάδων/φύλλων του φυλογενετικού δέντρου σε τοπολογία αστέρα

$D(i, j)$: η απόσταση μεταξύ των ταξινομημένων ομάδων i, j

Βήμα 2: Εντοπίζεται το ζεύγος διαφορετικών ταξινομημένων ομάδων, $i, j (i \neq j)$ για το οποίο ο πίνακας Q παίρνει την ελάχιστη τιμή. Έστω ότι αυτές οι ομάδες είναι οι f, g . Τότε, αυτές οι ταξινομημένες ομάδες ενώνονται σε έναν καινούργιο κόμβο, έστω u , ο οποίος συνδέεται στον κεντρικό κόμβο.

Βήμα 3: Υπολογίζεται η απόσταση καθενός εκ των συμπλεγμάτων f, g , από το νέο κόμβο u , ως εξής:

$$\delta(f, u) = \frac{1}{2}D(f, g) + \frac{1}{2(n-2)} \left[\sum_{k=1}^n D(f, k) - \sum_{k=1}^n D(g, k) \right] \quad (6.2)$$

και:
$$\delta(g, u) = D(f, g) - \delta(f, u) \quad (6.3)$$

Οι νέοι κλάδοι που ενσωματώνονται μεταξύ των f και u, g και u , και τα μήκη που τους αντιστοιχούν, $\delta(f, u), \delta(g, u)$ είναι πλέον μέρος του δέντρου που δημιουργείται σταδιακά. Αυτοί οι κλάδοι ούτε επηρεάζουν ούτε επηρεάζονται από μεταγενέστερα βήματα του αλγορίθμου.

Βήμα 4: Υπολογίζεται η απόσταση όλων των υπόλοιπων ομάδων, εκτός των f, g , από το νέο κόμβο u , ως εξής:

$$D(u, k) = \frac{1}{2} [D(f, k) + D(g, k) - D(f, g)] \quad (6.4)$$

όπου k είναι ο κόμβος της ομάδας του οποίου υπολογίζεται η απόσταση από τον u .

Βήμα 5: Ο αλγόριθμος εκκινεί από την αρχή, μόνο που το ζεύγος των ταξινομημένων ομάδων f, g αντικαθίσταται από τον κόμβο u , χρησιμοποιώντας στον πίνακα μήκους μονοπατιών τις αποστάσεις που βρέθηκαν στο προηγούμενο βήμα.

Σημειώνεται ότι ο Neighbor joining για n ταξινομημένες ομάδες επαναλαμβάνεται $n - 3$ φορές. Σε κάθε επανάληψη, δύο κόμβοι φύλλων ενώνονται σε έναν νέο κόμβο. Όταν, όμως, θα έχουν μείνει ακριβώς 3 κόμβοι, οι 2 εξ' αυτών που θα είναι μεταξύ των δοσμένων φύλλων, θα ενώνονται στον τρίτο κόμβο. Έτσι, ο αλγόριθμος σταματάει να εκτελείται όταν μείνουν μόνο 3 κόμβοι, δηλαδή μετά από $n - 3$ επαναλήψεις.

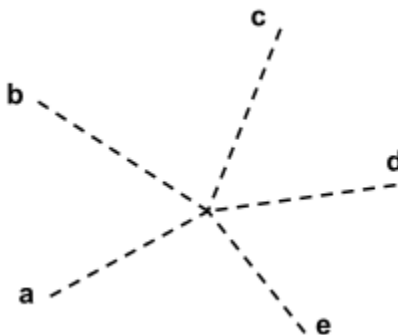
Καθώς το μοναδικό δεδομένο που απαιτεί ο αλγόριθμος είναι ο πίνακας μήκους μονοπατιών, μπορεί να γίνει επέκταση του αλγορίθμου και σε οποιοδήποτε δέντρο, του οποίου οι αποστάσεις μεταξύ των φύλλων είναι γνωστές. Έτσι, στα δίκτυα διανομής Χαμηλής Τάσης που εξετάζονται, την θέση των ταξινομημένων ομάδων που αναπαριστούν τα φύλλα του δέντρου, παίρνουν οι ζυγοί φορτίου.

Ωστόσο, στα δίκτυα Χαμηλής Τάσης που εξετάζονται, για να είναι δυνατή η εύρεση της τοπολογίας βάσει των μετρήσεων των έξυπνων μετρητών των καταναλωτών με τη χρήση του αλγορίθμου Neighbor joining, έχει γίνει η θεώρηση ότι από τον ζυγό του μετασχηματιστή εξετάζεται κάθε φορά μόνο μία αναχώρηση γραμμής, ανεξάρτητα από τις άλλες αναχωρήσεις. Έτσι, οι μεταβολές των φορτίων στις διάφορες αναχωρήσεις γραμμών δεν επηρεάζουν τις υπόλοιπες. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, σε σταθερή κατάσταση, διατηρώντας την τάση στον ζυγό αναφοράς ίση με την ονομαστική, επιτυγχάνεται απόλυτη μεταξύ των διαφορετικών αναχωρήσεων γραμμών από τον ζυγό αναφοράς. Ως

αποτέλεσμα,κάθε αναχώρηση λειτουργεί χωρίς την επίδραση από άλλες γραμμές. Ισοδύναμα,η ρίζα του δέντρου που αναπαριστά το δίκτυο ΧΤ είναι φύλλο[13].

6.3.2:Παράδειγμα

Έστω ότι δίνονται $n = 5$ κόμβοι φύλλων,οι {a,b,c,d,e}:



και η ακόλουθη μήτρα μήκους μονοπατιών:

Πίνακας 6.1:Πίνακας μήκους μονοπατιών, D

	a	b	c	d	e
a	0	5	9	9	8
b	5	0	10	10	9
c	9	10	0	8	7
d	9	10	8	0	3
e	8	9	7	3	0

Επανάληψη 1:

Βήμα 1:Υπολογίζονται τα στοιχεία του πίνακα Q ,εκτός των διαγώνιων,από τη σχέση (6.1) :

Πίνακας 6.2:Πίνακας Q

	a	b	c	d	e
a		-50	-38	-34	-34
b	-50		-38	-34	-34
c	-38	-38		-40	-40
d	-34	-34	-40		-48
e	-34	-34	-40	-48	

Βήμα 2: Εντοπίζεται το ελάχιστο στοιχείο της μήτρας Q , καθώς και τα φύλλα στα οποία αντιστοιχεί. Έτσι, $\min Q = Q(a, b) = Q(b, a) = -50$. Έτσι, οι κόμβοι a, b ενώνονται σε έναν νέο κόμβο u .

Βήμα 3: Από τις σχέσεις (6.2), (6.3) υπολογίζονται τα μήκη των νέων κλάδων του δέντρου μεταξύ των κόμβων a και u και b και u αντίστοιχα. Έτσι: $\delta(a, u) = 2$ και $\delta(b, u) = 3$.

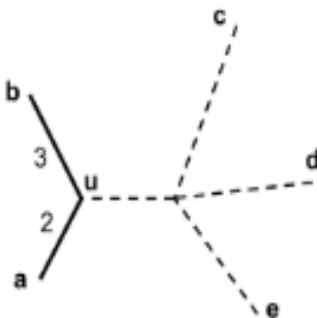
Βήμα 4: Πλέον, ανανεώνεται η μήτρα D , υπολογίζοντας τις αποστάσεις των υπολοίπων φύλλων από το νέο κόμβο u , σύμφωνα με τη σχέση (6.3.4): $D(c, u) = 7, D(d, u) = 7, D(e, u) = 6$.

Βήμα 5: Η νέα μήτρα μήκους μονοπατιών που προκύπτει, απομακρύνοντας τους κόμβους a, b , και εισάγοντας τον κόμβο u είναι:

Πίνακας 6.3: Πίνακας μήκους μονοπατιών, D , στο τέλος της 1^{ης} επανάληψης

	u	c	d	e
u	0	7	7	6
c	7	0	8	7
d	7	8	0	3
e	6	7	3	0

Το δέντρο που έχει σχηματιστεί στο τέλος της πρώτης επανάληψης είναι το ακόλουθο:



Επανάληψη 2:

Βήμα 1: Υπολογίζονται τα στοιχεία του πίνακα Q , εκτός των διαγώνιων, από τη σχέση (6.1) :

Πίνακας 6.4: Πίνακας Q κατά τη 2^η επανάληψη

	u	c	d	e
u		-28	-24	-24
c	-28		-24	-24
d	-24	-24		-28
e	-24	-24	-28	

Βήμα 2: Εντοπίζεται το ελάχιστο στοιχείο της μήτρας Q , καθώς και τα φύλλα στα οποία αντιστοιχεί. Παρατηρείται ότι, $\min Q = Q(u, c) = Q(d, e) = -28$. Έτσι, μπορούν να ενωθούν τόσο οι κόμβοι u, c όσο

και οι κόμβοι d, e σε έναν νέο κόμβο, έστω v . Επειδή και οι δύο επιλογές οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα, υποτίθεται ότι ενώνονται οι κόμβοι u, c στο νέο κόμβο v .

Βήμα 3: Από τις σχέσεις (6.2), (6.3) υπολογίζονται τα μήκη των νέων κλάδων του δέντρου μεταξύ των κόμβων u και v και c και v αντίστοιχα. Έτσι: $\delta(u, v) = 3$ και $\delta(c, v) = 4$.

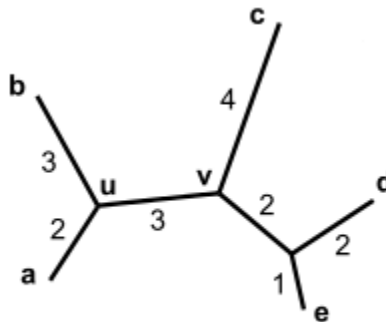
Βήμα 4: Πλέον, ανανεώνεται η μήτρα D , υπολογίζοντας τις αποστάσεις των υπολοίπων φύλλων από το νέο κόμβο u , σύμφωνα με τη σχέση (6.3.4): $D(d, v) = 4$, $D(e, v) = 3$.

Βήμα 5: Η νέα μήτρα μήκους μονοπατιών που προκύπτει, απομακρύνοντας τους κόμβους u, c , και εισάγοντας τον κόμβο v είναι:

Πίνακας 6.5: Πίνακας μήκους μονοπατιών, D , στο τέλος της 2^{ης} επανάληψης

	v	d	e
v	0	4	3
d	4	0	3
e	3	3	0

Το δέντρο που έχει σχηματιστεί στο τέλος της δεύτερης επανάληψης είναι το ακόλουθο:



Μετά τη δεύτερη επανάληψη, ο αλγόριθμος σταματάει να εκτελείται, καθώς το δέντρο έχει προσδιοριστεί πλήρως.

Το παραπάνω παράδειγμα παρουσιάζει μια ιδανική περίπτωση: το άθροισμα του συνολικού μήκους όλων των ακμών μεταξύ δύο κόμβων φύλλων είναι ίσο με την αρχική απόσταση μεταξύ αυτών των φύλλων, όπως δίνεται στον πίνακα D . Δεδομένης, λοιπόν, μιας μήτρας μήκους μονοπατιών που ικανοποιεί αυτή τη συνθήκη σχετικά με το αντίστοιχο δέντρο, ο αλγόριθμος Neighbor joining είναι βέβαιο ότι θα προσδιορίζει αυτό το δέντρο πλήρως.

6.4: Αλγόριθμος BIONJ

Ο αλγόριθμος BIONJ είναι μια βελτιωμένη έκδοση του αλγορίθμου Neighbor joining(NJ).Αυτός ο αλγόριθμος ακολουθεί τον ίδιο τρόπο ιεραρχικού clustering «από κάτω προς τα πάνω» με τον NJ.Επιπλέον,ο BIONJ χρησιμοποιεί ένα απλό μοντέλο πρώτης τάξης για τις διακυμάνσεις και την αλληλοσυσχέτιση μεταξύ των εξελικτικών προσεγγίσεων απόστασης.Αυτό το μοντέλο λειτουργεί καλά όταν αυτές οι προσεγγίσεις λαμβάνονται από ευθυγραμμισμένες ακολουθίες.Στον τομέα της βιοπληροφορικής,η ευθυγράμμιση ακολουθιών είναι ένας τρόπος τοποθέτησης ακολουθιών DNA,RNA ή πρωτεϊνών,για να εξακριβωθούν ομοιότητες μεταξύ τους,ομοιότητες που μπορεί να είναι αποτέλεσμα λειτουργικών,κατασκευαστικών ή εξελικτικών σχέσεων μεταξύ τους. Ο BIONJ σε κάθε βήμα επιτρέπει την επιλογή,μεταξύ των επιτρεπτών συνδυασμών ομαδοποίησης φύλλων,την ομαδοποίηση των φύλλων που οδηγεί στην ελάχιστη διακύμανση του νέου πίνακα μήκους μονοπατιών που προκύπτει μετά την αντικατάσταση αυτών των ενοποιημένων φύλλων από το νέο κόμβο στον οποίο ενώνονται.Ακόμη,ο BIONJ διατηρεί την ταχύτητα του αλγορίθμου NJ,κι έχει ένα επιπλέον πλεονέκτημα,ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύ μεγάλα σετ δεδομένων(>1000 taxa).Έτσι,στην παρούσα ανάλυση, την θέση των ταξινομημένων ομάδων λαμβάνουν οι ζυγοί φορτίου,επομένως,ο αλγόριθμος αυτός είναι ακόμα καταλληλότερος για την εύρεση τοπολογιών δικτύων διανομής πολλών ζυγών φορτίου[41].

6.5: Εφαρμογές του αλγορίθμου Neighbor joining (BIONJ) σε Δίκτυα Διανομής

Με βάση το προηγούμενο κεφάλαιο,ο πίνακας των αποστάσεων μεταξύ των ζυγών φορτίου ενός δικτύου ΧΤ προκύπτει από τον πειραματικό πίνακα ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος στους κόμβους ως εξής: αρχικά ,λαμβάνονται οι απόλυτες τιμές του πειραματικού πίνακα ευαισθησίας. Έπειτα,τα στοιχεία του πίνακα ομαδοποιούνται με εύρος που προκύπτει από οπτική παρατήρηση του πίνακα,και υπολογίζεται ο μέσος όρος των στοιχείων κάθε ομάδας.Ύστερα,τα στοιχεία κάθε ομάδας αντικαθίστανται στον πίνακα ευαισθησίας από τον μέσο όρο της ομάδας.Με αυτόν τον τρόπο,γίνεται μια προσπάθεια εξάλειψης των σφαλμάτων των μετρήσεων και προσέγγισης του θεωρητικά αναμενόμενου πίνακα ευαισθησίας ,με βάση τα δεδομένα των γραμμών, καθώς και της θεωρητικής ανάλυσης ευαισθησίας για δεδομένη τοπολογία δικτύου,που έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο νέος προσεγγιστικός πίνακας ευαισθησίας που προκύπτει θα είναι συμμετρικός.

Πλέον,με βάση αυτό το νέο πίνακα ευαισθησίας,υπολογίζεται ο πίνακας μήκους μονοπατιών όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.1:

$$D(i,j) = \text{autosensitivity}(i) - \text{sensitivity}(i,j) + \text{autosensitivity}(j) - \text{sensitivity}(j,i) \quad (6.5)$$

Ωστόσο,είναι δυνατή η εφαρμογή της (6.5) και στον πίνακα απολύτων τιμών ευαισθησίας που δεν είναι συμμετρικός,καθώς,σύμφωνα με την (6.5),ο πίνακας μήκους μονοπατιών θα προκύπτει και πάλι συμμετρικός.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, στα δίκτυα που εξετάζονται, για να συμπεριληφθεί ο ζυγός αναφοράς στην ευρισκόμενη τοπολογία, θα πρέπει η ρίζα να αντιμετωπιστεί ως φύλλο. Διαφορετικά, δεν θα φαίνεται στον πίνακα μήκους μονοπατιών. Γνωρίζοντας ότι κάθε μη διαγώνιο στοιχείο του πίνακα μήκους μονοπατιών περιέχει όλες τις αποστάσεις μεταξύ των φύλλων, αν η ρίζα θεωρηθεί φύλλο, οι αποστάσεις της ως προς τα υπόλοιπα φύλλα θα είναι οι αυτοευαισθησίες του πίνακα ευαισθησίας. Έτσι, μπορεί να τοποθετηθούν απευθείας στον πίνακα μήκους μονοπατιών οι αυτοευαισθησίες στη γραμμή και στη στήλη που αντιστοιχούν στον ζυγό αναφοράς.

Έπειτα, αυτός ο πίνακας μήκους μονοπατιών γράφεται σε μορφή PHYLIP και αποθηκεύεται σε ένα αρχείο κειμένου με όνομα για παράδειγμα, *input.txt*. Στη συνέχεια, το αρχείο αυτό τρέχει στο πρόγραμμα του BIONJ, το οποίο παράγει για το δεδομένο πίνακα το αντίστοιχο string δέντρου, που αποθηκεύεται σε ένα άλλο αρχείο κειμένου, π.χ. *output.txt*. Αυτό το αρχείο εξόδου περιέχει την πληροφορία σχετικά με την τοπολογία του δικτύου [39], [40].

Από το δέντρο που προκύπτει από τον αλγόριθμο BIONJ, με είσοδο τον πειραματικό πίνακα ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος, προκύπτουν οι συνολικές αντιστάσεις μεταξύ των κόμβων του δικτύου, σε ανά μονάδα τιμές. Έτσι, αν ληφθεί υπόψη και ο πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος, θα προκύπτουν και οι συνολικές επαγωγικές αντιδράσεις των κλάδων του δικτύου, σε ανά μονάδα τιμές. Γνωρίζοντας, κατ'επέκτασιν, τις συνολικές αντιστάσεις κι επαγωγικές αντιδράσεις μεταξύ του ζυγού αναφοράς και των ζυγών φορτίου, είναι δυνατό να εφαρμοστεί στην ευρισκόμενη τοπολογία η ίδια ροή φορτίου, με αυτήν από την οποία λαμβάνονται τα δεδομένα. Εάν τα αποτελέσματα της ροής φορτίου στην ευρισκόμενη τοπολογία δεν αποκλίνουν σημαντικά από τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους έξυπνους μετρητές, τότε η ευρισκόμενη τοπολογία θα αντιστοιχεί στην πραγματική τοπολογία του δικτύου. Ωστόσο, με τη μέθοδο αυτή, είναι αδύνατος ο ακριβής υπολογισμός του πλήθους των ζυγών διασύνδεσης του δικτύου.

Στα παραδείγματα που ακολουθούν, έχουν χρησιμοποιηθεί τα ακόλουθα είδη γραμμών:

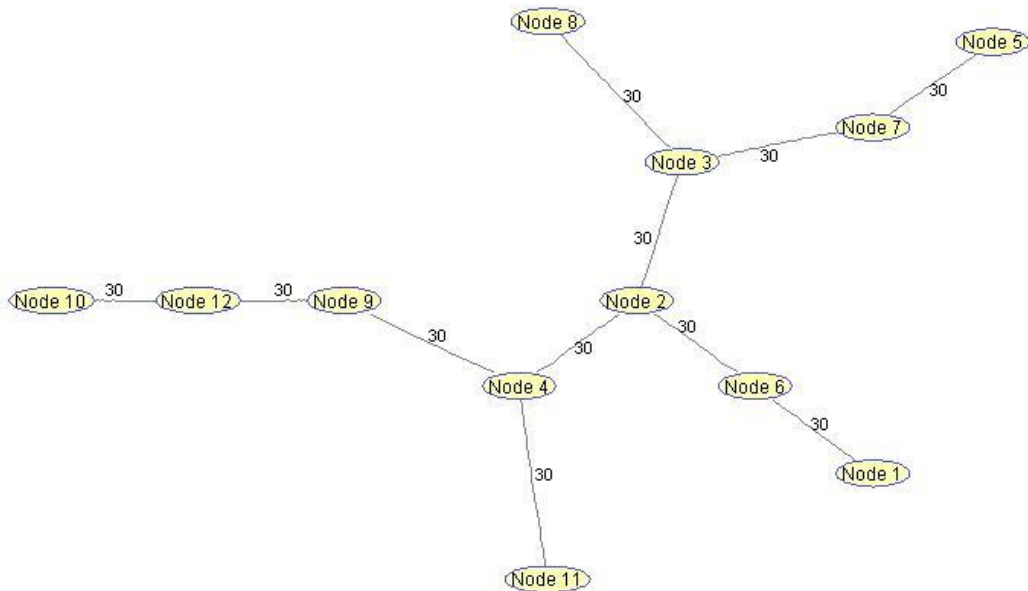
- οι υπέργειες γραμμές μεταξύ των πυλώνων είναι συνεστραμμένα καλώδια Al (αργιλίου), διατομής $4 \times 120 \text{ mm}^2$, με αντίσταση γραμμής $R = 0.284 \text{ Ohm / km}$ κι επαγωγική αντίδραση $X = 0.083 \text{ Ohm / km}$.
- οι γραμμές υπηρεσίας (service lines) μεταξύ πυλώνων και καταναλωτών είναι καλώδια Cu (χαλκού), διατομής $4 \times 16 \text{ mm}^2$, με αντίσταση γραμμής $R = 1.380 \text{ Ohm / km}$ κι επαγωγική αντίδραση $X = 0.082 \text{ Ohm / km}$. [11]

Η βασική τάση του δικτύου και η βασική ισχύς έχουν οριστεί: $V_b = 400 \text{ V}$, $S_b = 1 \text{ MVA}$. Άρα, η βασική αντίσταση του δικτύου είναι: $Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = 0.16 \text{ Ohm}$.

Πάνω στις αρχικές τοπολογίες αναγράφονται τα μήκη των γραμμών, τα οποία όμως δεν είναι δεδομένα κατά την διαδικασία εύρεσης της τοπολογίας.

Παράδειγμα 1

Έστω το ακόλουθο αρχικό δίκτυο Χαμηλής Τάσης 12 κόμβων :



Εικόνα 6.2:Τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης 12 κόμβων

Ακολουθως δίνονται οι μεταβολές τάσης,ενεργού και αέργου ισχύος,που προκύπτουν από την επιλογή κατάλληλων μετρήσεων από την προσομοίωση ροής φορτίου στο MATPOWER:

$$[\Delta V_{matrix_{real}}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} -0.0887 & -0.0769 & -0.1545 & -0.0622 \\ -0.0762 & -0.0757 & -0.0696 & -0.0335 \\ -0.1294 & -0.1756 & -0.3317 & -0.1867 \\ -0.2743 & -0.2926 & -0.3686 & -0.0621 \\ -0.1547 & -0.1321 & -0.2245 & -0.0814 \\ -0.1562 & -0.0701 & -0.1671 & -0.1419 \\ -0.1163 & -0.1259 & -0.3058 & -0.1716 \\ -0.3860 & -0.3267 & -0.4329 & -0.2982 \end{bmatrix}_{(8 \times 4)}$$

$$[\Delta P_{matrix}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0.0400 & 0.0100 & 0.1100 & -0.0100 \\ 0.0700 & 0.1000 & -0.0500 & -0.0400 \\ -0.0500 & 0.1300 & 0.3900 & 0.1700 \\ 0.2600 & 0.4400 & 0.4600 & -0.3500 \\ 0.1400 & 0.1300 & 0.2800 & -0.0200 \\ 0.1600 & -0.1300 & 0.1100 & 0.1800 \\ 0.0100 & 0.0300 & 0.4000 & 0.2000 \\ 0.4100 & 0.3200 & 0.4100 & 0.2100 \end{bmatrix}_{(8 \times 4)}$$

$$[\Delta Q_{matrix}] = \begin{bmatrix} 0.0003 & 0.0004 & 0.0010 & -0.0004 \\ 0.0002 & 0.0001 & 0.0009 & -0.0001 \\ 0.0004 & 0.0007 & 0.0010 & -0.0004 \\ 0.0006 & 0.0002 & 0.0012 & -0.0003 \\ 0.0005 & 0.0001 & 0.0007 & -0.0005 \\ 0.0005 & 0.0005 & 0.0006 & -0.0001 \\ 0.0001 & 0.0006 & 0.0008 & -0.0005 \\ 0.0006 & 0.0002 & 0.0010 & 0.0001 \end{bmatrix}_{(8 \times 4)}$$

Ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος που προκύπτει είναι ο εξής:

Πίνακας 6.6: Πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος

$$[S_{P-real}] = \begin{bmatrix} -0.4483 & -0.1522 & -0.1014 & -0.1014 \\ -0.1519 & -0.3981 & -0.1013 & -0.1013 \\ -0.1024 & -0.1022 & -0.5009 & -0.1530 \\ -0.1014 & -0.1015 & -0.1521 & -0.3975 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

και ο πίνακας ευαισθησίας, έπειτα από ομαδοποίηση των απόλυτων τιμών των στοιχείων του και αντικατάσταση του καθενός από τον μέσο όρο της αντίστοιχης ομάδας, είναι ο εξής:

Πίνακας 6.7: Συμμετρικός πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος

$$[S_{Pnew}] = \begin{bmatrix} 0.4483 & 0.1523 & 0.1016 & 0.1016 \\ 0.1523 & 0.3978 & 0.1016 & 0.1016 \\ 0.1016 & 0.1016 & 0.5009 & 0.1523 \\ 0.1016 & 0.1016 & 0.1523 & 0.3978 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

Ο αντίστοιχος πίνακας μήκους μονοπατιών που προκύπτει είναι ο εξής:

Πίνακας 6.8: Πίνακας μήκους μονοπατιών λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος

$$[D_{real}] = \begin{bmatrix} 0 & 0.4483 & 0.3978 & 0.5009 & 0.3978 \\ 0.4483 & 0 & 0.5414 & 0.7460 & 0.6428 \\ 0.3978 & 0.5414 & 0 & 0.6955 & 0.5924 \\ 0.5009 & 0.7460 & 0.6955 & 0 & 0.5941 \\ 0.3978 & 0.6428 & 0.5924 & 0.5941 & 0 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

και σε μορφή PHYLIP:

```

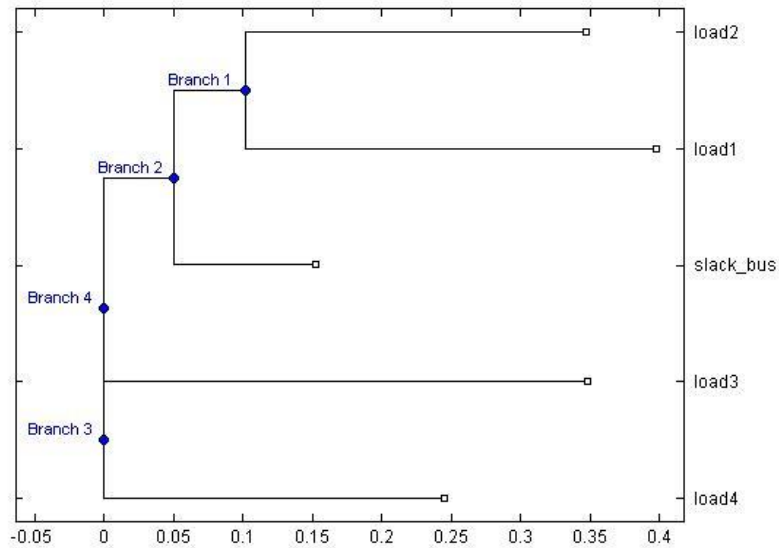
5
slack_bus
0      0.4483      0.3978      0.5009      0.3978
load1
0.4483      0      0.5414      0.7460      0.6428
load2
0.3978      0.5414      0      0.6955      0.5924
load3
0.5009      0.7460      0.6955      0      0.5941
load4
0.3978      0.6428      0.5924      0.5941      0

```

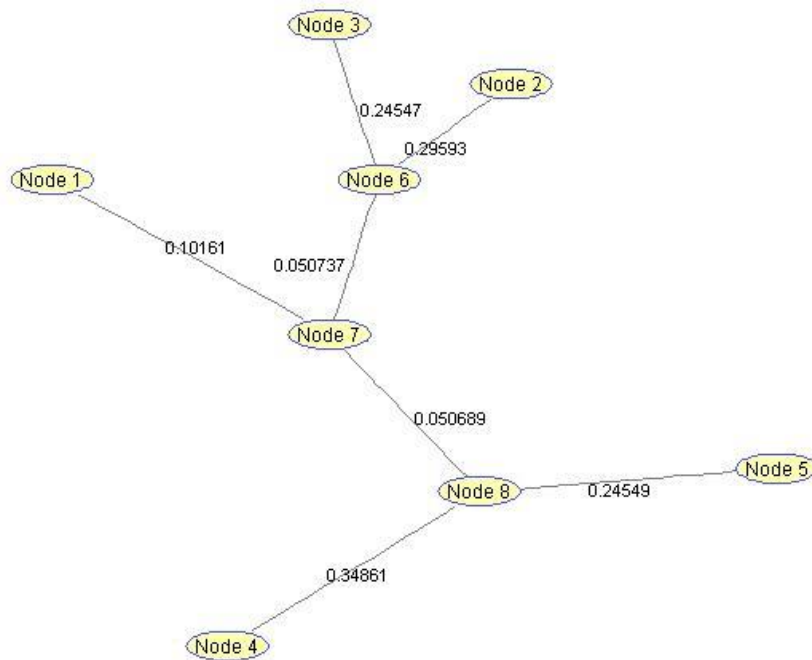
Το string δέντρου που προκύπτει από τον αλγόριθμο BIONJ είναι το εξής:

((load2:0.245467,load1:0.295933):0.050737,slack_bus:0.101611):0.050689,load3:0.348608,load4:0.245492);

Ακολουθως, παρατίθενται η αναπαράσταση του δέντρου σε μορφή φυλογενετικού δέντρου, και σε μορφή ακτινικού δικτύου διανομής:



Εικόνα 6.3: Αναπαράσταση ευρισκόμενης τοπολογίας σε μορφή φυλογενετικού δέντρου από τον αλγόριθμο BIONJ για πίνακα ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού



Εικόνα 6.4: Ευρισκόμενη τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης, με τις συνολικές αντιστάσεις των γραμμών

Ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος που προκύπτει είναι ο εξής:

Πίνακας 6.7: Πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος

$$[S_{Q-real}] = \begin{bmatrix} -0.0743 & -0.0448 & -0.0299 & -0.0299 \\ -0.0446 & -0.0596 & -0.0297 & -0.0297 \\ -0.0301 & -0.0301 & -0.0897 & -0.0450 \\ -0.0302 & -0.0301 & -0.0451 & -0.0597 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

και ο πίνακας ευαισθησίας, έπειτα από ομαδοποίηση των απόλυτων τιμών των στοιχείων του και αντικατάσταση του καθενός από τον μέσο όρο της αντίστοιχης ομάδας, είναι ο εξής:

Πίνακας 6.8: Συμμετρικός πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος

$$[S_{Qnew}] = \begin{bmatrix} 0.0743 & 0.0449 & 0.0300 & 0.0300 \\ 0.0449 & 0.0596 & 0.0300 & 0.0300 \\ 0.0300 & 0.0300 & 0.0897 & 0.0449 \\ 0.0300 & 0.0300 & 0.0449 & 0.0596 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}$$

Ο αντίστοιχος πίνακας μήκους μονοπατιών που προκύπτει είναι ο εξής:

Πίνακας 6.9: Πίνακας μήκους μονοπατιών λόγω μεταβολών αέργου ισχύος

$$[D_{reactive}] = \begin{bmatrix} 0 & 0.0743 & 0.0596 & 0.0897 & 0.0598 \\ 0.0743 & 0 & 0.0442 & 0.1041 & 0.0740 \\ 0.0596 & 0.0442 & 0 & 0.0894 & 0.0593 \\ 0.0897 & 0.1041 & 0.0894 & 0 & 0.0598 \\ 0.0596 & 0.0740 & 0.0593 & 0.0596 & 0 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

και σε μορφή PHYLIP:

```

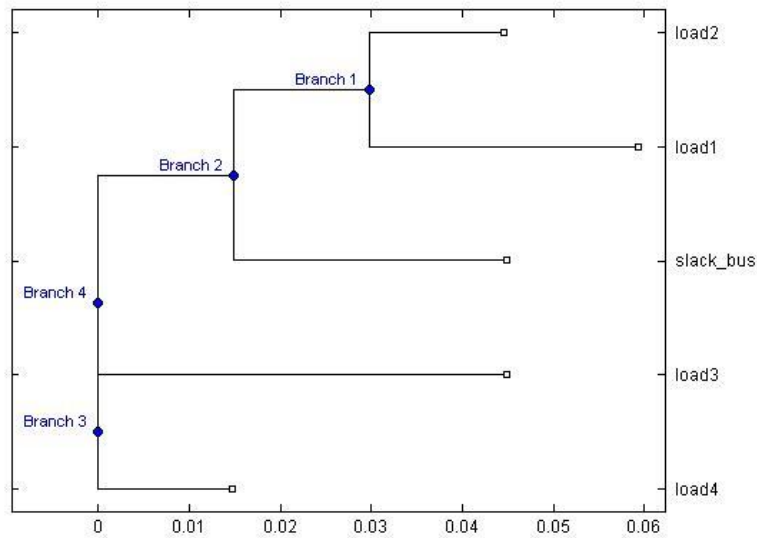
5
s1ack_bus
0      0.0743      0.0596      0.0897      0.0596
load1
0.0743      0      0.0442      0.1041      0.0740
load2
0.0596      0.0442      0      0.0894      0.0593
load3
0.0897      0.1041      0.0894      0      0.0596
load4
0.0596      0.0740      0.0593      0.0596      0

```

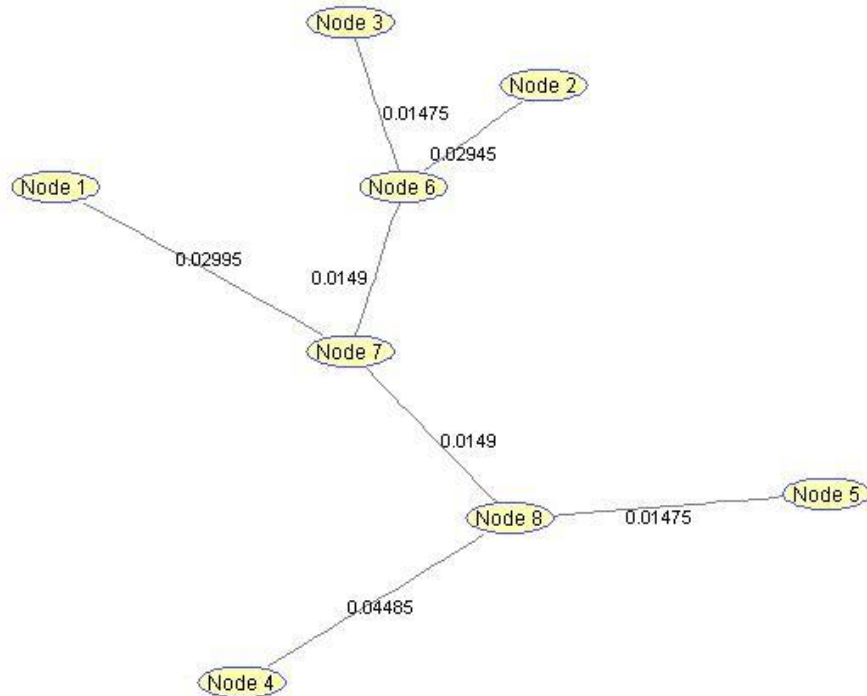
Το string δέντρου που προκύπτει από τον αλγόριθμο BIONJ είναι το εξής:

```
((load2:0.014750,load1:0.029450):0.014900,s1ack_bus:0.029950):0.014900,load3:0.044850,load4:0.014750);
```

Ακολούθως, παρατίθενται η αναπαράσταση του δέντρου σε μορφή φυλογενετικού δέντρου, και σε μορφή ακτινικού δικτύου διανομής:



Εικόνα 6.5:Αναπαράσταση ευρισκόμενης τοπολογίας σε μορφή φυλογενετικού δέντρου από τον αλγόριθμο BIONJ για πίνακα ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου



Εικόνα 6.6:Ευρισκόμενη τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης,με τις συνολικές επαγωγικές αντιδράσεις των γραμμών

Αν εφαρμοστεί στην ευρισκόμενη τοπολογία η ίδια ροή φορτίου από την οποία ελήφθησαν οι πειραματικές μετρήσεις,με δεδομένες πλέον τις συνολικές αντιστάσεις κι επαγωγικές αντιδράσεις των

γραμμών, οι τιμές των μεταβολών των τάσεων στους ζυγούς φορτίου που προκύπτουν, για τα επιλεγμένα στιγμιότυπα, είναι οι εξής:

$$[\Delta V_{matrix_{found}}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} -0.0849 & -0.0737 & -0.1481 & -0.0596 \\ -0.0727 & -0.0723 & -0.0671 & -0.0322 \\ -0.1239 & -0.1678 & -0.3172 & -0.1781 \\ -0.2615 & -0.2789 & -0.3525 & -0.0600 \\ -0.1475 & -0.1260 & -0.2146 & -0.0778 \\ -0.1491 & -0.0674 & -0.1600 & -0.1354 \\ -0.1112 & -0.1203 & -0.2923 & -0.1636 \\ -0.3678 & -0.3116 & -0.4138 & -0.2845 \end{bmatrix}_{(8 \times 4)}$$

Ακολούθως παρουσιάζεται ο πίνακας των σφαλμάτων (%) των μεταβολών τάσης μεταξύ πραγματικών μετρήσεων και των μετρήσεων που προκύπτουν από την ίδια ροή φορτίου στην ευρισκόμενη τοπολογία:

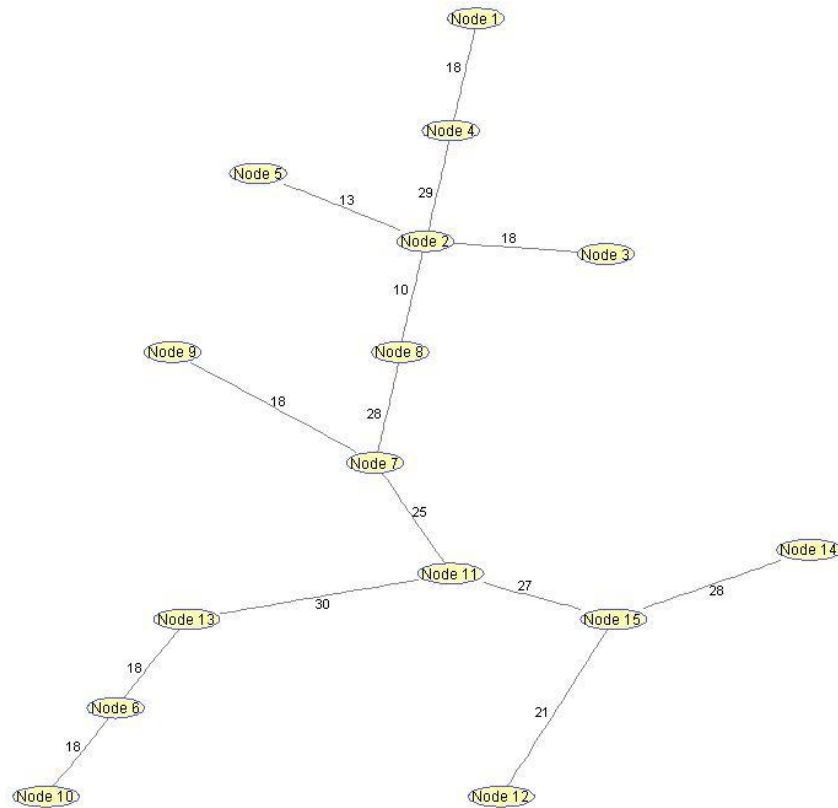
Πίνακας 6.10: Πίνακας σφαλμάτων μεταξύ πραγματικών τάσεων και τάσεων από την ροή φορτίου στην ευρισκόμενη τοπολογία

$$[error_{found}] = \begin{bmatrix} 3.1417 & 5.0115 & 5.0151 & 4.9148 \\ 5.1647 & 5.4560 & 6.3030 & 5.0300 \\ -4.8954 & 12.1337 & -4.5262 & -4.9505 \\ -4.6092 & -4.8281 & -4.3925 & -4.6894 \\ -4.8742 & -7.6137 & -4.5385 & -4.5281 \\ 4.7367 & 3.8501 & 4.6090 & 4.7782 \\ -4.7441 & -4.3994 & -4.4299 & -4.8068 \\ -4.9076 & -4.8438 & -4.3098 & 8.2692 \end{bmatrix}_{(8 \times 4)}$$

Παρατηρείται ότι, με εξαίρεση τα σφάλματα 12.1337% και κυρίως το 347.8750 %, που είναι πολύ μεγάλο, και παρατηρούνται σε μετρήσεις στον δεύτερο κατά σειρά ζυγό φορτίου, τα υπόλοιπα κυμαίνονται μεταξύ τιμών μικρότερων του 10% κατ' απόλυτη τιμή. Τα σφάλματα, στο σύνολό τους, μπορεί να οφείλονται σε μη κατάλληλη επιλογή στιγμιοτύπων, σε προσεγγίσεις της μεθόδου καθώς και σε προσεγγίσεις του ίδιου του αλγορίθμου BIONJ. Έτσι, συνάγεται ότι η ευρισκόμενη τοπολογία προσεγγίζει, ικανοποιητικά, την πραγματική.

Παράδειγμα 2

Έστω το ακόλουθο αρχικό δίκτυο Χαμηλής Τάσης 15 κόμβων :



Εικόνα 6.7:Τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης 15 κόμβων

Ακολουθως δίνονται οι μεταβολές τάσης,ενεργού και αέργου ισχύος,που προκύπτουν από την επιλογή κατάλληλων μετρήσεων από την προσομοίωση ροής φορτίου στο MATPOWER:

$$[\Delta Vmatrix_{real}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} -0.0277 & -0.0328 & -0.0174 & -0.2107 & -0.0906 & -0.1876 \\ -0.0750 & -0.0394 & -0.0388 & -0.2633 & -0.1686 & -0.1842 \\ -0.1697 & -0.1326 & -0.2747 & -0.3943 & -0.4014 & -0.4748 \\ -0.0579 & -0.0966 & -0.0989 & -0.3425 & -0.2019 & -0.3400 \\ -0.1059 & -0.0382 & -0.2320 & -0.4000 & -0.3709 & -0.2594 \\ -0.1085 & -0.0572 & -0.1505 & -0.3195 & -0.2748 & -0.1103 \\ -0.0434 & -0.0124 & -0.0351 & -0.1531 & -0.2169 & -0.2310 \\ -0.0187 & -0.0684 & -0.0388 & -0.2616 & -0.1725 & -0.2605 \\ -0.1238 & -0.1393 & -0.2063 & -0.2699 & -0.4097 & -0.4468 \\ -0.0801 & -0.1347 & -0.1210 & -0.3554 & -0.3095 & -0.3115 \\ -0.2303 & -0.2105 & -0.3695 & -0.3563 & -0.5191 & -0.5270 \\ -0.1409 & -0.0611 & -0.1069 & -0.2678 & -0.1714 & -0.2911 \end{bmatrix}_{(12 \times 6)}$$

$$[\Delta P_{matrix}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} -0.0300 & 0.0000 & -0.3500 & 0.3200 & -0.1800 & 0.2800 \\ 0.1600 & -0.1000 & -0.4100 & 0.3600 & 0.0300 & 0.1000 \\ 0.1600 & -0.1300 & 0.1100 & 0.1800 & 0.1800 & 0.4600 \\ -0.1200 & 0.1600 & -0.3400 & 0.4700 & -0.1500 & 0.5000 \\ 0.1300 & -0.4700 & 0.1900 & 0.4400 & 0.4500 & -0.1200 \\ 0.2100 & -0.2100 & 0.0100 & 0.4000 & 0.4000 & -0.3800 \\ 0.0600 & -0.2400 & -0.3200 & -0.0100 & 0.3200 & 0.3300 \\ -0.2300 & 0.1100 & -0.4200 & 0.4800 & 0.0200 & 0.3900 \\ 0.0100 & 0.1200 & -0.0200 & -0.0400 & 0.4600 & 0.4900 \\ -0.1100 & 0.3400 & -0.3000 & 0.4200 & 0.2900 & 0.2200 \\ 0.3200 & 0.2400 & 0.3700 & -0.1200 & 0.4800 & 0.4000 \\ 0.4000 & -0.2200 & -0.2000 & 0.2900 & -0.1800 & 0.3700 \end{bmatrix}_{(12 \times 6)}$$

$$[\Delta Q_{matrix}] = \begin{bmatrix} -0.0002 & -0.1000 & 0.0000 & 0.0010 & 0.0003 & 0.0003 \\ -0.0001 & -0.0003 & 0.0002 & 0.0012 & 0.0005 & 0.0002 \\ 0.0001 & 0.0002 & 0.0004 & 0.0011 & 0.0007 & 0.0004 \\ -0.0004 & 0.0001 & 0.0003 & 0.0011 & 0.0004 & 0.0001 \\ -0.0004 & -0.0004 & 0.0004 & 0.0012 & 0.0008 & 0.0001 \\ -0.0002 & 0.0000 & 0.0002 & 0.0012 & 0.0007 & -0.0001 \\ -0.0003 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0010 & 0.0004 & -0.0002 \\ -0.0001 & 0.0005 & 0.0002 & 0.0002 & 0.0001 & 0.0002 \\ -0.0002 & 0.0005 & -0.0000 & 0.0004 & 0.0005 & 0.0006 \\ -0.0002 & 0.0000 & -0.0001 & 0.0010 & 0.0003 & 0.0003 \\ -0.0003 & -0.0002 & 0.0007 & 0.0005 & 0.0009 & 0.0006 \\ -0.0001 & 0.0003 & 0.0001 & 0.0007 & 0.0004 & 0.0006 \end{bmatrix}_{(12 \times 6)}$$

Ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος που προκύπτει είναι ο εξής:

Πίνακας 6.11: Πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος

$$[S_{p-real}] = \begin{bmatrix} -0.2265 & -0.0793 & -0.0795 & -0.0796 & -0.0796 & -0.0796 \\ -0.0793 & -0.1855 & -0.0794 & -0.0796 & -0.0796 & -0.0796 \\ -0.0796 & -0.0796 & -0.2911 & -0.1442 & -0.1441 & -0.1442 \\ -0.0799 & -0.0799 & -0.1443 & -0.4160 & -0.1869 & -0.1871 \\ -0.0798 & -0.0798 & -0.1442 & -0.1867 & -0.4045 & -0.2324 \\ -0.0799 & -0.0799 & -0.1443 & -0.1873 & -0.2327 & -0.4627 \end{bmatrix}_{(6 \times 6)}$$

Ο αντίστοιχος πίνακας μήκους μονοπατιών που προκύπτει από τις απόλυτες τιμές του Πίνακα 6.11 και από την (6.5) είναι ο εξής:

Πίνακας 6.12: Πίνακας μήκους μονοπατιών λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος

$$[D_{real}] = \begin{bmatrix} 0 & 0.2265 & 0.1855 & 0.2911 & 0.4160 & 0.4045 & 0.4627 \\ 0.2265 & 0 & 0.2533 & 0.3586 & 0.4831 & 0.4716 & 0.5297 \\ 0.1855 & 0.2533 & 0 & 0.3176 & 0.4421 & 0.4306 & 0.4487 \\ 0.2911 & 0.3586 & 0.3176 & 0 & 0.4186 & 0.4072 & 0.4652 \\ 0.4160 & 0.4831 & 0.4421 & 0.4186 & 0 & 0.4469 & 0.5044 \\ 0.4045 & 0.4716 & 0.4306 & 0.4072 & 0.4469 & 0 & 0.4022 \\ 0.4627 & 0.5297 & 0.4487 & 0.4652 & 0.5044 & 0.4022 & 0 \end{bmatrix}_{(7 \times 7)}$$

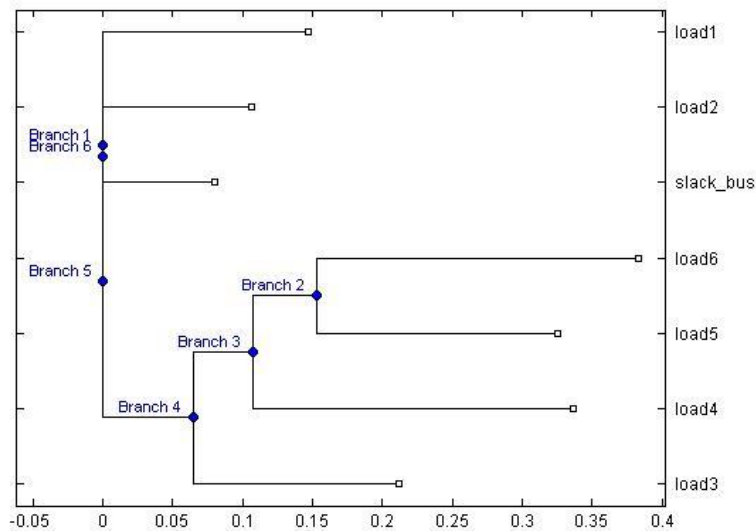
και σε μορφή PHYLIP:

7							
slack_bus							
0	0.2265	0.1855	0.2911	0.4160	0.4045	0.4627	
load1	0.2265	0	0.2533	0.3586	0.4831	0.4716	0.5297
load2	0.1855	0.2533	0	0.3176	0.4421	0.4306	0.4887
load3	0.2911	0.3586	0.3176	0	0.4186	0.4072	0.4652
load4	0.4160	0.4831	0.4421	0.4186	0	0.4469	0.5044
load5	0.4045	0.4716	0.4306	0.4072	0.4469	0	0.4022
load6	0.4627	0.5297	0.4887	0.4652	0.5044	0.4022	0

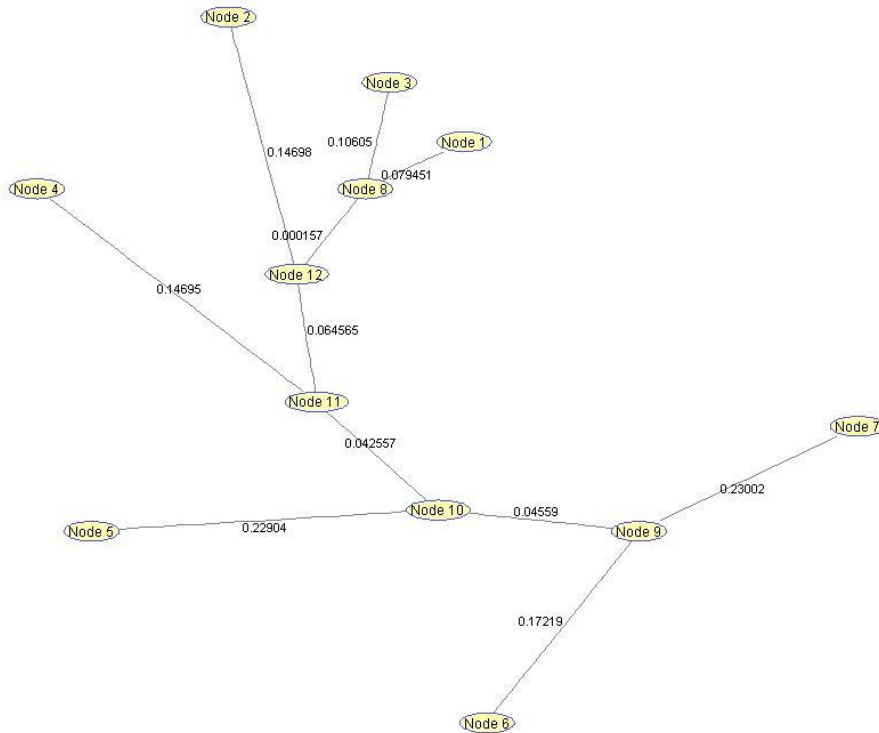
Το string δέντρου που προκύπτει από τον αλγόριθμο BIONJ είναι το εξής:

`((load1:0.146979,(load2:0.106049,slack_bus:0.079451):0.000157,(((load6:0.230015,load5:0.172185):0.045590,load4:0.229041):0.042557,load3:0.146947):0.064565));`

Ακολουθως, παρατίθενται η αναπαράσταση του δέντρου σε μορφή φυλογενετικού δέντρου, και σε μορφή ακτινικού δικτύου διανομής:



Εικόνα 6.8: Αναπαράσταση ευρισκόμενης τοπολογίας σε μορφή φυλογενετικού δέντρου από τον αλγόριθμο BIONJ για πίνακα ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού



Εικόνα 6.9:Ευρισκόμενη τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης,με τις συνολικές αντιστάσεις των γραμμών

Ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος που προκύπτει είναι ο εξής:

Πίνακας 6.13:Πειραματικός πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος

$$[S_{Q-real}] = \begin{bmatrix} -0.0321 & -0.0233 & -0.0234 & -0.0235 & -0.0234 & -0.0235 \\ -0.0232 & -0.0295 & -0.0233 & -0.0231 & -0.0233 & -0.0232 \\ -0.0234 & -0.0233 & -0.0511 & -0.0419 & -0.0422 & -0.0420 \\ -0.0235 & -0.0235 & -0.0425 & -0.0874 & -0.0549 & -0.0549 \\ -0.0235 & -0.0236 & -0.0423 & -0.0554 & -0.0787 & -0.0687 \\ -0.0236 & -0.0235 & -0.0426 & -0.0548 & -0.0684 & -0.0821 \end{bmatrix}_{(6 \times 6)}$$

Ο αντίστοιχος πίνακας μήκους μονοπατιών που προκύπτει από τις απόλυτες τιμές του Πίνακα 6.13 και την (6.5)είναι ο εξής:

Πίνακας 6.14:Πίνακας μήκους μονοπατιών λόγω μεταβολών αέργου ισχύος

$$[D_{reactive}] = \begin{bmatrix} 0 & 0.0321 & 0.0295 & 0.0511 & 0.0874 & 0.0787 & 0.0821 \\ 0.0321 & 0 & 0.0151 & 0.0365 & 0.0725 & 0.0639 & 0.0672 \\ 0.0295 & 0.0151 & 0 & 0.0340 & 0.0703 & 0.0614 & 0.0649 \\ 0.0511 & 0.0365 & 0.0340 & 0 & 0.0541 & 0.0452 & 0.0486 \\ 0.0874 & 0.0725 & 0.0703 & 0.0541 & 0 & 0.0577 & 0.0599 \\ 0.0787 & 0.0639 & 0.0614 & 0.0452 & 0.0557 & 0 & 0.0237 \\ 0.0821 & 0.0672 & 0.0649 & 0.0486 & 0.0599 & 0.0237 & 0 \end{bmatrix}_{(7 \times 7)}$$

και σε μορφή PHYLIP:

```

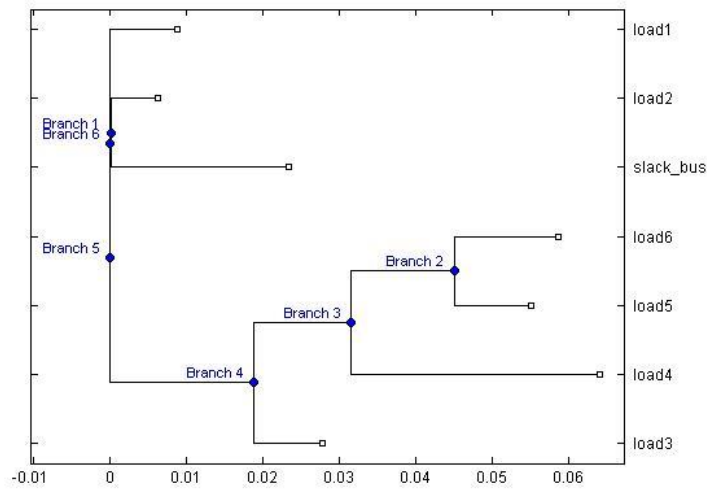
7
slack_bus
0 0.0321 0.0295 0.0511 0.0874 0.0787 0.0821
load1
0.0321 0 0.0151 0.0365 0.0725 0.0639 0.0672
load2
0.0295 0.0151 0 0.0340 0.0703 0.0614 0.0649
load3
0.0511 0.0365 0.0340 0 0.0541 0.0452 0.0486
load4
0.0874 0.0725 0.0703 0.0541 0 0.0557 0.0599
load5
0.0787 0.0639 0.0614 0.0452 0.0557 0 0.0237
load6
0.0821 0.0672 0.0649 0.0486 0.0599 0.0237 0

```

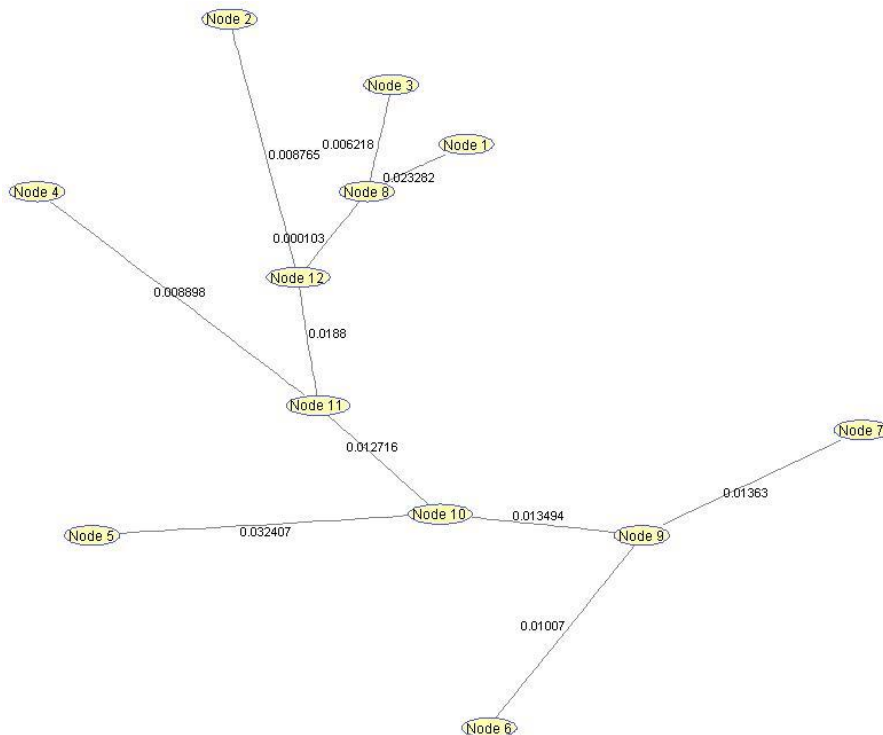
Το string δέντρου που προκύπτει από τον αλγόριθμο BIONJ είναι το εξής:

(load1:0.008765,(load2:0.006218,slack_bus:0.023282):0.000103,(((load6:0.013630,load5:0.010070):0.013494,load4:0.032407):0.012716,load3:0.008898):0.018800);

Ακολούθως, παρατίθενται η αναπαράσταση του δέντρου σε μορφή φυλογενετικού δέντρου, και σε μορφή ακτινικού δικτύου διανομής:



Εικόνα 6.10: Αναπαράσταση ευρισκόμενης τοπολογίας σε μορφή φυλογενετικού δέντρου από τον αλγόριθμο BIONJ για πίνακα ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου



Εικόνα 6.11:Ευρισκόμενη τοπολογία δικτύου Χαμηλής Τάσης,με τις συνολικές επαγωγικές αντιδράσεις των γραμμών

Αν εφαρμοστεί στην ευρισκόμενη τοπολογία η ίδια ροή φορτίου από την οποία ελήφθησαν οι πειραματικές μετρήσεις, με δεδομένες πλέον τις συνολικές αντιστάσεις κι επαγωγικές αντιδράσεις των γραμμών, οι τιμές των μεταβολών των τάσεων στους ζυγούς φορτίου που προκύπτουν, για τα επιλεγμένα στιγμιότυπα, είναι οι εξής:

$$[\Delta V_{matrix_{found}}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} -0.0266 & -0.0313 & -0.0171 & -0.2014 & -0.0872 & -0.1796 \\ -0.0716 & -0.0377 & -0.0376 & -0.2517 & -0.1616 & -0.1766 \\ -0.1619 & -0.1264 & -0.2623 & -0.3771 & -0.3840 & -0.4540 \\ -0.0555 & -0.0919 & -0.0950 & -0.3272 & -0.1934 & -0.3249 \\ -0.1011 & -0.0368 & -0.2215 & -0.3824 & -0.3547 & -0.2487 \\ -0.1035 & -0.0546 & -0.1439 & -0.3053 & -0.2628 & -0.1064 \\ -0.0414 & -0.0120 & -0.0340 & -0.1465 & -0.2072 & -0.2209 \\ -0.0182 & -0.0650 & -0.0376 & -0.2498 & -0.1650 & -0.2487 \\ -0.1182 & -0.1326 & -0.1971 & -0.2583 & -0.3913 & -0.4268 \\ -0.0766 & -0.1280 & -0.1159 & -0.3395 & -0.2959 & -0.2979 \\ -0.2195 & -0.2003 & -0.3524 & -0.3410 & -0.4958 & -0.5037 \\ -0.1341 & -0.0584 & -0.1024 & -0.2560 & -0.1644 & -0.2784 \end{bmatrix} (12 \times 6)$$

Ακολούθως παρουσιάζεται ο πίνακας των σφαλμάτων (%) των μεταβολών τάσης μεταξύ πραγματικών μετρήσεων και των μετρήσεων που προκύπτουν από την ίδια ροή φορτίου στην ευρισκόμενη τοπολογία:

Πίνακας 6.15: Πίνακας σφαλμάτων μεταξύ πραγματικών τάσεων και τάσεων από την ροή φορτίου στην ευρισκόμενη τοπολογία

$$[error_{found}] = \begin{bmatrix} 4.4746 & 4.9940 & 4.6378 & 4.5508 & 4.6063 & 4.6048 \\ 4.8702 & 4.7310 & 4.5493 & 4.4152 & 4.4870 & 4.5177 \\ -4.6209 & -4.4178 & -4.4373 & -4.4285 & -4.3843 & -3.5501 \\ -4.5722 & -4.9441 & -4.6277 & -4.4495 & -4.2072 & -4.4494 \\ -4.7482 & -4.3636 & -4.6502 & -4.3569 & -4.4065 & -4.4308 \\ 4.7509 & 3.6832 & 4.7698 & 4.6139 & 4.3603 & 4.4234 \\ -4.7771 & -4.7105 & -4.6381 & -4.5449 & -4.3483 & -4.3177 \\ -5.0061 & -5.0433 & -5.0513 & 4.7665 & 5.0241 & 5.0789 \\ 4.5933 & 4.8090 & 4.6925 & 4.5330 & 4.5399 & 4.4865 \\ 4.9755 & 4.6525 & 3.8378 & 4.3141 & 4.5795 & 4.5612 \\ 5.0341 & 4.8146 & 3.3853 & 4.5975 & 4.6864 & 4.7963 \\ -4.8181 & -3.5923 & -4.4368 & 8.6430 & -4.6493 & -4.5751 \end{bmatrix}_{(12 \times 6)}$$

Παρατηρείται ότι το μέγιστο σφάλμα κατ' απόλυτη τιμή είναι 8.6430 %, επομένως, βιώνεται ότι η ευρισκόμενη τοπολογία προσεγγίζει, ικανοποιητικά, την πραγματική. Τα σφάλματα, στο σύνολό τους, μπορεί να οφείλονται σε μη κατάλληλη επιλογή στιγμιοτύπων, σε προσεγγίσεις της μεθόδου καθώς και σε προσεγγίσεις του ίδιου του αλγορίθμου.

Με οπτική παρατήρηση της Εικόνας 6.11 παρατηρείται ότι η συνολική αντίσταση μεταξύ των κόμβων 8 και 12 είναι πολύ μικρή, συγκεκριμένα $0.000157 \mu\Omega$. Έτσι, για το συνολικό μήκος της γραμμής, που είναι άγνωστο, η συνολική αντίσταση θα είναι $:0.000157 \cdot Z_b = 2.512 \cdot 10^{-5} \Omega$, που είναι πάρα πολύ μικρή. Άρα, συμπεραίνεται ότι οι κόμβοι 8 και 12 είναι μεταξύ τους βραχυκυκλωμένοι, και άρα στην πραγματική τοπολογία δεν υπάρχει τμήμα που να αντιστοιχεί στην γραμμή μεταξύ των 8 και 12. Επομένως, στην πραγματικότητα, οι ζυγοί φορτίων 2 και 3 θα συνδέονται στον ίδιο κόμβο δικτύου.

6.6: Συμπεράσματα

Η μέθοδος αυτή απαιτεί τον υπολογισμό τόσο του πίνακα ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος όσο και του πίνακα ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου. Άρα, για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, απαιτούνται δεδομένα μετρήσεων για ενεργό και άεργο ισχύ στους ζυγούς φορτίου. Με βάση τα αποτελέσματα των ανωτέρω παραδειγμάτων από αυτή την μέθοδο, μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά η πραγματική τοπολογία του δικτύου διανομής που εξετάζεται, χωρίς όμως να υπολογίζονται τα μήκη των γραμμών καθώς και το πλήθος των πυλώνων-ενδιάμεσων κόμβων του δικτύου. Παρόλα αυτά, υπολογίζονται οι συνολικές αντιστάσεις και αντιδράσεις των γραμμών. Έτσι, για κάθε τμήμα του δικτύου, αν επιλεγθεί κάποιο συγκεκριμένο είδος γραμμής, μπορεί να υπολογιστεί και το μήκος του αντίστοιχου τμήματος.

[11] [13] [22] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44]

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Όπως προέκυψε από την ανάλυση στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο υπολογισμός του πίνακα ευαισθησίας με χρήση δεδομένων έξυπνων μετρητών είναι μία αξιόπιστη μέθοδος υπολογισμού των όρων ευαισθησίας στα Δίκτυα Διανομής, και ειδικότερα στα δίκτυα Χαμηλής Τάσης, στα οποία συνήθως η τοπολογία του δικτύου είναι άγνωστη. Ο πειραματικός πίνακας ευαισθησίας, σε αντίθεση με τον πίνακα ευαισθησίας που προκύπτει από την μέθοδο Jacobian, καθώς και με τον πίνακα ευαισθησίας που προκύπτει για δεδομένη τοπολογία δικτύου, δεν απαιτεί τη γνώση της τοπολογίας του δικτύου. Ακόμη, ένα πλεονέκτημα του πειραματικού πίνακα ευαισθησίας έναντι του αντίστοιχου που προκύπτει από τη μέθοδο Jacobian, είναι ότι, για δεδομένα στιγμιότυπα μετρήσεων, στα οποία παρατηρούνται μεταβολές των φορτίων, ο πειραματικός πίνακας ευαισθησίας υπολογίζεται μόνο μία φορά, ενώ ο πίνακας ευαισθησίας από τον Jacobian πρέπει να υπολογίζεται εκ νέου σε κάθε στιγμιότυπο από τη ροή φορτίου. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι τα σφάλματα του πειραματικού πίνακα ευαισθησίας ως προς τον πίνακα που προκύπτει από τη μέθοδο δεδομένης τοπολογίας είναι σχετικά μικρά, άρα θεωρείται ότι και ο πειραματικός πίνακας ευαισθησίας περιέχει την πληροφορία σχετικά με την τοπολογία του δικτύου.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι ο πίνακας ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος που προκύπτει από στιγμιότυπα στα οποία η άεργος ισχύς στους ζυγούς φορτίου δεν μεταβάλλεται, παρουσιάζει πολύ μικρή απόκλιση συγκριτικά με τον αντίστοιχο πίνακα ευαισθησίας που προκύπτει από στιγμιότυπα στα οποία υπάρχουν μεταβολές ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου. Επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ισοδύναμα ο πίνακας ευαισθησίας που προκύπτει και από τα δύο είδη στιγμιότυπων στις διάφορες εφαρμογές.

Σύγκριση αλγορίθμων εύρεσης τοπολογίας

Τόσο ο αλγόριθμος εύρεσης τοπολογίας βάσει της ακολουθίας Prüfer, όσο και ο αλγόριθμος Neighbor joining χρησιμοποιούν ως δεδομένο τον πίνακα αποστάσεων μεταξύ των φύλλων/ζυγών φορτίου του δικτύου, ο οποίος προκύπτει από τον πειραματικό πίνακα ευαισθησίας.

Μία επιπλέον προϋπόθεση του αλγορίθμου εύρεσης τοπολογίας με βάση την ακολουθία Prüfer είναι ότι όλες οι ακμές του δέντρου που αναπαριστά το δίκτυο, είναι μεταξύ τους ίσες. Ως αποτέλεσμα, είναι χρήσιμος στην εύρεση τοπολογιών δικτύων που έχουν ίδια μήκη γραμμών και ίδια είδη εναέριων γραμμών και γραμμών καταναλωτών, έτσι ώστε οι ακμές του δέντρου να είναι μεταξύ τους ίσες (έπειτα από τις προσεγγίσεις προκύπτουν όλες ίσες και συμβολίζονται με 1). Βάσει αυτής της προϋπόθεσης, και για τις 4 υποθέσεις δεδομένων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5, αρκεί μόνο ο πειραματικός υπολογισμός του πίνακα ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος, για τον πλήρη προσδιορισμό της τοπολογίας. Άρα, για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, απαιτούνται δεδομένα μετρήσεων μόνο για ενεργό ισχύ στους ζυγούς φορτίου. Έτσι, σε κάθε υπόθεση δεδομένων, από τις αντιστάσεις των γραμμών υπολογίζονται οι αντίστοιχες επαγωγικές αντιδράσεις, καθώς τα είδη των γραμμών που

χρησιμοποιούνται είναι τυποποιημένα.Ωστόσο,για δίκτυα που δεν τηρούν αυτή την προϋπόθεση,είναι αδύνατος ο προσδιορισμός της τοπολογίας με χρήση αυτής της μεθόδου.Επομένως,η μέθοδος αυτή είναι ικανή να προσδιορίσει τοπολογίες Δικτύων Διανομής με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Ο αλγόριθμος Neighbor joining δεν απαιτεί κάποιο άλλο δεδομένο,όπως τα μήκη και είδη των γραμμών, πέρα από τον πίνακα μήκους μονοπατιών.Ωστόσο,η μέθοδος εύρεσης τοπολογίας βάσει του NJ,απαιτεί δύο πίνακες μήκους μονοπατιών,ο ένας εκ των οποίων θα αντιστοιχεί στις αντιστάσεις των γραμμών και θα προκύπτει από τον πίνακα ευαισθησίας λόγω μεταβολών ενεργού ισχύος ,και ο άλλος θα αντιστοιχεί στις επαγωγικές αντιδράσεις των γραμμών και θα προκύπτει από τον πίνακα ευαισθησίας λόγω μεταβολών αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου. Από τους δυο πίνακες,όπως είναι αναμενόμενο,προκύπτει η ίδια τοπολογία.Άρα,για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, απαιτούνται δεδομένα μετρήσεων για ενεργό και άεργο ισχύ στους ζυγούς φορτίου.Με βάση τα αποτελέσματα των ανωτέρω παραδειγμάτων από αυτή την μέθοδο,μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά η πραγματική τοπολογία του δικτύου διανομής που εξετάζεται,χωρίς όμως να υπολογίζονται τα μήκη των γραμμών καθώς και το πλήθος των πυλώνων-ενδιάμεσων κόμβων του δικτύου.Παρόλα αυτά,υπολογίζονται οι συνολικές αντιστάσεις και αντιδράσεις των γραμμών.Έτσι,για κάθε τμήμα του δικτύου,αν επιλεγθεί κάποιο συγκεκριμένο τυποποιημένο είδος γραμμής, μπορεί να υπολογιστεί και το μήκος του αντίστοιχου τμήματος και κατ'επέκτασιν ,το πλήθος των πυλώνων/ενδιάμεσων κόμβων του δικτύου.

Από τα παραπάνω,συνάγεται ότι η μέθοδος εύρεσης τοπολογίας που βασίζεται στον αλγόριθμο Neighbor joining μπορεί να προσδιορίσει από τον πίνακα ευαισθησίας μεγαλύτερο εύρος τοπολογιών Δικτύων Διανομής,ανεξαρτητως επιπρόσθετων δεδομένων που απαιτεί η μέθοδος που στηρίζεται στην ακολουθία Prufer.

Επιπρόσθετα,χάρη στη χρησιμότητα του πίνακα ευαισθησίας που προκύπτει χρησιμοποιώντας δεδομένα τάσης,ενεργού και αέργου ισχύος,κρίνεται σκόπιμη η μέτρηση τάσης,ενεργού και αέργου ισχύος από τους έξυπνους μετρητές,παρά το επιπλέον κόστος.

Προτεινόμενα θέματα

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχτηκαν τα παρακάτω θέματα τα οποία είναι σκόπιμο να διερευνηθούν μελλοντικά:

- Στην παρούσα διπλωματική τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται λαμβάνονται από προσομοίωση ροής φορτίου στο MATPOWER.Επομένως,προτείνεται η χρησιμοποίηση πραγματικών δεδομένων έξυπνων μετρητών και η εφαρμογή των μεθόδων εύρεσης τοπολογίας σε πραγματικά δίκτυα ΧΤ.
- Από το σύνολο των δεδομένων που λαμβάνονται από τους έξυπνους μετρητές για τους αντίστοιχους χρήστες δικτύων,δεν είναι γνωστό ποια είναι τα κατάλληλα στιγμιότυπα που πρέπει να επιλεγθούν ώστε να υπολογιστεί ο σωστός πίνακας ευαισθησίας,που θα οδηγήσει με τη σειρά του στην εύρεση της πραγματικής τοπολογίας.Έτσι,για διαφορετικές ομάδες

στιγμιοτύπων,είναι πιθανό να προκύπτουν διαφορετικοί μεταξύ τους πίνακες ευαισθησίας,που θα οδηγούν στην εύρεση διαφορετικών τοπολογιών.Ως αποτέλεσμα,θα ήταν χρήσιμη η κατασκευή μοντέλου επιλογής των κατάλληλων δεδομένων από το σύνολο των στιγμιοτύπων μέτρησης που λαμβάνονται από τους έξυπνους μετρητές για την εύρεση της πραγματικής τοπολογίας.

- Τα δίκτυα ΧΤ είναι συνήθως τριφασικά ασύμμετρα. Προτείνεται η μελέτη της επίδρασης της κάθε φάσης ενός τριφασικού ασύμμετρου δικτύου ως προς τις υπόλοιπες,μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας.
- Μία ακόμη πιθανή εφαρμογή από τον υπολογισμό του πίνακα ευαισθησίας χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα έξυπνων μετρητών είναι ο εντοπισμός ρευματοκλοπών στο δίκτυο.

Βιβλιογραφία

- [1] European Technology Platform of Smart Grids
- [2] <http://energy.gov/oe/services/technology-development/smart-grid>
- [3] Kelvin Ross, «Greece gets smart meter rollout», Power Engineering International
- [4] [C&I smart meters for Greece from EDM I | Metering.com](#)
- [5] <https://www.eonenergy.com/for-your-home/smart-meters/data>
- [6] <https://www.eonenergy.com/for-your-home/smart-meters/what-is-a-smart-meter>
- [7] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, «Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας», Τόμος Ι, έκδοση ΕΜΠ, 1994
- [8] Ειρήνη Λεωνιδάκη, «Δομή και ανάπτυξη του δικτύου», Απρίλιος 2010
- [9] Κ.Βουρνάς, Γ.Κονταξής «Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 2010
- [10] «The Electrical Grid», [EnergyGroove.net](#)
- [11] Stavros Papathanassiou, Nikos Hatziargyriou, Kai Strunz, «A Benchmark Low Voltage Microgrid», Presented at the CIGRE Symposium “Power systems with dispersed generation: technologies, impacts on development, operation and performances”, April 2005, Athens, Greece
- [12] Fabian Tamp and Phil Ciufo «A sensitivity analysis toolkit for the simplification of MV Distribution Voltage Management», IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 2, March 2014
- [13] Morris Brenna, Ettore De Berardinis, Luca Delli Carpini, Federica Foadelli, Pietro Paulon, Paola Petroni, Gianluca Sapienza, Giorgio Scrosati, Dario Zaninelli « Automatic Distributed Voltage Control Algorithm in Smart Grids Applications », IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 2, June 2013
- [14] Sam Weckx, Reinhilde D’Hulst, and Johan Driesen «Voltage Sensitivity Analysis of a Laboratory Distribution Grid with Incomplete Data», IEEE Transactions on Smart Grid
- [15] Dheeraj Kumar Khatod, Vinay Pant, and Jaydev Sharma «A novel approach for sensitivity calculations in the radial distribution system», IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 21, No. 4, October 2006
- [16] Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sanchez «Matpower 5.1 User's Manual», March 20, 2015
- [17] Gianluca Sapienza «Voltage Control in MV Networks with high DG presence using a Real-Time Digital Simulator », Ph.D. Thesis
- [18] *Sniedovich, M.* «Dijkstra's algorithm revisited: the dynamic programming connexion», 2006

- [19] Στάθης Ζάχος, Άρης Παγουρτζής, Δημήτρης Φωτάκης « Εισαγωγή στην Επιστήμη των Υπολογιστών -6^η ενότητα:Γράφοι:Προβλήματα και Αλγόριθμοι», Διαφάνειες μαθήματος, ΕΜΠ
- [20] Konstantina Christakou, Jean-Yves Le Boudec, Mario Paolone, Dan-Cristian Tomozei , «Efficient Computation of Sensitivity Coefficients of Node Voltages and Line Currents in Unbalanced Electrical Networks»
- [21] S. Conti, S. Raiti, and G. Vagliasindi, «Voltage sensitivity analysis in radial MV distribution networks using constant current models», Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on IEEE, 2010, pp. 2548–2554.
- [22] Mudathir F. Akorede, Hashim Hizam «Teaching Power System Analysis Courses using MATPOWER», (ICEED 2009), December 7-8, 2009, Kuala Lumpur, Malaysia
- [23] Vanniarajan Chellappan, Kamala Krithivasan, «Network (tree) topology inference based on Prüfer sequence »
- [24] Bang Ye Wu and Kun-Mao Chao «Spanning Trees and Optimization Problems », CHAPMAN & HALL/CRC, 2004
- [25] Bo Li, Jingsha He and Henghua Shi, «Improving the Efficiency of Network Topology Discovery», The 3rd International Conference on Grid and Pervasive Computing – Workshops
- [26] J.A. Bondy and U.S.R. Murty, « Graph Theory with Applications», Department of Combinatorics and Optimization, University of Waterloo, Ontario, Canada, 1976
- [27] https://proofwiki.org/wiki/Pr%C3%BCfer_Sequence_from_Labeled_Tree
- [28] https://proofwiki.org/wiki/Labeled_Tree_from_Pr%C3%BCfer_Sequence
- [29] <http://mathworld.wolfram.com/PrueferCode.html>
- [30] Mona Singh «Phylogenetics», COS551, Fall 2003
- [31] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/Class/NAWBIS/Modules/Phylogenetics/phylo9.html>
- [32] http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/article/phylogenetics_02
- [33] Naruya Saitou and Masatoshi Nei « The Neighbor-joining Method: A New Method for Reconstructing Phylogenetic Trees», Molecular Biology and Evolution, vol. 4, no. 4, pp. 406–425, 1987.
- [34] Olivier Gascuel and Mike Steel, «Neighbor-Joining Revealed», September 2012
- [35] Piotr Płoński, Jan P. Radomski «Neighbor Joining Plus - algorithm for phylogenetic tree reconstruction with proper nodes assignment », 2013
- [36] Kenneth D. Bailey «Numerical Taxonomy and Cluster Analysis», Typologies and Taxonomies (1994)

[37] <http://nlp.stanford.edu/IR-book/html/htmledition/hierarchical-agglomerative-clustering-1.html>

[38] Oded Maimon , Lior Rokach,«*Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*»,Springer,2010

[39] <http://www.atgc-montpellier.fr/bionj/download.php>

[40] <http://evolution.genetics.washington.edu/phylip.html>

[41]Olivier Gascuel, «BIONJ: an improved version of the NJ algorithm based on a simple model of sequence data. », Montpellier

[42] Olivier Gascuel, «Concerning the NJ algorithm and its unweighted version, UNJ. », Montpellier

[43] Olivier Gascuel, «Data model and classification by trees: the minimum variance reduction (MVR) method.», Montpellier

[44] Olivier Gascuel, «On the optimization principle in phylogenetic analysis and the minimum evolution criterion.», Montpellier

Παράρτημα-Κώδικας σε MATLAB

Αλγόριθμος εύρεσης τοπολογίας Prüfer

```
function
[bg_found,N_found,ni,nf,Distance_found,k1_found,k2_found]=Prufer_Topology_Dis
covery(D,Loads_slack,N,length)

R=cell(1,1);
R{1,1}=1:Loads_slack;

remaining_nodes=R{1,1};

P=cell(1,1);
S=cell(1,1);

D_k_neighbor_m=zeros(N,N);
D_no_k=zeros(N,N);
D_with_m=zeros(N,N);

%% path length matrix restriction

find_ones=find(D(:,:)==1);
size_fones=size(find_ones,1);
if (size_fones~=0)
    bg_found='error';
    N_found='error';
    ni='error';
    nf='error';
    Distance_found='error';
    k1_found='error';
    k2_found='error';
else
last_node_init=max(R{1,1});

k=min(R{1,1});
lowest_labels=k;
d=find(D(k,:)==1);
d1=ismember(d,P{1,1});
condition=isempty(d1);

if (condition~=1)% if k has a neighbor in P
    Pi=d;% say Pi
    m=Pi;
    P{1,1}=[P{1,1} m];% Append m to Prufer sequence P

    %%Remove k from path matrix
    R{1,1}=R{1,1}(R{1,1}~=k);
    remaining_nodes=remaining_nodes(remaining_nodes~=k);
    D_no_k=D(R{1,1},R{1,1});

    D_new=D_no_k;
    last_node=last_node_init;
```

```

else
    last_node=last_node_init+1;% increment last_node
    m=last_node;

    %%Consider m as the neighbor of k
    D_k_neighbor_m(k,m)=1;
    D_k_neighbor_m(m,k)=1;
    D_k_neighbor_m(R{1,1},R{1,1})=D;

    P{1,1}=[P{1,1} m];% Append m to Prufer sequence P

    %%Remove k from path matrix
    R{1,1}=R{1,1} (R{1,1}~=k);
    remaining_nodes=remaining_nodes(remaining_nodes~=k);
    D_no_k(R{1,1},R{1,1})=D(R{1,1},R{1,1});

    %%Add m to the path matrix
    D_with_m=D_no_k;
    D_with_m(m,R{1,1})=D(k,R{1,1})-1;
    D_with_m(R{1,1},m)=D(R{1,1},k)-1;
    D_with_m(m,m)=0;

    S{1,1}=[S{1,1} m];%Append m to S

    remaining_nodes=[R{1,1} m];

    D_new=D_with_m(remaining_nodes,remaining_nodes);

end

for k=2:Loads_slack
    %k=min(R{1,1});
    lowest_labels=[lowest_labels k];
    d=find(D_with_m(k,:)==1);
    d1=ismember(d,P{1,1});
    condition=isempty(d1);

    if (condition~=1)% if k has a neighbor in P
        Pi=d;% say Pi
        m=Pi;
        P{1,1}=[P{1,1} m];% Append m to Prufer sequence P

        %%Remove k from path matrix
        R{1,1}=R{1,1} (R{1,1}~=k);
        remaining_nodes=remaining_nodes(remaining_nodes~=k);
        D_no_k=D_with_m(remaining_nodes,remaining_nodes);

        D_new=D_no_k;
        s1D=size(D_new,1);
        s2D=size(D_new,2);
    else
        last_node=last_node+1;% increment last_node
        m=last_node;
    end
end

```

```

%%Consider m as the neighbor of k
D_k_neighbor_m(k,m)=1;
D_k_neighbor_m(m,k)=1;

D_k_neighbor_m(remaining_nodes,remaining_nodes)=D_with_m(remaining_nodes,remaining_nodes);

P{1,1}=[P{1,1} m];%%Append m to Prufer sequence P

%%Remove k from path matrix
R{1,1}=R{1,1} (R{1,1}~=k);
remaining_nodes=remaining_nodes (remaining_nodes~=k);
D_no_k=D_with_m(remaining_nodes,remaining_nodes);

%%Add m to the path matrix

D_with_m(remaining_nodes,remaining_nodes)=D_no_k;
D_with_m(m,remaining_nodes)=D_with_m(k,remaining_nodes)-1;
D_with_m(remaining_nodes,m)=D_with_m(remaining_nodes,k)-1;
D_with_m(m,m)=0;

S{1,1}=unique(P{1,1});%%Append m to S

remaining_nodes=unique([remaining_nodes m]);

D_new=D_with_m(remaining_nodes,remaining_nodes)
s1D=size(D_new,1);
s2D=size(D_new,2);

end
end

%% Getleaves

S2{1,1}=S{1,1};
list=cell(1,1);
for i=[S2{1,1}]
    for j=[S2{1,1}]
        for w=[S2{1,1}]
            if(w~=i && w~=j && j~=i)
                if (D_with_m(i,j)==D_with_m(i,w)+D_with_m(w,j))
                    list{1,1}= [list{1,1} w];

                else
                    list{1,1}=list{1,1};
                end
            else
                t=0;
            end
        end
    end
end
end
end

```

```

intermediate_nodes=unique(list{1,1});
lf_nodes=find(~ismember(S{1,1},intermediate_nodes));
R_new=S2{1,1}(lf_nodes);
R{1,1}=unique([R{1,1} R_new]);

size_R=size(R{1,1},2);
s1D=size(D_new,1);
s2D=size(D_new,2);

while
(size_R~=2) || (D_new(1,2)~=1) || (D_new(2,1)~=1) || (D_new(1,1)~=0) || (D_new(2,2)~=
0) || (s1D~=2) || (s2D~=2)

    k=min(R{1,1});
    lowest_labels=[lowest_labels k];
    d=find(D_with_m(k,remaining_nodes)==1);
    d1=ismember(d,P{1,1});
    condition=isempty(d1);

    if (condition~=1)% if k has a neighbor in P
        Pi=remaining_nodes(d);% say Pi
        m=Pi;
        P{1,1}=[P{1,1} m];% Append m to Prufer sequence P

        %%Remove k from path matrix
        R{1,1}=R{1,1}(R{1,1}~=k);
        remaining_nodes=remaining_nodes(remaining_nodes~=k);
        D_no_k=D_with_m(remaining_nodes,remaining_nodes);

        D_new=D_no_k;
        s1D=size(D_new,1);
        s2D=size(D_new,2);
    else
        last_node=last_node+1;% increment last_node
        m=last_node;

        %%Consider m as the neighbor of k
        D_k_neighbor_m(k,m)=1;
        D_k_neighbor_m(m,k)=1;

D_k_neighbor_m(remaining_nodes,remaining_nodes)=D_with_m(remaining_nodes,rema
ining_nodes);

        P{1,1}=[P{1,1} m];%Append m to Prufer sequence P

        %%Remove k from path matrix
        R{1,1}=R{1,1}(R{1,1}~=k);
        remaining_nodes=remaining_nodes(remaining_nodes~=k);
        D_no_k=D_with_m(remaining_nodes,remaining_nodes);

        %%Add m to the path matrix

```



```

D_with_m(remaining_nodes,remaining_nodes)=D_no_k;
D_with_m(m,remaining_nodes)=D_with_m(k,remaining_nodes)-1;
D_with_m(remaining_nodes,m)=D_with_m(remaining_nodes,k)-1;
D_with_m(m,m)=0;

S{1,1}=unique(P{1,1});%Append m to S

remaining_nodes=unique([remaining_nodes m]);

D_new=D_with_m(remaining_nodes,remaining_nodes);
s1D=size(D_new,1);
s2D=size(D_new,2);

end
%% Getleaves

S2{1,1}=unique([S2{1,1} m]);
S2{1,1}=S2{1,1}(S2{1,1}~=k);
list=cell(1,1);
for i=[S2{1,1}]
    for j=[S2{1,1}]
        for w=[S2{1,1}]
            if(w~=i && w~=j && j~=i)
                if (D_with_m(i,j)==D_with_m(i,w)+D_with_m(w,j))
                    list{1,1}= [list{1,1} w];

                else
                    list{1,1}=list{1,1};
                end
            else
                t=0;
            end
        end
    end
end
end

intermediate_nodes=unique(list{1,1});
lf_nodes=find(~ismember(S2{1,1},intermediate_nodes));
R_new=S2{1,1}(lf_nodes);
R{1,1}=unique([R{1,1} R_new]);

size_R=size(R{1,1},2);
r=isempty(R{1,1});
s1D=size(D_new,1);
s2D=size(D_new,2);

end

%% Topology discovery(logical)-every edge is represented by 1

```

```

size_P=size(P{1,1},2);
N_found=size_P+2;

[ni,nf]=prufer_decod(P{1,1});%ni==fbus,nf=tbus
connectivity_matrix=sparse(ni,nf,ones,N_found,N_found);

Adj_found=full(connectivity_matrix);
leaves2=find(sum(Adj_found+Adj_found')==1);
all_nodes=1:N_found;
zb=find(~ismember(all_nodes,leaves2));
zd2_slack=all_nodes(zb);

%% Topology discovery(real distance)

leaves2=leaves2(leaves2~=1);
l_found=(ismember(ni,leaves2)+(ismember(nf,leaves2)));
k1_found=find(l_found==1);
k2_found=find(l_found==0);

Distance_found=zeros(N_found-1,1);
Distance_found(k1_found)=length;
Distance_found(k2_found)=length;

Tree_found=sparse(ni,nf,Distance_found,N_found,N_found);
Graph_found=full(Tree_found);
bg_found=view(biograph(Tree_found,[],'ShowArrows','off','ShowWeights','on','LayoutType','radial'));
for i=1:N_found
    bg_found.nodes(i).Shape = 'circle';
end
view(bg_found);

end

end

```

Αλγόριθμος αποκωδικοποίησης Prüfer

```

function [ni,nf]=prufer_decod(S)
n=length(S);
I=1:n+2;ni=zeros(n+1,1);nf=zeros(n+1,1);l=0;
while length(I)>2
for ii=1:length(I)
    if ~ismember(S,I(ii));
        l=l+1;
        ni(l)=I(ii);nf(l)=S(l); I(ii)=[];S(l)=[];
        break;
    end
end
end
ni(end)=I(1);nf(end)=I(2);
end

```