



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

## Επαναδιαμόρφωση Ηλεκτρικών Δικτύων Διανομής μέσω Διακοπών με Γενετικό Αλγόριθμο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Α. Τάταρης

Επιβλέπων : Πάυλος Σ. Γεωργιάκης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2011

Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα λευκή.



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

## Επαναδιαμόρφωση Ηλεκτρικών Δικτύων Διανομής μέσω Διακοπών με Γενετικό Αλγόριθμο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Α. Τάταρης

Επιβλέπων : Πάυλος Σ. Γεωργιλάκης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1<sup>η</sup> Μαρτίου 2011.

.....  
Πάυλος Γεωργιλάκης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

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

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

Αθήνα, Μάρτιος 2011

.....  
Δημήτριος Α. Τάταρης

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

Copyright © Δημήτριος Α. Τάταρης 2011.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

*Αφιερώνω αυτή την εργασία στους γονείς μου Αντώνιο, Λαμπρινή  
και στον αδερφό μου Ευστάθιο.*

Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα λευκή.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα Δίκτυα Διανομής (ΔΔ) ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν τις συνιστώσες των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με τη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα. Τα ΔΔ είναι συνέχεια του Δικτύου Μεταφοράς προς την κατεύθυνση της κατανάλωσης και περιλαμβάνουν ένα σύνολο από εναέριες και υπόγειες γραμμές, καθώς και τους υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάζεται κυρίως η επαναδιαμόρφωση βροχοειδών, ατρακτοειδών, ή συνδυασμό των δύο, υπόγειων καλωδιακών ΔΔ μέσης τάσης, όσον αφορά τον ανασχηματισμό των ακτινικών δικτύων λειτουργίας τους, μέσω χειρισμών των διακοπών, υπό κανονικές συνθήκες. Ο ανασχηματισμός αυτός συμβάλει στην ελαχιστοποίηση των ωμικών απωλειών, οι οποίες εξαρτώνται από το μέγεθος των φορτίων. Οι τιμές των φορτίων που λαμβάνονται στους υπολογισμούς μπορεί να είναι μηνιαίες προβλέψεις των φορτίων αιχμής.

Το πρόβλημα της Επαναδιαμόρφωσης ΔΔ μέσω Διακοπών ανήκει στην κατηγορία προβλημάτων βελτιστοποίησης, ακέραιου, γραμμικού ή μη γραμμικού προγραμματισμού. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται στην εργασία αυτή με τη βοήθεια του Γενετικού Αλγορίθμου (ΓΑ). Ειδικότερα, όλα τα εφικτά και μη, ακτινικά δίκτυα λειτουργίας περιγράφονται από δυαδικές συμβολοσειρές τις οποίες καλείται ο ΓΑ να επεξεργαστεί και να αξιολογήσει. Ο υπολογισμός των ωμικών απωλειών ενός ακτινικού δικτύου λειτουργίας εξαρτάται από το είδος των φορτίων. Αν πρόκειται για φορτία σταθερής έντασης τότε ο υπολογισμός αυτός περιλαμβάνει το σχηματισμό του πίνακα πρόσπτωσης, ενώ για φορτία σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος ο υπολογισμός των ωμικών απωλειών περιλαμβάνει την επίλυση του προβλήματος ροών φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson. Το βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας, δηλαδή το δίκτυο με τις ελάχιστες ωμικές απώλειες, προκύπτει από το ΓΑ, κατόπιν δοκιμών των παραμέτρων του.

Στα πλαίσια της εργασίας αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον MATLAB για την επίλυση του προβλήματος Επαναδιαμόρφωσης των ΔΔ με ΓΑ.

### Λέξεις κλειδιά:

Δίκτυο διανομής, υπόγειο καλωδιακό δίκτυο, βροχοειδές δίκτυο, ακτινικό δίκτυο λειτουργίας, υποσταθμοί τροφοδοσίας, φορτία σταθερής έντασης, φορτία σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος, ωμικές απώλειες, δυαδική συμβολοσειρά, γενετικός αλγόριθμος, αντικειμενική συνάρτηση, ποινή, αναπαραγωγή, διασταύρωση, μετάλλαξη, ελιτισμός.

Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα λευκή.



# ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORK RECONFIGURATION VIA SWITCHES WITH GENETIC ALGORITHM

## ABSTRACT

The electrical energy Distribution Networks (DNs) constitute the components of Electrical Energy Systems with the bigger complexity. The DNs are a continuation of the Transmission Networks to the direction of power consumption and include a set of overhead and underground lines, as well as voltage step-down substations. In the present Dissertation is examined mainly the reconfiguration of loop, bobbin-shaped, or combination of two, underground cable medium voltage DNs, with regard to the reconfiguration of radial operated networks, via handlings of switches, under normal operating conditions. This reconfiguration contributes to the minimization of ohmic losses, which depend on the size of loads. The values of loads that are involved in the calculations can be monthly forecasts of peak-loads.

The problem of DNs Reconfiguration via Switches belongs to the category of optimization, integer, linear or not linear programming. This problem is solved using Genetic Algorithm (GA). More specifically, all the feasible and infeasible radial operated networks are coded by binary strings that the GA evaluates. The calculation of ohmic losses of a radial operated network depends on the type of loads. In case of constant current loads, this calculation includes the shaping of incidence matrix, while for constant power and constant power factor loads, the calculation of ohmic losses includes the solution of power flow problem using the Newton-Raphson method. The optimal radial operated network, that is to say the network with the minimal ohmic losses, results from the GA, by appropriately configuring its parameters.

In the context of the current Dissertation, software was developed under MATLAB environment for the solution of the DNs Reconfiguration problem using GA.

### **Key words:**

Distribution network, underground cable network, loop network, radial operated network, feeders, constant current loads, constant power and constant power factor loads, ohmic losses, binary string, genetic algorithm, objective function, penalty, reproduction, crossover, mutation, elitism.

Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα λευκή.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>Ο</sup>

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Περιοχή έρευνας – Αντικείμενο εργασίας.....	13
1.2	Επαναδιαμόρφωση Δικτύων Διανομής.....	15
1.3	Ανασκόπηση βιβλιογραφίας.....	16
1.4	Δομή της εργασίας.....	18
1.5	Βιβλιογραφία.....	19

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>Ο</sup>

### ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

2.1	Γενικά.....	21
2.2	Εξοπλισμός Δικτύων Διανομής.....	21
2.3	Τοπολογία – Λειτουργία Δικτύων Διανομής ΜΤ.....	23
2.4	Τοπολογία – Λειτουργία Δικτύων Διανομής ΧΤ.....	27
2.5	Το δίκτυο ως γράφημα.....	29
2.6	Υπολογισμός απωλειών Δικτύου Διανομής.....	34
	2.6.1 <i>Είδη φορτίων</i> .....	34
	2.6.2 <i>Δίκτυο με φορτία σταθερής έντασης</i> .....	35
	2.6.3 <i>Δίκτυο με μικτά φορτία σταθερής ισχύος και σταθερής σύνθετης αντίστασης</i> .....	36
2.7	Βιβλιογραφία.....	42

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>Ο</sup>

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ – ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

3.1	Γενικά.....	43
3.2	Η θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών.....	44
3.3	Κύρια χαρακτηριστικά Γενετικού Αλγορίθμου.....	45
3.4	Βασικά στοιχεία Γενετικού Αλγορίθμου.....	46
	3.4.1 <i>Κωδικοποίηση – Αντικειμενική συνάρτηση</i> .....	47
	3.4.2 <i>Δομή Γενετικού Αλγορίθμου</i> .....	47
3.5	Ενσωμάτωση των περιορισμών.....	52
3.6	Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων.....	52
3.7	Βιβλιογραφία.....	53

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>**

### **ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

4.1	Γενικά.....	55
4.2	Δεδομένα Εισόδου.....	55
4.3	Κύριο πρόγραμμα Γενετικού Αλγορίθμου.....	57
4.4	Συνάρτηση υποπρογράμματος υπολογισμού τιμών αντικειμενικής συνάρτησης.....	60
4.4.1	Σκοπός.....	60
4.4.2	Κύριο τμήμα υποπρογράμματος.....	60
4.4.3	Τμήμα υποπρογράμματος υπολογισμού ωμικών απωλειών για φορτία σταθερής έντασης.....	64
4.4.4	Τμήμα υποπρογράμματος υπολογισμού ωμικών απωλειών για φορτία σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος.....	66
4.5	Βιβλιογραφία.....	68

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>**

### **ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

5.1	Υλοποίηση.....	69
5.2	Περιπτώσεις βροχοειδούς δικτύου φορτίων σταθερής έντασης.....	69
5.3	Περιπτώσεις βροχοειδών δικτύων φορτίων σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος.....	75
5.3.1	Πρότυπο δίκτυο 10 κόμβων και 13 κλάδων.....	75
5.3.2	Πρότυπο δίκτυο 16 κόμβων και 16 κλάδων.....	79
5.3.3	Πρότυπο δίκτυο 33 κόμβων και 37 κλάδων.....	83
5.3.4	Πρότυπο δίκτυο 44 κόμβων και 47 κλάδων.....	90
5.4	Βιβλιογραφία.....	99

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ**

6.1	Σύνοψη και συμπεράσματα της εργασίας.....	101
6.2	Επεκτάσεις της εργασίας.....	105

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο εξοπλισμού, που αποτελείται από σταθμούς παραγωγής, υποσταθμούς ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης, εναέριες και υπόγειες γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός των ΣΗΕ είναι η αδιάλειπτη τροφοδότηση των καταναλωτών με λογική αξιοπιστία, με καλής ποιότητας ηλεκτρική ισχύ και με το μικρότερο δυνατό κόστος [1.1]. Ειδικότερα, η αξιοπιστία αναφέρεται όχι μόνο στην ποσοτική κάλυψη των συνολικών αναγκών των καταναλωτών, αλλά και στην ικανοποίηση των χρονικών και τοπικών διακυμάνσεων του φορτίου. Η ποιότητα αναφέρεται στην τήρηση θεσμοθετημένων ορίων διακύμανσης της τάσης και της συχνότητας, τα οποία συνήθως είναι 5% και 0,5% αντίστοιχα [1.1].

Το Δίκτυο Διανομής (ΔΔ) ηλεκτρικής ενέργειας ως συνιστώσα ενός ΣΗΕ είναι το αντικείμενο μελέτης αυτής της Διπλωματικής Εργασίας. Το ΔΔ αποτελεί συνέχεια του Δικτύου Μεταφοράς προς την κατεύθυνση της κατανάλωσης και περιλαμβάνει ένα σύνολο από εναέριες και υπόγειες γραμμές καθώς και τους υποσταθμούς (Υ/Σ) υποβιβασμού τάσης. Η έκταση και η πολυπλοκότητα του ΔΔ είναι μεγαλύτερη του αντίστοιχου Μεταφοράς, ενώ οι τάσεις λειτουργίας χωρίζονται σε δύο επίπεδα, τη μέση τάση (ΜΤ) και τη χαμηλή τάση (ΧΤ). Στο ελληνικό ΔΔ η ΜΤ είναι 15kV ή 20kV, ενώ η ΧΤ είναι 0,4kV [1.1]. Το ΔΔ περιλαμβάνει επίσης και τα φορτία, δηλαδή τους καταναλωτές της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι καταναλωτές αυτοί μπορεί να είναι κυρίως οικιακοί, εμπορικοί ή μεγαλύτεροι βιομηχανικοί. Η τάση και γενικότερα ο τρόπος τροφοδοσίας των καταναλωτών εξαρτάται από τη μέγιστη δυνατή απορροφούμενη ισχύ τους. Για παράδειγμα, για μεμονωμένους καταναλωτές μέχρι 5,3kW ενδείκνυται μονοφασική τροφοδότηση στα 230V, ενώ για καταναλωτές μικρής ισχύος 50kW ενδείκνυται τριφασική τροφοδότηση στα 0,4kV [1.1]. Για μεγαλύτερα φορτία, από 100kW και πάνω, όπως τα βιομηχανικά, οι συνδέσεις γίνονται στη ΜΤ, δηλαδή στα 15kV ή 20kV, ενώ για ακόμη μεγαλύτερα

φορτία, από 10MW και πάνω, οι συνδέσεις γίνονται απευθείας στο Δίκτυο Μεταφοράς στα 150kV [1.1]. Γενικότερα, σε ένα ΔΔ ΜΤ ως φορτία μπορούν να θεωρηθούν οι Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ μαζί με τα ΔΔ ΧΤ που ακολουθούν.

Για τα ΔΔ έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι βελτιστοποίησης τόσο της λειτουργίας τους, όσο και της ανάπτυξής τους. Πρώτα, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης της λειτουργίας αφορούν κυρίως τις εξής περιοχές έρευνας [1.2]:

1. Επιλογή βέλτιστης συνδεσμολογίας. Τα ΔΔ λειτουργούν ακτινικά, αλλά με δυνατότητες διασύνδεσης, κυρίως αν είναι υπόγεια. Με τον όρο βέλτιστη λειτουργία νοείται ο ανασχηματισμός του δικτύου, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες. Στη βελτιστοποίηση αυτή λαμβάνεται υπόψη πάντοτε η αξιοπιστία στην τροφοδότηση και η ποιότητα ισχύος προς τα φορτία. Η επιλογή της βέλτιστης συνδεσμολογίας αφορά τόσο τη λειτουργία του ΔΔ υπό κανονικές συνθήκες, όπου όλα τα στοιχεία (γραμμές και Υ/Σ) είναι διαθέσιμα, όσο και τη λειτουργία του δικτύου υπό μη κανονικές συνθήκες. Στην δεύτερη περίπτωση, ένα ή περισσότερα στοιχεία δεν είναι διαθέσιμα, λόγω βλάβης, οπότε το βέλτιστο σχήμα του δικτύου είναι προφανώς εκείνο με το οποίο ελαχιστοποιείται το πλήθος ή και το μέγεθος των φορτίων που δεν θα τροφοδοτούνται λόγω αυτής της βλάβης.
2. Επιλογή βέλτιστης θέσης εγκατάστασης στοιχείων για τη διατήρηση της τάσης τροφοδοσίας προς τα φορτία. Τα στοιχεία αυτά είναι οι Ρυθμιστές Τάσης (PT) υπό φορτίο και οι Λήψεις (taps) των μετασχηματιστών (Μ/Σ) ΜΤ/ΧΤ. Η επιλογή των λήψεων στους Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ γίνεται έτσι ώστε να αντισταθμιστεί η πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής ΜΤ, ενώ η διακύμανση της τάσης κατά τη διάρκεια μεταβολών των φορτίων αντισταθμίζεται με την κατάλληλη επιλογή της λειτουργίας του PT. Η διατήρηση της τάσης τροφοδοσίας γίνεται ακόμη και με την εγκατάσταση πυκνωτών κοντά στα φορτία, κυρίως στο ΔΔ ΜΤ, οπότε μειώνονται οι ροές άεργου ισχύος και οι απώλειες πάνω στις γραμμές.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία ασχολείται με την περιοχή έρευνας που αφορά την επιλογή της βέλτιστης συνδεσμολογίας, υπό κανονικές συνθήκες, ενώ το είδος των απωλειών που εξετάζει, είναι οι ωμικές απώλειες πάνω στις γραμμές του δικτύου. Άλλα είδη απωλειών που συνυπάρχουν σε ένα δίκτυο είναι οι διηλεκτρικές απώλειες, οι απώλειες δινορρευμάτων, οι απώλειες σιδήρου, αλλά και οι άεργες απώλειες πάνω στις γραμμές κυρίως σε ένα ΔΔ ΜΤ. Πέρα από τις τεχνικές απώλειες υπάρχουν και οι μη τεχνικές οι οποίες αφορούν την τιμολόγηση της ενέργειας και την οικονομική διαχείρισή της γενικότερα.

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης της ανάπτυξης ενός ΔΔ βασίζονται σε μεθόδους της Επιχειρησιακής Έρευνας και έχουν σκοπό τον προσδιορισμό της βέλτιστης οικονομοτεχνικά λύσης για μια σχετικά μεγάλη χρονική περίοδο (5 έως 20 χρόνια). Η βέλτιστη οικονομοτεχνικά λύση περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους για όλη την εξεταζόμενη χρονική περίοδο σε συνδυασμό με την αδιάλειπτη

και αξιόπιστη τροφοδότηση των καταναλωτών (νέων και παλιών), με καλής ποιότητας ηλεκτρική ισχύ.

## 1.2 ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Στην μεταβλητότητα των φορτίων οφείλεται και η μεταβλητότητα των απωλειών πάνω στις γραμμές. Έτσι ανάλογα με τα φορτία, το ακτινικό δίκτυο λειτουργίας πρέπει να ανασχηματιστεί κατάλληλα, μέσω διακοπών, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι ωμικές απώλειες. Ο ανασχηματισμός αυτός καλείται επαναδιαμόρφωση και αφορά κυρίως τα υπόγεια καλωδιακά ΔΔ που απαντώνται σε σχήματα όπως τα βροχοειδή ή τα ατρακτοειδή ή σε συνδυασμούς των δύο, σε υπόγεια καλωδιακά ΔΔ ΜΤ.

Το πρόβλημα της Επαναδιαμόρφωσης ΔΔ ανήκει στην κατηγορία προβλημάτων βελτιστοποίησης, ακέραιου, γραμμικού ή μη γραμμικού προγραμματισμού. Στην εργασία αυτή το πρόβλημα της Επαναδιαμόρφωσης των ΔΔ επιλύεται με Γενετικό Αλγόριθμο (ΓΑ). Κάθε κατάσταση λειτουργίας του ΔΔ από πλευράς διακοπών, μπορεί να παρασταθεί με μία δυαδική συμβολοσειρά, δηλαδή μία ακολουθία από ψηφία μηδέν ή ένα. Ο χαρακτηρισμός ως γραμμικός ή μη γραμμικός προγραμματισμός αφορά τη μέθοδο επίλυσης του εφικτού ακτινικού δικτύου λειτουργίας (προκειμένου να υπολογιστούν οι ωμικές απώλειες πάνω στις γραμμές) και εξαρτάται από το είδος των φορτίων. Επίσης, ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου αυξάνεται δυσανάλογα με την πολυπλοκότητα και την έκταση του ΔΔ. Σκοπός του ΓΑ είναι με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων του, να βρει το βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας ή αλλιώς το ακτινικό δίκτυο λειτουργίας με τις ελάχιστες ωμικές απώλειες για δεδομένα φορτία.

Η επιδίωξη της εύρεσης του βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο απαιτεί το διαρκή ανασχηματισμό του δικτύου με την προϋπόθεση ότι όλοι οι διακόπτες είναι τηλεχειριζόμενοι. Όμως, κάτι τέτοιο δεν είναι πάντοτε πρακτικά και υπολογιστικά αποδεκτό. Το κέρδος που επιτυγχάνεται από τη μείωση των απωλειών θα πρέπει να υπερκαλύπτει το λειτουργικό κόστος του συστήματος (κόστος λειτουργίας και φθοράς των διακοπών). Οι ΓΑ για μεσαίου μεγέθους ΔΔ απαιτούν σχετικά μεγάλο υπολογιστικό χρόνο εκτέλεσης με αποτέλεσμα να είναι προβληματική η εφαρμογή τους σε συστήματα πραγματικού χρόνου. Μία πιθανή χρησιμότητα του ΓΑ Επαναδιαμόρφωσης ΔΔ είναι να θεωρηθεί μία αντιπροσωπευτική ημερήσια καμπύλη φορτίου, για το υπό εξέταση δίκτυο, για κάθε μήνα του έτους, που να αφορά, είτε τις εργάσιμες ημέρες, είτε τις αργίες. Από την ημερήσια αυτή καμπύλη προκύπτει το μέγιστο συνολικό φορτίο (φορτίο αιχμής) το οποίο μοιράζεται σε ένα ΔΔ ΜΤ στους Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ (φορτία) ανάλογα με την ονομαστική ισχύ των μετασχηματιστών τους ή σε ένα ΔΔ ΧΤ ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ των καταναλωτών. Στις περιπτώσεις αυτές οι χαρακτηρισμοί γραμμικός ή μη γραμμικός προγραμματισμός αντιστοιχούν στα ισοδύναμα φορτία σταθερής έντασης ή σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος αντίστοιχα,

που έχουν προκύψει από την κατανομή του φορτίου αιχμής. Βέβαια αν στο ΔΔ υπάρχουν καταναλωτές όπως οικιακοί, εμπορικοί, βιομηχανικοί που μπορεί να έχουν το δικό τους ατομικό δίκτυο ενσωματωμένο στο συνολικό δίκτυο, τότε η επαναδιαμόρφωση θα πρέπει να γίνει με βάση την καμπύλη φορτίου που αντιστοιχεί σε αυτούς. Συνεπώς, η επιτυχία του ΓΑ Επαναδιαμόρφωσης ΔΔ εξαρτάται από την ακρίβεια της πρόβλεψης του φορτίου αιχμής.

### 1.3 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί αρκετοί αλγόριθμοι που ασχολούνται με το πρόβλημα μείωσης των απωλειών μέσω επαναδιαμόρφωσης του ακτινικού δικτύου λειτουργίας ενός ΔΔ, χρησιμοποιώντας διακόπτες. Στην πλειοψηφία των κατασκευών, ειδικά σε υπόγεια καλωδιακά ΔΔ MT, κάθε τμήμα γραμμής (κλάδος) μεταξύ δύο ζυγών είναι εφοδιασμένο με ένα ζεύγος διακοπών, ένα στην αρχή και ένα στο τέλος του, ώστε να είναι εύκολος ο παραλληλισμός του κατά τη διάρκεια των χειρισμών, οπότε ο εκάστοτε αλγόριθμος θα λαμβάνει υπόψη το συγκεκριμένο ζεύγος διακοπών ως ένα νοητό ισοδύναμο διακόπτη. Οι διακόπτες που χρησιμοποιούνται στη MT είναι διακόπτες ισχύος στην αρχή της γραμμής και διακόπτες φορτίου, απομόνωσης ή διασύνδεσης σε όλους τους κλάδους της. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν επιγραμματικά ορισμένες αξιολογικές μελέτες.

Στον αλγόριθμο των Huddleston, Broadwater και Chandrasekaran [1.3] το ΔΔ μοντελοποιείται από μία δευτεροβάθμια εξίσωση απωλειών συμπεριλαμβάνοντας τους περιορισμούς των ρευμάτων του συστήματος. Σε αυτό το μοντέλο συμπεριλαμβάνεται ακόμη, η μεταγωγή των φορτίων εξαρτώμενων από την τάση. Επίσης εισάγονται συνιστώσες των στοιχείων του δικτύου ώστε να περιγραφεί η τοπολογία του ΔΔ προς επαναδιαμόρφωση. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επαναδιαμορφώνει το δίκτυο χρησιμοποιώντας πολλαπλά ζεύγη διακοπών, καταλήγοντας στη διαμόρφωση που ελαχιστοποιεί την εξίσωση των απωλειών, χωρίς όμως να διέρχεται από άλλες ενδιάμεσες διαμορφώσεις.

Ο αλγόριθμος των Civanlar, Grainger, Yin και Lee [1.3] ξεκινάει με τη βασική ροή φορτίου στο αρχικό ακτινικό δίκτυο λειτουργίας. Το ΔΔ αρχίζει να επαναδιαμορφώνεται τυχαία αλλάζοντας την κατάσταση ενός ζεύγους διακοπών τη φορά, αρχίζοντας με το κλείσιμο ενός διακόπτη διασύνδεσης, που αντιστοιχεί σε κλάδο μεταξύ φορτίων και ανοίγοντας ένα διακόπτη απομόνωσης. Ωστόσο οι περιπτώσεις των συνδυασμών που χρειάζεται να εξεταστούν για την εύρεση του βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας μειώνονται περίπου στο μισό, αν ληφθεί υπόψη ότι η ροή πραγματικής ισχύος συμβαίνει από το υψηλότερο στο χαμηλότερο δυναμικό, για αυτό ελέγχεται κάθε φορά η διαφορά δυναμικού στα άκρα κάθε ανοικτού διακόπτη. Οι ωμικές απώλειες του δικτύου για κάθε νέα διαμόρφωση συνδέονται με την προηγούμενη μέσω μιας ειδικής εξίσωσης. Η διαμόρφωση που οδηγεί στη μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή των απωλειών αποτελεί και τη βέλτιστη επιλογή. Η χρησιμότητα της ειδικής εξίσωσης του Civanlar αποτελεί μία πιο



αποδοτική μέθοδο για τον καθορισμό της μεταβολής αυτής από την απευθείας σύγκριση αποτελεσμάτων από τη ροή φορτίου μεταξύ των δύο διαμορφώσεων.

Ο αλγόριθμος του Glamocanin [1.4] αντιμετωπίζει το ηλεκτρικό δίκτυο ως ένα δίκτυο μεταφοράς και τις ωμικές απώλειες ως κόστος μεταφοράς από τις πηγές προς τα φορτία. Το κόστος μεταφοράς περιγράφεται από μια δευτεροβάθμια εξίσωση. Ο αλγόριθμος ξεκινώντας από τους κόμβους-πηγές ( $Y/\Sigma$  τροφοδοσίας) κατασκευάζει το βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας επιλέγοντας κλάδους (ηλεκτρικές γραμμές) που να ικανοποιούν τις εξής δύο συνθήκες:

1. Το συνολικό κόστος μεταφοράς της μονάδας του ρεύματος από την πηγή προς οποιοδήποτε φορτίο πρέπει να είναι ελάχιστο.
2. Κάθε κόμβος-φορτίο να συνδέεται με το υπόλοιπο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας μέσω κλάδου που επιφέρει την ελάχιστη μεταβολή στις συνολικές ωμικές απώλειες.

Στον αλγόριθμο αυτό συμπεριλαμβάνονται και οι περιορισμοί όσον αφορά την πτώση τάσης και τη φόρτιση σε κάθε κλάδο.

Οι Goswami, Basu [1.5] προτείνουν έναν ευρετικό αλγόριθμο ροής φορτίου, ο οποίος βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων τάσεων και ρευμάτων του Kirchhoff, με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Προκειμένου να καταλήξει στο βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας ακολουθείται μία επαναληπτική μέθοδος ανοιγοκλεισίματος των διακοπών απομόνωσης και διασύνδεσης, με την προϋπόθεση την κατάληξη σε ακτινικό δίκτυο λειτουργίας κάθε φορά. Στους ευρετικούς αλγόριθμους η πορεία που ακολουθείται προς ένα τελικό αποδεκτό αποτέλεσμα στηρίζεται σε μια σειρά προσεγγιστικών αποτελεσμάτων, οπότε οι λύσεις που δίνουν είναι συνήθως προσεγγίσεις των βέλτιστων λύσεων, όμως σε μικρό σχετικά υπολογιστικό χρόνο.

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο των Kashem, Jasmon, Mohamed και Moghannemi [1.6] ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αναπτύσσεται ώστε να επιλύσει το πρόβλημα της επαναδιαμόρφωσης του δικτύου με ελαχιστοποίηση των απωλειών. Αυτό το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο επίλυσης είναι πολυεπίπεδο και χρησιμοποιεί το μοντέλο του νευρώνα perceptron. Ο αλγόριθμος μάθησης που είναι ίδιος για όλους τους νευρώνες είναι ένας αλγόριθμος προς τα πίσω διάδοσης του σφάλματος. Η προτεινόμενη μέθοδος επιτυγχάνει την επίλυση του προβλήματος σε λίγο χρόνο εξαιτίας της δραστηκής μείωσης του αριθμού των νευρωνικών δικτύων.

Ο αλγόριθμος των Baran και Wu [1.7] στην απλή περίπτωση, ξεκινάει από ένα επικαλυπτικό δέντρο (spanning tree) το λεγόμενο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας. Με βάση αυτό καθορίζονται απλοί βρόχοι του βροχοειδούς δικτύου με τον καθέναν να περιλαμβάνει έναν ανοικτό κλάδο. Έτσι, σχηματίζεται κάθε φορά ένα νέο επικαλυπτικό δέντρο με το άνοιγμα και το κλείσιμο δύο διακοπών που ανήκουν στον κάθε βρόχο. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι απώλειες και συγκρίνονται με τις απώλειες των προηγούμενων δέντρων. Στον αλγόριθμο αυτό συμπεριλαμβάνονται και οι περιορισμοί όσον αφορά την πτώση τάσης και το μέγιστο ρεύμα σε κάθε κλάδο.

Ο αλγόριθμος των Augugliaro, Dusonchet και Mangione [1.8] παρουσιάζει μία ευρετική διαδικασία βασισμένη σε έναν άπληστο αλγόριθμο (greedy algorithm) τροποποιώντας κατάλληλα τον αλγόριθμο του Civanlar. Οι άπληστοι αλγόριθμοι επιλύουν διαδοχικά ένα πλήθος μικρότερων προβλημάτων, που εδώ είναι οι απλοί βρόχοι του βροχοειδούς δικτύου, με κριτήριο, σε κάθε βήμα, την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Έτσι, σε κάθε βρόχο επιλέγεται το άνοιγμα ή το κλείσιμο διακοπών, ώστε να προκύψει ένα νέο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας. Οι απώλειες αυτές υπολογίζονται με τη μέθοδο Newton-Raphson. Η ίδια επιστημονική ομάδα επινόησε ακόμη έναν αλγόριθμο επαναδιαμόρφωσης ΔΔ βασισμένη σε ένα μη γραμμικό μοντέλο προσομοιώνοντας τους διακόπτες απομόνωσης ως μεταβλητές αντιστάσεις [1.9].

Οι παραπάνω μελέτες, πλην της μελέτης των Huddleston, Broadwater και Chandrasekaran, έχουν ως αντικείμενο την επαναδιαμόρφωση ενός ΔΔ, με βάση ένα στιγμιότυπο της ζήτησης, λαμβάνοντας υπόψη φορτία σταθερής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε ζυγό του δικτύου. Σε μία πραγματική όμως τοπολογία, η ζήτηση των φορτίων μεταβάλλεται από ώρα σε ώρα και από μέρα σε μέρα. Επομένως, ο βέλτιστος ανασχηματισμός του ακτινικού δικτύου λειτουργίας είναι διαφορετικός σε κάθε χρονική περίοδο, ανάλογα με τη διαφοροποίηση της ζήτησης. Ο αλγόριθμος λοιπόν που χρησιμοποιείται πρέπει να εφαρμόζεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (σύστημα πραγματικού χρόνου) με σκοπό τη συνεχή επίτευξη της ελαχιστοποίησης των απωλειών [1.10]. Κάτι τέτοιο βέβαια οδηγεί σε μεγάλη αύξηση του υπολογιστικού όγκου, ενώ το κέρδος που επιτυγχάνεται από τη μείωση των απωλειών θα πρέπει να υπερκαλύπτει το λειτουργικό κόστος του συστήματος (κόστος λειτουργίας και φθοράς των διακοπών, απαιτούμενο εκπαιδευμένο προσωπικό για την ασφάλεια και τη λειτουργία του συστήματος και το χειρισμό των διακοπών) [1.10]. Μόνο έτσι μπορεί να δικαιολογηθεί οποιαδήποτε συμφέρουσα αναδιάταξη της τοπολογίας του ακτινικού δικτύου λειτουργίας. Τέλος, η μελέτη των Huddleston, Broadwater και Chandrasekaran προβαίνει σε μια τέτοια αναδιάταξη με βάση την πρόβλεψη του φορτίου αιχμής.

## 1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο έγινε μία σύντομη παρουσίαση των ΔΔ αλλά και του προβλήματος βελτιστοποίησης που καλείται να επιλύσει ο ΓΑ. Το πρόβλημα της Επαναδιαμόρφωσης του ΔΔ έχει επιλυθεί με διάφορες μεθόδους, μερικές από τις οποίες δεν καταλήγουν στο βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας, αλλά σε ένα υποβέλτιστο δίκτυο. Ακόμη, λίγες από αυτές τις μεθόδους, στηρίζονται σε πιθανοθεωρητικούς κανόνες αναζήτησης, όπως οι ΓΑ.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται σαφής διάκριση μεταξύ τοπολογίας του ΔΔ και του δικτύου λειτουργίας του, που φυσικά έχει και αυτό τη δική του τοπολογία, που είναι κυρίως ακτινική. Παρουσιάζονται τα κυριότερα σχήματα των ΔΔ MT και XT και δίνονται τα βασικότερα εργαλεία από τη θεωρία των γραφημάτων, όσον αφορά το γεωμετρικό σχεδιασμό ενός ΔΔ. Στη συνέχεια με βάση το είδος των φορτίων δίνεται

και η αντίστοιχη μεθοδολογία επίλυσης του δικτύου λειτουργίας, προκειμένου να υπολογιστούν οι συνολικές του απώλειες.

Στο **3<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζεται ένας κλάδος της Υπολογιστικής Νοημοσύνης, οι ΓΑ, οι οποίοι αποτελούν μία εξελιγμένη μοντελοποίηση της φυσικής αναπαραγωγικής διαδικασίας. Τα κύρια χαρακτηριστικά, αλλά και η βασική δομή ενός ΓΑ αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο, το οποίο κλείνει με τα πλεονεκτήματα των ΓΑ σε εφαρμογές βελτιστοποίησης και αναζήτησης.

Στο **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζεται ο ΓΑ Επαναδιαμόρφωσης ΔΔ, χωριζόμενος στο κύριο πρόγραμμα που δεν είναι άλλο από έναν τυπικό ΓΑ, χωρίς να υπάρχει άμεσα το στάδιο της αποκωδικοποίησης, και στο υποπρόγραμμα υπολογισμού τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης. Το υποπρόγραμμα αυτό παρουσιάζεται σε δύο παραλλαγές ανάλογα με το είδος των φορτίων. Τα φορτία αυτά είναι είτε φορτία σταθερής έντασης είτε φορτία σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή φορτίου. Το είδος των φορτίων καθορίζει το είδος της επίλυσης του δικτύου λειτουργίας και κατά επέκταση τη δομή των δεδομένων εισόδου.

Στο **5<sup>ο</sup> κεφάλαιο** εφαρμόζεται ο ΓΑ σε διάφορες περιπτώσεις βροχοειδών ΔΔ προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας. Τα πρότυπα αυτά βροχοειδή δίκτυα προέρχονται από τη διεθνή βιβλιογραφία, ενώ τα αποτελέσματα του γενετικού συγκρίνονται με τα αποτελέσματα άλλων μεθόδων, όπως αυτές περιγράφηκαν στην ενότητα 1.4, προκειμένου να επαληθευτεί η ορθότητα του ΓΑ Επαναδιαμόρφωσης ΔΔ.

Τέλος, στο **6<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζεται η σύνοψη και τα συμπεράσματα της όλης εργασίας, καθώς και κάποιες επεκτάσεις αυτής.

## 1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Δ. Λαμπρίδης, Π. Ντοκόπουλος, Γ. Παπαγιάννης *Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, 2006, σελ. 11-18.
- [1.2] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, τόμος I, για τους σπουδαστές της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π., Αθήνα 1994, σελ. 14-15.
- [1.3] C. T. Huddleston, R. P. Broadwater and A. Chandrasekaran, "Reconfiguration algorithm for minimizing losses in radial electric distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 18, pp. 57-66, 1990.
- [1.4] V. Glamocanin, "Optimal loss reduction of distribution networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 774-782, August 1990.
- [1.5] S. K. Goswami, S. K. Basu, "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, pp. 1484-1491, July 1992.
- [1.6] M. A. Kashem, G. B. Jasmon, A. Mohamed and M. Moghavvemi, "Artificial neural network approach to network reconfiguration for loss minimization in

- distribution networks,” *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 20, no. 4, pp.247-258, 1998.
- [1.7] M. E. Baran, F. F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, April 1989.
- [1.8] A. Augugliaro, L. Dusonchet, S. Mangione, “An efficient greedy approach for minimum loss reconfiguration of distribution networks,” *Electric Power Systems Research*, vol. 35, pp. 167-176, 1995.
- [1.9] A. Augugliaro, L. Dusonchet, S. Mangione, “Optimal re-configuration of distribution network for loss reduction using non-linear programming,” *European Transactions on Electric Power Systems*, vol. 1, no. 6, pp. 317-324, Nov./ Dec. 1991.
- [1.10] Π. Α. Ξένος, Σ. Β. Σίμης, «Επίδραση της Μεταβλητότητας των Φορτίων στο Βέλτιστο Ανασχηματισμό των Δικτύων Διανομής για Μείωση Απωλειών,» Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Α.Π.Θ., 2009.

## **ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

### **2.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Κατασκευαστικά τα Δίκτυα Διανομής (ΔΔ) ΜΤ και ΧΤ διακρίνονται σε εναέρια και σε καλωδιακά υπόγεια [2.1].

Τα εναέρια δίκτυα είναι πολύ πιο φτηνά από τα υπόγεια, αλλά και πιο εύκολα στην εκμετάλλευσή τους. Καταλαμβάνουν όμως περισσότερο χώρο, για αυτό απαντώνται 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 [2.1]. 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 μικτά δίκτυα. Τα μικτά δίκτυα ΜΤ και ΧΤ αποτελούνται από τμήματα υπόγεια και εναέρια [2.2].

### **2.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

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 αυτοί είναι οι εξής [2.1]:

1. Οι Αποζεύκτες (Isolators ή Disconnectors).
2. Οι Διακόπτες Φορτίου (Switches).

### 3. Οι Διακόπτες Ισχύος (Circuit Breakers).

Αποζεύκτες (A/Z) 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 χωρικά ρεύματα των μονωτήρων, των ζυγών και των μετασχηματιστών [2.1]. 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 [2.1]. Δεν μπορούν όμως να διακόπτουν τα ρεύματα βραχυκύκλωσης. Στα ΔΔ υπάρχουν δύο είδη τέτοιων διακοπών τα οποία είναι:

#### 1. Οι Διακόπτες Απομόνωσης (Sectionalizing Switches).

Οι διακόπτες αυτοί συνδέουν δύο τμήματα γραμμών της ίδιας γραμμής τροφοδοσίας.

#### 2. 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 συμβάλουν στον ανασχηματισμό (επαναδιαμόρφωση) του δικτύου όσον αφορά τη λειτουργία του.

Διακόπτες Ισχύος (Δ/Ι) 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 [2.1]. Επιπλέον προστατεύουν την εγκατάσταση σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Οι Δ/Ι 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:

1. Οι Δ/Ι, όταν δέχονται εντολές από Ηλεκτρονόμους Προστασίας.
2. Οι Ασφάλειες (ΑΣΦ).

Στην πράξη χρησιμοποιούνται συνδυασμοί των παραπάνω στοιχείων όπως είναι [2.1]:

1. Δ/Φ – 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.
2. A/Z – Δ/Ι, ώστε με το άνοιγμα των επαφών του Δ/Ι και την ενδεχόμενη δημιουργία τόξου να εξασφαλίζεται βέβαιη απομόνωση του κυκλώματος μέσω του A/Z.
3. Δ/Φ – ΑΣΦ, ώστε με τον Δ/Φ να υπάρχει δυνατότητα χειρισμών, αλλά και προστασία έναντι βραχυκυκλώματος μέσω των ΑΣΦ.



Η τροφοδότηση της γραμμής του κορμού στο ένα άκρο της, γίνεται από τους ζυγούς ΜΤ του Υ/Σ 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 Υ/Σ 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 μπορούν να τροφοδοτούνται κανονικά.

Στις Ευρωπαϊκές χώρες οι γραμμές των εναέριων ΔΔ ΜΤ περιλαμβάνουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ στις Η.Π.Α. και στον Καναδά στις γραμμές περιλαμβάνεται και ο ουδέτερος, που γειώνεται κατά διαστήματα.

Συνοψίζοντας, η τοπολογία των εναέριων δικτύων ΜΤ είναι ακτινική, αλλά και η λειτουργία τους είναι ακτινική.

Στα υπόγεια δίκτυα ΜΤ η δυσκολία εύρεσης της βλάβης, αλλά και η δύσκολη και χρονοβόρα αποκατάστασή 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 μία βλάβη, να είναι δυνατή η επανατροφοδότηση των Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ από άλλη οδό, μετά την εκτέλεση ορισμένων χειρισμών ή και αυτόματα, χωρίς να προηγείται κατά ανάγκη επισκευή της βλάβης. Τα βασικά σχήματα που περιγράφουν αυτές τις τοπολογίες είναι [2.1]:

1. Το βροχοειδές, που χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι οι γραμμές σχηματίζουν τμήματα βρόχου, που αρχίζουν και τελειώνουν στον ίδιο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Παραλλαγές του σχήματος αυτού είναι [2.2]:
  1. Δίκτυο με ανοικτούς ή κλειστούς δακτυλίους (Σχήμα 2.2α).
  2. Δίκτυο με Υ/Σ διασύνδεσης (Σχήμα 2.2β).
  3. Δίκτυο με ενδιάμεσους Υ/Σ ΜΤ (Σχήμα 2.2γ).

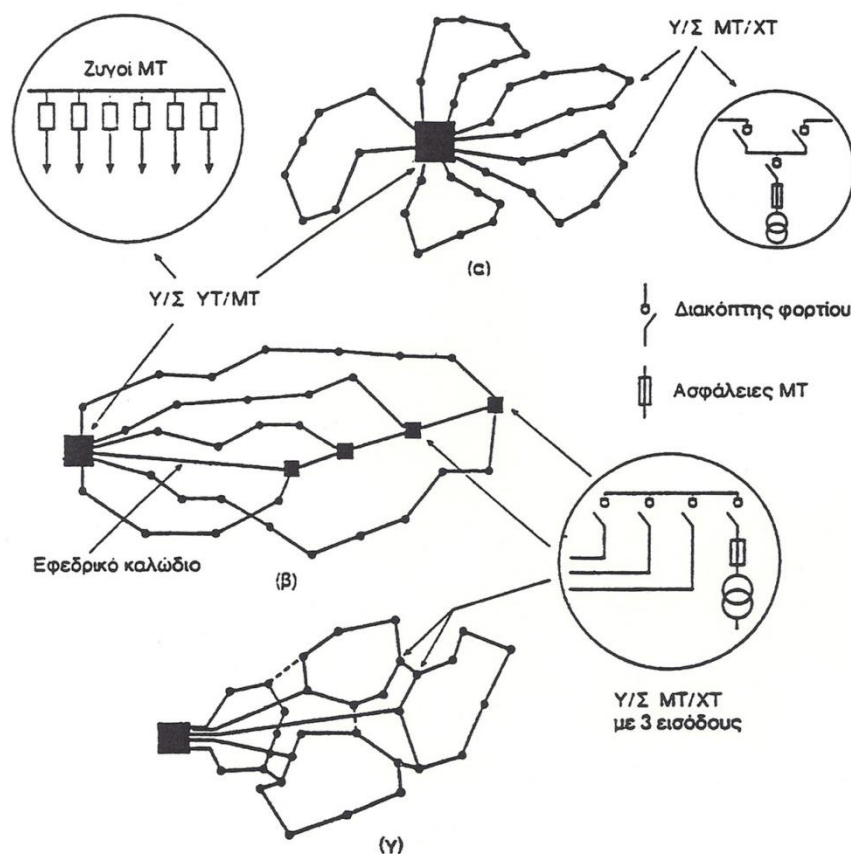
Κατά τη λειτουργία ενός βροχοειδούς ΔΔ δεν ενδείκνυται ο παραλληλισμός των Υ/Σ τροφοδοσίας, δηλαδή η ταυτόχρονη τροφοδότηση μιας γραμμής από δύο ή περισσότερους Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ [2.2]. Έτσι, στα βροχοειδή σχήματα ένας από τους Δ/Φ εισόδου ή εξόδου σε ένα Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ πρέπει να παραμένει ανοικτός.

2. Το ατρακτοειδές (Σχήμα 2.3), που χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι οι γραμμές αρχίζουν από ένα Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ και καταλήγουν σε έναν άλλο ή καταλήγουν σε έναν Υ/Σ Ζεύξης. Στα ατρακτοειδή σχήματα παραμένουν συχνά ανοικτοί οι διακόπτες των ζυγών ΜΤ των Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ ή του Υ/Σ Ζεύξης για κάθε γραμμή. Σε περίπτωση σφάλματος σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής προκαλείται άνοιγμα του Δ/Ι που προστατεύει τη γραμμή στην αναχώρησή της από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Στη συνέχεια, αφού η θέση του σφάλματος εντοπιστεί, το αντίστοιχο τμήμα απομονώνεται, με το άνοιγμα των εκατέρωθεν Δ/Φ, και τα λοιπά τμήματα επανατροφοδοτούνται.
3. Το σχήμα διπλής τροφοδότησης (Σχήμα 2.4), το οποίο συνίσταται από παράλληλες ακτινικές γραμμές. Σε κάθε Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ καταλήγουν δύο

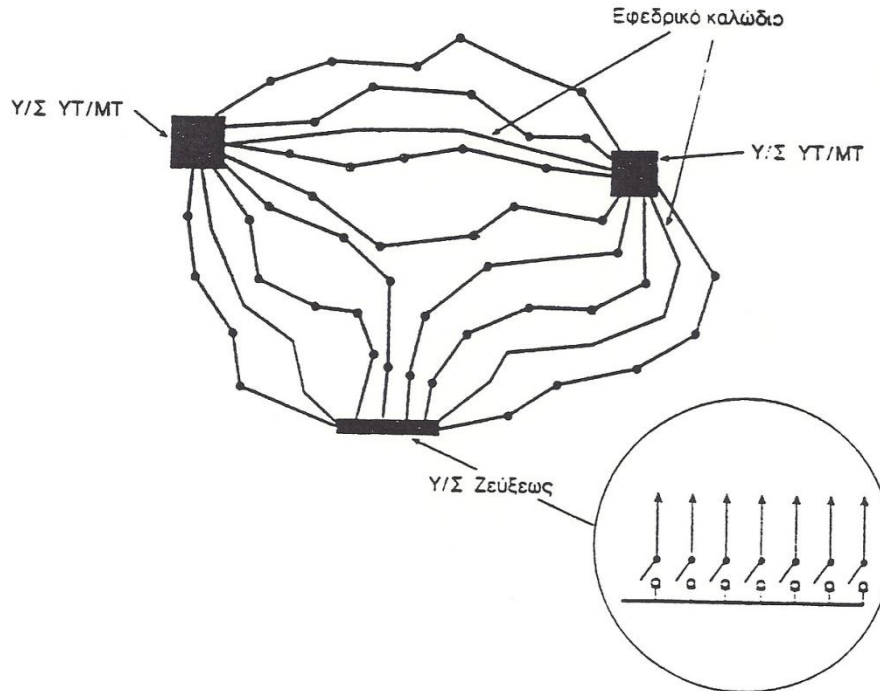


γραμμές τροφοδοσίας εκ των οποίων η μία είναι εφεδρική. Η κανονική και η εφεδρική γραμμή τροφοδοσίας δεν πρέπει να λειτουργούν ταυτόχρονα, για αυτό οι αντίστοιχοι  $\Delta/\Phi$  συνδέονται μεταξύ τους (μανδάλωση), ώστε να αποκλείεται το να παραμένουν ταυτόχρονα κλειστοί.

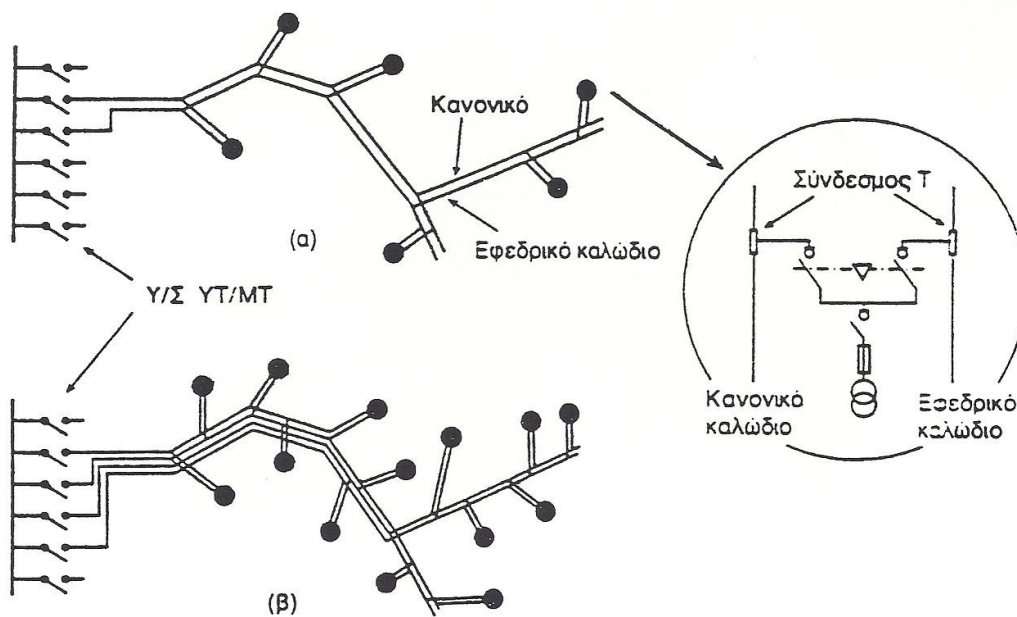
Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι σε όλα τα υπόγεια  $\Delta\Delta$  MT η λειτουργία παραμένει ακτινική ανεξαρτήτου τοπολογίας. Στην πράξη εμφανίζονται δίκτυα ως συνδυασμοί των σχημάτων βροχοειδούς και ατρακτοειδούς, τα οποία σε αυτή την εργασία θα χαρακτηρίζονται με τον όρο βροχοειδή.



Σχήμα 2.2: Βροχοειδή σχήματα υπόγειου καλωδιακού δικτύου MT [2.1].



Σχήμα 2.3: Ατρακτοειδές σχήμα υπόγειου καλωδιακού δικτύου ΜΤ [2.1].



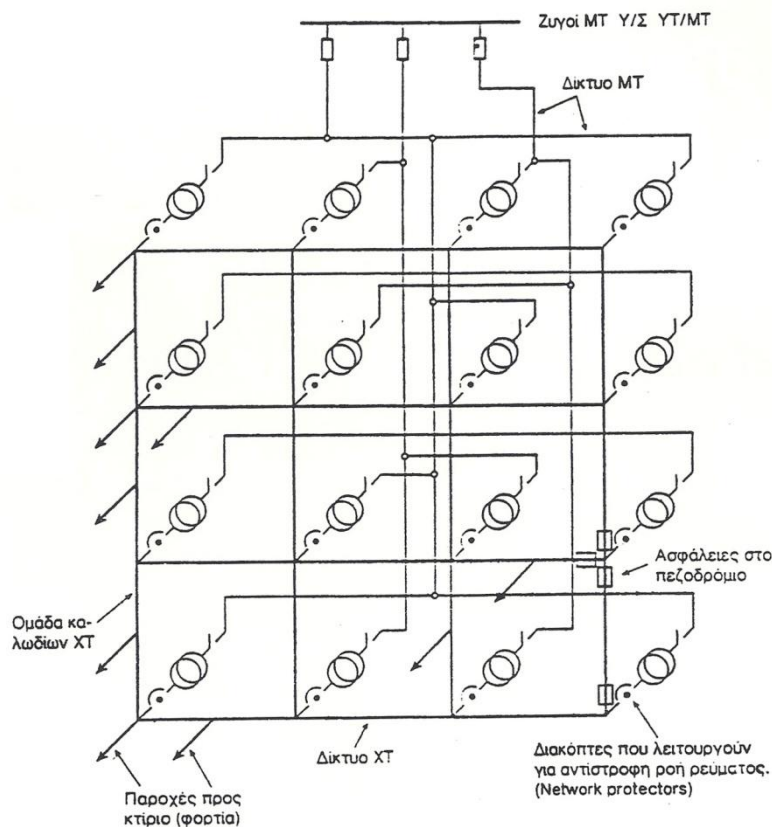
Σχήμα 2.4: Σχήμα διπλής τροφοδότησης α) Σε αρχική β) Σε επόμενη φάση ανάπτυξης [2.1].

Το βροχοειδές δίκτυο με δακτυλίους γύρω από Y/S ΥΤ/ΜΤ παρουσιάζει το πλεονέκτημα της απλότητας, αλλά δεν επιτρέπει την πλήρη αξιοποίηση των καλωδίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην ακραία περίπτωση που υπάρξει βλάβη μεταξύ του τμήματος που συνδέει τον Y/S ΥΤ/ΜΤ με τον πρώτο Y/S ΜΤ/ΧΤ να υπάρχει δυνατότητα τροφοδοσίας από την άλλη οδό όλων των Y/S ΜΤ/ΧΤ. Αντίθετα, τα υπόλοιπα δύο είδη βροχοειδούς δικτύου επιτρέπουν την καλύτερη

αξιοποίηση των καλωδίων, είτε μέσω εφεδρικού καλωδίου με Υ/Σ διασύνδεσης, είτε μέσω ενδιάμεσων Υ/Σ, ώστε να εξυπηρετούνται περισσότεροι του ενός βρόχοι. Το ατρακτοειδές δίκτυο εκμεταλλεύεται ακόμη περισσότερο την ικανότητα των καλωδίων ενώ ευνοεί περισσότερο μία ενδεχόμενη επέκταση του δικτύου. Βέβαια επιβαρύνεται από τον Υ/Σ Ζεύξης. Τέλος, στο δίκτυο διπλής τροφοδότησης όταν συμβεί βλάβη διακόπτεται η τροφοδοσία σε όλους τους Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ, ενώ η επανατροφοδότηση γίνεται με μεταγωγή στο εφεδρικό καλώδιο. Έτσι, ο χρόνος επανατροφοδότησης ελαχιστοποιείται. Βασικό μειονέκτημα αυτού του δικτύου είναι ότι παρουσιάζει δυσκολίες επέκτασης, λόγω κατασκευαστικών δυσχερειών, ιδιαίτερα όταν πρόκειται να αναπτυχθεί σε στενούς αστικούς χώρους.

## 2.4 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ – ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΤ

Στην πλειοψηφία τους τα ΔΔ ΧΤ, τόσο τα εναέρια όσο και τα υπόγεια καλωδιακά, λειτουργούν ακτινικά. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές, που απαντώνται 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 (Σχήμα 2.5) [2.1].

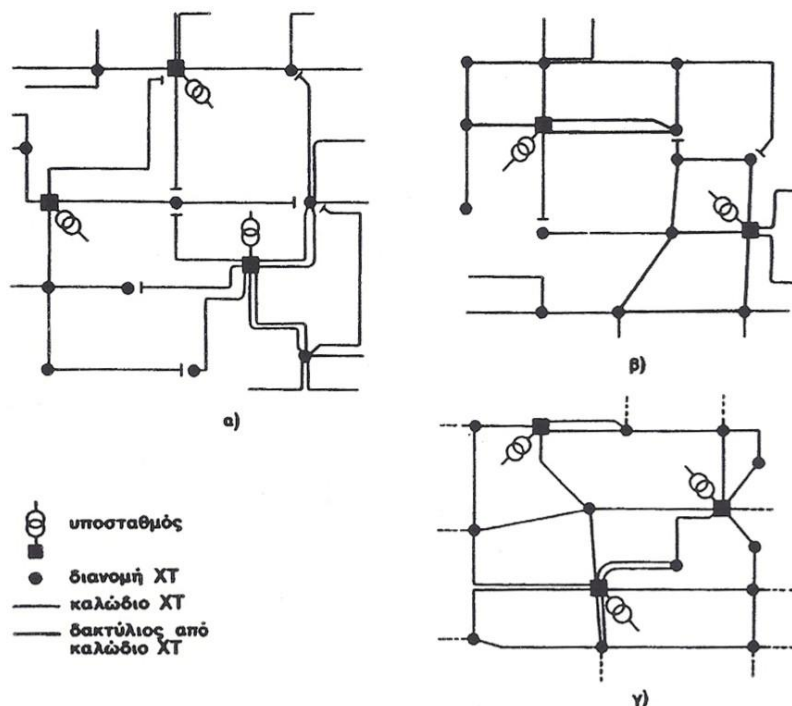


Σχήμα 2.5: Σχηματική διάταξη κλειστού δικτύου ΧΤ [2.1].

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  $\Delta/I$  ΧΤ των  $Y/\Sigma$  ΜΤ/ΧΤ, ώστε να αποφευχθεί η αντίστροφη ροή ρεύματος στους  $Y/\Sigma$  ΜΤ/ΧΤ και ουσιαστικά η ανακύκλωση του βραχυκυκλώματος [2.1]. 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 εν γένει τις λιγότερες απώλειες, αλλά απαιτούν πολύ στενή παρακολούθηση της ανακατανομής φορτίων με το χρόνο.

Η ακτινική λειτουργία των  $\Delta\Delta$  ΧΤ, υλοποιείται σε διάφορες τοπολογίες. Πρώτα στα εναέρια δίκτυα των οποίων η τοπολογία περιγράφεται από το ακτινικό σχήμα και κατόπιν στα υπόγεια καλωδιακά δίκτυα. Τα βασικά σχήματα που περιγράφουν τις τοπολογίες των υπόγειων  $\Delta\Delta$  ΧΤ είναι [2.2]:

1. Το ακτινικό (Σχήμα 2.6α), στο οποίο μπορεί να χρησιμοποιούνται καλώδια πολλών διατομών, ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί φόρτισης και πτώσης τάσης, χωρίς όμως την ύπαρξη εφεδρείας. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι σε περιόδους αιχμής, μπορεί να παρουσιασθεί μεγάλη πτώση τάσης.
2. Το δακτυλιοειδές (Σχήμα 2.6β), στο οποίο οι γραμμές ξεκινούν από έναν  $Y/\Sigma$  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.
3. Το διασυνδεδεμένο (Σχήμα 2.6γ), στο οποίο ενώνονται όλοι οι  $Y/\Sigma$  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.



Σχήμα 2.6: Υπόγεια καλωδιακά δίκτυα ΧΤ ακτινικής λειτουργίας [2.2].

Το διασυνδεδεμένο δίκτυο προσφέρει το μεγαλύτερο βαθμό εξυπηρέτησης από τα άλλα δύο σχήματα, το οποίο όμως οδηγεί σε μεγαλύτερη δαπάνη κατασκευής, λόγω αυξημένης πολυπλοκότητας. Το δακτυλιοειδές από άποψη εξυπηρέτησης και κατασκευής βρίσκεται μεταξύ των δύο άλλων σχημάτων. Ένα άλλο πλεονέκτημα του διασυνδεδεμένου δικτύου είναι η δυνατότητα επέκτασής του, κάτι που το κάνει να βρίσκει εφαρμογές σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα φορτίου. Τέλος, σε όλα τα είδη ΔΔ ΧΤ οι γραμμές είναι τριφασικές (με ουδέτερο), με εξαίρεση περιπτώσεις εναέριων δικτύων που μπορεί να υπάρξουν μονοφασικές γραμμές (μία φάση και ουδέτερος).

## 2.5 ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΩΣ ΓΡΑΦΗΜΑ

Όπως γίνεται φανερό από τα παραπάνω, το ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να παρασταθεί και να περιγραφεί ως γράφημα (γραμμικός γράφος). Στην περίπτωση αυτή οι ζυγοί  $Y/\Sigma$  τροφοδοσίας ή φορτίων αντιστοιχούν στους κόμβους του γραφήματος, ενώ τα τμήματα τριφασικών ή μονοφασικών γραμμών μεταξύ δύο συνεχόμενων ζυγών αντιστοιχούν στους κλάδους του, όπου στην ενότητα 2.6 χάρη συντομίας θα αποκαλούνται γραμμές. Έτσι, κάθε ηλεκτρικό δίκτυο υπακούει στα θεωρήματα και τους κανόνες που διέπουν τη Θεωρία των Γραφημάτων (Graph Theory). Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν στοιχεία αυτής της θεωρίας ξεκινώντας από τον αυστηρό ορισμό του γραφήματος.

*Γράφημα*  $G$  είναι ένα διατεταγμένο ζεύγος δύο ξένων μεταξύ τους συνόλων  $V \neq \emptyset$  και  $E$ , όπου το  $E$  είναι ένα υποσύνολο του συνόλου των μη διατεταγμένων

ζευγών του  $V$  ή των διατεταγμένων αν πρόκειται για *κατευθυνόμενο γράφημα* (προσανατολισμένος γράφος) [2.3]. Τα στοιχεία του συνόλου  $V$  ονομάζονται *κορυφές* (κόμβοι) του γραφήματος και ο αριθμός  $|V| = |V(G)|$  *τάξη* του γραφήματος  $G$ . Τα στοιχεία του συνόλου  $E$  ονομάζονται *πλευρές* (κλάδοι) του γραφήματος και ο αριθμός  $|E| = |E(G)|$  *μέγεθος* του γραφήματος  $G$ . Οι κορυφές που ενώνονται από μία ή περισσότερες πλευρές λέγονται *γειτονικές*. Η πλευρά που ενώνει δύο κορυφές καλείται ως *προσπίπτουσα* ή *διερχόμενη* από αυτές.

Για το μέγεθος  $m$  ενός γραφήματος τάξης  $n$  ισχύουν τα εξής [2.3]:

$$0 \leq m \leq \binom{n}{2} = \frac{n \cdot (n-1)}{2} \quad (2.1)$$

Ένα γράφημα τάξης  $n$  για το οποίο ισχύει  $m = 0$  λέγεται *κενό γράφημα*. Ένα γράφημα με  $m = \binom{n}{2}$  λέγεται *πλήρες γράφημα* τάξης  $n$ . Στο γράφημα αυτό όπως είναι φανερό κάθε κορυφή ενώνεται άμεσα με όλες τις άλλες.

Ο αριθμός των πλευρών που διέρχονται από μία κορυφή  $v$  ενός γραφήματος  $G$  ονομάζεται *βαθμός* της κορυφής  $v$  και συμβολίζεται  $d(v)$ . Προφανώς:

$$0 \leq d(v) \leq n-1 \quad (2.2)$$

### Θεώρημα

Το άθροισμα των βαθμών των κορυφών  $v_i$  ενός γραφήματος  $G$  ισούται με το διπλάσιο του αριθμού των πλευρών  $e$ , δηλαδή [2.3]:

$$\sum_{i=1}^n d(v_i) = 2 \cdot e \quad (2.3)$$

**Απόδειξη:** Εφόσον κάθε πλευρά προσπίπτει σε δύο κορυφές θα προσφέρει δύο μονάδες στο άθροισμα των βαθμών, μία μονάδα για κάθε κορυφή που είναι άκρο της πλευράς αυτής.

□

### Πόρισμα

Σε ένα γράφημα  $G$  το πλήθος των κορυφών, κάθε μία από τις οποίες έχει βαθμό περιττό, είναι άρτιος αριθμός [2.3].

**Απόδειξη:** Έστω  $u_1, u_2, \dots, u_k$  οι κορυφές με άρτιο βαθμό και  $v_1, v_2, \dots, v_l$  οι κορυφές με περιττό βαθμό. Θα δειχθεί ότι ο  $l$  είναι άρτιος.

Σύμφωνα με το προηγούμενο θεώρημα προκύπτει ότι:

$$\sum_{i=1}^k d(u_i) + \sum_{j=1}^l d(v_j) = 2 \cdot e$$

Το άθροισμα  $\sum_{i=1}^k d(u_i)$  είναι άρτιος αριθμός ως άθροισμα αρτίων, οπότε και το

άθροισμα  $\sum_{j=1}^l d(v_j) = 2 \cdot e - \sum_{i=1}^k d(u_i)$  είναι άρτιος αριθμός ως διαφορά αρτίων.

Εφόσον το άθροισμα των περιττών αριθμών είναι άρτιο, έπεται ότι το πλήθος των προσθετέων του είναι άρτιος αριθμός.

□

Σε ένα γράφημα  $G$ , μία πεπερασμένη ακολουθία στην οποία εναλλάσσονται κορυφές του  $G$  και πλευρές του  $G$ , η οποία αρχίζει και τελειώνει σε κορυφή και κάθε πλευρά που περιέχεται στην ακολουθία προσπίπτει στην κορυφή που προηγείται και στην κορυφή που έπεται, λέγεται *δρόμος*. Αν σε ένα δρόμο ενός γραφήματος  $G$  κάθε πλευρά και κορυφή του εμφανίζονται μία μόνο φορά, αυτός λέγεται *μονοπάτι*. Αν το μονοπάτι έχει σαν άκρα την ίδια κορυφή, δηλαδή είναι κλειστό, τότε αυτό λέγεται *κύκλος*, ο απλός βρόχος στη θεωρία των ηλεκτρικών δικτύων. Ακόμη, όταν για κάθε ζεύγος κορυφών ενός γραφήματος υπάρχει μονοπάτι από τη μία κορυφή στην άλλη, τότε το γράφημα αυτό καλείται *συνεκτικό*. Ένα γράφημα μίας κορυφής, χωρίς πλευρές θεωρείται συνεκτικό. Ένα μη συνεκτικό γράφημα  $G$  αποτελείται από ένα ή περισσότερα συνεκτικά *υπογραφήματα* (γραφήματα που το καθένα περιλαμβάνει ένα υποσύνολο των κορυφών και των πλευρών του  $G$ ), που ονομάζονται *συνεκτικές συνιστώσες* του  $G$ . Η πλευρά που αν αφαιρεθεί από το γράφημα, αυξάνεται ο αριθμός των (ελαχίστων) συνεκτικών συνιστωσών, ονομάζεται *γέφυρα*.

Στη συνέχεια με βάση τους παραπάνω ορισμούς δίνουμε τον αυστηρό ορισμό του δέντρου (Σχήμα 2.7).

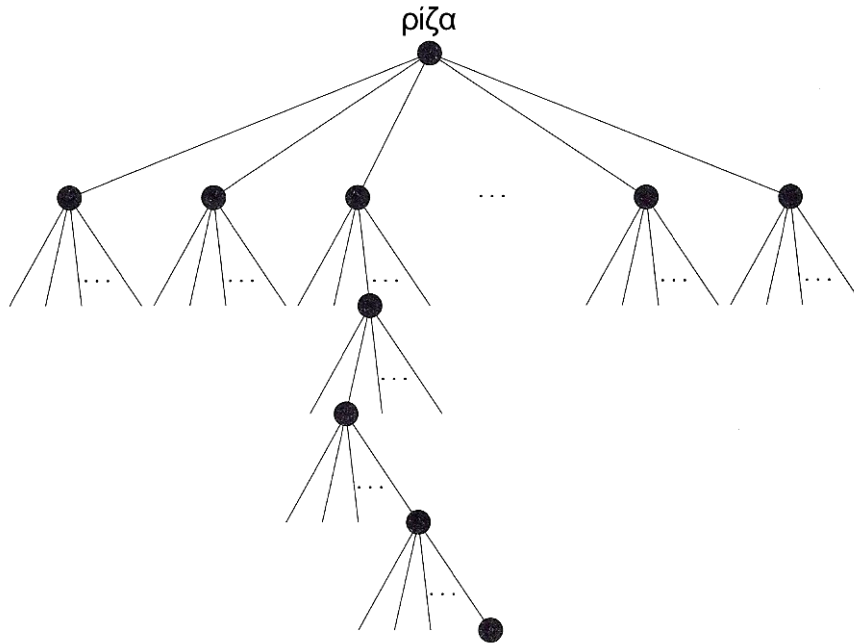
**Ορισμός:** Δέντρο είναι ένα συνεκτικό γράφημα χωρίς κύκλους [2.3].

Κατά αναλογία ένα γράφημα χωρίς κύκλους, το οποίο περιέχει ως συνιστώσες δέντρα, λέγεται *δάσος*. Με βάση τον ορισμό του δέντρου διατυπώνονται οι εξής ισοδύναμες εκφράσεις – θεωρήματα για ένα απλό γράφημα  $T$ ,  $n$  κορυφών [2.4]:

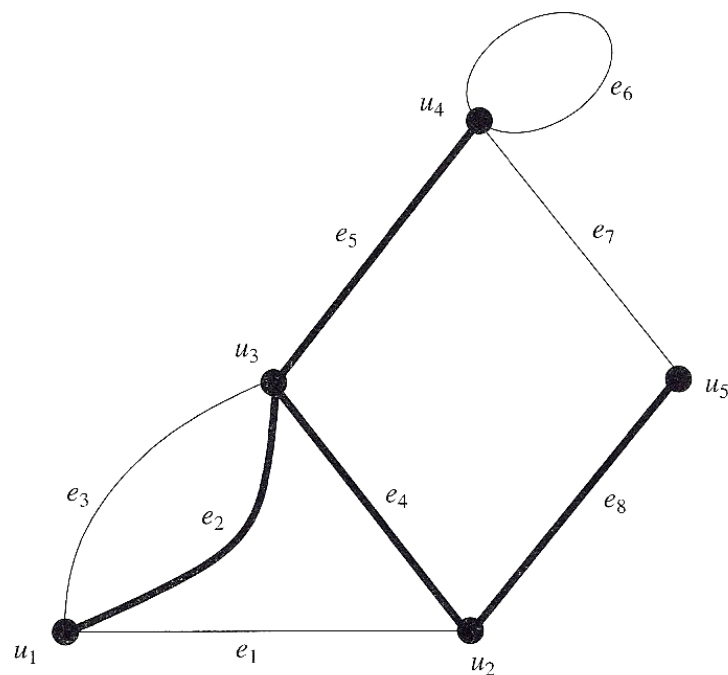
1. Το  $T$  είναι δέντρο.
2. Το  $T$  έχει  $n - 1$  πλευρές και κανένα κύκλο.
3. Το  $T$  έχει  $n - 1$  πλευρές και είναι συνεκτικό.
4. Το  $T$  είναι συνεκτικό και κάθε πλευρά του είναι γέφυρα.
5. Μεταξύ δύο διακεκριμένων κορυφών του  $T$  υπάρχει ακριβώς ένα μονοπάτι.
6. Το  $T$  δεν έχει κύκλους, αλλά αν προστεθεί μία πλευρά στο  $T$  μεταξύ ενός ζεύγους μη γειτονικών κορυφών σχηματίζεται ακριβώς ένας κύκλος.

Μία ειδική κατηγορία δέντρων είναι τα *δέντρα με ρίζα* (rooted trees), που δεν είναι άλλα από τα δέντρα με μία διακεκριμένη κορυφή (ρίζα) [2.4]. Τα δέντρα με ρίζα μπορούν να θεωρηθούν έμμεσα ως κατευθυνόμενα γραφήματα, αφού όλες οι πλευρές θα έχουν κατεύθυνση από τη ρίζα προς τις υπόλοιπες κορυφές. Η κατηγορία αυτή (Σχήμα 2.7) βρίσκει εφαρμογή στα ΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας, όσον αφορά τη λειτουργία τους. Στα τελευταία, οι ρίζες αποτελούν τους κόμβους-πηγές, ή αλλιώς τους Υ/Σ τροφοδοσίας.

Στο ερώτημα πόσα δέντρα μπορούν να προκύψουν από ένα γράφημα έρχεται να απαντήσει μερικώς το θεώρημα του Cayley (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.7: Δέντρο με ρίζα [2.4].



Σχήμα 2.8: Επικαλυπτικό δέντρο συνεκτικού γραφήματος [2.4].

### Θεώρημα του Cayley

Το πλήθος των (επικαλυπτικών) δέντρων  $n$  κορυφών, ενός πλήρους γραφήματος  $n$  κορυφών είναι  $n^{n-2}$  [2.4].

Η απόδειξη παραλείπεται. Προφανώς, το θεώρημα αυτό αφορά μη κατευθυνόμενα γραφήματα.



Στη συνέχεια θα εξεταστεί ένα σημαντικό πρόβλημα βελτιστοποίησης που είναι γνωστό στη βιβλιογραφία ως “the connector problem”, η βάση του οποίου έχει αποτελέσει αφετηρία πολλών εργασιών επαναδιαμόρφωσης δικτύων. Το πρόβλημα σύνδεσης (connector problem) διατυπώνεται ως εξής [2.3]:

Έστω ένα γράφημα (δίκτυο)  $G = (V, E)$  και μία συνάρτηση ορισμένη σε όλες τις πλευρές του γραφήματος, η λεγόμενη συνάρτηση κόστους,  $f : E \rightarrow \mathfrak{R}^+$ . Ζητείται να βρεθεί ένα υπογράφημα  $T = (V, E')$  με  $E' \subseteq E$  του  $G$ , για το οποίο το άθροισμα

$$f(T) = \sum_{j=1}^{|E'|} f(e_j) \text{ γίνεται ελάχιστο.}$$

Το οικονομικότερο υπογράφημα  $T$  αποτελείται από τα οικονομικότερα δέντρα του  $G$ , δηλαδή το οικονομικότερο δάσος. Παρακάτω, θα περιγραφούν τρεις αλγόριθμοι εύρεσης του οικονομικότερου δάσους [2.3].

### 1<sup>ος</sup> αλγόριθμος (αλγόριθμος του Kruskal)

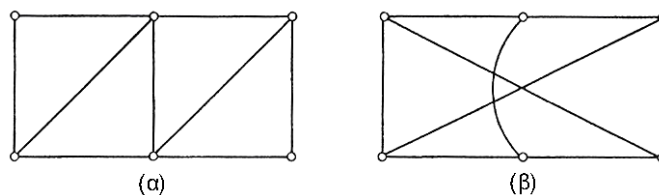
Διατάσσονται οι πλευρές έτσι ώστε τα κόστη τους να αποτελούν αύξουσα ακολουθία. Αρχίζοντας από το κενό γράφημα, αποτελούμενο από τις  $n$  κορυφές του γραφήματος  $G$ , τοποθετείται σε αυτό η πλευρά με το μικρότερο κόστος και η διαδικασία συνεχίζεται κάθε φορά με τις πλευρές ίσου ή αμέσως μεγαλύτερου κόστους, έτσι ώστε να μη σχηματίζεται κύκλος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται  $n-1$  φορές. Αν ο αλγόριθμος καταλήξει σε ένα και μόνο δέντρο αυτό θα αποτελείται από τις  $n-1$  οικονομικότερες πλευρές. Ο αλγόριθμος αυτός προτιμάται γιατί η πολυπλοκότητά του είναι γραμμική.

### 2<sup>ος</sup> αλγόριθμος

Διατάσσονται οι πλευρές έτσι ώστε τα κόστη τους να αποτελούν φθίνουσα ακολουθία. Αρχίζοντας από το γράφημα  $G$ , του οποίου αφαιρείται κάθε φορά η πλευρά με το μεγαλύτερο κόστος, έτσι ώστε να μην καταστρέφεται η συνεκτικότητα του. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι που η αφαίρεση μίας ακόμη πλευράς θα οδηγήσει σε καταστροφή της συνεκτικότητας. Αν ο αλγόριθμος καταλήξει σε ένα και μόνο δέντρο, αυτό θα αποτελείται από τις  $n-1$  οικονομικότερες πλευρές.

### 3<sup>ος</sup> αλγόριθμος (αλγόριθμος του Prim)

Ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόζεται όταν τα κόστη όλων των πλευρών είναι διαφορετικά. Αρχικά ξεκινάει ορίζοντας ομάδες κορυφών και πλευρών ενώ στη συνέχεια επιλέγεται η οικονομικότερη πλευρά που προσπίπτει σε αυτές τις ομάδες, ακόμη και αν είναι κοινή. Στο επόμενο βήμα επιλέγεται η οικονομικότερη από τις εναπομείνουσες πλευρές που να προσπίπτει στις ομάδες αυτές. Αν δύο ομάδες ενωθούν με μία πλευρά τότε συγκροτούν μία νέα ομάδα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να προκύψει για πρώτη φορά συνεκτικό γράφημα και με την προϋπόθεση να μη σχηματίζονται κύκλοι. Βέβαια δεν αποκλείεται να προκύψει ένα



**Σχήμα 2.9:** α) Επίπεδο β) Μη επίπεδο γράφημα [2.5].

σύνολο από συνεκτικά γραφήματα. Η πολυπλοκότητα του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι εκθετική.

Οι παραπάνω αλγόριθμοι μπορούν να γενικευτούν, στην περίπτωση που κάποιες κορυφές απαιτείται να αποτελέσουν ρίζες των σχηματιζόμενων δέντρων. Στην περίπτωση αυτή, οι ορισμοί του κύκλου και του μονοπατιού, αλλά και της συνεκτικότητας γενικεύονται, με την έννοια ότι ως κοινή κορυφή μπορεί να θεωρηθεί και η αναφορά σε δύο ή περισσότερες κορυφές που αποτελούν ρίζες.

Στην πλειοψηφία τους τα ηλεκτρικά δίκτυα παριστάνονται ως επίπεδα γραφήματα (Σχήμα 2.9α). Ο όρος *επίπεδο γράφημα* αφορά το γράφημα που μπορεί να επανασχεδιαστεί στο επίπεδο έτσι ώστε οι πλευρές του να μην τέμνονται, είναι όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία *εμφυτεύσιμο* (embedded) στο επίπεδο [2.3]. Στην επανασχεδίαση βέβαια, η τοπολογία του δικτύου παραμένει η ίδια. Σημειώνεται ότι ένα μη επίπεδο γράφημα (Σχήμα 2.9β) αποτελείται από επίπεδα υπογραφήματα (chips).

Το πρόβλημα που θα χρειαστεί να επιλυθεί προγραμματιστικά σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία είναι η μετάβαση από ένα μη κατευθυνόμενο γράφημα με κύκλους (βροχοειδές δίκτυο), σε ένα κατευθυνόμενο γράφημα που χαρακτηρίζεται ως δάσος κατευθυνόμενων επικαλυπτικών δέντρων με ρίζα (ακτινικό δίκτυο λειτουργίας), ελαχιστοποιώντας μία συνάρτηση (τη συνάρτηση των απωλειών) που μπορεί να οριστεί κατάλληλα σε όλες τις πλευρές του τελικού γραφήματος. Η συνάρτηση υπολογισμού των απωλειών περιγράφεται κατά περίπτωση στην ενότητα 2.6.

## 2.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

### 2.6.1 ΕΙΔΗ ΦΟΡΤΙΩΝ

Ο υπολογισμός των ωμικών απωλειών ενός ηλεκτρικού δικτύου προϋποθέτει τον αρχικό καθορισμό του είδους και της φύσης των φορτίων και κατόπιν την επιλογή της μεθόδου επίλυσης του. Οι κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται τα φορτία ανάλογα με τη φύση τους είναι [2.5]:

1. Φορτία Σταθερής Έντασης, ανεξάρτητα της τάσης τροφοδότησης.

2. Φορτία Σταθερής (πραγματικής) Ισχύος και Σταθερού Συντελεστή Ισχύος.
3. Φορτία Σταθερής Σύνθετης Αντίστασης.
4. Μικτά Φορτία.

Η συμπεριφορά των μικτών φορτίων ορίζεται από τα φορτία των τριών πρώτων κατηγοριών ως ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής ισχύς. Τα φορτία όλων των Υ/Σ σε πραγματικά ΔΔ ανήκουν συνήθως σε αυτή την κατηγορία.

### 2.6.2 ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΦΟΡΤΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ

Η επίλυση του δικτύου λειτουργίας ανάγεται στον υπολογισμό των ρευμάτων των γραμμών μέσω των απαιτήσεων σε ρεύμα των καταναλωτών (φορτίων). Ο υπολογισμός αυτός χρησιμοποιεί μαθηματικά εργαλεία από την άλγεβρα γραφημάτων.

Αρχικά θεωρείται όλο το δίκτυο λειτουργίας ως κατευθυνόμενο γράφημα παριστάνοντας τους ζυγούς με κόμβους και τις γραμμές με κλάδους. Τα δεδομένα που διατίθενται είναι μόνο τα κομβικά ρεύματα των φορτίων και όχι τα ρεύματα τροφοδοσίας των κόμβων-πηγών. Η αλγεβρική περιγραφή του συγκεκριμένου γραφήματος δίνεται από τον πίνακα πρόσπτωσης. Για ένα κατευθυνόμενο γράφημα που έχει  $n$  κόμβους και  $b$  κλάδους ο πλήρης πίνακας πρόσπτωσης  $A_a = [a_{ij}]$  είναι ένας πίνακας  $n \times b$  του οποίου τα στοιχεία έχουν τις ακόλουθες τιμές [2.6]:

$a_{ij} = 1$ , εάν ο κλάδος  $j$  συνδέεται με τον κόμβο  $i$  και ο προσανατολισμός του απομακρύνεται από αυτόν.

$a_{ij} = -1$ , εάν ο κλάδος  $j$  συνδέεται με τον κόμβο  $i$  και ο προσανατολισμός του κατευθύνεται προς αυτόν.

$a_{ij} = 0$ , εάν ο κλάδος  $j$  δεν συνδέεται με τον κόμβο  $i$ .

Για την επίλυση του γραφήματος (δικτύου) δεν χρειάζεται ο υπολογισμός ολόκληρου του πίνακα πρόσπτωσης αλλά μόνο των γραμμών του πίνακα, που αφορούν τους κόμβους-φορτίων. Αν  $A$  είναι ο πίνακας πρόσπτωσης διαμορφωμένος μόνο για τους κόμβους-φορτίων το αλγεβρικό σύστημα των ρευμάτων δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$A \cdot \underline{i} = -I, \quad (2.4)$$

όπου  $\underline{i} = [i_j]$  το διάνυσμα των κλαδικών ρευμάτων και  $I$  το διάνυσμα των κομβικών ρευμάτων των φορτίων.

Όταν το γράφημα είναι κατευθυνόμενο δάσος (ακτινικό δίκτυο λειτουργίας) αποτελούμενο από δέντρα με ρίζα, ο πίνακας  $A$  αφορά όλους τους κόμβους εκτός τους κόμβους των ριζών και είναι τετραγωνικός και αντιστρέψιμος. Συνεπώς, η λύση του αλγεβρικού συστήματος είναι:

$$\underline{i} = -A^{-1} \cdot I \quad (2.5)$$

Από τα κλαδικά ρεύματα προκύπτουν εύκολα οι απώλειες στους κλάδους (γραμμές). Οι συνολικές ωμικές ή πραγματικές απώλειες των μονοφασικών γραμμών είναι:

$$P_{losses} = |\tilde{i}|^2 \cdot R = \sum_{j=1}^b |\tilde{i}_j|^2 \cdot r_j \quad (2.6)$$

Οι συνολικές ωμικές απώλειες των τριφασικών γραμμών είναι:

$$P_{losses} = 3 \cdot |\tilde{i}|^2 \cdot R = 3 \cdot \sum_{j=1}^b |\tilde{i}_j|^2 \cdot r_j \quad (2.7)$$

Ο πίνακας  $R = [r_j]$  αφορά τις ωμικές αντιστάσεις των γραμμών.

Οι συνολικές άεργες απώλειες των μονοφασικών γραμμών είναι:

$$Q_{losses} = |\tilde{i}|^2 \cdot X = \sum_{j=1}^b |\tilde{i}_j|^2 \cdot x_j \quad (2.8)$$

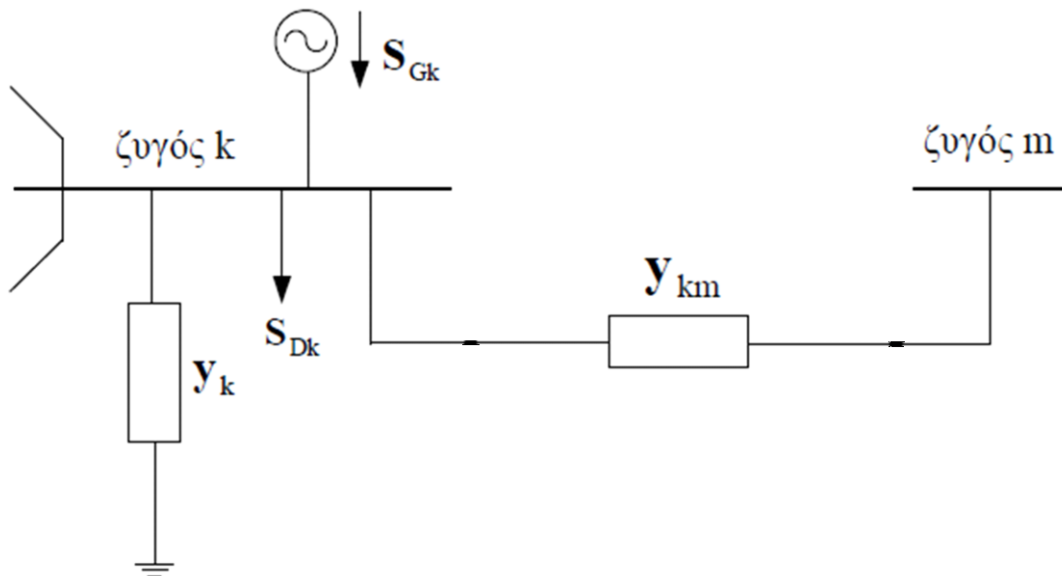
Οι συνολικές άεργες απώλειες των τριφασικών γραμμών είναι:

$$Q_{losses} = 3 \cdot |\tilde{i}|^2 \cdot X = 3 \cdot \sum_{j=1}^b |\tilde{i}_j|^2 \cdot x_j \quad (2.9)$$

Ο πίνακας  $X = [x_j]$  αφορά τις επαγωγικές αντιδράσεις των γραμμών. Ακόμη συμβολίζεται ως  $|\tilde{i}_j|$  το μέτρο του ρεύματος  $\tilde{i}_j$  στον κλάδο  $j$ .

### 2.6.3 ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΜΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Για τον υπολογισμό των απωλειών ενός ΔΔ ακολουθείται η μεθοδολογία υπολογισμού ροών φορτίου του Δικτύου Μεταφοράς [2.7]. Η μοντελοποίηση του δικτύου ξεκινάει από την απλή περίπτωση ενός ζυγού τροφοδοσίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10: Γενικευμένος ζυγός ΔΔ [2.7].

Στο ζυγό  $k$  συνδέεται ο Υ/Σ τροφοδοσίας, που τροφοδοτεί το σύστημα με μιγαδική ισχύ  $\tilde{S}_{Gk}$  και εγχέει ρεύμα  $\tilde{I}_{Gk}$  σε αυτό. Ακόμη στο ζυγό αυτό συνδέονται μια εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα  $\tilde{y}_k$  που παριστάνει οποιοδήποτε συνδυασμό πυκνωτών, αυτεπαγωγών ή φορτίων σταθερής αγωγιμότητας (σταθερής αντίστασης) και ένα φορτίο σταθερής μιγαδικής ισχύς  $\tilde{S}_{Dk}$  το οποίο απορροφά ρεύμα  $\tilde{I}_{Dk}$ . Η τάση στο ζυγό  $k$  συμβολίζεται με  $\tilde{V}_k$ , ενώ η τάση στο ζυγό  $m$  με  $\tilde{V}_m$ . Διευκρινίζεται ότι όλα τα μεγέθη βρίσκονται στο ανά μονάδα.

Το ρεύμα που διαρρέει τη γραμμή τροφοδοσίας μεταξύ των ζυγών  $k$  και  $m$  είναι:

$$\tilde{I}_{km} = \tilde{y}_{km} \cdot \tilde{V}_k - \tilde{y}_{km} \cdot \tilde{V}_m \quad (2.10)$$

Ο νόμος ρευμάτων Kirchhoff στο ζυγό  $k$  δίνει:

$$\tilde{I}_{Gk} - \tilde{I}_{Dk} = \tilde{y}_k \cdot \tilde{V}_k + \sum_{m \in A(k)} \tilde{I}_{km} \quad (2.11)$$

όπου  $A(k)$  είναι το σύνολο που περιέχει τους αριθμούς των ζυγών που είναι απευθείας συνδεδεμένοι με το ζυγό  $k$  μέσω μίας γραμμής.

Από τις σχέσεις (2.10) και (2.11) προκύπτει ότι:

$$\tilde{I}_{Gk} - \tilde{I}_{Dk} = \left( \tilde{y}_k + \sum_{m \in A(k)} \tilde{y}_{km} \right) \cdot \tilde{V}_k - \sum_{m \in A(k)} \tilde{y}_{km} \cdot \tilde{V}_m \quad (2.12)$$

Ορίζοντας:

$$\tilde{Y}_{kk} = \tilde{y}_k + \sum_{m \in A(k)} \tilde{y}_{km} \quad (2.13)$$

$$\tilde{Y}_{km} = -\tilde{y}_{km} \quad (2.14)$$

και αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2.12) προκύπτει ότι:

$$\tilde{I}_{Gk} - \tilde{I}_{Dk} = \tilde{Y}_{kk} \cdot \tilde{V}_k + \sum_{m \in A(k)} \tilde{Y}_{km} \cdot \tilde{V}_m \quad (2.15)$$

Στις μελέτες ροής φορτίου, για κάθε ζυγό  $k$  είναι γνωστές οι μιγαδικές ισχύεις παραγωγής  $\tilde{S}_{Gk}$  και οι μιγαδικές ισχύεις φορτίου  $\tilde{S}_{Dk}$ . Οι μιγαδικές ισχύεις στο ανά μονάδα σύστημα δίνονται από τις σχέσεις:

$$\tilde{S}_{Gk} = \tilde{V}_k \cdot \tilde{I}_{Gk}^* \quad (2.16)$$

$$\tilde{S}_{Dk} = \tilde{V}_k \cdot \tilde{I}_{Dk}^* \quad (2.17)$$

Συνδυάζοντας τις (2.15), (2.16) και (2.17) προκύπτει ότι:

$$\tilde{S}_{Gk} - \tilde{S}_{Dk} = \tilde{Y}_{kk}^* \cdot V_k^2 + \tilde{V}_k \cdot \sum_{m \in A(k)} \tilde{Y}_{km}^* \cdot \tilde{V}_m^*, \quad (2.18)$$

όπου  $V_k$  είναι το μέτρο της τάσης  $\tilde{V}_k$  του ζυγού  $k$ . Η τελευταία εξίσωση αποτελεί το ισοζύγιο ισχύος στο ζυγό  $k$  και μπορεί να αναλυθεί σε πραγματικό και φανταστικό μέρος λαμβάνοντας την πολική μορφή των μιγαδικών τάσεων και την καρτεσιανή μορφή των μιγαδικών ισχύων και των μιγαδικών αγωγιμοτήτων οι οποίες γράφονται ως εξής:

$$\tilde{V}_k = V_k \cdot e^{j\delta_k} = V_k \angle \delta_k \quad (2.19a)$$

$$\tilde{V}_m = V_m \cdot e^{j\delta_m} = V_m \angle \delta_m \quad (2.19\beta)$$

$$\tilde{S}_{Gk} = P_{Gk} + jQ_{Gk} \quad (2.19\gamma)$$

$$\tilde{S}_{Dk} = P_{Dk} + jQ_{Dk} \quad (2.19\delta)$$

$$\tilde{Y}_{kk} = G_{kk} + jB_{kk} \quad (2.19\sigma\tau)$$

$$\tilde{Y}_{km} = G_{km} + jB_{km} \quad (2.19\zeta)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.19α) έως (2.19ζ) στη σχέση (2.18) προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} (P_{Gk} + jQ_{Gk}) - (P_{Dk} + jQ_{Dk}) &= (G_{kk} + jB_{kk})^* \cdot V_k^2 + (V_k \angle \delta_k) \cdot \sum_{m \in A(k)} (G_{km} + jB_{km})^* \cdot (V_m \angle \delta_m)^* \Rightarrow \\ (P_{Gk} + jQ_{Gk}) - (P_{Dk} + jQ_{Dk}) &= (G_{kk} - jB_{kk}) \cdot V_k^2 + (V_k \angle \delta_k) \cdot \sum_{m \in A(k)} (G_{km} + jB_{km}) \cdot (V_m \angle -\delta_m) \Rightarrow \\ (P_{Gk} + jQ_{Gk}) - (P_{Dk} + jQ_{Dk}) &= (G_{kk} - jB_{kk}) \cdot V_k^2 + V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot (G_{km} - jB_{km}) \cdot \angle(\delta_k - \delta_m) \Rightarrow \\ (P_{Gk} + jQ_{Gk}) - (P_{Dk} + jQ_{Dk}) &= (G_{kk} - jB_{kk}) \cdot V_k^2 + V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot (G_{km} - jB_{km}) \cdot [\cos(\delta_k - \delta_m) + j \sin(\delta_k - \delta_m)] \Rightarrow \\ (P_{Gk} + jQ_{Gk}) - (P_{Dk} + jQ_{Dk}) &= (G_{kk} - jB_{kk}) \cdot V_k^2 + V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot \left\{ \begin{aligned} &[G_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) + B_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m)] \\ &[-j[-G_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) + B_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m)]] \end{aligned} \right\} \end{aligned}$$

Το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της τελευταίας σχέσης είναι:

$$P_{Gk} - P_{Dk} = G_{kk} \cdot V_k^2 - V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot \alpha_{km} \quad (2.20)$$

$$Q_{Gk} - Q_{Dk} = -B_{kk} \cdot V_k^2 - V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot \beta_{km}, \quad (2.21)$$

όπου

$$\alpha_{km} = -G_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) - B_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) \quad (2.22)$$

$$\beta_{km} = -G_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) + B_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m). \quad (2.23)$$

Οι εξισώσεις (2.20) και (2.21) αποτελούν εξισώσεις ροής φορτίου με πραγματικές μεταβλητές, για ένα ζυγό  $k$ .

Οι εξισώσεις (2.20) έως (2.23) γενικεύονται με τη γενίκευση των σύνθετων αγωγιμοτήτων ως εξής:

1. Τα στοιχεία  $\tilde{Y}_{ii} = G_{ii} + jB_{ii}$  είναι το άθροισμα των σύνθετων αγωγιμοτήτων των γραμμών (κλάδων) που συνδέονται στο ζυγό (κόμβο)  $i$ .
2. Τα στοιχεία  $\tilde{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$  είναι το αρνητικό άθροισμα των σύνθετων αγωγιμοτήτων των γραμμών (κλάδων) που συνδέουν τους ζυγούς (κόμβους)  $i$  και  $j$ .

Όπως γίνεται φανερό τα φορτία σταθερής σύνθετης αντίστασης (αγωγιμότητας) είναι ενσωματωμένα στις γενικευμένες σύνθετες αγωγιμότητες του ηλεκτρικού συστήματος (δικτύου). Έτσι, οι ζυγοί ενός ΔΔ ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες δανειζόμενες από τα Δίκτυα Μεταφοράς [2.7]:

1. Ζυγός Ταλάντωσης ή Ζυγός Αναφοράς, είναι ο ζυγός του δικτύου για τον οποίο η πραγματική και η άεργη εγχεόμενη ισχύς αφήνονται ελεύθερες και

στον οποίο το μέτρο τάσης ( $V$ ) και η φασική γωνία ( $\delta$ ) θεωρούνται γνωστά. Σε ένα ακτινικό δίκτυο λειτουργίας οι ζυγοί ταλάντωσης είναι οι ρίζες των δέντρων του δικτύου. Συνήθεις τιμές:  $\delta = 0^\circ$ ,  $V = 1\alpha.\mu$ .

2. Ζυγός Φορτίου ή Ζυγός PQ, είναι ο ζυγός για τον οποίο η έγχυση πραγματικής ισχύος ( $P$ ) και αέργου ισχύος ( $Q$ ) θεωρούνται γνωστές. Ο ζυγός αυτός δεν είναι άλλος από αυτόν που αφορά φορτίο σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος.

Η επίλυση ενός ακτινικού δικτύου λειτουργίας γίνεται κατά τμήματα, δηλαδή η επίλυση γίνεται ξεχωριστά για κάθε δέντρο με ρίζα που περιλαμβάνει. Έτσι για κάθε δέντρο με ρίζα ακολουθείται η εξής αρίθμηση: Ζυγός 1 είναι ο ζυγός ταλάντωσης, ενώ οι ζυγοί 2 έως  $n-1$  είναι οι ζυγοί φορτίου. Οι μεταβλητές που περιγράφουν αυτό το τμήμα του δικτύου είναι:

1. Οι φασικές γωνίες τάσεων όλων των ζυγών εκτός από το ζυγό ταλάντωσης,  $\delta_2$  έως  $\delta_n$ .
2. Τα μέτρα των τάσεων όλων των ζυγών εκτός από το ζυγό ταλάντωσης,  $V_2$  έως  $V_n$ .

Οι μεταβλητές αυτές αποτελούν το διάνυσμα κατάστασης  $\underline{x}$ , όπου

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \underline{\delta} \\ \underline{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \delta_n \\ V_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Όλες οι εξισώσεις που περιγράφουν το τμήμα του δικτύου είναι:

1.  $n-1$  εξισώσεις πραγματικής ισχύος μία για κάθε ζυγό εκτός από το ζυγό ταλάντωσης. Οι εξισώσεις αυτές γράφονται σε μορφή πίνακα:

$$\underline{b}_P = \underline{f}_P(\underline{x}), \quad (2.25)$$

όπου  $\underline{b}_P, \underline{f}_P(\underline{x})$  είναι διανύσματα διάστασης  $n-1$ , με το στοιχείο που αντιστοιχεί στο ζυγό  $k$  να ορίζεται βάσει της σχέσης (2.20), ως εξής:

$$b_{Pk} = P_{Gk} - P_{Dk} \quad (2.26)$$

$$f_{Pk} = G_{kk} \cdot V_k^2 - V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot \alpha_{km}, \quad (2.27)$$

όπου τα  $\alpha_{km}$  έχουν οριστεί στη σχέση (2.22).

2.  $n-1$  εξισώσεις πραγματικής ισχύος μία για κάθε ζυγό εκτός από το ζυγό ταλάντωσης. Οι εξισώσεις αυτές γράφονται σε μορφή πίνακα:

$$\underline{b}_Q = \underline{f}_Q(\underline{x}), \quad (2.28)$$

όπου  $\underline{b}_Q, \underline{f}_Q(\underline{x})$  είναι διανύσματα διάστασης  $n-1$ , με το στοιχείο που αντιστοιχεί στο ζυγό  $k$  να ορίζεται βάσει της σχέσης (2.21), ως εξής:

$$b_{Qk} = Q_{Gk} - Q_{Dk} \quad (2.29)$$

$$f_{Qk} = -B_{kk} \cdot V_k^2 - V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot \beta_{km}, \quad (2.30)$$

όπου τα  $\beta_{km}$  έχουν οριστεί στη σχέση (2.23).

Έτσι οι πίνακες των εξισώσεων (2.25) και (2.28) μπορούν να γραφούν σε ενιαία μορφή πινάκων ως εξής:

$$\underline{b} = \underline{f}(\underline{x}), \quad (2.31)$$

όπου

$$\underline{b} = \begin{bmatrix} \underline{b}_P \\ \underline{b}_Q \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\underline{f}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \underline{f}_P(\underline{x}) \\ \underline{f}_Q(\underline{x}) \end{bmatrix}. \quad (2.33)$$

Η επίλυση του συστήματος των μη γραμμικών εξισώσεων γίνεται με την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson, η οποία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Θεώρηση μίας αρχικής τιμής του διανύσματος κατάστασης  $\underline{x} = \underline{x}^{(0)}$ . Μηδενισμός του μετρητή ανακυκλώσεων  $i = 0$ .
2. Υπολογισμός των τιμών  $\underline{f}(\underline{x}^{(i)})$  και έλεγχος αν ικανοποιείται η σχέση:

$$\left| \underline{b} - \underline{f}(\underline{x}^{(i)}) \right| < \varepsilon, \quad (2.34)$$

όπου  $\varepsilon$  η απαιτούμενη ακρίβεια, η οποία πρέπει να ικανοποιείται για κάθε στοιχείο των πινάκων  $\underline{b}$  και  $\underline{f}(\underline{x}^{(i)})$ .

3. Αν η ανίσωση (2.34) αυτή δεν ικανοποιείται για όλα τα στοιχεία των πινάκων, τότε με χρήση του  $\underline{x}^{(i)}$  υπολογίζεται το νέο διάνυσμα κατάστασης που είναι:

$$\underline{x}^{(i+1)} = \underline{x}^{(i)} + J(\underline{x}^{(i)})^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{b}_P - \underline{f}_P(\underline{x}^{(i)}) \\ \underline{b}_Q - \underline{f}_Q(\underline{x}^{(i)}) \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Η Ιακωβιανή μήτρα για δεδομένη κατάσταση  $\underline{x}^{(i)}$  υπολογίζεται ως εξής:



$$J(\underline{x}^{(i)}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_P}{\partial \underline{x}}(\underline{x}^{(i)}) \\ \frac{\partial f_Q}{\partial \underline{x}}(\underline{x}^{(i)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_P}{\partial \underline{\delta}}(\underline{x}^{(i)}) & \frac{\partial f_P}{\partial \underline{V}}(\underline{x}^{(i)}) \\ \frac{\partial f_Q}{\partial \underline{\delta}}(\underline{x}^{(i)}) & \frac{\partial f_Q}{\partial \underline{V}}(\underline{x}^{(i)}) \end{bmatrix}, \quad (2.36)$$

όπου τα στοιχεία της Ιακωβιανής, λόγω των σχέσεων (2.27) και (2.30) δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{\partial f_{Pk}}{\partial \delta_k} = V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot \beta_{km} \quad (2.37\alpha)$$

$$\frac{\partial f_{Pk}}{\partial \delta_m} = -V_k \cdot V_m \cdot \beta_{km} \quad (2.37\beta)$$

$$\frac{\partial f_{Pk}}{\partial V_k} = 2 \cdot V_k \cdot G_{kk} - \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot \alpha_{km} \quad (2.37\gamma)$$

$$\frac{\partial f_{Pk}}{\partial V_m} = -V_k \cdot \alpha_{km} \quad (2.37\delta)$$

$$\frac{\partial f_{Qk}}{\partial \delta_k} = -V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot \alpha_{km} \quad (2.37\epsilon)$$

$$\frac{\partial f_{Qk}}{\partial \delta_m} = V_k \cdot V_m \cdot \alpha_{km} \quad (2.37\sigma\tau)$$

$$\frac{\partial f_{Qk}}{\partial V_k} = -2 \cdot V_k \cdot B_{kk} - \sum_{m \in A(k)} V_m \cdot \beta_{km} \quad (2.37\zeta)$$

$$\frac{\partial f_{Qk}}{\partial V_m} = -V_k \cdot \beta_{km} \quad (2.37\eta)$$

Σε αυτό το βήμα ακολουθεί η ενημέρωση του μετρητή ανακυκλώσεων  $i = i + 1$  και η μετάβαση στο 2<sup>ο</sup> βήμα.

4. Αν η ανίσωση (2.34) ικανοποιείται, τότε αυτή η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται.

Στη συνέχεια εφόσον υπολογίστηκε το διάνυσμα κατάστασης  $\underline{x}$  και είναι γνωστά τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων σε όλους τους ζυγούς  $PQ$  μπορεί να υπολογιστεί η ροή ισχύος σε κάθε γραμμή. Έτσι, για μία γραμμή που συνδέει τους ζυγούς  $k$  και  $m$ , οι ροές πραγματικής και άεργης ισχύος από τον  $k$  και  $m$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$P_{km} = g_{km} \cdot V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot \alpha_{km} \quad (2.38)$$

$$Q_{km} = -b_{km} \cdot V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot \beta_{km}, \quad (2.39)$$

όπου  $g_{km}$  και  $b_{km}$  είναι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της αγωγιμότητας της γραμμής, ενώ τα  $\alpha_{km}$  και  $\beta_{km}$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$\alpha_{km} = g_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) + b_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) \quad (2.40)$$

$$\beta_{km} = g_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) - b_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) \quad (2.41)$$

Συνεπώς, οι απώλειες πραγματικής και άεργης ισχύος σε μία γραμμή  $km$  είναι:

$$P_{losses,km} = P_{km} + P_{mk} \quad (2.42)$$

$$Q_{losses,km} = Q_{km} + Q_{mk} \quad (2.43)$$

Επομένως, σε ένα δέντρο με ρίζα (πηγή)  $n$  κόμβων (ζυγών) ενός ακτινικού δικτύου λειτουργίας οι συνολικές απώλειες είναι:

$$P_{losses} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (P_{ij} + P_{ji}) \quad (2.44)$$

$$Q_{losses} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (Q_{ij} + Q_{ji}) \quad (2.45)$$

Όπως γίνεται φανερό οι συνολικές απώλειες του ακτινικού δικτύου λειτουργίας αποτελούν το άθροισμα των επιμέρους απωλειών όλων των δέντρων με ρίζα (πηγή).

## 2.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, τόμος I, για τους σπουδαστές της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π., Αθήνα 1994, σελ. 23-43.
- [2.2] Π. Ντοκόπουλος, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, τόμος 2, Θεσσαλονίκη: Παρατηρητής, 1986, σελ. 369-383.
- [2.3] Α. Χ. Παπαϊωάννου, *Θεωρία Γραφημάτων*, για τους σπουδαστές της σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004, σελ. 1-26.
- [2.4] G. Agnarsson, R. Greenlaw, *Graph Theory: Modeling, Applications, and Algorithms*, Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc., 2007, pp. 66-83.
- [2.5] Γ. Ι. Ε. Πεπόνης, «Συμβολή στην Ανάπτυξη Ευριστικών Μεθόδων Βελτιστοποιήσεως των Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας,» Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π., 1996.
- [2.6] N. Balabanian, T. A. Bickart, *Electrical Network Theory*, New York, London, Sydney, Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 1969, pp. 70-77.
- [2.7] Γ. Κονταξής, Ν. Χατζηαργυρίου, *Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας*, για τους σπουδαστές της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003, σελ. 26-49.

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η Υπολογιστική Νοημοσύνη (ΥΝ) είναι ένα ταχέως αναπτυσσόμενο ερευνητικό πεδίο που ασχολείται με το σημαντικό θέμα της δημιουργίας πιο «έξυπνων» συστημάτων. Η ΥΝ περιλαμβάνει μεθόδους που στοχεύουν στη διευκόλυνση της ανάπτυξης ευφυούς συμπεριφοράς σε πολύπλοκες και μεταβαλλόμενες καταστάσεις. Οι τρεις βασικοί πυλώνες της ΥΝ είναι:

1. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks) .
2. Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic).
3. Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms).

Τα Νευρωνικά Δίκτυα [3.1] είναι δίκτυα αποτελούμενα από υπολογιστικούς κόμβους (νευρώνες, νευρώνια), συνδεδεμένους μεταξύ τους. Είναι εμπνευσμένα από το Κεντρικό Νευρικό Σύστημα, το οποίο προσπαθούν να προσομοιώσουν. Οι νευρώνες είναι τα δομικά στοιχεία του δικτύου. Υπάρχουν δύο είδη νευρώνων, οι νευρώνες εισόδου και οι υπολογιστικοί νευρώνες (συναρτήσεις). Οι νευρώνες εισόδου δεν υπολογίζουν τίποτα, μεσολαβούν όμως ανάμεσα στις εισόδους του δικτύου και τους υπολογιστικούς νευρώνες.

Η Ασαφής Λογική είναι μια επέκταση της κλασσικής αριστοτέλειας λογικής. Μια πρόταση μπορεί να είναι αληθής με κάποιο βαθμό αληθείας, και όχι απλά αληθής ή ψευδής. Με απλά λόγια, η ασαφής λογική λέει ότι τα πράγματα συχνά δεν είναι «άσπρο-μαύρο» αλλά «αποχρώσεις του γκρι».

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ) είναι αλγόριθμοι, οι οποίοι προσπαθούν να μιμηθούν τη διαδικασία της βιολογικής εξέλιξης. Προσπαθούν να βρουν τη λύση ενός προβλήματος με το να προσομοιώνουν την εξέλιξη ενός πληθυσμού «λύσεων» του

προβλήματος. Αυτός είναι ο λόγος που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία και ως μέρος ενός ευρύτερου συνόλου αλγορίθμων, τους εξελικτικούς. Έχουν μεγάλη ενδογενή ευελιξία και ελευθερία να επιλέγουν μια επιθυμητή βέλτιστη λύση σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προβλήματος.

### 3.2 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΕΙΔΩΝ

Η θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών (Evolution of Species) [3.2] που αναπτύχθηκε από τον Δαρβίνο, σκοπό έχει να δώσει μία εξήγηση για το φαινόμενο της ζωής, την προέλευση και τις βασικές λειτουργίες της. Τα κυριότερα σημεία της, που σχετίζονται και ερμηνεύουν τον τρόπο λειτουργίας των ΓΑ, είναι τα εξής:

1. Δεν υπάρχει αντικειμενική βάση διαχωρισμού των ζωντανών οργανισμών του ίδιου είδους σε ανώτερους και κατώτερους. Οι συνθήκες του περιβάλλοντος είναι οι παράγοντες που θα καθορίσουν ποιοι από αυτούς θα ζήσουν για να αναπαραχθούν και ποιοι όχι. Έτσι, τα κληροδοτούμενα χαρακτηριστικά των αναπαραγωγικά επιτυχημένων ατόμων γίνονται περισσότερα στην επόμενη γενιά. Όλος ο πληθυσμός προσπαθεί να προσαρμοστεί σε κάθε αλλαγή του περιβάλλοντος προκειμένου να επιβιώσει ως είδος.
2. Τα χαρακτηριστικά και η δομή των ατόμων κωδικοποιούνται σε πολύπλοκα οργανικά μόρια, τα χρωμοσώματα (chromosomes). Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από μικρότερα μέρη, τα γονίδια (genes). Το σύνολο της γενετικής πληροφορίας που είναι κωδικοποιημένο στα γονίδια ονομάζεται γονότυπος (genotype). Η αποκωδικοποίηση του γονότυπου δίνει το σύνολο των «ορατών» χαρακτηριστικών του και της συμπεριφοράς κάθε ατόμου, αποτελεί το λεγόμενο φαινότυπο (phenotype).
3. Η αναπαραγωγή (reproduction) δίνει ένα νέο οργανισμό (απόγονο), του οποίου τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια που προέρχονται τα μισά από τον πατέρα και τα μισά από τη μητέρα. Βέβαια στους ΓΑ αυτό δεν ισχύει πάντα. Έτσι, ο κάθε απόγονος οφείλει τα χαρακτηριστικά του στα γονίδια που κληρονόμησε από κάθε γονέα. Το κάθε χαρακτηριστικό μπορεί να οφείλεται σε ένα ή περισσότερα γονίδια τα οποία μπορεί να συμφωνούν ή να επικρατεί το ένα από αυτά. Στην δεύτερη περίπτωση το γονίδιο που τελικά καθορίζει το χαρακτηριστικό λέγεται κυρίαρχο ή επικρατές (dominant) και το άλλο υπολειπόμενο (recessive). Το υπολειπόμενο γονίδιο μπορεί όμως να περάσει στην επόμενη γενιά και να μετατραπεί και αυτό σε κυρίαρχο στον επόμενο απόγονο. Γονίδια που είναι υπεύθυνα για το ίδιο χαρακτηριστικό λέγονται αλληλόμορφα (alleles).
4. Μία δεύτερη λειτουργία του φαινομένου της εξέλιξης, μετά την αναπαραγωγή αποτελεί η μετάλλαξη (mutation). Κατά τη μετάλλαξη γίνεται με τυχαίο τρόπο η αλλαγή της δομής των χρωμοσωμάτων λόγω εξωγενών παραγόντων.

Η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους ΓΑ είναι η μίμηση των παραπάνω μηχανισμών της φύσης.

### 3.3 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Οι ΓΑ, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιούν έννοιες της γενετικής βιολογίας. Έτσι, κατά αναλογία με τους ζωντανούς οργανισμούς, αναφέρονται και αυτοί σε άτομα ή γονότυπα ενός πληθυσμού. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στους ΓΑ τα άτομα σχεδόν πάντα περιέχουν ένα χρωμόσωμα και όχι πλειάδα χρωμοσωμάτων όπως συμβαίνει στους ζωντανούς οργανισμούς. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από στοιχεία που ονομάζονται γονίδια και είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Η κατάσταση (μορφή) κάθε γονιδίου επηρεάζει ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά του ατόμου στο οποίο ανήκει. Η θέση στην οποία βρίσκεται το γονίδιο μέσα στο χρωμόσωμα καλείται τόπος (loci) [3.3]. Οι διαφορετικές καταστάσεις που μπορεί να πάρει το γονίδιο καλούνται αλληλόμορφες.

Στους ΓΑ κάθε γονότυπος αναπαριστά μια κωδικοποιημένη πιθανή λύση στο προς επίλυση πρόβλημα. Η κωδικοποίηση γίνεται σε συμβολοσειρές πεπερασμένου μήκους κάνοντας χρήση ενός πεπερασμένου αλφαβήτου. Μια απλή κωδικοποίηση θα μπορούσε να είναι μια δυαδική συμβολοσειρά. Στην περίπτωση αυτή τα ψηφία της αποτελούν τα γονίδια με καταστάσεις 0 ή 1, ενώ η ίδια αποτελεί ένα χρωμόσωμα. Το μεταφρασμένο (αποκωδικοποιημένο) περιεχόμενο καλείται φαινότυπος. Το στοιχείο της κωδικοποίησης είναι αυτό που επιτρέπει στους ΓΑ να κάνουν παράλληλη επεξεργασία δεδομένων.

Οι ΓΑ ανήκουν στην κατηγορία των στοχαστικών αλγορίθμων, με την έννοια ότι χρησιμοποιούν πιθανοθεωρητικούς κανόνες αναζήτησης και όχι ντετερμινιστικούς. Η χρήση των πιθανοθεωρητικών κανόνων αναζήτησης είναι κυρίαρχο γνώρισμα των ΓΑ, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι όλη η διαδικασία βαδίζει στην τύχη [3.2]. Το στοιχείο της τύχης που εφαρμόζεται μέσω των γενετικών τελεστών, χρησιμοποιείται ως οδηγός για αναζήτηση σε περιοχές πιθανών λύσεων, που αναμένεται να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα.

Οι ΓΑ διατηρούν ένα σταθερό πληθυσμό πιθανών λύσεων πάνω στον οποίο πειραματίζονται. Αυτό το γεγονός δίνει στους ΓΑ τη δυνατότητα να κάνουν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα. Σε πολλές μεθόδους βελτιστοποίησης, η επεξεργασία γίνεται βήμα-βήμα πηγαίνοντας από σημείο σε σημείο του πεδίου ορισμού του προβλήματος, με τον κίνδυνο να περιοριστεί η αναζήτηση σε μια περιοχή τοπικού ακρότατου που δεν είναι όμως ολικό. Οι ΓΑ εξαλείφουν αυτόν τον κίνδυνο ενεργώντας ταυτόχρονα πάνω σε ένα ευρύ σύνολο σημείων (σύνολο από συμβολοσειρές), ώστε να μπορούν να «ανεβαίνουν» πολλούς λόφους (hillclimbing) ταυτόχρονα, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα να βρουν μία λάθος κορυφή [3.2]. Ο αλγόριθμος καθώς τρέχει, δημιουργεί νέους πληθυσμούς απογόνων, που συγκλίνουν προοδευτικά προς την επιθυμητή λύση, εφόσον το

μέγεθος του πληθυσμού που επιλέχθηκε, καλύπτει αντιπροσωπευτικά ένα μεγάλο εύρος τιμών.

Ο διαχωρισμός και η αξιολόγηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με τη βοήθεια μιας αντικειμενικής συνάρτησης ή συνάρτησης καταλληλότητας (objective ή fitness function), η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στον οποίο εξελίσσεται ο αλγόριθμος. Στη βιβλιογραφία αυτή η συνάρτηση αναφέρεται και ως συνάρτηση αξιολόγησης ή συνάρτηση ικανότητας. Οι ΓΑ είναι εξαιρετικά ευέλικτοι, αφού αξιοποιούν μόνο όση πληροφορία περιέχεται στην αντικειμενική συνάρτηση και καμία άλλη επιπρόσθετη.

Κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής εξέτασης  $t$ , ο ΓΑ διατηρεί ένα πληθυσμό από πιθανές λύσεις:

$$\Delta(t) = \{x_1^t, \dots, x_n^t\}$$

Κάθε λύση  $x_i^t$  αξιολογείται και δίνει ένα μέτρο της καταλληλότητας και ορθότητάς της μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης. Αφού ολοκληρωθεί η αξιολόγηση όλων των στοιχείων του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός (επαναληπτική εξέταση  $t+1$ ) που προκύπτει από την επιλογή των πιο κατάλληλων (καλύτερων) στοιχείων του πληθυσμού της προηγούμενης γενιάς. Σε αυτά τα στοιχεία βασίζονται οι νέες πιθανές λύσεις οι οποίες προκύπτουν από τις μετατροπές τους μέσω των διαδικασιών της διασταύρωσης (crossover ή mating) και της μετάλλαξης (mutation). Η διασταύρωση συνδυάζει τα στοιχεία δύο χρωμοσωμάτων γονέων για να δημιουργήσει δύο νέους απογόνους ανταλλάσσοντας αντίστοιχα κομμάτια από τους γονείς, ενώ η μετάλλαξη πραγματοποιεί τυχαία αλλαγή της κατάστασης των γονιδίων με πιθανότητα ίση με τον ρυθμό μετάλλαξης (mutation rate).

Συνοψίζοντας, ένας ΓΑ επίλυσης ενός συγκεκριμένου προβλήματος αποτελείται από τα παρακάτω πέντε τμήματα:

1. Μία γενετικά κωδικοποιημένη αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος.
2. Ένα τρόπο δημιουργίας ενός αρχικού πληθυσμού των πιθανών λύσεων.
3. Μια αντικειμενική συνάρτηση αξιολόγησης που παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος κατατάσσοντας τις λύσεις με βάση την καταλληλότητά τους.
4. Γενετικούς τελεστές στους οποίους οφείλεται η σύνθεση των απογόνων.
5. Καθορισμός παραμέτρων του ΓΑ, όπως το μέγεθος του πληθυσμού όσο και των πιθανοτήτων εφαρμογής των γενετικών τελεστών.

### 3.4 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Ένας τυπικός ΓΑ περιλαμβάνει απλές λειτουργίες οι οποίες όμως έχουν μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Το στοιχείο αυτό δίνει σε αυτούς τους αλγορίθμους μεγάλη ευρωστία.

### 3.4.1 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

Τα στοιχεία που συνδέουν το ΓΑ με το πρόβλημα που καλείται να επιλύσει είναι η κωδικοποίηση και η αντικειμενική συνάρτηση. Η κωδικοποίηση αφορά την αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία τους από τον υπολογιστή. Κύριος στόχος της κωδικοποίησης είναι να αναπαριστά με ικανοποιητικό τρόπο τα επιμέρους χαρακτηριστικά των λύσεων, ώστε να διευκολύνει τις επόμενες λειτουργίες του αλγορίθμου. Αποτέλεσμα της κωδικοποίησης πρέπει να είναι η ύπαρξη ομοιοτήτων ανάμεσα στα άτομα με σκοπό την κατάλληλη εκμετάλλευσή τους, διότι οι ομοιότητες βοηθούν την κατεύθυνση της αναζήτησης. Συνήθως, σε προβλήματα βελτιστοποίησης μαθηματικών συναρτήσεων, η δυαδική συμβολοσειρά καθορισμένου μήκους είναι η πιο βολική και αποδοτική κωδικοποίηση.

Το δεύτερο βασικό στοιχείο σύνδεσης ενός ΓΑ με το πρόβλημα που λύνει είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτή παίρνει ως είσοδο μια κωδικοποιημένη συμβολοσειρά ή καμιά φορά και την ίδια την συμβολοσειρά και επιστρέφει μία τιμή, τις περισσότερες φορές πραγματική, που είναι ανάλογη του πόσο καλά λύνει το πρόβλημα η συγκεκριμένη συμβολοσειρά. Αποτελεί δε καθοριστικό παράγοντα επιβίωσης ή όχι του ατόμου αλλά και αναπαραγωγής του. Η αντικειμενική συνάρτηση παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος στο υπολογιστικό μοντέλο και καθορίζει σημαντικά τη χρονική διάρκεια της όλης διαδικασίας.

### 3.4.2 ΔΟΜΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Με τον καθορισμό της κωδικοποίησης και της αντικειμενικής συνάρτησης ορίζεται το πρόβλημα και ολοκληρώνεται το πρώτο στάδιο εφαρμογής του ΓΑ. Στη συνέχεια οι λειτουργίες του επόμενου σταδίου σχεδιάζονται να λειτουργούν ανεξάρτητα από το πώς έγινε η αναπαράσταση του ατόμου στο τεχνητό περιβάλλον και με ποιον τρόπο αξιολογούνται οι ικανότητές του. Εδώ γίνεται ο κύριος όγκος της εργασίας και παράγεται το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Η δομή ενός ΓΑ αποτελείται από τα παρακάτω βήματα [3.2]:

1. Αρχικοποίηση (Initialization).
2. Αποκωδικοποίηση (Decoding).
3. Υπολογισμός καταλληλότητας (Fitness calculation or evaluation).
4. Αναπαραγωγή (Reproduction).
  - I. Επιλογή (Selection).
  - II. Διασταύρωση (Crossover or mating).
  - III. Μετάλλαξη (Mutation).
5. Επανάληψη από το βήμα (2) μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου.

Η αρχικοποίηση είναι το βήμα στο οποίο δημιουργείται ο αρχικός πληθυσμός, πάνω στον οποίο θα λάβουν χώρα οι λειτουργίες του ΓΑ. Ο πληθυσμός αυτός συνήθως διαλέγεται με τυχαίο τρόπο ανάμεσα σε όλες τις δυνατές τιμές των μεταβλητών του προβλήματος, ενώ το μέγεθος ορίζεται από τον χρήστη, ώστε να είναι όσο το δυνατόν αντιπροσωπευτικό. Σε μερικές υλοποιήσεις, η επιλογή των αρχικών σημείων γίνεται με ευρετικές μεθόδους (heuristic methods), δίνοντας εξαρχής έναν προσανατολισμό στην αναζήτηση.

Αφού προκύψει η πρώτη γενιά, ο ΓΑ εισέρχεται στο επαναληπτικό μέρος του. Ο πληθυσμός πρέπει να αξιολογηθεί, δηλαδή να μετρηθεί η ικανότητα επιβίωσης του κάθε ατόμου χωριστά. Για να συμβεί αυτό πρέπει να γίνει αποκωδικοποίηση χαρακτηριστικών και έπειτα υπολογισμός της απόδοσης των ατόμων, μέσω υπολογισμού των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης. Κατά αναλογία με το φυσικό μοντέλο, το ρόλο του γονότυπου στο τεχνητό μοντέλο παίζει τις περισσότερες φορές η δομή της συμβολοσειράς με τα δυαδικά ψηφία ως αντίστοιχα των γονιδίων. Ο φαινότυπος αναφέρεται στην παρατηρήσιμη εμφάνιση μιας συμβολοσειράς, δηλαδή στο πώς φαίνεται στο περιβάλλον της. Περιβάλλον, όμως, θεωρείται η αντικειμενική συνάρτηση, άρα ο φαινότυπος μιας συμβολοσειράς αντιστοιχεί στην αποκωδικοποιημένη τιμή της, που ανήκει στο πεδίο ορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο υπολογισμός της καταλληλότητας είναι θεμελιώδη λειτουργία για το ΓΑ.

Στη συνέχεια ακολουθεί η σημαντικότερη λειτουργία του ΓΑ, η αναπαραγωγή. Η αναπαραγωγή περιλαμβάνει τα εξής στάδια: επιλογή, διασταύρωση και μετάλλαξη. Μέσω της διαδικασίας της επιλογής καθορίζεται ποια άτομα από τον υπάρχοντα πληθυσμό θα έχουν την ευκαιρία να λάβουν μέρος στην αναπαραγωγή και να κληροδοτήσουν στην επόμενη γενιά μέρος ή το σύνολο των χαρακτηριστικών τους. Στόχος της λειτουργίας της επιλογής είναι η εκθετική αύξηση των ικανότερων ατόμων και μετά από αναπαραγωγή αρκετών γενεών την επικράτηση τους. Έτσι, κάθε τεχνική επιλογής πρέπει να δίνει μεγαλύτερες πιθανότητες σε άτομα που αξιολογούνται μέσα στο τεχνητό περιβάλλον ως πιο ικανά. Ο τελεστής επιλογής μπορεί να εκφραστεί σε αλγοριθμική βάση χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση καταλληλότητας άμεσα ή έμμεσα. Ένας έμμεσος τρόπος, βασίζεται στη μέθοδο βαθμολογικής στάθμισης (rank weighting method) που θα αναπτυχθεί αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Σε αυτό το κεφάλαιο χάρη πληρότητας παρουσιάζεται η άμεση μέθοδος της εξαναγκασμένης ρουλέτας.

Η κατασκευή μιας τέτοιας ρουλέτας προκειμένου να βρεθεί το άτομο που αντιστοιχεί στο **μέγιστο** της αντικειμενικής συνάρτησης έχει ως εξής [3.2]:

1. Υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης  $eval(x_i)$  για κάθε χρωμόσωμα  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, n_p$ , όπου  $n_p$  το πλήθος των ατόμων του πληθυσμού.
2. Υπολογίζεται το άθροισμα όλων των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης

$$\text{του πληθυσμού: } F = \sum_{i=1}^{n_p} eval(x_i)$$



3. Υπολογίζεται η πιθανότητα επιλογής  $p_i$  για κάθε χρωμόσωμα  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, n_p$ :

$$p_i = \frac{eval(x_i)}{F}$$

4. Τέλος, υπολογίζεται η αθροιστική πιθανότητα  $q_i$  για κάθε χρωμόσωμα  $x_i$ ,

$$i = 1, \dots, n_p : q_i = \sum_{j=1}^i p_j$$

Παρόμοια, η κατασκευή εξαναγκασμένης ρουλέτας προκειμένου να βρεθεί το άτομο που αντιστοιχεί στο **ελάχιστο** της αντικειμενικής συνάρτησης έχει ως εξής:

1. Υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης  $eval(x_i)$  για κάθε χρωμόσωμα  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, n_p$ , όπου  $n_p$  το πλήθος των ατόμων του πληθυσμού.

2. Υπολογίζεται το άθροισμα όλων των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης

$$\text{του πληθυσμού: } F = \sum_{i=1}^{n_p} \frac{1}{eval(x_i)}$$

3. Υπολογίζεται η πιθανότητα επιλογής  $p_i$  για κάθε χρωμόσωμα  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, n_p$ :

$$p_i = \frac{1/eval(x_i)}{F}$$

4. Τέλος, υπολογίζεται η αθροιστική πιθανότητα  $q_i$  για κάθε χρωμόσωμα  $x_i$ ,

$$i = 1, \dots, n_p : q_i = \sum_{j=1}^i p_j$$

Για την επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα αποτελέσουν ένα προσωρινό πληθυσμό εκτελούνται  $n_p$  περιστροφές της ρουλέτας. Ο νέος αυτός πληθυσμός αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως δεξαμενή ζευγαρώματος (mating pool). Πιο συγκεκριμένα ακολουθούνται τα εξής βήματα [3.2]:

1. Επιλέγεται τυχαία ένας αριθμός  $u$  μεταξύ 0 και 1.
2. Αν  $u < q_1$  τότε επιλέγεται το πρώτο χρωμόσωμα  $x_1$ , διαφορετικά επιλέγεται το  $x_i$  ( $2 \leq i \leq n_p$ ), έτσι ώστε  $q_{i-1} < u \leq q_i$ .

Ο προσωρινός αυτός πληθυσμός περνάει στη διαδικασία του ζευγαρώματος. Η επιλογή των γονέων γίνεται βάση της παραμέτρου διασταύρωσης, τη λεγόμενη πιθανότητα διασταύρωσης  $f_r$  που καθορίζεται από το σχεδιαστή και λειτουργεί ως εξής [3.2]:

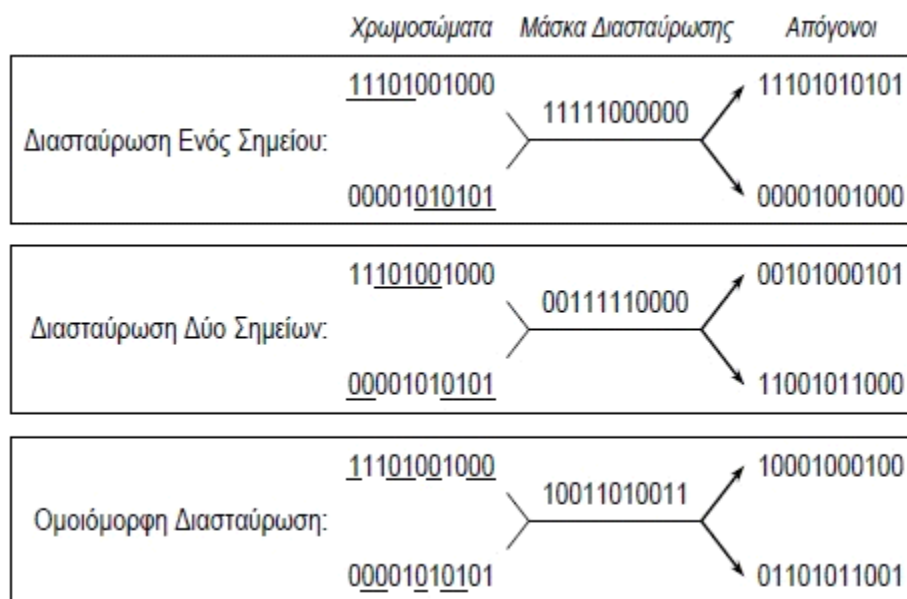
1. Επιλέγεται τυχαία ένας αριθμός  $u$  μεταξύ 0 και 1, για κάθε χρωμόσωμα.
2. Αν  $u < f_r$ , επιλέγεται το χρωμόσωμα για διασταύρωση.

Αν ο αριθμός των χρωμοσωμάτων προς διασταύρωση είναι άρτιος, τότε συνεχίζεται η υπόλοιπη διαδικασία, διαφορετικά είτε παραλείπεται ένα χρωμόσωμα, είτε βρίσκεται άλλο ένα, πάντα όμως με τυχαίο τρόπο. Όπως γίνεται φανερό αν  $f_r = 1$  σημαίνει συνεχή εφαρμογή του τελεστή διασταύρωσης, άρα ο αλγόριθμος θα συγκλίνει πιο αργά. Ο αναμενόμενος αριθμός ατόμων προς διασταύρωση είναι:

$$n_k = f_r \cdot n_p \quad (3.1)$$

Το ζευγάρι του πληθυσμού  $n_k$  γίνεται με τυχαίο τρόπο. Οι πιο συνήθεις τελεστές διασταύρωσης (Σχήμα 3.1) είναι:

1. Διασταύρωση ενός σημείου (single-point crossover).
2. Διασταύρωση δύο σημείων (two-point crossover).
3. Ομοιόμορφη διασταύρωση (uniform crossover).



**Σχήμα 3.1:** Συνήθεις τελεστές διασταύρωσης.

Τα νέα άτομα περιλαμβάνουν συνδυασμούς χαρακτηριστικών των γονέων με αποτέλεσμα τα πρώτα να παρουσιάζουν βελτιωμένες αποδόσεις. Υπάρχει βέβαια το ενδεχόμενο η διασταύρωση να δώσει χειρότερους απογόνους, αλλά αυτοί δεν θα έχουν μεγάλη πιθανότητα πολλαπλασιασμού στον επόμενο αναπαραγωγικό κύκλο.

Ο κύκλος της αναπαραγωγικής διαδικασίας κλείνει με τη μετάλλαξη. Καθώς αντιγράφονται δυαδικά ψηφία από το γονέα στον απόγονο, επιλέγεται τυχαία με μικρή πιθανότητα, τη λεγόμενη πιθανότητα μετάλλαξης (mutation probability)  $mut$ , ένα ψηφίο και αντιστρέφεται, από 0 σε 1 ή το αντίστροφο (Σχήμα 3.2). Αναλυτικά η διαδικασία έχει ως εξής [3.2]:

1. Επιλέγεται τυχαία ένας αριθμός  $u$  μεταξύ 0 και 1 για κάθε χρωμόσωμα και για κάθε δυαδικό ψηφίο μέσα στο χρωμόσωμα.
2. Αν  $u < mut$ , τότε αντιστρέφεται το δυαδικό ψηφίο.

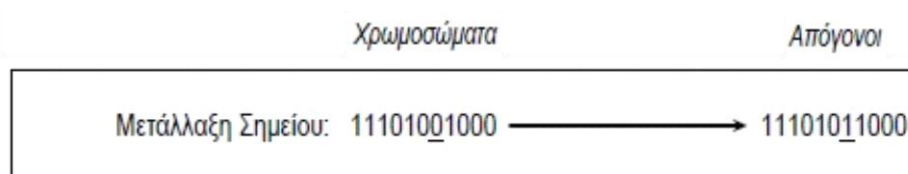
Ο αναμενόμενος αριθμός των αντιστραμμένων ψηφίων μετά τη διαδικασία της μετάλλαξης είναι:

$$nm = n_p \cdot n_t \cdot mut, \quad (3.2)$$

όπου  $n_t$  ο συνολικός αριθμός των απογόνων.

Είναι πολύ σημαντικό η πιθανότητα μετάλλαξης να είναι αρκετά μικρή (μέχρι 0,15), γιατί σε αντίθετη περίπτωση ο ΓΑ εκφυλίζεται σε τυχαίο ψάξιμο. Η μετάλλαξη μπορεί να συμβεί περισσότερες από μία φορές στο ίδιο άτομο [3.3]. Η λειτουργία αυτή δρα ως ασφαλιστική δικλείδα, όταν κατά την επιλογή και τη διασταύρωση χαθούν κάποιες πολύτιμες γενετικές πληροφορίες με το να εξασφαλίζει ότι κανένα σημείο του χώρου αναζήτησης δεν θα αποκλεισθεί από τη διαδικασία του ψαξίματος.

Με την ολοκλήρωση της μετάλλαξης έχει δημιουργηθεί η επόμενη γενιά. Μετά από κάποιο αριθμό γενεών και αφού καμία βελτίωση δεν παρατηρείται, η όλη διαδικασία του ΓΑ τερματίζεται.



Σχήμα 3.2: Τελεστής μετάλλαξης.

### 3.5 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ

Οι περιορισμοί στις αντικειμενικές συναρτήσεις συντελούν στην αξιολόγηση των πιθανών λύσεων. Οι πιθανές λύσεις που είναι έξω από το πεδίο ορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης αντί να αγνοούνται, αξιολογούνται κατάλληλα ως σημεία χαμηλής απόδοσης. Αντιμετωπίζονται τα σημεία αυτά, ως φορείς πληροφορίας που αξιοποιούνται αποδοτικά από το ΓΑ. Αυτό υλοποιείται με την εκχώρηση σε αυτά, χαμηλή απόδοση ανάλογης του βαθμού παραβίασης των περιορισμών. Ως χαμηλή απόδοση τίθεται μία υψηλή τιμή όταν αναζητείται το ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης, ή μία χαμηλή τιμή όταν αναζητείται το μέγιστο της αντικειμενικής συνάρτησης. Η μέθοδος αυτή ενσωμάτωσης των περιορισμών σε ένα ΓΑ, η οποία εξασφαλίζει σταθερό αριθμό πιθανών λύσεων (απογόνων) ανά γενιά καλείται μέθοδος ποινής (penalty method).

### 3.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Η χρήση των ΓΑ σε αρκετές εφαρμογές βελτιστοποίησης και αναζήτησης ενδείκνυται κυρίως λόγω των παρακάτω πλεονεκτημάτων [3.2]:

1. Μπορούν να λύσουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα.  
Η θεωρία και η πράξη έχουν δείξει ότι προβλήματα που έχουν δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα από ΓΑ. Για παράδειγμα συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και κατά συνέπεια μία πλειάδα τοπικών ακρότατων, καθιστούν ανεπαρκείς πολλές μεθόδους ως προς την εύρεση του ολικού ακρότατου σε δεδομένο διάστημα του πεδίου ορισμού τους, κάτι που ξεπερνιέται εύκολα από τους ΓΑ.
2. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα.  
Οι ΓΑ μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν στον υπάρχοντα κώδικα αφού χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη άμεσα το ρόλο της μέσα στο σύστημα.
3. Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι.  
Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση των ΓΑ, μπορούν να εφαρμοστούν παραλλαγές ή επεκτάσεις του βασικού σχήματος, που δεν ακολουθούν κατά ανάγκη το φυσικό μοντέλο.
4. Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους.  
Υπάρχουν περιπτώσεις προβλημάτων που οι ΓΑ μπορούν να συνδυαστούν με άλλες μεθόδους επίσης αποδοτικές, όπως τα Νευρωνικά Δίκτυα, δίνοντας αποτελέσματα μεγάλης ευελιξίας.
5. Παρουσιάζουν μεγάλο εύρος εφαρμογών σε πολλά πεδία επιστημών.  
Το χαρακτηριστικό, που τους εξασφαλίζει αυτό το πλεονέκτημα είναι η ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή των

καλύτερων ατόμων μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, οι ΓΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την οικονομία μέχρι το σχεδιασμό ηλεκτρικών δικτύων.

6. Ενσωματώνουν τους περιορισμούς των προβλημάτων βελτιστοποίησης.
7. Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας.  
Η μόνη επικοινωνία του ΓΑ με το περιβάλλον είναι η συνάρτηση καταλληλότητας, χωρίς ο αλγόριθμος να λαμβάνει υπόψη τη σημασία του προβλήματος.
8. Οι ΓΑ είναι η μόνη μέθοδος που κάνει ταυτόχρονη εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης, δηλαδή του πεδίου ορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης, και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας.  
Συνήθως, τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι ανταγωνιστικά και το επιθυμητό είναι να συνυπάρχουν και τα δύο προς όφελος της όλης διαδικασίας. Οι ΓΑ επιτυγχάνουν τον βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης.
9. Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση.  
Οι ΓΑ μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα της παράλληλης επεξεργασίας αυξάνοντας έτσι, την απόδοση όλου του υπολογιστικού συστήματος.

### 3.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Εγκυκλοπαίδεια Wikipedia, <http://el.wikipedia.org/wiki/>.
- [3.2] Σ. Λυκοθανάσης, *Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές*, Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2000, pp. 1-86.
- [3.3] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures=Evolution Programs*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2<sup>nd</sup> edition, 1992, pp. 1-44.



## **ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

### **4.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Το πρόβλημα που καλείται να λύσει ο Γενετικός Αλγόριθμος (ΓΑ) είναι η εύρεση του βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας από δοθέν βροχοειδές Δίκτυο Διανομής (ΔΔ), υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Το βέλτιστο δίκτυο είναι το ακτινικό δίκτυο λειτουργίας με τις ελάχιστες ωμικές απώλειες. Στην επιλογή αυτού του δικτύου αγνοούνται οι τεχνικοί περιορισμοί πτώσης τάσης και φόρτισης των γραμμών.

### **4.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ**

Τα δεδομένα που χρειάζεται το παρακάτω λογισμικό αφορούν τόσο το κύριο πρόγραμμα του ΓΑ όσο και την περιγραφή του βροχοειδούς δικτύου που καλείται να επιλύσει, η οποία θα χρειαστεί στον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης. Το κοινό στοιχείο δεδομένων που συνδέει το ΓΑ με το δίκτυο είναι ο συνολικός αριθμός των κλάδων που αποτελεί ταυτόχρονα και το συνολικό αριθμό ψηφίων της κάθε συμβολοσειράς-χρωμοσώματος. Οι κλάδοι ενός δικτύου αντιστοιχούν στα τμήματα των τριφασικών γραμμών του μεταξύ δύο συνεχόμενων ζυγών.

Η αρίθμηση των κόμβων ξεκινάει από το μηδέν, αριθμώντας πρώτα τους κόμβους που αντιστοιχούν σε ζυγούς που είναι συνδεδεμένες οι πηγές, δηλαδή οι υποσταθμοί τροφοδοσίας, και μετά τους υπόλοιπους. Η αρίθμηση των κλάδων του δοθέντος βροχοειδούς δικτύου ξεκινάει από τη μονάδα, αριθμώντας πρώτα τους κλάδους που ξεκινάνε απευθείας από τις πηγές-κόμβους και μετά τους υπόλοιπους.

Επειδή η υλοποίηση του αλγορίθμου θα γίνει στο περιβάλλον του MATLAB γίνεται η θεώρηση ότι τόσο κάποια δεδομένα όσο και κάποιες ενδιάμεσες μεταβλητές βρίσκονται σε μορφή πίνακα, συνήθως πίνακα-γραμμή.

Έτσι, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται από το κύριο πρόγραμμα είναι:

1. Ο συνολικός αριθμός γενεών των απογόνων,  $n_g$ .
2. Ο πληθυσμός ατόμων ανά γενιά,  $n_p$ .
3. Η πιθανότητα διασταύρωσης,  $f_r$ .
4. Η πιθανότητα μετάλλαξης,  $mut$ .
5. Ο συνολικός αριθμός ψηφίων ανά χρωμόσωμα,  $n_t$ .

Τα δεδομένα εισόδου της συνάρτησης υποπρογράμματος είναι:

1. Ο πίνακας που εμπεριέχει το σύνολο των συμβολοσειρών,  $s$ .
2. Ο συνολικός αριθμός των κλάδων του βροχοειδούς δικτύου,  $n_t$ .
3. Ο αριθμός των κλάδων του βροχοειδούς δικτύου συνδεδεμένων κατευθείαν με τις πηγές,  $n_s$ .
4. Ο συνολικός αριθμός κόμβων του βροχοειδούς δικτύου,  $n$ .
5. Ο συνολικός αριθμός των πηγών του βροχοειδούς δικτύου,  $n_f$ .
6. Η ποινή,  $GPenalty$ .

Για βροχοειδές δίκτυο αποτελούμενο από φορτία σταθερής έντασης υπάρχουν επιπλέον τα ακόλουθα δεδομένα εισόδου:

1. Ο πίνακας περιγραφής του βροχοειδούς δικτύου,  $cdata$ .  
Ο πίνακας αυτός αποτελείται από τρεις στήλες. Στην πρώτη στήλη δηλώνεται ο κλάδος, ενώ στις υπόλοιπες δύο ο κόμβος αναχώρησης (sending node) και ο κόμβος άφιξης (receiving node). Στον πίνακα αυτό δηλώνονται όλες οι δυνατές κατευθύνσεις του ρεύματος. Η τοποθέτηση των κλάδων στον πίνακα, γίνεται κατά τον αύξοντα αριθμό τους.
2. Ο πίνακας κομβικών ρευμάτων του δικτύου,  $I$ .  
Ο πίνακας αυτός είναι ένας πίνακας-στήλη, με τα ρεύματα τοποθετημένα κατά αύξοντα αριθμό κόμβων.
3. Ο πίνακας κλαδικών ωμικών αντιστάσεων,  $R$ .  
Ο πίνακας αυτός είναι ένας πίνακας-στήλη, με ωμικές αντιστάσεις τοποθετημένες κατά αύξοντα αριθμό κλάδων.

Για βροχοειδές δίκτυο αποτελούμενο από φορτία σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος έχουμε ακόμη τα ακόλουθα δεδομένα εισόδου:

1. Η βασική ισχύς του δικτύου,  $basemva$ .
2. Ο πίνακας περιγραφής του βροχοειδούς δικτύου,  $cdata$ .  
Ο πίνακας αυτός αποτελείται από πέντε στήλες. Στην πρώτη στήλη δηλώνεται ο κλάδος, ενώ στις υπόλοιπες τέσσερις ο κόμβος αναχώρησης (sending node) και ο κόμβος άφιξης (receiving node), η ανά μονάδα ωμική αντίσταση του κλάδου και η ανά μονάδα επαγωγική αντίδραση του κλάδου. Στον πίνακα



αυτό δηλώνονται όλες οι δυνατές κατευθύνσεις του ρεύματος. Η τοποθέτηση των κλάδων στον πίνακα, γίνεται κατά τον αύξοντα αριθμό τους.

3. Ο πίνακας κομβικών φορτίων,  $PQ$ .

Ο πίνακας αυτός αποτελείται από οκτώ στήλες. Στην πρώτη στήλη αναφέρεται ο αριθμός του κόμβου, στη δεύτερη δίνεται ο χαρακτηρισμός αν ο συγκεκριμένος κόμβος είναι κόμβος ταλάντωσης (κόμβος-πηγή) ή κόμβος-φορτίου, στις υπόλοιπες στήλες αναφέρονται οι αρχικές τιμές της ανά μονάδα τάσης και της γωνίας ( $V = 1\alpha.μ., \delta = 0^\circ$ ), η ενεργός και άεργος ισχύς σε MW και MVar, οι οποίες είναι αρχικά μηδενικές για τους κόμβους-πηγών. Ένας υποπίνακας αυτού θα αποτελέσει ένα από τα δεδομένα εισόδου στη συνάρτηση υπολογισμού ωμικών απωλειών με την αριθμητική μέθοδο Newton-Raphson. Η τοποθέτηση των κλάδων στον πίνακα, γίνεται κατά τον αύξοντα αριθμό τους.

### 4.3 ΚΥΡΙΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Τα στοιχεία που συνδέουν το ΓΑ με το πρόβλημα που καλείται να επιλύσει είναι η κωδικοποίηση και η αντικειμενική συνάρτηση.

Η κωδικοποίηση αφορά ένα σύνολο πιθανών λύσεων που στο υπό μελέτη πρόβλημα είναι οι καταστάσεις λειτουργίας του βροχοειδούς ΔΔ που προκύπτουν με το άνοιγμα ή κλείσιμο κάποιων διακοπών. Η αναπαράσταση αυτών των λύσεων μπορεί να γίνει από κωδικοποίηση με δυαδικά ψηφία, όπου κάθε λύση αναπαρίσταται από μια δυαδική συμβολοσειρά (binary string) καθορισμένου μήκους. Σημειώνεται ότι σε αρκετές κατασκευές, ειδικά στα υπόγεια καλωδιακά βροχοειδή ΔΔ ΜΤ, κάθε τμήμα γραμμής (κλάδος) μεταξύ δύο ζυγών είναι εφοδιασμένο με ένα ζεύγος διακοπών, ένα στην αρχή και ένα στο τέλος, ώστε να είναι εύκολος ο παραλληλισμός του κατά τη διάρκεια των χειρισμών, οπότε ο ΓΑ θα λαμβάνει υπόψη το συγκεκριμένο ζεύγος διακοπών ως ένα νοητό ισοδύναμο διακόπτη. Έτσι, στη συνέχεια θα θεωρείται ότι κάθε κλάδος κάθε βροχοειδούς δικτύου είναι εφοδιασμένος με ένα (νοητό) διακόπτη. Η δυαδική συμβολοσειρά-χρωμόσωμα, η οποία παριστάνεται με τη μορφή ενός πίνακα-γραμμή δηλώνει ποιος διακόπτης του βροχοειδούς δικτύου είναι ανοικτός (μηδέν) ή κλειστός (μονάδα), αφού κάθε στοιχείο της συμβολοσειράς αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο κλάδο. Μάλιστα, η αρίθμηση των δυαδικών στοιχείων, ξεκινώντας από το πρώτο ψηφίο (σημαντικότερο ψηφίο της συμβολοσειράς), του πίνακα-γραμμή ταυτίζεται με την αρίθμηση των κλάδων. Συγκεκριμένα, κάθε συμβολοσειρά χωρίζεται σε δύο συνεχόμενα τμήματα. Το πρώτο τμήμα (από αριστερά) αφορά του κλάδους που συνδέονται απευθείας με τους κόμβους-πηγές, ενώ το δεύτερο τους υπόλοιπους κλάδους.

Η αντικειμενική συνάρτηση, ο υπολογισμός της οποίας θα αναλυθεί διεξοδικά παρακάτω, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιβίωση και πολλαπλασιασμό ή όχι του ατόμου στο οποίο αντιστοιχεί. Αν η συγκεκριμένη

συμβολοσειρά αντιστοιχεί σε ακτινικό δίκτυο λειτουργίας, τότε η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει τιμή ίση με τις ωμικές απώλειες αυτού του δικτύου, ενώ διαφορετικά η τιμή της γίνεται ίση με μία καθορισμένη υψηλή τιμή (penalty).

Ο ΓΑ υλοποιεί τις παρακάτω λειτουργίες [4.1]:

1. Αρχικοποίηση.
2. Υπολογισμός καταλληλότητας και αξιολόγηση.
3. Αναπαραγωγή.
  - I. Επιλογή.
  - II. Διασταύρωση.
  - III. Μετάλλαξη.
4. Υπολογισμός καταλληλότητας και αξιολόγηση.
5. Επανάληψη από το βήμα (3) μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του ΓΑ.

Η αρχικοποίηση είναι το βήμα στο οποίο ορίζεται ο αρχικός πληθυσμός πάνω στον οποίο θα λάβουν χώρα οι λειτουργίες του ΓΑ. Ο πληθυσμός αυτός διαλέγεται με τυχαίο τρόπο σύμφωνα με ένα δεδομένο τύπο γονότυπου. Ο γονότυπος αυτός στο υπό μελέτη πρόβλημά αντιστοιχεί σε δυαδική συμβολοσειρά με αριθμό ψηφίων ίσο με τον αριθμό των κλάδων του βροχοειδούς δικτύου. Στην υλοποίηση στο MATLAB όλα τα άτομα αποθηκεύονται σε έναν πίνακα  $s$  όπου κάθε γραμμή αποτελεί μία συμβολοσειρά-χρωμόσωμα. Ο πληθυσμός αυτός παράγεται καλώντας μία γεννήτρια, τυχαίων αριθμών στο διάστημα  $[0,1]$ , στρογγυλοποιώντας κάθε φορά το αποτέλεσμα της στον πλησιέστερο ακέραιο.

Ο πληθυσμός αυτός πρέπει να αξιολογηθεί δηλαδή να υπολογιστεί η ικανότητα επιβίωσης του ατόμου ξεχωριστά. Έτσι, για κάθε συμβολοσειρά του αρχικού πληθυσμού υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση (συνάρτηση καταλληλότητας) για κάθε άτομο και στη συνέχεια κατατάσσονται τα άτομα αυτά κατά αύξουσα σειρά με βάση τις υπολογισθείσες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή από το καλύτερο στο χειρότερο.

Ακολουθεί η αναπαραγωγή. Η επιλογή των ατόμων που θα λάβουν μέρος στη αναπαραγωγή και θα κληροδοτήσουν στην επόμενη γενιά μέρος ή το σύνολο των χαρακτηριστικών τους γίνεται μέσω δοθέντος ποσοστού  $f_r$  επί του συνολικού πληθυσμού  $n_p$ , τη λεγόμενη πιθανότητα διασταύρωσης και φυσικά η επιλογή αυτή αναφέρεται στα καταλληλότερα άτομα. Σημειώνεται ότι ο πληθυσμός παραμένει σταθερός σε κάθε γενιά. Άρα, ο (άρτιος) αριθμός των ατόμων που θα ζευγαρώσουν είναι [4.2]:

$$n_k = f_r \cdot n_p \quad (4.1)$$

Μόλις γίνει η επιλογή των ατόμων εφαρμόζεται η μέθοδος της βαθμολογικής στάθμισης (rank weighting method). Σύμφωνα με την οποία, αριθμούνται κατά αύξοντα αριθμό (rank) από το καταλληλότερο που βρίσκεται στην αρχή της λίστας και υπολογίζονται οι αντίστοιχες πιθανότητες σύμφωνα με τη σχέση [4.2]:

$$P_r = \frac{n_k - r + 1}{\sum_{r=1}^{n_k} r} \quad (4.2)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι αθροιστικές πιθανότητες, αθροίζοντας από το καταλληλότερο άτομο, ενώ μέσω της γεννήτριας τυχαίων αριθμών στο διάστημα  $[0,1]$ , βρίσκεται ποια άτομα από τα επιλεγμένα θα διασταυρωθούν μεταξύ τους (αρχή της ρουλέτας). Εφόσον η αναπαραγωγή κάθε φορά γίνεται μεταξύ δύο ατόμων, η γεννήτρια τυχαίων αριθμών θα κληθεί δύο φορές. Ουσιαστικά αναζητείται το μικρότερο διάστημα μεταξύ των υπολογισθέντων αθροιστικών πιθανοτήτων που να βρίσκεται ο παραγόμενος τυχαίος αριθμός. Το άτομο που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη αθροιστική πιθανότητα αυτού του διαστήματος είναι και το ζητούμενο. Η διαδικασία αυτή εκτελείται ανά ζεύγη, τόσες φορές όσες είναι ο αριθμός των ατόμων που δεν επιλέχτηκαν προς διασταύρωση και που πρόκειται να αντικατασταθούν. Η εύκολη υλοποίηση (προγραμματιστικά) της τελευταίας έκφρασης γίνεται για πιθανότητα διασταύρωσης ίση με 50%.

Επιλέγεται ως τελεστής διασταύρωσης, η διασταύρωση ενός σημείου. Η επιλογή του σημείου διασταύρωσης μεταξύ των δύο επιλεγέντων ατόμων γίνεται κατά τυχαίο τρόπο. Βέβαια, χρειάστηκε να εξασφαλιστεί στο λογισμικό που αναπτύχθηκε ότι η διασταύρωση θα γίνει ακόμη και αν χρειαστεί να γίνει εναλλαγή ενός μόνο ψηφίου.

Ακολουθεί στη συνέχεια η μετάλλαξη κατά την οποία ένα ψηφίο αντιστρέφεται (από 0 σε 1 ή το αντίστροφο). Ο αριθμός των μεταλλάξεων προκύπτει από τη λεγόμενη πιθανότητα μετάλλαξης, *mut*, και είναι ίσος με [4.2]:

$$nm = (n_p - 1) \cdot n_t \cdot mut \quad (4.3)$$

Εδώ πρέπει να προσεχθεί ο όρος  $n_p - 1$ , που σημαίνει ότι η μετάλλαξη αφορά όλο τον πληθυσμό πέραν του καλύτερου ατόμου της προηγούμενης γενιάς. Στο σημείο αυτό εξασφαλίζεται η αντιγραφή του καλύτερου ατόμου στην επόμενη γενιά, ο λεγόμενος ελιτισμός (*elitism*). Αν χρειάζεται για παράδειγμα, να διατηρηθούν τα τέσσερα καλύτερα άτομα τότε θα πρέπει:

$$nm = (n_p - 4) \cdot n_t \cdot mut \quad (4.4)$$

Ο πληθυσμός και μετά τη διασταύρωση είναι αποθηκευμένος στον ίδιο πίνακα *s*. Συνεπώς, η τυχαία επιλογή των *nm* ψηφίων ανάγεται στην τυχαία επιλογή των συντεταγμένων τους κατά γραμμή και κατά στήλη, χωρίς να επηρεάζονται οι συμβολοσειρές των πρώτων γραμμών που περιλαμβάνουν τα καλύτερα άτομα, που ενδεχομένως είναι επιθυμητό να διατηρηθούν.

Μετά τον υπολογισμό της καταλληλότητας κάθε ατόμου και την αξιολόγηση του καινούριου πληθυσμού, ακολουθεί το κριτήριο τερματισμού του ΓΑ, το οποίο είναι ο αριθμός των γενιών (επαναλήψεων), που έχει καθοριστεί μετά από κάποιες δοκιμές.

Για να συγκριθούν τα αποτελέσματα του λογισμικού σε κάθε επανάληψη, καταγράφονται όλα τα άτομα κάθε γενιάς που αντιστοιχούν σε εφικτά ακτινικά δίκτυο λειτουργίας και μάλιστα με αποκωδικοποιημένες συμβολοσειρές στο δεκαδικό

σύστημα μαζί με τις αντίστοιχες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, αλλά βεβαίως δηλώνονται ξεχωριστά και τα άτομα που πρωτοεμφανίζονται για πρώτη φορά μαζί με τις αντίστοιχες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Επίσης, γίνεται καταγραφή της μικρότερης τιμής, αλλά και της μέσης τιμής των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης ανά γενιά. Το λογισμικό ολοκληρώνεται επιστρέφοντας το καλύτερο άτομο, μαζί με ένα διάγραμμα που περιλαμβάνει:

1. Την μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε γενιά.
2. Τη μέση τιμή των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης των ατόμων του πληθυσμού, κάθε γενιάς.

#### **4.4 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΙΜΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ**

##### **4.4.1 ΣΚΟΠΟΣ**

Σκοπός αυτού του υποπρογράμματος είναι ο έλεγχος αν η συγκεκριμένη συμβολοσειρά περιγράφει ή όχι εφικτό ακτινικό δίκτυο λειτουργίας. Στην περίπτωση που δεν είναι ακτινικό δίκτυο λειτουργίας, τότε το υποπρόγραμμα θέτει ως τιμή αντικειμενικής συνάρτησης μία υψηλή τιμή, για παράδειγμα  $2^{30}$ , γνωστή ως ποινή (penalty). Αν η συγκεκριμένη συμβολοσειρά πράγματι αντιστοιχεί σε ακτινικό δίκτυο λειτουργίας, τότε υπολογίζονται οι ωμικές απώλειες πάνω στις γραμμές του δικτύου υπολογίζοντας τον πίνακα πρόσπτωσης για φορτία σταθερής έντασης ή καλώντας τη συνάρτηση υποπρογράμματος της αριθμητικής μεθόδου Newton-Raphson για φορτία σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος.

##### **4.4.2 ΚΥΡΙΟ ΤΜΗΜΑ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ**

Αρχικά το συγκεκριμένο πρόγραμμα καλείται να αποφανθεί αν η υπό εξέταση συμβολοσειρά αντιστοιχεί σε εφικτό ακτινικό δίκτυο λειτουργίας ή όχι. Το εκάστοτε βροχοειδές δίκτυο δεν είναι λειτουργικά ακτινικό όταν δεν ικανοποιείται μία από τις παρακάτω δύο προϋποθέσεις, οι οποίες εμφανίζονται στο υποπρόγραμμα, με την προτεραιότητα με την οποία αναγράφονται:

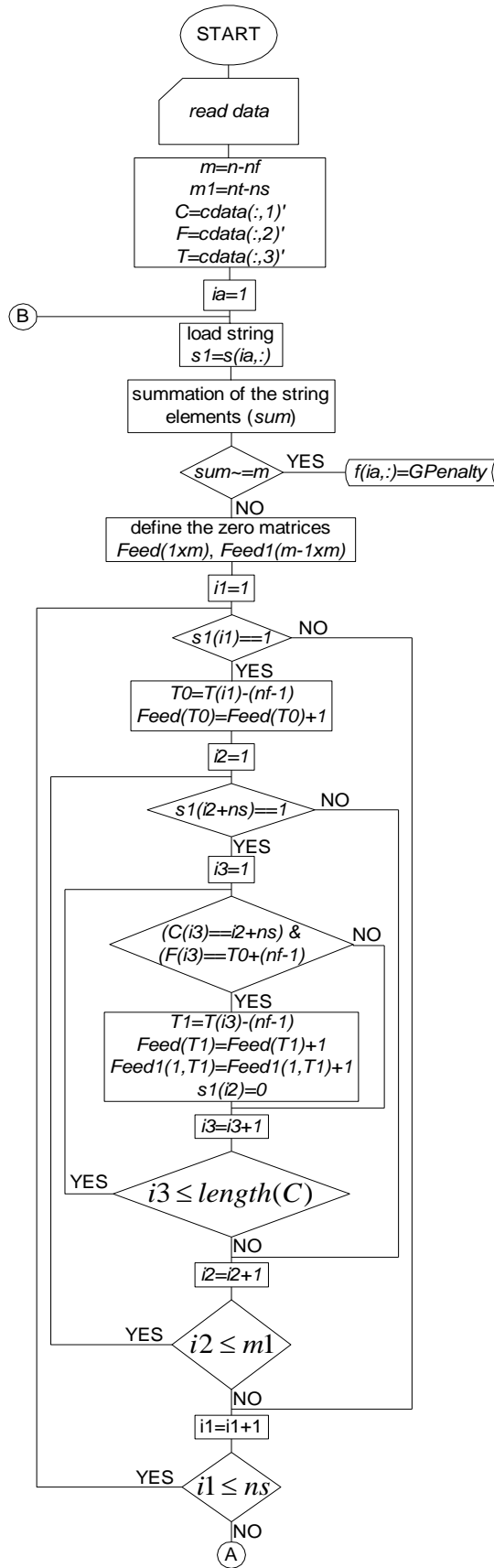
1. Ο αριθμός των εν λειτουργία κλάδων να είναι ίσος με τη διαφορά του συνολικού αριθμού κόμβων μείον τον αριθμό των κόμβων-πηγών, δηλαδή να είναι ίσος με τον αριθμό των κόμβων-φορτίων [4.3].
2. Σε κάθε δίκτυο λειτουργίας, ο συνολικός αριθμός των κλάδων που προσπίπτει σε κάθε κόμβο-φορτίο πρέπει να είναι ίσος με τη μονάδα.

Μάλιστα η δεύτερη προϋπόθεση αποτελεί έναν ορισμό του ακτινικού δικτύου λειτουργίας και περιλαμβάνει θεωρητικά και την πρώτη, αλλά είναι περισσότερη σύνθετη προγραμματιστικά. Στις περιπτώσεις που εξετάζονται, έρχεται να καλύψει, για παράδειγμα, το ενδεχόμενο να υπάρξει δίκτυο που όλοι οι κόμβοι-φορτία να συνδέονται μεταξύ τους χωρίς κανένας τους με κάποιο κόμβο-πηγή, ικανοποιώντας βέβαια την πρώτη προϋπόθεση.

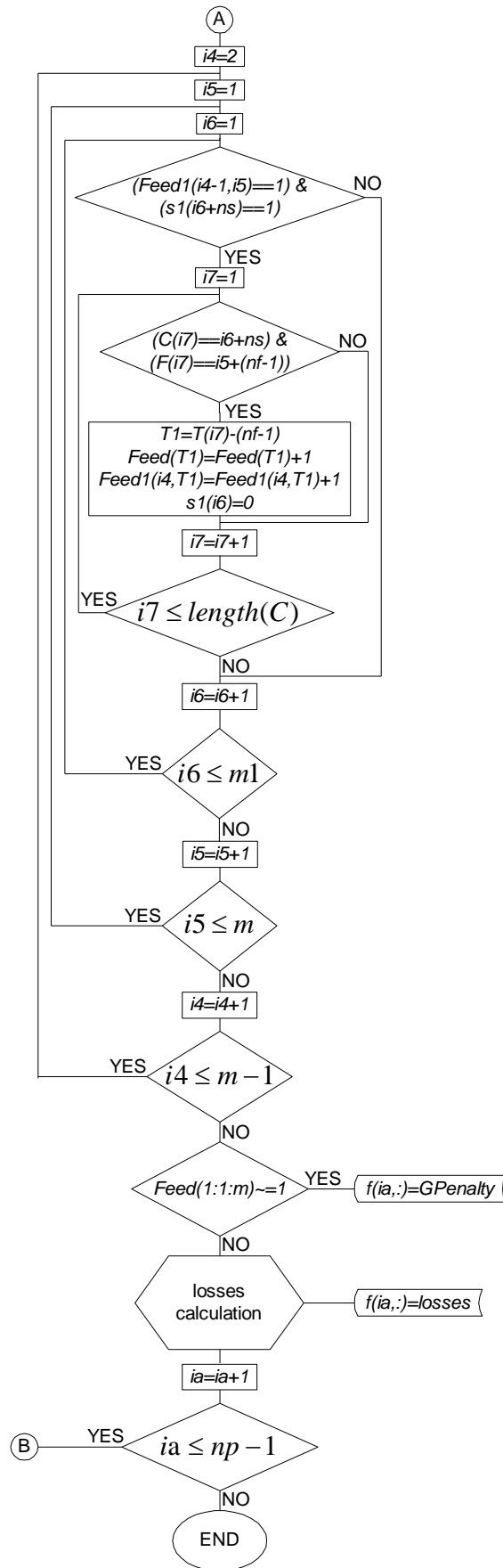
Όπως φαίνεται στο λογικό διάγραμμα του Σχήματος 4.1α το υποπρόγραμμα εξετάζει κάθε συμβολοσειρά ξεχωριστά, αθροίζοντας αρχικά τα στοιχεία της και συγκρίνοντας το άθροισμα με τον αριθμό των κόμβων-φορτίων  $m$ , για να αποφανθεί αν ισχύει η πρώτη προϋπόθεση ή όχι. Αν ισχύει, τότε ορίζει δύο βοηθητικούς πίνακες, *Feed* με διαστάσεις  $1 \times m$  και *FeedI* με διαστάσεις  $m-1 \times m$ , αρχικά μηδενικούς. Κάθε στοιχείο του *Feed* ή της κάθε γραμμής του *FeedI*, αντιστοιχεί σε έναν κόμβο-φορτίο σύμφωνα με τη σειρά που έγινε η αρίθμησή τους. Εδώ, πρέπει να σημειωθεί ότι η δήλωση των στοιχείων των πινάκων στο MATLAB ξεκινάει από τη μονάδα και όχι από το μηδέν, όπως για παράδειγμα γίνεται στη γλώσσα C. Ο τονούμενος πίνακας αφορά τον ανάστροφό του, ενώ η έκφραση *length* αφορά τη μέγιστη διάσταση του εκάστοτε πίνακα. Στον πίνακα *Feed* δηλώνεται ο συνολικός αριθμός των κλάδων που προσπίπτουν σε κάθε κόμβο-φορτίο, ενώ στον πίνακα *FeedI* ο αριθμός των κλάδων που προσπίπτουν σε κάθε κόμβο-φορτίο σε κάθε επανάληψη (Σχήμα 4.1β).

Όπως έχει ήδη σημειωθεί, ο πίνακας-γραμμή που αποτελεί τη συμβολοσειρά αποτελείται από δύο μέρη. Τα πρώτα  $n_s$  στοιχεία του αφορούν τους κλάδους που συνδέονται απευθείας στους κόμβους-πηγές, ενώ τα υπόλοιπα τους υπόλοιπους κλάδους. Έτσι, υλοποιείται ένας βρόχος επανάληψης, ο οποίος ανιχνεύει ποιος κλάδος από τους  $n_s$  είναι on ή off. Στην περίπτωση που είναι κάποιος on, βρίσκεται σε ποιον κόμβο προσπίπτει και δηλώνεται στον πίνακα *Feed* με την μετατροπή του αντίστοιχου στοιχείου από μηδέν σε μονάδα. Στη συνέχεια, ξεκινά ένας δεύτερος βρόχος επανάληψης για το δεύτερο τμήμα της εκάστοτε συμβολοσειράς. Στην περίπτωση που είναι on κάποιος κλάδος, εξετάζεται μέσω τρίτου βρόχου επανάληψης αν ο κόμβος άφιξης που βρέθηκε στον πρώτο βρόχο ταιριάζει με κάποιον εν δυνάμει κόμβο αναχώρησης, όπως έχει δηλωθεί στον πίνακα περιγραφής του βροχοειδούς δικτύου *cdata*. Εφόσον ταιριάζει κάποιος κόμβος, βρίσκεται ο νέος κόμβος άφιξης και δηλώνεται στους πίνακες *Feed* και *FeedI*. Ακόμη, μηδενίζεται το αντίστοιχο στοιχείο στη συμβολοσειρά, ώστε να μη ληφθεί ξανά στο υπόλοιπο υποπρόγραμμα. Συνοψίζοντας, μόλις παρουσιάστηκαν τρεις βρόχοι επανάληψης, ο ένας μέσα στον άλλον, με μία λογική συνθήκη ο καθένας.

Μετά τη λήξη των παραπάνω τριών βρόχων επανάληψης, ακολουθούν ακόμη τέσσερις, πάλι ο ένας μέσα στον άλλον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1β. Η λογική των τριών πρώτων βρόχων επανάληψης έγκειται στην εύρεση ενός ζεύγους κόμβου αναχώρησης που να είναι δηλωμένος στον πίνακα *FeedI* και κλάδου από αυτούς που είναι on και δεν έχουν ακόμη διαγραφεί από την υπό εξέταση συμβολοσειρά. Ο τέταρτος βρόχος επανάληψης με την κατάλληλη λογική συνθήκη αναλαμβάνει να απαντήσει αν το συγκεκριμένο ζεύγος είναι εφικτό.



Σχήμα 4.1α: Λογικό διάγραμμα συνάρτησης υποπρογράμματος.



Σχήμα 4.1β: Λογικό διάγραμμα συνάρτησης υποπρογράμματος.

Αν είναι, βρίσκεται ο κόμβος άφιξης και δηλώνεται στους πίνακες *Feed* και *Feed1*, αλλά και μηδενίζεται το αντίστοιχο στοιχείο της συμβολοσειράς.

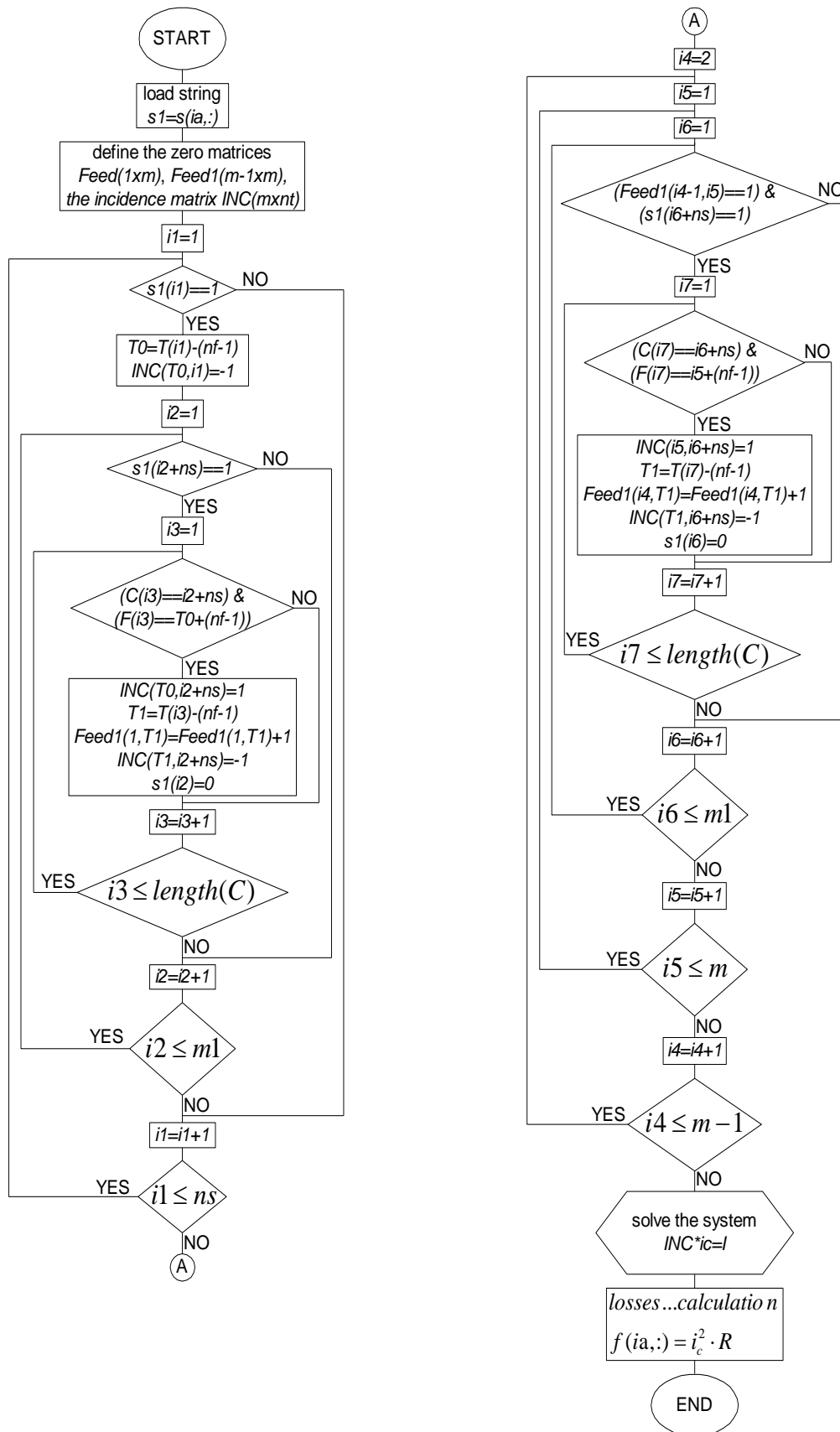
Μόλις τελειώσουν οι παραπάνω επαναλήψεις, εξετάζεται ο πίνακας *Feed*. Αν όλα τα στοιχεία του είναι μονάδες, τότε η υπό εξέταση συμβολοσειρά αφορά ακτινικό δίκτυο λειτουργίας και το υποπρόγραμμα προχωράει στον υπολογισμό των ωμικών απωλειών αυτού του δικτύου.

#### **4.4.3 ΤΜΗΜΑ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΩΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ**

Για τον υπολογισμό των ωμικών απωλειών ανά φάση, σε ένα ακτινικό δίκτυο λειτουργίας πρέπει πρώτα να υπολογιστεί ο πίνακας πρόσπτωσης του δικτύου και μάλιστα οι γραμμές του πίνακα, που αντιστοιχούν μόνο στους κόμβους-φορτία. Όπως φαίνεται και από το λογικό διάγραμμα του Σχήματος 4.2, ακολουθείται η ίδια διαδικασία με αυτή που περιγράφηκε στην ενότητα 4.4.2 εξαιρώντας το βοηθητικό πίνακα *Feed*. Οι διαστάσεις του πίνακα πρόσπτωσης *INC* είναι  $m \times n_i$ . Η συμπλήρωση του πίνακα πρόσπτωσης, ο οποίος αρχικά είναι μηδενικός, γίνεται για τις πρώτες στήλες του πίνακα, οι οποίες αντιστοιχούν στους κλάδους του δικτύου που συνδέονται απευθείας με τους κόμβους-πηγές, μόνο για τους κόμβους άφιξης και αφορά τους τρεις πρώτους βρόχους επανάληψης του υποπρογράμματος. Στη συνέχεια ακολουθούν οι υπόλοιποι τέσσερις βρόχοι επανάληψης, όπου και ολοκληρώνεται η συμπλήρωση του πίνακα. Στο κομμάτι αυτό γίνεται η συμπλήρωση των στηλών που αφορούν κλάδους του δικτύου που δεν συνδέονται απευθείας με τους κόμβους-πηγές και γίνεται αναφορά τόσο για τους κόμβους άφιξης όσο και για τους κόμβους αναχώρησης.

Ο συγκεκριμένος πίνακας πρόσπτωσης δεν είναι τετραγωνικός, οπότε δεν είναι δυνατό να επιλυθεί το αλγεβρικό σύστημα εύρεσης των κλαδικών ρευμάτων από τα κομβικά ρεύματα. Στο σημείο αυτό τροποποιείται ο πίνακας κατάλληλα απαλείφοντας τις μηδενικές στήλες θέτοντας τα αντίστοιχα κλαδικά ρεύματα μηδενικά. Έτσι, το τροποποιημένο αλγεβρικό σύστημα είναι δυνατό να επιλυθεί ώστε να βρεθούν και τα υπόλοιπα κλαδικά ρεύματα. Τέλος, από την εύρεση των κλαδικών ρευμάτων βρίσκονται εύκολα οι ωμικές απώλειες του δικτύου, ανά φάση.





Σχήμα 4.2: Λογικό διάγραμμα τμήματος υποπρογράμματος για φορτία σταθερής έντασης.

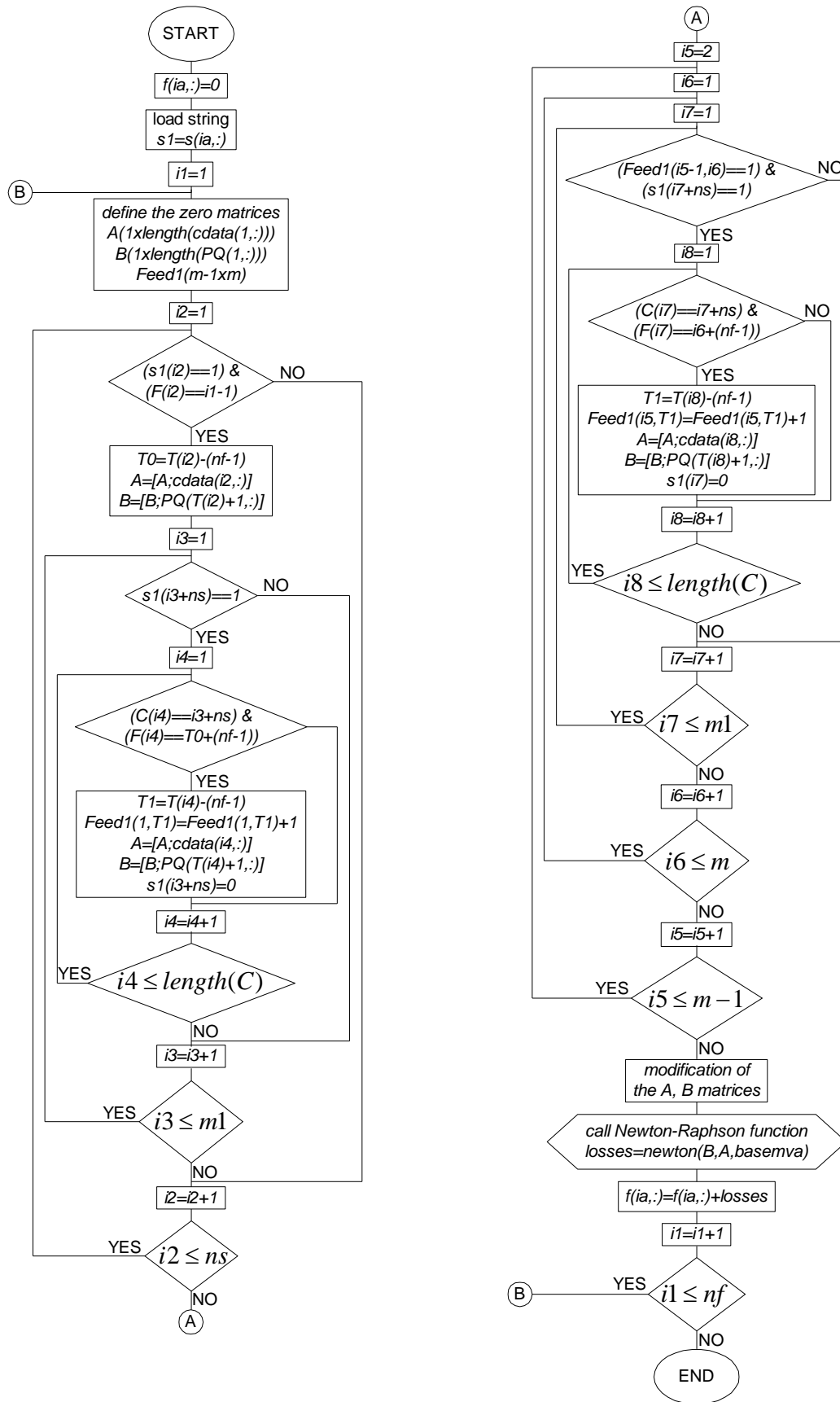
#### 4.4.4 ΤΜΗΜΑ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΩΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ

Αν ειδωθεί το ακτινικό δίκτυο λειτουργίας ως γράφημα, τότε θα διαπιστωθεί ότι αποτελείται από ένα σύνολο από δέντρα των οποίων οι κορυφές είναι οι κόμβοι-πηγές. Σύμφωνα με αυτή τη λογική σχηματίζονται οι πίνακες περιγραφής του δικτύου  $A$  και κομβικών φορτίων  $B$ , από τους αντίστοιχους πίνακες του βροχοειδούς δικτύου  $cdata$  και  $PQ$ , για κάθε δέντρο ξεχωριστά και κατόπιν καλείται η συνάρτηση υποπρογράμματος της αριθμητικής μεθόδου Newton-Raphson για τον υπολογισμό των απωλειών. Οι συνολικές απώλειες του ακτινικού δικτύου λειτουργίας αποτελούν το άθροισμα των επιμέρους απωλειών των δέντρων.

Πρώτα ξαναφορτώνεται η υπό εξέταση συμβολοσειρά. Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 4.3 όλο το υποπρόγραμμα βρίσκεται μέσα σε ένα βρόχο επανάληψης που στόχο έχει τη σάρωση όλων των κόμβων-πηγών. Εντός αυτού ακολουθούν, μία τριάδα και μία τετράδα βρόχοι επανάληψης που στόχο έχουν το σχηματισμό των  $A$  και  $B$  ανά γραμμή. Αρχικά οι  $A$  και  $B$  είναι μηδενικές γραμμές. Στον πρώτο εσωτερικό βρόχο επανάληψης ανιχνεύεται ποιος κλάδος του ακτινικού δικτύου λειτουργίας περιλαμβάνει το συγκεκριμένο κόμβο-πηγή. Στην περίπτωση που είναι κάποιος, βρίσκεται σε ποιον κόμβο προσπίπτει και συμπληρώνονται ανάλογα οι πίνακες  $A$  και  $B$ . Στη συνέχεια ενεργοποιείται ένας δεύτερος βρόχος επανάληψης για το δεύτερο τμήμα της εκάστοτε συμβολοσειράς. Στην περίπτωση που είναι οπ κάποιος κλάδος, εξετάζεται μέσω τρίτου βρόχου επανάληψης αν ο κόμβος άφιξης που βρέθηκε στον πρώτο βρόχο ταιριάζει με κάποιον εν δυνάμει κόμβο αναχώρησης, όπως έχει δηλωθεί στον πίνακα περιγραφής του βροχοειδούς δικτύου  $cdata$ . Εφόσον ταιριάζει κάποιος κόμβος, βρίσκεται ο νέος κόμβος άφιξης και δηλώνεται στον πίνακα  $FeedI$ , ενώ συμπληρώνονται οι πίνακες  $A$  και  $B$ . Ακόμη, μηδενίζεται το αντίστοιχο στοιχείο της συμβολοσειράς, ώστε να μη ληφθεί ξανά στο υπόλοιπο υποπρόγραμμα. Συνοψίζοντας, μόλις παρουσιάστηκαν τρεις βρόχοι επανάληψης, ο ένας μέσα στον άλλον, με μία λογική συνθήκη ο καθένας.

Μετά τη λήξη των παραπάνω τριών βρόχων επανάληψης, ακολουθούν ακόμη τέσσερις, πάλι ο ένας μέσα στον άλλον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Η λογική των τριών πρώτων βρόχων επανάληψης έγκειται στην εύρεση ενός ζεύγους κόμβου αναχώρησης που να είναι δηλωμένος στον πίνακα  $FeedI$  και κλάδου από αυτούς που είναι οπ και δεν έχουν ακόμη διαγραφεί από την υπό εξέταση συμβολοσειρά και ανήκουν στο δεύτερο τμήμα της συμβολοσειράς. Ο τέταρτος βρόχος επανάληψης με την κατάλληλη λογική συνθήκη αναλαμβάνει να απαντήσει αν το συγκεκριμένο ζεύγος είναι εφικτό. Αν είναι, βρίσκεται ο κόμβος άφιξης και δηλώνεται στον πίνακα  $FeedI$ , ενώ συμπληρώνονται οι πίνακες  $A$  και  $B$ , αλλά και μηδενίζεται το αντίστοιχο στοιχείο της συμβολοσειράς.

Μόλις τελειώσουν οι παραπάνω επαναλήψεις, αφαιρούνται οι πρώτες μηδενικές γραμμές των πινάκων  $A$  και  $B$ , ενώ στον πίνακα  $B$  προστίθεται η γραμμή που αναφέρεται στον κόμβο ταλάντωσης, δηλαδή τον κόμβο-πηγής.



Σχήμα 4.3: Λογικό διάγραμμα τμήματος υποπρογράμματος για φορτία σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος.

Το υποπρόγραμμα κάνει επαναρίθμηση των κόμβων στους πίνακες  $A$  και  $B$  και καλεί τη συνάρτηση υποπρογράμματος της αριθμητικής μεθόδου Newton-Raphson, για δεδομένη βασική ισχύ, από την οποία υπολογίζονται οι ωμικές απώλειες για το εκάστοτε δέντρο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα δέντρα (δενδροειδής μορφής δίκτυα) με έναν κόμβο-πηγή, του υπό εξέταση ακτινικού δικτύου λειτουργίας. Τέλος, μόλις ολοκληρωθεί ο εξωτερικός βρόχος επανάληψης προκύπτουν οι συνολικές ωμικές απώλειες του ακτινικού δικτύου λειτουργίας.

#### 4.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] R. L. Haupt S. E. Haupt, *Practical genetic algorithm*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004, pp. 211-219.
- [4.2] P. S. Georgilakis, *Spotlight on modern transformer design*, London: Springer-Verlag, 2009, pp. 244-256.
- [4.3] J. Mendoza, R. López, D. Morales, E. López, P. Dessante and R. Moraga, “Minimal loss reconfiguration with restricted population and addressed operators: Real application,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 948-954, May 2006.

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

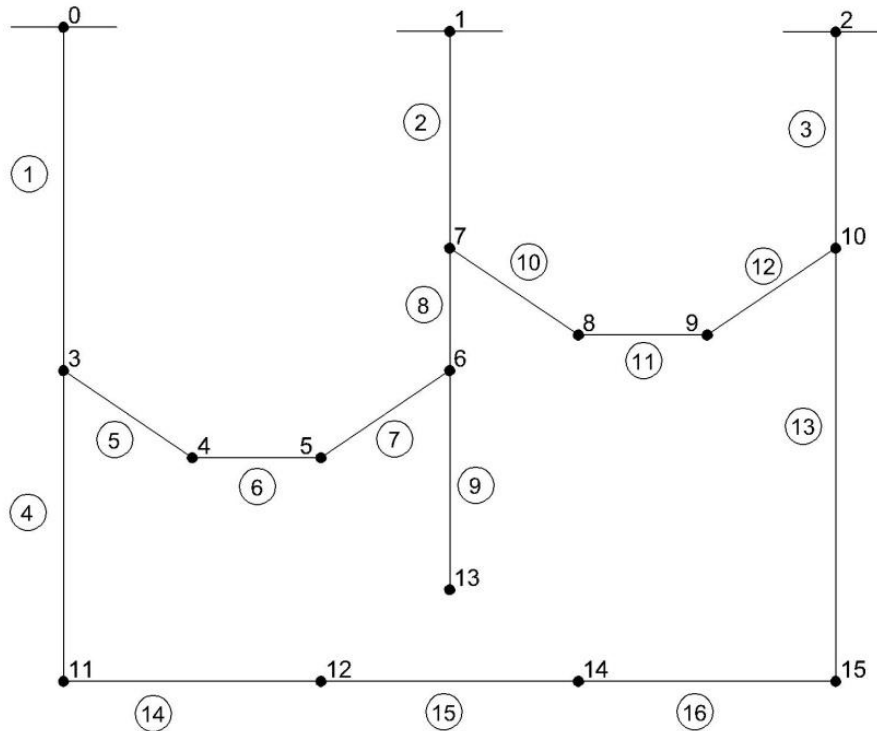
### 5.1 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

Η υλοποίηση του Γενετικού Αλγορίθμου Επαναδιαμόρφωσης Δικτύου Διανομής έγινε σε περιβάλλον MATLAB, έκδοσης 6.0.0.88 Release 12, που σημαίνει ότι η συγκεκριμένη υλοποίηση υποστηρίζεται και σε μεταγενέστερες εκδόσεις αυτής με μικρότερους, ίσως, χρόνους εκτέλεσης για δεδομένο ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το κύριο πρόγραμμα περιέχει 97 γραμμές κώδικα, η συνάρτηση υποπρογράμματος φορτίων σταθερού ρεύματος περιέχει 173 γραμμές κώδικα, η συνάρτηση υποπρογράμματος φορτίων σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος περιέχει 184 γραμμές κώδικα, ενώ η συνάρτηση υποπρογράμματος της αριθμητικής μεθόδου Newton-Raphson περιέχει 190 γραμμές κώδικα.

Η εκτέλεση του προγράμματος έγινε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με επεξεργαστή Intel® Core™ 2 Duo P8600 (2,4 GHz), σκληρό δίσκο 250 GB (5400RPM), 3072 MB DDR2 SDRAM (2 μονάδες Dimm), σε λειτουργικό σύστημα Windows Vista® Home Premium (32-bit) με Service Pack 1.

### 5.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΒΡΟΧΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ

Εξετάζεται πρότυπο, βροχοειδές, τριφασικό δίκτυο (Σχήμα 5.1), 16 κόμβων και 16 κλάδων, αποτελούμενο από τρία κυκλώματα απλών βρόχων. Κάθε κλάδος είναι εφοδιασμένος με ένα (νοητό) διακόπτη ο οποίος συμβάλει στη διαμόρφωση του δικτύου. Το δίκτυο βρίσκεται σε DC λειτουργία και περιλαμβάνει τρεις κόμβους-πηγές (0, 1, 2) που μπορεί στην πραγματικότητα να είναι τροφοδοτικά.



**Σχήμα 5.1:** Βροχοειδές δίκτυο 16 κόμβων και 16 κλάδων.

Στη συνέχεια εξετάζονται δύο περιπτώσεις για διαφορετικά φορτία σταθερής έντασης, κρατώντας σταθερά τα υπόλοιπα μεγέθη.

Δεδομένα Εισόδου

$$n_g = 460$$

$$n_p = 100$$

$$f_r = 0.5$$

$$n_k = f_r \cdot n_p = 0.5 \cdot 100 = 50$$

$$mut = 0.15$$

$$n_t = 16$$

$$n_s = 3$$

$$n = 16$$

$$n_f = 3$$

**Πίνακας 5.1:** Πίνακας περιγραφής βροχοειδούς δικτύου 16 κόμβων και 16 κλάδων.

Κλάδος	Κόμβος αναχώρησης	Κόμβος άφιξης	Ωμική αντίσταση (Ohm)
1	0	3	0,13
2	1	7	0,19
3	2	10	0,19
4	3	11	0,16
4	11	3	0,16

**Πίνακας 5.1:** Πίνακας περιγραφής βροχοειδούς δικτύου 16 κόμβων και 16 κλάδων (συνέχεια).

Κλάδος	Κόμβος αναχώρησης	Κόμβος άφιξης	Ωμική αντίσταση (Ohm)
5	3	4	0,13
5	4	3	0,13
6	4	5	0,07
6	5	4	0,07
7	5	6	0,19
7	6	5	0,19
8	6	7	0,14
8	7	6	0,14
9	6	13	0,14
10	7	8	0,19
10	8	7	0,19
11	8	9	0,07
11	9	8	0,07
12	9	10	0,16
12	10	9	0,16
13	10	15	0,14
13	15	10	0,14
14	11	12	0,07
14	12	11	0,07
15	12	14	0,07
15	14	12	0,07
16	14	15	0,07
16	15	14	0,07

**Πίνακας 5.2:** Πίνακας κομβικών φορτίων σταθερής έντασης.

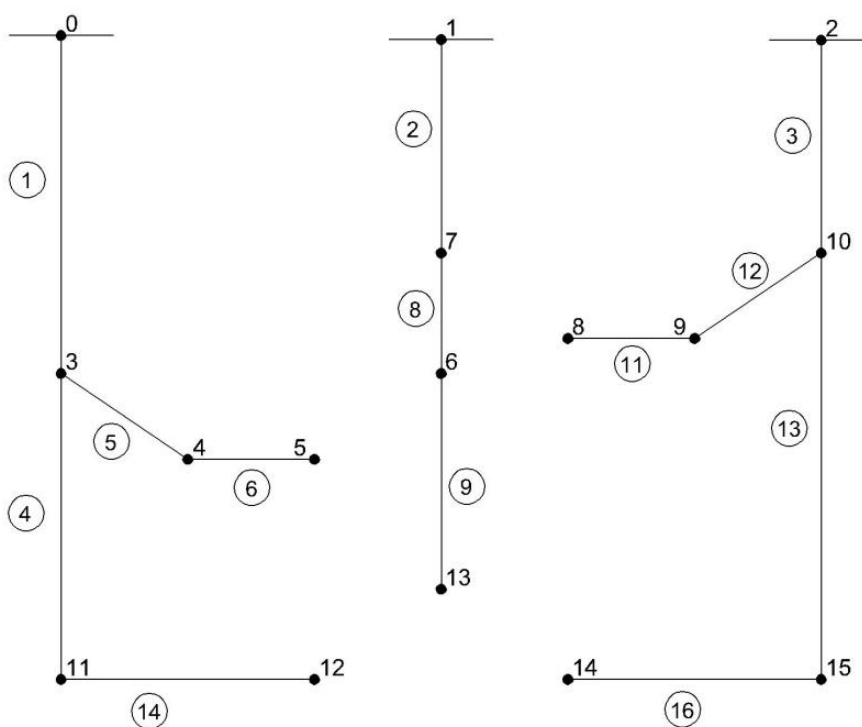
Κόμβος	Περίπτωση 1 <sup>η</sup> Ένταση (A)	Περίπτωση 2 <sup>η</sup> Ένταση (A)
3	88	132
4	132	132
5	27	27
6	224	224
7	178	178
8	44	44
9	44	44
10	43	43
11	88	133
12	66	66
13	204	204
14	92	92
15	44	43

Ενδεικτικός χρόνος εκτέλεσης: 44 sec

### Αποτελέσματα

Για την 1<sup>η</sup> περίπτωση το βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας (Σχήμα 5.2) περιγράφεται από την συμβολοσειρά 111110110111101 με συνολικές ωμικές απώλειες 147,689kW, ανά φάση. Το ίδιο δίκτυο λειτουργίας προκύπτει και από τους αλγορίθμους των Civanlar [5.1] και Huddleston [5.1].

Το αλγεβρικό σύστημα εύρεσης των κλαδικών ρευμάτων από τα κομβικά ρεύματα χρησιμοποιώντας τον πίνακα πρόσπτωσης (συμπεριλαμβάνοντας και τους κλάδους που δεν βρίσκονται σε λειτουργία), μόνο για τις γραμμές-πίνακα που αντιστοιχούν στους κόμβους-φορτίων είναι:



**Σχήμα 5.2:** Βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας 16 κόμβων και 13 κλάδων.



$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \\ i_7 \\ i_8 \\ i_9 \\ i_{10} \\ i_{11} \\ i_{12} \\ i_{13} \\ i_{14} \\ i_{15} \\ i_{16} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 88 \\ 132 \\ 27 \\ 224 \\ 178 \\ 44 \\ 44 \\ 43 \\ 88 \\ 66 \\ 204 \\ 92 \\ 44 \end{bmatrix}$$

Ισοδύναμα γράφουμε:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \\ i_8 \\ i_9 \\ i_{11} \\ i_{12} \\ i_{13} \\ i_{14} \\ i_{16} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 88 \\ 132 \\ 27 \\ 224 \\ 178 \\ 44 \\ 44 \\ 43 \\ 88 \\ 66 \\ 204 \\ 92 \\ 44 \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

$$i_7 = 0, i_{10} = 0, i_{15} = 0$$

Για την 2<sup>η</sup> περίπτωση το βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας περιγράφεται πάλι από την ίδια συμβολοσειρά 11111011011101 με συνολικές ωμικές απώλειες 160,401kW, ανά φάση. Το ίδιο δίκτυο λειτουργίας προκύπτει και από τον αλγόριθμο του Civanlar [5.1], ενώ ο αλγόριθμος του Huddleston [5.1] προτείνει το δίκτυο 111110110111011 με συνολικές ωμικές απώλειες 160,811kW, ανά φάση. Το αλγεβρικό σύστημα εύρεσης των κλαδικών ρευμάτων από τα κομβικά ρεύματα είναι:

$$\begin{bmatrix}
 -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \\ i_7 \\ i_8 \\ i_9 \\ i_{10} \\ i_{11} \\ i_{12} \\ i_{13} \\ i_{14} \\ i_{15} \\ i_{16} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 132 \\ 132 \\ 27 \\ 224 \\ 178 \\ 44 \\ 44 \\ 43 \\ 133 \\ 66 \\ 204 \\ 92 \\ 43 \end{bmatrix}$$

Ισοδύναμα γράφουμε:

$$\begin{bmatrix}
 -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \\ i_8 \\ i_9 \\ i_{11} \\ i_{12} \\ i_{13} \\ i_{14} \\ i_{16} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 132 \\ 132 \\ 27 \\ 224 \\ 178 \\ 44 \\ 44 \\ 43 \\ 133 \\ 66 \\ 204 \\ 92 \\ 43 \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

$$i_7 = 0, i_{10} = 0, i_{15} = 0$$

Επιλύοντας τα δύο παραπάνω συστήματα, βρίσκονται τα κλαδικά ρεύματα και οι ωμικές απώλειες, ανά φάση, για τις δύο περιπτώσεις.

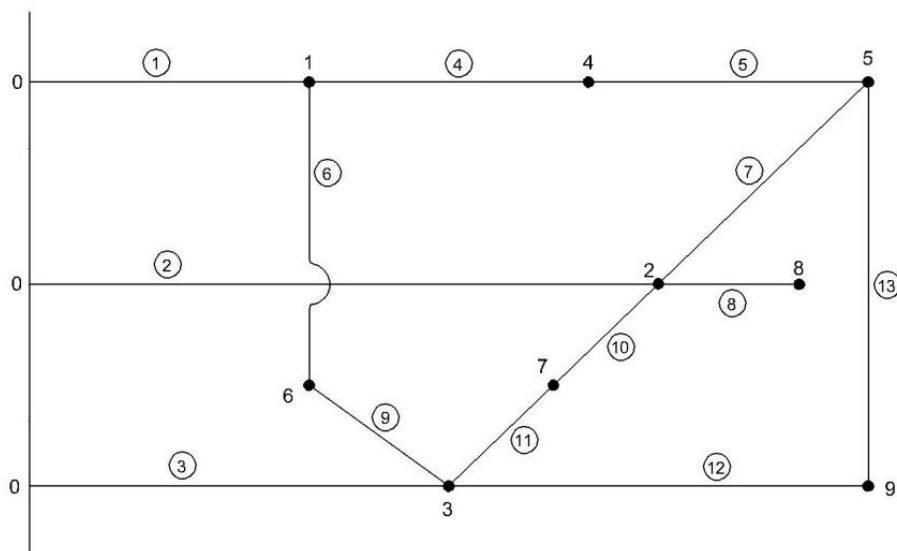
**Πίνακας 5.3:** Ωμικές απώλειες βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 16 κόμβων και 13 κλάδων.

Κλάδος	Περίπτωση 1 <sup>η</sup>		Περίπτωση 2 <sup>η</sup>	
	Ένταση (A)	Απώλειες (kW)	Ένταση (A)	Απώλειες (kW)
1	401	20,904	490	31,213
2	606	69,775	606	69,775
3	267	13,544	266	13,444
4	154	3,795	199	6,336
5	159	3,287	159	3,287
6	27	0,051	27	0,051
7	0	0	0	0
8	428	25,646	428	25,646
9	204	5,826	204	5,826
10	0	0	0	0
11	44	0,136	44	0,136
12	88	1,239	88	1,239
13	136	2,589	135	2,551
14	66	0,305	66	0,304
15	0	0	0	0
16	92	0,592	92	0,592
		<b>147,689</b>		<b>160,401</b>

### 5.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΒΡΟΧΟΕΙΔΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ

#### 5.3.1 ΠΡΟΤΥΠΟ ΔΙΚΤΥΟ 10 ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΙ 13 ΚΛΑΔΩΝ

Εξετάζεται πρότυπο, βροχοειδές, τριφασικό δίκτυο (Σχήμα 5.3), 10 κόμβων και 13 κλάδων, με βασική τάση  $V_b = 10kV$  και βασική ισχύ  $S_b = 100MVA$ . Κάθε κλάδος είναι εφοδιασμένος με ένα (νοητό) διακόπτη ο οποίος συμβάλει στη διαμόρφωση του δικτύου. Το δίκτυο περιλαμβάνει ένα κόμβο-πηγή (0), που μπορεί στην πραγματικότητα να είναι υποσταθμός (Υ/Σ) τροφοδοσίας.



**Σχήμα 5.3:** Βροχοειδές δίκτυο 10 κόμβων και 13 κλάδων.

Δεδομένα Εισόδου

$$n_g = 60$$

$$n_p = 100$$

$$f_r = 0.5$$

$$n_k = f_r \cdot n_p = 0.5 \cdot 100 = 50$$

$$mut = 0.15$$

$$n_t = 13$$

$$n_s = 1$$

$$n = 10$$

$$n_f = 1$$

**Πίνακας 5.4:** Περιγραφή βροχοειδούς δικτύου 10 κόμβων και 13 κλάδων.

Κλάδος	Κόμβος αναχώρησης	Κόμβος άφιξης	Ωμική αντίσταση (α.μ.)	Επαγωγική αντίδραση (α.μ.)
1	0	1	1,564	0,424
2	0	2	0,782	0,212
3	0	3	0,782	0,212
4	1	4	1,173	0,318
4	4	1	1,173	0,318
5	4	5	1,173	0,318
5	5	4	1,173	0,318
6	1	6	1,173	0,318
6	6	1	1,173	0,318
7	2	5	0,782	0,212
7	5	2	0,782	0,212
8	2	8	1,3685	0,371
9	3	6	1,173	0,318

**Πίνακας 5.4:** Περιγραφή βροχοειδούς δικτύου 10 κόμβων και 13 κλάδων (συνέχεια).

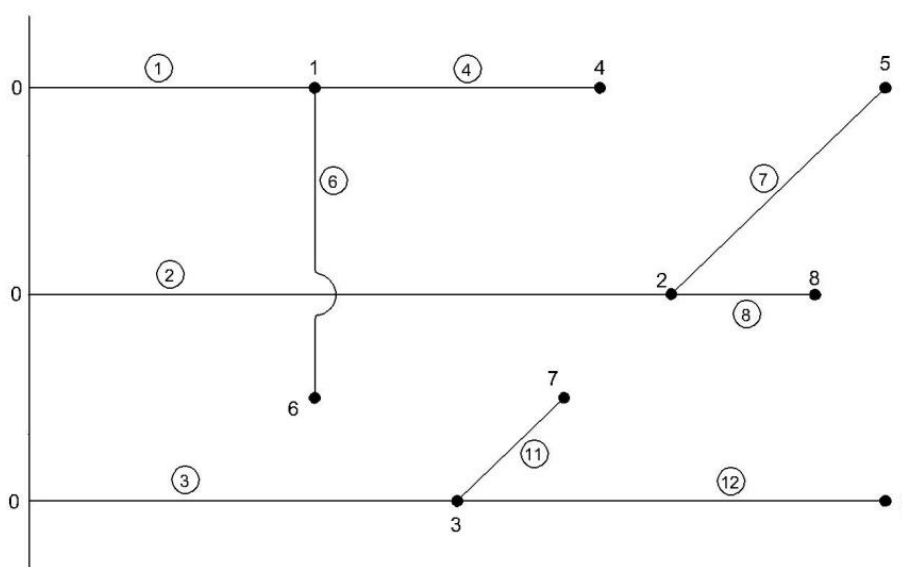
Κλάδος	Κόμβος αναχώρησης	Κόμβος άφιξης	Ωμική αντίσταση (α.μ.)	Επαγωγική αντίδραση (α.μ.)
9	6	3	1,173	0,318
10	2	7	1,173	0,318
10	7	2	1,173	0,318
11	3	7	0,782	0,212
11	7	3	0,782	0,212
12	3	9	1,173	0,318
12	9	3	1,173	0,318
13	5	9	0,782	0,212
13	9	5	0,782	0,212

Τα φορτία σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος του βροχοειδούς δικτύου φαίνονται στον Πίνακα 5.5.

Ενδεικτικός χρόνος εκτέλεσης: 41 sec

#### Αποτελέσματα

Το βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας (Σχήμα 5.4) περιγράφεται από την συμβολοσειρά 1111011100110, με συνολικές ωμικές απώλειες 268,272kW. Το ίδιο δίκτυο λειτουργίας προκύπτει και από τους αλγορίθμους των Augugliaro [5.2], Glamocanin [5.3], Goswami [5.4].



**Σχήμα 5.4:** Βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας 10 κόμβων και 9 κλάδων.

**Πίνακας 5.5:** Τάση, παραγωγή και φορτία βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 10 κόμβων και 9 κλάδων.

Κόμβος	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (°)	--Φορτίο--		--Παραγωγή--	
			kW	kVar	kW	kVar
0	1,000	0,000	0	0	5868,272	4152,728
1	0,991	0,131	100	90	0,000	0,000
2	0,975	0,549	500	300	0,000	0,000
3	0,975	0,561	600	400	0,000	0,000
4	0,989	0,174	100	90	0,000	0,000
5	0,967	0,732	800	600	0,000	0,000
6	0,987	0,143	300	100	0,000	0,000
7	0,970	0,674	600	400	0,000	0,000
8	0,952	1,097	1300	1000	0,000	0,000
9	0,956	1,100	1300	1100	0,000	0,000
<b>Σύνολο</b>			<b>5600</b>	<b>4080</b>	<b>5868,272</b>	<b>4152,728</b>

Από τον Πίνακα 5.5 διαπιστώνεται ότι στο βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας, η πτώση τάσης είναι μικρότερη από 5%, καθώς ο κόμβος με τη χαμηλότερη τάση (κόμβος 8) έχει μέτρο τάσης 0,952α.μ..

**Πίνακας 5.6:** Ροή φορτίου και απώλειες βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 10 κόμβων και 9 κλάδων.

Κλάδος		Ισχύς σε κάθε κόμβο & ροή ισχύος			Απώλεια γραμμής	
Κόμβος αναχ.	Κόμβος άφιξ.	kW	kVar	kVA	kW	kVar
0		5868,272	4152,728	7189,003		
	1	506,678	281,810	579,776	5,257	1,425
	2	2736,915	1937,118	3353,078	87,921	23,835
	3	2624,678	1933,800	3260,141	83,115	22,532
1		-100,000	-90,000	134,536		
	0	-501,421	-280,385	574,490	5,257	1,425
	4	100,217	90,059	134,737	0,217	0,059
	6	301,204	100,326	317,473	1,204	0,326
2		-500,000	-300,000	583,095		
	0	-2648,994	-1913,282	3267,693	87,921	23,835
	5	808,367	602,268	1008,060	8,367	2,268
	8	1340,627	1011,014	1679,115	40,627	11,014
3		-600,000	-400,000	721,110		
	0	-2541,563	-1911,268	3180,014	83,115	22,532
	7	604,324	401,172	725,360	4,324	1,172
	9	1337,239	1110,095	1737,964	37,239	10,095
4		-100,000	-90,000	134,536		
	1	-100,000	-90,000	134,536	0,217	0,059
5		-800,000	-600,000	1000,000		

**Πίνακας 5.6:** Ροή φορτίου και απώλειες βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 10 κόμβων και 9 κλάδων (συνέχεια).

Κλάδος		Ισχύς σε κάθε κόμβο & ροή ισχύος			Απώλεια γραμμής	
Κόμβος αναχ.	Κόμβος άφιξ.	kW	kVar	kVA	kW	kVar
	2	-800,000	-600,000	1000,000	8,367	2,268
6		-300,000	-100,000	316,228		
	1	-300,000	-100,000	316,228	1,204	0,326
7		-600,000	-400,000	721,110		
	3	-600,000	-400,000	721,110	4,324	1,172
8		-1300,000	-1000,000	1640,122		
	2	-1300,000	-1000,000	1640,122	40,627	11,014
9		-1300,000	-1100,000	1702,939		
	3	-1300,000	-1100,000	1702,939	37,239	10,095
<b>Συνολικές απώλειες γραμμών</b>					<b>268,272</b>	<b>72,728</b>

### 5.3.2 ΠΡΟΤΥΠΟ ΔΙΚΤΥΟ 16 ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΙ 16 ΚΛΑΔΩΝ

Εξετάζεται πρότυπο, βροχοειδές, τριφασικό δίκτυο (Σχήμα 5.1), 16 κόμβων και 16 κλάδων, με βασική τάση  $V_b = 12,65kV$  και βασική ισχύ  $S_b = 100MVA$ . Κάθε κλάδος είναι εφοδιασμένος με ένα (νοητό) διακόπτη ο οποίος συμβάλει στη διαμόρφωση του δικτύου. Το δίκτυο περιλαμβάνει τρεις κόμβους-πηγές (0, 1, 2), που μπορούν στην πραγματικότητα να είναι Υ/Σ τροφοδοσίας.

#### Δεδομένα Εισόδου

$$n_g = 460$$

$$n_p = 100$$

$$f_r = 0.5$$

$$n_k = f_r \cdot n_p = 0.5 \cdot 100 = 50$$

$$mut = 0.15$$

$$n_t = 16$$

$$n_s = 3$$

$$n = 16$$

$$n_f = 3$$

**Πίνακας 5.7:** Πίνακας περιγραφής βροχοειδούς δικτύου 16 κόμβων και 16 κλάδων.

Κλάδος	Κόμβος αναχώρησης	Κόμβος άφιξης	Ωμική αντίσταση (α.μ.)	Επαγωγική αντίδραση (α.μ.)
1	0	3	0,15812	0,30395
2	1	7	0,13282	0,25532
3	2	10	0,18974	0,36474
4	3	11	0,09487	0,18237
4	11	3	0,09487	0,18237
5	3	4	0,31624	0,60790
5	4	3	0,31624	0,60790
6	4	5	0,19986	0,38419
6	5	4	0,19986	0,38419
7	5	6	0,26564	0,51064
7	6	5	0,26564	0,51064
8	6	7	0,12650	0,24316
8	7	6	0,12650	0,24316
9	6	13	0,12396	0,23830
10	7	8	0,09993	0,19210
10	8	7	0,09993	0,19210
11	8	9	0,15812	0,30395
11	9	8	0,15812	0,30395
12	9	10	0,18974	0,36474
12	10	9	0,18974	0,36474
13	10	15	0,12396	0,23830
13	15	10	0,12396	0,23830
14	11	12	0,27323	0,52522
14	12	11	0,27323	0,52522
15	12	14	0,14926	0,28693
15	14	12	0,14926	0,28693
16	14	15	0,11258	0,21641
16	15	14	0,11258	0,21641

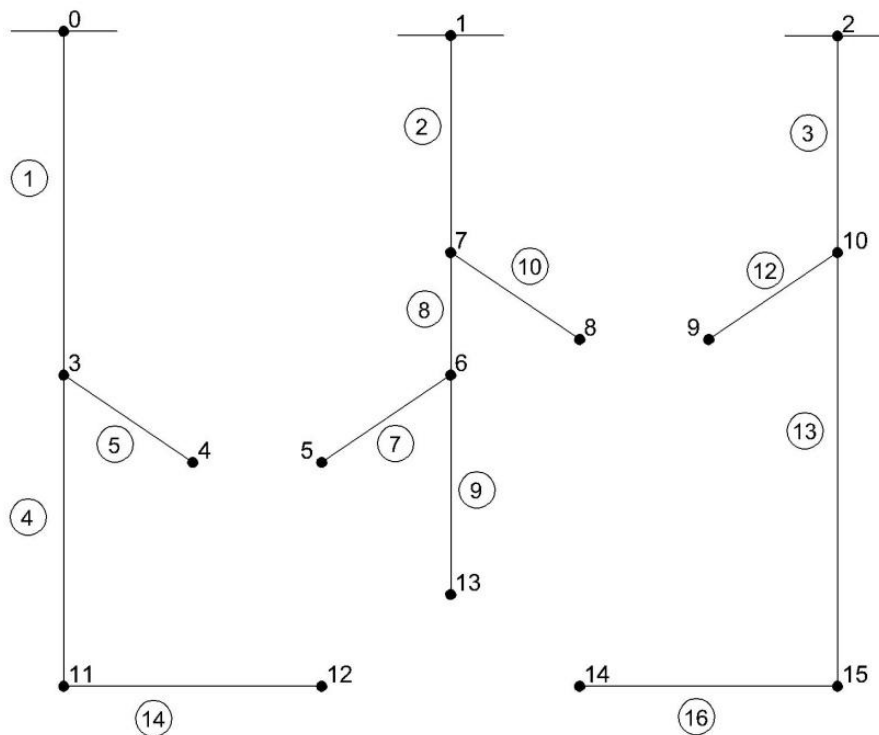
Τα φορτία σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος του βροχοειδούς δικτύου φαίνονται στον Πίνακα 5.8.

Ενδεικτικός χρόνος εκτέλεσης: 88 sec

#### Αποτελέσματα

Το βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας (Σχήμα 5.5) περιγράφεται από την συμβολοσειρά 1111101111011101, με συνολικές ωμικές απώλειες 331,130kW. Το ίδιο δίκτυο λειτουργίας προκύπτει και από τον αλγόριθμο του Kashem [5.5].





Σχήμα 5.5: Βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας 16 κόμβων και 13 κλάδων.

Πίνακας 5.8: Τάση, παραγωγή και φορτία βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 16 κόμβων και 13 κλάδων.

Κόμβος	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (°)	--Φορτίο--		--Παραγωγή--	
			kW	kVar	kW	kVar
0	1,000	0,000	0	0	6300,584	3153,350
1	1,000	0,000	0	0	6742,369	3705,227
2	1,000	0,000	0	0	6038,177	2797,951
3	0,981	-0,828	2100	920	0,000	0,000
4	0,974	-1,130	1100	520	0,000	0,000
5	0,963	-1,555	1450	590	0,000	0,000
6	0,970	-1,197	1650	780	0,000	0,000
7	0,982	-0,718	1280	760	0,000	0,000
8	0,980	-0,792	940	560	0,000	0,000
9	0,975	-1,164	1080	450	0,000	0,000
10	0,978	-0,979	1420	680	0,000	0,000
11	0,975	-1,069	1750	870	0,000	0,000
12	0,968	-1,360	1250	650	0,000	0,000
13	0,967	-1,328	1300	780	0,000	0,000
14	0,967	-1,508	1450	670	0,000	0,000
15	0,970	-1,363	1980	790	0,000	0,000
<b>Σύνολο</b>			<b>18750</b>	<b>9020</b>	<b>19081,130</b>	<b>9656,529</b>

Από τον Πίνακα 5.8 διαπιστώνεται ότι στο βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας, η πτώση τάσης είναι μικρότερη από 4%, καθώς ο κόμβος με τη χαμηλότερη τάση (κόμβος 5) έχει μέτρο τάσης 0,963α.μ..

**Πίνακας 5.9:** Ροή φορτίου και απώλειες βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 16 κόμβων και 13 κλάδων.

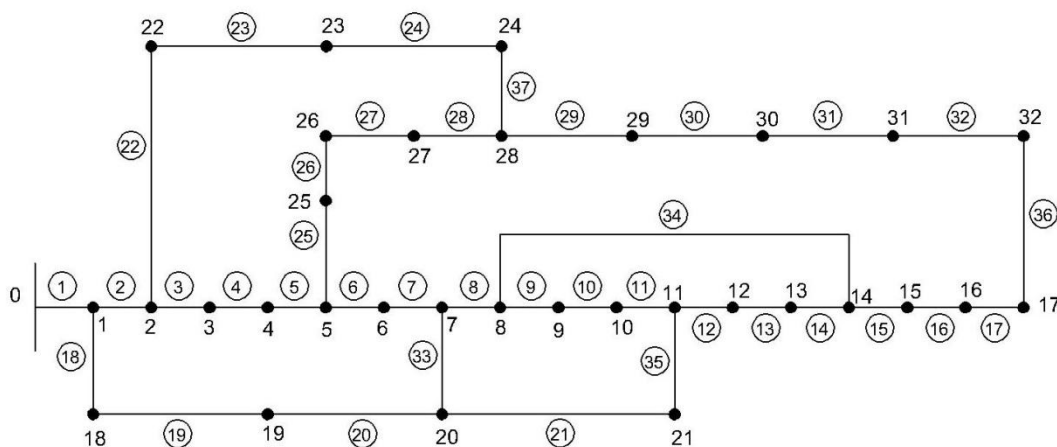
Κλάδος		Ισχύς σε κάθε κόμβο & ροή ισχύος			Απώλεια γραμμής	
Κόμβος αναχ.	Κόμβος άφιξ.	kW	kVar	kVA	kW	kVar
0		6300,584	3153,350	7045,635		
	3	6300,584	3153,350	7045,635	78,492	150,884
1		6742,369	3705,227	7693,390		
	7	6742,369	3705,227	7693,390	78,614	151,119
2		6038,177	2797,951	6654,931		
	10	6038,177	2797,951	6654,931	84,032	161,536
3		-2100,000	-920,000	2292,684		
	0	-6222,091	-3002,466	6908,634	78,492	150,884
	11	3017,154	1552,974	3393,368	11,362	21,841
	4	1104,938	529,492	1225,255	4,938	9,492
4		-1100,000	-520,000	1216,717		
	3	-1100,000	-520,000	1216,717	4,938	9,492
5		-1450,000	-590,000	1565,439		
	6	-1450,000	-590,000	1565,439	7,015	13,485
6		-1650,000	-780,000	1825,075		
	5	1457,015	603,485	1577,050	7,015	13,485
	7	-4410,063	-2169,345	4914,744	32,445	62,367
	13	1303,048	785,859	1521,679	3,048	5,859
7		-1280,000	-760,000	1488,624		
	1	-6663,755	-3554,108	7552,305	78,614	151,119
	6	4442,508	2231,711	4971,561	32,445	62,367
	8	941,247	562,397	1096,465	1,247	2,397
8		-940,000	-560,000	1094,166		
	7	-940,000	-560,000	1094,166	1,247	2,397
9		-1080,000	-450,000	1170,000		
	10	-1080,000	-450,000	1170,000	2,734	5,256
10		-1420,000	-680,000	1574,421		
	2	-5954,145	-2636,415	6511,722	84,032	161,536
	9	1082,734	455,256	1174,551	2,734	5,256
	15	3451,411	1501,159	3763,737	18,341	35,258
11		-1750,000	-870,000	1954,329		
	3	-3005,792	-1531,134	3373,300	11,362	21,841
	12	1255,792	661,134	1419,194	5,792	11,134
12		-1250,000	-650,000	1408,900		
	11	-1250,000	-650,000	1408,900	5,792	11,134
13		-1300,000	-780,000	1516,047		
	6	-1300,000	-780,000	1516,047	3,048	5,859

**Πίνακας 5.9:** Ροή φορτίου και απώλειες βέλτιστου ακτινικού φορτίου λειτουργίας 16 κόμβων και 13 κλάδων (συνέχεια).

Κλάδος		Ισχύς σε κάθε κόμβο & ροή ισχύος			Απώλεια γραμμής	
Κόμβος αναχ.	Κόμβος άφιξ.	kW	kVar	kVA	kW	kVar
14		-1450,000	-670,000	1597,310		
	15	-1450,000	-670,000	1597,310	3,070	5,901
15		-1980,000	-790,000	2131,783		
	10	-3433,070	-1465,901	3732,939	18,341	35,258
	14	1453,070	675,901	1602,578	3,070	5,901
<b>Συνολικές απώλειες γραμμών</b>					<b>331,130</b>	<b>636,529</b>

### 5.3.3 ΠΡΟΤΥΠΟ ΔΙΚΤΥΟ 33 ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΙ 37 ΚΛΑΔΩΝ

Εξετάζεται πρότυπο, βροχοειδές, τριφασικό δίκτυο (Σχήμα 5.6), 33 κόμβων και 37 κλάδων, με βασική τάση  $V_b = 12,66kV$ . Κάθε κλάδος είναι εφοδιασμένος με ένα (νοητό) διακόπτη ο οποίος συμβάλει στη διαμόρφωση του δικτύου. Το δίκτυο περιλαμβάνει ένα κόμβο-πηγή (0), που μπορεί στην πραγματικότητα να είναι Υ/Σ τροφοδοσίας.



**Σχήμα 5.6:** Βροχοειδές δίκτυο 33 κόμβων και 37 κλάδων.

Δεδομένα Εισόδου

$$n_g = 501$$

$$n_p = 100$$

$$f_r = 0.5$$

$$n_k = f_r \cdot n_p = 0.5 \cdot 100 = 50$$

$$mut = 0.01$$

$$n_t = 37$$

$$n_s = 1$$

$$n = 33$$

$$n_f = 1$$

**Πίνακας 5.10:** Περιγραφή βροχοειδούς δικτύου 33 κόμβων και 37 κλάδων.

Κλάδος	Κόμβος αναχώρησης	Κόμβος άφιξης	Ωμική αντίσταση (Ohm)	Επαγωγική αντίδραση (Ohm)
1	0	1	0,0922	0,0470
2	1	2	0,4930	0,2511
2	2	1	0,4930	0,2511
3	2	3	0,3660	0,1864
3	3	2	0,3660	0,1864
4	3	4	0,3811	0,1941
4	4	3	0,3811	0,1941
5	4	5	0,8190	0,7070
5	5	4	0,8190	0,7070
6	5	6	0,1872	0,6188
6	6	5	0,1872	0,6188
7	6	7	0,7114	0,2351
7	7	6	0,7114	0,2351
8	7	8	1,0300	0,7400
8	8	7	1,0300	0,7400
9	8	9	1,0440	0,7400
9	9	8	1,0440	0,7400
10	9	10	0,1966	0,0650
10	10	9	0,1966	0,0650
11	10	11	0,3744	0,1238
11	11	10	0,3744	0,1238
12	11	12	1,4680	1,1550
12	12	11	1,4680	1,1550
13	12	13	0,5416	0,7129
13	13	12	0,5416	0,7129
14	13	14	0,5910	0,5260
14	14	13	0,5910	0,5260
15	14	15	0,7463	0,5450
15	15	14	0,7463	0,5450
16	15	16	1,2890	1,7210
16	16	15	1,2890	1,7210
17	16	17	0,7320	0,5740

**Πίνακας 5.10:** Περιγραφή βροχοειδούς δικτύου 33 κόμβων και 37 κλάδων (συνέχεια).

Κλάδος	Κόμβος αναχώρησης	Κόμβος άφιξης	Ωμική αντίσταση (Ωm)	Επαγωγική αντίδραση (Ωm)
17	17	16	0,7320	0,5740
18	1	18	0,1640	0,1565
18	18	1	0,1640	0,1565
19	18	19	1,5042	1,3554
19	19	18	1,5042	1,3554
20	19	20	0,4095	0,4784
20	20	19	0,4095	0,4784
21	20	21	0,7089	0,9373
21	21	20	0,7089	0,9373
22	2	22	0,4512	0,3083
22	22	2	0,4512	0,3083
23	22	23	0,8980	0,7091
23	23	22	0,8980	0,7091
24	23	24	0,8960	0,7011
24	24	23	0,8960	0,7011
25	5	25	0,2030	0,1034
25	25	5	0,2030	0,1034
26	25	26	0,2842	0,1447
26	26	25	0,2842	0,1447
27	26	27	1,0590	0,9337
27	27	26	1,0590	0,9337
28	27	28	0,8042	0,7006
28	28	27	0,8042	0,7006
29	28	29	0,5075	0,2585
29	28	28	0,5075	0,2585
30	29	30	0,9744	0,9630
30	30	29	0,9744	0,9630
31	30	31	0,3105	0,3619
31	31	30	0,3105	0,3619
32	31	32	0,3410	0,5302
32	32	31	0,3410	0,5302
33	7	20	2,000	2,000
33	20	7	2,000	2,000
34	8	14	2,000	2,000
34	14	8	2,000	2,000
35	11	21	2,000	2,000
35	21	11	2,000	2,000
36	17	32	0,500	0,500
36	32	17	0,500	0,500
37	24	28	0,500	0,500
37	28	24	0,500	0,500

Τα φορτία σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος του βροχοειδούς δικτύου φαίνονται στον Πίνακα 5.11.



**Πίνακας 5.11:** Τάση, παραγωγή και φορτία βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 33 κόμβων και 32 κλάδων.

Κόμβος	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία Τάσης (°)	--Φορτίο--		--Παραγωγή--	
			kW	kVar	kW	kVar
0	1,000	0,000	0	0	3854,551	2402,305
1	0,997	0,014	100	60	0,000	0,000
2	0,987	0,097	90	40	0,000	0,000
3	0,982	0,163	120	80	0,000	0,000
4	0,978	0,230	60	30	0,000	0,000
5	0,967	0,249	60	30	0,000	0,000
6	0,967	0,209	200	100	0,000	0,000
7	0,963	-0,685	200	100	0,000	0,000
8	0,959	-0,736	60	20	0,000	0,000
9	0,963	-0,624	60	20	0,000	0,000
10	0,963	-0,624	45	30	0,000	0,000
11	0,963	-0,626	60	35	0,000	0,000
12	0,960	-0,641	60	35	0,000	0,000
13	0,960	-0,658	120	80	0,000	0,000
14	0,953	-0,893	60	10	0,000	0,000
15	0,951	-0,915	60	20	0,000	0,000
16	0,949	-1,008	60	20	0,000	0,000
17	0,947	-1,019	90	40	0,000	0,000
18	0,995	-0,022	90	40	0,000	0,000
19	0,978	-0,306	90	40	0,000	0,000
20	0,974	-0,425	90	40	0,000	0,000
21	0,970	-0,515	90	40	0,000	0,000
22	0,983	0,067	90	50	0,000	0,000
23	0,977	-0,021	420	200	0,000	0,000
24	0,973	-0,065	420	200	0,000	0,000
25	0,966	0,286	60	25	0,000	0,000
26	0,963	0,339	60	25	0,000	0,000
27	0,953	0,424	60	20	0,000	0,000
28	0,945	0,503	120	70	0,000	0,000
29	0,942	0,602	200	600	0,000	0,000
30	0,938	0,528	150	70	0,000	0,000
31	0,938	0,510	210	100	0,000	0,000
32	0,947	-1,022	60	40	0,000	0,000
<b>Σύνολο</b>			<b>3715</b>	<b>2300</b>	<b>3854,551</b>	<b>2402,305</b>

Από τον Πίνακα 5.11 διαπιστώνεται ότι στο βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας, η πτώση τάσης είναι μικρότερη από 7%, καθώς οι κόμβοι με τη χαμηλότερη τάση (κόμβοι 30, 31) έχουν μέτρο τάσης 0,938α.μ..

**Πίνακας 5.12:** Ροή φορτίου και απώλειες βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 33 κόμβων και 32 κλάδων.

Κλάδος		Ισχύς σε κάθε κόμβο & ροή ισχύος			Απώλεια Γραμμής	
Κόμβος αναχ.	Κόμβος άφιξ.	kW	kVar	kVA	kW	kVar
0		3854,551	2402,305	4541,876		
	1	3854,551	2402,305	4541,876	11,867	6,049
1		-100,000	-60,000	116,619		
	0	-3842,685	-2396,256	4528,605	11,867	6,049
	2	2409,537	1689,347	2942,747	26,793	13,647
	18	1333,148	646,909	1481,815	2,260	2,157
2		-90,000	-40,000	98,489		
	1	-2382,743	-1675,700	2912,977	26,793	13,647
	3	1353,211	1178,518	1794,460	7,548	3,844
	22	939,532	457,182	1044,862	3,155	2,156
3		-120,000	-80,000	144,222		
	2	-1345,663	-1174,673	1786,244	7,548	3,844
	4	1225,663	1094,673	1643,338	6,652	3,388
4		-60,000	-30,000	67,082		
	3	-1219,010	-1091,285	1636,120	6,652	3,388
	5	1159,010	1061,285	1571,506	13,190	11,386
5		-60,000	-20,000	63,246		
	4	-1145,821	-1049,899	1554,089	13,190	11,386
	6	200,062	100,207	223,755	0,062	0,207
	25	885,758	929,693	1284,094	2,232	1,137
6		-200,000	-100,000	223,607		
	5	-200,000	-100,000	223,607	0,062	0,207
7		-200,000	-100,000	223,607		
	8	394,084	153,744	423,012	1,241	0,892
	20	-594,084	-253,744	646,004	5,620	5,620
8		-60,000	-20,000	63,246		
	7	-392,843	-152,852	421,532	1,241	0,892
	14	332,843	132,852	358,377	1,742	1,742
9		-60,000	-20,000	63,246		
	10	-60,000	-20,000	63,246	0,005	0,002
10		-45,000	-30,000	54,083		
	9	60,005	20,002	63,251	0,005	0,002
	11	-105,005	-50,002	116,303	0,034	0,011
11		-60,000	-35,000	69,462		
	10	105,039	50,013	116,338	0,034	0,011
	12	180,530	115,457	214,293	0,453	0,357
	21	-345,569	-200,470	399,508	2,147	2,147
12		-60,000	-35,000	69,462		
	11	-180,076	-115,100	213,718	0,453	0,357
	13	120,076	80,100	144,341	0,076	0,100
13		-120,000	-80,000	144,222		



**Πίνακας 5.12:** Ροή φορτίου και απώλειες βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 33 κόμβων και 32 κλάδων (συνέχεια).

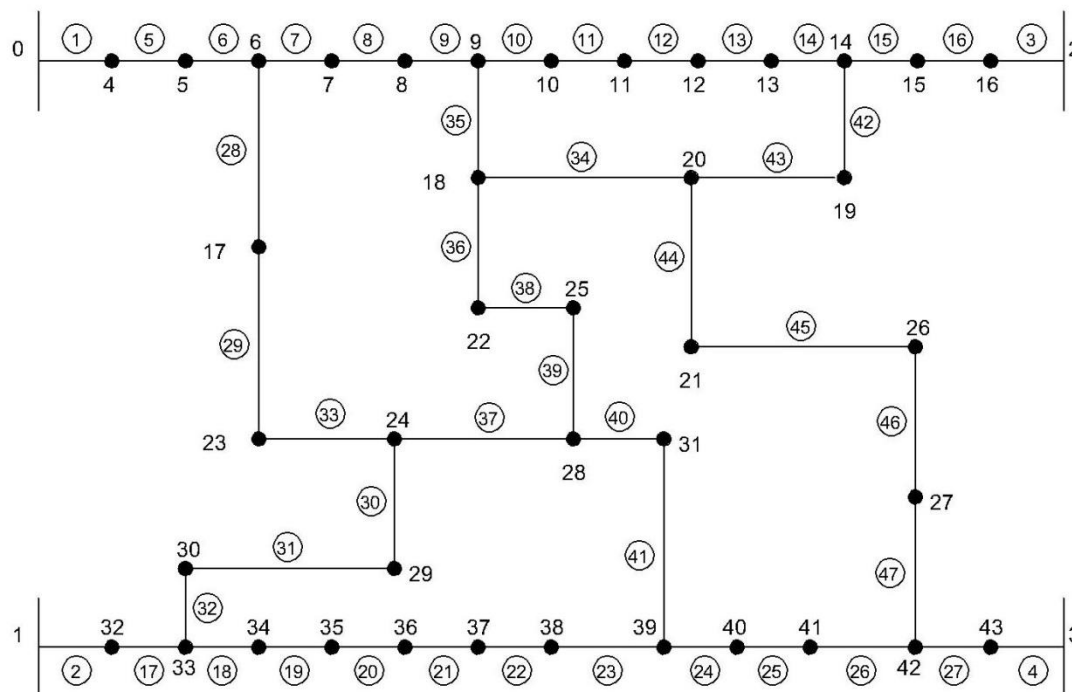
Κλάδος		Ισχύς σε κάθε κόμβο & ροή ισχύος			Απώλεια Γραμμής	
Κόμβος αναχ.	Κόμβος άφιξ.	kW	kVar	kVA	kW	kVar
	12	-120,000	-80,000	144,222	0,076	0,100
14		-60,000	-10,000	60,828		
	15	271,101	121,110	296,924	0,452	0,330
	8	-331,101	-131,110	356,115	1,742	1,742
15		-60,000	-20,000	63,246		
	14	-270,650	-120,780	296,377	0,452	0,330
	16	210,650	100,780	233,516	0,484	0,647
16		-60,000	-20,000	63,246		
	15	-210,165	-100,133	232,801	0,484	0,647
	17	150,165	80,133	170,209	0,147	0,115
17		-90,000	-40,000	98,489		
	16	-150,018	-80,018	170,024	0,147	0,115
	32	60,018	40,018	72,136	0,018	0,018
18		-90,000	-40,000	98,489		
	1	-1330,888	-644,752	1478,840	2,260	2,157
	19	1240,888	604,752	1380,409	18,061	16,274
19		-90,000	-40,000	98,489		
	18	-1222,827	-588,478	1357,060	18,061	16,274
	20	1132,827	548,478	1258,620	4,229	4,941
20		-90,000	-40,000	98,489		
	19	-1128,597	-543,537	1252,663	4,229	4,941
	21	438,893	244,174	502,243	1,177	1,556
	7	599,704	259,363	653,387	5,620	5,620
21		-90,000	-40,000	98,489		
	20	-437,716	-242,618	500,459	1,177	1,556
	11	347,716	202,618	402,443	2,147	2,147
22		-90,000	-50,000	102,956		
	2	-936,377	-455,026	1041,082	3,155	2,156
	23	846,377	405,026	938,297	5,100	4,028
23		-420,000	-200,000	465,188		
	22	-841,277	-400,999	931,958	5,100	4,028
	24	421,277	200,999	466,770	1,277	0,999
24		-420,000	-200,000	465,188		
	23	-420,000	-200,000	465,188	1,277	0,999
25		-60,000	-25,000	65,000		
	5	-883,526	-928,556	1281,731	2,232	1,137
	26	823,526	903,556	1222,542	2,843	1,447
26		-60,000	-25,000	65,000		
	25	-820,684	902,108	1219,558	2,843	1,447
	27	760,684	877,108	1161,016	9,600	8,465
27		-60,000	-20,000	63,246		

**Πίνακας 5.12:** Ροή φορτίου και απώλειες βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 33 κόμβων και 32 κλάδων (συνέχεια).

Κλάδος		Ισχύς σε κάθε κόμβο & ροή ισχύος			Απώλεια Γραμμής	
Κόμβος αναχ.	Κόμβος άφιξ.	kW	kVar	kVA	kW	kVar
	26	-751,083	-868,644	1148,333	9,600	8,465
	28	691,083	848,644	1094,437	6,622	5,769
28		-120,000	-70,000	138,924		
	27	-684,461	-842,875	1085,783	6,622	5,769
	29	564,461	772,875	957,054	3,247	1,654
29		-200,000	-600,000	632,456		
	28	-561,214	-771,221	953,805	3,247	1,654
	30	361,214	171,221	399,740	1,095	1,082
30		-150,000	-70,000	165,529		
	29	-360,119	-170,139	398,288	1,095	1,082
	31	210,119	100,139	232,761	0,119	0,139
31		-210,000	-100,000	232,594		
	30	-210,000	-100,000	232,594	0,119	0,139
32		-60,000	-40,000	72,111		
	17	-60,000	-40,000	72,111	0,018	0,018
<b>Συνολικές απώλειες γραμμών</b>					<b>139,551</b>	<b>102,305</b>

#### 5.3.4 ΠΡΟΤΥΠΟ ΔΙΚΤΥΟ 44 ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΙ 47 ΚΛΑΔΩΝ

Εξετάζεται πρότυπο, βροχοειδές, τριφασικό δίκτυο (Σχήμα 5.8), 44 κόμβων και 47 κλάδων, με βασική τάση  $V_b = 20kV$ . Κάθε κλάδος είναι εφοδιασμένος με ένα (νοητό) διακόπτη, ο οποίος συμβάλει στη διαμόρφωση του δικτύου. Το δίκτυο περιλαμβάνει τέσσερις κόμβους-πηγές (0, 1, 2, 3), που μπορούν στην πραγματικότητα να είναι Υ/Σ τροφοδοσίας.



Σχήμα 5.8: Βροχοειδές δίκτυο 44 κόμβων και 47 κλάδων.

Δεδομένα Εισόδου

- $n_g = 626$
- $n_p = 100$
- $f_r = 0.5$
- $n_k = f_r \cdot n_p = 0.5 \cdot 100 = 50$
- $mut = 0.01$
- $n_t = 47$
- $n_s = 4$
- $n = 44$
- $n_f = 4$

Πίνακας 5.13: Περιγραφή βροχοειδούς δικτύου 44 κόμβων και 47 κλάδων.

Κλάδος	Κόμβος αναχώρησης	Κόμβος άφιξης	Ωμική αντίσταση (Ohm)	Επαγωγική αντίδραση (Ohm)
1	0	4	0,159	0,016
2	1	32	0,287	0,029
3	2	16	0,317	0,031
4	3	43	0,319	0,032
5	4	5	0,236	0,024
5	5	4	0,236	0,024
6	5	6	0,185	0,019
6	6	5	0,185	0,019
7	6	7	0,314	0,032

**Πίνακας 5.13:** Περιγραφή βροχοειδούς δικτύου 44 κόμβων και 47 κλάδων (συνέχεια).

Κλάδος	Κόμβος αναχώρησης	Κόμβος άφιξης	Ωμική αντίσταση (Ohm)	Επαγωγική αντίδραση (Ohm)
7	7	6	0,314	0,032
8	7	8	0,218	0,022
8	8	7	0,218	0,022
9	8	9	0,305	0,031
9	9	8	0,305	0,031
10	9	10	0,344	0,035
10	10	9	0,344	0,035
11	10	11	0,190	0,019
11	11	10	0,190	0,019
12	11	12	0,188	0,018
12	12	11	0,188	0,018
13	12	13	0,320	0,032
13	13	12	0,320	0,032
14	13	14	0,241	0,024
14	14	13	0,241	0,024
15	14	15	0,163	0,016
15	15	14	0,163	0,016
16	15	16	0,138	0,014
16	16	15	0,138	0,014
17	32	33	0,329	0,033
17	33	32	0,329	0,033
18	33	34	0,218	0,022
18	34	33	0,218	0,022
19	34	35	0,185	0,019
19	35	34	0,185	0,019
20	35	36	0,192	0,019
20	36	35	0,192	0,019
21	36	37	0,259	0,026
21	37	36	0,259	0,026
22	37	38	0,128	0,013
22	38	37	0,128	0,013
23	38	39	0,241	0,024
23	39	38	0,241	0,024
24	39	40	0,255	0,026
24	40	39	0,255	0,026
25	40	41	0,146	0,015
25	41	40	0,146	0,015
26	41	42	0,307	0,031
26	42	41	0,307	0,031
27	42	43	0,248	0,025
27	43	42	0,248	0,025
28	6	17	0,231	0,023
28	17	6	0,231	0,023

**Πίνακας 5.13:** Περιγραφή βροχοειδούς δικτύου 44 κόμβων και 47 κλάδων (συνέχεια).

Κλάδος	Κόμβος αναχώρησης	Κόμβος άφιξης	Ωμική αντίσταση (Ohm)	Επαγωγική αντίδραση (Ohm)
29	17	23	0,222	0,022
29	23	17	0,222	0,022
30	24	29	0,282	0,028
30	29	24	0,282	0,028
31	29	30	0,227	0,023
31	30	29	0,227	0,023
32	30	33	0,293	0,029
32	33	30	0,293	0,029
33	23	24	0,263	0,027
33	24	23	0,263	0,027
34	18	20	0,195	0,020
34	20	18	0,195	0,020
35	9	18	0,327	0,033
35	18	9	0,327	0,033
36	18	22	0,250	0,025
36	22	18	0,250	0,025
37	24	28	0,150	0,015
37	28	24	0,150	0,015
38	22	25	0,186	0,019
38	25	22	0,186	0,019
39	25	28	0,142	0,014
39	38	25	0,142	0,014
40	28	31	0,128	0,013
40	31	28	0,128	0,013
41	31	39	0,241	0,024
41	39	31	0,241	0,024
42	14	19	0,330	0,033
42	19	14	0,330	0,033
43	19	20	0,180	0,018
43	20	19	0,180	0,018
44	20	21	0,310	0,031
44	21	20	0,310	0,031
45	21	26	0,284	0,029
45	26	21	0,284	0,029
46	26	27	0,144	0,015
46	27	26	0,144	0,015
47	27	42	0,252	0,026
47	42	27	0,252	0,026

Τα φορτία σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος του βροχοειδούς δικτύου φαίνονται στον Πίνακα 5.14.

Στον αρχικό πληθυσμό συμπεριλαμβάνονται τέσσερα εφικτά ακτινικά δίκτυα λειτουργίας, που δίνονται εξωτερικά στο λογισμικό, από το χρήστη και ζητείται από το ΓΑ να μεταφέρει τα τέσσερα καλύτερα άτομα κάθε γενιάς στην

επόμενη. Τα αρχικά τέσσερα εφικτά ακτινικά δίκτυα λειτουργίας σε μορφή συμβολοσειράς είναι:

```

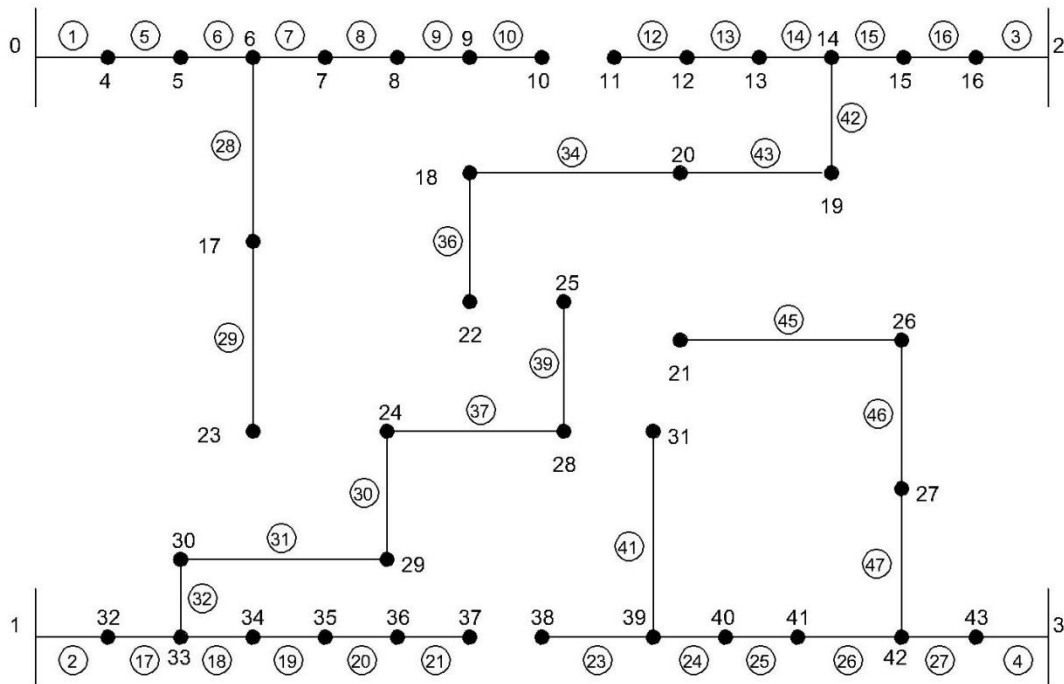
11111101111111111111011111111111001101101111110
111101111111111111110111111111110101101110101111
111111101111111111110111111111011110011110110111
111111110111111111111111011101111111011011101

```

Ενδεικτικός χρόνος εκτέλεσης: 137493 sec

### Αποτελέσματα

Το βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας (Σχήμα 5.9) περιγράφεται από την συμβολοσειρά 111111110111111111110111111111010110101110111, με συνολικές ωμικές απώλειες 117,18kW. Το ίδιο δίκτυο λειτουργίας προκύπτει και από τους αλγορίθμους του Augugliaro [5.2] [5.7] με την προϋπόθεση ότι κάθε κλάδος είναι εφοδιασμένος με ένα (νοητό) διακόπτη.



**Σχήμα 5.9:** Βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας 44 κόμβων και 40 κλάδων.

**Πίνακας 5.14:** Πτώση τάσης, παραγωγή και φορτία βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 44 κόμβων και 40 κλάδων.

Κόμβος	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (°)	--Φορτίο--		--Παραγωγή--	
			kW	kVar	kW	kVar
0	1,000	0,000	0	0	3808,639	1853,603
1	1,000	0,000	0	0	3550,998	1709,715
2	1,000	0,000	0	0	4029,501	1918,313
3	1,000	0,000	0	0	3966,041	1885,129
4	0,998	0,034	429	210	0,000	0,000
5	0,996	0,078	455	228	0,000	0,000
6	0,995	0,108	307	145	0,000	0,000
7	0,993	0,138	500	236	0,000	0,000
8	0,993	0,154	581	289	0,000	0,000
9	0,992	0,165	234	107	0,000	0,000
10	0,992	0,174	415	217	0,000	0,000
11	0,992	0,169	384	173	0,000	0,000
12	0,992	0,165	599	321	0,000	0,000
13	0,993	0,146	320	169	0,000	0,000
14	0,994	0,128	509	231	0,000	0,000
15	0,995	0,097	261	123	0,000	0,000
16	0,997	0,069	357	159	0,000	0,000
17	0,994	0,119	378	181	0,000	0,000
18	0,992	0,175	354	163	0,000	0,000
19	0,993	0,156	407	199	0,000	0,000
20	0,992	0,167	360	174	0,000	0,000
21	0,993	0,146	550	271	0,000	0,000
22	0,991	0,181	445	203	0,000	0,000
23	0,994	0,125	484	238	0,000	0,000
24	0,992	0,169	343	165	0,000	0,000
25	0,992	0,180	463	244	0,000	0,000
26	0,993	0,137	209	96	0,000	0,000
27	0,994	0,131	531	245	0,000	0,000
28	0,992	0,176	275	129	0,000	0,000
29	0,993	0,152	222	113	0,000	0,000
30	0,994	0,135	205	90	0,000	0,000
31	0,991	0,176	370	195	0,000	0,000
32	0,997	0,056	553	278	0,000	0,000
33	0,995	0,109	215	104	0,000	0,000
34	0,994	0,124	321	152	0,000	0,000
35	0,994	0,133	206	97	0,000	0,000
36	0,993	0,140	209	103	0,000	0,000
37	0,993	0,147	512	232	0,000	0,000
38	0,991	0,175	377	174	0,000	0,000
39	0,992	0,170	423	188	0,000	0,000
40	0,993	0,154	302	149	0,000	0,000
41	0,993	0,142	261	111	0,000	0,000

**Πίνακας 5.14:** Τάση, παραγωγή και φορτία βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 44 κόμβων και 40 κλάδων (συνέχεια).

Κόμβος	Μέτρο τάσης (α.μ.)	Γωνία τάσης (°)	--Φορτίο--		--Παραγωγή--	
			kW	kVar	kW	kVar
42	0,994	0,114	327	174	0,000	0,000
43	0,997	0,068	585	279	0,000	0,000
<b>Σύνολο</b>			<b>15238</b>	<b>7355</b>	<b>15355,180</b>	<b>7366,760</b>

Από τον Πίνακα 5.14 διαπιστώνεται ότι στο βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας, η πτώση τάσης είναι μικρότερη από 1%, καθώς οι κόμβοι με τη χαμηλότερη τάση (κόμβοι 22, 31, 38) έχουν μέτρο τάσης 0,991α.μ..

**Πίνακας 5.15:** Ροή φορτίου και απώλειες βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 44 κόμβων και 40 κλάδων.

Κλάδος		Ισχύς σε κάθε κόμβο & ροή ισχύος			Απώλεια γραμμής	
Κόμβος αναχ.	Κόμβος άφιξ.	kW	kVar	kVA	kW	kVar
0		3808,639	1853,603	4235,750		
	4	3808,639	1853,603	4235,750	7,132	0,718
1		3550,998	1709,715	3941,156		
	32	3550,998	1709,715	3941,156	11,145	1,126
2		4029,501	1918,313	4462,825		
	16	4029,501	1918,313	4462,825	15,784	1,544
3		3966,041	1885,129	4391,263		
	43	3966,041	1885,129	4391,263	15,378	1,543
4		-429,000	-210,000	477,641		
	0	-3801,508	-1852,885	4229,024	7,132	0,718
	5	3372,508	1642,885	3751,384	8,329	0,847
5		-455,000	-228,000	508,929		
	4	-3364,178	-1642,038	3743,526	8,329	0,847
	6	2909,178	1414,038	3234,628	4,875	0,501
6		-307,000	-145,000	339,520		
	5	-2904,303	-1413,538	3230,026	4,875	0,501
	7	1734,603	849,468	1931,436	2,958	0,302
	17	862,700	419,070	959,099	0,537	0,053
7		-500,000	-236,000	552,898		
	6	-1731,645	-849,166	1928,646	2,958	0,302
	8	1231,645	613,166	1375,835	1,045	0,105
8		-581,000	-289,000	648,908		
	7	-1230,599	-613,061	1374,852	1,045	0,105
	9	649,599	324,061	725,944	0,408	0,041
9		-234,000	-107,000	257,303		
	8	-649,192	-324,020	725,561	0,408	0,041
	10	415,192	217,020	468,489	0,192	0,020



**Πίνακας 5.15:** Ροή φορτίου και απώλειες βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 44 κόμβων και 40 κλάδων (συνέχεια).

Κλάδος		Ισχύς σε κάθε κόμβο & ροή ισχύος			Απώλεια γραμμής	
Κόμβος αναχ.	Κόμβος άφιξ.	kW	kVar	kVA	kW	kVar
10		-415,000	-217,000	468,310		
	9	-415,000	-217,000	468,310	0,192	0,020
11		-384,000	-173,000	421,171		
	12	-384,000	-173,000	421,171	0,085	0,008
12		-599,000	-321,000	679,590		
	11	384,085	173,008	421,252	0,085	0,008
	13	-983,085	-494,008	1100,227	0,984	0,098
13		-320,000	-169,000	361,885		
	12	984,068	494,106	1101,150	0,984	0,098
	14	-1304,068	-663,106	1462,978	1,308	0,130
14		-509,000	-231,000	558,965		
	13	1305,376	663,237	1464,203	1,308	0,130
	15	-3384,174	-1633,618	3757,837	5,826	0,572
	19	1569,798	739,381	1735,209	2,515	0,251
15		-261,000	-123,000	288,531		
	14	3390,000	1634,189	3763,333	5,826	0,572
	16	-3651,000	-1757,189	4051,853	5,717	0,580
16		-357,000	-159,000	390,807		
	2	-4013,717	-1916,769	4447,913	15,784	1,544
	15	3656,717	1757,769	4057,257	5,717	0,580
17		-378,000	-181,000	419,100		
	6	-862,163	-419,016	958,593	0,537	0,053
	23	484,163	238,016	539,505	0,163	0,016
18		-354,000	-163,000	389,724		
	20	-799,152	-366,015	878,983	0,383	0,039
	22	445,152	203,015	489,260	0,152	0,015
19		-407,000	-199,000	453,045		
	14	-1567,284	-739,129	1732,827	2,515	0,251
	20	1160,284	540,129	1279,843	0,748	0,075
20		-360,000	-174,000	399,845		
	18	799,535	366,055	879,348	0,383	0,039
	19	-1159,535	-540,055	1279,133	0,748	0,075
21		-550,000	-271,000	613,140		
	26	-550,000	-271,000	613,140	0,271	0,028
22		-445,000	-203,000	489,116		
	18	-445,000	-203,000	489,116	0,152	0,015
23		-484,000	-238,000	539,351		
	17	-484,000	-238,000	539,351	0,163	0,016
24		-343,000	-165,000	380,623		
	29	-1081,360	-538,036	1207,817	1,045	0,104
	28	738,360	373,036	827,243	0,261	0,026

**Πίνακας 5.15:** Ροή φορτίου και απώλειες βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 44 κόμβων και 40 κλάδων (συνέχεια).

Κλάδος		Ισχύς σε κάθε κόμβο & ροή ισχύος			Απώλεια γραμμής	
Κόμβος αναχ.	Κόμβος άφιξ.	kW	kVar	kVA	kW	kVar
25		-463,000	-244,000	523,359		
	28	-463,000	-244,000	523,359	0,099	0,010
26		-209,000	-96,000	229,993		
	21	550,271	271,028	613,395	0,271	0,028
	27	-759,271	-367,028	843,328	0,259	0,027
27		-531,000	-245,000	584,796		
	26	759,530	367,055	843,573	0,259	0,027
	42	-1290,530	-612,055	1428,313	1,302	0,134
28		-275,000	-129,000	303,753		
	24	-738,099	-373,010	826,998	0,261	0,026
	25	463,099	244,010	523,451	0,099	0,010
29		-222,000	-113,000	249,104		
	24	1082,405	538,140	1208,799	1,045	0,104
	30	-1304,405	-651,140	1457,894	1,224	0,124
30		-205,000	-90,000	223,886		
	29	1305,629	651,264	1459,044	1,224	0,124
	33	-1510,629	-741,264	1682,697	2,101	0,208
31		-370,000	-195,000	418,240		
	39	-370,000	-195,000	418,240	0,107	0,011
32		-553,000	-278,000	618,945		
	1	-3539,853	-1708,589	3930,628	11,145	1,126
	33	2986,853	1430,589	3311,779	9,069	0,910
33		-215,000	-104,000	238,833		
	32	-2977,784	-1429,679	3303,207	9,069	0,910
	34	1250,054	584,207	1379,831	1,049	0,106
	30	1512,730	741,472	1684,675	2,101	0,208
34		-321,000	-152,000	355,169		
	33	-1249,006	-584,102	1378,836	1,049	0,106
	35	928,006	432,102	1023,673	0,490	0,050
35		-206,000	-97,000	227,695		
	34	-927,515	-432,051	1023,207	0,490	0,050
	36	721,515	335,051	795,515	0,308	0,030
36		-209,000	-103,000	233,002		
	35	-721,208	-335,021	795,223	0,308	0,030
	37	512,208	232,021	562,308	0,208	0,021
37		-512,000	-232,000	562,110		
	36	-512,000	-232,000	562,110	0,208	0,021
38		-377,000	-174,000	415,217		
	39	-377,000	-174,000	415,217	0,106	0,011
39		-423,000	-188,000	462,896		
	38	377,106	174,011	415,317	0,106	0,011

**Πίνακας 5.15:** Ροή φορτίου και απώλειες βέλτιστου ακτινικού δικτύου λειτουργίας 44 κόμβων και 40 κλάδων (συνέχεια).

Κλάδος		Ισχύς σε κάθε κόμβο & ροή ισχύος			Απώλεια γραμμής	
Κόμβος αναχ.	Κόμβος άφιξ.	kW	kVar	kVA	kW	kVar
	40	-1170,213	-557,021	1296,021	1,089	0,111
	31	370,107	195,011	418,340	0,107	0,011
40		-302,000	-149,000	336,757		
	39	1171,302	557,132	1297,052	1,089	0,111
	41	-1473,302	-706,132	1633,781	0,989	0,102
41		-261,000	-111,000	283,623		
	40	1474,291	706,234	1634,717	0,989	0,102
	42	-1735,291	-817,234	1918,099	2,863	0,289
42		-327,000	-174,000	370,412		
	41	1738,154	817,523	1920,813	2,863	0,289
	43	-3356,986	-1603,712	3720,382	8,677	0,875
	27	1291,832	612,189	1429,547	1,302	0,134
43		-585,000	-279,000	648,125		
	3	-3950,663	-1883,587	4376,715	15,378	1,543
	42	3365,663	1604,587	3728,590	8,677	0,875
<b>Συνολικές απώλειες γραμμών</b>					<b>117,180</b>	<b>11,760</b>

## 5.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] C. T. Huddleston, R. P. Broadwater and A. Chandrasekaran, “Reconfiguration algorithm for minimizing losses in radial electric distribution systems,” *Electric Power Systems Research*, vol. 18, pp. 57-66, 1990.
- [5.2] A. Augugliaro, L. Dusonchet, S. Mangione, “An efficient greedy approach for minimum loss reconfiguration of distribution networks,” *Electric Power Systems Research*, vol. 35, pp. 167-176, 1995.
- [5.3] V. Glamocanin, “Optimal loss reduction of distribution networks,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 774-782, August 1990.
- [5.4] S. K. Goswami, S. K. Basu, “A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, pp. 1484-1491, July 1992.
- [5.5] M. A. Kashem, G. B. Jasmon, A. Mohamed and M. Moghavvemi, “Artificial neural network approach to network reconfiguration for loss minimization in distribution networks,” *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 20, no. 4, pp.247-258,1998.
- [5.6] M. E. Baran, F. F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, April 1989.

- [5.7] A. Augugliaro, L. Dusonchet, S. Mangione, “Optimal re-configuration of distribution network for loss reduction using non-linear programming,” European Transactions on Electric Power Systems, vol. 1, no. 6, pp. 317-324, Nov./ Dec. 1991.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ**

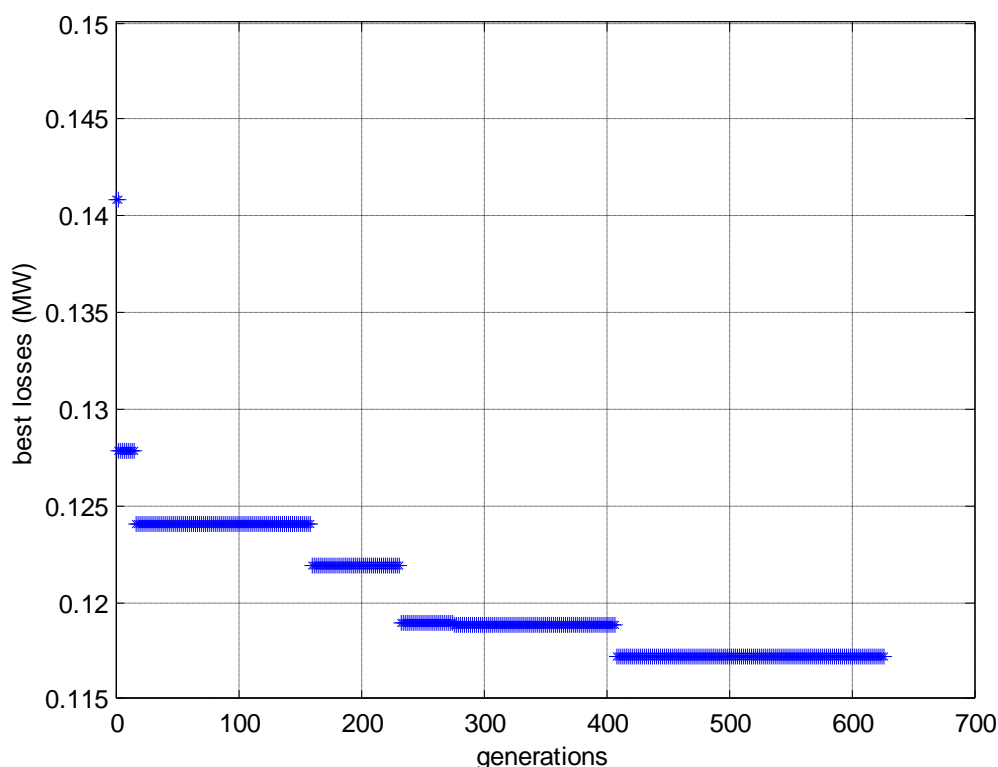
### **6.1 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάζεται η επαναδιαμόρφωση βροχοειδών ή ατρακτοειδών υπόγειων καλωδιακών Δικτύων Διανομής (ΔΔ) ΜΤ, όσον αφορά τον ανασχηματισμό των ακτινικών δικτύων λειτουργίας τους, μέσω χειρισμών των διακοπών, υπό κανονικές συνθήκες. Ο ανασχηματισμός αυτός συμβάλει στην ελαχιστοποίηση των ωμικών απωλειών, οι οποίες εξαρτώνται από το μέγεθος των φορτίων. Οι τιμές των φορτίων που λαμβάνονται στους υπολογισμούς μπορεί να είναι μηνιαίες προβλέψεις των φορτίων αιχμής.

Το πρόβλημα της Επαναδιαμόρφωσης ΔΔ μέσω Διακοπών ανήκει στην κατηγορία προβλημάτων βελτιστοποίησης, ακέραιου, γραμμικού ή μη γραμμικού προγραμματισμού. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με Γενετικό Αλγόριθμο (ΓΑ). Ειδικότερα, όλα τα εφικτά και μη ακτινικά δίκτυα λειτουργίας περιγράφονται από δυαδικές συμβολοσειρές τις οποίες καλείται ο ΓΑ να επεξεργαστεί και να αξιολογήσει. Ο υπολογισμός των ωμικών απωλειών ενός ακτινικού δικτύου λειτουργίας εξαρτάται από το είδος των φορτίων. Αν πρόκειται για φορτία σταθερής έντασης τότε ο υπολογισμός αυτός περιλαμβάνει τον σχηματισμό του πίνακα πρόσπτωσης, ενώ για φορτία σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος ο υπολογισμός των ωμικών απωλειών περιλαμβάνει την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson. Το βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας, δηλαδή το δίκτυο με τις ελάχιστες ωμικές απώλειες προκύπτει από τον αλγόριθμο επαναδιαμόρφωσης, κατόπιν δοκιμών των παραμέτρων του.

Η εφαρμογή του ΓΑ Επαναδιαμόρφωσης ΔΔ σε διάφορα βροχοειδή δίκτυα, καθώς και η ταύτιση των αποτελεσμάτων του με τα αποτελέσματα άλλων μεθόδων της διεθνούς βιβλιογραφίας αποδεικνύουν την ορθότητά του. Η μέχρι τώρα μελέτη οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

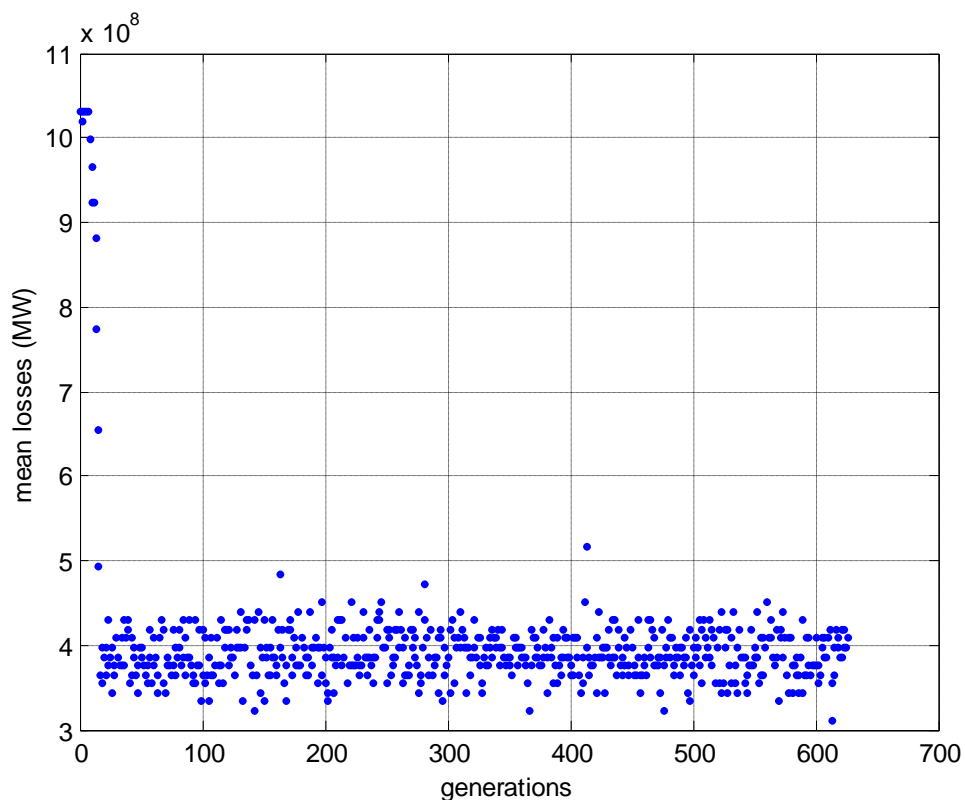
1. Ο ΓΑ που παρουσιάστηκε προϋποθέτει ότι κάθε κλάδος του βροχοειδούς δικτύου είναι ίδιας ικανότητας (ίδια ονομαστική τάση και ρεύμα και ίδιοι περιορισμοί τάσης και ρεύματος) και περιλαμβάνει ένα (νοητό) διακόπτη. Δεν απαιτεί όμως, τον διαχωρισμό των διακοπών σε διασύνδεσης (tie switches) και απομόνωσης (sectionalizing switches). Ο μόνος διαχωρισμός που γίνεται, είναι η διάκριση των διακοπών του δικτύου σε αυτούς που ανήκουν στους κλάδους που συνδέονται απευθείας με τους κόμβους-πηγές και στους υπόλοιπους.
2. Για μικρά βροχοειδή δίκτυα μέχρι και 16 κλάδων, το λογισμικό μπορεί να ξεκινήσει απευθείας από το βροχοειδές δίκτυο, χωρίς να απαιτείται κάποιο ή κάποια εξωτερικά δοσμένα, εφικτά ακτινικά δίκτυα λειτουργίας, προκειμένου να οδηγηθεί στο σωστό αποτέλεσμα. Επίσης, σε αυτά τα δίκτυα το λογισμικό εξασφαλίζει τη μετάβαση του καλύτερου ατόμου στην επόμενη γενιά (ελιτισμός). Για μεγαλύτερα δίκτυα, προκειμένου να προσανατολιστεί γρήγορα ο αλγόριθμος στην παραγωγή συμβολοσειρών που αφορούν εφικτά ακτινικά δίκτυα λειτουργίας, είναι αναγκαίο να δοθούν στον αρχικό πληθυσμό πιθανών λύσεων κάποια τέτοια ακτινικά δίκτυα, από το χρήστη. Σε αυτές τις περιπτώσεις εξασφαλίζεται η μετάβαση των καλύτερων ατόμων στην επόμενη γενιά (ελιτισμός), ο αριθμός των οποίων, είναι ίσος με τον αριθμό των εφικτών δικτύων που δόθηκαν από το χρήστη στον αρχικό πληθυσμό.
3. Ένας καλοσχεδιασμένος ΓΑ με σωστή επιλογή παραμέτρων, δίνει (σχεδόν) το ίδιο βέλτιστο αποτέλεσμα, όσες φορές και να εκτελεστεί. Η διαμόρφωση των παραμέτρων του δεν είναι άμεση και απαιτεί δοκιμαστικές προσπάθειες. Η χρήση πιθανοθεωρητικών κανόνων δεν σημαίνει και τυχαίο αποτέλεσμα. Ο χρόνος εκτέλεσης όμως, λόγω αυτών των κανόνων, δεν παραμένει απόλυτα ο ίδιος.
4. Η επιλογή του μεγέθους του πληθυσμού γίνεται ώστε να καλύψει αντιπροσωπευτικά ένα μεγάλο εύρος τιμών με στόχο να προκύψουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο αριθμός των γενιών πρέπει να είναι αρκετός, ώστε να σταθεροποιηθεί το αποτέλεσμα που δεν είναι τίποτα άλλο από το βέλτιστο ακτινικό δίκτυο. Μία συντηρητική επιλογή για μικρά δίκτυα μέχρι και 16 κλάδων με πιθανότητα διασταύρωσης 0,5 και μετάλλαξης 0,15 είναι ο συνολικός αριθμός των απογόνων να είναι ίσος με το 70% όλων των πιθανών δικτύων λειτουργίας εφικτών ακτινικών και μη ( $2^{n_i}$ ,  $n_i$  : συνολικός αριθμός των κλάδων του βροχοειδούς δικτύου), δηλαδή για 16 κλάδους ο συνολικός αριθμός γενιών των απογόνων είναι:  $0,7 \cdot 2^{16} / 100 \approx 460$  γενιές, αν κάθε γενιά έχει 100 άτομα.
5. Κάθε γενιά χαρακτηρίζεται από το καλύτερο άτομο του πληθυσμού της. Η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης αυτού του ατόμου είναι βηματική για όλα τα δίκτυα που μελετήθηκαν, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 6.1. Η μεταβολή αυτή της αντικειμενικής συνάρτησης οφείλεται κατά κύριο λόγο στη φύση του προβλήματος, αλλά και στην πιθανότητα και στον τελεστή διασταύρωσης.



**Σχήμα 6.1:** Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης για το πρότυπο, βροχοειδές δίκτυο 44 κόμβων και 47 κλάδων.

6. Η αύξηση της πιθανότητας μετάλλαξης αυξάνει την ταχύτητα εκτέλεσης του αλγορίθμου. Η σχετικά υψηλή τιμή της πιθανότητας μετάλλαξης (0,15) έχει σαν αποτέλεσμα ο πληθυσμός των εφικτών ακτινικών δικτύων λειτουργίας ανά γενιά, να αυξομειώνεται και ενδείκνυται για μικρά βροχοειδή δίκτυα μέχρι 16 κλάδων, ώστε να μπορέσει ο αλγόριθμος να βρει γρήγορα το βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας. Στα μικρά δίκτυα, η μέση τιμή όλων των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης των ατόμων του πληθυσμού, κάθε γενιάς, βρίσκεται κοντά στην ποινή (μικρός πληθυσμός εφικτών ακτινικών δικτύων λειτουργίας). Για μεγαλύτερα δίκτυα, όπου είναι αναγκαίο να δίνονται στον αρχικό πληθυσμό κάποια εφικτά ακτινικά δίκτυα λειτουργίας από το χρήστη, ενδείκνυται μικρή πιθανότητα μετάλλαξης (0,01). Σε αυτές τις περιπτώσεις, μετά από μερικές γενιές κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου, ο πληθυσμός των εφικτών ακτινικών δικτύων λειτουργίας σταθεροποιείται, σε ποσοστό άνω του 50% του συνολικού πληθυσμού, για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 6.2. Στη συνέχεια, με την πάροδο των γενεών, αυξάνεται ο αριθμός των απογόνων που αντιστοιχούν στο μέχρι τότε καλύτερο εφικτό δίκτυο, μέχρι όλοι σχεδόν οι απόγονοι των εφικτών δικτύων να γίνουν οι καλύτεροι. Βέβαια στην πορεία αν εμφανιστεί άλλος καλύτερος απόγονος, τότε όλος ο πληθυσμός των εφικτών δικτύων προσπαθεί να μοιάσει σε αυτόν. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν κρατηθούν σταθερές όλες οι παράμετροι του ΓΑ, η αύξηση του μεγέθους και της

πολυπλοκότητας του βροχειδούς δικτύου, οδηγεί σε μείωση του σταθεροποιημένου πληθυσμού των εφικτών ακτινικών δικτύων λειτουργίας.



**Σχήμα 6.2:** Μέση τιμή των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης, υπολογίζοντας τις απώλειες σε MW, με ποινή  $2^{30}$  για το πρότυπο, βροχειδές δίκτυο 44 κόμβων και 47 κλάδων.



7. Ο χρόνος εκτέλεσης, για δεδομένο βροχοειδές δίκτυο, είναι μικρότερος στην περίπτωση φορτίων σταθερής έντασης από ότι στην περίπτωση φορτίων σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος. Αυτό οφείλεται στον υπολογισμό των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης και ειδικότερα στην επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson και στην απαιτούμενη ακρίβεια της ανοχής σύγκλισής της. Για δεδομένο είδος φορτίων, η αύξηση της πολυπλοκότητας και του μεγέθους του βροχοειδούς δικτύου οδηγεί στην αύξηση του χρόνου εκτέλεσης. Αν δοθούν αρχικά εφικτά ακτινικά δίκτυα λειτουργίας από το χρήστη, τότε ο χρόνος αυτός μειώνεται σημαντικά.
8. Η ροή φορτίου σε όλα τα ακτινικά δίκτυα λειτουργίας που μελετήθηκαν έδειξε ότι όσο πιο κοντά βρίσκονται οι κλάδοι κάθε γραμμής, στην πηγή τροφοδοσίας, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες πάνω σε αυτούς. Αυτό οφείλεται στη μείωση της μεταφερόμενης ισχύος κατά την απομάκρυνση από τον υποσταθμό τροφοδοσίας, κατά μήκος της γραμμής.

## 6.2 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αποτελεί μία ερευνητική προσπάθεια προκειμένου να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα της Επαναδιαμόρφωσης των ΔΔ, υπό κανονικές συνθήκες. Κάποιες ερευνητικές επεκτάσεις αυτής της εργασίας είναι:

1. Ενσωμάτωση στο ΓΑ των περιορισμών τάσης και ρεύματος, ώστε να είναι δυνατή η διαχείριση γραμμών διαφορετικής ικανότητας.
2. Εφαρμογή της άμεσης μεθόδου της εξαναγκασμένης ρουλέτας στον τελεστή διασταύρωσης του ΓΑ, αλλά και αλλαγή αυτού από τελεστή διασταύρωσης ενός σημείου σε τελεστή διασταύρωσης δύο ή περισσότερων σημείων. Σύγκριση της απόδοσης των νέων ΓΑ με αυτόν της εργασίας.
3. Επέκταση του ΓΑ ώστε να προκύπτει βέλτιστο ακτινικό δίκτυο λειτουργίας με τις ελάχιστες ωμικές, αλλά και άεργες απώλειες. Οι απώλειες αυτές θα αξιολογούνται μαζί με διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας η κάθε μία, ανάλογα με την εφαρμογή του δικτύου.
4. Βελτίωση του χρόνου εκτέλεσης του ΓΑ, με συνδυασμό κάποιων ευρετικών μεθόδων, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή του και σε συστήματα πραγματικού χρόνου.
5. Συνδυασμός του ΓΑ με Νευρωνικά Δίκτυα, καθώς και σύγκριση της απόδοσης του υβριδικού ΓΑ με αυτόν της εργασίας.
6. Επέκταση της εφαρμογής της αντικειμενικής συνάρτησης του ΓΑ σε Μικτά Δίκτυα, όπως για παράδειγμα συνδυασμός ακτινικών εναέριων με βροχοειδή υπόγεια καλωδιακά. Ακόμη επέκταση της αντικειμενικής συνάρτησης ώστε να περιλαμβάνει επίλυση προβλήματος ροών φορτίου δικτύων με μικτά φορτία, σταθερής έντασης και σταθερής ισχύος και σταθερού συντελεστή ισχύος.

7. Επέκταση του αλγορίθμου σε Επαναδιαμόρφωση των ΔΔ, υπό μη κανονικές συνθήκες (βραχυκυκλώματα). Στις περιπτώσεις αυτές, όπου κάποιες γραμμές ή υποσταθμοί τροφοδοσίας δεν είναι διαθέσιμοι, λόγω βλάβης, το βέλτιστο σχήμα του δικτύου είναι αυτό που ελαχιστοποιεί το πλήθος ή και το μέγεθος των φορτίων που δεν τροφοδοτούνται και κατά δεύτερο λόγο τις απώλειες.
8. Κατασκευή αλγορίθμου, που να επιλέγει τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης στοιχείων για τη διατήρηση της τάσης τροφοδοσίας προς τα φορτία. Τέτοια στοιχεία είναι οι Ρυθμιστές Τάσης υπό φορτίο, οι Λήψεις (taps) των μετασχηματιστών ΜΤ/ΧΤ και οι πυκνωτές.