



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

**ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ  
ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ  
ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Θ. Τζώρτζης

**Επίβλεψη :** Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2012





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

**ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ  
ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ  
ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Θ. Τζώρτζης

**Επίβλεψη :** Πάυλος Σ. Γεωργιλάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ... Μαρτίου 2012.

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

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

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

Αθήνα, Μάρτιος 2012

.....  
Κωνσταντίνος Θ. Τζώρτζης

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

Copyright © Κωνσταντίνος Τζώρτζης, 2012.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η συμφόρηση των γραμμών μεταφοράς έχουν προκαλέσει αυξημένο ενδιαφέρον για τις τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής. Η κατάλληλη τοποθέτηση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής είναι απαραίτητη προϋπόθεση προκειμένου να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη που προκύπτουν από την ένταξή τους σε αυτά.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής μοναδιαίου συντελεστή ισχύος σε δίκτυα διανομής, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος παρουσιάζονται ξεχωριστές αναλυτικές μέθοδοι για τα ακτινικά και τα βροχοειδή δίκτυα διανομής, αντίστοιχα. Η ανάλυση στα ακτινικά δίκτυα διανομής γίνεται με τη χρήση του μοντέλου του διανεμημένου φορτίου, ενώ στα βροχοειδή δίκτυα διανομής βασίζεται στον πίνακα αγωγιμότητας και στα στοιχεία των ζυγών. Επιπλέον, διερευνάται η επίδραση της βέλτιστης τοποθέτησης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο προφίλ των τάσεων των δικτύων.

Στην παρούσα εργασία, αναπτύχθηκε λογισμικό με γραφικό περιβάλλον (GUI) σε περιβάλλον MATLAB, το οποίο επιλύει τα ανωτέρω προβλήματα βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικά και βροχοειδή δίκτυα διανομής. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής : (α) σε ακτινικό δίκτυο διανομής 11 ζυγών κάτω από τέσσερις διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, και (β) στα πρότυπα βροχοειδή δίκτυα 5, 6, 14, 30 και 57 ζυγών της IEEE και σε τροποποιημένες εκδοχές τους. Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών μεθόδων χρησιμοποιήθηκε η κλασική μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Αναλυτικές μέθοδοι, μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, δίκτυα διανομής, βέλτιστη τοποθέτηση, απώλειες ενεργού ισχύος, ανάλυση ροών φορτίου, προφίλ τάσεων.



## **ABSTRACT**

Power system deregulation and the shortage of transmission capacities have led to increased interest in distributed generation technologies. Proper location of distributed generation sources in power distribution systems is important for obtaining their maximum potential benefits.

The scope of this thesis is the optimal placement of distributed generation sources with unity power factor in power distribution systems, in order to achieve minimum active power losses. Analytical approaches are presented for both radial and meshed networks. Distributed load model is used for radial feeders analysis, while the proposed method for meshed systems is based on bus admittance matrix and load and generation data of the buses. Additionally, the impact of distributed generation allocation on bus voltage profile is examined.

In the present diploma thesis, software with graphical user interface (GUI) was developed, under MATLAB environment. The software solves the above distributed generation placement problems in both radial and meshed networks. This software was used for the solution of the optimal distributed generation problem : (a) in an 11-bus radial feeder under four different types of loading, and (b) in IEEE 5, 6, 14, 30 and 57-bus meshed test systems and their modified versions. A classical power flow algorithm was used in order to verify the validity of the results obtained from the implementation of the proposed approaches.

## **KEY WORDS**

Analytical approaches, distributed generation sources, power distribution systems, optimal placement, active power losses, power flow simulation, voltage profile.





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Παύλο Γεωργιάκη, Λέκτορα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, καθώς και για την ελευθερία που μου επέτρεψε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, και ιδιαίτερα τον πατέρα μου, για τη στήριξη και τη βοήθειά τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	2
1.3	Ηλεκτρικές απώλειες δικτύων διανομής	3
1.4	Αντικείμενο και δομή της εργασίας	3
1.5	Βιβλιογραφία	5

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

2.1	Ορισμός	7
2.2	Τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής	8
2.2.1	Μονάδες εσωτερικής καύσης	8
2.2.2	Αεριοστρόβιλοι	9
2.2.3	Μικροτουρμπίνες	9
2.2.4	Κυψέλες καυσίμου	9
2.2.5	Φωτοβολταϊκά συστήματα	9
2.2.6	Αιολικά συστήματα	9
2.2.7	Μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα	10
2.3	Πλεονεκτήματα διεσπαρμένης παραγωγής	10
2.4	Μειονεκτήματα διεσπαρμένης παραγωγής	11
2.5	Βιβλιογραφία	12

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

3.1	Εισαγωγή	13
3.2	Κατηγοριοποίηση μεθόδων βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής	13
3.2.1	Αναλυτικές μέθοδοι	14
3.2.2	Μεταευριστικές μέθοδοι	15
3.2.3	Μέθοδοι βασισμένες σε γενετικούς αλγορίθμους	16
3.2.4	Υβριδικές μέθοδοι	17
3.2.5	Άλλες μέθοδοι	17
3.3	Βιβλιογραφία	18

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

4.1	Το μοντέλο του διανεμημένου φορτίου σε ακτινική γραμμή διανομής	21
4.2	Εύρεση βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινική γραμμή διανομής με διανεμημένο φορτίο	23
4.3	Αλγόριθμος	25
4.4	Παραδείγματα εκτέλεσης αλγορίθμου σε ακτινική γραμμή διανομής με χρονοαμετάβλητο φορτίο και μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής	26
4.4.1	Ομοιόμορφη κατανομή φορτίου	26
4.4.2	Κεντρική κατανομή φορτίου	30
4.4.3	Πρώτη τριγωνική κατανομή φορτίου	34
4.4.4	Δεύτερη τριγωνική κατανομή φορτίου	36
4.5	Παράδειγμα εκτέλεσης αλγορίθμου σε ακτινική γραμμή διανομής με χρονομεταβλητό φορτίο και μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής	39
4.6	Επέκταση της μεθόδου για τοποθέτηση πολλαπλών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής	44
4.7	Βιβλιογραφία	46

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ**

5.1	Εισαγωγή	47
5.2	Η μελέτη των ροών φορτίου	47
5.2.1	Μεταβλητές συστήματος	47
5.2.2	Εξισώσεις ροών φορτίου	48
5.2.3	Εφαρμογή της μεθόδου Newton-Raphson για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου	49
5.2.4	Υπολογισμός ροών ισχύος και απωλειών ισχύος	53
5.3	Προσομοίωση με ροές φορτίου για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυα διανομής	54
5.4	Παράδειγμα εύρεσης βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυο διανομής μέσω προσομοιώσεων με ροές φορτίου	55
5.5	Βιβλιογραφία	60

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΒΡΟΧΟΕΙΔΗ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

6.1	Εισαγωγή	61
6.2	Ανάπτυξη αναλυτικής μεθόδου	61

6.2.1	Κατασκευή νέου πίνακα αγωγιμοτήτων	62
6.2.2	Υπολογισμός νέου διανύσματος ισχύος	64
6.2.3	Κατάστροση αντικειμενικής συνάρτησης προς ελαχιστοποίηση	65
6.3	Αλγόριθμος	66
6.4	Αριθμητικό παράδειγμα εκτέλεσης αλγορίθμου σε βροχοειδές δίκτυο διανομής 4 ζυγών	67
6.4.1	Δεδομένα συστήματος	67
6.4.2	Υπολογισμός νέου διανύσματος ισχύος	68
6.4.3	Υπολογισμός τιμών αντικειμενικής συνάρτησης	69
6.4.3.1	Τοποθέτηση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 1	69
6.4.3.2	Τοποθέτηση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 2	70
6.4.3.3	Τοποθέτηση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 3	71
6.4.3.4	Τοποθέτηση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 4	73
6.4.4	Εύρεση βέλτιστης θέσης εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	74
6.5	Βιβλιογραφία	75

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

7.1	Εισαγωγή	77
7.2	Το επιστημονικό λογισμικό MATLAB	77
7.2.1	Το περιβάλλον της MATLAB	78
7.2.2	Προγραμματισμός στη MATLAB	80
7.2.3	Το γραφικό περιβάλλον (GUI) της MATLAB	81
7.3	Λογισμικό για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικά δίκτυα διανομής	85
7.3.1	Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής	85
7.3.2	Εισαγωγή δεδομένων	86
7.3.3	Επεξεργασία και παρουσίαση αποτελεσμάτων	88
7.3.3.1	Χρονοαμετάβλητο φορτίο	88
7.3.3.2	Χρονομεταβλητό φορτίο	90
7.3.4	Ανάλυση m-αρχείων και δομή της εφαρμογής	91
7.4	Λογισμικό για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε βροχοειδή δίκτυα διανομής	95
7.4.1	Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής	95
7.4.2	Εισαγωγή δεδομένων	97
7.4.3	Επεξεργασία και παρουσίαση αποτελεσμάτων	98

7.4.4	Ανάλυση m-αρχείων και δομή της εφαρμογής	100
7.5	Βιβλιογραφία	103

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

8.1	Εισαγωγή	105
8.2	Ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών χρονοαμετάβλητου φορτίου και μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	105
8.2.1	Ομοιόμορφη κατανομή φορτίου	106
8.2.2	Κεντρική κατανομή φορτίου	109
8.2.3	Πρώτη τριγωνική κατανομή φορτίου	112
8.2.4	Δεύτερη τριγωνική κατανομή φορτίου	115
8.3	Ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών χρονομεταβλητού φορτίου και μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	118
8.4	Βροχοειδή συστήματα	119
8.4.1	Τροποποιημένο δίκτυο 5 ζυγών της IEEE	119
8.4.2	Δίκτυο 6 ζυγών της IEEE	122
8.4.3	Δίκτυο 14 ζυγών της IEEE	124
8.4.3.1	Τροποποιημένο δίκτυο 9 ζυγών	128
8.4.4	Δίκτυο 30 ζυγών της IEEE	131
8.4.4.1	Τροποποιημένο δίκτυο 18 ζυγών	134
8.4.5	Δίκτυο 57 ζυγών της IEEE	136
8.5	Βιβλιογραφία	140

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

9.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	141
9.2	Επεκτάσεις της εργασίας	143

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΩΝ**

A.1	Τροποποιημένο δίκτυο 5 ζυγών της IEEE	145
A.2	Δίκτυο 6 ζυγών της IEEE	146
A.3	Δίκτυο 14 ζυγών της IEEE	147
A.4	Δίκτυο 30 ζυγών της IEEE	148
A.5	Δίκτυο 57 ζυγών της IEEE	150

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύστημα των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή τάση, σταθερή συχνότητα και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης [1.1].

Δεδομένου ότι η εξυπηρέτηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ενός συνόλου καταναλωτών προϋποθέτει τις διακεκριμένες φάσεις της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής, σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατόν να διακριθούν τα ακόλουθα συστήματα :

- το σύστημα παραγωγής, που περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής του ηλεκτρικού ρεύματος και τους μετασχηματιστές ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά του υπό υπερυψηλή και υψηλή τάση. Η σύγχρονη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας έχει θεμελιωθεί στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων και της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων ροών και των υδατοπτώσεων σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω θερμικών και υδροηλεκτρικών σταθμών, αντίστοιχα.
- το σύστημα μεταφοράς, που διασυνδέει όλους τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής καθώς και διαφορετικά συστήματα μεταξύ τους και μεταφέρει τις μεγάλες ποσότητες ισχύος προς τα κέντρα κατανάλωσης. Αποτελεί τη ραχοκοκαλιά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και λειτουργεί στα μέγιστα δυνατά επίπεδα τάσης. Περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υπερυψηλής και υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεων των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διάφορων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται.
- το σύστημα υπομεταφοράς, που μεταφέρει ισχύ σε μικρότερες ποσότητες και αποστάσεις υπό χαμηλότερη τάση από υποσταθμούς μεταφοράς σε υποσταθμούς διανομής μικρότερων κέντρων κατανάλωσης, στην ίδια περιοχή μείζονος φορτίου. Σημειώνεται ότι οι μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές τροφοδοτούνται συνήθως απευθείας από το σύστημα υπομεταφοράς. Όσο το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας επεκτείνεται και δημιουργείται αναγκαιότητα για μεταφορά υπό υψηλότερα επίπεδα τάσης, οι παλιότερες γραμμές μεταφοράς υποβιβάζονται σε λειτουργία υπομεταφοράς, καθιστώντας σχετικά δύσκολη τη διάκριση μεταξύ δικτύων υπομεταφοράς και μεταφοράς.
- το σύστημα διανομής, που περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέσης και χαμηλής τάσης, στα οποία υπάγονται και υποσταθμοί διανομής μέσω των οποίων η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή τάση. Με τα δίκτυα διανομής η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται σε μικρότερες περιοχές φορτίου, και παρέχεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης.

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

Αξίζει, επιπλέον, να αναφερθεί πως τρία γενικά, αλλά βασικά, χαρακτηριστικά σχεδιάσης και αναφοράς ενός ηλεκτρικού δικτύου είναι η τάση, η ισχύς βραχυκύκλωσης και η στάθμη μόνωσης αυτού. Τάση του δικτύου είναι η μέγιστη τάση λειτουργίας των ηλεκτρικών γραμμών. Ισχύς βραχυκύκλωσης του δικτύου είναι η συμβατική ισχύς που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ, η οποία αποδίδεται στο δίκτυο σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος μέσα σε αυτό. Η στάθμη μόνωσης του δικτύου αναφέρεται συνήθως στην τιμή της κρουστικής αντοχής αυτού, δηλαδή της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης του εξοπλισμού των υποσταθμών σε κρουστικές υπερτάσεις τυποποιημένης μορφής [1.2].

## 1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

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

Διακρίνονται δύο βαθμίδες διανομής, η διανομή μέσης τάσης ή αλλιώς πρωτεύουσα διανομή, και η διανομή χαμηλής τάσης ή αλλιώς δευτερεύουσα διανομή. Τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης τροφοδοτούνται από τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, από υψηλή σε μέση, και τροφοδοτούν τους υποσταθμούς διανομής και τους καταναλωτές μέσης τάσης. Οι καταναλωτές μέσης τάσης είναι κατά κύριο λόγο βιομηχανικοί καταναλωτές με τριφασικές παροχές και οι γραμμές διανομής που τους τροφοδοτούν αποτελούνται από τρεις αγωγούς φάσεων. Τα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης έχουν σαν αφετηρία τους υποσταθμούς διανομής, όπου η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή μέσω μετασχηματιστών διανομής, που αποτελούν το βασικό εξοπλισμό των υποσταθμών. Στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής και εμπορικής χρήσης, που ενίοτε έχουν μονοφασικές παροχές, που δημιουργούν ασύμμετρες φορτίσεις. Οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης αποτελούνται από τρεις αγωγούς φάσεων και διαθέτουν, επιπλέον, και ουδέτερο αγωγό.

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

Η μορφή των δικτύων διανομής είναι κατά κανόνα ακτινική (radial) ή βροχοειδής (meshed). Η ακτινική λειτουργία του δικτύου διανομής έγκειται στο γεγονός ότι όλα τα φορτία του δικτύου τροφοδοτούνται από το ένα μόνο άκρο τους. Έτσι, οι κλάδοι του δικτύου δεν συνδέονται μεταξύ τους, αλλά διαδίδονται ακτινικά από την κεντρική τροφοδοσία προς τα υπόλοιπα σημεία του δικτύου. Αντίθετα, στη βροχοειδή λειτουργία, τα δίκτυα διανομής είναι κλειστά, μέσω των βρόχων που σχηματίζουν οι γραμμές. Η βροχοειδής μορφή επιτρέπει οικονομία των γραμμών για τον ίδιο βαθμό εξυπηρέτησης και προσφέρει εναλλακτική τροφοδότηση σε περίπτωση βλαβών, ενώ η ακτινική απλοποιεί και διευκολύνει ζητήματα προστασίας του δικτύου και ροής της ενέργειας. Σημειώνεται, ότι πολλά δίκτυα διανομής έχουν σχεδιαστεί έτσι, ώστε να μετατρέπονται από ακτινικά σε βροχοειδή και αντίστροφα, με το χειρισμό κατάλληλων διακοπών ή αποξευκτών [1.3].



### 1.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Οι τεχνικές απώλειες των δικτύων διανομής μέσης και χαμηλής τάσης αποτελούν ένα αξιοσημείωτο ποσοστό της διανεμόμενης προς τους καταναλωτές ενέργειας και είναι αρκετά σημαντικές λόγω των μεγάλων ποσών της διακινούμενης ενέργειας. Το μεγαλύτερο ποσοστό των απωλειών των δικτύων διανομής οφείλεται κυρίως στις ηλεκτρικές απώλειες ή αλλιώς απώλειες ενεργού ισχύος. Λόγω του ότι τα καλώδια των αγωγών των τριφασικών γραμμών διανομής και τα τυλίγματα των μετασχηματιστών διανομής παρουσιάζουν ωμική αντίσταση, κατά τη διαρροή τους από ρεύματα που οφείλονται στις ροές ισχύος παράγονται θερμικές απώλειες, οι οποίες υπολογίζονται ως εξής :

$$P_{απ} = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (1.1)$$

όπου  $I$  και  $R$  το ρεύμα και η αντίσταση ανά φάση της γραμμής διανομής, αντίστοιχα.

Οι απώλειες ενεργού ισχύος είναι μικρότερες στα υπόγειες γραμμές από ότι στις αντίστοιχες ισοδύναμες εναέριες γραμμές, κυρίως λόγω των μεγαλύτερων διατομών των υπόγειων καλωδίων και της φύσης των χρησιμοποιούμενων αγωγών (αγωγοί αλουμινίου και χαλκού έναντι αγωγών ACSR).

Στο ελληνικό σύστημα, για παράδειγμα, οι ετήσιες απώλειες ενέργειας των δικτύων μέσης και χαμηλής τάσης της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), εκφραζόμενες ως ποσοστά της εισερχόμενης ενέργειας από τα δίκτυα μεταφοράς, ανέρχονται περίπου σε ποσοστό 6.5% και η κατά προσέγγιση κατανομή τους είναι [1.3] :

- Δίκτυα μέσης τάσης : 3.0%
- Δίκτυα χαμηλής τάσης : 2.0%
- Υποσταθμοί διανομής : 1.5%

Στα δίκτυα διανομής, λοιπόν, οι απώλειες ενεργού ισχύος αποτελούν ένα σημαντικό μέρος της παραγόμενης ισχύος και για αυτό είναι πολύ σημαντική η μείωσή τους. Ο λόγος είναι ότι τα δίκτυα διανομής συνδέουν τους καταναλωτές με το σύστημα μεταφοράς υψηλής τάσης και έτσι, λόγω της πιο χαμηλής τάσης που βρίσκονται, έχουν μεγαλύτερη τιμή ρεύματος, και επομένως οι απώλειες ενεργού ισχύος είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες στα δίκτυα υψηλής τάσης.

Μερικοί τρόποι μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος στα δίκτυα διανομής είναι :

- Μείωση του ρεύματος με διόρθωση του συντελεστή ισχύος ( $\cos\phi$ ) μέσω αντιστάθμισης με πυκνωτές.
- Αύξηση της διατομής των αγωγών των γραμμών διανομής.
- Ανασχηματισμός τοπολογίας δικτύων διανομής μέσω διακοπτικών κινήσεων.
- Μείωση των φορτίσεων των γραμμών μέσω διείδυσης διεσπαρμένης παραγωγής [1.4].

### 1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής μοναδιαίου συντελεστή ισχύος τόσο σε ακτινικά όσο και σε βροχοειδή δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ενεργού ισχύος. Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, μέσω της τοπικής παροχής ενεργού ισχύος που προσφέρουν, μπορούν να συνεισφέρουν άμεσα στην εξυπηρέτηση των φορτίων των γραμμών διανομής, με αποτέλεσμα τη διακίνηση μικρότερων ποσοτήτων ισχύος από την εξωτερική πηγή τροφοδότησης των φορτίων, και κατά συνέπεια τη μείωση των

φορτίσεων των γραμμών και κατά επέκταση των απωλειών ενεργού ισχύος. Με τη βέλτιστη τοποθέτηση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, δεν ελαχιστοποιούνται μόνο οι απώλειες, αλλά επίσης βελτιώνονται και οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος παρουσιάζονται ξεχωριστές αναλυτικές μέθοδοι για τα ακτινικά και τα βροχοειδή δίκτυα διανομής, αντίστοιχα, που προσδιορίζουν με ακρίβεια και ταχύτητα τις βέλτιστες θέσεις τοποθέτησης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

Αναλυτικότερα, η εργασία οργανώνεται σε εννιά κεφάλαια :

- **Κεφάλαιο 1:** Στον παρόν κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και στις λειτουργίες του. Περιγράφονται συνοπτικά τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και οι ηλεκτρικές απώλειες που παρουσιάζονται σε αυτά. Επιπλέον, αναφέρεται ο σκοπός και η δομή της εργασίας.
- **Κεφάλαιο 2:** Διατυπώνεται ο ορισμός της διεσπαρμένης παραγωγής, παρουσιάζονται οι κύριες τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, καθώς και τα συνολικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη διεξόδυσή τους στα δίκτυα διανομής.
- **Κεφάλαιο 3:** Γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, όσον αφορά τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής και κατηγοριοποιούνται οι διάφοροι μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος.
- **Κεφάλαιο 4:** Παρουσιάζεται η αναλυτική μέθοδος για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικά δίκτυα διανομής, που βασίζεται στο μοντέλο του διανεμημένου φορτίου. Επιπλέον, δίνονται δύο αριθμητικά παραδείγματα εκτέλεσης του αλγορίθμου που υλοποιεί την αναλυτική μέθοδο , για περιπτώσεις χρονοαμετάβλητου και χρονομεταβλητού φορτίου και μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.
- **Κεφάλαιο 5:** Διατυπώνεται και επιλύεται το πρόβλημα της ροής φορτίου μέσω της επαναληπτικής μεθόδου Newton-Raphson, και δίνεται ο τρόπος υπολογισμού των ροών ισχύος και των απωλειών ισχύος σε δίκτυα διανομής. Παρουσιάζεται μέθοδος για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυα διανομής που βασίζεται σε προσομοιώσεις ροής φορτίου και χρησιμοποιείται προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματά της με αυτά των αναλυτικών μεθόδων. Επιπλέον, δίνεται ένα αναλυτικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου σε ένα μικρό δίκτυο 3 ζυγών.
- **Κεφάλαιο 6:** Παρουσιάζεται η αναλυτική μέθοδος για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε βροχοειδή δίκτυα διανομής, που βασίζεται στον πίνακα αγωγιμότητας και στα δεδομένα παραγωγής και φορτίου των ζυγών του συστήματος. Επιπλέον, δίνεται ένα αναλυτικό αριθμητικό παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου που υλοποιεί την αναλυτική μέθοδο σε ένα δίκτυο 4 ζυγών.
- **Κεφάλαιο 7:** Περιγράφεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε, για την εύρεση των βέλτιστων θέσεων τοποθέτησης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικά και βροχοειδή δίκτυα διανομής. Εξηγείται ο τρόπος εισαγωγής δεδομένων, η επεξεργασία τους και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Αναπτύχθηκαν δύο εφαρμογές σε περιβάλλον MATLAB για ακτινικά και βροχοειδή δίκτυα διανομής αντίστοιχα, που συνοδεύονται από γραφικά περιβάλλοντα (GUI), φιλικά προς το χρήστη.
- **Κεφάλαιο 8:** Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής αναλυτικών μεθόδων και της μεθόδου ροής φορτίου σε ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, καθώς και σε διάφορα πρότυπα βροχοειδή δίκτυα της IEEE. Επίσης, εξετάζεται η επίδραση της βέλτιστης τοποθέτησης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο προφίλ των τάσεων των ζυγών των δικτύων.
- **Κεφάλαιο 9:** Συνοψίζεται η εργασία, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επέκτασης της εργασίας.

## 1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001, σελ. 5-16.
- [1.2] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμος Ι, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985, σελ. 1-10.
- [1.3] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμος Ι*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1994, σελ. 7-33.
- [1.4] W. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*. New Mexico: CRC Press, 2002, pp. 1-11.



## **ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ**

### **2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ**

Η diesπαρμένη παραγωγή ορίζεται ως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, με τιμές που κατά κανόνα κυμαίνονται από  $1\text{ kW}$  μέχρι  $100\text{ MW}$ , και αναφέρεται στη εγκατάσταση ηλεκτρικών πηγών απευθείας στο δίκτυο διανομής ή στην περιοχή του μετρητή κατανάλωσης [2.1].

Η diesπαρμένη παραγωγή αποτελεί μια σχετικά καινούρια τάση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, ωστόσο, η ιδέα πίσω από αυτό το σχέδιο δεν είναι καθόλου καινούρια. Τις πρώτες μέρες της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή αυτής της μορφής, ήταν ο κανόνας και όχι η εξαίρεση. Οι πρώτες εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος, παρείχαν ενέργεια μόνο σε καταναλωτές στη γειτονική τους περιοχή. Τα πρώτα δίκτυα ήταν βασισμένα σε DC τάση (συνεχή τάση), και έτσι η παροχή της ήταν περιορισμένη, όπως περιορισμένη ήταν και η απόσταση ανάμεσα στον παραγωγό και τον καταναλωτή. Η περιορισμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την έντονη διακύμανση στη ζήτηση, έκανε τη χρήση τοπικών μέσων αποθήκευσης, όπως οι μπαταρίες που μπορούσαν να συνδεθούν κατευθείαν στο δίκτυο DC, απαραίτητη. Αυτή η μέθοδος, μάλιστα, τοπικής αποθήκευσης ενέργειας είναι κάτι άλλο, εκτός από τη diesπαρμένη παραγωγή, το οποίο επανέρχεται σταδιακά στο προσκήνιο [2.2].

Στη συνέχεια, η τεχνολογική εξέλιξη που σημειώθηκε, όπως η εμφάνιση των AC δικτύων, εναλλασσόμενης τάσης, επέτρεψε τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Επιπλέον, η εφαρμογή οικονομιών κλίμακας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οδήγησαν σε μία μεγάλη αύξηση της ισχύος εξόδου των μονάδων παραγωγής. Σαν αποτέλεσμα, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας στην παραγωγή, και ως αποτέλεσμα στην κατανάλωση, μειώθηκε σημαντικά, ενώ, κατασκευάστηκαν μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα, αποτελούμενα από τεράστια δίκτυα μεταφοράς και διανομής, αλλά και πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας που εξυπηρετούσαν ταυτόχρονα μια πλειάδα καταναλωτών. Πλέον, το συνολικό φορτίο των καταναλωτών ακολουθούσε μια πιο ομαλή διακύμανση, καθώς χαρακτήριζε το αποτέλεσμα του συνδυασμού υψηλών, ταυτόχρονων φορτίων, δηλαδή τον μέσο όρο του συνόλου των καταναλωτών. Οπότε, η ασφάλεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας αυξανόταν, ενώ επιπλέον ασφάλεια, σε ενδεχόμενη αποτυχία ενός σταθμού παραγωγής, προσέδιδαν οι υπόλοιπες εγκαταστάσεις του δικτύου.

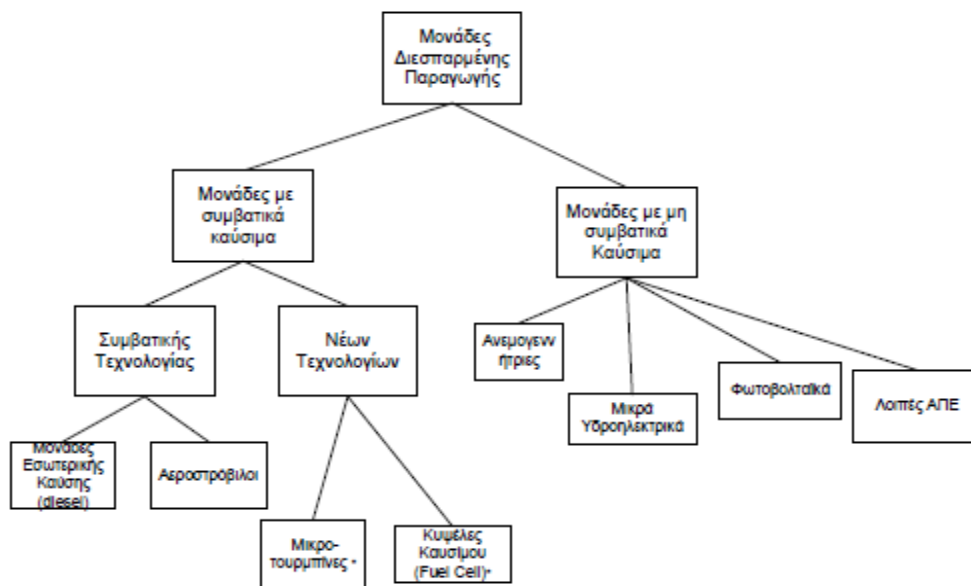
Την τελευταία δεκαετία, τεχνολογικές καινοτομίες και ένα μεταβαλλόμενο και ρυθμιστικό οικονομικό περιβάλλον, είχαν σαν αποτέλεσμα να ανανεωθεί το ενδιαφέρον για τη diesπαρμένη παραγωγή. Οι πέντε κυριότεροι λόγοι που οδήγησαν σε αυτήν την εξέλιξη είναι :

1. Η ανάπτυξη στις τεχνολογίες diesπαρμένης παραγωγής.
2. Οι περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
3. Οι αυξημένες απαιτήσεις των καταναλωτών για αξιοπιστία στην παροχή ενέργειας.
4. Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
5. Οι ανησυχίες για τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές, που εκφράστηκε κατά κύριο λόγο μέσω του πρωτόκολλου του Κιότο και προβλέπει μείωση των εκπομπών έξι αερίων του θερμοκηπίου.

Η διείσδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής αυξάνεται συνεχώς, ως αποτέλεσμα των τεχνολογικών προόδων και των θεσμικών αλλαγών στη βιομηχανία ηλεκτρικής ισχύος, αν και συχνά μπορεί να σχετίζεται με δαπανηρές ενισχύσεις δικτύων. Οι οικονομικές ευκαιρίες που παρουσιάζονται για τους ιδιώτες επενδυτές στο απελευθερωμένο ηλεκτρικό περιβάλλον και τα σημαντικά πιθανά οφέλη για τις μονάδες (ικανότητα μεγάλης εγκαταστημένης ισχύος, μείωση των απωλειών ισχύος) συμβάλλουν σε αυτή την τάση. Η σύνδεση, πάντως, των νέων εγκαταστάσεων εμποδίζεται συχνά από ποικίλους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών απαιτήσεων και εκτιμήσεων, που επιλύονται συνήθως εις βάρος του επενδυτή. Τα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι η σταθερή λειτουργία και οι γρήγορες μεταβολές της τάσης, όπως επίσης η εκπομπή των flicker και των αρμονικών [2.3].

## 2.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Οι κυριότερες τεχνολογίες των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής δίνονται συνοπτικά στο Σχήμα 2.1. Όπως φαίνεται, γίνεται διαφοροποίηση σε δύο μεγάλες ομάδες. Στις μονάδες που χρησιμοποιούν συμβατικά και μη ανανεώσιμα καύσιμα και στις μονάδες που χρησιμοποιούν ανανεώσιμα καύσιμα, όπως η βιομάζα, ή μετατρέπουν την ανανεώσιμη πηγή ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 2.1: Τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

### 2.2.1 Μονάδες εσωτερικής καύσης

Μια μηχανή εσωτερικής καύσης μετατρέπει την ενέργεια που περιέχεται σε κάποιο καύσιμο σε μηχανική ενέργεια μέσω της κίνησης εμβόλων μέσα σε κυλίνδρους. Αυτή η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη περιστροφή ενός άξονα μέσα στη μηχανή. Μια γεννήτρια συνδέεται με τη μηχανή εσωτερικής καύσης για τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι διαθέσιμες από μικρά μεγέθη (5 kW για εφεδρική γεννήτρια σε κατοικίες) μέχρι μεγάλες γεννήτριες (7 MW), και χρησιμοποιούν διαθέσιμα καύσιμα, όπως βενζίνη, diesel και φυσικό αέριο.

### 2.2.2 Αεριοστρόβιλοι

Αυτού του τύπου μονάδες χρησιμοποιούνται από τις εταιρείες παραγωγής ηλεκτρισμού ειδικά για την παροχή ισχύος αιχμής εξαιτίας της χαμηλής σχετικά ηλεκτρικής απόδοσης και του μικρού χρόνου εκκίνησης και μεταβολής του φορτίου. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί μείγμα έντονα συμπιεσμένου αέρα με καύσιμο προκειμένου με την εκτόνωση του σε συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας να παραχθεί μηχανικό έργο και να κινηθεί κάποια γεννήτρια. Συνήθως, ως καύσιμο χρησιμοποιείται το φυσικό αέριο.

### 2.2.3 Μικροτουρμπίνες

Οι γεννήτριες μικροτουρμπίνων αερίου (MTGs) είναι μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία και θεωρείται πολύ σημαντική για εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος υψηλής πυκνότητας. Οι μονάδες αυτές είναι μικρού μεγέθους, πολύ υψηλής ταχύτητας και συνήθως συμπεριλαμβάνουν την τουρμπίνα αερίου (gas turbine), το συμπιεστή (compressor), τη γεννήτρια και τα ηλεκτρονικά ισχύος για τη σύνδεσή τους στο δίκτυο. Τυπικά, λειτουργούν με φυσικό αέριο, αλλά δέχονται για λειτουργία και πολλά άλλα βιομηχανικά καύσιμα, όπως προπάνιο, diesel και κηροζίνη. Είναι επίσης ικανές να παράγουν ανανεώσιμη ενέργεια όταν τροφοδοτούνται με βιοαέριο. Οι MTGs έχουν μια τουρμπίνα αερίου μεγάλης ταχύτητας, η οποία οδηγεί μια ενσωματωμένη ηλεκτρική γεννήτρια, που λειτουργεί σε υψηλή ταχύτητα, γενικά σε μία τάξη των 50-120 χιλιάδων στροφών ανά λεπτό (rpm).

### 2.2.4 Κυψέλες καυσίμου

Τα συστήματα ισχύος με κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβα, καθαρά, και αποδοτικά τοπικά συστήματα παραγωγής που χρησιμοποιούν μια ηλεκτροχημική διεργασία για τη μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρισμό. Επιπροσθέτως της παροχής ενέργειας, μπορούν να προσφέρουν μια πηγή θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση του χώρου και του νερού ή για ψύξη απορρόφησης.

### 2.2.5 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) χρησιμοποιούν ηλιακά κύτταρα ή ηλιακές φωτοβολταϊκές συστοιχίες για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Συγκεντρώνονται σε επίπεδα πάνελ, τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν σε ταράτσες, ή άλλες ηλιόλουστες περιοχές. Παράγουν ηλεκτρισμό χωρίς να έχουν κινούμενα μέρη, λειτουργούν αθόρυβα και χωρίς εκπομπές.

### 2.2.6 Αιολικά συστήματα

Οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) είναι μηχανές μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια. Μια τουρμπίνα με πτερωτές τοποθετείται στην κορυφή ενός ψηλού πύργου. Ο πύργος έχει μεγάλο ύψος, ώστε να εκμεταλλεύεται τη μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου, απαλλαγμένη από τις αναταράξεις που προέρχονται από τη μεσολάβηση εμποδίων, όπως δέντρα, λόφοι, κτήρια. Αν η παραγόμενη μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται απευθείας από κάποιον μηχανισμό, όπως από μία αντλία, τότε η μηχανή συνήθως αναφέρεται σαν ανεμόμυλος (wind mill). Αν η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω γεννήτριας, η μηχανή ονομάζεται ανεμογεννήτρια. Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να ποικίλλει σε μέγεθος από λίγα  $kW$  (οικιακές εφαρμογές) έως και πάνω από  $5 MW$ . Τα αιολικά πάρκα, στα οποία είναι εγκατεστημένες πολλές ανεμογεννήτριες, μπορούν να αποδώσουν ηλεκτρική ισχύ που μπορεί να φτάσει ακόμα και τα  $100 MW$ .

### 2.2.7 Μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα

Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν μικρή εγκατεστημένη ισχύ, που δεν ξεπερνάει συνήθως το  $1\text{ MW}$ . Είναι τοποθετημένοι σε περιοχές με τρεχούμενο νερό (φράγματα κοιλάδων, λίμνες, ποτάμια). Η ενέργεια της ροής του νερού μετατρέπεται, μέσω κατάλληλου υδροστροβίλου, σε ισχύ περιστροφικού άξονα, και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ισχύ με τη χρήση γεννήτριας.

## 2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Συγκεντρωτικά, τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την ενσωμάτωση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής, είναι [2.4]:

- Η διεσπαρμένη παραγωγή καλύπτει μία ευρεία γκάμα τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου πολλών ανανεώσιμων τεχνολογιών που παρέχουν ισχύ μικρής κλίμακας, σε τοποθεσία κοντά στους χρήστες. Όλες αυτές οι τεχνολογίες δημιουργούν νέες ευκαιρίες στην αγορά και αυξημένο βιομηχανικό ανταγωνισμό.
- Η παραγωγή της ενέργειας κοντά στην τοποθεσία στην οποία χρησιμοποιείται, ελαχιστοποιεί τις απώλειες μεταφοράς, όπως επίσης και το κόστος μεταφοράς, που αποτελεί ένα σημαντικό μέρος (πάνω από το 30%) του συνολικού κόστους του ηλεκτρισμού.
- Η τροφοδότηση των φορτίων από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, μειώνει σημαντικά τις απώλειες ισχύος στις γραμμές διανομής, όπως θα φανεί και από την ανάλυση που πραγματοποιείται σε αυτή την εργασία.
- Η διεσπαρμένη παραγωγή βοηθά στην αποσυμφόρηση των ήδη υπαρχόντων δικτύων. Επιπρόσθετα, επιτρέπει τη χρήση της θερμικής ενέργειας σε εφαρμογές συμπαραγωγής, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση του συστήματος.
- Όσο αυξάνεται η ζήτηση για περισσότερη και καλύτερης ποιότητας ηλεκτρική ισχύ, η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχει εναλλακτικές λύσεις για αξιόπιστη και οικονομική παροχή σε νοικοκυριά και επιχειρήσεις. Μπορεί να εξασφαλίσει στους πελάτες ότι η παροχή είναι συνεχόμενη και αξιόπιστη, αποκαθιστώντας την ηλεκτρική ενέργεια σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, σε περιπτώσεις διακοπής της ρευματοδότησης.
- Η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στους καταναλωτές θερμικών φορτίων, μέσω των εφαρμογών συμπαραγωγής, καθώς επίσης και σε εκείνους που έχουν πρόσβαση σε φτηνά καύσιμα, όπως για παράδειγμα στο φυσικό αέριο. Επιπλέον, προσφέρει πλεονεκτήματα στους καταναλωτές που ευνοούνται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής που ζούνε και μπορούν να αξιοποιήσουν τις ανανεώσιμες πηγές.
- Η εκτεταμένη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βοηθάει στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου αλλά και σε επιβλαβείς εκπομπές όπως τα οξείδια του θείου και του αζώτου ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ), συνεισφέροντας έτσι με ουσιαστικό τρόπο στην προστασία του περιβάλλοντος.
- Είναι πρακτικά πιο εύκολο να βρεθούν τοποθεσίες για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και άλλες διεσπαρμένες παραγωγές από ότι για ένα μεγάλο, κεντρικό εργοστάσιο παραγωγής ισχύος και μάλιστα οι μονάδες αυτές είναι πιο εύκολο και κυρίως πιο γρήγορο να συνδεθούν στο δίκτυο. Η έκθεση και το ρίσκο του κεφαλαίου μειώνονται, και αποφεύγονται οι περιττές δαπάνες.
- Η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών, αλλά και άλλων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, εκτός από την υψηλότερη απόδοση ενέργειας επιφέρει μείωση στις εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας.



## 2.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η εισαγωγή των αποκεντρωμένων μονάδων παραγωγής ενέργειας, σε ευρεία κλίμακα, είναι πιθανό να οδηγήσει σε μερική αστάθεια του ενεργειακού προφίλ. Η αμφίδρομη ροή ισχύος και η σύνθετη διαχείριση ενέργειας, που απαιτεί η διεσπαρμένη παραγωγή, μπορούν να εμφανίσουν προβλήματα και να οδηγήσουν σε έντονη διακύμανση της τάσης. Επιπρόσθετα, τα πιθανά βραχυκυκλώματα και υπερφορτίσεις στο δίκτυο προέρχονται, πλέον, από πολλαπλές πηγές, το οποίο προκαλεί δυσκολίες στον εντοπισμό των εκάστοτε σφαλμάτων του δικτύου.

Πιο αναλυτικά, τα μειονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής, είναι [2.5] :

- Το σχετικά υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά  $kW$  εγκατεστημένης ισχύος, συγκριτικά με τα μεγάλα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής. Επιπλέον, διαφορές υπάρχουν και στα κόστη κεφαλαίου για διαφορετικές τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής που μπορούν να ποικίλλουν από 1000 €/kW έως 20000 €/kW, στις τουρμπίνες καύσης και τις κυψέλες καυσίμου, αντίστοιχα.
- Η αυξανόμενη συμμετοχή της διεσπαρμένης παραγωγής στην εγκατεστημένη παραγωγή θα επιφέρει μικρότερη επιλογή μεταξύ των βασικών καυσίμων. Αυτό θα μπορούσε να μειώσει τη διαφοροποίηση των πρωταρχικών αποθεμάτων ενέργειας. Δεδομένου ότι οι περισσότερες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής βασίζονται πρωταρχικά στο αέριο, αναμένεται έντονα αυξημένη ζήτηση και εξάρτηση από αυτό.
- Το κόστος για την πρωταρχική παροχή καυσίμου στη διεσπαρμένη παραγωγή, προβλέπεται να είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι για την κεντρική παραγωγή.
- Πολλές φορές δεν μπορεί να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη για την ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων εγκαταστάσεων παραγωγής, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τα αιολικά πάρκα. Πρέπει να γίνεται μετεωρολογική πρόβλεψη, που δεν μπορεί όμως να προβλέψει ακριβώς την ποσότητα ισχύος που θα είναι δυνατό να παραχθεί. Σε μικρά χρονικά διαστήματα μπορούν να υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στη δυνατότητα παραγωγής ή ακόμα και απώλεια της παραγωγής εξαιτίας της φύσης ορισμένων πηγών, όπως είναι για παράδειγμα ο άνεμος. Έτσι υπάρχει συγκεκριμένο ποσοστό της ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές, η διείσδυση είναι δηλαδή περιορισμένη και πρέπει να υπάρχει πάντα εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα αφορά κυρίως τα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.
- Καθώς η ισχύς εξόδου των πηγών διεσπαρμένης παραγωγής εμφανίζει αρκετές δυσκολίες, ως προς την πρόβλεψή της, προκύπτουν επιζήμιες και δυσμενείς συνέπειες.
- Ο μεγάλος αριθμός μονάδων παραγωγής μπορεί να προκαλέσει, εκτός από τη συνήθη ροή φορτίου από τη μέση τάση στη χαμηλή, επιπλέον ροή φορτίου, από την χαμηλή τάση στο δίκτυο μέσης τάσης. Αυτή η αμφίδρομη ροή φορτίου, απαιτεί διαφορετικά μέσα προστασίας και στα δύο επίπεδα τάσης. Επιπλέον, η σημαντική προσαρμοστικότητα που προσφέρουν οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, προϋποθέτει καλύτερη ανάλυση και μεγαλύτερη προσοχή, όσον αφορά τη διαχείριση και λειτουργία του δικτύου.
- Η συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής θα μπορούσε να προκαλέσει την αποσύνδεση υγιών γραμμών, στις οποίες συνδέονται μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, λόγω της γρήγορης αντίδρασης των υπέργειων γραμμών μέσης τάσης σε σφάλματα του δικτύου.

## 2.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Soder, "Distributed generation : a definition," *Electric Power Systems Research*, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [2.2] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D' haeseleer, "Distributed generation : definition, benefits, issues," *Energy Policy*, vol. 33, no. 6, pp. 787-798, Apr. 2005.
- [2.3] P. Dondi, D. Bayoumi, C. Haederli, D. Julian, M. Suter, "Network integration of distributed power generation," *Journal of Power Sources*, vol. 106, pp. 1-9, 2002.
- [2.4] W. El-Khattam and M. M. A. Salama, "Distributed generation technologies, definitions and benefits," *Electric Power Systems Research*, vol. 71, no.2, pp. 119-128, 2004.
- [2.5] J. A. P. Lopes, "Integration of dispersed generation on distribution networks-impact studies," in Proc. 2002 *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 1, pp. 323-328, Jan. 2002.

## **ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ**

### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η μεγιστοποίηση των τεχνικών και οικονομικών ωφελειών που προκύπτουν από την ένταξη των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής και που περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την ενίσχυση των γραμμών των δικτύων, τη βελτίωση του προφίλ των τάσεων, τη μείωση των απωλειών ισχύος, την ελάττωση του λειτουργικού κόστους αιχμής και την αύξηση στην ασφάλεια των κρίσιμων φορτίων, απαιτεί την εύρεση των βέλτιστων θέσεων για την τοποθέτησή τους. Ο προσδιορισμός των βέλτιστων θέσεων και μεγεθών των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής αποτελεί μεγάλη πρόκληση για τους σχεδιαστές των δικτύων διανομής και τους ερευνητές του συγκεκριμένου επιστημονικού κλάδου. Η κύρια αιτία είναι ότι οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μεταβάλλουν τις ροές ισχύος στα δίκτυα, που ενώ συνήθως ήταν προς μια κατεύθυνση, τώρα γίνονται αμφίδρομες. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε συνθήκες μεγάλης διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής, η αλλαγή στην κατεύθυνση των ροών ισχύος μεταφέρεται και στα δίκτυα μεταφοράς και υπομεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [3.1].

### **3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

Η βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής είναι αντικείμενο πολυκριτηριακής ανάλυσης και σχεδιασμού με πολλούς περιορισμούς. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης είναι πολύ συνηθισμένα σε εφαρμογές μηχανικών εξαιτίας της πολυδιάστατης φύσης των πραγματικών προβλημάτων της ζωής. Σαν αποτέλεσμα, έχουν γίνει πολλές προσεγγίσεις από ερευνητές στους κλάδους της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και του σχεδιασμού των συστημάτων διανομής για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Κάποιες μέθοδοι αντιμετωπίζουν ικανοποιητικά το ζήτημα, ενώ άλλες είναι λιγότερο αποτελεσματικές παρουσιάζοντας αρκετά μειονεκτήματα. Λόγω του πλήθους των μεθόδων που αναπτύχθηκαν και της μεγάλης βιβλιογραφίας επί του θέματος, γίνεται μια κατηγοριοποίησή τους. Οι τεχνικές επίλυσης χωρίζονται στις επόμενες πέντε κατηγορίες :

1. Αναλυτικές μέθοδοι (Analytical methods)
2. Μεταεвриστικές μέθοδοι (Metaheuristic methods)
3. Μέθοδοι βασισμένες σε γενετικούς αλγορίθμους (Genetic algorithm methods)
4. Υβριδικές μέθοδοι (Hybrid methods)
5. Άλλες μέθοδοι (Other methods)

Ο χρήστης, βασισμένος σε αυτή την κατηγοριοποίηση, μπορεί να αποφασίσει ποιας κατηγορίας αλγόριθμο είναι καλύτερο να υλοποιήσει, σύμφωνα με το μέγεθος και την τοπολογία του δικτύου διανομής του, το κριτήριο βελτιστοποίησης, την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων, τα διαθέσιμα δεδομένα που έχει και τους πόρους που διαθέτει. Αξίζει να σημειωθεί πως μια επιμέρους υποκατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει ανάλογα με την παράμετρο που βελτιστοποιείται. Κάποιες προσεγγίσεις στοχεύουν στο να εντοπίσουν τη βέλτιστη θέση τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής συγκεκριμένου μεγέθους, άλλες προσπαθούν να προσδιορίσουν το βέλτιστο μέγεθος των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής δεδομένης της θέσης εγκατάστασής τους, ενώ άλλες επιδιώκουν να βελτιστοποιήσουν τόσο τη θέση εγκατάστασης όσο και το μέγεθος των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

Παρακάτω, ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των πέντε κατηγοριών των μεθόδων βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και γίνεται αναφορά στα δημοσιευμένα άρθρα των αντίστοιχων μεθόδων σύμφωνα με το [3.2].

### 3.2.1 Αναλυτικές μέθοδοι

Οι αναλυτικές μέθοδοι χρησιμοποιούν αναλυτικούς μαθηματικούς υπολογισμούς προκειμένου να επιτύχουν την ελαχιστοποίηση ή τη μεγιστοποίηση κάποιας αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης. Δεν περιλαμβάνουν επαναληπτικούς αλγόριθμους, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν προβλήματα σύγκλισης και έτσι οι λύσεις να επιτυγχάνονται σχετικά γρήγορα. Οι προσεγγίσεις αυτές αξιοποιούν τα τοπολογικά χαρακτηριστικά των συστημάτων και βασίζονται κυρίως στην έγχυση των ρευμάτων των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στους κόμβους των δικτύων. Η υλοποίηση των αναλυτικών μεθόδων προϋποθέτει κάποιες φορές την υιοθέτηση μη ρεαλιστικών παραδοχών και συνεπώς μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα όταν γίνει εφαρμογή σε πραγματικά δίκτυα.

Ο Willis [3.3] πρότεινε την εφαρμογή του κανόνα των "δύο τρίτων", σύμφωνα με τον οποία έπρεπε να τοποθετηθεί μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής στα δύο τρίτα της συνολικής απόστασης κατά μήκος της γραμμής μεγέθους ίσου με τα δύο τρίτα της συνολικής ζήτησης των φορτίων της γραμμής. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία δίνει ακριβή αποτελέσματα, μόνο όταν η γραμμή διανομής ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή φορτίου. Οι Griffin et al. [3.4] χρησιμοποίησαν τους συντελεστές ευαισθησίας απωλειών του δικτύου προκειμένου να προσδιορίσουν τις βέλτιστες θέσεις των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος. Οι Acharya et al. [3.5] επέκτειναν τη μέθοδο [3.4] εισάγοντας τροποποιούμενους συντελεστές ευαισθησίας απωλειών και συνδυάζοντάς τους με βέλτιστη ροή φορτίου επιχείρησαν να βελτιστοποιήσουν τόσο τη θέση όσο και το μέγεθος των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής.

Οι Jurado and Cano [3.6] κατασκεύασαν μια συνάρτηση κόστους προς βελτιστοποίηση, επιδιώκοντας να μελετήσουν το πως η θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής επιδρά στο χρηματικό κόστος επένδυσης της εγκατάστασης ανάλογα με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε ευρεία κλίμακα, καθώς η μοντελοποίηση που έγινε αφορούσε τα συγκεκριμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δύο εξεταζόμενων δικτύων. Τέλος, οι Gozel και Hocaoglu [3.7] μελέτησαν την επίδραση των κανονικοποιημένων μοντέλων στατικών φορτίων στην εύρεση της βέλτιστης θέσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής χρησιμοποιώντας την τεχνική των ισοδύναμων εγγεόμενων ρευμάτων.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των αναλυτικών μεθόδων είναι η μοντελοποίηση της θέσης τοποθέτησης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, αλλά και του μεγέθους τους σαν συνεχείς μεταβλητές. Έτσι το μέγεθος μιας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που υπολογίστηκε μπορεί να μην ταιριάζει με τα διαθέσιμα μεγέθη, ή η υπολογισμένη βέλτιστη θέση τοποθέτησης να μη συμπίπτει με τις φυσικές τοποθεσίες των ζυγών του συστήματος. Η στρογγυλοποίηση των αποτελεσμάτων είναι πιθανό να μεταβάλλει ανεπιθύμητα τις τάσεις των ζυγών ή η μείωση των απωλειών να είναι διαφορετική από αυτή που αρχικά υπολογίστηκε.

### 3.2.2 Μεταευριστικές μέθοδοι

Οι μεταευριστικές μέθοδοι είναι υπολογιστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης προβλημάτων που προσπαθούν επαναληπτικά να βελτιώσουν μια υποψήφια λύση του προβλήματος δεδομένου ενός δοσμένου μέτρου ποιότητας. Γίνονται ελάχιστες ή καθόλου παραδοχές σχετικά με το πρόβλημα βελτιστοποίησης και ελέγχεται πολύ μεγάλος όγκος πιθανών λύσεων. Παρόλα αυτά, δεν είναι εγγυημένο ότι μέσω αυτών των διαδικασιών, θα προσδιοριστεί τελικά κάποια βέλτιστη λύση. Μερικοί γνωστοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν μεταευριστικές τεχνικές είναι η μέθοδος αναζήτησης με περιορισμένες καταστάσεις (tabu search), η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization), η βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών (ant colony optimization), και η προσομοιωμένη απόπτωση (simulated annealing).

Οι Golshan και Arefifar [3.8] και Nara et. al. [3.9] χρησιμοποίησαν τη μέθοδο αναζήτησης με περιορισμένες καταστάσεις προκειμένου να βελτιστοποιήσουν τόσο τη θέση όσο και το μέγεθος των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής. Πρόκειται για μια συνδυαστική τεχνική τοπικής αναζήτησης λύσεων που βασίζεται σε ένα ευέλικτο σύστημα μνήμης. Η κεντρική ιδέα της μεθόδου είναι ότι απαγορεύει την έρευνα σε λύσεις που έχουν ήδη δεχτεί επίσκεψη, δηλαδή έχουν ήδη ερευνηθεί. Οι λύσεις που ερευνώνται για πρώτη φορά αποθηκεύονται σε μία λίστα που ονομάζεται απαγορευμένη λίστα (tabu list). Σε κάθε βήμα της διαδικασίας η μέθοδος ερευνά τοπικά ένα διαφορετικό γειτονικό χώρο λύσεων και επαναληπτικά προχωρά από μια λύση σε μία επόμενη μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι οι προσεγγιστικές λύσεις που επιτυγχάνονται δεν είναι πάντα βέλτιστες.

Η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης στην οποία τα σωματίδια ή πράκτορες που απαρτίζουν ένα πληθυσμό, αλλάζουν θέσεις με το χρόνο. Τα σωματίδια αυτά πετούν σε ένα πολυδιάστατο χώρο αναζήτησης. Κατά τη διάρκεια της πτήσης, κάθε σωματίδιο ρυθμίζει τη θέση του σύμφωνα με τη δική του εμπειρία και την εμπειρία των γειτονικών σωματιδίων, κάνοντας χρήση της καλύτερης θέσης που συνάντησε είτε το ίδιο το σωματίδιο είτε κάποιο γειτονικό του. Η κατεύθυνση σμήνους ενός σωματιδίου καθορίζεται από το σύνολο των σωματιδίων που συνορεύουν με αυτό και την εμπειρία του. Οι Arkadani et al. [3.10] χρησιμοποίησαν το συγκεκριμένο αλγόριθμο για την εύρεση των βέλτιστων θέσεων των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, όμως αποδείχτηκε σχετικά ανεπαρκής σε θέματα ταχύτητας και μνήμης.

Η βελτιστοποίηση με αποικίες μυρμηγκιών είναι εμπνευσμένη από τη συμπεριφορά των πραγματικών μυρμηγκιών κατά την αναζήτηση της τροφής τους. Ένα σύνολο τεχνητών μυρμηγκιών συνεργάζονται για να βρουν τη λύση σε ένα πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης με την αλλαγή των πληροφοριών μέσω φερορμονών που βρίσκονται στα τεχνητά μονοπάτια. Κάθε τεχνητό μυρμήγκι αναζητά λύσεις με το μικρότερο δυνατό κόστος και η αλληλεπίδραση και η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στα μυρμήγκια δίνει τη βέλτιστη λύση. Ο μηχανισμός της προσαρμοστικής προσαρμογής της επίδρασης του συντελεστή φερομόνης και των στοχαστικών διαταραχών, βελτιώνει την ικανότητα του αλγορίθμου να αποφεύγει συμπεριφορές στασιμότητας και κατά συνέπεια βελτιώνει το χρόνο σύγκλισης. Οι Falaghi και Haghifam [3.11] κατασκεύασαν μια αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης του κόστους επένδυσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και του συνολικού λειτουργικού κόστους του συστήματος, και μέσω του συγκεκριμένου αλγορίθμου κατέληξαν σε αποτελέσματα σχετικά με το βέλτιστο πλήθος και τις βέλτιστες θέσεις των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που πρέπει να προστεθούν στο σύστημα.

Η προσομοιωμένη απόπτωση είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που βασίζεται στην απόπτωση των στερεών. Κατά τη διαδικασία της απόπτωσης ένα υλικό θερμαίνεται μέχρι μια υψηλή θερμοκρασία και μετά ψύχεται με ελεγχόμενο τρόπο για να έρθει σε μια επιθυμητή τελική κατάσταση. Όταν το υλικό βρίσκεται στην υψηλή θερμοκρασία, τα σωματίδια του είναι σε τυχαίο σχηματισμό, ενώ μετά που ψύχεται τα σωματίδια οργανώνονται σε ένα πλέγμα που αποτελεί μια κατάσταση ελάχιστης ενέργειας. Οι Sutthibun και Bhasarputra [3.12] σχεδίασαν μια πολυμεταβλητή αντικειμενική συνάρτηση

για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και χρησιμοποίησαν το συγκεκριμένο αλγόριθμο προκειμένου να την ελαχιστοποιήσουν.

### 3.2.3 Μέθοδοι βασισμένες σε γενετικούς αλγόριθμους

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν δυναμικές, στοχαστικές διαδικασίες αναζήτησης των οποίων ο βασικός μηχανισμός είναι εμπνευσμένος από τη δαρβινική θεωρία της εξέλιξης της φύσης (αναπαραγωγή, μετάλλαξη, εξέλιξη, θάνατος οργανισμών), και σχετίζεται με τη μεταφορά από έναν πληθυσμό χρωμοσωμάτων σε έναν άλλο πληθυσμό χρησιμοποιώντας ένα είδος φυσικής επιλογής μαζί με γενετικούς τελεστές, όπως η διασταύρωση (crossover), δηλαδή η ανταλλαγή γενετικού υλικού μεταξύ δύο χρωμοσωμάτων από απλοειδείς γονείς, η μετάλλαξη (mutation), δηλαδή η αναστροφή γενετικού υλικού σε έναν τυχαία επιλεγμένο τόπο, η αντιστροφή (inversion), δηλαδή η ανακατανομή της διάταξης των γονιδίων σε ένα χρωμόσωμα, και η επιλογή (selection), δηλαδή ο διαχωρισμός των χρωμοσωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή της επόμενης γενεάς.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι εκτελούν μία αναζήτηση στο χώρο των υποψηφίων λύσεων, με στόχο την εύρεση των βέλτιστων λύσεων σύμφωνα με κάποιο δοσμένο κριτήριο. Η αναζήτηση αυτή είναι παράλληλη, καθώς σε κάθε υποψήφια λύση μπορεί να εκτελεστεί ξεχωριστή αναζήτηση. Η μέθοδος της αναζήτησης μπορεί να θεωρηθεί σαν "αναρρίχηση λόφου", καθώς γίνονται μικρές αλλαγές στις υποψήφιες λύσεις του πληθυσμού και επιλέγονται πάντα οι καλύτερες, βάσει του κριτηρίου, που συνήθως είναι η βελτιστοποίηση κάποιας αντικειμενικής συνάρτησης. Η αναζήτηση επικεντρώνεται στις περισσότερες κατάλληλες λύσεις, χωρίς όμως να αγνοούνται οι υπόλοιπες, καθώς υπάρχει πάντα ο κίνδυνος να παγιδευτεί η διαδικασία σε τοπικά ακρότατα [3.13].

Ένας γενετικός αλγόριθμος επίλυσης αποτελείται από τα παρακάτω 5 τμήματα:

1. Μία γενετικά κωδικοποιημένη αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος.
2. Ένα τρόπο δημιουργίας ενός αρχικού πληθυσμού των πιθανών λύσεων.
3. Μία αντικειμενική συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function), που αποτελεί το περιβάλλον κατατάσσοντας τις λύσεις με βάση την καταλληλότητά τους.
4. Γενετικούς τελεστές στους οποίους οφείλεται η σύνθεση των απογόνων.
5. Καθορισμός παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου, όπως το μέγεθος του πληθυσμού όσο και των πιθανοτήτων εφαρμογής των γενετικών τελεστών.

Διάφορες προσεγγίσεις με χρήση γενετικών αλγορίθμων έχουν γίνει στο ζήτημα της βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυα διανομής. Βασική αρχή της μοντελοποίησης είναι ότι τα μεγέθη και οι θέσεις των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής κωδικοποιούνται υπό μορφή δυαδικών συμβολοσειρών και μέσω κάποιων εφαρμογών με γενετικούς τελεστές προκύπτει ένα νέο σύνολο. Οι Sedighizadeh και Rezazadeh [3.14] υλοποίησαν ένα γενετικό αλγόριθμο προκειμένου να βελτιστοποιήσουν μια αντικειμενική συνάρτηση που αφορούσε τις απώλειες ισχύος του συστήματος σε συνδυασμό με το προφίλ των τάσεων των ζυγών. Οι Singh και Verma [3.15] ανέπτυξαν μια μεθοδολογία που χρησιμοποιεί γενετικό αλγόριθμο για να τοποθετεί βέλτιστα τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, από άποψη θέσης και μεγέθους, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των τοπικών διαταραχών ισχύος από στατικά φορτία που ελέγχονται από τάση. Οι Borges και Falcao [3.16] χρησιμοποίησαν γενετικό αλγόριθμο, του οποίου η συνάρτηση καταλληλότητας συνδέει τα τεχνικά οφέλη (μείωση απωλειών ισχύος, βελτίωση τάσεων) που προκύπτουν από τη διείσδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με τα κόστη επένδυσης, συντήρησης και λειτουργίας.

### 3.2.4 Υβριδικές μέθοδοι

Οι υβριδικές μέθοδοι αποτελούν συνδυασμό εφαρμογής γενετικών αλγορίθμων και άλλων μεθόδων βελτιστοποίησης και χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτευχθούν πιο αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να αναζητήσουν υποψήφιες λύσεις του προβλήματος σε ένα πολύ μεγάλο χώρο λύσεων και να προσδιορίζουν ένα υποχώρο λύσεων στον οποίο βρίσκονται οι βέλτιστες λύσεις, χωρίς όμως να μπορούν ικανοποιητικά να τις εντοπίζουν. Αντίθετα, άλλες τεχνικές αναζήτησης μπορούν να προσδιορίζουν με μεγάλη ακρίβεια τις βέλτιστες λύσεις σε ένα συγκεκριμένο υποχώρο λύσεων, οπότε ο συνδυασμός των δύο μεθόδων βελτιώνει την αποτελεσματικότητα των γενετικών αλγορίθμων και αντιμετωπίζει ταυτόχρονα το πρόβλημα ευρωστίας των άλλων τεχνικών οδηγώντας συνολικά σε πολύ καλύτερα αποτελέσματα, από αυτά που θα προέκυπταν από την εφαρμογή κάθε μεθόδου ξεχωριστά.

Οι Gandomkar et al. [3.17] ενσωμάτωσαν τη μέθοδο αναζήτησης με περιορισμένες καταστάσεις στη φάση παραγωγής του γενετικού αλγορίθμου στην προσπάθειά τους να εντοπίσουν βέλτιστες θέσεις για τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, με κριτήριο τη βελτιστοποίηση της ποιότητας ισχύος και την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος λόγω αρμονικής παραμόρφωσης. Οι Mardaneh και Ghahretnian [3.18] χρησιμοποίησαν στην προσέγγισή τους γενετικό αλγόριθμο και βέλτιστη ροή φορτίου προκειμένου να βρουν τις κατάλληλες θέσεις για συγκεκριμένο αριθμό μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που εισάγονται στο σύστημα. Η κύρια ιδέα ήταν να υπολογίζεται η συνάρτηση καταλληλότητας μέσω βέλτιστης ροής φορτίου και μετά να επιστρέφεται στο γενετικό αλγόριθμο, ώστε να προσδιορίζονται οι βέλτιστες θέσεις. Οι Kim et al. [3.19] επεδίωξαν να βελτιστοποιήσουν τις θέσεις των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος και χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο hereford ranch στο στάδιο της διαμόρφωσης των γενετικών τελεστών του γενετικού αλγορίθμου, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη αξιοπιστία στη σύνθεση των απογόνων του πληθυσμού που παράγεται, στα πλαίσια της επίλυσης. Οι Ziari et al. [3.20] προσέγγισαν το ζήτημα της βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής κατασκευάζοντας αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση συναρτήσει των τεχνικών και οικονομικών κινδύνων που θα προέκυπταν από τη διεύθυνση της διεσπαρμένης παραγωγής. Η διαδικασία βελτιστοποίησης περιλάμβανε τη χρήση γενετικού αλγορίθμου και την ενίσχυσή του με τη μεθοδολογία βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, προκειμένου να μη παγιδευτεί ο αλγόριθμος σε τοπικά ελάχιστα.

### 3.2.5 Άλλες μέθοδοι

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά σε προσεγγίσεις, σχετικά με το ζήτημα της βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυα διανομής, που δεν εντάσσονται σε κάποια από τις προαναφερθείσες κατηγορίες. Οι Rosehart και Nowicki [3.21] επιχείρησαν να προσδιορίσουν τις βέλτιστες θέσεις των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους του συνολικού συστήματος, και πραγματοποίησαν μοντελοποίηση του προβλήματος μέσω πολλαπλασιαστών Lagrange. Οι Kashem et al. [3.22] χρησιμοποίησαν ανάλυση ευαισθησίας στα ηλεκτρικά στοιχεία του συστήματος, προκειμένου να καταλήξουν σε συμπεράσματα σχετικά με το πώς η τοποθέτηση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής επιδρά στην απόδοση και την ευστάθεια του συστήματος. Οι Keane και Malley [3.23] διατύπωσαν το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής υπό τη μορφή εξισώσεων γραμμικού προγραμματισμού, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Simplex για να το επιλύσουν. Οι Agalgaonkar et al. [3.24] διερεύνησαν τις πιθανές βέλτιστες θέσεις των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε καθεστώς απελευθερωμένης αγοράς ενέργειας με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από ανάλυση της κομβικής οριακής τιμολόγησης (locational marginal pricing).

### 3.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Soder, "Distributed generation : a definition," *Electric Power Systems Research*, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [3.2] M. F. Acorede, H. Hizam, I Aris, and M.Z.A Ab Kadir, " A review of strategies for optimal placement of distributed generation in power distribution systems," *Research Journal of Applied Science*, vol. 5, no. 2, pp. 137-145, 2010.
- [3.3] H. L. Willis, "Analytical methods and rules of thumb for modelling DG-distribution interaction," in *Proc. 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, pp. 1643-1644, July 2000.
- [3.4] T. Griffin, K. Tomsovic, D. Secrest, and A. Law, "Placement of dispersed generation systems for reduced losses," presented at the 33rd Annual International Conference Systems Sciences, Hawaii, USA, 2000.
- [3.5] N. Acharya, P. Mahat, and N. Mithulananthan, " An analytical approach for DG allocation in primary distribution network," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no.10, pp. 669-678, Dec. 2006.
- [3.6] F. Jurado and A. Cano, " Optimal placement of biomass fuelled gas turbines for reduced losses," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no.15, pp. 2673-2681, Sep. 2006.
- [3.7] T. Gözel and M. H. Hocaoglu," An analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems," *Electric Power System Research*, vol. 79, no. 6, pp. 912-918, April 2009.
- [3.8] M. E. H. Golshan and S. A. Arefifar, "Optimal allocation of distributed generation and reactive sources considering tap positions of voltage regulators as control variables," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 17, no. 3, pp. 219-239, Nov. 2006.
- [3.9] K. Nara, Y. Hayashi, K. Ikeda, and T. Ashizawa, " Application of tabu search to optimal placement of distributed generations," in *Proc. 2001 IEEE Power Engineering Winter Meeting*, vol. 3, pp. 918-923, Feb. 2001.
- [3.10] A. J. Ardakani, A. K. Kaviani, S. A. Pourmousavi, S. H. Hosseinian, and M. Abedi, " Siting and sizing of distributed generation for loss reduction," presented at the International Conference on Power Systems, Dec. 2007.
- [3.11] H. Falaghi and M. R. Haghifam, "ACO based algorithm for distributed generation sources allocation and sizing in distribution systems," in. *Proc. 2007 IEEE Lausanne Power Tech*, vol.7, pp. 555-560, July 2007.
- [3.12] T. Sutthibun and P. Bhasaputra, "Multi-objective optimal distributed generation placement using simulated annealing," in. *Proc. 2010 IEEE International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, vol. 4, pp. 814-818, May 2010.
- [3.13] M. Melanie, *An Introduction to Genetic Algorithms*, Cambridge: MIT Press, 1996, pp. 1-24.
- [3.14] M. Sadighizadeh and A. Rezaadeh, "Using genetic algorithm for distributed generation allocation for reduce losses and improve voltage profile," in *Proc. World Academy of Science, Engineering, and Technology*, vol. 27, pp. 251-256, Feb. 2008.



- [3.15] D. Singh and K. S. Verma, " GA based optimal sizing and placement of distributed generation for loss minimization," *International Journal of Intelligent Technology*, vol.2, no.4, pp. 263-269, 2005.
- [3.16] C. L. T. Borges and D. M. Falcao, " Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no. 6, pp. 413-420, July 2006.
- [3.17] M. Gandomkar, M. Vakilian, and M. Ehsan, "A genetic- based tabu search algorithm for optimal DG allocation in distribution networks," *Electric Power Components and Systems*, vol. 33, no. 12, pp. 1351-1362, Dec. 2005.
- [3.18] M. Mardaneh and G. B. Ghahrepetian, " Siting and sizing of DG units using GA and OPF based technique," in *Proc. 2004 IEEE Region 10 Conference*, vol. 3, pp. 331-334, Nov. 2004.
- [3.19] J. O. Kim, S. W. Nam, S. K. Park, and C. Singh, " Dispersed generation planning using improved hereford ranch algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol.47, no. 1, pp. 47-55, Oct. 1998.
- [3.20] I. Ziari, G. Ledwich, A. Ghosh, D. Cornforth, and M. Wishart, " Optimal allocation and sizing of DGs in distribution networks," presented at the Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis, USA, Jul. 2010.
- [3.21] W. Rosehart and E. Nowicki, " Optimal placement of distributed generation," in *Proc. 14th Power System Computation Conference*, pp. 1-5, June 2002.
- [3.22] M. A. Kashem, M. Negnevitsky, and G. Ledwich, " Distributed generation for minimization of power losses in distribution systems," in *Proc. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 8-14, June 2006.
- [3.23] A. Keane and M. O' Malley, " Impact of distributed generation capacity on losses," in *Proc. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 7-7, June 2006.
- [3.24] A. P. Agalgaonkar, S. V. Kulkarni, S.A. Khairpade, and S. A. Soman, " Placement and penetration of distributed generation under standard market design," *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol.1, no.1, pp. 1-16, Dec. 2004.

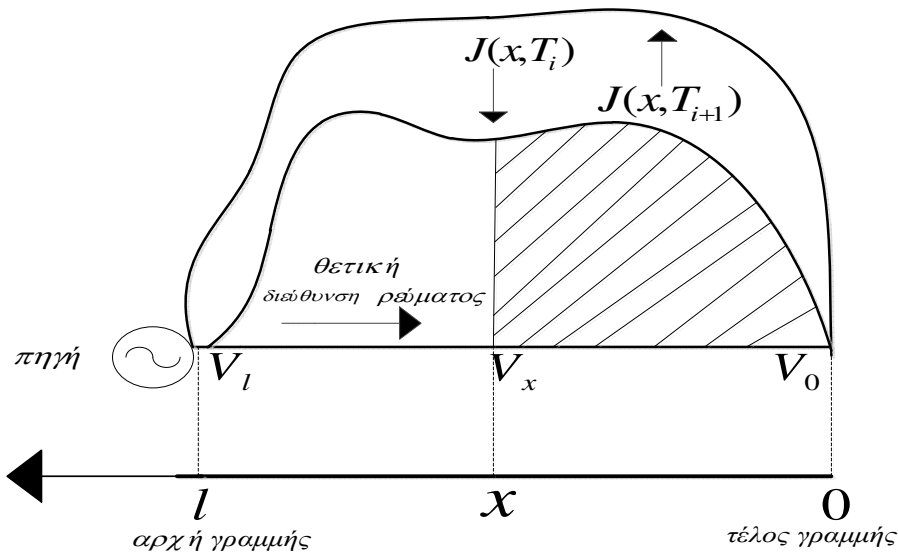


**ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ  
ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ  
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

**4.1 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΗ  
ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

Όταν σε μια ακτινική γραμμή διανομής τα διαδοχικά σημεία σύνδεσης των φορτίων απέχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους, τότε είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο του συνεχώς διανεμημένου φορτίου. Τέτοιες τοπολογίες φορτίων συναντώνται κυρίως στα δίκτυα χαμηλής τάσης των αστικών και των ημιαστικών περιοχών [4.1].

Στην ανάλυση που ακολουθεί θεωρείται ακτινική γραμμή μήκους  $l$ . Έστω  $x$  η απόσταση ενός τυχαίου σημείου από το πέρας της γραμμής, δηλαδή  $x = 0$  για το πέρας της γραμμής, ενώ  $x = l$  για την αρχή της γραμμής. Το μέγεθος των φορτίων εκφράζεται με την πυκνότητα φορτίου  $J(x, T_i)$ , όπου  $T_i$  η αντίστοιχη διακριτή χρονική τιμή. Η πυκνότητα φορτίου μετριέται συνήθως σε  $A/m$ . Σε ό,τι αφορά τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γραμμής, θεωρείται ότι η ανά μονάδα μήκους ωμική αντίσταση  $R$  και αυτεπαγωγή  $L$  είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες κατά μήκος της γραμμής, ενώ η χωρητικότητα  $C$  και η ωμική αγωγιμότητα  $G$  αγνοούνται, γεγονός απόλυτα επιτρεπτό για τα δίκτυα χαμηλής τάσης αλλά συχνά και για τα δίκτυα μέσης τάσης, αν είναι εναέρια ή αν το μήκος της γραμμής είναι μικρό.



**Σχήμα 4.1:** Ακτινική γραμμή με διανεμημένο φορτίο σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές φόρτισης.

Στην πρώτη φάση της ανάλυσης αναπτύσσονται οι ηλεκτρικές εξισώσεις της ακτινικής γραμμής πριν την προσθήκη μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Έστω ότι τη χρονική διάρκεια  $T_i$  τα φορτία κατανέμονται πάνω στη γραμμή σύμφωνα με την πυκνότητα φορτίου  $J(x, T_i)$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Τότε, το ρεύμα γραμμής, που προέρχεται από την εξωτερική πηγή τροφοδότησης, στο σημείο  $x$  θα είναι :

$$I(x, T_i) = \int_0^x J(x, T_i) dx \quad (4.1)$$

Αν  $Z = R + jX$  ( $\Omega/\text{km}$ ) η σύνθετη αντίσταση ανά μονάδα μήκους της γραμμής, τότε οι στοιχειώδεις απώλειες ενεργού ισχύος στο σημείο  $x$  θα είναι :

$$dP_{\alpha\pi}(x, T_i) = |I(x, T_i)|^2 \cdot R dx = \left( \left| \int_0^x J(x, T_i) dx \right| \right)^2 \cdot R dx \quad (4.2)$$

και η στοιχειώδης πτώση τάσης (πολική τιμή) στο σημείο  $x$  θα είναι :

$$d(\Delta V(x, T_i)) = \sqrt{3} \cdot I(x, T_i) \cdot Z dx = \sqrt{3} \cdot \left( \int_0^x J(x, T_i) dx \right) \cdot Z dx \quad (4.3)$$

Άρα, οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος κατά μήκος της τριφασικής γραμμής τη χρονική διάρκεια  $T_i$  είναι :

$$P_{\alpha\pi}(T_i) = 3 \cdot \int_0^l dP_{\alpha\pi}(x, T_i) = 3 \cdot \int_0^l \left( \int_0^x J(x, T_i) dx \right)^2 \cdot R dx \quad (4.4)$$

και η πτώση τάσης μεταξύ του σημείου  $x$  και του πέρατος του γραμμής είναι :

$$\Delta V(x, T_i) = V_x(T_i) - V_0(T_i) = \int_0^x d(\Delta V(x, T_i)) = \sqrt{3} \cdot \int_0^x \int_0^x J(x, T_i) dx \cdot Z dx \quad (4.5)$$

Οπότε η τάση στο σημείο  $x$  είναι :

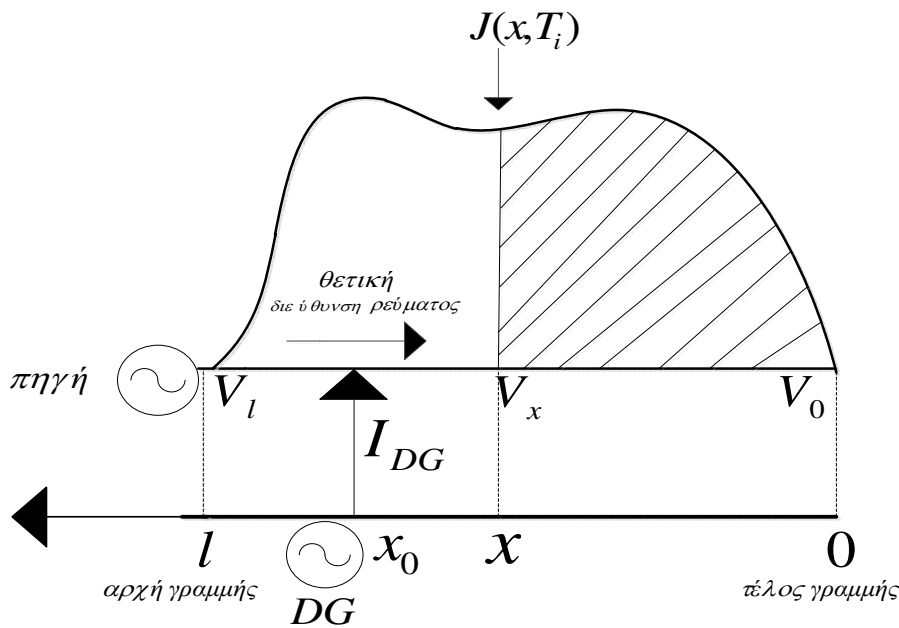
$$V_x(T_i) = V_0(T_i) + \Delta V(x, T_i) = V_l(T_i) - \Delta V(l, T_i) + \Delta V(x, T_i) \quad (4.6)$$

όπου  $\Delta V(l, T_i)$  η συνολική πτώση τάσης μεταξύ της αρχής και του πέρατος της γραμμής, η οποία είναι :

$$\Delta V(l, T_i) = V_l(T_i) - V_0(T_i) = \int_0^l d(\Delta V(x, T_i)) = \sqrt{3} \cdot \int_0^l \int_0^x J(x, T_i) dx \cdot Z dx \quad (4.7)$$

**4.2 ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ**

Έστω, τώρα, ότι συνδέεται στην ακτινική γραμμή που εξετάζεται μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής (DG) μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στο σημείο  $x_0$ . Η σύνδεση της μονάδας, λόγω της επίδρασής της στο προφίλ των τάσεων, προκαλεί μια μικρή μεταβολή στην πυκνότητα φορτίου της γραμμής, η οποία όμως για λόγους απλούστευσης μπορεί να αμεληθεί [4.2]. Οπότε θεωρείται ότι η πυκνότητα φορτίου  $J(x, T_i)$  παραμένει ως έχει μετά τη σύνδεση της μονάδας. Το ρεύμα  $I_{DG}(T_i)$ , που εγχέει στο δίκτυο η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής τη χρονική διάρκεια  $T_i$ , οδηγεί στη σημαντική αλλαγή του ρεύματος γραμμής μεταξύ της εξωτερικής πηγής και του σημείου σύνδεσης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, και κατά επέκταση, στη μεταβολή των απωλειών ενεργού ισχύος της γραμμής όπως θα φανεί από τις αντίστοιχες εξισώσεις. Στόχος της ανάλυσης είναι η εύρεση του βέλτιστου σημείου σύνδεσης  $x_0$ , ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής.



**Σχήμα 4.2:** Ακτινική γραμμή με διανεμημένο φορτίο μετά την προσθήκη μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, DG, στο σημείο  $x_0$ .

Μετά την προσθήκη της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, λοιπόν, το ρεύμα της εξεταζόμενης γραμμής στο τυχαίο σημείο  $x$  διαμορφώνεται ως εξής :

$$I(x, T_i) = \begin{cases} \int_0^x J(x, T_i) dx & , \text{αν } 0 \leq x \leq x_0 \\ \int_0^x J(x, T_i) dx - I_{DG}(T_i) & , \text{αν } x_0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (4.8)$$

Αν  $P_{\alpha\pi\_new}(x_0, T_i)$  οι συνολικές τριφασικές απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής κατά τη χρονική διάρκεια  $T_i$  συναρτήσει του σημείου σύνδεσης  $x_0$  της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, τότε εκφράζονται μαθηματικά ως εξής :

$$P_{\alpha\pi\_new}(x_0, T_i) = 3 \cdot \left( \int_0^{x_0} |I(x, T_i)|^2 \cdot R dx + \int_{x_0}^l |I(x, T_i)|^2 \cdot R dx \right) \Rightarrow$$

$$P_{\alpha\pi\_new}(x_0, T_i) = 3 \cdot \left( \int_0^{x_0} \left( \int_0^x J(x, T_i) dx \right)^2 \cdot R dx + \int_{x_0}^l \left( \int_0^x J(x, T_i) dx - I_{DG}(T_i) \right)^2 \cdot R dx \right) \quad (4.9)$$

Η νέα πτώση τάσης μεταξύ του σημείου  $x$  και του πέρατος του γραμμής είναι :

$$\Delta V(x, T_i) = V_x(T_i) - V_0(T_i) = \int_0^x d(\Delta V(x, T_i)) = \sqrt{3} \cdot \int_0^x I(x, T_i) \cdot Z dx \Rightarrow$$

$$\Delta V_{new}(x, T_i) = \begin{cases} \sqrt{3} \cdot \int_0^x J(x, T_i) dx \cdot Z dx & , \text{αν } 0 \leq x \leq x_0 \\ \sqrt{3} \cdot \left( \int_0^{x_0} J(x, T_i) dx \cdot Z dx + \int_{x_0}^x \left( \int_0^x J(x, T_i) dx - I_{DG}(T_i) \right) \cdot Z dx \right) & , \text{αν } x_0 \leq x \leq l \end{cases} \quad (4.10)$$

Η εξίσωση (4.6) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αυτή την περίπτωση για το υπολογισμό της τάσης στα διάφορα σημεία της γραμμής.

Όπως διαφαίνεται από τις εξισώσεις (4.8) έως (4.10) το διάστημα  $(x_0, l)$  της γραμμής επηρεάζεται ηλεκτρικά από την έγχυση του ρεύματος της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Δοθείσης χρονικής περιόδου μελέτης  $T$ , η μέση τιμή των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος της γραμμής είναι :

$$\overline{P_{\alpha\pi\_new}(x_0)} = \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^N P_{\alpha\pi\_new}(x_0, T_i) \cdot T_i \quad (4.11)$$

όπου  $N$  είναι ο συνολικός αριθμός των χρονικών διαστημάτων  $T_i$ , στα οποία έχει διαιρεθεί η χρονική περίοδος μελέτης  $T$ .

Η διαδικασία υπολογισμού της βέλτιστης θέσης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής περιλαμβάνει παραγωγή της συνάρτησης (4.11) ως προς  $x_0$ , ώστε να εντοπιστούν τα τοπικά ακρότατά της στο πεδίο ορισμού της. Για να εξεταστεί το είδος των τοπικών ακροτάτων χρησιμοποιείται το κριτήριο της δεύτερης παραγώγου. Δεδομένου ότι στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, ενδιαφέρουν μόνο τα τοπικά ελάχιστα. Οπότε, η βέλτιστη θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στη γραμμή προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης :

$$\frac{d\overline{P_{\alpha\pi\_new}(x_0)}}{dx_0} = 0 \quad (4.12)$$

με τον περιορισμό η λύση της εξίσωσης, έστω  $x_{opt}$ , να βρίσκεται εντός του πεδίου ορισμού  $[0, l]$  και η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης (4.11) στο σημείο  $x_{opt}$  να είναι θετική, ώστε το  $x_{opt}$  να είναι τοπικό ελάχιστο σύμφωνα με το κριτήριο της δεύτερης παραγωγού.

Σε γενικές γραμμές, όπως θα φανεί και στο Κεφάλαιο 8, η προσθήκη μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο έχει θετικό αντίκτυπο στο προφίλ των τάσεων των γραμμών διανομής. Είναι δυνατό όμως, αν και σπάνιο, να προκληθεί ανύψωση ή πτώση τάσης στα κοντινά σημεία πέρα από τα επιτρεπτά όρια του  $\pm 5\%$ . Σε τέτοιες περιπτώσεις, προκειμένου να επανέλθουν οι τάσεις εντός επιτρεπτών ορίων, είτε αυξάνεται το μέγεθος ισχύος της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, είτε, αν αυτό δεν είναι εφικτό, τοποθετείται σε κοντινό σημείο στο οποίο ικανοποιούνται οι περιορισμοί [4.3].

Τέλος, το ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος σε μια χρονική διάρκεια  $T_i$  δίνεται από την σχέση :

$$loss\_reduction = \left( \frac{P_{ap\_old}(T_i) - P_{ap\_new}(x_{opt}, T_i)}{P_{ap\_old}(T_i)} \right) \cdot 100\% \quad (4.13)$$

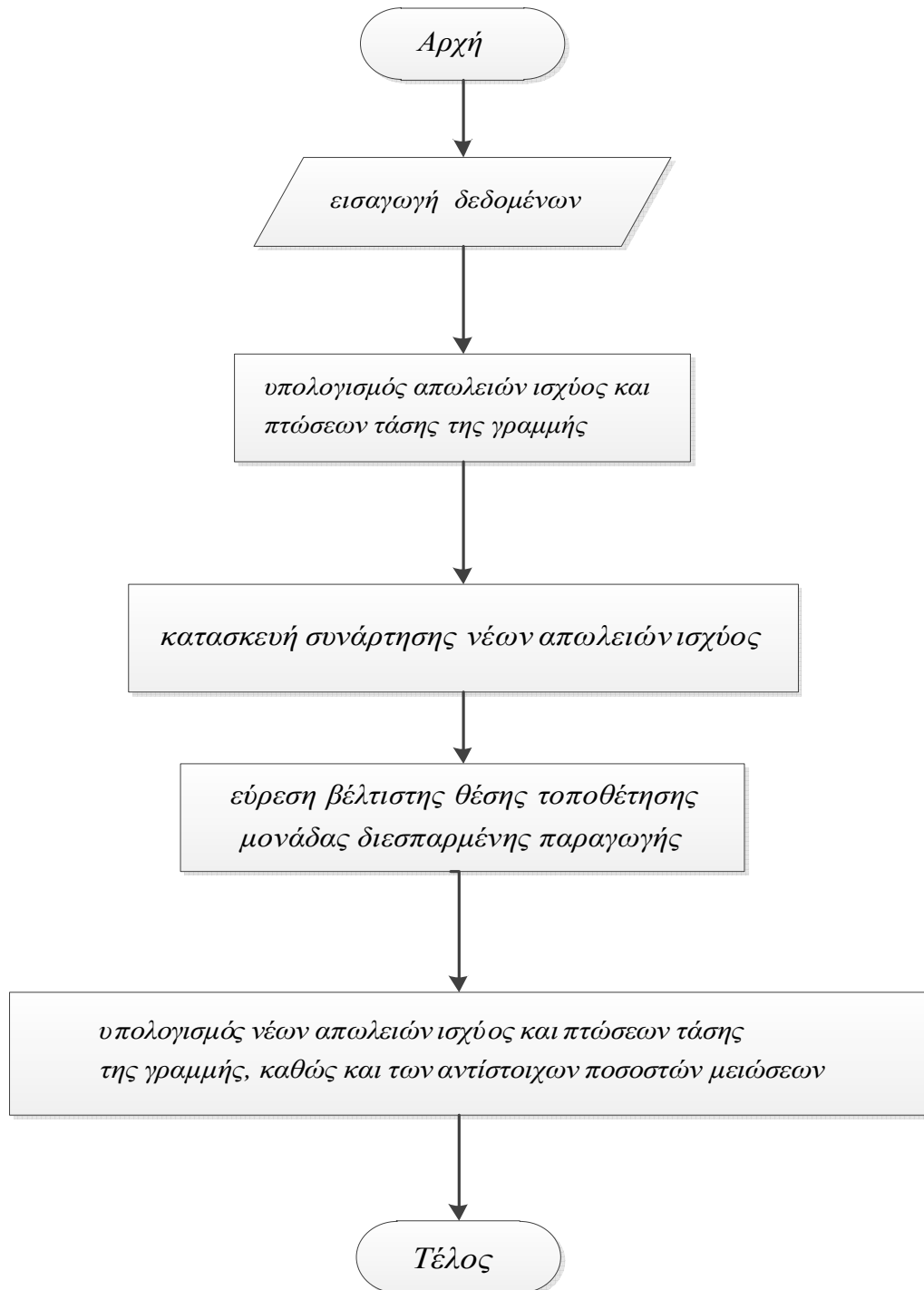
Σημειώνεται, ότι η σχέση (4.13) διαμορφώνεται ανάλογα, όταν ζητείται το μέσο ποσοστό μείωσης.

### 4.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

Τα βήματα για την υλοποίηση του αλγόριθμου εύρεσης της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που ακολουθούν το μοντέλο του διανεμημένου φορτίου, με σκοπό την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση των απωλειών ισχύος είναι τα ακόλουθα :

1. Εισάγονται τα δεδομένα που αφορούν την ακτινική γραμμή, όπως το επίπεδο τάσης, η σύνθετη αντίσταση κατά μήκος της γραμμής και η πυκνότητα φορτίου.
2. Υπολογίζονται οι απώλειες ενεργού ισχύος και οι πτώσεις τάσης κατά μήκος της γραμμής από τις σχέσεις (4.4)-(4.7).
3. Εισάγεται το μέγεθος του ρεύματος που εγγχεί η συνδεδεμένη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής.
4. Κατασκευάζεται η νέα συνάρτηση απωλειών ισχύος και η μέση τιμή αυτής από τις σχέσεις (4.9) και (4.11) αντίστοιχα.
5. Υπολογίζεται η βέλτιστη θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής από την επίλυση της (4.12) ως προς  $x_0$ .
6. Υπολογίζονται οι νέες απώλειες ενεργού ισχύος και οι πτώσεις τάσης κατά μήκος της γραμμής από τις σχέσεις (4.11), (4.10), (4.6).
7. Υπολογίζεται το ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος από την (4.13).

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος σε μορφή διαγράμματος ροής.



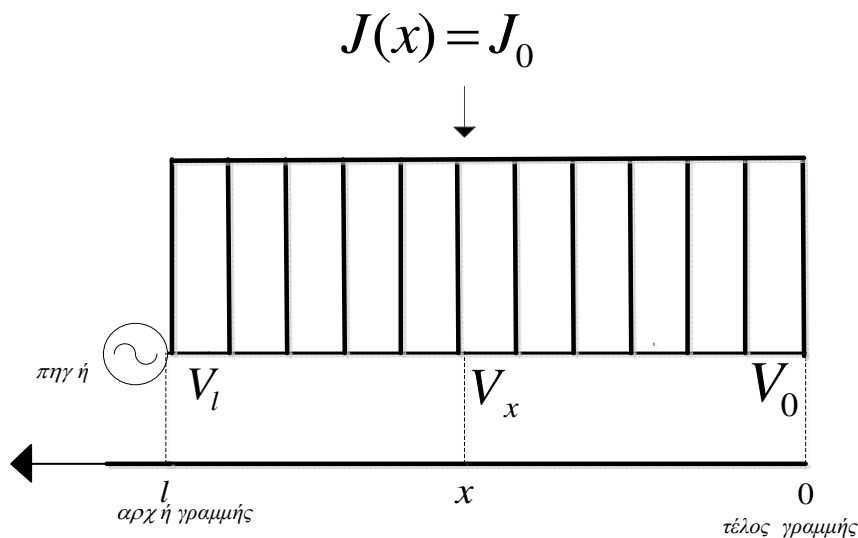
**Σχήμα 4.3:** Διάγραμμα ροής μεθόδου υπολογισμού βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικό δίκτυο διανομής.



#### 4.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΧΡΟΝΟΑΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

##### 4.4.1 Ομοιόμορφη κατανομή φορτίου

Για την πλήρη κατανόηση της μεθόδου υπολογισμού της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικό δίκτυο διανομής, θα παρουσιαστεί αναλυτικά ένα αριθμητικό παράδειγμα εκτέλεσης του αλγορίθμου σε ακτινική γραμμή διανομής με χρονοαμετάβλητο φορτίο και μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής. Έστω, λοιπόν, τριφασική ακτινική γραμμή μήκους  $l = 200m$  που τροφοδοτεί ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4.



**Σχήμα 4.4:** Ακτινική γραμμή αναλυτικού παραδείγματος με ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο κατά μήκος της.

Το επίπεδο τάσης της γραμμής είναι τα  $0.4kV$ , η σύνθετη αντίσταση είναι  $Z = (0.4 + j0.3) \Omega/km$  και η πυκνότητα φορτίου δίνεται από τη σχέση  $J(x) = J_0$ , όπου  $J_0 = 0.97A/m$ .

Οι απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής, σύμφωνα με την (4.4), είναι :

$$\begin{aligned}
 P_{απ} &= 3 \cdot \int_0^l \left( \int_0^x J(x) dx \right)^2 \cdot R dx = 3 \cdot \int_0^l \left( \int_0^x J_0 dx \right)^2 \cdot R dx = 3 \cdot \int_0^l J_0^2 \cdot x^2 \cdot R dx \\
 &= 3 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot \int_0^l x^2 dx = 3 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot \left[ \frac{x^3}{3} \right]_0^l = 3 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot \frac{l^3}{3} = J_0^2 \cdot R \cdot l^3 \\
 &= (0.97A/m)^2 \cdot (0.4 \cdot 10^{-3} \Omega/m) \cdot (200m)^3 = 3.011kW
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

Σύμφωνα με την (4.7), η συνολική πτώση τάσης, μεταξύ της αρχής και του πέρατος της ακτινικής γραμμής, είναι :

$$\begin{aligned}
 \Delta V(l) &= \sqrt{3} \cdot \int_0^l \int_0^x J(x) dx \cdot Z dx = \sqrt{3} \cdot \int_0^l \int_0^x J_0 dx \cdot Z dx = \sqrt{3} \cdot \int_0^l J_0 \cdot x \cdot Z dx \\
 &= \sqrt{3} \cdot J_0 \cdot Z \cdot \int_0^l x dx = \sqrt{3} \cdot J_0 \cdot Z \cdot \left[ \frac{x^2}{2} \right]_0^l = \sqrt{3} \cdot J_0 \cdot Z \cdot \frac{l^2}{2} \quad (4.15) \\
 &= \sqrt{3} \cdot (0.97 A/m) \cdot (0.4 + 0.3) \cdot 10^{-3} \Omega/m \cdot \frac{(200m)^2}{2} = 16.8V
 \end{aligned}$$

$$\text{η οποία σε μορφή ποσοστού είναι } \frac{\Delta V(l)}{V_{nominal}} \cdot 100\% = \frac{16.8}{400} \cdot 100\% = 4.2\% \quad (4.16)$$

Κατόπιν, εισάγεται μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, για την οποία υποτίθεται ότι τροφοδοτεί όλο το φορτίο της γραμμής, οπότε η εξωτερική πηγή αναλαμβάνει την τροφοδότηση μόνο των απωλειών ισχύος του συστήματος. Άρα το ρεύμα που εγχέει η μονάδα στη γραμμή είναι :

$$I_{DG} = \int_0^l J(x) dx = \int_0^l J_0 dx = J_0 \cdot l \quad (4.17)$$

Διευκρινίζεται ότι σε περίπτωση που η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής τροφοδοτούσε ένα ποσοστό του φορτίου, έστω  $a$ , τότε το αντίστοιχο εγχεόμενο ρεύμα θα ήταν  $a \cdot I_{DG}$ , όπου  $I_{DG}$  το ρεύμα της σχέσης (4.17).

Η νέα συνάρτηση απωλειών ενεργού ισχύος της γραμμής διαμορφώνεται, σύμφωνα με την (4.9), ως εξής :

$$\begin{aligned}
 P_{\alpha\pi\_new}(x_0) &= 3 \cdot \left( \int_0^{x_0} \left( \int_0^x J(x) dx \right)^2 \cdot R dx + \int_{x_0}^l \left( \int_0^x J(x) dx - I_{DG} \right)^2 \cdot R dx \right) \\
 &= 3 \cdot \left( \int_0^{x_0} \left( \int_0^x J_0 dx \right)^2 \cdot R dx + \int_{x_0}^l \left( \int_0^x J_0 dx - J_0 l \right)^2 \cdot R dx \right) \\
 &= 3 \cdot R \cdot \left( \int_0^{x_0} J_0^2 \cdot x^2 dx + \int_{x_0}^l \left( \int_0^x J_0 dx \right)^2 - 2 \int_0^x J_0 dx \cdot J_0 \cdot l + J_0^2 \cdot l^2 \right) \\
 &= 3 \cdot R \cdot \left( \int_0^{x_0} J_0^2 \cdot x^2 dx + \int_{x_0}^l J_0^2 \cdot x^2 dx - \int_{x_0}^l 2 \cdot J_0^2 \cdot l \cdot x dx + \int_{x_0}^l J_0^2 \cdot l^2 dx \right) \\
 &= 3 \cdot R \cdot \left( \int_0^l J_0^2 \cdot x^2 dx - 2 \cdot J_0^2 \cdot l \cdot \frac{l^2 - x_0^2}{2} + J_0^2 \cdot l^2 \cdot (l - x_0) \right) \Rightarrow
 \end{aligned}$$

$$P_{\alpha\pi\_new}(x_0) = 3 \cdot R \cdot J_0^2 \cdot \left( \frac{l^3}{3} - 2 \cdot l \cdot \frac{l^2 - x_0^2}{2} + l^2(l - x_0) \right) \quad (4.18)$$

Το επόμενο βήμα είναι η παραγωγή της συνάρτησης απωλειών (4.18) και η εύρεση των αντίστοιχων ριζών, σύμφωνα με την (4.12), οπότε :

$$\begin{aligned} \frac{dP_{\alpha\pi\_new}(x_0)}{dx_0} = 0 &\Rightarrow 3 \cdot R \cdot J_0^2 \cdot (2 \cdot x_0 \cdot l - l^2) = 0 \Rightarrow \\ 2 \cdot x_0 \cdot l - l^2 = 0 &\Rightarrow x_{opt} = \frac{l^2}{2 \cdot l} = \frac{l}{2} = 100m \end{aligned} \quad (4.19)$$

Η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης απωλειών είναι :

$$\left. \frac{d^2 P_{\alpha\pi\_new}(x_0)}{dx_0^2} \right|_{l/2} = 6 \cdot R \cdot J_0^2 \cdot l > 0 \quad (4.20)$$

οπότε η λύση που προκύπτει είναι έγκυρη. Άρα στην εξεταζόμενη ακτινική γραμμή το μέσο της γραμμής  $x_{opt} = \frac{l}{2} = 100m$  είναι η ιδανική θέση για να τοποθετηθεί η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής.

Οι βέλτιστες απώλειες ενεργού ισχύος προκύπτουν θέτοντας στη σχέση (4.18) όπου  $x_0$  το  $x_{opt}$ . Οπότε :

$$\begin{aligned} \Rightarrow P_{\alpha\pi\_new}\left(\frac{l}{2}\right) &= 3 \cdot R \cdot J_0^2 \cdot \left( \frac{l^3}{3} - 2 \cdot l \cdot \frac{l^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2}{2} + l^2\left(l - \frac{l}{2}\right) \right) \\ &= 3 \cdot R \cdot J_0^2 \cdot \left( \frac{l^3}{3} - l \cdot \frac{3}{4} \cdot l^2 + l^2 \cdot \frac{l}{2} \right) = 3 \cdot R \cdot J_0^2 \cdot \frac{l^3}{12} = \frac{R \cdot J_0^2 \cdot l^3}{4} \\ &= 0.25 \cdot (0.4 \cdot 10^{-3} \Omega/m) \cdot (0.97A/m)^2 \cdot (200m)^3 = 0.752kW \end{aligned} \quad (4.21)$$

Το ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος, σύμφωνα με την (4.13), είναι :

$$loss\_reduction = \frac{P_{\alpha\pi\_old} - P_{\alpha\pi\_new}(x_{opt})}{P_{\alpha\pi\_old}} = \left( \frac{3.011kW - 0.752kW}{3.011kW} \right) \cdot 100\% \approx 75\% \quad (4.22)$$

Παρατηρείται εξαιρετικά σημαντική μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος από τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στην εξεταζόμενη ακτινική γραμμή.

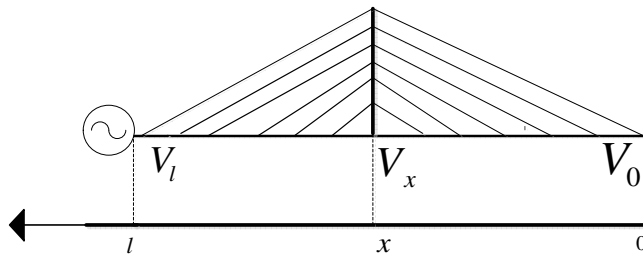
Η νέα συνολική πτώση τάσης μεταξύ της αρχής και του πέρατος της ακτινικής γραμμής, σύμφωνα με την (4.10), είναι:

$$\begin{aligned}
 \Delta V_{new}(l) &= \sqrt{3} \cdot \left( \int_0^{x_{opt}} \int_0^x J(x) dx \cdot Z dx + \int_{x_{opt}}^l \left( \int_0^x J(x) dx - I_{DG} \right) \cdot Z dx \right) \\
 &= \sqrt{3} \cdot \left( \int_0^{\frac{l}{2}} \int_0^x J_0 dx \cdot Z dx + \int_{\frac{l}{2}}^l \left( \int_0^x J_0 dx - J_0 \cdot l \right) \cdot Z dx \right) \\
 &= \sqrt{3} \cdot \left( \int_0^{\frac{l}{2}} J_0 \cdot x \cdot Z dx + \int_{\frac{l}{2}}^l (J_0 \cdot x - J_0 \cdot l) \cdot Z dx \right) \quad (4.23) \\
 &= \sqrt{3} \cdot J_0 \cdot Z \cdot \left( \int_0^{\frac{l}{2}} x dx + \int_{\frac{l}{2}}^l x dx - \int_{\frac{l}{2}}^l l dx = \sqrt{3} \cdot J_0 \cdot Z \left( \int_0^{\frac{l}{2}} x dx - \int_{\frac{l}{2}}^l l dx \right) \right) \\
 &= \sqrt{3} \cdot J_0 \cdot Z \cdot \left( \frac{l^2}{2} - l \cdot \left( l - \frac{l}{2} \right) \right) = \sqrt{3} \cdot J_0 \cdot Z \cdot \left( \frac{l^2}{2} - \frac{l^2}{2} \right) = 0V
 \end{aligned}$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση, το ρεύμα που εγγεί η μονάδα διεσπαρμένης, όταν τοποθετηθεί βέλτιστα και όταν τροφοδοτεί όλο το φορτίο, προκαλεί εξάλειψη της συνολικής πτώσης τάσης της ακτινικής γραμμής. Δηλαδή το ποσοστό βελτίωσης της τάσης είναι 100%. Συμπερασματικά, παρατηρείται ότι η προσθήκη μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, ειδικά αν γίνει στο βέλτιστο σημείο, ενισχύει σημαντικά τη γραμμή, βελτιώνοντας τις τάσεις και ελαχιστοποιώντας τις απώλειες ενεργού ισχύος.

#### 4.4.2 Κεντρική κατανομή φορτίου

Θεωρείται, τώρα, τριφασική ακτινική γραμμή μήκους  $l$  που τροφοδοτεί φορτίο που είναι κεντρικά διανεμημένο κατά μήκος της, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Θα προσδιοριστούν θεωρητικά η βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που τροφοδοτεί όλο το φορτίο της ακτινικής γραμμής, καθώς και οι απώλειες ενεργού ισχύος πριν και μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Σημειώνεται ότι η ανά μονάδα μήκους αντίσταση της γραμμής είναι  $R$ .



Σχήμα 4.5: Ακτινική γραμμή με κεντρικά διανεμημένο φορτίο.

Η πυκνότητα φορτίου της γραμμής δίνεται από τη σχέση :

$$J(x) = \begin{cases} \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot x & , \text{αν } 0 \leq x \leq \frac{l}{2} \\ \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot (l-x) & , \text{αν } \frac{l}{2} \leq x \leq l \end{cases} \quad (4.24)$$

όπου  $J_0$  η μέγιστη τιμή της πυκνότητας φορτίου σε  $A/m$  .

Οι απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής, σύμφωνα με την (4.4) , είναι :

$$\begin{aligned} P_{απ} &= 3 \cdot \int_0^l \left( \int_0^x J(x) dx \right)^2 \cdot R dx \\ &= 3 \cdot \int_0^{\frac{l}{2}} \left( \int_0^x \left( \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot x \right) dx \right)^2 \cdot R dx + 3 \cdot \int_{\frac{l}{2}}^l \left( \int_0^{\frac{l}{2}} \left( \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot x \right) dx + \int_{\frac{l}{2}}^x \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot (l-x) dx \right)^2 \cdot R dx \\ &= 3 \cdot \int_0^{\frac{l}{2}} \left( \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot \frac{x^2}{2} \right)^2 \cdot R dx + 3 \cdot \int_{\frac{l}{2}}^l \left( \frac{2}{l} \cdot J_0 \left[ \frac{x^2}{2} \right]_0^{\frac{l}{2}} + \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot l \cdot [x]_{\frac{l}{2}}^x - \frac{2}{l} \cdot J_0 \left[ \frac{x^2}{2} \right]_{\frac{l}{2}}^x \right)^2 \cdot R dx \\ &= 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \int_0^{\frac{l}{2}} x^4 dx + 3 \cdot 4 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \int_{\frac{l}{2}}^l \left( \frac{l^2}{8} + l \cdot \left( x - \frac{l}{2} \right) - \frac{x^2}{2} + \frac{l^2}{8} \right)^2 dx \\ &= 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \left[ \frac{x^5}{5} \right]_0^{\frac{l}{2}} + 12 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \int_{\frac{l}{2}}^l \left( l \cdot x - \frac{l^2}{2} - \frac{x^2}{2} \right)^2 dx \\ &= 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{l}{2} \right)^5 + 12 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \int_{\frac{l}{2}}^l \left( l^2 \cdot x^2 - l \cdot x \cdot l^2 + \frac{l^4}{4} - l \cdot x^3 + \frac{l^2 \cdot x^2}{4} + \frac{x^4}{4} \right) dx \\ &= \frac{3}{160} \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot l^5 + 12 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \int_{\frac{l}{2}}^l \left( \frac{5}{4} \cdot l^2 \cdot x^2 + \frac{l^4}{4} + \frac{x^4}{4} - l^3 \cdot x - l \cdot x^3 \right) dx \\ &= \frac{3}{160} \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 + 12 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \left( \frac{5}{4} \cdot l^2 \cdot \left[ \frac{x^3}{3} \right]_{\frac{l}{2}}^l + \frac{l^4}{4} \cdot [x]_{\frac{l}{2}}^l + \left[ \frac{x^5}{20} \right]_{\frac{l}{2}}^l - l^3 \cdot \left[ \frac{x^2}{2} \right]_{\frac{l}{2}}^l - l \cdot \left[ \frac{x^4}{4} \right]_{\frac{l}{2}}^l \right) \\ &= \frac{3}{160} \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 + 12 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \left( \frac{35}{96} l^5 + \frac{1}{8} \cdot l^5 + \frac{11}{640} \cdot l^5 - \frac{1}{4} \cdot l^5 - \frac{15}{64} \cdot l^5 \right) \\ &= 0.01875 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 + 0.26875 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 \\ &\Rightarrow P_{απ} = 0.2875 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 \end{aligned} \quad (4.25)$$

Κατόπιν, εισάγεται μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, η οποία υποτίθεται ότι τροφοδοτεί όλο το φορτίο της γραμμής, οπότε η εξωτερική πηγή αναλαμβάνει την τροφοδότηση μόνο των απωλειών ισχύος του συστήματος. Άρα, το ρεύμα που εγχέει η μονάδα στη γραμμή είναι :

$$\begin{aligned}
 I_{DG} &= \int_0^l J(x) dx = \int_0^{\frac{l}{2}} \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot x dx + \int_{\frac{l}{2}}^l \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot (l-x) dx \\
 &= \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot \left[ \frac{x^2}{2} \right]_0^{\frac{l}{2}} + \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot \left( l \cdot [x]_{\frac{l}{2}}^l - \left[ \frac{x^2}{2} \right]_{\frac{l}{2}}^l \right) = \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot \left( \frac{l^2}{8} + l^2 - \frac{l^2}{2} - \frac{l^2}{2} + \frac{l^2}{8} \right) \quad (4.26) \\
 &= \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot \frac{l^2}{4} = \frac{J_0 \cdot l}{2}
 \end{aligned}$$

Η νέα συνάρτηση απωλειών ενεργού ισχύος της γραμμής διαμορφώνεται, σύμφωνα με την (4.9), ως εξής :

$$\begin{aligned}
 P_{\alpha\pi\_new}(x_0) &= 3 \cdot \left( \int_0^{x_0} \left( \int_0^x J(x) dx \right) \right)^2 \cdot R dx + \int_{x_0}^l \left( \int_0^x J(x) dx - I_{DG} \right)^2 \cdot R dx \\
 &= 3 \cdot \int_0^{x_0} \left( \int_0^x \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot x dx \right)^2 \cdot R dx + 3 \cdot \int_{x_0}^{\frac{l}{2}} \left( \int_0^x \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot x dx - I_{DG} \right)^2 \cdot R dx \\
 &\quad + \int_{\frac{l}{2}}^l \left( \int_0^{\frac{l}{2}} \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot x dx + \int_{\frac{l}{2}}^x \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot (l-x) dx - I_{DG} \right)^2 \cdot R dx \\
 &= 3 \cdot R \cdot \int_0^{x_0} \left( \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot \frac{x^2}{2} \right)^2 dx + 3 \cdot R \cdot \int_{x_0}^{\frac{l}{2}} \left( \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot \frac{x^2}{2} - I_{DG} \right)^2 dx \\
 &\quad + 3 \cdot R \cdot \int_{\frac{l}{2}}^l \left( \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot \left[ \frac{x^2}{2} \right]_0^{\frac{l}{2}} + \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot l \cdot [x]_{\frac{l}{2}}^x - \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot \left[ \frac{x^2}{2} \right]_{\frac{l}{2}}^x - I_{DG} \right)^2 dx \\
 &= 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \int_0^{x_0} x^4 dx + 3 \cdot R \cdot \int_{x_0}^{\frac{l}{2}} \left( \frac{J_0^2}{l^2} \cdot x^4 - 2 \cdot \frac{J_0}{l} \cdot x^2 \cdot I_{DG} + I_{DG}^2 \right) dx \\
 &\quad + \frac{3 \cdot R}{l^2} \cdot \int_{\frac{l}{2}}^l \left( J_0 \cdot \frac{l^2}{4} + 2 \cdot J_0 \cdot l \cdot x - J_0 \cdot l^2 - J_0 \cdot x^2 + J_0 \cdot \frac{l^2}{4} - J_0 \cdot \frac{l^2}{2} \right)^2 dx \\
 &= 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \left[ \frac{x^5}{5} \right]_0^{x_0} + \frac{3 \cdot R}{l^2} \cdot \left( J_0^2 \cdot \left[ \frac{x^5}{5} \right]_{x_0}^{\frac{l}{2}} - 2 \cdot J_0 \cdot J_0 \cdot \frac{l^2}{2} \cdot \left[ \frac{x^3}{3} \right]_{x_0}^{\frac{l}{2}} + J_0^2 \cdot \frac{l^4}{4} \cdot [x]_{x_0}^{\frac{l}{2}} \right) \\
 &\quad + 3 \cdot R \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot \int_{\frac{l}{2}}^l (l^2 - 2 \cdot l \cdot x + x^2)^2 dx
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \frac{x_0^5}{5} + 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \left( \frac{l^5}{160} - \frac{x_0^5}{5} - \frac{l^5}{24} + l^2 \cdot \frac{x_0^3}{3} + \frac{l^5}{8} - \frac{l^4}{4} \cdot x_0 \right) + 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \int_{\frac{l}{2}}^l (x-l)^4 dx \\
 &= 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \left( \frac{x_0^5}{5} - \frac{x_0^5}{5} + l^2 \cdot \frac{x_0^3}{3} - \frac{l^4}{4} \cdot x_0 + 0.0895 \cdot l^5 + \left[ \frac{x-l}{5} \right]_{\frac{l}{2}}^l \right) \\
 &= 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \left( \frac{l^2}{3} \cdot x_0^3 - \frac{l^4}{4} \cdot x_0 + 0.0895 \cdot l^5 + \frac{1}{160} \cdot l^5 \right) \\
 &\Rightarrow P_{\alpha\pi\_new}(x_0) = \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \left( l^2 \cdot x_0^3 - \frac{3}{4} \cdot l^4 \cdot x_0 + 0.28725 \cdot l^5 \right) \quad (4.27)
 \end{aligned}$$

Η βέλτιστη θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής προκύπτει, σύμφωνα με τη (4.12), από την εξίσωση :

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_{\alpha\pi\_new}(x_0)}{dx_0} = 0 &\Rightarrow R \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot \left( 3 \cdot l^2 \cdot x_0^2 - \frac{3}{4} \cdot l^4 \right) = 0 \\
 \Rightarrow 3 \cdot l^2 \cdot x_0^2 - \frac{3}{4} \cdot l^4 &= 0 \Rightarrow x_0^2 = \frac{l^4}{4 \cdot l^2} \Rightarrow x_0 = \pm \sqrt{\frac{l^2}{4}} = \pm \frac{l}{2} \quad (4.28)
 \end{aligned}$$

Η αρνητική λύση απορρίπτεται, γιατί βρίσκεται εκτός του πεδίου ορισμού.

Η δεύτερη παράγωγος της νέας συνάρτησης απωλειών ενεργού ισχύος είναι :

$$\frac{d^2 P_{\alpha\pi\_new}(x_0)}{dx_0^2} \Big|_{l/2} = 3 \cdot R \cdot J_0^2 \cdot l > 0 \quad (4.29)$$

οπότε η λύση που προκύπτει είναι έγκυρη. Άρα στην εξεταζόμενη ακτινική γραμμή το μέσο της γραμμής  $x_{opt} = \frac{l}{2}$  είναι η ιδανική θέση για να τοποθετηθεί η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής.

Οι απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής, μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στη θέση  $x_{opt} = \frac{l}{2}$ , είναι :

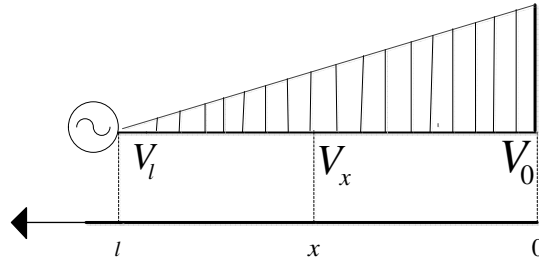
$$P_{\alpha\pi\_new}\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \left( \frac{1}{8} \cdot l^5 - \frac{3}{8} \cdot l^5 + 0.28725 \cdot l^5 \right) = 0.0375 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 \quad (4.30)$$

Το ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος, σύμφωνα με την (4.13), είναι :

$$reduction = \frac{P_{\alpha\pi\_old} - P_{\alpha\pi\_new}(x_{opt})}{P_{\alpha\pi\_old}} = \left( \frac{J_0^2 \cdot R \cdot l^3 \cdot (0.2875 - 0.0375)}{0.2875 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3} \right) \cdot 100\% \approx 86.96\% \quad (4.31)$$

### 4.4.3 Πρώτη τριγωνική κατανομή φορτίου

Θεωρείται, τώρα, τριφασική ακτινική γραμμή μήκους  $l$  που τροφοδοτεί φορτίο που είναι τριγωνικά διανεμημένο κατά μήκος της, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Θα προσδιοριστούν θεωρητικά η βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που τροφοδοτεί όλο το φορτίο της ακτινικής γραμμής, καθώς και οι απώλειες ενεργού ισχύος πριν και μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Σημειώνεται ότι η ανά μονάδα μήκους αντίσταση της γραμμής είναι  $R$ .



Σχήμα 4.6: Ακτινική γραμμή με τριγωνικά διανεμημένο φορτίο.

Η πυκνότητα φορτίου της γραμμής δίνεται από τη σχέση :

$$J(x) = \frac{J_0}{l} \cdot (l - x) \quad , \text{αν } 0 \leq x \leq l \quad (4.32)$$

όπου  $J_0$  η μέγιστη τιμή της πυκνότητας φορτίου σε  $A/m$ .

Οι απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής, σύμφωνα με την (4.4), είναι :

$$\begin{aligned} P_{\alpha\pi} &= 3 \cdot \int_0^l \left( \int_0^x J(x) dx \right)^2 \cdot R dx = 3 \cdot \int_0^l \left( \int_0^x \frac{J_0}{l} \cdot (l - x) dx \right)^2 \cdot R dx \\ &= 3 \cdot \int_0^l \left( \int_0^x \frac{J_0}{l} \cdot l \cdot dx - \int_0^x \frac{J_0}{l} \cdot x \cdot dx \right)^2 \cdot R dx \\ &= 3 \cdot \int_0^l \left( \frac{J_0}{l} \cdot l \cdot x - \frac{J_0}{l} \cdot \frac{x^2}{2} \right)^2 \cdot R dx = 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot \int_0^l \left( l^2 \cdot x^2 - 2 \cdot l \cdot x \cdot \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{4} \right) \cdot R dx \\ &= 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot \left( l^2 \cdot \left[ \frac{x^3}{3} \right]_0^l - l \cdot \left[ \frac{x^4}{4} \right]_0^l + \frac{1}{4} \cdot \left[ \frac{x^5}{5} \right]_0^l \right) \cdot R = 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot l^5 - \frac{1}{4} \cdot l^5 + \frac{1}{20} \cdot l^5 \right) \cdot R \\ &= 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot 0.1333 \cdot l^5 \\ &\Rightarrow P_{\alpha\pi} = 0.4 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 \quad (4.33) \end{aligned}$$

Κατόπιν, εισάγεται μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, η οποία υποτίθεται ότι τροφοδοτεί όλο το φορτίο της γραμμής. Το ρεύμα που εγγχεί η μονάδα στη γραμμή είναι :



$$\begin{aligned}
 I_{DG} &= \int_0^l J(x) dx = \int_0^l \frac{J_0}{l} \cdot (l-x) dx = \frac{J_0}{l} \cdot \left( l \cdot [x]_0^l - \left[ \frac{x^2}{2} \right]_0^l \right) = \frac{J_0}{l} \cdot \left( l^2 - \frac{l^2}{2} \right) \\
 &\Rightarrow I_{DG} = \frac{J_0 \cdot l}{2}
 \end{aligned} \tag{4.34}$$

Η νέα συνάρτηση απωλειών ενεργού ισχύος της γραμμής διαμορφώνεται, σύμφωνα με την (4.9), ως εξής :

$$\begin{aligned}
 P_{\alpha\pi\_new}(x_0) &= 3 \cdot \left( \int_0^{x_0} \left( \int_0^x J(x) dx \right)^2 \cdot R dx + \int_{x_0}^l \left( \int_0^x J(x) dx - I_{DG} \right)^2 \cdot R dx \right) \\
 &= 3 \cdot \left( \int_0^{x_0} \left| \int_0^x J(x) dx \right|^2 \cdot R dx + \int_{x_0}^l \left| \int_0^x J(x) dx - I_{DG} \right|^2 \cdot R dx \right) \\
 &= 3 \cdot R \cdot \left( \int_0^{x_0} \left| \int_0^x J(x) dx \right|^2 dx + \int_{x_0}^l \left( \left( \int_0^x J(x) dx \right)^2 - 2 \cdot \int_0^x J(x) dx \cdot I_{DG} + I_{DG}^2 \right) dx \right) \\
 &= 3 \cdot R \cdot \left( \int_0^l \left| \int_0^x J(x) dx \right|^2 dx - 2 \cdot I_{DG} \cdot \int_{x_0}^l \left( \int_0^x J(x) dx \right) dx + I_{DG}^2 \cdot (l - x_0) \right) \\
 &= P_{\alpha\pi} + 3 \cdot R \cdot \left( -2 \cdot I_{DG} \cdot \int_{x_0}^l \left( \frac{J_0}{l} \cdot l \cdot x - \frac{J_0}{l} \cdot \frac{x^2}{2} \right) dx + I_{DG}^2 \cdot (l - x_0) \right) \\
 &= P_{\alpha\pi} + 3 \cdot R \cdot \left( -2 \cdot \frac{J_0 \cdot l}{2} \cdot \left( \frac{J_0}{2} \cdot (l^2 - x_0^2) - \frac{J_0}{6 \cdot l} \cdot (l^3 - x_0^3) \right) + \frac{J_0^2 \cdot l^2}{4} \cdot (l - x_0) \right) \\
 &= 0.4 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 + 3 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot \left( -\frac{l}{2} \cdot (l^2 - x_0^2) + \frac{1}{6} \cdot (l^3 - x_0^3) + \frac{l^2}{4} (l - x_0) \right) \\
 &\Rightarrow P_{\alpha\pi\_new}(x_0) = J_0^2 \cdot R \cdot \left( 0.4 \cdot l^3 - \frac{1}{2} \cdot (x_0^3 - l^3) + \frac{3}{2} \cdot l \cdot (x_0^2 - l^2) - \frac{3}{4} \cdot l^2 \cdot (x_0 - l) \right) \tag{4.35}
 \end{aligned}$$

Η βέλτιστη θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής προκύπτει, σύμφωνα με τη (4.12), από την εξίσωση :

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_{\alpha\pi\_new}(x_0)}{dx_0} &= 0 \Rightarrow R \cdot J_0^2 \cdot \left( -\frac{3}{2} \cdot x_0^2 + 3 \cdot l \cdot x_0 - \frac{3}{4} \cdot l^2 \right) = 0 \\
 &\Rightarrow \frac{1}{2} \cdot x_0^2 - l \cdot x_0 + \frac{1}{4} \cdot l^2 = 0 \Rightarrow x_0^2 - 2 \cdot l \cdot x_0 + \frac{1}{2} \cdot l^2 = 0 \\
 &\Rightarrow x_0 = \frac{+2 \cdot l \pm \sqrt{4 \cdot l^2 - 2 \cdot l^2}}{2} = \frac{+2l \pm \sqrt{2} \cdot l}{2} = l \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot l
 \end{aligned} \tag{4.36}$$

Η αρνητική λύση απορρίπτεται, γιατί βρίσκεται εκτός του πεδίου ορισμού, οπότε :

$$x_{opt} = l - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot l \approx l - 0.7071 \cdot l = 0.2929 \cdot l \tag{4.37}$$

Η δεύτερη παράγωγος της νέας συνάρτησης απωλειών ενεργού ισχύος είναι :

$$\left. \frac{d^2 P_{\alpha\pi\_new}(x_0)}{dx_0^2} \right|_{0.2929 \cdot l} = 0.8787 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l > 0 \quad (4.38)$$

οπότε η λύση που προκύπτει είναι έγκυρη. Άρα η βέλτιστη θέση εγκατάστασης της εξεταζόμενης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινική γραμμή διανομής με τη συγκεκριμένη τριγωνική κατανομή φορτίου είναι σε απόσταση  $0.2929 \cdot l$  από το πέρας της γραμμής, η αλλιώς σε απόσταση  $0.7071 \cdot l$  από την αρχή της γραμμής.

Οι απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής, μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στη θέση  $x_{opt} = 0.2929 \cdot l$ , είναι :

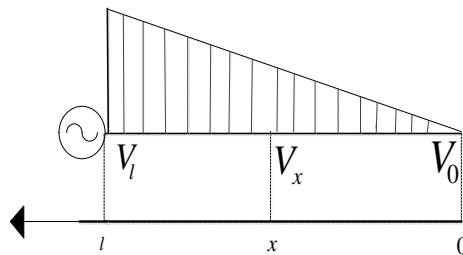
$$\begin{aligned} P_{\alpha\pi\_new}(0.2929 \cdot l) &= \\ J_0^2 \cdot R \cdot \left( 0.4 \cdot l^5 + \frac{1}{2} \cdot \left( (0.2929 \cdot l)^3 - l^3 \right) - \frac{3}{2} \cdot l \cdot \left( (0.2929 \cdot l)^2 - l^2 \right) + \frac{3}{4} \cdot l^2 \cdot (0.2929 \cdot l - l) \right) \\ \Rightarrow P_{\alpha\pi\_new}(0.2929 \cdot l) &= 0.0464 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 \end{aligned} \quad (4.39)$$

Το ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος, σύμφωνα με την (4.13), είναι :

$$reduction = \frac{P_{\alpha\pi\_old} - P_{\alpha\pi\_new}(x_{opt})}{P_{\alpha\pi\_old}} = \left( \frac{J_0^2 \cdot R \cdot l^3 \cdot (0.4 - 0.0464)}{0.4 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3} \right) \cdot 100\% \approx 88.39\% \quad (4.40)$$

#### 4.4.4 Δεύτερη τριγωνική κατανομή φορτίου

Θεωρείται, τώρα, τριφασική ακτινική γραμμή μήκους  $l$  που τροφοδοτεί φορτίο που είναι τριγωνικά διανεμημένο κατά μήκος της, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Θα προσδιοριστούν θεωρητικά η βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που τροφοδοτεί όλο το φορτίο της ακτινικής γραμμής, καθώς και οι απώλειες ενεργού ισχύος πριν και μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Σημειώνεται ότι η ανά μονάδα μήκους αντίσταση της γραμμής είναι  $R$ .



**Σχήμα 4.7:** Ακτινική γραμμή με τριγωνικά διανεμημένο φορτίο.

Η πυκνότητα φορτίου της γραμμής δίνεται από τη σχέση :

$$J(x) = \frac{J_0}{l} \cdot x \quad , \text{αν } 0 \leq x \leq l \quad (4.41)$$

όπου  $J_0$  η μέγιστη τιμή της πυκνότητας φορτίου σε  $A/m$ .

Οι απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής, σύμφωνα με την (4.4) , είναι :

$$\begin{aligned} P_{\alpha\pi} &= 3 \cdot \int_0^l \left( \int_0^x J(x) dx \right)^2 \cdot R dx = 3 \cdot \int_0^l \left( \int_0^x \left( \frac{J_0}{l} \cdot x \right) dx \right)^2 \cdot R dx = 3 \cdot \int_0^l \left( \frac{J_0}{l} \cdot \frac{x^2}{2} \right)^2 \cdot R dx \\ &= 3 \cdot \int_0^l \frac{J_0^2}{l^2} \cdot \frac{x^4}{4} R dx = 3 \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot \frac{1}{4} \int_0^l x^4 \cdot R dx = \frac{3}{4} \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \left( \left[ \frac{x^5}{5} \right]_0^l \right) \\ &= \frac{3}{4} \cdot \frac{J_0^2}{l^2} \cdot R \cdot \frac{1}{5} \cdot l^5 = \frac{3}{20} \cdot J_0 \cdot R \cdot l^3 \\ &\Rightarrow P_{\alpha\pi} = 0.15 \cdot J_0 \cdot R \cdot l^3 \end{aligned} \quad (4.42)$$

Κατόπιν, εισάγεται μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, η οποία υποτίθεται ότι τροφοδοτεί όλο το φορτίο της γραμμής. Το ρεύμα που εγχέει η μονάδα στη γραμμή είναι :

$$I_{DG} = \int_0^l J(x) dx = \int_0^l \frac{J_0}{l} \cdot x dx = \frac{J_0}{l} \cdot \left[ \frac{x^2}{2} \right]_0^l = \frac{J_0 \cdot l}{2} \quad (4.43)$$

Η νέα συνάρτηση απωλειών ενεργού ισχύος της γραμμής διαμορφώνεται, σύμφωνα με την (4.9), ως εξής :

$$\begin{aligned} P_{\alpha\pi\_new}(x_0) &= 3 \cdot \left( \int_0^{x_0} \left( \int_0^x J(x) dx \right)^2 \cdot R dx + \int_{x_0}^l \left( \int_0^x J(x) dx - I_{DG} \right)^2 \cdot R dx \right) \\ &= 3 \cdot \left( \int_0^{x_0} \left| \int_0^x J(x) dx \right|^2 \cdot R dx + \int_{x_0}^l \left| \int_0^x J(x) dx - I_{DG} \right|^2 \cdot R dx \right) \\ &= 3 \cdot R \cdot \left( \int_0^{x_0} \left| \int_0^x J(x) dx \right|^2 dx + \int_{x_0}^l \left( \left( \int_0^x J(x) dx \right)^2 - 2 \cdot \int_0^x J(x) dx \cdot I_{DG} + I_{DG}^2 \right) dx \right) \\ &= 3 \cdot R \cdot \left( \int_0^l |J(x) dx|^2 dx - 2 \cdot I_{DG} \cdot \int_{x_0}^l \left( \int_0^x \frac{J_0}{l} \cdot x dx \right) dx + I_{DG}^2 \cdot (l - x_0) \right) \\ &= P_{\alpha\pi} + 3 \cdot R \cdot \left( -2 \cdot I_{DG} \cdot \int_{x_0}^l \left( \frac{J_0}{l} \cdot \frac{x^2}{2} \right) dx + I_{DG}^2 \cdot (l - x_0) \right) \\ &= P_{\alpha\pi} + 3 \cdot R \cdot \left( -2 \cdot \frac{J_0 \cdot l}{2} \cdot \left( \frac{J_0}{2 \cdot l} \cdot \left( \frac{l^3}{3} - \frac{x_0^3}{3} \right) \right) + \frac{J_0^2 \cdot l^2}{4} \cdot (l - x_0) \right) \\ &= 0.15 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 + 3 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot \left( -\frac{1}{6} \cdot (l^3 - x_0^3) + \frac{l^2}{4} \cdot (l - x_0) \right) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow P_{\alpha\pi\_new}(x_0) = J_0^2 \cdot R \cdot \left( 0.15 \cdot l^3 - \frac{1}{2} \cdot (l^3 - x_0^3) + \frac{3}{4} \cdot l^2 \cdot (l - x_0) \right) \quad (4.44)$$

Η βέλτιστη θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής προκύπτει, σύμφωνα με τη (4.12), από την εξίσωση :

$$\begin{aligned} \frac{dP_{\alpha\pi\_new}(x_0)}{dx_0} = 0 &\Rightarrow R \cdot J_0^2 \cdot \left( +\frac{3}{2} \cdot x_0^2 - \frac{3}{4} \cdot l^2 \right) = 0 \\ \Rightarrow +\frac{1}{2} \cdot x_0^2 - \frac{1}{4} \cdot l^2 = 0 &\Rightarrow x_0^2 = \frac{2 \cdot l^2}{4} \Rightarrow x_0^2 = \frac{l^2}{2} \\ \Rightarrow x_0 = \pm \frac{l}{\sqrt{2}} = \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot l \end{aligned} \quad (4.45)$$

Η αρνητική λύση απορρίπτεται, γιατί βρίσκεται εκτός του πεδίου ορισμού, οπότε :

$$x_{opt} = +\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot l \approx 0.7071 \cdot l \quad (4.46)$$

Η δεύτερη παράγωγος της νέας συνάρτησης απωλειών ενεργού ισχύος είναι :

$$\frac{d^2 P_{\alpha\pi\_new}(x_0)}{dx_0^2} \Big|_{0.7071 \cdot l} = 2.1213 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l > 0 \quad (4.47)$$

οπότε η λύση που προκύπτει είναι έγκυρη. Άρα η βέλτιστη θέση εγκατάστασης της εξεταζόμενης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινική γραμμή διανομής με τη συγκεκριμένη τριγωνική κατανομή φορτίου είναι σε απόσταση  $0.7071 \cdot l$  από το πέρας της γραμμής, η αλλιώς σε απόσταση  $0.2929 \cdot l$  από την αρχή της γραμμής.

Οι απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής, μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στη θέση  $x_{opt} = 0.7071 \cdot l$ , είναι :

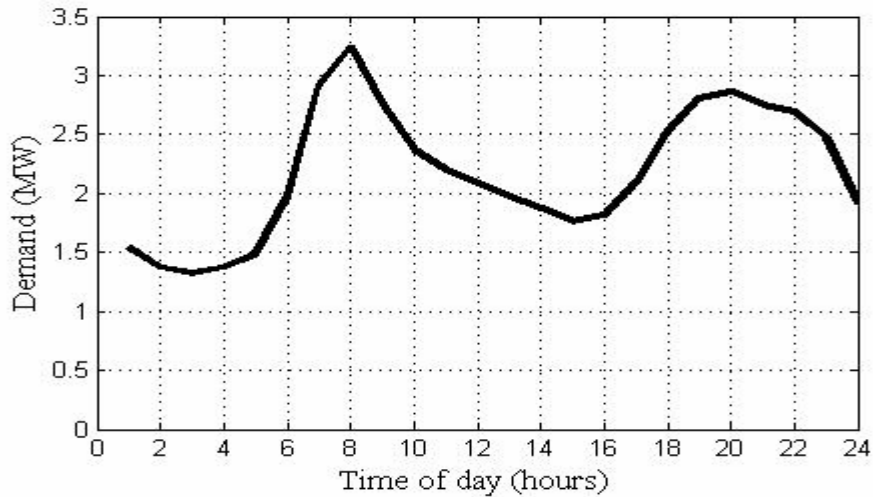
$$\begin{aligned} P_{\alpha\pi\_new}(0.7071 \cdot l) &= J_0^2 \cdot R \cdot \left( 0.15 \cdot l^3 - \frac{1}{2} \cdot (l^3 - (0.7071 \cdot l)^3) + \frac{3}{4} \cdot l^2 \cdot (0.2929 \cdot l - l) \right) \\ \Rightarrow P_{\alpha\pi\_new}(0.7071 \cdot l) &= 0.0464 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 \end{aligned} \quad (4.48)$$

Το ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος, σύμφωνα με την (4.13), είναι :

$$reduction = \frac{P_{\alpha\pi\_old} - P_{\alpha\pi\_new}(x_{opt})}{P_{\alpha\pi\_old}} = \left( \frac{J_0^2 \cdot R \cdot l^3 \cdot (0.15 - 0.0464)}{0.15 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3} \right) \cdot 100\% \approx 69.04\% \quad (4.49)$$

#### 4.5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΧΡΟΝΟΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί και θα χρησιμοποιηθεί μια τροποποιημένη εκδοχή του αλγορίθμου σε ακτινική γραμμή διανομής με χρονομεταβλητό φορτίο και μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής. Το στοιχείο που διαφοροποιεί την ανάλυση σε αυτή την περίπτωση είναι ότι το μέγεθος που περιγράφει τα φορτία και τη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής είναι η ενεργός ισχύς και όχι η πυκνότητα φορτίου. Θεωρείται, λοιπόν, τριφασική ακτινική γραμμή μήκους  $l = 200m$  που τροφοδοτεί ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο. Το επίπεδο τάσης της γραμμής είναι τα  $0.4kV$ , η σύνθετη αντίσταση κατά μήκος της είναι  $Z = (0.4 + j0.3)\Omega/km$ . Η ημερήσια χρονολογική καμπύλη του συνολικού ομοιόμορφα διανεμημένου φορτίου της γραμμής, η οποία είναι αμετάβλητη κατά τη διάρκεια του έτους, φαίνεται στο Σχήμα 4.8 [4.4].



**Σχήμα 4.8:** Ημερήσια χρονολογική καμπύλη συνολικού φορτίου γραμμής.

Διακριτοποιείται η χρονική περίοδος μελέτης  $T = 24$  ώρες σε 24 διαστήματα  $T_i$ , όπου  $T_i = 1$  ώρα. Η ζήτηση φορτίου σε κάθε χρονικό διάστημα  $T_i$  φαίνεται στον Πίνακα 4.1 .

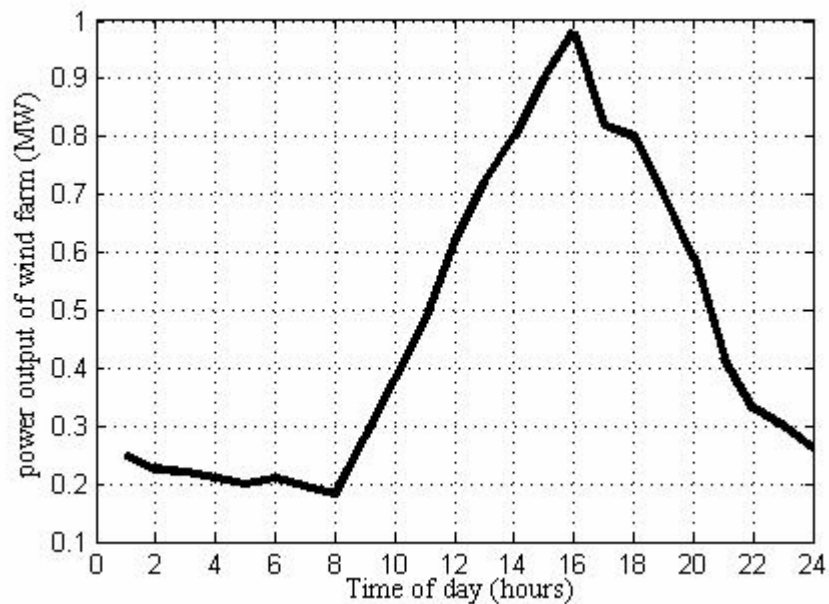
**Πίνακας 4.1:** Ζήτηση φορτίου ακτινικής γραμμής.

Ωρα	Φορτίο (MW)
1	1.54
2	1.375
3	1.32
4	1.375
5	1.485
6	1.98
7	2.915
8	3.245
9	2.75
10	2.365
11	2.2

**Πίνακας 4.1:** Ζήτηση φορτίου ακτινικής γραμμής (συνέχεια).

Ωρα	Φορτίο (MW)
12	2.09
13	1.98
14	1.87
15	1.76
16	1.815
17	2.09
18	2.53
19	2.805
20	2.86
21	2.75
22	2.695
23	2.475
24	1.925

Η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής που χρησιμοποιείται στο παράδειγμα είναι ένα αιολικό πάρκο ονομαστικής ισχύος  $1\text{ MW}$ . Η μέση ημερήσια ισχύς που παράγει το αιολικό πάρκο φαίνεται στο Σχήμα 4.9 [4.5].

**Σχήμα 4.9:** Ημερήσια παραγόμενη ισχύς αιολικού πάρκου.**Πίνακας 4.2:** Αιολική παραγωγή ανά ώρα ημέρας.

Ωρα	Ισχύς (MW)
1	0.25
2	0.225
3	0.22
4	0.21
5	0.2
6	0.21

**Πίνακας 4.2:** Αιολική παραγωγή ανά ώρα ημέρας (συνέχεια).

Ωρα	Ισχύς (MW)
7	0.195
8	0.18
9	0.28
10	0.38
11	0.48
12	0.62
13	0.72
14	0.8
15	0.9
16	0.98
17	0.82
18	0.8
19	0.7
20	0.59
21	0.42
22	0.33
23	0.3
24	0.26

Για να επιλυθεί το πρόβλημα, θα πρέπει να ενσωματωθούν στις εξισώσεις η ισχύς φορτίου και η παραγόμενη ισχύς του αιολικού πάρκου, οι τιμές των οποίων παρουσιάστηκαν στους Πίνακες 4.1 και 4.2. Σύμφωνα με τη σχέση (4.9), αν θεωρηθεί ότι η πυκνότητα του ομοιόμορφα διανεμημένου φορτίου είναι της μορφής  $J(x, T_i) = J_0(T_i)$ , όπου  $J_0(T_i)$  σταθερή ποσότητα, οι απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής το χρονικό διάστημα  $T_i$ , μετά την τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, είναι:

$$\begin{aligned}
 P_{απ\_new}(x_0, T_i) &= 3 \cdot \left( \int_0^{x_0} \left( \int_0^x J(x, T_i) dx \right)^2 \cdot R dx + \int_{x_0}^l \left( \int_0^x J(x, T_i) dx - I_{DG}(T_i) \right)^2 \cdot R dx \right) \\
 &= 3 \cdot \left( \int_0^{x_0} \left( \int_0^x J_0(T_i) dx \right)^2 \cdot R dx + \int_{x_0}^l \left( \int_0^x J_0(T_i) dx - I_{DG}(T_i) \right)^2 \cdot R dx \right) \\
 &= 3 \cdot R \cdot \left( \int_0^{x_0} J_0^2(T_i) \cdot x^2 dx + \int_{x_0}^l \left( \int_0^x J_0(T_i) dx \right)^2 - 2 \int_0^x J_0(T_i) dx \cdot I_{DG}(T_i) + I_{DG}^2(T_i) \right) \\
 &= 3 \cdot R \cdot \left( \int_0^{x_0} J_0^2(T_i) \cdot x^2 dx + \int_{x_0}^l J_0^2(T_i) \cdot x^2 dx - \int_{x_0}^l 2 \cdot J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot x + \int_{x_0}^l I_{DG}^2(T_i) dx \right) \\
 &= 3 \cdot R \cdot \left( \int_0^l J_0^2(T_i) \cdot x^2 dx - 2 \cdot J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot \frac{l^2 - x_0^2}{2} + I_{DG}^2(T_i) \cdot (l - x_0) \right) \\
 &= 3 \cdot R \cdot \left( J_0^2(T_i) \cdot \frac{l^3}{3} + J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot (x_0^2 - l^2) - I_{DG}^2(T_i) \cdot (x_0 - l) \right) \tag{4.50}
 \end{aligned}$$

Οι μέσες απώλειες ενεργού ισχύος, σύμφωνα με την (4.11), είναι :

$$\begin{aligned}
 \overline{P_{\alpha\pi\_new}(x_0)} &= \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^N P_{\alpha\pi\_new}(x_0, T_i) \cdot T_i \\
 &= \frac{3 \cdot R}{T} \cdot \sum_{i=1}^N \left( J_0^2(T_i) \cdot \frac{l^3}{3} + J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot (x_0^2 - l^2) - I_{DG}^2(T_i) \cdot (x_0 - l) \right) \cdot T_i \\
 &= \frac{3 \cdot R}{T} \cdot \sum_{i=1}^N \left( J_0^2(T_i) \cdot \frac{l^3}{3} + J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot x_0^2 - J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot l^2 - \right. \\
 &\quad \left. - I_{DG}^2(T_i) \cdot x_0 + I_{DG}^2(T_i) \cdot l \right) \cdot T_i \tag{4.51} \\
 &= \frac{3 \cdot R}{T} \cdot \sum_{i=1}^N \left( J_0^2(T_i) \cdot \frac{l^3}{3} - J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot l^2 + I_{DG}^2(T_i) \cdot l \right) \cdot T_i \\
 &\quad + \frac{3 \cdot R \cdot x_0^2}{T} \cdot \sum_{i=1}^N J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot T_i - \frac{3 \cdot R \cdot x_0}{T} \cdot \sum_{i=1}^N I_{DG}^2(T_i) \cdot T_i \\
 &= A + \frac{3 \cdot R \cdot x_0^2}{T} \cdot \sum_{i=1}^N J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot T_i - \frac{3 \cdot R \cdot x_0}{T} \cdot \sum_{i=1}^N I_{DG}^2(T_i) \cdot T_i
 \end{aligned}$$

όπου το A τέθηκε ίσο με το κομμάτι της συνάρτησης (4.25) που είναι ανεξάρτητο της μεταβλητής  $x_0$ .

$$A = \frac{3 \cdot R}{T} \cdot \sum_{i=1}^N \left( J_0^2(T_i) \cdot \frac{l^3}{3} - J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot l^2 + I_{DG}^2(T_i) \cdot l \right) \cdot T_i \tag{4.52}$$

Η βέλτιστη θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής προκύπτει, σύμφωνα με τη (4.12), από την εξίσωση :

$$\begin{aligned}
 \frac{d\overline{P_{\alpha\pi\_new}(x_0)}}{dx_0} &= 0 \Rightarrow \\
 \frac{6 \cdot R \cdot x_0}{T} \cdot \sum_{i=1}^N J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot T_i - \frac{3 \cdot R}{T} \cdot \sum_{i=1}^N I_{DG}^2(T_i) \cdot T_i &= 0 \Rightarrow \\
 x_0 &= \frac{\sum_{i=1}^N I_{DG}^2(T_i) \cdot T_i}{2 \cdot \sum_{i=1}^N J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot T_i} \tag{4.53}
 \end{aligned}$$



Από τη σχέση (4.1) το ρεύμα στην αρχή της γραμμής, πριν τη προσθήκη της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, είναι :

$$I(x, T_i) = \int_0^x J(x, T_i) dx \Rightarrow I(l, T_i) = \int_0^l J_0(T_i) dx \Rightarrow$$

$$I(l, T_i) = J_0(T_i) \cdot l \quad (4.54)$$

Οπότε η (4.27) παίρνει τη μορφή :

$$x_{opt} = \frac{\sum_{i=1}^N I_{DG}^2(T_i) \cdot T_i}{2 \cdot \sum_{i=1}^N J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot T_i} \Rightarrow x_{opt} = \frac{l \cdot \sum_{i=1}^N I_{DG}^2(T_i) \cdot T_i}{2 \cdot \sum_{i=1}^N I(l, T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot T_i} \quad (4.55)$$

Υποθέτοντας ότι οι τάσεις στην ακτινική γραμμή είναι εντός του προβλεπόμενου ορίου  $\pm 5\%$ , και άρα κοντά στην ονομαστική τιμή τους, είναι δυνατόν να θεωρηθεί προσεγγιστικά ότι οι τάσεις στην αρχή της γραμμής και στο σημείο σύνδεσης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής είναι περίπου ίσες κάθε χρονική στιγμή, δηλαδή  $V_{DG}(T_i) \approx V_l(T_i)$ . Δεδομένου ότι  $N = 24$ ,  $T_i = 1$ , και ότι η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής έχει μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και ο συντελεστής ισχύος του φορτίου είναι και αυτός κοντά στη μονάδα, η τελική σχέση υπολογισμού της βέλτιστης θέσης είναι :

$$x_{opt} = \frac{l \cdot \sum_{i=1}^N I_{DG}^2(T_i) \cdot T_i}{2 \cdot \sum_{i=1}^N I(l, T_i) \cdot I_{DG}(T_i) \cdot T_i} \Rightarrow x_{opt} = \frac{l \cdot \sum_{i=1}^{24} V_{DG}^2(T_i) \cdot I_{DG}^2(T_i)}{2 \cdot \sum_{i=1}^{24} V_{DG}^2(T_i) \cdot I(l, T_i) \cdot I_{DG}(T_i)} \Rightarrow$$

$$x_{opt} \approx \frac{l \cdot \sum_{i=1}^{24} 9 \cdot V_{DG}^2(T_i) \cdot I_{DG}^2(T_i)}{2 \cdot \sum_{i=1}^{24} 3 \cdot V_l(T_i) \cdot I(l, T_i) \cdot 3 \cdot V_{DG}(T) \cdot I_{DG}(T_i)} \Rightarrow x_{opt} \approx \frac{l \cdot \sum_{i=1}^{24} P_{DG}^2(T_i)}{2 \cdot \sum_{i=1}^{24} P_{load}(T_i) \cdot P_{DG}(T_i)} \quad (4.56)$$

όπου  $P_{DG}(T_i)$  η παραγόμενη ισχύς του αιολικού πάρκου και  $P_{load}(T_i)$  η συνολική ισχύς φορτίου το αντίστοιχο χρονικό διάστημα  $T_i$ .

Με αντικατάσταση των τιμών ισχύος από τους Πίνακες 4.1 και 4.2 για το φορτίο και τη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής αντίστοιχα, προκύπτει ότι η βέλτιστη θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής είναι :

$$x_{opt} = \frac{l}{2} \cdot \left( \frac{0.25^2 + 0.225^2 + \dots + 0.26^2}{1.54 \cdot 0.25 + 1.375 \cdot 0.225 + \dots + 1.925 \cdot 0.26} \right) \approx 0.14 \cdot l \quad (4.57)$$

Η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης απωλειών είναι :

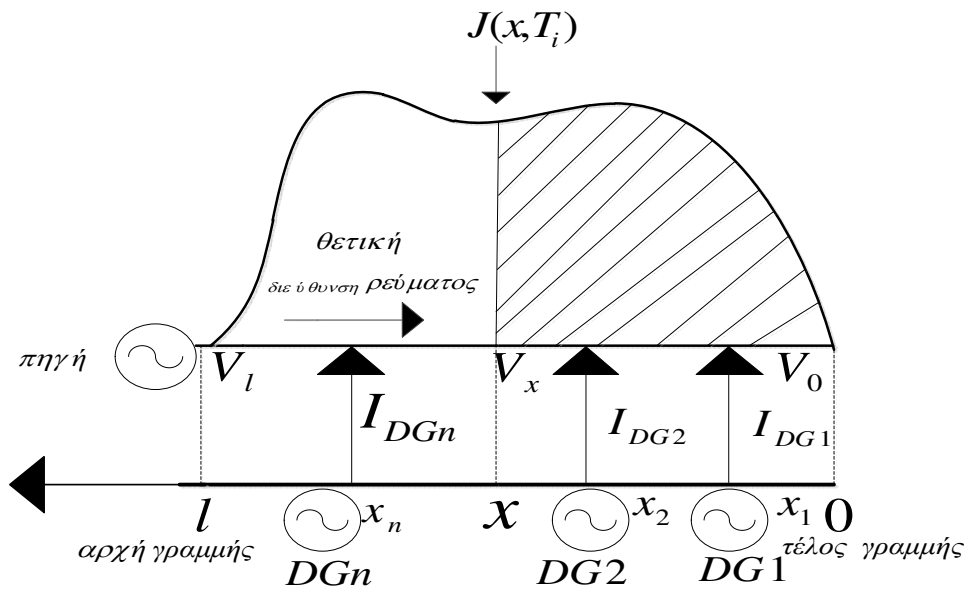
$$\left. \frac{d^2 \overline{P_{ap\_new}(x_0)}}{dx_0^2} \right|_{0.14l} = \frac{6 \cdot R}{24} \cdot \sum_{i=1}^{24} J_0(T_i) \cdot I_{DG}(T_i) > 0 \quad (4.58)$$

οπότε η λύση που προκύπτει είναι έγκυρη. Άρα στην εξεταζόμενη ακτινική γραμμή γραμμής μήκους  $l = 200m$  η ιδανική θέση για να τοποθετηθεί η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής είναι στα  $x_{opt} = 0.14 \cdot l = 0.14 \cdot 200m = 28m$  από το πέρας της γραμμής, ή αλλιώς στα  $172m$  από την αρχή της γραμμής.

#### 4.6 ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Παρότι η βέλτιστη τοποθέτηση πολλαπλών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινική γραμμή διανομής ξεφεύγει από τα πλαίσια που εξετάζει αυτή η εργασία, για λόγους πληρότητας αναφέρονται οι βασικές αρχές της μεθοδολογίας προσέγγισης.

Έστω ότι σε ακτινική γραμμή διανομής με διανεμημένο φορτίο συνδέονται  $n$  μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στα σημεία  $x_1, x_2, \dots, x_n$  όπου  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10.



**Σχήμα 4.10:** Ακτινική γραμμή με διανεμημένο φορτίο μετά την προσθήκη πολλαπλών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

Τα εγχεόμενα ρεύματα των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής προκαλούν μεταβολή στο ρεύμα της ακτινικής γραμμής διανομής, που διαμορφώνεται ως εξής το ενδεικτικό χρονικό διάστημα  $T_i$  :

$$I(x, T_i) = \begin{cases} \int_0^x J(x, T_i) dx & , \text{αν } 0 \leq x \leq x_1 \\ \int_0^x J(x, T_i) dx - I_{DG1}(T_i) & , \text{αν } x_1 \leq x \leq x_2 \\ \int_0^x J(x, T_i) dx - I_{DG1}(T_i) - I_{DG2}(T_i) & , \text{αν } x_2 \leq x \leq x_3 \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \int_0^x J(x, T_i) dx - I_{DG1}(T_i) - I_{DG2}(T_i) \dots - I_{DGn}(T_i) & , \text{αν } x_n \leq x \leq l \end{cases} \quad (4.59)$$

Αν  $P_{\alpha\pi\_new}(x_1, x_2, \dots, x_n, T_i)$  οι συνολικές τριφασικές απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής κατά τη χρονική διάρκεια  $T_i$  συναρτήσει των σημείων σύνδεσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, τότε εκφράζονται μαθηματικά ως εξής :

$$\begin{aligned} P_{\alpha\pi\_new}(x_1, x_2, \dots, x_n, T_i) &= \\ & 3 \cdot \left( \int_0^{x_1} |I(x, T_i)|^2 \cdot R dx + \int_{x_1}^{x_2} |I(x, T_i)|^2 \cdot R dx + \int_{x_2}^{x_3} |I(x, T_i)|^2 \cdot R dx + \dots + \int_{x_n}^l |I(x, T_i)|^2 \cdot R dx \right) \\ \Rightarrow P_{\alpha\pi\_new}(x_1, x_2, \dots, x_n, T_i) &= 3 \cdot \int_0^{x_1} \left| \int_0^x J(x, T_i) dx \right|^2 \cdot R dx + 3 \cdot \int_{x_1}^{x_2} \left| \int_0^x J(x, T_i) dx - I_{DG1}(T_i) \right|^2 \cdot R dx \\ & + 3 \cdot \int_{x_2}^{x_3} \left| \int_0^x J(x, T_i) dx - I_{DG1}(T_i) - I_{DG2}(T_i) \right|^2 \cdot R dx + \dots \\ & + 3 \cdot \int_{x_n}^l \left| \int_0^x J(x, T_i) dx - I_{DG1}(T_i) - I_{DG2}(T_i) - \dots - I_{DGn}(T_i) \right|^2 \cdot R dx \end{aligned} \quad (4.60)$$

Η μέση συνάρτηση των απωλειών ενεργού ισχύος είναι συνάρτηση πολλών μεταβλητών, όπου οι μεταβλητές είναι οι βέλτιστες θέσεις τοποθέτησης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Η εύρεση των βέλτιστων θέσεων τοποθέτησης  $x_{1opt}, x_{2opt}, \dots, x_{nopt}$  των  $n$  μονάδων προκύπτει από την επίλυση του συστήματος των  $n$  εξισώσεων :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P_{\alpha\pi\_new}(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial P_{\alpha\pi\_new}(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_2} = 0 \\ \dots \\ \frac{dP_{\alpha\pi\_new}(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_n} = 0 \end{array} \right. \quad (4.61)$$

#### 4.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμος Ι*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1994, σελ. 130-134.
- [4.2] C. Wang and M. H. Nehrir, "Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems," *IEEE Trans. Power systems*, vol. 19, no. 4, pp. 2068-2076, Nov. 2004.
- [4.3] K. V. Kumar and M. P. Selvan, "Planning and operation of distributed generations in distribution systems for improved voltage profile," in *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, Mar. 2009.
- [4.4] J. Cahill, K. Ritland, and W. Kelly, "Description of Electric Energy Use in Single Family Residences in the Pacific Northwest," Office of Energy Resources, Bonneville Power Administration, Portland, OR, Dec. 1986-1992.
- [4.5] W. Kellogg, M. H. Nehrir, G. Venkataramanan, and V. Gerez, "Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 13, pp. 70-75, Mar. 1998.

## **ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ**

### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σχετικά με τη λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) διακρίνεται η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ή κανονική λειτουργία και η μεταβατική και ασύμμετρη κατάσταση λειτουργίας ή γενικότερα μη κανονική ή ανώμαλη λειτουργία. Ο κύριος προορισμός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να προμηθεύει την πραγματική και άεργο ισχύ τις οποίες ζητούν τα διάφορα φορτία που είναι συνδεδεμένα στο σύστημα. Η ροή της ισχύος στο δίκτυο για την τροφοδότηση της ζήτησης αποτελεί τη χαρακτηριστικότερη εκδήλωση της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας για ένα σύστημα. Ταυτόχρονα, η τάση και η συχνότητα στους ζυγούς πρέπει να τηρούνται μέσα σε προδιαγεγραμμένα όρια παρά το γεγονός ότι τα φορτία υπόκεινται σε σημαντικές και ως ένα σημείο απρόβλεπτες μεταβολές [5.1].

Το πρόβλημα των ροών φορτίου συνίσταται στον προσδιορισμό των μεταβλητών του συστήματος (ισχύος, ρευμάτων, τάσεων), σε μια δεδομένη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια ορισμένη εικόνα φορτίων, μια αντίστοιχη εικόνα παραγόμενης ισχύος και μια αντίστοιχη εικόνα τάσεων και ροών στο δίκτυο. Κάθε άλλη εικόνα φορτίων ή ροών συνιστά μια άλλη κατάσταση λειτουργίας και περιγράφεται από άλλες τιμές μεταβλητών.

### **5.2 Η ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ**

Βασικά στοιχεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ζυγοί και οι γραμμές του. Η ισχύς διακινείται μεταξύ των διάφορων ζυγών από τις θέσεις παραγωγής προς τα φορτία, ανάλογα με τις διαθέσιμες γραμμές και τις τάσεις των ζυγών. Οι διαδρομές των γραμμών, με τις οποίες γίνεται η διακίνηση της ισχύος, διαμορφώνονται ανάλογα με τα μεγέθη και τις θέσεις των φορτίων, με δεδομένες τις θέσεις παραγωγής και το μέγεθος της παραγόμενης ισχύος. Άλλοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη είναι η σχετική σημασία των φορτίων και οι καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας υπάρχει ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης ισχύος, απωλειών και φορτίων και η ισορροπία αυτή διέπεται από σταθερή συχνότητα λειτουργίας και σταθερές τάσεις ζυγών [5.2].

#### **5.2.1 Μεταβλητές συστήματος**

Θεωρώντας τη γενική περίπτωση ενός ζυγού του συστήματος με παραγωγή και φορτίο, που εκφράζονται υπό τη μορφή ισχύος, διακρίνονται τα έξι ηλεκτρικά μεγέθη του ζυγού ως εξής :

1. Παραγόμενη ενεργός ισχύς  $P_G$
2. Παραγόμενη άεργος ισχύς  $Q_G$
3. Ενεργός ισχύς φορτίου  $P_D$
4. Άεργος ισχύς φορτίου  $Q_D$
5. Μέτρο της τάσης  $V$
6. Φασική γωνία της τάσης  $\theta$

Τα ηλεκτρικά αυτά μεγέθη αποτελούν τις μεταβλητές του συστήματος και είναι έξι ανά ζυγό. Σε ένα σύστημα με  $N$  ζυγούς υπάρχουν συνολικά  $6N$  μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες. Τα φορτία ή μεταβλητές διαταραχής ( $P_D, Q_D$ ), οι ισχύς παραγωγής ή μεταβλητές ελέγχου ( $P_G, Q_G$ ) και οι εξαρτημένες μεταβλητές ή μεταβλητές κατάστασης ( $V, \theta$ ).

Σημειώνεται, ότι η εγχεόμενη ενεργός και άεργος ισχύς στο ζυγό εκφράζονται ως εξής :

$$P = P_G - P_D \quad (5.1)$$

$$Q = Q_G - Q_D \quad (5.2)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι ζυγοί διακρίνονται στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες :

1. Ζυγός ταλάντωσης ή ζυγός αναφοράς : Στο ζυγό αυτό επιβάλλεται σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία, ενώ προσδιορίζονται η παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς.
2. Ζυγός φορτίου (PQ) : Ζυγός στον οποίο είναι γνωστή η ισχύς φορτίου και η ισχύς παραγωγής, ενώ προσδιορίζεται η τάση κατά μέτρο και γωνία.
3. Ζυγός παραγωγής (PV) : Ζυγός στον οποίο είναι γνωστή η ισχύς φορτίου, η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης, ενώ προσδιορίζεται η παραγόμενη άεργος ισχύς και η γωνία της τάσης [5.3].

### 5.2.2 Εξισώσεις ροών φορτίου

Οι σχέσεις μεταξύ των τάσεων στους ζυγούς (κόμβους) και των ρευμάτων που εγχέονται σε αυτούς, μπορούν να διατυπωθούν με τη βοήθεια του πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών ως εξής :

$$[\tilde{I}] = [Y] \cdot [\tilde{V}] \Rightarrow \begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \\ \dots \\ \tilde{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \\ \dots \\ \tilde{V}_n \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

όπου:

$n$  : Συνολικός αριθμών των ζυγών του δικτύου.

$Y_{ii}$  : Διαγώνιο στοιχείου του πίνακα αγωγιμοτήτων των ζυγών, που εκφράζει το άθροισμα των αγωγιμοτήτων που καταλήγουν στο ζυγό  $i$ .

$Y_{ij}$  : Μη διαγώνιο στοιχείου του πίνακα αγωγιμοτήτων των ζυγών, που ισούται με την αντίθετη τιμή του αθροίσματος όλων των αγωγιμοτήτων μεταξύ του ζυγού  $i$  και του ζυγού  $j$ .

$\tilde{V}_i$  : Τάση στο ζυγό  $i$ .

$\tilde{I}_i$  : Εγχεόμενο ρεύμα στο ζυγό  $i$ .

Η εξίσωση (5.3) θα ήταν γραμμική αν τα εγχεόμενα ρεύμα στους ζυγούς ήταν γνωστά. Πρακτικά, όμως, τα εγχεόμενα ρεύματα στους περισσότερους ζυγούς είναι άγνωστα. Το ρεύμα σε οποιοδήποτε ζυγό  $i$  σχετίζεται με την τάση και την ισχύ του ζυγού ως εξής :

$$\tilde{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\tilde{V}_i^*} \quad (5.4)$$

Για τους διάφορους τύπους ζυγών οι σχέσεις μεταξύ των μεγεθών που περιγράφονται στην εξίσωση (5.4) καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά των συσκευών που συνδέονται στους ζυγούς. Οι οριακές συνθήκες που επιβάλλονται από τους διαφορετικούς τύπους των ζυγών καθιστούν το πρόβλημα μη γραμμικό, με αποτέλεσμα οι εξισώσεις ροών φορτίου να επιλύονται επαναληπτικά μέσω αριθμητικών τεχνικών, όπως οι μέθοδοι Gauss -Siedel και Newton-Raphson.

### 5.2.3 Εφαρμογή της μεθόδου Newton-Raphson για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου.

Η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson είναι πιο σύνθετη, αλλά και πιο ασφαλής. Συνήθως δεν έχει πρόβλημα σύγκλισης και κατά κανόνα συγκλίνει ταχύτερα από τη Gauss-Siedel. Η μέθοδος Newton-Raphson συνίσταται στη γραμμικοποίηση του αρχικού συστήματος εξισώσεων με τη βοήθεια του αναπτύγματος Taylor, όπου αμελούνται οι όροι δεύτερης τάξης και άνω. Παρακάτω παρουσιάζεται η συγκεκριμένη μέθοδος.

Για οποιοδήποτε ζυγό  $i$  του δικτύου η μιγαδική ισχύς εκφράζεται ως εξής :

$$\tilde{S}_i = P_i + jQ_i = \tilde{V}_i \cdot \tilde{I}_i^* \quad (5.5)$$

Το εγχεόμενο ρεύμα στο ζυγό  $i$ , σύμφωνα με την (5.3), είναι :

$$\tilde{I}_i = \sum_{m=1}^N \tilde{Y}_{im} \cdot \tilde{V}_m \quad (5.6)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης (5.6) στη σχέση (5.5), προκύπτει :

$$P_i + jQ_i = \tilde{V}_i \cdot \sum_{m=1}^N \tilde{Y}_{im}^* \cdot \tilde{V}_m^* = \tilde{V}_i \cdot \sum_{m=1}^N (G_{im} - jB_{im}) \cdot \tilde{V}_m^* \quad (5.7)$$

Το γινόμενο των τάσεων  $\tilde{V}_i$  και  $\tilde{V}_m^*$  μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$\begin{aligned} \tilde{V}_i \cdot \tilde{V}_m^* &= (V_i \cdot e^{j\theta_i}) \cdot (V_m \cdot e^{-j\theta_m}) = V_i \cdot V_m \cdot e^{j(\theta_i - \theta_m)} = \\ &= V_i \cdot V_m (\cos(\theta_i - \theta_m) + j \sin(\theta_i - \theta_m)) = V_i \cdot V_m (\cos \theta_{im} + j \sin \theta_{im}) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Οπότε, αντικαθιστώντας την (5.8) στη σχέση (5.7) και χωρίζοντας το πραγματικό από το φανταστικό μέρος, οι εξισώσεις για την ενεργό και άεργο ισχύ του ζυγού  $i$  διαμορφώνονται ως εξής :

$$P_i = V_i \cdot \sum_{m=1}^n G_{im} \cdot V_m \cdot \cos \theta_{im} + B_{im} \cdot V_m \cdot \sin \theta_{im} \quad (5.9)$$

$$Q_i = V_i \cdot \sum_{m=1}^n G_{im} \cdot V_m \cdot \sin \theta_{im} + B_{im} \cdot V_m \cdot \cos \theta_{im} \quad (5.10)$$

Οπότε, η ενεργός και η άεργος ισχύς στους ζυγούς είναι συναρτήσεις που εξαρτώνται από τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων όλων των ζυγών. Οι εξισώσεις (5.9) και (5.10) συνιστούν ένα σύστημα από μη γραμμικές εξισώσεις. Η εξίσωση (5.9) εφαρμόζεται τόσο στους ζυγούς φορτίου, όσο και στους ζυγούς παραγωγής, ενώ η (5.10) εφαρμόζεται μόνο στους ζυγούς φορτίου. Οι επαναληπτικές εξισώσεις ροής φορτίου στο ζυγό  $i$ , που αποτελούν τις διαφορές μεταξύ δοσμένων και υπολογιζόμενων τιμών ισχύος, προκύπτουν, ανάλογα με το είδος του ζυγού, ως εξής :

Ζυγός  $i$  : Ζυγός φορτίου

$$\Delta P_i = P_i^{sp} - \left( V_i \cdot \sum_{m=1}^n G_{im} \cdot V_m \cdot \cos \theta_{im} + B_{im} \cdot V_m \cdot \sin \theta_{im} \right) \quad (5.11)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{sp} - \left( V_i \cdot \sum_{m=1}^n G_{im} \cdot V_m \cdot \sin \theta_{im} + B_{im} \cdot V_m \cdot \cos \theta_{im} \right) \quad (5.12)$$

Ζυγός  $i$  : Ζυγός παραγωγής

$$\Delta P_i = P_i^{sp} - \left( V_i \cdot \sum_{m=1}^n G_{im} \cdot V_m \cdot \cos \theta_{im} + B_{im} \cdot V_m \cdot \sin \theta_{im} \right) \quad (5.13)$$

όπου  $P_i^{sp}$  η δοσμένη τιμή της εγχεόμενης ενεργού ισχύος, αν ο ζυγός  $i$  είναι ζυγός παραγωγής, και  $P_i^{sp}, Q_i^{sp}$  οι δοσμένες τιμές της εγχεόμενης ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα, αν ο ζυγός  $i$  είναι ζυγός φορτίου.

Αν υποθεθεί ότι ο ζυγός 1 του δικτύου είναι ζυγός αναφοράς, οι ζυγοί 2 έως  $f$  είναι ζυγοί παραγωγής και οι ζυγοί  $f+1$  έως  $n$  είναι ζυγοί φορτίου, τότε με τη βοήθεια του αναπτύγματος Taylor και αγνοώντας τους όρους δεύτερης τάξης και άνω, προκύπτουν οι ακόλουθες γραμμικές εξισώσεις :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_{f+1} \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[ \begin{array}{ccc} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_n} \\ \vdots & (H) & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} \end{array} \right] & \left[ \begin{array}{ccc} \frac{\partial P_2}{\partial V_{f+1}} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial V_n} \\ \vdots & (N) & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial V_{f+1}} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{ccc} \frac{\partial Q_{f+1}}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_{f+1}}{\partial \theta_n} \\ \vdots & (J) & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \end{array} \right] & \left[ \begin{array}{ccc} \frac{\partial Q_{f+1}}{\partial V_{f+1}} & \cdots & \frac{\partial Q_{f+1}}{\partial V_n} \\ \vdots & (L) & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial V_{f+1}} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{array} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta V_{f+1} \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (5.14)$$



$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

όπου  $\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}$  είναι ο Ιακωβιανός πίνακας.

Με βάση την αρίθμηση των ζυγών που έχει γίνει, ο Ιακωβιανός πίνακας θα έχει διαστάσεις  $(2n - m - 1) \times (2n - m - 1)$ . Οι υποπίνακες  $H$  και  $L$  είναι τετραγωνικοί με διαστάσεις  $(n - 1) \times (n - 1)$  και  $(n - m) \times (n - m)$ , ενώ οι  $N$  και  $J$  δεν είναι τετραγωνικοί και έχουν διαστάσεις  $(n - 1) \times (m)$  και  $(m) \times (n - 1)$  αντίστοιχα. Οι σχέσεις υπολογισμού των διαγώνιων και μη διαγώνιων στοιχείων των υποπινάκων του Ιακωβιανού πίνακα είναι οι εξής :

$$H_{ii} = \partial \Delta P_i / \partial \theta_i = V_i \sum_{m \neq i} (G_{im} \sin \theta_{im} - B_{im} \cos \theta_{im}) V_m \quad (5.16)$$

$$H_{im} = \partial \Delta P_i / \partial \theta_m = -V_i (G_{im} \sin \theta_{im} - B_{im} \cos \theta_{im}) V_m \quad (5.17)$$

$$J_{ii} = \partial \Delta Q_i / \partial \theta_i = V_i \sum_{m \neq i} (G_{im} \cos \theta_{im} + B_{im} \sin \theta_{im}) V_m = -P_i^{sp} + V_i^2 G_{im} \quad (5.19)$$

$$J_{im} = \partial \Delta Q_i / \partial \theta_m = V_i (G_{im} \cos \theta_{im} + B_{im} \sin \theta_{im}) V_m \quad (5.20)$$

$$N_{ii} = V_i \partial \Delta P_i / \partial V_i = -P_i^{sp} - V_i^2 G_{ii} \quad (5.22)$$

$$N_{im} = \partial \Delta P_i / \partial V_m = -J_{im} \quad (5.23)$$

$$L_{ii} = \partial \Delta Q_i / \partial V_i = -Q_i^{sp} + V_i^2 B_{ii} \quad (5.24)$$

$$L_{im} = \partial \Delta Q_i / \partial V_m = H_{im} \quad (5.25)$$

Αν ο μετρητής των ανακυκλώσεων της μεθόδου Newton-Raphson συμβολίζεται με  $k$ , τότε οι νέες εκτιμήσεις που προκύπτουν για τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων των ζυγών δίνονται από τις σχέσεις :

$$\theta_i^{(k+1)} = \theta_i^{(k)} + \Delta\theta_i^{(k)} \quad (5.26)$$

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \Delta V_i^{(k)} \quad (5.27)$$

Η διαδικασία για τη λύση των εξισώσεων ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson είναι η ακόλουθη:

1. Για τους ζυγούς φορτίου, όπου οι ισχείς  $P_i^{sp}$  και  $Q_i^{sp}$  είναι γνωστές, το μέτρο των τάσεων και οι γωνίες των φάσεων τίθενται ίσες με τις τιμές των ζυγών αναφοράς ή 1.0 και 0 αντίστοιχα, δηλαδή  $V_i^{(0)} = 1.0$  και  $\theta_i^{(0)} = 0$ . Για τους ζυγούς PV, όπου τα  $V_i$  και  $P_i^{sp}$  είναι γνωστά, οι γωνίες των φάσεων τίθενται ίσες με τη φάση του ζυγού αναφοράς ή 0, δηλαδή  $\theta_i^{(0)} = 0$ .
2. Για ζυγούς φορτίου, οι  $P_i$  και  $Q_i$  υπολογίζονται από τις σχέσεις (5.9) και (5.10), ενώ οι  $\Delta P_i$  και  $\Delta Q_i$  υπολογίζονται από τις σχέσεις (5.11) και (5.12).
3. Για ζυγούς PV, οι  $P_i$  και  $\Delta P_i$  υπολογίζονται από τις σχέσεις (5.9) και (5.13) αντίστοιχα.
4. Τα στοιχεία του Ιακωβιανού πίνακα ( $H$ ,  $N$ ,  $J$ ,  $L$ ) υπολογίζονται από τις (5.16) - (5.25).
5. Η γραμμική εξίσωση (5.14) λύνεται απευθείας με τη μέθοδο της τριγωνοποίησης και απαλοιφής Gauss.
6. Τα νέα μέτρα των τάσεων και οι νέες γωνίες φάσεων υπολογίζονται από τις (5.26) και (5.27).
7. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι οι  $\Delta P_i$  και  $\Delta Q_i$  να είναι μικρότερες από την προσδιορισμένη ακρίβεια, δηλαδή :

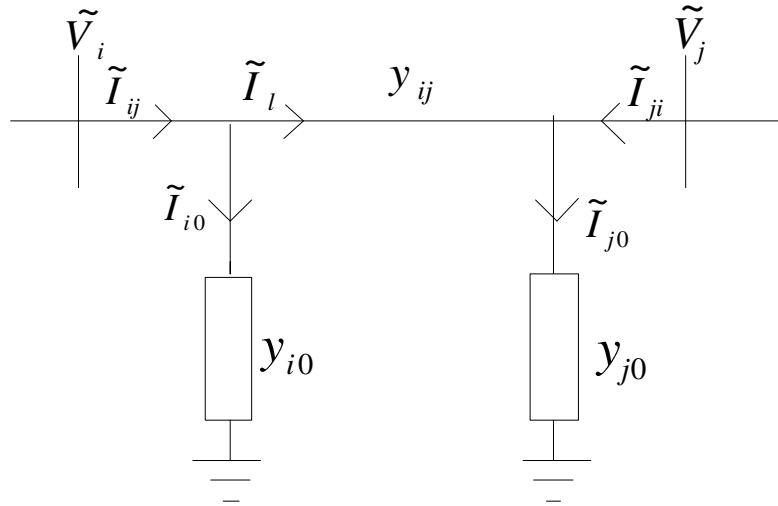
$$|\Delta P_i| \leq \varepsilon \quad (5.28)$$

$$|\Delta Q_i| \leq \varepsilon$$

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου Newton-Raphson είναι ο τετραγωνικός ρυθμός σύγκλισης, ο οποίος είναι ταχύτερος κάθε άλλης μεθόδου. Επίσης, αποτελεί μια πολύ αξιόπιστη μέθοδο που δεν επηρεάζεται από παράγοντες όπως η επιλογή του ζυγού ταλαντώσεως ή οι μικρές επαγωγικές αντιδράσεις μεταξύ των ζυγών. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αναγκαιότητα διαμόρφωσης και αντιστροφής του Ιακωβιανού πίνακα σε κάθε ανακύκλωση. Ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι παρουσιάζει προβλήματα σύγκλισης όταν οι αρχικές υποθετικές τιμές των τάσεων διαφέρουν σημαντικά από τις πραγματικές τιμές [5.4].

### 5.2.4 Υπολογισμός ροών ισχύος και απωλειών ισχύος

Μετά τη σύγκλιση της προσεγγιστικής μεθόδου επίλυσης του προβλήματος ροής φορτίου, είναι γνωστές οι τιμές των τάσεων κατά μέτρο και γωνία σε όλους τους ζυγούς του συστήματος. Οπότε, πλέον, είναι εφικτό να υπολογιστούν οι ροές ισχύος και οι απώλειες ισχύος σε όλες τις γραμμές του συστήματος. Έστω μια τυπική γραμμή του συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Με  $y_{ij}$  συμβολίζεται η αγωγιμότητα σειράς της γραμμής, ενώ με  $y_{i0}, y_{j0}$  οι εγκάρσιες αγωγιμότητες.



**Σχήμα 5.1:** Γραμμή του συστήματος για υπολογισμό ροών ισχύος.

Το ρεύμα γραμμής μεταξύ των ζυγών  $i$  και  $j$  υπολογίζεται με εφαρμογή του νόμου ρευμάτων Kirkchoff ως εξής :

$$\tilde{I}_{ij} = \tilde{I}_l + \tilde{I}_{i0} = y_{ij} \cdot (\tilde{V}_i - \tilde{V}_j) + y_{i0} \cdot \tilde{V}_i \quad (5.29)$$

Αντίστοιχα , το ρεύμα γραμμής μεταξύ των ζυγών  $j$  και  $i$  είναι :

$$\tilde{I}_{ji} = -\tilde{I}_l + \tilde{I}_{j0} = y_{ij} \cdot (\tilde{V}_j - \tilde{V}_i) + y_{j0} \cdot \tilde{V}_j \quad (5.30)$$

Η ροή μιγαδικής ισχύος  $\tilde{S}_{ij}$  από το ζυγό  $i$  προς το ζυγό  $j$  και η ροή της μιγαδικής ισχύος  $\tilde{S}_{ji}$  από το ζυγό  $j$  προς το ζυγό  $i$ , προκύπτουν ως εξής :

$$\tilde{S}_{ij} = \tilde{V}_i \cdot \tilde{I}_{ij}^* \quad (5.31)$$

$$\tilde{S}_{ji} = \tilde{V}_j \cdot \tilde{I}_{ji}^* \quad (5.32)$$

Οι απώλειες ισχύος της γραμμής υπολογίζονται από το αλγεβρικό άθροισμα των ροών μιγαδικής ισχύος των σχέσεων (5.31) και (5.32) και είναι :

$$\tilde{S}_{Lij} = \tilde{S}_{ij} + \tilde{S}_{ji} \quad (5.33)$$

Σημειώνεται, τέλος, ότι οι συνολικές απώλειες ισχύος του συστήματος υπολογίζονται από το άθροισμα των απωλειών ισχύος σε όλες τις γραμμές του συστήματος. Χωρίζοντας την εξίσωση των συνολικών απωλειών ισχύος σε πραγματικό και φανταστικό μέρος, προκύπτουν οι συνολικές απώλειες ενεργού και αέργου ισχύος αντίστοιχα του συστήματος,

$$P_{Ltotal} = \sum \text{Re}(\tilde{S}_{ij} + \tilde{S}_{ji}) \quad (5.34)$$

$$Q_{Ltotal} = \sum \text{Im}(\tilde{S}_{ij} + \tilde{S}_{ji}) \quad (5.35)$$

### 5.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΡΟΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Μέσω της ανάλυσης ροών φορτίου είναι δυνατό να προσδιοριστεί η βέλτιστη θέση τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής τόσο σε ακτινικά όσο και σε βροχοειδή δίκτυα διανομής, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος. Η διαδικασία που ακολουθείται απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ και είναι πιο χρονοβόρα σε σχέση με τις αναλυτικές μεθόδους λόγω των επαναληπτικών αλγορίθμων που περιλαμβάνει, αλλά δίνει πολύ ακριβή και σωστά αποτελέσματα και χρησιμεύει στο να επαληθευτούν και να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την υλοποίηση των αναλυτικών μεθόδων.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάζονται μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μοναδιαίου συντελεστή ισχύος. Συνεπώς, η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής που εισάγεται στο δίκτυο εγγχεί σε αυτό μόνο την ενεργό ισχύ που παράγει, έστω  $P_{DG}$ . Δηλαδή, ούτε παράγει ούτε απορροφά άεργο ισχύ. Οπότε, η άεργος ισχύς του ζυγού, στον οποίο συνδέεται η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, παραμένει αμετάβλητη, ενώ η ενεργός ισχύς διαμορφώνεται ως εξής :

$$P = P_G^{new} - P_D = P_G^{old} + P_{DG} - P_D \quad (5.36)$$

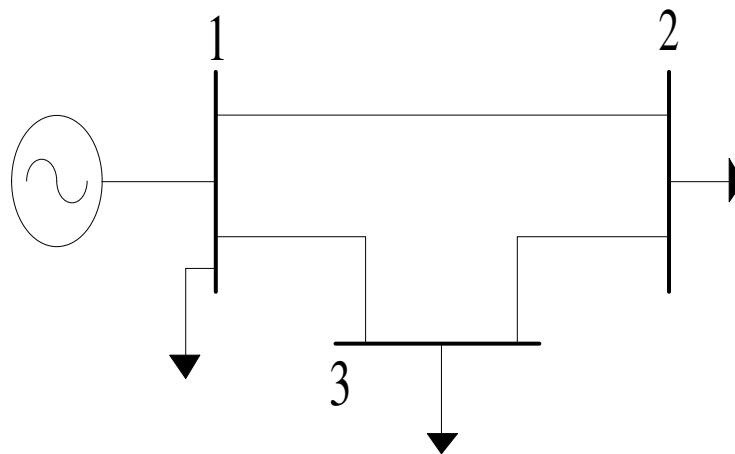
Συνεπώς, με βάση τον ορισμό που δόθηκε στην Ενότητα 5.2.1 για τα είδη των ζυγών, η προσθήκη μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ζυγό του συστήματος δεν μεταβάλλει την κατηγορία στην οποία ανήκει. Σημειώνεται, ότι δεν εξετάζεται το ενδεχόμενο να συνδέεται η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό αναφοράς του συστήματος, καθώς δεν έχει νόημα να εγγέεται στο ίδιο ζυγό η ισχύς της εξωτερικής πηγής τροφοδότησης του δικτύου και η ισχύς της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Τα βήματα για την υλοποίηση του αλγόριθμου εύρεσης της βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυα διανομής μέσω προσομοίωσης με ροές φορτίου, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, είναι τα ακόλουθα :

1. Εισάγονται τα στοιχεία των ζυγών και των γραμμών του εξεταζόμενου συστήματος, καθώς και η παραγόμενη ενεργός ισχύς της εισαγόμενης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.
2. Επαναλαμβάνεται η εξής διαδικασία για κάθε ζυγό που αποτελεί πιθανή θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής :
  - προστίθεται στα στοιχεία του η παραγόμενη ενεργός ισχύς της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σύμφωνα με τη σχέση (5.36).
  - γίνεται ανάλυση ροής φορτίου του δικτύου για τον προσδιορισμό των τάσεων σε όλους τους ζυγούς με βάση τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Ενότητα 5.2.3.
  - υπολογίζονται οι ροές ισχύος σε όλες τις γραμμές του δικτύου από τις σχέσεις (5.31) και (5.32), και, κατόπιν, οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος από τη σχέση (5.34).
3. Επιλέγεται ως βέλτιστη θέση ο ζυγός, που όταν εγχέεται σε αυτόν η παραγόμενη ενεργός ισχύς της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, ελαχιστοποιούνται οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος του εξεταζόμενου συστήματος.

#### 5.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΡΟΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Για την πλήρη κατανόηση του αλγορίθμου παρουσιάζεται ένα αριθμητικό παράδειγμα σε ένα μικρό πρότυπο δίκτυο διανομής 3 ζυγών, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Το δίκτυο αποτελείται από 3 ζυγούς και 3 γραμμές. Ο ζυγός 1 είναι ζυγός ταλάντωσης, ενώ οι ζυγοί 2 και 3 είναι ζυγοί φορτίου. Η βασική τάση είναι τα  $11kV$ , ενώ ως βασική ισχύς λαμβάνονται τα  $100MVA$ . Τα δεδομένα των γραμμών και των ζυγών φαίνονται στους Πίνακες 5.1 και 5.2 αντίστοιχα και ακολουθούν συγκεκριμένο τρόπο παρουσίασης (format), που εφαρμόζεται στα πλαίσια της εισαγωγής δεδομένων όλων των εξεταζόμενων δικτύων της εργασίας για την ανάλυση του προβλήματος ροής φορτίου από το λογισμικό που αναπτύχθηκε και που παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 7.



5.2: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου διανομής 3 ζυγών.

**Πίνακας 5.1:** Στοιχεία γραμμών του δικτύου 3 ζυγών.

Από ζυγό	Προς ζυγό	R (p.u.)	X (p.u.)	1/2 B (p.u.)	Κωδικός γραμμής
1	2	0.12	0.4	0	1
1	3	0.24	0.53	0	1
2	3	0.17	0.48	0	1

**Πίνακας 5.2:** Στοιχεία ζυγών του δικτύου 3 ζυγών.

Αρ. ζυγού	Κωδικός ζυγού	Μέτρο τάσης (p.u.)	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο		Παραγωγή				Έγχυση (MVAR)
					MW	MVAR	MW	MVAR	Qmin (MVAR)	Qmax (MVAR)	
1	1	1	11	0	4	0.5	0	0	0	0	0
2	0	1	11	0	6	1.5	0	0	0	0	0
3	0	1	11	0	5.5	1	0	0	0	0	0

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα στοιχεία των γραμμών του συστήματος. Μια γραμμή καθορίζεται από το ζευγάρι ζυγών που την αποτελούν. Έτσι, στις πρώτες δύο στήλες είναι ο αρχικός και ο τελικός ζυγός μιας γραμμής, αντίστοιχα. Οι τρεις επόμενες στήλες αναφέρονται στην ωμική αντίσταση  $R$ , στην επαγωγική αντίδραση  $X$  και στο μισό της χωρητικής αγωγιμότητας  $B$ , και όλες οι τιμές είναι ανηγμένες στο ανά μονάδα σύστημα (p.u.). Στην τελευταία στήλη τοποθετείται ο κωδικός της γραμμής, όπου στην περίπτωση των μετασχηματιστών είναι η τιμή της λήψης τους και στην περίπτωση γραμμής η τιμή 1.

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα στοιχεία των ζυγών του συστήματος. Στην πρώτη στήλη είναι ο αριθμός των ζυγών, όπου ο πρώτος ζυγός είναι ο ζυγός ταλάντωσης, ενώ στη δεύτερη στήλη είναι ο κωδικός του ζυγού. Για το ζυγό αναφοράς, ο κωδικός είναι 1 και για αυτόν πρέπει να δίνονται η τάση του κατά μέτρο και γωνία. Για τους ζυγούς φορτίου, ο κωδικός είναι 0, και πρέπει να γίνεται μια αρχικοποίηση της τάσης που συνήθως αν δίνεται τότε θεωρείται ίση με την αντίστοιχη τάση του ζυγού αναφοράς ( $1\angle 0^\circ$  p.u.). Για τους ζυγούς παραγωγής, ο κωδικός είναι 2 και πρέπει να είναι γνωστό το μέτρο της τάσης του. Στις στήλες 3 και 4 είναι η τάση του ζυγού σε ανά μονάδα τιμή και σε kV αντίστοιχα, ενώ στην επόμενη στήλη είναι η γωνία της τάσης σε μοίρες. Οι δύο επόμενες στήλες αντιστοιχούν στην ενεργό ( $MW$ ) και στην άεργο ισχύ ( $MVAR$ ) του φορτίου. Οι επόμενες τέσσερις στήλες αφορούν την παραγωγή και είναι με σειρά η ενεργός ισχύς ( $MW$ ), η άεργος ισχύς ( $MVAR$ ), η ελάχιστη παραγωγή αέργου ισχύος ( $Q_{\min}-MVAR$ ) και η μέγιστη παραγωγή αέργου ισχύος ( $Q_{\max}-MVAR$ ). Στην τελευταία στήλη τοποθετείται τυχόν εισερχόμενη στο σύστημα άεργος ισχύς λόγω εγκατεστημένων παράλληλων πυκνωτών.

Στόχος της ανάλυσης είναι η εύρεση της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής μεγέθους  $2.2 MW$ , που αντιστοιχεί περίπου στο 15% του συνολικού φορτίου του δικτύου διανομής. Δεδομένου ότι ο ζυγός 1 είναι ζυγός αναφοράς, πιθανές βέλτιστες θέσεις είναι ο ζυγός 2 και ο ζυγός 3. Αρχικά, πριν την εισαγωγή της μονάδας διεσπαρμένης στο δίκτυο, πραγματοποιείται ανάλυση ροών φορτίου και υπολογίζονται οι ροές ισχύος στις γραμμές για τον προσδιορισμό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου διανομής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες 5.3 και 5.4.

**Πίνακας 5.3:** Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου του παραδείγματος, πριν την εισαγωγή της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Αποτελέσματα ροών φορτίου							
Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVAR)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVAR)	Έγχυση (MVAR)
1	1	0	4	0.5	15.621	3.328	0
2	0.9849	0	6	1.5	0	0	0
3	0.9831	0	5.5	1	0	0	0
Σύνολο :			15.5	3	15.621	3.328	0

**Πίνακας 5.4:** Αποτελέσματα υπολογισμού ροών ισχύος των γραμμών και απωλειών ισχύος στο δίκτυο του παραδείγματος, πριν την εισαγωγή της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Ροές ισχύος γραμμών και απώλειες						
Από ζυγό	Προς ζυγό	Ροή ισχύος (MW)	Ροή ισχύος (MVAR)	Ροή ισχύος (MVA)	Απώλειες (MW)	Απώλειες (MVAR)
1	-	11.6206	2.8281	11.9598	-	-
1	2	6.4641	1.9092	6.7401	0.0545	0.1817
1	3	5.1567	0.919	5.2379	0.0658	0.1454
2	-	-6	-1.5	6.1847	-	-
2	1	-6.4095	-1.7275	6.6383	0.0545	0.1817
2	3	0.4095	0.2275	0.4685	0.0004	0.0011
3	-	-5.5	-1	5.5902	-	-
3	1	-5.0908	-0.7736	5.1493	0.0658	0.1454
3	2	-0.4092	-0.2264	0.4676	0.0004	0.0011
Σύνολο :					0.1207	0.3282

Κατόπιν, υποτίθεται ότι η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 2 του δικτύου, οπότε στα στοιχεία παραγωγής του ζυγού 2 προστίθενται τα 2.2 MW ενεργού ισχύος που παράγει η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής. Πραγματοποιείται ανάλυση ροών φορτίου με τα νέα δεδομένα και υπολογίζονται οι ροές ισχύος στις γραμμές για τον προσδιορισμό των νέων απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου διανομής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες 5.4 και 5.5.

**Πίνακας 5.4:** Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου του παραδείγματος, μετά την εισαγωγή της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 2.

Αποτελέσματα ροών φορτίου							
Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVAR)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVAR)	Έγχυση (MVAR)
1	1	0	4	0.5	13.385	3.226	0
2	0.9871	0	6	1.5	2.2	0	0
3	0.9844	0	5.5	1	0	0	0
Σύνολο :			15.5	3	15.585	3.226	0

**Πίνακας 5.5:** Αποτελέσματα υπολογισμού ροών ισχύος των γραμμών και απωλειών ισχύος στο δίκτυο του παραδείγματος, μετά την εισαγωγή της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 2.

Ροές ισχύος γραμμών και απώλειες						
Από ζυγό	Προς ζυγό	Ροή ισχύος (MW)	Ροή ισχύος (MVAR)	Ροή ισχύος (MVA)	Απώλειες (MW)	Απώλειες (MVAR)
1	-	9.3853	2.7258	9.7732	-	-
1	2	4.8504	1.7999	5.1736	0.0321	0.1071
1	3	4.5350	0.926	4.6286	0.0514	0.1135
2	-	-3.8	-1.5	4.0853	-	-
2	1	-4.8183	-1.6929	5.107	0.0321	0.1071
2	3	1.0183	0.1929	1.0364	0.0019	0.0053
3	-	-5.5	-1	5.5902	-	-
3	1	-4.4836	-0.8124	4.5566	0.0514	0.1135
3	2	-1.0164	-0.1876	1.0336	0.0019	0.0053
Σύνολο :					0.0854	0.2259

Στη συνέχεια, υποτίθεται ότι η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 3 του δικτύου, οπότε στα στοιχεία παραγωγής του ζυγού 3 προστίθενται τα 2.2 MW ενεργού ισχύος που παράγει η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής. Πραγματοποιείται ανάλυση ροών φορτίου με τα νέα δεδομένα και υπολογίζονται οι ροές ισχύος στις γραμμές για τον προσδιορισμό των νέων απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου διανομής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες 5.6 και 5.7.

**Πίνακας 5.6:** Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου του παραδείγματος, μετά την εισαγωγή της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 3.

Αποτελέσματα ροών φορτίου							
Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVAR)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVAR)	Έγχυση (MVAR)
1	1	0	4	0.5	13.378	3.220	0
2	0.9863	0	6	1.5	0	0	0
3	0.9862	0	5.5	1	2.2	0	0
Σύνολο :			15.5	3	15.578	3.220	0



**Πίνακας 5.7:** Αποτελέσματα υπολογισμού ροών ισχύος των γραμμών και απωλειών ισχύος στο δίκτυο του παραδείγματος, μετά την εισαγωγή της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 3.

Ροές ισχύος γραμμών και απώλειες						
Από ζυγό	Προς ζυγό	Ροή ισχύος (MW)	Ροή ισχύος (MVAR)	Ροή ισχύος (MVA)	Απώλειες (MW)	Απώλειες (MVAR)
1	-	9.3781	2.7196	9.7645	-	-
1	2	5.6014	1.8028	5.8843	0.0416	0.1385
1	3	3.7768	0.9169	3.8865	0.0363	0.0801
2	-	-6	-1.5	6.1847	-	-
2	1	-5.5598	-1.6643	5.8036	0.0416	0.1385
2	3	-0.4402	0.1643	0.4698	0.0004	0.0011
3	-	-3.3	-1	3.4482	-	-
3	1	-3.7406	-0.8368	3.833	0.0363	0.0801
3	2	0.4406	-0.1632	0.4698	0.0004	0.0011
Σύνολο :					0.0782	0.2196

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που φαίνεται στον Πίνακα 5.8, προκύπτει ότι οι απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου διανομής ελαχιστοποιούνται όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 3. Άρα, ο ζυγός 3 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της συγκεκριμένης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Σημειώνεται, επίσης, ότι εξαιτίας της βέλτιστης τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής βελτιώνονται ελαφρώς οι τάσεις στους ζυγούς 2 και 3 του δικτύου πλησιάζοντας περισσότερο την ονομαστική τους τιμή. Η επίδραση της τοποθέτησης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο προφίλ των τάσεων των ζυγών των δικτύων διανομής θα αναλυθεί εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 8.

**Πίνακας 5.8:** Σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου.	0.1207 MW
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου , όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 2.	0.0854 MW
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου , όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 3.	0.0782 MW
Βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.	ζυγός 3
Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος.	35.211 %

## 5.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμος I, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985, σελ. 126-132.
- [5.2] H. Saadat, *Power Systems Analysis, second edition*. New York : McGraw-Hill, 1999, pp. 200-212, 232-240.
- [5.3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York : McGraw-Hill, 1993, pp. 257-269.
- [5.4] W. D. Stevenson, Jr., *Elements of Power System Analysis, third edition*. New York : McGraw-Hill, 1975, pp. 342-356.

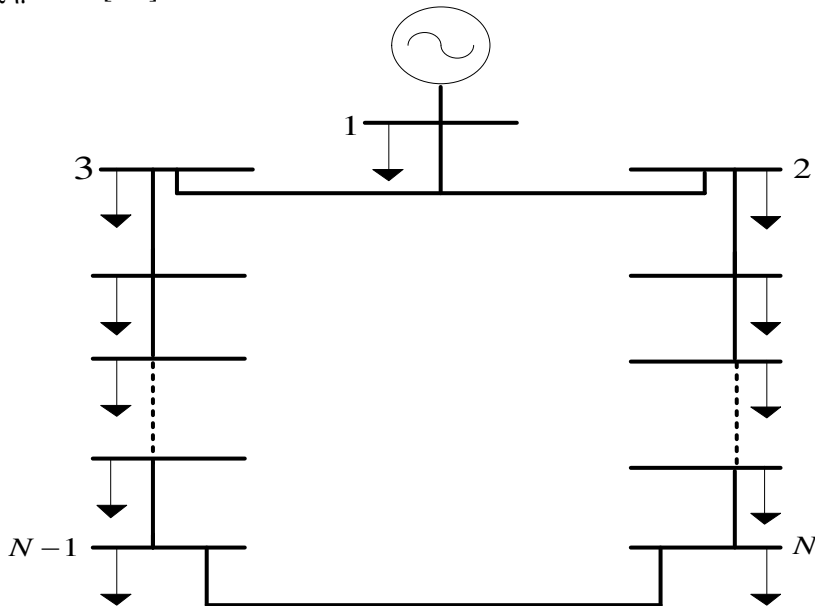
## ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΒΡΟΧΟΕΙΔΗ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεγάλη διεύθυνση διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής προκαλεί διαφόρων ειδών τεχνικά θέματα, αναφορικά με τις αμφίδρομες ροές ισχύος, τις μεταβολές της τάσης, το επίπεδο των σφαλμάτων, την επιλογή των μέσων προστασίας, την ποιότητα ισχύος και την ευστάθεια [6.1]. Αναλύσεις, που έχουν πραγματοποιηθεί, επισημαίνουν ότι τα δίκτυα διανομής με βροχοειδή μορφή ευνοούν περισσότερο την ενσωμάτωση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και ανταποκρίνονται καλύτερα στις τεχνικές απαιτήσεις από ό,τι τα ακτινικά, και προς αυτή την κατεύθυνση κινούνται οι σχεδιασμοί των μελλοντικών δικτύων διανομής [6.2]. Καίριας σημασίας, λοιπόν, είναι η ανάπτυξη μεθόδων που θα υποδεικνύουν τα βέλτιστα σημεία τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα βροχοειδή δίκτυα διανομής.

### 6.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Τα βροχοειδή δίκτυα έχουν πιο πολύπλοκη δομή από ό,τι τα ακτινικά, για αυτό και η διαδικασία που ακολουθείται για την εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής είναι πιο σύνθετη και τελείως διαφορετικής λογικής από αυτή που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Έστω ότι το προς εξέταση δίκτυο είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 6.1 [6.3].



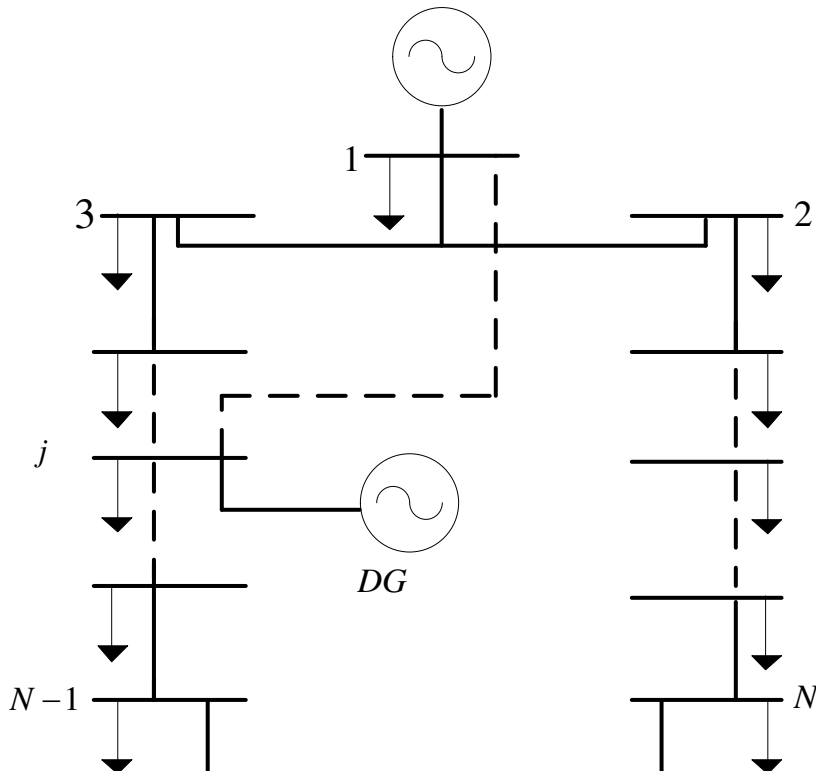
**Σχήμα 6.1:** Βροχοειδές δίκτυο διανομής  $N$  ζυγών.

Το δίκτυο έχει  $N$  ζυγούς και  $N$  φορτία. Θεωρείται ότι η ισχύς της εξωτερικής πηγής τροφοδότησης εγχέεται στο ζυγό 1, ο οποίος λαμβάνεται ως ζυγός αναφοράς. Ο πίνακας αγωγιμοτήτων των ζυγών του αρχικού συστήματος, διαστάσεων  $N \times N$ , είναι :

$$Y_{bus}^0 = \begin{bmatrix} Y_{11}^0 & Y_{12}^0 & \dots & Y_{1(N-1)}^0 & Y_{1N}^0 \\ Y_{21}^0 & Y_{22}^0 & \dots & Y_{2(N-1)}^0 & Y_{2N}^0 \\ & & \dots & & \\ & & & \dots & \\ Y_{N1}^0 & Y_{N2}^0 & \dots & Y_{N(N-1)}^0 & Y_{NN}^0 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

### 6.2.1 Κατασκευή νέου πίνακα αγωγιμοτήτων

Έστω, τώρα, ότι εισάγεται στο δίκτυο μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, DG, μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στο ζυγό  $j$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Στόχος είναι η εύρεση του ζυγού του δικτύου, που όταν συνδεθεί σε αυτόν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενεργού ισχύος. Σημειώνεται, ότι στην ανάλυση που πραγματοποιείται δε λαμβάνεται υπόψη η παραγόμενη ισχύς της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, καθώς, όπως θα φανεί, ο εντοπισμός του βέλτιστου ζυγού γίνεται με βάση την τοπολογία και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δικτύου.



**Σχήμα 6.2:** Βροχοειδές δίκτυο διανομής  $N$  ζυγών, μετά την προσθήκη μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, DG, στο ζυγό  $j$ .

Υποτίθεται, στα πλαίσια της ανάλυσης, ότι ο ζυγός αναφοράς 1 και ο ζυγός τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $j$  συνδέονται μεταξύ τους μέσω φανταστικής γραμμής, με αποτέλεσμα να συγχωνεύονται οι ζυγοί 1 και  $j$  σε έναν ενιαίο ζυγό. Εικονικά, δηλαδή, εξαλείφεται από το δίκτυο ο ζυγός  $j$ , και όλες οι συνδέσεις του με τους άλλους ζυγούς μετατρέπονται σε συνδέσεις με τον νέο ενιαίο ζυγό 1. Αυτό έχει αντίκτυπο στην αρίθμηση των ζυγών του δικτύου και στο περιεχόμενο και στις διαστάσεις του πίνακα αγωγιμοτήτων των ζυγών. Σημειώνεται ότι στο ζυγό αναφοράς εγγέεται όλη η ισχύς της εξωτερικής πηγής τροφοδότησης και στο ζυγό τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής εγγέεται όλη η παραγόμενη ισχύς της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Συνεπώς, αυτή η υπόθεση γίνεται στα πλαίσια της κατασκευής συγκεκριμένης αντικειμενικής συνάρτησης προκειμένου να διερευνηθεί η ταυτόχρονη επίδραση των δύο διαφορετικών πηγών ισχύος στην τροφοδότηση των φορτίων του συστήματος.

Αν  $(bus\ number)_i^0$  είναι ο αριθμός του τυχαίου ζυγού  $i$  του δικτύου πριν την προσθήκη της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, τότε η καινούρια αρίθμηση διαμορφώνεται ως εξής :

$$bus\ number_i = \begin{cases} (bus\ number)_i^0 & , \quad i < j \\ (bus\ number)_i^0 - 1 & , \quad i > j \end{cases} \quad (6.2)$$

Ο νέος πίνακας αγωγιμοτήτων των ζυγών, μετά τη συγχώνευση των ζυγών 1 και  $j$ , έχει διαστάσεις  $(N-1) \times (N-1)$  και διαμορφώνεται ως εξής :

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1k} & \dots & Y_{1(N-1)} \\ & & & & & \\ & & & & & \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ik} & \dots & Y_{i(N-1)} \\ & & & & & \\ & & & & & \\ Y_{(N-1)1} & Y_{(N-1)2} & \dots & Y_{(N-1)k} & \dots & Y_{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

όπου τα στοιχεία του πίνακα, λαμβάνοντας υπόψη την καινούρια αρίθμηση (6.2) και το ότι οι συνδέσεις του ζυγού  $j$  με τους άλλους ζυγούς έχουν μετατραπεί σε συνδέσεις με τον νέο ενιαίο ζυγό 1, συμπληρώνονται ως εξής :

$$Y_{11} = Y_{11}^0 + Y_{jj}^0 + Y_{1j}^0 + Y_{j1}^0 \quad (6.4)$$

$$Y_{1k} = \begin{cases} Y_{1k}^0 + Y_{jk}^0 & , \quad k = 2, \dots, j-1 \\ Y_{1(k+1)}^0 + Y_{j(k+1)}^0 & , \quad k = j, \dots, N-1 \end{cases} \quad (6.5)$$

$$Y_{k1} = Y_{1k} \quad , \quad k = 2, \dots, N-1 \quad (6.6)$$

$$Y_{ik} = \begin{cases} Y_{ik}^0 & , \quad 2 \leq (i,k) \leq j-1 \\ Y_{i(k+1)}^0 & , \quad 2 \leq i \leq j-1, j \leq k \leq N-1 \\ Y_{(i+1)k}^0 & , \quad j \leq i \leq N-1, 2 \leq k \leq j-1 \\ Y_{(i+1)(k+1)}^0 & , \quad j \leq (i,k) \leq N-1 \end{cases} \quad (6.7)$$

Ο πίνακας σύνθετων αντιστάσεων των ζυγών του δικτύου, που προκύπτει με αντιστροφή του νέου πίνακα αγωγιμοτήτων (6.3), είναι :

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1(N-1)} \\ & & & & & \\ & Z_{i1} & Z_{i2} & \dots & Z_{ik} & \dots & Z_{i(N-1)} \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ Z_{(N-1)1} & Z_{(N-1)2} & \dots & Z_{(N-1)k} & \dots & Z_{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

### 6.2.2 Υπολογισμός νέου διανυσμάτος ισχύος

Η ισχύς των φορτίων του αρχικού συστήματος είναι :

$$S_L^0 = [S_{L1}^0, S_{L2}^0, \dots, S_{Li}^0, \dots, S_{LN}^0,] \Rightarrow \quad (6.9)$$

$$S_L^0 = [P_{L1}^0 + jQ_{L1}^0, P_{L2}^0 + jQ_{L2}^0, \dots, P_{Li}^0 + jQ_{Li}^0, \dots, P_{LN}^0 + jQ_{LN}^0]$$

όπου  $P_{Li}^0, Q_{Li}^0$  η ενεργός και η άεργος ισχύς αντίστοιχα του φορτίου του ζυγού  $i$ .

Η ισχύς παραγωγής στους ζυγούς του αρχικού συστήματος είναι :

$$S_G^0 = [S_{G1}^0, S_{G2}^0, \dots, S_{Gi}^0, \dots, S_{GN}^0,] \Rightarrow \quad (6.10)$$

$$S_G^0 = [P_{G1}^0 + jQ_{G1}^0, P_{G2}^0 + jQ_{G2}^0, \dots, P_{Gi}^0 + jQ_{Gi}^0, \dots, P_{GN}^0 + jQ_{GN}^0]$$

όπου  $P_{Gi}^0, Q_{Gi}^0$  η παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς αντίστοιχα στο ζυγό  $i$ .

Στα πλαίσια της αναλυτικής μεθόδου, αναπτύσσεται ένα νέο διάνυσμα ισχύος για τα φορτία του συστήματος ανάλογα με το είδος του κάθε ζυγού (αναφοράς, παραγωγής, φορτίου), το οποίο είναι :

$$S_L = [S_{L1}, S_{L2}, \dots, S_{Li}, \dots, S_{LN},] \Rightarrow \quad (6.11)$$

$$S_L = [P_{L1} + jQ_{L1}, P_{L2} + jQ_{L2}, \dots, P_{Li} + jQ_{Li}, \dots, P_{LN} + jQ_{LN}]$$

όπου

$$S_{Li} = \begin{cases} 0 + j0 & , \quad \text{ζυγός}_i = \text{ζυγός αναφοράς} \\ S_{Li}^0 & , \quad \text{ζυγός}_i = \text{ζυγός φορτίου} \\ \begin{cases} P_{Li}^0 - P_{Gi}^0 + j0 & , \quad P_{Li}^0 > P_{Gi}^0 \\ 0 & , \quad P_{Li}^0 \leq P_{Gi}^0 \end{cases} & , \quad \text{ζυγός}_i = \text{ζυγός παραγωγής} \end{cases} \quad (6.12)$$

Υποτίθεται ότι στο ζυγό αναφοράς, όπου τέθηκε  $S_{Li}=0$ , η ισχύς που καταναλώνει το φορτίο τροφοδοτείται απευθείας από την εξωτερική πηγή τροφοδότησης. Η ίδια υπόθεση ισχύει και την άεργο ισχύ που καταναλώνει το φορτίο στους ζυγούς παραγωγής, όπου τέθηκε  $Q_{Li} = 0$ .

### 6.2.3 Κατάστρωση αντικειμενικής συνάρτησης προς ελαχιστοποίηση

Η ισοδύναμη αντίσταση μεταξύ του ζυγού αναφοράς 1 και του τυχαίου ζυγού του δικτύου  $i$ , όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό  $j$  ( $j \neq 1$ ), είναι :

$$R_{li}(j) = \begin{cases} \operatorname{Re}(Z_{11} + Z_{ii} - 2 \cdot Z_{1i}) & , \quad i < j \\ \operatorname{Re}(Z_{11} + Z_{(i-1)(i-1)} - 2 \cdot Z_{1(i-1)}) & , \quad i > j \end{cases} \quad (6.13)$$

Με βάση, λοιπόν, τις σχέσεις (6.12) και (6.13), καταστρώνεται η αντικειμενική συνάρτηση, ως εξής :

$$obj\_function(j) = \sum_{i=1}^{j-1} R_{li}(j) \cdot |S_{Li}|^2 + \sum_{i=j+1}^N R_{li}(j) \cdot |S_{Li}|^2, \quad j = 2, \dots, N \quad (6.14)$$

Οι σχέσεις (6.13) και (6.14) τροποποιούνται, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό αναφοράς 1, ως εξής :

$$R_{li}(1) = \operatorname{Re}(Z_{11} + Z_{ii} - 2 \cdot Z_{1i}) \quad (6.15)$$

$$obj\_function(1) = \sum_{i=2}^N R_{li}(1) \cdot |S_{Li}|^2 \quad (6.16)$$

Σημειώνεται, ότι σε αυτήν την περίπτωση, ο πίνακας αγωγιμοτήτων και ο πίνακας σύνθετων αντιστάσεων των ζυγών παραμένει αμετάβλητος. Η πιθανότητα, βέβαια, ο ζυγός αναφοράς να αποτελεί το βέλτιστο ζυγό τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής είναι μηδαμινή, καθώς δεν έχει νόημα να εγχέεται στο ίδιο ζυγό η ισχύς της εξωτερικής πηγής τροφοδότησης και η ισχύς της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Ο βέλτιστος ζυγός τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής είναι εκείνος για τον οποίο η αντικειμενική συνάρτηση (6.14) ελαχιστοποιείται.

$$obj\_function(\text{ζυγός}_{optimal}) = \min(obj\_function(j)), \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (6.17)$$

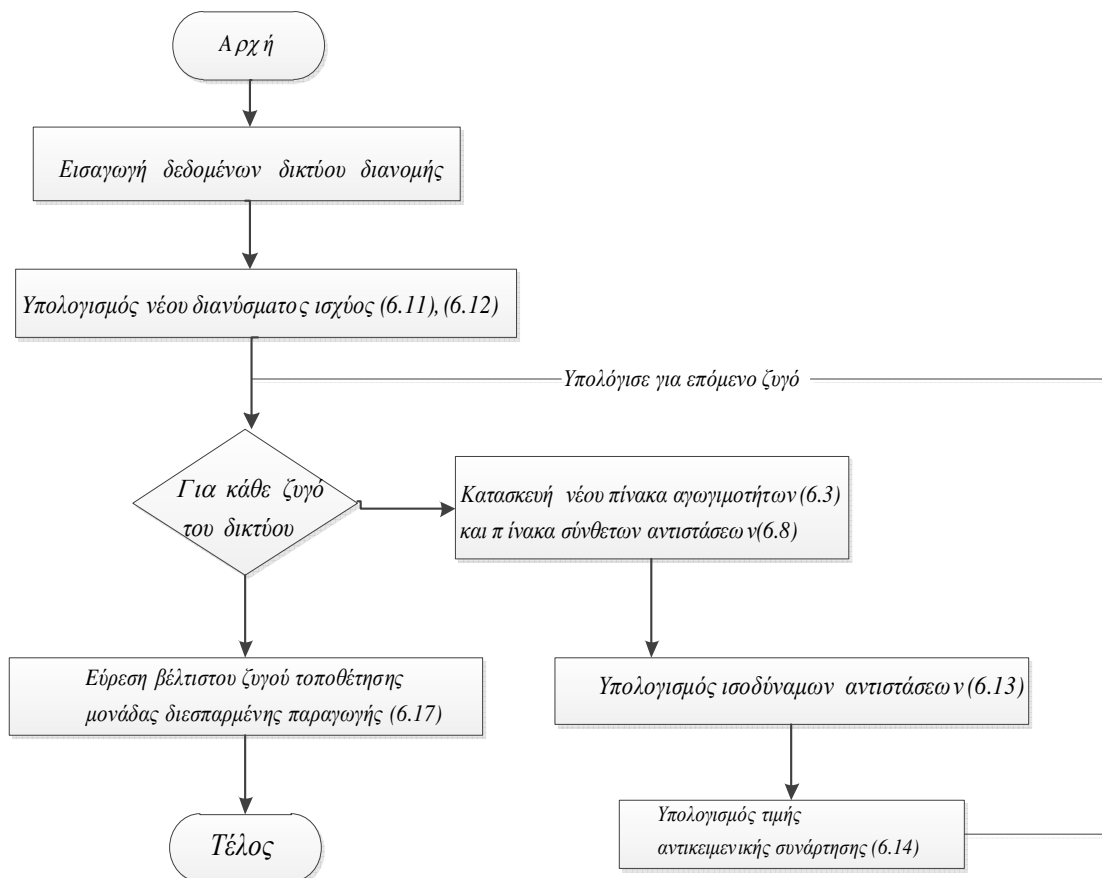
Η αναλυτική μέθοδος, λοιπόν, υποδεικνύει τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, αξιοποιώντας τα στοιχεία των ζυγών και των γραμμών του δικτύου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μέθοδος δεν περιλαμβάνει κάποιο επαναληπτικό αλγόριθμο, όπως τα προγράμματα ροής φορτίου, άρα, δεν υπάρχει κάποιο ζήτημα σύγκλισης και οι λύσεις μπορούν να επιτευχθούν πολύ γρήγορα. Πρακτικά, η σύνδεση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο βέλτιστο ζυγό, που προκύπτει από την αναλυτική μέθοδο, μπορεί να είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί εξαιτίας διαφόρων παραγόντων, όπως γεωγραφικών, οικονομικών, τεχνικών. Είναι, όμως, πολύ σημαντικό, για τους σχεδιαστές των συστημάτων, να γνωρίζουν ποια είναι η βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος. Σημειώνεται, τέλος, ότι η αναλυτική μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και σε δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αν είναι τεχνικά εφικτή η σύνδεση της εξεταζόμενης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ζυγούς υψηλής τάσης.

### 6.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

Τα βήματα για την υλοποίηση του αλγόριθμου εύρεσης του βέλτιστου ζυγού τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε βροχοειδή δίκτυα διανομής, με σκοπό την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος είναι τα ακόλουθα :

4. Εισάγονται τα στοιχεία των ζυγών και των γραμμών του εξεταζόμενου συστήματος.
5. Υπολογίζεται το νέο διάνυσμα ισχύος των φορτίων των ζυγών (6.11), σύμφωνα τη σχέση (6.12).
6. Για κάθε ζυγό του δικτύου, που αποτελεί πιθανή θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, κατασκευάζεται ο νέος πίνακας αγωγιμοτήτων και επακόλουθα ο νέος πίνακας σύνθετων αντιστάσεων των ζυγών από τις σχέσεις (6.3) και (6.8) αντίστοιχα. Ακολούθως υπολογίζονται οι ισοδύναμες αντιστάσεις από τη σχέση (6.13) και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης από την (6.14).
7. Επιλέγεται ως βέλτιστη θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής ο ζυγός εκείνος που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση, σύμφωνα με την (6.17).

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος σε μορφή διαγράμματος ροής.



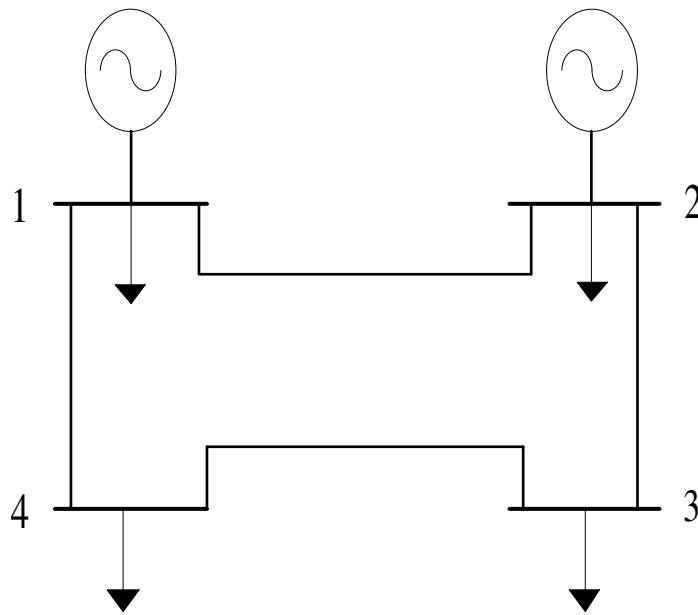
**Σχήμα 6.3:** Διάγραμμα ροής μεθόδου υπολογισμού βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε βροχοειδές δίκτυο διανομής.



## 6.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΕ ΒΡΟΧΟΕΙΔΕΣ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 4 ΖΥΓΩΝ

### 6.4.1 Δεδομένα συστήματος

Για την πλήρη κατανόηση της αναλυτικής μεθόδου θα παρουσιαστεί ένα πλήρες αριθμητικό παράδειγμα εκτέλεσης του αλγορίθμου σε ένα μικρό βροχοειδές δίκτυο διανομής 4 ζυγών, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Το δίκτυο αποτελείται από 4 ζυγούς και 4 γραμμές. Ο ζυγός 1 είναι ζυγός ταλάντωσης, ο ζυγός 2 είναι ζυγός παραγωγής, ενώ οι ζυγοί 3 και 4 είναι ζυγοί φορτίου. Η βασική τάση είναι τα  $20kV$ . Τα δεδομένα των γραμμών και των ζυγών παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.1 και 6.2 αντίστοιχα.



Σχήμα 6.4: Βροχοειδές δίκτυο διανομής 4 ζυγών.

Πίνακας 6.1: Στοιχεία γραμμών του δικτύου 4 ζυγών.

Από ζυγό	Προς ζυγό	R (p.u.)	X (p.u.)	1/2 B (p.u.)
1	2	0.22	0.32	0
1	4	0.14	0.4	0
2	3	0.17	0.42	0
3	4	0.25	0.5	0

Πίνακας 6.2: Στοιχεία ζυγών του δικτύου 4 ζυγών.

Αρ. ζυγού	είδος ζυγού	Φορτίο		Παραγωγή	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	αναφοράς	6	0	0	0
2	παραγωγής	3	0.5	5	0
3	φορτίου	8.5	1.5	0	0
4	φορτίου	4	1	0	0

Σύμφωνα με τα δεδομένα των γραμμών, ο πίνακας αγωγιμοτήτων ( $p.u.$ ) του αρχικού συστήματος, είναι :

$$Y_{bus}^0 = \begin{bmatrix} 2.2384 - j4.3492 & -1.4589 + j2.1220 & 0 & -0.7795 + j2.2272 \\ -1.4589 + j2.122 & 2.2869 - j4.1678 & -0.8281 + j2.0458 & 0 \\ 0 & -0.8281 + j2.0458 & 1.6281 - j3.6458 & -0.8 + j1.6 \\ -0.7795 + j2.2272 & 0 & -0.8 + j1.6 & 1.5795 - j3.8272 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

#### 6.4.2 Υπολογισμός νέου διανύσματος ισχύος

Η νέα ισχύς των φορτίων υπολογίζεται σύμφωνα με την (6.12), ανάλογα με το είδος των ζυγών. Οπότε :

$$\text{ζυγός 1 (αναφοράς)} : S_{L1} = (0 + j0) MVA$$

$$\text{ζυγός 2 (παραγωγής)} : S_{L2} = (0 + j0) MVA, \text{ αφού } P_{L2} = 3MW < P_{G2} = 5MW$$

$$\text{ζυγός 3 (φορτίου)} : S_{L3} = S_{L3}^0 = (8.5 + j1.5) MVA$$

$$\text{ζυγός 4 (φορτίου)} : S_{L4} = S_{L4}^0 = (4 + j1) MVA$$

Άρα, το νέο διάνυσμα ισχύος των φορτίων του συστήματος είναι :

$$S_L = [S_{L1} \quad S_{L2} \quad S_{L3} \quad S_{L4}] \Rightarrow$$

$$S_L = [0 + j0 \quad 0 + j0 \quad 8.5 + j1.5 \quad 4 + j1] (MVA) \quad (6.19)$$

### 6.4.3 Υπολογισμός τιμών αντικειμενικής συνάρτησης

Για κάθε πιθανό ζυγό τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής θα υπολογιστεί η αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, ακολουθώντας τα βήματα υλοποίησης του αλγορίθμου.

#### 6.4.3.1 Τοποθέτηση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 1

Όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό αναφοράς του συστήματος, τότε ο πίνακας αγωγιμοτήτων των ζυγών (6.18) παραμένει αμετάβλητος. Ο πίνακας σύνθετων αντιστάσεων των ζυγών (*p.u.*) προκύπτει με αντιστροφή του πίνακα αγωγιμοτήτων (6.18), ως εξής :

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} = \begin{bmatrix} 0.0583 + j0.1154 & -0.0214 - j0.0137 & -0.037 - j0.0759 & 0.0001 - j0.0258 \\ -0.0214 - j0.0137 & 0.0618 + j0.117 & -0.004 - j0.0281 & -0.0364 - j0.0752 \\ -0.037 - j0.0759 & -0.004 - j0.0281 & 0.0642 + j0.1396 & -0.0232 - j0.0357 \\ 0.0001 - j0.0258 & -0.0364 - j0.0752 & -0.0232 - j0.0357 & 0.0595 + j0.1367 \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

Οι ισοδύναμες αντιστάσεις μεταξύ του ζυγού αναφοράς 1 και των ζυγών του δικτύου, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 1, σύμφωνα με την (6.15), είναι :

$$\begin{aligned} R_{12}(1) &= \operatorname{Re}(Z_{11} + Z_{22} - 2 \cdot Z_{12}) \\ &= \operatorname{Re}(0.0583 + j0.1154 + 0.0618 + j0.117 - 2 \cdot (-0.0214 - j0.0137)) \\ &= \operatorname{Re}(0.1628 + j0.2598) = 0.1628 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{13}(1) &= \operatorname{Re}(Z_{11} + Z_{33} - 2 \cdot Z_{13}) \\ &= \operatorname{Re}(0.0583 + j0.1154 + 0.0642 + j0.1396 - 2 \cdot (-0.037 - j0.0759)) \\ &= \operatorname{Re}(0.1965 + j0.4068) = 0.1965 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{14}(1) &= \operatorname{Re}(Z_{11} + Z_{44} - 2 \cdot Z_{14}) \\ &= \operatorname{Re}(0.0583 + j0.1154 + 0.0595 + j0.1367 - 2 \cdot (-0.0001 - j0.0258)) \\ &= \operatorname{Re}(0.1175 + j0.3037) = 0.1175 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης από τη σχέση (6.16). Σημειώνεται, ότι η μόνη σκοπιμότητα της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η σύγκριση των τιμών της, ώστε να προσδιοριστεί η ελάχιστη τιμή που αντιστοιχεί στο βέλτιστο ζυγό τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Άρα, δεν έχει σημασία σε τι μονάδες είναι εκφρασμένες οι ποσότητες  $R_i$  και  $|S_{Li}|$ , αρκεί να είναι οι ίδιες στον υπολογισμό όλων των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης. Στην προκειμένη περίπτωση, χρησιμοποιούνται τα (*p.u.*) για τις ισοδύναμες αντιστάσεις και τα (*MVA*) για τη φαινόμενη ισχύ.

$$\begin{aligned}
obj\_function(I) &= \sum_{i=2}^4 R_{Li} \cdot |S_{Li}|^2 \\
&= 0.1628 \cdot |0 + j0|^2 + 0.1965 \cdot |8.5 + j1.5|^2 + 0.1175 \cdot |4 + j1|^2 \\
&= 0.1628 \cdot 0 + 0.1965 \cdot 74.5 + 0.1175 \cdot 17 = 16.6367
\end{aligned} \tag{6.21}$$

#### 6.4.3.2 Τοποθέτηση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 2

Έστω ότι η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 2 του δικτύου. Με βάση την ανάλυση που έγινε στην Ενότητα 6.2.1, ο ζυγός 2 συγχωνεύεται με το ζυγό αναφοράς διατηρώντας τις συνδέσεις του με τους άλλους ζυγούς, και συνεπώς ο ζυγός 3 γίνεται ζυγός 2 και ο ζυγός 4 γίνεται ζυγός 3. Κατασκευάζεται ο νέος πίνακας αγωγιμοτήτων των ζυγών, όπου τα στοιχεία του συμπληρώνονται σύμφωνα με τις σχέσεις (6.4)-(6.7). Άρα :

$$\begin{aligned}
Y_{11} &= Y_{11}^0 + Y_{22}^0 + Y_{12}^0 + Y_{21}^0 = 2.2384 - j4.3492 + 2.2869 - j4.1678 - 1.4589 \\
&+ j2.122 - 1.4589 + j2.122 = 1.6076 - j4.2730 \text{ p.u.}
\end{aligned}$$

$$Y_{12} = Y_{13}^0 + Y_{23}^0 = 0 - 0.8281 + j2.0458 = -0.8281 + j2.0458 \text{ p.u.}$$

$$Y_{13} = Y_{14}^0 + Y_{24}^0 = -0.7795 + j2.2272 + 0 = -0.7795 + j2.2272 \text{ p.u.}$$

$$Y_{21} = Y_{12} = -0.8281 + j2.0458 \text{ p.u.}$$

$$Y_{22} = Y_{33}^0 = 1.6281 - j3.6458 \text{ p.u.}$$

$$Y_{23} = Y_{34}^0 = -0.8 + j1.6 \text{ p.u.}$$

$$Y_{31} = Y_{13} = -0.7795 + j2.2272 \text{ p.u.}$$

$$Y_{32} = Y_{43}^0 = -0.8 + j1.6 \text{ p.u.}$$

$$Y_{33} = Y_{44}^0 = 1.5795 - j3.8272 \text{ p.u.}$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 1.6076 - j4.273 & -0.8281 + j2.0458 & -0.7795 + j2.2272 \\ -0.8281 + j2.0458 & 1.6281 - j3.6458 & -0.8 + j1.6 \\ -0.7795 + j2.2272 & -0.8 + j1.6 & 1.5795 - j3.8272 \end{bmatrix} \tag{6.22}$$

Ο νέος πίνακας σύνθετων αντιστάσεων των ζυγών ( $p.u.$ ), που προκύπτει με αντιστροφή του πίνακα (6.22), είναι :

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} = \begin{bmatrix} 0.0343 + j0.0911 & -0.0192 - j0.0467 & -0.0151 - j0.0444 \\ -0.0192 - j0.0467 & 0.0458 + j0.1018 & -0.0266 + j0.0551 \\ -0.0151 - j0.0444 & -0.0266 - j0.0551 & 0.0417 + j0.0995 \end{bmatrix} \tag{6.23}$$

Οι ισοδύναμες αντιστάσεις μεταξύ του ζυγού αναφοράς 1 και των ζυγών του δικτύου, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 2, υπολογίζονται από την (6.13), χρησιμοποιώντας τις τιμές του πίνακα σύνθετων αντιστάσεων (6.23).

$$R_{11}(2) = \text{Re}(Z_{11} + Z_{11} - 2 \cdot Z_{11}) = 0 \text{ p.u.}$$

$$\begin{aligned} R_{13}(2) &= \text{Re}(Z_{11} + Z_{22} - 2 \cdot Z_{12}) \\ &= \text{Re}(0.0343 + j0.0911 + 0.0458 + j0.1018 - 2 \cdot (-0.0192 - j0.0467)) \\ &= \text{Re}(0.1185 + j0.2864) = 0.1185 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{14}(2) &= \text{Re}(Z_{11} + Z_{33} - 2 \cdot Z_{13}) \\ &= \text{Re}(0.0343 + j0.0911 + 0.0417 + j0.0995 - 2 \cdot (-0.0151 - j0.0444)) \\ &= \text{Re}(0.1063 + j0.2794) = 0.1063 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογίζεται από τη σχέση (6.14), και είναι :

$$\begin{aligned} obj\_function(2) &= \sum_{i=1}^1 R_{1i} \cdot |S_{Li}|^2 + \sum_{i=3}^4 R_{1i} \cdot |S_{Li}|^2 \\ &= 0 \cdot |0 + j0|^2 + 0.1185 \cdot |8.5 + j1.5|^2 + 0.1063 \cdot |4 + j1|^2 \\ &= 0 + 0.1185 \cdot 74.5 + 0.1063 \cdot 17 = 10.6355 \end{aligned} \quad (6.24)$$

### 6.4.3.3 Τοποθέτηση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 3

Έστω, τώρα, ότι η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 3 του δικτύου. Ο ζυγός 3 συγχωνεύεται με το ζυγό αναφοράς διατηρώντας τις συνδέσεις του με τους άλλους ζυγούς. Η μόνη αλλαγή στην αρίθμηση των ζυγών είναι ότι ο ζυγός 4 γίνεται ζυγός 3. Κατασκευάζεται ο νέος πίνακας αγωγιμοτήτων των ζυγών (p.u.), όπου τα στοιχεία του συμπληρώνονται σύμφωνα με τις σχέσεις (6.4)-(6.7). Οπότε :

$$\begin{aligned} Y_{11} &= Y_{11}^0 + Y_{33}^0 + Y_{13}^0 + Y_{31}^0 = 2.2384 - j4.3492 + 1.6281 - j3.6458 + 0 + 0 \\ &= 3.8665 - j7.995 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$Y_{12} = Y_{12}^0 + Y_{32}^0 = -1.4589 + j2.122 - 0.8281 + j2.0458 = -2.2869 + j4.1678 \text{ p.u.}$$

$$Y_{13} = Y_{14}^0 + Y_{34}^0 = -0.7795 + j2.2272 - 0.8 + j1.6 = -1.5795 + j3.8272 \text{ p.u.}$$

$$Y_{21} = Y_{12} = -2.2869 + j4.1678 \text{ p.u.}$$

$$Y_{22} = Y_{22}^0 = 2.2869 - j4.1678 \text{ p.u.}$$

$$Y_{23} = Y_{24}^0 = 0 \text{ p.u.}$$

$$Y_{31} = Y_{13} = -1.5795 + j3.8272 \text{ p.u.}$$

$$Y_{32} = Y_{42}^0 = 0 \text{ p.u.}$$

$$Y_{33} = Y_{44}^0 = 1.5795 - j3.8272 \text{ p.u.}$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 3.8665 - j7.995 & -2.2869 + j4.1678 & -1.5795 + j3.8272 \\ -2.2869 + j4.1678 & 2.2869 - 4.1678 & 0 \\ -1.5795 + j3.8272 & 0 & 1.5795 - j3.8272 \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

Ο νέος πίνακας σύνθετων αντιστάσεων των ζυγών ( $p.u.$ ), που προκύπτει με αντιστροφή του πίνακα (6.25), είναι :

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} = \begin{bmatrix} 0.0215 + j0.0453 & -0.0122 - j0.0162 & -0.0092 - j0.0291 \\ -0.0122 - j0.0162 & 0.0552 + j0.1068 & -0.043 - j0.0906 \\ -0.0092 - j0.0291 & -0.0430 - j0.0906 & 0.0522 + j0.1197 \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

Οι ισοδύναμες αντιστάσεις μεταξύ του ζυγού αναφοράς 1 και των ζυγών του δικτύου, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 3, υπολογίζονται από την (6.13), χρησιμοποιώντας τις τιμές του πίνακα σύνθετων αντιστάσεων (6.26).

$$R_{11}(3) = \text{Re}(Z_{11} + Z_{11} - 2 \cdot Z_{11}) = 0 \text{ p.u.}$$

$$\begin{aligned} R_{12}(3) &= \text{Re}(Z_{11} + Z_{22} - 2 \cdot Z_{12}) \\ &= \text{Re}(0.0215 + j0.0453 + 0.0552 + j0.1068 - 2 \cdot (-0.0122 - j0.0162)) \\ &= \text{Re}(0.1012 + j0.1844) = 0.1012 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{14}(3) &= \text{Re}(Z_{11} + Z_{33} - 2 \cdot Z_{13}) \\ &= \text{Re}(0.0215 + j0.0911 + 0.0522 + j0.1197 - 2 \cdot (-0.0092 - j0.0291)) \\ &= \text{Re}(0.0921 + j0.2233) = 0.0921 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογίζεται από τη σχέση (6.14), και είναι :

$$\begin{aligned} obj\_function(3) &= \sum_{i=1}^2 R_{1i} \cdot |S_{Li}|^2 + \sum_{i=4}^4 R_{1i} \cdot |S_{Li}|^2 \\ &= 0 \cdot |0 + j0|^2 + 0.1012 \cdot |0 + j0|^2 + 0.0921 \cdot |4 + j1|^2 \\ &= 0 + 0.1012 \cdot 0 + 0.0921 \cdot 17 = 1.5657 \end{aligned} \quad (6.27)$$

#### 6.4.3.4 Τοποθέτηση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 4

Έστω, τώρα, ότι η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 4 του δικτύου. Ο ζυγός 4 συγχωνεύεται με το ζυγό αναφοράς διατηρώντας τις συνδέσεις του με τους άλλους ζυγούς. Η αρίθμηση των υπόλοιπων ζυγών παραμένει ως έχει. Κατασκευάζεται ο νέος πίνακας αγωγιμοτήτων των ζυγών ( $p.u.$ ), όπου τα στοιχεία του συμπληρώνονται σύμφωνα με τις σχέσεις (6.4)-(6.7). Οπότε :

$$Y_{11} = Y_{11}^0 + Y_{44}^0 + Y_{14}^0 + Y_{41}^0 = 2.2384 - j4.3492 + 1.5795 - j3.8272 - 0.7795 + j2.2272 - 0.7795 + j2.2272 = 2.2589 - j3.722 \text{ p.u.}$$

$$Y_{12} = Y_{12}^0 + Y_{42}^0 = -1.4589 + j2.122 + 0 = -1.4589 + j2.122 \text{ p.u.}$$

$$Y_{13} = Y_{13}^0 + Y_{43}^0 = 0 - 0.8 + j1.6 = -0.8 + j1.6 \text{ p.u.}$$

$$Y_{21} = Y_{12} = -1.4589 + j2.122 \text{ p.u.}$$

$$Y_{22} = Y_{22}^0 = 2.2869 - j4.1678 \text{ p.u.}$$

$$Y_{23} = Y_{23}^0 = -0.8281 + j2.0458 \text{ p.u.}$$

$$Y_{31} = Y_{13} = -0.8 + j1.6 \text{ p.u.}$$

$$Y_{32} = Y_{32}^0 = -0.8281 + j2.0458 \text{ p.u.}$$

$$Y_{33} = Y_{33}^0 = 1.6281 - j3.6458 \text{ p.u.}$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 2.2589 - j3.722 & -1.4589 + j2.122 & -0.8 + j1.6 \\ -1.4589 + j2.122 & 2.2869 - j4.1678 & -0.8281 + j2.0458 \\ -0.8 + j1.6 & -0.8281 + j2.0458 & 1.6281 - j3.6458 \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

Ο νέος πίνακας σύνθετων αντιστάσεων των ζυγών ( $p.u.$ ), που προκύπτει με αντιστροφή του πίνακα (6.28), είναι :

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} = \begin{bmatrix} 0.0526 + j0.0885 & -0.0256 - j0.0344 & -0.027 - j0.0541 \\ -0.0256 - j0.0344 & 0.0443 + j0.0821 & -0.0187 - j0.0477 \\ -0.027 - j0.0541 & -0.0187 - j0.0477 & 0.0458 + j0.1018 \end{bmatrix} \quad (6.29)$$

Οι ισοδύναμες αντιστάσεις μεταξύ του ζυγού αναφοράς 1 και των ζυγών του δικτύου, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 4, υπολογίζονται από την (6.13), χρησιμοποιώντας τις τιμές του πίνακα σύνθετων αντιστάσεων (6.29).

$$R_{11}(4) = \operatorname{Re}(Z_{11} + Z_{11} - 2 \cdot Z_{11}) = 0 \text{ p.u.}$$

$$\begin{aligned} R_{12}(4) &= \operatorname{Re}(Z_{11} + Z_{22} - 2 \cdot Z_{12}) \\ &= \operatorname{Re}(0.0526 + j0.0885 + 0.0443 + j0.0821 - 2 \cdot (-0.0256 - j0.0344)) \\ &= \operatorname{Re}(0.1481 + j0.2393) = 0.1481 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{13}(4) &= \operatorname{Re}(Z_{11} + Z_{33} - 2 \cdot Z_{13}) \\ &= \operatorname{Re}(0.0526 + j0.0885 + 0.0458 + j0.1018 - 2 \cdot (-0.027 - j0.0541)) \\ &= \operatorname{Re}(0.1524 + j0.2984) = 0.1524 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογίζεται από τη σχέση (6.14), και είναι :

$$\begin{aligned} obj\_function(4) &= \sum_{i=1}^3 R_{ii} \cdot |S_{Li}|^2 \\ &= 0 \cdot |0 + j0|^2 + 0.1012 \cdot |0 + j0|^2 + 0.0921 \cdot |8 + j1.5|^2 \\ &= 0 + 0.1482 \cdot 0 + 0.1524 \cdot 74.5 = 11.3538 \end{aligned} \quad (6.30)$$

#### 6.4.4 Εύρεση βέλτιστης θέσης εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής

Συγκεντρωτικά, οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, όπως υπολογίστηκαν στο αναλυτικό παράδειγμα, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.

**Πίνακας 6.3:** Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης.

Αριθμός ζυγού	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης
1	16.6367
2	10.6355
3	1.5657
4	11.3538

Όπως φαίνεται, λοιπόν, η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την ελάχιστη τιμή της, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 3 του δικτύου διανομής, που είναι ζυγός φορτίου. Άρα, ο ζυγός 3 είναι ο βέλτιστος ζυγός τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, και μάλιστα με αξιοσημείωτη διαφορά από τον επόμενο καλύτερο ζυγό, που είναι ο ζυγός 2. Το αποτέλεσμα κρίνεται λογικό, αφού το φορτίο του ζυγού 3 είναι το μεγαλύτερο του συστήματος, και η τροφοδότηση του απαιτεί μεγάλες ροές ενεργού ισχύος στις γραμμές του δικτύου και κατά συνέπεια προκαλεί απώλειες ενεργού ισχύος, οι οποίες όμως ελαχιστοποιούνται όταν ένα ή όλο το μέρος του φορτίου καλύπτεται απευθείας από τη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής που συνδέεται στο ζυγό 3.



#### 6.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] J. A. P. Lopes, "Integration of dispersed generation on distribution networks-impact studies," in Proc. 2002 *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 1, pp. 323-328, Jan. 2002.
- [6.2] G. Celli, F. Pilo, G. Pisano, V. Allegranza, R. Cicoria and A. Iaria, " Meshed vs radial MV distribution network in presence of large amount of DG," *IEEE Power System Conference and Exposition*, vol. 2, pp. 709-714, Oct. 2004.
- [6.3] C. Wang and M. H. Nehrir, "Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems," *IEEE Trans. Power systems*, vol. 19, no. 4, pp. 2068-2076, Nov. 2004.



## **ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

### **7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή του λογισμικού που αναπτύχθηκε για την εύρεση της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικά και βροχοειδή δίκτυα διανομής, ώστε να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος. Το λογισμικό υλοποιήθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού της MATLAB, ενώ για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε γραφικό περιβάλλον (GUIDE - Graphical User Interface Design Environment).

### **7.2 ΤΟ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MATLAB**

Η MATLAB είναι ένα σύγχρονο ολοκληρωμένο μαθηματικό λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιείται σε πανεπιστημιακά μαθήματα αλλά και σε ερευνητικές και άλλες εφαρμογές με επιστημονικούς υπολογισμούς. Το όνομά της προέρχεται από τα αρχικά γράμματα των λέξεων MATtrix LABoratory, καθώς αποθηκεύει και κάνει τις πράξεις με βάση την άλγεβρα πινάκων. Η MATLAB είναι ένα διαδραστικό πρόγραμμα για αριθμητικούς υπολογισμούς με δυνατότητες προγραμματισμού, που το καθιστούν ένα ισχυρό και χρήσιμο εργαλείο στις μαθηματικές και φυσικές επιστήμες.

Όπως υποδηλώνεται και από το όνομά της, η MATLAB είναι ειδικά σχεδιασμένη για υπολογισμούς με πίνακες, όπως η επίλυση γραμμικών συστημάτων, η εύρεση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων, η αντιστροφή τετραγωνικών πινάκων κ.α. Επιπλέον το πακέτο αυτό είναι εφοδιασμένο με πολλές επιλογές για την κατασκευή γραφικών παραστάσεων και περιλαμβάνει προγράμματα γραμμένα στη δική του γλώσσα προγραμματισμού για την επίλυση άλλων προβλημάτων όπως η εύρεση των ριζών μη γραμμικής εξίσωσης, η επίλυση μη γραμμικών συστημάτων, η επίλυση προβλημάτων αρχικών τιμών με συνήθεις διαφορικές εξισώσεις κ.α.

Η γλώσσα προγραμματισμού της MATLAB δίνει την ευχέρεια στο χρήστη να το επεκτείνει με δικά του προγράμματα. Αξίζει να σημειωθεί πως η MATLAB είναι σχεδιασμένη για την αριθμητική επίλυση προβλημάτων σε αριθμητική πεπερασμένης ακρίβειας (finite-precision arithmetic), δηλαδή δεν βρίσκει την ακριβή αλλά μια προσεγγιστική λύση ενός προβλήματος. Αυτή είναι και η βασική της διαφορά από τα συστήματα συμβολικών υπολογισμών όπως η Maple και το Mathematica [7.1].

Μερικά από τα κυριότερα χαρακτηριστικά της MATLAB είναι τα εξής:

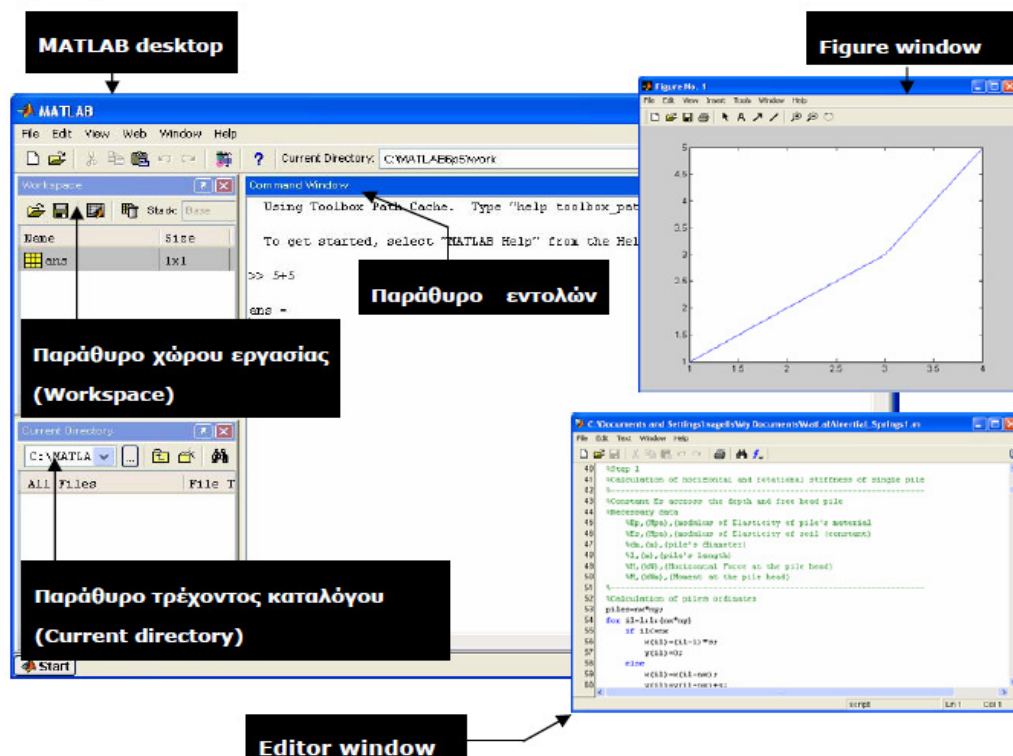
- Προγραμματισμός σε γλώσσα scripting που μοιάζει πολύ με τη γλώσσα C. Τα αρχεία script έχουν κατάληξη \*.m.
- Δυνατότητα δημιουργίας αρχείων exe με χρήση compiler.

- Εύκολη διαχείριση πινάκων (matrices) και διανυσμάτων (vectors).
- Ολοκληρωμένο περιβάλλον editor/debugger (medit.exe). Καλείται από το κεντρικό παράθυρο της MATLAB όταν ανοίγεται ή δημιουργείται ένα νέο αρχείο, μπορεί όμως να εκτελεστεί και ως ανεξάρτητο πρόγραμμα.
- Ποικίλες δυνατότητες δημιουργίας γραφικών παραστάσεων 2 και 3 διαστάσεων εύκολα και γρήγορα. Προχωρημένες δυνατότητες όπως 3-D φωτισμός, αλλαγή οπτικής γωνίας, δημιουργία εικονοσειρών κ.α.
- Γραφικός προγραμματισμός. Δυνατότητα σχεδιασμού παραθύρων, κουμπιών, γραφικών μενού κ.α. Πλήρης γκάμα επιλογών για σχεδιασμό γραφικών διεπιφανειών χρήστη (Graphical User Interfaces ).
- Εξαιρετικό εργαλείο βοήθειας Help. Το εργαλείο Help της MATLAB είναι πλήρες, λεπτομερές, εύχρηστο και εύκολο στην αναζήτηση της πληροφορίας που χρειάζεται ο χρήστης, ενώ περιέχει παραδείγματα και demos.

### 7.2.1 Το περιβάλλον της MATLAB

Η MATLAB υποστηρίζει όλα σχεδόν τα διατιθέμενα λειτουργικά συστήματα. Για την ανάπτυξη του λογισμικού της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 7.11.0.584(R2010b) σε περιβάλλον Windows 7 64bit. Εκτός από την πλατφόρμα των Windows, μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες πλατφόρμες λειτουργικών συστημάτων, όπως το UNIX, Sun Solaris, Linux, και Mac OS 10.3.

Σε όλα, λοιπόν, τα παραπάνω συστήματα, η MATLAB λειτουργεί μέσω τριών βασικών παραθύρων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1.



Σχήμα 7.1: Το περιβάλλον της MATLAB.

## 1. Επιφάνεια εργασίας της MATLAB (matlab desktop)

Η επιφάνεια εργασίας της MATLAB είναι το παράθυρο, το οποίο συναντά ο χρήστης με την εκκίνηση του προγράμματος, και αποτελείται από τα εξής επιμέρους υπο-παράθυρα.

- Παράθυρο εντολών (Command Window) : Αυτό είναι το βασικό παράθυρο. Χαρακτηρίζεται από το σύμβολο προτροπής ( >>, MATLAB, command prompt). Το σύνολο των εντολών, συμπεριλαμβανομένων και των εντολών που αναπτύσσει ο ίδιος ο χρήστης, πληκτρολογούνται στο παράθυρο εντολών, πάντα με τη χρήση του συμβόλου προτροπής μπροστά από κάθε εντολή. Επίσης, στο τμήμα αυτό της επιφάνειας εργασίας της MATLAB, πραγματοποιείται η εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων για μια εφαρμογή, καθώς χρησιμεύει και για την εξαγωγή των επιζητούμενων αποτελεσμάτων.
- Παράθυρο τρέχοντος καταλόγου (Current Directory) : Είναι το σημείο της επιφάνειας εργασίας της MATLAB, όπου αναγράφονται το σύνολο των αρχείων, τα οποία είναι αποθηκευμένα στον τρέχοντα κατάλογο του συστήματος. Παρέχεται η δυνατότητα πλοήγησης μέσα σε αυτό, όπως επίσης με τη χρήση του ποντικιού είναι δυνατή η εκτέλεση διάφορων επιλογών, οι οποίες σχετίζονται με το αρχείο (μετονομασία αρχείου, διαγραφή αρχείου, εκτέλεση m-αρχείων).
- Παράθυρο χώρου εργασίας (Workspace) : Στο παράθυρο αυτό, απεικονίζονται όλες οι μεταβλητές, οι οποίες εισάγονται και χρησιμοποιούνται στο παράθυρο εντολής. Παρέχονται, επίσης, πληροφορίες για το μέγεθος και τον τύπο της κάθε μεταβλητής. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει την τιμή οποιασδήποτε μεταβλητής στο παράθυρο εντολών, πληκτρολογώντας απλώς το όνομά της. Στις τελευταίες εκδόσεις της MATLAB, προσφέρεται η δυνατότητα για κάθε μεταβλητή, η οποία καταγράφεται στο παράθυρο του χώρου εργασίας, να αναπαρίσταται και μέσω γραφήματος.
- Παράθυρο ιστορικού εντολών (Command History) : Το σύνολο των εντολών, οι οποίες πληκτρολογούνται στο παράθυρο εντολών, μετά από κάθε σύμβολο προτροπής, καταγράφονται στο παρόν παράθυρο ιστορικού εντολών. Στο παράθυρο αυτό υπάρχουν καταχωρημένες εντολές, οι οποίες έχουν εκτελεστεί στο πλαίσιο πολυσύνθετων τμημάτων, ακόμα και μέρες πριν από την τελευταία εισαγωγή στο σύστημα. Παρέχεται η δυνατότητα να επιλεγεί από αυτό το παράθυρο μια επιθυμητή εντολή και στη συνέχεια να εκτελεστεί στο παράθυρο εντολών, κάνοντας διπλό κλικ με το ποντίκι πάνω στην εντολή αυτή.

## 2. Παράθυρο γραφημάτων (Figure Window)

Το αποτέλεσμα από όλες τις σχετικές με τα γραφήματα εντολές, οι οποίες έχουν εκτελεστεί στο παράθυρο εντολών, παρέχονται από το παρόν, ξεχωριστό από τα υπόλοιπα, παράθυρο. Από το παράθυρο των γραφημάτων, είναι δυνατή η επεξεργασία και ο χειρισμός των γραφημάτων.

## 3. Παράθυρο σύνταξης (Editor Window)

Είναι το παράθυρο στο οποίο ο χρήστης μπορεί να αναπτύξει, να επεξεργαστεί, να αποθηκεύσει τα δικά του αρχεία εντολών. Αν και είναι δυνατό τα αρχεία αυτά να συνταχθούν μέσω των κλασικών προγραμμάτων σύνταξης (text editors), η MATLAB προσφέρει το αντίστοιχο πρόγραμμα, το οποίο είναι ενσωματωμένο στο πακέτο του λογισμικού [7.2].

## 7.2.2 Προγραμματισμός στη MATLAB

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της MATLAB είναι η δυνατότητα της απλής προέκτασης της σε ποικίλες εφαρμογές, μέσω της σύνταξης από το χρήστη αυτόνομων κωδίκων και προγραμμάτων. Το λογισμικό προσφέρει στο χρήστη τη χρήση μιας ενσωματωμένης γλώσσας προγραμματισμού, η οποία διαθέτει κοινά χαρακτηριστικά με τη γλώσσα προγραμματισμού C. Μάλιστα, δεν είναι υπερβολικό να θεωρηθεί ότι η συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού της MATLAB ίσως είναι η καταλληλότερη και υψηλότερου επιπέδου για εφαρμογές μηχανικού, οι οποίες απαιτούν ισχυρά υπολογιστικά εργαλεία, κάτι το οποίο είναι δύσκολο να επιτευχθεί από τις κλασσικές γλώσσες προγραμματισμού.

Στη MATLAB ο χρήστης μπορεί να αναπτύξει κώδικα στα m-αρχεία (m-files). Τα m-αρχεία είναι τυπικά ASCII αρχεία κειμένου (text files), συνοδευόμενα από την προέκταση \*.m στο όνομα του αρχείου και στα οποία γίνεται χρήση της γλώσσας προγραμματισμού του λογισμικού. Τα περισσότερα m-αρχεία είναι δυνατόν να ενεργοποιηθούν μέσω οποιουδήποτε προγράμματος επεξεργασίας κειμένου (editor or word processing application). Ένα τέτοιο πρόγραμμα διαθέτει και το παρόν λογισμικό. Υπάρχουν δύο είδη m-αρχείων. Τα αρχεία κειμένου (script files) και τα αρχεία συναρτήσεων (function files).

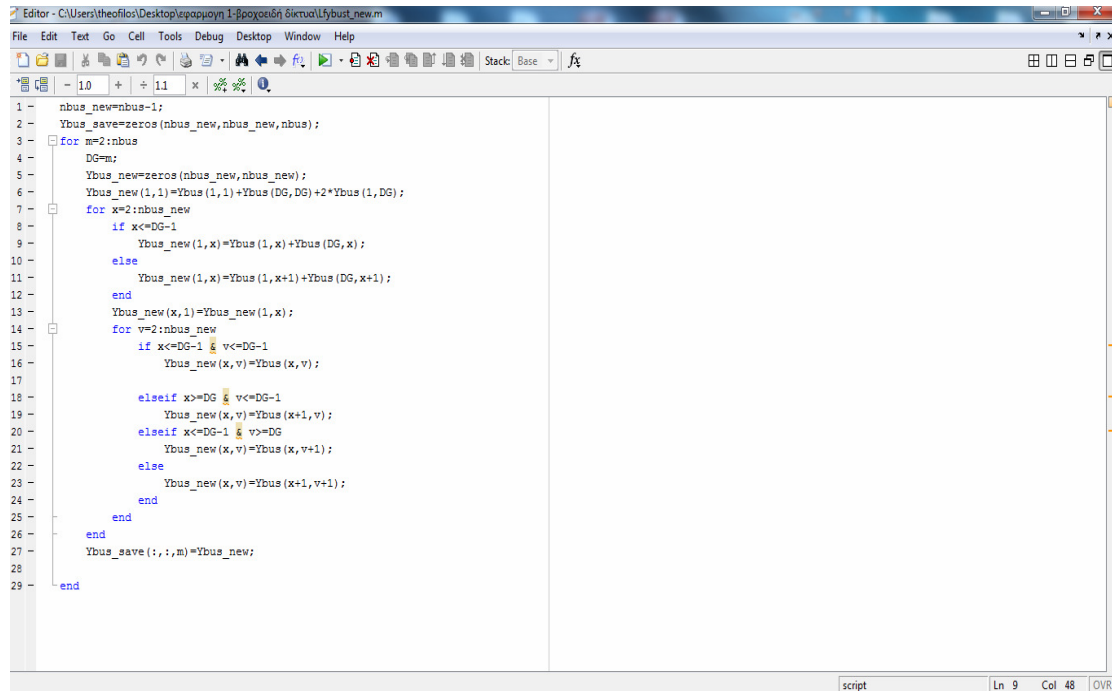
- αρχεία κειμένου (script files) : Τα αρχεία κειμένου αποτελούν ένα σύνολο εντολών της MATLAB. Τα αρχεία αυτά εκτελούνται μέσα από το παράθυρο εντολών, πληκτρολογώντας το όνομα του αρχείου, χωρίς την προέκταση \*.m, δεξιά από το σύμβολο προτροπής. Όλη αυτή η διαδικασία είναι ισοδύναμη με την πληκτρολόγηση μιας προς μιας του συνόλου των εντολών, οποίες περιέχονται μέσα στο εν λόγω αρχείο κειμένου, στο παράθυρο εντολών. Οι μεταβλητές, οι οποίες χρησιμοποιούνται μέσα στους κώδικες των αρχείων κειμένων έχουν καθολικό χαρακτήρα (global variables), με αποτέλεσμα να καταγράφονται στο πλαίσιο του παραθύρου του χώρου εργασίας, τόσο οι μεταβλητές, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως δεδομένα του προβλήματος, όσο και αυτές, οι οποίες φέρουν τα αποτελέσματα. Τα αρχεία κειμένου είναι δυνατόν να περιέχουν αριθμούς, μεταβλητές, εντολές και συναρτήσεις είτε της ίδιας της MATLAB (ενσωματωμένες στο λογισμικό), είτε αναπτυγμένες από το χρήστη. Συμπερασματικά, τα αρχεία κειμένου είναι πολύ χρήσιμα στις περιπτώσεις, όπου ο χρήστης πρέπει να επαναλάβει μια συγκεκριμένη ροή εντολών και πράξεων αρκετές φορές και με διαφορετικές κάθε φορά τιμές για τα δεδομένα [7.3].
- αρχεία συναρτήσεων (function files) : Τα αρχεία συναρτήσεων αποτελούν τη δεύτερη κατηγορία των m-αρχείων και η κύρια διαφορά τους από τα αρχεία κειμένου είναι ότι οι μεταβλητές είναι τοπικής εμβέλειας (local variables), δηλαδή μια μεταβλητή σε ένα αρχείο συνάρτησης δεν μπορεί να επηρεαστεί από διαδικασίες εκτός του συγκεκριμένου αρχείου. Ακόμα, μπορούν να δεχτούν δεδομένα ως ορίσματα και να επιστρέφουν αποτελέσματα. Είναι ουσιαστικά σαν τις υπορουτίνες, οι οποίες δημιουργούνται στα πλαίσια των γνωστών γλωσσών προγραμματισμού, όπως η Fortran, η Visual Basic και η C. Ένα αρχείο συνάρτησης πρέπει οπωσδήποτε να ξεκινά με τη γραμμή, όπου ορίζεται η συνάρτηση και όπου καταγράφονται αναλυτικά οι μεταβλητές εισαγωγής και εξαγωγής των αποτελεσμάτων. Η σύνταξη, δηλαδή, είναι η εξής :

```
function[output variables]=function_name(input variables);
```

Ο προγραμματισμός στη MATLAB περιλαμβάνει τη χρήση αριθμών, μεταβλητών, εντολών και συναρτήσεων, σχεσιακών και λογικών τελεστών, που οργανώνονται από τις τέσσερις δομές ελέγχου ροής (flow control structures) οι οποίες είναι οι εξής :

- βρόχοι for ( for loops)
- βρόχοι while (while loops)
- εντολή if (if statement)
- εντολή switch ( switch statement)

Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα προγραμματισμού σε MATLAB. Συγκεκριμένα, είναι ένα αρχείο κειμένου (script file), που υπολογίζει τον νέο πίνακα αγωγιμοτήτων των ζυγών του δικτύου, όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 6.2.1.



```

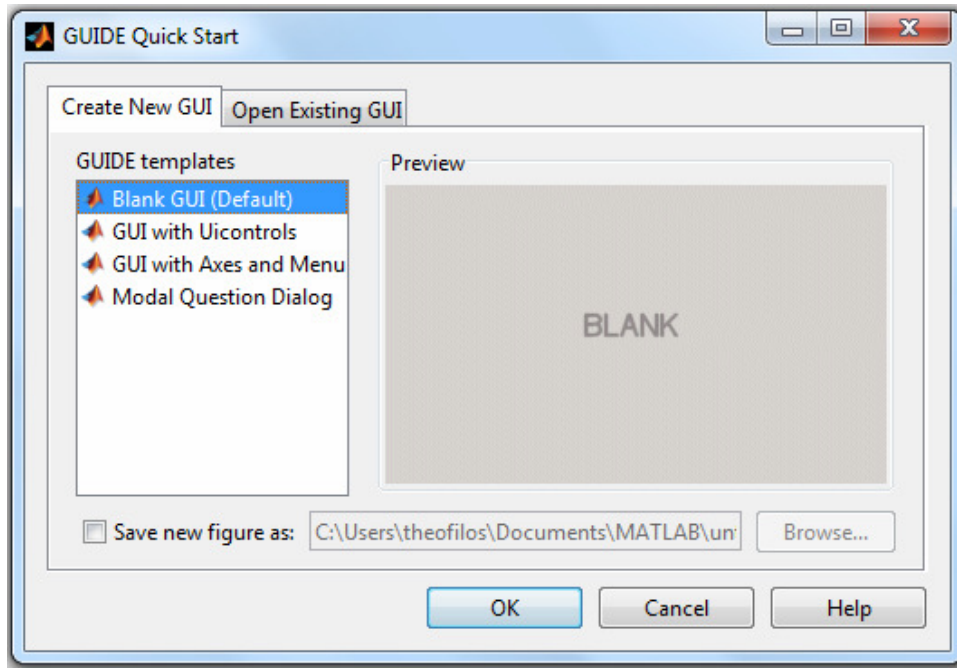
1 - nbus_new=nbus-1;
2 - Ybus_save=zeros(nbus_new,nbus_new,nbus);
3 - for m=2:nbus
4 -     DG=m;
5 -     Ybus_new=zeros(nbus_new,nbus_new);
6 -     Ybus_new(1,1)=Ybus(1,1)+Ybus(DG,DG)+2*Ybus(1,DG);
7 -     for x=2:nbus_new
8 -         if x<=DG-1
9 -             Ybus_new(1,x)=Ybus(1,x)+Ybus(DG,x);
10 -        else
11 -            Ybus_new(1,x)=Ybus(1,x+1)+Ybus(DG,x+1);
12 -        end
13 -        Ybus_new(x,1)=Ybus_new(1,x);
14 -        for v=2:nbus_new
15 -            if x<=DG-1 & v<=DG-1
16 -                Ybus_new(x,v)=Ybus(x,v);
17 -            elseif x>=DG & v<=DG-1
18 -                Ybus_new(x,v)=Ybus(x+1,v);
19 -            elseif x<=DG-1 & v>=DG
20 -                Ybus_new(x,v)=Ybus(x,v+1);
21 -            else
22 -                Ybus_new(x,v)=Ybus(x+1,v+1);
23 -            end
24 -        end
25 -    end
26 -    Ybus_save(:,:,m)=Ybus_new;
27 - end
28 -
29 -

```

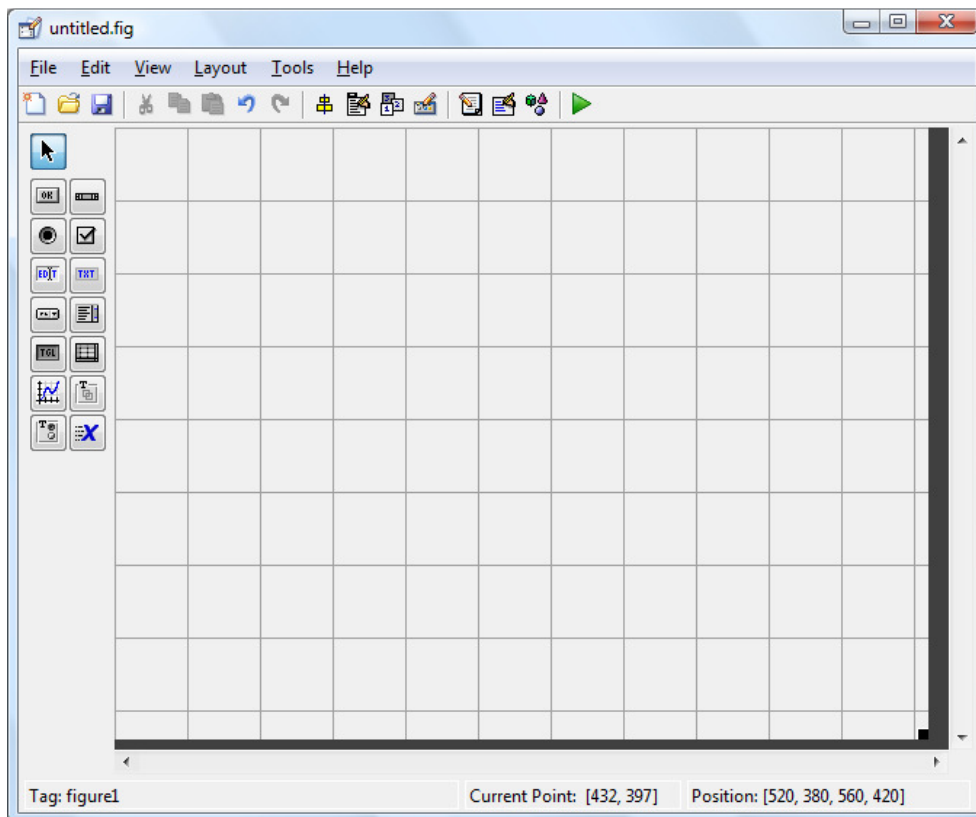
Σχήμα 7.2: Παράδειγμα προγραμματισμού σε MATLAB .

### 7.2.3 Το γραφικό περιβάλλον (GUI) της MATLAB

Η MATLAB δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να κατασκευάσει δικές του γραφικές διεπιφάνειες (Graphical User Interfaces). Η χρησιμότητα αυτής της λειτουργίας είναι μεγάλη, επειδή τα προγράμματα-εφαρμογές που περιέχουν γραφική διεπιφάνεια γίνονται πιο φιλικά στον τελικό χρήστη. Η MATLAB διαθέτει μια ικανοποιητική εργαλειοθήκη, η οποία διευκολύνει πολύ τη δημιουργία μιας γραφικής διεπιφάνειας χρήστη. Αυτή η εργαλειοθήκη, ή αλλιώς GUIDE, περιέχει μια πληθώρα χρήσιμων εργαλείων ελέγχου, όπως κουμπιά και πλαίσια. Η εκκίνηση του GUIDE γίνεται με δύο τρόπους. Πρώτον, με τη κλήση της ομώνυμης συνάρτησης από το παράθυρο εντολών της MATLAB ( $\>>$  guide). Δεύτερον, επιλέγοντας από τη γραμμή μενού File→New→GUI. Στη συνέχεια, ο οδηγός ρωτάει το χρήστη αν θέλει να δημιουργήσει ένα κενό παράθυρο (Blank GUI), ένα παράθυρο βασισμένο σε κάποια πρότυπα ή να ανοίξει ένα έτοιμο παράθυρο (Σχήμα 7.3). Στη συνέχεια, αν ο χρήστης αφήσει την προεπιλεγμένη επιλογή "Blank GUI", θα ανοίξει ένα άδειο παράθυρο, στο οποίο μπορεί να δημιουργήσει το δικό του GUI (Σχήμα 7.4).

















Σχήμα 7.3: Διαθέσιμες επιλογές για τη δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος.







Σχήμα 7.4: Περιβάλλον και εργαλεία για τη δημιουργία GUI.

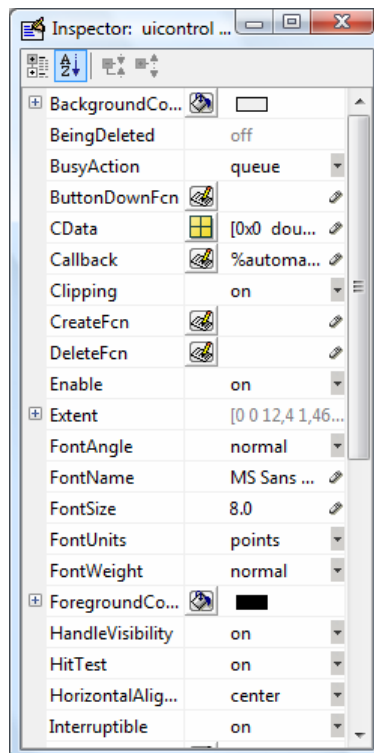


Ακολουθώς, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.4, ο χρήστης μπορεί να δει ότι το περιβάλλον δημιουργίας του παραθύρου αποτελείται από μία κεντρική γραμμή επιλογών, μια γραμμή εργαλείων και μία κάθετη εργαλειοθήκη στα αριστερά. Η γκριζα περιοχή με το πλέγμα είναι το φόντο του παραθύρου. Η κάθετη εργαλειοθήκη περιέχει τα παρακάτω 14 αντικείμενα (objects) με τα οποία μπορεί να εμπλουτίσει το γραφικό του περιβάλλον:

1. *Push button*  : ορθογώνιο κουμπί, αφού πατηθεί εκτελεί μια επιθυμητή λειτουργία.
2. *Slider*  : δίνει τη δυνατότητα να μεταβάλει ο χρήστης κάποια μεταβλητή με τη βοήθεια μιας μπάρας μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής. Συνοδεύει κάποιο κείμενο ή γράφημα. Η μπάρα μπορεί να είναι είτε οριζόντια είτε κάθετη.
3. *Radio Button*  : στρογγυλό κουμπί με το οποίο ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μόνο μια επιλογή από ένα πλήθος επιλογών. Διαλέγοντας μια, αναιρείται κάποια άλλη.
4. *Check Box*  : δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να διαλέξει μια ή περισσότερες επιλογές.
5. *Edit Text*  : είναι ένα πεδίο στο οποίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει ή να μορφοποιήσει αλφαριθμητικά δεδομένα. Μπορεί να γίνει εισαγωγή κειμένου μονής ή πολλαπλής γραμμής.
6. *Static Text*  : προβάλλει στην οθόνη μια γραμμή κειμένου. Το κείμενο αυτό δε μπορεί να το επεξεργαστεί ο χρήστης του λογισμικού.
7. *Pop-up Menu*  : παρέχει στο χρήστη μια λίστα επιλογών που ανοίγει όταν πατηθεί με το ποντίκι.
8. *List Box*  : παρέχει στο χρήστη μια λίστα ενός ή περισσότερων επιλογών που παραμένει ανοιχτή. Όταν υπάρχουν πολλές επιλογές εμφανίζεται αυτόματα μια μπάρα.
9. *Toggle Button*  : δίνει τη δυνατότητα επιλογής ή όχι μιας λειτουργίας.
10. *Table*  : παρέχει στο χρήστη επιλογές σε μορφή πίνακα.
11. *Axes*  : δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει μια γραφική παράσταση στο παράθυρο.
12. *Panel*  : χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση πολλών στοιχείων ελέγχου.
13. *Button Group*  : είναι σαν το panel αλλά επιδρά αυτόματα στην ομαδοποίηση των radio buttons και toggle buttons.
14. *ActiveX control*  : αντικείμενο ελέγχου ActiveX.

Η εισαγωγή των παραπάνω αντικειμένων στο παράθυρο είναι απλή και γίνεται με απλό σύρσιμο (drag and drop). Ειδικά τα αντικείμενα push button, radio button, slider, edit text, static text, list box, pop-up menu, check box και toggle button ανήκουν στην κατηγορία των στοιχείων ελέγχου (uicontrols). Ο χρήστης μπορεί να εισάγει όσες φορές θέλει το κάθε

αντικείμενο στο παράθυρο. Μέσω του object browser  βλέπει πόσα και ποια αντικείμενα υπάρχουν στο συγκεκριμένο παράθυρο της εφαρμογής του και επιλέγοντάς τα βλέπει τη θέση τους. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να στοιχίσει κάθετα ή οριζόντια όποια στοιχεία ελέγχου επιθυμεί μέσω του εικονιδίου align objects . Χρησιμοποιώντας τον property inspector (Σχήμα 7.5) μέσω του εικονιδίου  ή με διπλό κλικ ή δεξί κλικ πάνω στο αντικείμενο, μπορεί να καθορίσει ιδιότητες των κουμπιών, όπως το χρώμα του φόντου, τη γραμματοσειρά, το είδος των γραμμάτων, αν είναι ορατό, ενεργό ή όχι ένα στοιχείο, τη θέση του, την ετικέτα του (tag) ή το κείμενο (string) που θα είναι πάνω του κ.α. Αυτές είναι κάποιες από τις κοινές ιδιότητες σε όλα τα στοιχεία ελέγχου που χρησιμοποιούνται περισσότερο [7.4]. Επιπλέον, με το εικονίδιο  μπορεί να δημιουργήσει γραμμή μενού που μπορεί να περιέχει και υπομενού.



Σχήμα 7.5: Property inspector.

Αφού σχεδιαστεί η μορφή του γραφικού περιβάλλοντος, αποθηκεύεται το αρχείο με μορφή \*.fig, ενώ ταυτόχρονα δημιουργείται ένα \*.m αρχείο, στο οποίο γίνεται ο προγραμματισμός όλων των αντικειμένων που εισήγαγε ο χρήστης στο GUI. Συγκεκριμένα, επιλέγοντας view→M.-file Editor ανοίγει ο editor που περιέχει τον κώδικα προγραμματισμού στη MATLAB. Εξ αρχής υπάρχει μια έτοιμη μορφή κώδικα με συναρτήσεις (functions) και σχόλια που είναι αποθηκευμένα και εξυπηρετούν το χρήστη. Για κάθε στοιχείο του GUI επίσης έχει δημιουργηθεί μια συνάρτηση την οποία καλεί το πρόγραμμα με την επιλογή του κατάλληλου κουμπιού (callback). Κάτω από κάθε συνάρτηση τοποθετείται ο κώδικας που προγραμματίζει τη λειτουργία που θα ακολουθεί το GUI με την επιλογή του αντίστοιχου κουμπιού, και που μπορεί να περιλαμβάνει και m-αρχεία που αναπτύχθηκαν ξεχωριστά από το γραφικό περιβάλλον. Τέλος, σημειώνεται ότι οποιαδήποτε στιγμή επιθυμεί ο χρήστης να προσθέσει ή να αφαιρέσει κουμπιά και να επαναπρογραμματίσει το γραφικό περιβάλλον, έχει τη δυνατότητα να το κάνει [7.5].


### 7.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

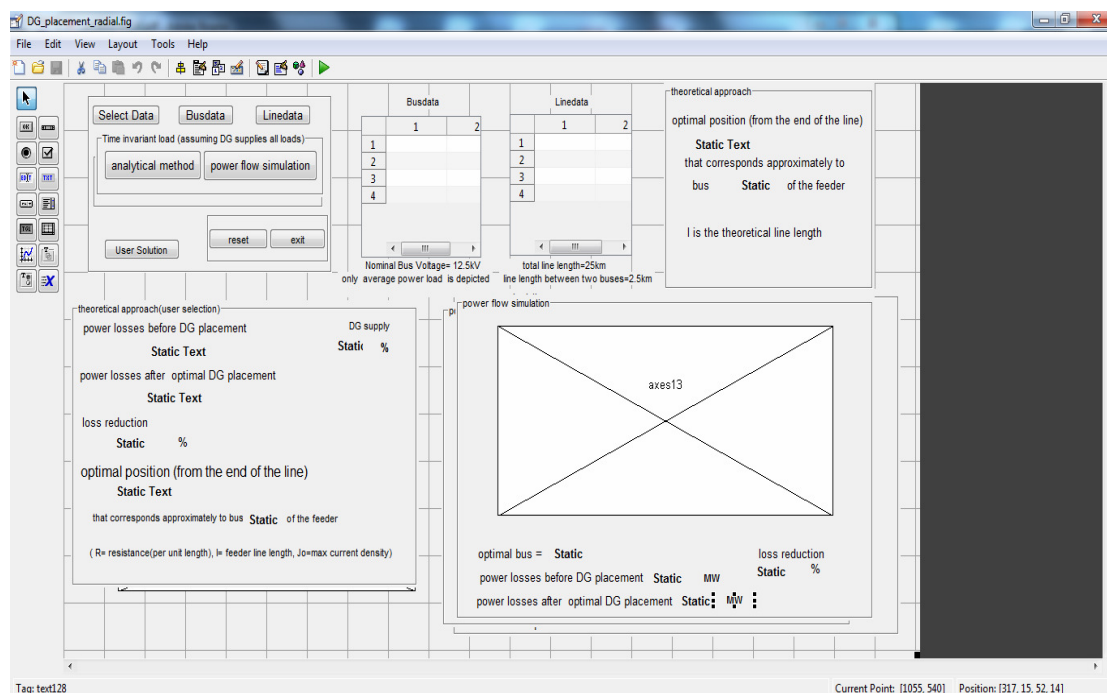
Το λογισμικό που αναπτύχθηκε προσδιορίζει τη βέλτιστη θέση τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικό δίκτυο διανομής 11 ζυγών για τέσσερις διαφορετικές κατανομές φορτίου, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος. Η εύρεση της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Πρώτον, με υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου του Κεφαλαίου 4, όπου γίνεται θεωρητική προσέγγιση και χρησιμοποιείται το μοντέλο του διανεμημένου φορτίου. Δεύτερον, με τη μέθοδο προσομοίωσης με ροές φορτίου του Κεφαλαίου 5, ώστε να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα της αναλυτικής μεθόδου. Το λογισμικό αποτελείται συνολικά από 27 αρχεία : 1 fig-αρχείο, 5 αρχεία Excel και 21 m-αρχεία. Ο συνολικός κώδικας που αναπτύχθηκε για τα 21 m-αρχεία είναι 766 γραμμές.

#### 7.3.1 Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής

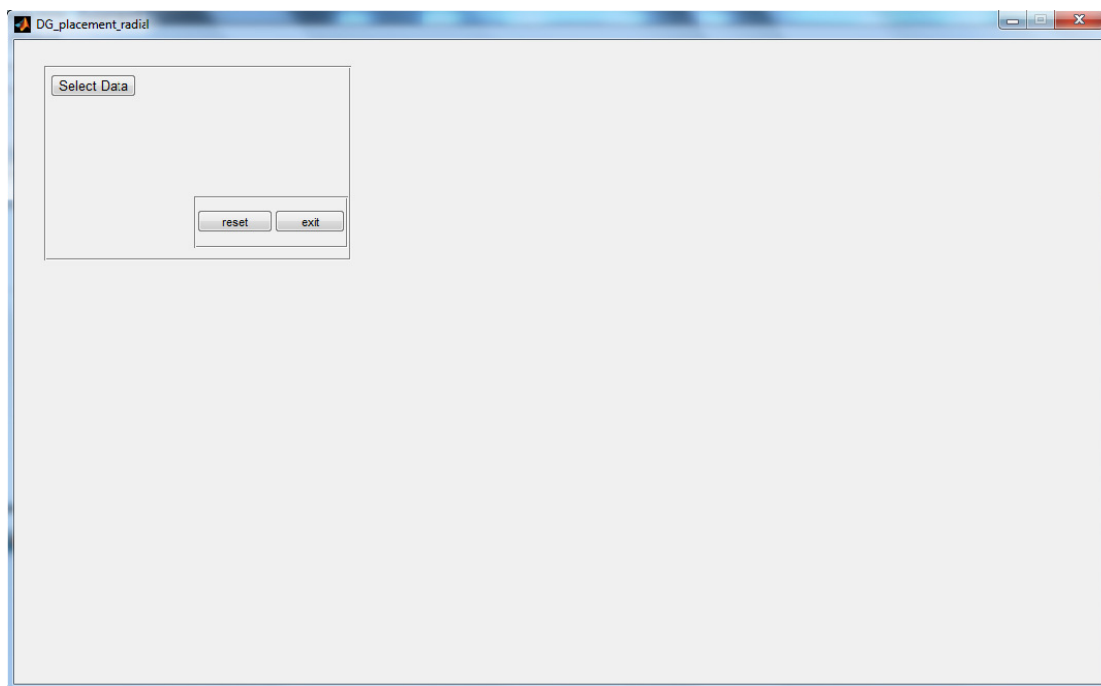
Το γραφικό περιβάλλον που δημιουργήθηκε ,στα πλαίσια της εφαρμογής, ονομάστηκε DG\_placement\_radial και τα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ακόλουθα :

- 11 push buttons για την εισαγωγή δεδομένων, εκτέλεση υπολογισμών, καθαρισμό δεδομένων και έξοδο από την εφαρμογή.
- 52 static texts για εμφάνιση τίτλων και αποτελεσμάτων
- 3 axes για εμφάνιση των αποτελεσμάτων γραφικά.
- 2 tables για παρουσίαση δεδομένων.
- 9 panels, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ομαδοποιημένη εμφάνιση των επιλογών του χρήστη, αλλά και των αποτελεσμάτων.

Μετά την εκκίνηση του GUIDE, αφού ο χρήστης επιλέξει να ανοίξει το γραφικό περιβάλλον DG\_placement\_radial, εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 7.6. Πατώντας το κουμπί “Run” , ο χρήστης μπορεί να τρέξει την εφαρμογή (Σχήμα 7.7).



Σχήμα 7.6: Εισαγωγή όλων των αντικειμένων του GUI για την υλοποίηση της εφαρμογής.

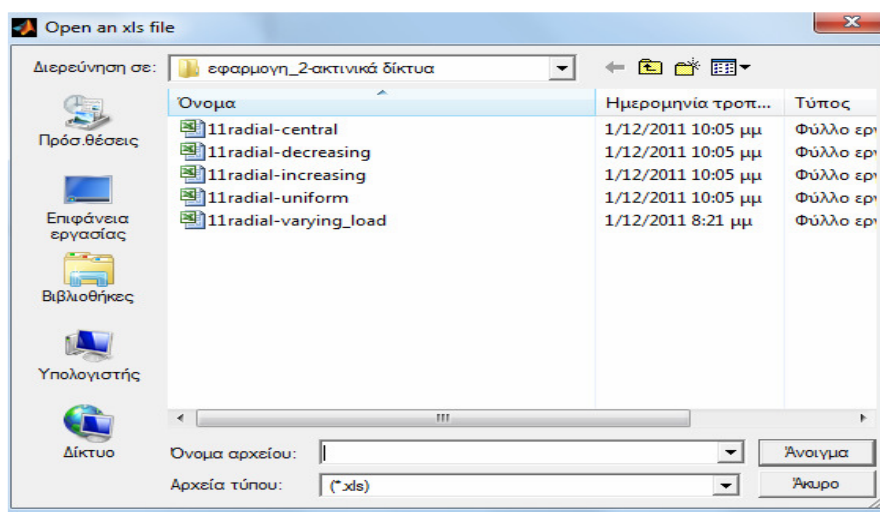


**Σχήμα 7.7:** Το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής κατά την εκκίνηση.

Από το Σχήμα 7.7 φαίνεται ότι μόνο τρεις επιλογές είναι ενεργοποιημένες. Η εφαρμογή είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να καθοδηγεί το χρήστη στην επόμενη κίνηση που πρέπει να κάνει. Έτσι, κατά την εκκίνηση της εφαρμογής, ο χρήστης μπορεί είτε να επιλέξει δεδομένα ("Select Data"), είτε να κάνει επανεκκίνηση ("reset"), είτε να εγκαταλείψει την εφαρμογή ("exit "). Αφού επιλεγούν τα δεδομένα του εξεταζόμενου συστήματος, τότε εμφανίζονται και ενεργοποιούνται οι υπόλοιπες λειτουργίες της εφαρμογής.

### 7.3.2 Εισαγωγή δεδομένων

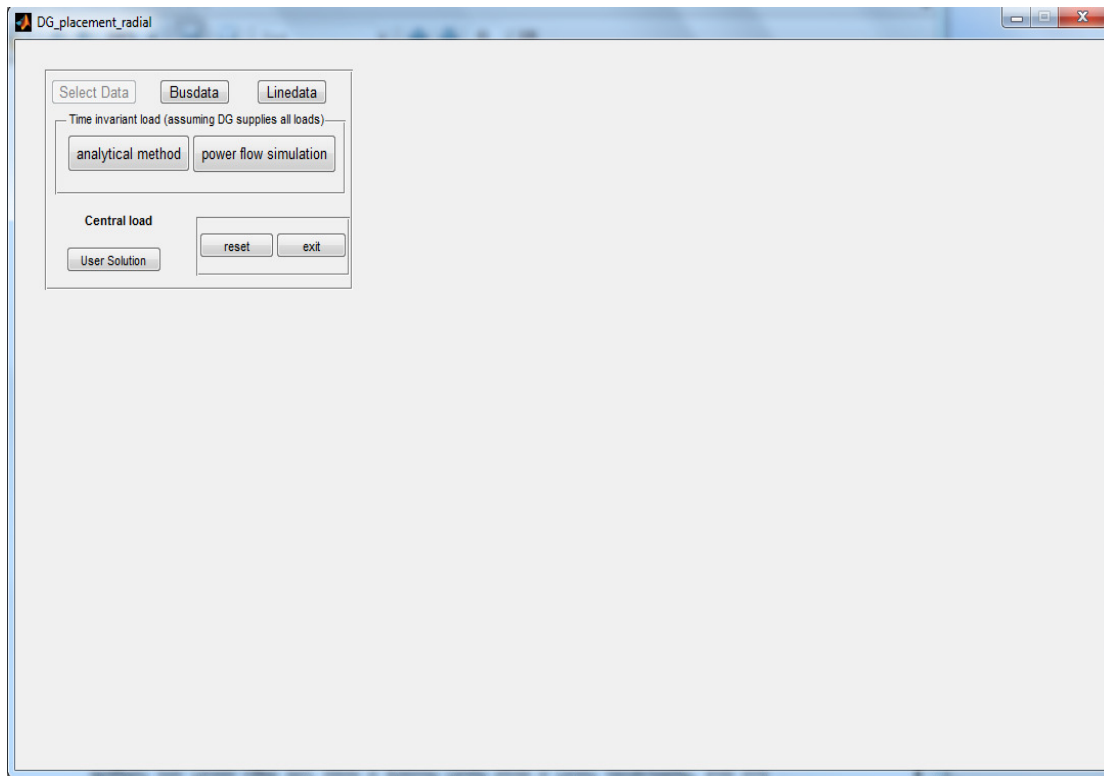
Επιλέγοντας το κουμπί "Select Data", ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 7.8), στο οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει κάποια δεδομένα εισόδου από ένα αρχείο Excel (\*.xls) που ήδη υπάρχει.



**Σχήμα 7.8:** Εισαγωγή δεδομένων από αρχείο Excel.

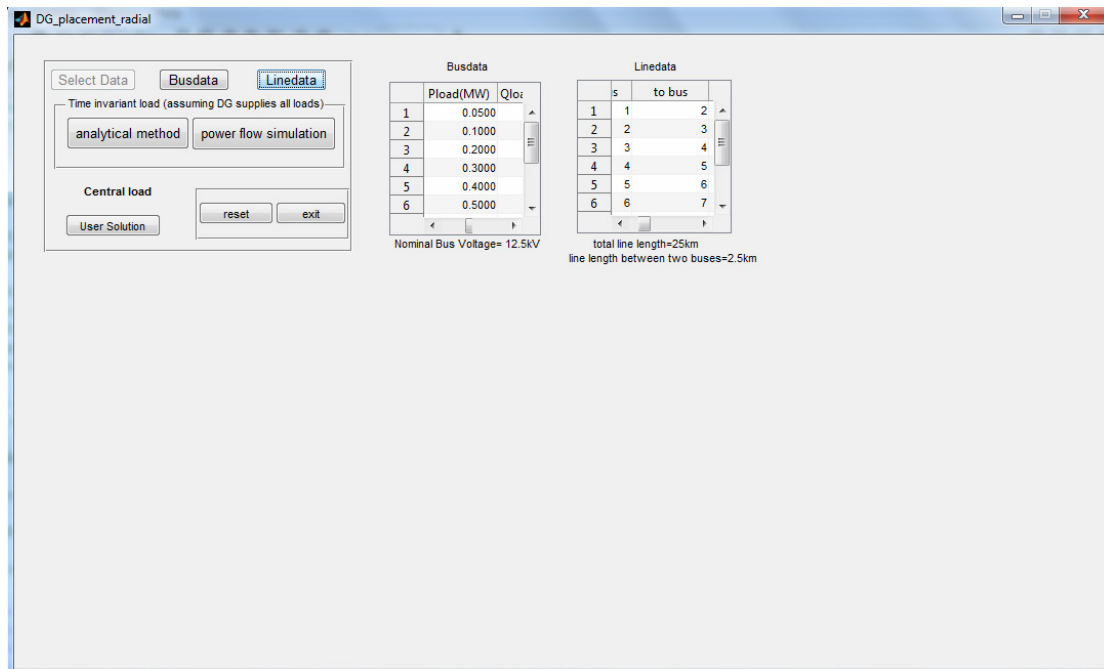
Οι τέσσερις πρώτες επιλογές των αρχείων Excel αναφέρονται σε ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών με χρονοαμετάβλητα φορτία, όπου τα φορτία στους ζυγούς θεωρούνται σταθερής ισχύος και κατανέμονται είτε ομοιόμορφα, είτε κεντρικά, είτε τριγωνικά (αυξητικά ή μειούμενα). Η πέμπτη επιλογή αναφέρεται σε χρονομεταβλητό φορτίο ομοιόμορφης κατανομής και χρονομεταβλητή μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, όπου η ισχύς των φορτίων και της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αναλυτική περιγραφή των διάφορων κατανομών φορτίου γίνεται στο Κεφάλαιο 8, όπου παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές.

Μόλις επιλεγεί κάποιο υπάρχον αρχείο, τότε διαβάζεται το συγκεκριμένο αρχείο και εμφανίζονται και ενεργοποιούνται όλα τα κουμπιά που ήταν κρυφά προηγουμένως (Σχήμα 7.9), ώστε να μπορούν να εκτελέσουν τις λειτουργίες τους. Ακόμα απενεργοποιείται το κουμπί "Select Data", αφού ο χρήστης έχει επιλέξει δεδομένα, όμως σε περίπτωση που θέλει να τα αλλάξει, τότε θα πρέπει να πατήσει πρώτα το κουμπί "reset", για να γίνει επανεκκίνηση της εφαρμογής και να εισάγει τα νέα δεδομένα με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε. Σημειώνεται, ότι, ανάλογα με το αν το φορτίο είναι χρονοαμετάβλητο ή χρονομεταβλητό, διαφοροποιείται ελαφρώς η εικόνα του γραφικού περιβάλλοντος.



**Σχήμα 7.9:** Εμφάνιση λειτουργιών εφαρμογής για επιλογή δικτύου διανομής χρονοαμετάβλητου φορτίου.

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων, ο χρήστης με τα κουμπιά "Busdata" και "Linedata" μπορεί να δει τα στοιχεία των ζυγών και των γραμμών του δικτύου διανομής που εισήγαγε (Σχήμα 7.10). Τα δεδομένα παρουσιάζονται με συγκεκριμένο τρόπο (format), που περιγράφηκε στην Ενότητα 5.4. Ακόμα, εμφανίζεται το συνολικό μήκος της γραμμής διανομής και η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών ζυγών, στοιχεία απαραίτητα προκειμένου η αναλυτική μέθοδος να καταλήξει σε αριθμητικό αποτέλεσμα.



Σχήμα 7.10: Εμφάνιση στοιχείων γραμμών και ζυγών στο γραφικό περιβάλλον.

### 7.3.3 Παρουσίαση και επεξεργασία αποτελεσμάτων

#### 7.3.3.1 Χρονοαμετάβλητο φορτίο

Αφού γίνει εισαγωγή δεδομένων από το χρήστη, μπορεί να δει και να μελετήσει τα αποτελέσματα των υπολογισμών που εκτελούν τα υπόλοιπα ενεργοποιημένα κουμπιά που περιλαμβάνει το γραφικό περιβάλλον.

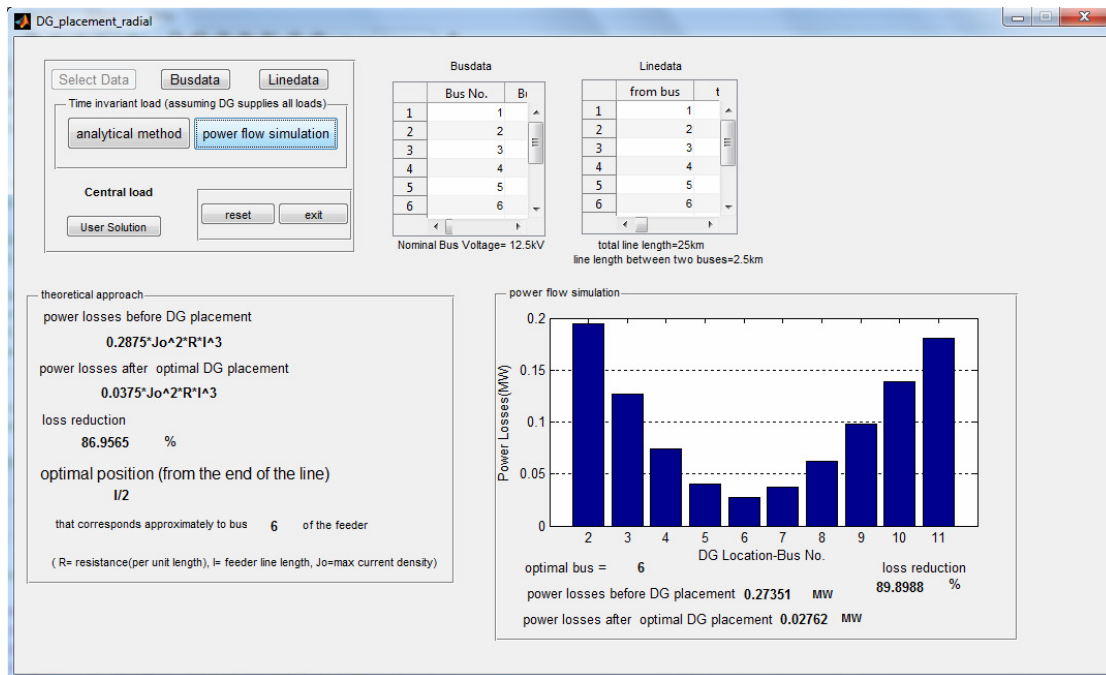
Για την εύρεση της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που τροφοδοτεί όλο το φορτίο του συστήματος, υπάρχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ αναλυτικής μεθόδου ("analytical method") και προσομοίωσης ροής φορτίου ("power flow simulation").

Η αναλυτική μέθοδος, ανάλογα με το είδος της κατανομής φορτίου της γραμμής, προσδιορίζει θεωρητικά τη βέλτιστη θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής συναρτήσει του μήκους της γραμμής χρησιμοποιώντας το μοντέλο του διανεμημένου φορτίου. Ακολούθως, γίνεται η αντιστοιχία της λύσης στον πιο κοντινό ζυγό του συστήματος. Ακόμα, υπολογίζονται παραμετρικά οι απώλειες ενεργού ισχύος γραμμής με τη συγκεκριμένη κατανομή φορτίου, πριν και μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, συναρτήσει της μέγιστης τιμής της πυκνότητας φορτίου, της ωμικής αντίστασης και του μήκους της γραμμής. Η διαδικασία υπολογισμού παρουσιάστηκε στις Ενότητες 4.2 και 4.4.

Προκειμένου να συγκριθούν και να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα της αναλυτικής μεθόδου χρησιμοποιείται η μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου, όπως δείχτηκε στις Ενότητες 5.3 και 5.4. Μέσω διαδοχικών εκτελέσεων ροών φορτίου υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος που προκύπτουν από τη σύνδεση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε κάθε πιθανό ζυγό, και ως βέλτιστη θέση επιλέγεται ο ζυγός, στον οποίο ελαχιστοποιούνται οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος του συστήματος. Η μεταβολή των απωλειών ενεργού ισχύος του συστήματος ανάλογα με το ζυγό σύνδεσης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής παρουσιάζεται σε γράφημα (axe). Ακόμα, όπως και στην

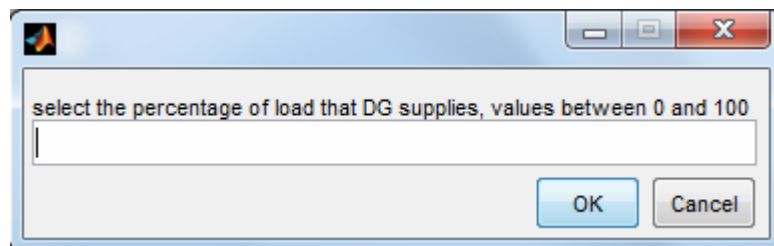


προηγούμενη περίπτωση, υπολογίζεται η βέλτιστη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος του συστήματος σε μορφή ποσοστού. Στο Σχήμα 7.11 φαίνονται τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων στο ακτινικό δίκτυο διανομής 11 ζυγών που έχει κεντρική κατανομή φορτίου.



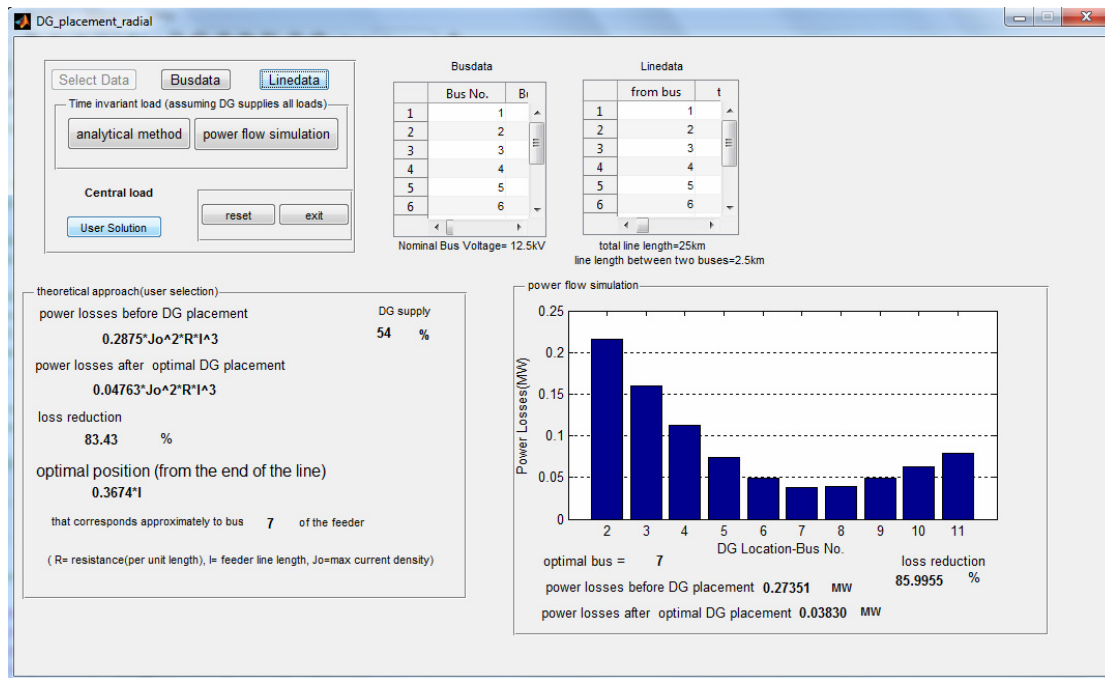
**Σχήμα 7.11:** Εμφάνιση αποτελεσμάτων μεθόδων εύρεσης βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικό δίκτυο διανομής 11 ζυγών.

Στη βασική περίπτωση ανάλυσης θεωρήθηκε ότι η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής τροφοδοτεί όλο το φορτίο του συστήματος. Μέσω της λειτουργίας " User Solution" υπάρχει η δυνατότητα να επιλέξει ο χρήστης το ποσοστό του φορτίου που τροφοδοτεί η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής. Με το πάτημα, λοιπόν, του αντίστοιχου κουμπιού εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου που φαίνεται στο Σχήμα 7.12.



**Σχήμα 7.12:** Επιλογή από το χρήστη ποσοστού τροφοδότησης φορτίου από τη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής.

Μετά την επιλογή του χρήστη, υλοποιούνται οι δύο μέθοδοι εύρεσης της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής και προσδιορίζονται τα νέα αποτελέσματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.13. Παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον το πώς μεταβάλλεται η βέλτιστη θέση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, ανάλογα με το ποσοστό του φορτίου του συστήματος που τροφοδοτεί.



**Σχήμα 7.13:** Εμφάνιση αποτελεσμάτων μεθόδων εύρεσης βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, σύμφωνα με την επιλογή του χρήστη.

### 7.3.3.2 Χρονομεταβλητό φορτίο

Στην περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει το αρχείο εισόδου Excel που αναφέρεται στο ακτινικό δίκτυο με χρονομεταβλητό φορτίο και μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, το γραφικό περιβάλλον διαφοροποιείται μερικώς.

Με το πάτημα του κουμπιού "Busdata", που αναφέρεται στα στοιχεία των ζυγών, εμφανίζονται επιπλέον δύο γραφήματα που απεικονίζουν τη ζήτηση φορτίου κατά τη διάρκεια της μέρας, που είναι ίδια σε όλους τους ζυγούς λόγω ομοιόμορφης κατανομής, και την ημερήσια παραγωγή ισχύος αιολικού πάρκου, που αποτελεί τη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής στη συγκεκριμένη περίπτωση. Επιπρόσθετα, στα στοιχεία των ζυγών, η στήλη που αναφέρεται στην ενεργό ισχύ φορτίου συμπληρώνεται με τη μέση τιμή των φορτίων.

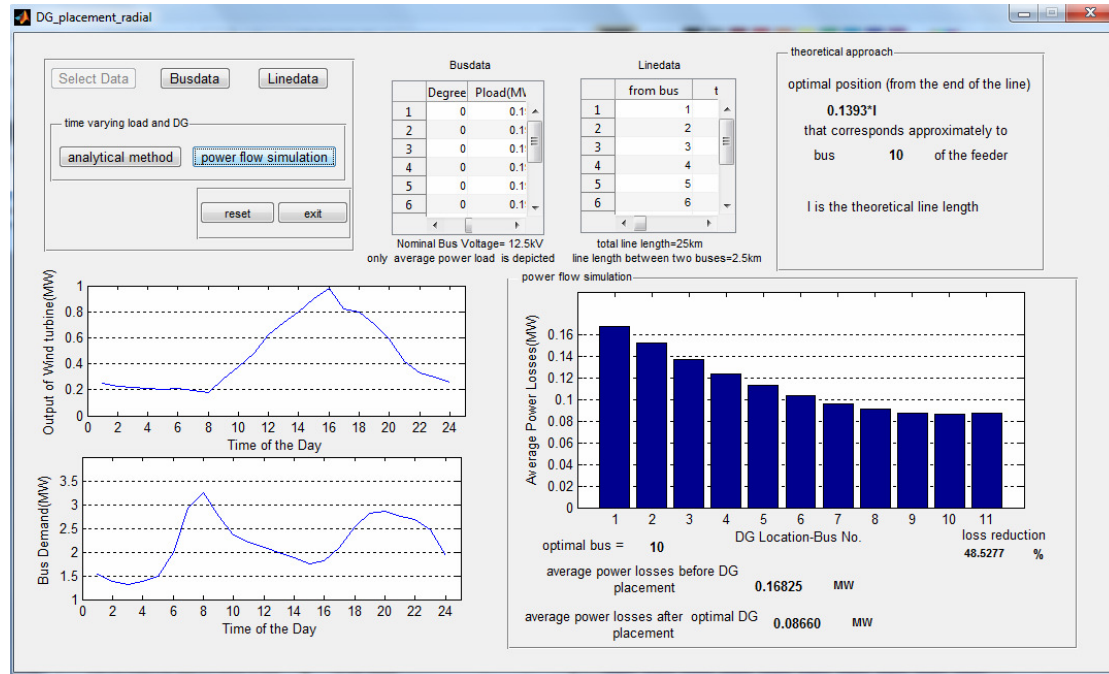
Η αναλυτική μέθοδος υλοποιείται αξιοποιώντας τα δεδομένα ισχύος των φορτίων και της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, όπως δείχτηκε στο αναλυτικό παράδειγμα της Ενότητας 4.5. Η θεωρητική λύση που προκύπτει συναρτήσει του μήκους της γραμμής αντιστοιχίζεται στο πιο κοντινό ζυγό του δικτύου, ώστε να έχει πρακτική εφαρμογή το αποτέλεσμα της αναλυτικής μεθόδου.

Η εύρεση της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής μέσω της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου περιλαμβάνει την εκτέλεση πολλαπλών ροών φορτίου, ώστε να προσδιοριστούν οι μέσες συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος σε κάθε περίπτωση, ανάλογα με το ζυγό στον οποίο συνδέεται η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, και να εντοπιστεί επακόλουθα η βέλτιστη θέση, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των μέσων απωλειών ενεργού ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί πως υπολογιστικά αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και επίπονη σε σχέση με την αναλυτική μέθοδο, καθώς απαιτεί την εκτέλεση 264 ροών φορτίου για την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος στο εξεταζόμενο δίκτυο.

Σημειώνεται, τέλος, πως το χρονομεταβλητό φορτίο αποτελεί ουσιαστικά μια πιο σύνθετη εκδοχή του χρονοαμετάβλητου φορτίου και παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα, αφού, αντί να χρησιμοποιείται κατευθείαν μια σταθερή τιμή που αντιστοιχεί



συνήθως στη μέση τιμή των φορτίων των ζυγών όπως γίνεται στις περιπτώσεις χρονοαμετάβλητου φορτίου, επεξεργάζονται αναλυτικά όλες οι τιμές των φορτίων στις διάφορες χρονικές στιγμές για τον υπολογισμό των τελικών αποτελεσμάτων. Στο Σχήμα 7.14 φαίνεται το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής στην περίπτωση χρονομεταβλητού φορτίου και μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.



**Σχήμα 7.14:** Εμφάνιση αποτελεσμάτων μεθόδων εύρεσης βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικό δίκτυο διανομής 11 ζυγών με χρονομεταβλητό φορτίο και μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής.

### 7.3.4 Ανάλυση m-αρχείων και δομή της εφαρμογής

Η λειτουργία των m-αρχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της εφαρμογής περιγράφεται στον Πίνακα 7.1.

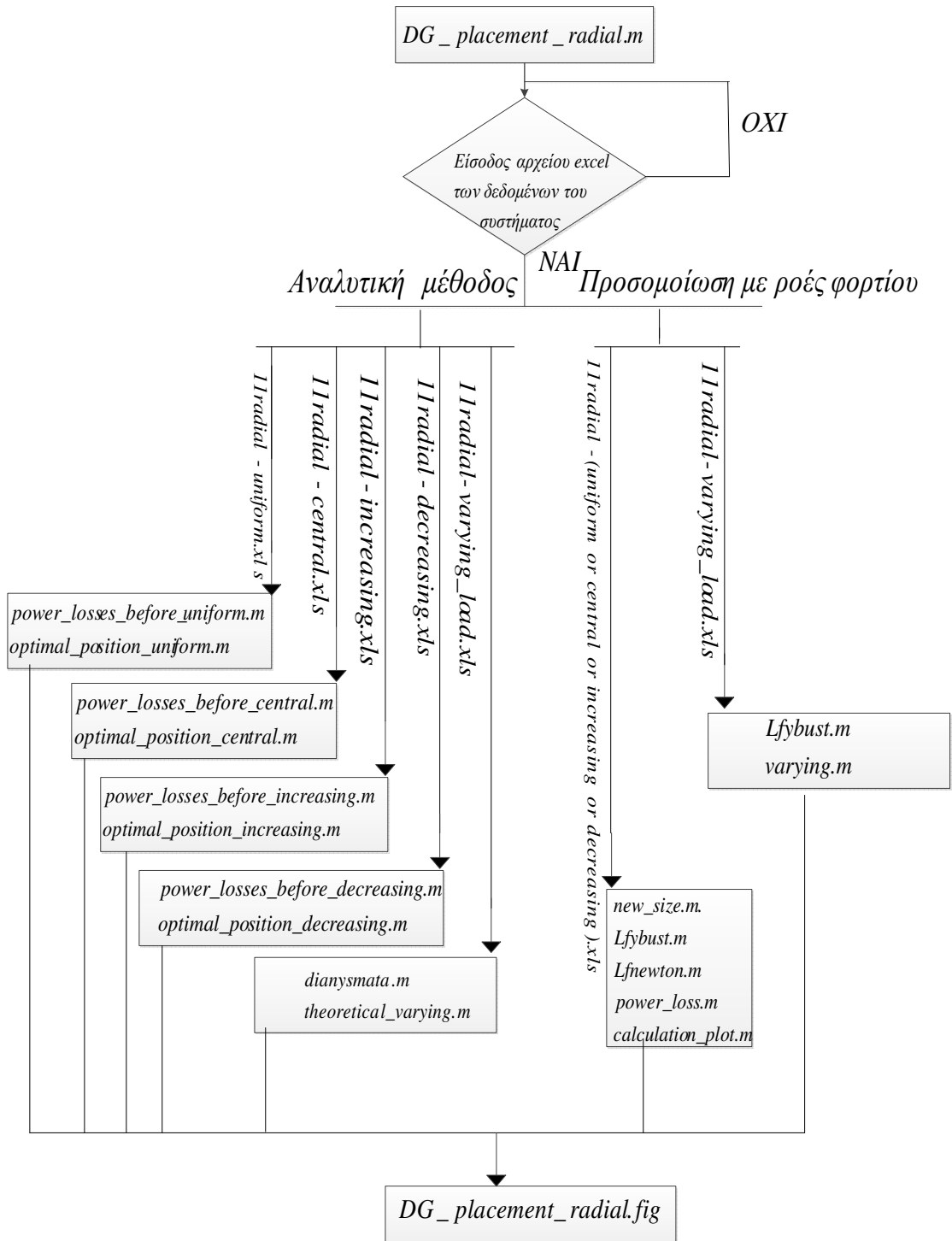
**Πίνακας 7.1:** Περιγραφή m-αρχείων του λογισμικού εύρεσης βέλτιστης θέσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικά δίκτυα διανομής.

A/A	Όνομα αρχείου	Περιγραφή λειτουργίας
1	DG_placement_radial.m	Αρχείο, στο οποίο υπάρχει ο κώδικας που ενσωματώθηκε στα στοιχεία ελέγχου, ώστε αυτά να εκτελούν τις επιθυμητές λειτουργίες για την υλοποίηση της εφαρμογής και να είναι λειτουργικό το γραφικό περιβάλλον.
2	power_losses_before_uniform.m	Υπολογισμός των απωλειών ενεργού ισχύος ακτινικής γραμμής διανομής με ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο.

3	power_losses_before_central.m	Υπολογισμός των απωλειών ενεργού ισχύος ακτινικής γραμμής διανομής με κεντρικά διανεμημένο φορτίο.
4	power_losses_before_increasing.m	Υπολογισμός των απωλειών ενεργού ισχύος ακτινικής γραμμής διανομής με τριγωνικά αυξητικό διανεμημένο φορτίο.
5	power_losses_before_decreasing.m	Υπολογισμός των απωλειών ενεργού ισχύος ακτινικής γραμμής διανομής με τριγωνικά μειούμενο διανεμημένο φορτίο.
6	optimal_position_uniform.m	Εύρεση βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινική γραμμή διανομής με ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο, και υπολογισμός βέλτιστων απωλειών ενεργού ισχύος.
7	optimal_position_central.m	Εύρεση βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινική γραμμή διανομής με κεντρικά διανεμημένο φορτίο, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο, και υπολογισμός βέλτιστων απωλειών ενεργού ισχύος.
8	optimal_position_increasing.m	Εύρεση βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινική γραμμή διανομής με τριγωνικά αυξητικό διανεμημένο φορτίο, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο, και υπολογισμός βέλτιστων απωλειών ενεργού ισχύος.
9	optimal_position_decreasing.m	Εύρεση βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινική γραμμή διανομής με τριγωνικά μειούμενο διανεμημένο φορτίο, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο, και υπολογισμός βέλτιστων απωλειών ενεργού ισχύος.
10	Lfybust.m	Υπολογισμός και δημιουργία πίνακα αγωγιμοτήτων εξεταζόμενου συστήματος.
11	Lfnewton.m	Εκτέλεση ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson.
12	power_loss.m	Υπολογισμός απωλειών ενεργού ισχύος δικτύου διανομής, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα ροών ισχύος που προκύπτουν από την εκτέλεση της ροής φορτίου.
13	new_size.m	Εισαγωγή μεγέθους ισχύος της εισαγόμενης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, ίσης με το συνολικό φορτίο του συστήματος.
14	calculation_plot.m	Εύρεση βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής μέσω ροών φορτίου και κατασκευή γραφήματος που απεικονίζει τις απώλειες ενεργού ισχύος του συστήματος, ανάλογα με το ζυγό σύνδεσης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

15	uniform_user.m	Εύρεση βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινική γραμμή με ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο, μετά από επιλογή του χρήστη του ποσοστού τροφοδότησης φορτίου από τη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής.
16	central_user.m	Εύρεση βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινική γραμμή διανομής με κεντρικά διανεμημένο φορτίο, μετά από επιλογή του χρήστη του ποσοστού τροφοδότησης φορτίου από τη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής.
17	increasing_user.m	Εύρεση βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινική γραμμή διανομής με τριγωνικά αυξητικό διανεμημένο φορτίο, μετά από επιλογή του χρήστη του ποσοστού τροφοδότησης φορτίου από τη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής.
18	decreasing_user.m	Εύρεση βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινική γραμμή με τριγωνικά μειούμενο φορτίο, μετά από επιλογή του χρήστη του ποσοστού τροφοδότησης φορτίου από τη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής.
19	dianysmata.m	Κατασκευή διανυσμάτων με τα δεδομένα ισχύος στην περίπτωση χρονομεταβλητού φορτίου και μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.
20	theoretical_varying.m	Εύρεση βέλτιστης θέσης χρονομεταβλητής μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινική γραμμή διανομής με χρονομεταβλητό φορτίο ομοιόμορφης κατανομής, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο.
21	varying.m	Εύρεση βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυο διανομής με χρονομεταβλητό φορτίο μέσω ροών φορτίου και κατασκευή γραφήματος που απεικονίζει τις μέσες απώλειες ενεργού ισχύος του συστήματος, ανάλογα με το ζυγό σύνδεσης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Το ιεραρχικό διάγραμμα αρχείων του λογισμικού εύρεσης βέλτιστης θέσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικά δίκτυα διανομής φαίνεται στο Σχήμα 7.15.



Σχήμα 7.15: Ιεραρχικό διάγραμμα αρχείων λογισμικού.


## 7.4 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΒΡΟΧΟΕΙΔΗ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

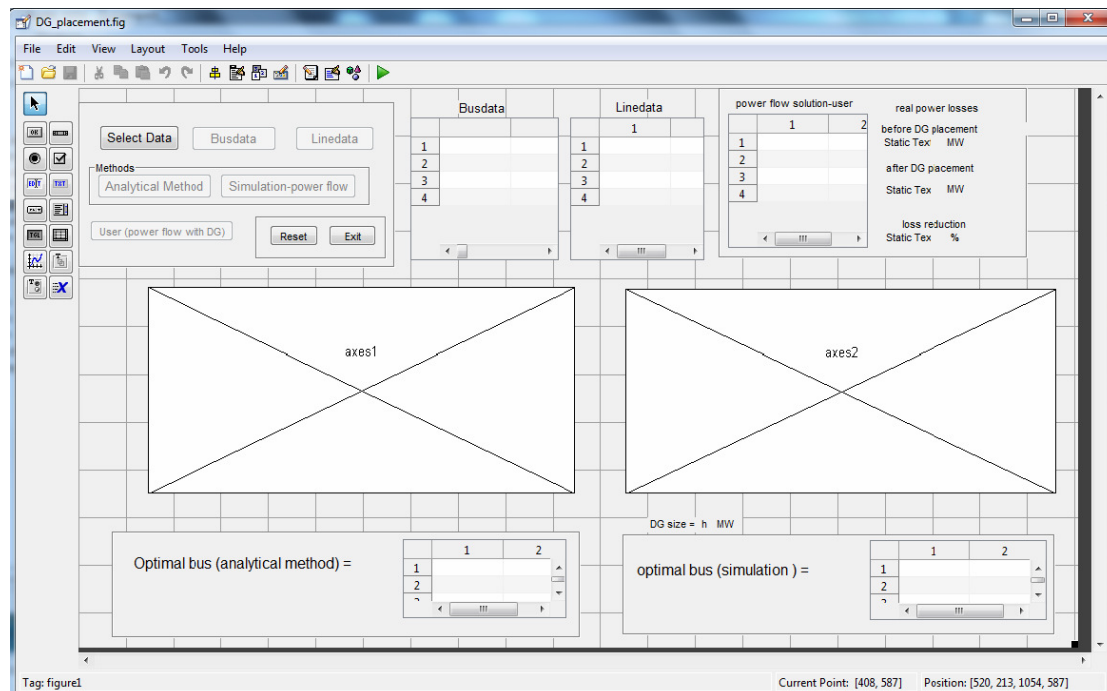
Το λογισμικό που αναπτύχθηκε προσδιορίζει τη βέλτιστη θέση τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε διάφορα βροχοειδή δίκτυα διανομής, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος. Η εύρεση της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Πρώτον, με υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου του Κεφαλαίου 6. Δεύτερον, με τη μέθοδο προσομοίωσης με ροές φορτίου του Κεφαλαίου 5, ώστε να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα της αναλυτικής μεθόδου. Το λογισμικό αποτελείται συνολικά από 18 αρχεία : 1 fig-αρχείο, 6 αρχεία Excel και 11 m-αρχεία. Ο συνολικός κώδικας που αναπτύχθηκε για τα 11 m-αρχεία είναι 700 γραμμές.

### 7.4.1 Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής

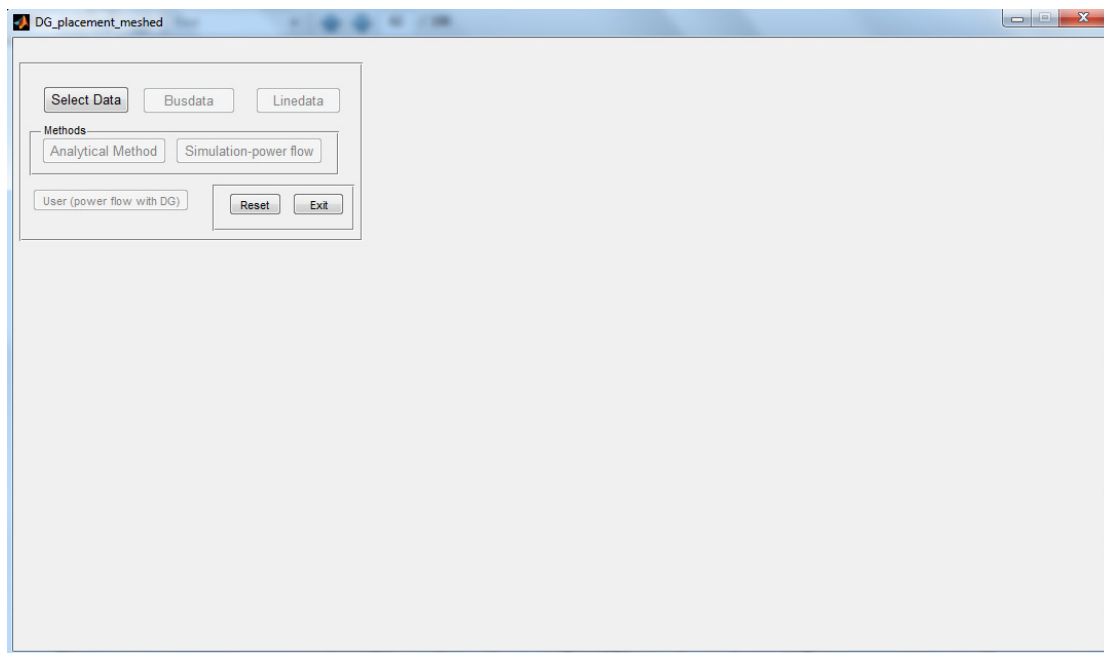
Το γραφικό περιβάλλον που δημιουργήθηκε ,στα πλαίσια της εφαρμογής, ονομάστηκε DG\_placement\_meshed και τα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ακόλουθα :

- 8 push buttons για την εισαγωγή δεδομένων, εκτέλεση υπολογισμών, καθαρισμό δεδομένων και έξοδο από την εφαρμογή.
- 26 static texts για εμφάνιση τίτλων και αποτελεσμάτων
- 2 axes για εμφάνιση των αποτελεσμάτων γραφικά.
- 5 tables για παρουσίαση δεδομένων και αποτελεσμάτων.
- 6 panels, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ομαδοποιημένη εμφάνιση των επιλογών του χρήστη, αλλά και των αποτελεσμάτων.

Μετά την εκκίνηση του GUIDE, αφού ο χρήστης επιλέξει να ανοίξει το γραφικό περιβάλλον DG\_placement\_meshed, εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 7.16. Πατώντας το κουμπί “Run” , ο χρήστης μπορεί να τρέξει την εφαρμογή (Σχήμα 7.17).



Σχήμα 7.16: Εισαγωγή όλων των αντικειμένων του GUI για την υλοποίηση της εφαρμογής.



**Σχήμα 7.17:** Το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής κατά την εκκίνηση.

Από το Σχήμα 7.17 φαίνεται ότι μόνο τρεις επιλογές είναι ενεργοποιημένες. Η εφαρμογή είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να καθοδηγεί το χρήστη στην επόμενη κίνηση που πρέπει να κάνει. Έτσι, κατά την εκκίνηση της εφαρμογής, ο χρήστης μπορεί είτε να επιλέξει δεδομένα ("Select Data"), είτε να κάνει επανεκκίνηση ("reset"), είτε να εγκαταλείψει την εφαρμογή ("exit "). Αφού επιλεγούν τα δεδομένα του εξεταζόμενου συστήματος, τότε ενεργοποιούνται τα υπόλοιπα κουμπιά της εφαρμογής. Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι λειτουργίες του κάθε κουμπιού.

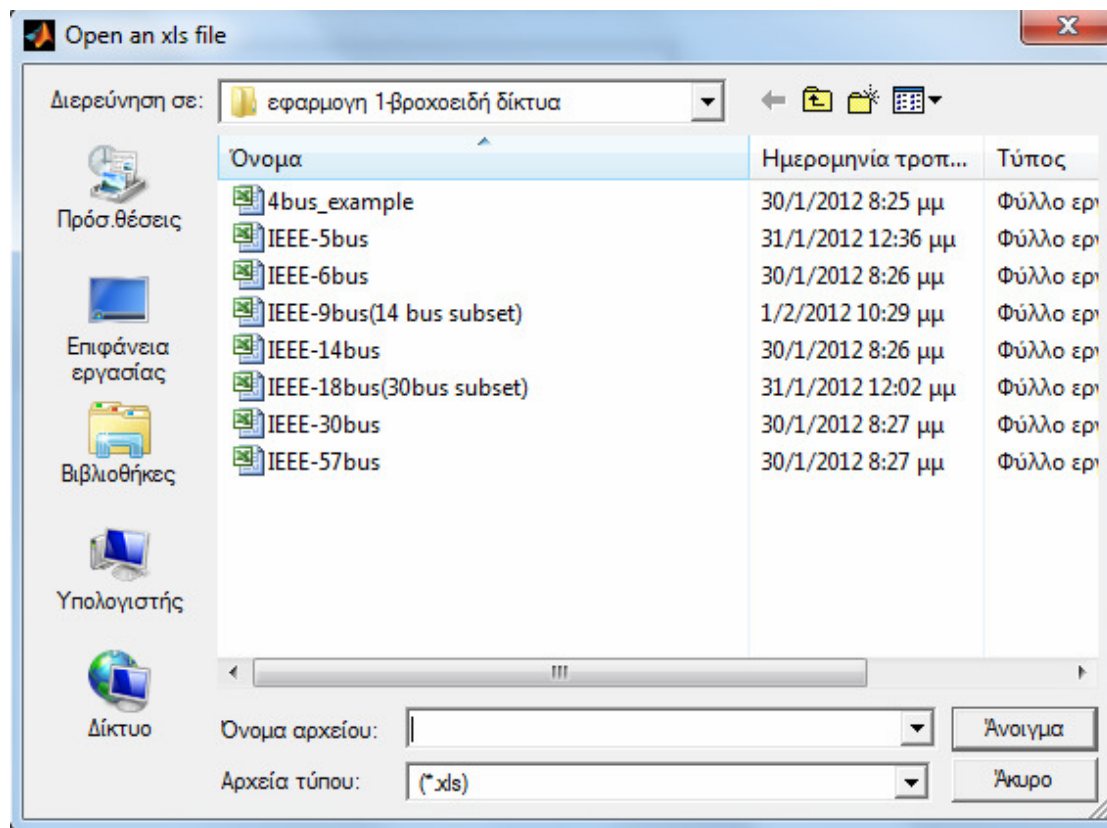
**Πίνακας 7.2:** Συνοπτική επεξήγηση των λειτουργιών των κουμπιών του γραφικού περιβάλλοντος της εφαρμογής.

Κουμπί	Συνοπτική λειτουργία
Select Data	Ανοίγει παράθυρο διαλόγου για την επιλογή αρχείου Excel που περιλαμβάνει τα δεδομένα του εξεταζόμενου δικτύου διανομής.
Busdata	Παρουσιάζει στο γραφικό περιβάλλον τα στοιχεία των ζυγών που επιλέχτηκαν.
Linedata	Παρουσιάζει στο γραφικό περιβάλλον τα στοιχεία των γραμμών που επιλέχτηκαν.
Analytical Method	Υλοποιεί την αναλυτική μέθοδο του Κεφαλαίου 6 για την εύρεση της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.
Simulation-power flow	Προσδιορίζει τη βέλτιστη θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής μέσω προσομοίωσης με ροές φορτίου.
User (power flow with DG)	Εκτελεί ροή φορτίου, μετά τη σύνδεση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ζυγό του δικτύου, σύμφωνα με τις επιλογές του χρήστη.

Reset	Κάνει επανεκκίνηση της εφαρμογής.
Exit	Ανοίγει παράθυρο διαλόγου, μέσω του οποίου μπορεί να τερματιστεί η εφαρμογή.

### 7.4.2 Εισαγωγή δεδομένων

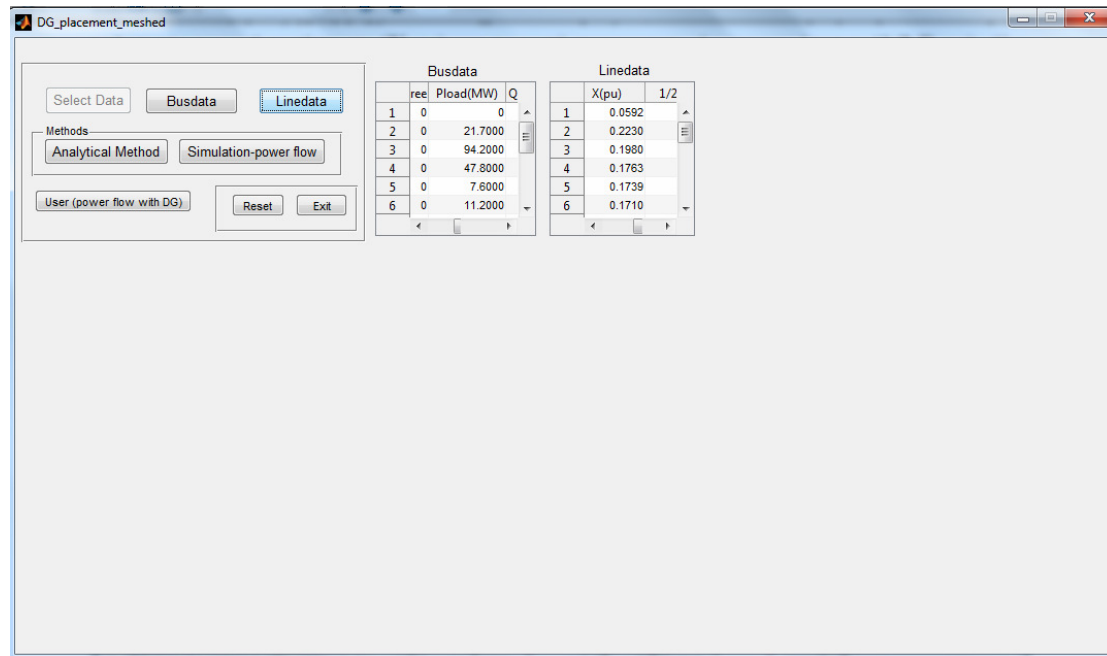
Επιλέγοντας το κουμπί "Select Data", ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 7.18), στο οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει κάποια δεδομένα εισόδου από ένα αρχείο Excel (\*.xls) που ήδη υπάρχει.



Σχήμα 7.18: Εισαγωγή δεδομένων από αρχείο Excel.

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε οκτώ αρχεία που περιλαμβάνουν δεδομένα διάφορων βροχοειδών δικτύων. Το δίκτυο των 4 ζυγών είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο αναλυτικό παράδειγμα της Ενότητας 6.4, ενώ όλα τα υπόλοιπα είναι πρότυπα δίκτυα δοκιμών της IEEE. Μόλις επιλεγεί κάποιο υπάρχον αρχείο, τότε διαβάζεται το συγκεκριμένο αρχείο και ενεργοποιούνται όλα τα κουμπιά που ήταν κρυφά προηγουμένως (Σχήμα 7.17), ώστε να μπορούν να εκτελέσουν τις λειτουργίες τους. Ακόμα απενεργοποιείται το κουμπί "Select Data", αφού ο χρήστης έχει επιλέξει δεδομένα, όμως σε περίπτωση που θέλει να τα αλλάξει, τότε θα πρέπει να πατήσει πρώτα το κουμπί "reset", για να γίνει επανεκκίνηση της εφαρμογής και να εισάγει τα νέα δεδομένα με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε.

Τα δεδομένα εισόδου που πρέπει να εισαχθούν είναι στοιχεία που αφορούν τις γραμμές και τους ζυγούς του συστήματος και ακολουθούν συγκεκριμένο τρόπο παρουσίασης (format), που περιγράφηκε στην Ενότητα 5.4. Μετά την εισαγωγή των δεδομένων, ο χρήστης με τα κουμπιά "Busdata" και "Linedata" μπορεί να δει τα στοιχεία των ζυγών και των γραμμών του βροχοειδούς δικτύου διανομής που εισήγαγε (Σχήμα 7.19).



Σχήμα 7.19: Εμφάνιση στοιχείων γραμμών και ζυγών στο γραφικό περιβάλλον.

### 7.4.3 Παρουσίαση και επεξεργασία αποτελεσμάτων

Αφού γίνει εισαγωγή δεδομένων από το χρήστη, μπορεί να δει και να μελετήσει τα αποτελέσματα των υπολογισμών που εκτελούν τα υπόλοιπα ενεργοποιημένα κουμπιά που περιλαμβάνει το γραφικό περιβάλλον.

Για την εύρεση της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στο εξεταζόμενο βροχοειδές δίκτυο διανομής, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, υπάρχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ αναλυτικής μεθόδου ("analytical method") και προσομοίωσης ροής φορτίου ("Simulation-power flow"). Η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, που εισάγεται στο δίκτυο, παράγει ενεργό ισχύ που κυμαίνεται μεταξύ 5% και 30% του συνολικού φορτίου, ανάλογα την περίπτωση.

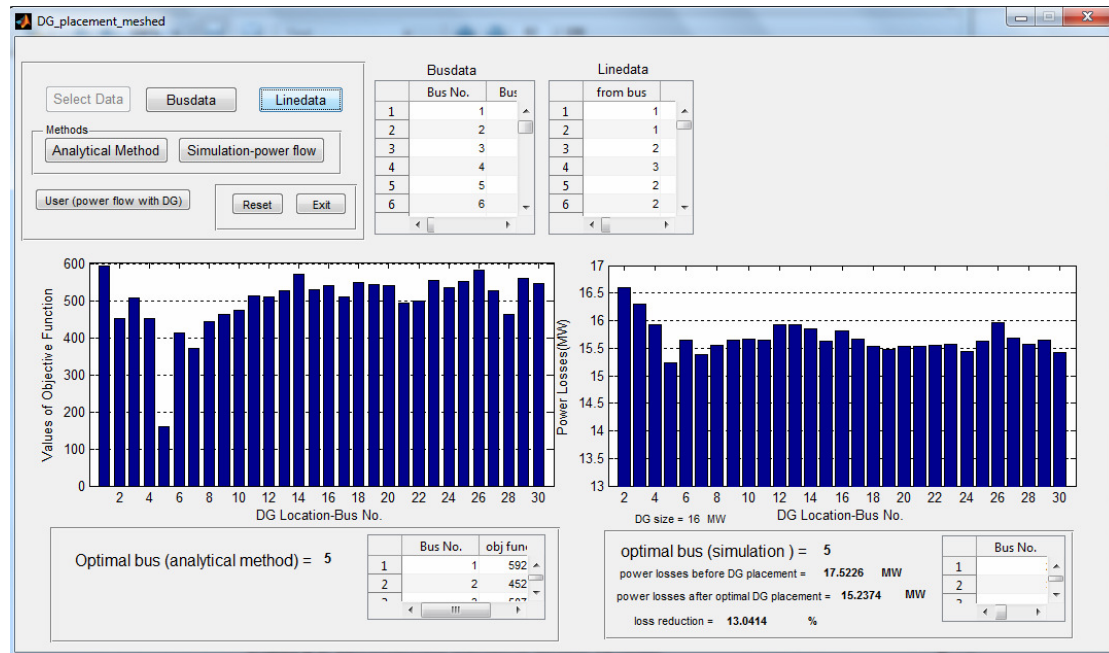
Αν ο χρήστης επιλέξει την αναλυτική μέθοδο πατώντας το κουμπί "analytical method", τότε εκτελείται ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 6.3 και υπολογίζεται η βέλτιστη θέση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, μέσω της ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης που κατασκευάζεται. Όλες οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, ανάλογα με τη πιθανή θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, παρουσιάζονται σε γράφημα (axe) και σε πίνακα (table).

Ο χρήστης μπορεί να συγκρίνει και να επιβεβαιώσει τα αποτελέσματα της αναλυτικής μεθόδου μέσω της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου πατώντας το κουμπί "Simulation-power flow", που υλοποιεί τον αλγόριθμο της Ενότητας 5.3. Μέσω διαδοχικών εκτελέσεων ροών φορτίου υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος που προκύπτουν από τη σύνδεση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε κάθε πιθανό ζυγό, και ως βέλτιστη θέση επιλέγεται ο ζυγός, στον οποίο ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενεργού ισχύος. Όλες οι τιμές των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος του συστήματος, ανάλογα με τη πιθανή θέση



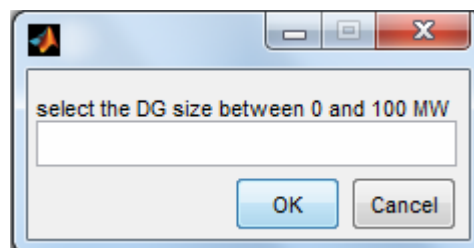
τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, παρουσιάζονται σε γράφημα (axe) και σε πίνακα (table), ενώ εμφανίζεται και το ποσοστό μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος του συστήματος που επιτυγχάνεται με τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Ενδεικτικά αποτελέσματα των δύο μεθόδων εύρεσης της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.20.

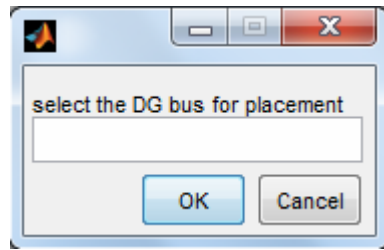


Σχήμα 7.20: Εμφάνιση αποτελεσμάτων μεθόδων εύρεσης βέλτιστης θέσης τοποθέτησης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε βροχοειδές δίκτυο διανομής.

Ο χρήστης, μέσω μιας πρόσθετης λειτουργίας που ενσωματώθηκε στο λογισμικό, μπορεί να εισάγει μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής στο εξεταζόμενο δίκτυο διανομής επιλέγοντας το μέγεθος της ενεργού ισχύος που αυτή παράγει (Σχήμα 7.21) και το ζυγό στον οποίο συνδέεται (Σχήμα 7.22) από τα αντίστοιχα παράθυρα διαλόγου που εμφανίζονται με το πάτημα του κουμπιού "User (power flow with DG)". Στη συνέχεια, με βάση τις επιλογές που έκανε ο χρήστης, εκτελείται η ροή φορτίου και τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται σε πίνακα (table). Ακόμα, υπολογίζεται και εμφανίζεται το ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος του συστήματος. Η συγκεκριμένη λειτουργία είναι ιδιαίτερη χρήσιμη, αφού δίνει τη δυνατότητα να μελετηθούν ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως οι τάσεις στους ζυγούς και οι απώλειες ενεργού ισχύος, μετά τη σύνδεση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε ζυγό του δικτύου, σύμφωνα με τις επιλογές του χρήστη.

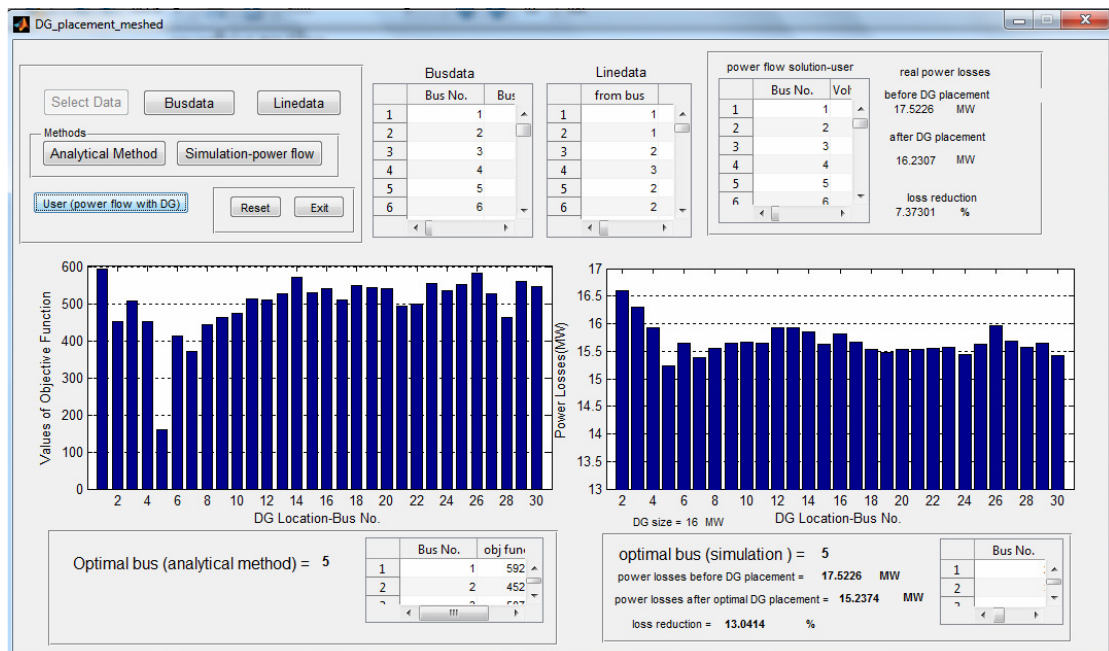


Σχήμα 7.21: Επιλογή από το χρήστη της παραγόμενης ισχύος της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.



**Σχήμα 7.22:** Επιλογή από το χρήστη του ζυγού σύνδεσης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Τα αποτελέσματα, που προκύπτουν από τις επιλογές του χρήστη, εμφανίζονται στο πάνω δεξιό μέρος στο παράθυρο του γραφικού περιβάλλοντος (Σχήμα 7.23).



**Σχήμα 7.23:** Εμφάνιση αποτελεσμάτων ανάλυσης ροών φορτίου και υπολογισμού απωλειών ενεργού ισχύος, σύμφωνα με τις επιλογές του χρήστη.

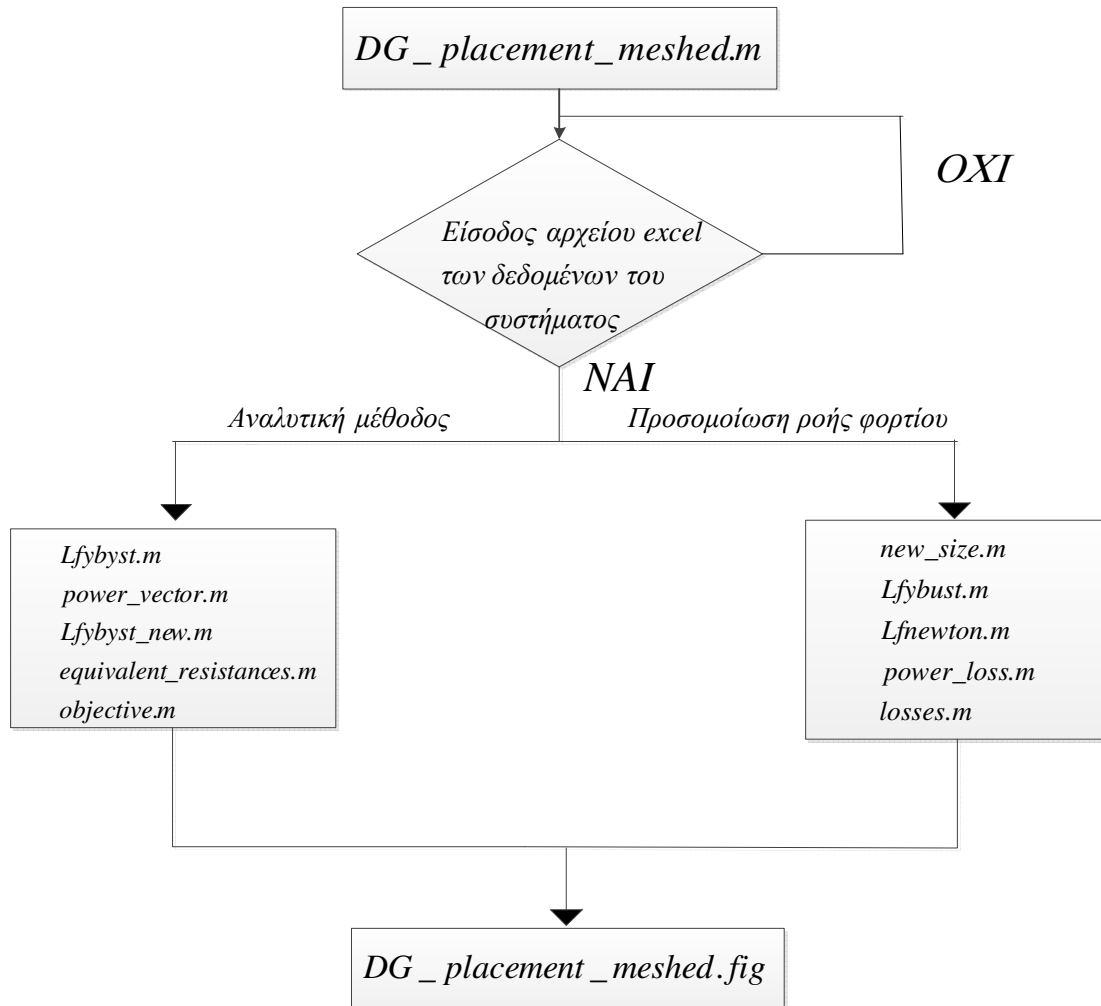
#### 7.4.4 Ανάλυση m-αρχείων και δομή της εφαρμογής

Η λειτουργία των m-αρχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της εφαρμογής περιγράφεται στον Πίνακα 7.3.

**Πίνακας 7.3:** Περιγραφή m-αρχείων του λογισμικού εύρεσης βέλτιστης θέσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε βροχοειδή δίκτυα διανομής.

A/A	Όνομα αρχείου	Περιγραφή λειτουργίας
1	DG_placement_meshed.m	Αρχείο, στο οποίο υπάρχει ο κώδικας που ενσωματώθηκε στα στοιχεία ελέγχου, ώστε αυτά να εκτελούν τις επιθυμητές λειτουργίες για την υλοποίηση της εφαρμογής και να είναι λειτουργικό το γραφικό περιβάλλον.
2	Lfybust.m	Υπολογισμός και δημιουργία πίνακα αγωγιμοτήτων των ζυγών του εξεταζόμενου συστήματος
3	power_vector.m	Υπολογισμός του νέου διανύσματος ισχύος του συστήματος (6.11) από τη σχέση (6.12).
4	Lfybust_new.m	Κατασκευή του νέου πίνακα αγωγιμοτήτων του ζυγών του εξεταζόμενου συστήματος από τη σχέση (6.3), ανάλογα με τη θέση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.
5	equivalent_resistances.m	Υπολογισμού του νέου πίνακα σύνθετων αντιστάσεων των ζυγών από τη σχέση (6.8) και των ισοδύναμων αντιστάσεων από τη σχέση (6.13).
6	objective.m	Υπολογισμός των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης από τη σχέση (6.14), εύρεση της βέλτιστης θέσης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής από τη σχέση (6.17) και κατασκευή γραφήματος με τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης.
7	new_size.m	Υπολογισμός της εισαγόμενης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, ανάλογα με το μέγεθος του φορτίου του συστήματος.
8	Lfnewton.m	Εκτέλεση ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson.
9	power_loss.m	Υπολογισμός απωλειών ενεργού ισχύος δικτύου διανομής, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα ροών ισχύος που προκύπτουν από την εκτέλεση της ροής φορτίου.
10	output_1.m	Οργάνωση των αποτελεσμάτων της ροής φορτίου σε πίνακα, με σκοπό την εμφάνιση τους στο γραφικό περιβάλλον
11	losses.m	Εύρεση βέλτιστης θέσης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής μέσω ροών φορτίου και κατασκευή γραφήματος που απεικονίζει τις απώλειες ενεργού ισχύος του συστήματος, ανάλογα με το ζυγό σύνδεσης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Το ιεραρχικό διάγραμμα αρχείων του λογισμικού εύρεσης βέλτιστης θέσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε βροχοειδή δίκτυα διανομής φαίνεται στο Σχήμα 7.24.



Σχήμα 7.24: Ιεραρχικό διάγραμμα αρχείων λογισμικού.

## 7.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [7.1] Γ. Γεωργίου, Χ. Ξενοφώντος, *Εισαγωγή στη MATLAB*. Λευκωσία, 2007.
- [7.2] Α. Αρβανιτίδης, και Χ. Σαραγιώτης, "Εισαγωγή στο MATLAB," [Online]. Διαθέσιμο: [http://users.auth.gr/~arvanit/Eisagogi\\_sto\\_Matlab.pdf](http://users.auth.gr/~arvanit/Eisagogi_sto_Matlab.pdf), προσπελάστηκε τον Ιανουάριο 2012.
- [7.3] "Mathworks- MATLAB programming fundamentals- Release 2011b," [Online]. Διαθέσιμο : [http://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/matlab/matlab\\_prog.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/matlab_prog.pdf), προσπελάστηκε τον Ιανουάριο 2012.
- [7.4] "Mathworks- MATLAB Creating Graphical User Interfaces- Release 2011b," [Online]. Διαθέσιμο : [http://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/matlab/buildgui.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/buildgui.pdf), προσπελάστηκε τον Ιανουάριο 2012.
- [7.5] Δ. Βαρσάμης, "MATLAB - Graphical User Interfaces," [Online]. Διαθέσιμο: [http://teiserron.gr/index.php?topic=1531.0;prev\\_next=prev](http://teiserron.gr/index.php?topic=1531.0;prev_next=prev), προσπελάστηκε τον Ιανουάριο 2012.



## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

### 8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

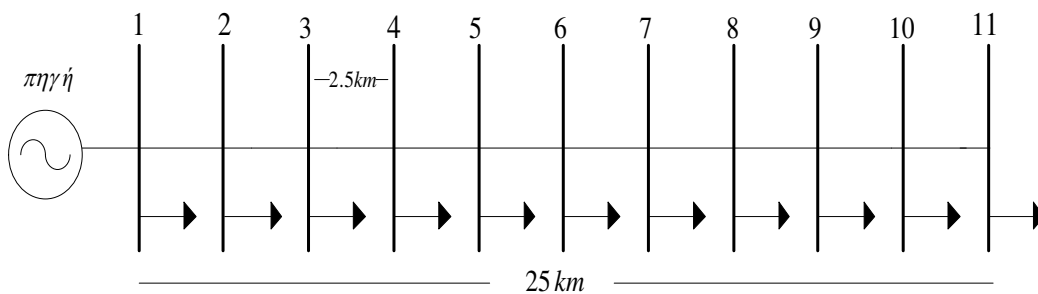
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται εφαρμογές του λογισμικού που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 7, σε ακτινικό δίκτυο διανομής 11 ζυγών, υπό τέσσερις διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, καθώς και σε διάφορα πρότυπα βροχοειδή δίκτυα της IEEE. Γίνεται, επίσης, σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την υλοποίηση των αναλυτικών μεθόδων και της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου.

Εκτός από τον κύριο στόχο της ανάλυσης, που είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων θέσεων τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυα διανομής με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, διερευνάται, επιπλέον, η επίδραση της βέλτιστης τοποθέτησης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο προφίλ των τάσεων των ζυγών των δικτύων.

### 8.2 ΑΚΤΙΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 11 ΖΥΓΩΝ ΧΡΟΝΟΑΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΑΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Το ακτινικό δίκτυο διανομής 11 ζυγών  $12.5kV$ , του οποίου η τοπολογία φαίνεται στο Σχήμα 8.1, θεωρείται ότι εξυπηρετεί φορτία σταθερής ισχύος. Η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, σε όλες τις βασικές περιπτώσεις ανάλυσης που θα πραγματοποιηθούν, υποτίθεται ότι τροφοδοτεί όλο το φορτίο του συστήματος. Το μήκος της εξεταζόμενης ακτινικής γραμμής είναι  $25km$ , η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών ζυγών της γραμμής είναι  $2.5km$ , ενώ η ανά μονάδα μήκους ωμική αντίσταση  $R$  και η ανά μονάδα μήκους επαγωγική αντίδραση  $X$  είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες κατά μήκος της γραμμής και έχουν τιμές  $0.538 \Omega/km$  και  $0.4625 \Omega/km$  αντίστοιχα. Ο ζυγός 1 είναι ζυγός αναφοράς, ενώ οι υπόλοιποι είναι ζυγοί φορτίου.

Για την υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου του Κεφαλαίου 4 θεωρείται ακτινική γραμμή διανεμημένου φορτίου με κατανομή φορτίου ίδια κάθε φορά με αυτή του ακτινικού δικτύου των 11 ζυγών, και προσδιορίζεται θεωρητικά η βέλτιστη θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής συναρτήσει του θεωρητικού μήκους  $l$ . Μετά, η θεωρητική λύση προσαρμόζεται στα πραγματικά δεδομένα και αντιστοιχίζεται στον πιο κοντινό στη λύση ζυγό του ακτινικού δικτύου των 11 ζυγών.



Σχήμα 8.1: Μονογραμμικό διάγραμμα ακτινικού δικτύου διανομής 11 ζυγών.

### 8.2.1 Ομοιόμορφη κατανομή φορτίου

Θεωρείται ότι τα φορτία του ακτινικού δικτύου έχουν συνολικό μέγεθος  $5.5 MW$  και ότι κατανέμονται ομοιόμορφα (uniformly distributed load) στους ζυγούς του δικτύου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.1. Στόχος είναι η βέλτιστη τοποθέτηση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $5.5 MW$ , που τροφοδοτεί όλο το φορτίο του συστήματος.

**Πίνακας 8.1:** Ομοιόμορφη κατανομή φορτίου στους ζυγούς του ακτινικού δικτύου.

Αριθμός ζυγού	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Φορτίο (MW)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

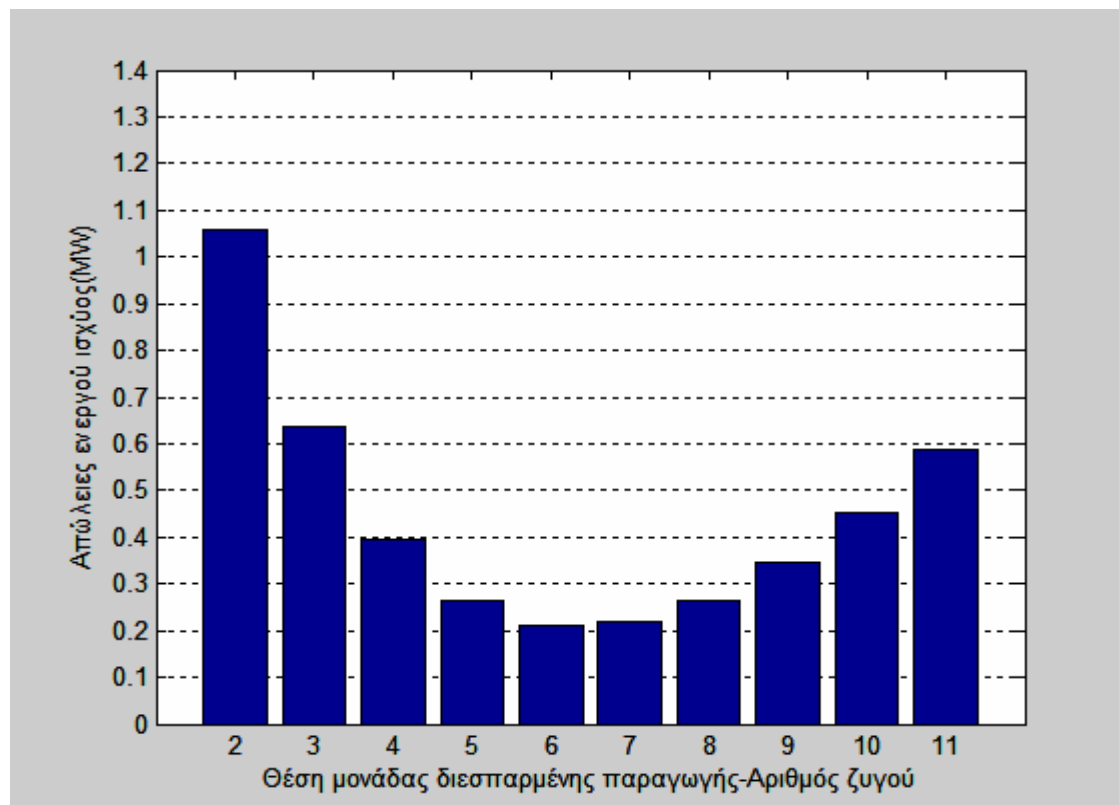
Η υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου δίνει τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 8.2. Με βάση τη θεωρητική ανάλυση, η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής πρέπει να τοποθετηθεί σε απόσταση  $12.5 km$  από το πέρας του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών, σημείο στο οποίο βρίσκεται ο ζυγός 6. Άρα, ο ζυγός 6 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο.

**Πίνακας 8.2:** Αποτελέσματα αναλυτικής μεθόδου για ομοιόμορφη κατανομή φορτίου.

<p>Θεωρητική ακτινική γραμμή με ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο</p>	<p style="text-align: center;"><math>J(x) = J_0</math></p> <p style="text-align: right;"><math>R</math> αντίσταση</p>
<p>Θεωρητικές απώλειες ενεργού ισχύος πριν την τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής</p>	$J_0^2 \cdot R \cdot l^3$
<p>Θεωρητική βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής</p>	$0.5 \cdot l$
<p>Θεωρητικές απώλειες ενεργού ισχύος μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής</p>	$0.25 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3$
<p>Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος της θεωρητικής ακτινικής γραμμής ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος (%)</p>	$\frac{J_0^2 \cdot R \cdot l^3 - 0.25 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3}{J_0^2 \cdot R \cdot l^3} = 75\%$
<p>Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών μετά την αντιστοίχιση της θεωρητικής λύσης</p>	$x_{opt} = 0.5 \cdot 25 km = 12.5 km \rightarrow$ ζυγός 6



Μέσω της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου, προσδιορίζονται οι απώλειες ενεργού ισχύος του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών, ανάλογα με την κάθε πιθανή θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.2.



**Σχήμα 8.2:** Απώλειες ενεργού ισχύος του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

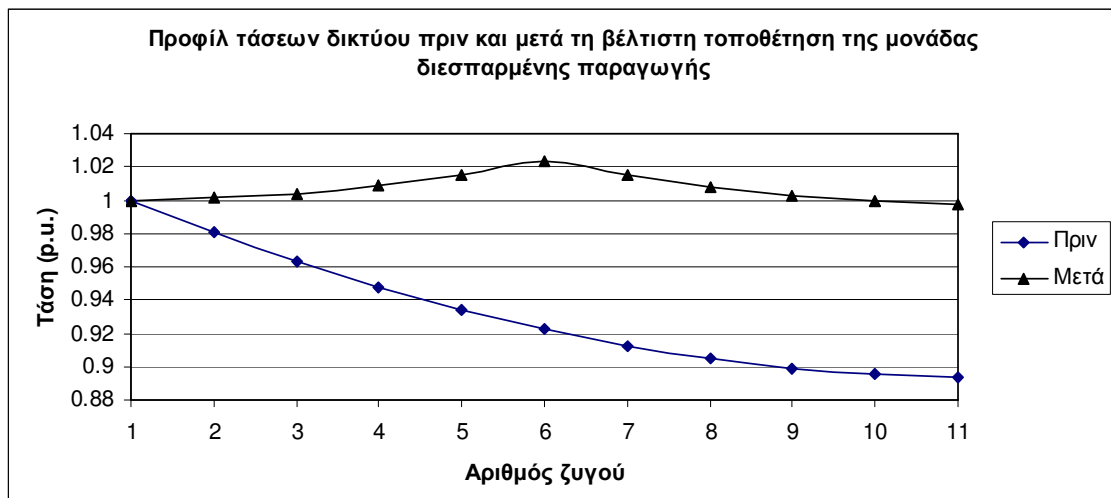
Οι απώλειες ενεργού ισχύος ελαχιστοποιούνται, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 6. Άρα, ο ζυγός 6 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Μάλιστα, το ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου είναι εντυπωσιακό, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.3.

**Πίνακας 8.3:** Αποτελέσματα μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών με ομοιόμορφη κατανομή φορτίου.

Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	1.7414 MW
Βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 6
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.2124 MW
Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	87.80 %

Σημειώνεται ότι και οι δύο μέθοδοι καταλήγουν στο ίδιο αποτέλεσμα σχετικά με τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής των 5.5 MW.

Η βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 6 του δικτύου βελτιώνει εντυπωσιακά τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς του δικτύου και επαναφέρει τις τάσεις των ζυγών 6-11 εντός του ορίου  $\pm 5\%$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.3.



**Σχήμα 8.3:** Προφίλ των τάσεων των ζυγών του ακτινικού δικτύου, πριν και μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής 5.5 MW.

Τέλος, στον Πίνακα 8.4 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων σε περιπτώσεις που η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής είναι μικρότερου μεγέθους και δεν τροφοδοτεί όλο το φορτίο, αλλά ένα μέρος αυτού. Παρατηρείται, ότι τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συμφωνούν μεταξύ τους και η βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής μεταβάλλεται και πλησιάζει προς το ζυγό 6, όσο μεγαλώνει το ποσοστό του φορτίου που τροφοδοτεί.

**Πίνακας 8.4:** Αποτελέσματα των δύο μεθόδων για διάφορα μεγέθη ισχύος της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που εισάγεται στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών.

	Παραγόμενη ισχύς μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	1.1 MW	2.2 MW	3.3 MW	4.4 MW
	Ποσοστό τροφοδότησης του συνολικού φορτίου του συστήματος	20%	40%	60%	80%
Αναλυτική μέθοδος	Θεωρητική βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.1·l	0.2·l	0.3·l	0.4·l
	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών μετά την αντιστοίχιση της θεωρητικής λύσης (τα χιλιόμετρα μετριοούνται από το τέλος της γραμμής)	2.5km ↓ ζυγός 10	5km ↓ ζυγός 9	7.5km ↓ ζυγός 8	10km ↓ ζυγός 7
Μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 10	ζυγός 9	ζυγός 8	ζυγός 7
	Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	1.7414 MW			
	Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.5691 MW	0.2098 MW	0.1012 MW	0.1196 MW
	Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	67.31 %	87.95 %	94.18 %	93.13 %

## 8.2.2 Κεντρική κατανομή φορτίου

Θεωρείται ότι τα φορτία του ακτινικού δικτύου έχουν συνολικό μέγεθος  $2.6 MW$  και ότι κατανέμονται κεντρικά (centrally distributed load) στους ζυγούς του δικτύου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.5. Στόχος είναι η βέλτιστη τοποθέτηση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $2.6 MW$ , που τροφοδοτεί όλο το φορτίο του συστήματος.

**Πίνακας 8.5:** Ομοιόμορφη κατανομή φορτίου στους ζυγούς του ακτινικού δικτύου.

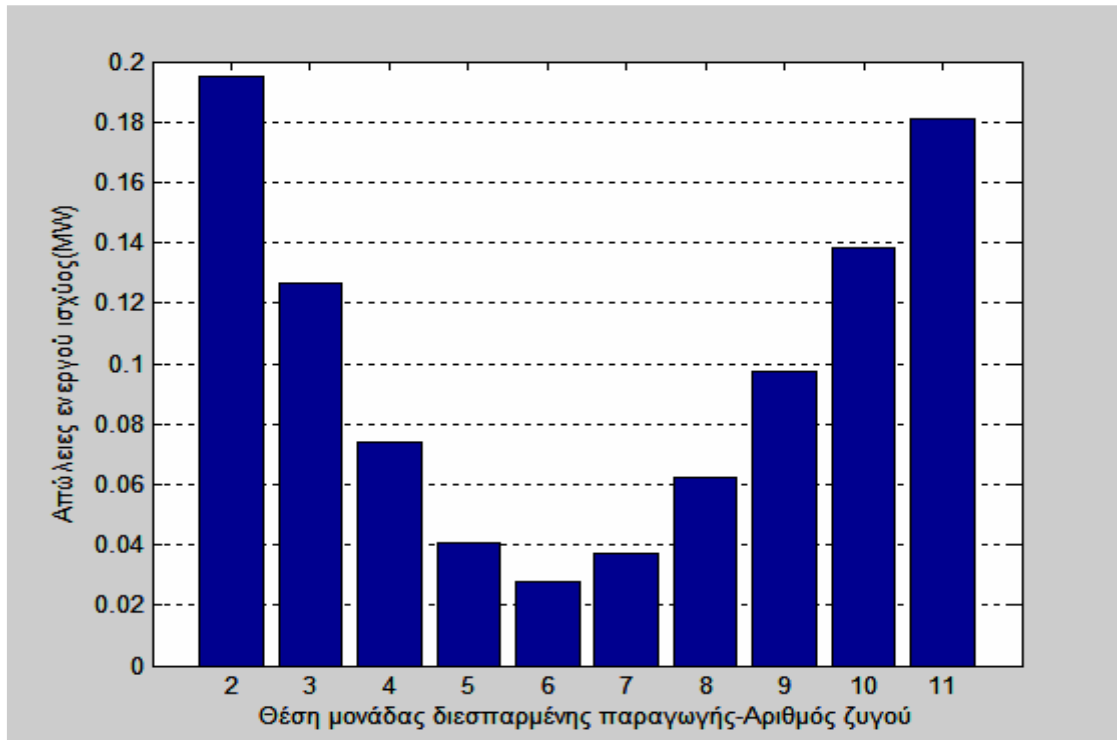
Αριθμός ζυγού	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Φορτίο (MW)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05

Η υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου δίνει τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 8.6. Με βάση τη θεωρητική ανάλυση, η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής πρέπει να τοποθετηθεί σε απόσταση  $12.5 km$  από το πέρας του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών, σημείο στο οποίο βρίσκεται ο ζυγός 6. Άρα, ο ζυγός 6 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο.

**Πίνακας 8.6:** Αποτελέσματα αναλυτικής μεθόδου για κεντρική κατανομή φορτίου.

<p>Θεωρητική ακτινική γραμμή με κεντρικά διανεμημένο φορτίο</p>	$J(x) = \begin{cases} \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot x & 0 \leq x \leq \frac{l}{2} \\ \frac{2}{l} \cdot J_0 \cdot (l-x) & \frac{l}{2} \leq x \leq l \end{cases}$
<p>Θεωρητικές απώλειες ενεργού ισχύος πριν την τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής</p>	$0.2875 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3$
<p>Θεωρητική βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής</p>	$0.5 \cdot l$
<p>Θεωρητικές απώλειες ενεργού ισχύος μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής</p>	$0.0375 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3$
<p>Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος της θεωρητικής ακτινικής γραμμής ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος (%)</p>	$\frac{0.2875 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 - 0.0375 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3}{0.2875 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3} = 86.96\%$
<p>Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών μετά την αντιστοίχιση της θεωρητικής λύσης</p>	$x_{opt} = 0.5 \cdot 25 km = 12.5 km \rightarrow \text{ζυγός 6}$

Μέσω της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου, υπολογίζονται οι απώλειες ενεργού ισχύος του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών κεντρικής κατανομής φορτίου, ανάλογα με την κάθε πιθανή θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.4.



**Σχήμα 8.4:** Απώλειες ενεργού ισχύος του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

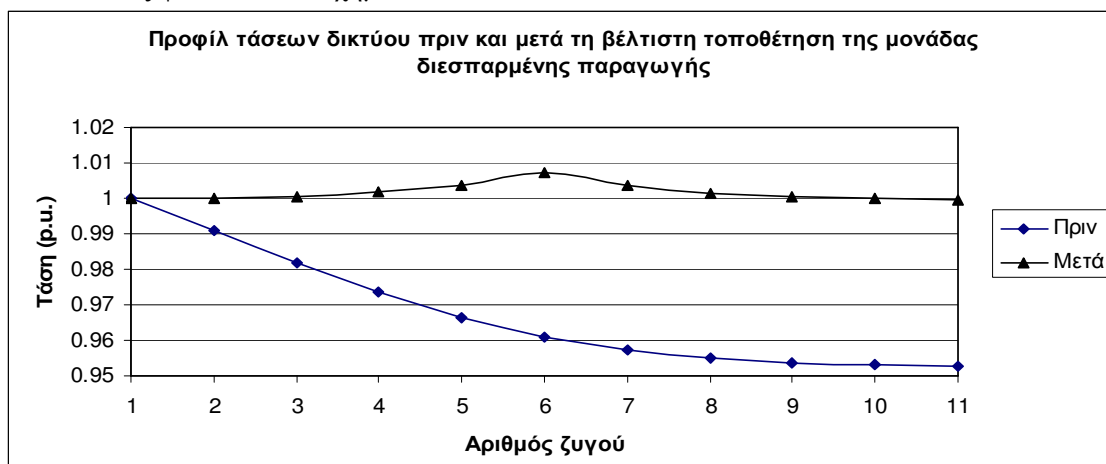
Οι απώλειες ενεργού ισχύος ελαχιστοποιούνται, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 6. Άρα, ο ζυγός 6 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Μάλιστα, το ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου και σε αυτήν την περίπτωση είναι πολύ μεγάλο, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.7.

**Πίνακας 8.7:** Αποτελέσματα μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών με κεντρική κατανομή φορτίου.

Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	0.2735 MW
Βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 6
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.0276 MW
Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	89.89 %

Σημειώνεται ότι και οι δύο μέθοδοι καταλήγουν ακριβώς στο ίδιο αποτέλεσμα σχετικά με τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής των 2.6 MW.

Η βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 6 του δικτύου επιδρά θετικά στο προφίλ των τάσεων των ζυγών, αφού όλες οι τιμές προσεγγίζουν την ονομαστική τιμή του 1 p.u., ενώ αρχικά οι περισσότερες ήταν οριακά εντός του περιορισμού  $\pm 5\%$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.5.



**Σχήμα 8.5:** Προφίλ των τάσεων των ζυγών του ακτινικού δικτύου, πριν και μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής 2.6 MW.

Τέλος, στον Πίνακα 8.8 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων σε περιπτώσεις που η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής είναι μικρότερου μεγέθους και δεν τροφοδοτεί όλο το φορτίο, αλλά ένα μέρος αυτού. Παρατηρείται, ότι τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συμφωνούν μεταξύ τους. Σημειώνεται, ότι επειδή οι λύσεις της αναλυτικής μεθόδου αντιστοιχούν σε σημεία του δικτύου όπου δεν υπάρχει κάποιος ζυγός, επιλέγεται ως βέλτιστη θέση εγκατάστασης ο πιο κοντινός στο σημείο της λύσης ζυγός.

**Πίνακας 8.8:** Αποτελέσματα των δύο μεθόδων για διάφορα μεγέθη ισχύος της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που εισάγεται στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών.

	Παραγόμενη ισχύς μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.52 MW	1.04 MW	1.56 MW	2.08 MW
	Ποσοστό τροφοδότησης του συνολικού φορτίου του συστήματος	20%	40%	60%	80%
Αναλυτική μέθοδος	Θεωρητική βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.224·l	0.316·l	0.387·l	0.447·l
	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών μετά την αντιστοίχιση της θεωρητικής λύσης (τα χιλιόμετρα μετρούνται από το τέλος της γραμμής)	5.6km ↓ ζυγός 9	7.9km ↓ ζυγός 8	9.68km ↓ ζυγός 7	11.18km ↓ ζυγός 7
Μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 9	ζυγός 8	ζυγός 7	ζυγός 7
	Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	0.2735 MW			
	Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.1429 MW	0.0674 MW	0.0296 MW	0.02 MW
	Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	47.76 %	75.34 %	89.18 %	92.68 %

### 8.2.3 Πρώτη τριγωνική κατανομή φορτίου

Θεωρείται ότι τα φορτία του ακτινικού δικτύου έχουν συνολικό μέγεθος  $3.3 MW$  και ότι κατανέμονται τριγωνικά με αυξητική μορφή (increasingly distributed load) στους ζυγούς του δικτύου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.9. Στόχος είναι η βέλτιστη τοποθέτηση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $3.3 MW$ , που τροφοδοτεί όλο το φορτίο του συστήματος.

**Πίνακας 8.9:** Πρώτη τριγωνική κατανομή φορτίου στους ζυγούς του ακτινικού δικτύου.

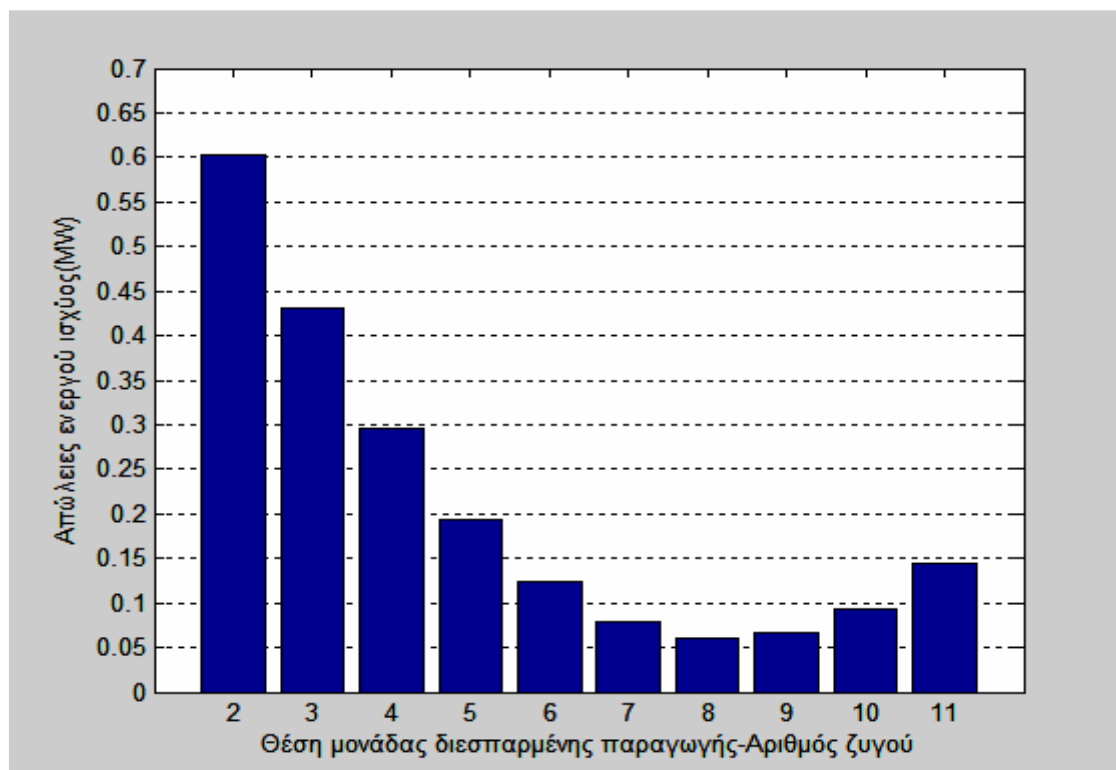
Αριθμός ζυγού	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Φορτίο (MW)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55

Η υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου δίνει τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 8.10. Με βάση τη θεωρητική ανάλυση, η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής πρέπει να τοποθετηθεί στο σημείο που απέχει απόσταση  $7.32 km$  από το πέρας του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών. Ο πιο κοντινός σε αυτό το σημείο ζυγός είναι ο ζυγός 8. Άρα, ο ζυγός 8 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο.

**Πίνακας 8.10:** Αποτελέσματα αναλυτικής μεθόδου για πρώτη τριγωνική κατανομή φορτίου.

<p>Θεωρητική ακτινική γραμμή με τριγωνικά αυξητικό διανεμημένο φορτίο</p>	
<p>Θεωρητικές απώλειες ενεργού ισχύος πριν την τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής</p>	$0.4 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3$
<p>Θεωρητική βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής</p>	$0.2929 \cdot l$
<p>Θεωρητικές απώλειες ενεργού ισχύος μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής</p>	$0.0464 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3$
<p>Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος της θεωρητικής ακτινικής γραμμής ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος (%)</p>	$\frac{0.4 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 - 0.0464 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3}{0.4 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3} = 88.39\%$
<p>Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών μετά την αντιστοίχιση της θεωρητικής λύσης</p>	$x_{opt} = 0.2929 \cdot 25 km \approx 7.32 km \rightarrow$ ζυγός 8

Μέσω της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου, υπολογίζονται οι απώλειες ενεργού ισχύος του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών πρώτης τριγωνικής κατανομής φορτίου, ανάλογα με την κάθε πιθανή θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.6.



**Σχήμα 8.6:** Απώλειες ενεργού ισχύος του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

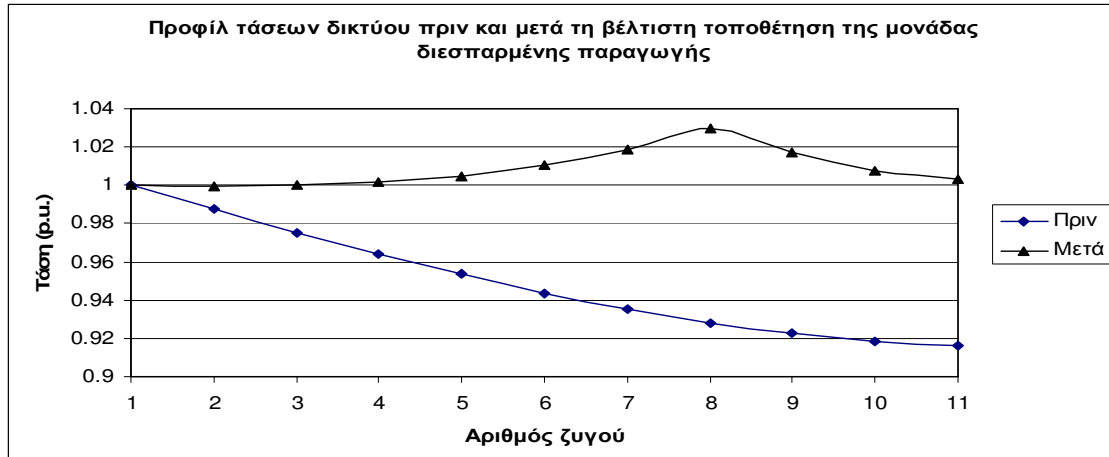
Οι απώλειες ενεργού ισχύος ελαχιστοποιούνται, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 8. Άρα, ο ζυγός 8 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Μάλιστα, οι απώλειες ενεργού ισχύος μειώνονται θεαματικά, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.11.

**Πίνακας 8.11:** Αποτελέσματα μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών με την πρώτη τριγωνική κατανομή φορτίου.

Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	0.8102 MW
Βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 8
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.061 MW
Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	92.48 %

Σημειώνεται ότι και οι δύο μέθοδοι καταλήγουν ακριβώς στο ίδιο αποτέλεσμα σχετικά με τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής των 3.3 MW.

Και σε αυτή την περίπτωση, το αρχικά αδύναμο δίκτυο από πλευράς παραβίασης του ορίου τάσης, αποκτά τάσεις κοντά στην ονομαστική τους τιμή μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 8. Ο ζυγός αυτός στη νέα κατάσταση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τάση του δικτύου, εξαιτίας της έγχυσης σε αυτόν όλης της ενεργού ισχύος της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.



**Σχήμα 8.7:** Προφίλ των τάσεων των ζυγών του ακτινικού δικτύου, πριν και μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής 3.3 MW .

Τέλος, στον Πίνακα 8.12 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων σε περιπτώσεις που η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής είναι μικρότερου μεγέθους και δεν τροφοδοτεί όλο το φορτίο, αλλά ένα μέρος αυτού. Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση ότι όσο μικρότερη είναι η παραγόμενη ισχύς της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, τόσο πιο κοντά στο πέρας του ακτινικού δικτύου είναι η βέλτιστη θέση εγκατάστασής της.

**Πίνακας 8.12:** Αποτελέσματα των δύο μεθόδων για διάφορα μεγέθη ισχύος της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που εισάγεται στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών.

		0.5 MW	1.5 MW	2.3 MW	3.1 MW
Παραγόμενη ισχύς μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής		0.5 MW	1.5 MW	2.3 MW	3.1 MW
Ποσοστό τροφοδότησης του συνολικού φορτίου του συστήματος		15%	45%	70%	95%
Αναλυτική μέθοδος	Θεωρητική βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.039·l	0.119·l	0.194·l	0.275·l
	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών μετά την αντιστοίχιση της θεωρητικής λύσης (τα χιλιόμετρα μετριοούνται από το τέλος της γραμμής)	0.98km ↓ ζυγός 11	2.98km ↓ ζυγός 10	4.85km ↓ ζυγός 9	6.88km ↓ ζυγός 8
Μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 11	ζυγός 10	ζυγός 9	ζυγός 8
	Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	0.8102 MW			
	Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.4467 MW	0.1232 MW	0.0426 MW	0.0531 MW
	Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	44.86 %	84.79 %	94.74 %	93.45 %



### 8.2.4 Δεύτερη τριγωνική κατανομή φορτίου

Θεωρείται ότι τα φορτία του ακτινικού δικτύου έχουν συνολικό μέγεθος  $3.3 MW$  και ότι κατανέμονται τριγωνικά με μειούμενη μορφή (decreasingly distributed load) στους ζυγούς του δικτύου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.13. Στόχος είναι η βέλτιστη τοποθέτηση μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $3.3 MW$ , που τροφοδοτεί όλο το φορτίο του συστήματος.

**Πίνακας 8.13:** Δεύτερη τριγωνική κατανομή φορτίου στους ζυγούς του ακτινικού δικτύου.

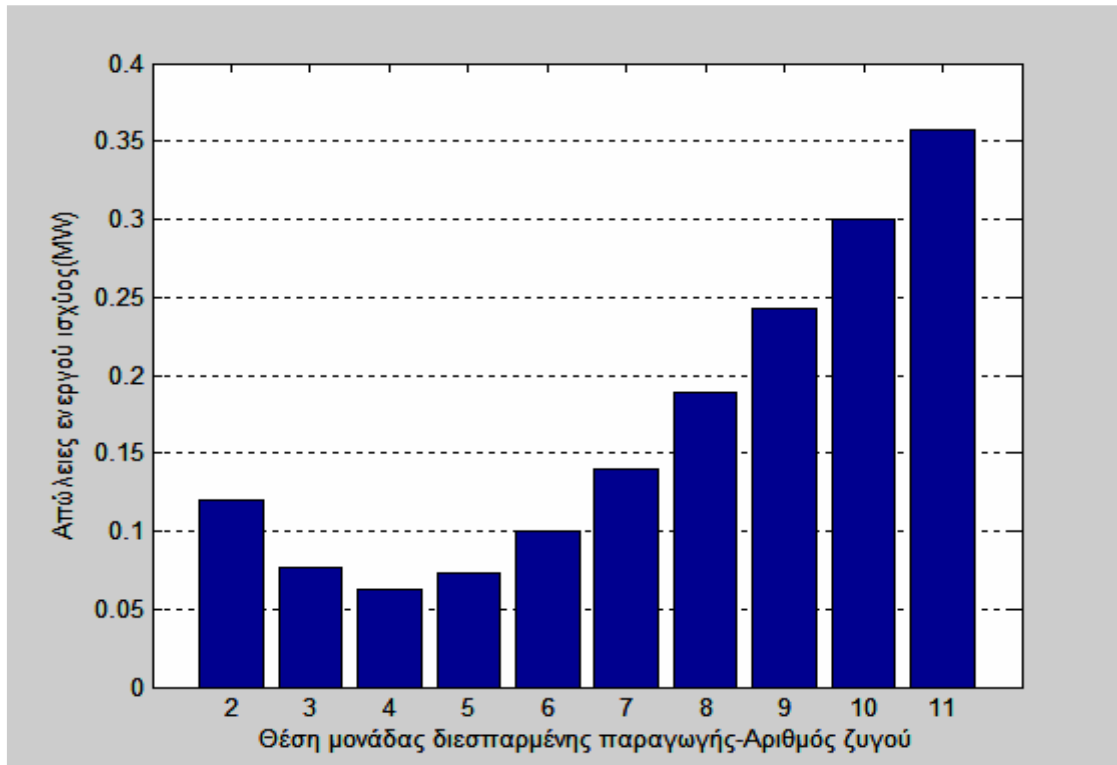
Αριθμός ζυγού	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Φορτίο (MW)	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Η υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου δίνει τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 8.14. Με βάση τη θεωρητική ανάλυση, η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής πρέπει να τοποθετηθεί στο σημείο που απέχει απόσταση  $17.68 km$  από το πέρας του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών. Ο πιο κοντινός σε αυτό το σημείο ζυγός είναι ο ζυγός 4. Άρα, ο ζυγός 4 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο.

**Πίνακας 8.14:** Αποτελέσματα αναλυτικής μεθόδου για δεύτερη τριγωνική κατανομή φορτίου.

Θεωρητική ακτινική γραμμή με τριγωνικά μειούμενο διανεμημένο φορτίο	
Θεωρητικές απώλειες ενεργού ισχύος πριν την τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	$0.15 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3$
Θεωρητική βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	$0.7071 \cdot l$
Θεωρητικές απώλειες ενεργού ισχύος μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	$0.0464 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3$
Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος της θεωρητικής ακτινικής γραμμής ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος (%)	$\frac{0.15 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3 - 0.0464 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3}{0.15 \cdot J_0^2 \cdot R \cdot l^3} = 69.04\%$
Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών μετά την αντιστοίχιση της θεωρητικής λύσης	$x_{opt} = 0.7071 \cdot 25 km \approx 17.68 km \rightarrow$ ζυγός 4

Μέσω της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου, υπολογίζονται οι απώλειες ενεργού ισχύος του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών δεύτερης τριγωνικής κατανομής φορτίου, ανάλογα με την κάθε πιθανή θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.8.



**Σχήμα 8.8:** Απώλειες ενεργού ισχύος του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

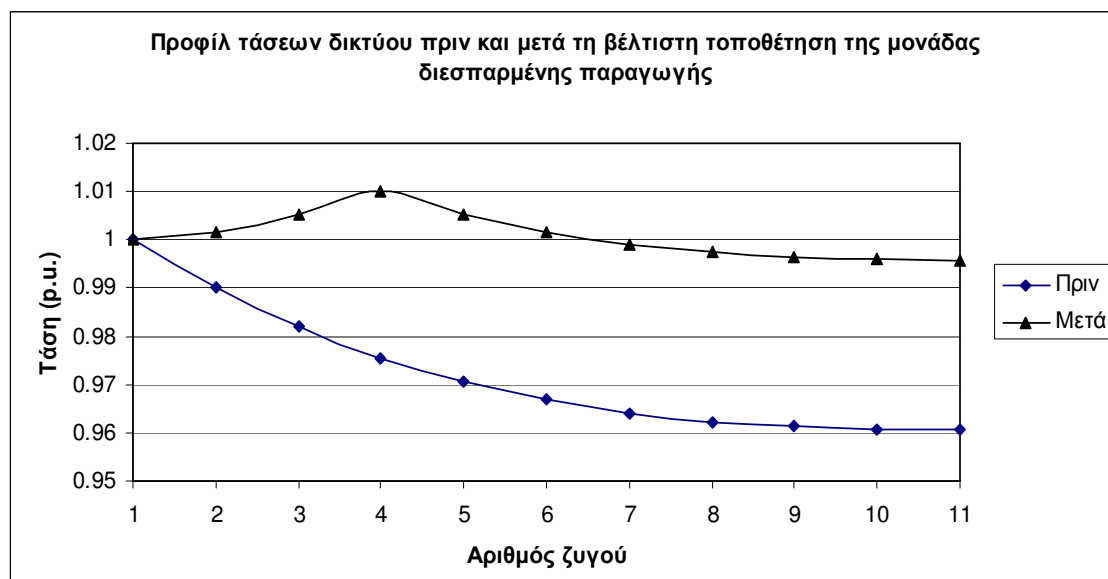
Οι απώλειες ενεργού ισχύος ελαχιστοποιούνται, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 4. Άρα, ο ζυγός 4 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Σε σχέση με τις άλλες κατανομές φορτίου, το ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος είναι πιο μικρό, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.15.

**Πίνακας 8.15:** Αποτελέσματα μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών με την δεύτερη τριγωνική κατανομή φορτίου.

Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	0.2017 MW
Βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 4
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.0627 MW
Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	68.9 %

Σημειώνεται ότι και οι δύο μέθοδοι καταλήγουν ακριβώς στο ίδιο αποτέλεσμα σχετικά με τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής των 3.3 MW.

Και σε αυτή την περίπτωση, οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς του δικτύου βελτιώνονται και προσεγγίζουν την ονομαστική τους τιμή, εξαιτίας της βέλτιστης τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ζυγό 4.



**Σχήμα 8.8:** Προφίλ των τάσεων των ζυγών του ακτινικού δικτύου, πριν και μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής 3.3 MW .

Τέλος, στον Πίνακα 8.16 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων σε περιπτώσεις που η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής είναι μικρότερου μεγέθους και δεν τροφοδοτεί όλο το φορτίο, αλλά ένα μέρος αυτού.

**Πίνακας 8.16:** Αποτελέσματα των δύο μεθόδων για διάφορα μεγέθη ισχύος της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που εισάγεται στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών.

	Παραγόμενη ισχύς μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.66 MW	1.65 MW	2.31 MW	3 MW
	Ποσοστό τροφοδότησης του συνολικού φορτίου του συστήματος	20%	50%	70%	90%
Αναλυτική μέθοδος	Θεωρητική βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.316·l	0.5·l	0.591·l	0.671·l
	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών μετά την αντιστοίχιση της θεωρητικής λύσης (τα χιλιόμετρα μετρούνται από το τέλος της γραμμής)	7.9km ↓ ζυγός 8	12..5km ↓ ζυγός 6	14.78km ↓ ζυγός 5	16.78km ↓ ζυγός 4
Μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 8	ζυγός 6	ζυγός 5	ζυγός 4
	Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	0.2017 MW			
	Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.0853 MW	0.064 MW	0.0285 MW	0.0501 MW
	Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	56.71 %	86.91 %	85.83 %	75.16 %

### 8.3 ΑΚΤΙΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 11 ΖΥΓΩΝ ΧΡΟΝΟΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΑΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

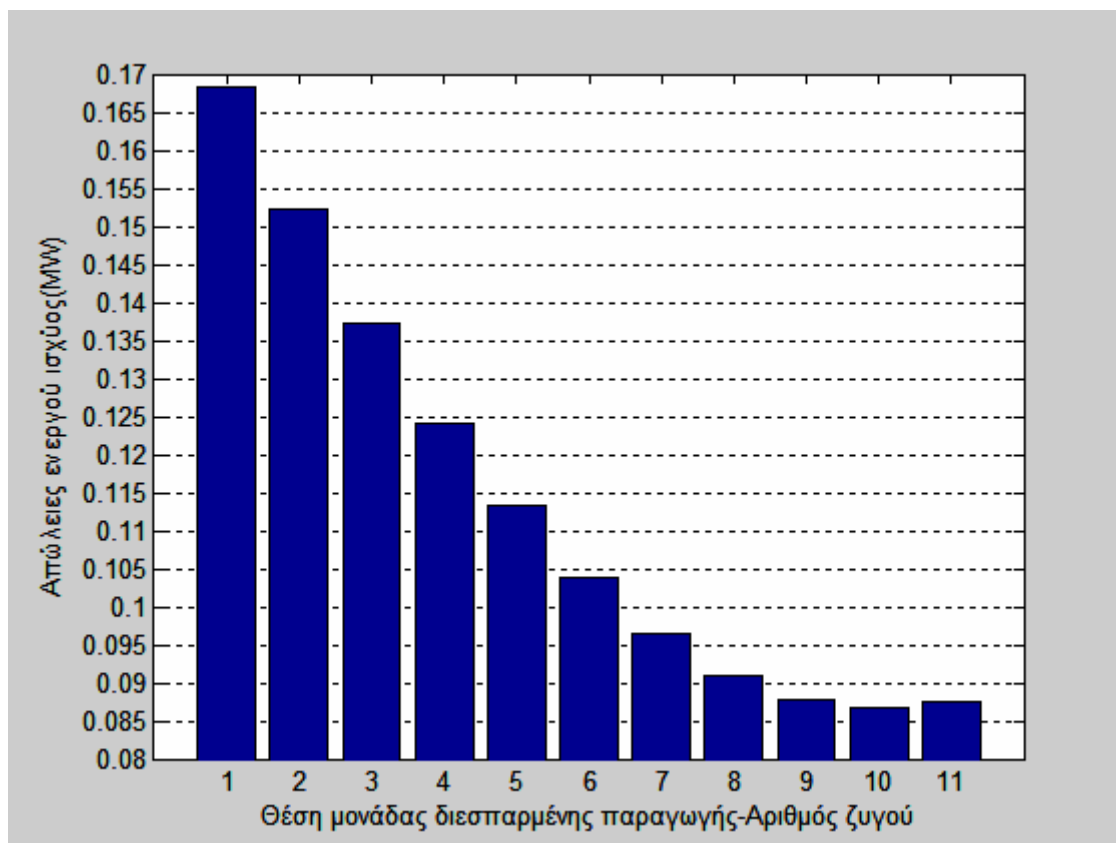
Το ίδιο ακτινικό δίκτυο, που μελετήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, θεωρείται, τώρα, ότι εξυπηρετεί φορτίο ομοιόμορφης κατανομής που οι τιμές του μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η ημερήσια χρονολογική καμπύλη του συνολικού φορτίου, το οποίο κατανέμεται ομοιόμορφα στους ζυγούς του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών, φαίνεται στο Σχήμα 4.8 του αντίστοιχου αναλυτικού παραδείγματος της Ενότητας 4.5. Ως μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, που παράγει μεταβλητή ισχύ, επιλέγεται ένα αιολικό πάρκο ονομαστικής ισχύος  $1\text{ MW}$ . Η μέση ημερήσια ισχύς που παράγει το αιολικό πάρκο φαίνεται στο Σχήμα 4.9 της Ενότητας 4.5.

Η διαδικασία υπολογισμού της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο, δείχτηκε στο αναλυτικό παράδειγμα της Ενότητας 4.5 και το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν ότι η βέλτιστη θέση βρίσκεται σε απόσταση  $0.14 \cdot l$  από το πέρας της ακτινικής γραμμής, όπου  $l$  το μήκος της ακτινικής γραμμής. Στο συγκεκριμένο ακτινικό δίκτυο, η γραμμή έχει μήκος  $25\text{ km}$ , οπότε με αριθμητική αντικατάσταση προκύπτει ότι η βέλτιστη θέση βρίσκεται σε απόσταση  $3.5\text{ km}$  από το πέρας της γραμμής. Οι ζυγοί του ακτινικού δικτύου απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $2.5\text{ km}$ , οπότε η βέλτιστη θέση βρίσκεται ανάμεσα στους ζυγούς 10 και 11 του ακτινικού δικτύου, αλλά πιο κοντά στο ζυγό 10. Άρα, δεδομένου ότι η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να συνδεθεί μόνο σε κάποιο ζυγό του δικτύου και όχι σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής, ως βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής επιλέγεται ο ζυγός 10.

Για την επιβεβαίωση της προτεινόμενης λύσης της αναλυτικής μεθόδου χρησιμοποιείται η μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου, η οποία υστερεί πάρα πολύ σε χρόνους εκτέλεσης, αλλά δίνει ακριβή αποτελέσματα. Υπολογίζονται οι μέσες απώλειες ενεργού ισχύος του ακτινικού δικτύου, ανάλογα με θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.9. Σημειώνεται, ότι για τον υπολογισμό των μέσων απωλειών ενεργού ισχύος του συστήματος για μια πιθανή θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, απαιτείται η εκτέλεση 24 ροών φορτίων, εξαιτίας του μεταβλητού φορτίου και της μεταβλητής ισχύος της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Οι μέσες απώλειες ενεργού ισχύος ελαχιστοποιούνται, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 10. Άρα, ο ζυγός 10 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, σύμφωνα και με αυτή τη μέθοδο. Στον Πίνακα 8.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου σχετικά με τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής μεταβλητής ισχύος στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών χρονομεταβλητού φορτίου, καθώς και τη μείωση των μέσων απωλειών ενεργού ισχύος που επιτυγχάνεται.

**Πίνακας 8.17:** Αποτελέσματα μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου.

Αρχικές μέσες απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	0.16825 MW
Βέλτιστη θέση εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 10
Μέσες απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.0866 MW
Μείωση μέσων απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	48.53%



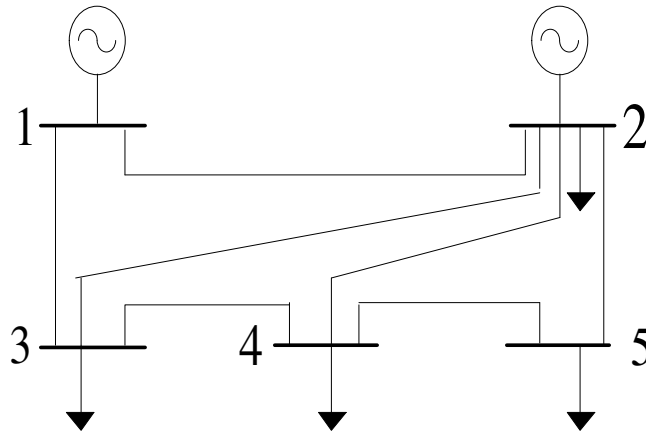
**Σχήμα 8.9:** Μέσες απώλειες ενεργού ισχύος του ακτινικού δικτύου 11 ζυγών, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

## 8.4 ΒΡΟΧΟΕΙΔΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Σε αυτή την ενότητα διερευνώνται οι βέλτιστες θέσεις εγκατάστασης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε κάποια πρότυπα βροχοειδή συστήματα της IEEE, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 6 και τη μέθοδο προσομοίωσης με ροές φορτίου. Τα φορτία και οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής θεωρούνται σταθερής ισχύος. Εξετάζεται, επίσης, η επίδραση της βέλτιστης τοποθέτησης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο προφίλ των τάσεων των ζυγών. Η μελέτη αυτή αφορά μόνο τους ζυγούς φορτίου των συστημάτων, καθώς στους ζυγούς αναφοράς και παραγωγής οι τάσεις είναι προκαθορισμένες και σταθερές. Υπενθυμίζεται, ότι η μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου αποκλείει από πιθανή βέλτιστη θέση εγκατάστασης το ζυγό αναφοράς του συστήματος, για αυτό και δεν θα εμφανίζεται ως πιθανή θέση στα αντίστοιχα διαγράμματα της μεθόδου. Ζυγός αναφοράς σε όλα τα δίκτυα είναι ο ζυγός 1, εκτός από τα τροποποιημένα δίκτυα 9 και 18 ζυγών αντίστοιχα.

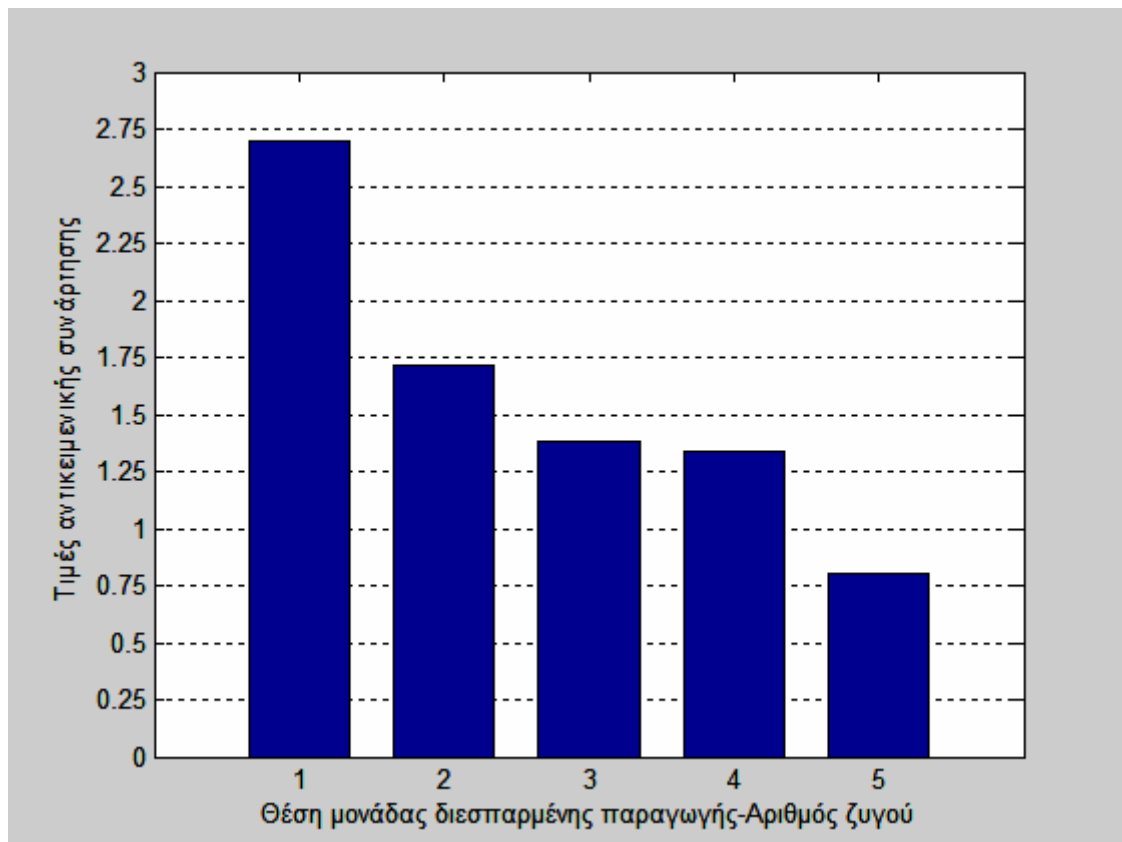
### 8.4.1 Τροποποιημένο δίκτυο 5 ζυγών της IEEE

Τα δεδομένα του τροποποιημένου δικτύου των 5 ζυγών της IEEE είναι από το [8.1] και βρίσκονται επίσης στο παράρτημα Α, στους Πίνακες Α.1.1 και Α.1.2, για τις γραμμές και τους ζυγούς του δικτύου, αντίστοιχα. Πρόκειται για δίκτυο μέσης τάσης 10 kV, που αποτελείται από 7 γραμμές και που έχει συνολικό φορτίο  $(14.5 + j4)$  MVA. Η τοπολογία του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 8.10.



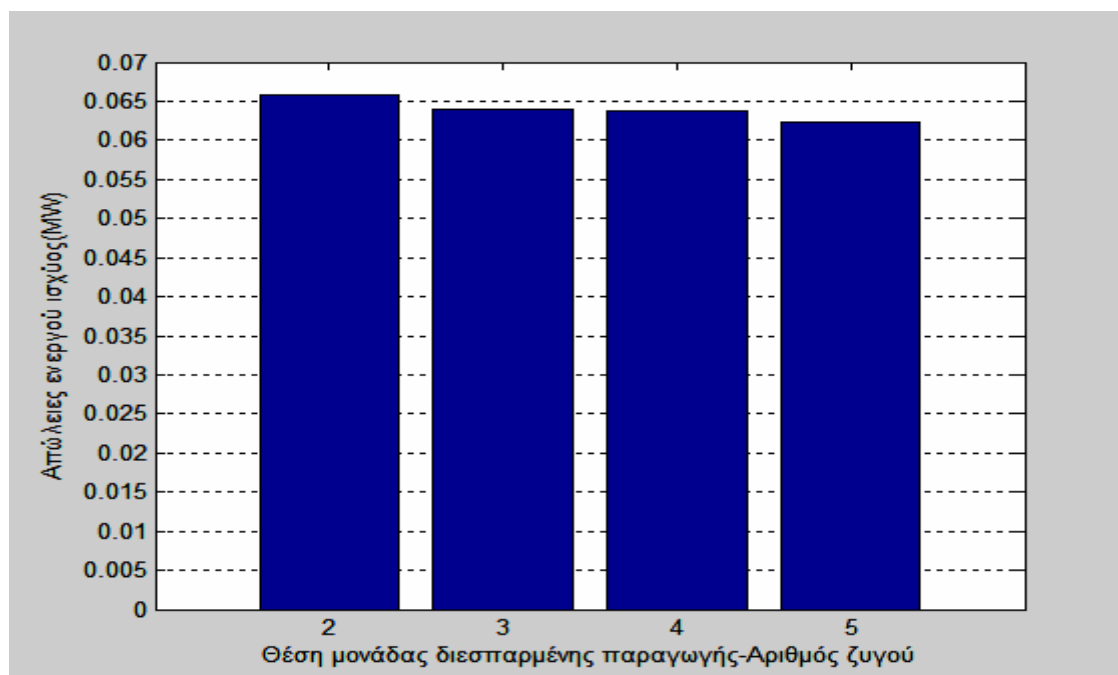
**Σχήμα 8.10:** Μονογραμμικό διάγραμμα τροποποιημένου δικτύου 5 ζυγών της IEEE.

Στόχος είναι η εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που παράγει ενεργό ισχύ  $1\text{ MW}$ , τιμή που αντιστοιχεί περίπου στο 6.5% του συνολικού φορτίου του συστήματος. Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης της αναλυτικής μεθόδου φαίνονται στο Σχήμα 8.11. Παρατηρείται ότι η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την ελάχιστη τιμή της, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 5 του δικτύου. Άρα, ο ζυγός 5 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο τροποποιημένο δίκτυο των 5 ζυγών της IEEE, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο.



**Σχήμα 8.11:** Τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης της αναλυτικής μεθόδου, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $1\text{ MW}$  στο τροποποιημένο δίκτυο 5 ζυγών της IEEE.

Μέσω της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου, υπολογίζονται οι απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου, ανάλογα με την κάθε πιθανή θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.12. Οι απώλειες ενεργού ισχύος ελαχιστοποιούνται, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 5. Άρα, ο ζυγός 5 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο 5 ζυγών της IEEE, σύμφωνα και με αυτή τη μέθοδο. Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 8.18. Σημειώνεται ότι η βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής δεν επηρέασε καθόλου τις τάσεις στους ζυγούς του δικτύου.



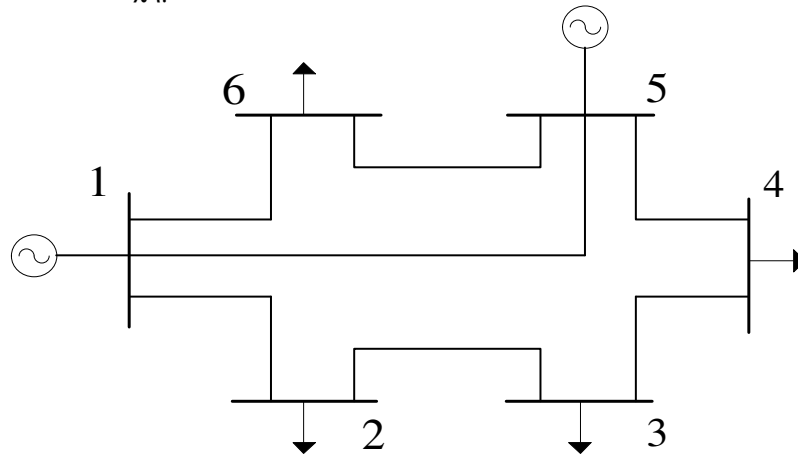
**Σχήμα 8.12:** Απώλειες ενεργού ισχύος του τροποποιημένου δικτύου 5 ζυγών της IEEE, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

**Πίνακας 8.18:** Αποτελέσματα των δύο μεθόδων στο τροποποιημένο δίκτυο 5 ζυγών της IEEE.

	Παραγόμενη ισχύς μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	1 MW
Αναλυτική μέθοδος	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 5
Μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 5
	Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	0.0691 MW
	Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.064 MW
	Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	7.41 %

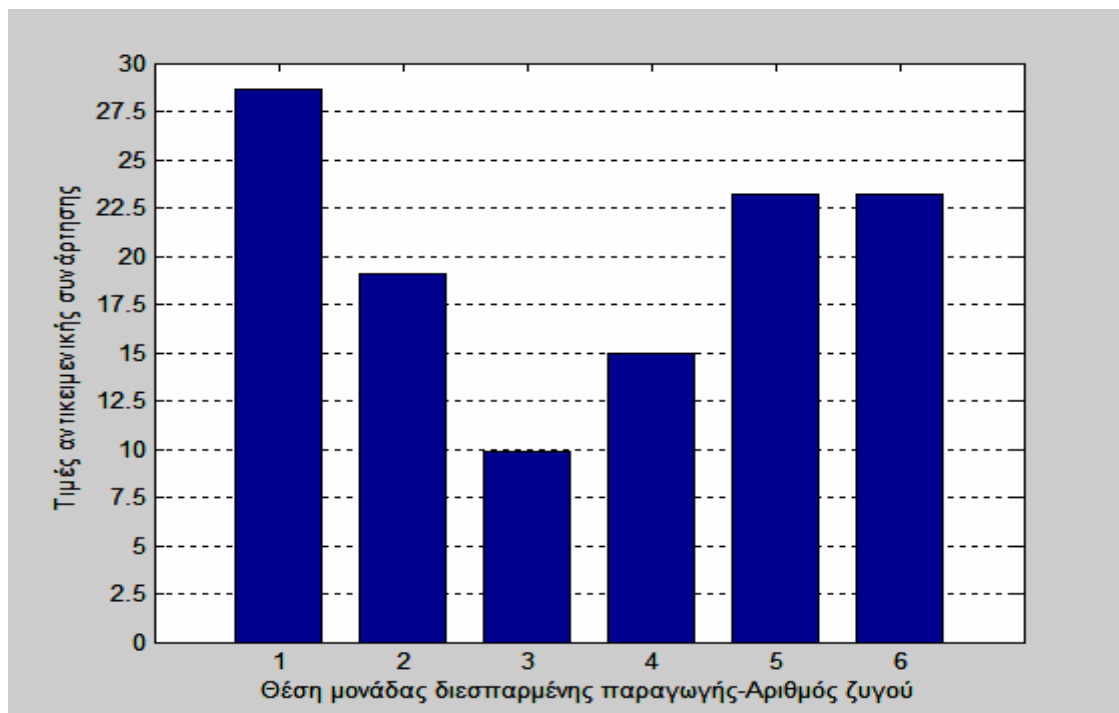
### 8.4.2 Δίκτυο 6 ζυγών της IEEE

Τα δεδομένα του δικτύου των 6 ζυγών της IEEE είναι από το [8.2] και βρίσκονται επίσης στο Παράρτημα Α, στους Πίνακες Α.2.1 και Α.2.2, για τις γραμμές και τους ζυγούς του δικτύου, αντίστοιχα. Πρόκειται για βροχοειδές δίκτυο διανομής τάσης  $25\text{ kV}$ , που αποτελείται από 7 γραμμές και που έχει συνολικό φορτίο  $(21.25 + j5.75)\text{ MVA}$ . Η τοπολογία του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 8.13.



**Σχήμα 8.13:** Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 6 ζυγών της IEEE.

Στόχος είναι η εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που παράγει ενεργό ισχύ  $5\text{ MW}$ , τιμή που αντιστοιχεί περίπου στο 22.5% του συνολικού φορτίου του συστήματος. Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτουν από την υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου φαίνονται στο Σχήμα 8.14.

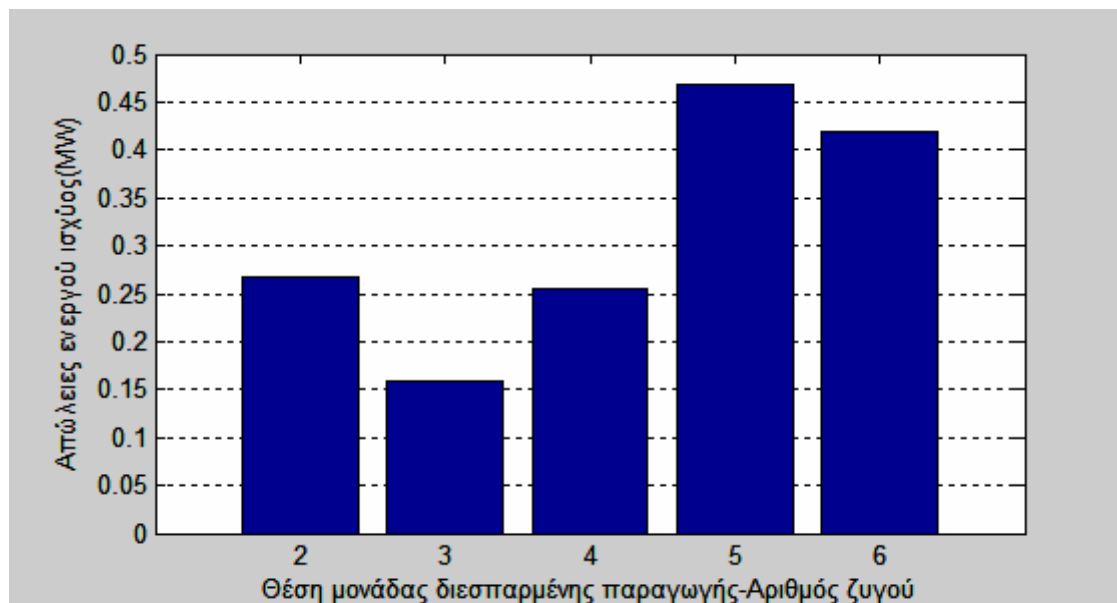


**Σχήμα 8.14:** Τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης της αναλυτικής μεθόδου, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $5\text{ MW}$  στο δίκτυο 6 ζυγών της IEEE.



Παρατηρείται ότι η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την ελάχιστη τιμή της, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 3 του δικτύου. Άρα, ο ζυγός 3 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο των 6 ζυγών της IEEE, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο.

Μέσω της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου, υπολογίζονται οι απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου, ανάλογα με την κάθε πιθανή θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.15. Οι απώλειες ενεργού ισχύος ελαχιστοποιούνται, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 3. Άρα, ο ζυγός 3 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο 6 ζυγών της IEEE, σύμφωνα και με αυτή τη μέθοδο. Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 8.19.



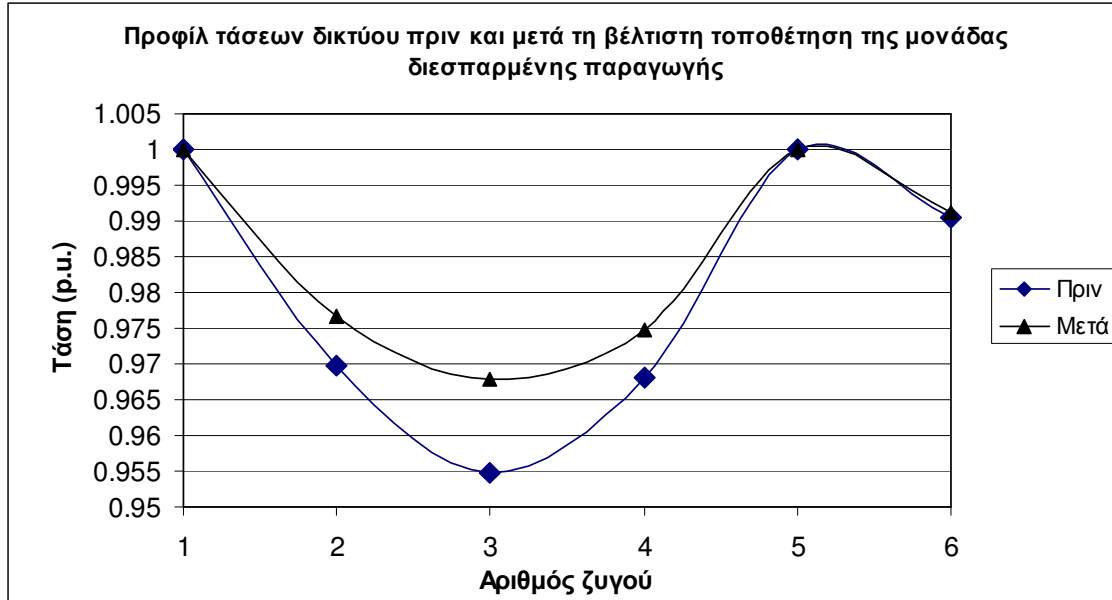
**Σχήμα 8.15:** Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου 6 ζυγών της IEEE, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

**Πίνακας 8.19:** Αποτελέσματα των δύο μεθόδων στο δίκτυο 6 ζυγών της IEEE.

	Παραγόμενη ισχύς μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	5 MW
Αναλυτική μέθοδος	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 3
Μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 3
	Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	0.4608 MW
	Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	0.2149 MW
	Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	53.36 %

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 8.19 φαίνεται ότι η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής  $5 MW$ , αν τοποθετηθεί βέλτιστα στο δίκτυο 6 ζυγών της IEEE, αντισταθμίζει σε μεγάλο βαθμό, κατά  $53.36\%$ , τις απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου.

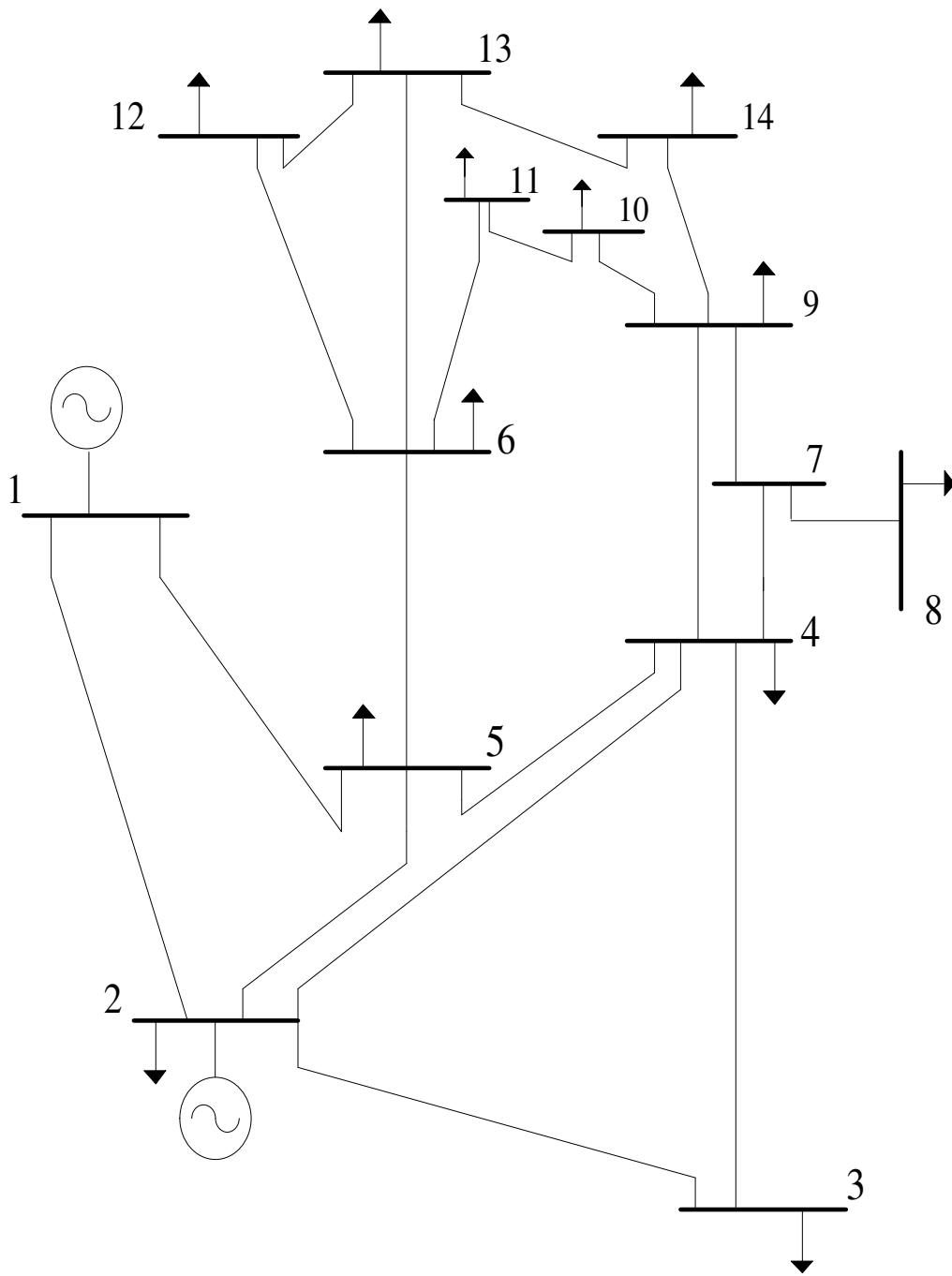
Η βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $5 MW$  προκαλεί μικρή βελτίωση των τάσεων στους ζυγούς 2, 3 και 4 του δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.16.



**Σχήμα 8.16:** Προφίλ τάσεων των ζυγών του δικτύου 6 ζυγών της IEEE πριν και μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $5 MW$ .

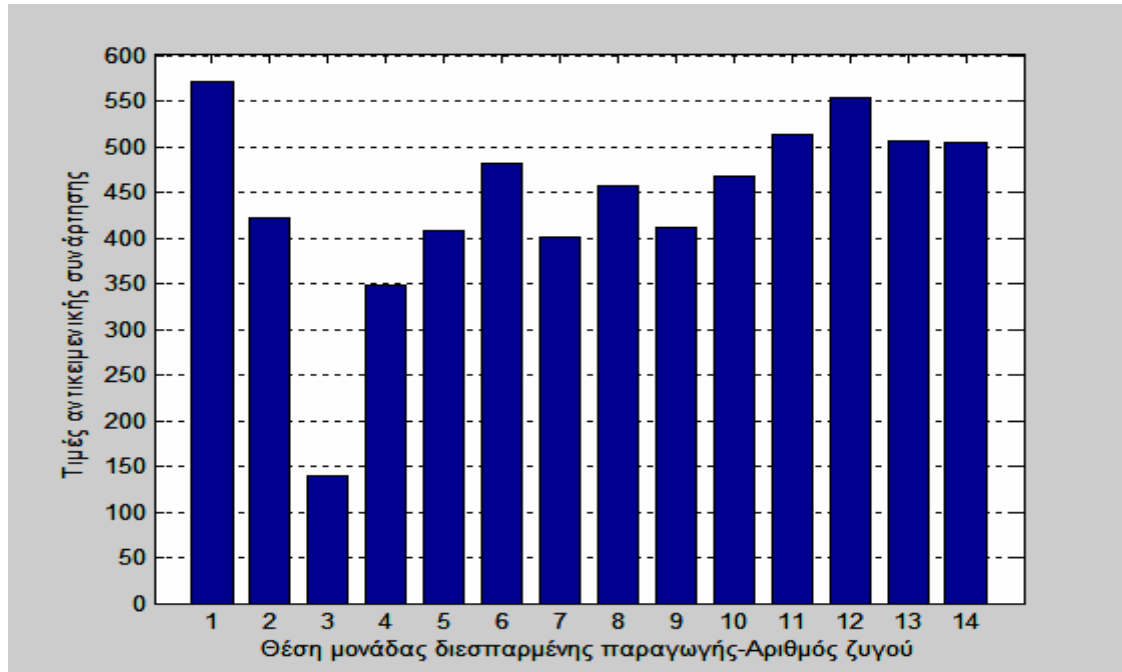
### 8.4.3 Δίκτυο 14 ζυγών της IEEE

Τα δεδομένα του δικτύου των 14 ζυγών της IEEE είναι από το [8.3] και βρίσκονται επίσης στο Παράρτημα Α, στους Πίνακες Α.3.1 και Α.3.2, για τις γραμμές και τους ζυγούς του δικτύου, αντίστοιχα. Πρόκειται για βροχοειδές συνδυασμένο σύστημα υπομεταφοράς και διανομής. Οι ζυγοί 1-5 λειτουργούν στην υψηλή τάση στα  $132 kV$ , ενώ οι ζυγοί 6-14 λειτουργούν στη μέση τάση στα  $33 kV$ . Το δίκτυο αποτελείται από 20 γραμμές και εξυπηρετεί συνολικό φορτίο  $(259 + j73.5) MVA$ . Η τοπολογία του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 8.17. Γίνεται διερεύνηση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που παράγει ενεργό ισχύ  $14 MW$ , τιμή που αντιστοιχεί περίπου στο  $5\%$  του συνολικού φορτίου του συστήματος.



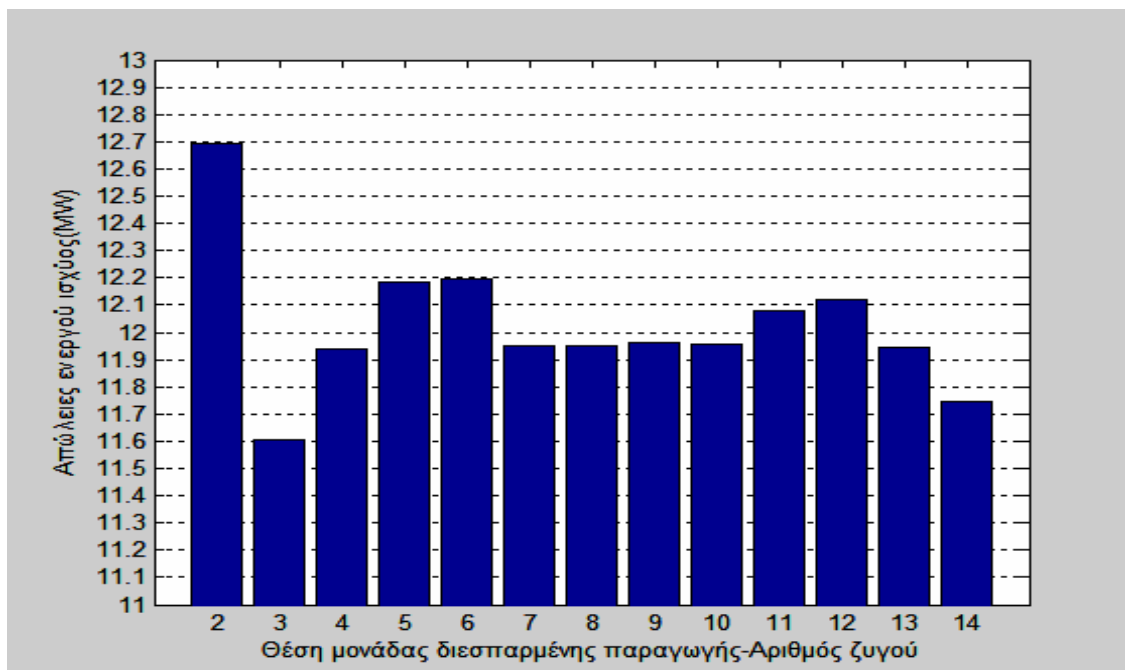
**Σχήμα 8.17:** Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 14 ζυγών της IEEE.

Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτουν από την υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου φαίνονται στο Σχήμα 8.18. Παρατηρείται ότι η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την ελάχιστη τιμή της, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 3 του δικτύου. Άρα, ο ζυγός 3 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο των 14 ζυγών της IEEE, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο.



**Σχήμα 8.18:** Τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης της αναλυτικής μεθόδου, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $14\text{ MW}$  στο δίκτυο 14 ζυγών της IEEE.

Μέσω της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου, υπολογίζονται οι απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου, ανάλογα με την κάθε πιθανή θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.19. Οι απώλειες ενεργού ισχύος ελαχιστοποιούνται, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 3. Άρα, ο ζυγός 3 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο 14 ζυγών της IEEE, σύμφωνα και με αυτή τη μέθοδο.



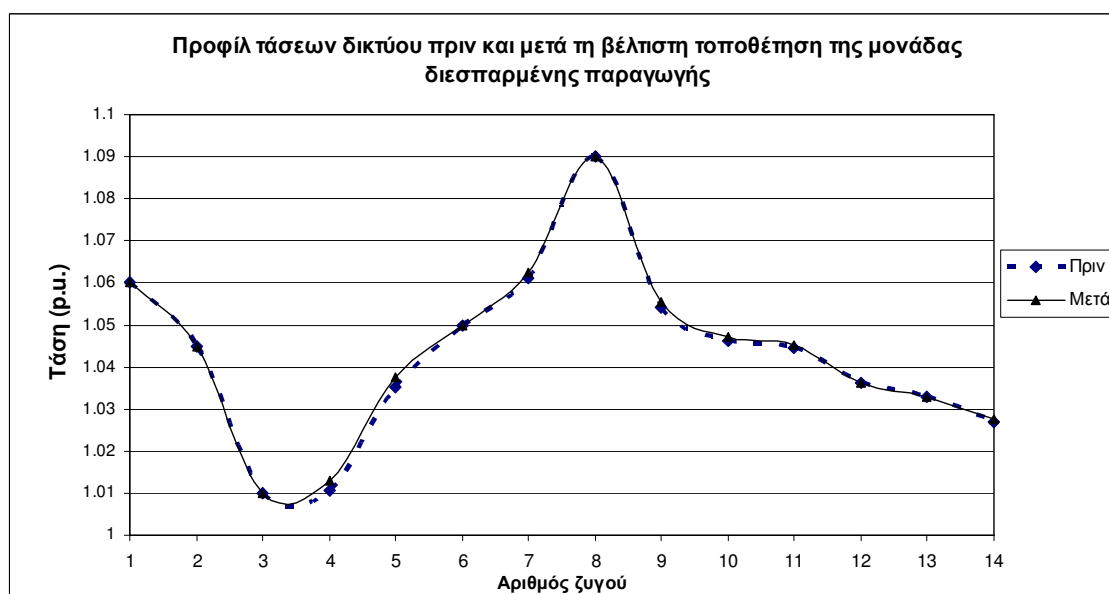
**Σχήμα 8.19:** Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου 14 ζυγών της IEEE, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 8.20.

**Πίνακας 8.20:** Αποτελέσματα των δύο μεθόδων στο δίκτυο 14 ζυγών της IEEE.

	Παραγόμενη ισχύς μονάδας δισπαρμένης παραγωγής	14 MW
Αναλυτική μέθοδος	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας δισπαρμένης παραγωγής	ζυγός 3
Μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας δισπαρμένης παραγωγής	ζυγός 3
	Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	13.4296 MW
	Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας δισπαρμένης παραγωγής	11.6052 MW
	Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	13.59 %

Η μονάδα δισπαρμένης παραγωγής είναι μικρού μεγέθους σε σχέση με το συνολικό φορτίο του δικτύου 14 ζυγών της IEEE, και η βέλτιστη τοποθέτηση της στο ζυγό 3 επιδρά ελάχιστα στο προφίλ των τάσεων των ζυγών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.20.



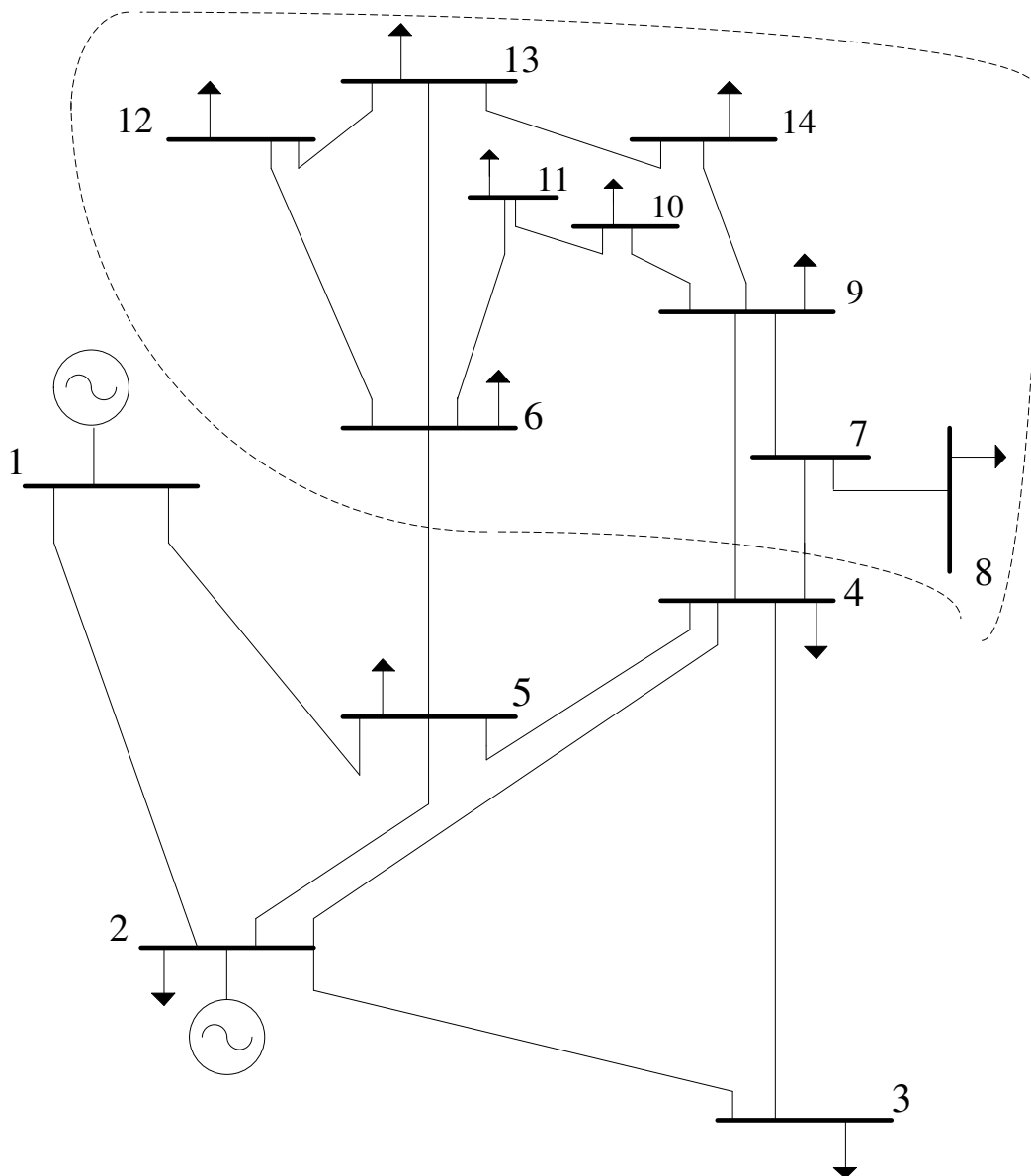
**Σχήμα 8.20:** Προφίλ τάσεων των ζυγών του δικτύου 14 ζυγών της IEEE πριν και μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας δισπαρμένης παραγωγής 14 MW.

Ο ζυγός 3 του δικτύου 14 ζυγών της IEEE, που προσδιορίστηκε ως βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας δισπαρμένης παραγωγής 14 MW, είναι ζυγός υψηλής τάσης, και έτσι μπορεί να μην εφικτό να συνδεθεί σε αυτόν η μονάδα δισπαρμένης παραγωγής. Η

σύνδεση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυα υψηλής τάσης παρουσιάζει ιδιαιτερότητες. Η παραγόμενη ισχύς της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής πρέπει να ξεπερνά τα  $20 MW$ , ενώ για τη σύνδεση απαιτείται η προσθήκη ανεξάρτητου μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ ή η κατασκευή ιδιαίτερου υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ [8.4].

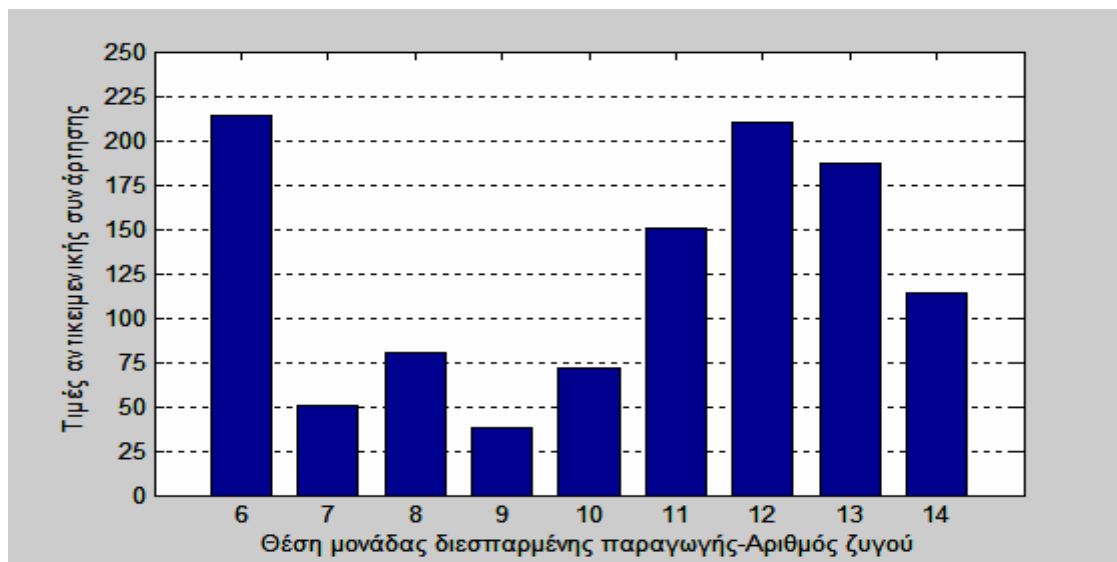
#### 8.4.3.1 Τροποποιημένο δίκτυο 9 ζυγών

Επιλέγεται ένα τροποποιημένο δίκτυο 9 ζυγών, που αποτελεί υποσύνολο του δικτύου 14 ζυγών της IEEE, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.21, και περιλαμβάνει τους ζυγούς 6-14, δηλαδή όλους τους ζυγούς μέσης τάσης. Το καινούριο σύστημα είναι ένα αμιγώς βροχοειδές δίκτυο διανομής, αποτελείται από 10 γραμμές και εξυπηρετεί συνολικό φορτίο  $(87.7 + j44.1) MVA$ . Ζυγός αναφοράς θεωρείται ο ζυγός 6, ενώ η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής που εισάγεται στο δίκτυο είναι  $7 MW$ , τιμή που αντιστοιχεί περίπου στο 7% του συνολικού φορτίου.



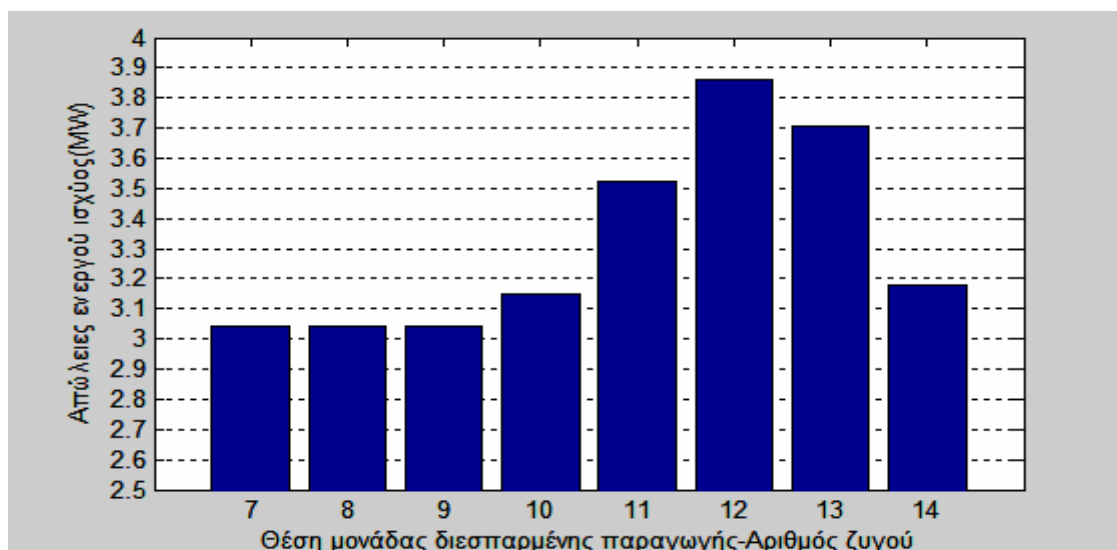
Σχήμα 8.21: Υποσύνολο του δικτύου 14 ζυγών της IEEE.

Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτουν από την υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου φαίνονται στο Σχήμα 8.22. Παρατηρείται ότι η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την ελάχιστη τιμή της, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 9 του δικτύου. Άρα, ο ζυγός 9 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο τροποποιημένο δίκτυο 9 ζυγών, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο.



**Σχήμα 8.22:** Τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης της αναλυτικής μεθόδου, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής 7 MW στο τροποποιημένο δίκτυο 9 ζυγών.

Η εφαρμογή της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου στο τροποποιημένο δίκτυο 9 ζυγών δείχνει ότι οι απώλειες ενεργού ισχύος ελαχιστοποιούνται, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής 7 MW συνδέεται στο ζυγό 9, επιβεβαιώνοντας το αποτέλεσμα της αναλυτικής μεθόδου. Σημειώνεται ότι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.23, οι απώλειες ενεργού ισχύος έχουν σχεδόν την ίδια τιμή όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στους ζυγούς 7, 8 και 9 αντίστοιχα διαφέροντας οριακά στο τέταρτο δεκαδικό ψηφίο.



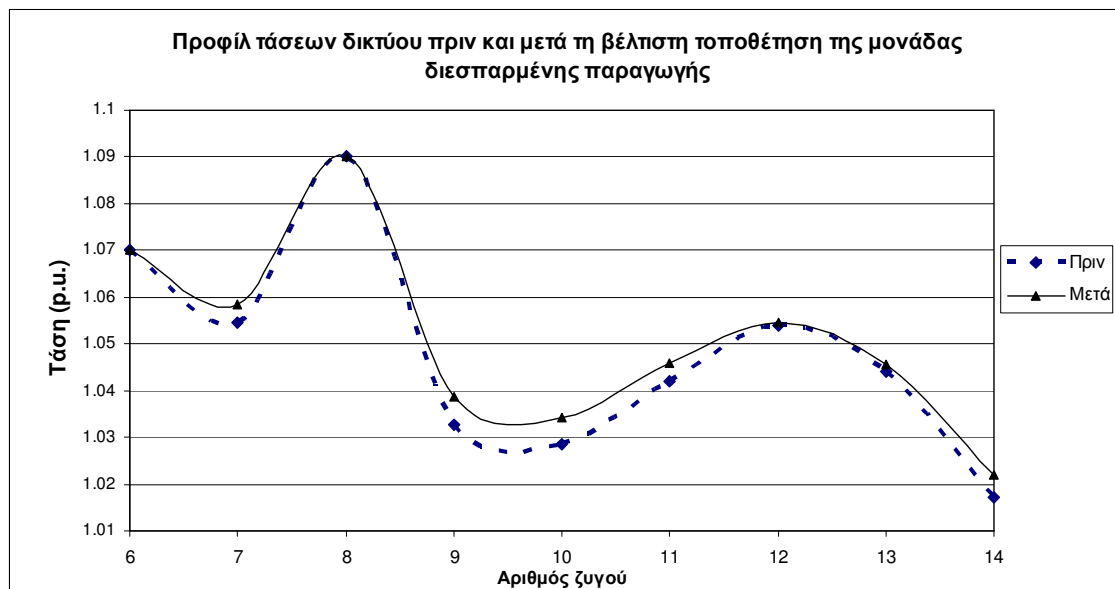
**Σχήμα 8.23:** Απώλειες ενεργού ισχύος του τροποποιημένου δικτύου 9 ζυγών, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 8.21.

**Πίνακας 8.21:** Αποτελέσματα των δύο μεθόδων στο τροποποιημένο δίκτυο 9 ζυγών.

	Παραγόμενη ισχύς μονάδας δισπαρμένης παραγωγής	7 MW
Αναλυτική μέθοδος	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας δισπαρμένης παραγωγής	ζυγός 9
Μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας δισπαρμένης παραγωγής	ζυγός 9
	Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	3.9775 MW
	Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας δισπαρμένης παραγωγής	3.0421 MW
	Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	23.52 %

Η βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας δισπαρμένης παραγωγής 7 MW στο ζυγό 9 του δικτύου ανυψώνει ελαφρώς τις τάσεις στους περισσότερους ζυγούς κατά ποσοστό 0.01 – 0.05% περίπου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.24.

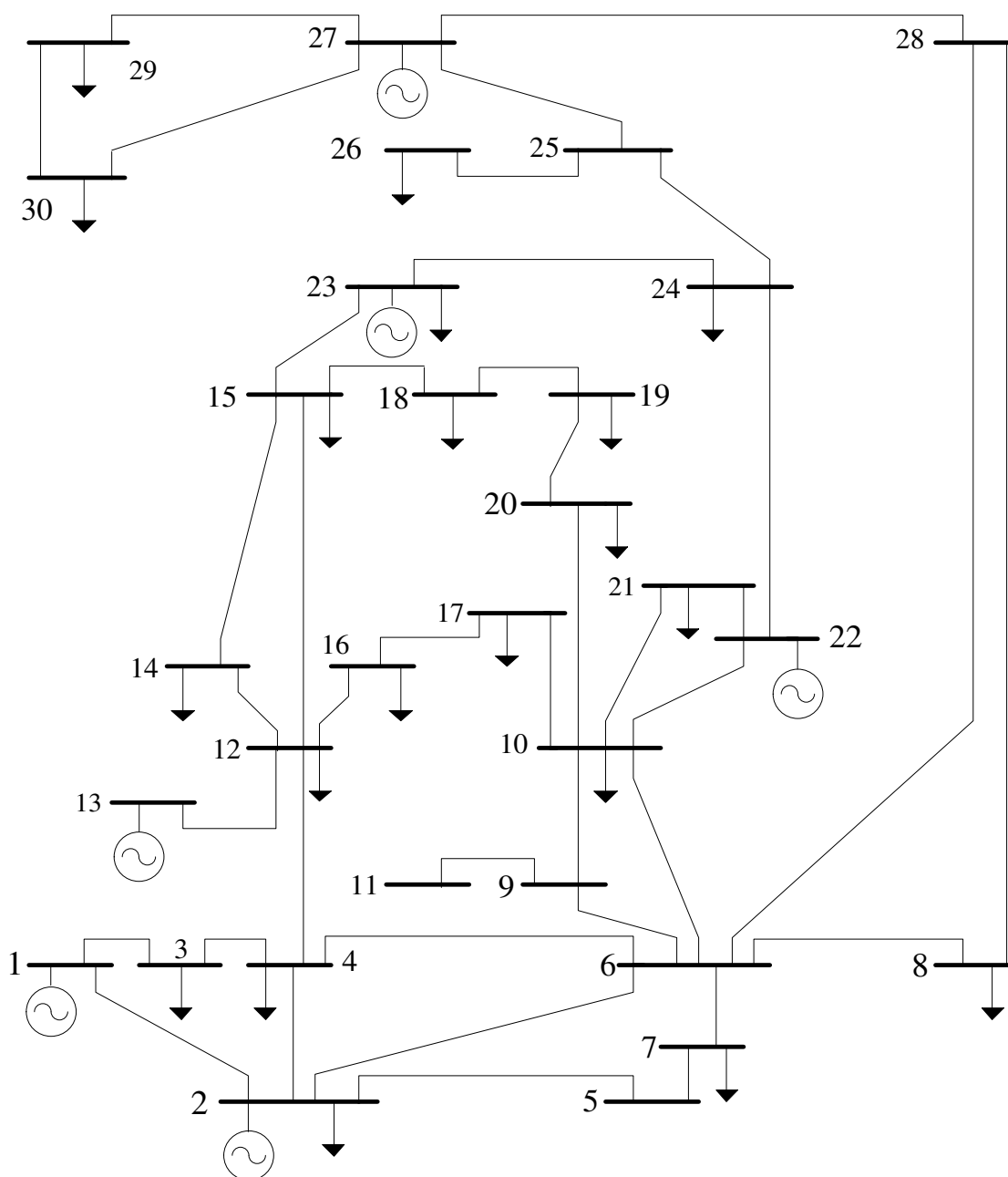


**Σχήμα 8.24:** Προφίλ τάσεων των ζυγών του τροποποιημένου δικτύου 9 ζυγών πριν και μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας δισπαρμένης παραγωγής 7 MW.



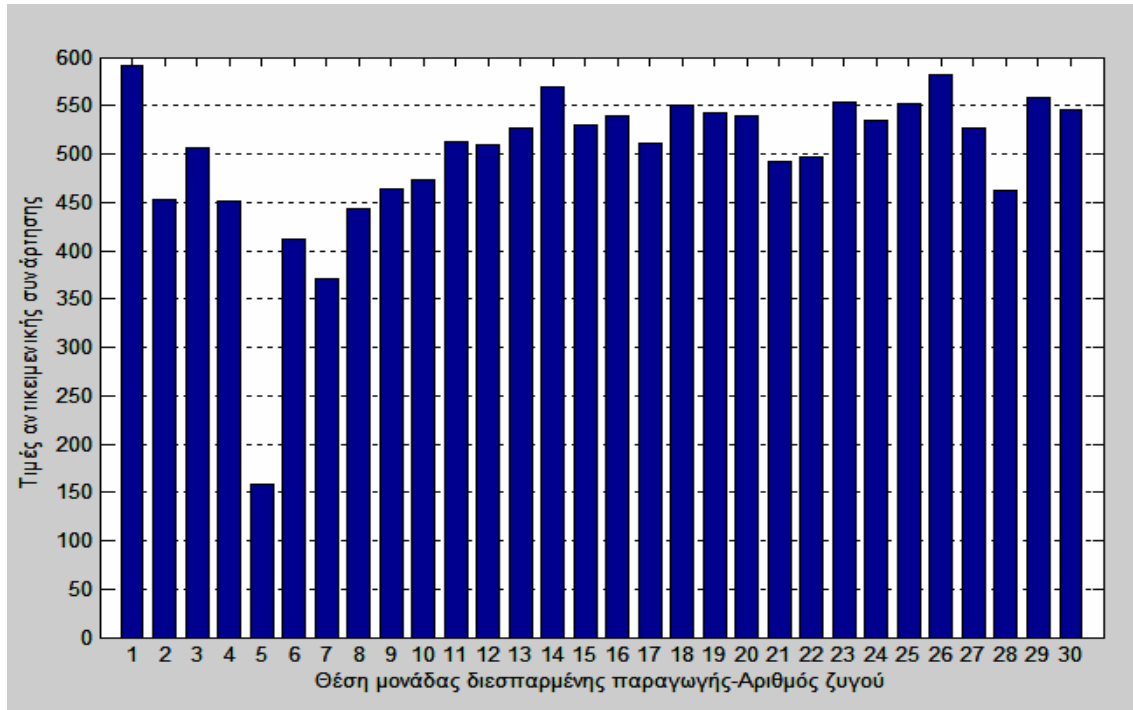
### 8.4.4 Δίκτυο 30 ζυγών της IEEE

Τα δεδομένα του δικτύου των 14 ζυγών της IEEE είναι από το [8.3] και βρίσκονται επίσης στο Παράρτημα Α, στους Πίνακες Α.4.1 και Α.4.2, για τις γραμμές και τους ζυγούς του δικτύου, αντίστοιχα. Πρόκειται για βροχοειδές συνδυασμένο σύστημα υπομεταφοράς και διανομής. Οι ζυγοί 1-8 και 28 λειτουργούν στην υψηλή τάση στα  $132\text{ kV}$ , οι 10, 12, 14-27, 29, 30 λειτουργούν στη μέση τάση στα  $33\text{ kV}$ , οι 11 και 13 λειτουργούν στη μέση τάση στα  $11\text{ kV}$ , ενώ ο 9 λειτουργεί στη χαμηλή τάση στο  $1\text{ kV}$ . Το δίκτυο αποτελείται από 41 γραμμές και εξυπηρετεί συνολικό φορτίο  $(283 + j126.2)\text{ MVA}$ . Η τοπολογία του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 8.25. Γίνεται διερεύνηση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που παράγει ενεργό ισχύ  $15\text{ MW}$ , τιμή που αντιστοιχεί περίπου στο 5% του συνολικού φορτίου του συστήματος.

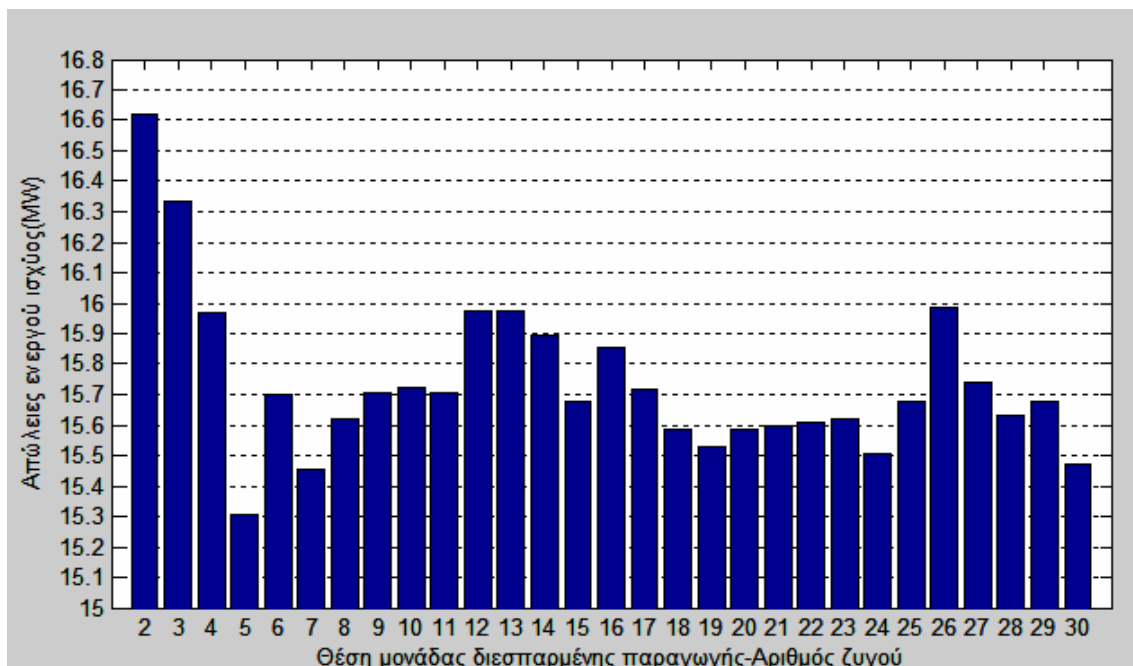


Σχήμα 8.25: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 30 ζυγών της IEEE.

Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτουν από την υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου φαίνονται στο Σχήμα 8.26, ενώ οι απώλειες ενεργού ισχύος του συστήματος, ανάλογα με την κάθε πιθανή θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, όπως προκύπτουν από τη εφαρμογή της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου, φαίνονται στο Σχήμα 8.27.



**Σχήμα 8.26:** Τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης της αναλυτικής μεθόδου, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής 15 MW στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE.



**Σχήμα 8.27:** Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου 30 ζυγών της IEEE, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

Παρατηρείται ότι η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την ελάχιστη τιμή της, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 5 του δικτύου. Άρα, ο ζυγός 5 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής 15 MW στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο, αποτέλεσμα που επιβεβαιώνεται από τη μέθοδο προσομοίωσης με ροές φορτίου, καθώς οι απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου ελαχιστοποιούνται, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 5.

**Πίνακας 8.22:** Αποτελέσματα των δύο μεθόδων στο δίκτυο 30 ζυγών της IEEE.

	Παραγόμενη ισχύς μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	15 MW
Αναλυτική μέθοδος	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 5
Μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 5
	Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	17.5226 MW
	Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	15.3083 MW
	Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	12.64 %

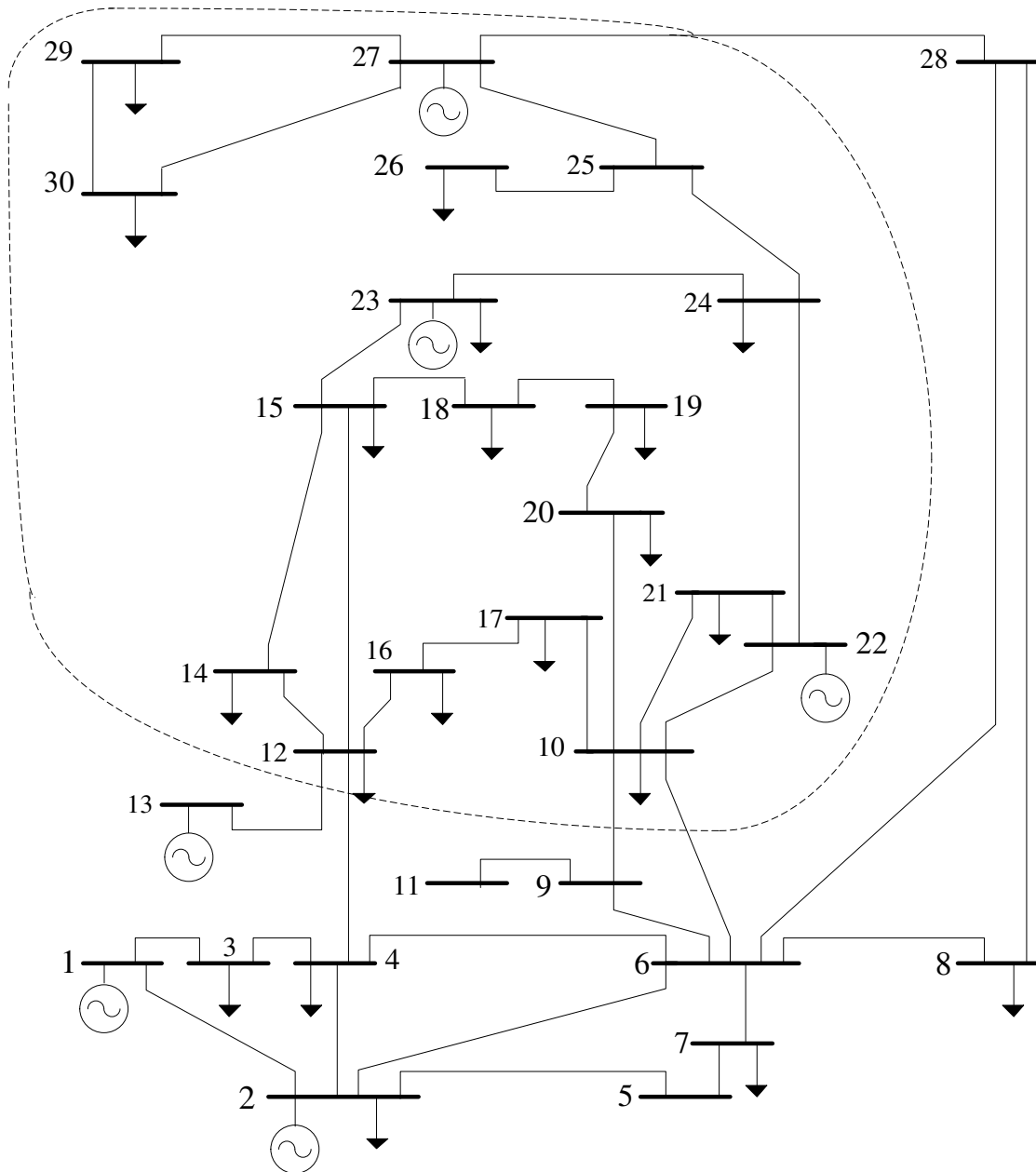
Η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής είναι μικρού μεγέθους σε σχέση με το συνολικό φορτίο του δικτύου 30 ζυγών της IEEE, και η βέλτιστη τοποθέτηση της στο ζυγό 5 επιδρά ελάχιστα στο προφίλ των τάσεων των ζυγών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.28



**Σχήμα 8.28:** Προφίλ τάσεων των ζυγών του δικτύου 30 ζυγών της IEEE πριν και μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής 15 MW.

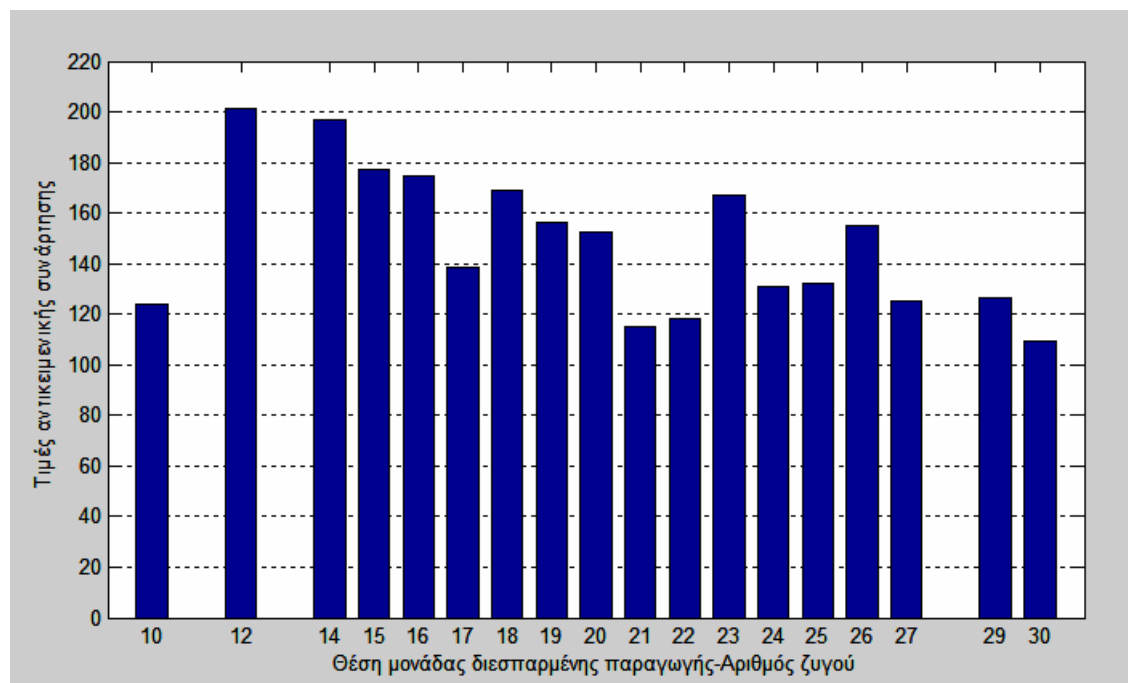
#### 8.4.4.1 Τροποποιημένο δίκτυο 18 ζυγών

Επειδή η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να μην είναι εφικτό να συνδεθεί στο ζυγό 5 του δικτύου 30 ζυγών της IEEE, που είναι ζυγός υψηλής τάσης, επιλέγεται για εξέταση ένα τροποποιημένο δίκτυο 18 ζυγών, που αποτελεί υποσύνολο του δικτύου 30 ζυγών της IEEE, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.29, και περιλαμβάνει τους ζυγούς 10, 12, 14-27, 29 και 30, δηλαδή όλους τους ζυγούς μέσης τάσης που λειτουργούν στα  $33\text{ kV}$ . Το καινούριο σύστημα είναι ένα αμιγώς βροχοειδές δίκτυο διανομής, αποτελείται από 22 γραμμές και εξυπηρετεί συνολικό φορτίο  $(104.7 + j50.8)\text{ MVA}$ . Ζυγός αναφοράς θεωρείται ο ζυγός 12, ενώ η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής που εισάγεται στο δίκτυο είναι  $5\text{ MW}$ , τιμή που αντιστοιχεί περίπου στο 5% του συνολικού φορτίου.

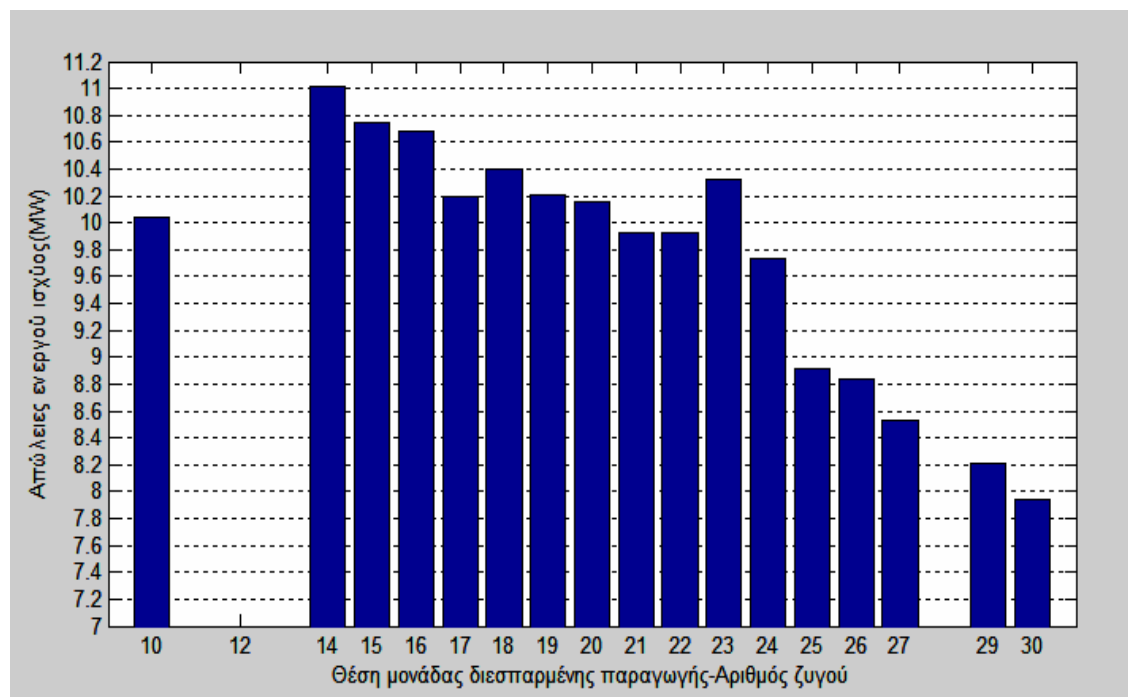


Σχήμα 8.29: Υποσύνολο του δικτύου 30 ζυγών της IEEE.

Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτουν από την υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου φαίνονται στο Σχήμα 8.30, ενώ οι απώλειες ενεργού ισχύος του συστήματος, ανάλογα με την κάθε πιθανή θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, όπως προκύπτουν από τη εφαρμογή της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου, φαίνονται στο Σχήμα 8.31.



**Σχήμα 8.30:** Τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης της αναλυτικής μεθόδου, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής 5 MW στο τροποποιημένο δίκτυο 18 ζυγών.



**Σχήμα 8.31:** Απώλειες ενεργού ισχύος του τροποποιημένου δικτύου 18 ζυγών, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής

Παρατηρείται ότι η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την ελάχιστη τιμή της, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 30 του δικτύου. Άρα, ο ζυγός 5 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $5\text{ MW}$  στο τροποποιημένο δίκτυο 18 ζυγών, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο, αποτέλεσμα που επιβεβαιώνεται από τη μέθοδο προσομοίωσης με ροές φορτίου, καθώς οι απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου ελαχιστοποιούνται, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 5. Το ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος που προκύπτει από τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής είναι ιδιαίτερο σημαντικό και ανέρχεται στο  $28.93\%$ , όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.23 με τα αποτελέσματα.

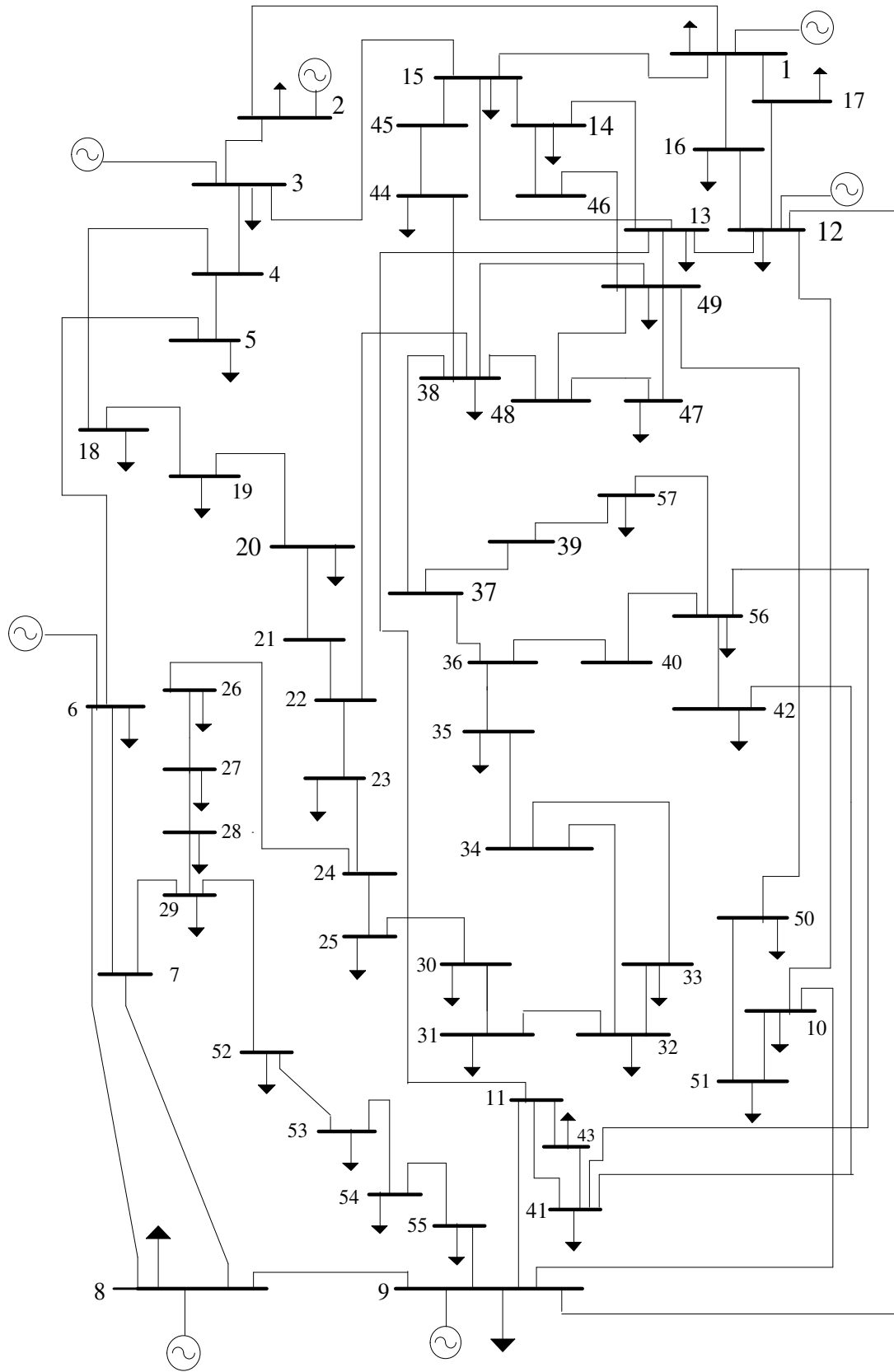
**Πίνακας 8.23:** Αποτελέσματα των δύο μεθόδων στο τροποποιημένο δίκτυο 18 ζυγών.

	Παραγόμενη ισχύς μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	5 MW
Αναλυτική μέθοδος	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 30
Μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 30
	Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	11.1783 MW
	Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	7.9446 MW
	Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	28.93 %

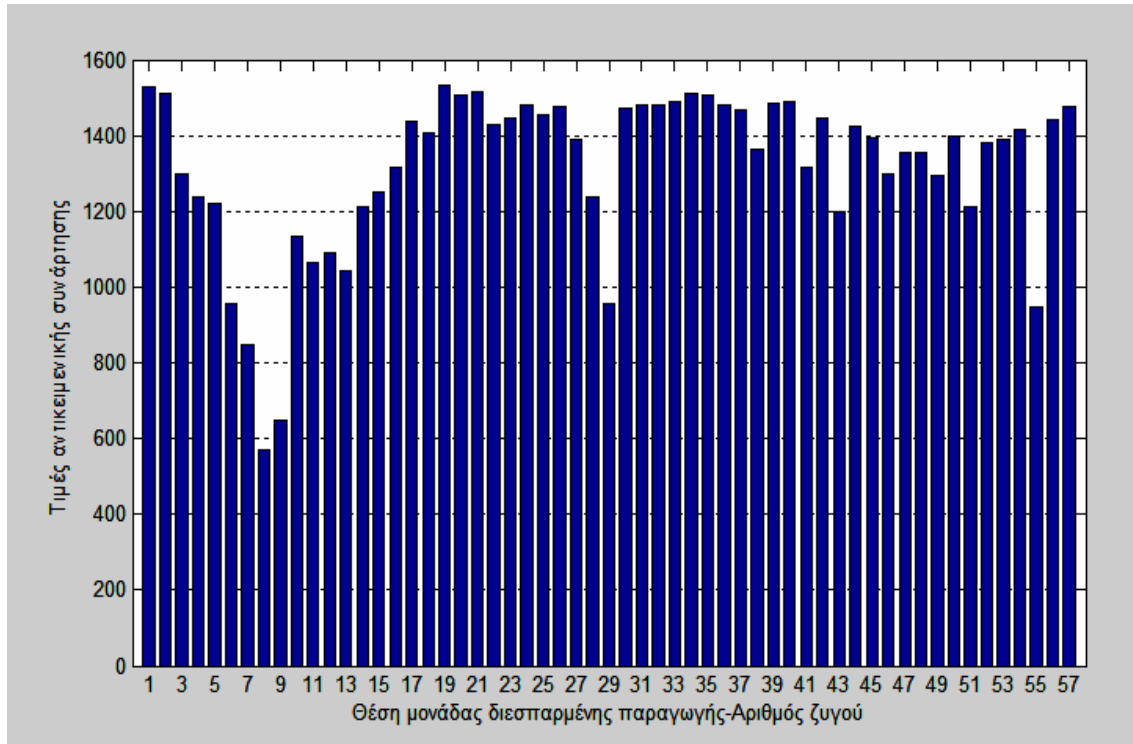
#### 8.4.5 Δίκτυο 57 ζυγών της IEEE

Τα δεδομένα του δικτύου των 57 ζυγών της IEEE είναι από το [8.3] και βρίσκονται επίσης στο Παράρτημα Α, στους Πίνακες Α.5.1 και Α.5.2, για τις γραμμές και τους ζυγούς του δικτύου, αντίστοιχα. Πρόκειται για δίκτυο υψηλής τάσης  $345\text{ kV}$ , που αποτελείται από 78 γραμμές και που εξυπηρετεί μεγάλα φορτία συνολικού μεγέθους  $(1250.8 + j336.4)\text{ MVA}$ . Η τοπολογία του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 8.32. Σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι δυνατή μόνο η σύνδεση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής πολύ μεγάλου μεγέθους ισχύος. Για αυτό, γίνεται διερεύνηση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής που παράγει ενεργό ισχύ  $65\text{ MW}$ , τιμή που αντιστοιχεί περίπου στο  $5\%$  του συνολικού φορτίου του συστήματος.

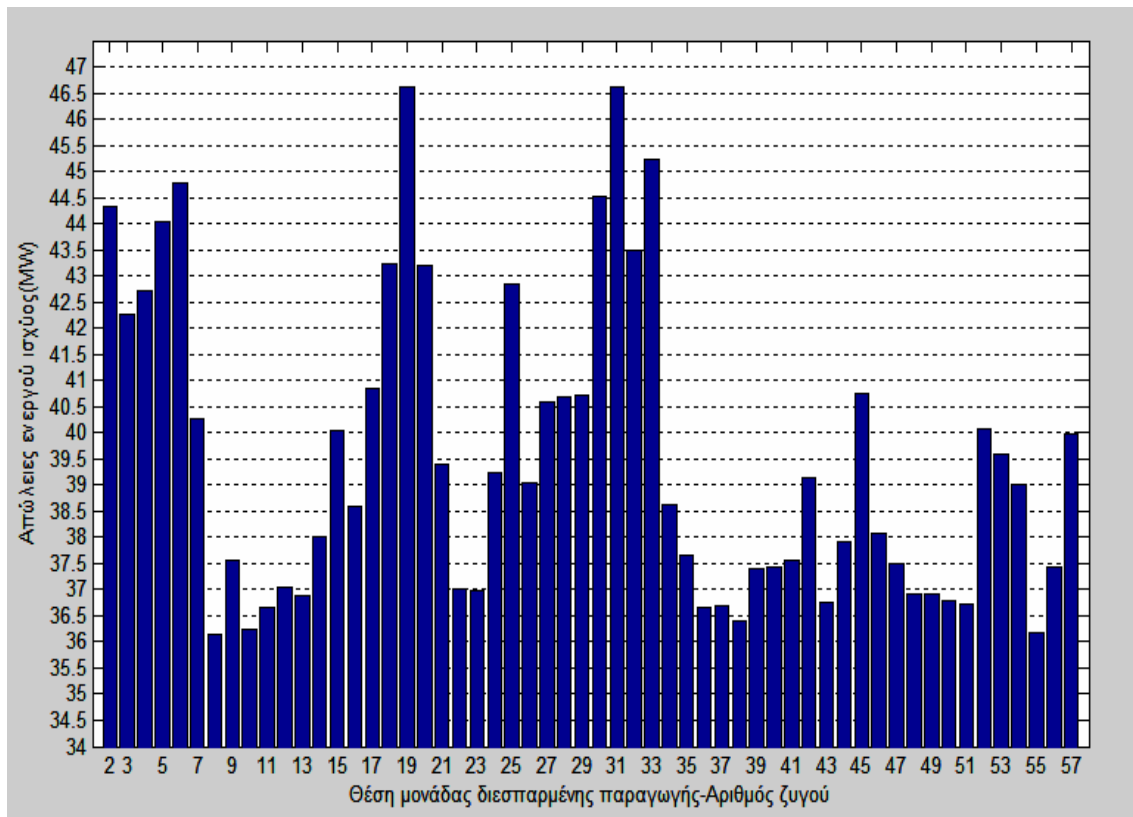
Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτουν από την υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου φαίνονται στο Σχήμα 8.33, ενώ οι απώλειες ενεργού ισχύος του συστήματος, ανάλογα με την κάθε πιθανή θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, όπως προκύπτουν από τη εφαρμογή της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου, φαίνονται στο Σχήμα 8.34.



Σχήμα 8.32: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 57 ζυγών της IEEE.



**Σχήμα 8.33:** Τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης της αναλυτικής μεθόδου, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής 65 MW στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE.



**Σχήμα 8.34:** Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου 57 ζυγών της IEEE, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής.

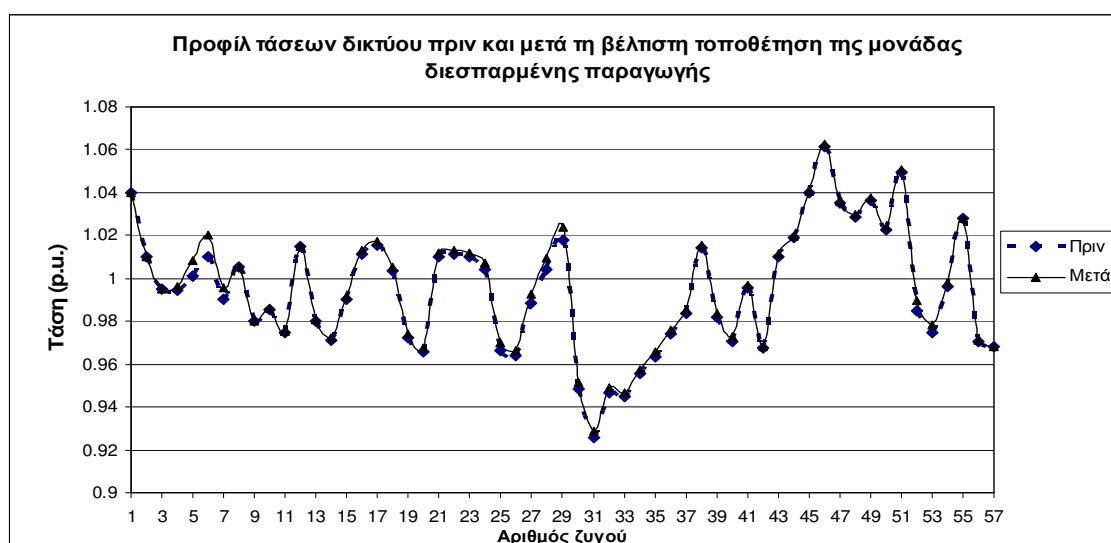


Παρατηρείται ότι η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την ελάχιστη τιμή της, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 8 του δικτύου. Άρα, ο ζυγός 8 αποτελεί τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $65\text{ MW}$  στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο, αποτέλεσμα που επιβεβαιώνεται από τη μέθοδο προσομοίωσης με ροές φορτίου, καθώς οι απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου ελαχιστοποιούνται, όταν η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται στο ζυγό 8. Το ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος που προκύπτει από τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής είναι ιδιαίτερο σημαντικό και ανέρχεται στο 20.12 %, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.24 με τα αποτελέσματα.

**Πίνακας 8.24:** Αποτελέσματα των δύο μεθόδων στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE.

	Παραγόμενη ισχύς μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	65 MW
Αναλυτική μέθοδος	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 8
Μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου	Βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	ζυγός 8
	Αρχικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου	45.2425 MW
	Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής	36.1419 MW
	Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου ως ποσοστό των αρχικών απωλειών ενεργού ισχύος	20.12 %

Οι τάσεις στους ζυγούς του δικτύου δεν παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερη μεταβολή από τη σύνδεση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $65\text{ MW}$  στο ζυγό 8 (Σχήμα 8.35).



**Σχήμα 8.35:** Προφίλ τάσεων των ζυγών του δικτύου 57 ζυγών της IEEE πριν και μετά τη βέλτιστη τοποθέτηση της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $65\text{ MW}$ .

## 8.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [8.1] W. D. Stevenson, Jr., *Elements of Power System Analysis, third edition*. New York : McGraw-Hill, 1975, pp. 729-730.
- [8.2] T. Griffin, K. Tomsovic, D. Secrest, and A. Law, "Placement of dispersed generation systems for reduced losses," presented at the 33rd Annual International Conference Systems Sciences, Hawaii, USA, 2000.
- [8.3] Power System Test Case Archive, University of Washington, College of Engineering. [Online]. Διαθέσιμο : <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>, προσπελάστηκε τον Ιανουάριο 2012.
- [8.4] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Soder, "Distributed generation : a definition," *Electric Power Systems Research*, vol. 57, pp. 195-204, 2001.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **9.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το ζήτημα της βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής μοναδιαίου συντελεστή ισχύος σε δίκτυα διανομής, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου διανομής. Παρουσιάστηκαν ξεχωριστές αναλυτικές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος στα ακτινικά και στα βροχοειδή δίκτυα διανομής αντίστοιχα.

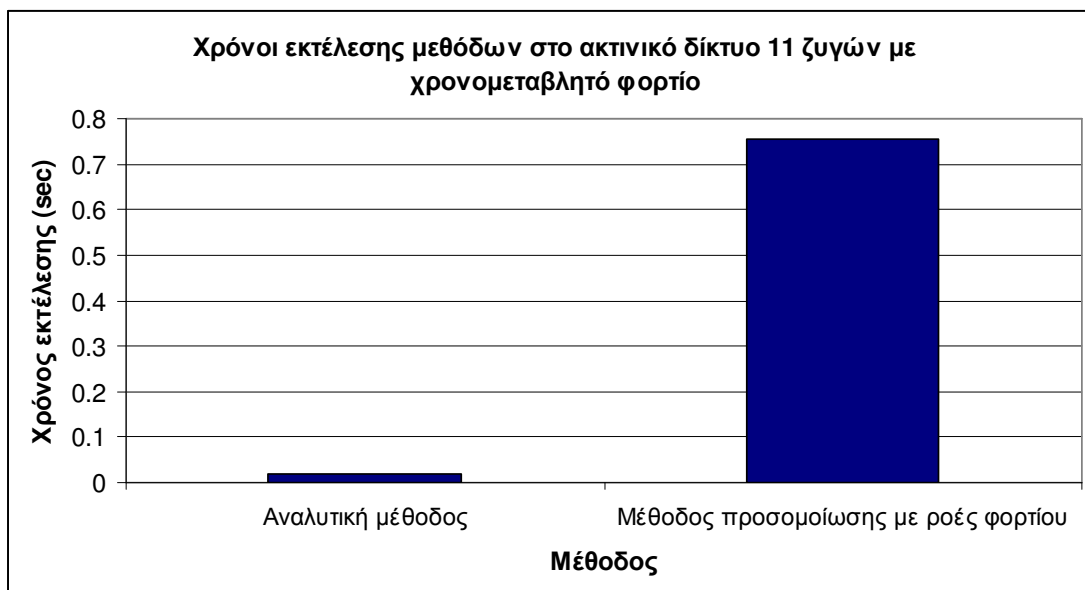
Στα ακτινικά δίκτυα διανομής, η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στο μοντέλο της ακτινικής γραμμής με διανεμημένα φορτία και στα εγχεόμενα ρεύματα των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Γίνεται θεωρητική ανάλυση, κατασκευάζεται η μέση συνάρτηση απωλειών ενεργού ισχύος της γραμμής συναρτήσει της θέσης εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, και η διερεύνηση των τοπικών ακροτάτων της συνάρτησης οδηγεί στην εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η μοντελοποίηση της κατανομής του φορτίου της ακτινικής γραμμής.

Στα βροχοειδή δίκτυα διανομής, η προτεινόμενη μέθοδος αξιοποιεί τα τοπολογικά χαρακτηριστικά του συστήματος και κάνει χρήση του πίνακα αγωγιμοτήτων και των δεδομένων των ζυγών, σε ό,τι αφορά την παραγωγή και το φορτίο τους. Εισάγεται ένα νέο διάγραμμα που περιγράφει την ισχύ στους ζυγούς και δημιουργείται ένας τροποποιημένος πίνακας αγωγιμοτήτων των ζυγών, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Στόχος της ανάλυσης είναι η ελαχιστοποίηση μιας συγκεκριμένης αντικειμενικής συνάρτησης.

Η προγραμματιστική υλοποίηση όλων των μεθόδων της εργασίας έγινε σε περιβάλλον MATLAB. Αναπτύχθηκε ξεχωριστό λογισμικό για τα ακτινικά και τα βροχοειδή δίκτυα διανομής, αντίστοιχα, ενώ σχεδιάστηκε και κατάλληλο γραφικό περιβάλλον (GUI) με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι φιλικό προς το χρήστη και να τον καθοδηγεί στην επόμενο κίνηση που πρέπει να κάνει. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών μεθόδων, ενσωματώθηκε στο λογισμικό η κλασική μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου, μέσω της οποίας είναι δυνατό να προσδιοριστεί και το ποσοστό μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος του συστήματος που προκύπτει από τη βέλτιστη τοποθέτηση της εξεταζόμενης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Η κεντρική ιδέα λειτουργίας των δύο εφαρμογών είναι η εισαγωγή από το χρήστη των δεδομένων του εξεταζόμενου συστήματος μέσω κατάλληλα διαμορφωμένου αρχείου excel και ακολούθως, η εμφάνιση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της αναλυτικής μεθόδου και της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου σχετικά με τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της εξεταζόμενης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Ο υπολογιστής στον οποίο δοκιμάστηκε το λογισμικό είχε λειτουργικό σύστημα Windows 7 Home Premium 64 bit, επεξεργαστή Inter Core i5 2.67 GHz, δίσκο 500 GB και RAM 6.00 GB.

Το λογισμικό για τα ακτινικά δίκτυα διανομής εφαρμόστηκε σε ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών. Αρχικά, θεωρήθηκε ότι η ισχύς των φορτίων και της εισαγόμενης μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής είναι σταθερή. Μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικές κατανομές φορτίου. Για τη αρχική ανάλυση, θεωρήθηκε ότι η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής παράγει

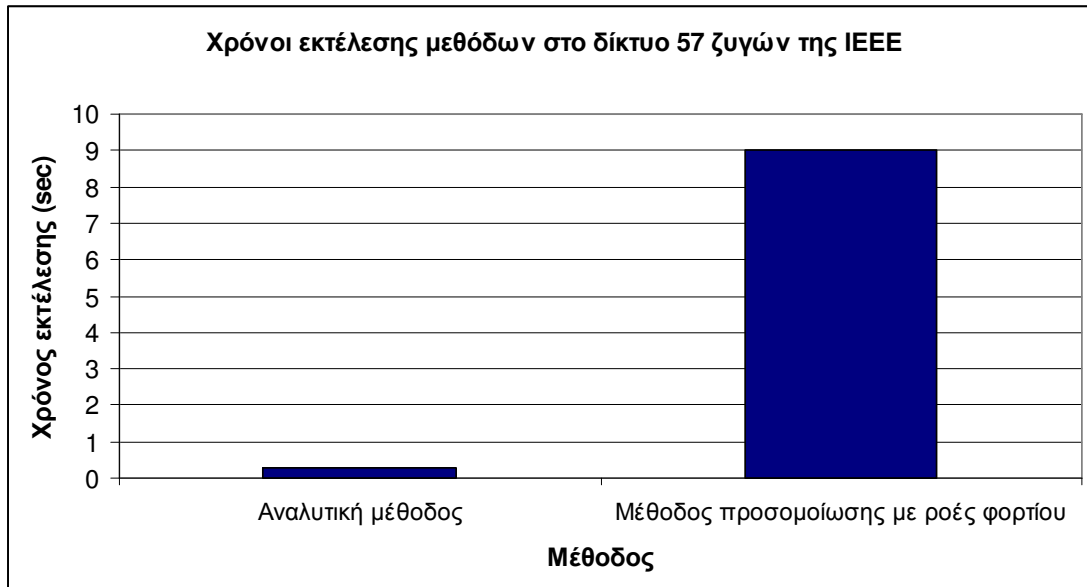
ενεργό ισχύ ίση με το συνολικό το φορτίο του συστήματος. Για την υλοποίηση της αναλυτικής μεθόδου υποτέθηκε ακτινική γραμμή διανεμημένου φορτίου με κατανομή φορτίου ίδια κάθε φορά με αυτή του ακτινικού δικτύου των 11 ζυγών, και προσδιορίστηκε θεωρητικά η βέλτιστη θέση τοποθέτησης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής συναρτήσει του θεωρητικού μήκους  $l$  της γραμμής. Μετά, η θεωρητική λύση προσαρμόστηκε στα πραγματικά δεδομένα και αντιστοιχίστηκε στον πιο κοντινό στη λύση ζυγό του ακτινικού δικτύου των 11 ζυγών, ανάλογα με την εξεταζόμενη κατανομή φορτίου. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων σχετικά με τη βέλτιστη θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής συμφωνούν μεταξύ τους. Ακόμα, για κάθε κατανομή φορτίου εξετάστηκαν διάφορες περιπτώσεις, όπου η εισαγόμενη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής είναι μικρότερου μεγέθους ισχύος και τροφοδοτεί μόνο ένα ποσοστό του φορτίου του συστήματος. Σε όλες τις δοκιμές που έγιναν, η αναλυτική μέθοδος και η μέθοδος προσομοίωσης με ροές φορτίου δίνουν ίδια αποτελέσματα. Κατόπιν, θεωρήθηκε ότι το ακτινικό δίκτυο εξυπηρετεί φορτία ομοιόμορφα κατανεμημένα στους ζυγούς, τα οποία όμως μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ακόμα, η εξεταζόμενη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής σε αυτή την περίπτωση ήταν ένα αιολικό πάρκο μεταβλητής παραγομένης ισχύος. Και οι δύο μέθοδοι προτείνουν την ίδια θέση εγκατάστασης της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών. Σημειώνεται, ότι η αναλυτική μέθοδος δίνει πολύ γρήγορα αποτελέσματα σε σχέση με τη μέθοδο προσομοίωσης με ροές φορτίου, καθώς δεν περιλαμβάνει κάποιο επαναληπτικό αλγόριθμο και δεν υπάρχει κάποιο ζήτημα σύγκλισης της λύσης. Ενδεικτικά, οι χρόνοι εκτέλεσης των μεθόδων στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών με χρονομεταβλητό φορτίο φαίνονται στο Σχήμα 9.1.



**Σχήμα 9.1:** Χρόνοι εκτέλεσης μεθόδων στο ακτινικό δίκτυο 11 ζυγών με χρονομεταβλητό φορτίο .

Το λογισμικό για τα βροχοειδή δίκτυα διανομής εφαρμόστηκε στα πρότυπα βροχοειδή δίκτυα 5, 6, 14, 30 και ζυγών 57 της IEEE. Ακόμα, στα δίκτυα των 14 και 30 ζυγών που είναι συνδυασμένα συστήματα υπομεταφοράς και διανομής, επιλέχτηκαν επιπλέον τροποποιημένα δίκτυα 9 και 18 ζυγών αντίστοιχα που περιλάμβαναν τους ζυγούς μέσης τάσης των ανωτέρω συστημάτων. Τα φορτία και οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής θεωρούνται σταθερής ισχύος. Η μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, που εξετάζεται σε κάθε περίπτωση, παράγει ενεργό ισχύ που κυμαίνεται μεταξύ 5% και 25% του συνολικού φορτίου, ανάλογα με τα δεδομένα των φορτίων των ζυγών. Σε όλα τα δίκτυα, τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται

σχετικά με τη βέλτιστη τοποθέτηση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, μέσω της αναλυτικής μεθόδου και της μεθόδου προσομοίωσης με ροές φορτίου, είναι ακριβώς τα ίδια. Άρα, η αναλυτική μέθοδος αποδεικνύεται ιδιαίτερα ακριβής και αξιόπιστη. Επιπλέον, μπορεί να δώσει αποτελέσματα με εξαιρετική μεγάλη ταχύτητα ακόμα και σε δίκτυα υψηλής πολυπλοκότητας, όπως το δίκτυο 57 ζυγών της IEEE που αποτελείται από 78 γραμμές. Αντίθετα, η μέθοδος προσομοίωσης εμφανίζει πολύ μεγάλους χρόνους εκτέλεσης σε συστήματα πολλών ζυγών, εξαιτίας των χρονοβόρων επαναληπτικών διαδικασιών που περιλαμβάνει. Ενδεικτικά, οι χρόνοι εκτέλεσης των δύο μεθόδων στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.2 και παρουσιάζουν τεράστια διαφορά μεταξύ τους. Όπως φαίνεται, είναι χαρακτηριστική η υπεροχή της αναλυτικής μεθόδου, με βάση το χρόνο εκτέλεσης.



**Σχήμα 9.2:** Χρόνοι εκτέλεσης μεθόδων στο δίκτυο 57 ζυγών της IEEE.

Σημειώνεται, ότι στα πλαίσια της εργασίας, διερευνήθηκε η επίδραση της βέλτιστης τοποθέτησης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο προφίλ των τάσεων των ζυγών των διάφορων δικτύων. Στο ακτινικό δίκτυο διανομής 11 ζυγών και στις τέσσερις διαφορετικές συνθήκες φόρτισης η προσθήκη μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής, που τροφοδοτούσε όλο το φορτίο του συστήματος, βελτίωσε εντυπωσιακά τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς του δικτύου επαναφέροντάς τες εντός επιτρεπτών ορίων. Στα βροχοειδή δίκτυα, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που εξετάστηκαν ήταν μικρού μεγέθους σε σχέση με το συνολικό φορτίο και δεν επέφεραν κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή στις τάσεις των ζυγών.

## 9.2 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η σημαντικότερη επέκταση της εργασίας που μπορεί να γίνει είναι η τροποποίηση των αναλυτικών μεθόδων και επακόλουθα του λογισμικού που έχει αναπτυχθεί, προκειμένου να γίνει διερεύνηση των βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης πολλαπλών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυα διανομής. Μια πρώτη προσέγγιση πάνω στη μοντελοποίηση του συγκεκριμένου ζητήματος επιχειρήθηκε στην Ενότητα 4.6. Ακόμα, θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί το μέγεθος των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης. Τέλος, χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη βέλτιστη τοποθέτηση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής θα έδινε ο συνοπολογισμός άλλων οικονομικών κριτηρίων, όπως η μεγιστοποίηση του κέρδους ή η ελαχιστοποίηση του κόστους.



---

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

---

## ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΩΝ

### Α.1 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΚΤΥΟ 5 ΖΥΓΩΝ ΤΗΣ ΙΕΕΕ

**Πίνακας Α.1.1:** Στοιχεία γραμμών του τροποποιημένου δικτύου 5 ζυγών της ΙΕΕΕ.

Από ζυγό	Προς ζυγό	R (p.u.)	X (p.u.)	1/2 B (p.u.)	Κωδικός γραμμής
1	2	0.02	0.06	0.03	1
1	3	0.08	0.24	0.025	1
2	3	0.06	0.18	0.02	1
2	4	0.02	0.18	0.02	1
2	5	0.04	0.12	0.015	1
3	4	0.01	0.03	0.01	1
4	5	0.08	0.24	0.035	1

**Πίνακας Α.1.2:** Στοιχεία ζυγών του τροποποιημένου δικτύου 5 ζυγών της ΙΕΕΕ.

Αρ. ζυγού	Κωδικός ζυγού	Μέτρο τάσης (p.u.)	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο		Παραγωγή				
					MW	MVAR	MW	MVAR	Qmin (MVAR)	Qmax (MVAR)	Έγχυση (MVAR)
1	1	1.06	10	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1.01	10	0	0	1	2	0	0	10	0
3	0	1	10	0	4.5	1.5	0	0	0	0	0
4	0	1	10	0	4	0.5	0	0	0	0	0
5	0	1	10	0	6	1	0	0	0	0	0

## A.2 ΔΙΚΤΥΟ 6 ΖΥΓΩΝ ΤΗΣ ΙΕΕΕ

**Πίνακας A.2.1:** Στοιχεία γραμμών του δικτύου 6 ζυγών της ΙΕΕΕ.

Από ζυγό	Προς ζυγό	R (p.u.)	X (p.u.)	1/2 B (p.u.)	Κωδικός γραμμής
1	2	0.2238	0.509	0	1
2	3	0.2238	0.509	0	1
3	4	0.2238	0.509	0	1
4	5	0.2238	0.509	0	1
5	6	0.2238	0.509	0	1
6	1	0.2276	0.2961	0	1
1	5	0.2603	0.7382	0	1

**Πίνακας A.2.2:** Στοιχεία ζυγών του δικτύου 6 ζυγών της ΙΕΕΕ.

Αρ. ζυγού	Κωδικός ζυγού	Μέτρο τάσης (p.u.)	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο		Παραγωγή				
					MW	MVAR	MW	MVAR	Qmin (MVAR)	Qmax (MVAR)	Έγχυση (MVAR)
1	1	1	25	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	25	0	4	1	0	0	0	0	0
3	0	1	25	0	7.25	2	0	0	0	0	0
4	0	1	25	0	5	1.25	0	0	0	0	0
5	2	1	25	0	0	0	8	0	0	50	0
6	0	1	25	0	5	1.5	0	0	0	0	0



## Α.3 ΔΙΚΤΥΟ 14 ΖΥΓΩΝ ΤΗΣ ΙΕΕΕ

Πίνακας Α.3.1: Στοιχεία γραμμών του δικτύου 14 ζυγών της ΙΕΕΕ.

Από ζυγό	Προς ζυγό	R (p.u.)	X (p.u.)	1/2 B (p.u.)	Κωδικός γραμμής
1	2	0.01938	0.05917	0.0264	1
1	5	0.05403	0.22304	0.0246	1
2	3	0.04699	0.19797	0.0219	1
2	4	0.05811	0.17632	0.017	1
2	5	0.05695	0.17388	0.0173	1
3	4	0.06701	0.17103	0.0064	1
4	5	0.01335	0.04211	0	0.978
4	7	0	0.20912	0	0.969
4	9	0	0.55618	0	0.932
5	6	0	0.25202	0	1
6	11	0.09498	0.1989	0	1
6	12	0.12291	0.25581	0	1
6	13	0.06615	0.13027	0	1
7	8	0	0.17615	0	1
7	9	0	0.11001	0	1
9	10	0.03181	0.0845	0	1
9	14	0.12711	0.27038	0	1
10	11	0.08205	0.19207	0	1
12	13	0.22092	0.19988	0	1
13	14	0.17093	0.34802	0	1

Πίνακας Α.3.2: Στοιχεία ζυγών του δικτύου 14 ζυγών της ΙΕΕΕ.

Αρ. ζυγού	Κωδικός ζυγού	Μέτρο τάσης (p.u.)	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο		Παραγωγή				
					MW	MVAR	MW	MVAR	Qmin (MVAR)	Qmax (MVAR)	Έγχυση (MVAR)
1	1	1.06	132	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1.045	132	0	21.7	12.7	40	0	-40	50	0
3	2	1.01	132	0	94.2	19	0	0	0	40	0
4	0	1	132	0	47.8	-3.9	0	0	0	0	0
5	0	1	132	0	7.6	1.6	0	0	0	0	0
6	2	1.07	33	0	11.2	7.5	0	0	-6	24	0
7	0	1	33	0	0	0	0	0	0	0	0
8	2	1.09	33	0	0	0	0	0	-6	24	0
9	0	1	33	0	29.5	16.6	0	0	0	0	19
10	0	1	33	0	9	5.8	0	0	0	0	0
11	0	1	33	0	3.5	1.8	0	0	0	0	0
12	0	1	33	0	6.1	1.6	0	0	0	0	0
13	0	1	33	0	13.5	5.8	0	0	0	0	0
14	0	1	33	0	14.9	5	0	0	0	0	0

## Α.4 ΔΙΚΤΥΟ 30 ΖΥΓΩΝ ΤΗΣ ΙΕΕΕ

Πίνακας Α.4.1: Στοιχεία γραμμών του δικτύου 30 ζυγών της ΙΕΕΕ.

Από ζυγό	Προς ζυγό	R (p.u.)	X (p.u.)	1/2 B (p.u.)	Κωδικός γραμμής
1	2	0.0192	0.0575	0.0264	1
1	3	0.0452	0.1652	0.0204	1
2	4	0.057	0.1737	0.0184	1
3	4	0.0132	0.0379	0.0042	1
2	5	0.0472	0.1983	0.0209	1
2	6	0.0581	0.1763	0.0187	1
4	6	0.0119	0.0414	0.0045	1
5	7	0.046	0.116	0.0102	1
6	7	0.0267	0.082	0.0085	1
6	8	0.012	0.042	0.0045	1
6	9	0	0.208	0	0.978
6	10	0	0.556	0	0.969
9	11	0	0.208	0	1
9	10	0	0.11	0	1
4	12	0	0.256	0	0.932
12	13	0	0.14	0	1
12	14	0.1231	0.2559	0	1
12	15	0.0662	0.1304	0	1
12	16	0.0945	0.1987	0	1
14	15	0.221	0.1997	0	1
16	17	0.0824	0.1923	0	1
15	18	0.1073	0.2185	0	1
18	19	0.0639	0.1292	0	1
19	20	0.034	0.068	0	1
10	20	0.0936	0.209	0	1
10	17	0.0324	0.0845	0	1
10	21	0.0348	0.0749	0	1
10	22	0.0727	0.1499	0	1
21	22	0.0116	0.0236	0	1
15	23	0.1	0.202	0	1
22	24	0.115	0.179	0	1
23	24	0.132	0.27	0	1
24	25	0.1885	0.3292	0	1
25	26	0.2544	0.38	0	1
25	27	0.1093	0.2087	0	1
28	27	0	0.396	0	0.968
27	29	0.2198	0.4153	0	1
27	30	0.3202	0.6027	0	1
29	30	0.2399	0.4533	0	1
8	28	0.0636	0.2	0.0214	1
6	28	0.0169	0.0599	0.065	1

Πίνακας Α.4.2: Στοιχεία ζυγών του δικτύου 30 ζυγών της IEEE.

Αρ. ζυγού	Κωδικός ζυγού	Μέτρο τάσης (p.u.)	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο		Παραγωγή				Έγχυση (MVAR)	
					MW	MVAR	MW	MVAR	Qmin (MVAR)	Qmax (MVAR)		
1	1	1.06	132	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1.043	132	0	21.7	12.7	40	0	-40	50	0	0
3	0	1	132	0	2.4	1.2	0	0	0	0	0	0
4	0	1	132	0	7.6	1.6	0	0	0	0	0	0
5	2	1.01	132	0	94.2	19	0	0	-40	40	0	0
6	0	1	132	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	132	0	22.8	10.9	0	0	0	0	0	0
8	2	1.01	132	0	30	30	0	0	-10	60	0	0
9	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1	33	0	5.8	2	0	0	0	0	0	19
11	2	1.082	11	0	0	0	0	0	-6	24	0	0
12	0	1	33	0	11.2	7.5	0	0	0	0	0	0
13	2	1.071	11	0	0	0	0	0	-6	24	0	0
14	0	1	33	0	6.2	1.6	0	0	0	0	0	0
15	0	1	33	0	8.2	2.5	0	0	0	0	0	0
16	0	1	33	0	3.5	1.8	0	0	0	0	0	0
17	0	1	33	0	9	5.8	0	0	0	0	0	0
18	0	1	33	0	3.2	0.9	0	0	0	0	0	0
19	0	1	33	0	9.5	3.4	0	0	0	0	0	0
20	0	1	33	0	2.2	0.7	0	0	0	0	0	0
21	0	1	33	0	17.5	11.2	0	0	0	0	0	0
22	0	1	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	1	33	0	3.2	1.6	0	0	0	0	0	0
24	0	1	33	0	8.7	6.7	0	0	0	0	0	4.3
25	0	1	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	1	33	0	3.5	2.3	0	0	0	0	0	0
27	0	1	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	1	132	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	1	33	0	2.4	0.9	0	0	0	0	0	0
30	0	1	33	0	10.6	1.9	0	0	0	0	0	0

## Α.5 ΔΙΚΤΥΟ 57 ΖΥΓΩΝ ΤΗΣ ΙΕΕΕ

Πίνακας Α.5.1: Στοιχεία γραμμών του δικτύου 57 ζυγών της ΙΕΕΕ.

Από ζυγό	Προς ζυγό	R (p.u.)	X (p.u.)	1/2 B (p.u.)	Κωδικός γραμμής
1	2	0.0083	0.028	0.0645	1
2	3	0.0298	0.085	0.0409	1
3	4	0.0112	0.0366	0.019	1
4	5	0.0625	0.132	0.0129	1
4	6	0.043	0.148	0.0174	1
6	7	0.02	0.102	0.0138	1
6	8	0.0339	0.173	0.0235	1
8	9	0.0099	0.0505	0.0274	1
9	10	0.0369	0.1679	0.022	1
9	11	0.0258	0.0848	0.0218	1
9	12	0.0648	0.295	0.0386	1
9	13	0.0481	0.158	0.0406	1
13	14	0.0132	0.0434	0.0055	1
13	15	0.0269	0.0869	0.0115	1
1	15	0.0178	0.091	0.0494	1
1	16	0.0454	0.206	0.0273	1
1	17	0.0238	0.108	0.0143	1
3	15	0.0162	0.053	0.0272	1
4	18	0	0.555	0	0.97
5	6	0.0302	0.0641	0.0062	1
7	8	0.0139	0.0712	0.0097	1
10	12	0.0277	0.1262	0.0164	1
11	13	0.0223	0.0732	0.0094	1
12	13	0.0178	0.058	0.0604	1
12	16	0.018	0.0813	0.0108	1
12	17	0.0397	0.179	0.0238	1
14	15	0.0171	0.0547	0.0148	1
18	19	0.461	0.685	0	1
19	20	0.283	0.434	0	1
21	20	0	0.7767	0	1.043
21	22	0.0736	0.117	0	1
22	23	0.0099	0.0152	0	1
23	24	0.166	0.256	0.0042	1
24	25	0	1.182	0	1
24	26	0	0.0473	0	1.043
26	27	0.165	0.254	0	1
27	28	0.0618	0.0954	0	1
28	29	0.0418	0.0587	0	1
7	29	0	0.0648	0	0.967
25	30	0.135	0.202	0	1
30	31	0.326	0.497	0	1

Πίνακας Α.5.1: Στοιχεία γραμμών του δικτύου 57 ζυγών της IEEE (συνέχεια).

Από ζυγό	Προς ζυγό	R (p.u.)	X (p.u.)	1/2 B (p.u.)	Κωδικός γραμμής
31	32	0.507	0.755	0	1
32	33	0.0392	0.036	0	1
34	32	0	0.953	0	0.975
34	35	0.052	0.078	0.0016	1
35	36	0.043	0.0537	0.0008	1
36	37	0.029	0.0366	0	1
37	38	0.0651	0.1009	0.001	1
37	39	0.0239	0.0379	0	1
36	40	0.03	0.0466	0	1
22	38	0.0192	0.0295	0	1
11	41	0	0.749	0	0.955
41	42	0.207	0.352	0	1
41	43	0	0.412	0	1
38	44	0.0289	0.0585	0.001	1
15	45	0	0.1042	0	0.955
14	46	0	0.0735	0	0.9
46	47	0.023	0.068	0.0016	1
47	48	0.0182	0.0233	0	1
48	49	0.0834	0.129	0.0024	1
49	50	0.0801	0.128	0	1
50	51	0.1386	0.22	0	1
10	51	0	0.0712	0	0.93
13	49	0	0.191	0	0.895
29	52	0.1442	0.187	0	1
52	53	0.0762	0.0984	0	1
53	54	0.1878	0.232	0	1
54	55	0.1732	0.2265	0	1
11	43	0	0.153	0	0.958
44	45	0.0624	0.1242	0.002	1
40	56	0	1.195	0	0.958
56	41	0.553	0.549	0	1
56	42	0.2125	0.354	0	1
39	57	0	1.355	0	0.98
57	56	0.174	0.26	0	1
38	49	0.115	0.177	0.0015	1
38	48	0.0312	0.0482	0	1
9	55	0	0.1205	0	0.94

Πίνακας Α.5.2: Στοιχεία ζυγών του δικτύου 57 ζυγών της IEEE.

Αρ. ζυγού	Κωδικός ζυγού	Μέτρο τάσης (p.u.)	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο		Παραγωγή				Έγχυση (MVAR)
					MW	MVAR	MW	MVAR	Qmin (MVAR)	Qmax (MVAR)	
1	1	1.04	345	0	55	17	0	0	0	0	0
2	2	1.01	345	0	3	88	0	0	-17	50	0
3	2	0.985	345	0	41	21	40	0	-10	60	0
4	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1	345	0	13	4	0	0	0	0	0
6	2	0.98	345	0	75	2	450	0	-8	25	0
7	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
8	2	1.005	345	0	150	22	0	0	-140	200	0
9	2	0.98	345	0	121	26	0	0	-3	9	0
10	0	1	345	0	5	2	0	0	0	0	0
11	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
12	2	1.015	345	0	377	24	310	0	-150	155	0
13	0	1	345	0	18	2.3	0	0	0	0	0
14	0	1	345	0	10.5	5.3	0	0	0	0	0
15	0	1	345	0	22	5	0	0	0	0	0
16	0	1	345	0	43	3	0	0	0	0	0
17	0	1	345	0	42	8	0	0	0	0	0
18	0	1	345	0	27.2	9.8	0	0	0	0	10
19	0	1	345	0	3.3	0.6	0	0	0	0	0
20	0	1	345	0	2.3	1	0	0	0	0	0
21	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	1	345	0	6.3	2.1	0	0	0	0	0
24	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	1	345	0	6.3	3.2	0	0	0	0	5.9
26	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	1	345	0	9.3	0.5	0	0	0	0	0
28	0	1	345	0	4.6	2.3	0	0	0	0	0
29	0	1	345	0	17	2.6	0	0	0	0	0
30	0	1	345	0	3.6	1.8	0	0	0	0	0
31	0	1	345	0	5.8	2.9	0	0	0	0	0
32	0	1	345	0	1.6	0.8	0	0	0	0	0
33	0	1	345	0	3.8	1.9	0	0	0	0	0
34	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	1	345	0	6	3	0	0	0	0	0
36	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	1	345	0	14	7	0	0	0	0	0
39	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	1	345	0	6.3	3	0	0	0	0	0
42	0	1	345	0	7.1	4.4	0	0	0	0	0
43	0	1	345	0	2	1	0	0	0	0	0
44	0	1	345	0	12	1.8	0	0	0	0	0

**Πίνακας Α.5.2:** Στοιχεία ζυγών του δικτύου 57 ζυγών της IEEE (συνέχεια).

Αρ. ζυγού	Κωδικός ζυγού	Μέτρο τάσης (p.u.)	Μέτρο τάσης (kV)	Γωνία τάσης (deg)	MW	MVAR	MW	MVAR	Qmin (MVAR)	Qmax (MVAR)	Έγχυση (MVAR)
45	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	1	345	0	29.7	11.6	0	0	0	0	0
48	0	1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	1	345	0	18	8.5	0	0	0	0	0
50	0	1	345	0	21	10.5	0	0	0	0	0
51	0	1	345	0	18	5.3	0	0	0	0	0
52	0	1	345	0	4.9	2.2	0	0	0	0	0
53	0	1	345	0	20	10	0	0	0	0	6.3
54	0	1	345	0	4.1	1.4	0	0	0	0	0
55	0	1	345	0	6.8	3.4	0	0	0	0	0
56	0	1	345	0	7.6	2.2	0	0	0	0	0
57	0	1	345	0	6.7	2	0	0	0	0	0

