



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

**ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κυριακή Ε. Αντωνιάδου-Πλυταριά

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Νικόλαος Χ. Κουτσούκης, Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015



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

**ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κυριακή Ε. Αντωνιάδου-Πλυταριά

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιάκης, Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Νικόλαος Χ. Κουτσούκης, Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22^η Δεκεμβρίου 2015.

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

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

.....
Στάυρος Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015

.....
Κυριακή Ε. Αντωνιάδου-Πλυταριά

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

Copyright © Κυριακή Αντωνιάδου-Πλυταριά, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι ο μακροπρόθεσμος προγραμματισμός ανάπτυξης δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται καθορίζει την ενίσχυση των υπαρχόντων γραμμών διανομής, την κατασκευή νέων γραμμών διανομής για την επέκταση του δικτύου, την ενίσχυση του υποσταθμού και την εγκατάσταση ρυθμιστών τάσης. Επιπλέον, καθορίζεται το έτος που είναι απαραίτητη κάθε μία από τις προαναφερόμενες πιθανές επενδύσεις. Η αντικειμενική συνάρτηση που ελαχιστοποιείται είναι η καθαρή παρούσα αξία του συνολικού κόστους των επενδύσεων.

Για την επίλυση του μακροπρόθεσμου προγραμματισμού ανάπτυξης δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον GAMS. Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Αρχικά, για το τελευταίο έτος σχεδιασμού καθορίζονται τα στοιχεία του δικτύου (θέση, μέγεθος) που πρέπει να ενισχυθούν και να προστεθούν για την εξυπηρέτηση της αυξανόμενης ζήτησης και των νέων φορτίων. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη διαμόρφωση του δικτύου που προκύπτει από το προηγούμενο στάδιο, εξετάζεται η τοποθέτηση ρυθμιστών τάσης. Τέλος, εξετάζονται διαδοχικά τα προηγούμενα έτη και επιλέγεται το έτος που θα πραγματοποιηθεί η κάθε επένδυση του δικτύου που αποφασίστηκε στα προηγούμενα στάδια. Η μέθοδος επίλυσης που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε σε δίκτυα διανομής των 22, 43 και 267 ζυγών, για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητά της.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Σχεδιασμός δικτύου διανομής, επέκταση δικτύου, ρυθμιστές τάσης, βελτιστοποίηση

ABSTRACT

The scope of this thesis is the multi-year power distribution planning (PDP). The goal of the developed multi-year PDP formulation is to define the reinforcement of existing distribution lines and substations, the addition of new distribution lines due to the network expansion and the installation of voltage regulators. Furthermore, the year for the necessary network investments is defined. The objective function to be minimized is the net present value of total investment costs.

A software was developed on GAMS for the solution of the multi-year PDP problem. The solution methodology consists of three stages. In the first stage, the site and the size of the distribution network assets that have to be reinforced and/or to be added in order to serve the load growth demand and the new loads are defined. In the next stage, the placement of voltage regulators is examined using the network configuration that was derived from the first stage. In the final stage, a heuristic method based on a back-propagation algorithm is performed in order to define the year of each network investment that was yielded from the previous stages. The developed multi-year PDP framework was applied to distribution networks of 22, 43 and 267 buses in order to evaluate its performance and its computational efficiency.

KEY WORDS

Power distribution planning, network expansion, voltage regulators, optimization

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντας μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Νικόλαο Κουτσούκη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Τέλος, για τη στήριξη και τη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και πάνω από όλα την οικογένειά μου και το Δημήτρη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

| | | |
|-----|-----------------------------------|---|
| 1.1 | Εισαγωγή | 1 |
| 1.2 | Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας | 2 |
| 1.3 | Αντικείμενο και δομή της εργασίας | 3 |
| 1.4 | Βιβλιογραφία | 4 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

| | | |
|-------|----------------------------------------|----|
| 2.1 | Εισαγωγή | 5 |
| 2.2 | Μέθοδοι βελτιστοποίησης | 5 |
| 2.2.1 | Ταξινόμηση προβλημάτων βελτιστοποίησης | 6 |
| 2.2.2 | Γραμμικά προβλήματα | 7 |
| 2.2.3 | Μεικτά – ακέραια γραμμικά προβλήματα | 7 |
| 2.2.4 | Ο αλγόριθμος “Branch and Bound” | 8 |
| 2.3 | Ταξινόμηση μοντέλων σχεδιασμού | 9 |
| 2.4 | Βιβλιογραφία | 11 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΤΙΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

| | | |
|-------|------------------------|----|
| 3.1 | Εισαγωγή | 13 |
| 3.2 | Ανάλυση ροών ισχύος | 13 |
| 3.2.1 | Δομή ακτινικών δικτύων | 14 |
| 3.2.2 | Εξισώσεις ροών ισχύος | 14 |
| 3.3 | Ρύθμιση τάσης | 15 |
| 3.3.1 | Ρυθμιστές τάσης | 16 |
| 3.3.2 | Κύκλωμα αντιστάθμισης | 17 |
| 3.4 | Διεσπαρμένη παραγωγή | 19 |
| 3.5 | Βιβλιογραφία | 21 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΚΤΙΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

| | | |
|-------|--------------------------|----|
| 4.1 | Εισαγωγή | 23 |
| 4.2 | Το λογισμικό GAMS | 23 |
| 4.2.1 | Δομή και σύσταση εντολών | 24 |
| 4.2.2 | Cplex | 28 |

| | | |
|---------|-----------------------------------------------------|----|
| 4.3 | Διατύπωση του προβλήματος | 29 |
| 4.3.1 | Αντικειμενική συνάρτηση | 29 |
| 4.3.2 | Ισοζύγιο ισχύος | 30 |
| 4.3.3 | Περιορισμοί ενίσχυσης γραμμών | 32 |
| 4.3.4 | Περιορισμοί ενίσχυσης Μ/Σ | 33 |
| 4.3.5 | Περιορισμοί για την ακτινική λειτουργία του δικτύου | 34 |
| 4.3.5.1 | Δημιουργία νέου μονοπατιού | 34 |
| 4.3.5.2 | Δημιουργία συνεκτικού γράφου | 35 |
| 4.3.6 | Μοντελοποίηση ρυθμιστών τάσης | 36 |
| 4.4 | Μέθοδος επίλυσης | 38 |
| 4.4.1 | Στάδια επίλυσης | 38 |
| 4.4.2 | Επιλογή των αναβαθμίσεων | 39 |
| 4.4.3 | Επιλογή του έτους | 40 |
| 4.5 | Βιβλιογραφία | 40 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

| | | |
|---------|--------------------------------|----|
| 5.1 | Εισαγωγή | 41 |
| 5.2 | Υπολογισμός κόστους επενδύσεων | 41 |
| 5.3 | Δίκτυο 22 ζυγών | 42 |
| 5.3.1 | Δεδομένα | 42 |
| 5.3.2 | Αποτελέσματα | 46 |
| 5.3.2.1 | Σενάριο 1 | 47 |
| 5.3.2.2 | Σενάριο 2 | 48 |
| 5.3.2.3 | Σενάριο 3 | 50 |
| 5.3.2.4 | Συγκεντρωτικά αποτελέσματα | 50 |
| 5.4 | Δίκτυο 43 ζυγών | 55 |
| 5.4.1 | Δεδομένα | 55 |
| 5.4.2 | Αποτελέσματα | 60 |
| 5.4.2.1 | Σενάριο 1 | 61 |
| 5.4.2.2 | Σενάριο 2 | 63 |
| 5.4.2.3 | Σενάριο 3 | 64 |
| 5.4.2.4 | Συγκεντρωτικά αποτελέσματα | 65 |
| 5.5 | Δίκτυο 267 ζυγών | 69 |
| 5.5.1 | Δεδομένα | 69 |
| 5.5.2 | Αποτελέσματα | 78 |
| 5.5.2.1 | Σενάριο 1 | 78 |

| | | |
|---------|----------------------------|----|
| 5.5.2.2 | Σενάριο 2 | 80 |
| 5.5.2.3 | Σενάριο 3 | 81 |
| 5.5.2.4 | Συγκεντρωτικά αποτελέσματα | 82 |
| 5.6. | Βιβλιογραφία | 87 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

| | | |
|-----|------------------------------------------------|----|
| 6.1 | Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της | 89 |
| 6.2 | Προτάσεις για μελλοντική επέκταση της εργασίας | 90 |

| | | |
|---------------------|------------------|----|
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: | ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ | 91 |
|---------------------|------------------|----|

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

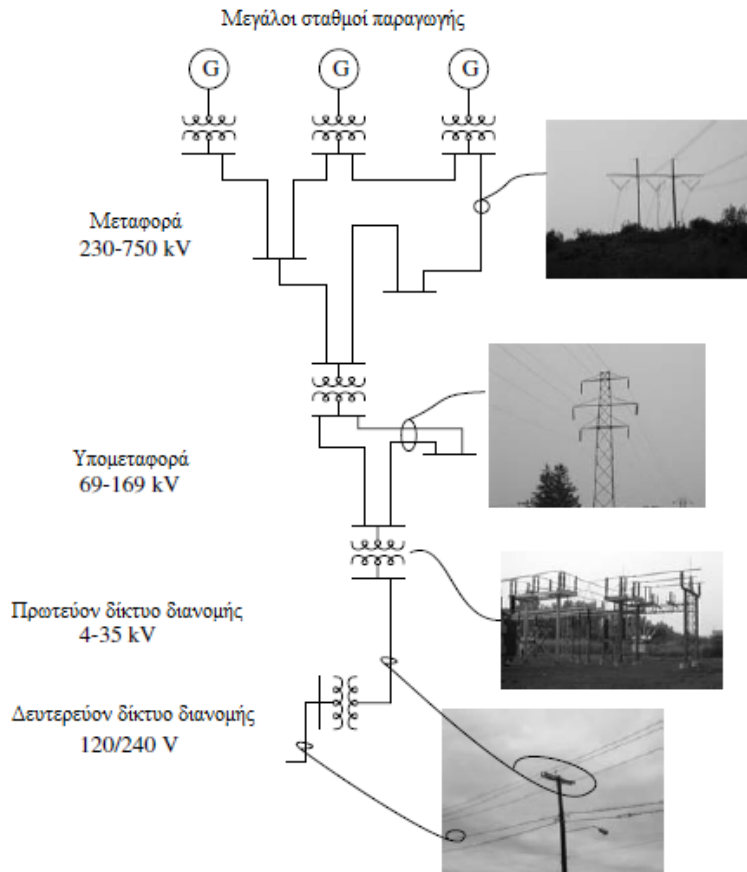
Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε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

- 1) Τους σταθμούς παραγωγής, όπου παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια.
- 2) Τα δίκτυα μεταφοράς, που συνδέουν τους σταθμούς παραγωγής με τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης.
- 3) Τα δίκτυα διανομής (ΔΔ) με τα οποία η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές (βιομηχανίες, κατοικίες κλπ).

Μεταξύ των δικτύων μεταφοράς και διανομής παρεμβάλλονται ενίοτε και τα δίκτυα υπομεταφοράς, τα οποία χρησιμεύουν και για τους δύο παραπάνω σκοπούς. Γενικά, η διάκριση μεταξύ μεταφοράς και διανομής διαφέρει από χώρα σε χώρα. Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η παράλληλη τεχνολογική εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων για τη διανομή, όπως άλλωστε και για τη μεταφορά, με αποτέλεσμα δίκτυα που παλιότερα έπαιζαν το ρόλο μεταφοράς να χαρακτηρίζονται ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής.

Στο ελληνικό δίκτυο η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής προς τους υποσταθμούς γίνεται με τις γραμμές υπερυψηλής (400 kV) και τις γραμμές υψηλής (150 kV, 66 kV) τάσης. Από τους υποσταθμούς (Υ/Σ) ξεκινά η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας ΜΤ (πρωτεύον δίκτυο διανομής) που γίνεται κυρίως με γραμμές των 20 kV, ενώ υπάρχουν και γραμμές των 15 kV και των 6,6 kV. Το δευτερεύον δίκτυο διανομής περιλαμβάνει τις γραμμές ΧΤ (220/380 V) με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Σύμφωνα με στοιχεία της ΡΑΕ για για το διασυνδεδεμένο σύστημα (National Report ΡΑΕ 2012), το έτος 2011 το 66,5% της εγκαταστημένης ισχύος των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων ήταν θερμοικοί σταθμοί, το 19,6% μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί και το 13,9% μονάδες ανανέωσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) με τα αιολικά πάρκα να επικρατούν στο σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των έργων ΑΠΕ που βρίσκονται σε λειτουργία. Ο λιγνίτης είναι η πιο σημαντική εγχώρια ενεργειακή πηγή συνεισφέροντας στο 53,15% της εγχώριας παραγωγής για το 2011. Το φυσικό αέριο συνεισφέρει στο 28,3% [1.2].



Σχήμα 1.1: Η δομή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [1.3].

1.2 ΔΙΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Τα ΔΔ περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων αυτή φτάνει στους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν στο σύστημα μεταφοράς. Τα ΔΔ φτάνουν μέχρι τον μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας και από το σημείο αυτό ξεκινά το εσωτερικό δίκτυο διανομής για την τροφοδότηση των συσκευών κατανάλωσης. Οι υποδομές της διανομής είναι εκτεταμένες, προκειμένου να εξυπηρετηθούν όλοι οι καταναλωτές είτε πρόκειται για πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές είτε για απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές. Το ελληνικό ΔΔ έχει συνολικά 235.325 χλμ γραμμές διανομής, όπως δείχνουν τα στοιχεία από τον ΔΕΔΔΗΕ [1.4] για τα ποσοτικά μεγέθη του στο τέλος του έτους 2014 και συγκεκριμένα είναι:

- **Γραμμές Μέσης Τάσης (ΜΤ):** 110 750 km.
- **Γραμμές Χαμηλής Τάσης (ΧΤ):** 124 575 km.
- **Υποσταθμοί διανομής (Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ):** 160 575.
- **Υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ:** 225.

Κατασκευαστικά τα ΔΔ διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα εναέρια και τα υπόγεια δίκτυα. Τα εναέρια δίκτυα είναι λιγότερο δαπανηρά από τα υπόγεια και είναι ευκολότερα στην εγκατάσταση και την συντήρησή τους. Όμως, καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο, η διάθεση του οποίου δεν είναι πάντα εφικτή. Η κατασκευή εναέριων δικτύων προσφέρεται ιδιαίτερα στις αγροτικές περιοχές, που χαρακτηρίζονται από μικρή πυκνότητα φορτίου και μπορούν εύκολα να τηρηθούν οι ελάχιστες απαιτούμενες αποστάσεις μεταξύ των αγωγών. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται «αγροτικά» ή «υπεραστικά». Οι Υ/Σ των εναέριων δικτύων κατασκευάζονται συνήθως εναέριοι, πάνω σε έναν ή δύο στύλους.

Τα υπόγεια δίκτυα (ΜΤ ή ΧΤ) χρησιμοποιούνται στα κέντρα των πόλεων λόγω αισθητικής, εξαιτίας της έλλειψης διαθέσιμης γης και κυρίως λόγω της μεγάλης πυκνότητας φορτίου. Σε μικρές πόλεις ή στα προάστια τα δίκτυα κατασκευάζονται μερικώς υπόγεια και μερικώς εναέρια (π.χ. υπόγειο το δίκτυο ΜΤ και εναέριο το δίκτυο ΧΤ). Οι Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ των υπόγειων δικτύων εγκαθίστανται συχνά στα υπόγεια πολυκατοικιών ή στην επιφάνεια του εδάφους σε ειδικά διαμορφωμένους οικόσκους [1.5].

Η επιλογή του κατάλληλου δικτύου για μία δεδομένη περιοχή είναι ένα σύνθετο τεχνικοοικονομικό πρόβλημα, γιατί κατά τη σχεδιάσή του πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η μελλοντική ανάπτυξή του. Το σύστημα διανομής είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την εταιρία ηλεκτρικής ενέργειας, επειδή βρίσκεται κοντά στον τελικό καταναλωτή και έχει υψηλό κόστος επένδυσης. Επιπλέον, τα σφάλματα στο δίκτυο διανομής επηρεάζουν πολύ περισσότερο σε σχέση με τα σφάλματα στο επίπεδο της μεταφοράς ή της παραγωγής, τα οποία δεν προκαλούν κατά κανόνα διακοπές στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτό και ο σχεδιασμός του δικτύου διανομής ξεκινά από το επίπεδο του καταναλωτή.

Η ζήτηση, το είδος του φορτίου, ο συντελεστής ισχύος και τα άλλα χαρακτηριστικά του φορτίου υπαγορεύουν το είδος του δικτύου διανομής που απαιτείται. Μόλις καθοριστούν τα φορτία, ομαδοποιούνται, για να εξυπηρετηθούν από το δευτερεύον δίκτυο διανομής (δίκτυο ΧΤ). Οι γραμμές διανομής του δευτερεύοντος ΔΔ συνδέονται με τους Μ/Σ διανομής που υποβιβάζουν τη ΜΤ του πρωτεύοντος δικτύου. Τα φορτία αυτών των Μ/Σ συνδυάζονται προκειμένου να καθοριστούν οι απαιτήσεις του πρωτεύοντος ΔΔ και στη συνέχεια γίνεται ανάθεση του φορτίου του πρωτεύοντος ΔΔ στους Μ/Σ που υποβιβάζουν την υψηλή τάση της μεταφοράς [1.6].

Το κλειδί για την παροχή αξιόπιστων και οικονομικών υπηρεσιών στους καταναλωτές είναι η διεξοδική μελέτη σχεδιασμού και ανάπτυξης των ΔΔ με στόχο να διασφαλιστεί η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Το μεγάλο πλήθος των επιμέρους στοιχείων των ΔΔ και των καταναλωτών που εξυπηρετούν έχουν οδηγήσει σε αυξημένη πολυπλοκότητα στη διαμόρφωσή τους. Για αυτό το λόγο και είναι πολύτιμη η χρήση του Η/Υ στη μελέτη των εναλλακτικών σχεδίων επέκτασής τους και στον έλεγχο της λειτουργίας τους.

1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της εργασίας είναι ο μακροπρόθεσμος σχεδιασμός ενός ακτινικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτό το σκοπό αναπτύχθηκε ένα περιεκτικό μοντέλο που ενσωματώνει αρκετές επιλογές αναβάθμισης και ανάπτυξης του ΔΔ, οι οποίες θα εξασφαλίζουν την εξυπηρέτηση της μελλοντικής ζήτησης φορτίου και την διατήρηση των ορίων της τάσης στους ζυγούς. Ο στόχος του σχεδιασμού είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης του ΔΔ.

Η εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του μαθηματικού προγραμματισμού και γίνεται μία αναφορά και ταξινόμηση των μοντέλων σχεδιασμού.

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται μία ανάλυση των ακτινικών δικτύων διανομής, παρουσιάζονται οι εξισώσεις ροών ισχύος και περιγράφονται οι ρυθμιστές τάσης και οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται αρχικά το λογισμικό GAMS που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα του μακροπρόθεσμου σχεδιασμού. Ορίζεται το πρόβλημα και οι εξισώσεις του και παρουσιάζεται η μέθοδος επίλυσης που αναπτύχθηκε.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου σε ένα δίκτυο 22 ζυγών, ένα δίκτυο 43 ζυγών και ένα δίκτυο 267 ζυγών. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων γίνεται με χρήση πινάκων, σχημάτων και γραφημάτων.

Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται μία σύνοψη της εργασίας και των συμπερασμάτων της. Στο τέλος γίνονται προτάσεις για την μελλοντική επέκταση της εργασίας.

Στο **Παράρτημα Α** παρατίθενται τα κυριότερα ελληνικά και αγγλικά ακρωνύμια που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία.

1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.
- [1.2] ΡΑΕ – Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, [Online].
Διαθέσιμο:
http://www.rae.gr/site/categories_new/consumers/know_about/electricity/production.csp
- [1.3] T. A. Short, *Electric Power Distribution Handbook*, CRC Press, 2004.
- [1.4] ΔΕΔΔΗΕ - Βασικά μεγέθη του δικτύου ηλεκτρισμού, [Online].
Διαθέσιμο: <http://www.deddie.gr/el/to-diktuo-ilektrismou/vasika-megethi-tou-diktuou-ilektrismou>
- [1.5] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Τόμος Ι, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1994.
- [1.6] T. Gönen, *Electric Power Distribution System Engineering*, Boca Raton: CRC Press, 2nd ed., 2008.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητος, προκειμένου να ικανοποιηθεί η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με το βέλτιστο τεχνικά και οικονομικά τρόπο. Η μελέτη ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [2.1] μπορεί να είναι βραχυπρόθεσμη (έως 5 έτη), μεσοπρόθεσμη (5 έως 10 έτη) ή μακροπρόθεσμη (10 έως 30 έτη). Οι επενδύσεις αφορούν είτε την επέκταση του δικτύου με καινούρια στοιχεία (π.χ. γραμμές διανομής, Μ/Σ κτλ.) είτε την αντικατάσταση των στοιχείων του τη χρονική περίοδο που αναμένεται ότι η τάση σε ένα ζυγό θα είναι πολύ χαμηλή ή το ρεύμα μιας γραμμής ή του μετασχηματιστή θα είναι πολύ υψηλό. Πρακτικά, η αναβάθμιση ενός στοιχείου του δικτύου γίνεται συνήθως εξαιτίας της προβλεπόμενης αύξησης του φορτίου. Οι επιλογές επένδυσης περιλαμβάνουν την κατασκευή νέων υποσταθμών (Υ/Σ) ή την αναβάθμισή τους, την ενίσχυση των γραμμών διανομής ή την επέκτασή τους, την τοποθέτηση ρυθμιστών τάσης (ΡΤ) ή/και πυκνωτών και εναλλακτικά την ένταξη ΜΔΠ.

Τα δεδομένα της μελέτης είναι η αρχική κατάσταση του δικτύου το έτος αναφοράς και η προβλεπόμενη αύξηση των φορτίων σε όλη την εξεταζόμενη περίοδο της μελέτης. Από τα διαφορετικά σχέδια αναβάθμισης, που είναι λύσεις τεχνικά και οικονομικά εφικτές και διασφαλίζουν την εξυπηρέτηση των φορτίων, επιλέγεται τελικά η βέλτιστη τεχνικοοικονομικά πρόταση, δηλαδή εκείνη η οποία έχει το ελάχιστο συνολικό κόστος και τον καλύτερο βαθμό εξυπηρέτησης των καταναλωτών (μεγαλύτερη συνέχεια τροφοδότησης, μεγαλύτερη σταθερότητα της τάσης τροφοδότησης). Το τελικό κόστος της επέκτασης του δικτύου διανομής επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως το κόστος υλικών, το κόστος εγκατάστασης, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας, τις απώλειες ενέργειας. Συνήθως όμως λαμβάνεται υπόψη μόνο το κόστος επένδυσης, καθώς το κόστος των απωλειών ενέργειας είναι συγκριτικά μικρό σε σχέση με το κόστος επένδυσης [2.2].

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η επεξήγηση της διαδικασίας του σχεδιασμού και της επέκτασης ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του μαθηματικού προγραμματισμού, που είναι η βάση για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης και στη συνέχεια περιγράφονται τα διαφορετικά μοντέλα σχεδιασμού που έχουν αναπτυχθεί.

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Σε αυτήν την ενότητα γίνεται μία παρουσίαση των μαθηματικών μεθόδων βελτιστοποίησης, οι οποίες χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό των δικτύων διανομής, καθώς η επιλογή της λύσης στηρίζεται από τη χρήση μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού. Στη γενική του μορφή ένα μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού επιδιώκει να βρει τις κατάλληλες τιμές μέσα από ένα σύνολο μεταβλητών, που βελτιστοποιούν (ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν ανάλογα με το πρόβλημα) έναν κριτήριο απόφασης, που καλείται αντικειμενική συνάρτηση και η οποία εκφράζεται

ως μαθηματική συνάρτηση των μεταβλητών, που καλούνται μεταβλητές απόφασης. Αυτές οι μεταβλητές υπόκεινται σε περιορισμούς, επομένως στόχος είναι από όλα τα δυνατά σύνολα τιμών, από όλες δηλαδή τις εφικτές λύσεις, να βρεθεί το βέλτιστο. Αν \mathbf{x} είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης το μοντέλο περιγράφεται ως ακολούθως [2.3]:

$$\begin{aligned} \text{Min (ή Max)} \quad z &= f(\mathbf{x}) \\ \text{υπό τον περιορισμό: } \mathbf{x} &\in F \end{aligned} \quad (2.1)$$

όπου: $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^n, z: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}, F \subseteq \mathcal{R}^n$.

Όταν στο $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ δοθεί η βέλτιστη λύση, η z λαμβάνει τη βέλτιστη τιμή και για να είναι εφικτή η λύση πρέπει το \mathbf{x} να ικανοποιεί τον περιορισμό F , τον χώρο που προσδιορίζεται μαθηματικά από τις ακόλουθες ανισότητες (που μπορεί να είναι και ισότητες):

$$F = \begin{cases} g_1(x_1, \dots, x_n) \leq b_1 \\ \dots \\ g_m(x_1, \dots, x_n) \leq b_m \end{cases} \quad (2.2)$$

όπου b_1, \dots, b_m γνωστοί παράμετροι. Το σύνολο των εφικτών λύσεων καλείται εφικτό σύνολο.

2.2.1 Ταξινόμηση προβλημάτων βελτιστοποίησης

Ανάλογα με το είδος των συναρτήσεων και των μεταβλητών του προβλήματος τα μοντέλα διακρίνονται σε διαφορετικές κατηγορίες [2.3]:

- 1) Μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού, αν η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί εκφράζονται ως γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης και μοντέλα μη γραμμικού προγραμματισμού, αν έστω και μία συνάρτηση είναι μη γραμμική.
- 2) Μοντέλα συνεχή, αν οι μεταβλητές παίρνουν συνεχείς μόνο τιμές, *ακέραια*, αν λαμβάνουν μόνο ακέραιες τιμές και *μεικτά-ακέραια*, αν κάποιες μεταβλητές είναι συνεχείς και κάποιες ακέραιες.
- 3) Μοντέλα *στοχαστικά*, αν κάποια από τις μεταβλητές ή τις αριθμητικές παραμέτρους των συναρτήσεων συνδέονται με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Αν όχι, τότε καλούνται *αιτιοκρατικά*.
- 4) Μοντέλα *δυναμικά*, αν κάποια από τις μεταβλητές είναι συνάρτηση του χρόνου αλλιώς τα μοντέλα είναι *στατικά*.
- 5) Μοντέλα με ένα μόνο κριτήριο απόφασης, δηλαδή μία αντικειμενική συνάρτηση ή μοντέλα *πολυκριτηριακά* (ή *πολυαντικειμενικά*).

Κάθε μοντέλο χαρακτηρίζεται από στοιχεία και των πέντε αυτών κατηγοριών. Για παράδειγμα ένα μοντέλο μπορεί να είναι γραμμικό, μεικτό-ακέραιο, αιτιοκρατικό, στατικό, με μία αντικειμενική συνάρτηση.

2.2.2 Γραμμικά προβλήματα

Τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού (LP – Linear Programming) συνήθως μετασχηματίζονται και μελετώνται στην κανονική τους μορφή [2.4]:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } z = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (2.3)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} \mathbf{Ax} &= \mathbf{b} \\ \mathbf{x} &\geq 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

όπου:

$$\mathbf{c} \in \mathcal{R}^n$$

$$\mathbf{b} \in \mathcal{R}^m \quad : \text{ μη μηδενικό διάνυσμα.}$$

$$\mathbf{A} \quad : \text{ πίνακας } m \times n .$$

Το κύριο ζητούμενο στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι η εύρεση του διανύσματος που είναι *ολικά βέλτιστο* (global optimum), καθότι μαθηματικά εγγυάται μόνο η ύπαρξη *τοπικά βέλτιστου* (local optimum), εφόσον αυτό υπάρχει. Τη σύγκλιση σε ολικά βέλτιστο σημείο την εγγυώνται τα *κυρτά προβλήματα* (CP – Convex Programming) που στη γενική τους μορφή γράφονται ως ακολούθως [2.4]:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } Z = f(\mathbf{x}) \quad (2.5)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} h(\mathbf{x}) &= 0 \\ g(\mathbf{x}) &\leq 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

όπου f, g κυρτές και συνεχώς παραγωγίσιμες συναρτήσεις. Τα γραμμικά προβλήματα είναι μία ειδική περίπτωση των κυρτών προβλημάτων και επομένως, ως συνέπεια της κυρτότητας, κάθε τοπικά βέλτιστη λύση είναι και ολικά βέλτιστη.

Υπάρχουν αρκετοί αλγόριθμοι που επιλύουν τα γραμμικά προβλήματα. Οι πιο διαδεδομένοι είναι ο αλγόριθμος *Simplex* και ο δυαδικός αλγόριθμος *Simplex* [2.4].

2.2.3 Μεικτά – ακέραια γραμμικά προβλήματα

Όταν σε ένα γραμμικό πρόβλημα κάποιες μεταβλητές πρέπει να είναι ακέραιες, τότε το πρόβλημα είναι *μεικτού-ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού* (MILP – Mixed Integer Linear Programming). Στην πράξη, στα περισσότερα προβλήματα υπάρχει ανάγκη κάποιες μεταβλητές να είναι ακέραιες και συχνά περιορίζονται μόνο στο να λαμβάνουν την τιμή 1 ή 0 (δυαδικές μεταβλητές). Αυτό προσθέτει πολυπλοκότητα στην επίλυση του προβλήματος, επειδή δεν υπάρχει συνέχεια και άρα το πρόβλημα δεν είναι κυρτό. Ωστόσο, οι δυαδικές μεταβλητές είναι πολύ χρήσιμο

εργαλείο στη μοντελοποίηση μη γραμμικών προβλημάτων τα οποία, με τη χρήση κάποιων επιπρόσθετων περιορισμών, μπορούν να γίνουν γραμμικά. Ένα τέτοιο πρόβλημα γράφεται στην κανονική του μορφή ως ακολούθως [2.4]:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (2.7)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &= b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ x_j &\geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ x_j &\in \mathbb{N}, \text{ για κάποια ή για όλα τα } j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.8)$$

όπου το \mathbb{N} αναφέρεται στο σύνολο $\{0, 1, 2, \dots\}$.

Τα περισσότερα προβλήματα MILP λύνονται με τον αλγόριθμο *branch and bound*, που περιγράφεται στη συνέχεια.

2.2.4 Ο αλγόριθμος “Branch and Bound”

Τα προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού λύνονται συνήθως με την τεχνική *branch and bound*. Αρχικά επιλύεται το απαλλαγμένο (relaxed) πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, δηλαδή υποτίθεται ότι οι μεταβλητές μπορούν να λάβουν συνεχείς τιμές. Αν κατά σύμπτωση η βέλτιστη λύση του απαλλαγμένου προβλήματος είναι ακέραια, τότε αυτή είναι και η βέλτιστη λύση του ακέραιου προβλήματος. Αν η λύση δίνει δεκαδικές τιμές σε κάποιες μεταβλητές, τότε επιλέγεται μία από αυτές και δημιουργούνται δύο υποπροβλήματα, όπου η μεταβλητή λαμβάνει τις δύο κοντινότερες ακέραιες τιμές (άνω όριο και κάτω όριο). Δηλαδή, καθώς η διαδικασία εξελίσσεται, προστίθενται παραπάνω περιορισμοί στο πρόβλημα και ο χώρος των εφικτών λύσεων χωρίζεται σε υποπεριοχές.

Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζεται ένα δέντρο προγραμματισμού και επιλύονται τα προβλήματα που προκύπτουν καθώς αναπτύσσεται, ακολουθώντας τη σειρά LIFO (last in first out), δηλαδή πρώτα επιλύονται τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν πιο πρόσφατα. Με τη στρατηγική αυτή μειώνεται κατά επανάληψη το κάτω όριο και αυξάνεται το πάνω όριο. Η ανάπτυξη ενός κλάδου σταματάει αν το υποπρόβλημα είναι ανέφικτο (infeasible) ή αν βρεθεί ακέραια λύση. Κάθε φορά που βρίσκεται ακέραια λύση, σημειώνεται ως υποψήφια. Αν στη συνέχεια βρεθεί άλλη ακέραια λύση, τότε αυτή συγκρίνεται με την τρέχουσα υποψήφια και αν είναι καλύτερη, τότε παίρνει τη θέση της. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να εξεταστούν όλοι οι κλάδοι του δέντρου, οπότε και το πρόβλημα θα έχει βέλτιστη ακέραια λύση ή θα είναι ανέφικτο. Η τεχνική αυτή έχει αρκετές παραλλαγές, που αφορούν τη σειρά με την οποία γίνεται η προσπέλαση του δέντρου.

Η τεχνική *branch and bound* εφαρμόζεται και στα προβλήματα μεικτού-ακέραιου προγραμματισμού: οι μεταβλητές που δημιουργούν τα υποπροβλήματα είναι οι ακέραιες μεταβλητές

του προβλήματος και μία λύση θεωρείται υποψήφια μόνο όταν οι ακέραιες μεταβλητές παίρνουν ακέραιες τιμές [2.3].

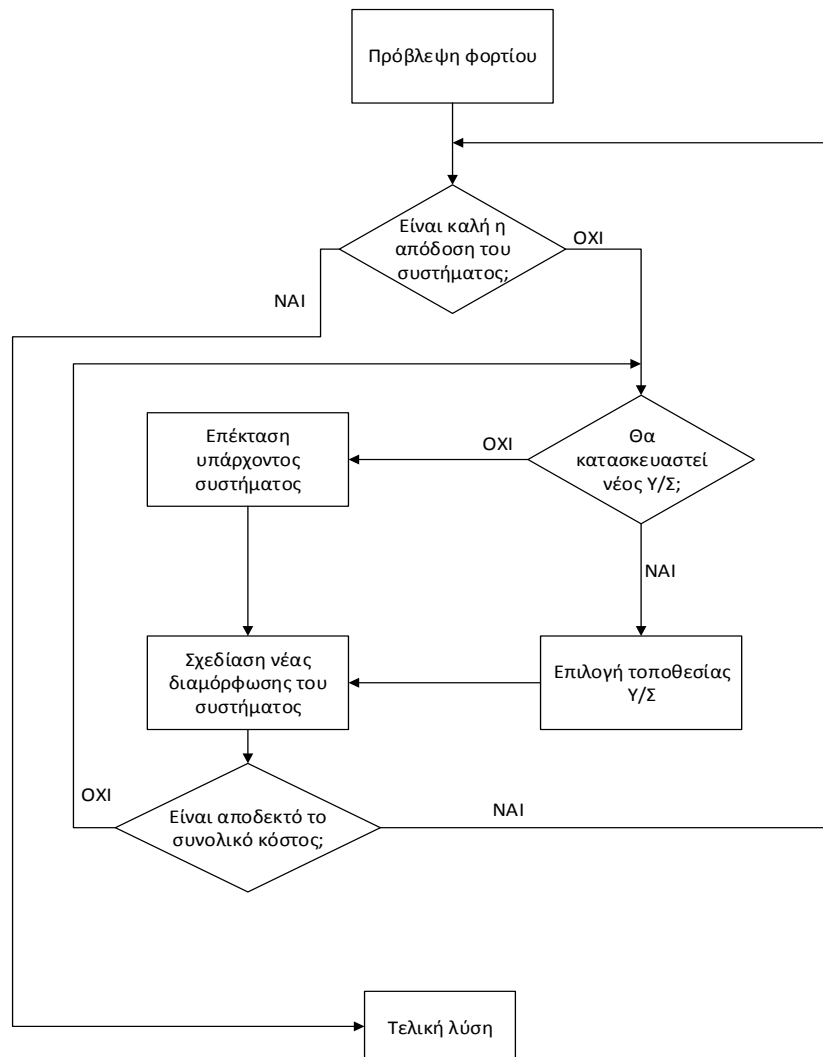
2.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ο σχεδιασμός ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μία διαδικασία βελτιστοποίησης που καθορίζει ένα σύνολο μεταβλητών σχεδίασης (π.χ. θέση και μέγεθος Υ/Σ, αριθμός γραμμών διανομής, ακτινική ή βροχοειδής διαμόρφωση). Οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών λαμβάνονται ικανοποιώντας τις αντικειμενικές συναρτήσεις, δηλαδή κριτήρια όπως η ελαχιστοποίηση του επενδυτικού κόστους, η ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης και απωλειών ή η μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας του συστήματος. Παράλληλα πρέπει να ικανοποιούνται και οι περιορισμοί του δικτύου, όπως τα θερμικά όρια αντοχής των γραμμών και η μέγιστη επιτρεπτή πτώση τάσης στους ζυγούς. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται σε γενικές γραμμές η τυπική διαδικασία σχεδιασμού του δικτύου διανομής που ακολουθούν οι περισσότερες εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας.

Γενικά, ο σχεδιασμός είναι μία πολύπλοκη διαδικασία εξαιτίας των πολλών και διαφορετικών (διακριτών, συνεχών) μεταβλητών που περιλαμβάνει και των πολλών απαιτήσεων και περιορισμών του συστήματος διανομής και της διαμόρφωσής του δικτύου. Για μία εταιρία ηλεκτρικής ενέργειας, το πιο σημαντικό είναι το μέγεθος του κόστους του δικτύου διανομής, που μπορεί να ανέλθει έως και το 60% του συνολικού προϋπολογισμού των επενδύσεων, ενώ οι δαπάνες λειτουργίας ανέρχονται στο 20% του προϋπολογισμού. Η μείωση του είναι μία δύσκολη υπόθεση, καθώς ένα δίκτυο διανομής με έναν μόλις υποσταθμό μπορεί να έχει χιλιάδες διαφορετικές εφικτές επιλογές σχεδιασμού. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα που αναπαριστούν το σύστημα, εξετάζουν διάφορες εναλλακτικές λύσεις και χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους προσέγγισης της βέλτιστης λύσης. Τέτοια προγράμματα ποτέ δε λαμβάνουν υπόψη όλες τις παραμέτρους του προβλήματος και τα περισσότερα περιλαμβάνουν απλοποιήσεις και παραδοχές. Ωστόσο, μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση του κόστους της διανομής κατά 5%-10%, σύμφωνα με τις πιο συντηρητικές εκτιμήσεις και αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούνται [2.2].

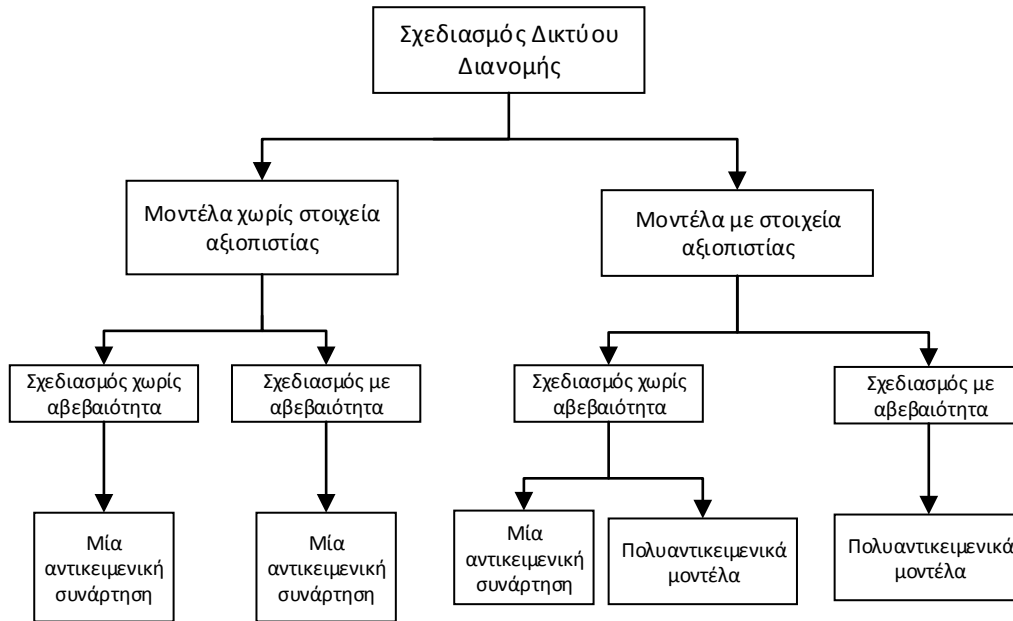
Αρχικά, ο σχεδιασμός των δικτύων διανομής χωρίζεται σε 3 είδη [2.5]:

1. *Στατικός σχεδιασμός*: Ο σχεδιασμός του δικτύου διανομής γίνεται σε ένα βήμα που αντιστοιχεί στην περίοδο μελέτης.
2. *Δυναμικός σχεδιασμός*: Πολλαπλά βήματα εκτελούνται στην περίοδο μελέτης, π.χ. εξετάζονται διαφορετικά σενάρια πρόβλεψης φορτίου ή διαφορετικά σημεία διασύνδεσης.
3. *Ψευδο-δυναμικός σχεδιασμός*: Η βελτιστοποίηση γίνεται σε κάθε βήμα διαδοχικά, δηλαδή επαναλαμβάνεται ο στατικός σχεδιασμός σε κάθε βήμα.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής μίας τυπικής διαδικασίας σχεδιασμού ενός συστήματος διανομής [2.2].

Στη συνέχεια δημιουργούνται διαφορετικά μοντέλα ανάλογα με τις παραμέτρους που εξετάζουν και ανάλογα με τις στρατηγικές επίλυσης που εφαρμόζουν. Η ταξινόμηση των μοντέλων γίνεται σε τρία επίπεδα και μπορεί να παρουσιαστεί διαγραμματικά με τη μορφή ενός δέντρου (Σχήμα 2.2). Στο πρώτο επίπεδο, που είναι και η βάση του σχεδιασμού, γίνεται διαχωρισμός των μοντέλων με κριτήριο το αν περιλαμβάνουν ή όχι στοιχεία αξιοπιστίας. Ακολουθεί το δεύτερο επίπεδο, που διακρίνεται και αυτό σε δύο κατηγορίες: σχεδιασμός με ή χωρίς αβεβαιότητα. Ο σχεδιασμός με αβεβαιότητα μοντελοποιεί την ενδογενή стоχαστικότητα της μελλοντικής ζήτησης φορτίου, των τιμών της αγοράς, της παραγωγής από ΑΠΕ ή του ρυθμού εμφάνισης βλαβών (αν υπάρχουν παράμετροι αξιοπιστίας). Τέλος, το δέντρο επεκτείνεται περαιτέρω στο τρίτο επίπεδο, που περιλαμβάνει τις διαφορετικές μαθηματικές διατυπώσεις των αντικειμενικών συναρτήσεων και τις αντίστοιχες στρατηγικές επίλυσης.



Σχήμα 2.2: Ταξινόμηση των μοντέλων σχεδιασμού των δικτύων διανομής σε δενδροειδή δομή [2.5].

Οι μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος σχεδιασμού είναι δύο: *αριθμητικές μέθοδοι* και *ευριστικές μέθοδοι*. Τα αριθμητικά μοντέλα έχουν καλύτερες ιδιότητες σύγκλισης σε σχέση με τα ευριστικά και η βέλτιστη τιμή είναι συνήθως ακριβής αλλά δύσκολα μπορούν να χειριστούν ένα μη γραμμικό, μη κυρτό πρόβλημα, όπως είναι από τη φύση του το πρόβλημα του σχεδιασμού της διανομής. Για αυτό συνήθως επιλέγονται για δοκιμές σε μικρότερα συστήματα. Τα πιο γενικευμένα και ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι τα μεικτά-ακέραια, ωστόσο στα περισσότερα εφαρμόζεται γραμμικοποίηση, γιατί μειώνει το χρόνο υπολογισμού της λύσης εισάγοντας μικρό μόνο σφάλμα. Σε μεγάλα δίκτυα εφαρμόζονται ευριστικά μοντέλα, που δεν περιορίζονται από το μέγεθος του συστήματος και πλέον είναι τα πιο διαδεδομένα. Οι ευριστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης παρέχουν λύσεις κοντά στη βέλτιστη για μεγάλης έκτασης και πολυπλοκότητας προβλήματα, ωστόσο δεν υπάρχει εγγύηση ότι θα βρουν την ολικά βέλτιστη λύση.

Η τελευταία τάση στη μελέτη επέκτασης του συστήματος διανομής είναι ο σχεδιασμός ενεργών δικτύων διανομής (Active Distribution Networks - ADN). Τα σύγχρονα μοντέλα έχουν περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις, δηλαδή βελτιστοποιούν ταυτόχρονα την επέκταση των Υ/Σ και των γραμμών και ενσωματώνουν ΜΔΠ. [2.6].

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Τόμος Ι, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1994.
- [2.2] T. Gönen, *Electric Power Distribution System Engineering*, Boca Raton: CRC Press, 2nd ed., 2008.
- [2.3] Π. Κάπρος, *Μοντέλα Μαθηματικού Προγραμματισμού*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008.
- [2.4] E. Castillo, A. J. Conejo, P. Pedregal, R. Garcia, and N. Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*, New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [2.5] S. Ganguly, N. C. Sahoo, and D. Das, "Recent advances on power distribution system

- planning: a state-of-the-art survey,” *Energy Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 165-193, Jan. 2013.
- [2.6] P. S. Georgilakis and N. D. Hatziargyriou, “A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research,” *Electric Power Systems Research*, vol. 121, pp. 89-100, April 2015.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΤΙΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί συνεχή και εκτενή ανάλυση, για να διασφαλίζεται η λειτουργία του κατά τον οικονομικότερο και αποδοτικότερο τρόπο σε μόνιμη κατάσταση ή μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας. Κατά την ανάλυση πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να εκτιμώνται ένα πλήθος διαφορετικών παραγόντων που επηρεάζουν τη λειτουργία του δικτύου. Αρχικά, πρέπει να προβλέπονται τα διαφορετικά επίπεδα φορτίου κατά τη διάρκεια της ημέρας και η μεταβολή στη μελλοντική ζήτηση ισχύος, προκειμένου να εξυπηρετούνται οι καταναλωτές. Επιπλέον, πρέπει να μελετάται το προφίλ της τάσης, καθώς η ανάπτυξη του δικτύου περιορίζεται από τις επιτρεπτές τιμές για την τάση, τη βύθιση τάσης και το flicker. Επιπρόσθετα, είναι σημαντικό να εξετάζεται και η περίπτωση στην οποία συνδέονται μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) στο δίκτυο διανομής.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά μία παρουσίαση των εξισώσεων ροών ισχύος που περιγράφουν τα ακτινικά δίκτυα διανομής και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέθοδοι με τις οποίες γίνεται ο έλεγχος της τάσης. Τέλος, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν τη ροή ισχύος και τη λειτουργία του δικτύου οι ΜΔΠ.

3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Η ανάλυση ροών ισχύος σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας προσδιορίζει, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, την τάση κατά μέτρο και γωνία σε όλους τους ζυγούς, τις ροές ενεργού και αέργου ισχύος, καθώς και τις απώλειες ισχύος σε όλες τις γραμμές, έχοντας ως δεδομένα την κατανάλωση των φορτίων και την τάση σε έναν ζυγό, συνήθως στην αρχή της γραμμής διανομής. Η ανάλυση αυτή είναι απαραίτητη για τον έλεγχο του προφίλ των τάσεων, ώστε αυτές να διατηρούνται εντός των καθορισμένων ορίων λειτουργίας και για τον έλεγχο των ροών ισχύος, προκειμένου να ικανοποιούνται τα όρια θερμικής αντοχής των γραμμών. Επίσης, είναι απαραίτητη και για τη μελέτη σχεδιασμού και ανάπτυξης του δικτύου διανομής, καθώς η τήρηση των ορίων λειτουργίας και ασφαλείας του δικτύου είναι ένα από τα πιο βασικά κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό.

Για τον υπολογισμό των ροών ισχύος και των τάσεων στα δίκτυα διανομής υπάρχει συγκεκριμένη μοντελοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) και παράσταση των στοιχείων του, ενώ γίνονται και κάποιες απλοποιητικές παραδοχές. Στις γραμμές διανομής αγνοούνται οι εγκάρσιες χωρητικότητες και έτσι παριστάνονται απλώς από μία σύνθετη αντίσταση σε σειρά. Τα φορτία μπορούν να παρασταθούν με τρεις τρόπους [3.1]:

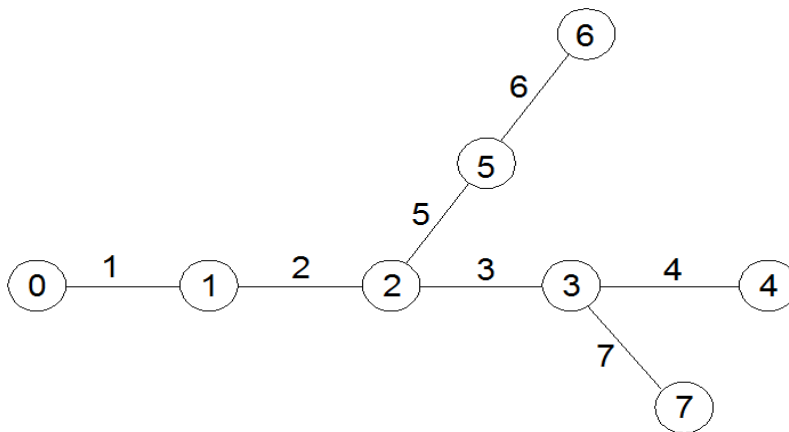
- 1) Σταθερής έντασης (και σταθερού συντελεστή ισχύος)
- 2) Σταθερής ισχύος (ενεργού και αέργου)
- 3) Σταθερής (σύνθετης) αντίστασης.

Επίσης, επειδή η ανάλυση βασίζεται στο μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα, υποτίθεται συμμετρία στο σύστημα, δηλαδή οι τριφασικές γραμμές διανομής και τα τριφασικά φορτία είναι συμμετρικά.

3.2.1 Δομή ακτινικών δικτύων

Πριν την παρουσίαση των εξισώσεων, θα περιγραφεί η διαμόρφωση των ακτινικών δικτύων, στα οποία θα γίνει ανάλυση ροών ισχύος. Τα δίκτυα διανομής που λειτουργούν ακτινικά έχουν συνήθως «δενδροειδή» δομή, που περιλαμβάνει τον κορμό του δικτύου, που κατασκευάζεται από αγωγούς μεγάλης διατομής και τις διακλαδώσεις, που έχουν αγωγούς μικρότερης διατομής από ό,τι ο κορμός. Στις διακλαδώσεις συνδέονται συνήθως οι μετασχηματιστές μέσης τάσης / χαμηλής τάσης (MT/XT). Σε αυτή τη δομή συχνά υπάρχουν και βρόχοι (loops, meshes) αλλά τα δίκτυα λειτουργούν σε ακτινική διαμόρφωση με κάποιους ανοικτούς διακόπτες, για να επιτρέπεται η ανίχνευση βλάβης και η απομόνωση τμημάτων σε περίπτωση σφάλματος. Η κάθε γραμμή ενός τέτοιου δικτύου τροφοδοτείται μόνο από το ένα άκρο. Η κύρια γραμμής διανομής, δηλαδή ο κορμός, τροφοδοτείται στην αρχή της από το μετασχηματιστή υψηλής τάσης / μέσης τάσης (ΥΤ/ΜΤ).

Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να παρασταθεί από έναν γράφο, όπου *κόμβοι* του γράφου καλούνται τα σημεία σύνδεσης των φορτίων και *κλάδοι* καλούνται τα τμήματα των γραμμών μεταξύ δύο κόμβων. Το ακτινικό δίκτυο είναι ισοδύναμο με ένα δέντρο. Η αρχή της γραμμής, όπου η τάση είναι γνωστή, κωδικοποιείται με το 0, ενώ η αρίθμηση των υπόλοιπων κόμβων και κλάδων γίνεται ως εξής: Ο κόμβος προς τον οποίο ρέει ισχύς (η οποία ρέει προς τα φορτία) έχει αριθμό μεγαλύτερο από τον προηγούμενό του, ενώ οι κλάδοι λαμβάνουν τον αριθμό του κόμβου στον οποίον καταλήγουν [3.1]. Οι διακλαδώσεις θεωρούνται αρχικά ως φορτία της κύριας γραμμής, επομένως πρώτα αριθμούνται οι κλάδοι πάνω στην κύρια γραμμή και μετά αυτοί των διακλαδώσεων (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Ακτινικό δίκτυο διανομής.

3.2.2 Εξισώσεις ροών ισχύος

Το ακτινικό δίκτυο διανομής μπορεί να περιγραφεί από το σύνολο αναδρομικών εξισώσεων (3.1) έως (3.3), που ονομάζονται εξισώσεις *DistFlow* [3.2]. Έστω Ω_n το σύνολο των κόμβων του δικτύου και Ω_l το σύνολο των κλάδων του. Οι P_{ij} και Q_{ij} δηλώνουν την ενεργό και άεργο ισχύ που ρέει από το ζυγό i στο ζυγό j .

$$\sum_{k:(i,k) \in \Omega_l} P_{ik} = P_{ji} - r_{ij} \frac{P_{ji}^2 + Q_{ji}^2}{v_j^2} - P_i^L \quad (3.1)$$

$$\sum_{k:(i,k) \in \Omega_l} Q_{ik} = Q_{ji} - x_{ij} \frac{P_{ji}^2 + Q_{ji}^2}{v_j^2} - Q_i^L \quad (3.2)$$

$$v_i^2 = v_j^2 - 2(r_{ij}P_{ji} + x_{ij}Q_{ji}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \frac{P_{ji}^2 + Q_{ji}^2}{v_j^2} \quad (3.3)$$

όπου:

$i, j, k \in \Omega_n$ με $j < i < k$

P_{ij}, Q_{ij} : η ενεργός και η άεργος ισχύς που ρέει από το ζυγό i στο ζυγό j .

P_i^L, Q_i^L : το ενεργό και άεργο φορτίο στον κόμβο i .

v_i : η τάση στον κόμβο i .

r_{ij} : η ωμική αντίσταση της γραμμής μεταξύ των κόμβων i, j .

x_{ij} : η επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταξύ των κόμβων i, j .

Από τις εξισώσεις (3.1) έως (3.3) μπορούν να αφαιρεθούν οι τετραγωνικοί όροι, οι οποίοι εκφράζουν τις απώλειες ισχύος και έχουν τιμή σημαντικά μικρότερη από τις άλλες μεταβλητές. Έτσι προκύπτουν οι ακόλουθες απλοποιημένες, γραμμικές εξισώσεις *DistFlow* (3.4) έως (3.6):

$$\sum_{k:(i,k) \in \Omega_l} P_{ik} = P_{ji} - P_i^L \quad (3.4)$$

$$\sum_{k:(i,k) \in \Omega_l} Q_{ik} = Q_{ji} - Q_i^L \quad (3.5)$$

$$v_i^2 = v_j^2 - 2(r_{ij}P_{ji} + x_{ij}Q_{ji}) \quad (3.6)$$

3.3 ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ

Η ρύθμιση της τάσης είναι μία πολύ σημαντική λειτουργία για το δίκτυο διανομής, καθώς η αύξηση φορτίου, η ζήτηση αέργου ισχύος και οι απώλειες που αυτή προκαλεί, εισάγουν διακυμάνσεις στο μέγεθος της τάσης στους ζυγούς και πρέπει να υπάρχει έλεγχος, ώστε οι τιμές στους καταναλωτές να είναι εντός των αποδεκτών ορίων και να διασφαλίζεται η ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ανεκτά όρια διακύμανσης της τάσης είναι έως $\pm 10\%$ επί της ονομαστικής της τιμής [3.1].

Ως μέσα ρύθμισης τάσης στα συστήματα διανομής χρησιμοποιούνται οι ρυθμιστές τάσης υπό φορτίο (VRs – Voltage Regulators), οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι κατά μήκος των γραμμών MT, ο μετασχηματιστής YT/MT με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ ή LTCs – Load

Tap-Changing Transformers) στον υποσταθμό και οι εγκάρσιοι πυκνωτές ή συστοιχίες πυκνωτών (CBs – Capacitor Banks). Σπανιότερα μπορεί να χρησιμοποιηθούν και μετασχηματιστές ΜΤ/ΧΤ με λήψεις, που συνήθως μπορούν να μεταβάλλονται μόνο όταν ο Μ/Σ είναι αποσυνδεδεμένος από το δίκτυο. Οι περισσότερες ηλεκτρικές εταιρίες χρησιμοποιούν Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ για ρύθμιση στο ζυγό του υποσταθμού και συμπληρωματικά στις γραμμές ρυθμιστές τάσης ή αν χρειαστεί και πυκνωτές.

3.3.1 Ρυθμιστές τάσης

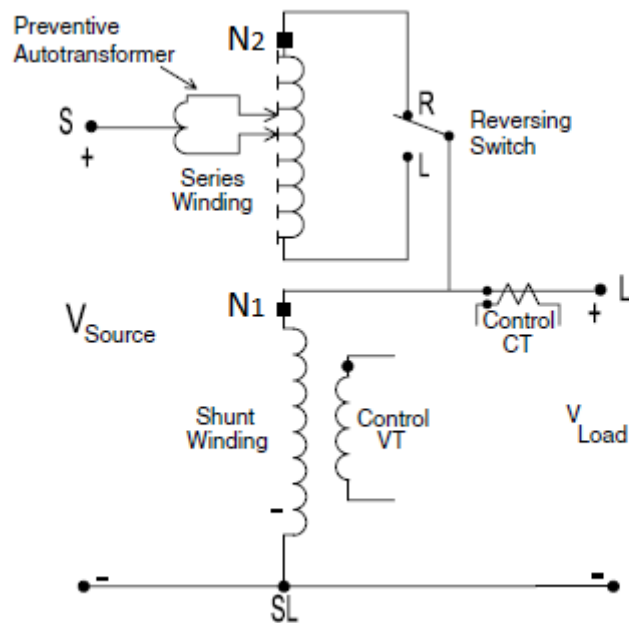
Οι ρυθμιστές τάσης χρησιμοποιούνται εκτενώς για να ελέγξουν την τάση κάθε γραμμής ξεχωριστά. Ο ρυθμιστής τάσης (Σχήμα 3.2) είναι ουσιαστικά ένας αυτομετασχηματιστής με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ). Η διαφορά του με τον κλασικό μετασχηματιστή είναι ότι ενώ μεταβάλλει το μέτρο της τάσης, δεν την μετασχηματίζει, δηλαδή δεν αλλάζει το βασικό επίπεδο της τάσης. Έχει ενδιάμεσες λήψεις στο ένα τύλιγμά του, που ονομάζεται τύλιγμα ρύθμισης και ταυτίζεται με το τύλιγμα σειράς στους μικρούς σχετικά ρυθμιστές (για διερχόμενη ένταση φορτίου έως 600Α). Το τύλιγμα σειράς (series winding) συνδέεται με το εγκάρσιο τύλιγμα (shunt winding), το οποίο συνδέεται απευθείας με το κύκλωμα προς ρύθμιση. Για τον περιορισμό του ρεύματος που προκαλείται κατά την αλλαγή της λήψης που γίνεται υπό φορτίο, χρησιμοποιείται ένα επαγωγικό πηνίο. Η τάση που επάγεται στο τύλιγμα σειράς, ανάλογα με την πολικότητα του, που αλλάζει μέσω του αναστροφέα (RS – Reverse Switch), μπορεί είτε να προστίθεται είτε να αφαιρείται από την τάση που επάγεται στο εγκάρσιο τύλιγμα και έτσι η τάση στην έξοδο μπορεί να αυξάνεται ή να μειώνεται.

$$\frac{V_S}{V_L} = a_R \quad (3.7)$$

Ο λόγος a_R του ρυθμιστή είναι συνάρτηση του λόγου του αριθμού των ελιγμάτων του τυλίγματος σειράς (N_2) προς τον αριθμό των ελιγμάτων του εγκάρσιου τυλίγματος (N_1) και μπορεί να δοθεί και σε συνάρτηση με τη θέση της λήψης [3.3]. Οι περισσότεροι ρυθμιστές έχουν εύρος ρύθμισης $\pm 10\%$ και 32 ή 16 λήψεις κατά την αμερικανική τυποποίηση, που σημαίνει αλλαγή τάσης κατά 5/8% ή 1,25% σε κάθε λήψη (tap). Αν υποθεθεί βήμα 5/8% ή 0.00625 α.μ. τότε ο λόγος του ρυθμιστή δίνεται από τη σχέση:

$$a_R = 1 \pm 0.00625 \cdot Tap \quad (3.8)$$

όπου το “+” υποδηλώνει τη θέση μείωσης (L) και το “-” τη θέση ανύψωσης (R) της τάσης. Αν περιοριστεί η περιοχή ρύθμισης, τότε αυξάνεται η ικανότητα φόρτισης του ρυθμιστή, λόγω μικρότερων απωλειών.



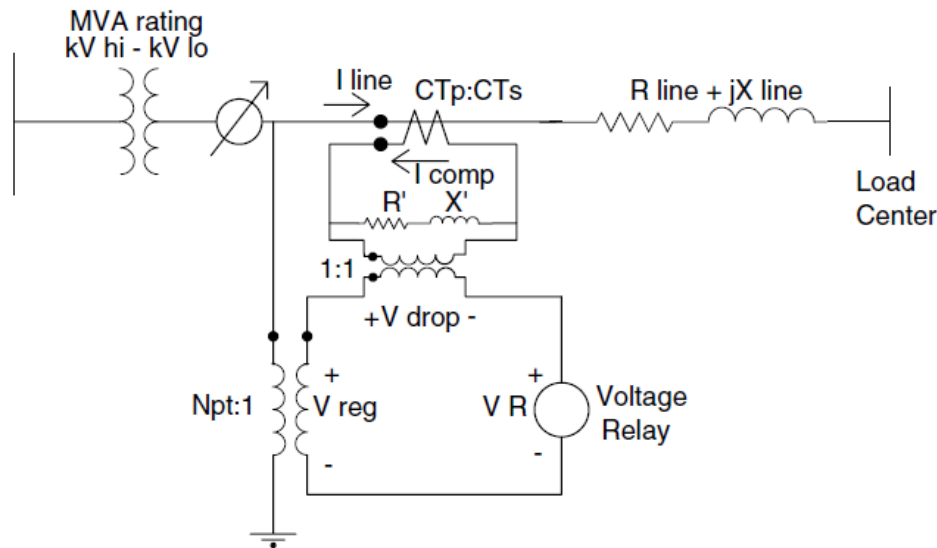
Σχήμα 3.2: Μονοφασικός ρυθμιστής τάσης [3.3].

3.3.2 Κύκλωμα αντιστάθμισης

Η θέση της λήψης καθορίζεται από από ένα κύκλωμα ελέγχου, το κύκλωμα αντιστάθμισης πτώσης τάσης (line drop compensator), που συνδέεται στη γραμμή διανομής μέσω ενός μετασχηματιστή τάσης και ενός μετασχηματιστή έντασης (Σχήμα 3.3). Ο σκοπός του είναι να μοντελοποιήσει την πτώση τάσης στη γραμμή διανομής μεταξύ του ρυθμιστή και του κέντρου φορτίου. Πρόκειται για ένα αναλογικό κύκλωμα που μοντελοποιεί σε μικρότερη κλίμακα το κύκλωμα της γραμμής. Στη διάταξη εισάγονται οι ακόλουθες ρυθμίσεις [3.3]:

1. *Επίπεδο τάσης*: Η επιθυμητή τάση που θα πρέπει να διατηρηθεί στην έξοδο του ρυθμιστή ή στον απομακρυσμένο κόμβο της γραμμής, ανάλογα με το ποιο θεωρείται ως κέντρο φορτίου.
2. *Εύρος ρύθμισης*: Η επιτρεπόμενη απόκλιση (\pm) της τάσης στο κέντρο φορτίου από το επίπεδο τάσης που έχει επιλεγεί. Συνήθως είναι $\pm 2\%$ από το επίπεδο της τάσης.
3. *Χρονοκαθυστέρηση*: Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της εντολής από το κύκλωμα για ανύψωση ή πτώση τάσης και της εκτέλεσης της εντολής. Αυτή η καθυστέρηση εμποδίζει την αλλαγή λήψης στην περίπτωση ενός μεταβατικού ρεύματος. Συνήθως ρυθμίζεται στα 30 δευτερόλεπτα και μπορεί να διευρυνθεί έως και τα 60 δευτερόλεπτα.
4. *Αντιστάθμιση πτώσης τάσης*: Αυτή η ρύθμιση υπάρχει για να αντισταθμίσει την πτώση τάσης στη γραμμή. Στην ουσία ελέγχει την τιμή των R' , X' του κυκλώματος, που είναι βαθμονομημένα σε volts, ώστε να αντιστοιχούν στην ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταξύ του ρυθμιστή και του κέντρου φορτίου. Αν το κέντρο φορτίου είναι η έξοδος του ρυθμιστή, τότε λαμβάνουν την τιμή 0.

Ο προσδιορισμός της τάσης και η προσαρμογή των λήψεων γίνεται με τη βοήθεια του ηλεκτρονόμου ελέγχου τάσης (voltage relay). Αν η τιμή αποκλίνει από το προκαθορισμένο επίπεδο τάσης περισσότερο από το επιτρεπόμενο εύρο ρύθμισης και για μεγαλύτερο χρόνο από αυτόν που ορίζεται, τότε ο κινητήρας του μηχανισμού αλλαγής λήψης, αλλάζει τον επιλογέα των λήψεων προς τέτοια κατεύθυνση, ώστε η τάση να επανέλθει εντός του εύρους. Η αλλαγή της θέσης μπορεί να διαρκέσει από 2 έως 8 δευτερόλεπτα. Έτσι, η αλλαγή από την ουδέτερη θέση στη θέση πλήρους ανύψωσης ή πτώσης που παρέχει ο ρυθμιστής διαρκεί περίπου 2 λεπτά [3.4].



Σχήμα 3.3: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος αντιστάθμισης ενός ρυθμιστή τάσης [3.3].

Η πιο σημαντική ρύθμιση που εισάγεται, η αντιστάθμιση πτώσης τάσης υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$R' + jX' = (Rline_{\Omega} + jXline_{\Omega}) \cdot \frac{CT_P}{N_{PT}} \quad (3.9)$$

όπου:

$R' + jX'$: η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος ελέγχου σε Volts.

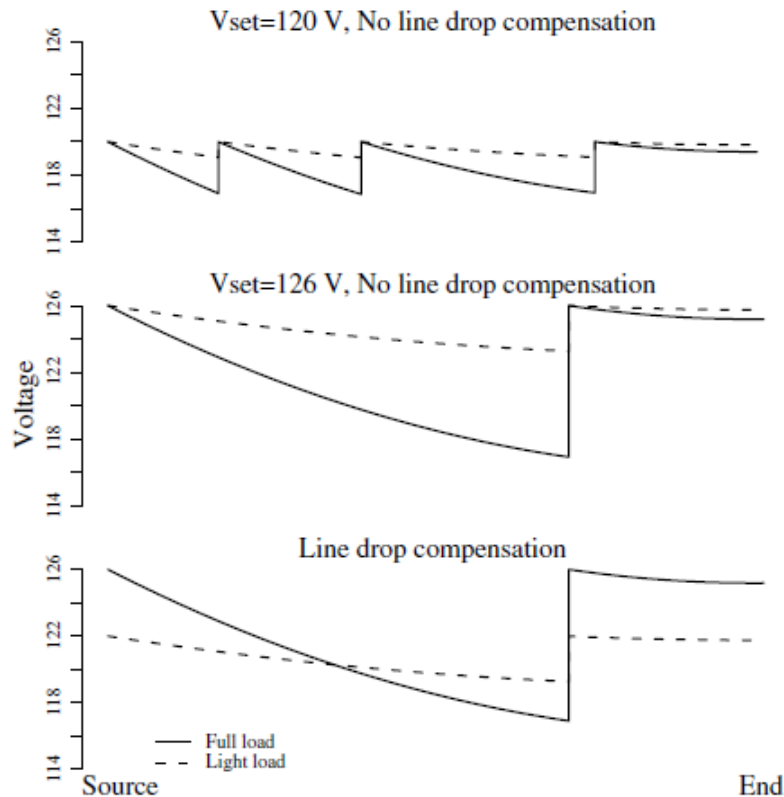
$Rline_{\Omega} + jXline_{\Omega}$: η σύνθετη αντίσταση της γραμμής σε Ω .

CT_P : το ονομαστικό ρεύμα της γραμμής.

N_{PT} : ο λόγος του μετασχηματιστή τάσης.

Πολλοί ρυθμιστές λειτουργούν χωρίς αντιστάθμιση της πτώσης τάσης, γιατί αυτό είναι ευκολότερο και λιγότερο επιρρεπές σε λάθη αλλά έτσι χάνονται οι δυνατότητες που παρέχει το κύκλωμα ελέγχου. Αν για παράδειγμα ο ρυθμιστής έχει επίπεδο τάσης ίσο με την ονομαστική τάση του συστήματος και η γραμμή διανομής είναι αρκετά μεγάλη τότε ίσως χρειαστεί να τοποθετηθεί και δεύτερος ρυθμιστής ή και περισσότεροι, γιατί η τάση στα φορτία στο τέλος της γραμμής ενδέχεται να πέσει κάτω από τα επιτρεπτά όρια. Αν επιλεγεί ένα υψηλότερο επίπεδο τάσης, τότε ίσως δεν χρειαστούν πρόσθετοι ρυθμιστές αλλά σε κάποια σημεία θα υπάρχουν υψηλές τάσεις τις ώρες χαμηλού φορτίου και ίσως υπάρξει και υπερανύψωση αν το σύστημα διαθέτει πυκνωτές. Με την αντιστάθμιση πτώσης τάσης μπορεί να επιτευχθεί ανύψωση στις ώρες υψηλού φορτίου, χωρίς αυτή

να παραμένει και στις ώρες χαμηλού φορτίου που δε χρειάζεται (Σχήμα 3.4). Επίσης, προκαλούνται λιγότερες διακυμάνσεις στη διάρκεια της ημέρας για τους καταναλωτές.



Σχήμα 3.4: Το προφίλ της τάσης σε μία γραμμή διανομής με διαφορετικούς τρόπους ρύθμισης [3.5].

Τρεις μονοφασικοί ρυθμιστές τάσης μπορούν να συνδεθούν εξωτερικά (σε γειωμένο αστέρα ή τρίγωνο) και να σχηματίσουν έναν τριφασικό ρυθμιστή. Ο κάθε ρυθμιστής έχει το δικό του κύκλωμα ελέγχου και έτσι οι αλλαγές στις λήψεις γίνονται στον κάθε ένα ξεχωριστά. Υπάρχουν ωστόσο, επιπλέον, και τριφασικοί ρυθμιστές που λειτουργούν με ένα κύκλωμα ελέγχου και στους οποίους γίνονται ταυτόχρονα οι ίδιες αλλαγές στα τρία τυλίγματα [3.3]. Το είδος του ρυθμιστή εξαρτάται από το μέγεθος της ισχύος αλλά συχνά τοποθετούνται σε πρώτο στάδιο μονοφασικοί ρυθμιστές (δύο ρυθμιστές σε συνδεσμολογία ανοιχτού τριγώνου) και στη συνέχεια εγκαθίσταται και τρίτος, όταν αυξηθούν τα φορτία και συνεπώς και οι πτώσεις τάσης.

3.4 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Η διεσπαρμένη ή διανεμημένη παραγωγή αναφέρεται σε παραγωγή ισχύος μικρής κλίμακας, συνήθως έως 5 MW, η οποία εφαρμόζεται στο επίπεδο της διανομής, πρόκειται δηλαδή για μονάδες παραγωγής που έχουν εγκατασταθεί κοντά στο φορτίο, με στόχο τη μείωση της φόρτισης του δικτύου. Μερικά από τα πλεονεκτήματα των ΜΔΠ είναι τα ακόλουθα:

- Μειώνονται οι απώλειες ενέργειας και η πτώση τάσης

- Βελτιώνεται η αξιοπιστία του συστήματος
- Μειώνονται τα λειτουργικά έξοδα
- Αντιμετωπίζονται προβλήματα υπερφόρτισης και αναβάλλονται οι αναβαθμίσεις των εγκαταστάσεων του δικτύου
- Διαθέτουν δυνατότητες συμπαράγωγής

Παρά τα οφέλη όμως, υπάρχουν σοβαρά ζητήματα που αφορούν τη σύνδεσή τους, καθότι τα δίκτυα διανομής δεν έχουν σχεδιαστεί με τέτοια κριτήρια, ώστε να μπορούν να ενσωματώνουν και παραγωγή και οι ΜΔΠ μπορεί να παραβιάσουν τη βασική αρχή λειτουργίας του παραδοσιακού δικτύου διανομής : τη μεταφορά ισχύος από τον υποσταθμό στα φορτία, δηλαδή προς μία κατεύθυνση [3.5]. Επιπλέον, λόγω των πολλαπλών πηγών ενέργειας, σε περίπτωση σφάλματος δημιουργούνται μεγάλα ρεύματα, επομένως χρειάζεται μεγαλύτερη αυτοματοποίηση και εξειδικευμένα συστήματα ανίχνευσης και απομόνωσης σφάλματος.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται σταδιακά η μετάβαση από τα παθητικά στα λεγόμενα ενεργά δίκτυα διανομής (ADN – Active Distribution Networks). Ως ενεργά δίκτυα διανομής [3.6] ορίζονται τα δίκτυα εκείνα που έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν έναν συνδυασμό από διανεμημένες πηγές ενέργειας (DER – Distributed Energy Resources), οι οποίες είναι οι ΜΔΠ, τα ελεγχόμενα φορτία και οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Οι νέες, πιο αποδοτικές, από άποψη κόστους, τεχνολογίες κάνουν αρκετά ελκυστική την επιλογή των ΜΔΠ για αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, έναντι της αναβάθμισης των γραμμών ή των μετασχηματιστών. Μέσα στην επόμενη δεκαετία αναμένεται να συνδεθούν στα δίκτυα διανομής ΜΔΠ ικανές για παραγωγή σημαντικού μεγέθους ανανεώσιμης ενέργειας, μικρής και μεσαίας κλίμακας και ως αποτέλεσμα η ροή ισχύος θα είναι διπλής κατεύθυνσης. Αυτό το γεγονός είναι καθοριστικός παράγοντας για την ανάπτυξη του δικτύου διανομής και συχνά ένα από τα κριτήρια του σχεδιασμού είναι η βέλτιστη τοποθεσία των ΜΔΠ στο δίκτυο.

Οι ΜΔΠ χρησιμοποιούν διάφορες τεχνολογίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας:

- Εμβολοφόρες μηχανές (diesel ή πετρελαίου)
- Στρόβιλοι εσωτερικής καύσης
- Μικροστρόβιλοι
- Ανεμογεννήτριες
- Κυψέλες καυσίμου
- Φωτοβολταϊκά
- Υδροηλεκτρικά

Η μετατροπή ισχύος και η σύνδεση με το δίκτυο γίνεται με σύγχρονες γεννήτριες, ασύγχρονες γεννήτριες ή με αντιστροφείς (inverters), οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιούνται και σε συνδυασμό με γεννήτρια για τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος. Οι τρεις κύριοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στην επιλογή της πηγής ενέργειας είναι η σταθερότητα στην παροχή ισχύος, η αξιοπιστία (διαθεσιμότητα) της πηγής και η ικανότητα να ακολουθεί τις αλλαγές του φορτίου.

Ο πιο απλός τρόπος, για να αναπαρασταθεί η ΜΔΠ είναι το μοντέλο του αρνητικού φορτίου, το οποίο αναπαρίσταται από σταθερή ισχύ. Υπάρχουν και πιο σύνθετα μοντέλα που διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος της γεννήτριας και τους μηχανισμούς ελέγχου που διαθέτει η μονάδα, αλλά συνήθως το μοντέλο της σταθερής ισχύος είναι ακριβές και αρκετά επαρκές για τις περιπτώσεις μικρής διεύθυνσης διεσπαρμένης παραγωγής.

3.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Τόμος Ι, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1994.
- [3.2] J. A. Taylor, "Conic optimization of electric power systems," Ph.D. thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Ιούλιος, 2011.
- [3.3] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, CRC Press, 2002.
- [2.4] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [3.5] T. A. Short, *Electric Power Distribution Handbook*, CRC Press, 2004.
- [3.6] CIGRE (International Council on Large Electric Systems), "Planning and optimization methods for active distribution systems," C6.19 Working Group, Δεκέμβριος, 2013.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΚΤΙΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η διατύπωση του προβλήματος του μακροπρόθεσμου σχεδιασμού ακτινικού δικτύου διανομής και περιγράφεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε για αυτό το σκοπό στο υπολογιστικό περιβάλλον του GAMS (General Algebraic Modeling System). Αρχικά, γίνεται μία παρουσίαση του GAMS, των δυνατοτήτων και των δομικών συστατικών του. Στη συνέχεια ορίζεται το πρόβλημα και παρατίθενται τα δεδομένα, τα ζητούμενα και οι παραδοχές του. Τέλος, παρουσιάζονται οι μέθοδοι επίλυσης που αναπτύχθηκαν.

4.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS

Η αυξημένη πολυπλοκότητα των προβλημάτων βελτιστοποίησης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που προέκυψε από την απαίτηση για πιο ρεαλιστικά μοντέλα, για μεγαλύτερο μέγεθος λόγω της ενσωμάτωσης μεγαλύτερων γεωγραφικών περιοχών και εξαιτίας των περιβαλλοντικών ζητημάτων και των ρυθμιστικών κανόνων, οδήγησε στην ανάγκη για καλύτερη διαχείριση των βάσεων δεδομένων και για εφαρμογή νέων τεχνικών μαθηματικού προγραμματισμού. Για αυτό το λόγο αναπτύχθηκε ένα πλήθος από γλώσσες μοντελοποίησης προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το GAMS είναι ένα υπολογιστικό περιβάλλον που ορίζει, αναλύει και επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης. Είναι μία πολύ δημοφιλής και ευέλικτη γλώσσα υψηλού επιπέδου για τη δημιουργία μαθηματικών μοντέλων με συνοπτικές αλγεβρικές παραστάσεις. Αναπτύχθηκε στα πλαίσια μίας έρευνας για μοντελοποίηση οικονομικών προβλημάτων που χρηματοδοτήθηκε από την Παγκόσμια Τράπεζα το 1988 [4.1]. Οι πιο σημαντικές δυνατότητες που παρέχει το GAMS είναι [4.2]:

- 1) Το πρόβλημα βελτιστοποίησης εκφράζεται ανεξάρτητα από το μέγεθος των δεδομένων. Με τη χρήση δεικτών δίνεται η δυνατότητα να γραφούν με ενιαίο και συμπαγή τρόπο παρόμοιες μεταβλητές, δηλαδή μεταβλητές που είναι του ίδιου είδους και έτσι είτε πρόκειται για μικρά προβλήματα (δεκάδες μεταβλητές και σταθερές) είτε για μεγάλα προβλήματα (χιλιάδες μεταβλητές και σταθερές) χρησιμοποιείται ο ίδιος κώδικας και δεν απαιτείται πολυπλοκότερη αναπαράσταση.
- 2) Ο διαχωρισμός της μοντελοποίησης από την επίλυση του προβλήματος. Ο χρήστης εστιάζει στη σωστή διατύπωση του προβλήματος, σύμφωνα με τους κανόνες του GAMS, ενώ απαλλάσσεται από τις δυσκολίες που αφορούν τις τεχνικές επίλυσης. Αυτές καθορίζονται από τον επιλυτή (solver), που έχει ορίσει ο χρήστης.
- 3) Ο κώδικας του GAMS χρησιμοποιεί τον μαθηματικό φορμαλισμό των προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού και για αυτό το λόγο γίνεται εύκολα κατανοητός σε χρήστες με στοιχειώδεις γνώσεις.

4.2.1 Δομή και σύσταση εντολών

Η δομή ενός μοντέλου σε GAMS αποτελείται από τα ακόλουθα συστατικά μέρη [4.1]: σύνολα, δεδομένα, μεταβλητές, εξισώσεις, μοντέλο και έξοδος. Αυτά παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.1 και αναλύονται παρακάτω με τη χρήση παραδειγμάτων.

Πίνακας 4.1: Δομή μοντέλου σε GAMS.

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Σύνολα (Sets) | Δήλωση και ανάθεση των μελών. |
| Δεδομένα (Data) με την μορφή σταθερών, παραμέτρων και πινάκων | Δήλωση και ανάθεση των τιμών τους. |
| Μεταβλητές (Variables) | Δήλωση, αρχικοποίηση και ορισμός του είδους και των ορίων. |
| Εξισώσεις (Equations) | Δήλωση και ορισμός. |
| Εντολές δημιουργίας μοντέλου και επίλυσης (Model and solve statements) | Δήλωση του μοντέλου, ανάθεση κατάλληλου solver. |
| Έξοδος (Output) | Εντολές απεικόνισης (display). |

- **Sets:** Αποτελούν τη βασική δομή του GAMS. Αντιστοιχούν στους δείκτες των αλγεβρικών εξισώσεων. Με τη δεσμευμένη λέξη **set** δηλώνεται το όνομά τους και το σύνολο των τιμών που μπορούν να πάρουν, το οποίο μπορεί να είναι και διατεταγμένο. Μετά το όνομα μπορεί να υπάρχουν και σχόλια που περιγράφουν το δείκτη και τα οποία αγνοούνται από το μεταγλωττιστή του GAMS, π.χ.:

```
Set N buses /1*4/;
```

Όπου N είναι το όνομα του δείκτη και η λέξη “buses” είναι η περιγραφή του και αγνοείται. Με τη χρήση του αστερίσκου (*) δηλώνονται οι ζυγοί 1 έως 4. Κάθε εντολή στο GAMS τερματίζει υποχρεωτικά με το semicolon (;).

- **Scalars:** Η εντολή **Scalar** χρησιμοποιείται για τη δήλωση σταθερών και την ανάθεση των τιμών τους κατά επιλογή, ενώ μπορούν να περιλαμβάνονται και σχόλια, όπως και προηγουμένως π.χ.:

```
Scalar Lf loss factor /0.02/;
```

- **Tables:** Η εντολή χρησιμοποιείται για τη δήλωση δεδομένων σε μορφή πινάκων. Η δεσμευμένη λέξη **Table** δηλώνει το διάνυσμα των δεδομένων και επιτρέπει την ανάθεση των τιμών του και την εισαγωγή ενδιάμεσων σχολίων. Για παράδειγμα:

```
Table Le(N,N) length of line in km
```

```
      1  2  3  4
1     0  1  0  0
```

| | | | | |
|---|---|-----|-----|----|
| 2 | 1 | 0 | 1,5 | 0 |
| 3 | 0 | 1,5 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 0; |

- **Parameters:** Η εντολή αυτή είναι ισοδύναμη με την εντολή **Table** με τη διαφορά ότι για τους μονοδιάστατους πίνακες επιτρέπεται μόνο η εντολή **Parameter**.
- **Variables:** Η δεσμευμένη λέξη **Variable(s)** χρησιμοποιείται για να δηλώσει τις μεταβλητές βελτιστοποίησης. Μαζί με τη μεταβλητή δηλώνονται και οι διαστάσεις της, αν χρειάζεται, που ορίζονται από τους δείκτες. Μετά το όνομα της μεταβλητής μπορούν να ακολουθούν επεξηγηματικά σχόλια:

Variable Pflow(N,N) power flow;

Κατά τη δημιουργία του προγράμματος GAMS πρέπει πάντα να ορίζεται και μία μεταβλητή που να αναπαριστά την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Μπορεί επίσης να δηλώνεται και το είδος της μεταβλητής: ελεύθερη, θετική, αρνητική, ακέραη, δυαδική με τις αντίστοιχες δεσμευμένες λέξεις **free**, **positive**, **negative**, **integer**, **binary**. Επιπλέον, με τη χρήση των καταλήξεων “.lo” και “.up” καθορίζεται το κάτω και πάνω όριο αντίστοιχα της μεταβλητής:

Positive variable V(N) voltage of each bus;

V.lo = 0.95; V.up = 1.05;

- **Equations:** Με τη δεσμευμένη λέξη **Equation(s)** δηλώνονται οι εξισώσεις, δηλαδή η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί του προβλήματος. Η εντολή έχει δομή παρόμοια με τις προηγούμενες. Αφού δηλωθούν, με τη χρήση του συμβόλου “..” μπορεί να ταυτιστεί το όνομα της εξίσωσης με το μαθηματικό της τύπο. Στο τέλος κάθε εξίσωσης τοποθετείται επίσης semicolon. Όταν μία εξίσωση ορίζεται ως συνάρτηση ενός (ή και περισσότερων δεικτών), τότε αυτή η «εξίσωση» ισοδυναμεί με πλήθος εξισώσεων ίσο με τον αριθμό των στοιχείων που ανήκουν στο αντίστοιχο σύνολο. Παρατηρείται λοιπόν εύκολα η συμπαγής δομή που προσφέρει στο μοντέλο αυτός ο συμβολισμός. Για παράδειγμα:

Equation NPB(N) nodal power balance;

NPB(N) .. SUM(NP, (1 - f) · Pflow(NP, N) - Pflow(N, NP)) = e = Pd(N);

Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι ο δείκτης NP ταυτίζεται με το δείκτη N, μέσω της εντολής:

Alias (N,NP);

η οποία πρέπει να προηγείται της δήλωσης των εξισώσεων. Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται, όταν στις εξισώσεις υπάρχει αλληλεπίδραση στοιχείων από το ίδιο σύνολο. Στις εξισώσεις χρησιμοποιείται το σύμβολο “=e=”, που σημαίνει «ίσο με», το σύμβολο “=I=”, που σημαίνει «μικρότερο από ή ίσο με» και το “=g=”, που σημαίνει «μεγαλύτερο από ή ίσο με». Το

“SUM” συμβολίζει το άθροισμα, το οποίο εδώ γίνεται για όλα τα στοιχεία του συνόλου N. Παρατηρείται ότι με έναν μαθηματικό τύπο, δηλώνονται τόσες εξισώσεις, όσες και τα στοιχεία του συνόλου N (στην προκειμένη περίπτωση 4).

- **Model:** Με την εντολή **Model** καθορίζονται οι εξισώσεις που θα συμπεριληφθούν στο μοντέλο:

Model dsplan /all/;

Με αυτήν την εντολή περιλαμβάνονται όλες οι εξισώσεις που έχουν γραφτεί προηγουμένως. Εναλλακτικά μπορούν να γραφτούν οι εξισώσεις που θα περιληφθούν με το όνομά τους.

- **Solve:** Είναι η εντολή επίλυσης του μοντέλου από το GAMS:

Solve dsplan using lp minimizing z;

Έτσι, ζητείται η επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποιώντας την τιμή της μεταβλητής z (που αντιπροσωπεύει την αντικειμενική συνάρτηση). Η δεσμευμένη λέξη lp χρησιμοποιείται για το γραμμικό προγραμματισμό.

- **Display:** Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται, προκειμένου να αποκτηθούν χρήσιμες πληροφορίες ή αποτελέσματα σε ευανάγνωστη μορφή στο αρχείο εξόδου του GAMS. Για παράδειγμα, η εντολή:

Display Pd.l;

Εμφανίζει στο αρχείο τις βέλτιστες τιμές όλων των στοιχείων του διανύσματος Pd(N). Η κατάληξη “.l” χρησιμοποιείται μετά το όνομα της μεταβλητής, για να δηλώσει τη βέλτιστη τιμή, η οποία αποκτάται μετά την επίλυση του προβλήματος.

Γενικά κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να διατυπωθεί χρησιμοποιώντας τα παραπάνω στοιχεία. Σε κάθε σημείο του προγράμματος μπορούν να εισαχθούν σχόλια σε γραμμή που ξεκινάει με αστερίσκο (*) ή μεταξύ των δεσμευμένων λέξεων \$ontext και \$offtext. Με τη χρήση του συμβόλου “\$” μπορεί να εισαχθεί σε μία εξίσωση, ή στην ανάθεση τιμών μιας παραμέτρου κάποια συνθήκη. Υπάρχουν, επίσης, εντολές ελέγχου της ροής του προγράμματος (**if-else**) και εντολές για τη δημιουργία επαναληπτικών βρόχων (**loop, while**).

Μόλις δημιουργηθεί το αρχείο εισόδου με κατάληξη “.gms” τότε ο χρήστης μπορεί να «τρέξει» το πρόγραμμα πατώντας το κουμπί “Run Gams” ή F9 και αν δεν υπάρχουν λάθη στο πρόγραμμα, τότε δημιουργείται το αρχείο εξόδου με κατάληξη “.lst”. Σε αυτό το αρχείο δίνεται η λύση, δηλαδή οι τιμές των μεταβλητών απόφασης και της αντικειμενικής συνάρτησης, εφόσον αυτή υπάρχει, αλλιώς υπάρχει ένδειξη από το GAMS που εξηγεί γιατί δε βρέθηκε λύση. Η αιτία μπορεί να είναι το ίδιο το μοντέλο (αν είναι ανέφικτο ή δεν είναι καλά περιορισμένο) ή ο επιλυτής (για παράδειγμα αν δεν διαθέτει τους κατάλληλους πόρους για την επίλυση). Στο αρχείο εξόδου δίνονται στατιστικά στοιχεία για το μέγεθος του μοντέλου (Σχήμα 4.1) και στοιχεία για την κατάσταση του μοντέλου και του επιλυτή (Σχήμα 4.2)

MODEL STATISTICS

| | | | |
|---------------------|----|--------------------|----|
| BLOCKS OF EQUATIONS | 4 | SINGLE EQUATIONS | 31 |
| BLOCKS OF VARIABLES | 4 | SINGLE VARIABLES | 37 |
| NON ZERO ELEMENTS | 81 | DISCRETE VARIABLES | 16 |

Σχήμα 4.1: Τα στατιστικά στοιχεία του μοντέλου στο αρχείο εξόδου.

```

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

MODEL    upgrades      OBJECTIVE    z
TYPE     MIP           DIRECTION   MINIMIZE
SOLVER   CPLEX        FROM LINE   58

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS       1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    7000.0000

RESOURCE USAGE, LIMIT    0.078    1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT   1      2000000000

```

Σχήμα 4.2: Η αναφορά της κατάστασης του μοντέλου και του επιλυτή στο αρχείο εξόδου.

Εφόσον η κατάσταση του μοντέλου και του επιλυτή είναι αποδεκτή, τότε στο αρχείο εξόδου παρουσιάζονται οι τιμές των μεταβλητών του προβλήματος (Σχήμα 4.3). Συγκεκριμένα, εμφανίζεται η βέλτιστη τιμή (level) κάθε μεταβλητής, το κάτω όριο (lower), το πάνω όριο (upper) και η οριακή τιμή της (marginal), που δείχνει κατά πόσο η χαλάρωση ενός περιορισμού μπορεί να μεταβάλει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι τελείες (.) δηλώνουν την τιμή μηδέν ενώ με EPS συμβολίζεται μία πολύ μικρή, μη μηδενική τιμή.

Το λογισμικό διαθέτει εργαλεία για την έξοδο των αποτελεσμάτων στην επιθυμητή μορφή και επιπλέον είναι δυνατή η σύνδεση με προγράμματα λογιστικών φύλλων για την εισαγωγή δεδομένων και για την εξαγωγή αποτελεσμάτων για παρουσίαση και γραφική ανάλυση [4.2], [4.3].

Το GAMS παρέχει διάφορους εμπορικούς και ελεύθερους επιλυτές (solvers) που χρησιμοποιούνται για τις ακόλουθες τάξεις προβλημάτων βελτιστοποίησης:

- Γραμμικός προγραμματισμός (LP).
- Μη γραμμικός προγραμματισμός (NLP).
- Μεικτός-ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (MILP).
- Μεικτός-ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός (MINLP).

Η επιλογή του κατάλληλου επιλυτή απαιτεί κατανόηση της ειδικής δομής του κάθε προβλήματος, καθώς η απόδοσή τους συνδέεται στενά με αυτήν. Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιήθηκε ο εμπορικός επιλυτής Cplex, που περιγράφεται παρακάτω.

```

---- VAR Pflow power flow

          LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL

1.1      .           .           +INF      EPS
1.2      .           2.682      +INF      .
1.3      .           .           +INF      EPS
1.4      .           .           +INF      EPS
2.1      .           .           +INF      EPS
2.2      .           .           +INF      EPS
2.3      .           1.769      +INF      .
2.4      .           .           +INF      EPS
3.1      .           .           +INF      EPS
3.2      .           .           +INF      EPS
3.3      .           .           +INF      EPS
3.4      .           0.658      +INF      .
4.1      .           .           +INF      EPS
4.2      .           .           +INF      EPS
4.3      .           .           +INF      EPS
4.4      .           .           +INF      EPS

```

Σχήμα 4.3: Οι τιμές της μεταβλητής Pflow στο αρχείο εξόδου.

4.2.2 Cplex

Ο Cplex είναι ένας επιλυτής, που χρησιμοποιείται από το GAMS, εφόσον υπάρχει η κατάλληλη άδεια και είναι σχεδιασμένος για να επιλύει μεγάλα και δύσκολα προβλήματα γρήγορα και με ελάχιστη παρέμβαση από το χρήστη. Διαθέτει διαφορετικές επιλογές επίλυσης και χρησιμοποιείται κυρίως σε μοντέλα γραμμικά (LP), τετραγωνικά περιορισμένα (QCP – Quadratically Constrained Programming) ή μεικτά-ακέραια (MIP – Mixed Integer Programming).

Ο Cplex μπορεί οριστεί ως επιλυτής από προεπιλογή κατά την εγκατάσταση του GAMS ή μέσω της εντολής:

Option LP = Cplex ;

Στην παραπάνω εντολή δηλώνεται ότι θα χρησιμοποιηθεί ο Cplex για την επίλυση προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού και η εντολή πρέπει να προηγείται της εντολής επίλυσης. Ο Cplex λύνει τα περισσότερα γραμμικά προβλήματα με τον δυαδικό αλγόριθμο Simplex. Για τα μεικτά-ακέραια προβλήματα χρησιμοποιεί τη μέθοδο *branch and bound* και επιλύει μία σειρά από γραμμικά υποπροβλήματα. Ακόμα και ένα μικρό MIP πρόβλημα μπορεί να παράγει πολλά υποπροβλήματα, γεγονός που το κάνει απαιτητικό σε μνήμη και πολύπλοκο υπολογιστικά και άρα μπορεί να χρειάζεται αρκετό χρόνο για να επιλυθεί. Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει το ανώτατο χρονικό όριο που ο Cplex θα επιχειρεί προσέγγιση της βέλτιστης τιμής, μέσω της εντολής:

Option Reslim=x;

όπου το x είναι ο χρόνος σε δευτερόλεπτα.

Ο Cplex είναι σχεδιασμένος να επιλύει το κάθε πρόβλημα με προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για τη μέθοδο που θα ακολουθηθεί, ανάλογα και με το είδος του προβλήματος, επομένως ο χρήστης αρκεί μόνο να καθορίσει το είδος του προβλήματος, και η επίλυση γίνεται με τη χρήση του κατάλληλου αλγορίθμου. Διαθέτει όμως και πλήθος επιλογών, προκειμένου να μπορεί παρέμβει ο χρήστης στη διαδικασία βελτιστοποίησης, αν κριθεί αναγκαίο [4.4]. Ο Cplex χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή των μεθόδων επίλυσης του προβλήματος μακροπρόθεσμου σχεδιασμού που αναπτύχθηκαν, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

4.3 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτήν την εργασία επιλύεται το πρόβλημα μακροπρόθεσμου σχεδιασμού και ανάπτυξης του πρωτεύοντος δικτύου διανομής (δίκτυο MT), το οποίο περιλαμβάνει τις ακόλουθες επιλογές ανάπτυξης: ενίσχυση του μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ του υποσταθμού (Υ/Σ), ενίσχυση των γραμμών διανομής ΜΤ και τοποθέτηση ρυθμιστών τάσης (ΡΤ), ενώ επιπλέον, επειδή λαμβάνεται υπόψη και η επέκταση του δικτύου, καθορίζεται και ο τρόπος σύνδεσης των νέων φορτίων που προστίθενται. Το ζητούμενο του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση της καθαρής παρούσας αξίας του συνολικού κόστους επένδυσης. Τα δεδομένα που εισάγονται στο πρόβλημα είναι τα ακόλουθα:

- Το αρχικό δίκτυο, η διαμόρφωσή του και τα ονομαστικά του μεγέθη (ισχύς και τάση).
- Η αρχική διαστασιολόγηση των στοιχείων του (Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ, γραμμές διανομής) και η σύνθετη αντίσταση των γραμμών. Οι απώλειες του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ αγνοούνται.
- Τα φορτία που εξυπηρετεί το έτος αναφοράς και το σενάριο για τη μελλοντική διακύμανση της ζήτησης. Για κάθε έτος θεωρείται ένα επίπεδο φορτίου, δηλαδή τα φορτία είναι σταθερής ενεργού και αέργου ισχύος. Επίσης, υποτίθεται ότι τα φορτία είναι συμμετρικά.
- Το δίκτυο που προστίθεται, δηλαδή η ισχύς των καινούριων φορτίων, το έτος στο οποίο προστίθενται και οι εναλλακτικές διαδρομές, σύμφωνα με τις οποίες μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους και στο υπάρχον δίκτυο.

4.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση κόστους του προβλήματος υπολογίζει την καθαρή παρούσα αξία της συνολικής επένδυσης της ηλεκτρικής εταιρίας:

$$J = \min \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{(1+\alpha)^t} \left(\sum_{i \in \Omega_{SS}} C^{SS} \cdot S_{i,t}^{SS} + \sum_{i,j \in \Omega_n: \exists(i,j)} C^F \cdot Le_{(i,j)} \cdot S_{(i,j),t}^F + \sum_{i,j \in \Omega_n: \exists(i,j)} C^{VR} \cdot z_{(i,j),t}^V \right) \right) \quad (4.1)$$

όπου:

T : η χρονική περίοδος μελέτης (σύνολο ετών σχεδιασμού).

- α : το επιτόκιο αναγωγής.
 Ω_n : το σύνολο των ζυγών του δικτύου.
 Ω_{SS} : το υποσύνολο των ζυγών υποσταθμού.
 C^{SS} : το κόστος ενίσχυσης του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (\$/MVA).
 C^F : το κόστος ενίσχυσης της γραμμής διανομής (\$/MVA·km).
 C^{VR} : το κόστος εγκατάστασης ΡΤ.
 $S_{i,t}^{SS}$: το μέγεθος ενίσχυσης (MVA) του υποσταθμού i το έτος t .
 $S_{(i,j),t}^F$: το μέγεθος ενίσχυσης (MVA) της γραμμής διανομής (i,j) το έτος t .
 $Le_{(i,j)}$: το μήκος της γραμμής (i,j) σε km.
 $z_{(i,j),t}^V$: δυαδική μεταβλητή απόφασης για την εγκατάσταση ΡΤ στη γραμμή (i,j) το έτος t .

Στην αντικειμενική συνάρτηση κόστους χρησιμοποιείται το αποπληθωρισμένο επιτόκιο αναγωγής που δίνεται από τον τύπο:

$$a = \frac{Intr - Infr}{1 + Infr} \quad (4.2)$$

όπου:

- $Intr$: το ονομαστικό επιτόκιο αναγωγής (interest rate).
 $Infr$: ο ρυθμός πληθωρισμού (inflation rate).

Το μέγεθος ενίσχυσης S^F και S^{SS} των γραμμών και του Μ/Σ αντίστοιχα είναι ακέραιες μεταβλητές και θα αναλυθούν παρακάτω στις ενότητες 4.3.3 και 4.3.4. Στη συνέχεια ακολουθούν οι γραμμικές και τετραγωνικές εξισώσεις που προσομοιώνουν τη λειτουργία του ακτινικού δικτύου διανομής στη μόνιμη κατάσταση.

4.3.2 Ισοζύγιο ισχύος

Υπολογίζεται το ισοζύγιο ενεργού και το ισοζύγιο αέργου ισχύος στους κόμβους σύμφωνα με τις απλοποιημένες εξισώσεις *Distflow*. Το αλγεβρικό άθροισμα της ισχύος που εισέρχεται και της ισχύος που εξέρχεται από κάθε κόμβο πρέπει να ισούται με τη ζήτηση ισχύος στον κόμβο [4.5]:

$$\sum_{i,j \in \Omega_n; \exists(i,j)} (P_{(j,i),t} - P_{(i,j),t}) + P_{i,t}^{Im} = P_{i,t}^D \quad (4.3)$$

$$\sum_{i,j \in \Omega_n; \exists(i,j)} (Q_{(j,i),t} - Q_{(i,j),t}) + Q_{i,t}^{Im} = Q_{i,t}^D \quad (4.4)$$

$$\forall i \in \Omega_n, \forall t \in T$$

όπου:

| | |
|-----------------------|----------------------------------------------------------|
| $P_{(i,j),t}$ | : η ροή ενεργού ισχύος στη γραμμή (i,j) το έτος t . |
| $Q_{(i,j),t}$ | : η ροή αέργου ισχύος στη γραμμή (i,j) το έτος t . |
| $P_{i,t}^{\text{Im}}$ | : η εισαγόμενη ενεργός ισχύς στον ζυγό i το έτος t . |
| $Q_{i,t}^{\text{Im}}$ | : η εισαγόμενη αέργος ισχύς στον ζυγό i το έτος t . |
| $P_{i,t}^D$ | : ενεργό φορτίο στον ζυγό i το έτος t . |
| $Q_{i,t}^D$ | : αέργο φορτίο στον ζυγό i το έτος t . |

Η εισαγόμενη ενεργός και αέργος ισχύς προστίθενται μόνο για τον κόμβο του υποσταθμού και στις υπόλοιπες περιπτώσεις οι μεταβλητές είναι μηδενικές. Στις παραπάνω εξισώσεις πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι σε μία γραμμή διανομής θα ρέει ισχύς μόνο όταν ο κλάδος χρησιμοποιείται. Αυτό δηλώνεται μέσω μίας δυαδικής μεταβλητής χρησιμοποίησης, που παίρνει την τιμή 1, όταν ο κλάδος χρησιμοποιείται και την τιμή 0 όταν είναι εκτός του κυκλώματος που είναι σε λειτουργία. Αυτή η συνθήκη κανονικά εφαρμόζεται πολλαπλασιάζοντας τη μεταβλητή που δηλώνει τη ροή με την αντίστοιχη μεταβλητή χρησιμοποίησης [4.6]. Αυτό όμως δημιουργεί έναν μη γραμμικό περιορισμό, ο οποίος παρακάμπτεται με την εισαγωγή παραπάνω γραμμικών περιορισμών, που ισοδυναμούν με τη ζητούμενη συνθήκη:

$$P_{(i,j),t} \leq M \cdot y_{(i,j),t} \quad (4.5)$$

$$P_{(j,i),t} \leq M \cdot (1 - y_{(i,j),t}) \quad (4.6)$$

$$P_{(i,j),t} \geq 0 \quad (4.7)$$

$$\forall i, j \in \Omega_n : \exists(i, j), \forall t \in T$$

όπου:

M : ένας μεγάλος αριθμός.

$y_{(i,j),t}$: μεταβλητή χρησιμοποίησης της γραμμής διανομής (i,j) το έτος t .

Αντίστοιχες εξισώσεις ισχύουν και για την αέργο ισχύ. Με τις παραπάνω εξισώσεις εξασφαλίζεται επίσης ότι η ροή ισχύος σε μία δεδομένη γραμμή θα έχει μία κατεύθυνση μόνο και συγκεκριμένα αν $y_{(i,j),t} = 1$, τότε ρέει ισχύς από τον κόμβο i προς τον κόμβο j . Οι γραμμές διανομής που συνδέουν τους αρχικούς κόμβους του δικτύου χρησιμοποιούνται σε όλη την περίοδο μελέτης:

$$y_{(i,j),t} + y_{(j,i),t} = 1 \quad (4.8)$$

$$\forall i, j \in \Omega_{fn} : \exists(i, j), \forall t \in T$$

όπου:

Ω_{fn} : το υποσύνολο των αρχικών ζυγών του δικτύου.

4.3.3 Περιορισμοί ενίσχυσης γραμμών

Η ροή ισχύος σε μία γραμμή διανομής πρέπει να είναι εντός των θερμικών ορίων αντοχής. Για αυτό και εισάγονται οι εξισώσεις (4.9) έως (4.13), οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τις καινούριες επενδύσεις για αναβάθμιση των γραμμών [4.5], [4.8].

$$P_{(i,j),t}^2 + Q_{(i,j),t}^2 \leq (S_{(i,j),t}^{Ftot})^2 \quad (4.9)$$

$$S_{(i,j),t}^{Ftot} = S_{(i,j)}^{Fcap} + \sum_{t'=1}^t (S_{(i,j),t'}^F + S_{(j,i),t'}^F) \quad (4.10)$$

$$S_{(i,j),t}^F \leq M \cdot z_{(i,j),t}^F \quad (4.11)$$

$$\sum_{t=1}^T (z_{(i,j),t}^F + z_{(j,i),t}^F) \leq 1 \quad (4.12)$$

$$z_{(i,j),t}^F \leq y_{(i,j),t} \quad (4.13)$$

$$\forall i, j \in \Omega_n : \exists(i, j), \forall t \in T$$

όπου:

$S_{(i,j),t}^F$: το μέγεθος ενίσχυσης (MVA) της γραμμής διανομής (i,j) το έτος t .

$S_{(i,j)}^{Fcap}$: η μέγιστη χωρητικότητα (MVA) της γραμμής (i,j) το έτος αναφοράς.

$S_{(i,j),t}^{Ftot}$: η μέγιστη χωρητικότητα (MVA) της γραμμής (i,j) το έτος t .

$z_{(i,j),t}^F$: δυαδική μεταβλητή απόφασης για την αναβάθμιση της γραμμής (i,j) το έτος t .

Η μεταβλητή S^F είναι ακέραιη και αυξάνεται με βήμα 2 MVA, δηλαδή η ελάχιστη αναβάθμιση της χωρητικότητας της γραμμής θα είναι 2 MVA. Η δυαδική μεταβλητή z^F λαμβάνει την τιμή 1 όταν γίνεται αναβάθμιση μέσω του περιορισμού (4.11) και η εξίσωση (4.12) ορίζει ότι πρέπει να γίνεται συνολικά το πολύ μία αναβάθμιση σε κάθε γραμμή στην περίοδο μελέτης. Φυσικά, η αναβάθμιση μιας γραμμής στο έτος t έχει νόημα μόνο αν η γραμμή θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό το έτος και για αυτό εισάγεται και ο περιορισμός (4.13) που αποκλείει την αναβάθμιση της γραμμής, εάν αυτή δεν χρησιμοποιείται.

Τέλος, για την περίπτωση δικτύου με περισσότερες από μία κύριες γραμμές διανομής (feeders) χρησιμοποιείται ένας επιπλέον περιορισμός, για να γίνει ισομοιρασμός των φορτίων κατά την επέκταση του δικτύου:

$$(P_{k,t}^{Fdr} - P_{m,t}^{Fdr})^2 \leq limit, \quad \forall t \in T \quad (4.14)$$

όπου:

$$limit = (P_{tot,k}^D - P_{tot,m}^D)^2 \quad (4.15)$$

$$\forall k, m \in \Omega_l$$

όπου:

Ω_l : το σύνολο των κύριων γραμμών διανομής.

Με P_k^{Fdr} και P_m^{Fdr} συμβολίζεται η ροή ενεργού ισχύος από τον Υ/Σ προς την αντίστοιχη κύρια γραμμή διανομής, ενώ με $P_{tot,k}^D$ και $P_{tot,m}^D$ το άθροισμα της ενεργού ισχύος των φορτίων της αντίστοιχης κύριας γραμμής διανομής στο έτος 0.

4.3.4 Περιορισμοί ενίσχυσης Μ/Σ

Οι περιορισμοί (4.16) έως (4.19) εξασφαλίζουν ότι η συνολική ισχύς που παρέχεται από τον υποσταθμό στις γραμμές διανομής είναι εντός των θερμικών ορίων αντοχής του Μ/Σ του [4.5], [4.8]. Τα όρια αυτά λαμβάνουν υπόψη τις καινούριες επενδύσεις για την αναβάθμιση του Μ/Σ.

$$(P_{i,t}^{Im})^2 + (Q_{i,t}^{Im})^2 \leq (S_{i,t}^{SS,tot})^2 \quad (4.16)$$

$$S_{i,t}^{SS,tot} = S_i^{SScap} + \sum_{t'=1}^t S_{i,t'}^{SS} \quad (4.17)$$

$$S_{i,t}^{SS} \leq M \cdot z_{i,t}^{SS} \quad (4.18)$$

$$\sum_{t=1}^T S_{i,t}^{SS} \leq 1 \quad (4.19)$$

$$\forall i \in \Omega_{SS}, \forall t \in T$$

όπου:

$S_{i,t}^{SS}$: το μέγεθος ενίσχυσης (MVA) του υποσταθμού i το έτος t .

S^{SScap} : η μέγιστη χωρητικότητα (MVA) του Μ/Σ το έτος αναφοράς.

$S_i^{SS,tot}$: η μέγιστη χωρητικότητα (MVA) του Μ/Σ το έτος t .

z_t^{SS} : δυαδική μεταβλητή απόφασης για την αναβάθμιση του Μ/Σ το έτος t .

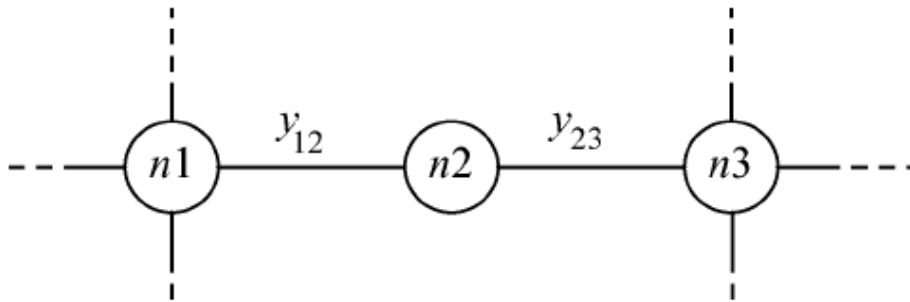
Η μεταβλητή S^{SS} είναι ακέραιη και αυξάνεται με βήμα 2 MVA, δηλαδή η ελάχιστη αναβάθμιση της χωρητικότητας του Μ/Σ θα είναι 2 MVA. Η δυαδική μεταβλητή z^{SS} λαμβάνει την τιμή 1 όταν γίνεται αναβάθμιση του Μ/Σ μέσω του περιορισμού (4.18) και η εξίσωση (4.19) ορίζει ότι πρέπει να γίνεται συνολικά το πολύ μία αναβάθμιση στον Μ/Σ στην περίοδο μελέτης.

4.3.5 Περιορισμοί για την ακτινική λειτουργία του δικτύου

Προκειμένου να αποφευχθούν τα κλειστά μονοπάτια, δηλαδή οι βρόχοι, χρησιμοποιείται ο περιορισμός:

$$\sum_{i,j \in \Omega_n: \exists(i,j)} y_{(i,j),t} \leq N_t - 1, \quad \forall t \in T \quad (4.20)$$

όπου με N_t συμβολίζεται το σύνολο των ενεργών κόμβων του δικτύου το έτος t . Η εξίσωση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι ένα δέντρο N κόμβων έχει το πολύ $N-1$ κλάδους. Καθώς η δομή του ακτινικού δικτύου είναι ισοδύναμη με δέντρο, κάθε επιπλέον κλάδος οδηγεί στη δημιουργία κλειστού μονοπατιού. Για να διασφαλιστεί ότι το δίκτυο που δημιουργεί η λύση του προβλήματος είναι πάντα ακτινικό, χρειάζονται και κάποιοι επιπρόσθετοι περιορισμοί που να περιέχουν πιο συγκεκριμένες πληροφορίες για την τοπολογία του υπό εξέταση δικτύου. Παρακάτω ακολουθούν περιορισμοί που αφορούν τη δημιουργία νέου μονοπατιού στο δίκτυο και τη διατήρηση της συνεκτικότητας του γράφου οι οποίοι, μαζί με τον περιορισμό (4.20) είναι επαρκείς για την απόκτηση ακτινικών λύσεων, όπως έδειξαν οι μέχρι τώρα δοκιμές [4.6].



Σχήμα 4.4: Ορισμός νέου μονοπατιού για κόμβο με δύο γειτονικούς κλάδους [4.6].

4.3.5.1 Δημιουργία νέου μονοπατιού

Ένα νέο μονοπάτι αποτελείται από δύο ή περισσότερους κλάδους σε σειρά, που ενώνουν δύο ή περισσότερους κόμβους του δικτύου. Το καινούριο μονοπάτι πρέπει να δημιουργείται μόνο, όταν κάποιοι κλάδοι χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα σε κατάλληλο συνδυασμό, καθώς η έλλειψη ενός μόνο στοιχείου είναι ικανή διακόψει το εν σειρά κύκλωμα. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 4.4 φαίνεται ένας κόμβος με δύο γειτονικούς κλάδους. Αν αυτός ο κόμβος δεν έχει φορτίο ούτε παραγωγή ισχύος, τότε δεν υπάρχει λόγος οι κλάδοι να χρησιμοποιούνται χωριστά. Οι κλάδοι χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και δημιουργούν το μονοπάτι 1-2-3 εξισώνοντας τις αντίστοιχες μεταβλητές χρησιμοποίησης:

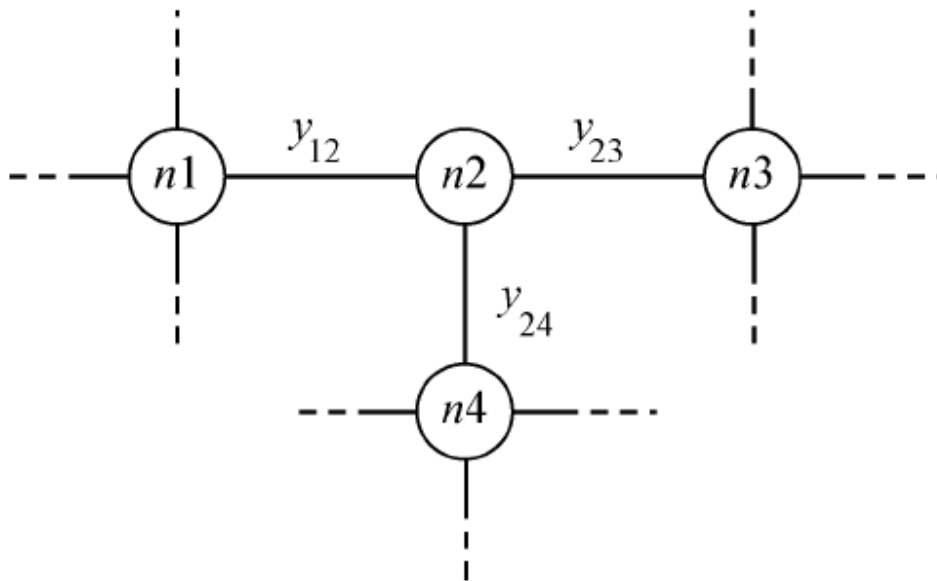
$$y_{12} = y_{23} \quad (4.21)$$

Αν ένας τέτοιος κόμβος έχει τρεις γειτονικούς κλάδους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5, τότε υπάρχουν 2^3 δυνατοί συνδυασμοί χρησιμοποίησης των γειτονικών κλάδων με τρεις από αυτούς, όταν

χρησιμοποιείται ένας μόνο κλάδος από τους τρεις, να είναι άχρηστοι. Για αυτό και εισάγεται ο περιορισμός (4.22) που ορίζει τους αποδεκτούς συνδυασμούς για το δίκτυο:

$$\begin{aligned} y_{12} &\leq y_{23} + y_{24} \\ y_{23} &\leq y_{12} + y_{24} \\ y_{24} &\leq y_{12} + y_{23} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Στην περίπτωση που ο κόμβος έχει δύο γειτονικούς κλάδους, υπάρχουν 2^2 συνδυασμοί και η εξίσωση (4.21) αφαιρεί τους δύο από αυτούς, πράγμα που ισοδυναμεί με την αφαίρεση μίας δυαδικής μεταβλητής. Η συνθήκη (4.22) αφαιρεί τρεις από τις οκτώ εναλλακτικές. Γενικά, ένας κόμβος με n γειτονικούς κλάδους έχει 2^n συνδυασμούς χρησιμοποίησης και n ανισωτικοί περιορισμοί μπορούν να εισαχθούν, προκειμένου να εξαλειφθούν n από αυτές τις εναλλακτικές. Αν και η μείωση του προβλήματος της δημιουργίας νέων μονοπατιών είναι ίση με $n/2^n$, στην πράξη, οι γειτονικοί κλάδοι δεν είναι περισσότεροι από τέσσερις. Έτσι, υπάρχει σημαντικό όφελος στη μείωση του μεγέθους του προβλήματος.



Σχήμα 4.5: Ορισμός νέου μονοπατιού για κόμβο με τρεις γειτονικούς κλάδους [4.6].

4.3.5.2 Δημιουργία συνεκτικού γράφου

Οι παρακάτω περιορισμοί προκύπτουν από τη γενίκευση του NPK και διασφαλίζουν ότι ο γράφος που αναπαριστά το δίκτυο θα είναι συνεκτικός. Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται ένα τμήμα του δικτύου με τρεις ομάδες διαχωρισμού: γύρω από έναν κόμβο (Τύπος 1), γύρω από δύο γειτονικούς κόμβους (Τύπος 2) και γύρω από έναν κόμβο μαζί με όλους τους γειτονικούς του (Τύπος 3).

Όταν ο κόμβος 1 έχει φορτίο μη μηδενικό, που σημαίνει ότι πρέπει να είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο, τότε πρέπει να ικανοποιείται η σχέση:

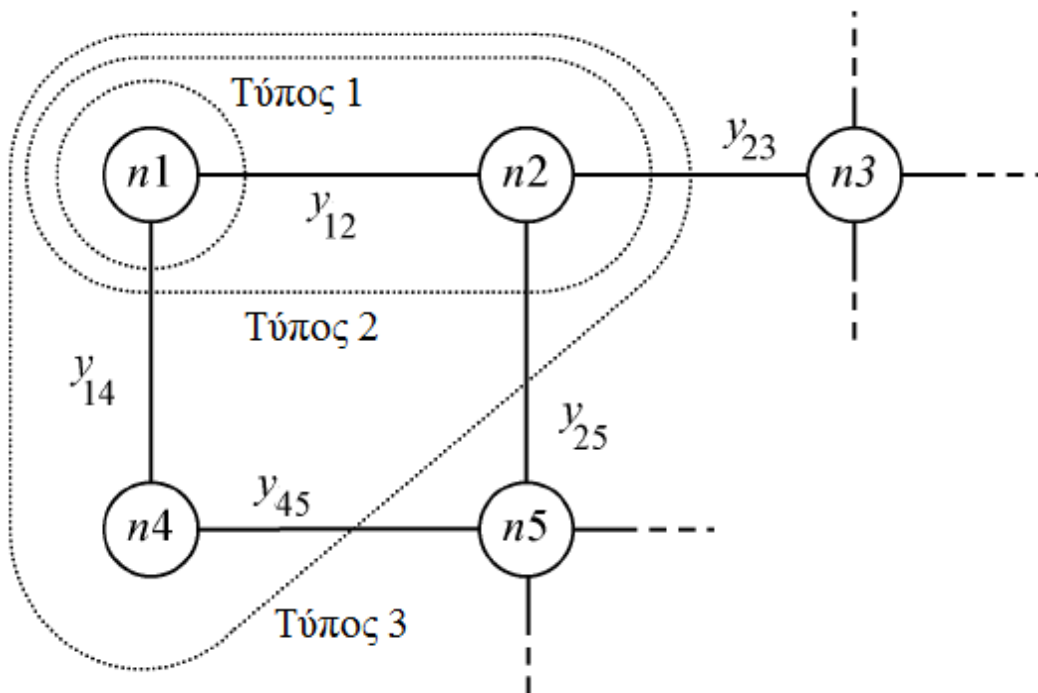
$$y_{12} + y_{14} \geq 1 \quad (4.23)$$

Όταν ένας από τους δύο κόμβους στην άκρη του κλάδου 1-2 έχει μη μηδενικό φορτίο, τότε τουλάχιστον ένας από τους δύο πρέπει να συνδέεται στο δίκτυο:

$$y_{14} + y_{23} + y_{25} \geq 1 \quad (4.24)$$

Όταν είτε ο κόμβος 1 είτε ένας από τους δύο γειτονικούς του (ο 2 ή ο 4) έχουν μη μηδενικό φορτίο, τουλάχιστον ένας από τους τρεις πρέπει να συνδέεται στο δίκτυο:

$$y_{45} + y_{23} + y_{25} \geq 1 \quad (4.25)$$



Σχήμα 4.6: Ομάδες διαχωρισμού σε τμήμα του δικτύου [4.6].

Με τον ίδιο τρόπο δημιουργούνται ομάδες διαχωρισμού και αντίστοιχοι περιορισμοί και για το υπόλοιπο δίκτυο. Αυτοί οι περιορισμοί, καθώς και οι προηγούμενοι, που αφορούν την ακτινική λειτουργία του δικτύου, ισχύουν για τους κόμβους που προστίθενται στο δίκτυο κατά την περίοδο της μελέτης.

4.3.6 Μοντελοποίηση ρυθμιστών τάσης

Η τάση στους κόμβους υπολογίζεται ως ακολούθως [4.6]:

$$\left| v_{i,t}^{sqr} - v_{j,t}^{sqr} - 2 \left(r_{(i,j)} P_{(i,j),t} + x_{(i,j)} Q_{(i,j),t} \right) \right| \leq M \cdot (1 - y_{(i,j),t}) \quad (4.26)$$

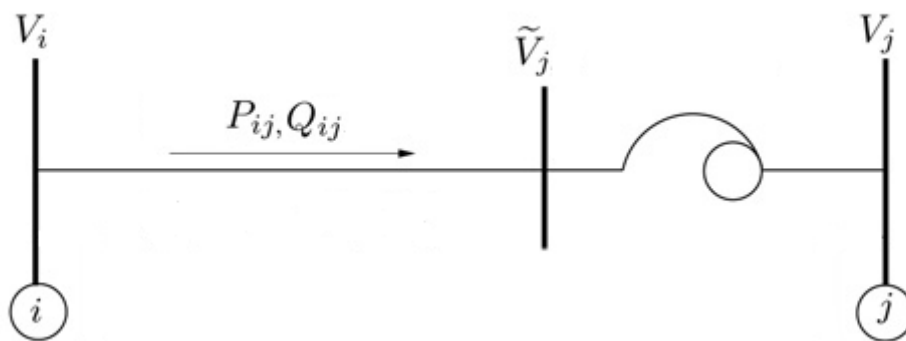
$$\forall i, j \in \Omega_n : \exists(i, j), \forall t \in T$$

Όταν η μεταβλητή y είναι 0, ο περιορισμός χαλαρώνει αφού το M είναι αρκετά μεγάλο για να ικανοποιούνται και οι δύο ανισότητες για τις πιθανές τιμές των τάσεων. Όταν η μεταβλητή y είναι 1, τότε ο περιορισμός μετατρέπεται σε ισότητα και συνεπώς μέσω της γραμμικοποιημένης εξίσωσης *Distflow* μπορεί να υπολογιστεί η τάση στον τελικό κόμβο ενός κλάδου, εφόσον είναι γνωστή η τάση στον αρχικό κόμβο του κλάδου και εφόσον ρέει ισχύς μεταξύ τους. Η μεταβλητή v^{sqr} αναπαριστά την v^2 και ο συνεπώς η (4.26) είναι γραμμική.

Σε αυτήν την εργασία ο κάθε PT (Σχήμα 4.7) θεωρείται ότι έχει εύρος ρύθμισης (regulation range) $rr\% = 10\%$ και η αντίστασή του αγνοείται. Τα όρια διακύμανσης της τάσης γύρω από την ονομαστική τιμή λαμβάνονται στο $\pm 5\%$, ενώ η τάση στον Υ/Σ έχει άνω όριο ρύθμισης το $+6\%$ (1.06 α.μ).

Στο μοντέλο γίνεται η απλοποιητική παραδοχή ότι ο PT δεν έχει λήψεις, δηλαδή η αλλαγή στην τάση δε γίνεται βηματικά αλλά είναι συνεχής μεταβλητή. Αυτή η επιλογή έγινε εξαιτίας των ακόλουθων παρατηρήσεων [4.7]:

- 1) Μειώνεται η πολυπλοκότητα του μοντέλου.
- 2) Δεν απαιτείται ακριβής περιγραφή, γιατί δεν πρόκειται για πρόβλημα λειτουργίας του δικτύου.
- 3) Η θέση των PT είναι πιο σημαντική.
- 4) Τα λάθη αυτής της απλοποίησης είναι μικρά σε σχέση με την αβεβαιότητα που σχετίζεται με τη μελλοντική ζήτηση.



Σχήμα 4.7: Ο κλάδος ij με ρυθμιστή τάσης.

Η μοντελοποίηση της λειτουργίας του PT γίνεται σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.27) και (4.28). Οι εξισώσεις είναι γραμμικές, καθώς η μεταβλητή που σχετίζεται με την τάση αναπαριστά το τετράγωνο του μεγέθους της τάσης, δηλαδή οι μεταβλητές $V_{j,t}^{sqr}$ και $\tilde{V}_{j,t}^{sqr}$ χρησιμοποιούνται, για να αναπαραστήσουν τις $V_{j,t}^2$ και $\tilde{V}_{j,t}^2$ αντίστοιχα [4.7].

$$(1 - rr\%)^2 \cdot \tilde{V}_{j,t}^{sqr} \leq V_{j,t}^{sqr} \leq (1 + rr\%)^2 \cdot \tilde{V}_{j,t}^{sqr}, \quad \forall i, j \in \Omega_n, \forall t \in T \quad (4.27)$$

$$\left| V_{j,t}^{sqr} - \tilde{V}_{j,t}^{sqr} \right| \leq (\bar{V}^2 - \underline{V}^2) \cdot z_{(i,j),t}^V, \quad \forall i, j \in \Omega_n : \exists(i, j), \forall t \in T \quad (4.28)$$

όπου:

$\tilde{V}_{j,t}^{sqr}$: το τετράγωνο της μη ρυθμισμένης τάσης (πριν την τοποθέτηση PT).

$V_{j,t}^{sqr}$: το τετράγωνο της ρυθμισμένης τάσης (μετά την τοποθέτηση PT).

\bar{V} : το άνω όριο της τάσης.

\underline{V} : το κάτω όριο της τάσης.

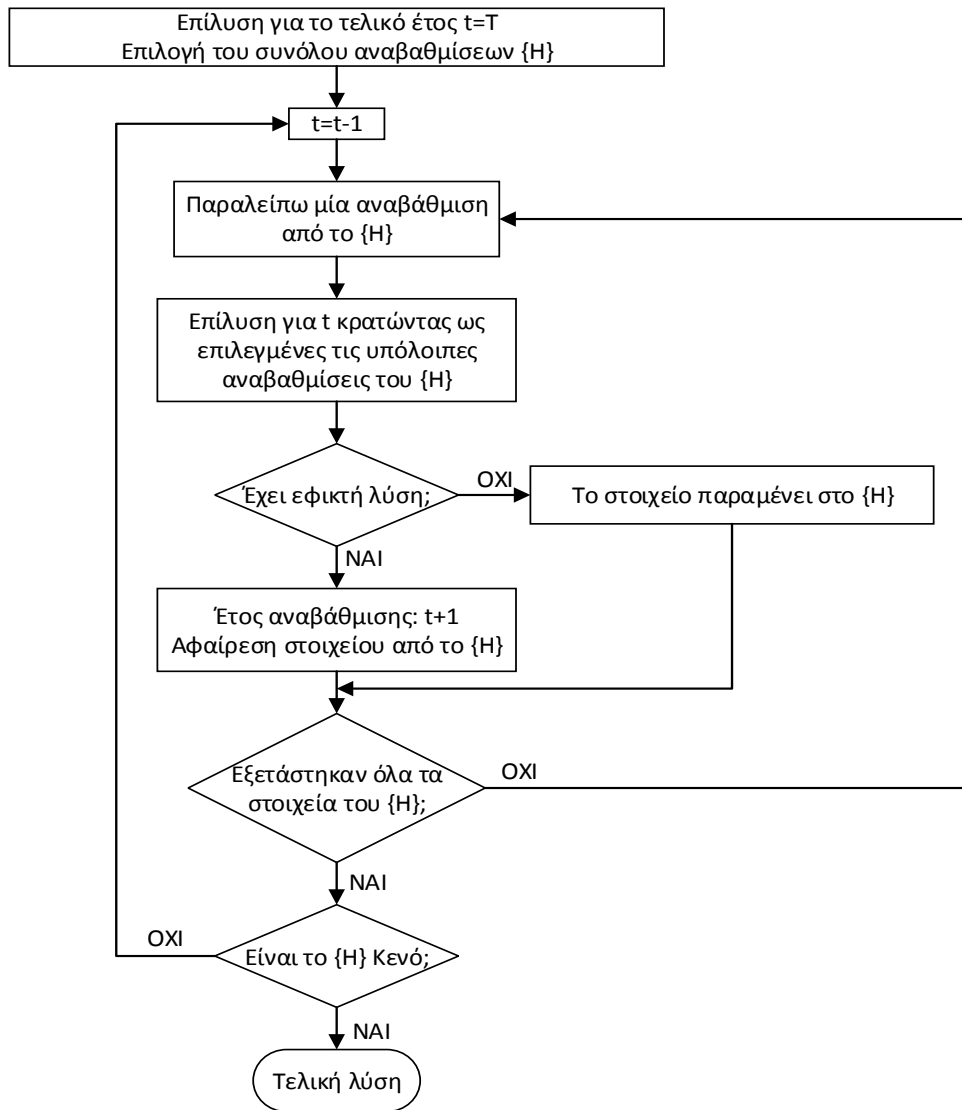
4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μία μέθοδος επίλυσης με ευριστική προσέγγιση για τον καθορισμό του χρονοδιαγράμματος των επενδύσεων. Η μέθοδος ξεκινάει από το τελευταίο έτος της μελέτης σχεδιασμού και προχωράει προς τα πίσω μέχρι το πρώτο έτος, δηλαδή ο σχεδιασμός γίνεται για το τελευταίο έτος και στη συνέχεια αποφασίζεται η περίοδος ανάθεσης των επιλεγμένων αναβαθμίσεων. Επομένως, γίνεται πρώτα η επιλογή όλων των αναβαθμίσεων και στη συνέχεια γίνεται η επιλογή του έτους που θα γίνει η κάθε αναβάθμιση. Το πρόβλημα δομήθηκε με τη χρήση ενός μόνο συνόλου (set), του συνόλου των ζυγών του δικτύου (με τα καινούρια φορτία να ορίζονται ως υποσύνολο αυτού) και η εξέταση όλων των ετών γίνεται με τη χρήση επαναληπτικού βρόχου. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου δίνεται στο Σχήμα 4.8.

4.4.1 Στάδια επίλυσης

Η μέθοδος χωρίζεται σε τρία στάδια. Πρώτα αποφασίζεται η αναβάθμιση του Μ/Σ, των γραμμών διανομής και της επέκτασής τους. Η διαμόρφωση του δικτύου που προκύπτει από την επίλυση του πρώτου σταδίου εισάγεται ως είσοδος στο δεύτερο στάδιο, όπου υπολογίζονται οι τάσεις σε όλους τους κόμβους και εξετάζεται η εγκατάσταση PT. Τέλος, στο τρίτο στάδιο, επιλέγεται το έτος που είναι απαραίτητη η κάθε αναβάθμιση. Συγκεκριμένα:

- **Στάδιο 1:** Στο στάδιο αυτό εξετάζεται η αναβάθμιση των Μ/Σ, η αναβάθμιση των γραμμών διανομής καθώς και η επέκτασή τους. Περιλαμβάνονται οι εξισώσεις (4.3) έως (4.25). Από την αντικειμενική συνάρτηση (4.1) αφαιρείται η συνιστώσα που αφορά την εγκατάσταση PT. Εξαιτίας των περιορισμών (4.9), (4.14) και (4.16) το πρόβλημα ορίζεται και επιλύεται ως ένα *μεικτό-ακέραιο τετραγωνικά περιορισμένο πρόβλημα* (MIQCP – Mixed Integer Quadratically Constrained Programming).
- **Στάδιο 2:** Στο στάδιο αυτό γίνεται η επιλογή των θέσεων για την εγκατάσταση των PT. Η συνιστώσα που αφαιρέθηκε στο Στάδιο 1, είναι η αντικειμενική συνάρτηση αυτού του σταδίου. Περιλαμβάνονται οι εξισώσεις (4.26) έως (4.28). Το πρόβλημα είναι *μεικτό-ακέραιο γραμμικό* (MILP).
- **Στάδιο 3:** Στο στάδιο αυτό γίνεται η επιλογή του έτους όπου θα εγκατασταθούν οι αναβαθμίσεις που επιλέχθηκαν στα Στάδια 1 και 2. Περιλαμβάνονται οι εξισώσεις (4.3) έως (4.7), οι τετραγωνικοί περιορισμοί (4.9) και (4.16) και οι εξισώσεις (4.26) έως (4.28). Το πρόβλημα που επιλύεται είναι *τετραγωνικά περιορισμένο* (QCP – Quadratically Constrained Programming).



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα ροής της μεθόδου επίλυσης.

4.4.2 Επιλογή των αναβαθμίσεων

Για την επιλογή των αναβαθμίσεων επιλύονται τα δύο πρώτα στάδια, που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.4.1 για το τελευταίο έτος, δηλαδή για το μέγιστο φορτίο. Στο πρώτο στάδιο καθορίζονται οι επενδύσεις που θα γίνουν στον Μ/Σ και στις γραμμές διανομής και το μέγεθος ενίσχυσής τους και στο δεύτερο στάδιο αποφασίζεται, αν χρειάζεται η τοποθέτηση ΡΤ. Έτσι, προκύπτει το σύνολο $\{H\}$ των αναβαθμίσεων, που το πλήθος των στοιχείων του ταυτίζεται με τον αριθμό των δυαδικών μεταβλητών απόφασης για αναβάθμιση (z^F , z^{SS} και z^V) που λαμβάνουν την τιμή 1. Το μέγεθος ενίσχυσης το καθορίζουν οι ακέραιες μεταβλητές του πρώτου σταδίου. Επομένως, στα δύο αυτά στάδια αποφασίζεται το πλάνο των αναβαθμίσεων που απαιτούνται να γίνουν, για να είναι ικανοποιητική η λειτουργία του δικτύου στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού.

4.4.3 Επιλογή του έτους

Το σύνολο $\{H\}$, που καθορίστηκε στα προηγούμενα στάδια, παραμένει αμετάβλητο, και οι ακέραιες μεταβλητές του προβλήματος έχουν σταθερή τιμή. Αυτό σημαίνει ότι οι ακέραιες μεταβλητές απαλείφονται και έτσι πλέον το πρόβλημα γίνεται συνεχές και συνεπώς πιο απλό στην επίλυσή του. Με τη χρήση επαναληπτικών δομών εξετάζονται τα προηγούμενα έτη και για κάθε έτος εξετάζονται όλα τα στοιχεία του $\{H\}$, δηλαδή το πρόβλημα επιλύεται κατά επαναλήψη όσες φορές χρειάζεται μέχρι να καθοριστεί το έτος αναβάθμισης για κάθε στοιχείο του συνόλου. Αν N ο αριθμός των στοιχείων του $\{H\}$, τότε στη χειρότερη περίπτωση θα γίνουν $N \cdot (T - 1)$ επαναλήψεις. Μόλις τελειώσει και αυτό το στάδιο, έχει πλέον καθοριστεί το έτος υλοποίησης κάθε επένδυσης και έτσι λαμβάνεται η τελική λύση του προβλήματος.

4.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] D. Chattopadhyay, "Application of general algebraic modeling system to power system optimization," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, no. 1, Feb. 1999.
- [4.2] E. Castillo, A. J. Conejo, P. Pedregal, R. Garcia, and N. Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*, New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [4.3] GAMS – A Users's Guide, GAMS Development Corporation, June 2015, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.gams.com/dd/docs/bigdocs/GAMSUsersGuide.pdf>
- [4.4] GAMS/CPLEX 12, GAMS Development Corporation, June 2015, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.gams.com/dd/docs/solvers/allsolvers.pdf>
- [4.5] A. S. B. Humayd and K. Bhattacharya, "Comprehensive multi-year distribution system planning using back-propagation approach," IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 7, no. 12, pp. 1415-1425, May 2013.
- [4.6] S. Haffner, L. F. A. Pereira, L. A. Pereira, and L.S. Barreto, "Multistage model for distribution expansion planning with distributed generation – Part I: Problem formulation," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no.2, April 2008.
- [4.7] R. R. Gonçalves, J. F. Franco, and M. J. Rider, "Short-term expansion planning of radial electrical distribution system using mixed-integer linear programming," IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 9, no. 3, pp. 256-266, Aug. 2014.
- [4.8] J. A. Taylor, "Conic optimization of electric power systems," Ph.D. thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, July, 2011.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εφαρμογή της μεθόδου επίλυσης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 έγινε σε τρία δίκτυα διανομής και σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, όπως προέκυψαν από την επίλυση που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του GAMS (έκδοση 24.1.3) με χρήση του επιλυτή Cplex. Η επίλυση έγινε σε Η/Υ με επεξεργαστή AMD 3.00 GHz, μνήμη RAM 8 GB, στο λειτουργικό σύστημα Windows 7 Professional Service Pack 1.

Το μοντέλο σχεδιασμού ακτινικού δικτύου διανομής εφαρμόστηκε για τρία διαφορετικά σενάρια πρόβλεψης της αύξησης του φορτίου. Ο συντελεστής ισχύος θεωρείται σταθερός και λαμβάνεται ίσος με 0,9 επαγωγικός. Η περίοδος μελέτης είναι 20 έτη.

5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ

Για τον υπολογισμό του κόστους των επενδύσεων χρησιμοποιείται η εξίσωση (4.1) με κάποιες διαφορές που εξηγούνται παρακάτω. Μετά την απόφαση για ενίσχυση ή κατασκευή ενός κλάδου το πρόγραμμα αποφασίζει ποια από τις διαθέσιμες γραμμές διανομής θα χρησιμοποιηθεί και ανάγεται το κόστος εγκατάστασης της γραμμής σε παρούσα αξία, επομένως η αντίστοιχη συνιστώσα J_f του αθροίσματος γράφεται ως ακολούθως:

$$J_f = \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{(1+\alpha)^t} \left(\sum_{i,j \in \Omega_n: \exists(i,j)} C_{(i,j),t}^F \cdot Le_{(i,j)} \right) \right) \quad (5.1)$$

όπου:

$C_{(i,j),t}^F$: το κόστος της γραμμής διανομής (i,j) σε €/km που θα εγκατασταθεί το έτος t .

Όσον αφορά την ενίσχυση του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ στις εφαρμογές που ακολουθούν, γίνεται αντικατάσταση του Μ/Σ 25 ΜVA σε Μ/Σ 50 ΜVA, οπότε χρησιμοποιείται το κόστος αντικατάστασης που είναι 375 000 €, το οποίο ανάγεται σε παρούσα αξία. Το κόστος εγκατάστασης του ΡΤ είναι 80 000 €. Στον υπολογισμό κόστους χρησιμοποιείται το αποπληθωρισμένο επιτόκιο αναγωγής που δίνεται από τον τύπο:

$$a = \frac{Intr - Infr}{1 + Infr} \quad (5.2)$$

όπου:

$Intr$: το ονομαστικό επιτόκιο αναγωγής (interest rate).

$Infr$: ο ρυθμός πληθωρισμού (inflation rate).

Το ονομαστικό επιτόκιο θεωρείται ίσο με 10% και ο ρυθμός πληθωρισμού ίσος με 4%, οπότε προσεγγιστικά ο αποπληθωρισμένος συντελεστής είναι με ίσος με 6%.

Πρέπει ακόμα να σημειωθεί, ότι κατά την επίλυση του προβλήματος καθορίζεται το έτος που είναι απαραίτητη η κάθε αναβάθμιση για την σωστή λειτουργία του δικτύου, πράγμα που σημαίνει ότι οι επενδύσεις πρέπει να έχουν ήδη γίνει το προηγούμενο έτος. Οι επενδύσεις θεωρούνται ότι πραγματοποιούνται ταυτόχρονα στο τέλος του έτους. Συνεπώς, το έτος t που χρησιμοποιείται στην εξίσωση υπολογισμού του κόστους, στην πραγματικότητα είναι το έτος που προηγείται του έτους που αποφασίζεται η αντίστοιχη αναβάθμιση.

5.3 ΔΙΚΤΥΟ 22 ΖΥΓΩΝ

Σε αυτή την εφαρμογή οι απώλειες των γραμμών διανομής λαμβάνονται υπόψη και προσεγγίζονται με ένα κλάσμα απωλειών, που είναι ίσο με 2% επί της ισχύος που εισέρχεται στον κάθε κόμβο και έτσι τελικά οι εξισώσεις (4.3) και (4.4) έχουν την ακόλουθη μορφή [5.1]:

$$\sum_{i,j \in \Omega_n: \exists(i,j)} \left((1 - L_f) \cdot P_{(j,i),t} - P_{(i,j),t} \right) + P_{i,t}^{Im} = P_{i,t}^D \quad (5.3)$$

$$\sum_{i,j \in \Omega_n: \exists(i,j)} \left((1 - L_f) \cdot Q_{(j,i),t} - Q_{(i,j),t} \right) + Q_{i,t}^{Im} = Q_{i,t}^D \quad (5.4)$$

όπου:

L_f : το ποσοστό απωλειών.

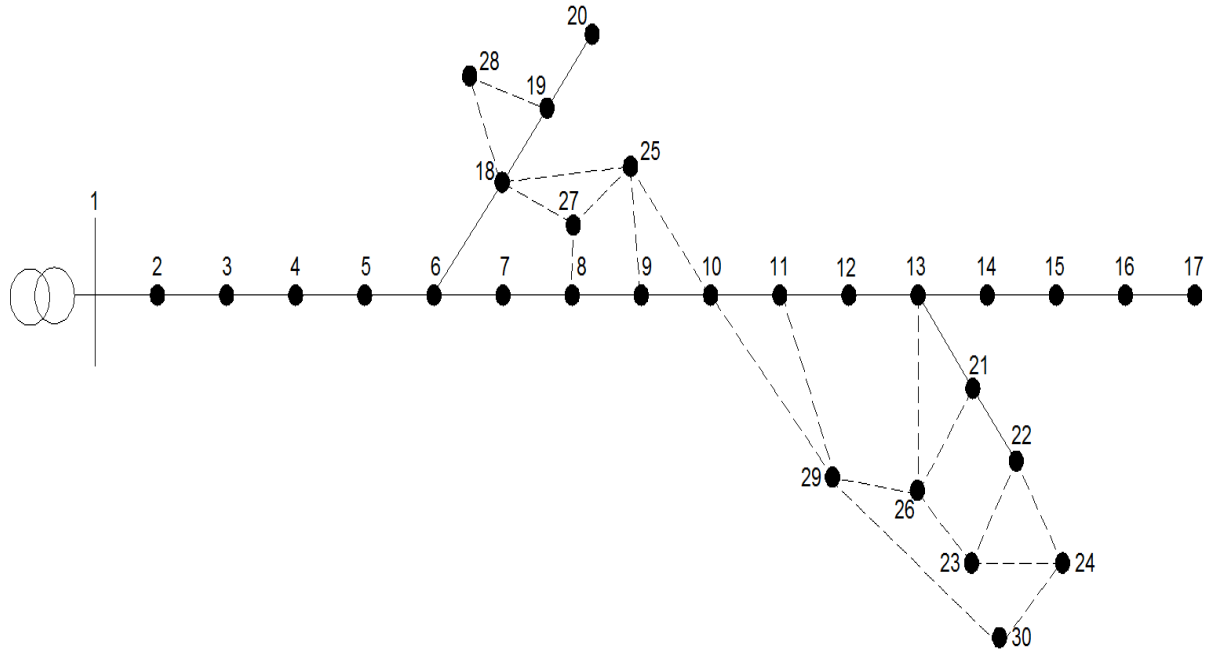
Επειδή το δίκτυο 22 ζυγών έχει μία μόνο κύρια γραμμή διανομής (feeder) οι περιορισμοί (4.14) και (4.15) παραλείπονται. Τα τρία διαφορετικά σενάρια πρόβλεψης της αύξησης του φορτίου είναι:

1. **Σενάριο 1:** Η ετήσια αύξηση του φορτίου είναι 3% και προστίθενται 8 καινούρια φορτία.
2. **Σενάριο 2:** Η ετήσια αύξηση του φορτίου είναι 3% στο πρώτο μισό της περιόδου μελέτης και 1% στο δεύτερο μισό. Προστίθενται 5 καινούρια φορτία.
3. **Σενάριο 3:** Η ετήσια αύξηση του φορτίου είναι 1% και προστίθενται 3 καινούρια φορτία.

5.3.1 Δεδομένα

Παρουσιάζονται τα δεδομένα για το δίκτυο διανομής 20 kV των 22 ζυγών, τα φορτία που θα προστεθούν σε αυτό και οι γραμμές που είναι υποψήφιες για την επέκτασή του (Σχήμα 5.1). Ο Υ/Σ ΜΤ/ΥΤ έχει μέγιστη χωρητικότητα 25 MVA. Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται δίνονται στον Πίνακα 5.1 και τα στοιχεία που αφορούν τις γραμμές διανομής του αρχικού δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Στον Πίνακα 5.3 φαίνεται η ενεργός και η άεργος ισχύς των φορτίων του αρχικού

δικτύου (έτος 0), καθώς και των φορτίων που αναμένεται να προστεθούν και το έτος πρόσθεσής τους. Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται οι γραμμές διανομής για την επέκταση του δικτύου που είναι υποψήφιες για την εξυπηρέτηση των φορτίων.



Σχήμα 5.1: Δίκτυο των 22 ζυγών με τα φορτία που θα προστεθούν και οι υποψήφιες γραμμές (διακεκομμένες γραμμές) που θα τα εξυπηρετήσουν μέχρι το τέλος της περιόδου προγραμματισμού.

Πίνακας 5.1: Αγωγοί μέσης τάσης (20 kV).

| Τύπος | Περιγραφή γραμμής διανομής | R (Ohm/km) | X (Ohm/km) | Χωρητικότητα (MVA) | Κόστος (€/km) |
|-------|------------------------------|------------|------------|--------------------|---------------|
| 1 | Εναέρια υπεραστική 3x16 ACSR | 1,268 | 0,422 | 4,71 | 12 000 |
| 2 | Εναέρια υπεραστική 3x35 ACSR | 0,576 | 0,397 | 7,76 | 15 000 |
| 3 | Εναέρια υπεραστική 3x95 ACSR | 0,215 | 0,334 | 15,42 | 23 000 |

Πίνακας 5.2: Οι γραμμές διανομής του δικτύου 22 ζυγών στο έτος 0.

| Ζυγός αναχώρησης | Ζυγός άφιξης | Τύπος | Μήκος (km) |
|-------------------------|---------------------|--------------|-------------------|
| 1 | 2 | 3 | 1,5 |
| 2 | 3 | 3 | 1,6 |
| 3 | 4 | 3 | 1,0 |
| 4 | 5 | 3 | 2,0 |
| 5 | 6 | 3 | 1,6 |
| 6 | 7 | 3 | 1,1 |
| 7 | 8 | 3 | 0,9 |
| 8 | 9 | 3 | 1,7 |
| 9 | 10 | 1 | 1,0 |
| 10 | 11 | 1 | 0,8 |
| 11 | 12 | 1 | 0,5 |
| 12 | 13 | 1 | 0,8 |
| 13 | 14 | 1 | 0,7 |
| 14 | 15 | 1 | 1,0 |
| 15 | 16 | 1 | 0,6 |
| 16 | 17 | 1 | 0,5 |
| 6 | 18 | 1 | 2,3 |
| 18 | 19 | 1 | 1,0 |
| 19 | 20 | 1 | 1,0 |
| 13 | 21 | 1 | 1,4 |
| 21 | 22 | 1 | 1,0 |

Πίνακας 5.3: Η ενεργός και η άεργος ισχύς των φορτίων του δικτύου 22 ζυγών στο έτος 0.

| Ζυγός | P (MW) | Q(MVAr) | Έτος |
|-------|--------|---------|------|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0,50 | 0,24 | 0 |
| 3 | 0,25 | 0,12 | 0 |
| 4 | 0,18 | 0,09 | 0 |
| 5 | 0,25 | 0,12 | 0 |
| 6 | 0,29 | 0,14 | 0 |
| 7 | 0,14 | 0,07 | 0 |
| 8 | 0,36 | 0,17 | 0 |
| 9 | 0,11 | 0,05 | 0 |
| 10 | 0,58 | 0,28 | 0 |
| 11 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 12 | 0,15 | 0,73 | 0 |
| 13 | 0,25 | 0,12 | 0 |
| 14 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 15 | 0,18 | 0,09 | 0 |
| 16 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 17 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 18 | 0,07 | 0,03 | 0 |
| 19 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 20 | 0,25 | 0,12 | 0 |
| 21 | 0,11 | 0,05 | 0 |
| 22 | 0,11 | 0,05 | 0 |
| 23 | 0,14 | 0,07 | 5 |
| 24 | 0,14 | 0,07 | 7 |
| 25 | 0,06 | 0,03 | 5 |
| 26 | 0,1 | 0,05 | 8 |
| 27 | 0,1 | 0,05 | 2 |
| 28 | 0,06 | 0,03 | 8 |
| 29 | 0,1 | 0,05 | 2 |
| 30 | 0,1 | 0,05 | 3 |

Πίνακας 5.4: Οι γραμμές διανομής που είναι υποψήφιες για την επέκταση του δικτύου 22 ζυγών.

| Ζυγός αναχώρησης | Ζυγός άφιξης | Μήκος (km) |
|-------------------------|---------------------|-------------------|
| 8 | 27 | 0,8 |
| 9 | 25 | 1,5 |
| 10 | 25 | 1,5 |
| 18 | 25 | 1,8 |
| 18 | 27 | 1,1 |
| 25 | 27 | 1,1 |
| 18 | 28 | 1 |
| 19 | 28 | 1 |
| 13 | 26 | 1,8 |
| 21 | 26 | 1,5 |
| 22 | 23 | 1,4 |
| 22 | 24 | 1,4 |
| 23 | 24 | 0,7 |
| 23 | 26 | 1,1 |
| 10 | 29 | 1,8 |
| 11 | 29 | 1,5 |
| 24 | 30 | 0,5 |
| 26 | 29 | 0,5 |
| 29 | 30 | 1,5 |

5.3.2 Αποτελέσματα

Ακολουθούν οι Πίνακες 5.5 έως 5.10 με τα αποτελέσματα των αναβαθμίσεων των στοιχείων του δικτύου για τα τρία διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν. Στους Πίνακες 5.5, 5.7 και 5.9 φαίνεται για κάθε γραμμή διανομής η ελάχιστη αύξηση της χωρητικότητας που απαιτείται, η οποία αυξάνεται με βήμα 2 MVA, το έτος που απαιτείται να γίνει η αναβάθμιση, και στο τέλος των πινάκων φαίνεται η γραμμή διανομής όπου αποφασίζεται να γίνει η εγκατάσταση του ΡΤ καθώς και το έτος που γίνεται η εγκατάσταση. Στους Πίνακες 5.6, 5.8 και 5.10 δίνεται η τελική διαμόρφωση του δικτύου και στην τελευταία γραμμή το συνολικό κόστος των επενδύσεων σε καθαρή παρούσα αξία. Στα Σχήματα 5.2 και 5.3 φαίνονται οι τάσεις στους ζυγούς πριν και μετά την εγκατάσταση ΡΤ για το τελευταίο έτος του σχεδιασμού.

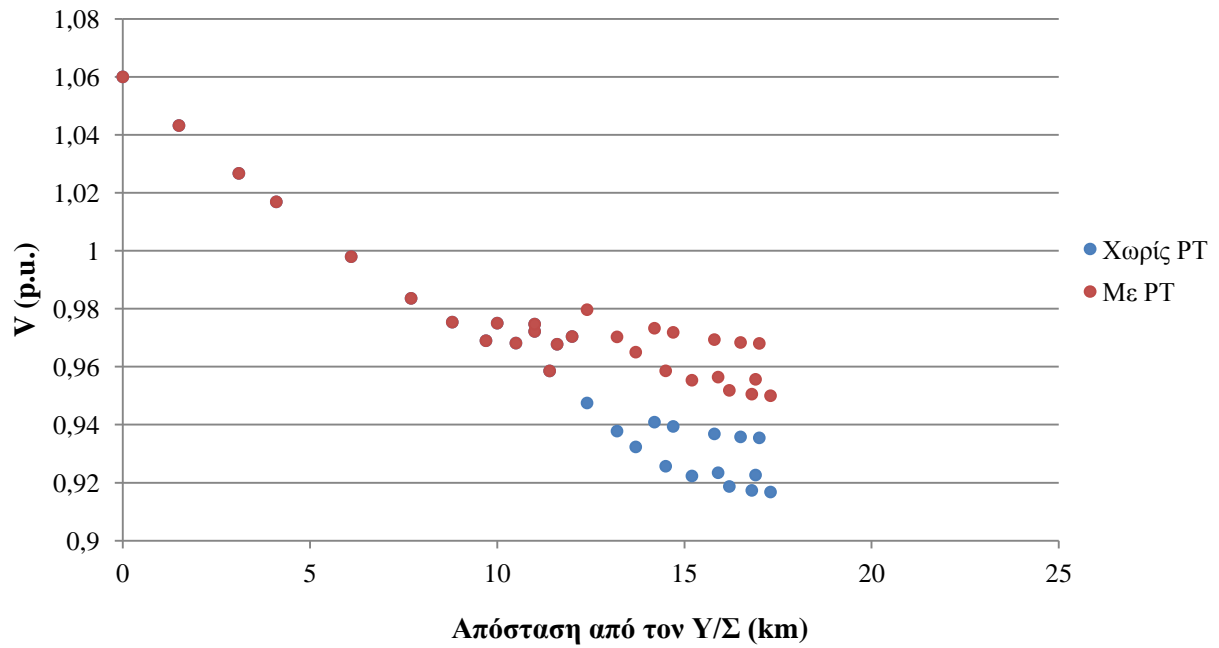
5.3.2.1 Σενάριο 1

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα για το δίκτυο των 22 ζυγών (Σενάριο 1).

| Γραμμές Διανομής | | Θερμική Χωρητικότητα (MVA) | Έτος αναβάθμισης |
|------------------|--------------|-------------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 8 | 27 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 9 | 10 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 12 |
| 23 | 24 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 3 |
| 26 | 23 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 3 |
| 27 | 25 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 5 |
| 29 | 26 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 3 |
| 10 | 29 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 18 | 28 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 8 |
| 24 | 30 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 3 |
| Ρυθμιστής Τάσης | | Έτος εγκατάστασης | |
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 9 | 10 | 10 | |

Πίνακας 5.6: Διαμόρφωση του δικτύου 22 ζυγών (Σενάριο 1).

| Γραμμές Διανομής | | Τύπος Γραμμής Διανομής | Έτος αναβάθμισης |
|---------------------------------------------|--------------|------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 8 | 27 | ACSR-16 | 2 |
| 9 | 10 | ACSR-35 | 12 |
| 23 | 24 | ACSR-16 | 3 |
| 26 | 23 | ACSR-16 | 3 |
| 27 | 25 | ACSR-16 | 5 |
| 29 | 26 | ACSR-16 | 3 |
| 10 | 29 | ACSR-16 | 2 |
| 18 | 28 | ACSR-16 | 8 |
| 24 | 30 | ACSR-16 | 3 |
| Ρυθμιστής Τάσης | | Έτος εγκατάστασης | |
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 9 | 10 | 10 | |
| Συνολικό κόστος επένδυσης: 133 028 € | | | |



Σχήμα 5.2: Η τάση (α.μ.) σε συνάρτηση με την απόσταση των ζυγών από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ στο δίκτυο 22 ζυγών για το Σενάριο 1 στο τελευταίο έτος σχεδιασμού.

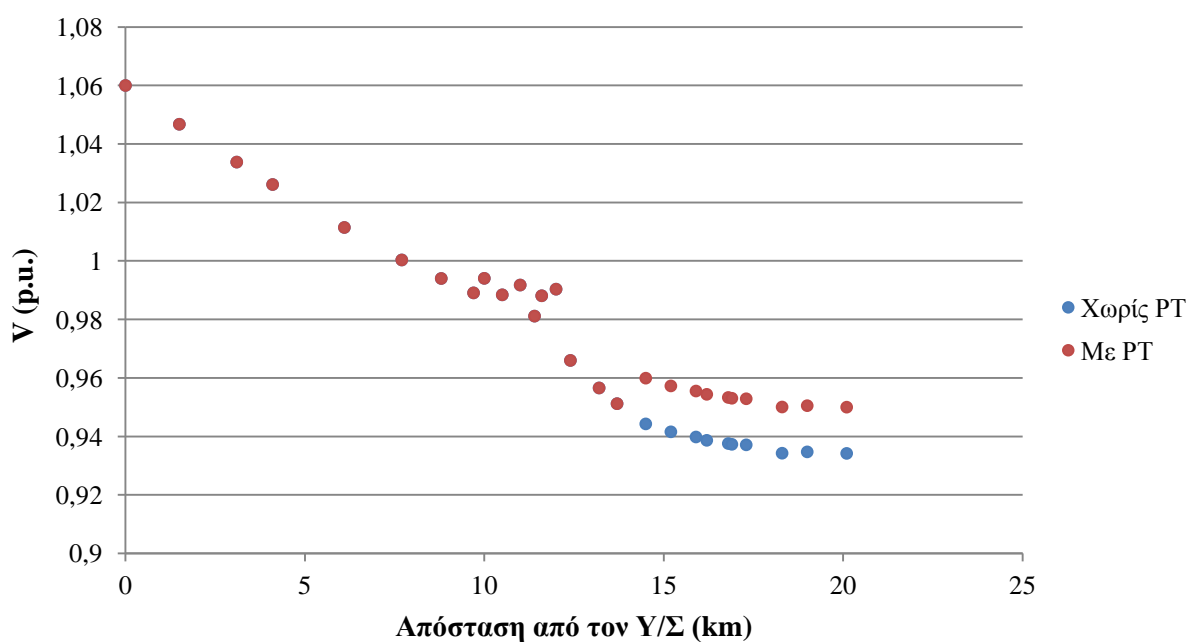
5.3.2.2 Σενάριο 2

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα για το δίκτυο των 22 ζυγών (Σενάριο 2).

| Γραμμές Διανομής | | Θερμική Χωρητικότητα (MVA) | Έτος αναβάθμισης |
|------------------|--------------|----------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφιξης | | |
| 8 | 27 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 22 | 23 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 5 |
| 23 | 24 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 7 |
| 23 | 26 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 8 |
| 27 | 25 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 5 |
| Ρυθμιστής Τάσης | | Έτος εγκατάστασης | |
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφιξης | | |
| 12 | 13 | 10 | |

Πίνακας 5.8: Διαμόρφωση του δικτύου (Σενάριο 2).

| Γραμμές Διανομής | | Τύπος Γραμμής Διανομής | Έτος αναβάθμισης |
|--------------------------------------------|--------------|------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 8 | 27 | ACSR-16 | 2 |
| 22 | 23 | ACSR-16 | 5 |
| 23 | 24 | ACSR-16 | 7 |
| 23 | 26 | ACSR-16 | 8 |
| 27 | 25 | ACSR-16 | 5 |
| Ρυθμιστής Τάσης | | Έτος εγκατάστασης | |
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 12 | 13 | 10 | |
| Συνολικό κόστος επένδυσης: 94 872 € | | | |



Σχήμα 5.3: Η τάση (α.μ.) σε συνάρτηση με την απόσταση των ζυγών από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ στο δίκτυο 22 ζυγών για το Σενάριο 2 στο τελευταίο έτος σχεδιασμού.

5.3.2.3 Σενάριο 3

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα για το δίκτυο των 22 ζυγών (Σενάριο 3).

| Γραμμές Διανομής | | Θερμική Χωρητικότητα (MVA) | Έτος αναβάθμισης |
|------------------|--------------|----------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφιξης | | |
| 9 | 25 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 5 |
| 22 | 24 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 5 |
| 24 | 23 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 5 |

Πίνακας 5.10: Διαμόρφωση του δικτύου 22 ζυγών (Σενάριο 3).

| Γραμμές Διανομής | | Τύπος Γραμμής Διανομής | Έτος αναβάθμισης |
|--------------------------------------------|--------------|------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφιξης | | |
| 9 | 25 | ACSR-16 | 5 |
| 22 | 24 | ACSR-16 | 5 |
| 24 | 23 | ACSR-16 | 5 |
| Συνολικό κόστος επένδυσης: 34 218 € | | | |

5.3.2.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στους Πίνακες 5.11 έως 5.13 δίνεται αναλυτικά το κόστος κάθε λύσης και ο χρόνος επίλυσης για κάθε στάδιο της μεθόδου, τα οποία παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.4.1. Τέλος, στον Πίνακα 5.14 γίνεται σύγκριση της ποσοστιαίας μεταβολής του μέγιστου συνολικού φορτίου (τελευταίο έτος) μεταξύ των σεναρίων σε σχέση με τη μεταβολή του κόστους επενδύσεων.

Πίνακας 5.11: Το κόστος επένδυσης και ο χρόνος επίλυσης για το δίκτυο των 22 ζυγών (Σενάριο 1).

| | | | |
|----------------------------------|----------|----------|----------|
| Συνολικό κόστος (€) | 133 028 | | |
| Κόστος αναβάθμισης γραμμών (€) | 85 676 | | |
| Κόστος αναβάθμισης Υ/Σ ΜΤ/ΥΤ (€) | - | | |
| Κόστος εγκατάστασης ΡΤ (€) | 47 352 | | |
| Χρόνος Εκτέλεσης (sec) | Στάδιο 1 | Στάδιο 2 | Στάδιο 3 |
| | 3 | 0,3 | 29 |

Πίνακας 5.12: Το κόστος επένδυσης και ο χρόνος επίλυσης για το δίκτυο των 22 ζυγών (Σενάριο 2).

| | | | |
|----------------------------------|----------|----------|----------|
| Συνολικό κόστος (€) | 94 872 | | |
| Κόστος αναβάθμισης γραμμών (€) | 47 520 | | |
| Κόστος αναβάθμισης Υ/Σ ΜΤ/ΥΤ (€) | - | | |
| Κόστος εγκατάστασης ΡΤ (€) | 47 352 | | |
| Χρόνος Εκτέλεσης (sec) | Στάδιο 1 | Στάδιο 2 | Στάδιο 3 |
| | 2,5 | 0,3 | 20 |

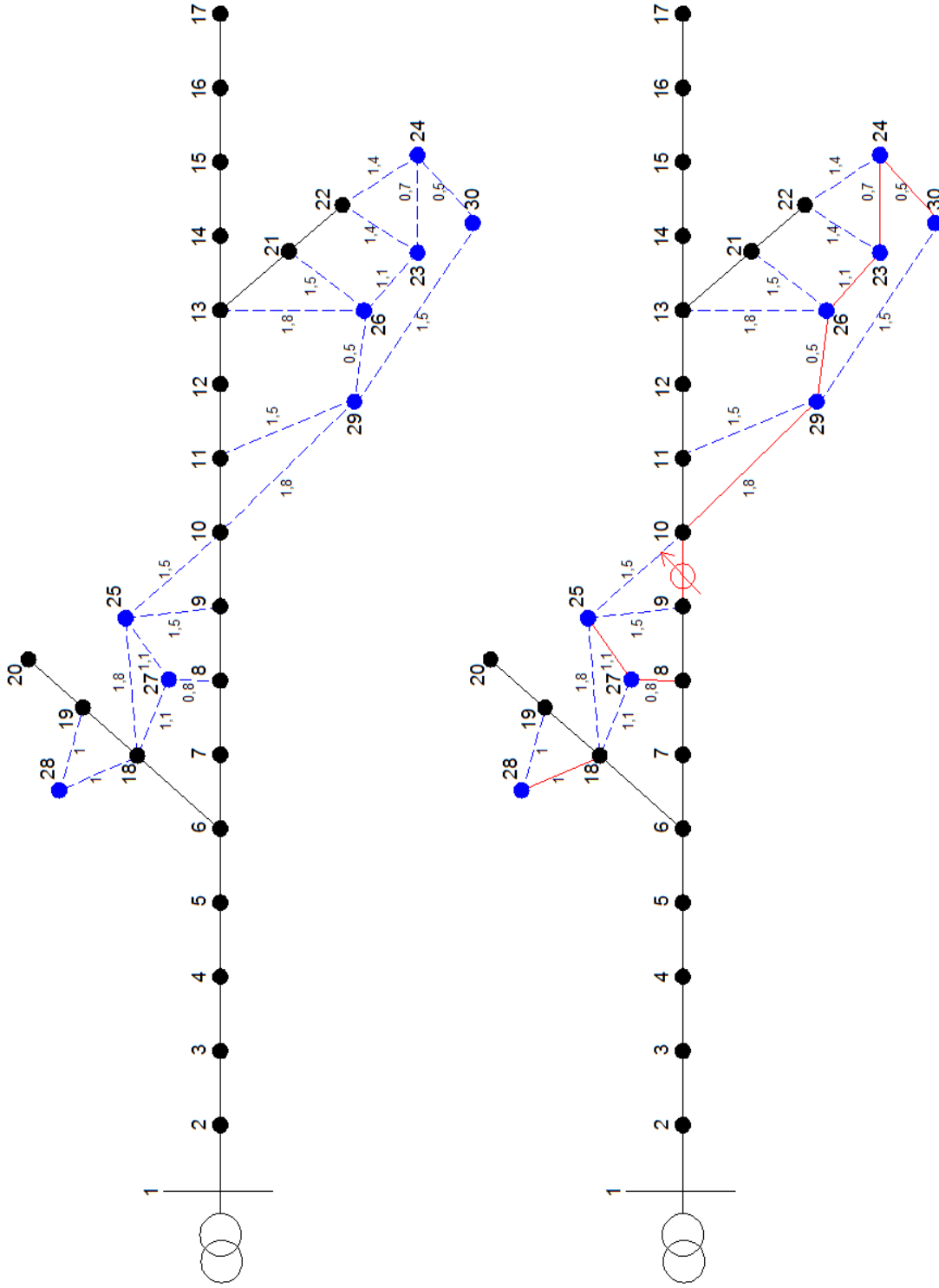
Πίνακας 5.13: Το κόστος επένδυσης και ο χρόνος επίλυσης για το δίκτυο των 22 ζυγών (Σενάριο 3).

| | | | |
|-----------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Συνολικό κόστος (€) | 34 218 | | |
| Κόστος αναβάθμισης γραμμών (€) | 34 218 | | |
| Κόστος αναβάθμισης Υ/Σ ΜΤ/ΥΤ (€) | - | | |
| Κόστος εγκατάστασης ΡΤ (€) | - | | |
| Χρόνος Εκτέλεσης (sec) | Στάδιο 1 | Στάδιο 2 | Στάδιο 3 |
| | 1,5 | 0,3 | 12 |

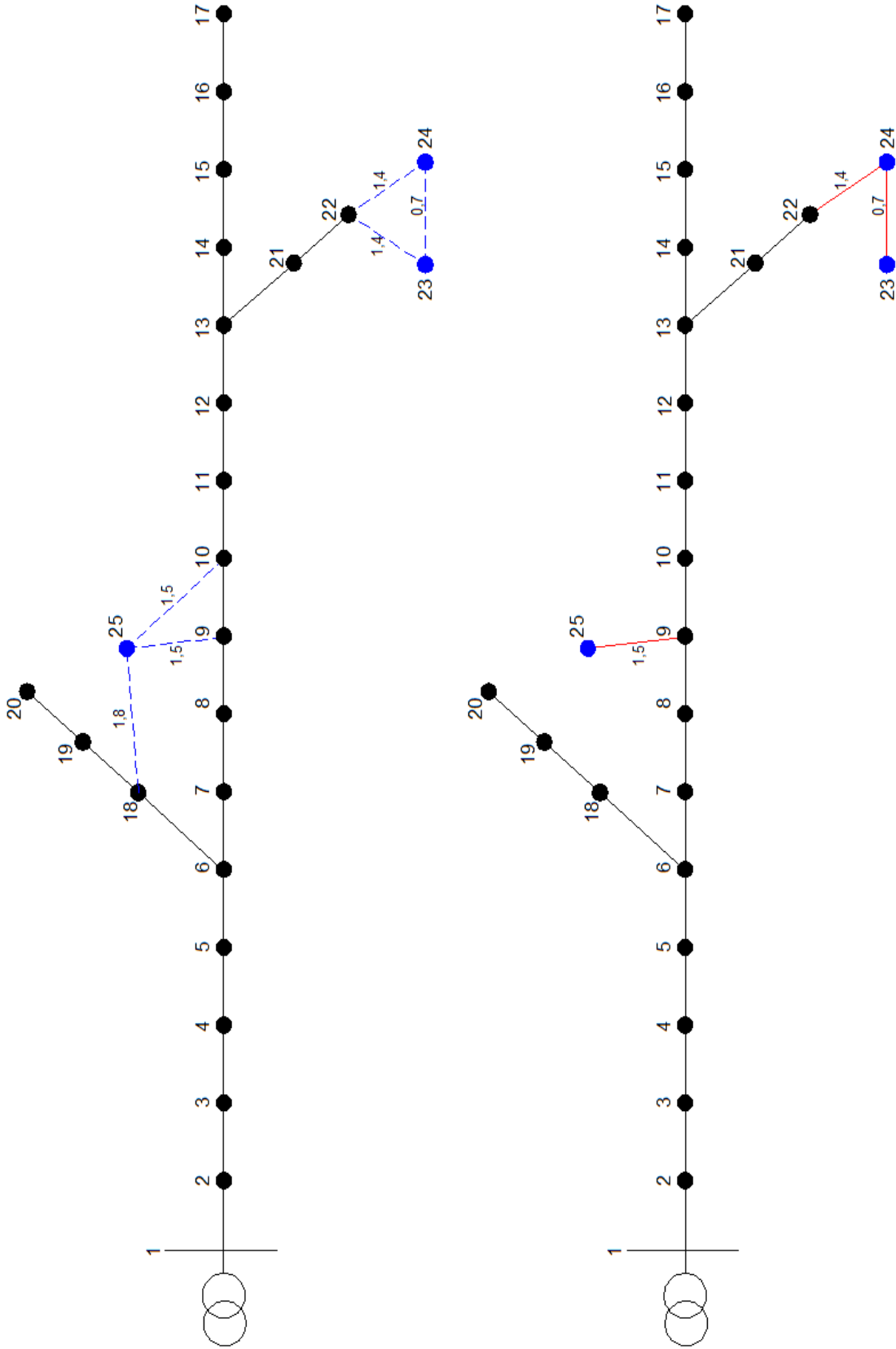
Πίνακας 5.14: Σύγκριση της ποσοστιαίας μεταβολής του μέγιστου συνολικού φορτίου (τελευταίο έτος) με την ποσοστιαία μεταβολή του κόστους επένδυσης για το δίκτυο των 22 ζυγών.

| | Μέγιστο συνολικό φορτίο (MVA) | % Μεταβολή | Συνολικό κόστος επένδυσης | % Μεταβολή |
|------------------|----------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Σενάριο 3 | 7,29 | - | 34 218 | - |
| Σενάριο 2 | 9,1 | 24,8 % | 94 872 | 177,3 % |
| Σενάριο 1 | 11,5 | 57,8 % | 133 028 | 288,8 % |

Στα Σχήματα 5.4 έως 5.6 που ακολουθούν φαίνονται οι αναβαθμίσεις και η επέκταση του δικτύου των 22 ζυγών για την εξυπηρέτηση των καινούριων φορτίων για το κάθε σενάριο που εξετάστηκε.



Σχήμα 5.4: Οι αναβαθμίσεις και η διαμόρφωση του δικτύου των 22 ζυγών για το Σενάριο 1. Οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τους εναλλακτικούς τρόπους διασύνδεσης των καινούριων φορτίων (μπλε χρώμα) και οι κόκκινες γραμμές δείχνουν ποιες γραμμές κατασκευάζονται ή ενισχύονται.



Σχήμα 5.6: : Οι αναβαθμίσεις και η διαμόρφωση του δικτύου των 22 ζυγών για το Σενάριο 3. Οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τους εναλλακτικούς τρόπους διασύνδεσης των καινούριων φορτίων (μπλε χρώμα) και οι κόκκινες γραμμές δείχνουν ποιες γραμμές κατασκευάζονται ή ενισχύονται.

5.4 ΔΙΚΤΥΟ 43 ΖΥΓΩΝ

Για την εφαρμογή στο δίκτυο των 43 ζυγών, το οποίο αποτελείται από δύο κύριες γραμμές διανομής, αγνοούνται οι απώλειες των γραμμών διανομής και επομένως οι ροές ισχύος υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.3) και (4.4) και χρησιμοποιούνται οι περιορισμοί (4.14) και (4.15). Τα τρία διαφορετικά σενάρια πρόβλεψης της αύξησης του φορτίου είναι:

1. **Σενάριο 1:** Η ετήσια αύξηση του φορτίου είναι 3% και προστίθενται 15 καινούρια φορτία.
2. **Σενάριο 2:** Η ετήσια αύξηση του φορτίου είναι 3% στο πρώτο μισό της περιόδου μελέτης και 1% στο δεύτερο μισό. Προστίθενται 9 καινούρια φορτία.
3. **Σενάριο 3:** Η ετήσια αύξηση του φορτίου είναι 1% και προστίθενται 6 καινούρια φορτία.

5.4.1 Δεδομένα

Παρουσιάζονται τα δεδομένα για το δίκτυο διανομής 20 kV των 43 ζυγών, τα φορτία που θα προστεθούν σε αυτό και οι γραμμές που είναι υποψήφιες για την επέκτασή του (Σχήμα 5.7). Το δίκτυο έχει δύο κύριες γραμμές διανομής και ο Υ/Σ ΜΤ/ΥΤ έχει μέγιστη χωρητικότητα 25 MVA. Οι αγωγοί ΜΤ που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο είναι αυτοί που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Τα στοιχεία που αφορούν τις γραμμές διανομής του αρχικού δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.15 και οι γραμμές διανομής που είναι υποψήφιες για την επέκταση του δικτύου δίνονται στον Πίνακα 5.16. Στον Πίνακα 5.17 φαίνεται η ενεργός και η άεργος ισχύς των φορτίων του αρχικού δικτύου (έτος 0), καθώς και των φορτίων που αναμένεται να προστεθούν και το έτος πρόσθεσής τους.

Πίνακας 5.15: Οι γραμμές διανομής του δικτύου 43 ζυγών στο έτος 0.

| Ζυγός αναχώρησης | Ζυγός άφιξης | Τύπος | Μήκος (km) |
|------------------|--------------|-------|------------|
| 1 | 2 | 3 | 1,5 |
| 2 | 3 | 3 | 1,6 |
| 3 | 4 | 3 | 1,0 |
| 4 | 5 | 3 | 2,0 |
| 5 | 6 | 3 | 1,6 |
| 6 | 7 | 3 | 1,1 |
| 7 | 8 | 3 | 0,9 |
| 8 | 9 | 3 | 1,7 |
| 9 | 10 | 1 | 1,0 |
| 10 | 11 | 1 | 0,8 |
| 11 | 12 | 1 | 0,5 |
| 12 | 13 | 1 | 0,8 |
| 13 | 14 | 1 | 0,7 |
| 14 | 15 | 1 | 1,0 |
| 15 | 16 | 1 | 0,6 |
| 16 | 17 | 1 | 0,5 |
| 6 | 18 | 1 | 2,3 |
| 18 | 19 | 1 | 1,0 |
| 19 | 20 | 1 | 1,0 |
| 13 | 21 | 1 | 1,4 |
| 21 | 22 | 1 | 1,0 |
| 1 | 23 | 3 | 1,5 |
| 23 | 24 | 3 | 1,6 |
| 24 | 25 | 3 | 1,0 |
| 25 | 26 | 3 | 2,0 |
| 26 | 27 | 3 | 1,6 |
| 27 | 28 | 3 | 1,1 |
| 28 | 29 | 3 | 0,9 |
| 29 | 30 | 3 | 1,7 |
| 30 | 31 | 1 | 1,0 |
| 31 | 32 | 1 | 0,8 |
| 32 | 33 | 1 | 0,5 |
| 33 | 34 | 1 | 0,8 |
| 34 | 35 | 1 | 0,7 |
| 35 | 36 | 1 | 1,0 |
| 36 | 37 | 1 | 0,6 |
| 37 | 38 | 1 | 0,5 |
| 27 | 39 | 1 | 2,3 |
| 39 | 40 | 1 | 1,0 |
| 40 | 41 | 1 | 1,0 |
| 34 | 42 | 1 | 1,4 |
| 42 | 43 | 1 | 1,0 |

Πίνακας 5.16: Οι γραμμές διανομής που είναι υποψήφιες για την επέκταση του δικτύου 43 ζυγών.

| Ζυγός αναχώρησης | Ζυγός άφιξης | Μήκος (km) |
|-------------------------|---------------------|-------------------|
| 15 | 44 | 0,9 |
| 16 | 44 | 0,9 |
| 38 | 45 | 1,4 |
| 43 | 45 | 0,7 |
| 44 | 45 | 0,8 |
| 36 | 46 | 0,5 |
| 37 | 46 | 0,5 |
| 42 | 46 | 0,6 |
| 43 | 46 | 0,6 |
| 17 | 47 | 1,2 |
| 38 | 47 | 1,2 |
| 45 | 47 | 1,8 |
| 17 | 48 | 1,8 |
| 38 | 48 | 1,8 |
| 47 | 48 | 1 |
| 7 | 49 | 1,4 |
| 8 | 49 | 1,4 |
| 18 | 49 | 1 |
| 32 | 50 | 1,8 |
| 34 | 50 | 1,5 |
| 41 | 50 | 2,8 |
| 21 | 51 | 2 |
| 34 | 51 | 1 |
| 42 | 51 | 1 |
| 22 | 52 | 1 |
| 43 | 52 | 1 |
| 51 | 52 | 1 |
| 15 | 53 | 1,8 |
| 17 | 53 | 2,8 |
| 12 | 54 | 1,5 |
| 32 | 54 | 1 |
| 9 | 55 | 1,5 |
| 54 | 55 | 1,5 |
| 9 | 56 | 1,8 |
| 11 | 56 | 0,5 |
| 12 | 56 | 0,8 |
| 54 | 56 | 0,5 |
| 12 | 57 | 2 |
| 13 | 57 | 1,7 |
| 14 | 57 | 2 |
| 8 | 58 | 2,8 |
| 12 | 58 | 2 |
| 49 | 58 | 1,8 |
| 57 | 58 | 1,7 |

Πίνακας 17: Η ενεργός και η άεργος ισχύς των φορτίων του δικτύου 43 ζυγών στο έτος 0.

| Ζυγός | P (MW) | Q(MVAr) | Έτος |
|-------|--------|---------|------|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0,50 | 0,24 | 0 |
| 3 | 0,25 | 0,12 | 0 |
| 4 | 0,18 | 0,09 | 0 |
| 5 | 0,25 | 0,12 | 0 |
| 6 | 0,29 | 0,14 | 0 |
| 7 | 0,14 | 0,07 | 0 |
| 8 | 0,36 | 0,17 | 0 |
| 9 | 0,11 | 0,05 | 0 |
| 10 | 0,58 | 0,28 | 0 |
| 11 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 12 | 0,15 | 0,73 | 0 |
| 13 | 0,25 | 0,12 | 0 |
| 14 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 15 | 0,18 | 0,09 | 0 |
| 16 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 17 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 18 | 0,07 | 0,03 | 0 |
| 19 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 20 | 0,25 | 0,12 | 0 |
| 21 | 0,11 | 0,05 | 0 |
| 22 | 0,11 | 0,05 | 0 |
| 23 | 0,50 | 0,24 | 0 |
| 24 | 0,25 | 0,12 | 0 |
| 25 | 0,18 | 0,09 | 0 |
| 26 | 0,25 | 0,12 | 0 |
| 27 | 0,29 | 0,14 | 0 |
| 28 | 0,14 | 0,07 | 0 |
| 29 | 0,36 | 0,17 | 0 |
| 30 | 0,11 | 0,05 | 0 |
| 31 | 0,58 | 0,28 | 0 |
| 32 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 33 | 0,15 | 0,73 | 0 |
| 34 | 0,25 | 0,12 | 0 |
| 35 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 36 | 0,18 | 0,09 | 0 |
| 37 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 38 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 39 | 0,07 | 0,03 | 0 |
| 40 | 0,15 | 0,07 | 0 |
| 41 | 0,25 | 0,12 | 0 |
| 42 | 0,11 | 0,05 | 0 |
| 43 | 0,11 | 0,05 | 0 |
| 44 | 0,15 | 0,07 | 4 |
| 45 | 0,15 | 0,07 | 8 |
| 46 | 0,18 | 0,09 | 7 |
| 47 | 0,18 | 0,09 | 4 |
| 48 | 0,15 | 0,07 | 8 |
| 49 | 0,15 | 0,07 | 8 |
| 50 | 0,15 | 0,07 | 4 |

Πίνακας 17: (Συνέχεια...)

| | | | |
|----|------|------|---|
| 51 | 0,06 | 0,03 | 7 |
| 52 | 0,1 | 0,05 | 5 |
| 53 | 0,1 | 0,05 | 7 |
| 54 | 0,25 | 0,12 | 4 |
| 55 | 0,16 | 0,08 | 8 |
| 56 | 0,1 | 0,05 | 2 |
| 57 | 0,1 | 0,05 | 7 |
| 58 | 0,1 | 0,05 | 8 |

5.4.2 Αποτελέσματα

Ακολουθούν οι Πίνακες 5.18 έως 5.23 με τα αποτελέσματα των αναβαθμίσεων των στοιχείων του δικτύου για τα τρία διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν. Στους Πίνακες 5.18, 5.20 και 5.22 φαίνεται για κάθε γραμμή διανομής η ελάχιστη αύξηση της χωρητικότητας που απαιτείται, η οποία αυξάνεται με βήμα 2 MVA, το έτος που απαιτείται να γίνει η αναβάθμιση και στο τέλος των πινάκων φαίνονται οι γραμμές διανομής, όπου αποφασίζεται να γίνει η εγκατάσταση PT, καθώς και το έτος που γίνεται η εγκατάστασή τους. Στους Πίνακες 5.19, 5.21 και 5.23 δίνεται η τελική διαμόρφωση του δικτύου και στην τελευταία γραμμή το συνολικό κόστος των επενδύσεων σε καθαρή παρούσα αξία. Στα Σχήματα 5.8 και 5.9 φαίνονται οι τάσεις στους ζυγούς πριν και μετά την εγκατάσταση PT για το τελευταίο έτος του σχεδιασμού.

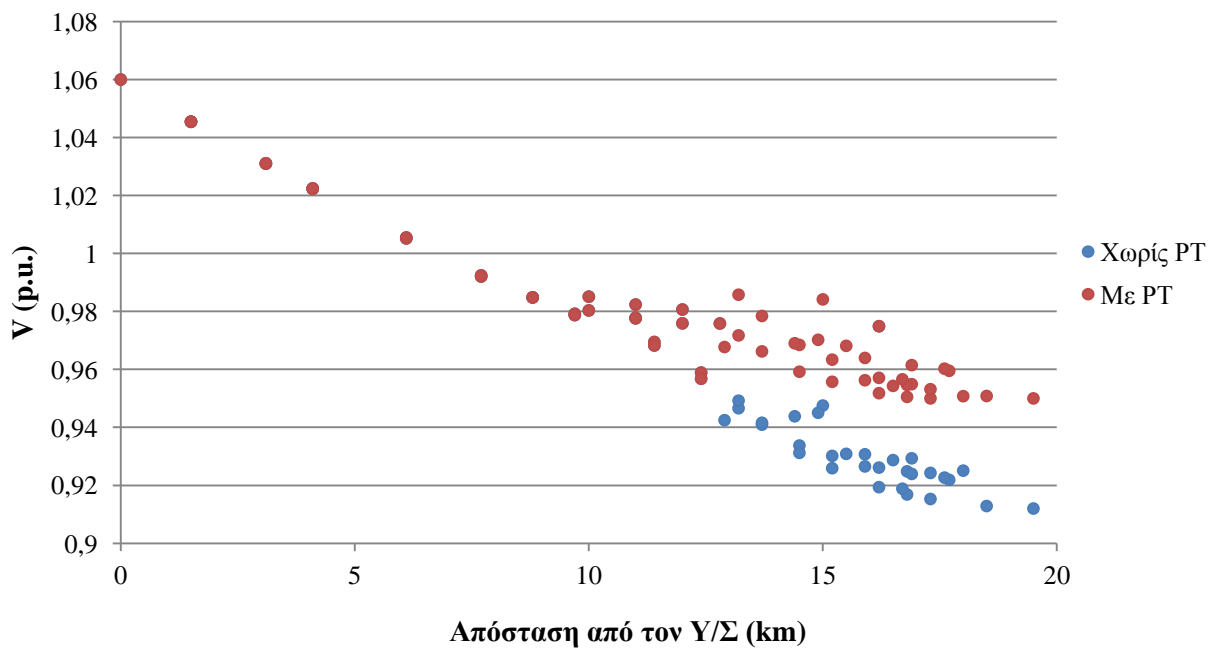
5.4.2.1 Σενάριο 1

Πίνακας 5.18: Αποτελέσματα για το δίκτυο των 43 ζυγών (Σενάριο 1).

| Γραμμές Διανομής | | Θερμική Χωρητικότητα (MVA) | Έτος αναβάθμισης |
|------------------|--------------|-------------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Άφιξης | | |
| 9 | 10 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 13 |
| 30 | 31 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 11 |
| 31 | 32 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 17 |
| 45 | 44 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 43 | 45 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 36 | 46 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 7 |
| 38 | 47 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 47 | 48 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 8 |
| 18 | 49 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 7 |
| 32 | 50 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 34 | 51 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 7 |
| 22 | 52 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 5 |
| 15 | 53 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 7 |
| 56 | 54 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 54 | 55 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 8 |
| 11 | 56 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 58 | 57 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 7 |
| 49 | 58 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 7 |
| Ρυθμιστές Τάσης | | Έτος εγκατάστασης | |
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Άφιξης | | |
| 10 | 11 | 14 | |
| 31 | 32 | 8 | |

Πίνακας 5.19: Διαμόρφωση του δικτύου 43 ζυγών (Σενάριο 1).

| Γραμμές Διανομής | | Τύπος Γραμμής Διανομής | Έτος αναβάθμισης |
|---------------------------------------------|--------------|------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 9 | 10 | ACSR-35 | 13 |
| 30 | 31 | ACSR-35 | 11 |
| 31 | 32 | ACSR-35 | 17 |
| 45 | 44 | ACSR-16 | 4 |
| 43 | 45 | ACSR-16 | 4 |
| 36 | 46 | ACSR-16 | 7 |
| 38 | 47 | ACSR-16 | 4 |
| 47 | 48 | ACSR-16 | 8 |
| 18 | 49 | ACSR-16 | 7 |
| 32 | 50 | ACSR-16 | 4 |
| 34 | 51 | ACSR-16 | 7 |
| 22 | 52 | ACSR-16 | 5 |
| 15 | 53 | ACSR-16 | 7 |
| 56 | 54 | ACSR-16 | 4 |
| 54 | 55 | ACSR-16 | 8 |
| 11 | 56 | ACSR-16 | 2 |
| 58 | 57 | ACSR-16 | 7 |
| 49 | 58 | ACSR-16 | 7 |
| Ρυθμιστής Τάσης | | Έτος εγκατάστασης | |
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 10 | 11 | 14 | |
| 31 | 32 | 8 | |
| Συνολικό κόστος επένδυσης: 262 745 € | | | |



Σχήμα 5.8: Η τάση (α.μ.) σε συνάρτηση με την απόσταση των ζυγών από τον Υ/Σ στο δίκτυο 43 ζυγών για το Σενάριο 1 στο τελευταίο έτος σχεδιασμού.

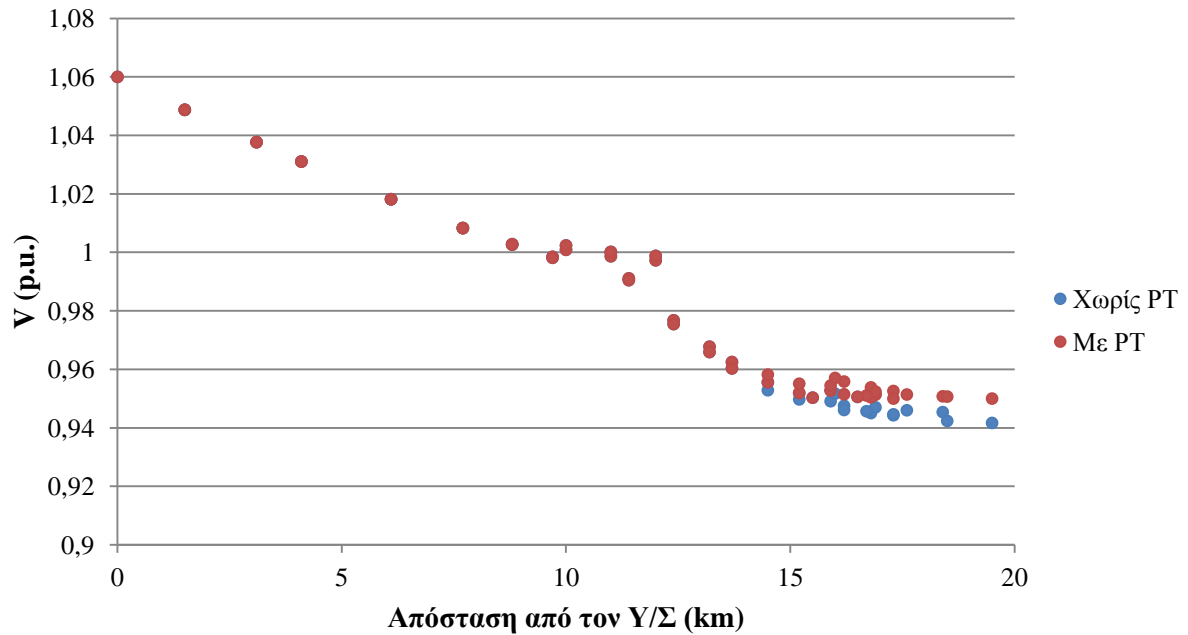
5.4.2.2 Σενάριο 2

Πίνακας 5.20: Αποτελέσματα για το δίκτυο των 43 ζυγών (Σενάριο 2).

| Γραμμές Διανομής | | Θερμική Χωρητικότητα (MVA) | Έτος αναβάθμισης |
|------------------|--------------|-------------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Άφιξης | | |
| 45 | 44 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 43 | 45 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 36 | 46 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 7 |
| 17 | 47 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 47 | 48 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 8 |
| 18 | 49 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 8 |
| 34 | 50 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 52 | 51 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 7 |
| 22 | 52 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 5 |
| Ρυθμιστές Τάσης | | Έτος εγκατάστασης | |
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Άφιξης | | |
| 14 | 15 | 14 | |
| 33 | 34 | 16 | |

Πίνακας 5.21: Διαμόρφωση του δικτύου 43 ζυγών (Σενάριο 2).

| Γραμμές Διανομής | | Τύπος Γραμμής Διανομής | Έτος αναβάθμισης |
|---------------------------------------------|--------------|------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Άφιξης | | |
| 45 | 44 | ACSR-16 | 4 |
| 43 | 45 | ACSR-16 | 4 |
| 36 | 46 | ACSR-16 | 7 |
| 17 | 47 | ACSR-16 | 4 |
| 47 | 48 | ACSR-16 | 8 |
| 18 | 49 | ACSR-16 | 8 |
| 34 | 50 | ACSR-16 | 4 |
| 52 | 51 | ACSR-16 | 7 |
| 22 | 52 | ACSR-16 | 5 |
| Ρυθμιστής Τάσης | | Έτος εγκατάστασης | |
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Άφιξης | | |
| 14 | 15 | 14 | |
| 33 | 34 | 16 | |
| Συνολικό κόστος επένδυσης: 151 361 € | | | |



Σχήμα 5.9: Η τάση (α.μ.) σε συνάρτηση με την απόσταση των ζυγών από τον Υ/Σ στο δίκτυο 43 ζυγών για το Σενάριο 2 στο τελευταίο έτος σχεδιασμού.

5.4.2.3 Σενάριο 3

Πίνακας 5.22: Αποτελέσματα για το δίκτυο των 43 ζυγών (Σενάριο 3).

| Γραμμές Διανομής | | Θερμική Χωρητικότητα (MVA) | Έτος αναβάθμισης |
|------------------|--------------|----------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφιξης | | |
| 45 | 44 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 43 | 45 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 36 | 46 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 7 |
| 17 | 47 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 47 | 48 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 8 |
| 18 | 49 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 8 |

Πίνακας 5.23: Διαμόρφωση του δικτύου 43 ζυγών (Σενάριο 3).

| Γραμμές Διανομής | | Τύπος Γραμμής Διανομής | Έτος αναβάθμισης |
|--------------------------------------------|--------------|------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφιξης | | |
| 45 | 44 | ACSR-16 | 4 |
| 43 | 45 | ACSR-16 | 4 |
| 36 | 46 | ACSR-16 | 7 |
| 17 | 47 | ACSR-16 | 4 |
| 47 | 48 | ACSR-16 | 8 |
| 18 | 49 | ACSR-16 | 8 |
| Συνολικό κόστος επένδυσης: 47 395 € | | | |

5.4.2.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στους Πίνακες 5.24 έως 5.26 δίνεται το κόστος κάθε λύσης και ο χρόνος επίλυσης για κάθε στάδιο της μεθόδου. Στον Πίνακα 5.27 γίνεται σύγκριση της ποσοστιαίας μεταβολής του μέγιστου συνολικού φορτίου (τελευταίο έτος) μεταξύ των σεναρίων σε σχέση με τη μεταβολή του κόστους επενδύσεων. Τέλος, ακολουθούν τα Σχήματα 5.10 έως 5.12, όπου φαίνονται οι αναβαθμίσεις και η επέκταση του δικτύου των 43 ζυγών για κάθε σενάριο που εξετάστηκε.

Πίνακας 5.24: Το κόστος επένδυσης και ο χρόνος επίλυσης για το δίκτυο των 43 ζυγών (Σενάριο 1).

| | | | |
|-----------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Συνολικό κόστος (€) | 262 745 | | |
| Κόστος αναβάθμισης γραμμών (€) | 172 033 | | |
| Κόστος αναβάθμισης Υ/Σ ΜΤ/ΥΤ (€) | - | | |
| Κόστος εγκατάστασης ΡΤ (€) | 90 712 | | |
| Χρόνος Εκτέλεσης (sec) | Στάδιο 1 | Στάδιο 2 | Στάδιο 3 |
| | 344 | 1 | 72 |

Πίνακας 5.25: Το κόστος επένδυσης και ο χρόνος επίλυσης για το δίκτυο των 43 ζυγών (Σενάριο 2).

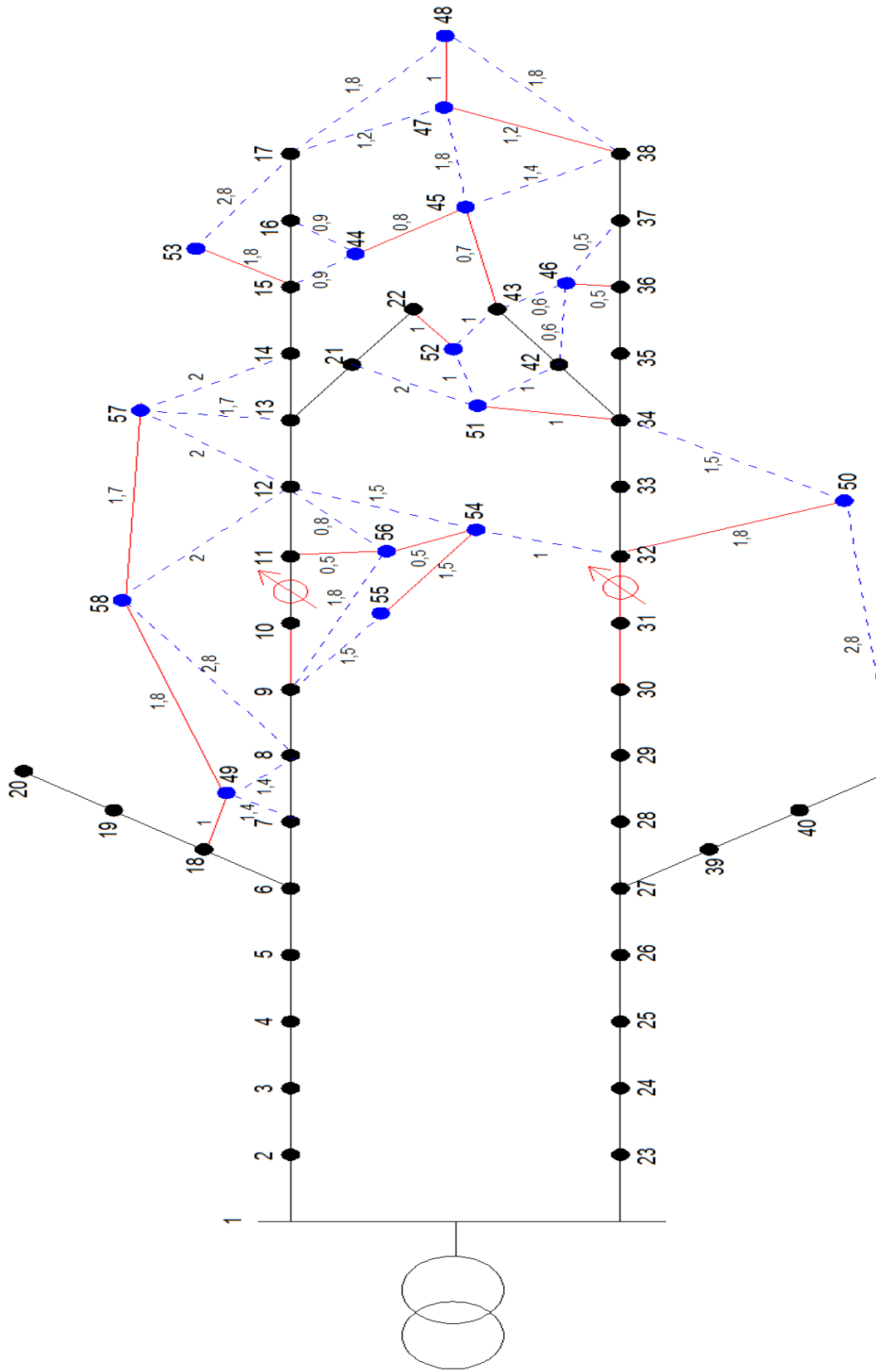
| | | | |
|-----------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Συνολικό κόστος (€) | 151 361 | | |
| Κόστος αναβάθμισης γραμμών (€) | 80 473 | | |
| Κόστος αναβάθμισης Υ/Σ ΜΤ/ΥΤ (€) | - | | |
| Κόστος εγκατάστασης ΡΤ (€) | 70 888 | | |
| Χρόνος Εκτέλεσης (sec) | Στάδιο 1 | Στάδιο 2 | Στάδιο 3 |
| | 9 | 0,3 | 42 |

Πίνακας 5.26: Το κόστος επένδυσης και ο χρόνος επίλυσης για το δίκτυο των 43 ζυγών (Σενάριο 3).

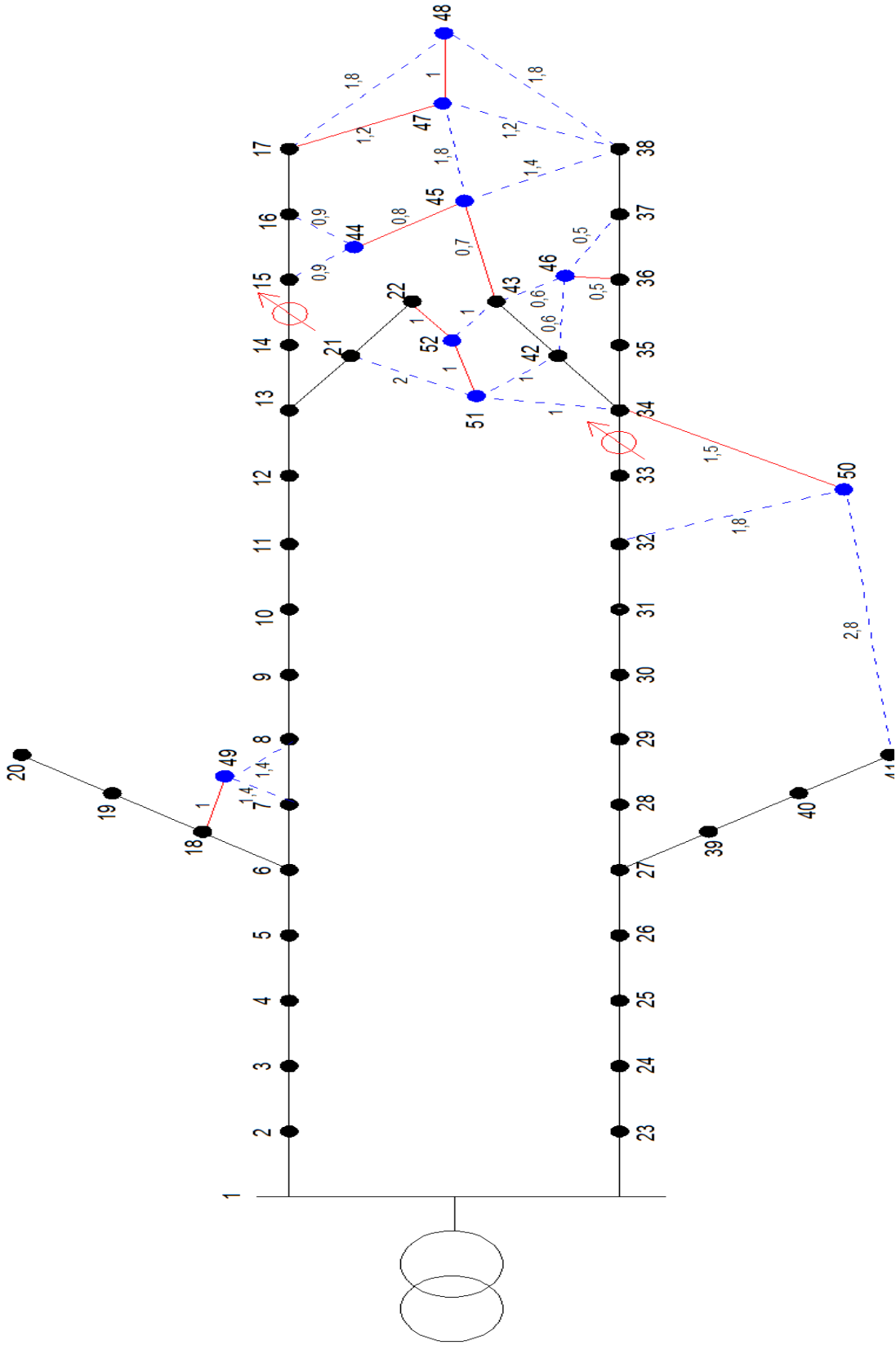
| | | | |
|-----------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Συνολικό κόστος (€) | 47 395 | | |
| Κόστος αναβάθμισης γραμμών (€) | 47 395 | | |
| Κόστος αναβάθμισης Υ/Σ ΜΤ/ΥΤ (€) | - | | |
| Κόστος εγκατάστασης ΡΤ (€) | - | | |
| Χρόνος Εκτέλεσης (sec) | Στάδιο 1 | Στάδιο 2 | Στάδιο 3 |
| | 4 | 0,3 | 26 |

Πίνακας 5.27 Σύγκριση της ποσοστιαίας μεταβολής του μέγιστου συνολικού φορτίου (τελευταίο έτος) με την ποσοστιαία μεταβολή του κόστους επένδυσης για το δίκτυο των 43 ζυγών.

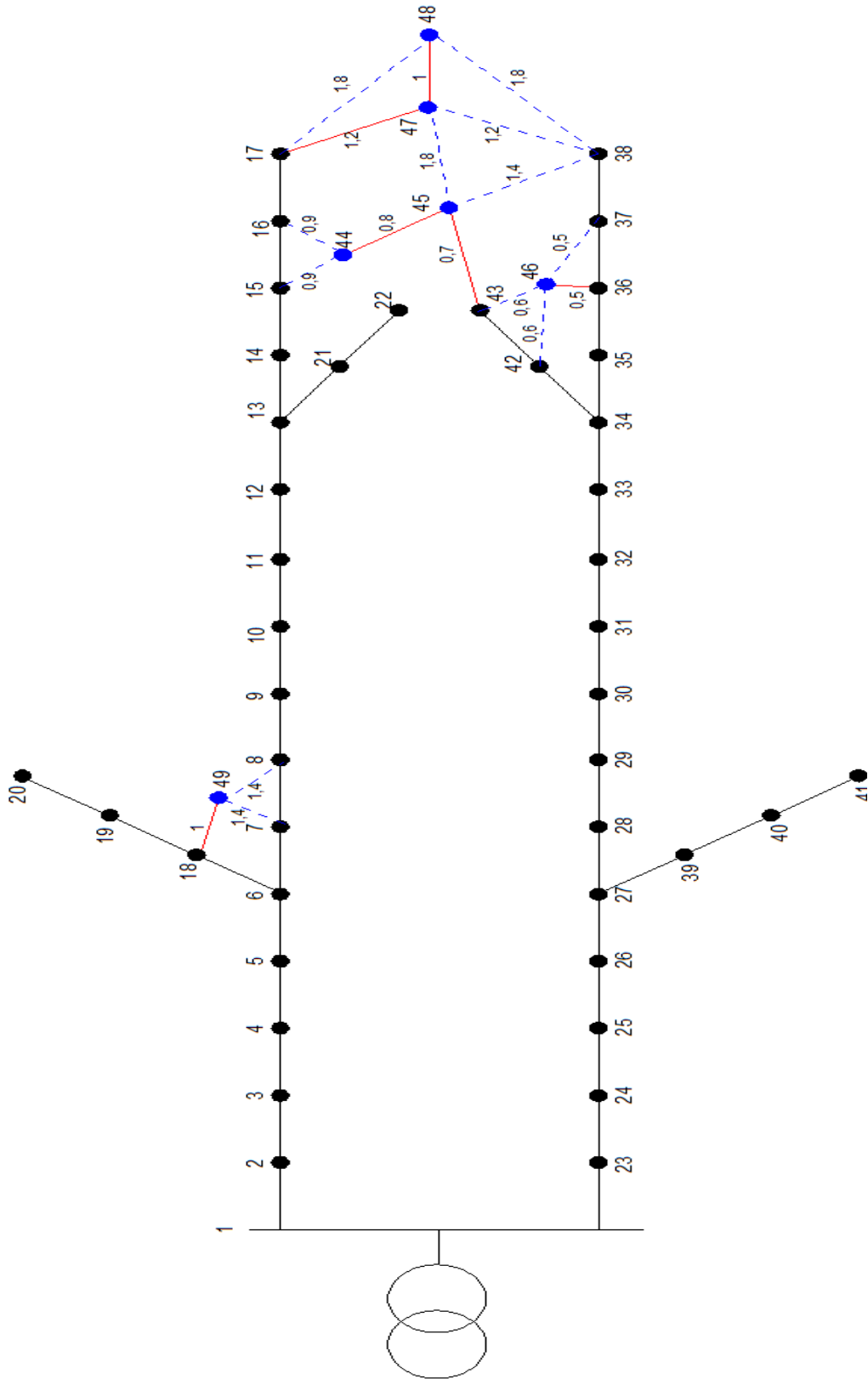
| | Μέγιστο συνολικό φορτίο (MVA) | % Μεταβολή | Συνολικό κόστος επένδυσης | % Μεταβολή |
|------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------|
| Σενάριο 3 | 14,95 | - | 47 395 | - |
| Σενάριο 2 | 18,46 | 23,5 % | 151 361 | 219,4 % |
| Σενάριο 1 | 23,84 | 59,5 % | 262 745 | 454,4 % |



Σχήμα 5.10: Οι αναβαθμίσεις και η διαμόρφωση του δικτύου των 43 ζυγών για το Σενάριο 1. Οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τους εναλλακτικούς τρόπους διάσυνδεσης των καινούριων φορτίων (μπλε χρώμα) και οι κόκκινες γραμμές δείχνουν ποιες γραμμές κατασκευάζονται ή ενισχύονται.



Σχήμα 5.11: Οι αναβαθμίσεις και η διαμόρφωση του δικτύου των 43 ζυγών για το Σενάριο 2. Οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τους εναλλακτικούς τρόπους διασύνδεσης των καινούριων φορτίων (μπλε χρώμα) και οι κόκκινες γραμμές δείχνουν ποιες γραμμές κατασκευάζονται ή ενισχύονται.



Σχήμα 5.12: Οι αναβαθμίσεις και η διαμόρφωση του δικτύου των 43 ζυγών για το Σενάριο 3. Οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τους εναλλακτικούς τρόπους διασύνδεσης των καινούριων φορτίων (μπλε χρώμα) και οι κόκκινες γραμμές δείχνουν ποιες γραμμές κατασκευάζονται ή ενισχύονται.

5.5 ΔΙΚΤΥΟ 267 ΖΥΓΩΝ

Για την εφαρμογή στο δίκτυο των 267 ζυγών, το οποίο αποτελείται από δύο κύριες γραμμές διανομής, αγνοούνται οι απώλειες των γραμμών διανομής και επομένως οι ροές ισχύος υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.3) και (4.4) και χρησιμοποιούνται οι περιορισμοί (4.14) και (4.15). Τα τρία διαφορετικά σενάρια πρόβλεψης της αύξησης του φορτίου είναι:

1. **Σενάριο 1:** Η ετήσια αύξηση του φορτίου είναι 3% και προστίθενται 21 καινούρια φορτία.
2. **Σενάριο 2:** Η ετήσια αύξηση του φορτίου είναι 3% στο πρώτο μισό της περιόδου μελέτης και 1% στο δεύτερο μισό. Προστίθενται 13 καινούρια φορτία.
3. **Σενάριο 3:** Η ετήσια αύξηση του φορτίου είναι 1% και προστίθενται 8 καινούρια φορτία.

5.5.1 Δεδομένα

Παρουσιάζονται τα δεδομένα για το δίκτυο διανομής 20 kV των 267 ζυγών, τα φορτία που θα προστεθούν σε αυτό και οι γραμμές που είναι υποψήφιες για την επέκτασή του. Το δίκτυο έχει δύο κύριες γραμμές διανομής και ο Υ/Σ ΜΤ/ΥΤ έχει μέγιστη χωρητικότητα 25 MVA. Οι αγωγοί ΜΤ που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο είναι αυτοί που δίνονται στον Πίνακα 5.1. Τα στοιχεία που αφορούν τις γραμμές διανομής του αρχικού δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.28. Στον Πίνακα 5.29 φαίνεται η ενεργός και η άεργος ισχύς των φορτίων του αρχικού δικτύου (έτος 0) και στον Πίνακα 5.30 τα φορτία που αναμένεται να προστεθούν και το έτος πρόσθεσής τους. Στον Πίνακα 5.31 παρουσιάζονται οι γραμμές διανομής για την επέκταση του δικτύου που είναι υποψήφιες για την εξυπηρέτηση των φορτίων.

Πίνακας 5.28: Οι γραμμές διανομής του δικτύου 267 ζυγών στο έτος 0.

| Ζυγός αναχώρησης | Ζυγός άφιξης | Τύπος | Μήκος (km) | Ζυγός αναχώρησης | Ζυγός άφιξης | Τύπος | Μήκος (km) |
|------------------|--------------|-------|------------|------------------|--------------|-------|------------|
| 1 | 2 | 3 | 0,404 | 49 | 50 | 2 | 0,227 |
| 2 | 3 | 2 | 0,382 | 49 | 51 | 2 | 0,342 |
| 2 | 4 | 3 | 0,126 | 51 | 52 | 1 | 0,343 |
| 4 | 5 | 2 | 0,015 | 51 | 53 | 1 | 1,868 |
| 4 | 6 | 3 | 0,465 | 53 | 54 | 1 | 0,121 |
| 6 | 7 | 2 | 0,110 | 53 | 55 | 1 | 3,373 |
| 6 | 8 | 3 | 0,304 | 55 | 56 | 1 | 1,470 |
| 8 | 9 | 2 | 0,280 | 55 | 57 | 1 | 0,140 |
| 8 | 10 | 3 | 2,542 | 57 | 58 | 2 | 0,046 |
| 10 | 11 | 1 | 0,082 | 57 | 59 | 2 | 1,236 |
| 10 | 12 | 3 | 1,047 | 59 | 60 | 1 | 0,009 |
| 12 | 13 | 2 | 0,088 | 59 | 61 | 1 | 0,544 |
| 12 | 14 | 3 | 0,096 | 46 | 62 | 3 | 0,913 |
| 14 | 15 | 1 | 0,175 | 62 | 63 | 1 | 0,091 |
| 14 | 16 | 3 | 0,116 | 62 | 64 | 3 | 1,578 |
| 16 | 17 | 2 | 0,040 | 64 | 65 | 3 | 0,373 |
| 16 | 18 | 3 | 1,887 | 65 | 66 | 1 | 0,369 |
| 18 | 19 | 3 | 3,168 | 65 | 67 | 1 | 0,685 |
| 19 | 20 | 2 | 0,956 | 67 | 68 | 1 | 0,663 |
| 19 | 21 | 3 | 0,908 | 68 | 69 | 1 | 1,192 |
| 21 | 22 | 2 | 0,154 | 67 | 70 | 1 | 0,303 |
| 21 | 23 | 3 | 1,075 | 70 | 71 | 1 | 1,258 |
| 23 | 24 | 1 | 1,514 | 71 | 72 | 1 | 0,701 |
| 23 | 25 | 3 | 0,100 | 64 | 73 | 3 | 7,111 |
| 25 | 26 | 1 | 3,191 | 73 | 74 | 1 | 0,263 |
| 26 | 27 | 1 | 1,611 | 73 | 75 | 3 | 0,403 |
| 27 | 28 | 1 | 0,507 | 75 | 76 | 1 | 0,115 |
| 27 | 29 | 1 | 0,097 | 75 | 77 | 3 | 2,255 |
| 26 | 30 | 1 | 1,965 | 77 | 78 | 1 | 1,397 |
| 30 | 31 | 2 | 0,512 | 78 | 79 | 1 | 0,314 |
| 31 | 32 | 1 | 0,025 | 78 | 80 | 1 | 0,100 |
| 31 | 33 | 1 | 0,106 | 80 | 81 | 1 | 0,059 |
| 30 | 34 | 1 | 1,677 | 80 | 82 | 1 | 0,236 |
| 34 | 35 | 1 | 0,757 | 82 | 83 | 1 | 0,332 |
| 34 | 36 | 1 | 0,308 | 83 | 84 | 1 | 1,314 |
| 36 | 37 | 1 | 0,196 | 82 | 85 | 1 | 0,031 |
| 37 | 38 | 1 | 0,516 | 77 | 86 | 3 | 0,135 |
| 36 | 39 | 1 | 0,217 | 86 | 87 | 1 | 0,171 |
| 25 | 40 | 3 | 1,167 | 86 | 88 | 3 | 0,607 |
| 40 | 41 | 1 | 0,257 | 88 | 89 | 1 | 0,133 |
| 40 | 42 | 3 | 0,388 | 88 | 90 | 3 | 2,095 |
| 42 | 43 | 3 | 2,687 | 90 | 91 | 1 | 0,182 |
| 43 | 44 | 1 | 2,443 | 90 | 92 | 3 | 0,210 |
| 43 | 45 | 2 | 0,117 | 92 | 93 | 1 | 0,508 |
| 42 | 46 | 3 | 0,203 | 93 | 94 | 1 | 1,641 |
| 46 | 47 | 2 | 0,218 | 92 | 95 | 3 | 0,150 |
| 47 | 48 | 2 | 0,091 | 95 | 96 | 1 | 0,122 |
| 47 | 49 | 2 | 0,102 | 95 | 97 | 3 | 0,903 |

Πίνακας 5.28: (Συνέχεια...)

| | | | | | | | |
|-----|-----|---|-------|-----|-----|---|-------|
| 97 | 98 | 3 | 0,073 | 147 | 148 | 2 | 0,420 |
| 97 | 99 | 3 | 0,878 | 147 | 149 | 2 | 0,466 |
| 99 | 100 | 1 | 0,021 | 149 | 150 | 2 | 0,100 |
| 99 | 101 | 2 | 0,728 | 150 | 151 | 2 | 0,094 |
| 101 | 102 | 1 | 0,058 | 150 | 152 | 2 | 0,320 |
| 101 | 103 | 2 | 2,759 | 152 | 153 | 2 | 0,008 |
| 1 | 104 | 3 | 0,058 | 152 | 154 | 2 | 0,696 |
| 104 | 105 | 2 | 0,010 | 154 | 155 | 2 | 0,215 |
| 104 | 106 | 3 | 0,546 | 154 | 156 | 2 | 0,377 |
| 106 | 107 | 2 | 0,010 | 156 | 157 | 2 | 0,016 |
| 106 | 108 | 2 | 0,870 | 156 | 158 | 1 | 0,005 |
| 108 | 109 | 2 | 0,360 | 156 | 159 | 2 | 0,488 |
| 108 | 110 | 2 | 0,503 | 149 | 160 | 2 | 0,655 |
| 110 | 111 | 2 | 0,261 | 160 | 161 | 2 | 0,028 |
| 106 | 112 | 3 | 0,768 | 160 | 162 | 2 | 0,384 |
| 112 | 113 | 2 | 0,243 | 162 | 163 | 2 | 0,041 |
| 112 | 114 | 3 | 0,150 | 162 | 164 | 2 | 1,007 |
| 114 | 115 | 2 | 0,010 | 164 | 165 | 1 | 0,365 |
| 114 | 116 | 3 | 0,087 | 165 | 166 | 1 | 1,008 |
| 116 | 117 | 2 | 0,072 | 164 | 167 | 2 | 0,523 |
| 116 | 118 | 3 | 0,150 | 167 | 168 | 1 | 0,527 |
| 118 | 119 | 1 | 0,165 | 167 | 169 | 2 | 0,626 |
| 118 | 120 | 3 | 0,108 | 169 | 170 | 1 | 1,417 |
| 120 | 121 | 1 | 0,284 | 170 | 171 | 1 | 0,872 |
| 120 | 122 | 3 | 0,075 | 170 | 172 | 1 | 0,063 |
| 122 | 123 | 1 | 0,010 | 170 | 173 | 2 | 0,655 |
| 123 | 124 | 1 | 0,282 | 173 | 174 | 1 | 0,083 |
| 122 | 125 | 3 | 0,150 | 173 | 175 | 1 | 0,236 |
| 125 | 126 | 1 | 0,301 | 175 | 176 | 1 | 0,080 |
| 125 | 127 | 3 | 0,150 | 175 | 177 | 2 | 1,370 |
| 127 | 128 | 3 | 0,810 | 177 | 178 | 2 | 0,540 |
| 127 | 129 | 3 | 0,139 | 177 | 179 | 2 | 0,784 |
| 129 | 130 | 1 | 0,067 | 169 | 180 | 2 | 0,626 |
| 129 | 131 | 3 | 0,154 | 180 | 181 | 2 | 0,197 |
| 131 | 132 | 3 | 0,585 | 181 | 182 | 2 | 0,120 |
| 131 | 133 | 3 | 0,105 | 181 | 183 | 1 | 0,158 |
| 133 | 134 | 3 | 0,116 | 180 | 184 | 2 | 0,318 |
| 133 | 135 | 3 | 0,703 | 184 | 185 | 1 | 1,436 |
| 135 | 136 | 3 | 0,035 | 184 | 186 | 2 | 0,564 |
| 135 | 137 | 3 | 0,412 | 186 | 187 | 2 | 3,872 |
| 137 | 138 | 3 | 0,143 | 187 | 188 | 2 | 0,048 |
| 137 | 139 | 3 | 0,203 | 187 | 189 | 1 | 0,698 |
| 139 | 140 | 3 | 0,208 | 189 | 190 | 1 | 0,025 |
| 139 | 141 | 3 | 0,494 | 189 | 191 | 1 | 1,318 |
| 141 | 142 | 3 | 0,081 | 191 | 192 | 2 | 0,376 |
| 141 | 143 | 3 | 0,337 | 191 | 193 | 1 | 0,495 |
| 143 | 144 | 2 | 0,746 | 193 | 194 | 1 | 0,218 |
| 143 | 145 | 3 | 0,008 | 193 | 195 | 2 | 0,753 |
| 141 | 146 | 2 | 0,055 | 195 | 196 | 1 | 0,110 |
| 141 | 147 | 2 | 1,186 | 195 | 197 | 1 | 0,981 |

Πίνακας 5.28: (Συνέχεια...)

| | | | | | | | |
|-----|-----|---|-------|-----|-----|---|-------|
| 197 | 198 | 2 | 0,252 | 231 | 233 | 2 | 0,396 |
| 197 | 199 | 1 | 0,865 | 233 | 234 | 2 | 0,550 |
| 195 | 200 | 2 | 5,360 | 234 | 235 | 2 | 0,699 |
| 200 | 201 | 2 | 0,108 | 233 | 236 | 2 | 0,380 |
| 186 | 202 | 2 | 2,587 | 236 | 237 | 2 | 1,637 |
| 202 | 203 | 2 | 0,025 | 237 | 238 | 2 | 0,093 |
| 202 | 204 | 2 | 1,318 | 237 | 239 | 2 | 0,300 |
| 204 | 205 | 2 | 0,605 | 239 | 240 | 2 | 0,598 |
| 204 | 206 | 2 | 0,295 | 239 | 241 | 2 | 3,103 |
| 206 | 207 | 2 | 0,019 | 241 | 242 | 2 | 0,458 |
| 206 | 208 | 2 | 0,200 | 241 | 243 | 2 | 0,823 |
| 208 | 209 | 2 | 0,050 | 243 | 244 | 2 | 0,694 |
| 208 | 210 | 2 | 0,704 | 243 | 245 | 2 | 1,647 |
| 210 | 211 | 2 | 0,455 | 236 | 246 | 2 | 0,288 |
| 210 | 212 | 2 | 0,260 | 246 | 247 | 2 | 0,100 |
| 212 | 213 | 2 | 0,845 | 246 | 248 | 2 | 0,500 |
| 212 | 214 | 2 | 0,178 | 248 | 249 | 2 | 0,420 |
| 214 | 215 | 2 | 0,145 | 248 | 250 | 2 | 0,960 |
| 214 | 216 | 2 | 0,520 | 250 | 251 | 2 | 0,059 |
| 202 | 217 | 2 | 0,104 | 250 | 252 | 2 | 0,417 |
| 217 | 218 | 2 | 0,050 | 252 | 253 | 2 | 0,090 |
| 217 | 219 | 1 | 0,150 | 253 | 254 | 2 | 0,405 |
| 217 | 220 | 2 | 0,651 | 250 | 255 | 2 | 0,394 |
| 220 | 221 | 1 | 0,113 | 255 | 256 | 2 | 0,242 |
| 220 | 222 | 2 | 0,445 | 255 | 257 | 2 | 0,911 |
| 222 | 223 | 2 | 0,109 | 257 | 258 | 2 | 0,091 |
| 222 | 224 | 2 | 0,175 | 257 | 259 | 2 | 1,065 |
| 224 | 225 | 2 | 0,919 | 255 | 260 | 1 | 0,381 |
| 224 | 226 | 2 | 2,548 | 260 | 261 | 1 | 0,119 |
| 226 | 227 | 2 | 0,594 | 260 | 262 | 1 | 1,018 |
| 226 | 228 | 2 | 0,610 | 262 | 263 | 2 | 0,193 |
| 228 | 229 | 2 | 0,196 | 263 | 264 | 2 | 0,165 |
| 228 | 230 | 2 | 0,091 | 263 | 265 | 2 | 1,912 |
| 228 | 231 | 2 | 0,506 | 262 | 266 | 2 | 1,561 |
| 231 | 232 | 2 | 0,058 | 266 | 267 | 2 | 1,300 |

Πίνακας 5.29: Η ενεργός και η άεργος ισχύς των φορτίων του δικτύου 267 ζυγών στο έτος 0.

| Ζυγός | P (MW) | Q(MVAr) | Ζυγός | P (MW) | Q(MVAr) |
|-------|--------|---------|-------|--------|---------|
| 1 | 0,000 | 0,000 | 51 | 0,000 | 0,000 |
| 2 | 0,000 | 0,000 | 52 | 0,076 | 0,025 |
| 3 | 0,190 | 0,062 | 53 | 0,000 | 0,000 |
| 4 | 0,000 | 0,000 | 54 | 0,190 | 0,062 |
| 5 | 0,038 | 0,012 | 55 | 0,000 | 0,000 |
| 6 | 0,000 | 0,000 | 56 | 0,038 | 0,012 |
| 7 | 0,456 | 0,150 | 57 | 0,000 | 0,000 |
| 8 | 0,000 | 0,000 | 58 | 0,038 | 0,012 |
| 9 | 0,038 | 0,012 | 59 | 0,000 | 0,000 |
| 10 | 0,000 | 0,000 | 60 | 0,038 | 0,012 |
| 11 | 0,038 | 0,012 | 61 | 0,038 | 0,012 |
| 12 | 0,000 | 0,000 | 62 | 0,000 | 0,000 |
| 13 | 0,122 | 0,040 | 63 | 0,122 | 0,040 |
| 14 | 0,000 | 0,000 | 64 | 0,000 | 0,000 |
| 15 | 0,122 | 0,040 | 65 | 0,000 | 0,000 |
| 16 | 0,000 | 0,000 | 66 | 0,038 | 0,012 |
| 17 | 0,076 | 0,025 | 67 | 0,000 | 0,000 |
| 18 | 0,000 | 0,000 | 68 | 0,038 | 0,012 |
| 19 | 0,000 | 0,000 | 69 | 0,038 | 0,012 |
| 20 | 0,038 | 0,012 | 70 | 0,114 | 0,037 |
| 21 | 0,000 | 0,000 | 71 | 0,114 | 0,037 |
| 22 | 0,076 | 0,025 | 72 | 0,114 | 0,037 |
| 23 | 0,000 | 0,000 | 73 | 0,000 | 0,000 |
| 24 | 0,076 | 0,025 | 74 | 0,076 | 0,025 |
| 25 | 0,000 | 0,000 | 75 | 0,000 | 0,000 |
| 26 | 0,000 | 0,000 | 76 | 0,076 | 0,025 |
| 27 | 0,000 | 0,000 | 77 | 0,000 | 0,000 |
| 28 | 0,038 | 0,012 | 78 | 0,000 | 0,000 |
| 29 | 0,122 | 0,040 | 79 | 0,076 | 0,025 |
| 30 | 0,000 | 0,000 | 80 | 0,000 | 0,000 |
| 31 | 0,000 | 0,000 | 81 | 0,190 | 0,062 |
| 32 | 0,076 | 0,025 | 82 | 0,000 | 0,000 |
| 33 | 0,122 | 0,040 | 83 | 0,076 | 0,025 |
| 34 | 0,000 | 0,000 | 84 | 0,038 | 0,012 |
| 35 | 0,076 | 0,025 | 85 | 0,076 | 0,025 |
| 36 | 0,000 | 0,000 | 86 | 0,000 | 0,000 |
| 37 | 0,038 | 0,012 | 87 | 0,038 | 0,012 |
| 38 | 0,076 | 0,025 | 88 | 0,000 | 0,000 |
| 39 | 0,038 | 0,012 | 89 | 0,038 | 0,012 |
| 40 | 0,000 | 0,000 | 90 | 0,000 | 0,000 |
| 41 | 0,076 | 0,025 | 91 | 0,038 | 0,012 |
| 42 | 0,000 | 0,000 | 92 | 0,000 | 0,000 |
| 43 | 0,000 | 0,000 | 93 | 0,076 | 0,025 |
| 44 | 0,038 | 0,012 | 94 | 0,122 | 0,040 |
| 45 | 0,608 | 0,200 | 95 | 0,000 | 0,000 |
| 46 | 0,000 | 0,000 | 96 | 0,076 | 0,025 |
| 47 | 0,000 | 0,000 | 97 | 0,000 | 0,000 |
| 48 | 0,076 | 0,025 | 98 | 0,000 | 0,000 |
| 49 | 0,000 | 0,000 | 99 | 0,000 | 0,000 |
| 50 | 0,114 | 0,037 | 100 | 0,038 | 0,012 |

Πίνακας 5.29: (Συνέχεια...)

| | | | | | |
|-----|-------|-------|-----|-------|-------|
| 101 | 0,000 | 0,000 | 152 | 0,000 | 0,000 |
| 102 | 0,038 | 0,012 | 153 | 0,076 | 0,025 |
| 103 | 0,190 | 0,062 | 154 | 0,000 | 0,000 |
| 104 | 0,000 | 0,000 | 155 | 0,076 | 0,025 |
| 105 | 0,122 | 0,040 | 156 | 0,000 | 0,000 |
| 106 | 0,000 | 0,000 | 157 | 0,076 | 0,025 |
| 107 | 0,038 | 0,012 | 158 | 0,038 | 0,012 |
| 108 | 0,000 | 0,000 | 159 | 0,076 | 0,025 |
| 109 | 0,038 | 0,012 | 160 | 0,000 | 0,000 |
| 110 | 0,076 | 0,025 | 161 | 0,038 | 0,012 |
| 111 | 0,076 | 0,025 | 162 | 0,000 | 0,000 |
| 112 | 0,000 | 0,000 | 163 | 0,038 | 0,012 |
| 113 | 0,038 | 0,012 | 164 | 0,000 | 0,000 |
| 114 | 0,000 | 0,000 | 165 | 0,038 | 0,012 |
| 115 | 0,076 | 0,025 | 166 | 0,076 | 0,025 |
| 116 | 0,000 | 0,000 | 167 | 0,000 | 0,000 |
| 117 | 0,122 | 0,040 | 168 | 0,038 | 0,012 |
| 118 | 0,000 | 0,000 | 169 | 0,000 | 0,000 |
| 119 | 0,122 | 0,040 | 170 | 0,000 | 0,000 |
| 120 | 0,000 | 0,000 | 171 | 0,038 | 0,012 |
| 121 | 0,076 | 0,025 | 172 | 0,038 | 0,012 |
| 122 | 0,000 | 0,000 | 173 | 0,000 | 0,000 |
| 123 | 0,076 | 0,025 | 174 | 0,076 | 0,025 |
| 124 | 0,038 | 0,012 | 175 | 0,000 | 0,000 |
| 125 | 0,000 | 0,000 | 176 | 0,038 | 0,012 |
| 126 | 0,076 | 0,025 | 177 | 0,000 | 0,000 |
| 127 | 0,000 | 0,000 | 178 | 0,076 | 0,025 |
| 128 | 0,038 | 0,012 | 179 | 0,038 | 0,012 |
| 129 | 0,000 | 0,000 | 180 | 0,000 | 0,000 |
| 130 | 0,076 | 0,025 | 181 | 0,000 | 0,000 |
| 131 | 0,000 | 0,000 | 182 | 0,076 | 0,025 |
| 132 | 0,038 | 0,012 | 183 | 0,076 | 0,025 |
| 133 | 0,000 | 0,000 | 184 | 0,000 | 0,000 |
| 134 | 0,076 | 0,025 | 185 | 0,038 | 0,012 |
| 135 | 0,000 | 0,000 | 186 | 0,038 | 0,012 |
| 136 | 0,076 | 0,025 | 187 | 0,000 | 0,000 |
| 137 | 0,000 | 0,000 | 188 | 0,019 | 0,006 |
| 138 | 0,076 | 0,025 | 189 | 0,000 | 0,000 |
| 139 | 0,000 | 0,000 | 190 | 0,038 | 0,012 |
| 140 | 0,038 | 0,012 | 191 | 0,000 | 0,000 |
| 141 | 0,000 | 0,000 | 192 | 0,038 | 0,012 |
| 142 | 0,038 | 0,012 | 193 | 0,000 | 0,000 |
| 143 | 0,000 | 0,000 | 194 | 0,076 | 0,025 |
| 144 | 0,076 | 0,025 | 195 | 0,000 | 0,000 |
| 145 | 0,038 | 0,012 | 196 | 0,019 | 0,006 |
| 146 | 0,038 | 0,012 | 197 | 0,000 | 0,000 |
| 147 | 0,000 | 0,000 | 198 | 0,038 | 0,012 |
| 148 | 0,038 | 0,012 | 199 | 0,038 | 0,012 |
| 149 | 0,000 | 0,000 | 200 | 0,000 | 0,000 |
| 150 | 0,000 | 0,000 | 201 | 0,000 | 0,000 |
| 151 | 0,076 | 0,025 | 202 | 0,000 | 0,000 |

Πίνακας 5.29: (Συνέχεια...)

| | | | | | |
|-----|-------|-------|-----|-------|-------|
| 203 | 0,000 | 0,000 | 236 | 0,000 | 0,000 |
| 204 | 0,000 | 0,000 | 237 | 0,000 | 0,000 |
| 205 | 0,038 | 0,012 | 238 | 0,000 | 0,000 |
| 206 | 0,000 | 0,000 | 239 | 0,000 | 0,000 |
| 207 | 0,190 | 0,062 | 240 | 0,038 | 0,012 |
| 208 | 0,000 | 0,000 | 241 | 0,000 | 0,000 |
| 209 | 0,038 | 0,012 | 242 | 0,122 | 0,040 |
| 210 | 0,000 | 0,000 | 243 | 0,000 | 0,000 |
| 211 | 0,038 | 0,012 | 244 | 0,038 | 0,012 |
| 212 | 0,000 | 0,000 | 245 | 0,076 | 0,025 |
| 213 | 0,038 | 0,012 | 246 | 0,000 | 0,000 |
| 214 | 0,000 | 0,000 | 247 | 0,038 | 0,012 |
| 215 | 0,558 | 0,183 | 248 | 0,000 | 0,000 |
| 216 | 0,038 | 0,012 | 249 | 0,038 | 0,012 |
| 217 | 0,000 | 0,000 | 250 | 0,000 | 0,000 |
| 218 | 0,000 | 0,000 | 251 | 0,038 | 0,012 |
| 219 | 0,000 | 0,000 | 252 | 0,038 | 0,012 |
| 220 | 0,000 | 0,000 | 253 | 0,000 | 0,000 |
| 221 | 0,076 | 0,025 | 254 | 0,122 | 0,040 |
| 222 | 0,000 | 0,000 | 255 | 0,000 | 0,000 |
| 223 | 0,038 | 0,012 | 256 | 0,076 | 0,025 |
| 224 | 0,000 | 0,000 | 257 | 0,000 | 0,000 |
| 225 | 0,000 | 0,000 | 258 | 0,000 | 0,000 |
| 226 | 0,000 | 0,000 | 259 | 0,000 | 0,000 |
| 227 | 0,000 | 0,000 | 260 | 0,000 | 0,000 |
| 228 | 0,000 | 0,000 | 261 | 0,038 | 0,012 |
| 229 | 0,000 | 0,000 | 262 | 0,000 | 0,000 |
| 230 | 0,038 | 0,012 | 263 | 0,000 | 0,000 |
| 231 | 0,000 | 0,000 | 264 | 0,038 | 0,012 |
| 232 | 0,038 | 0,012 | 265 | 0,076 | 0,025 |
| 233 | 0,000 | 0,000 | 266 | 0,000 | 0,000 |
| 234 | 0,076 | 0,025 | 267 | 0,038 | 0,012 |
| 235 | 0,038 | 0,012 | | | |

Πίνακας 5.30: Η ενεργός και η άεργος ισχύς των φορτίων που θα προστεθούν στο δίκτυο 267 ζυγών.

| Ζυγός | P (MW) | Q(MVAr) | Έτος |
|--------------|---------------|----------------|-------------|
| 268 | 0,038 | 0,012 | 2 |
| 269 | 0,076 | 0,025 | 2 |
| 270 | 0,038 | 0,012 | 2 |
| 271 | 0,038 | 0,012 | 4 |
| 272 | 0,076 | 0,025 | 6 |
| 273 | 0,038 | 0,012 | 6 |
| 274 | 0,076 | 0,025 | 5 |
| 275 | 0,038 | 0,012 | 2 |
| 276 | 0,038 | 0,012 | 4 |
| 277 | 0,038 | 0,012 | 2 |
| 278 | 0,038 | 0,012 | 2 |
| 279 | 0,038 | 0,012 | 4 |
| 280 | 0,076 | 0,025 | 2 |
| 281 | 0,038 | 0,012 | 2 |
| 282 | 0,038 | 0,012 | 2 |
| 283 | 0,038 | 0,012 | 2 |
| 284 | 0,038 | 0,012 | 4 |
| 285 | 0,122 | 0,040 | 6 |
| 286 | 0,076 | 0,025 | 4 |
| 287 | 0,038 | 0,012 | 6 |
| 288 | 0,038 | 0,012 | 6 |

Πίνακας 5.31: Οι γραμμές διανομής που είναι υποψήφιες για την επέκταση του δικτύου 267 ζυγών.

| Ζυγός αναχώρησης | Ζυγός άφιξης | Μήκος (km) |
|-------------------------|---------------------|-------------------|
| 35 | 268 | 1,000 |
| 38 | 268 | 1,500 |
| 216 | 268 | 1,260 |
| 268 | 269 | 1,230 |
| 216 | 269 | 1,330 |
| 215 | 269 | 1,530 |
| 69 | 270 | 1,265 |
| 71 | 270 | 1,487 |
| 270 | 271 | 1,145 |
| 271 | 272 | 1,200 |
| 38 | 272 | 1,620 |
| 272 | 273 | 2,106 |
| 269 | 273 | 1,530 |
| 60 | 274 | 1,095 |
| 61 | 274 | 1,098 |
| 274 | 275 | 1,025 |
| 61 | 275 | 0,762 |
| 74 | 276 | 1,045 |
| 76 | 276 | 0,952 |
| 253 | 277 | 2,096 |
| 200 | 277 | 1,365 |
| 253 | 278 | 1,527 |
| 277 | 278 | 1,455 |
| 278 | 279 | 1,541 |
| 277 | 279 | 1,712 |
| 201 | 279 | 2,138 |
| 84 | 280 | 1,281 |
| 245 | 280 | 1,903 |
| 280 | 281 | 1,419 |
| 245 | 281 | 0,846 |
| 245 | 282 | 1,788 |
| 265 | 282 | 1,566 |
| 84 | 283 | 0,818 |
| 103 | 283 | 2,249 |
| 283 | 284 | 1,380 |
| 281 | 284 | 1,449 |
| 284 | 285 | 1,780 |
| 282 | 285 | 1,281 |
| 283 | 286 | 1,212 |
| 284 | 286 | 1,161 |
| 286 | 287 | 2,465 |
| 284 | 287 | 2,138 |
| 285 | 287 | 0,980 |
| 265 | 287 | 3,068 |
| 287 | 288 | 2,883 |
| 103 | 288 | 0,142 |

5.5.2 Αποτελέσματα

Ακολουθούν οι Πίνακες 5.32 έως 5.37 με τα αποτελέσματα των αναβαθμίσεων των στοιχείων του δικτύου για τα τρία διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν. Στους Πίνακες 5.32, 5.34 και 5.36 φαίνεται για κάθε γραμμή διανομής η ελάχιστη αύξηση της χωρητικότητας που απαιτείται, η οποία αυξάνεται με βήμα 2 MVA, το έτος που απαιτείται να γίνει η αναβάθμιση και στο τέλος των πινάκων φαίνονται οι γραμμές διανομής, όπου αποφασίζεται να γίνει η εγκατάσταση PT, καθώς και το έτος που γίνεται η εγκατάστασή τους. Στους Πίνακες 5.33, 5.35 και 5.37 δίνεται η τελική διαμόρφωση του δικτύου και στην τελευταία γραμμή το συνολικό κόστος των επενδύσεων σε καθαρή παρούσα αξία. Στα Σχήματα 5.13 και 5.14 φαίνονται οι τάσεις στους ζυγούς πριν και μετά την εγκατάσταση PT για το τελευταίο έτος του σχεδιασμού.

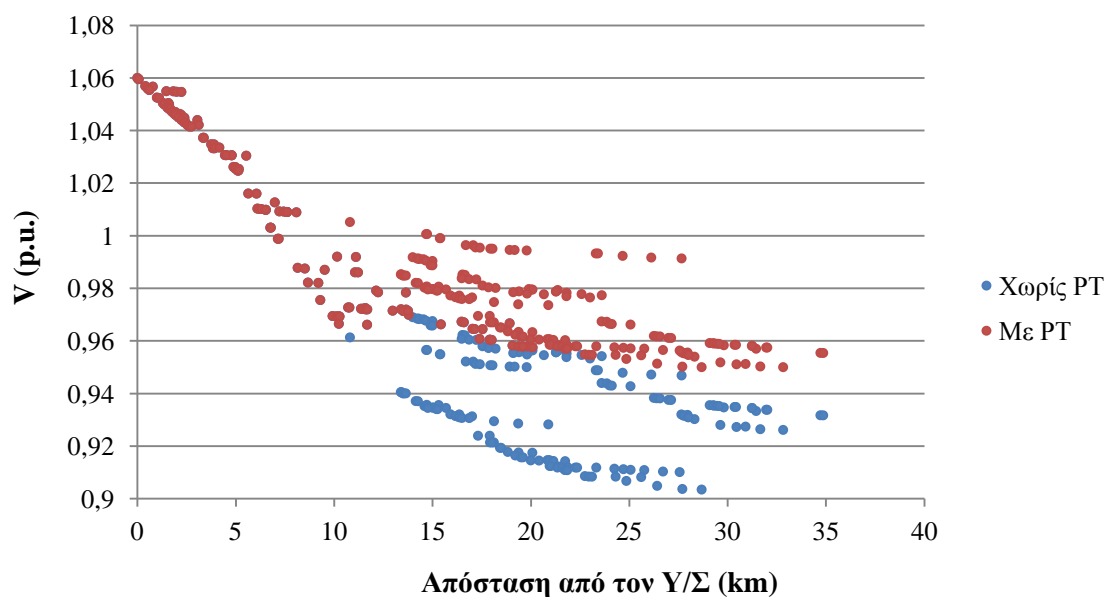
5.5.2.1 Σενάριο 1

Πίνακας 5.32: Αποτελέσματα για το δίκτυο των 267 ζυγών (Σενάριο 1).

| Γραμμές Διανομής | | Θερμική Χωρητικότητα (MVA) | Έτος αναβάθμισης |
|------------------|--------------|-------------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Άφιξης | | |
| 216 | 268 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 268 | 269 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 69 | 270 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 270 | 271 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 271 | 272 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 6 |
| 269 | 273 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 6 |
| 275 | 274 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 5 |
| 61 | 275 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 76 | 276 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 200 | 277 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 277 | 278 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 278 | 279 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 84 | 280 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 245 | 281 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 265 | 282 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 84 | 283 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 286 | 284 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 282 | 285 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 6 |
| 283 | 286 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 285 | 287 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 6 |
| 103 | 288 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 6 |
| Ρυθμιστές Τάσης | | Έτος εγκατάστασης | |
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Άφιξης | | |
| 42 | 46 | 14 | |
| 184 | 186 | 9 | |

Πίνακας 5.33: Διαμόρφωση του δικτύου 267 ζυγών (Σενάριο 1).

| Γραμμές Διανομής | | Τύπος Γραμμής Διανομής | Έτος αναβάθμισης |
|---------------------------------------------|--------------|------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 216 | 268 | ACSR-16 | 2 |
| 268 | 269 | ACSR-16 | 2 |
| 69 | 270 | ACSR-16 | 2 |
| 270 | 271 | ACSR-16 | 4 |
| 271 | 272 | ACSR-16 | 6 |
| 269 | 273 | ACSR-16 | 6 |
| 275 | 274 | ACSR-16 | 5 |
| 61 | 275 | ACSR-16 | 2 |
| 76 | 276 | ACSR-16 | 4 |
| 200 | 277 | ACSR-16 | 2 |
| 277 | 278 | ACSR-16 | 2 |
| 278 | 279 | ACSR-16 | 4 |
| 84 | 280 | ACSR-16 | 2 |
| 245 | 281 | ACSR-16 | 2 |
| 265 | 282 | ACSR-16 | 2 |
| 84 | 283 | ACSR-16 | 2 |
| 286 | 284 | ACSR-16 | 4 |
| 282 | 285 | ACSR-16 | 6 |
| 283 | 286 | ACSR-16 | 4 |
| 285 | 287 | ACSR-16 | 6 |
| 103 | 288 | ACSR-16 | 6 |
| Ρυθμιστής Τάσης | | Έτος εγκατάστασης | |
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 42 | 46 | 14 | |
| 184 | 186 | 9 | |
| Συνολικό κόστος επένδυσης: 363 420 € | | | |



Σχήμα 5.13: Η τάση (α.μ.) σε συνάρτηση με την απόσταση των ζυγών από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ στο δίκτυο 267 ζυγών για το Σενάριο 1 στο τελευταίο έτος σχεδιασμού.

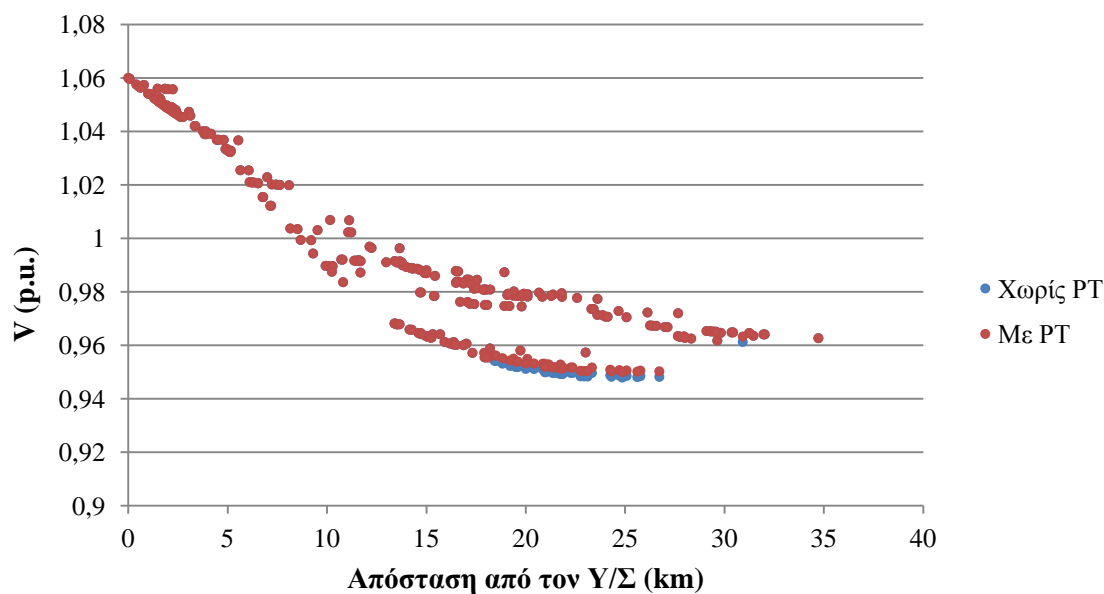
5.5.2.2 Σενάριο 2

Πίνακας 5.34: Αποτελέσματα για το δίκτυο των 267 ζυγών (Σενάριο 2).

| Γραμμές Διανομής | | Θερμική Χωρητικότητα (MVA) | Έτος αναβάθμισης |
|------------------|--------------|-------------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 35 | 268 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 216 | 269 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 69 | 270 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 270 | 271 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 271 | 272 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 6 |
| 269 | 273 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 6 |
| 275 | 274 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 5 |
| 61 | 275 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 76 | 276 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 200 | 277 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 277 | 278 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 278 | 279 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 84 | 280 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| Ρυθμιστές Τάσης | | Έτος εγκατάστασης | |
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 228 | 231 | 19 | |

Πίνακας 5.35: Διαμόρφωση του δικτύου 267 ζυγών (Σενάριο 2).

| Γραμμές Διανομής | | Τύπος Γραμμής Διανομής | Έτος αναβάθμισης |
|---------------------------------------------|--------------|------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 35 | 268 | ACSR-16 | 2 |
| 216 | 269 | ACSR-16 | 2 |
| 69 | 270 | ACSR-16 | 2 |
| 270 | 271 | ACSR-16 | 4 |
| 271 | 272 | ACSR-16 | 6 |
| 269 | 273 | ACSR-16 | 6 |
| 275 | 274 | ACSR-16 | 5 |
| 61 | 275 | ACSR-16 | 2 |
| 76 | 276 | ACSR-16 | 4 |
| 200 | 277 | ACSR-16 | 2 |
| 277 | 278 | ACSR-16 | 2 |
| 278 | 279 | ACSR-16 | 4 |
| 84 | 280 | ACSR-16 | 2 |
| Ρυθμιστής Τάσης | | Έτος εγκατάστασης | |
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 228 | 231 | 19 | |
| Συνολικό κόστος επένδυσης: 202 768 € | | | |



Σχήμα 5.14: Η τάση (α.μ.) σε συνάρτηση με την απόσταση των ζυγών από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ στο δίκτυο 267 ζυγών για το Σενάριο 2 στο τελευταίο έτος σχεδιασμού.

5.5.2.3 Σενάριο 3

Πίνακας 5.36: Αποτελέσματα για το δίκτυο των 267 ζυγών (Σενάριο 3).

| Γραμμές Διανομής | | Θερμική Χωρητικότητα (MVA) | Έτος αναβάθμισης |
|------------------|--------------|----------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Άφιξης | | |
| 35 | 268 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 216 | 269 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 69 | 270 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |
| 270 | 271 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 4 |
| 273 | 272 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 6 |
| 269 | 273 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 6 |
| 275 | 274 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 5 |
| 61 | 275 | =(Αρχική Χωρ. +2MVA) | 2 |

Πίνακας 5.37: Διαμόρφωση του δικτύου 267 ζυγών (Σενάριο 3).

| Γραμμές Διανομής | | Τύπος Γραμμής Διανομής | Έτος αναβάθμισης |
|---------------------------------------------|--------------|------------------------|------------------|
| Ζυγός Αναχώρησης | Ζυγός Αφίξης | | |
| 35 | 268 | ACSR-16 | 2 |
| 216 | 269 | ACSR-16 | 2 |
| 69 | 270 | ACSR-16 | 2 |
| 270 | 271 | ACSR-16 | 4 |
| 271 | 272 | ACSR-16 | 6 |
| 269 | 273 | ACSR-16 | 6 |
| 275 | 274 | ACSR-16 | 5 |
| 61 | 275 | ACSR-16 | 2 |
| Συνολικό κόστος επένδυσης: 103 210 € | | | |

5.5.2.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στους Πίνακες 5.38 έως 5.40 δίνεται το κόστος κάθε λύσης και ο χρόνος επίλυσης για κάθε στάδιο της μεθόδου. Στον Πίνακα 5.41 γίνεται σύγκριση της ποσοστιαίας μεταβολής του μέγιστου συνολικού φορτίου (τελευταίο έτος) μεταξύ των σεναρίων σε σχέση με τη μεταβολή του κόστους επενδύσεων. Τέλος, ακολουθούν τα Σχήματα 5.15 έως 5.17, όπου φαίνεται για το κάθε σενάριο η τελική διαμόρφωση του δικτύου 267 ζυγών και οι θέσεις εγκατάστασης των ΡΤ πάνω στις κύριες γραμμές διανομής.

Πίνακας 5.38: Το κόστος επένδυσης και ο χρόνος επίλυσης για το δίκτυο των 267 ζυγών (Σενάριο 1).

| | | | |
|--------------------------------|----------|----------|----------|
| Συνολικό κόστος (€) | 363 420 | | |
| Κόστος αναβάθμισης γραμμών (€) | 250 430 | | |
| Κόστος αναβάθμισης Μ/Σ (€) | - | | |
| Κόστος εγκατάστασης ΡΤ (€) | 112 990 | | |
| Χρόνος Εκτέλεσης (sec) | Στάδιο 1 | Στάδιο 2 | Στάδιο 3 |
| | 1409 | 2,4 | 9768 |

Πίνακας 5.39: Το κόστος επένδυσης και ο χρόνος επίλυσης για το δίκτυο των 267 ζυγών (Σενάριο 2).

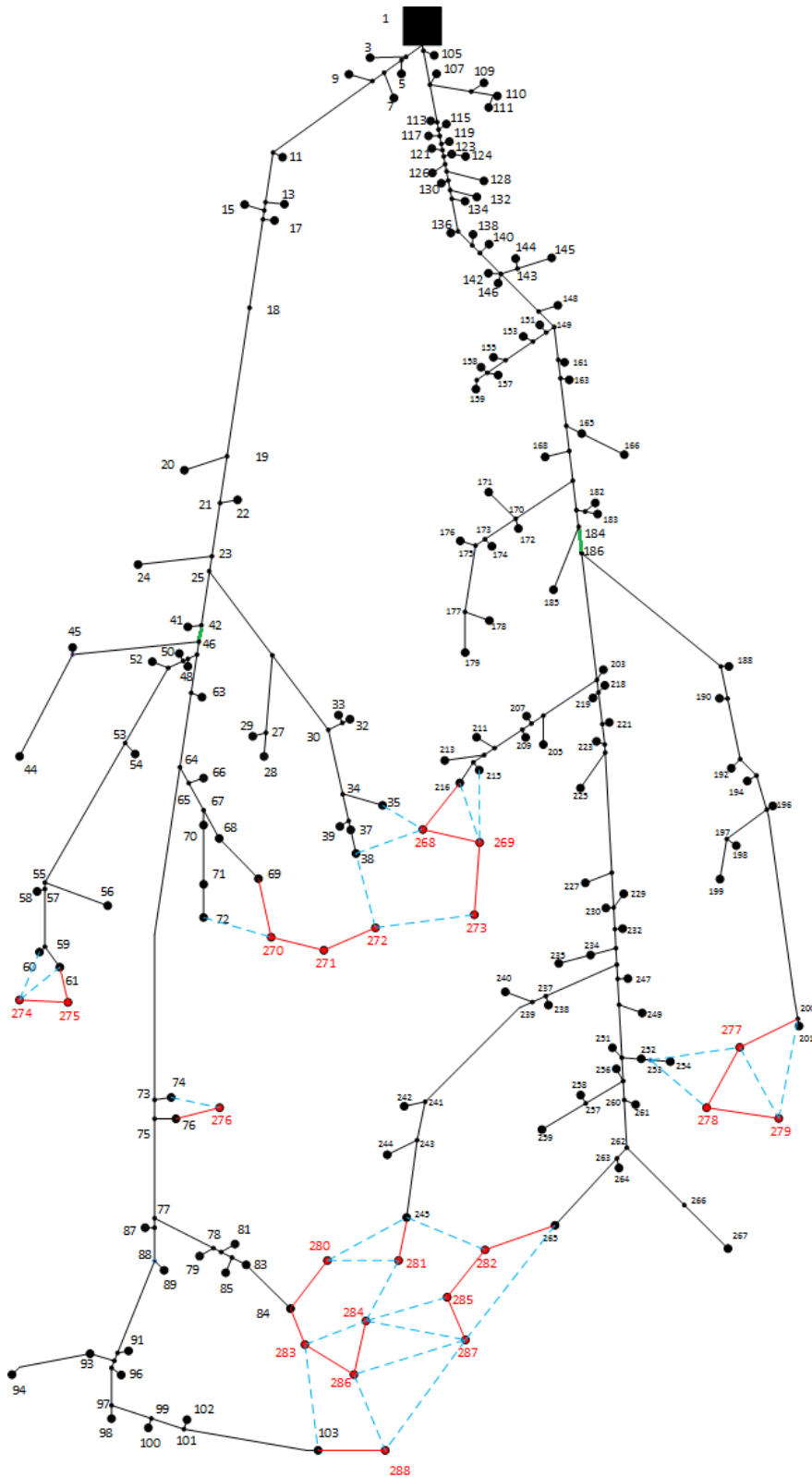
| | | | |
|--------------------------------|----------|----------|----------|
| Συνολικό κόστος (€) | 202 768 | | |
| Κόστος αναβάθμισης γραμμών (€) | 174 740 | | |
| Κόστος αναβάθμισης Μ/Σ (€) | - | | |
| Κόστος εγκατάστασης ΡΤ (€) | 28 028 | | |
| Χρόνος Εκτέλεσης (sec) | Στάδιο 1 | Στάδιο 2 | Στάδιο 3 |
| | 367 | 1,7 | 6512 |

Πίνακας 5.40: Το κόστος επένδυσης και ο χρόνος επίλυσης για το δίκτυο των 267 ζυγών (Σενάριο 3).

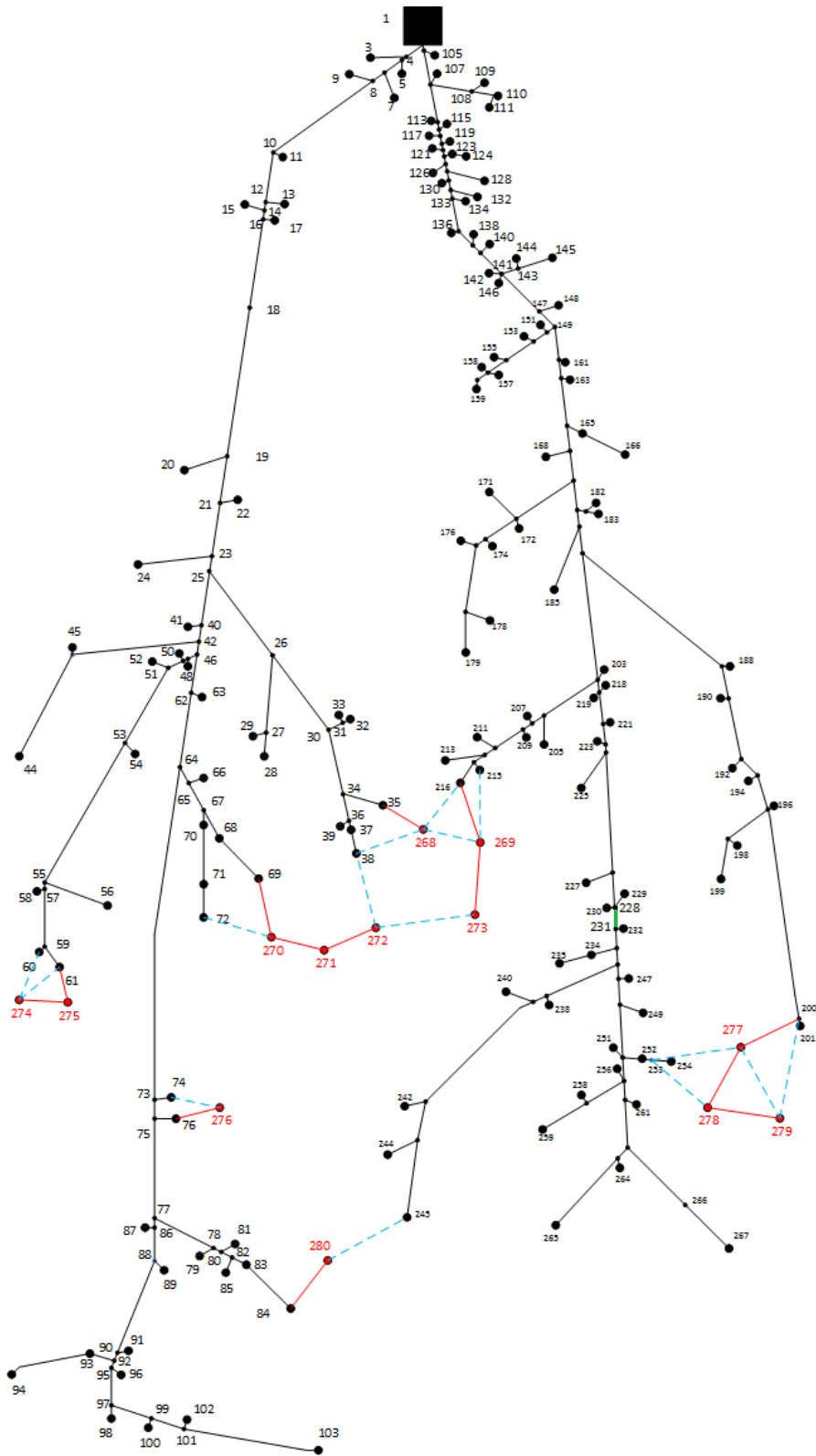
| | | | |
|--------------------------------|----------|----------|----------|
| Συνολικό κόστος (€) | 103 210 | | |
| Κόστος αναβάθμισης γραμμών (€) | 103 210 | | |
| Κόστος αναβάθμισης Μ/Σ (€) | - | | |
| Κόστος εγκατάστασης ΡΤ (€) | - | | |
| Χρόνος Εκτέλεσης (sec) | Στάδιο 1 | Στάδιο 2 | Στάδιο 3 |
| | 320 | 1,7 | 4799 |

Πίνακας 5.41: Σύγκριση της ποσοστιαίας μεταβολής του μέγιστου συνολικού φορτίου (τελευταίο έτος) με την ποσοστιαία μεταβολή του κόστους επένδυσης για το δίκτυο των 267 ζυγών.

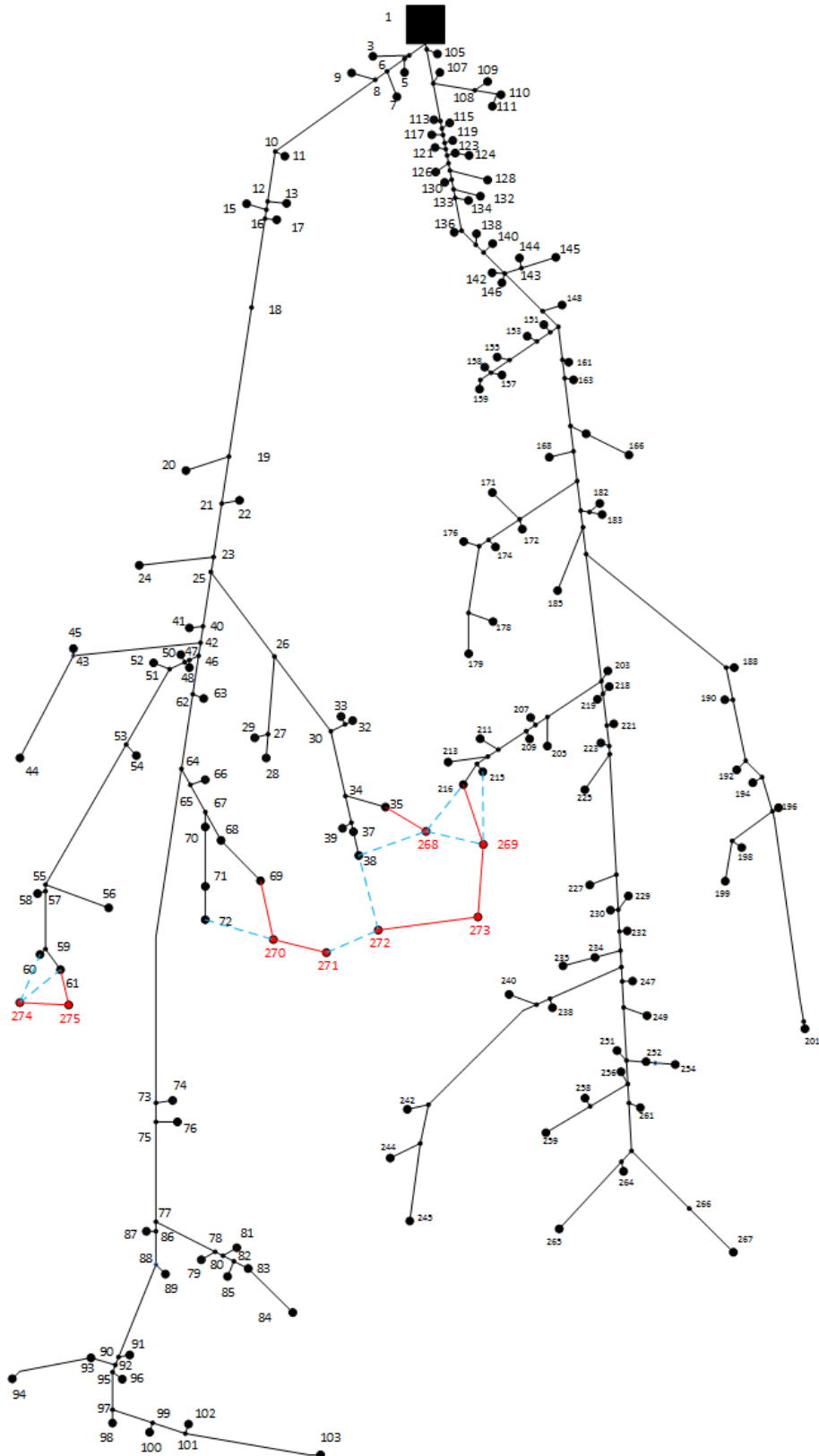
| | Μέγιστο συνολικό φορτίο (MVA) | % Μεταβολή | Συνολικό κόστος επένδυσης | % Μεταβολή |
|------------------|----------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Σενάριο 3 | 13,5 | - | 103 210 | - |
| Σενάριο 2 | 16,7 | 23,7 % | 202 768 | 96,5 % |
| Σενάριο 1 | 21 | 55,6 % | 363 420 | 252,1 % |



Σχήμα 5.15: Η τελική διαμόρφωση του δικτύου 267 ζυγών (Σενάριο 1). Οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τις υποψήφιες γραμμές για επέκταση και οι κόκκινες αυτές που τελικά κατασκευάζονται. Οι πράσινες γραμμές πάνω στο δίκτυο είναι οι θέσεις εγκατάστασης ΡΤ.



Σχήμα 5.16: Η τελική διαμόρφωση του δικτύου 267 ζυγών (Σενάριο 2). Οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τις υποψήφιες γραμμές για επέκταση και οι κόκκινες αυτές που τελικά κατασκευάζονται. Η πράσινη γραμμή πάνω στο δίκτυο είναι η θέση εγκατάστασης ΡΤ.



Σχήμα 5.17: Η τελική διαμόρφωση του δικτύου 267 ζυγών (Σενάριο 3). Οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τις υποψήφιες γραμμές για επέκταση και οι κόκκινες αυτές που τελικά κατασκευάζονται.

5.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] A. S. B. Humayd and K. Bhattacharya, “Comprehensive multi-year distribution system planning using back-propagation approach,” IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 7, no. 12, pp. 1415-1425, May 2013.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα του μακροπρόθεσμου σχεδιασμού ακτινικού δικτύου διανομής ΜΤ με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης. Ο σχεδιασμός του δικτύου διανομής (ΔΔ) είναι απαραίτητος, για να εξυπηρετηθεί η μελλοντική ζήτηση φορτίου και είναι ιδιαίτερα σημαντικός για δύο λόγους: έχει υψηλό κόστος επένδυσης και τα σφάλματα στο επίπεδο της διανομής επηρεάζουν άμεσα τον καταναλωτή και την ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ρεαλιστική προσομοίωση του ΔΔ και της λειτουργίας του είναι μία δύσκολη διαδικασία, γιατί η διαμόρφωση του συστήματος είναι πολύπλοκη, λόγω των πολλών επιμέρους στοιχείων του δικτύου και του πλήθους των καταναλωτών που εξυπηρετεί και μάλιστα η πολυπλοκότητα θα αυξάνεται συνεχώς τα επόμενα χρόνια λόγω της μετάβασης από τα παθητικά στα ενεργητικά δίκτυα διανομής και την υψηλή διείδυση διεσπαρμένης παραγωγής.

Για το σχεδιασμό των ΔΔ χρησιμοποιούνται *αριθμητικές (μαθηματικές) μέθοδοι* και *ευριστικές μέθοδοι*. Οι αριθμητικές μέθοδοι έχουν καλύτερες ιδιότητες σύγκλισης και η βέλτιστη λύση που δίνουν είναι συνήθως ακριβής, όμως δύσκολα μπορούν να χειριστούν μεγάλης πολυπλοκότητας μη γραμμικά μοντέλα, όπως είναι αυτά που αναπαριστούν πιο πιστά τα μεγάλα ΔΔ. Για αυτό το λόγο, στα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως οι ευριστικές μέθοδοι, που μειώνουν το χρόνο υπολογισμού δίνοντας ταυτόχρονα αρκετά καλές λύσεις, αν και όχι απαραίτητα βέλτιστες.

Για την επίλυση του προβλήματος του σχεδιασμού που διατυπώνεται σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιήθηκε μία ευριστική μέθοδος επίλυσης και αναπτύχθηκε λογισμικό στο προγραμματιστικό περιβάλλον του GAMS, που είναι μία πολύ εύχρηστη γλώσσα για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει γραμμική αντικειμενική συνάρτηση κόστους και ο υπολογισμός των ροών ισχύος στις γραμμές και των τάσεων στους ζυγούς γίνεται με τις αναδρομικές εξισώσεις *DistFlow*. Για τα θερμικά όρια αντοχής του Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ και των γραμμών διανομής χρησιμοποιήθηκαν τετραγωνικοί περιορισμοί, ενώ όλοι οι υπόλοιποι ιστοικοί και ανισωτικοί περιορισμοί του προβλήματος είναι γραμμικοί. Με την επίλυση καθορίζεται η ενίσχυση του Υ/Σ, η ενίσχυση και η κατασκευή νέων γραμμών και η θέση των ρυθμιστών τάσης (ΡΤ). Καθορίζεται επίσης και η χρονική περίοδος που είναι απαραίτητη η κάθε επένδυση. Ως αποτέλεσμα, δηλαδή, δίνεται ένα βέλτιστο πλάνο, όσον αφορά το μέγεθος, τη θέση και το χρονοδιάγραμμα των επενδύσεων, που θα εξυπηρετεί την αναμενόμενη ζήτηση φορτίου, ικανοποιώντας τα θερμικά όρια αντοχής και τα αποδεκτά όρια διακύμανσης της τάσης από την ονομαστική της τιμή.

Η μέθοδος σχεδιασμού καθορίζει αρχικά το είδος των επενδύσεων (θέση, μέγεθος) για το τελευταίο έτος της περιόδου μελέτης και στη συνέχεια εξετάζονται τα προηγούμενα έτη μέχρι και το αρχικό και καθορίζεται το έτος της κάθε επένδυσης. Χωρίζεται σε τρία στάδια: στο πρώτο αποφασίζεται η ενίσχυση του Υ/Σ και η ενίσχυση και επέκταση των γραμμών για το τελευταίο έτος, στο δεύτερο αποφασίζεται η θέση εγκατάστασης ΡΤ για το τελευταίο έτος στο δίκτυο που προέκυψε από το προηγούμενο στάδιο και στο τρίτο στάδιο αποφασίζεται το έτος της κάθε επένδυσης.

Για να αποδειχτεί η εφαρμογή της μεθόδου έγιναν προσομοιώσεις για τρία διαφορετικά σενάρια πρόβλεψης φορτίου σε τρία ΔΔ: ένα δίκτυο 22 ζυγών με μία κύρια γραμμή διανομής, ένα δίκτυο 43 ζυγών με δύο κύριες γραμμές διανομής και ένα δίκτυο 267 ζυγών με δύο κύριες γραμμές διανομής. Υπολογίστηκε για κάθε περίπτωση η καθαρή παρούσα αξία του κόστους επένδυσης της λύσης που αποφασίστηκε.

Όπως ήταν αναμενόμενο, τα ακραία σενάρια, δηλαδή στις περιπτώσεις όπου το φορτίο είχε μεγάλη αύξηση και προσαρτήθηκαν περισσότερα νέα φορτία κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου προγραμματισμού, ήταν και τα πιο δαπανηρά. Από τη σύγκριση μεταξύ της ποσοστιαίας μεταβολής φορτίου και της ποσοστιαίας μεταβολής του κόστους επένδυσης, προκύπτει το συμπέρασμα ότι για τον ορθό σχεδιασμό του δικτύου και τη μείωση του κόστους επένδυσης έχει μεγάλη σημασία η σωστή πρόβλεψη του αναμενόμενου φορτίου, μιας και το κόστος επένδυσης αυξάνεται εντονότερα σε σχέση με τη αύξηση του συνολικού φορτίου στο υπάρχον δίκτυο.

Η χρήση της ευριστικής προσέγγισης στις προσομοιώσεις παρείχε μία μεθοδολογία αξιολόγησης του αποδοτικότερου χρόνου επένδυσης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και σε πραγματικά ΔΔ, σε περιπτώσεις υψηλής φόρτισης και μεγάλης πολυπλοκότητας με αρκετές διαφορετικές εναλλακτικές δυνατότητες επέκτασής τους. Η σημασία της έγκειται στο γεγονός ότι σε γρήγορο υπολογιστικό χρόνο μπορεί να παρθεί απόφαση για τη χρονική στιγμή των δράσεων αναβάθμισης και ανάπτυξης του ΔΔ.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Μία μελλοντική επέκταση του λογισμικού που δημιουργήθηκε σε αυτήν την εργασία είναι η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των επενδύσεων ενίσχυσης και επέκτασης του δικτύου διανομής (γραμμές διανομής και Υ/Σ ΜΤ/ΥΤ) και των επενδύσεων για την εγκατάσταση ΡΤ, δηλαδή η ενοποίηση των Σταδίου 1 και του Σταδίου 2, που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.4.1. Επιπλέον, επειδή οι αναβαθμίσεις στο δίκτυο επηρεάζουν τις απώλειες ενέργειας προτείνεται στην αντικειμενική συνάρτηση κόστους να συναθροίζεται το κόστος απωλειών μαζί με το κόστος επενδύσεων. Έτσι, θα προκύπτει μία ακόμα πιο οικονομική λύση για τη μελλοντική διαμόρφωση του δικτύου.

Στη συνέχεια, η εργασία μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω σε δύο άξονες: Ο πρώτος άξονας αφορά την εξέταση και την ενσωμάτωση περισσότερων επιλογών ανάπτυξης από την πλευρά του σχεδιαστή, ενώ ο δεύτερος είναι η ρεαλιστικότερη προσομοίωση του συστήματος διανομής και του πλαισίου λειτουργίας του.

Η πρώτη σημαντική επιλογή σχεδιασμού που θα μπορούσε να περιληφθεί είναι η δυνατότητα επέκτασης του δικτύου μέσω της κατασκευής καινούριου Υ/Σ ΜΤ/ΥΤ. Η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των Υ/Σ (θέση, μέγεθος) και των γραμμών διανομής (θερμική χωρητικότητα, διασύνδεση) θα συμβάλει στην ακόμα καλύτερη εξυπηρέτηση των φορτίων. Η επιλογή της τοποθέτησης πυκνωτών ταυτόχρονα με την τοποθέτηση ΡΤ μπορεί να βελτιώσει ακόμα περισσότερο το προφίλ της τάσης και άρα την ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Μία άλλη επιλογή ανάπτυξης ως μέτρο κατά της υπερφόρτισης του δικτύου είναι επίσης και οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΑΠ). Επιπλέον, μπορεί να γίνεται σύγκριση της αναλογίας όφελους – κόστους των επενδύσεων, ώστε να ελαχιστοποιηθούν ακόμα περισσότερο οι δαπάνες.

Τέλος, για να γίνει το μοντέλο πιο ρεαλιστικό, μπορούν να λαμβάνονται υπόψη διαφορετικά στάδια φορτίου, για να προσομοιωθεί η διακύμανση της ημερήσιας ζήτησης φορτίου και παράμετροι αξιοπιστίας, για να προσομοιωθεί καλύτερα η λειτουργία του δικτύου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

A.1 ΕΛΛΗΝΙΚΑ

| | |
|------|----------------------------------|
| α.μ. | : ανά μονάδα |
| ΑΠΕ | : Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας |
| ΔΔ | : Δίκτυο διανομής |
| ΜΔΠ | : Μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής |
| Μ/Σ | : Μετασχηματιστής |
| ΜΤ | : Μέση τάση |
| ΝΡΚ | : Νόμος ρευμάτων Kirchoff |
| ΡΤ | : Ρυθμιστής τάσης |
| ΣΗΕ | : Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας |
| Υ/Σ | : Υποσταθμός |
| ΥΤ | : Υψηλή τάση |
| ΧΤ | : Χαμηλή τάση |

A.2 ΑΓΓΛΙΚΑ

| | |
|-------|-------------------------------------------------------|
| GAMS | : General algebraic modeling system |
| LP | : Linear programming |
| NLP | : Non-linear programming |
| MILP | : Mixed-integer linear programming |
| MINLP | : Mixed-integer non-linear programming |
| MIQCP | : Mixed-integer quadratically constrained programming |
| p.u. | : per unit |

