



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

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΗΣ
ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ
ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Α. Λαζαρίδης

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2016



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

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΗΣ
ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ
ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Α. Λαζαρίδης

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ...

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Παπαθανασίου
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π. Γεωργιλάκης
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....
Ιωάννης Α. Λαζαρίδης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Copyright © Ιωάννης Α. Λαζαρίδης, 2016
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

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

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

Περίληψη

Τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν στις μέρες μας ένα διαρκώς αναπτυσσόμενο κλάδο της τεχνολογίας. Η αναμενόμενη μαζική διείσδυσή τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργεί την ανάγκη μελέτης της επίδρασης τους σε αυτό, λόγω του επιπρόσθετου φορτίου που απαιτεί η εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών τους για τις καθημερινές μετακινήσεις τους.

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της μονοφασικής φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων σε ακτινικά δίκτυα διανομής μέσης τάσης. Απαραίτητο εργαλείο για τη μελέτη αυτή θα είναι ο αλγόριθμος “Backward and Forward Sweep” ο οποίος αποτελεί μία μέθοδο ανάλυσης ροής ισχύος για τα ασύμμετρα ακτινικά δίκτυα διανομής. Τα κριτήρια με τα οποία θα εκτιμήσουμε την επίδραση θα είναι η ασυμμετρία των φάσεων και οι απώλειες ισχύος στο δίκτυο λόγω της ασύμμετρης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, στο **Κεφάλαιο 1** αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας και ειδικότερα στο Σύστημα Διανομής, καθώς επίσης και ο ορισμός της ανάλυσης ροής ισχύος. Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται η δομή των ακτινικών δικτύων διανομής και η διαδικασία δεικτοδότησης τους. Η δεικτοδότηση αυτή είναι απαραίτητη για τη διάσχιση τους κατά την εκτέλεση της ανάλυσης ροής ισχύος. Στο **Κεφάλαιο 3** παραθέτονται τα συστατικά στοιχεία των ακτινικών δικτύων διανομής καθώς επίσης και οι εξισώσεις που τα διέπουν. Οι εξισώσεις αυτές είναι απαραίτητες για την εφαρμογή του αλγορίθμου ανάλυσης ροής ισχύος. Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται ο αλγόριθμος “Backward and Forward Sweep” και παραθέτονται παραδείγματα για την καλύτερη κατανόηση του.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται μια γενική περιγραφή των ηλεκτρικών οχημάτων. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στους τύπους των ηλεκτρικών οχημάτων, στη τεχνολογία των απαραίτητων για τη λειτουργία τους συσσωρευτών και στους σταθμούς φόρτισης τους. Ακόμη επεξηγείται ο αλγόριθμος εκτίμησης της συνολικής ζήτησης ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων και ο ελεγχόμενος τρόπος φόρτισης Smart Charging.

Στο **Κεφάλαιο 6**, το οποίο αποτελεί το κύριο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, γίνεται η μελέτη της επίδρασης της ασύμμετρης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, σε συγκεκριμένο ακτινικό δίκτυο διανομής μέσης τάσης. Στη συνέχεια, εξετάζεται κατά πόσο είναι εφικτό να περιοριστούν οι επιπτώσεις αυτές χρησιμοποιώντας τεχνικές διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων μελετώντας διαφορετικά σενάρια διείσδυσης τους.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μια σύνοψη της διπλωματικής εργασίας και παραθέτονται τα τελικά συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά

Ανάλυση ροής ισχύος, ασύμμετρα ακτινικά δίκτυα διανομής, στοιχεία δικτύου διανομής, αλγόριθμος “Backward and Forward Sweep”, ηλεκτρικά οχήματα, ασυμμετρίες τάσεων, Smart Charging

Abstract

Electric vehicle nowadays constitute a constantly developing field of technology. Their expected mass penetration into the power grid leads to their analysis as long as this additional load added in order to serve the energy requirements for their daily trips, affects the operation of the network they belong.

The purpose of this thesis is the study of the effect of the electric vehicles' single-load charging on radial medium voltage distribution grids. Indispensable tool for this study will be the "Backward and Forward Sweep" algorithm, a method used for executing power flow analysis on unbalanced radial distribution grids. We will estimate the effect using the voltage asymmetry and the power losses of the grid, as a result of electric vehicles' unbalanced charging.

More specifically, in **Chapter 1**, we refer the characteristics of the electric power system and the distribution system, and the definition of the power flow analysis. In **Chapter 2** we describe the radial distribution grids' structure and the process of their indexing. This indexing is necessary for the execution of the power flow analysis. In **Chapter 3** we cite the component parts of the radial distribution grids and the equations that describe them. These equations are necessary for the execution of the power flow analysis. In **Chapter 4** we describe the "Backward and Forward Sweep" algorithm, citing examples in order to comprehend it.

Chapter 5 is an overview of the existing electric vehicles. More specifically, we refer their various types, the technology of their batteries and the technology of their charging stations. Furthermore, the algorithm that estimates the electric vehicles' total power demand and the controlled charging algorithm called "Smart Charging" are described in this chapter.

In **Chapter 6**, the most important part of this thesis, we study the effect of the electric vehicles' unbalanced charging, on a specific radial medium voltage distribution grid. Subsequently, we examine if we can limit this effect using management techniques of the electric vehicles for various penetration scenarios.

Finally, a synopsis of this thesis and the final conclusions are discussed in **Chapter 7**.

Key Words

Power flow analysis, unbalanced radial distribution grids, distribution grid's component parts, "Backward and Forward Sweep" algorithm, electric vehicles, voltage asymmetry, Smart Charging

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ιδιαίτερες ευχαριστίες προς τον κ. Παύλο Γεωργιάκη, επίκουρο καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, για τη παραχώρηση του απαραίτητου για την πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας λογισμικού και για τις σημαντικές υποδείξεις του καθώς επίσης και προς τον κ. Ευάγγελο Καρφόπουλο για την υπομονή του και τη συμβολή του στην εκπόνηση της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Εισαγωγή	15
1.2	Σκοπός και Απαιτήσεις ΣΗΕ	16
1.3	Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	17
1.4	Σύστημα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας	18
1.5	Ανάλυση Ροής Ισχύος.....	19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

2.1	Εισαγωγή	21
2.2	Ζυγοί και Κλάδοι του Συστήματος.....	22
2.3	Γενικευμένο Μοντέλο Περιγραφής Δικτύου.....	23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

3.1	Εισαγωγή	27
3.2	Φορτία.....	27
3.3	Εγκάρσιοι Πυκνωτές	34
3.4	Γραμμές Διανομής.....	36
3.4.1	Μοντελοποίηση.....	36
3.4.2	Υπολογισμός Μήτρας Σύνθετων Αντιστάσεων Σειράς Γραμμής.....	38
3.4.2.1	Εναέριες Γραμμές Διανομής	38
3.4.2.2	Υπόγειες Γραμμές Διανομής	40
3.4.3	Υπολογισμός Μήτρας Εγκάρσιων Αγωγιμοτήτων Γραμμής.....	44
3.4.3.1	Εναέριες Γραμμές Διανομής	44
3.4.3.2	Υπόγειες Γραμμές Διανομής	46
3.5	Μετασχηματιστές	47
3.6	Διεσπαρμένη Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	52
3.7	Ρυθμιστές Τάσης	53
3.8	Διακόπτες.....	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ “BACKWARD AND FORWARD SWEEP

4.1	Εισαγωγή	59
4.2	Γενική Περιγραφή Αλγορίθμου “Backward and Forward Sweep”	61
4.2.1	Βήματα Backward Sweep	61
4.2.2	Βήματα Forward Sweep.....	66
4.3	Παράδειγμα Εκτέλεσης Αλγορίθμου BFS	69

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

5.1	Εισαγωγή	79
5.2	Ορισμός και Τύποι Ηλεκτρικών Οχημάτων	79
5.3	Τεχνολογία Συσσωρευτών.....	82
5.4	Σύστημα Μετάδοσης	86
5.5	Τεχνολογίες Σταθμών Φόρτισης.....	86
5.6	Αλγόριθμος Εκτίμησης της Ζήτησης των Ηλεκτρικών Οχημάτων.....	92
5.7	Βελτιστοποίηση Smart Charging.....	95

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

6.1	Εισαγωγή	97
6.2	Λογισμικό	97
6.3	Δίκτυο	98
6.4	Καμπύλες Ζήτησης Ισχύος Αρχικών Φορτίων.....	103
6.5	Δείκτες Ασυμμετρίας.....	106
6.6	Αποτελέσματα	107
6.6.1	Αποτελέσματα χωρίς EV	107
6.6.2	Αποτελέσματα με EV	110
6.6.3	Αποτελέσματα με Ρυθμιστή και με EV	114
6.6.4	Αποτελέσματα με EV με Βελτιστοποίηση Smart Charging	117
6.6.5	Αποτελέσματα με Ρυθμιστή και με EV με Βελτιστοποίηση Smart Charging	121
6.6.6	Γραφικές Παραστάσεις (για διείσδυση EV 5,8 %)	124
6.7	Συμπεράσματα.....	131

6.8	Αποτελέσματα για Μεγαλύτερη Διείσδυση EV	131
6.8.1	Εισαγωγή.....	131
6.8.2	Αποτελέσματα για Διπλάσια Διείσδυση EV (11,6 %)	132
6.8.3	Αποτελέσματα με Ρυθμιστή και για Διπλάσια Διείσδυση EV.....	133
6.8.4	Αποτελέσματα για Διπλάσια Διείσδυση EV με Βελτιστοποίηση Smart Charging	134
6.8.5	Αποτελέσματα με Ρυθμιστή και για Διπλάσια Διείσδυση EV με Βελτιστοποίηση Smart Charging	135
6.8.6	Αποτελέσματα για Τριπλάσια Διείσδυση EV (17,4 %)	136
6.8.7	Αποτελέσματα με Ρυθμιστή και για Τριπλάσια Διείσδυση EV.....	137
6.8.8	Αποτελέσματα για Τριπλάσια Διείσδυση EV με Βελτιστοποίηση Smart Charging	138
6.8.9	Αποτελέσματα με Ρυθμιστή και για Τριπλάσια Διείσδυση EV με Βελτιστοποίηση Smart Charging	139
6.8.10	Αποτελέσματα για Τετραπλάσια Διείσδυση (23,2 %)	140
6.8.11	Αποτελέσματα με Ρυθμιστή και για Τετραπλάσια Διείσδυση EV	141
6.8.12	Αποτελέσματα για Τετραπλάσια Διείσδυση EV με Βελτιστοποίηση Smart Charging	142
6.8.13	Αποτελέσματα με Ρυθμιστή και για Τετραπλάσια Διείσδυση EV με Βελτιστοποίηση Smart Charging	143
6.8.14	Γραφικές Παραστάσεις για Μεγαλύτερη Διείσδυση EV (Διπλάσια (11,6 %), Τριπλάσια (17,4 %) και Τετραπλάσια (23,2 %)).....	144
6.9	Συγκρίσεις και Αξιολόγηση.....	157
6.9.1	Εισαγωγή.....	157
6.9.2	Πίνακες και Γραφικές Παραστάσεις	157

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1	Σύνοψη της Εργασίας και Συμπεράσματα.....	173
-----	---	-----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	177
---------------------	-------	-----

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας από τους σημαντικότερους τομείς της γνώσης του ηλεκτρισμού είναι η μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Πολύπλοκα συστήματα μεταφοράς και διανομής εξυπηρετούν την τεράστια ανάγκη της χώρας μας για ηλεκτρική ενέργεια. Εξαιτίας αυτής της τεράστιας απαίτησης για ενέργεια, πρέπει συνεχώς να ενδιαφερόμαστε για την αποδοτική λειτουργία της διανομής της και των σχετιζόμενων συστημάτων.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν εδώ και πολλά χρόνια. Οι ανάγκες που πρέπει να καλύπτουν έχουν αυξηθεί ραγδαία από τη δημιουργία τους. Στις μέρες μας, οι ανάγκες αυτές συνεχίζουν να αυξάνονται, δημιουργώντας επιπλέον απαιτήσεις στη παραγωγή ενέργειας, στα συστήματα μεταφοράς και διανομής καθώς και τα σχετιζόμενα συστήματα.

Ο Thomas Edison ήταν αυτός που ανέπτυξε την ιδέα της διαδεδομένης παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Πραγματοποίησε αναπτυξιακό έργο σε γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (DC) χρησιμοποιώντας ατμομηχανές. Το έργο του Edison στη παραγωγή ενέργειας οδήγησε στην ανάπτυξη των ηλεκτρικών κινητήρων, των συστημάτων μεταφοράς και διανομής και του σχετιζόμενου εξοπλισμού ελέγχου.

Οι περισσότερες ανακαλύψεις σχετιζόμενες με την ηλεκτρική ενέργεια αφορούσαν συστήματα συνεχούς ρεύματος (DC). Η παραγωγή ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) διαδόθηκε λίγο καιρό μετά. Ο πρωταρχικός λόγος προτίμησης της AC παραγωγής και μεταφοράς ήταν οι μετασχηματιστές που μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν το επίπεδο της τάσης για να μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια σε μακρινές αποστάσεις. Έτσι, η ανακάλυψη των μετασχηματιστών επέτρεψε τη μετατροπή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας από DC σε AC. Στις μέρες μας, σχεδόν όλα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παράγουν και μεταφέρουν τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα.

Οι μετασχηματιστές αυξάνουν τη τάση που παράγεται από τις AC γεννήτριες μειώνοντας αντίστοιχα το επίπεδο του ρεύματος. Αυτό επιτρέπει τη διανομή ηλεκτρικής ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, μειώνει τις απώλειες ισχύος και αυξάνει συνολικά την απόδοση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η αυξημένη χρήση των ηλεκτρικών κινητήρων για οικιακή χρήση και βιομηχανικό εξοπλισμό έχει αυξήσει την ανάγκη για διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορες περιοχές.

Αρχικά, τα συστήματα διανομής ήταν μόνο επέκταση του συστήματος παραγωγής. Υπήρχε ανεπαρκής σχεδιασμός για την αποδοτική μεταφορά της ενέργειας από το σύστημα παραγωγής στο περιορισμένο αριθμό καταναλωτών. Η αύξηση της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε σε υψηλότερες απαιτήσεις από το σύστημα διανομής. Πλέον, όχι μόνο εξυπηρετούνται περισσότεροι καταναλωτές, αλλά και ο σημερινός εξοπλισμός απαιτεί προσοχή στη διακύμανση της τάσης και ελάχιστη ανοχή στη διακοπή των υπηρεσιών.

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία των συστημάτων μεταφοράς και διανομής έχει μετατραπεί σε μία πολύ σημαντική επιστήμη. Τα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνδεδεμένα μαζί με τέτοιο τρόπο που αν συμβεί κάποιο πρόβλημα σε ένα, μπορούν να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες του από κάποιο άλλο. Ηλεκτρικά φορτία μπορεί να μεταφερθούν εύκολα από ένα σύστημα σε κάποιο άλλο. Τα σημερινά δίκτυα είναι πολύ αξιόπιστα και διατηρούν την ισχύ προς τους καταναλωτές στο κατάλληλο επίπεδο τάσης χωρίς διακοπή. Είναι πολύ σπάνιο να συμβούν “blackouts” ή “brownouts”. Αυτές οι συνθήκες αποφεύγονται με κατάλληλο σχεδιασμό για καταστάσεις εξαιρετικά υψηλής ζήτησης. “Blackout” είναι η ολική διακοπή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ “brownout” η μείωση του επιπέδου τάσης στον καταναλωτή. “Brownout” μπορεί και να συμβεί σκόπιμα για να μεταφερθεί διαθέσιμη ισχύ με μειωμένη τάση έτσι ώστε να αποφευχθεί “blackout” κατά τη διάρκεια προβλήματος εξαιρετικά υψηλής ζήτησης. Υψηλή ζήτηση συνήθως συμβαίνει κατά τη διάρκεια αφύσικα υψηλών ή χαμηλών θερμοκρασιών για μία εκτενή περίοδο.

Τα πρώτα συστήματα μεταφοράς παρείχαν DC ρεύμα σε χαμηλά επίπεδα τάσης σε σχετικά κοντινές αποστάσεις. Η εφεύρεση του μετασχηματιστή και τα προβλήματα μεταφοράς ισχύος σε μακρινές αποστάσεις οδήγησαν στη χρήση AC συστημάτων ενέργειας. Σήμερα, μεγαλύτερη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να εξυπηρετηθεί με υψηλής τάσης μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Τα επίπεδα τάσης μπορούν εύκολα να αυξηθούν και να μειωθούν από τους μετασχηματιστές για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

Όχι μόνο έχει βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος μεταφοράς και διανομής, αλλά επιπλέον και τα υλικά, ο εξοπλισμός και τα σχετιζόμενα συστήματα ελέγχου έχουν αναβαθμιστεί. Παραδείγματα τέτοια βελτίωσης περιλαμβάνουν τη ποιότητα των εγκαταστάσεων, καλύτερους αγωγούς και μονωτές, και περισσότερο αξιόπιστα συστήματα υπολογιστών για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των συστημάτων μεταφοράς και διανομής [1.1].

1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΗΕ

Ο προορισμός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια εξυπηρετούμενη περιοχή καταναλώσεως. Το σύστημα πρέπει να έχει μελετηθεί και να λειτουργεί σωστά και να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

α) Πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση.

β) Η ζήτηση πραγματικής και άεργου ισχύος μεταβάλλεται με το χρόνο, και το σύστημα πρέπει να μπορεί να ικανοποιεί αυτή τη συνεχώς μεταβαλλόμενη ζήτηση.

γ) Η παρεχόμενη ενέργεια πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους όρους ποιότητας. Τρεις βασικοί παράγοντες συνιστούν τη ποιότητα αυτή : 1) σταθερή συχνότητα, 2) σταθερή τάση, 3) υψηλή αξιοπιστία τροφοδοτήσεως.

δ) Η ενέργεια πρέπει να παρέχεται με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη [1.2].

1.3 ΔΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και μέσων, τα οποία χρησιμεύουν στην εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας από απόψεως εκτάσεως μπορούν να διακριθούν σε «Εθνικά Συστήματα», «Περιφερειακά Συστήματα», και «Ιδιωτικά Συστήματα» εφ' όσον αντίστοιχα καλύπτουν το σύνολο μιας χώρας, το σύνολο μιας γεωγραφικής περιοχής, ή τις ανάγκες μεμονωμένου ιδιωτικού συγκροτήματος.

Η δομή του συστήματος έχει πρωτεύουσα σημασία για τη γεωγραφική διαθεσιμότητα της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ιδιότητα, η οποία χαρακτηρίζει τη δομή του συστήματος περισσότερο από κάθε άλλη είναι το μέγεθος του συστήματος. Η δομή και η σύνθεση του συστήματος εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το μέγεθός του. Οπωσδήποτε όμως ακόμη και το μικρότερο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα ηλεκτρικό δίκτυο πολύπλοκο.

Η εξυπηρέτηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ενός συνόλου καταναλωτών προϋποθέτει τις διακεκριμένες φάσεις της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής. Το Σύστημα Παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής, όπου παράγεται το ηλεκτρικό ρεύμα, μαζί με τους υποσταθμούς ανυψώσεως της τάσεως για τη μεταφορά του υπό υψηλή τάση. Το Σύστημα Μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσεως, τους υποσταθμούς ζεύξεως των δικτύων αυτών, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων τάσεων του δικτύου, και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσεως σε μέση τάση προς τροφοδότηση των δικτύων διανομής. Με το σύστημα μεταφοράς η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τους σταθμούς παραγωγής προς τις περιοχές καταναλώσεως. Το Σύστημα Διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσεως (μερικές φορές όμως και υψηλής τάσεως) στα οποία δίκτυα υπάγονται και οι υποσταθμοί διανομής μέσω των οποίων η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή. Με τα δίκτυα διανομής η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στις μικρότερες περιοχές φορτίου, και παρέχεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσεως.

Ένα σύστημα παραγωγής και μεταφοράς μπορεί να λειτουργεί μεμονωμένο ή διασυνδεδεμένο με ένα ή περισσότερα άλλα γειτονικά συστήματα. Η διασύνδεση γίνεται συνήθως σε επίπεδο εθνικών συστημάτων, και προσφέρει ορισμένα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα στη λειτουργία του κάθε συστήματος [1.2].

1.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μεταφέρεται στις μείζονες περιοχές της καταναλώσεως με τα δίκτυα μεταφοράς, διανέμεται μέσα στις περιοχές αυτές με τα δίκτυα διανομής. Τα δίκτυα διανομής καλύπτουν όλη την εξυπηρετούμενη περιοχή και φθάνουν μέχρι και τον τελευταίο καταναλωτή. Διακρίνονται σε δύο βαθμίδες διανομής :

- α) Διανομή MT ή πρωτεύουσα διανομή
- β) Διανομή XT ή δευτερεύουσα διανομή

Το δίκτυο διανομής MT τροφοδοτείται από τους υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/MT και τροφοδοτεί τους υποσταθμούς διανομής MT/XT και τους καταναλωτές MT.

Οι περιοχές καταναλώσεως ή φορτίου, είναι αστικές, βιομηχανικές, υπεραστικές, αγροτικές ή μικτές, ενώ αντίστοιχος προς το είδος της περιοχής είναι και ο τύπος του δικτύου MT. Έτσι, στα κέντρα των πόλεων, ή γενικά σε περιοχές μεγάλης πυκνότητας φορτίου, τα δίκτυα είναι ως επί το πλείστον υπόγεια, δηλαδή οι γραμμές διανομής αποτελούνται από καλώδια. Στις υπόλοιπες περιοχές, τα δίκτυα είναι κατά κανόνα εναέρια.

Τα δίκτυα διανομής MT είναι συνήθως βροχοειδή αλλά λειτουργούν ακτινικά. Η βροχοειδής δομή επιτρέπει οικονομία γραμμών για τον ίδιο βαθμό εξυπηρέτησεως, ενώ η ακτινική λειτουργία επιβάλλεται από την απλότητα της προστασίας και της ροής της ενέργειας στα δίκτυα αυτά [1.2].

Η χαμηλή τάση διανομής είναι εκείνη με την οποία τροφοδοτούνται οι οικιακοί καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής XT αναχωρούν από τους ζυγούς XT των υποσταθμών διανομής και τροφοδοτούν τις παροχές των καταναλωτών XT. Τα αστικά δίκτυα διανομής XT ιδίως των πυκνοκατοικημένων περιοχών είναι κατά κανόνα υπόγεια.

Επειδή οι παροχές χαμηλής τάσεως μπορεί να είναι τριφασικές ή μονοφασικές, η χαμηλή τάση αναφέρεται με δύο τιμές. Η πρώτη αναφέρεται στην πολική τάση του συστήματος και η δεύτερη στη φασική. Το τριφασικό σύστημα XT που εφαρμόζεται στη χώρα μας είναι 400/230 V.

Η τεχνική των δικτύων διανομής καλύπτει τα προβλήματα των εναέριων και υπόγειων γραμμών και υποσταθμών διανομής, των παροχών και της μετρήσεως, των χειρισμών και της αποκαταστάσεως των βλαβών. Από οικονομική άποψη, η διανομή

έχει μεγάλο ενδιαφέρον διότι απορροφά μεγάλο μέρος των επενδύσεων κεφαλαίου του όλου συστήματος [1.2].

1.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ο όρος ανάλυση ροής ισχύος αναφέρεται στον υπολογισμό κατά μέτρο και γωνία των τάσεων, των ρευμάτων και των ροών ενεργού και άεργου ισχύος στα διάφορα σημεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από πραγματικές ή υποτιθέμενες συνθήκες λειτουργίας. Η ανάλυση αυτή αφορά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και όχι τυχόν μεταβατικά φαινόμενα τα οποία εμφανίζονται κατά τη σύνδεση ή αποσύνδεση στοιχείων του δικτύου, είτε κατά τη διάρκεια τριφασικών βραχυκυκλωμάτων [1.2].

Η μελέτη αυτή είναι αναγκαία τόσο κατά την καθημερινή λειτουργία ενός δικτύου, όσο και για τις μελέτες επέκτασης και ανάπτυξης του συστήματος. Η ανάλυση ροής ισχύος χρειάζεται επίσης για να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις από τις διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, την εισαγωγή νέων φορτίων, την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής, την εύρεση της κατάλληλης θέσης για την τοποθέτηση πυκνωτών αντιστάθμισης ή ρυθμιστών, την κατασκευή νέων γραμμών, κλπ [1.2].

Οι αλγόριθμοι ανάλυσης ροής ισχύος είναι στην πλειονότητά τους επαναληπτικής φύσεως και προσεγγίζουν συνήθως τα πραγματικά αποτελέσματα σε ικανοποιητικά επίπεδα της τάξεως του 0.001 p.u. και χαμηλότερα. Επίσης, η εκτέλεσή τους γίνεται συνήθως σε σύντομο χρονικό διάστημα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ένα σύστημα ελέγχου ώστε να λάβει τη κατάλληλη απόφαση σε πραγματικό χρόνο για επιβολή αλλαγών στο δίκτυο με σκοπό τη βέλτιστη οικονομικά, λειτουργικά και σε θέματα ασφαλείας, λειτουργία [1.3].

Επειδή το σύστημα διανομής είναι ακτινικό (ή λειτουργεί ως ακτινικό), δεν χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται για την ανάλυση ροής ισχύος στα συστήματα μεταφοράς εξαιτίας προβλημάτων σύγκλισης. Αντί αυτών, χρησιμοποιείται μια επαναληπτική μέθοδος ειδικά σχεδιασμένη για ακτινικά συστήματα. Ο αλγόριθμος αυτός λαμβάνει υπ' όψιν τις ασυμμετρίες που εμφανίζει ένα δίκτυο διανομής σε αντίθεση με τις κλασσικές μεθόδους των δικτύων μεταφοράς που εφαρμόζονται στο ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα. Η επαναληπτική αυτή μέθοδος ονομάζεται αλγόριθμος BFS (“Backward and Forward Sweep”).

Κεφάλαιο 2

ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα δίκτυα διανομής που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα ακτινικά δίκτυα διανομής. Τα δίκτυα αυτά έχουν μια κεντρική τροφοδοσία (main feeder), από την οποία και διοχετεύεται στους υπόλοιπους ζυγούς του συστήματος η απαιτούμενη για τη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρική ενέργεια.

Η τοπολογία τους θα μπορούσε να απλοποιηθεί στην παρομοίωσή της με ένα δέντρο. Ο κορμός του δέντρου είναι η κύρια και μοναδική τροφοδότηση του υπόλοιπου συστήματος. Όλα τα φύλλα του τροφοδοτούνται αποκλειστικά από τον κορμό του δέντρου, διαμέσου των αντίστοιχων κλάδων [2.1].

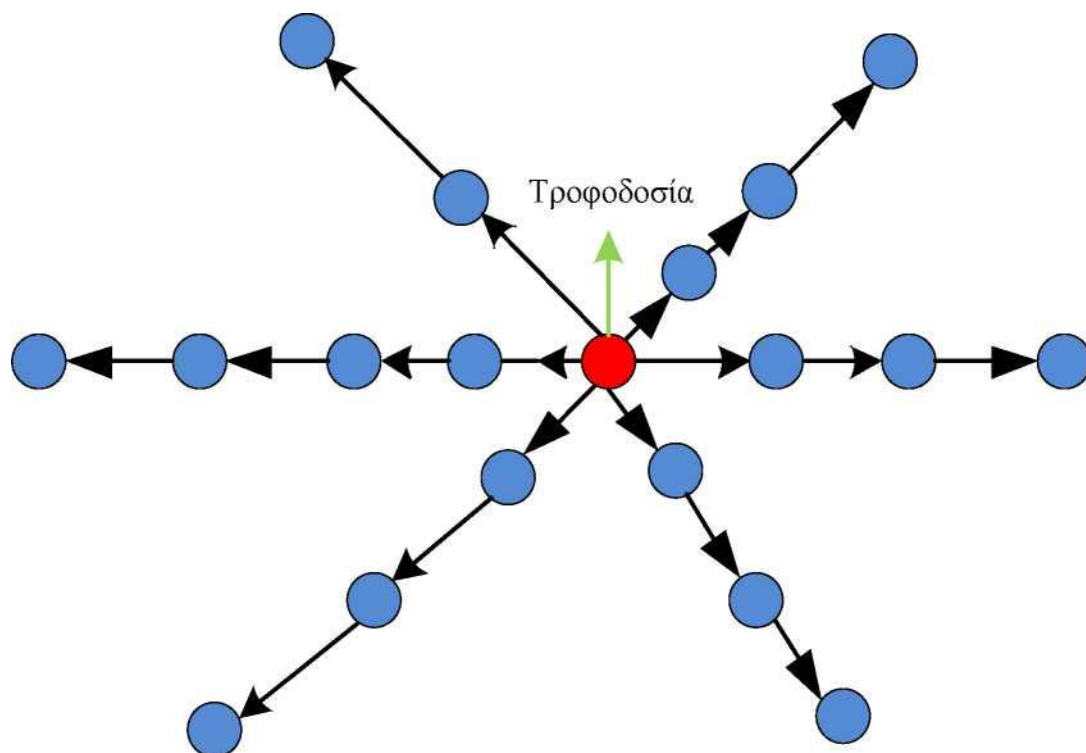
Έτσι και στα ηλεκτρικά ακτινικά δίκτυα διανομής, κορμός ονομάζεται το κύριο τμήμα του δικτύου από το οποίο διέρχεται το σύνολο της ισχύος ώστε να καταλήξει στους υπόλοιπους υποκλάδους. Ομοίως, η ροή ισχύος και επομένως και η κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι συνήθως μονόπλευρη και πραγματοποιείται μόνο από το κορμό στους υπόλοιπους κλάδους. Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση της διοχέτευσης της πλεονάζουσας ισχύος από συμπαραγωγό γεννήτρια που είναι εγκατεστημένη σε ζυγό του συστήματος [2.2].

Επίσης οι κλάδοι του δικτύου δεν σχηματίζουν βρόχους αλλά διαδίδονται ακτινικά από την κεντρική τροφοδοσία προς τα υπόλοιπα σημεία του δικτύου. Σε αυτό τον τρόπο σχεδιασμού του δικτύου οφείλεται και ο χαρακτηρισμός «ακτινικό».

Φυσικά, παρότι η ακτινική μορφή των δικτύων υπερτερεί οικονομικά έναντι των περιπτώσεων ύπαρξης πολλαπλών διαδρομών για την τροφοδότηση των φορτίων (π.χ. βροχοειδή συστήματα), αντιμετωπίζει προβλήματα σε θέματα αξιοπιστίας και αυτό διότι μια βλάβη στο κεντρικό τροφοδότη οδηγεί στην αποσύνδεση από την τροφοδοσία του συνόλου του συστήματος. Για αυτό το λόγο σε συστήματα που είναι δύσκολη η επιδιόρθωση, όπως τα υπόγεια δίκτυα διανομής, είτε επιλέγονται βροχοειδή δίκτυα διανομής, είτε εγκαθίστανται με χειροκίνητους ή αυτόματους διακόπτες διαθέσιμες εναλλακτικές τροφοδοτήσεις, οι οποίες διατηρούν την ακτινική φύση του δικτύου [2.3].

Λαμβάνοντας βέβαια υπ' όψιν πως το κόστος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή ενός δικτύου, παρατηρείται πως επί του συνόλου του συστήματος διανομής και κυρίως στα εναέρια δίκτυα, εμφανίζεται σε μεγάλο ποσοστό η ακτινική τοπολογία.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η δομή ενός συστήματος με ακτινική τοπολογία και στο κέντρο του έχει σημειωθεί ο τροφοδότης του δικτύου. Παρατηρείται εύκολα η ροή της ισχύος από τον τροφοδότη (feeder) προς τους υπόλοιπους ζυγούς του συστήματος καθώς επίσης και η παντελής απουσία βρόχων [2.4].



Σχήμα 2.1: Σχεδιάγραμμα τοπολογίας ενός ακτινικού δικτύου [2.4].

Να σημειωθεί ότι η ανάλυση και η περιγραφή της τοπολογίας ενός δικτύου, είναι ένα απαραίτητο στάδιο για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η ανάλυση ροής φορτίου. Ως εκ τούτου κρίνεται αναγκαία η εύρεση μιας γενικευμένης περιγραφής ούτως ώστε να μπορεί να εισάγεται σε ένα πρόγραμμα η σειρά εμφάνισης των ζυγών του συστήματος, οι κλάδοι που τους διασυνδέουν και όπου υπάρχουν διακλαδώσεις τα ονόματα των ζυγών που εμφανίζονται πρώτοι στη διακλάδωση. Πριν παρουσιαστεί όμως αυτή η μεθοδολογία θα χρειαστεί να οριστούν οι έννοιες των ζυγών και των κλάδων σε ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [2.4].

2.2 ΖΥΓΟΙ ΚΑΙ ΚΛΑΔΟΙ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ισχύος χαμηλής τάσης συναντώνται οι κόμβοι και οι κλάδοι. Οι κλάδοι αποτελούν τμήματα του κυκλώματος (πηγές τάσης, αντίσταση, πυκνωτές, μετασχηματιστές, γραμμές, κ.α.) και οι κόμβοι αποτελούν τα σημεία στα οποία ενώνονται δύο κλάδοι. Ομοίως, στα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας το ρόλο των κόμβων διαδραματίζουν οι ζυγοί και φυσικά τη διασύνδεσή τους υλοποιούν οι κλάδοι. Οι κλάδοι σε ένα σύστημα διανομής μπορούν να είναι τα ακόλουθα στοιχεία:

- 1) Γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
- 2) Μετασχηματιστές τάσης
- 3) Ρυθμιστές τάσης
- 4) Διακόπτες

Μάλιστα η παρουσία ενός κλάδου δεν είναι ανάγκη να περιλαμβάνει μόνο μια κατηγορία εκ των στοιχείων που περιγράφηκαν, αλλά μπορεί να είναι συνδυασμός αυτών. Για παράδειγμα συνηθίζεται στα προς εξέταση συστήματα ανάμεσα στον πρώτο και στο δεύτερο ζυγό να παρεμβάλλεται ένας ρυθμιστής και μία γραμμή διανομής συνδεδεμένοι σε σειρά.

Η περιγραφή της συνδεσμολογίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου και των αντίστοιχων κλάδων που τους διασυνδέουν, είναι ένα αντικείμενο που αφορά τη θεωρία των δέντρων εν προκειμένω, αλλά και τη θεωρία των γράφων γενικότερα. Με τη βοήθεια αυτών των θεωριών είναι δυνατό να διασχίζονται στους επαναληπτικούς αλγορίθμους διαδοχικά όλοι οι ζυγοί και να αποθηκεύονται οι ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τον κάθε ζυγό ή τον κάθε κλάδο [2.4].

Επίσης, οι ιδιότητες των δέντρων, δίνουν τη δυνατότητα να διασχίζεται το δίκτυο με τεχνικές όπως η ανάστροφη κατά πλάτος διάσχιση (RBF-Reverse Breadth First), η οποία είναι απαραίτητη σε αρκετούς αλγορίθμους [2.1].

Στην Ενότητα 2.3 θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο καταχωρείται η τοπολογία σε κατάλληλη μορφή ώστε να είναι δυνατή η διάσχισή της και η εισαγωγή του δικτύου σε επαναληπτικούς αλγορίθμους.

2.3 ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

Για να είναι δυνατή η γενίκευση του τρόπου εισαγωγής της τοπολογίας ενός δικτύου, θα πρέπει να δημιουργηθεί μια δομή η οποία θα περιέχει τις βασικές πληροφορίες (building block) που απαιτούνται να δίνονται για κάθε ζυγό. Στη συνέχεια θα πρέπει να γίνει η απαραίτητη δεικτοδότηση (indexing) έτσι ώστε να μπορεί να διασχίζεται το εκάστοτε δίκτυο κατά τη συγκεκριμένη σειρά που απαιτεί ο κατά περίπτωση εφαρμοζόμενος αλγόριθμος [2.2].

Για να μπορεί ένας αλγόριθμος να διαβάσει την πλήρη περιγραφή της τοπολογίας του συστήματος, απαιτείται από το χρήστη να εισάγει:

- Το όνομα του ζυγού από τον οποίο προήλθε ο τρέχον ζυγός.
- Το όνομα του ζυγού που ακολουθεί στον ίδιο κλάδο.
- Τον αριθμό των υποκλάδων που ξεκινούν από το συγκεκριμένο ζυγό.
- Τα ονόματα των ζυγών που συνδέονται άμεσα με το ζυγό και δεν ανήκουν στον ίδιο κλάδο με αυτόν.

Η έννοια του κλάδου και του υποκλάδου γίνεται εύκολα αντιληπτή εάν μελετηθεί η διάσχιση ενός δέντρου. Με αφετηρία τον κορμό ενός δέντρου και καθώς διατρέχονται οι ζυγοί του, παρατηρείται ότι σε μερικούς ζυγούς εμφανίζονται διακλαδώσεις. Οι κλάδοι στους οποίους διασπάται ο κορμός αποτελούν τους υποκλάδους του. Με τη σειρά τους, οι υποκλάδοι αυτοί, μπορούν αργότερα να χωριστούν σε περισσότερους κλάδους. Έτσι δημιουργούνται διασπάσεις σε δύο, τρία ή και περισσότερα επίπεδα σε ένα ζυγό ενός κλάδου.

Είναι λοιπόν απαραίτητο να εισαχθεί μέθοδος δεικτοδότησης του εκάστοτε ζυγού, που θα του προσδίδει ένα μοναδικό αναγνωριστικό και ταυτόχρονα θα μπορεί να συσχετίζει τη δική του πληροφορία με τους άμεσα συνδεδεμένους με αυτόν ζυγούς.

Αυτό το οποίο τελικά απαιτείται είναι μια τριάδα δεικτών για τον κάθε ζυγό, η

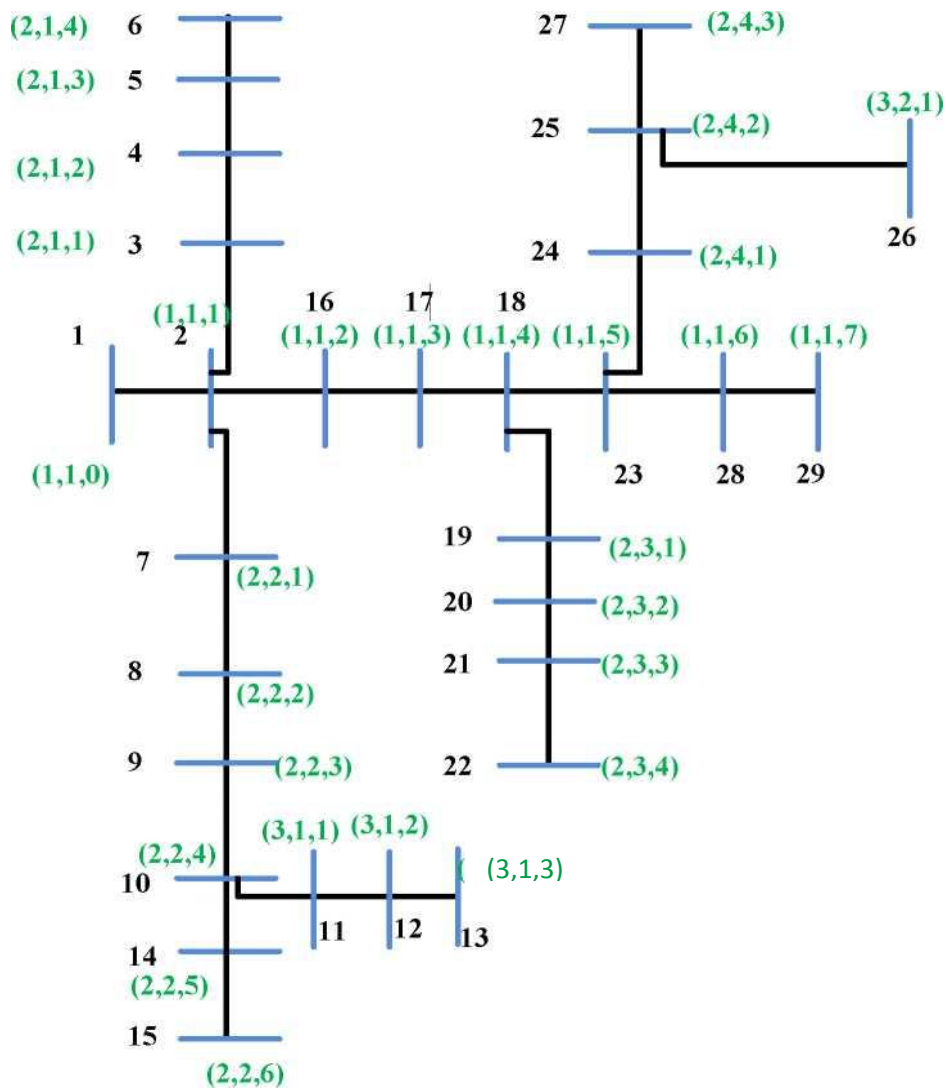
(l,m,n):

- 1) Ο δείκτης l δηλώνει το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται ο κάθε ζυγός. Για παράδειγμα εφόσον βρίσκεται στον κορμό έχει την τιμή 1, ενώ εάν βρίσκεται σε άμεση διακλάδωση του κορμού, θεωρείται ότι ανήκει στο επίπεδο 2.
- 2) Ο δείκτης m διαχωρίζει δύο διαφορετικούς υποκλάδους του ίδιου επιπέδου μεταξύ τους, ώστε να συνεχίζει να είναι μοναδική η δεικτοδότηση και να έχει ως εκ τούτου νόημα η αναφορά με αυτή. Για παράδειγμα, δύο υποκλάδοι που ξεκινούν από τον κορμό θα έχουν τον ίδιο δείκτη l ίσο με δύο. Επομένως οι πρώτοι ζυγοί των κλάδων αυτών δεν θα μπορούσαν να διαχωριστούν και δεν θα ήταν μοναδική η αναφορά με βάση τους δείκτες. Έτσι, στον πρώτο υποκλάδο τέτοιου επιπέδου που συναντάται αντιστοιχίζεται δείκτης $m=1$, στο δεύτερο $m=2$ κλπ.
- 3) Ο δείκτης n χρησιμοποιείται για να δεικτοδοτήσει τους ζυγούς που έχουν ίδιο l , m , και επομένως ανήκουν στον ίδιο κλάδο. Ο δείκτης αυτός είναι φανερό πως θα αυξάνεται καθώς προχωρά η διάσχιση του δικτύου επάνω σε ένα κλάδο. Ο πρώτος ζυγός του κορμού έχει πάντα $n=0$, ενώ οι πρώτοι ζυγοί των υπολοίπων υποκλάδων έχουν πάντα $n=1$.

Ένα εύλογο ερώτημα το οποίο τίθεται συνήθως, είναι με ποιο κριτήριο γίνεται ο διαχωρισμός σε μια διακλάδωση για το ποιος θα θεωρηθεί ότι είναι τμήμα του τρέχοντος κλάδου και ποιος ότι είναι ο υποκλάδος. Εφόσον κάτι τέτοιο δεν καθορίζεται από το ίδιο το πρόβλημα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια ότι η μεγαλύτερη ισχύς ανήκει στον κύριο κλάδο και η μικρότερη στον υποκλάδο, είτε ότι η πιο μεγάλη, σε μήκος ή σε αριθμό ζυγών, διαδρομή ανήκει στον κύριο κλάδο. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή αυτή δεν θα διαφοροποιήσει σημαντικά τα αποτελέσματα του αλγορίθμου.

Τέλος, ο τρόπος με τον οποίο εισάγει τα δεδομένα ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τις τιμές του δείκτη m , ανάλογα με τη σειρά που καταχώρησε τον εκάστοτε ζυγό. Παρότι κάτι τέτοιο δεν έχει κανένα σοβαρό αντίκτυπο στην εφαρμογή των αλγορίθμων, συνηθίζεται η επιλογή του επόμενου προς καταχώρηση ζυγού να γίνεται με κριτήριο τη διάσχιση όλων των υποκλάδων ενός ζυγού πριν τη συνέχιση στον επόμενο ζυγό του ίδιου κλάδου.

Στο Σχήμα 2.2 παρατίθεται ένα παράδειγμα ενός δικτύου διανομής 29 ζυγών. Η αρίθμηση των ζυγών έχει γίνει με βάση τη σειρά που προσπελάστηκε για να γίνει η καταχώρησή τους στη τοπολογία του δικτύου, σύμφωνα με τα ανωτέρω που περιγράφηκαν. Επίσης με βάση αυτή τη τοπολογία φαίνονται μέσα σε παρένθεση οι δείκτες (l,m,n) για το συγκεκριμένο δίκτυο [2.4].



Σχήμα 2.2: Δεικτοδότηση δικτύου διανομής 29 ζυγών [2.4]

Από την τριάδα δεικτών που εισήχθησαν, είναι δυνατόν να απαντηθεί με ποια σειρά πρέπει να προσπελαστούν οι κλάδοι ώστε να πραγματοποιηθεί η RBF (Reverse Breadth First- Ανάστροφη κατά Πλάτος) διάσχιση του εν λόγω δικτύου. Οι ζυγοί σε αυτή τη διάσχιση επιλέγονται ξεκινώντας από το τέλος των κλάδων που έχουν κατά σειρά προτεραιότητα το μεγαλύτερο 1, το μεγαλύτερο m και τέλος το μεγαλύτερο n, ώστε να γίνει διάσχιση των αντίστοιχων κλάδων από το τέλος τους μέχρι την αρχή τους.

Έτσι παρατηρείται ότι η RBF σειρά διάσχισης αποτελείται κατά σειρά από τον κλάδο του ζυγού 26, του ζυγού 13, του ζυγού 27, του ζυγού 22, του ζυγού 15, του ζυγού 6 και του ζυγού 29. Αντίθετα, η BF (Breadth First) διάσχιση περιλαμβάνει τους κλάδους των αντίστοιχων ζυγών με αντίστροφη όμως σειρά.

Αυτοί οι τρόποι διάσχισης ήταν αναγκαίο να οριστούν μιας και θα χρειαστούν σε επόμενα κεφάλαια που θα γίνεται αντίστοιχη διάσχιση του δικτύου σε κάθε επανάληψη.

Κεφάλαιο 3

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τις εξισώσεις που ισχύουν για τα στοιχεία του δικτύου διανομής. Οι εξισώσεις αυτές είναι απαραίτητες για την εφαρμογή του αλγορίθμου BFS. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται προσεγγίζουν τη συμπεριφορά του πραγματικού μοντέλου χωρίς να είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα και χωρίς να απαιτούν δεδομένα τα οποία είναι είτε δυσεύρετα είτε μη διαθέσιμα στα πραγματικά συστήματα.

Τα στοιχεία του δικτύου με τα οποία θα ασχοληθούμε είναι:

- A) Τα φορτία
- B) Οι εγκάρσιοι πυκνωτές
- Γ) Οι γραμμές διανομής
- Δ) Οι μετασχηματιστές
- E) Η διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- ΣΤ) Οι ρυθμιστές τάσης
- Z) Οι διακόπτες

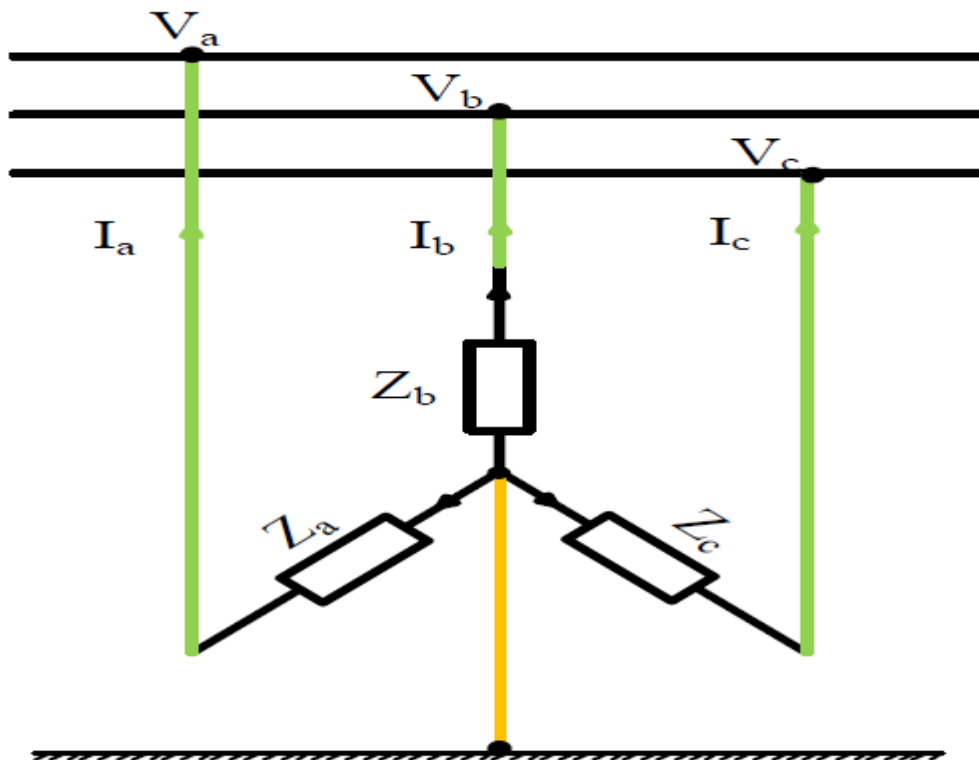
3.2 ΦΟΡΤΙΑ

Ο λόγος για τον οποίο παράγεται, μεταφέρεται και διανέμεται η ηλεκτρική ενέργεια είναι αδιαμφισβήτητα η τροφοδότηση των φορτίων του συστήματος. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία είναι αναγκαία για την παροχή της απαραίτητης ισχύος και ως εκ τούτου την εξυπηρέτηση του φορτίου.

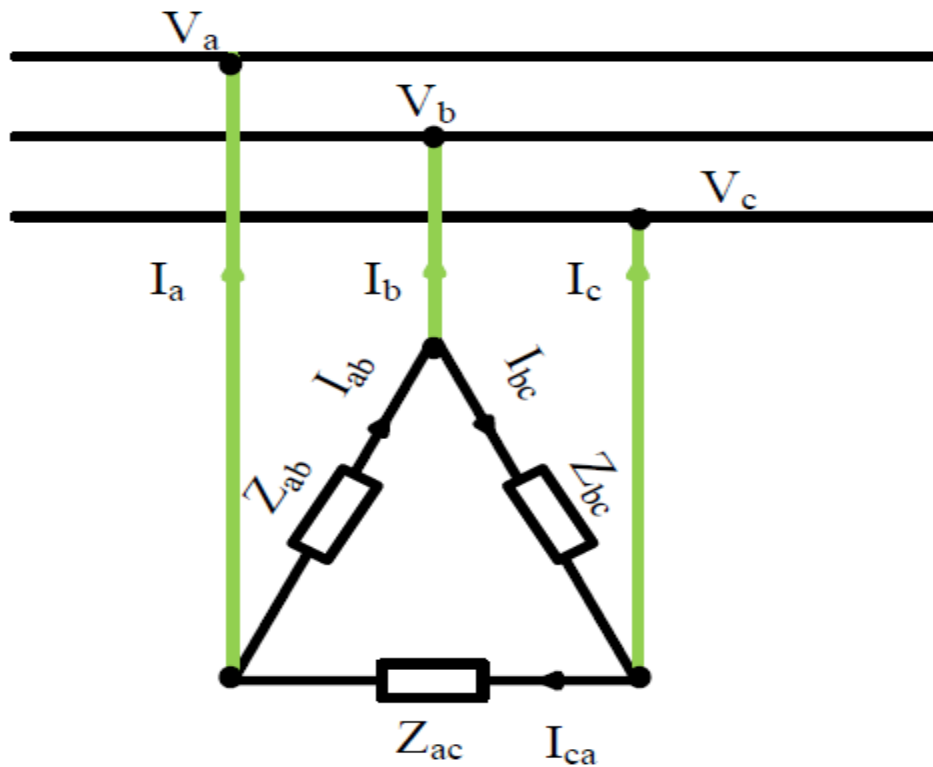
Το μοντέλο του φορτίου σε έναν αλγόριθμο ροής φορτίου είναι απαραίτητο να χαρακτηρίζεται από ένα βαθμό ευελιξίας. Αυτό συμβαίνει επειδή τα φορτία δεν είναι μόνο μιας κατηγορίας. Αντίθετα, στα δίκτυα διανομής μπορεί κανείς να συναντήσει τρεις κύριες κατηγοριοποιήσεις των φορτίων [3.1].

- Με βάση τη συνδεσμολογία τους διακρίνονται σε:
 - Φορτία συνδεδεμένα κατά αστέρα (Σχήμα 3.1), τα οποία συνδέονται με τις φασικές τάσεις του δικτύου.
 - Φορτία συνδεδεμένα κατά τρίγωνο (Σχήμα 3.2), τα οποία συνδέονται με τις πολικές τάσεις του δικτύου.

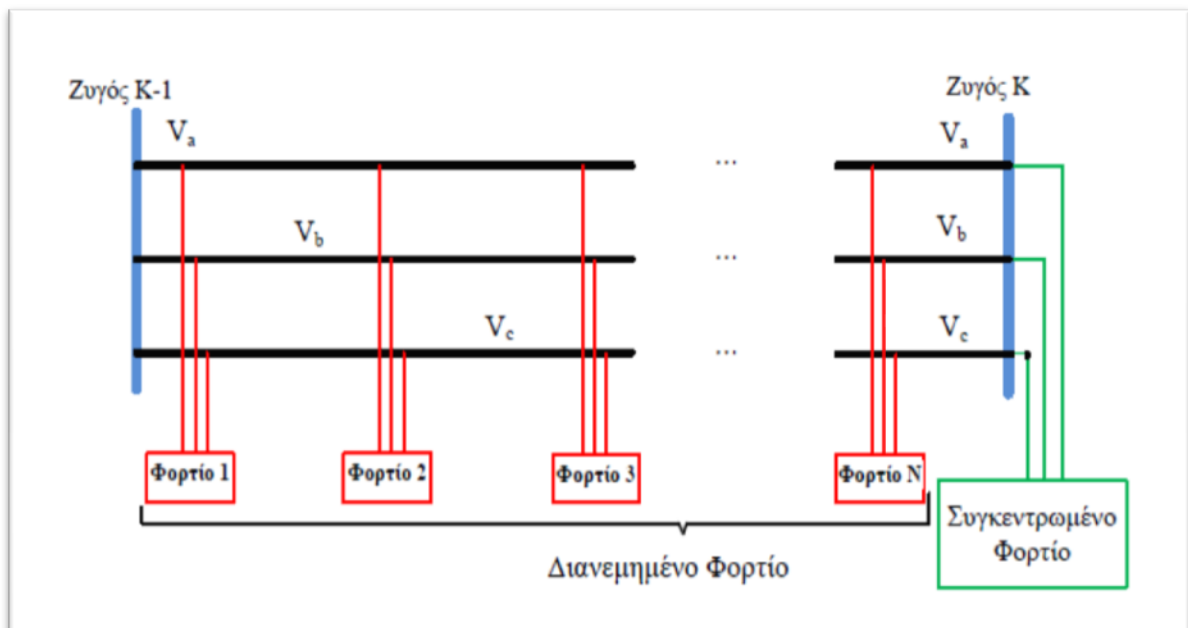
- Με βάση τον τρόπο λειτουργίας τους διακρίνονται σε:
- Φορτία σταθερής ισχύος, τα οποία ονομάζονται και φορτία σταθερού PQ, το οποίο σημαίνει ότι απορροφούν σταθερή ενεργή και άεργη ισχύ. Με διαφορετική τιμή της τάσης τα εν λόγω φορτία απορροφούν διαφορετική τιμή ρεύματος, ώστε τελικά να απορροφήσουν την ίδια ισχύ.
 - Φορτία σταθερού ρεύματος, τα οποία διακρίνονται για το σταθερό μέτρο ρεύματος που απορροφούν. Σε αυτόν τον τύπο φορτίου σταθερός παραμένει επίσης ο συντελεστής ισχύος της απορροφόμενης ισχύος και επομένως και η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος.
 - Φορτία σταθερής σύνθετης αντίστασης, τα οποία λειτουργούν όπως μια σύνθετη αντίσταση, με βάση το νόμο του Ohm. Δηλαδή μεταβαλλόμενη τάση έχει ως αποτέλεσμα ανάλογα μεταβαλλόμενο απορροφόμενο ρεύμα.
- Με βάση τη θέση τους στο δίκτυο τους διακρίνονται σε:
- Συγκεντρωμένα φορτία (Σχήμα 3.3), τα οποία βρίσκονται σε ένα σημείο του δικτύου, δηλαδή είναι γνωστό το όνομα του ζυγού στον οποίο συνδέονται.
 - Διανεμημένα φορτία (Σχήμα 3.4), τα οποία βρίσκονται διεσπαρμένα κατά μήκος μιας γραμμής του δικτύου και χρειάζονται ειδική τεχνική ανάλυσης. [3.2]



Σχήμα 3.1 Συνδεσμολογία κατά αστέρα [3.1]



Σχήμα 3.2 Συνδεσμολογία κατά τρίγωνο [3.1]



Σχήμα 3.3 Παράδειγμα διανεμημένου και συγκεντρωμένου φορτίου [3.1]

Η εισαγωγή των δεδομένων ενός φορτίου γίνεται πάντοτε δηλώνοντας τη συνδεσμολογία, τον τύπο και την ισχύ του κάθε φορτίου που έχει συνδεθεί στην αντίστοιχη φάση (πολική ή φασική) σε συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας. Για την παρακάτω ανάλυση θα θεωρείται ότι τα φορτία που μελετώνται είναι συγκεντρωμένα και όχι διανεμημένα. Στη συνέχεια με μια μεθοδολογία που θα αναφερθεί θα φανεί ότι τα διανεμημένα φορτία λειτουργούν όπως τα συγκεντρωμένα προσθέτοντας

κάποιους ζυγούς στην περιοχή των διανεμημένων φορτίων. Το μέγεθος το οποίο χρειάζεται να υπολογιστεί από τα φορτία για την πραγματοποίηση της ροής φορτίου, είναι το εγχεόμενο ρεύμα, δηλαδή το αντίθετο του απορροφούμενου ρεύματος.

→Φορτία σταθερής ισχύος σε συνδεσμολογία αστέρα:

$$\begin{aligned}\tilde{I}_{a_injected} &= \left(-\frac{\tilde{S}_{a,nom}}{\tilde{V}_a} \right)^* \\ \tilde{I}_{b_injected} &= \left(-\frac{\tilde{S}_{b,nom}}{\tilde{V}_b} \right)^* \\ \tilde{I}_{c_injected} &= \left(-\frac{\tilde{S}_{c,nom}}{\tilde{V}_c} \right)^*\end{aligned}\tag{3.1}$$

όπου $\tilde{I}_{a_injected}$ είναι το εγχεόμενο ρεύμα, $\tilde{S}_{a,nom}$ η ονομαστική φαινόμενη ισχύς και \tilde{V}_a η φασική τάση της φάσης a.

→Φορτία σταθερής ισχύος σε συνδεσμολογία τριγώνου:

$$\begin{aligned}\tilde{I}_{a_injected} &= \tilde{I}_{ca} - \tilde{I}_{ab} = \left(\frac{\tilde{S}_{ca,nom}}{\tilde{V}_{ca}} \right)^* - \left(\frac{\tilde{S}_{ab,nom}}{\tilde{V}_{ab}} \right)^* \\ \tilde{I}_{b_injected} &= \tilde{I}_{ab} - \tilde{I}_{bc} = \left(\frac{\tilde{S}_{ab,nom}}{\tilde{V}_{ab}} \right)^* - \left(\frac{\tilde{S}_{bc,nom}}{\tilde{V}_{bc}} \right)^* \\ \tilde{I}_{c_injected} &= \tilde{I}_{bc} - \tilde{I}_{ca} = \left(\frac{\tilde{S}_{bc,nom}}{\tilde{V}_{bc}} \right)^* - \left(\frac{\tilde{S}_{ca,nom}}{\tilde{V}_{ca}} \right)^*\end{aligned}\tag{3.2}$$

Όπου $\tilde{S}_{ab,nom}$ και \tilde{V}_{ab} η ονομαστική φαινόμενη ισχύς και η πολική τάση μεταξύ των φάσεων a και b.

→Φορτία σταθερού ρεύματος σε συνδεσμολογία αστέρα:

Στα φορτία τύπου σταθερού ρεύματος, σταθερά παραμένουν το μέτρο του ρεύματος που απορροφά το κάθε φορτίο και ο συντελεστής ισχύος της παρεχόμενης ισχύος. Επομένως για να βρεθεί το ρεύμα που απορροφάται από κάθε φάση, αρχικά υπολογίζεται το μέτρο του ρεύματος (εξίσωση (3.3)) και στη συνέχεια της γωνίας του ρεύματος (εξίσωση (3.4)). Εφόσον είναι γνωστά η γωνία και το μέτρο του ρεύματος για κάθε φάση, είναι δυνατόν μέσω της εξίσωσης (3.5) να υπολογιστεί η τελική τιμή του εγχεόμενου ρεύματος.

$$\begin{aligned}
|I_{a_injected}| &= \left| -\frac{\tilde{S}_{a,nom}}{\tilde{V}_{a,nom}} \right| \\
|I_{b_injected}| &= \left| -\frac{\tilde{S}_{b,nom}}{\tilde{V}_{b,nom}} \right| \\
|I_{c_injected}| &= \left| -\frac{\tilde{S}_{c,nom}}{\tilde{V}_{c,nom}} \right|
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Όπου $\tilde{V}_{a,nom}$ η ονομαστική φασική τιμή της φάσης a

$$\begin{aligned}
Arg(\tilde{I}_{a_load}) &= Arg(\tilde{V}_a) - Arg(\tilde{S}_{a,nom}) \\
Arg(\tilde{I}_{b_load}) &= Arg(\tilde{V}_b) - Arg(\tilde{S}_{b,nom}) \\
Arg(\tilde{I}_{c_load}) &= Arg(\tilde{V}_c) - Arg(\tilde{S}_{c,nom})
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Όπου \tilde{I}_{a_load} το ρεύμα που απορροφά το φορτίο (δηλαδή το αντίθετο του εγχεόμενου)

$$\begin{aligned}
\tilde{I}_{a_injected} &= -|\tilde{I}_{a_injected}| * \exp(j * Arg(\tilde{I}_{a_load})) \\
\tilde{I}_{b_injected} &= -|\tilde{I}_{b_injected}| * \exp(j * Arg(\tilde{I}_{b_load})) \\
\tilde{I}_{c_injected} &= -|\tilde{I}_{c_injected}| * \exp(j * Arg(\tilde{I}_{c_load}))
\end{aligned} \tag{3.5}$$

→Φορτίο σταθερού ρεύματος σε συνδεσμολογία τριγώνου:

$$\begin{aligned}
|\tilde{I}_{ab}| &= \left| \frac{\tilde{S}_{ab,nom}}{\tilde{V}_{ab,nom}} \right| \\
|\tilde{I}_{bc}| &= \left| \frac{\tilde{S}_{bc,nom}}{\tilde{V}_{bc,nom}} \right| \\
|\tilde{I}_{ca}| &= \left| \frac{\tilde{S}_{ca,nom}}{\tilde{V}_{ca,nom}} \right|
\end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
Arg(\tilde{I}_{ab}) &= Arg(\tilde{V}_{ab}) - Arg(\tilde{S}_{ab,nom}) \\
Arg(\tilde{I}_{bc}) &= Arg(\tilde{V}_{bc}) - Arg(\tilde{S}_{bc,nom}) \\
Arg(\tilde{I}_{ca}) &= Arg(\tilde{V}_{ca}) - Arg(\tilde{S}_{ca,nom})
\end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{I}_{a_injected} &= |\tilde{I}_{ca}| * \exp(j * Arg(\tilde{I}_{ca})) - |\tilde{I}_{ab}| * \exp(j * Arg(\tilde{I}_{ab})) \\
\tilde{I}_{b_injected} &= |\tilde{I}_{ab}| * \exp(j * Arg(\tilde{I}_{ab})) - |\tilde{I}_{bc}| * \exp(j * Arg(\tilde{I}_{bc})) \\
\tilde{I}_{c_injected} &= |\tilde{I}_{bc}| * \exp(j * Arg(\tilde{I}_{bc})) - |\tilde{I}_{ca}| * \exp(j * Arg(\tilde{I}_{ca}))
\end{aligned} \tag{3.8}$$

→Φορτίο σταθερής αντίστασης σε συνδεσμολογία αστέρα:

Στα φορτία αυτά συνήθως ως δεδομένο δίνεται η ισχύς σε ονομαστική τάση και από αυτή τη τιμή με τη βοήθεια της εξίσωσης (3.9) μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της σύνθετης αγωγιμότητας του φορτίου ανά φάση. Στη συνέχεια για δεδομένη τάση μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα που απορροφάει το φορτίο και κατ'επέκταση το εγχεόμενο ρεύμα(εξίσωση (3.10)).

$$\begin{aligned}\tilde{Y}_a &= \frac{(\tilde{S}_{a,nom})^*}{|\tilde{V}_{a,nom}|^2} \\ \tilde{Y}_b &= \frac{(\tilde{S}_{b,nom})^*}{|\tilde{V}_{b,nom}|^2} \\ \tilde{Y}_c &= \frac{(\tilde{S}_{c,nom})^*}{|\tilde{V}_{c,nom}|^2}\end{aligned}\quad (3.9)$$

$$\begin{aligned}\tilde{I}_{a_injected} &= -(\tilde{Y}_a * \tilde{V}_a) \\ \tilde{I}_{b_injected} &= -(\tilde{Y}_b * \tilde{V}_b) \\ \tilde{I}_{c_injected} &= -(\tilde{Y}_c * \tilde{V}_c)\end{aligned}\quad (3.10)$$

→Φορτίο σταθερής αντίστασης σε συνδεσμολογία τριγώνου:

$$\begin{aligned}\tilde{Y}_{ab} &= \frac{(\tilde{S}_{ab,nom})^*}{|\tilde{V}_{ab,nom}|^2} \\ \tilde{Y}_{bc} &= \frac{(\tilde{S}_{bc,nom})^*}{|\tilde{V}_{bc,nom}|^2} \\ \tilde{Y}_{ca} &= \frac{(\tilde{S}_{ca,nom})^*}{|\tilde{V}_{ca,nom}|^2}\end{aligned}\quad (3.11)$$

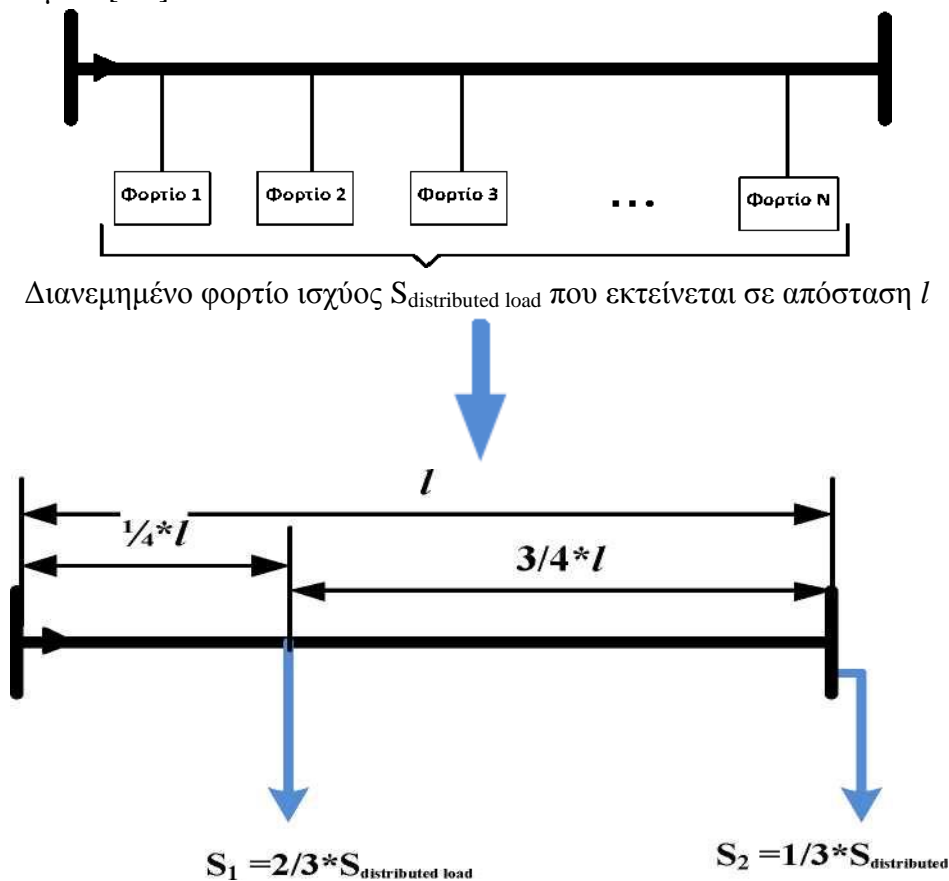
$$\begin{aligned}\tilde{I}_{a_injected} &= \tilde{Y}_{ca} * \tilde{V}_{ca} - \tilde{Y}_{ab} * \tilde{V}_{ab} = \tilde{Y}_{ca} * (\tilde{V}_c - \tilde{V}_a) - \tilde{Y}_{ab} * (\tilde{V}_a - \tilde{V}_b) \\ \tilde{I}_{b_injected} &= \tilde{Y}_{ab} * \tilde{V}_{ab} - \tilde{Y}_{bc} * \tilde{V}_{bc} = \tilde{Y}_{ab} * (\tilde{V}_a - \tilde{V}_b) - \tilde{Y}_{bc} * (\tilde{V}_b - \tilde{V}_c) \\ \tilde{I}_{c_injected} &= \tilde{Y}_{bc} * \tilde{V}_{bc} - \tilde{Y}_{ca} * \tilde{V}_{ca} = \tilde{Y}_{bc} * (\tilde{V}_b - \tilde{V}_c) - \tilde{Y}_{ca} * (\tilde{V}_c - \tilde{V}_a)\end{aligned}\quad (3.12)$$

Όλες οι παραπάνω περιπτώσεις αποτελούν τις εξισώσεις των συγκεντρωμένων φορτίων των δικτύων διανομής, έτσι ώστε να υπολογιστούν τα εγχεόμενα ρεύματά τους. Οι εξισώσεις αναπτύχθηκαν τόσο για τις περιπτώσεις των συνδεδεμένων κατά αστέρα όσο και για τις συνδεσμολογίες τριγώνου. Μπορούν μάλιστα οι ίδιες εξισώσεις να εφαρμοστούν και για περιπτώσεις φορτίων που τροφοδοτούνται μόνο από μια ή δύο φάσεις.

Εκτός όμως από τα συγκεντρωμένα φορτία υπάρχουν και τα διανεμημένα. Στο Σχήμα 3.3 δόθηκε ένα παράδειγμα διανεμημένου και συγκεντρωμένου φορτίου στο ίδιο δίκτυο. Η μεθοδολογία η οποία ακολουθείται σε αυτή την περίπτωση είναι η προσέγγιση των κατανεμημένων φορτίων με αντίστοιχα συγκεντρωμένα [3.1].

Το διανεμημένο φορτίο μετατρέπεται σε δύο συγκεντρωμένα φορτία. Το πρώτο συγκεντρωμένο φορτίο έχει τιμή ισχύος τα $\frac{2}{3}$ της συνολικής του διανεμημένου και το δεύτερο το $\frac{1}{3}$ της τιμής του διανεμημένου. Για την εισαγωγή των δύο αυτών φορτίων δημιουργείται ένας ζυγός σε απόσταση ίση με το $\frac{1}{4}$ της συνολικής απόστασης που εκτείνεται το διανεμημένο φορτίο και τοποθετείται στο συγκεκριμένο ζυγό το πρώτο φορτίο, ενώ το δεύτερο φορτίο τοποθετείται στο τέλος της γραμμής που εκτείνεται το προς ανάλυση διανεμημένο φορτίο [3.2].

Γραφική απεικόνιση της μεθοδολογίας αυτής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η προσέγγιση αυτή είναι η καλύτερη δυνατή μιας και έχει πολύ χαμηλή πολυπλοκότητα, δεν απαιτεί πολλούς υπολογισμούς καθώς και επίσης δεν παρουσιάζει μεγάλο σφάλμα ως προς την πραγματική πτώση τάσης που δημιουργεί το διανεμημένο φορτίο. Ακόμα η μεθοδολογία αυτή δεν παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις ως προς την απώλεια ισχύος επί της γραμμής. Εναλλακτικές μέθοδοι, όπως η θεώρηση N συγκεντρωμένων φορτίων πάνω στη γραμμή (με N να τείνει θεωρητικά στο άπειρο) όχι μόνο αυξάνουν την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου και μειώνουν την απόδοσή του, αλλά παράλληλα δεν προσφέρουν αισθητά καλύτερα αποτελέσματα[3.1].



Σχήμα 3.4 Αναγωγή διανεμημένου φορτίου σε δύο συγκεντρωμένα [3.1]

3.3 ΕΓΚΑΡΣΙΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ

Ένα από τα πιο γνωστά προβλήματα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν σε εναλλασσόμενη τάση είναι η αυξημένη απαίτηση σε άεργο ισχύ εξαιτίας του ότι τα φορτία σε ένα σύστημα διανομής είναι συνήθως επαγωγικού χαρακτήρα. Η αύξηση της απαίτησης σε άεργο ισχύ μειώνει τη διαθέσιμη ενεργό ισχύ στο σύστημα και αναγκάζει την παροχή μεγαλύτερης τιμής ρεύματος έτσι ώστε να φτάσει μια δεδομένη ποσότητα ενεργού ισχύος στο φορτίο. Η αύξηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται μεγαλύτερες πτώσεις τάσης στους ζυγούς του δικτύου. Ακόμα, η παρουσία μεγαλύτερων ρευμάτων καταπονεί το σύνολο των στοιχείων του δικτύου και μειώνεται η αξιοπιστία του συστήματος, καθώς ο ρυθμός βλαβών εμφανίζεται μεγαλύτερος. Επίσης από το σύνολο της ισχύος που παράγεται ένα ποσοστό μόνο καταλήγει να χρησιμοποιείται (ενεργός ισχύς) και έτσι το κόστος παραγωγής αυξάνεται όσο μεγαλώνει και το ποσοστό της αέργου ισχύος [3.3].

Επομένως, ιδιαίτερος τις ώρες της αιχμής, πρέπει με κάποιο τρόπο να υπάρξει εισαγωγή αέργου ισχύος στο δίκτυο. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνεται από την εγκατάσταση εγκάρσιων πυκνωτών σε ορισμένους ζυγούς του δικτύου. Οι πυκνωτές αυτοί μπορούν να συνοδεύονται από χειροκίνητους ή χειριζόμενους από απόσταση διακόπτες έτσι ώστε να μπορούν να εισάγονται στο δίκτυο σε στιγμές αιχμής όπου η απαίτηση σε άεργο ισχύ είναι αυξημένη και να αποσυνδέονται όταν δεν απαιτείται τόσο μεγάλη ποσότητα αέργου ισχύος. Ενδεικτικό είναι ότι κατά τη λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων λόγω της διαδικασίας εκκίνησης και λειτουργίας πολλών κινητήρων ταυτόχρονα, απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα αέργου ισχύος. Αντίθετα τις απογευματινές ώρες που τα εν λόγω φορτία είναι αποσυνδεδεμένα δεν παρουσιάζεται τόση ανάγκη σε άεργο ισχύ και η προσθήκη εγκάρσιων πυκνωτών στο σύστημα ενδέχεται να προκαλέσει, αντί για μείωση, αύξηση της πτώσης τάσης κατά απόλυτη τιμή.

Επίσης κρίνεται αναγκαίο να τονιστεί πως συνήθως οι εταιρίες διανομής και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θέτουν στους πελάτες τους όριο στο ποσοστό της αέργου ισχύος επί της συνολικής απαίτησής τους σε ισχύ. Με άλλα λόγια τους υποχρεώνουν να διατηρούν πάνω από ένα όριο τον συντελεστή ισχύος τους [3.1].

Οι εγκάρσιοι πυκνωτές που τοποθετούνται στα συστήματα διανομής μπορούν να προσομοιωθούν χρησιμοποιώντας το μοντέλο του φορτίου σταθερής αντίστασης, όπως αυτό περιγράφηκε στην Ενότητα 3.2. Συγκεκριμένα η περιγραφή του φορτίου θα δίνεται και πάλι με την ισχύ του φορτίου σε κατάσταση ονομαστικής φόρτισης. Αυτή τη φορά όμως η συνολική ισχύς του φορτίου θα αποτελείται μόνο από άεργη ισχύ και μηδενική ενεργή. Να σημειωθεί επίσης ότι το πρόσημο της άεργης ισχύος θα είναι αρνητικό(σύμβαση φορτίου), δίνοντας την έννοια ότι τροφοδοτεί ο εγκάρσιος πυκνωτής με άεργο ισχύ το σύστημα και δεν την απορροφά από το δίκτυο. Επομένως οι εξισώσεις που θα ισχύουν για τα εγγεόμενα ρεύματα του εγκάρσιου πυκνωτή θα είναι:

→ Εγκάρσιος πυκνωτής σε συνδεσμολογία αστέρα:

$$\begin{aligned}\tilde{Y}_a &= \frac{(\tilde{S}_{a,nom})^*}{|\tilde{V}_{a,nom}|^2} = \frac{(jQ_{a,nom})^*}{|\tilde{V}_{a,nom}|^2} = \frac{-jQ_{a,nom}}{|\tilde{V}_{a,nom}|^2} \\ \tilde{Y}_b &= \frac{(\tilde{S}_{b,nom})^*}{|\tilde{V}_{b,nom}|^2} = \frac{(jQ_{b,nom})^*}{|\tilde{V}_{b,nom}|^2} = \frac{-jQ_{b,nom}}{|\tilde{V}_{b,nom}|^2} \\ \tilde{Y}_c &= \frac{(\tilde{S}_{c,nom})^*}{|\tilde{V}_{c,nom}|^2} = \frac{(jQ_{c,nom})^*}{|\tilde{V}_{c,nom}|^2} = \frac{-jQ_{c,nom}}{|\tilde{V}_{c,nom}|^2}\end{aligned}\quad (3.13)$$

Όπου $Q_{a,nom} < 0$ η ονομαστική άεργος ισχύ που «καταναλώνει» ο πυκνωτής ως φορτίο (γι' αυτό και θα έχει αρνητική τιμή καθώς παράγει άεργο ισχύ). Αν πολλαπλασιάσουμε την αγωγιμότητα \tilde{Y}_a με την τάση \tilde{V}_a θα υπολογίσουμε το ρεύμα που απορροφά ο πυκνωτής (έχουμε κάνει σύμβαση φορτίου). Επομένως το ρεύμα που αναχωρεί από τον πυκνωτή, δηλαδή το εγχεόμενο ρεύμα θα είναι το αντίθετο του γινομένου $\tilde{Y}_a * \tilde{V}_a$.

$$\begin{aligned}\tilde{I}_{a_injected} &= -(\tilde{Y}_a * \tilde{V}_a) \\ \tilde{I}_{b_injected} &= -(\tilde{Y}_b * \tilde{V}_b) \\ \tilde{I}_{c_injected} &= -(\tilde{Y}_c * \tilde{V}_c)\end{aligned}\quad (3.14)$$

→ Εγκάρσιος πυκνωτής σε συνδεσμολογία τριγώνου:

$$\begin{aligned}\tilde{Y}_{ab} &= \frac{(\tilde{S}_{ab,nom})^*}{|\tilde{V}_{ab,nom}|^2} = \frac{(jQ_{ab,nom})^*}{|\tilde{V}_{ab,nom}|^2} = \frac{-jQ_{ab,nom}}{|\tilde{V}_{ab,nom}|^2} \\ \tilde{Y}_{bc} &= \frac{(\tilde{S}_{bc,nom})^*}{|\tilde{V}_{bc,nom}|^2} = \frac{(jQ_{bc,nom})^*}{|\tilde{V}_{bc,nom}|^2} = \frac{-jQ_{bc,nom}}{|\tilde{V}_{bc,nom}|^2} \\ \tilde{Y}_{ca} &= \frac{(\tilde{S}_{ca,nom})^*}{|\tilde{V}_{ca,nom}|^2} = \frac{(jQ_{ca,nom})^*}{|\tilde{V}_{ca,nom}|^2} = \frac{-jQ_{ca,nom}}{|\tilde{V}_{ca,nom}|^2}\end{aligned}\quad (3.15)$$

Όπου όπως και πριν έχει γίνει σύμβαση φορτίου, επομένως $Q_{ab,nom} < 0$

$$\begin{aligned}\tilde{I}_{a_injected} &= \tilde{Y}_{ca} * \tilde{V}_{ca} - \tilde{Y}_{ab} * \tilde{V}_{ab} = \tilde{Y}_{ca} * (\tilde{V}_c - \tilde{V}_a) - \tilde{Y}_{ab} * (\tilde{V}_a - \tilde{V}_b) \\ \tilde{I}_{b_injected} &= \tilde{Y}_{ab} * \tilde{V}_{ab} - \tilde{Y}_{bc} * \tilde{V}_{bc} = \tilde{Y}_{ab} * (\tilde{V}_a - \tilde{V}_b) - \tilde{Y}_{bc} * (\tilde{V}_b - \tilde{V}_c) \\ \tilde{I}_{c_injected} &= \tilde{Y}_{bc} * \tilde{V}_{bc} - \tilde{Y}_{ca} * \tilde{V}_{ca} = \tilde{Y}_{bc} * (\tilde{V}_b - \tilde{V}_c) - \tilde{Y}_{ca} * (\tilde{V}_c - \tilde{V}_a)\end{aligned}\quad (3.16)$$

3.4 ΓΡΑΜΜΕΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

3.4.1 Μοντελοποίηση

Οι γραμμές διανομής αποτελούν το πιο συχνά εμφανιζόμενο στοιχείο των κλάδων του δικτύου. Αναλαμβάνουν να μεταφέρουν την ηλεκτρική ισχύ από τους υποσταθμούς διανομής στα φορτία των καταναλωτών. Η κατασκευή τους και η τοποθέτησή τους γίνεται με γνώμονα τη συνεχή και απροβλημάτιστη λειτουργία του δικτύου. Δεδομένου όμως του μήκους και του πλήθους των γραμμών είναι κατανοητό ότι πρέπει να επιλεγούν προσεκτικά, φροντίζοντας να καλύπτουν και μια μελλοντική αύξηση της παρεχόμενης ισχύος μέσω του δικτύου διανομής.

Οι γραμμές διανομής πρέπει να χαρακτηρίζονται από:

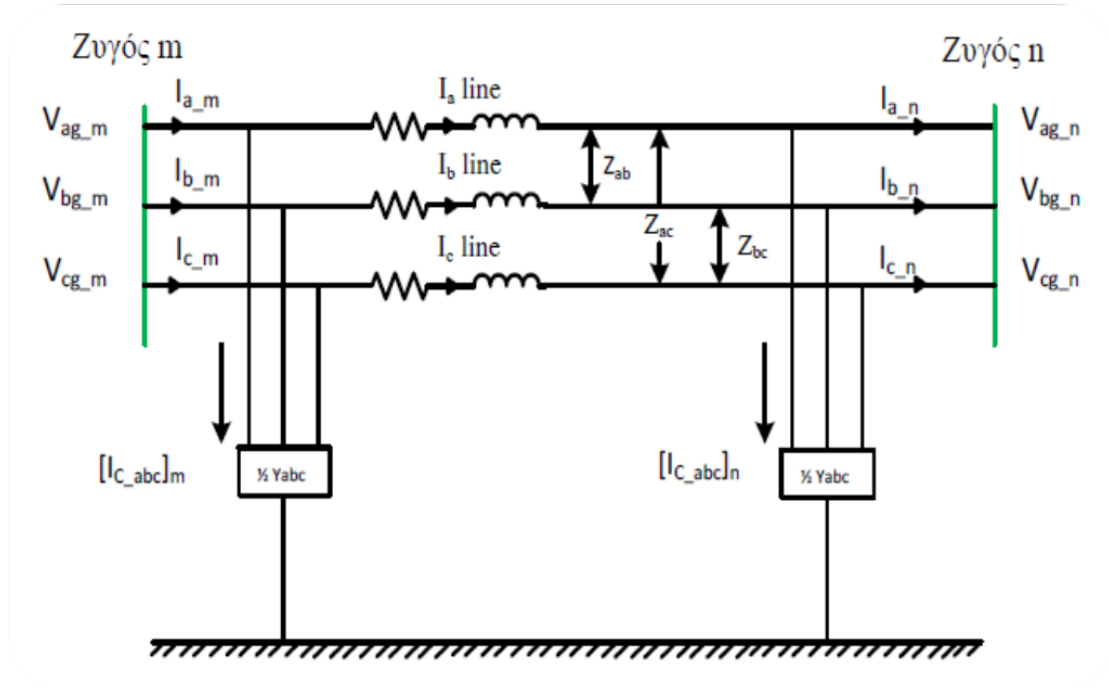
- τη μικρότερη δυνατή αντίσταση έτσι ώστε να υπάρχουν οι λιγότερες απώλειες κατά τη διανομή. Υπενθυμίζεται ότι μεγάλες απώλειες κατά μήκος των γραμμών οδηγούν σε τάσεις αρκετά κάτω της ονομαστικής, που με τη σειρά τους οδηγούν σε υψηλά ρεύματα τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στα στοιχεία του δικτύου.
- την καλύτερη δυνατή αξιοπιστία ώστε ο ρυθμός βλαβών τους να είναι αρκετά μικρός. Μια βλάβη στο μέσον μιας γραμμής μπορεί να χρειαστεί αρκετές ώρες ή και μέρες επισκευής.
- αντοχή στην καταπόνηση εξαιτίας φυσικών φαινομένων και ακραίων καιρικών συνθηκών.

Για την κατασκευή του μοντέλου της γραμμής πρέπει να είναι γνωστά τα ακόλουθα χαρακτηριστικά της:

- Η τοπολογία της γραμμής, δηλαδή εάν είναι υπόγεια ή εναέρια καθώς και τις αποστάσεις μεταξύ των φάσεων αλλά και μεταξύ φάσεων και του ουδέτερου, εάν αυτός υπάρχει. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις οι γραμμές ακολουθούν συγκεκριμένη τυποποίηση στην οποία οι αποστάσεις αυτές είναι προκαθορισμένες και το μόνο που χρειάζεται να καθοριστεί είναι η σειρά εμφάνισης των φάσεων και να δηλωθεί η ύπαρξη ή όχι του ουδέτερου.
- Οι τύποι των αγωγών που χρησιμοποιούνται για τις φάσεις και τον ουδέτερο.

Όπως θα αναλυθεί στις Ενότητες 3.4.2 και 3.4.3 με τη βοήθεια των εν λόγω παραμέτρων υπολογίζεται η μήτρα σύνθετων αντιστάσεων σειράς Z_{abc} και η μήτρα εγκάρσιων αγωγιμοτήτων Y_{abc} της κάθε γραμμής [3.1].

Θεωρώντας δεδομένες τις ανωτέρω μήτρες, μπορεί να αναπτυχθεί το μοντέλο της γραμμής. Στο Σχήμα 3.5 φαίνονται στη γραμμή που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο ζυγούς τα μεγέθη που θα περιγράψουν οι εξισώσεις του μοντέλου.



Σχήμα 3.5 Μοντέλο τριφασικής γραμμής διανομής [3.1]

Οι εξισώσεις που θα χρειαστούμε για τον αλγόριθμο είναι της μορφής [3.2]:

$$[V_m] = [a] * [V_n] + [b] * [I_n] \quad (3.17)$$

$$[I_m] = [c] * [V_n] + [d] * [I_n] \quad (3.18)$$

$$[V_n] = [A] * [V_m] - [B] * [I_m] \quad (3.19)$$

Οι τάσεις στις παραπάνω εξισώσεις είναι φασικές. Με εφαρμογή των νόμων Kirchhoff και πράξεις μεταξύ των πινάκων θα υπολογίσουμε τους πίνακες $[a]$, $[b]$, $[c]$, $[d]$, $[A]$ και $[B]$.

Ισχύουν οι εξισώσεις:

$$[I_{line_abc}] = [I_n] + \frac{1}{2} * [Y_{abc}] * [V_n] \quad (3.20)$$

και
$$[V_m] = [V_n] + [Z_{abc}] * [I_{line_abc}] \quad (3.21)$$

Με βάση τις δύο τελευταίες εξισώσεις προκύπτει:

$$[\alpha] = [U] + \frac{1}{2} * [Z_{abc}] * [Y_{abc}] \quad (3.22)$$

$$[b] = [Z_{abc}] \quad (3.23)$$

Όπου ο $[U]$ είναι ο 3x3 μοναδιαίος πίνακας.

Ακόμη, ισχύει η εξίσωση:

$$[I_m] = [I_{line_abc}] + \frac{1}{2} * [Y_{abc}] * [V_m] \quad (3.24)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.20) και (3.17) (τόρα γνωρίζουμε τους πίνακες $[a]$ και $[b]$) και μετά από πράξεις μεταξύ πινάκων προκύπτουν:

$$[c] = [Y_{abc}] + \frac{1}{4} * [Y_{abc}] * [Z_{abc}] * [Y_{abc}] \quad (3.25)$$

και

$$[d] = [U] + \frac{1}{2} * [Z_{abc}] * [Y_{abc}] \quad (3.26)$$

Τέλος, για τους πίνακες $[A]$ και $[B]$ αρκεί να επιλύσουμε την εξίσωση (3.17) ως προς $[V_n]$. Έτσι προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$[A] = [a]^{-1} \quad (3.27)$$

και

$$[B] = [a]^{-1} * [b] \quad (3.28)$$

Εύκολα διαπιστώνεται πως η εξίσωση (3.19) δίνει τις τιμές της τάσης στο ζυγό n του Σχήματος 3.5, εφόσον είναι γνωστές οι τιμές των μεγεθών στο ζυγό m . Αντίστοιχα οι εξισώσεις (3.17) και (3.18) δίνουν τις τιμές της τάσης και του ρεύματος στο ζυγό m συναρτήσει των αντίστοιχων μεγεθών στο ζυγό n . Στο Κεφάλαιο 4 θα αναδειχθεί η σημασία αυτών των εξισώσεων στον αλγόριθμο ροής ισχύος.

3.4.2 Υπολογισμός μήτρας σύνθετων αντιστάσεων σειράς γραμμής

3.4.2.1 Εναέριες γραμμές διανομής

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.4.1, για να ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση των γραμμών είναι απαραίτητο να υπολογιστούν η μήτρα σύνθετων αντιστάσεων σειράς Z_{abc} και η μήτρα εγκάρσιας αγωγιμότητας Y_{abc} . Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται ότι εκτός της σύνθετης αντίστασης που υπάρχει κατά μήκος των γραμμών, εμφανίζεται σύνθετη αντίσταση μεταξύ των γραμμών. Επίσης στην περίπτωση που υπήρχε γραμμή ουδέτερου, θα έπρεπε να ληφθούν υπόψιν και οι σύνθετες αντιστάσεις που υπάρχουν μεταξύ των φάσεων και του ουδέτερου.

Η μέθοδος η οποία θα ακολουθηθεί για την εξαγωγή της μήτρας σύνθετων αντιστάσεων σειράς είναι η τροποποιημένη μέθοδος του Carson [3.2]. Σύμφωνα με αυτή ορίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

- \hat{z}_{ii} = σύνθετη αντίσταση αγωγού i σε $\frac{\Omega}{\text{mile}}$
- \hat{z}_{ij} = σύνθετη αντίσταση μεταξύ αγωγών i και j σε $\frac{\Omega}{\text{mile}}$

- $\hat{r}_i =$ αντίσταση αγωγού i σε $\frac{\Omega}{mile}$
- $D_{ij} =$ απόσταση μεταξύ αγωγών i και j σε feet
- $\rho =$ ειδική αντίσταση γης σε $\frac{\Omega}{meter}$
- $GMR_i =$ Μέση Γεωμετρική Ακτίνα αγωγού i σε feet
- $f =$ συχνότητα του συστήματος

Οι σχέσεις εύρεσης της μήτρας σύνθετης αντίστασης σειράς είναι:

$$\hat{z}_{ii} = \hat{r}_i + \frac{0.158836}{100} * f + j * \frac{0.202237}{100} * f * \left(\ln \left(\frac{1}{GMR_i} \right) + 7.6786 + \frac{1}{2} * \ln \left(\frac{\rho}{f} \right) \right) \quad (3.29)$$

$$\hat{z}_{ij} = \frac{0.158836}{100} * f + j * \frac{0.202237}{100} * f * \left(\ln \left(\frac{1}{D_{ij}} \right) + 7.6786 + \frac{1}{2} * \ln \left(\frac{\rho}{f} \right) \right) \quad (3.30)$$

Στις περιπτώσεις έλλειψης ουδετέρου ο πίνακας Z_{abc} που θα προκύψει θα είναι διαστάσεων 3x3 και μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς κάποια τροποποίηση στις εξισώσεις του 3.4.1. Εφόσον όμως η γραμμή έχει και ουδέτερο αγωγό τότε ο πίνακας που προκύπτει θα έχει διαστάσεις 4x4 και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αυτή τη διάσταση στις εξισώσεις των γραμμών.

Η λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα έρχεται από τη μέθοδο μείωσης του Kron [3.2]. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου φαίνεται με τις εξισώσεις (3.31) έως (3.36) που αναλύονται παρακάτω για την περίπτωση 3 φάσεων και ουδετέρου. Εξυπακούεται ότι στην περίπτωση απουσίας κάποιας φάσης μηδενίζονται τα αντίστοιχα στοιχεία που σχετίζονται με αυτή.

$$Z_{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{11} & \hat{z}_{12} & \hat{z}_{13} & \hat{z}_{1n} \\ \hat{z}_{21} & \hat{z}_{22} & \hat{z}_{23} & \hat{z}_{2n} \\ \hat{z}_{31} & \hat{z}_{32} & \hat{z}_{33} & \hat{z}_{3n} \\ \hat{z}_{n1} & \hat{z}_{n2} & \hat{z}_{n3} & \hat{z}_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$[\hat{z}_{ij}] = \begin{bmatrix} \hat{z}_{11} & \hat{z}_{12} & \hat{z}_{13} \\ \hat{z}_{21} & \hat{z}_{22} & \hat{z}_{23} \\ \hat{z}_{31} & \hat{z}_{32} & \hat{z}_{33} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$[\hat{z}_{in}] = \begin{bmatrix} \hat{z}_{1n} \\ \hat{z}_{2n} \\ \hat{z}_{3n} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$[\hat{z}_{nj}] = [\hat{z}_{n1} \quad \hat{z}_{n2} \quad \hat{z}_{n3}] \quad (3.34)$$

$$[\hat{z}_{nn}] = [\hat{z}_{nn}] \quad (3.35)$$

$$[Z_{ABC}] = [\hat{z}_{ij}] - [\hat{z}_{in}] * [\hat{z}_{nn}]^{-1} * [\hat{z}_{nj}] \quad (3.36)$$

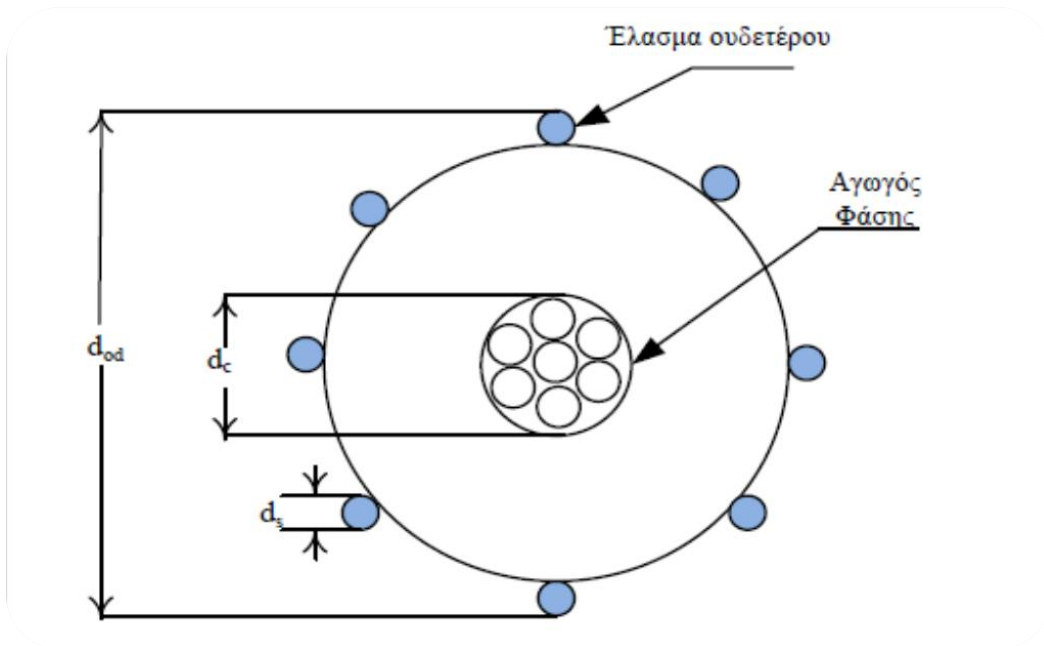
3.4.2.2 Υπόγειες γραμμές διανομής

Οι υπόγειες γραμμές και γενικότερα η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας υπογείως συνηθίζεται στα δίκτυα διανομής μεγάλων πόλεων και πυκνοκατοικημένων περιοχών, διότι έχει πολλαπλά οφέλη για τη διαρρύθμιση του περιβάλλοντος της πόλης. Με τέτοιου είδους δίκτυα:

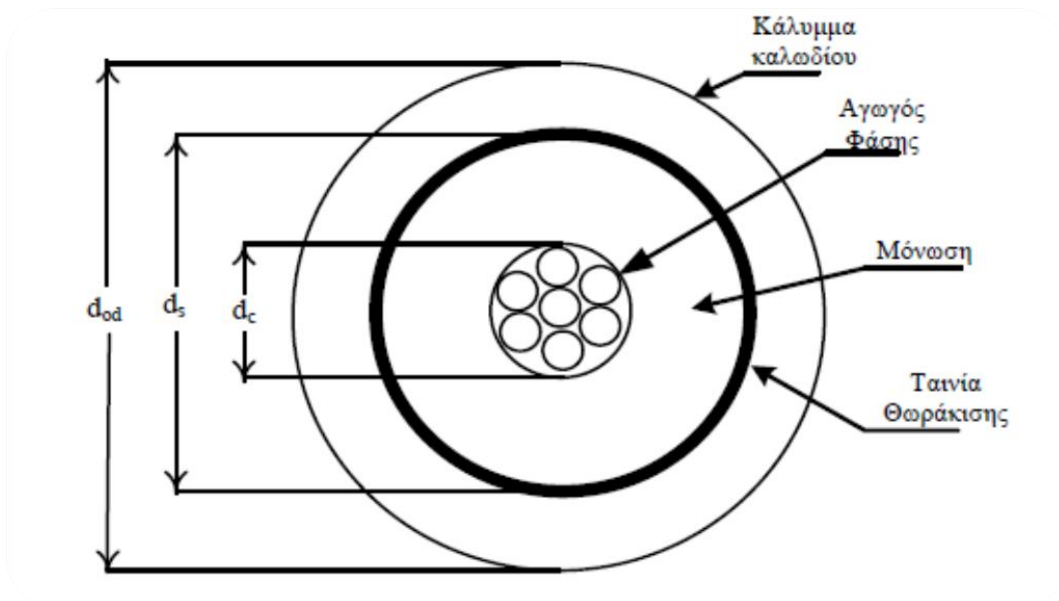
- Δεν δεσμεύεται χώρος από το ήδη επιβαρυνόμενο περιβάλλον των μεγαλουπόλεων.
- Δεν κινδυνεύει ο εξοπλισμός από εξωγενείς παράγοντες όπως έντονα καιρικά φαινόμενα.
- Υπάρχει μεγαλύτερη ασφάλεια για τους ανθρώπους, καθώς πιο δύσκολα μπορεί να έρθουν σε επαφή με τον εξοπλισμό του δικτύου. [3.1]

Από την άλλη πλευρά όμως, μια ενδεχόμενη βλάβη στο υπόγειο δίκτυο θα έχει ως αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερο χρόνο αποκατάστασης. Επίσης το κόστος κατασκευής των υπογείων δικτύων είναι πολύ μεγαλύτερο από των αντίστοιχων εναέριων.

Οι υπόγειες γραμμές αποτελούνται από τα καλώδια που έχουν τοποθετημένο στο εσωτερικό τους τον ουδέτερο (concentric neutral cables) και από τα καλώδια που έχουν ταινία θωράκισης (tape shielded cables) πριν το κάλυμμα του καλωδίου. Θα πρέπει να τονιστεί ότι στην περίπτωση των tape shielded καλωδίων ο αγωγός του ουδέτερου βρίσκεται υποχρεωτικά σε ξεχωριστό καλώδιο [3.2]. Στα Σχήματα 3.6 και 3.7 φαίνονται οι δύο κατηγορίες καλωδίων καθώς και κάποια από τα μεγέθη τους που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς των μητρών.



Σχήμα 3.6 : Καλώδιο με ομόκεντρο ουδέτερο (concentric neutral cable) [3.1]



Σχήμα 3.7: Θωρακισμένο καλώδιο (table shielded cable) [3.1]

Για τον υπολογισμό της μήτρας αντιστάσεων σειράς των καλωδίων με ομόκεντρο ουδέτερο χρειάζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

- GMR_c = Μέση Γεωμετρική Ακτίνα αγωγού φάσης (feet)

- GMR_s = Μέση Γεωμετρική Ακτίνα ελάσματος ουδετέρου (feet)
- GMR_{cn} = ισοδύναμο Μέσης Γεωμετρικής Ακτίνας ουδετέρου ενός καλωδίου (feet)
- r_c = αντίσταση αγωγού φάσης $\left(\frac{\Omega}{mile}\right)$
- r_s = αντίσταση ελάσματος ουδετέρου $\left(\frac{\Omega}{mile}\right)$
- d_c = διάμετρος του αγωγού φάσης (inches)
- d_{od} = ονομαστική διάμετρος του αγωγού ουδετέρου του καλωδίου (inches)
- d_s = διάμετρος των ελασμάτων του αγωγού ουδετέρου (inches)
- k = σύνολο ελασμάτων του αγωγού ουδετέρου
- R = ακτίνα του κύκλου που περνάει από το κέντρο των ελασμάτων του ουδετέρου (feet)
- r_{cn} = ισοδύναμο αντίστασης ουδετέρου στο καλώδιο $\left(\frac{\Omega}{mile}\right)$
- $D_{phase\ n,m}$ = απόσταση μεταξύ αγωγών φάσης n και m (feet)
- $D_{phase\ n,neutral\ n}$ = απόσταση μεταξύ αγωγού φάσης n και ελασμάτων ουδετέρου του ίδιου καλωδίου (feet)
- $D_{phase\ n,neutral\ m}$ = μέση γεωμετρική απόσταση μεταξύ αγωγού φάσης n και ελασμάτων ουδετέρου του καλωδίου της φάσης m (feet)

Στις εξισώσεις (3.37) έως (3.41) υπολογίζονται όσα από τα μεγέθη δεν δίνονται στους πίνακες της βιβλιογραφίας [3.2] ή ως δεδομένα από την τοπολογία του χώρου τοποθέτησης των καλωδίων:

$$R = \frac{d_{od} - d_s}{24} \quad (3.37)$$

$$D_{phase\ n,neutral\ n} = R \quad (3.38)$$

$$r_{cn} = \frac{r_s}{k} \quad (3.39)$$

$$D_{phase\ n,neutral\ m} = \sqrt[k]{D_{phase\ n,m}^k - D_{phase\ m,neutral\ m}^k} \quad (3.40)$$

$$GMR_{cn} = \sqrt[k]{GMR_s * k * R^{k-1}} \quad (3.41)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.29) και (3.30) και αντικαθιστώντας τα αντίστοιχα μεγέθη με βάση τις εξισώσεις (3.37) έως (3.41) θα προκύψει ο $[Z_{primitive}]$ για υπόγεια καλώδια τριών φάσεων με ομόκεντρο ουδέτερο. Ο πίνακας αυτός, λαμβανομένου υπόψιν ότι θα εμφανίζονται τρεις φάσεις και τρεις ουδέτεροι θα έχει διαστάσεις 6x6.

Με βάση τις εξισώσεις ελαχιστοποίησης του Kron ((3.31) έως (3.36)), ο πίνακας αυτός εύκολα προσεγγίζεται σε έναν άλλο με διαστάσεις που μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί στις εξισώσεις των γραμμών ((3.21) έως (3.26)).

Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι στην περίπτωση τοποθέτησης σε φρεάτια των υπόγειων καλωδίων, η εξίσωση (3.40) μπορεί να απλοποιηθεί σε:

$$D_{phase\ n,neutral\ m} \cong D_{phase\ n,m} \quad (3.42)$$

μιας και η απόσταση μεταξύ των δύο καλωδίων υπερβαίνει κατά πολύ, σε αυτή την περίπτωση, την ακτίνα μεταξύ αγωγού φάσης και ουδέτερου του δεύτερου καλωδίου.

Εκτός όμως από την περίπτωση των υπόγειων καλωδίων με ομόκεντρο ουδέτερο υπάρχουν και τα υπόγεια θωρακισμένα καλώδια. Σε αυτά τα καλώδια, για να υπολογιστεί η μήτρα σύνθετης αντίστασης σειράς χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα μεγέθη:

- d_c = διάμετρος του αγωγού φάσης (inches)
- d_s = εξωτερική διάμετρος της ταινίας θωράκισης (inches)
- d_{od} = εξωτερική διάμετρος του καλλύμματος καλωδίου (inches)
- T = πάχος της ταινίας θωράκισης σε mils ($1\ mils = \frac{1}{1000}\ inch$)
- r_{shield} = αντίσταση ταινίας θωράκισης $\left(\frac{\Omega}{mile}\right)$
- GMR_{shield} = ισοδύναμο γεωμετρικής μέσης ακτίνας που περνάει μέσα από το κέντρο της ταινίας θωράκισης (feet)
- r_c = αντίσταση αγωγού φάσης $\left(\frac{\Omega}{mile}\right)$
- GMR_c = Γεωμετρική μέση ακτίνα αγωγού φάσης (feet)

Τα περισσότερα από τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να βρεθούν από τους πίνακες της βιβλιογραφίας [3.2]. Παρ' όλα αυτά κάποια από τα μεγέθη εξάγονται σε συνδυασμό μεγεθών που δίνονται ως δεδομένα, από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$GMR_{shield} = \frac{d_s - \frac{T}{1000}}{24} \quad (3.43)$$

$$r_{shield} = \frac{2.3715 * 7.9385}{d_s * T} \quad (3.44)$$

Για να εξαχθεί η τιμή της μήτρας αντιστάσεων ακολουθείται και πάλι η μέθοδος του Carson που περιγράφεται στις εξισώσεις (3.29) και (3.30). Εφόσον πρέπει, για παράδειγμα, να υπολογιστεί η μήτρα σύνθετης αντίστασης σειράς ενός θωρακισμένου καλωδίου μιας μόνο φάσης και ενός αγωγού ουδέτερου θα προκύψει σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.29) και (3.30) ένας πίνακας $[Z_{primitive}]$ διαστάσεων 3×3 . Η κάθε γραμμή αυτού του πίνακα αναφέρεται στον αγωγό φάσης, στην ταινία θωράκισης και στον ουδέτερο αντιστοίχως. Όπως όμως προαναφέρθηκε, αυτό το οποίο απαιτείται στην

περίπτωση της γραμμής είναι οι σύνθετες αντιστάσεις των αγωγών φάσεων και οι μεταξύ τους αυτεπαγωγές. Εφόσον, λοιπόν, υπάρχει μόνο μια φάση θα πρέπει να προκύπτει ένας πίνακας 3x3 με όλα τα στοιχεία μηδενικά, εκτός από το διαγώνιο στοιχείο του οποίου η γραμμή αντιστοιχεί στη φάση του καλωδίου.

Ο υπολογισμός της τιμής αυτού του στοιχείου μπορεί να γίνει από τον πίνακα $[Z_{primitive}]$ που υπολογίστηκε ήδη με τα παραπάνω στοιχεία και συγκεκριμένα με εφαρμογή των εξισώσεων (3.31) έως (3.36) σύμφωνα με τη μέθοδο μείωσης του Kron [3.2].

3.4.3 Υπολογισμός μήτρας εγκάρσιων αγωγιμοτήτων γραμμής

3.4.3.1 Εναέριες γραμμές διανομής

Εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα, η διαφορά της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου καθώς απομακρύνεται κάποιος από τον αγωγό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χωρητικοτήτων και ως εκ τούτου την ανάγκη εισαγωγής της εγκάρσιας μήτρας αγωγιμότητας στο μοντέλο που υλοποιήθηκε στην Ενότητα 3.4.1 για τη γραμμή διανομής.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η χρήση αυτής της μήτρας, ειδικά στις εναέριες γραμμές, δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα σε σχέση με την περίπτωση αγνόησής της. Παρόλα αυτά για να θεωρηθεί ολοκληρωμένη η μελέτη, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί και να συμπεριληφθεί στο μοντέλο της γραμμής [3.1].

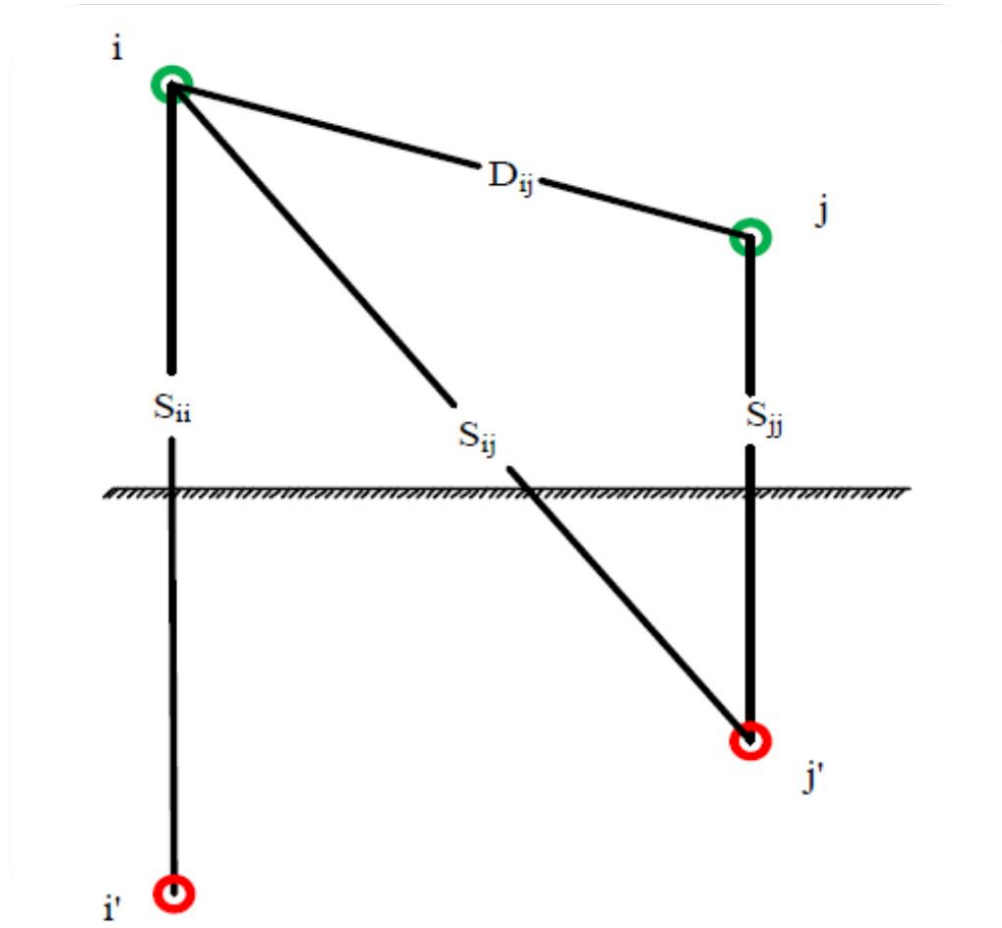
Στον υπολογισμό της μήτρας εγκάρσιας αγωγιμότητας χρησιμοποιείται η μέθοδος των ειδώλων και της επαλληλίας. Ειδικότερες λεπτομέρειες του υπολογισμού των τελικών εξισώσεων (3.45) και (3.46) μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία [3.2]. Κρίνεται όμως αναγκαίο να αναφερθεί πως στη μέθοδο των ειδώλων δημιουργούνται είδωλα των φορτίων που ουσιαστικά είναι τα συμμετρικά τους ως προς το γειωμένο επίπεδο (έδαφος), με αντίθετο όμως φορτίο. Ως εκ τούτου στο Σχήμα 3.8 χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι συμβολισμοί:

- S_{ii} = απόσταση αγωγού i από το είδωλό του (feet)
- D_{ij} = απόσταση αγωγού i από τον αγωγό j (feet)
- S_{ij} = απόσταση αγωγού i από το είδωλο του αγωγού j (feet)
- RD_i = ακτίνα αγωγού i (feet)

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3.45) και (3.46) μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές των συντελεστών δυναμικού:

$$\hat{p}_{ii} = 11.17689 * \ln \left(\frac{S_{ii}}{RD_i} \right) \frac{\text{mile}}{\mu F} \quad (3.45)$$

$$\hat{p}_{ij} = 11.17689 * \ln \left(\frac{S_{ij}}{D_{ij}} \right) \frac{\text{mile}}{\mu F} \quad (3.46)$$



Σχήμα 3.8: Αποστάσεις στις εναέριες γραμμές [3.1]

Εφόσον έχουμε απουσία ουδετέρου ο πίνακας που θα περιλαμβάνει τους συντελεστές δυναμικού θα έχει, όμοια με την περίπτωση της μήτρας αντιστάσεων, διαστάσεις 3×3 . Έτσι με τη χρησιμοποίηση των εξισώσεων (3.47), (3.48) και (3.49) υπολογίζεται η μήτρα εγκάρσιων αγωγιμοτήτων.

$$[p_{abc}] = \begin{bmatrix} \hat{p}_{11} & \hat{p}_{12} & \hat{p}_{13} \\ \hat{p}_{21} & \hat{p}_{22} & \hat{p}_{23} \\ \hat{p}_{31} & \hat{p}_{32} & \hat{p}_{33} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$[C_{abc}] = [p_{abc}]^{-1} \quad (3.48)$$

$$[Y_{abc}] = 0 + j * \omega * [C_{abc}] \frac{\mu S}{mile} \quad (3.49)$$

Όμοια με την ανάλυση των εξισώσεων (3.31) έως (3.36) της Ενότητας 3.4.2.1, στην περίπτωση που υπάρχει και ουδέτερος αγωγός πρέπει να ακολουθηθεί η μέθοδος μείωσης του Kron, η οποία αναλύεται στις εξισώσεις (3.50) έως (3.55).

Το αποτέλεσμα της εξίσωσης (3.55) μπορεί εν συνεχεία να τοποθετηθεί στην εξίσωση (3.48). Με αντικατάσταση του πίνακα $[C_{abc}]$ στην (3.49) υπολογίζεται τελικά η τελική τιμή της εγκάρσιας αγωγιμότητας για τις εναέριες γραμμές.

$$p_{primitive} = \begin{bmatrix} \hat{p}_{11} & \hat{p}_{12} & \hat{p}_{13} & \hat{p}_{1n} \\ \hat{p}_{21} & \hat{p}_{22} & \hat{p}_{23} & \hat{p}_{2n} \\ \hat{p}_{31} & \hat{p}_{32} & \hat{p}_{33} & \hat{p}_{3n} \\ \hat{p}_{n1} & \hat{p}_{n2} & \hat{p}_{n3} & \hat{p}_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$[\hat{p}_{ij}] = \begin{bmatrix} \hat{p}_{11} & \hat{p}_{12} & \hat{p}_{13} \\ \hat{p}_{21} & \hat{p}_{22} & \hat{p}_{23} \\ \hat{p}_{31} & \hat{p}_{32} & \hat{p}_{33} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$[\hat{p}_{in}] = \begin{bmatrix} \hat{p}_{1n} \\ \hat{p}_{2n} \\ \hat{p}_{3n} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$[\hat{p}_{nj}] = [\hat{p}_{n1} \quad \hat{p}_{n2} \quad \hat{p}_{n3}] \quad (3.53)$$

$$[\hat{p}_{nn}] = [\hat{p}_{nn}] \quad (3.54)$$

$$[p_{ABC}] = [\hat{p}_{ij}] - [\hat{p}_{in}] * [\hat{p}_{nn}]^{-1} * [\hat{p}_{nj}] \quad (3.55)$$

3.4.3.2 Υπόγειες γραμμές διανομής

Όπως στις εναέριες, έτσι και στις υπόγειες γραμμές είναι αναγκαίο να υπολογιστεί η μήτρα εγκάρσιων αγωγιμοτήτων ώστε να χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο της γραμμής που περιγράφηκε στην Ενότητα 3.4.1. Όπως θα γίνει εύκολα αντιληπτό, τόσο για τις περιπτώσεις των καλωδίων με ομόκεντρο ουδέτερο όσο και για των θωρακισμένων υπόγειων καλωδίων, ο υπολογισμός της συγκεκριμένης μήτρας είναι μια πολύ πιο

εύκολη διαδικασία σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις που έχουν ήδη περιγραφεί.

Στα υπόγεια καλώδια με ομόκεντρο ουδέτερο ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη για την εύρεση της μήτρας εγκάρσιας αγωγιμότητας [3.1]:

- R_b = ακτίνα του κύκλου που περνάει μέσα από το κέντρο του συνόλου των ελασμάτων του ουδέτερου (inches)
- d_c = διάμετρος του αγωγού φάσης (inches)
- d_s = διάμετρος των ελασμάτων του αγωγού ουδέτερου (inches)
- k = σύνολο ελασμάτων του αγωγού ουδέτερου
- RD_c = ακτίνα του αγωγού φάσης (inches)
- RD_s = ακτίνα των ελασμάτων του αγωγού ουδέτερου (inches)

Με τη βοήθεια της εξίσωσης (3.56) βρίσκονται τα διαγώνια στοιχεία της μήτρας:

$$y_{phase_g} = 0 + j * \frac{77.3619}{\ln\left(\frac{R_b}{RD_c}\right) - \frac{1}{k} \ln\left(\frac{k * RD_s}{R_b}\right)} \frac{\mu S}{mile} \quad (3.56)$$

Να σημειωθεί ότι η μήτρα αγωγιμοτήτων αυτού του τύπου καλωδίων είναι μηδενική σε όλα τα στοιχεία της εκτός των διαγωνίων. Στα θωρακισμένα υπόγεια καλώδια τα αντίστοιχα διαγώνια στοιχεία υπολογίζονται διαμέσου της εξίσωσης (3.57):

$$y_{phase_g} = 0 + j * \frac{77.3619}{\ln\left(\frac{R_b}{RD_c}\right)} \frac{\mu S}{mile} \quad (3.57)$$

3.5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Οι μετασχηματιστές αποτελούν ένα απαραίτητο στοιχείο ενός συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ως γνωστόν, η τάση στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να παρέχεται στους καταναλωτές σε συγκεκριμένα επίπεδα, ώστε να είναι δυνατή η ασφαλής χρησιμοποίησή της από τα αντίστοιχα φορτία. Οι τάσεις όμως δεν έχουν σε όλα τα στάδια του συστήματος το ίδιο επίπεδο. Κατά τη παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας επικρατούν κατά περίπτωση διαφορετικά επίπεδα τάσης.

Στα δίκτυα μεταφοράς η τάση συνηθίζεται να είναι σε υψηλά επίπεδα. Αυτό συμβαίνει διότι υψηλή τιμή της τάσης συνεπάγεται μικρότερη τιμή του ρεύματος για την ίδια παρεχόμενη ισχύ. Με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιούνται οι απώλειες στα επιμέρους στοιχεία του δικτύου και κατά κύριο λόγο στις γραμμές μεταφοράς.

Το ίδιο όμως δεν μπορεί να συμβεί στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε

αυτό το στάδιο προτιμάται να υπάρχει επίπεδο τάσης στο οποίο μπορούν να τροφοδοτηθούν οι πελάτες που έχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, αλλά και οι πελάτες που απαιτούν χαμηλότερη ισχύ όπως οι οικιακοί καταναλωτές. Έτσι στα δίκτυα διανομής προτιμάται η μέση τάση.

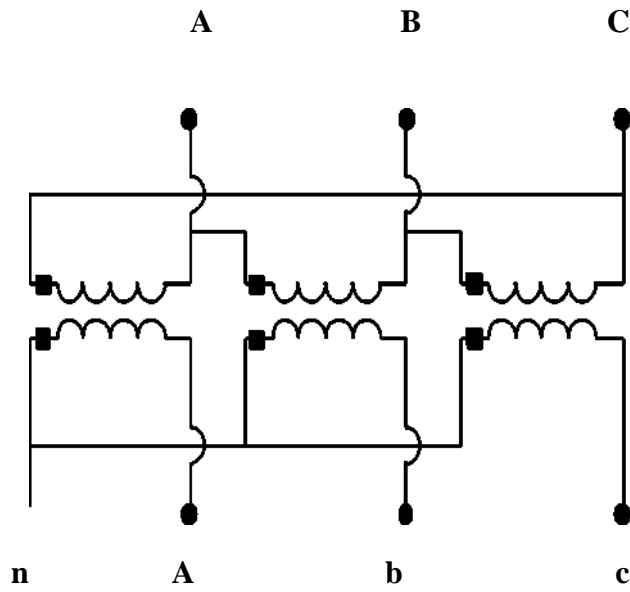
Οι μετασχηματιστές είναι τα στοιχεία του δικτύου που αναλαμβάνουν το έργο της ανύψωσης και του υποβιβασμού της τάσης σε όλα τα στάδια παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ισχύος. Εξυπακούεται ότι στο στάδιο της διανομής οι μετασχηματιστές αναλαμβάνουν τη διαδικασία υποβιβασμού της τάσης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η παροχή της σύμφωνα με τις προδιαγραφές των φορτίων του καταναλωτή.

Ο πρώτος μετασχηματιστής που συναντάται συνήθως σε ένα σύστημα διανομής, είναι ο μετασχηματιστής υποβιβασμού του υποσταθμού διανομής, ο οποίος διασυνδέει το σύστημα διανομής με το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μετασχηματιστές υπάρχουν όμως και σε τμήματα του δικτύου που απαιτείται υποβιβασμός της τάσης, όπως στην περίπτωση των οικιακών καταναλωτών που προαναφέρθηκαν [3.1].

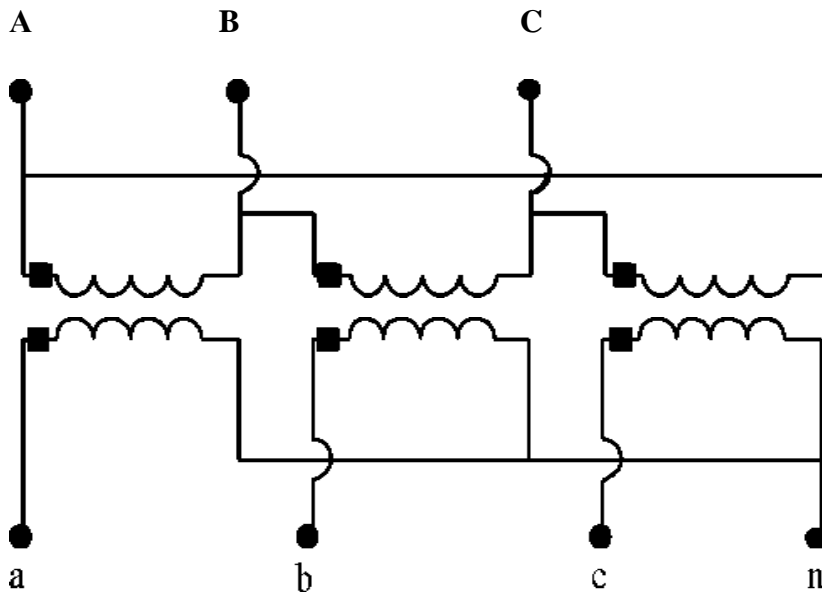
Η σωστή μοντελοποίηση ενός μετασχηματιστή είναι διαδικασία απαραίτητη για να υπάρξουν σωστά αποτελέσματα σε έναν αλγόριθμο ροής φορτίου. Υπάρχουν πολλές συνδεσμολογίες στους τριφασικούς μετασχηματιστές, οι βασικότερες όμως κατηγορίες που εμφανίζονται στα συστήματα διανομής είναι :

- τριγώνου - γειωμένου αστέρα (Delta - grounded Wye)
- γειωμένου αστέρα - γειωμένου αστέρα (grounded Wye - grounded Wye)
- τριγώνου - τριγώνου (Delta - Delta)
- ανοικτού αστέρα - ανοικτού τριγώνου (open Wye - open Delta)

Να σημειωθεί ότι όλες αυτές οι συνδεσμολογίες θα αναλυθούν για την περίπτωση των μετασχηματιστών υποβιβασμού (step down), μιας και αυτή η κατηγορία συναντάται στα δίκτυα διανομής. Σε μερικές συνδεσμολογίες όπως οι τύπου γειωμένου αστέρα - γειωμένου αστέρα, τόσο για την περίπτωση υποβιβασμού όσο και για την περίπτωση των ανύψωσης τάσης, ισχύουν οι ίδιες ακριβώς εξισώσεις. Στη περίπτωση όμως τριγώνου - γειωμένου αστέρα οι εξισώσεις των μετασχηματιστών ανύψωσης διαφέρουν από αυτές των μετασχηματιστών υποβιβασμού. Αυτό συμβαίνει διότι αλλάζουν οι συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων όπως αυτό φαίνεται και στα Σχήματα 3.9 και 3.10. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η τάση του πρωτεύοντος στο μετασχηματιστή υποβιβασμού προηγείται του δευτερεύοντος κατά 30 μοίρες, ενώ στο μετασχηματιστή ανύψωσης υστερεί η φάση του κατά 30 μοίρες [3.2].



Σχήμα 3.9: Τριγώνου - Γειωμένου αστέρα, υποβιβασμού [3.1]



Σχήμα 3.10: Τριγώνου - Γειωμένου αστέρα, ανύψωσης [3.1]

Οι εξισώσεις που θα περιγράψουν τους μετασχηματιστές, θα έχουν τη γενική μορφή:

$$[V_m] = [a_t] * [V_n] + [b_t] * [I_n] \quad (3.58)$$

$$[I_m] = [c_t] * [V_n] + [d_t] * [I_n] \quad (3.59)$$

$$[V_n] = [A_t] * [V_m] - [B_t] * [I_m] \quad (3.60)$$

Με τις εξισώσεις αυτές μπορεί να υπολογιστεί η τάση στο δευτερεύον (ζυγός n), εφόσον δίνεται το ρεύμα στο πρωτεύον (ζυγός m). Επίσης, με τα ίδια δεδομένα μπορεί να βρεθεί και το ρεύμα του πρωτεύοντος. Κατά την αντίστροφη διαδικασία, εφόσον είναι γνωστή η τάση στο πρωτεύον και το ρεύμα του δευτερεύοντος μπορεί να βρεθεί η τάση στο δευτερεύον. Όπως και στη μοντελοποίηση των γραμμών έτσι και στου μετασχηματιστή, οι εξισώσεις πήραν την κατάλληλη μορφή ώστε να είναι απευθείας εφαρμόσιμες στον αλγόριθμο backward and forward sweep που θα περιγραφεί στο επόμενο κεφάλαιο. Οι τάσεις στις εξισώσεις (3.58) έως (3.60) είναι φασικές, το ρεύμα I_m εξέρχεται από το κόμβο m ενώ το ρεύμα I_n εισέρχεται στο κόμβο n [3.2].

Επομένως για τις συνδεσμολογίες μετασχηματιστών που θα αναλυθούν, θα οριστούν απλά οι πίνακες που συμμετέχουν στις εξισώσεις (3.58) έως (3.60), καθώς και τα απαραίτητα μεγέθη για τον ορισμό αυτών. Να σημειωθεί ότι ο πίνακας $[c_t]$ θα θεωρηθεί μηδενικός σε όλες τις συνδεσμολογίες που θα αναλυθούν, καθώς είναι αμελητέο το ρεύμα το οποίο διαρρέει τον εγκάρσιο κλάδο του μετασχηματιστή σε σχέση με αυτό που διαρρέει την αντίσταση σειράς και φτάνει στο δευτερεύον.

Αρα για όλες τις περιπτώσεις θα θεωρηθεί [3.2]:

$$[c_t] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

Επίσης να τονιστεί ότι τα μεγέθη Zt_a , Zt_b και Zt_c αναφέρονται στις εκφρασμένες ως προς τη χαμηλή τάση (ως προς το δευτερεύον) τιμές της σύνθετης αντίστασης σειράς της αντίστοιχης φάσης του μετασχηματιστή.

- Μετασχηματιστές υποβιβασμού τριγώνου – γειωμένου αστέρα [3.2]

$$n_t = \frac{VLL_{Rated\ primary}}{VLN_{Rated\ secondary}} \quad (3.62)$$

Όπου $VLL_{Rated\ primary}$ και $VLN_{Rated\ secondary}$ είναι η ονομαστική πολική τάση του πρωτεύοντος και η ονομαστική φασική τάση του δευτερεύοντος, αντίστοιχα.

$$[a_t] = -\frac{n_t}{3} * \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

$$[b_t] = -\frac{n_t}{3} * \begin{bmatrix} 0 & 2 * Zt_b & Zt_c \\ Zt_a & 0 & 2 * Zt_c \\ 2 * Zt_a & Zt_b & 0 \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

$$[d_t] = \frac{1}{n_t} * \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

$$[B_t] = \begin{bmatrix} Zt_a & 0 & 0 \\ 0 & Zt_b & 0 \\ 0 & 0 & Zt_c \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

$$[A_t] = \frac{1}{n_t} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

- Μετασχηματιστές υποβιβασμού γειωμένου αστέρα – γειωμένου αστέρα [3.2]

$$n_t = \frac{VLN_{Rated\ primary}}{VLN_{Rated\ secondary}} \quad (3.68)$$

Όπου $VLN_{Rated\ primary}$ είναι η ονομαστική φασική τάση του πρωτεύοντος.

$$[\alpha_t] = n_t * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

$$[b_t] = n_t * \begin{bmatrix} Zt_a & 0 & 0 \\ 0 & Zt_b & 0 \\ 0 & 0 & Zt_c \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

$$[d_t] = \frac{1}{n_t} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

$$[B_t] = \begin{bmatrix} Zt_a & 0 & 0 \\ 0 & Zt_b & 0 \\ 0 & 0 & Zt_c \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

$$[A_t] = \frac{1}{n_t} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

- Μετασχηματιστές τριγώνου – τριγώνου [3.2]

$$n_t = \frac{VLL_{Rated\ primary}}{VLL_{Rated\ secondary}} \quad (3.74)$$

Όπου $VLL_{Rated\ secondary}$ είναι η ονομαστική πολική τάση του δευτερεύοντος.

$$[\alpha_t] = \frac{n_t}{3} * \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

$$[G1] = \frac{1}{Zt_{ab} + Zt_{bc} + Zt_{ca}} * \begin{bmatrix} Zt_{ca} & -Zt_{bc} & 0 \\ Zt_{ca} & Zt_{ab} + Zt_{ca} & 0 \\ -Zt_{ab} - Zt_{bc} & -Zt_{bc} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

$$[b_t] = \frac{n_t}{3} * \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Zt_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & Zt_{bc} & 0 \\ 0 & 0 & Zt_{ca} \end{bmatrix} * [G1] \quad (3.77)$$

$$[d_t] = \frac{1}{n_t} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

$$[B_t] = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Zt_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & Zt_{bc} & 0 \\ 0 & 0 & Zt_{ca} \end{bmatrix} * [G1] \quad (3.79)$$

$$[A_t] = \frac{1}{3 * n_t} * \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

- Μετασχηματιστές ανοικτού αστέρα – ανοικτού τριγώνου [3.2]

$$n_t = \frac{VLL_{Rated\ primary}}{VLL_{Rated\ secondary}} \quad (3.81)$$

$$[\alpha_t] = \begin{bmatrix} n_t & -n_t & 0 \\ 0 & n_t & -n_t \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

$$[b_t] = \begin{bmatrix} n_t * Zt_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -n_t * Zt_{bc} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

$$[d_t] = \frac{1}{n_t} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

$$[B_t] = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 2 * Zt_{ab} & 0 & -Zt_{bc} \\ -Zt_{ab} & 0 & -Zt_{bc} \\ -Zt_{ab} & 0 & 2 * Zt_{bc} \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

$$[A_t] = \frac{1}{3 * n_t} * \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & -2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

3.6 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια έντονη τάση χρησιμοποίησης της εναλλακτικής και της πράσινης ενέργειας. Εξαιτίας της μείωσης της διαθεσιμότητας των ορυκτών πόρων και της αύξησης της τιμής τους, όλο και περισσότερα κράτη στρέφονται προς τα φωτοβολταϊκά συστήματα, την αιολική ενέργεια καθώς και άλλες μορφές εναλλακτικής ενέργειας.

Είναι λοιπόν αναπόφευκτο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να διασπείρεται κατά μήκος ενός συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως κρίνεται αναγκαίο να μπορεί η ανάλυση ροής φορτίου να συμπεριλάβει στους υπολογισμούς της και τη διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στους ζυγούς του συστήματος. Το μοντέλο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό το στοιχείο έχει ως στόχο την αποφυγή της πολυπλοκότητας και τη συμβατότητα με τη χρησιμοποίηση του αλγορίθμου backward & forward sweep που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι γεννήτριες διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να

χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- τις γεννήτριες PV όπου είναι σταθερή η παραγωγή της ενεργού ισχύος και της τάσης εξόδου
- τις γεννήτριες PQ όπου είναι σταθερή η παραγωγή της μιγαδικής ισχύος και το ρεύμα μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η τάση του ζυγού που συνδέονται. [3.1]

Λόγω τις ιδιομορφίας του αλγορίθμου ανάλυσης ροής φορτίου των ακτινικών δικτύων διανομής, θα χρησιμοποιηθεί και θα αναλυθεί μόνο η περίπτωση των γεννητριών PQ. Η εξίσωση η οποία διέπει το μοντέλο της διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned}\tilde{I}_{a_cogen} &= \left(\frac{\tilde{S}_a}{\tilde{V}_a}\right)^* \\ \tilde{I}_{b_cogen} &= \left(\frac{\tilde{S}_b}{\tilde{V}_b}\right)^* \\ \tilde{I}_{c_cogen} &= \left(\frac{\tilde{S}_c}{\tilde{V}_c}\right)^*\end{aligned}\tag{3.87}$$

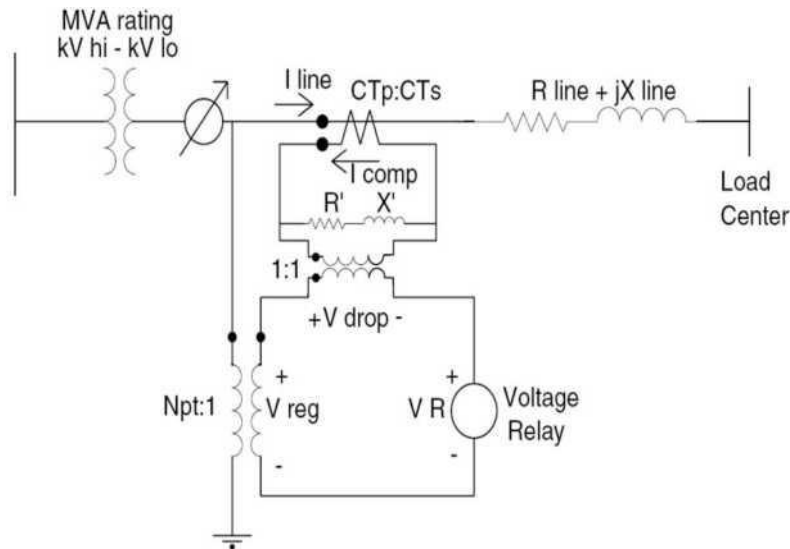
Στις εξισώσεις (3.87) έχει γίνει σύμβαση πηγής που σημαίνει ότι το ρεύμα που υπολογίζεται είναι με φορά από τη γεννήτρια προς τον κόμβο ενώ θετικές τιμές ισχύος αντιστοιχούν σε παραγωγή.

3.7 ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ

Οι ρυθμιστές τάσης αναλαμβάνουν να ρυθμίσουν την τάση σε συγκεκριμένο σημείο του δικτύου. Το σημείο αυτό ονομάζεται κέντρο ρύθμισης και η τιμή ρύθμισης που προσπαθεί να εφαρμόσει ο ρυθμιστής στο συγκεκριμένο σημείο είναι η ονομαστική τάση του δικτύου στο συγκεκριμένο τμήμα. Η ρύθμιση αυτή φυσικά επηρεάζει ενός τάσεις του δικτύου όχι μόνο στο κέντρο ρύθμισης, αλλά τόσο στα σημεία που έπονται αυτού όσο και στα σημεία που βρίσκονται μεταξύ του ρυθμιστή και του κέντρου ρύθμισης.

Ο ρυθμιστής τάσης δεν είναι τίποτε διαφορετικό από έναν αυτομετασχηματιστή, ο οποίος διαθέτει λήψεις (taps) και ένα μηχανισμό επιλογής ενός κατάλληλης λήψης. Διαφορετικές λήψεις είναι ουσιαστικά διαφορετικές τιμές των τυλιγμάτων του αυτομετασχηματιστή και έχουν ως αποτέλεσμα υποβιβασμό ή ανύψωση ενός τάσης κατά ένα ποσοστό.

Ένα αναλογικό κύκλωμα το οποίο ονομάζεται αντισταθμιστής πτώσης τάσης (line drop compensator) καλείται να εντοπίσει το ποσοστό ενός πτώσης τάσης και να εφαρμόσει την κατάλληλη λήψη στον αυτομετασχηματιστή έτσι ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή τιμής τάσης κοντά στην ονομαστική στο κέντρο ρύθμισης. Στον αντισταθμιστή πρέπει να έχει εισαχθεί από το χρήστη η σύνθετη αντίσταση ενός γραμμής που μεσολαβεί μεταξύ του ρυθμιστή και του κέντρου ρύθμισης. Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται το κύκλωμα ενός αντισταθμιστή [3.1].



Σχήμα 3.11: Κύκλωμα αντισταθμιστή [3.2]

Ο αντισταθμιστής αυτός αποτελείται από:

- ένα μετασχηματιστή τάσης που υποβιβάζει την τάση του δικτύου στο σημείο σύνδεσης του ρυθμιστή, σε επίπεδο κατάλληλο για εφαρμογή στο αναλογικό κύκλωμα (συνήθως στα 120 V). Η υποβιβασμένη αυτή τάση ονομάζεται \tilde{V}_{reg} και ουσιαστικά είναι η αρχική τάση του αναλογικού κυκλώματος του αντισταθμιστή. Ο μετασχηματιστής αυτός έχει λόγο μετασχηματισμού $N_t:1$.
- ένα μετασχηματιστή ρεύματος που μετασχηματίζει το ρεύμα που διαρρέει τη γραμμή μεταξύ κέντρου ρύθμισης και ρυθμιστή, στο ρεύμα που θα διαρρέει την αντίσταση του αντισταθμιστή. Το ρεύμα έχει μετασχηματιστεί ώστε να έχει χαμηλή τιμή που να είναι ανεκτή έτσι ώστε να μπορεί να διαρρέει το αναλογικό κύκλωμα. Ο μετασχηματιστής αυτός έχει λόγο μετασχηματισμού $CT_p: CT_s$. Να σημειωθεί ότι η τιμή του CT_s είναι δεδομένη στα 5 A με βάση τη βιβλιογραφία [3.2].
- Την ισοδύναμη αντίσταση του αντισταθμιστή η οποία όταν διαρρέεται από το μετασχηματισμένο ρεύμα προκαλεί την ίδια ανά μονάδα πτώση τάσης με την πτώση τάσης μεταξύ κέντρου ρύθμισης και ρυθμιστή. Η τάση στα άκρα αυτής της ισοδύναμης αντίστασης ονομάζεται \tilde{V}_{drop} .
- Τη μετασχηματισμένη τάση που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη τάση στο κέντρο ρύθμισης και ονομάζεται \tilde{V}_{relay} (Voltage Relay). Η τάση αυτή φυσικά έχει τιμή που ανήκει στο επίπεδο των τάσεων του αντισταθμιστή. [3.2]

Στον αντισταθμιστή, η τιμή της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης εισάγεται συνήθως σε τιμές που αντιστοιχούν σε πτώση τάσης για ονομαστικό ρεύμα. Επομένως οι μονάδες στις οποίες δίνεται είναι volt. Φυσικά για να ξεχωρίζει αυτό το μέγεθος από τις μονάδες της αντίστασης, οι οποίες αναφέρονται πάντα σε ohm, συμβολίζεται με $R' + j * X'$. Η εξίσωση (3.88) δίνει την αντιστοιχία της τιμής της ισοδύναμης αντίστασης στον αντισταθμιστή σε ohm σε σχέση με την $R' + j * X'$.

$$R' + j * X' = (R_{comp_{\Omega}} + j * X_{comp_{\Omega}}) * CT_s \quad (3.88)$$

Για τον υπολογισμό της \tilde{V}_{relay} πρέπει να εφαρμοστεί στο κύκλωμα του αντισταθμιστή ο νόμος τάσεων του Kirchhoff. Εφαρμόζοντας διαδοχικά τις εξισώσεις (3.89) έως (3.91) προκύπτει η τιμή της \tilde{V}_{relay} .

$$\tilde{I}_{comp} = \tilde{I}_{line} * \frac{CT_s}{CT_p} \quad (3.89)$$

$$\tilde{V}_{drop} = (R_{comp_{\Omega}} + j * X_{comp_{\Omega}}) * \tilde{I}_{comp} \quad (3.90)$$

$$\tilde{V}_{relay} = \tilde{V}_{reg} - \tilde{V}_{drop} \quad (3.91)$$

Για κάθε ρυθμιστή παρέχονται ως δεδομένα η ονομαστική τάση του αντισταθμιστή του ($V_{comp_{nom}}$) και το εύρος ζώνης στο οποίο μπορεί να κινείται η τιμή της τάσης του κέντρου ρύθμισης σε σχέση με την ονομαστική (bandwidth). Η λήψη πρέπει επομένως να υπολογίζεται ώστε η τιμή στο κέντρο ρύθμισης να είναι τουλάχιστον όσο η ονομαστική μειωμένη κατά το μισό του εύρους ζώνης της. Επίσης ισχύει για τους τυπικούς ρυθμιστές ότι κάθε λήψη αντιστοιχεί σε $\frac{5}{8}\%$ ή αλλιώς 0.00625 p.u. αλλαγή της τάσης [3.2].

Επομένως για τη λήψη η οποία θα επιλεγεί ισχύει:

$$Tap = \frac{V_{comp_{nom}} - \frac{1}{2} * bandwidth_{comp} - |\tilde{V}_{relay}|}{V_{comp_{nom}} * 0.00625} \quad (3.92)$$

Εξυπακούεται ότι υπάρχει όριο στον αριθμό των λήψεων και δεν θα πρέπει να παραβιάζεται η συνθήκη:

$$0.9 \leq 1 - Tap * 0.00625 \leq 1.1 \quad (3.93)$$

Δεδομένης της λήψης που έχει επιλεγεί είναι εύκολο να υλοποιηθούν οι εξισώσεις του ρυθμιστή. Σε αυτό βοηθάει το ότι έχουν ήδη διαμορφωθεί οι εξισώσεις του μετασχηματιστή οπότε θα υπάρχει η ίδια ακριβώς μοντελοποίηση και στον ρυθμιστή. Η μοντελοποίηση ακολουθεί θεώρηση τριφασικού ρυθμιστή σε συνδεσμολογία γειωμένου αστέρα, μιας και αυτή είναι η συνδεσμολογία που συνήθως συναντάται στα γειωμένα τμήματα του δικτύου. Φυσικά βάζοντας σε κάποια λήψη την τιμή μηδέν είναι ουσιαστικά σαν να αγνοείται η ύπαρξη ρυθμιστή για τη συγκεκριμένη φάση.

Συγκεκριμένα οι εξισώσεις μοντελοποίησης του ρυθμιστή είναι [3.2]:

$$[V_m] = [a_{reg}] * [V_n] + [b_{reg}] * [I_n] \quad (3.94)$$

$$[I_m] = [c_{reg}] * [V_n] + [d_{reg}] * [I_n] \quad (3.95)$$

$$[V_n] = [A_{reg}] * [V_m] - [B_{reg}] * [I_m] \quad (3.96)$$

Όπου οι αντίστοιχοι πίνακες ορίζονται παρακάτω. Οι τάσεις στις εξισώσεις (3.94)

έως (3.96) είναι φασικές, το ρεύμα I_m εξέρχεται από το κόμβο m ενώ το ρεύμα I_n εισέρχεται στο ζυγό n .

$$a_{R_phase} = 1 - Tap_{phase} * 0.00625 \quad (3.97)$$

$$[a_{reg}] = \begin{bmatrix} a_{R_a} & 0 & 0 \\ 0 & a_{R_b} & 0 \\ 0 & 0 & a_{R_c} \end{bmatrix} \quad (3.98)$$

$$[b_{reg}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.99)$$

$$[d_{reg}] = \begin{bmatrix} a_{R_a}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & a_{R_b}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & a_{R_c}^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.100)$$

$$[B_{reg}] = [a_{reg}]^{-1} * [b_{reg}] \quad (3.101)$$

$$[A_{reg}] = [a_{reg}]^{-1} \quad (3.102)$$

$$[c_{reg}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.103)$$

3.8 ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ

Οι διακόπτες στα δίκτυα διανομής έχουν το ρόλο της σύνδεσης και της αποσύνδεσης τμημάτων του δικτύου από την τροφοδοσία. Σε ένα ακτινικό δίκτυο το κλείσιμο κάποιων διακοπών μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία βρόχων, γεγονός το οποίο αναιρεί την ακτινική φύση του δικτύου. Σε μια τέτοια περίπτωση αλγόριθμοι που προορίζονται αυστηρά για δίκτυα ακτινικής τοπολογίας, δεν θα έχουν σωστά αποτελέσματα. Επομένως ο χρήστης θα πρέπει να φροντίζει οι διακόπτες που επιλέγει να είναι κλειστοί να μη δημιουργούν βρόχους στο δίκτυο.

Η ύπαρξη διακοπών μπορεί να εξυπηρετεί την αποσύνδεση μέρους του δικτύου για την προγραμματισμένη ή μη συντήρησή του, είτε την εναλλακτική τροφοδότηση τμημάτων του δικτύου από άλλη πηγή. Επίσης ανάλογα με τον τόπο λειτουργίας τους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

- Διακόπτες ελαίου
- Διακόπτες αέρος
- Διακόπτες κενού
- Διακόπτες SF6 (εξαφθοριούχου θείου)

Φυσικά όσο πιο υψηλό είναι το επίπεδο της τάσης τόσο πιο μεγάλη είναι η απαίτηση μείωσης της φθοράς εξαιτίας του ηλεκτρικού τόξου καθώς και η απαίτηση αύξησης της μόνωσης.

Σε κάθε περίπτωση η μοντελοποίηση των διακοπών είναι ίδια για όλους του διακόπτες ανεξαρτήτως της φύσεώς τους και του λόγου για τον οποίο έχουν τοποθετηθεί στο συγκεκριμένο σημείο του δικτύου.

- Ένας ανοικτός διακόπτης λειτουργεί ως ανοιχτοκύκλωμα και απομονώνει το συγκεκριμένο τμήμα του δικτύου.
- Ένας κλειστός διακόπτης λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα και μεταφέρει χωρίς καμία μεταβολή την τάση και το ρεύμα από τον αρχικό ζυγό, στον ζυγό με τον οποίο τον διασυνδέει ο διακόπτης. [3.1]

Οι εξισώσεις του κλειστού διακόπτη είναι οι ακόλουθες:

$$[V_{1,abc}] = [V_{2,abc}] \quad (3.104)$$

$$[I_{1,abc}] = [I_{2,abc}] \quad (3.105)$$

Κεφάλαιο 4

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

“BACKWARD AND FORWARD SWEEP”

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία για την ανάλυση ροής ισχύος ασύμμετρων ακτινικών δικτύων διανομής έχει την ονομασία: “Backward and Forward Sweep”. Η ελληνική μετάφραση της ονομασίας του αλγορίθμου αντιστοιχεί στην περιγραφή “πίσω και εμπρός εκκαθάριση”, η οποία και περιγράφει τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου.

Ουσιαστικά ο συγκεκριμένος αλγόριθμος σε κάθε επανάληψη διατρέχει από μια φορά το ακτινικό δίκτυο διανομής με την RBF σειρά διάσχισης που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.3 και με την BF σειρά διάσχισης, η οποία είναι η αντίστροφη της RBF. Η πρώτη διάσχιση αντιστοιχεί στην προς τα πίσω εκκαθάριση (Backward Sweep) και η δεύτερη στην προς τα εμπρός εκκαθάριση (Forward Sweep) [4.1].

Ο αλγόριθμος αυτός, όπως άλλωστε και οι περισσότεροι που κάνουν ανάλυση ροής ισχύος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, βασίζεται στη θεωρία των επαναληπτικών μεθόδων της αριθμητικής ανάλυσης. Χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτών των μεθοδολογιών είναι τα ακόλουθα γενικά βήματα:

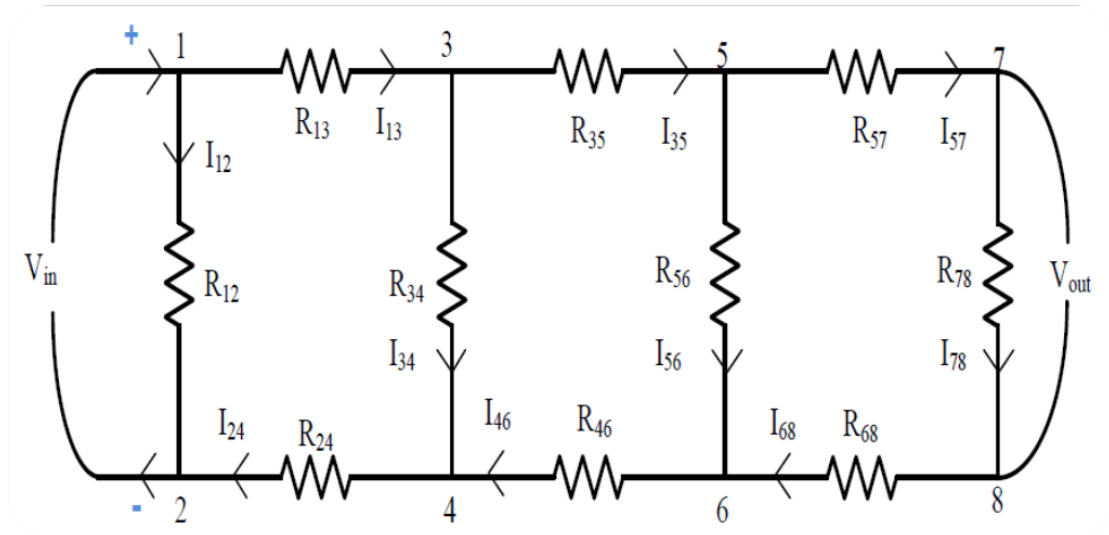
- Η πρόβλεψη μιας αρχικής τιμής των άγνωστων μεγεθών που πρέπει να υπολογιστούν, η οποία στην περίπτωση αυτή είναι η τάση των ζυγών του δικτύου, εκτός φυσικά από την τάση του τροφοδότη, η οποία θεωρείται γνωστή.
- Με χρήση των εξισώσεων που συνδέουν τα ζητούμενα με τα ήδη γνωστά μεγέθη, υπολογίζονται οι νέες τιμές των προκαθορισμένων από το πρόβλημα μεταβλητών (αρχικές συνθήκες).
- Γίνεται εύρεση της τιμής του σφάλματος μεταξύ αρχικής και υπολογισθείσας τιμής μιας ή περισσότερων μεταβλητών οι οποίες ήταν εξαρχής γνωστές και ακολουθεί διόρθωση της αρχικής πρόβλεψης των ζητούμενων μεγεθών ή σύγκλιση εφόσον το σφάλμα βρίσκεται κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή. [4.2]

Η αρχική ιδέα από την οποία προήλθε η εφαρμογή της μεθόδου backward and forward sweep είναι τα κλιμακωτά κυκλώματα ή αλλιώς κυκλώματα σκάλας (ladder circuits), τα οποία συναντώνται στη θεωρία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων [4.3]. Στο

Σχήμα 4.1 αναπαρίσταται ένα τέτοιο κύκλωμα, στο οποίο γνωστή είναι η τάση εισόδου V_{in} και άγνωστη η τάση εξόδου V_{out} .

Ένα τέτοιο κύκλωμα επιλύεται θεωρώντας μια τυχαία τιμή, ως πρόβλεψη, της V_{out} . Εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm στον κλάδο 7-8 υπολογίζεται ότι:

$$I_{78} = \frac{V_{out, πρόβλεψη}}{R_{78}} \quad (4.1)$$



Σχήμα 4.1: Κλιμακωτό κύκλωμα [4.3]

Από νόμο τάσεων Kirchhoff στο βρόχο 5-7-8-6-5 προκύπτει ότι:

$$V_{56} = \frac{V_{out, πρόβλεψη}}{R_{78}} * (R_{57} + R_{78} + R_{68}) \quad (4.2)$$

Ομοίως με την (4.1) ισχύει για την εφαρμογή νόμου Ohm στον κλάδο 5-6:

$$I_{56} = \frac{V_{56}}{R_{56}} \quad (4.3)$$

Επομένως με εφαρμογή νόμου τάσεων και ρευμάτων Kirchhoff στο βρόχο 3-5-6-4-3 προκύπτει ότι:

$$V_{34} = (I_{56} + I_{78}) * (R_{35} + R_{46}) + V_{56} \quad (4.4)$$

Τέλος εφαρμόζοντας τους νόμους Ohm και Kirchhoff στο βρόχο 1-3-4-2-1 και στον κλάδο 3-4 προκύπτει ότι:

$$I_{34} = \frac{V_{34}}{R_{34}} \quad (4.5)$$

$$V_{12} = (I_{34} + I_{56} + I_{78}) * (R_{13} + R_{24}) + V_{34} \quad (4.6)$$

Επομένως από τις εξισώσεις (4.1) έως (4.6) προκύπτει ότι η V_{in} μπορεί να εκφραστεί μόνο συναρτήσει της τιμής $V_{out,πρόβλεψη}$ και των αντιστάσεων του κυκλώματος.

Γνωρίζοντας τώρα την πραγματική τιμή της V_{in} είναι δυνατό να βρεθεί η αναλογία:

$$\lambda = \frac{V_{in,πραγματικό}}{V_{in,πρόβλεψης}} \quad (4.7)$$

Τέλος, δεδομένου ότι το κύκλωμα είναι γραμμικό, προκύπτει:

$$V_{out,πραγματικό} = \lambda * V_{out,πρόβλεψη} \quad (4.8)$$

Δυστυχώς όμως τα δίκτυα τα οποία πρόκειται να μελετηθούν δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως γραμμικά. Αυτό συμβαίνει διότι δεν υπάρχει γραμμικότητα σε πολλά στοιχεία τους, όπως είναι για παράδειγμα στα φορτία σταθερής έντασης και στα φορτία σταθερής ισχύος. Επομένως η εξίσωση (4.8) δεν μπορεί να εφαρμοστεί και είναι απαραίτητο να γίνουν αρκετές επαναλήψεις με κατάλληλη διόρθωση κάθε φορά, έτσι ώστε να οδηγηθεί σε σύγκλιση η μέθοδος. Σε κάθε περίπτωση η μέθοδος της σκάλας (ladder method) αποτέλεσε το εφαλτήριο για τη δημιουργία της μεθόδου backward and forward sweep [4.3].

4.2 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ “BACKWARD AND FORWARD SWEEP”

4.2.1 Βήματα Backward Sweep

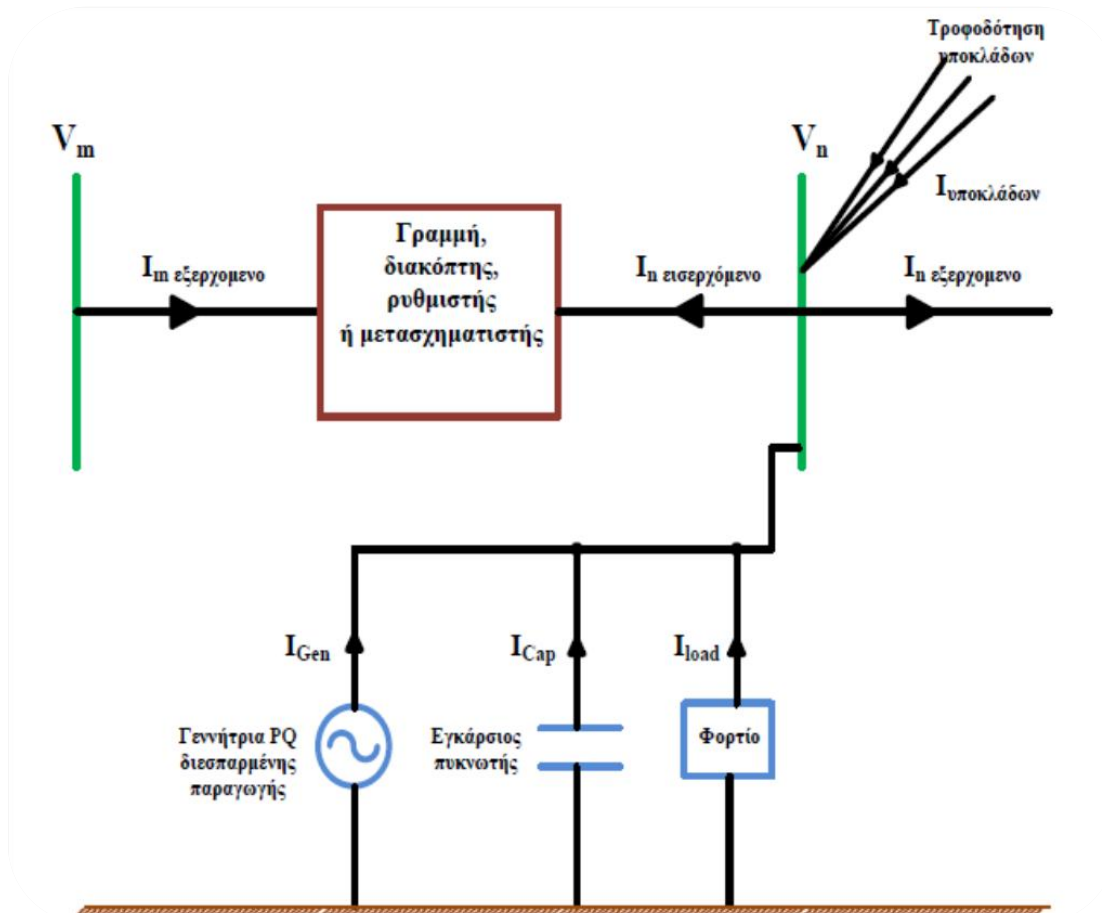
Όπως δηλώνει και η ίδια η ονομασία του αλγορίθμου, το πρώτο στάδιο της εφαρμογής του είναι το Backward Sweep. Πριν από την εκκίνηση του αλγορίθμου έχει γίνει η αρχικοποίηση όλων των τάσεων των ζυγών με κάποιες τιμές πρόβλεψης, οι οποίες είναι κατά προτίμηση οι ονομαστικές τάσεις λειτουργίας του συστήματος στους συγκεκριμένους ζυγούς. Η κίνηση αυτή κρίνεται απαραίτητη καθώς η ακολουθούμενη μέθοδος απαιτεί μια οποιαδήποτε τιμή πρόβλεψης στα RBF άκρα του δικτύου.

Στη συνέχεια γίνεται διάσχιση του κάθε υποκλάδου του ακτινικού δικτύου με RBF (reverse breadth first) σειρά ξεκινώντας από το τέλος του (τελευταίος ζυγός του υποκλάδου) μέχρι και το πρώτο στοιχείο του. Η συγκεκριμένη διαδρομή απλοποιείται αρκετά με την ανάθεση δεικτών στους ζυγούς, διαδικασία που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.3.

Σε κάθε ζυγό γίνεται εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff με βάση τα στοιχεία τα οποία είναι τοποθετημένα σε αυτόν (εγκάρσιοι πυκνωτές, φορτία, γεννήτριες διεσπαρμένης παραγωγής) αλλά και τις τυχόν αναχωρήσεις διαφορετικών υποκλάδων που ξεκινούν από τον εξεταζόμενο ζυγό. Η εφαρμογή του νόμου ρευμάτων είναι απαραίτητη ώστε από το ρεύμα εξόδου του ζυγού να βρεθεί το ρεύμα

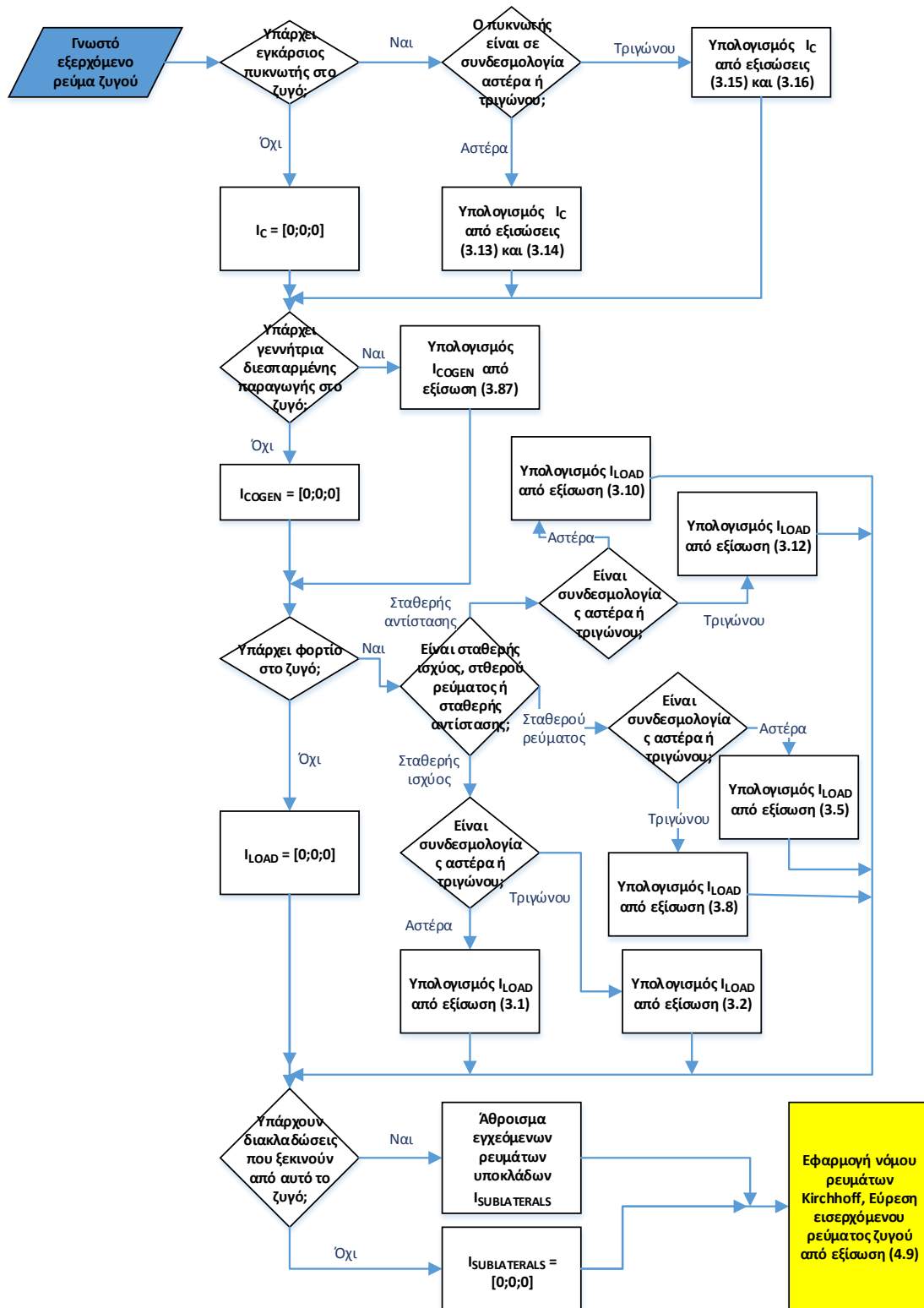
εισόδου στο ζυγό. Στο Σχήμα 4.2 φαίνονται τα ρεύματα και οι φορές τους για το ζυγό n. Η φορά των ρευμάτων καθορίζει και τα πρόσημα που θα έχουν στην εξίσωση του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff [4.2]:

$$I_n \text{ εισερχόμενο} = I_{gen} + I_{cap} + I_{load} + \sum I_{υποκλάδων} - I_n \text{ εξερχόμενο} \quad (4.9)$$



Σχήμα 4.2: Συνδεσμολογία ζυγού στο σύστημα [4.2]

Όσο και αν φαίνεται απλή εκ πρώτης όψεως, η εφαρμογή του νόμου του Kirchhoff στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι τόσο εύκολη. Προϋποθέτει ότι έχει προηγουμένως γίνει η εύρεση όλων αυτών των ρευμάτων που εμπλέκονται στην εξίσωση (4.9), μέσω των κατάλληλων εξισώσεων που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 3. Η δυνατότητα επιλογής μεταξύ έξι διαφορετικών συνδυασμών ανάμεσα σε συνδεσμολογίες και τύπους φορτίων καθώς και η παρουσία γεννήτριας διεσπαρμένης παραγωγής ή και εγκάρσιου πυκνωτή για αντιστάθμιση στο ζυγό, μαζί με την εύρεση εγχεόμενων ρευμάτων σε υποκλάδους κάνει πιο πολύπλοκη την εύρεση του εισερχόμενου ρεύματος. Αυτός είναι και ο λόγος που το λογικό διάγραμμα της συγκεκριμένης διαδικασίας (Σχήμα 4.3) φαίνεται αρκετά «δαιδαλώδες».



Σχήμα 4.3: Λογικό διάγραμμα εύρεσης ρευμάτων που σχετίζονται με το ζυγό [4.2]

Αφότου γίνει εύρεση του εισερχόμενου ρεύματος ακολουθεί ο υπολογισμός της τάσης του προηγούμενου ζυγού με τον οποίο διασυνδέεται ο εξεταζόμενος ζυγός στον ίδιο υποκλάδο, καθώς και ο υπολογισμός του εξερχόμενου ρεύματος. Για όλες τις περιπτώσεις κλάδων που ενώνουν δύο ζυγούς έχουν ήδη αναπτυχθεί οι σχετικές εξισώσεις στο Κεφάλαιο 3.

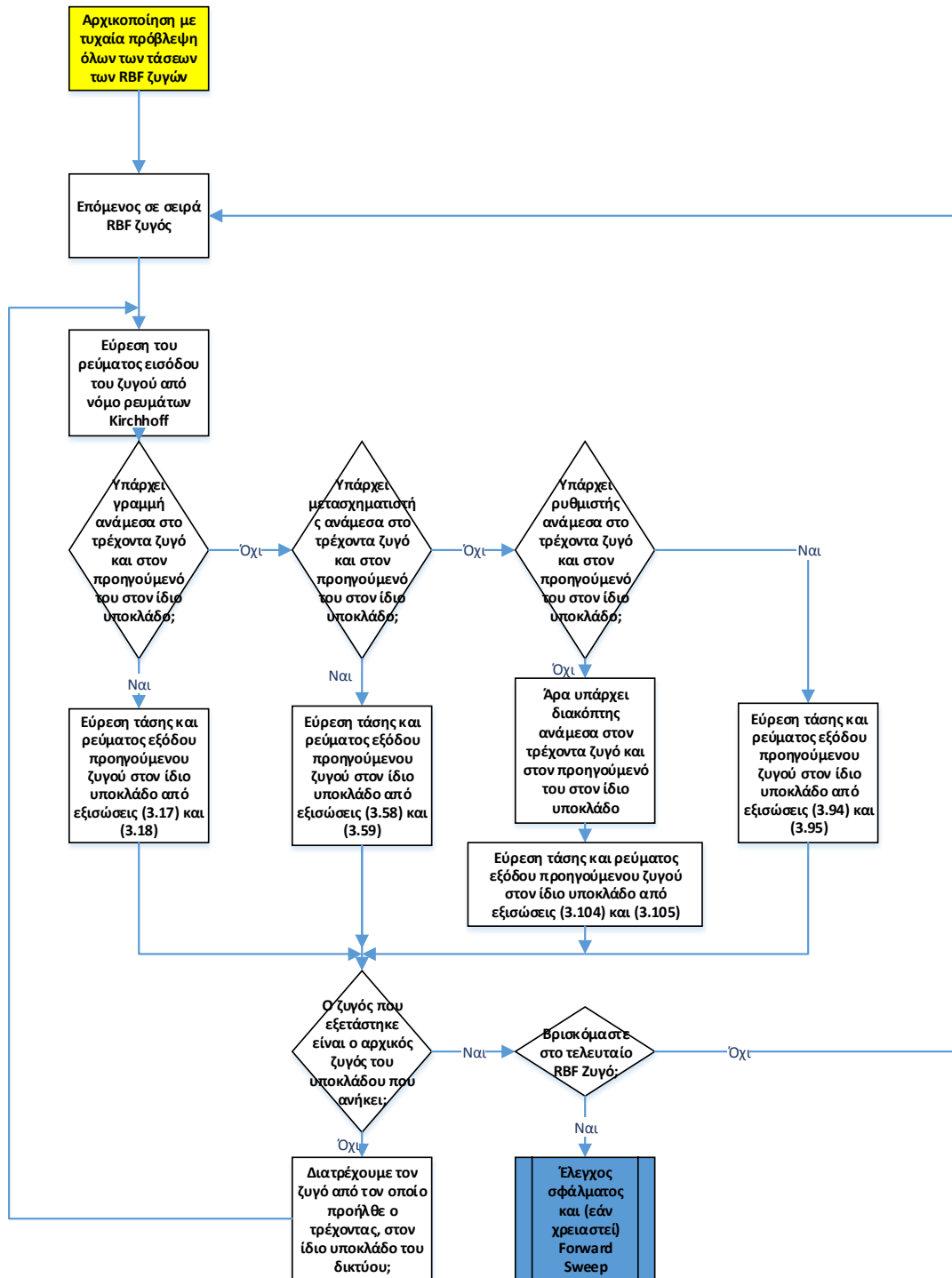
Συγκεκριμένα ισχύει:

1. Στην περίπτωση που υπάρχει γραμμή μεταξύ των δύο ζυγών χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.17) για τον υπολογισμό της τάσης του προηγούμενου ζυγού και η εξίσωση (3.18) για το εξερχόμενο ρεύμα του.
2. Εφόσον μεταξύ των δύο ζυγών υπάρχει μετασχηματιστής χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.58) για τον υπολογισμό της τάσης του προηγούμενου ζυγού και η εξίσωση (3.59) για το εξερχόμενο ρεύμα του.
3. Για την περίπτωση ύπαρξης ρυθμιστή γίνεται χρήση των εξισώσεων (3.94) για την τάση και (3.95) για το ρεύμα.
4. Τέλος, εάν είναι διακόπτης το στοιχείο που συνδέει τους δύο ζυγούς χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.104) για την τάση και (3.105) για το ρεύμα, οι οποίες ουσιαστικά εξισώσουν το ρεύμα και την τάση των δύο ζυγών.

Διαμέσου αυτών των εξισώσεων είναι δυνατό να γίνει ο υπολογισμός των τάσεων και των ρευμάτων όλων των ζυγών του δικτύου. Συγκεκριμένα όταν ένας υποκλάδος διασχίζεται ολόκληρος γίνεται μετάβαση στον επόμενο κατά RBF σειρά υποκλάδο. Όταν πλέον διασχιστεί και ο τελευταίος υποκλάδος, που ουσιαστικά θα είναι ο κεντρικός κορμός του δικτύου, θα έχει υπολογιστεί και η τάση του αρχικού ζυγού-τροφοδότη (feeder). Επειδή όμως από τα δεδομένα του προβλήματος είναι ήδη γνωστή η τιμή του εν λόγω μεγέθους, είναι δυνατό να υπολογιστεί το σφάλμα που προέκυψε από την πρόβλεψη που έγινε. Εφόσον το σφάλμα δεν υπερβαίνει κάποια μέγιστη τιμή τότε η λύση θεωρείται αποδεκτή, ειδάλλως γίνεται το βήμα forward sweep και ακολούθως επαναλαμβάνεται ο αλγόριθμος.

Η επιλογή του μέγιστου σφάλματος που μπορεί να γίνει αποδεκτό είναι μια ιδιαίτερα κρίσιμη επιλογή. Αυτό συμβαίνει διότι μια ιδιαίτερα υψηλή τιμή δεν θα δώσει τόσο ακριβή αποτελέσματα, ενώ αντίθετα μια αρκετά χαμηλή τιμή μπορεί να οδηγήσει στην άπειρη επανάληψη του αλγορίθμου και στη μη σύγκλιση της λύσης του προβλήματος. Προκύπτει λοιπόν ότι η σωστή επιλογή του μέγιστου σφάλματος ώστε ο αλγόριθμος να τρέχει σε πραγματικό χρόνο και να έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα πρέπει να έχει μια ενδιάμεση τιμή. Ως εκ τούτου μια ικανοποιητική τιμή του εν λόγω ορίου είναι η 0.001 p.u. (ανά μονάδα). Να σημειωθεί επίσης ότι το σφάλμα αυτό αφορά το μέγιστο σφάλμα εκ των τριών φάσεων του ζυγού τροφοδοσίας.

Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται το λογικό διάγραμμα του βήματος Backward Sweep. Μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει τόσο την μετάβαση από αυτό το βήμα στον έλεγχο σφάλματος και εφόσον χρειαστεί στο βήμα forward sweep, όσο και την ενσωμάτωση της διαδικασίας εύρεσης των ρευμάτων μέσα στο συγκεκριμένο αλγόριθμο [4.2].



Σχήμα 4.4: Λογικό διάγραμμα Backward Sweep [4.2]

4.2.2 Βήματα Forward Sweep

Εφόσον το σφάλμα δεν είναι μέσα στα ανεκτά όρια, τότε είναι απαραίτητη η εκτέλεση της διαδικασίας forward sweep και η επανάληψη του αλγορίθμου. Η συγκεκριμένη διαδικασία θεωρεί σωστές τις τιμές των ρευμάτων που βρέθηκαν με την Backward Sweep και αλλάζει, με βάση τη σωστή τιμή της τάσης τροφοδοσίας, τις τιμές των τάσεων των ζυγών. Ουσιαστικά πρόκειται για την ανάστροφη πορεία από την οποία ακολουθήθηκε κατά την Backward Sweep και για αυτό το λόγο έχει και την αντίστοιχη ονομασία (Forward Sweep). Πλέον δεν χρησιμοποιείται η RBF σειρά των κλάδων του δικτύου, αλλά γίνεται χρήση της BF σειράς όπως αυτή έχει οριστεί στην Ενότητα 2.3.

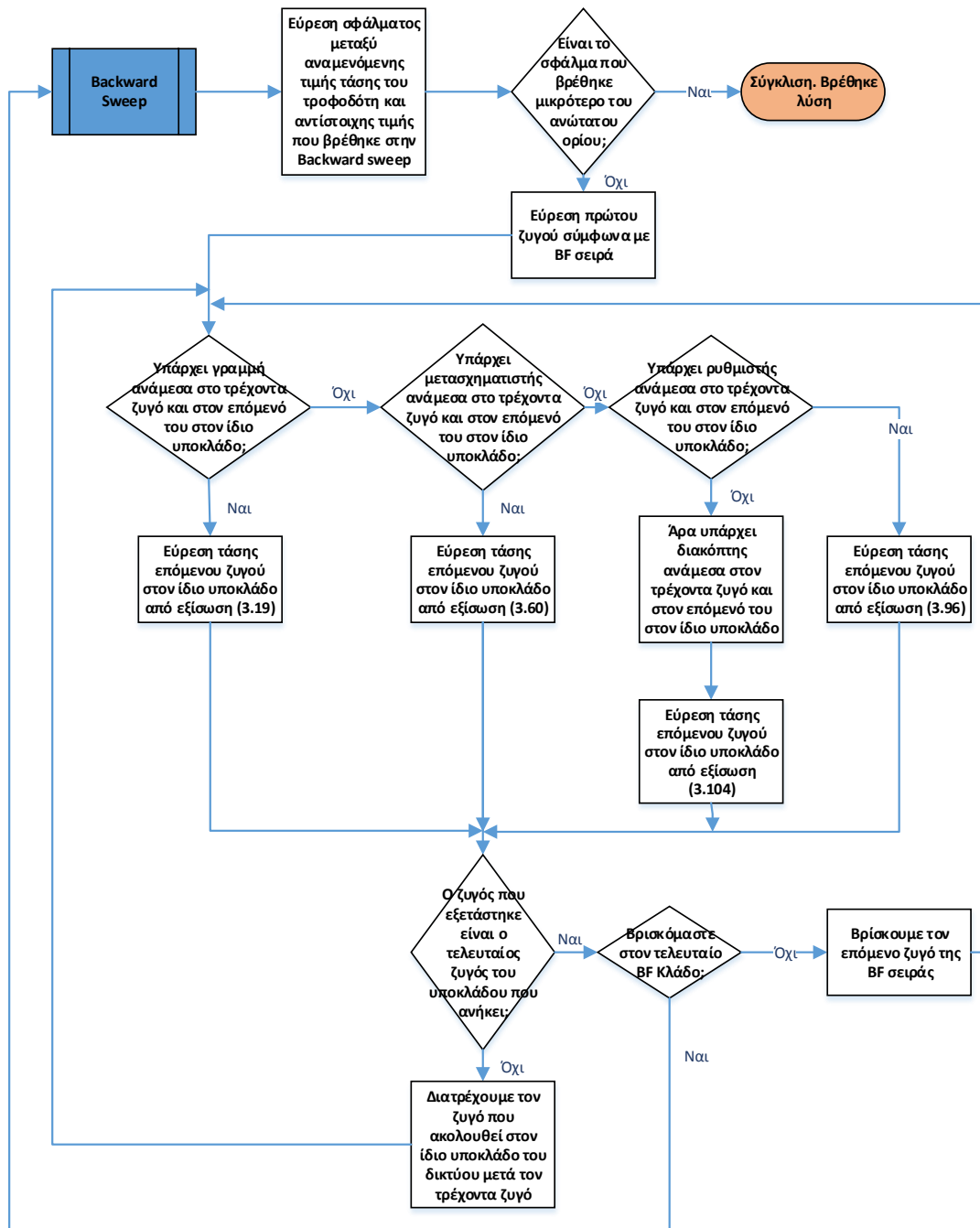
Οι εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται είναι αυτές που δίνουν την τιμή της τάσης του επόμενου ζυγού συναρτήσει της τάσης και του εξερχόμενου ρεύματος του προηγούμενου ζυγού. Συγκεκριμένα ισχύει:

5. Στην περίπτωση που υπάρχει γραμμή μεταξύ των δύο ζυγών χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.19) για τον υπολογισμό της τάσης του επόμενου ζυγού.
6. Εφόσον μεταξύ των δύο ζυγών υπάρχει μετασχηματιστής χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.60) για τον υπολογισμό της τάσης του επόμενου ζυγού.
7. Για την περίπτωση ύπαρξης ρυθμιστή γίνεται χρήση της εξίσωσης (3.96) ώστε να βρεθεί η αντίστοιχη τάση.
8. Τέλος εάν είναι διακόπτης το στοιχείο που συνδέει τους δύο ζυγούς χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.104) για την τάση του επόμενου ζυγού.

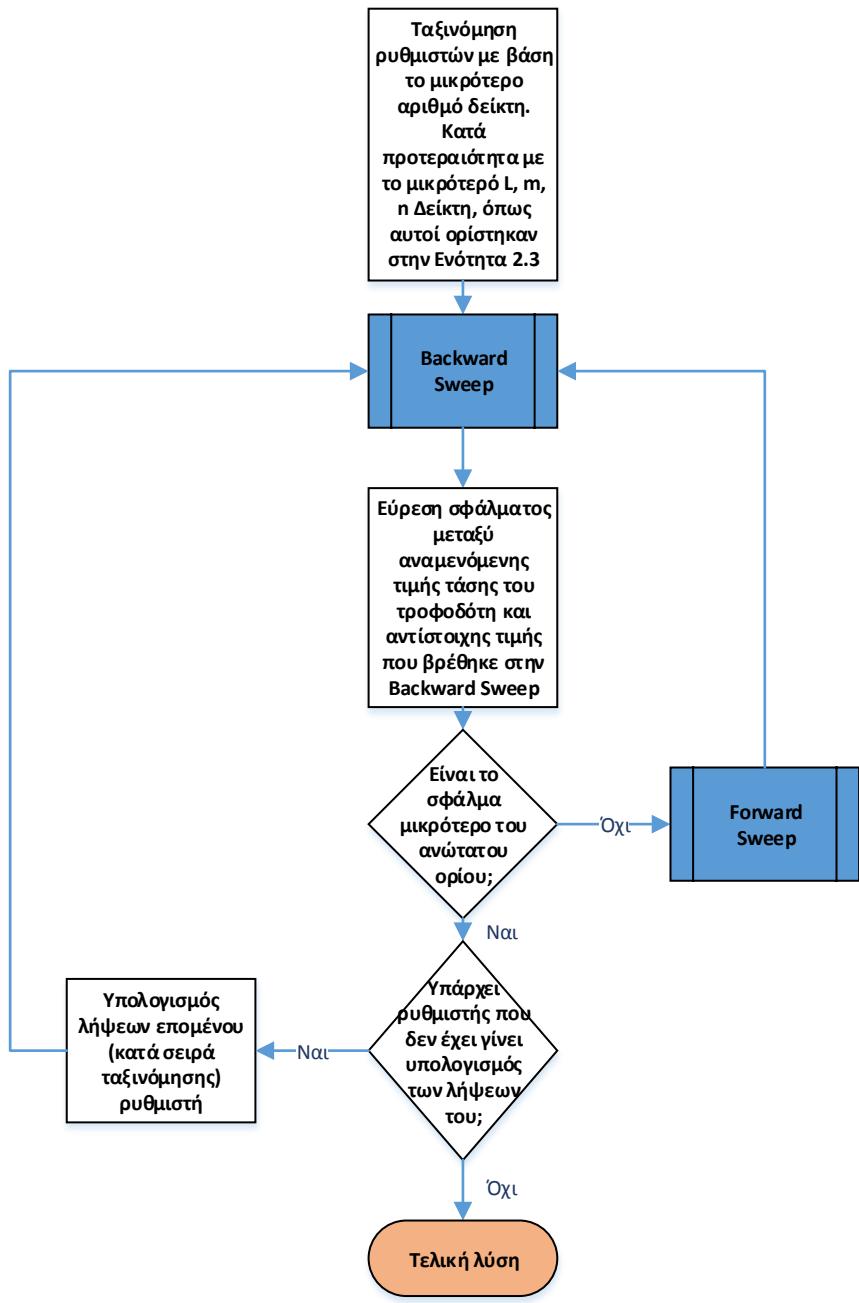
Με αυτό τον τρόπο διορθώνονται οι τάσεις ώστε να μην προκύπτει τόσο μεγάλο σφάλμα σε σχέση με την τάση τροφοδοσίας και ο αλγόριθμος οδηγείται πάλι στην Backward sweep ώστε να γίνει νέα επανάληψη του αλγορίθμου. Όταν το σφάλμα γίνει μικρότερο από την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, τότε έχει βρεθεί η λύση του συγκεκριμένου προβλήματος. Στο Σχήμα 4.5 γίνεται παρουσίαση του λογικού διαγράμματος των βημάτων Forward Sweep.

Υπάρχει όμως μια παράμετρος η οποία δεν έχει έως τώρα αναφερθεί. Στην περίπτωση παρουσίας ρυθμιστή, δεν είναι δυνατόν να είναι γνωστή η λήψη η οποία πρέπει να έχει επιλεγεί σε κάθε φάση προτού να γίνει η ανάλυση ροής φορτίου και να υπολογιστεί η τάση στο σημείο ρύθμισης. Ακόμη περισσότερο δεν είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι λήψεις ενός ρυθμιστή προτού καθοριστούν οι λήψεις ενός άλλου που προηγείται στην τοπολογία του δικτύου και ως εκ τούτου επηρεάζει την τάση του σημείου ρύθμισης του πρώτου.

Για αυτό ακριβώς το λόγο γίνεται εξ αρχής ταξινόμηση των ρυθμιστών με βάση του δείκτες l , m , n του ζυγού στον οποίο συνδέονται. Συγκεκριμένα προηγείται η ρύθμιση του ρυθμιστή με το μικρότερο δείκτη l . Εφόσον υπάρχει ισότητα των δεικτών l δύο ρυθμιστών, επιλέγεται αυτός με το μικρότερο m και εφόσον και εκεί υπάρχει ισότητα, προτεραιότητα έχει αυτός με το μικρότερο n . Η ταξινόμηση αυτή καθορίζει τη σειρά με την οποία θα γίνει η ρύθμισή τους, ενώ πριν επιτευχθεί η ρύθμιση ενός ρυθμιστή, θεωρείται ότι έχει μηδενική λήψη ($\text{tap}=0$). Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται ότι πριν και μετά την εύρεση λήψης κάθε ρυθμιστή ακολουθεί εκτέλεση του αλγορίθμου ανάλυσης ροής φορτίου ώστε να βρεθούν οι νέες τιμές τάσης και ρεύματος. Επομένως η ύπαρξη πολλών ρυθμιστών οδηγεί στην επιπλέον εκτέλεση ισάριθμων φορών του αλγορίθμου “Backward and Forward Sweep” [4.2].



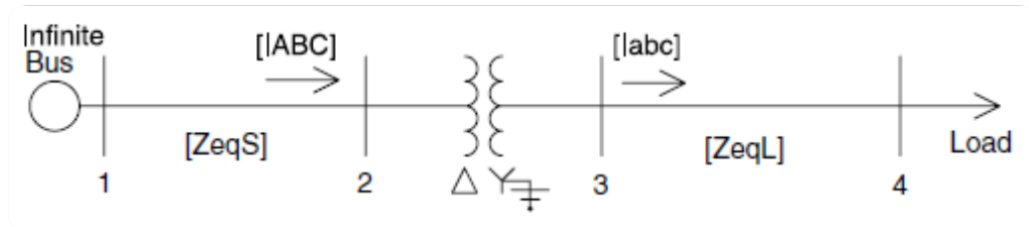
Σχήμα 4.5: Λογικό διάγραμμα Forward Sweep [4.2]



Σχήμα 4.6: Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου [4.2]

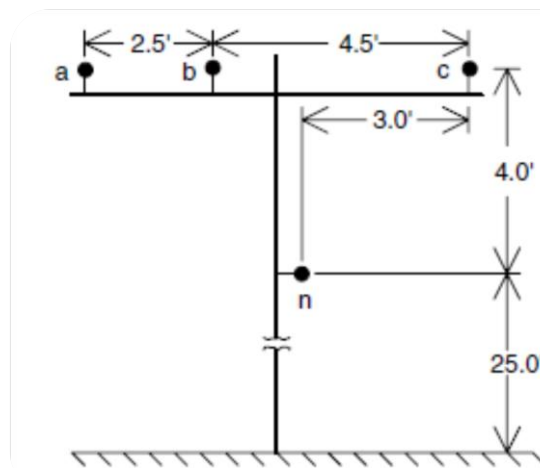
4.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ BFS

Στη συνέχεια ακολουθεί ένα παράδειγμα εκτέλεσης του αλγορίθμου BFS για καλύτερη κατανόηση του. Το δίκτυο στο οποίο θα εφαρμοστεί είναι πολύ απλό καθώς αποτελείται από 4 ζυγούς και δεν έχει υποκλάδους. Στο σχήμα 4.7 βλέπουμε το δίκτυο αυτό το οποίο έχει τα εξής δεδομένα [4.3]:



Σχήμα 4.7: Μονογραμμικό σχέδιο του δικτύου του παραδείγματος

1. Το επίπεδο της τάσης στους ζυγούς 1 και 2 είναι 12.47 kV(πολική) ενώ στους ζυγούς 3 και 4 είναι 4.16 kV(πολική).
2. Η τάση στον άπειρο ζυγό 1 είναι συμμετρική και είναι 12.47 kV(πολική).
3. Η γραμμή που συνδέει τους ζυγούς 1 και 2 αποτελείται μόνο από τις 3 φάσεις(συνδεσμολογία τριγώνου) και έχει μήκος 2000 feet. Η γραμμή που συνδέει τους ζυγούς 3 και 4 αποτελείται από τις 3 φάσεις και τον ουδέτερο(συνδεσμολογία αστέρα με ουδέτερο) και έχει μήκος 2500 feet. Οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών και στις δύο γραμμές φαίνονται στο σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8: Αποστάσεις μεταξύ αγωγών παραδείγματος

4. Και στις δύο εναέριες γραμμές για τους αγωγούς των φάσεων χρησιμοποιούμε τον τύπο 336,400 26/7 ACSR ενώ ο ουδέτερος αγωγός της γραμμής 3-4 είναι τύπου 4/0 6/1 ACSR. Οι γραμμές έχουν σχετικά μικρό μήκος επομένως θα αγνοήσουμε την εγκάρσια αγωγιμότητα.
5. Μεταξύ των ζυγών 2 και 3 υπάρχει μετασχηματιστής με συνδεσμολογία τριγώνου-γειωμένου αστέρα και αποτελείται από 3 μονοφασικούς μετασχηματιστές, ο καθένας με ονομαστική ισχύ 2000 kVA, ονομαστική τάση

- στο πρωτεύον 12.47 kV, ονομαστική τάση στο δευτερεύον 2.4 kV και αντίσταση σειράς $Z = 0.01 + j0.06$ p.u.
6. Στο ζυγό 4 υπάρχει ένα ασύμμετρο τριφασικό φορτίο σταθερής ισχύος συνδεδεμένο κατά αστέρα παρουσία ουδέτερου. Το φορτίο καταναλώνει ισχύ:
 - $S_a = 750$ kVA με συντελεστή ισχύος $\cos\phi_a = 0.85$ επαγωγικό
 - $S_b = 1000$ kVA με συντελεστή ισχύος $\cos\phi_b = 0.90$ επαγωγικό
 - $S_c = 1250$ kVA με συντελεστή ισχύος $\cos\phi_c = 0.95$ επαγωγικό
 7. Το όριο του σφάλματος για τη σύγκλιση της μεθόδου έχει καθοριστεί στη τιμή 0.001 p.u.

Υπολογισμός παραμέτρων των στοιχείων του δικτύου

Γραμμή 1-2

Γνωρίζοντας τον τύπο των αγωγών και τις αποστάσεις μεταξύ τους μπορούμε να υπολογίσουμε τη μήτρα Z_{abc} της γραμμής 1-2 χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.29) και (3.30). Καθώς δεν υπάρχει ουδέτερος, ο πίνακας που προκύπτει είναι 3x3 και μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας στους υπολογισμούς μας. Οι εξισώσεις (3.29) και (3.30) μας δίνουν τη μήτρα Z_{abc} σε $\frac{\Omega}{mile}$ επομένως πρέπει να πολλαπλασιάσουμε κατάλληλα τα αποτελέσματα τους για να υπολογίσουμε τη μήτρα Z_{abc} σε Ω . Έτσι έχουμε:

$$[ZeqS_{ABC}] = \begin{bmatrix} 0.1414 + j0.5353 & 0.0361 + j0.3225 & 0.0361 + j0.2752 \\ 0.0361 + j0.3225 & 0.1414 + j0.5353 & 0.0361 + j0.2955 \\ 0.0361 + j0.2752 & 0.0361 + j0.2955 & 0.1414 + j0.5353 \end{bmatrix} \Omega$$

Από τις εξισώσεις (3.22),(3.23) και (3.25) έως (3.28) έχουμε:

$$[a_1] = [d_1] = [U] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[b_1] = [ZeqS_{ABC}] = \begin{bmatrix} 0.1414 + j0.5353 & 0.0361 + j0.3225 & 0.0361 + j0.2752 \\ 0.0361 + j0.3225 & 0.1414 + j0.5353 & 0.0361 + j0.2955 \\ 0.0361 + j0.2752 & 0.0361 + j0.2955 & 0.1414 + j0.5353 \end{bmatrix}$$

$$[c_1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[A_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[B_1] = \begin{bmatrix} 0.1414 + j0.5353 & 0.0361 + j0.3225 & 0.0361 + j0.2752 \\ 0.0361 + j0.3225 & 0.1414 + j0.5353 & 0.0361 + j0.2955 \\ 0.0361 + j0.2752 & 0.0361 + j0.2955 & 0.1414 + j0.5353 \end{bmatrix}$$

Γραμμή 3-4

Η διαφορά με τη προηγούμενη γραμμή είναι η παρουσία ουδετέρου. Η εφαρμογή των εξισώσεων (3.29) και (3.30) θα μας δώσουν πίνακα 4x4 ο οποίος θα πρέπει να γίνει 3x3 με τη μέθοδο Kron χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.31) έως (3.36). Πολλαπλασιάζοντας και πάλι το αποτέλεσμα με την απόσταση κατάλληλα προκύπτει η ζητούμενη μήτρα σε Ω.

$$[Z_{eq}L_{abc}] = \begin{bmatrix} 0.1907 + j0.5035 & 0.0607 + j0.2302 & 0.0598 + j0.1751 \\ 0.0607 + j0.2302 & 0.1939 + j0.4885 & 0.0614 + j0.1931 \\ 0.0598 + j0.1751 & 0.0614 + j0.1931 & 0.1921 + j0.4970 \end{bmatrix} \Omega$$

Από τις εξισώσεις (3.22),(3.23) και (3.25) έως (3.28) έχουμε:

$$[a_2] = [d_2] = [U] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[b_2] = [Z_{eq}L_{abc}] = \begin{bmatrix} 0.1907 + j0.5035 & 0.0607 + j0.2302 & 0.0598 + j0.1751 \\ 0.0607 + j0.2302 & 0.1939 + j0.4885 & 0.0614 + j0.1931 \\ 0.0598 + j0.1751 & 0.0614 + j0.1931 & 0.1921 + j0.4970 \end{bmatrix}$$

$$[c_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[A_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[B_2] = \begin{bmatrix} 0.1907 + j0.5035 & 0.0607 + j0.2302 & 0.0598 + j0.1751 \\ 0.0607 + j0.2302 & 0.1939 + j0.4885 & 0.0614 + j0.1931 \\ 0.0598 + j0.1751 & 0.0614 + j0.1931 & 0.1921 + j0.4970 \end{bmatrix}$$

Μετασχηματιστής

Η αντίδραση του μετασχηματιστή πρέπει να μετατραπεί σε πραγματικές τιμές σε Ω ως προς τη χαμηλή τάση.

$$Z_{base} = \frac{2.4^2 * 1000}{2000} = 2.88 \Omega$$

$$Z_{t_{low}} = (0.01 + j0.06) * 2.88 = 0.0288 + j0.1728 \Omega$$

Από τις εξισώσεις (3.62) έως (3.67) έχουμε:

$$n_t = \frac{12.47}{2.4} = 5.1958$$

$$[a_t] = -\frac{n_t}{3} * \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -3.4639 & -1.7319 \\ -1.7319 & 0 & -3.4639 \\ -3.4639 & -1.7319 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[b_t] = \begin{bmatrix} 0 & -0.0998 - j0.5986 & -0.0499 - j0.2993 \\ -0.0499 - j0.2993 & 0 & -0.0998 - j0.5986 \\ -0.0998 - j0.5986 & -0.0499 - j0.2993 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[c_t] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[d_t] = \begin{bmatrix} 0.1925 & -0.1925 & 0 \\ 0 & 0.1925 & -0.1925 \\ -0.1925 & 0 & 0.1925 \end{bmatrix}$$

$$[A_t] = \begin{bmatrix} 0.1925 & 0 & -0.1925 \\ -0.1925 & 0.1925 & 0 \\ 0 & -0.1925 & 0.1925 \end{bmatrix}$$

$$[B_t] = \begin{bmatrix} 0.0288 + j0.1728 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0288 + j0.1728 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0288 + j0.1728 \end{bmatrix}$$

Υπολογισμός RBF διάσχισης ζυγών

Το δίκτυο είναι πολύ απλό επομένως ο προσδιορισμός της RBF διάσχισης και η δεικτοδότηση των ζυγών είναι περιττή. Παρ' όλα αυτά για να είμαστε τυπικοί ως προς τον αλγόριθμο θα πραγματοποιήσουμε και αυτό το βήμα.

Όνομα ζυγού	Δείκτες		
	l	m	n
1	1	1	0
2	1	1	1
3	1	1	2
4	1	1	3

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τον κανόνα καθορισμού της RBF σειράς, ο οποίος αναφέρει ότι προηγείται ο ζυγός με τον μεγαλύτερο δείκτη (κατά προτεραιότητα l,m,n), το RBF άκρο είναι ο ζυγός 4 και η σειρά διάσχισης του δικτύου είναι οι ζυγοί 4,3,2,1.

Αρχικοποίηση τιμών

Ορίζουμε τις πολικές και φασικές τάσεις του άπειρου ζυγού 1:

$$[ELL_s] = \begin{bmatrix} 12,470 / \underline{30} \\ 12,470 / \underline{-90} \\ 12,470 / \underline{150} \end{bmatrix} V$$

$$[ELN_s] = \begin{bmatrix} 7199.6 / \underline{0} \\ 7199.6 / \underline{-120} \\ 7199.6 / \underline{120} \end{bmatrix} V$$

Υποθέτουμε τις φασικές τάσεις του άκρου RBF δηλαδή τις τάσεις του ζυγού 4. Λόγω παρουσίας μετασχηματιστή συνδεσμολογίας τριγώνου – γειωμένου αστέρα θα χρησιμοποιήσουμε τις ονομαστικές τάσεις μετατοπισμένες όμως κατά 30 μοίρες προς τα αρνητικά. Θα μπορούσαμε και να μην είχαμε κάνει τη μετατόπιση αυτή καθώς κάνουμε απλά μία πρόβλεψη τιμής αλλά λόγω της παρουσίας μετασχηματιστή τέτοιας συνδεσμολογίας μία τέτοια μετατόπιση μπορεί να προκαλέσει ταχύτερη σύγκλιση.

$$[V_4] = \begin{bmatrix} 2400 / \underline{-30} \\ 2400 / \underline{-150} \\ 2400 / \underline{90} \end{bmatrix} V$$

1^η επανάληψη backward sweep

Αρχικά υπολογίζουμε το εισερχόμενο στο κόμβο 4 ρεύμα. Δεν έχουμε εγκάρσιους πυκνωτές, ούτε διεσπαρμένη παραγωγή, ούτε εξερχόμενο ρεύμα, ούτε ρεύμα από άλλους υποκλάδους. Έχουμε μόνο φορτίο σταθερής ισχύος και συνδεσμολογίας αστέρα με ουδέτερο. Επομένως από τις εξισώσεις (4.9) και (3.1) έχουμε:

$$[I_4]_{\text{εισερχ.}} = - \begin{bmatrix} 312 / \underline{-61.8} \\ 416.7 / \underline{-175.8} \\ 520.8 / \underline{71.8} \end{bmatrix} A$$

Το αρνητικό πρόσημο, όπως έχουμε πει, υπάρχει γιατί θέλουμε το εγχεόμενο και όχι το απορροφόμενο ρεύμα.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τις τάσεις και τα εξερχόμενα ρεύματα του ζυγού 3 χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.17) και (3.18). Οι εξισώσεις αυτές δίνονται με φορά του ρεύματος I_n προς το ζυγό n επομένως θα πρέπει να αλλάξουμε το πρόσημο του ρεύματος.

$$[V_3] = [a_2] * [V_4] + [b_2] * [I_4] = \begin{bmatrix} 2470.9 / -29.5 \\ 2534.4 / -148.4 \\ 2509.5 / 94.1 \end{bmatrix} V$$

$$[I_3]_{\text{εξερχόμενος προς 4}} = [c_2] * [V_4] + [d_2] * [I_4] = \begin{bmatrix} 312.5 / 61.8 \\ 416.7 / -175.8 \\ 520.8 / 71.8 \end{bmatrix} A$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το εισερχόμενο ρεύμα του κόμβου 3. Ο κόμβος 3 δεν έχει ούτε φορτία, ούτε εγκάρσιους πυκνωτές, ούτε διεσπαρμένη παραγωγή, ούτε ρεύματα υποκλάδων. Επομένως το εισερχόμενο ρεύμα στο κόμβο 3 θα ισούται με το αντίθετο του εξερχόμενου του στο κόμβο 4 (διότι θέλουμε το εγγεόμενο και όχι το απορροφόμενο). Από τις εξισώσεις (3.58) και (3.59) υπολογίζουμε τις τάσεις και τα ρεύματα του κόμβου 2 καθώς ανάμεσα στους κόμβους 2 και 3 έχουμε μετασχηματιστή. Οι εξισώσεις αυτές δίνονται με φορά του ρεύματος I_n προς το ζυγό η επομένως θα πρέπει να αλλάξουμε το πρόσημο του ρεύματος.

$$[V_2] = [a_t] * [V_3] + [b_t] * [I_3] = \begin{bmatrix} 7956.4 / 3.3 \\ 7344.5 / -113.4 \\ 7643.0 / 120.5 \end{bmatrix} V$$

$$[I_2]_{\text{εξερχόμενος προς 3}} = [c_t] * [V_3] + [d_t] * [I_3] = \begin{bmatrix} 118.2 / -23.5 \\ 150.3 / -137.8 \\ 148.3 / 88.9 \end{bmatrix} A$$

Έπειτα υπολογίζουμε το εισερχόμενο ρεύμα του κόμβου 2. Ο κόμβος 2 δεν έχει ούτε φορτία, ούτε εγκάρσιους πυκνωτές, ούτε διεσπαρμένη παραγωγή, ούτε ρεύματα υποκλάδων. Επομένως το εισερχόμενο ρεύμα στο κόμβο 2 θα ισούται με το αντίθετο του εξερχόμενου του στο κόμβο 3 (διότι θέλουμε το εγγεόμενο και όχι το απορροφόμενο). Από τις εξισώσεις (3.17) και (3.18) υπολογίζουμε τις τάσεις και τα ρεύματα του κόμβου 1 καθώς ανάμεσα στους κόμβους 1 και 2 έχουμε γραμμή διανομής. Οι εξισώσεις αυτές δίνονται με φορά του ρεύματος I_n προς το ζυγό η επομένως θα πρέπει να αλλάξουμε το πρόσημο του ρεύματος.

$$[V_1] = [a_1] * [V_2] + [b_1] * [I_2] = \begin{bmatrix} 7985.9 / 3.4 \\ 7370.6 / -113.2 \\ 7673.6 / 120.7 \end{bmatrix} V$$

$$[I_1]_{\text{εξερχόμενος 2}} = [c_1] * [V_2] + [d_1] * [I_2] = \begin{bmatrix} 118.2 - 23.5 \\ 150.3 / -137.8 \\ 148.3 / 88.9 \end{bmatrix} A$$

Αρα η πολική τάση στο κόμβο 1 είναι:

$$[V_{LL1}] = \begin{bmatrix} 13,067.5 / 33.7 \\ 13,411.4 / -85.7 \\ 13,375.9 / 152.7 \end{bmatrix} V$$

Υπολογίζουμε το σφάλμα μεταξύ πραγματικής και υπολογισμένης τιμής:

$$[Error]_{pu} = \frac{|[ELL_s - V_{LL1}]|}{12,470} = \begin{bmatrix} 0.0809 \\ 0.1086 \\ 0.0876 \end{bmatrix} p.u.$$

Το σφάλμα είναι μεγαλύτερο του ανεκτού επομένως θα ξεκινήσει η forward sweep. Η forward sweep χρησιμοποιεί τις πραγματικές φασικές τάσεις του κόμβου 1 και προχωράει προς το κόμβο 4 χρησιμοποιώντας τα εξερχόμενα ρεύματα που υπολογίσαμε με τη backward sweep.

1^η επανάληψη Forward sweep

Για τον υπολογισμό της τάσης $[V_2]$ θα χρησιμοποιήσω την εξίσωση (3.19). Στην εξίσωση αυτή το ρεύμα I_m πρέπει να έχει φορά εξερχόμενη από το κόμβο , επομένως θα χρησιμοποιήσουμε απευθείας το ρεύμα $[I_1]_{\text{εξερχόμενος 2}}$.

$$[V_2] = [A_1] * [ELN_s] - [B_1] * [I_1]_{\text{εξερχόμενος 2}} = \begin{bmatrix} 7171.1 / -0.1 \\ 7176.7 / -120.2 \\ 7169.3 / 119.8 \end{bmatrix} V$$

Για τον υπολογισμό της τάσης $[V_3]$ θα χρησιμοποιήσω την εξίσωση (3.60). Στην εξίσωση αυτή το ρεύμα I_m πρέπει να έχει φορά εξερχόμενη από το κόμβο , επομένως θα χρησιμοποιήσουμε απευθείας το ρεύμα $[I_2]_{\text{εξερχόμενος 3}}$.

$$[V_3] = [A_t] * [V_2] - [B_t] * [I_2]_{\text{εξερχόμενος 3}} = \begin{bmatrix} 2354.0 / -31.2 \\ 2351.0 / -151.6 \\ 2349.9 / 87.8 \end{bmatrix} V$$

Για τον υπολογισμό της τάσης $[V_4]$ θα χρησιμοποιήσω την εξίσωση (3.19). Στην εξίσωση αυτή το ρεύμα I_m πρέπει να έχει φορά εξερχόμενη από το κόμβο, επομένως θα χρησιμοποιήσουμε απευθείας το ρεύμα $[I_3]_{\text{εξερχόμενος προς 4}}$.

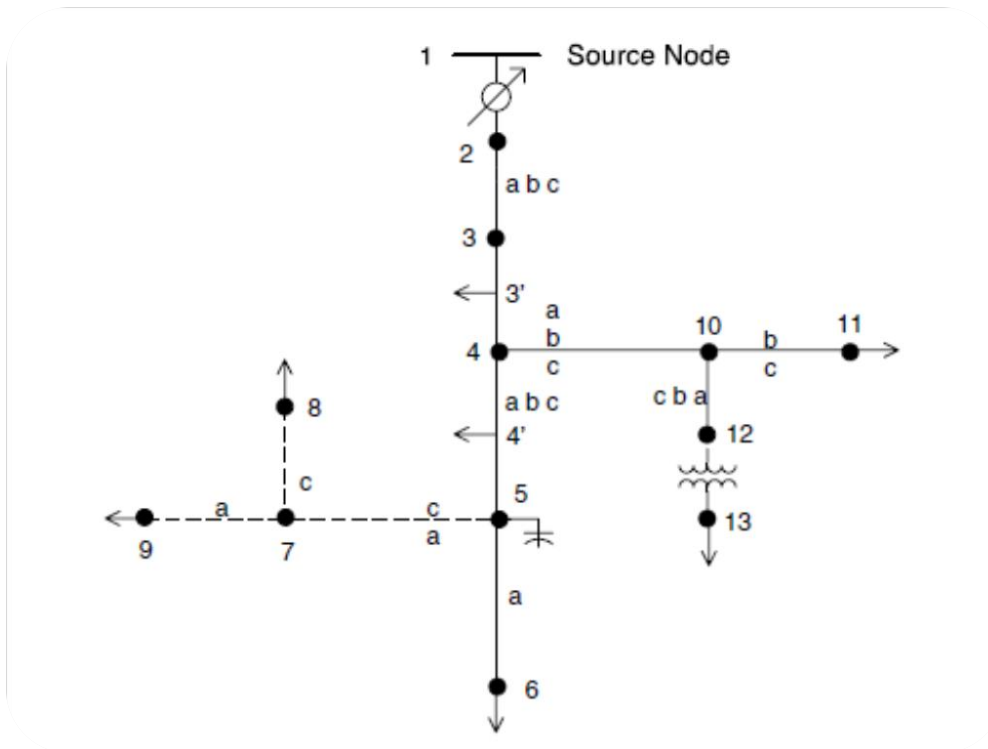
$$[V_4] = [A_2] * [V_3] - [B_2] * [I_3]_{\text{εξερχόμενος προς 4}} = \begin{bmatrix} 2283.7 / -31.7 \\ 2221.4 / -153.6 \\ 2261.0 / 83.2 \end{bmatrix} V$$

Έτσι, ολοκληρώθηκε η πρώτη επανάληψη. Η δεύτερη επανάληψη ξεκινάει υπολογίζοντας το εισερχόμενο ρεύμα στο κόμβο 4 (εγγεόμενο) χρησιμοποιώντας τις νέες τιμές τάσης του κόμβου 4. Η backward sweep χρησιμοποιεί καινούργια ρεύματα. Η backward και forward sweep θα συνεχιστούν μέχρι το σφάλμα να είναι μικρότερο από 0.001 p.u. Μετά από 4 επαναλήψεις η λύση συγκλίνει με σφάλμα 0.0003 p.u. Το τελικό αποτέλεσμα στο κόμβο 4 είναι:

$$[V_{4,final}] = \begin{bmatrix} 2278.7 / -31.8 \\ 2199.8 / -153.5 \\ 2211.2 / 83.1 \end{bmatrix} V$$

Το παραπάνω παράδειγμα ήταν πολύ απλό και χρησιμοποιήθηκε για καλύτερη κατανόηση του αλγορίθμου. Σε μία πιο πολύπλοκη εφαρμογή με περισσότερους υποκλάδους, περισσότερα φορτία και προσθήκη εγκάρσιων πυκνωτών και διεσπαρμένης παραγωγής χρειάζεται πολύ προσοχή στον υπολογισμό του εισερχόμενου ρεύματος και κυρίως στα πρόσημα. Πολύ σημαντικό για τη κατανόηση του υπολογισμού του εισερχόμενου ρεύματος είναι το σχήμα 4.2. Οι εξισώσεις που έχουν δοθεί στο κεφάλαιο 3 υπολογίζουν τα ρεύματα με αυτή τη φορά. Επομένως χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή η χρήση των εξισώσεων στα στοιχεία των κλάδων που θέλουν το εισερχόμενο ρεύμα με αντίθετη από τη φορά που φαίνεται στο σχήμα 4.2. Τέλος πολύ σημαντικό για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων είναι φυσικά η κατανόηση της RBF διάσχισης των κόμβων.

Παρακάτω θα δούμε ένα ακόμα παράδειγμα με πιο πολύπλοκη τοπολογία. Στο παράδειγμα αυτό δε θα ασχοληθούμε καθόλου με υπολογισμούς παρά μόνο με τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσουμε. Η τοπολογία του δικτύου φαίνεται στο σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9: Μονογραμμικό σχέδιο δικτύου [4.3]

1. Υπολογισμός παραμέτρων στοιχείων δικτύου
 2. Προσδιορισμός RBF άκρων και RBF σειράς διάσχισης κόμβων
- Συγκεκριμένα για αυτό το δίκτυο έχουμε:

Όνομα ζυγού	Δείκτες		
	l	m	n
1	1	1	0
2	1	1	1
3	1	1	2
4	1	1	3
5	1	1	4
6	1	1	5
7	2	2	1
8	3	2	1
9	2	2	2
10	2	1	1
11	2	1	2
12	3	1	1
13	3	1	2

Τα RBF άκρα είναι οι κόμβοι 8, 13, 9, 11 και 6 ενώ η RBF σειρά διάσχισης είναι 8, 13, 12, 9, 7, 11, 10, 6, 5, 4, 3, 2, 1.

3. Αρχικοποίηση τάσεων κόμβου 1
4. Πρόβλεψη τάσεων 8, 13, 9, 11 και 6
5. Υπολογισμός εισερχόμενου ρεύματος σε κόμβο 8
6. Backward sweep στον υποκλάδο 8-7
7. Υπολογισμός εισερχόμενου ρεύματος σε κόμβο 13
8. Backward sweep στον υποκλάδο 13-12-10
9. Υπολογισμός εισερχόμενου ρεύματος σε κόμβο 9
10. Backward sweep στον υποκλάδο 9-7-5
11. Υπολογισμός εισερχόμενου ρεύματος σε κόμβο 11
12. Backward sweep στον υποκλάδο 11-10-4
13. Υπολογισμός εισερχόμενου ρεύματος σε κόμβο 6
14. Backward sweep στον κύριο κλάδο 6-5-4-3-2-1.
15. Έλεγχος σφάλματος (Αν το σφάλμα είναι ανεκτό σταματάω αλλιώς συνεχίζω με forward sweep με αντίθετη σειρά διάσχισης από πριν)
16. Forward sweep στον κύριο κλάδο 1-2-3-4-5-6
17. Forward sweep στον υποκλάδο 4-10-11
18. Forward sweep στον υποκλάδο 5-7-9
19. Forward sweep στον υποκλάδο 10-12-13
20. Forward sweep στον υποκλάδο 7-8
21. Επιστρέφω στο βήμα 5 και συνεχίζω μέχρι να υπάρξει ανεκτό σφάλμα

Κεφάλαιο 5

ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicles) ονομάζονται τα οχήματα που για την κίνηση τους χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια αντί για συμβατικά καύσιμα όπως για παράδειγμα πετρέλαιο ή βενζίνη. Όταν μιλάμε για ηλεκτρικά οχήματα αναφερόμαστε σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα κατά κύριο λόγο, χωρίς όμως να απορρίπτουμε το γεγονός πως γίνονται μελέτες και προσπάθειες έτσι ώστε να δημιουργηθούν και εμπορικά επαγγελματικά οχήματα που θα εξοπλίζουν τους μεταφορικούς στόλους εταιρειών στο προσεχές μέλλον [5.1].

Τα τελευταία χρόνια γίνεται μία έντονη προσπάθεια ανά τον κόσμο για εξάπλωση και ανάπτυξη των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας και την μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Έτσι παρατηρούμε εταιρείες κατασκευής αυτοκινήτων όπως για παράδειγμα Toyota, BMW, Mercedes να κάνουν προσπάθειες για κατασκευή ενός εμπορικού αλλά και ελκυστικού ηλεκτρικού αυτοκινήτου αλλά παρατηρούμε και διάφορες πολιτικές οι οποίες ευνοούν την κατοχή ηλεκτρικών αυτοκινήτων από ιδιώτες. Παρ' όλα αυτά όμως τα προβλήματα που απομένουν να λυθούν είναι αρκετά και θα χρειαστεί αρκετή προσπάθεια από τα ανά τον κόσμο εργαστήρια προτού μπορούμε να συγκρίνουμε ένα αυτοκίνητο με συμβατικά καύσιμα με ένα όμοιο του που χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια. Γι' αυτό τον λόγο τα περισσότερα αυτοκίνητα που κυκλοφορούν αυτή την στιγμή στην αγορά είναι κυρίως υβριδικά (δηλαδή χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας τον ηλεκτρισμό αλλά ο ηλεκτρισμός αυτός παράγεται από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσεως που παράγει ηλεκτρισμό και/ή κινεί το όχημα. Συνοπτικά τα προβλήματα που υπάρχουν και εμποδίζουν την ευρεία εξάπλωση των EVs είναι τα ακόλουθα [5.2]:

1. Αυτονομία μπαταρίας EV και πυκνότητα ισχύος
2. Χρόνος φόρτισης μπαταρίας
3. Χρόνος ζωής της μπαταρίας και κύκλοι ζωής
4. Κόστος μπαταρίας
5. Σύνδεση στο δίκτυο για φόρτιση και πως αυτό επηρεάζεται

5.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Με τον όρο *ηλεκτρικό όχημα (EV)* αναφερόμαστε σε οχήματα που χρησιμοποιούν για την κίνηση τους έναν ή περισσότερους ηλεκτροκινητήρες. Τα ηλεκτρικά οχήματα

που διατίθενται σήμερα στην αγορά μπορούν να διαιρεθούν με βάση την τεχνολογία τους σε τρεις βασικές κατηγορίες [5.3]:

- *Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicles - BEV's)*

Είναι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που κινούνται αποκλειστικά με την ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται σε συσσωρευτές εγκατεστημένους εντός του οχήματος και η οποία μπορεί να προσληφθεί από το δίκτυο, ή από κάποια εξωτερική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Εφαρμόζονται επίσης και τεχνικές φόρτισης των συσσωρευτών με τη λεγόμενη «αναγεννητική πέδηση», που αξιοποιεί την θερμότητα που παράγεται κατά το φρενάρισμα του οχήματος. Με τα σημερινά δεδομένα οι μπαταρίες μολύβδου - οξέος (lead - acid) αποτελούν την οικονομικότερη επιλογή, όμως τεχνολογίες όπως οι υδριδίου μετάλλων νικελίου (NiMH), ιόντων λιθίου (Li-Ion) και πολυμερών ιόντων λιθίου κερδίζουν συνεχώς έδαφος λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής, του μικρότερου μεγέθους και βάρους. Σήμερα, ορισμένοι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι τα χαμηλής ταχύτητας, τα εδάφους αεροδρομίων, καθώς και οχήματα βιομηχανικού εξοπλισμού, όπως για παράδειγμα περνοφόροι ανυψωτές κ.α.

- *Ηλεκτρικά οχήματα με μονάδα επέκτασης της αυτονομίας τους (Battery Electric Vehicles with Range Extender)*

Είναι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα τα οποία έχουν συσσωρευτές όπως ακριβώς και τα προαναφερθέντα, και επιπλέον διαθέτουν μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (γεννήτρια) επί του οχήματος. Η γεννήτρια αυτή χρησιμοποιείται κατά περίπτωση είτε για να φορτιστούν οι συσσωρευτές του οχήματος όταν αυτοί εκφορτιστούν, είτε για την απευθείας τροφοδότηση των ηλεκτροκινητήρων όταν αυτό απαιτείται. Τα οχήματα ανεφοδιάζονται με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο όπως ακριβώς και τα BEV's, αλλά παράλληλα πρέπει να ανεφοδιάζονται και με το είδος του καυσίμου με το οποίο λειτουργεί η μονάδα επέκτασης της αυτονομίας τους (είτε αυτό είναι βενζίνη, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο).

- *Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicles - PEHV)*

Τα αυτοκίνητα αυτά κινούνται χρησιμοποιώντας συνδυασμό ηλεκτροκινητήρα και κινητήρα εσωτερικής καύσης, και εκτός από τον εφοδιασμό τους με το συμβατικό καύσιμο του θερμικού κινητήρα, έχουν επιπρόσθετα τη δυνατότητα να φορτίζουν τους συσσωρευτές τους με ηλεκτρική ενέργεια απευθείας από το δίκτυο, ή από κάποια εξωτερική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Οι διατάξεις των οχημάτων αυτών είναι δύο: η παράλληλη και η σειριακή [5.4].

Στην «παράλληλη» σχεδίαση του κινητήρα, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης και ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι συνδεδεμένοι μηχανικά και κινούν τους τροχούς. Λόγω της μηχανικής σύνδεσης του κινητήρα με τους τροχούς απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων.

Κατά τη διάρκεια της κίνησης, η ενέργεια ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να οδηγείται από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης στον ηλεκτροκινητήρα και από εκεί στους τροχούς ή τις μπαταρίες ή από τις μπαταρίες στον ηλεκτροκινητήρα και από εκεί στους τροχούς ή να κινούν και οι δύο κινητήρες τους τροχούς. Ένας ελεγκτής ρυθμίζει την εκάστοτε συμβολή του κάθε στοιχείου του συστήματος στην προώθηση των τροχών. Κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης, η κίνηση δίνεται και από τους δύο κινητήρες ενώ κατά τη διάρκεια της επιβράδυνσης, η περίσσεια ενέργειας φορτίζει τις μπαταρίες.

Η «σειριακή» διάταξη αποτελείται από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης, έναν ηλεκτρικό κινητήρα που λειτουργεί ως γεννήτρια και έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Οι τροχοί δέχονται κίνηση μόνο από τον ηλεκτρικό κινητήρα, ενώ ο κινητήρας εσωτερικής καύσης κινεί τη γεννήτρια. Ο ηλεκτρικός κινητήρας δέχεται ενέργεια είτε από τους συσσωρευτές είτε από τη γεννήτρια ή και από τις δύο πηγές ενέργειας.

Στις χαμηλές ταχύτητες η κίνηση δίνεται στους τροχούς από τον ηλεκτροκινητήρα που τροφοδοτείται από τις μπαταρίες. Στις υψηλότερες ταχύτητες ο κινητήρας εσωτερικής καύσης δίνει μέρος της ενέργειας του στον ηλεκτροκινητήρα κίνησης και στις μπαταρίες. Κατά τη διάρκεια της πλήρους επιτάχυνσης, ο ηλεκτροκινητήρας δέχεται όλη την ενέργεια από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης και από τις μπαταρίες ώστε να αντεπεξέλθει στην αυξημένη ζήτηση ροπής. Κατά τη διάρκεια της επιβράδυνσης, ο ηλεκτροκινητήρας φορτίζει τις μπαταρίες για μελλοντική χρήση τους.

Τα ηλεκτρικά οχήματα κατηγοριοποιούνται περαιτέρω ανάλογα με το μέγεθος και τη χρήση τους στις εξής κατηγορίες [5.5]:

- *L7e*

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλα τα πολύ μικρά αυτοκίνητα με μέγιστο καθαρό βάρος τα 550kg (χωρίς να υπολογίζεται το βάρος του καυσίμου ή των συσσωρευτών) και μέγιστη ισχύ τα 15 kW ανεξαρτήτως του κινητήρα.

- *M1*

Ως τύπου M1 μπορούν να χαρακτηριστούν όλα τα επιβατικά οχήματα που περιλαμβάνουν μέχρι 8 θέσεις επιβατών επιπλέον της θέσης του οδηγού.

- *N1*

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει όλα τα επαγγελματικά οχήματα, με μέγιστο βάρος φορτίου τα 3500kg.

- N2

Η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει τα επαγγελματικά οχήματα με βάρος φορτίου μεταξύ 3500kg και 12000kg.

Οι λόγοι για τους οποίους η κατηγοριοποίηση των οχημάτων έχει περιοριστεί στις παραπάνω 4 κατηγορίες είναι οι εξής:

1. Υπάρχει ήδη ένας αριθμός οχημάτων τύπου L7e διαθέσιμος στην αγορά, αλλά το ποσοστό τους επί των συνολικών πωλήσεων των ηλεκτρικών οχημάτων θα μειωθεί δραστικά, καθώς οικονομικότερα, ασφαλέστερα και πρακτικότερα οχήματα τύπου M1 θα εισαχθούν στην αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων.
2. Η κυρίαρχη τάξη ηλεκτρικών οχημάτων θα είναι ο τύπος M1. Αυτό επιβεβαιώνεται καθημερινά από τις συνεχείς ανακοινώσεις των διαφόρων κατασκευαστών αυτοκινήτων περί κυκλοφορίας νέων μοντέλων ηλεκτρικών οχημάτων τύπου M1.
3. Πολλά ηλεκτρικά οχήματα τύπου N1 αναμένεται να κυκλοφορήσουν στο μέλλον, καθώς σε πολλές περιπτώσεις τα μοντέλα χρήσης (πχ διανυόμενη απόσταση) καθώς και οι χρόνοι και οι τοποθεσίες φόρτισης (πχ κατά τη διάρκεια της νύχτας σε σταθμό φόρτισης) μπορούν να προβλεφθούν με αξιοπιστία και αποδεκτή ακρίβεια.
4. Το άνω όριο τέθηκε με τα οχήματα τύπου N2, με μέγιστη δυνατότητα φορτίου τα 12000kg. Οι μέχρι τώρα πληροφορίες αναφέρουν πως μεγαλύτερα οχήματα είναι απίθανο να χρησιμοποιήσουν ηλεκτροκίνηση.

5.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

Ο συσσωρευτής είναι μια διάταξη που αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια μετατρέποντάς την σε χημική και την απελευθερώνει με την αντίστροφη διαδικασία. Αποτελείται από δυο διαφορετικά αγωγικά υλικά βυθισμένα, σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, μέσα σε αγωγικό υγρό, τον ηλεκτρολύτη. Οι συσσωρευτές διακρίνονται ανάλογα με τα αγωγικά υλικά τους. Συνηθέστεροι τύποι συσσωρευτών είναι: μολύβδου-οξέως, νικελίου-καδμίου, νικελίου-μετάλλου υδριδίου και ιόντων λιθίου. Ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται μεταβάλλονται σημαντικά χαρακτηριστικά του συσσωρευτή όπως η ενέργεια ανά μονάδα μάζας (Wh/kg), το κόστος ανά μονάδα ενέργειας (€/Wh), βάθος εκφόρτισης (DOD %), ο ρυθμός εκφόρτισης κτλ [5.6].

Μια σύντομη περιγραφή των βασικών τύπων συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται ακολουθεί παρακάτω [5.7]:

❖ *Μολύβδου – Οξέος*

Οι συσσωρευτές μολύβδου - εκχυλίσματος οξέος είναι οι φθηνότεροι και πιο συνηθισμένοι. Επιτρέπουν υψηλούς ρυθμούς φόρτισης στην περίπτωση της γρήγορης φόρτισης. Απαιτείται όμως επιθεώρηση του επιπέδου των ηλεκτρολυτών και αντικατάσταση του νερού. Παραδοσιακά, τα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα έχουν χρησιμοποιήσει συσσωρευτές μολύβδου - οξέος εξαιτίας της ώριμης τεχνολογίας τους, της υψηλής διαθεσιμότητάς τους, και του χαμηλού κόστους.

Έχουν όμως σχετικά χαμηλή βαρομετρική πυκνότητα ενέργειας περίπου 30-40 Wh/kg και καταλήγουν να αποτελούν το 25%-50% της τελικής μάζας του ηλεκτρικού οχήματος. Παρόλο που η διαφορά στο βάρος δεν είναι τόσο μεγάλη, λόγω του ελαφρύτερου αμαξώματος των ηλεκτρικών οχημάτων, ακόμη και οι αποδοτικότεροι συσσωρευτές τείνουν να οδηγήσουν σε υψηλότερες μάζες όταν εφαρμόζονται σε οχήματα με σχετικά υψηλή αυτονομία. Η απόδοση (70-75%) και η ικανότητα αποθήκευσης της σημερινής γενιάς των κοινών συσσωρευτών μολύβδου - οξέος μειώνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Σε ακραίες καιρικές συνθήκες είναι απαραίτητη η εκτροπή ενέργειας από τις μπαταρίες για τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσής τους, με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοσή τους μέχρι και 40%. Ακόμα έχει παρατηρηθεί πως η διάρκεια ζωής μειώνεται από συνεχόμενες εκφορτίσεις σε επίπεδα κάτω του 20% της ονομαστικής χωρητικότητας. Πρόσφατα επιτεύγματα στην απόδοση, τη χωρητικότητα, το υλικό κατασκευής, την ασφάλεια, την τοξικότητα και την ανθεκτικότητα είναι πιθανόν να επιτρέψουν την εφαρμογή αυτών των εξεχόντων χαρακτηριστικών της μπαταρίας σε κανονικού μεγέθους ηλεκτρικά οχήματα. Η φόρτιση και η λειτουργία των συσσωρευτών αυτών συνήθως έχει ως αποτέλεσμα τις εκπομπές υδρογόνου, οξυγόνου και θείου, οι οποίες είναι αναμενόμενες και αβλαβείς αν εξαερίζονται σωστά.

❖ *Νικελίου – Καδμίου*

Οι συσσωρευτές νικελίου - καδμίου έχουν υψηλή διάρκεια ζωής και μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως χωρίς επιπτώσεις. Η πυκνότητα ενέργειας κυμαίνεται από 45 - 80 Wh/kg. Μπορούν να ανακυκλωθούν, αλλά το κάδμιο ανήκει στα βαρέα μέταλλα και απαιτείται ειδική μεταχείριση ώστε να μη βλάψει το περιβάλλον. Ένα άλλο μειονέκτημα των συσσωρευτών νικελίου - καδμίου είναι το κόστος το οποίο είναι το υψηλότερο από όλα τα άλλα είδη συσσωρευτών.

❖ *Νικελίου - Υδριδίου Μετάλλου*

Οι συσσωρευτές νικελίου - υδριδίου μετάλλου θεωρούνται πλέον μια σχετικά ώριμη τεχνολογία. Ενώ είναι λιγότερο αποδοτικοί (60-70%) σε

φόρτιση και εκφόρτιση από ότι οι μολύβδου - οξέος, έχουν να καυχώνται για μια ενεργειακή πυκνότητα της τάξης του 60 - 120 Wh/kg, πολύ υψηλότερη από αυτή του μολύβδου - οξέος. Όταν χρησιμοποιούνται σωστά, οι συσσωρευτές νικελίου - υδριδίου μετάλλου μπορούν να έχουν εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, όπως έχει αποδειχθεί κατά τη χρήση τους σε υβριδικά αυτοκίνητα, όπως για παράδειγμα στο RAV4 EV όπου εξακολουθούν να λειτουργούν καλά μετά από 160000 Km και πάνω από μια δεκαετία χρήσης. Μειονέκτημα αποτελούν η χαμηλή απόδοση, η υψηλή αυτό - εκφόρτιση, οι πολύ απαιτητικοί κύκλοι φόρτισης, και η κακή απόδοση σε ψυχρές καιρικές συνθήκες. Η καλύτερη λειτουργία επιτυγχάνεται όταν η εκφόρτιση γίνεται στο 20% - 50% της ονομαστικής χωρητικότητας, μακροπρόθεσμα όμως το SOC (State of Charge) θα μειωθεί κάτω από το 100%. Τα υλικά κατασκευής των συσσωρευτών αυτών δεν είναι βλαβερά για το περιβάλλον, και μάλιστα οι συστοιχίες είναι ανακυκλώσιμες.

❖ *Ιόντων Λιθίου*

Οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου αποτελούνται από μια οικογένεια συσσωρευτών που χρησιμοποιούν διάφορους συνδυασμούς υλικών ανόδου και καθόδου. Κάθε συνδυασμός έχει σαφή πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όσο αφορά την ασφάλεια, τις επιδόσεις, το κόστος, και άλλες παραμέτρους. Οι πιο χαρακτηριστικές τεχνολογίες για εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι η λιθίου - νικελίου - κοβαλτίου - αλουμινίου (NCA), λιθίου - νικελίου - μαγγανίου - κοβαλτίου (NMO), λιθίου - μαγγανίου - σπινελίου (ZTO), τιτανικού λιθίου (LTO), και λιθίου - φωσφορικού σιδήρου (LFP). Οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου έχουν αποδείξει την πολύ καλή τους απόδοση σε εφαρμογές φορητών ηλεκτρονικών ή και ιατρικών συσκευών. Έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, καλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες και είναι ανακυκλώσιμες. Το λίθιο είναι το τρίτο πιο ελαφρύ χημικό στοιχείο, προσφέροντας έτσι ένα συγκριτικό πλεονέκτημα σχετικά με άλλες μπαταρίες που χρησιμοποιούν βαρύτερα μέταλλα. Ένα ακόμη πλεονέκτημα που έχουν οι μπαταρίες Li - ion είναι η υψηλή τάση ανοιχτού κυκλώματος που επιτυγχάνουν σε σχέση με άλλες υδάτινες μπαταρίες όπως οι μπαταρίες μολύβδου - οξέος, οι μπαταρίες Νικελίου - υδριδίου μετάλλου και οι μπαταρίες Νικελίου - Καδμίου. Οι πυκνωτές ισχύος της τάξης του 300W/kg και ενέργειας της τάξης του 100W/kg σε συνδυασμό με την μεγάλη διάρκεια ζωής (1000 κύκλοι) αποτελούν χαρακτηριστικά που δίνουν στους συσσωρευτές ιόντων λιθίου προοπτικές αντικατάστασης των συσσωρευτών NiMH στα ηλεκτρικά οχήματα της επόμενης γενιάς. Μοναδικό μειονέκτημα, ωστόσο, των μπαταριών Li - ion είναι ότι η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται και από το χρόνο που έχει περάσει από τη στιγμή της κατασκευής τους, ανεξάρτητα από το αν αυτές έχουν φορτιστεί και ανεξάρτητα από τον αριθμό των κύκλων φόρτισης/αποφόρτισης. Έτσι, μια παλιότερη χρονολογικά

μπαταρία θα διαρκέσει λιγότερο απ' ότi μια καινούρια εξαιτίας της ηλικίας της και μόνο, κάτι που δε συμβαίνει με τις άλλες μπαταρίες.

Πέρα από τους παραπάνω συσσωρευτές υπάρχουν και κάποιες νέες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας όπως οι υπερπυκνωτές και οι κυψέλες καυσίμου.

❖ Υπερπυκνωτές

Μια σχετικά νέα τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας είναι οι υπερπυκνωτές. Σε αυτούς η αποθήκευση ενέργειας γίνεται μέσα από τον φυσικό διαχωρισμό θετικού και αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου. Τα φορτία αποθηκεύονται σε δύο παράλληλους οπλισμούς χωρισμένους με μονωτικό υλικό. Αφού δε λαμβάνουν χώρα χημικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια, οι υπερπυκνωτές έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Η χαμηλή πυκνότητα ενέργειας σε συνδυασμό με το μεγάλο κόστος κάνει τη χρήση των υπερπυκνωτών κυρίως βοηθητική. Μπορούν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν ως βασικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας σε υβριδικά οχήματα ιδίως σε αστικό περιβάλλον, που το συνεχόμενο «σταμάτα - ξεκίνα» στην οδήγηση απαιτεί μικρή ισχύ. Είναι ιδανικοί για φόρτιση μέσω της αναγεννητικής πέδησης και μπορούν γρήγορα να προσφέρουν μεγάλα ποσά ισχύος κατά την επιτάχυνση λόγω των υψηλών ρυθμών φόρτισης/αποφόρτισης και της υψηλής πυκνότητας ισχύος.

❖ Κυψέλες καυσίμου

Η τελευταία δεκαετία χαρακτηρίζεται από αλματώδη ανάπτυξη της ερευνητικής δραστηριότητας στο πεδίο των κυψελών καυσίμου, δημιουργώντας έτσι τις προϋποθέσεις για υιοθέτησή τους στα συστήματα ηλεκτροκίνησης. Η βασική αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου είναι γνωστή εδώ και 150 χρόνια, ωστόσο, μια ποικιλία τεχνικών και οικονομικών προβλημάτων τις είχαν κρατήσει στο περιθώριο των τεχνολογικών εφαρμογών. Η διαφορά των κυψελών καυσίμου με τις μπαταρίες μπορεί να συνοψιστεί ως εξής : οι μπαταρίες αποθηκεύουν ενέργεια, ενώ οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν απευθείας τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου παράγει ενέργεια όσο της παρέχεται υδρογόνο και οξυγόνο. Η ίδια η κυψέλη δεν εκφορτίζεται ούτε εξαντλείται η ενέργειά της, όπως συμβαίνει με τις μπαταρίες. Σε ένα ηλεκτρικό όχημα με κυψέλη καυσίμου, η αποθήκευση γίνεται στη δεξαμενή καυσίμου, όπως στα συμβατικά οχήματα. Παρότι το υδρογόνο έχει υψηλή πυκνότητα ενέργειας (περίπου ίση με 42kWh/kg) είναι τόσο ελαφρύ που ένα λίτρο, πεπιεσμένο σε 35 Μρα (περίπου 350 ατμόσφαιρες) ζυγίζει μόνο 31 γραμμάρια και αποδίδει μόνο 1,3kWh. Αντίθετα, η βενζίνη έχει χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας (περίπου ίση με 14kWh/kg), αλλά ένα λίτρο της είναι ισοδύναμο με 8,3kWh. Ομολογουμένως,

οι κυψέλες καυσίμου και οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι πιο αποδοτικοί από τις μηχανές εσωτερικής καύσης, ωστόσο, για να παρασχεθεί σε ένα ηλεκτρικό όχημα εύρος απόδοσης 500 km απαιτούνται 6 kg υδρογόνου. Συμπιεσμένο στα 35 MPa, το υδρογόνο θα καταλάβει 200 λίτρα, ενώ με την προσθήκη των σωληνώσεων, βαλβίδων και συστημάτων ρύθμισης και συμπίεσης, ο απαιτούμενος χώρος αποθήκευσης είναι διπλάσιος. Εταιρείες με μεγάλη τεχνογνωσία σε μπαταρίες νικελίου μετάλλου υβριδίου έχουν χρησιμοποιήσει τη γνώση στα υβρίδια μετάλλου για την ανάπτυξη κραμάτων μετάλλου που μπορούν να αποθηκεύσουν 7% του βάρους τους σε υδρογόνο και σε χαμηλή πίεση των 200 kPa. Με αυτήν την τεχνολογία μπορούν να αποθηκευτούν 6 kg υδρογόνου σε 120 λίτρα, δηλαδή σε περίπου διπλάσιο μέγεθος δεξαμενής από αυτό που χρησιμοποιείται σε συμβατικά οχήματα μέσου μεγέθους. Ωστόσο, το βάρος αποθήκευσης παραμένει σημαντικό πρόβλημα, ενώ η παραγωγή υδρογόνου είναι ένα ακόμη ζήτημα προς επίλυση, καθώς δεν υπάρχουν αντίστοιχες υποδομές ή προοπτικές εγκατάστασής τους. Μία εναλλακτική λύση για την αποθήκευση υδρογόνου είναι η συνεχής παροχή του, μέσω παραγωγής από πιο εύχρηστα υλικά. Διάφορες αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν στραφεί στη δημιουργία συνεπτυγμένων χημικών συστημάτων για την παραγωγή υδρογόνου από κοινά καύσιμα. Η εναλλακτική αυτή εξαλείφει τα προβλήματα υποδομής, δημιουργεί όμως προβλήματα πολυπλοκότητας και κινδύνους ρύπανσης παρόμοιους με αυτούς των συμβατικών οχημάτων. Τέλος, η ασφάλεια του υδρογόνου σε σχέση με τη βενζίνη κατά τη μετακίνηση των οχημάτων παραμένει ακόμη ένα ανοιχτό ζήτημα.

5.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Το σύστημα μετάδοσης είναι απαραίτητο στοιχείο στο κινητήριο σύστημα ενός αυτοκινήτου. Ο λόγος είναι ότι αν συνδεόταν ο κινητήρα απ' ευθείας στους τροχούς, η ροπή που θα απαιτούνταν κατά την εκκίνηση θα ήταν μεγάλη και - στην περίπτωση του βενζινοκινητήρα - αυτός θα έσβηνε, ενώ στην περίπτωση του ηλεκτροκινητήρα, θα απαιτούνταν μεγάλα ρεύματα. Έτσι, χρειαζόμαστε τη μεταβολή του λόγου μετάδοσης ανάλογα με τις συνθήκες. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με το κιβώτιο διακριτών σχέσεων, είτε με το κιβώτιο συνεχούς λόγου μετάδοσης [5.6].

5.5 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Είναι φανερό ότι όλες οι κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό που είναι η απαίτηση της ολικής ή μερικής φόρτισης των συσσωρευτών τους με ηλεκτρική ενέργεια που θα χρησιμοποιείται για την κίνησή τους. Αυτή η διαδικασία χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά και αρκετές ιδιαιτερότητες που αποτελούν τη βασική και κρίσιμότερη προϋπόθεση για να επιτευχθεί η ευρεία διείσδυσή τους στο μέλλον. Ένας σταθμός φόρτισης των

συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά σε αναλογία με τους σταθμούς ανεφοδιασμού των συμβατικών οχημάτων (ICE) [5.8]:

- ❖ εύκολη πρόσβαση που σημαίνει διαθεσιμότητα σταθμών διάσπαρτων κατά μήκος του οδικού δικτύου
- ❖ ταχεία διαδικασία φόρτισης στην ίδια κλίμακα χρόνου με αυτήν των συμβατικών οχημάτων (ιδανική περίπτωση).

Η ανάπτυξη ενός δικτύου σημείων (σταθμών) φόρτισης με τα παραπάνω χαρακτηριστικά θα προκαλούσε τη μικρότερη μεταβολή στα χαρακτηριστικά οδήγησης του μέσου οδηγού και θα μπορούσε να δράσει καταλυτικά για την επιπρόσθετη στάθμη διείδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Η ένταση φόρτισης των συσσωρευτών καθορίζεται από διεθνή πρότυπα οργανισμών όπως είναι, για παράδειγμα, η International Electrotechnical Committee (IEC). Στο σχετικό πρότυπό της έχουν καθορισθεί οι ακόλουθοι τέσσερις τρόποι φόρτισης (modes) [5.9]:

- ❖ Απλή φόρτιση από μία συμβατική πρίζα (μονοφασική ή τριφασική).
- ❖ Απλή φόρτιση από μία συμβατική πρίζα που είναι εξοπλισμένη με μία ειδική διάταξη προστασίας των ηλεκτρικών οχημάτων.
- ❖ Απλή φόρτιση ή ταχεία φόρτιση με χρήση ειδικού βύσματος για φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων με πολλούς ακροδέκτες (Multi pin).
- ❖ Ταχεία φόρτιση με χρήση ειδικής τεχνολογίας φόρτισης

Είναι φανερό ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ του χρόνου φόρτισης και της απαιτούμενης ισχύος των σταθμών φόρτισης. Οι ακόλουθες απαιτήσεις ισχύουν για την παροχή εναλλασσομένου ρεύματος στις αντίστοιχες συσκευές φόρτισης των συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων που ευρίσκονται τοποθετημένοι σε αυτά [5.9]:

- Διάρκεια φόρτισης 6 - 8 ώρες με μονοφασική παροχή:
Τάση 230V, Ρεύμα 16A, Ισχύς 3kW.
- Διάρκεια φόρτισης 4 - 6 ώρες με μονοφασική παροχή:
Τάση 230V, Ρεύμα 32A, Ισχύς 7kW.
- Διάρκεια φόρτισης 2 - 4 ώρες με τριφασική παροχή:
Τάση 400V, Ρεύμα 16A, Ισχύς 11kW.
- Διάρκεια φόρτισης 1 - 2 ώρες με τριφασική παροχή:
Τάση 400V, Ρεύμα 32A, Ισχύς 22kW.

- Διάρκεια φόρτισης 20 - 30 λεπτά ώρας με τριφασική παροχή:
Τάση 400V, Ρεύμα 63A, Ισχύς 43kW.

Έχει αναπτυχθεί μία εναλλακτική μέθοδος φόρτισης με χρήση συνεχούς ρεύματος η οποία είναι ένα σύστημα ταχείας φόρτισης με την ονομασία CHAdeMO (CHArge de MOve). Οι σχετικές συσκευές δεν αποτελούν απλά τερματικά ηλεκτρικής παροχής στα οποία συνδέεται η υπάρχουσα επί του οχήματος συσκευή φόρτισης. Αντίθετα, είναι πλήρεις και αυτόνομες, εκτός των ηλεκτρικών οχημάτων, συσκευές φόρτισης μεγάλης ισχύος οι οποίες παρέχουν συνεχές ρεύμα υψηλής έντασης απευθείας στο συσσωρευτή τους παρακάμπτοντας την υπάρχουσα συσκευή φόρτισης. Είναι αυτονόητο ότι τα για να χρησιμοποιηθεί αυτή τη διαδικασία φόρτισης, τα ηλεκτρικά οχήματα θα πρέπει να διαθέτουν μία κατάλληλη ηλεκτρική σύνδεση με την αναγκαία υποδοχή και το κατάλληλο ηλεκτρικό κύκλωμα. Η σχεδίαση ενός φορτιστή CHAdeMO εμπεριέχει τη χρήση ενός ελεγκτή ο οποίος λαμβάνει εντολές από το ηλεκτρικό όχημα μέσω διαύλου CAN (CAN bus) με συγκεκριμένο πρωτόκολλο επικοινωνίας και ο φορτιστής ρυθμίζει το ρεύμα φόρτισης ώστε να ανταποκρίνεται στην τιμή αναφοράς από το ηλεκτρικό όχημα. Με το μηχανισμό αυτό επιτυγχάνεται ταχεία και βέλτιστη διαδικασία φόρτισης σε συνάρτηση με την κατάσταση λειτουργίας του συσσωρευτή και το περιβάλλον χρήσης του ενώ προλαμβάνονται ενδεχόμενες ζημιές στο συσσωρευτή από υπερθέρμανση ή άλλα αίτια. Το σύστημα CHAdeMO είναι αρκετά διαδεδομένο και έχει προταθεί ως διεθνές βιομηχανικό πρότυπο ενώ η διαδικασία φόρτισης με χρήση συνεχούς ρεύματος αποτελεί αντικείμενο προς προτυποποίηση από διεθνείς οργανισμούς (π.χ. πρότυπο IEC 61296-3).

Οι σταθμοί φόρτισης με φορτιστές τύπου CHAdeMO συνήθως εγκαθίστανται κατά μήκος οδικών αξόνων ή σε άλλα σημεία στα οποία η ανάγκη φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να ικανοποιηθεί στο συντομότερο χρονικό διάστημα (συνήθως σε 20 έως 30 λεπτά). Κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων της Ιαπωνίας έχουν ήδη ιδρύσει μία ανοικτή σύμπραξη ενδιαφερομένων εταιρειών και αρκετά Ιαπωνικά μοντέλα οχημάτων είναι κατασκευασμένα ώστε να χρησιμοποιούν αυτό το σύστημα ταχείας φόρτισης. Τα ηλεκτρικά οχήματα των Ευρωπαίων κατασκευαστών χρησιμοποιούν έως τώρα τη σχετικά ταχεία φόρτιση με παροχή εναλλασσομένου ρεύματος με ισχύ 21 kW, όπως αναφέρεται παραπάνω, η οποία συνδέεται με την υπάρχουσα συσκευή φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά δεν αποκλείεται μελλοντικά να χρησιμοποιήσουν την απευθείας φόρτιση με συνεχές ρεύμα. Ένα τέτοιο σημάδι είναι η αποδοχή του προτύπου IEC 62196 - 3 (Combo-System) το οποίο προβλέπει επαφές στις υποδοχές και τους ακροσυνδέσμους που είναι κατάλληλες για φόρτιση με συνεχές ρεύμα υψηλής έντασης.

Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζεται μία μικτή συσκευή ταχείας φόρτισης η οποία χρησιμοποιεί το σύστημα CHAdeMO με ισχύ 45 kW – 65 kW και, εναλλακτικά, τη τριφασική παροχή εναλλασσομένου ρεύματος με ισχύ 21 kW. Με τον τρόπο αυτό, τα Ευρωπαϊκά Η/Ο που δεν διαθέτουν υποδοχή του συστήματος CHAdeMO μπορούν να συνδέονται για τη διαδικασία φόρτισής τους. Αυτές οι συσκευές έχουν τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά [5.9]:

- *Τύποι και υποδοχές ακροσυνδέσεων:* Υπάρχει προσαρτημένο καλώδιο φόρτισης με ακροσύνδεσμο τύπου CHAdeMO για την ταχεία φόρτιση με συνεχές ρεύμα, όσων Η/Ο διαθέτουν την αντίστοιχη υποδοχή, το αντίστοιχο κύκλωμα και το σχετικό πρωτόκολλο επικοινωνίας για τον συνεχή έλεγχο και την αυτόματη ρύθμιση της φόρτισης. Επιπρόσθετα, υπάρχουν δύο υποδοχές (τύπου IEC 62196 - 2) για τη τριφασική σύνδεση εναλλασσομένου ρεύματος με ισχύ 21 kW για κάθε μία.
- *Αριθμός αγωγών ανά υποδοχή (τύπου IEC 62196 - 2):* Πέντε αγωγοί ισχύος και δύο αγωγοί δεδομένων.
- *Πρόσβαση:* Με προπληρωμένη κάρτα ή οποιοδήποτε άλλο σύστημα ελέγχου της πρόσβασης και αυτόματης χρέωσης.



Εικόνα 5.1: Μικτή συσκευή ταχείας φόρτισης με εναλλασσόμενο και συνεχές ρεύμα [5.9]

Επίσης, σημειώνεται ότι τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη σταθμών φόρτισης που εφαρμόζουν μία διαφορετική διαδικασία φόρτισης με συνεχές ρεύμα η οποία επιτρέπει τη δυνατότητα άμεσης έγχυσης ηλεκτρικής ενέργειας με σημαντική τιμή ισχύος από εξωτερικό σύστημα συσσωρευτών που φορτίζονται με ξεχωριστό τρόπο. Αυτή η νέα διαδικασία φόρτισης έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα [5.9]:

- Δυνατότητα αυτόνομης τροφοδότησης που σημαίνει ότι δεν χρειάζονται υποδομές εναλλασσομένου ρεύματος με παροχές μεγάλων τιμών ηλεκτρικής ισχύος.
- Δυνατότητα χρήσης φωτοβολταϊκών συστημάτων για τη φόρτιση του εξωτερικού συστήματος συσσωρευτών έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης αυτονομία του σχετικού σταθμού φόρτισης όσον αφορά την τοποθέτηση του.

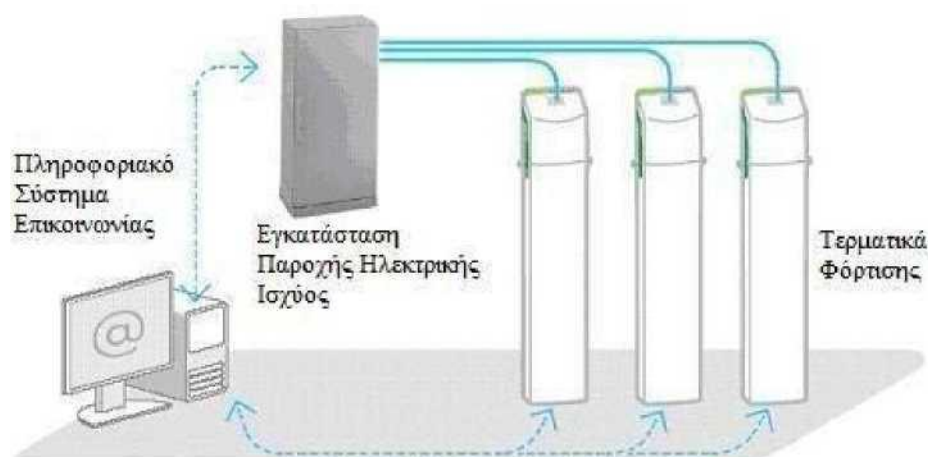
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένα, η διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να υλοποιηθεί με τους ενσωματωμένους φορτιστές τους. Στα πρώτα χρόνια χρησιμοποίησης των ηλεκτρικών οχημάτων, αναμένεται ότι η διαδικασία φόρτισής τους θα πραγματοποιείται από ιδιωτικούς σταθμούς φόρτισης

που θα βρίσκονται στις οικίες των κατόχων τους κατά τη διάρκεια της νύκτας ή στους χώρους εργασίας τους κατά τη διάρκεια της ημερήσιας απασχόλησής τους.

Επομένως, οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις αυτών των χώρων θα πρέπει να βελτιωθούν και να αναβαθμιστούν κατάλληλα έτσι ώστε να επιτρέψουν την ομαλή παροχή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος σε συσχέτιση με τις αντίστοιχες απαιτήσεις ισχύος των υφιστάμενων συσκευών (π.χ. κλιματιστικά, κουζίνα, θερμοσίφωνα, άλλες συσκευές κίνησης, κλπ).

Είναι φανερό ότι δημιουργείται άμεσα η ανάγκη ανάπτυξης δικτύων κοινοχρήστων σταθμών ηλεκτρικής παροχής στους οποίους θα μπορεί να πραγματοποιείται η φόρτιση των συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτά τα δίκτυα είναι απαραίτητα για να αυξηθεί η απόσταση αυτονομίας της χρησιμοποίησης των ηλεκτρικών οχημάτων και σε αρκετές χώρες έχει ξεκινήσει ένας μηχανισμός υλοποίησης τέτοιων δικτύων. Η ανάπτυξη αυτής της υποδομής υποστήριξης των ηλεκτρικών οχημάτων θα πραγματοποιείται σταδιακά και θα επιτείνει τις επιχειρηματικές δράσεις. Αυτοί οι σταθμοί φόρτισης θα μπορούν να ανήκουν σε φορείς με δημόσιο χαρακτήρα (π.χ. ΟΤΑ), σε επιχειρηματικούς φορείς με αντικείμενο εργασίας την εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας ή καυσίμων (πρατήρια) ή σε νέους επιχειρηματικούς φορείς που θα θελήσουν να δραστηριοποιηθούν (π.χ. εμπορικά κέντρα, υπεραγορές, κλπ).

Στην Εικόνα 5.2 φαίνεται παραστατικά ένα μοντέλο σταθμών φόρτισης με τρία τερματικά φόρτισης στα οποία συνδέονται τα καλώδια σύνδεσης με τα ηλεκτρικά οχήματα, η εγκατάσταση παροχής ηλεκτρικής ισχύος και το πληροφοριακό σύστημα επικοινωνίας με απομεμακρυσμένο σύστημα επιτήρησης και διαχείρισης της λειτουργίας τους. Για το σκοπό αυτό ένα σχετικό πρότυπο ευρίσκεται σε κατάσταση συγγραφής για τους τρόπους επικοινωνίας μεταξύ των συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων και του δικτύου ηλεκτρικής παροχής. [5.9]



Εικόνα 5.2: Μοντέλο σταθμών φόρτισης με τρία τερματικά φόρτισης, εγκατάσταση παροχής ηλεκτρικής ισχύος και σύστημα επικοινωνίας [5.9]

Ολοένα και περισσότερες προσπάθειες γίνονται για την αξιοποίηση των ΑΠΕ στους σταθμούς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων έτσι ώστε να επιτευχθεί η μείωση των ρύπων [5.10].



Εικόνα 5.3: Skyrump - ο πρώτος σταθμός φόρτισης αυτοκινήτων με ανεμογεννήτρια [5.9]

Η General Electric και η Urban Green Energy κατασκεύασαν τον πρώτο σταθμό φόρτισης που λειτουργεί με την αιολική ενέργεια στη Βαρκελώνη. Ο σταθμός ονομάζεται Skyrump και χρησιμοποιεί την ανεμογεννήτρια ειδικού τύπου «4K», ύψους 14 μέτρων, η οποία απαιτεί ανέμους ταχύτητας επτά μιλίων ανά ώρα για να αποδώσει. Η εγκατάσταση έγινε στα γραφεία της εταιρείας περιβαλλοντικών υπηρεσιών Cespra, ενώ αναμένονται ακόμα περισσότεροι στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Αυστραλία.

Παράλληλα, αρχιτέκτονες και σχεδιαστές ανά τον κόσμο εργάζονται ήδη για τον σχεδιασμό των πρώτων σταθμών φόρτισης για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, που πρόκειται να κυκλοφορήσουν σύντομα και στην ευρωπαϊκή αγορά. Ανάμεσά τους ανήκουν και προτάσεις οι οποίες εκτός από τη χρήση των ΑΠΕ, χαρακτηρίζονται και από ιδιαίτερα καλαίσθητη μορφή (Εικόνα 5.4).

Μακροχρόνια αναμένεται και η εμφάνιση πιο εξεζητημένων τρόπων φόρτισης με τα ηλεκτρικά οχήματα να προσφέρουν ενέργεια και συγκεκριμένες υπηρεσίες στο δίκτυο (υπηρεσίες V2G: Vehicle to Grid). Η βασική ιδέα του V2G είναι πως εφόσον τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα περιέχουν μπαταρίες που χρειάζονται ενέργεια για να φορτίσουν, αντιστοίχως θα μπορούσαν κάτω από κάποιες προϋποθέσεις να προσφέρουν και ενέργεια στο δίκτυο εξυπηρετώντας έτσι συγκεκριμένες ανάγκες του δικτύου. Αυτή η λειτουργία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για την αγορά ενέργειας, αλλά θα μπορούσε επίσης να επιτρέψει στα οχήματα να λειτουργούν ως μονάδες εκκίνησης μετά την καθολική συσκότηση (black out), σε αποκοπή υψηλής ισχύος (peak power) κτλ. (Kempton and Tomic, 2005 - Larsen, Chandrashekhara, and

Oestergard,2008). Εδώ να σημειώσουμε πως το concept αυτό είναι θεωρητικό και δεν έχει βρει εφαρμογή μέχρι στιγμής σε κανένα σημείο του κόσμου [5.9].



Εικόνα 5.4: Το «Ηλιακό Δάσος» του σχεδιαστή Νέβιλ Μαρς προφυλάσσει τα οχήματα από τον ήλιο ως χώρος στάθμευσης, ενώ τα φορτίζει παράλληλα. [5.9]

5.6 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

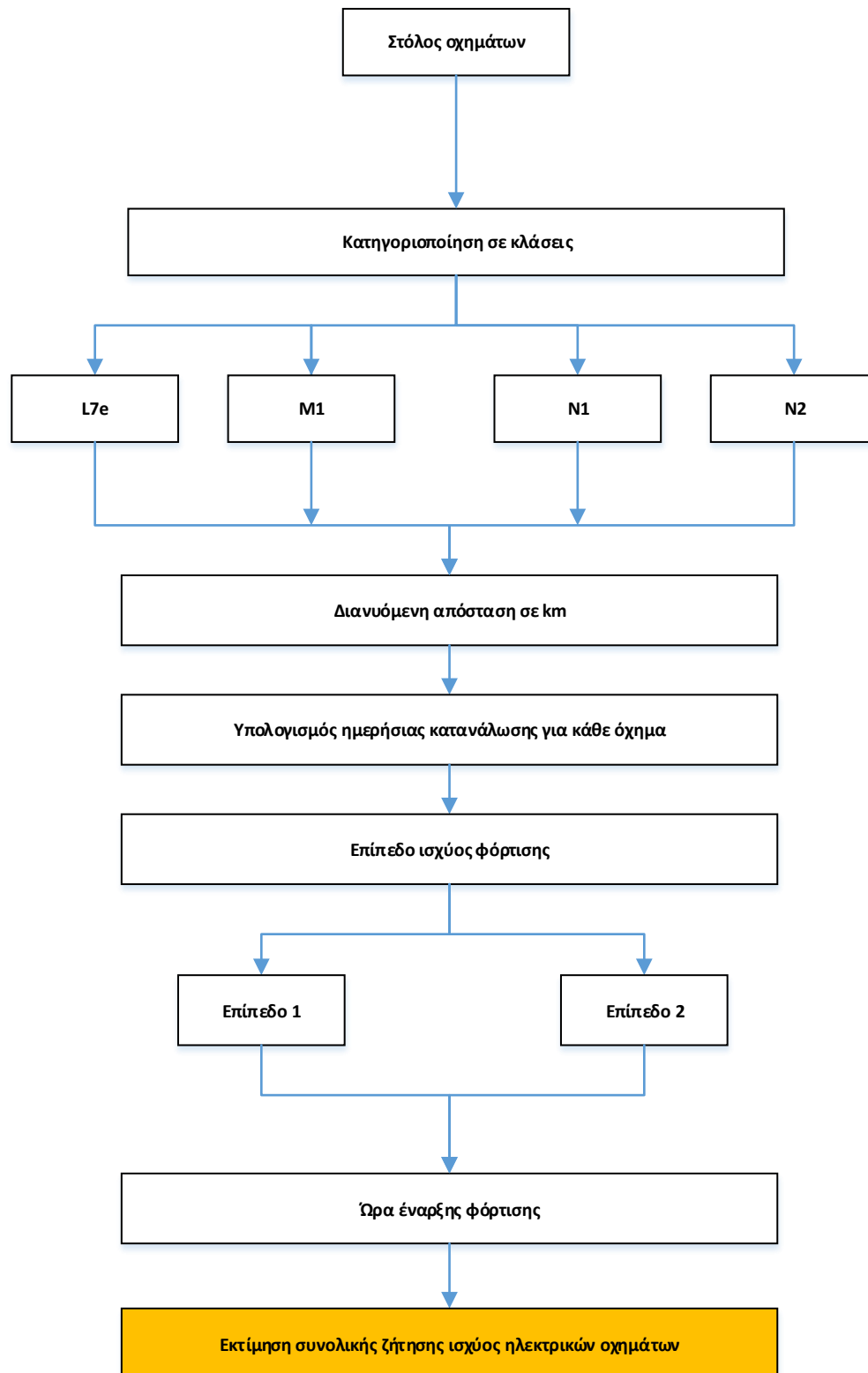
Στην παράγραφο αυτή θα περιγραφεί ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για την εκτίμηση της συνολικής ημερήσιας ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Οι ενεργειακές ανάγκες ενός ηλεκτρικού οχήματος εξαρτώνται από πάρα πολλές παραμέτρους. Όταν μιλάμε γενικά για ενεργειακές ανάγκες εννοούμε την ισχύ που χρειάζεται καθημερινά ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο προκειμένου να καλύψει τις ημερήσιες του ανάγκες και σε διανύομενη απόσταση αλλά και ώστε στο τέλος της ημέρας να επαναφορτίσει τον συσσωρευτή του, ώστε να είναι έτοιμος να χρησιμοποιηθεί την επόμενη. Οι ενεργειακές ανάγκες χρειάζονται μια εκτεταμένη μελέτη, καθώς είναι ένα μέγεθος που μπορεί να εξαρτάται από την κλάση του οχήματος, από την τεχνολογία του οχήματος (χωρητικότητα συσσωρευτή και κατανάλωση οχήματος) καθώς και από τις ημερήσιες διαδρομές που κάνει κάθε οδηγός.

Όσον αφορά τώρα το τελικό φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων που θέλει να εξυπηρετηθεί από το δίκτυο, αυτό εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων που κυκλοφορούν, από το επίπεδο φόρτισης που θα επιλέξει για το όχημα του ο κάθε οδηγός αλλά και σε βαθύτερη ανάλυση από την στρατηγική φόρτισης που θα επιλέξει να πραγματοποιήσει ο κάθε οδηγός (ελεγχόμενη φόρτιση, η οποία γίνεται

σε συγκεκριμένη ώρα μέσα στη μέρα, ή μη ελεγχόμενη φόρτιση, στην οποία η φόρτιση ξεκινά αμέσως μετά τη σύνδεση του αυτοκινήτου στο δίκτυο) [5.11].

Ο αλγόριθμος που θα εφαρμόσουμε σε αυτή τη διπλωματική θα είναι με μη ελεγχόμενη φόρτιση και φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα μπλοκ αλγορίθμου εκτίμησης της συνολικής ζήτησης ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων [5.11]

Αρχικά καλούμαστε να επιλέξουμε τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων που θα φορτίζονται στο δίκτυο με βάση τη διείσδυση που θέλουμε να επιτύχουμε. Στη συνέχεια αποφασίζουμε τον τύπο των ηλεκτρικών οχημάτων που θα χρησιμοποιήσουμε και τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από αυτούς. Οι τύποι αυτοί είναι τέσσερις, ο L7e, ο M1, ο N1 και ο N2 και έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 5.2.

Έπειτα, πρέπει να οριστεί η ημερήσια διανυόμενη απόσταση των ηλεκτρικών οχημάτων σε km. Έχει θεωρηθεί ότι η απόσταση αυτή ακολουθεί μια κανονική κατανομή με συγκεκριμένη μέση τιμή και τυπική απόκλιση. Ακολουθεί ο υπολογισμός της ημερήσιας κατανάλωσης για κάθε όχημα ο οποίος εξαρτάται από δύο παράγοντες, την ημερήσια διανυόμενη απόσταση και τον τύπο του ηλεκτρικού οχήματος. Στον υπολογισμό της ημερήσιας κατανάλωσης πρέπει να συμπεριλάβουμε και τις απώλειες φόρτισης, λόγω της μετατροπής του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές ή το αντίστροφο από τα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιούνται κάθε φορά. Οι απώλειες αυτές έχουν θεωρηθεί ότι είναι το 10% της συνολικής ζήτησης. Εμείς πρέπει να ορίσουμε την κατανάλωση ενέργειας ανά km για κάθε τύπο ηλεκτρικού οχήματος [5.11].

Τα επίπεδα φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι δύο. Τα επίπεδα αυτά ακολουθούν τα πρότυπα του γερμανικού βύσματος Walther για μονοφασική φόρτιση και φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

		Charging Voltage	
		Single-Phase (230 V)	
Charging Current	16 A	3,7 kW	
	32 A	7,4 kW	

Πίνακας 5.1 Επίπεδα ισχύος φόρτισης [5.11]

Τέλος, πρέπει να ορίσουμε την ώρα έναρξης της φόρτισης. Θεωρούμε ότι και αυτό ο παράγοντας ακολουθεί την κανονική κατανομή οπότε αρκεί να ορίσουμε μόνο τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση.

Οπότε τώρα, γνωρίζοντας τον συνολικό αριθμό των οχημάτων, τον αριθμό των οχημάτων που ανήκουν στην κάθε κατηγορία, καθώς και την ώρα σύνδεσης και αποσύνδεσης των οχημάτων, μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική καμπύλη ζήτησης ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων [5.11]. Ο αλγόριθμος αυτός δεν κατανέμει τα οχήματα στο δίκτυο. Η κατανομή αυτή γίνεται αναλογικά πρώτα ανά φάση και στη συνέχεια ανά ζυγό. Ο αλγόριθμος αυτός θα χρησιμοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο που θα μελετήσουμε την επίδραση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στα ακτινικά δίκτυα διανομής και θα εκτελεστεί μέσω λογισμικού που έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Matlab.

5.7 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ SMART CHARGING

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, τα ακτινικά δίκτυα διανομής παρουσιάζουν ασυμμετρίες στις φάσεις των ζυγών. Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο μπορεί να επιδράσει σημαντικά στις ασυμμετρίες αυτές τις ώρες αιχμής, προκαλώντας την επιδείνωσή τους. Στη παράγραφο αυτή θα μελετήσουμε ένα διαφορετικό τρόπο φόρτισης, ελεγχόμενο αυτή τη φορά, που σκοπό έχει να αντιμετωπίσει την επιδείνωση αυτή.

Ο τρόπος αυτός τον οποίο ονομάζουμε Smart Charging (SCh για συντομία) βασίζεται στην εξής ιδέα. Τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν ήδη μοιραστεί αναλογικά στο δίκτυο ανά φάση και ανά ζυγό και δε μπορώ να το αλλάξω αυτό. Αυτό όμως που μπορούμε να αλλάξουμε είναι η στιγμή που θα γίνει η φόρτιση, δηλαδή να μετατοπίσουμε χρονικά τις καμπύλες των ηλεκτρικών οχημάτων για κάθε φάση και κάθε ζυγό. Να επιτύχουμε δηλαδή να γίνεται η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων όταν εμείς θέλουμε και όχι ταυτόχρονα όταν συνδεθούν τα ηλεκτρικά οχήματα τις ώρες αιχμής.

Η χρονική αυτή μετατόπιση έγινε μέσω μιας αντικειμενικής συνάρτησης την οποία θέλαμε να ελαχιστοποιήσουμε. Η συνάρτηση αυτή έχει ως δεδομένα τις ζητήσεις ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων και των αρχικών φορτίων. Τα αρχικά φορτία είναι σταθερά και δεν αλλάζουν ενώ οι ζητήσεις ισχύος EV πρέπει να ακολουθούν κάποιους περιορισμούς όπως η συνολική ζήτηση ισχύος να είναι ίδια με πριν (αφού κάνουμε χρονική μετατόπιση) καθώς και άλλους που θα αναφέρουμε παρακάτω. Η αντικειμενική συνάρτηση που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε είναι η:

$$\min_X f = \sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^N \sum_{j=A,B,C} \left(P_i^j(h) - \bar{P}_i(h) \right)^2 \quad (5.1)$$

$$\text{Όπου } P_i^j(h) = P_{grid_i}^j(h) + X_i^j(h)$$

Όπου $P_i^j(h)$ είναι η συνολική ζήτηση ισχύος(αρχικά φορτία(σταθερή) + $P_{grid_i}^j(h)$ + EV(μεταβλητή) $X_i^j(h)$) την h ώρα στον i ζυγό στην j φάση ενώ $\bar{P}_i(h)$ είναι η μέση τιμή των συνολικών ζητήσεων ισχύος (αρχικά φορτία(σταθερή) + EV(μεταβλητή)) των τριών φάσεων για την h ώρα στον i ζυγό, $P_i^{EV,j}$ είναι η συνολική ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων στον ζυγό i, στη φάση j όπως προέκυψε από τη εκτίμηση ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων στο κεφάλαιο 5. Επιλέγοντας αυτή την αντικειμενική συνάρτηση θα καταφέρουμε να επιτύχουμε τη μικρότερη απόκλιση της ζήτησης ισχύος για κάθε ζυγό κάθε ώρα και κάθε φάση από τη μέση τιμή των ζητήσεων ισχύος των τριών φάσεων για κάθε ζυγό και κάθε ώρα. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτή η συνάρτηση είναι πολύ απλός. Το δίκτυο μας είναι ασύμμετρο γιατί αποτελείται από φορτία που απορροφούν διαφορετική ισχύ σε κάθε ζυγό σε κάθε φάση. Επομένως με τη παραπάνω συνάρτηση θα επιτύχουμε να περιορίσουμε την ασυμμετρία που εισάγεται από την μη ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Εκτός όμως από την συνάρτηση που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε χρειαζόμαστε και κάποιους περιορισμούς:

- Το άθροισμα των συνολικών ζητήσεων ισχύος όλων των ωρών στον i ζυγό στην j φάση πρέπει να είναι το ίδιο με το αντίστοιχο άθροισμα χωρίς την βελτιστοποίηση ($P_i^{EV,j}$). Αυτό εξασφαλίζει ότι θα γίνει χρονική μετατόπιση.

$$h_j = \sum_{h=1}^T X_i^j(h) = P_i^{EV,j} \quad \forall j = A, B, C, i=1, \dots, N_{bus} \quad (5.2)$$

- Η ζήτηση των EV είναι μηδενική όταν τα αυτοκίνητα δεν είναι συνδεδεμένα (Plug=0).

$$X_i^j(h) (1 - Plug) = 0 \quad (5.3)$$

- Η ισχύς φόρτισης κάθε ηλεκτρικού οχήματος δεν μπορεί να ξεπερνά την εγκατεστημένη ισχύ του σταθμού (P_{mode})

$$X_i^j(h) \leq P_{mode} \quad (5.4)$$

Κεφάλαιο 6

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα ηλεκτρικό όχημα (EV) χρησιμοποιεί ένα ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες ή κινητήρες έλξης (traction motors) για προώθηση. Μπορεί να τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια μέσω συστήματος από πηγές εξωτερικές του οχήματος ή εσωτερικές με μπαταρίες ή γεννήτρια που μετατρέπει το καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια [6.1]. Τα ηλεκτρικά οχήματα προσφέρουν μειωμένες σχετικές με τη μετακίνηση εκπομπές, μειώνουν το ενεργειακό κόστος της οδήγησης και σε μερικές περιπτώσεις εξαλείφουν τη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Η συνολική ζήτηση ισχύος αναμένεται να αυξηθεί καθώς ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων πληθαίνει [6.2].

Αν ένας μεγάλος αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων συνδέονταν στο δίκτυο για φόρτιση, θα αυξανόταν η ζήτηση ισχύος στην παραγωγή και τη μεταφορά, καθώς και οι απώλειες ισχύος. Παρ' όλα αυτά, η συνολική κατανάλωση ενέργειας και οι απώλειες θα μειώνονταν χάρη στην υψηλότερη απόδοση των ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα κύκλο φόρτισης. Στις ΗΠΑ έχει εκτιμηθεί ότι υπάρχουν ήδη σχεδόν επαρκείς εγκαταστάσεις παραγωγής και υποδομές μεταφοράς για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, υποθέτοντας ότι το μεγαλύτερο μέρος της φόρτισης θα πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της νύχτας, χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [6.3].

Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται από συμβατικές παροχές ισχύος ή από εξειδικευμένους σταθμούς φόρτισης, μια διαδικασία η οποία συνήθως διαρκεί ώρες, αλλά μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας και συχνά είναι επαρκής για φυσιολογική καθημερινή χρήση.

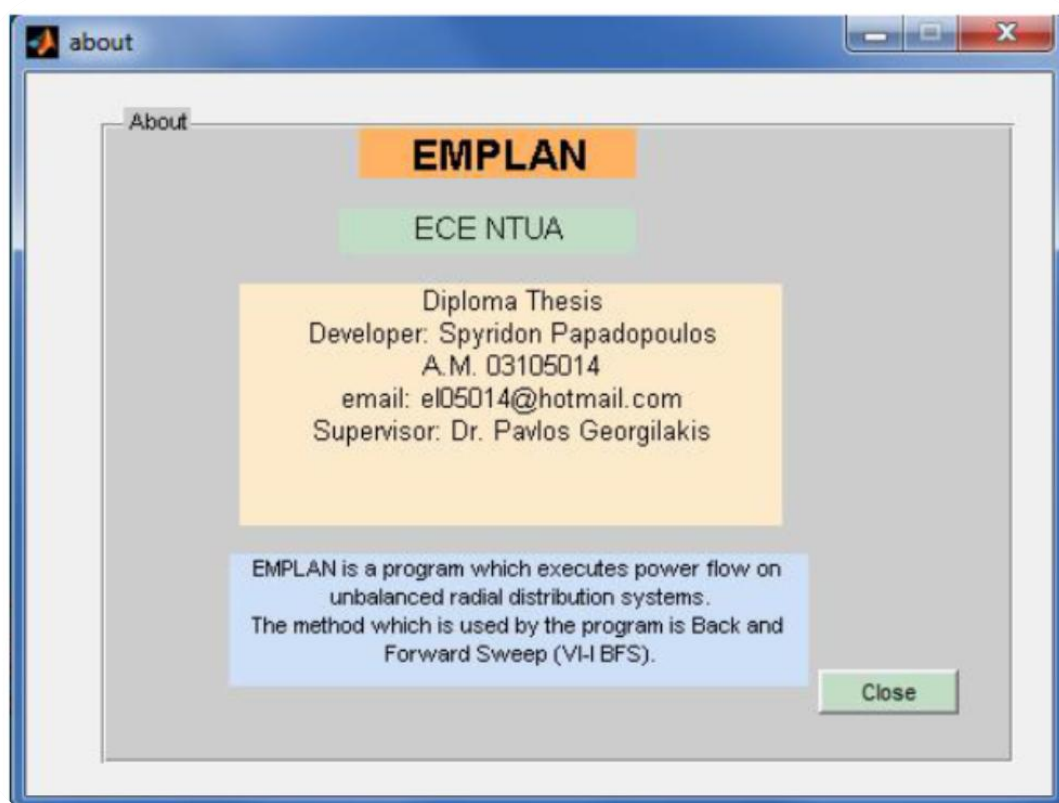
Στο κεφάλαιο αυτό, το οποίο αποτελεί το κύριο τμήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα μελετηθεί η επίδραση της ασύμμετρης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στα ακτινικά δίκτυα διανομής επί 24ώρου βάσης. Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε τρόπους αντιμετώπισης της επίδρασης αυτής προσπαθώντας να περιορίσουμε τις ασυμμετρίες που προκαλεί στο ήδη ασύμμετρο ακτινικό δίκτυο διανομής.

6.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

Βασικό εργαλείο για τη μελέτη θα αποτελέσει το λογισμικό “EMPLAN” που αναπτύχθηκε από το Διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό

Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π Σπυρίδωνα Χ. Παπαδόπουλο για τη διπλωματική του εργασία «Ανάλυση ροής φορτίου σε ασύμμετρα ακτινικά δίκτυα διανομής» με επιβλέποντα τον κ. Παύλο Σ. Γεωργιλάκη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Το λογισμικό αυτό έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον MATLAB και εφαρμόζει στιγμιαία ανάλυση ροής ισχύος σε ασύμμετρα ακτινικά δίκτυα διανομής χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο BFS (“Backward and Forward Sweep”) που αναλύσαμε στο Κεφάλαιο 4. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας το λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε ως “black box” χωρίς να γίνει κάποια αλλαγή σε αυτό. Καθώς το λογισμικό αυτό εκτελεί στιγμιαία ανάλυση ροής ισχύος και εμείς θέλαμε να δούμε την επίδραση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων επί 24ώρου βάσης, έγινε εκτέλεση για κάθε ώρα ξεχωριστά. Στο σχήμα 6.1 φαίνεται το About Box του εν λόγω λογισμικού.



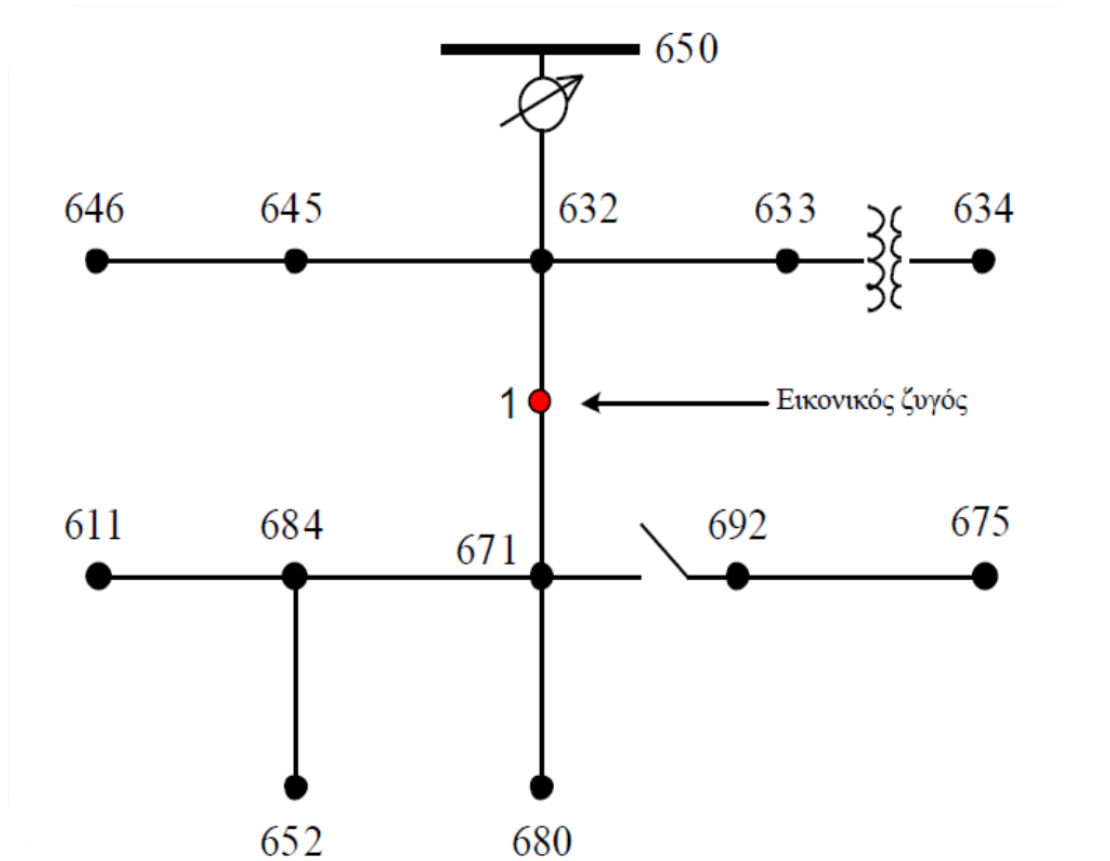
Σχήμα 6.1: About Box λογισμικού EMPLAN [6.4]

6.3 ΔΙΚΤΥΟ

Το δίκτυο που επιλέχθηκε σε αυτή τη διπλωματική είναι το δίκτυο 13 ζυγών της IEEE [6.5] με μερικές τροποποιήσεις. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν μόνο φορτία

σταθερής ισχύος γιατί και τα ηλεκτρικά οχήματα ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία φορτίων. Με αυτή την επιλογή θα μπορούμε να βγάλουμε καλύτερα συμπεράσματα για την επίδραση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο. Ακόμη, προστέθηκε ένας εικονικός ζυγός (ζυγός 1) για τη μοντελοποίηση του ενός διανεμημένου φορτίου σε δύο συγκεντρωμένα όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 3.2. Τέλος, προστέθηκαν μερικά ακόμη φορτία σε φάσεις που προηγουμένως δεν υπήρχε κάποιο. Για να γίνει αυτό έπρεπε να αλλάξουν και ορισμένες γραμμές από το αρχικό δίκτυο. Στο σχήμα 6.2 φαίνεται το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου.

S



Σχήμα 6.2: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 13 ζυγών IEEE

Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται τα δεδομένα του παραπάνω δικτύου

Πίνακας 6.1: Δεδομένα μετασχηματιστή δικτύου 13 ζυγών IEEE

Τοποθεσία Μ/Σ	Συνδεσμολογία	kVA	kVLL-high	kVLL-low	R%	X%
Μεταξύ ζυγών 633 και 634	Γειωμένου Αστήρα-Γειωμένου Αστήρα	500	4.16	0.48	1.1	2

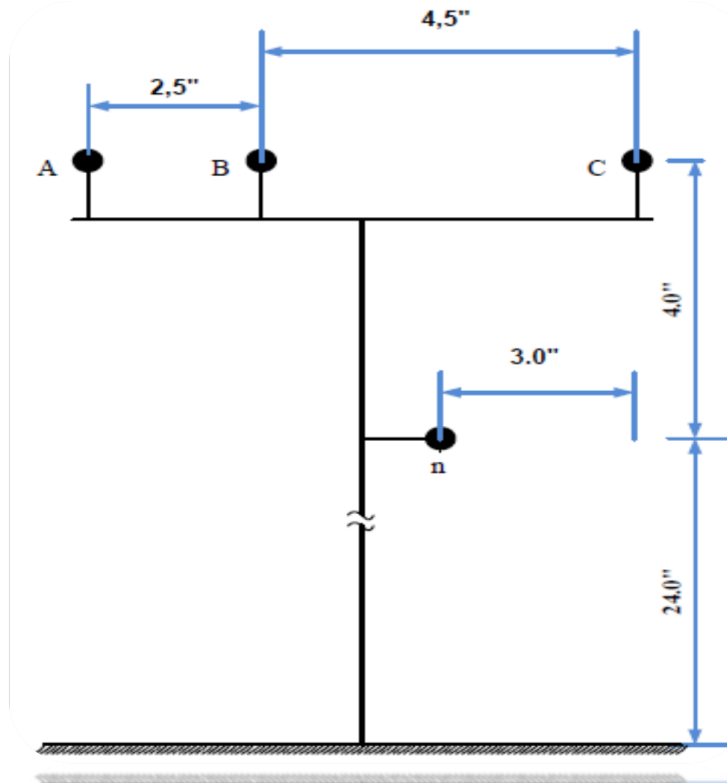
Πίνακας 6.2: Δεδομένα των τύπων εναέριων γραμμών δικτύου 13 ζυγών IEEE

Αναγνωριστικό γραμμής	Τύπος αγωγού φάσης	Τύπος αγωγού ουδετέρου	Spacing id	Διαδοχή φάσεων
601	556,500 26/7 ACSR	4/0 6/1 ACSR	500	B A C N
602	4/0 6/1 ACSR	4/0 6/1 ACSR	500	C A B N
603	1/0 ACSR	1/0 ACSR	505	C B N
604	1/0 ACSR	1/0 ACSR	505	A C N
605	1/0 ACSR	1/0 ACSR	510	CN

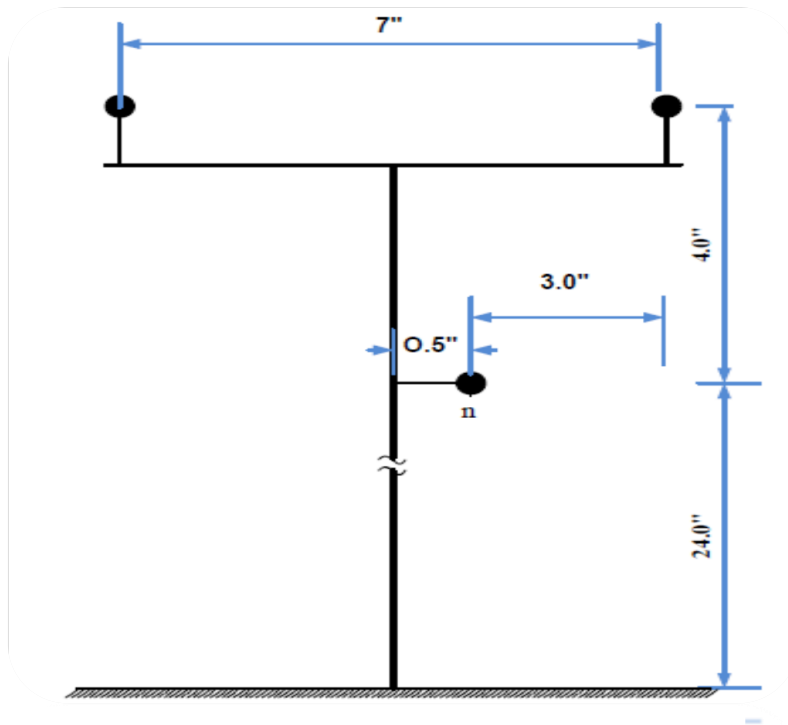
Πίνακας 6.3: Δεδομένα των τύπων υπόγειων γραμμών δικτύου 13 ζυγών IEEE

Αναγνωριστικό γραμμής	Τύπος αγωγού φάσης	Τύπος αγωγού ουδετέρου	Spacing id	Διαδοχή φάσεων
606	250,000 AA, CN	-	515	A B C
607	1/0 AA, TS	1/0 Cu	520	A N

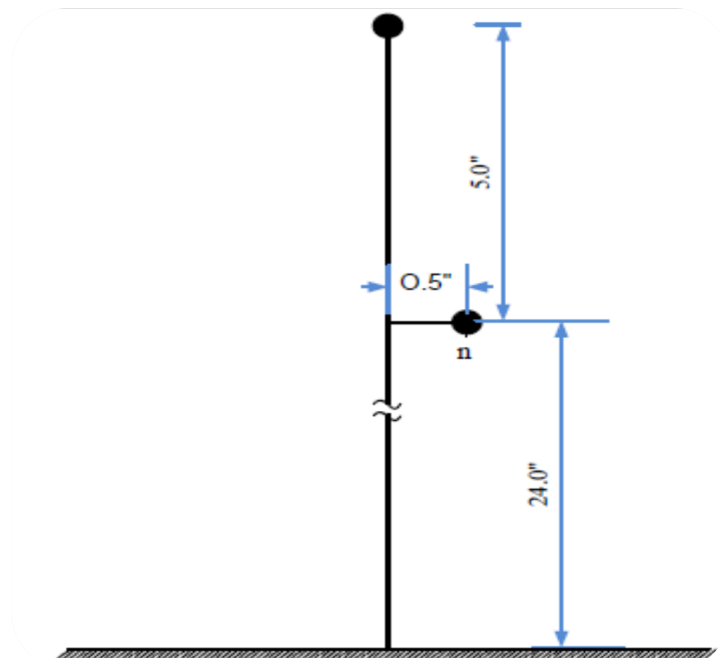
Από τη βιβλιογραφία [3.2] χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα μπορούμε να υπολογίσουμε τις παραμέτρους των γραμμών διανομής. Το μόνο που δε γνωρίζουμε είναι οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών που θα φανούν στα παρακάτω σχήματα.



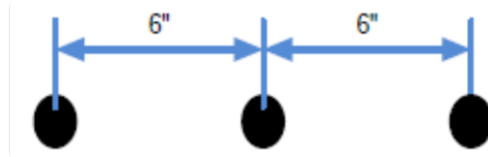
Σχήμα 6.3: Spacing id 500 [6.4]



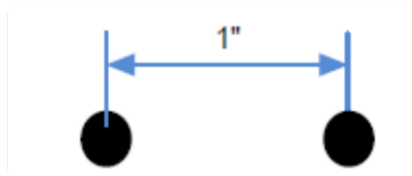
Σχήμα 6.4: Spacing id 505 [6.4]



Σχήμα 6.5: Spacing id 510 [6.4]



Σχήμα 6.6: Spacing id 515 [6.4]



Σχήμα 6.7: Spacing id 520 [6.4]

Πίνακας 6.4: Δεδομένα γραμμών δικτύου 13 ζυγών IEEE

Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Μήκος γραμμής (feet)	Αναγνωριστικό γραμμής
632	645	500	602
632	633	500	602
645	646	300	602
650	632	2000	601
684	652	800	604
632	1	500	601
1	671	1500	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
684	611	300	605
692	675	500	606

Πίνακας 6.5 Δεδομένα ρυθμιστή δικτύου 13 ζυγών IEEE

Ρυθμιστής 1	
Τοποθεσία :	650 – 632
Εγκατεστημένος στις φάσεις:	A - B –C
Τύπος σύνδεσης:	Τριφασικός γειωμένου αστέρα
Φάσεις που επιτηρεί για τη ρύθμιση:	A-B-C
Εύρος ζώνης ρύθμισης αντισταθμιστή:	2.0 Volts
N_t :	20
Primary CT Rating ($C T_p$):	700

Ρυθμίσεις αντισταθμιστή:	Φάση Α	Φάση Β	Φάση C
R' - ισοδύναμη (V):	3	3	3
X' - ισοδύναμη (V):	9	9	9
Επίπεδο τάσης αντισταθμιστή (V):	122	122	122

Πίνακας 6.6: Δεδομένα αρχικών φορτίων δικτύου 13 ζυγών IEEE

Τοποθεσία φορτίου	Συνδεσμολογία φορτίου	Τύπος φορτίου	Μέγιστη μιγαδική ισχύς S (kW + j*kVAr)		
			Φάση Α	Φάση Β	Φάση C
Ζυγός 634	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	160+j110	120+j90	90+j56
Ζυγός 645	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0	170+j125	140+j76
Ζυγός 646	Αγείωτου τριγώνου	Σταθερής ισχύος	200+j119	230+j132	0
Ζυγός 652	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	128+j86	0	200+j97
Ζυγός 671	Αγείωτου τριγώνου	Σταθερής ισχύος	385+j220	400+j279	280+j181
Ζυγός 675	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	485+j190	68+j60	290+j212
Ζυγός 692	Αγείωτου τριγώνου	Σταθερής ισχύος	0	0	180+j160
Ζυγός 611	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	0	0	190+j90
Μεταξύ 632 και 671	Γειωμένου αστέρα	Σταθερής ισχύος	17+j10	66+j38	117+j68

6.4 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΡΧΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Όπως είπαμε και προηγουμένως η μελέτη σε αυτή τη διπλωματική θα γίνει επί 24ώρου βάσης. Επομένως τα παραπάνω δεδομένα για τα φορτία στο Πίνακα 6.6 δεν επαρκούν. Υπάρχει ανάγκη για 24ωρες καμπύλες ζήτησης ισχύος τόσο για τα φορτία όσο και για τα ηλεκτρικά οχήματα.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δίκτυα διανομής Χαμηλής Τάσης που συνδυάστηκαν κατάλληλα για να προκύψουν οι επιθυμητές μέγιστες ζητήσεις φορτίων. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν μέρος του project “Low Voltage Network Solutions” που πραγματοποιήθηκε το 2014 από το πανεπιστήμιο του Manchester [6.6].

Η ζήτηση αέργου ισχύος προέκυψε από τους συντελεστές ισχύος του Πίνακα 6.6 όπου φαίνονται οι μέγιστες ζητήσεις ενεργού και αέργου ισχύος.

Τα δεδομένα αυτά ήταν 24ωρες καμπύλες ζήτησης ισχύος ανά 5 λεπτά που μετατράπηκαν, χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές, σε 24ωρες καμπύλες ζήτησης ισχύος ανά 1 ώρα. Τα δεδομένα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 6.7: Δεδομένα αρχικών φορτίων φάσης Α στο 24ωρο σε kW

Φάση Α									
ώρα	bus 634	bus 645	bus 646	bus 652	bus 671	bus 675	bus 692	bus 611	between buses 632-671
1	35		13	26	19	53			2
2	21		18	24	29	61			4
3	19		15	13	23	64			2
4	23		18	13	24	74			2
5	23		21	15	22	99			2
6	25		20	11	41	88			3
7	21		73	14	196	76			6
8	80		128	33	341	111			15
9	135		79	83	171	290			12
10	96		87	48	205	115			3
11	121		94	19	266	352			3
12	80		154	22	120	207			17
13	41		101	31	122	115			5
14	67		74	30	129	139			14
15	38		106	52	189	90			12
16	41		87	48	130	150			6
17	80		110	64	164	244			11
18	118		86	60	193	341			12
19	68		314	102	98	349			9
20	157		200	32	258	248			9
21	145		152	56	182	239			8
22	138		146	128	385	309			16
23	160		124	81	247	485			16
24	77		96	41	194	310			6

Πίνακας 6.8: Δεδομένα αρχικών φορτίων φάσης Β στο 24ωρο σε kW

Φάση Β									
ώρα	bus 634	bus 645	bus 646	bus 652	bus 671	bus 675	bus 692	bus 611	between buses 632-671
1	34	29	35		30	3			5
2	47	24	22		43	5			6
3	47	20	29		42	5			6
4	12	21	23		43	5			5
5	18	19	24		47	4			6

6	13	24	25		39	6			5
7	31	49	34		159	20			7
8	76	70	62		139	22			19
9	65	118	38		249	14			16
10	28	58	143		327	8			14
11	21	98	72		204	55			6
12	23	38	23		313	33			18
13	53	32	18		313	46			21
14	18	70	25		58	24			12
15	29	63	33		39	11			13
16	27	118	80		57	8			33
17	61	170	142		168	37			66
18	83	149	41		400	26			40
19	61	130	118		187	42			46
20	46	134	230		179	34			38
21	62	117	104		292	36			30
22	93	162	205		341	68			39
23	120	112	208		162	30			56
24	58	50	83		128	13			49

Πίνακας 6.9: Δεδομένα αρχικών φορτίων φάσης C στο 24ωρο σε kW

Φάση C									
ώρα	bus 634	bus 645	bus 646	bus 652	bus 671	bus 675	bus 692	bus 611	between buses 632-671
1	12	29		47	27	49	28	16	7
2	7	27		98	61	73	33	27	9
3	4	22		30	41	25	21	18	9
4	4	24		36	38	29	33	23	8
5	5	26		33	38	32	56	27	8
6	6	27		52	46	36	51	18	9
7	5	23		45	41	32	34	54	19
8	23	44		82	146	145	164	55	118
9	19	106		83	161	165	157	52	30
10	21	140		104	126	111	146	33	56
11	9	36		48	207	45	105	28	12
12	29	27		46	139	109	60	144	11
13	38	37		41	129	61	70	101	17
14	10	52		91	90	107	110	37	59
15	7	51		109	181	142	119	103	45
16	25	90		66	280	95	180	86	90
17	22	92		105	155	130	118	106	99
18	90	98		70	268	155	108	86	90
19	77	96		88	225	290	167	86	34

20	30	109		123	178	118	136	119	117
21	48	77		112	176	218	80	59	58
22	55	134		200	239	161	145	109	108
23	57	47		196	202	132	85	190	69
24	52	93		183	72	72	53	83	86

6.5 ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ

Όπως αναφέραμε προηγουμένως η μελέτη της επίδρασης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων θα γίνει συγκρίνοντας τις απώλειες ισχύος και την ασυμμετρία των τάσεων. Τα αποτελέσματα για τις απώλειες ισχύος προκύπτουν άμεσα από την ανάλυση ροής ισχύος. Τι γίνεται όμως με την ασυμμετρία των τάσεων; Πώς μπορεί να μετρηθεί έτσι ώστε να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις;

Τη λύση εδώ δίνει η μέθοδος συμμετρικών συνιστωσών που ανέπτυξε ο C.L. Fortescue. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο ένα ασύμμετρο σύστημα n φασιθέτων (phasors) μπορεί να μετασχηματιστεί σε n συστήματα συμμετρικών φασιθέτων. Οι συμμετρικοί αυτοί φασιθέτες καλούνται συμμετρικές συνιστώσες των αρχικών φασιθέτων.

Επομένως ένα σύστημα 3 ασύμμετρων φάσεων σε ένα κόμβο ενός δικτύου διανομής μπορούν να μετασχηματισθούν σε 3 συμμετρικά συστήματα χρησιμοποιώντας τη προηγούμενη μέθοδο. Τα νέα αυτά συστήματα ονομάζονται θετικής ακολουθίας, αρνητικής ακολουθίας και μηδενικής ακολουθίας.

Στο πρώτο συμμετρικό σύστημα, τα μέτρα των τάσεων που προκύπτουν είναι ίσα ενώ οι γωνίες διαφέρουν κατά 120 μοίρες σύμφωνα με τη θετική ακολουθία φάσεων. Στο δεύτερο συμμετρικό σύστημα, τα μέτρα των τάσεων που προκύπτουν είναι ίσα ενώ οι γωνίες διαφέρουν κατά 120 μοίρες σύμφωνα με τη αρνητική ακολουθία φάσεων. Τέλος, στο τρίτο συμμετρικό σύστημα οι τάσεις είναι ίσες τόσο κατά μέτρο όσο και κατά γωνία. Επομένως χρειάζεται να γνωρίζουμε μια μόνο τάση από κάθε σύστημα. Οι τύποι για την εφαρμογή της μεθόδου των συμμετρικών συνιστωσών φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις [6.7]:

$$\tilde{V}_a^{(0)} = \frac{1}{3}(\tilde{V}_a + \tilde{V}_b + \tilde{V}_c) \quad (6.1)$$

$$\tilde{V}_a^{(+)} = \frac{1}{3}(\tilde{V}_a + a * \tilde{V}_b + a^2 * \tilde{V}_c) \quad (6.2)$$

$$\tilde{V}_a^{(-)} = \frac{1}{3}(\tilde{V}_a + a^2 * \tilde{V}_b + a * \tilde{V}_c) \quad (6.3)$$

Όπου $a = 1/\underline{120^\circ}$

Δε χρειάζεται να ασχοληθούμε περισσότερο με τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών. Εμείς χρειαζόμαστε μόνο τις παραπάνω εξισώσεις που υπολογίζουν τις

τάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας. Οι δείκτες ασυμμετρίας που θα χρησιμοποιήσουμε είναι οι ρ και ε [6.8] όπου:

$$\rho = \frac{|\tilde{V}_a^{(-)}|}{|\tilde{V}_a^{(+)}|} \quad (6.4)$$

$$\varepsilon = \frac{|\tilde{V}_a^{(0)}|}{|\tilde{V}_a^{(+)}|} \quad (6.5)$$

Οι δείκτες αυτοί όπως βλέπουμε είναι ποσοστά και παίρνουν τιμές από 0 έως 1. Σε ένα συμμετρικό σύστημα τάσεων οι δείκτες αυτοί παίρνουν τιμή 0 ενώ στη πιο ακραία περίπτωση ασυμμετρίας, όταν δηλαδή έχουμε ύπαρξη μόνο μίας τάσης παίρνουν τιμή 1. Σε περίπτωση ύπαρξης δύο μόνο τάσεων οι δείκτες παίρνουν τιμές κοντά στο 0.5. Στο παρακάτω πίνακα βλέπουμε τους δείκτες αυτούς για τυχαίες τάσεις.

Πίνακας 6.10: Τιμές δεικτών ασυμμετρίας για τυχαίες τάσεις

Va (V)	Va ang (deg)	Vb (V)	Vb ang (deg)	Vc (V)	Vc ang (deg)	ρ	ε
240	0	240	-120	240	120	0,000000	0,000000
200	0	240	-120	240	120	0,058824	0,058824
0	0	0	-120	240	120	1,000000	1,000000
240	0	240	-120	0	120	0,500000	0,500000
240	0	250	-120	230	120	0,024056	0,024056
200	-3	240	-117	250	123	0,079456	0,069200
275	-5	230	-123	245	118	0,063894	0,044905
200	0	220	-118	230	124	0,040985	0,049400

6.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.6.1 Αποτελέσματα χωρίς EV

Στην παράγραφο αυτή θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα για το αρχικό μας δίκτυο όπου ακόμα δεν έχουν προστεθεί τα ηλεκτρικά οχήματα. Θα παραθέσουμε τις τάσεις σε όλους τους κόμβους δύο συγκεκριμένες ώρες μόνο, τη 3^η (ώρα χαμηλής ζήτησης του δικτύου) και τη 19^η (ώρα που όπως θα δούμε αργότερα εμφανίζεται η μέγιστη ζήτηση ισχύος για τα ηλεκτρικά οχήματα). Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι η ώρα αιχμής για την αρχική περίπτωση “χωρίς EV” δεν είναι η 19^η ώρα αλλά η 22^η. Επιλέγουμε να δείξουμε αυτή την ώρα όμως για να μπορέσουμε να μελετήσουμε καλύτερα την επίδραση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η 3^η ώρα αποτελεί όπως θα δούμε στη συνέχεια, την ώρα ελάχιστης ζήτησης και για τις δύο περιπτώσεις. Στη συνέχεια θα παραθέσουμε την ελάχιστη, τη μέγιστη και τη μέση τιμή για όλες τις τιμές που υπολογίσαμε για κάθε κόμβο και για τους δύο δείκτες και για τις απώλειες ισχύος.

Πίνακας 6.11: 3^η ώρα χωρίς EV (χαμηλό φορτίο)

Ζυγός	Va pu	Ang Va (degrees)	Vb pu	Ang Vb (degrees)	Vc pu	Ang Vc (degrees)	ρ	ε
650	1,000151	0,002	1,000042	-120,001	1,000314	120,000	0,000067	0,000091
632	0,995264	-0,237	0,996067	-120,239	0,992063	119,641	0,001535	0,001285
645	0,995305	-0,239	0,995177	-120,255	0,991226	119,622	0,001600	0,001495
646	0,995257	-0,244	0,994968	-120,264	0,991023	119,623	0,001600	0,001502
633	0,994745	-0,227	0,995087	-120,271	0,992148	119,639	0,001375	0,000896
634	0,991899	-0,309	0,987658	-120,464	0,991580	119,621	0,001289	0,001832
1	0,994293	-0,316	0,996320	-120,243	0,990125	119,580	0,001958	0,002124
2	0,991338	-0,555	0,997245	-120,250	0,984515	119,410	0,003302	0,004873
671	0,991337	-0,555	0,997245	-120,250	0,984515	119,410	0,003302	0,004874
684	0,991301	-0,564	0,000000	-120,250	0,983588	119,395	0,499701	0,500322
611	0,000000	-0,564	0,000000	-120,250	0,983234	119,387	1,000000	1,000000
652	0,990955	-0,582	0,000000	-120,250	0,982016	119,374	0,499682	0,500349
680	0,991338	-0,555	0,997245	-120,250	0,984515	119,410	0,003302	0,004874
692	0,991351	-0,556	0,997245	-120,250	0,984517	119,410	0,003299	0,004877
675	0,990327	-0,572	0,997384	-120,264	0,984309	119,422	0,003413	0,004897

Πίνακας 6.12: 19^η ώρα χωρίς EV (υψηλό φορτίο)

Ζυγός	Va pu	Ang Va (degrees)	Vb pu	Ang Vb (degrees)	Vc pu	Ang Vc (degrees)	ρ	ε
650	1,000037	0,002	0,999965	-120,002	1,000220	120,000	0,000057	0,000095
632	0,971324	-2,141	0,985852	-120,583	0,937578	117,764	0,011202	0,022145
645	0,970129	-2,250	0,977924	-120,650	0,934408	117,671	0,009216	0,022084
646	0,968905	-2,348	0,975355	-120,668	0,933379	117,684	0,008158	0,022199
633	0,970242	-2,170	0,984692	-120,598	0,935810	117,732	0,011329	0,022464
634	0,959705	-2,482	0,974921	-120,854	0,924064	117,330	0,012357	0,023495
1	0,965146	-2,625	0,987701	-120,577	0,924583	117,333	0,014878	0,028536
2	0,946982	-4,140	0,99457	-120,513	0,886380	116,033	0,026226	0,048931
671	0,946982	-4,140	0,99457	-120,513	0,886380	116,033	0,026226	0,048931
684	0,945618	-4,192	0	-120,513	0,882523	115,985	0,502232	0,499553
611	0	-4,192	0	-120,513	0,880631	115,941	1,000000	1,000000
652	0,940636	-4,303	0	-120,513	0,877260	115,977	0,503024	0,498798
680	0,946982	-4,140	0,99457	-120,513	0,886380	116,033	0,026226	0,048931

692	0,946987	-4,140	0,994567	-120,513	0,886388	116,033	0,026225	0,048929
675	0,941033	-4,295	0,996088	-120,565	0,881826	116,131	0,027523	0,050832

Πίνακας 6.13: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (χωρίς EV)

ρ χωρίς EV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
650	0,000007	0,000191	0,000097
632	0,001535	0,012019	0,006697
645	0,001600	0,011895	0,006263
646	0,001600	0,011773	0,006026
633	0,001375	0,011778	0,006675
634	0,001259	0,012357	0,006623
1	0,001958	0,014897	0,008561
2	0,003302	0,026226	0,014035
671	0,003302	0,026226	0,014035
684	0,488551	0,520805	0,500301
611	1,000000	1,000000	1,000000
652	0,488786	0,520733	0,500362
680	0,003302	0,026226	0,014035
692	0,003299	0,026225	0,014031
675	0,003413	0,027523	0,014548

Πίνακας 6.14: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ε (χωρίς EV)

ε χωρίς EV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
650	0,000015	0,000358	0,000174
632	0,001285	0,022716	0,012453
645	0,001495	0,022084	0,012584
646	0,001502	0,022199	0,012622
633	0,000896	0,022464	0,012382
634	0,001832	0,024510	0,012224
1	0,002124	0,030302	0,016143
2	0,004873	0,053955	0,027044
671	0,004874	0,053955	0,027044
684	0,479381	0,511967	0,500590
611	1,000000	1,000000	1,000000
652	0,479418	0,511790	0,500701
680	0,004874	0,053955	0,027044
692	0,004877	0,053958	0,027042
675	0,004897	0,054283	0,027424

Ο κόμβος 650 είναι ο άπειρος ζυγός και έχει αρχικοποιηθεί με συμμετρικό σύστημα τάσεων. Οι ελάχιστες αποκλίσεις λόγω ανοχής σφάλματος 0,001 α.μ. οδηγούν σε αμελητέες ασυμμετρίες όπως φαίνεται στο παραπάνω πίνακα.

Στον κόμβο 611 καταφθάνει μία μόνο φάση του δικτύου. Για το λόγο αυτό εμφανίζει τάση μόνο στη φάση C. Ο δείκτης ασυμμετρίας σε περίπτωση παρουσίας μίας μόνο φάσης δίνει πάντα τιμή 1 γιατί εφαρμόζοντας την μέθοδο των συμμετρικών

συνιστώσων προκύπτει ότι τα μέτρα των φάσεων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας είναι ίσα μεταξύ τους.

Τέλος στους κόμβους 684 και 652 καταφθάνουν δύο μόνο φάσεις του δικτύου. Για το λόγο αυτό εμφανίζουν τάσεις μόνο στις φάσεις Α και C. Ο δείκτης ασυμμετρίας στη περίπτωση αυτή δίνει τιμές πολύ κοντά στο 0,5 που μεταβάλλονται ελάχιστα στις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Για τους παραπάνω λόγους, οι κόμβοι 650, 611, 652 και 684 δε θα συμπεριληφθούν στα υπόλοιπα αποτελέσματα μας. Θα παραθέσουμε τις τιμές μόνο για τις περιπτώσεις “χωρίς EV” και “με EV”

Πίνακας 6.15: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (χωρίς EV)

Απώλειες ισχύος χωρίς EV			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	2,41	125,18	40,78
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
Power losses/Total demand	0,005285	0,039359	0,020364

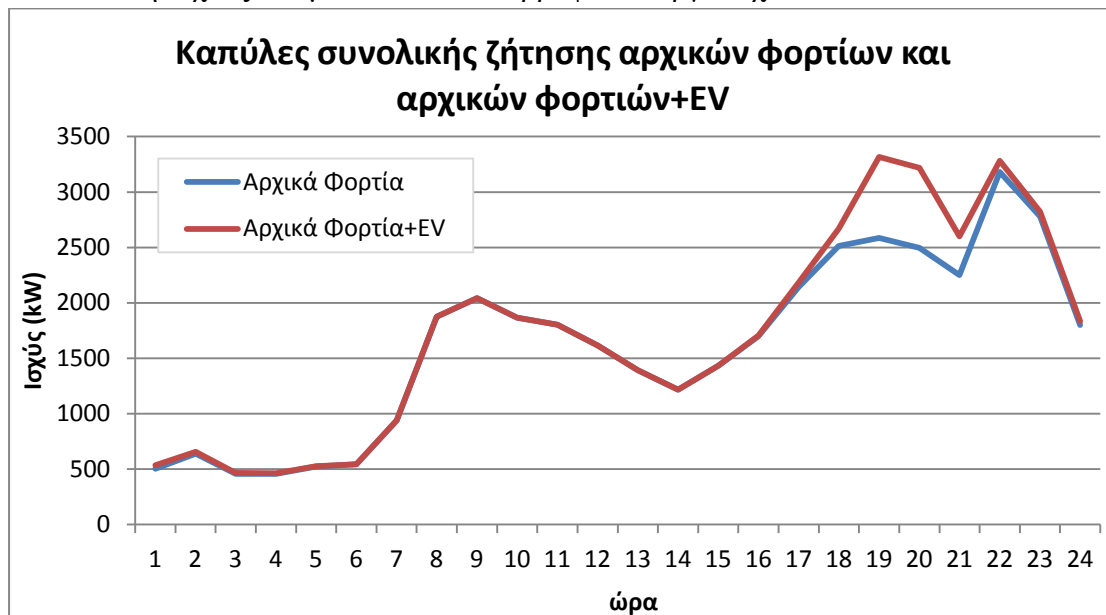
6.6.2 Αποτελέσματα με EV

Στην παράγραφο αυτή θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν προσθέτοντας στο αρχικό μας δίκτυο ηλεκτρικά οχήματα. Η προσθήκη των ηλεκτρικών οχημάτων έγινε με τον εξής τρόπο:

Από την συνολική καμπύλη ζήτησης ισχύος των φορτίων και με χρήση κατάλληλου λογισμικού (σε περιβάλλον Matlab) που εκτέλεσε τον αλγόριθμο εκτίμησης που επεξηγήσαμε στην παράγραφο 5.6 εξαγάγαμε τη συνολική καμπύλη ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα, στον αλγόριθμο εκτίμησης, επιλέξαμε να προσθέσουμε στο δίκτυο 300 ηλεκτρικά οχήματα για να επιτύχουμε την επιθυμητή διείσδυση (περίπου 5 % της αρχικής ζήτησης χωρίς ηλεκτρικά οχήματα). Έπειτα, επιλέξαμε τον αριθμό των οχημάτων για κάθε τύπο. Το 1 % των οχημάτων ήταν τύπου L7e, το 88 % τύπου M1, το 10 % τύπου N1 και το υπόλοιπο 1 % τύπου N2. Η κανονική κατανομή της διανυόμενης απόστασης ορίστηκε με μέση τιμή 35 km και τυπική απόκλιση 10 km.

Οι καταναλώσεις ορίστηκαν για τους τύπους των οχημάτων ως εξής: για τον τύπο L7e 0,13 kWh/km, για τον τύπο M1 0,16 kWh/km, για τον τύπο N1 0,24 kWh/km και τέλος για το τύπο N2 0,80 kWh/km. Η κανονική κατανομή της ώρας έναρξης φόρτισης ορίστηκε με μέση τιμή την 20^η ώρα και τυπική απόκλιση μισή ώρα. Με τα δεδομένα αυτά και την εφαρμογή του αλγορίθμου εκτίμησης υπολογίσαμε τη συνολική καμπύλη ζήτησης ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων. Στη συνέχεια τα φορτία των ηλεκτρικών οχημάτων μοιράστηκαν αναλογικά στις φάσεις και έπειτα αναλογικά στους ζυγούς. Στις φάσεις των κόμβων όπου δεν είχαμε αρχικά φορτία προφανώς δε προσθέσαμε ηλεκτρικά οχήματα.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι δύο συνολικές καμπύλες ζήτησης ισχύος. Έπειτα ακολουθεί πίνακας με τα δεδομένα για τη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ηλεκτρικά οχήματα είναι ωμικά φορτία, δηλαδή έχουν συντελεστή ισχύος ίσο με 1 και δεν απορροφούν άεργο ισχύ.



Σχήμα 6.8: Καμπύλες συνολικής ζήτησης αρχικών φορτίων και αρχικών φορτίων+EV

Πίνακας 6.16: Δεδομένα συνολικής ζήτησης αρχικών φορτίων και EV σε kW

ώρα	a	b	c	sum	EV
1	148	137	217	502	32,62
2	156	148	335	639	17,12
3	137	149	170	456	7,92
4	154	109	195	457	6,40
5	182	118	224	524	3,41
6	187	111	246	545	0
7	386	300	253	939	0
8	708	388	778	1874	0
9	771	499	774	2043	0
10	554	577	736	1868	0
11	856	456	490	1802	0
12	601	449	565	1614	0
13	414	483	495	1392	0
14	452	207	557	1216	0
15	487	189	757	1433	0
16	462	324	912	1698	8,00
17	672	644	828	2143	39,81
18	812	738	963	2513	157,93
19	940	584	1063	2586	729,47
20	905	661	930	2496	723,24

21	782	641	829	2251	347,84
22	1122	909	1150	3180	100,16
23	1114	688	977	2779	42,94
24	724	381	697	1801	32,61

Η διείσδυση των EV είναι $\frac{2249,47}{38753} = 0,058 = 5.8 \%$ όπως προκύπτει προσθέτοντας τις ζητήσεις ισχύος για όλες τις ώρες.

Από το παραπάνω πίνακα βλέπουμε π.χ. ότι πρέπει να κατανείμουμε αναλογικά 157,93 kW ηλεκτρικών οχημάτων την 18^η ώρα. Άρα στη φάση A θα γίνει προσθήκη $\frac{812}{2513} * 157,93 = 51,03$ kW ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτά τα 51,03 kW θα μοιραστούν στη συνέχεια και πάλι αναλογικά στους ζυγούς της φάσης A με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 6.7.

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα για την περίπτωση με τα ηλεκτρικά οχήματα. Όπως και πριν θα παραθέσουμε μόνο τη 3^η και τη 19^η ώρα και έπειτα τις ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές των δύο δεικτών ασυμμετρίας και των απωλειών ισχύος.

Πίνακας 6.17: 3^η ώρα με EV (χαμηλό φορτίο)

Ζυγός	Va pu	Ang Va (degrees)	Vb pu	Ang Vb (degrees)	Vc pu	Ang Vc (degrees)	ρ	ε
650	1,000153	0,002	1,000044	-120,001	1,000323	120,001	0,000069	0,000094
632	0,995237	-0,240	0,996018	-120,247	0,992044	119,633	0,001558	0,001266
645	0,995273	-0,242	0,995116	-120,264	0,991203	119,613	0,001625	0,001479
646	0,995222	-0,246	0,994903	-120,272	0,991002	119,615	0,001624	0,001482
633	0,994710	-0,229	0,995032	-120,279	0,992128	119,631	0,001399	0,000881
634	0,991846	-0,313	0,987538	-120,479	0,991556	119,612	0,001318	0,001898
1	0,994270	-0,320	0,996267	-120,250	0,990091	119,570	0,001987	0,002106
2	0,991325	-0,562	0,997182	-120,258	0,984437	119,394	0,003346	0,004871
671	0,991325	-0,562	0,997182	-120,258	0,984437	119,394	0,003346	0,004871
684	0,991291	-0,570	0,000000	-120,258	0,983500	119,378	0,499621	0,500402
611	0,000000	-0,570	0,000000	-120,258	0,983141	119,370	1,000000	1,000000
652	0,990945	-0,589	0,000000	-120,258	0,981908	119,356	0,499598	0,500434
680	0,991325	-0,562	0,997182	-120,258	0,984438	119,394	0,003346	0,004871
692	0,991339	-0,562	0,997182	-120,258	0,984440	119,394	0,003343	0,004875
675	0,990304	-0,578	0,997324	-120,272	0,984229	119,406	0,003458	0,004890

Πίνακας 6.18: 19^η ώρα με EV (υψηλό φορτίο)

Ζυγός	Va pu	Ang Va (deg)	Vb pu	Ang Vb (deg)	Vc pu	Ang Vc (degr)	ρ	ε
650	1,000023	0,007	0,999888	-120,007	1,000642	120,001	0,000170	0,000300
632	0,969629	-2,908	0,986674	-120,705	0,926302	116,860	0,014330	0,029412
645	0,967202	-3,099	0,978435	-120,835	0,922492	116,769	0,012095	0,029411
646	0,965200	-3,255	0,976003	-120,873	0,921274	116,805	0,010885	0,029600
633	0,968420	-2,953	0,985382	-120,728	0,924041	116,806	0,014530	0,029924
634	0,956508	-3,410	0,974428	-121,108	0,910519	116,215	0,015969	0,031367
1	0,964002	-3,516	0,988523	-120,668	0,910876	116,184	0,018965	0,037627
2	0,947784	-5,413	0,995571	-120,494	0,865816	114,104	0,033204	0,063557
671	0,947784	-5,413	0,995571	-120,494	0,865816	114,104	0,033204	0,063557
684	0,946321	-5,489	0,000000	-120,494	0,861030	114,010	0,497909	0,505427
611	0,000000	-5,489	0,000000	-120,494	0,858719	113,938	1,000000	1,000000
652	0,940685	-5,666	0,000000	-120,494	0,854364	113,952	0,498857	0,504606
680	0,947784	-5,413	0,995571	-120,494	0,865816	114,104	0,033204	0,063557
692	0,947793	-5,413	0,995563	-120,494	0,865839	114,103	0,033203	0,063551
675	0,940653	-5,637	0,997490	-120,556	0,860182	114,184	0,034892	0,065616

Πίνακας 6.19: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με EV)

Ζυγός	ρ με EV		
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
650	0,000007	0,000201	0,000108
632	0,001558	0,014330	0,007007
645	0,001625	0,012130	0,006533
646	0,001624	0,011983	0,006270
633	0,001399	0,014530	0,006990
634	0,001297	0,015969	0,006980
1	0,001987	0,018965	0,008972
2	0,003346	0,033204	0,014738
671	0,003346	0,033204	0,014738
684	0,488420	0,520805	0,499871
611	1,000000	1,000000	1,000000
652	0,488654	0,520733	0,499909
680	0,003346	0,033204	0,014738
692	0,003343	0,033203	0,014734
675	0,003420	0,034892	0,015287

Πίνακας 6.20: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ϵ (με EV)

ε με EV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
650	0,000015	0,000377	0,000194
632	0,001266	0,029412	0,013114
645	0,001479	0,029411	0,013200
646	0,001482	0,029600	0,013221
633	0,000881	0,029924	0,013068
634	0,001898	0,031367	0,012993
1	0,002106	0,037627	0,017013
2	0,004871	0,063557	0,028535
671	0,004871	0,063557	0,028535
684	0,479381	0,512106	0,501164
611	1,000000	1,000000	1,000000
652	0,479418	0,511930	0,501320
680	0,004871	0,063557	0,028535
692	0,004875	0,063551	0,028534
675	0,004890	0,065616	0,028925

Πίνακας 6.21: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με EV)

Απώλειες ισχύος με EV			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	2,47	131,64	45,62
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	729,47	93,73
Total demand (kW) (EV+Load)	463,72	3315,79	1708,44
Power losses/Total demand	0,005322	0,040018	0,021023

Συγκρίνοντας τους αντίστοιχους πίνακες στις περιπτώσεις “χωρίς EV” και “με EV” παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο πρόβλημα εμφανίζεται όπως ήταν αναμενόμενο κατά τη διάρκεια της αιχμής. Συγκεκριμένα ο δείκτης ρ για το κόμβο 675 που παρουσιάζει τις μεγαλύτερες ασυμμετρίες μεταβάλλεται από 0,0275 σε 0,0349. Αυξάνεται δηλαδή κατά περίπου 26,9 %. Η μέγιστη τιμή του δείκτη ϵ για τον ίδιο κόμβο πάλι μεταβάλλεται από 0,0542 σε 0,0656 δηλαδή αυξάνεται κατά περίπου 21 %. Η μέση τιμή του ρ στον ίδιο κόμβο αυξάνεται κατά 5,5% ενώ η μέση τιμή ϵ αυξάνεται κατά 5,5% επίσης. Τέλος οι μέγιστες απώλειες ισχύος για το δίκτυο μεταβάλλονται από 125,18 kW σε 131,64 kW ενώ οι μέσες από 40,78 kW σε 45,62 kW δηλαδή αυξάνονται αντίστοιχα κατά περίπου 5,2 % και 11,9 %. Τα παραπάνω συμπεράσματα θα φανούν καλύτερα μέσα από γραφικές παραστάσεις που θα ακολουθήσουν αφού δούμε και τους τρόπους αντιμετώπισης της επίδρασης.

6.6.3 Αποτελέσματα με ρυθμιστή και με EV

Όπως είδαμε στη προηγούμενη παράγραφο η προσθήκη των ηλεκτρικών οχημάτων επιδρά στην ασυμμετρία των τάσεων κυρίως κατά τη διάρκεια της αιχμής

ενώ στις απώλειες ισχύος σε όλο το 24ωρο. Πέρα όμως από ασυμμετρίες στη τάση τα ηλεκτρικά οχήματα προκαλούν όπως βλέπουμε κατά τη διάρκεια της αιχμής σημαντική πτώση τάσης. Συγκεκριμένα η τάση στη φάση C τη 19^η ώρα στο κόμβο 675 φτάνει στο 0.86 α.μ. Για την ανύψωση της θα χρησιμοποιήσουμε το ρυθμιστή του δικτύου. Ο ρυθμιστής εκτός από την ανύψωση της τάσης θα προκαλέσει και μείωση της επίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων στην ασυμμετρία των τάσεων και στις απώλειες ισχύος όπως θα δούμε παρακάτω καθιστώντας τον ένα πολύ σημαντικό τρόπο βελτιστοποίησης. Όπως και προηγουμένως θα ακολουθήσουν τα αποτελέσματα μόνο για τη 3^η και τη 19^η ώρα και έπειτα οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές των δύο δεικτών ασυμμετρίας και των απωλειών ισχύος.

Πίνακας 6.22: 3^η ώρα με ρυθμιστή και με EV (χαμηλό φορτίο)

Ζυγός	Va pu	Ang Va (deg)	Vb pu	Ang Vb (deg)	Vc pu	Ang Vc (deg)	ρ	ε
650	0,999789	-0,015	0,999972	-120,004	0,999601	119,987	0,000086	0,000150
632	1,020627	-0,243	1,015116	-120,241	1,017171	119,636	0,000883	0,002284
645	1,020840	-0,236	1,014149	-120,258	1,016658	119,622	0,001205	0,002662
646	1,020790	-0,241	1,013941	-120,267	1,016461	119,623	0,001304	0,002662
633	1,020173	-0,225	1,013795	-120,276	1,017578	119,638	0,001166	0,002497
634	1,017380	-0,305	1,006442	-120,469	1,017020	119,620	0,003271	0,003963
1	1,019685	-0,320	1,015357	-120,245	1,015267	119,576	0,000543	0,002337
2	1,016813	-0,549	1,016246	-120,252	1,009754	119,409	0,001188	0,003935
671	1,016813	-0,549	1,016246	-120,252	1,009754	119,409	0,001188	0,003935
684	1,016778	-0,558	0,000000	-120,252	1,008779	119,393	0,499644	0,500379
611	0,000000	-0,558	0,000000	-120,252	1,008430	119,386	1,000000	1,000000
652	1,016430	-0,576	0,000000	-120,252	1,007171	119,372	0,499627	0,500405
680	1,016813	-0,549	1,016246	-120,252	1,009754	119,409	0,001188	0,003935
692	1,016787	-0,550	1,016250	-120,253	1,009749	119,409	0,001191	0,003929
675	1,015778	-0,565	1,016388	-120,267	1,009543	119,421	0,001290	0,003738

Πίνακας 6.23: 19^η ώρα με ρυθμιστή και με EV (υψηλό φορτίο)

Ζυγός	Va pu	Ang Va (deg)	Vb pu	Ang Vb (deg)	Vc pu	Ang Vc (deg)	ρ	ε
650	1,000017	-0,004	1,000016	-119,996	0,999771	119,992	0,000065	0,000133
632	1,038041	-2,515	1,039751	-120,675	1,014088	117,351	0,006645	0,018249
645	1,035720	-2,676	1,031938	-120,799	1,010985	117,281	0,005018	0,018224
646	1,033832	-2,812	1,029662	-120,833	1,009851	117,311	0,004784	0,018219
633	1,036884	-2,550	1,038472	-120,703	1,012366	117,312	0,006630	0,018475
634	1,025781	-2,947	1,028091	-121,044	1,000062	116,821	0,007476	0,019481
1	1,032717	-3,038	1,041402	-120,653	1,000171	116,79	0,010206	0,024761
2	1,017281	-4,667	1,047780	-120,526	0,959367	115,101	0,021854	0,045808
671	1,017281	-4,667	1,047781	-120,526	0,959367	115,101	0,021854	0,045808

684	1,015885	-4,733	0,000000	-120,526	0,955012	115,026	0,498897	0,502533
611	0,000000	-4,733	0,000000	-120,526	0,952930	114,968	1,000000	1,000000
652	1,010588	-4,884	0,000000	-120,526	0,948986	114,983	0,499737	0,501744
680	1,017281	-4,667	1,047781	-120,526	0,959367	115,101	0,021854	0,045808
692	1,017276	-4,667	1,047785	-120,526	0,959354	115,101	0,021856	0,045814
675	1,010651	-4,858	1,049506	-120,581	0,954309	115,168	0,023276	0,047233

Πίνακας 6.24: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με ρυθμιστή με EV)

ρ με ρυθμιστή με EV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,000192	0,006645	0,003315
645	0,000185	0,005018	0,002657
646	0,000245	0,004784	0,002443
633	0,000186	0,006630	0,003330
634	0,000506	0,011536	0,004783
1	0,000543	0,010206	0,004897
2	0,001188	0,021854	0,009938
671	0,001188	0,021854	0,009938
680	0,001188	0,021854	0,009938
692	0,001191	0,021856	0,009942
675	0,001290	0,023276	0,010488

Πίνακας 6.25: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ε (με ρυθμιστή με EV)

ε με ρυθμιστή με EV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001363	0,018249	0,008627
645	0,001424	0,018224	0,008754
646	0,001433	0,018219	0,008756
633	0,001047	0,018475	0,008377
634	0,000525	0,019481	0,008171
1	0,002337	0,024761	0,011899
2	0,003935	0,045808	0,021775
671	0,003935	0,045808	0,021775
680	0,003935	0,045808	0,021775
692	0,003929	0,045814	0,021774
675	0,003738	0,047233	0,022012

Πίνακας 6.26: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με ρυθμιστή με EV)

Απώλειες ισχύος με ρυθμιστή με EV			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	2,37	110,81	39,89
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	729,47	93,73
Total demand (kW) (EV+Load)	463,72	3315,79	1708,44
Power losses/Total demand	0,005112	0,033430	0,018645

Συγκρίνοντας τους αντίστοιχους πίνακες “χωρίς EV” και “με ρυθμιστή με EV” συμπεραίνουμε πόσο αποδοτική λύση αποτελεί ο ρυθμιστής τάσης. Συγκεκριμένα κατά την αιχμή ο δείκτης ρ μεταβάλλεται για τον ζυγό 675 από 0,0275 σε 0,0233 δηλαδή μειώνεται κατά περίπου 15,3 % ενώ ο δείκτης ϵ για τον ίδιο ζυγό από 0,0543 σε 0,0472 δηλαδή μειώνεται κατά περίπου 13,1 %. Η μέση τιμή του ρ στον ίδιο κόμβο μειώνεται κατά περίπου 24,8% ενώ η μέση τιμή ϵ μειώνεται κατά 19,7% επίσης. Όσον αφορά τις απώλειες ισχύος οι μέγιστες για όλο το δίκτυο μεταβάλλονται από 125,18 kW σε 110,81 kW ενώ οι μέσες από 40,78 kW σε 39,89 kW δηλαδή μειώνονται αντίστοιχα κατά περίπου 11,5 % και 2,2 %. Αξίζει να τονίσουμε εδώ πως κανονικά θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε ρυθμιστή τάσης και στην περίπτωση χωρίς EV ορισμένες ώρες όπως η ώρα αιχμής γιατί το μέτρο της τάσης ήταν ορισμένες φορές 0,88 α.μ. δηλαδή κάτω από το ανεκτό όριο 0,9 α.μ. Επειδή όμως αυτό έγινε για λίγους ζυγούς και συγκεκριμένες μόνο ώρες αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε την περίπτωση χωρίς EV χωρίς ρυθμιστή ως αναφορά.

6.6.4 Αποτελέσματα με EV με βελτιστοποίηση Smart Charging

Στην προηγούμενη παράγραφο είδαμε το ρυθμιστή τάσης ως ένα τρόπο αντιμετώπισης της επίδρασης της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Στην παράγραφο αυτή θα δούμε ένα δεύτερο τρόπο αντιμετώπισης, την βελτιστοποίηση Smart Charging (SCh) που αναλύσαμε στη παράγραφο 5.7. Έχουμε θεωρήσει ότι τις ώρες 7 έως 16 τα ηλεκτρικά οχήματα δεν είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο.

Η βελτιστοποίηση SCh μας έδωσε τις παρακάτω ζητήσεις για τα ηλεκτρικά οχήματα:

Πίνακας 6.27: Ζήτηση ισχύος EV SCh για Φάση A σε kW

ώρα	Φάση A								
	bus 634	bus 645	bus 646	bus 652	bus 671	bus 675	bus 692	bus 611	between buses 632-671
1	9,06	0,00	34,40	0,00	0,00	67,18	0,00	0,00	0,00
2	27,06	0,00	29,41	9,56	0,00	72,18	0,00	0,00	0,00
3	27,56	0,00	32,41	0,00	0,00	47,11	0,00	0,00	0,00
4	6,06	0,00	29,41	0,00	0,00	37,18	0,00	0,00	0,00
5	9,56	0,00	26,41	0,00	0,00	13,18	0,00	0,00	0,00
6	5,56	0,00	27,41	0,76	0,00	27,18	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00	102,25	0,00	0,00	0,00	0,00
19	23,15	0,00	0,00	0,00	61,50	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	14,06	0,00	0,00	0,00	0,00	8,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	5,25	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	8,57	1,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,00	0,00	0,00	35,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Πίνακας 6.28: Ζήτηση ισχύος EV SCh για Φάση B σε kW

ώρα	Φάση B								
	bus 634	bus 645	bus 646	bus 652	bus 671	bus 675	bus 692	bus 611	between buses 632-671
1	0,00	10,44	2,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	15,44	15,68	0,00	7,25	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	19,44	8,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	18,44	14,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	20,44	13,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	15,44	12,68	0,00	9,75	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,10	0,00	15,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00
19	2,18	0,00	52,97	0,00	10,50	0,00	0,00	0,00	0,00
20	41,12	0,00	0,00	0,00	50,25	0,00	0,00	0,00	20,00
21	13,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00	15,25	0,00	0,00	0,00	14,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00	67,75	33,00	0,00	0,00	0,00
24	0,00	18,35	0,00	0,00	37,25	0,00	0,00	0,00	0,00

Πίνακας 6.29: Ζήτηση ισχύος EV SCh για Φάση C σε kW

ώρα	Φάση C								
	bus 634	bus 645	bus 646	bus 652	bus 671	bus 675	bus 692	bus 611	between buses 632-671
1	0,00	6,18	0,00	14,52	0,00	0,00	28,29	19,83	10,72

2	0,00	8,18	0,00	0,00	0,00	0,00	23,29	8,83	10,21
3	0,00	13,18	0,00	25,02	0,00	3,87	35,29	17,83	9,21
4	0,00	11,18	0,00	19,02	0,00	0,00	23,29	12,83	9,71
5	0,00	9,18	0,00	23,02	0,00	0,00	0,29	8,83	10,21
6	0,00	8,18	0,00	2,40	0,00	0,00	5,29	17,83	9,21
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	8,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	8,52	26,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	11,52	0,00	0,00	0,00	0,00	7,71
20	29,03	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	19,97	24,46	0,00	0,00	0,00	112,81	0,00	0,00	0,00
24	0,00	0,00	0,00	0,00	54,00	60,31	3,29	0,00	0,00

Όπως και προηγουμένως θα ακολουθήσουν τα αποτελέσματα μόνο για τη 3^η και τη 19^η ώρα για να μπορέσουμε να πραγματοποιήσουμε συγκρίσεις με τις προηγούμενες περιπτώσεις, και έπειτα οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές των δύο δεικτών ασυμμετρίας και των απωλειών ισχύος.

Πίνακας 6.30: 3^η ώρα με EV Sch

Ζυγός	Va pu	Ang Va (deg)	Vb pu	Ang Vb (deg)	Vc pu	Ang Vc (deg)	ρ	ε
650	1,000289	0,006	0,999955	-120,004	1,000791	120,004	0,000206	0,000285
632	0,995301	-0,577	0,997252	-120,178	0,988727	119,380	0,002040	0,004626
645	0,994896	-0,607	0,996232	-120,217	0,987502	119,356	0,001885	0,004773
646	0,994582	-0,631	0,996101	-120,230	0,987219	119,365	0,001770	0,004815
633	0,994501	-0,600	0,996490	-120,205	0,988425	119,385	0,001848	0,004420
634	0,989801	-0,875	0,989071	-120,397	0,987855	119,366	0,001894	0,002947
1	0,994738	-0,696	0,997523	-120,147	0,986017	119,243	0,002824	0,006272
2	0,992883	-1,054	0,998583	-120,060	0,978223	118,860	0,005098	0,011072
671	0,992883	-1,054	0,998583	-120,060	0,978223	118,860	0,005098	0,011072
684	0,993059	-1,061	0,000000	-120,060	0,976764	118,809	0,499073	0,501030
611	0,000000	-1,061	0,000000	-120,060	0,976168	118,787	1,000000	1,000000
652	0,993044	-1,077	0,000000	-120,060	0,974327	118,734	0,498642	0,501494
680	0,992883	-1,054	0,998583	-120,060	0,978223	118,860	0,005098	0,011072

692	0,992910	-1,055	0,998586	-120,059	0,978223	118,859	0,005091	0,011088
675	0,991273	-1,092	0,998875	-120,084	0,978081	118,881	0,005318	0,010867

Πίνακας 6.31: 19^η ώρα με EV SCh

Ζυγός	Va pu	Ang Va (deg)	Vb pu	Ang Vb (deg)	Vc pu	Ang Vc (deg)	ρ	ε
650	1,000059	0,002	0,999959	-120,002	1,000229	120,000	0,000062	0,000096
632	0,967773	-2,376	0,986975	-120,796	0,937243	117,823	0,010816	0,022064
645	0,966305	-2,468	0,978372	-120,925	0,934429	117,734	0,008677	0,021031
646	0,964921	-2,556	0,975400	-120,982	0,933618	117,749	0,007535	0,020731
633	0,966359	-2,432	0,985968	-120,812	0,935350	117,801	0,010890	0,022541
634	0,954138	-2,920	0,976060	-121,084	0,923598	117,398	0,011334	0,024118
1	0,961238	-2,921	0,989234	-120,789	0,923888	117,395	0,014487	0,029062
2	0,941995	-4,625	0,997401	-120,730	0,884688	116,122	0,025808	0,051210
671	0,941995	-4,625	0,997401	-120,730	0,884687	116,122	0,025808	0,051210
684	0,940689	-4,676	0,000000	-120,730	0,880656	116,063	0,506386	0,495242
611	0,000000	-4,676	0,000000	-120,730	0,878760	116,018	1,000000	1,000000
652	0,935856	-4,787	0,000000	-120,730	0,874936	116,024	0,506960	0,494736
680	0,941995	-4,625	0,997401	-120,730	0,884687	116,122	0,025808	0,051210
692	0,942000	-4,625	0,997398	-120,730	0,884696	116,121	0,025806	0,051207
675	0,936032	-4,781	0,998912	-120,782	0,880139	116,220	0,027130	0,053391

Πίνακας 6.32: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με EV SCh)

ρ με EV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,002040	0,013371	0,006972
645	0,001885	0,013225	0,006507
646	0,001770	0,013080	0,006251
633	0,001848	0,013144	0,006952
634	0,001498	0,011556	0,006841
1	0,002571	0,016614	0,008923
2	0,003578	0,026036	0,014634
671	0,003578	0,026036	0,014634
680	0,003578	0,026036	0,014634
692	0,003578	0,026034	0,014630
675	0,003420	0,027130	0,015177

Πίνακας 6.33: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ε (με EV SCh)

ε με EV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,003534	0,022074	0,012963
645	0,003819	0,022956	0,013057
646	0,003827	0,023050	0,013086
633	0,003297	0,022541	0,012887
634	0,002664	0,024510	0,012521

1	0,004732	0,029062	0,016835
2	0,008430	0,051210	0,028248
671	0,008430	0,051210	0,028248
680	0,008430	0,051210	0,028248
692	0,008430	0,051207	0,028247
675	0,008196	0,053391	0,028617

Πίνακας 6.34: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με EV SCh)

Απώλειες ισχύος με EV SCh			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	4,50	132,72	43,33
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	268,12	93,71
Total demand (kW) (EV+Load)	639,11	3287,67	1708,42
Power losses/Total demand	0,007036	0,040371	0,020853

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα “χωρίς EV” και “με EV SCh” παρατηρώ ότι κατά την αιχμή ο δείκτης ρ μεταβάλλεται από 0,0275 σε 0,0271 δηλαδή μειώνεται κατά περίπου 1,5% ενώ ο δείκτης ϵ από 0,0542 σε 0,0512 δηλαδή μειώνεται κατά περίπου 5,5%. Καταφέρνει δηλαδή να περιορίσει την επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων τις ώρες αιχμής. Για να επιτύχει όμως κάτι τέτοιο αυξάνονται οι ελάχιστες τιμές των δεικτών. Συγκεκριμένα η ελάχιστη τιμή του δείκτη ρ στο κόμβο 675 μεταβάλλεται από 0,0034 σε 0,0084 δηλαδή αυξάνεται κατά περίπου 147% ενώ η αντίστοιχη τιμή του δείκτη ϵ από 0,0049 σε 0,0082 δηλαδή αυξάνεται κατά περίπου 67%. Παρόλο που σαν ποσοστά οι αυξήσεις είναι μεγάλες, τα νούμερα είναι πολύ μικρά και πρακτικά δεν έχουμε κάποιο πρόβλημα. Η μέση τιμή ρ στον ίδιο κόμβο αυξάνεται κατά περίπου 4,8% ενώ η μέση τιμή ϵ αυξάνεται κατά 4,3%. Το βασικό πρόβλημα το έχουμε τις ώρες αιχμής και η βελτιστοποίηση SCh είναι αρκετά αποδοτική όσον αφορά αυτές τις ώρες. Τέλος παρατηρώντας τις μέγιστες απώλειες ισχύος, μεταβάλλονται από 125,18 kW σε 132,72 kW δηλαδή αυξάνονται κατά περίπου 6% ενώ οι μέσες απώλειες ισχύος μεταβάλλονται από 40,78 kW σε 43,33 kW δηλαδή αυξάνονται κατά περίπου 6,3%. Αργότερα θα δούμε και άλλες συγκρίσεις μεταξύ των περιπτώσεων τόσο μέσω πινάκων όσο και μέσω γραφικών παραστάσεων.

6.6.5 Αποτελέσματα με ρυθμιστή και με EV με βελτιστοποίηση Smart Charging

Τελευταία περίπτωση είναι ακόμα ένας τρόπος αντιμετώπισης της επίδρασης των EV. Ο τρόπος αυτός στην ουσία συνδυάζει τους δύο προηγούμενους που εφαρμόσαμε, την χρήση ρυθμιστή τάσης και τη βελτιστοποίηση SCh. Όπως και προηγουμένως θα ακολουθήσουν τα αποτελέσματα μόνο για τη 3^η και τη 19^η ώρα και έπειτα οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές των δύο δεικτών ασυμμετρίας και των απωλειών ισχύος.

Πίνακας 6.35: 3^η ώρα με ρυθμιστή με EV SCh

Ζυγός	Va pu	Ang Va (deg)	Vb pu	Ang Vb (deg)	Vc pu	Ang Vc (deg)	ρ	ε
650	0,999807	-0,025	0,999968	-120,002	0,999442	119,974	0,000125	0,000270
632	1,020587	-0,580	1,022972	-120,166	1,013310	119,379	0,002218	0,004920
645	1,020340	-0,595	1,021855	-120,210	1,012704	119,371	0,001920	0,004774
646	1,020034	-0,618	1,021726	-120,222	1,012428	119,379	0,001811	0,004818
633	1,019709	-0,593	1,021820	-120,202	1,013628	119,398	0,001819	0,004350
634	1,015127	-0,854	1,014589	-120,385	1,013072	119,381	0,001789	0,002954
1	1,020040	-0,693	1,023236	-120,137	1,010669	119,248	0,002959	0,006486
2	1,018233	-1,033	1,024268	-120,054	1,003069	118,884	0,005115	0,011053
671	1,018233	-1,033	1,024268	-120,054	1,003069	118,884	0,005115	0,011053
684	1,018416	-1,041	0,000000	-120,054	1,001516	118,835	0,499116	0,500989
611	0,000000	-1,041	0,000000	-120,054	1,000935	118,814	1,000000	1,000000
652	1,018409	-1,057	0,000000	-120,054	0,999023	118,763	0,498710	0,501429
680	1,018233	-1,033	1,024268	-120,054	1,003069	118,884	0,005115	0,011053
692	1,018192	-1,034	1,024275	-120,054	1,003066	118,885	0,005120	0,011047
675	1,016595	-1,069	1,024557	-120,078	1,002927	118,905	0,005329	0,010847

Πίνακας 6.36: 19^η ώρα με ρυθμιστή με EV SCh

Ζυγός	Va pu	Ang Va (deg)	Vb pu	Ang Vb (deg)	Vc pu	Ang Vc (deg)	ρ	ε
650	0,999983	-0,002	1,000014	-119,999	0,999898	119,997	0,000028	0,000052
632	1,036568	-2,062	1,040054	-120,733	1,016208	118,128	0,003727	0,013987
645	1,035193	-2,138	1,031923	-120,852	1,013763	118,053	0,001678	0,013406
646	1,033882	-2,215	1,029137	-120,902	1,013006	118,065	0,001045	0,013125
633	1,035267	-2,107	1,039066	-120,750	1,014594	118,110	0,003737	0,014273
634	1,023884	-2,532	1,029675	-120,994	1,003784	117,769	0,004349	0,015344
1	1,030477	-2,532	1,042108	-120,731	1,003973	117,765	0,006865	0,019651
2	1,012476	-4,001	1,049593	-120,689	0,968003	116,700	0,016525	0,038093
671	1,012476	-4,001	1,049593	-120,689	0,968003	116,700	0,016525	0,038093
684	1,011244	-4,045	0,000000	-120,689	0,964305	116,651	0,505681	0,495166
611	0,000000	-4,045	0,000000	-120,689	0,962574	116,614	1,000000	1,000000
652	1,006722	-4,140	0,000000	-120,689	0,959073	116,621	0,506185	0,494696
680	1,012476	-4,001	1,049594	-120,689	0,968003	116,700	0,016525	0,038093
692	1,012473	-4,001	1,049596	-120,689	0,967997	116,700	0,016526	0,038095
675	1,006934	-4,134	1,050967	-120,734	0,963857	116,783	0,017637	0,039753

Πίνακας 6.37: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με ρυθμιστή με EV SCh)

ρ με ρυθμιστή με EV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,000814	0,006666	0,003308

645	0,000505	0,005276	0,002605
646	0,000408	0,004798	0,002382
633	0,000747	0,006607	0,003287
634	0,000506	0,008814	0,004528
1	0,000659	0,009395	0,004933
2	0,002351	0,017324	0,009989
671	0,002351	0,017324	0,009989
680	0,002351	0,017324	0,009989
692	0,002351	0,017325	0,009992
675	0,002322	0,017936	0,010532

Πίνακας 6.38: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ϵ (με ρυθμιστή με EV SCh)

ε με ρυθμιστή με EV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001363	0,016215	0,008605
645	0,001424	0,016882	0,008722
646	0,001433	0,016918	0,008731
633	0,001047	0,015956	0,008281
634	0,000525	0,018656	0,007769
1	0,002658	0,020818	0,011912
2	0,006357	0,038093	0,021805
671	0,006357	0,038093	0,021805
680	0,006357	0,038093	0,021805
692	0,006357	0,038095	0,021804
675	0,006224	0,039753	0,022031

Πίνακας 6.39: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με ρυθμιστή με EV SCh)

Απώλειες ισχύος με ρυθμιστή με EV SCh			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	4,29	110,62	38,08
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	268,12	93,71
Total demand (kW) (EV+Load)	639,11	3287,67	1708,42
Power losses/Total demand	0,006713	0,033648	0,018561

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα “χωρίς EV” και “με ρυθμιστή με EV SCh” παρατηρούμε ότι και αυτό ο τρόπος αντιμετώπισης είναι πάρα πολύ αποδοτικός. Συγκεκριμένα στο κόμβο 675 η μέγιστη τιμή του δείκτη ρ μεταβάλλεται από 0,0275 σε 0,0179 μειώνεται δηλαδή κατά περίπου 35% ενώ ο δείκτης ϵ από 0,0542 σε 0,0398 δηλαδή μειώνεται κατά περίπου 27%. Η μέση τιμή ρ για τον ίδιο κόμβο μειώνεται κατά περίπου 27,6% ενώ η μέση τιμή ϵ μειώνεται κατά 19,7%. Οι μέγιστες απώλειες ισχύος μεταβάλλονται από 125,18 kW σε 110,62 kW δηλαδή μειώνονται κατά περίπου 11,6% ενώ οι μέσες απώλειες ισχύος μεταβάλλονται από 40,78 kW σε 38,08 kW δηλαδή μειώνονται κατά περίπου 6,6%.

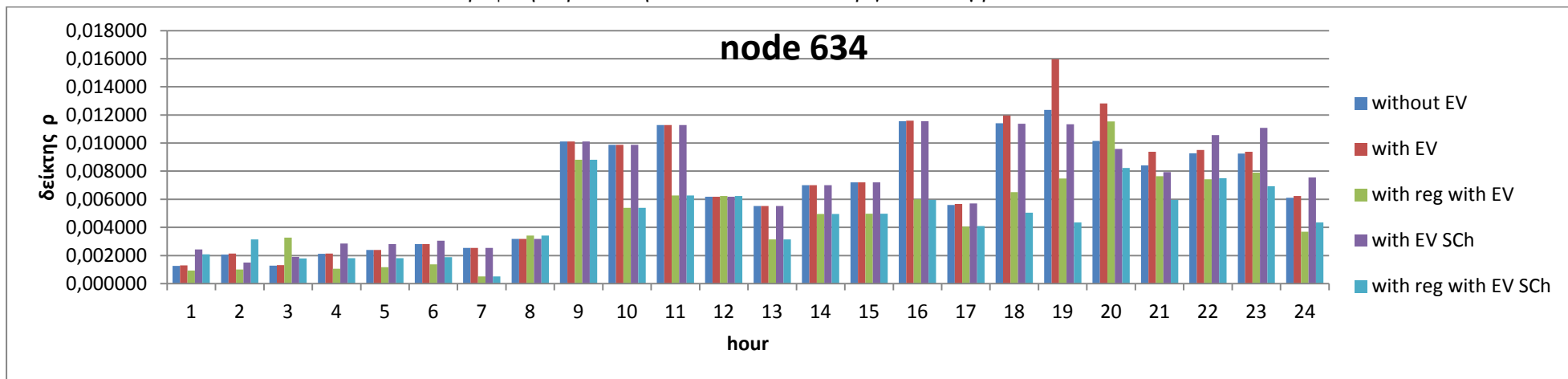
6.6.6 Γραφικές παραστάσεις (για διείσδυση EV 5,8 %)

Στη συνέχεια ακολουθούν γραφικές παραστάσεις για επιλεγμένους κόμβους που απεικονίζουν τα συμπεράσματα μας σε όλες τις περιπτώσεις. Οι κόμβοι που επιλέγονται είναι ο 675 που εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές στους δείκτες ρ και ε και είναι από τους πιο απομακρυσμένους από τον άπειρο ζυγό 650 (4500 feet), και ο κόμβος 634 που αποτελεί ένα σχετικά κοντινό, στον άπειρο ζυγό 650, κόμβο (2500 feet).

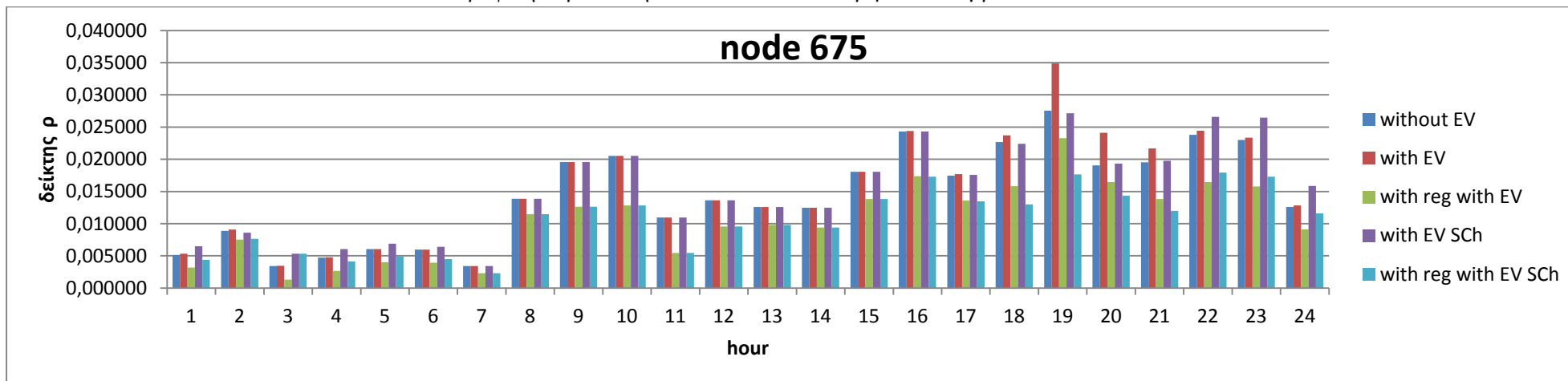
Στους κόμβους θα δούμε αρχικά σε γραφικές παραστάσεις το σύνολο όλων των δεικτών ρ και ε . Στη συνέχεια θα δούμε γι' αυτούς τους κόμβους πάλι γραφικές παραστάσεις που θα απεικονίζουν τις μέγιστες, τις ελάχιστες και τις μέσες τιμές για την περίπτωση "χωρίς EV" σε απόλυτες τιμές δίπλα στις σχετικές μεταβολές για τις άλλες 4 περιπτώσεις ως προς την αρχική.

Τέλος, θα ακολουθήσουν γραφικές παραστάσεις που θα δείχνουν τις μέγιστες και τις μέσες τιμές των δεικτών ρ και ε σε σχέση με την απόσταση από τον άπειρο ζυγό 650. Οι τελευταίες μάλιστα γραφικές παραστάσεις θα δικαιολογήσουν την επιλογή των ζυγών 634 και 675 για τις πρώτες. Σε αυτές τις γραφικές παραστάσεις δε θα συμπεριλάβουμε τους ζυγούς που εμφανίζουν μία ή δύο μόνο τάσεις γιατί όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως παίρνουν τιμές 1 και κοντά στο 0,5 αντίστοιχα που είναι πολύ πιο μεγάλες από τους ζυγούς με τρεις φάσεις. Μια ενδεχόμενη προσθήκη τους στις γραφικές αυτές παραστάσεις θα τις αλλοίωνε και δε θα μπορούσαμε να εξαγάγουμε συμπεράσματα από αυτές.

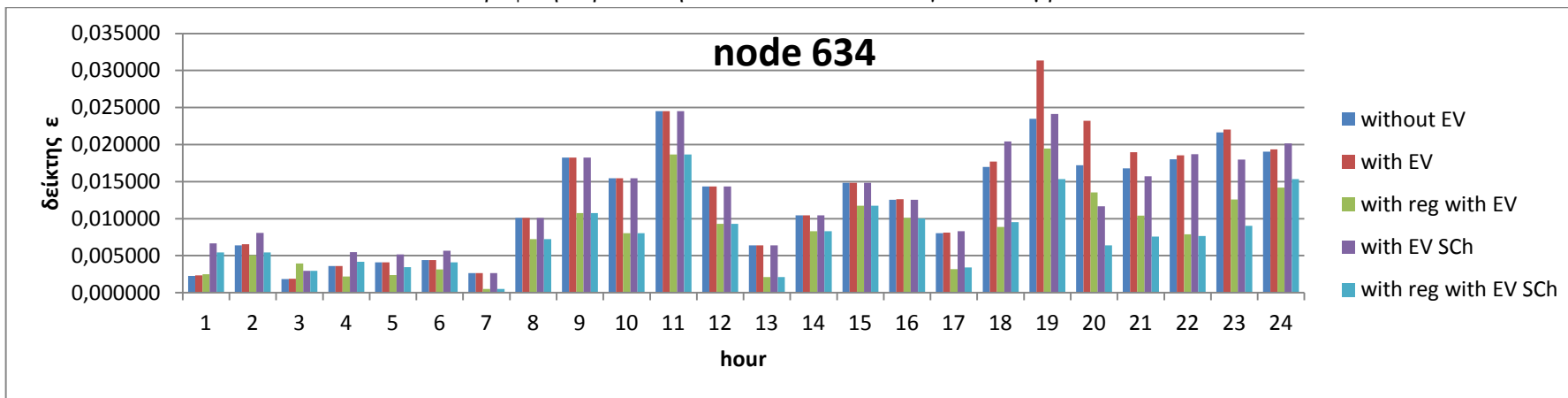
Γραφική παράσταση 6.1: Σύνολο δεικτών ρ για τον κόμβο 634



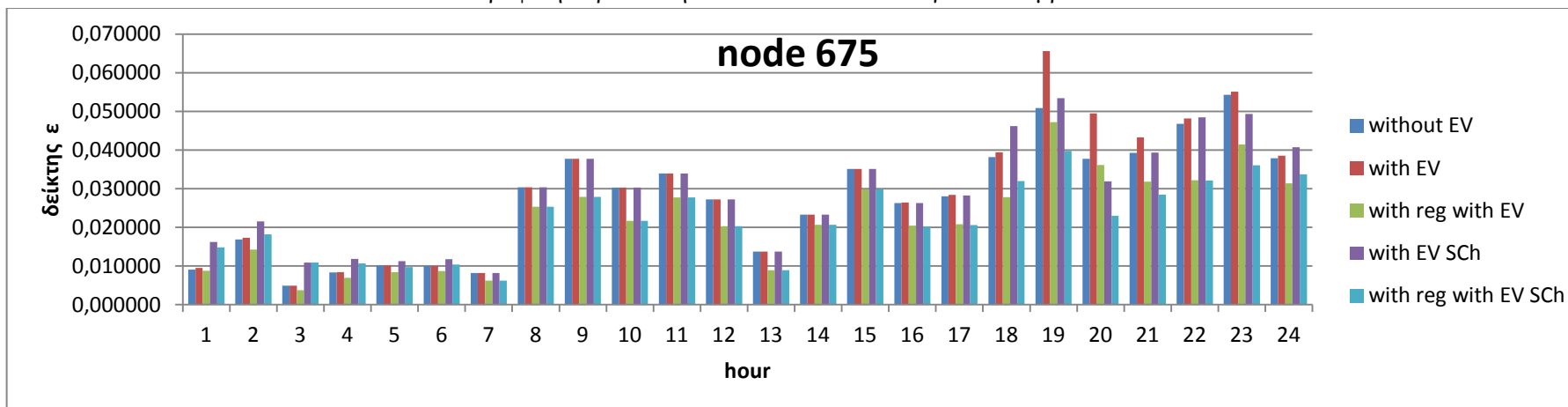
Γραφική παράσταση 6.2: Σύνολο δεικτών ρ για τον κόμβο 675



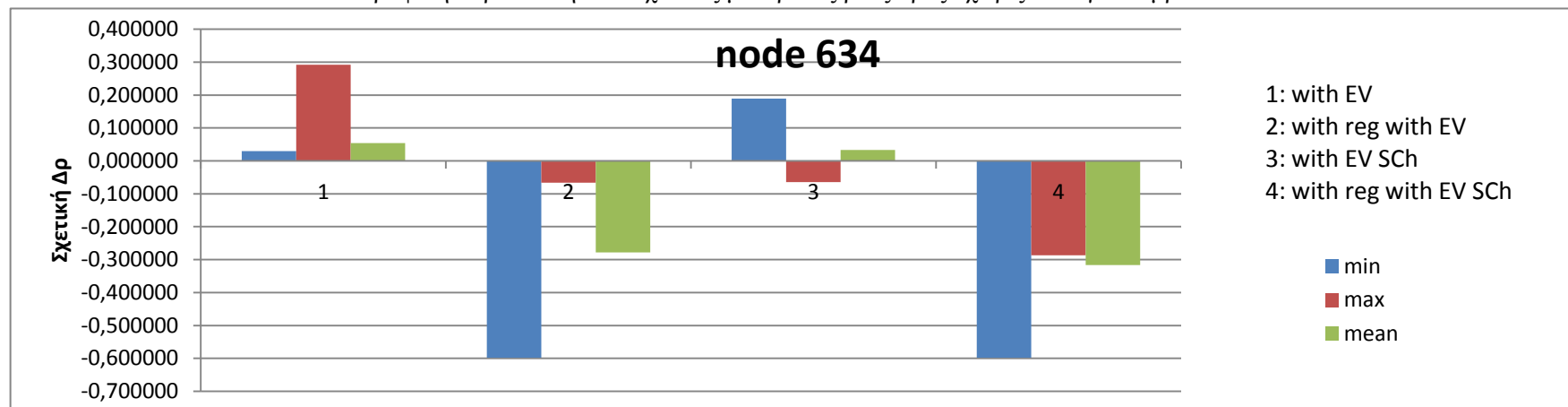
Γραφική παράσταση 6.3: Σύνολο δεικτών ϵ για τον κόμβο 634



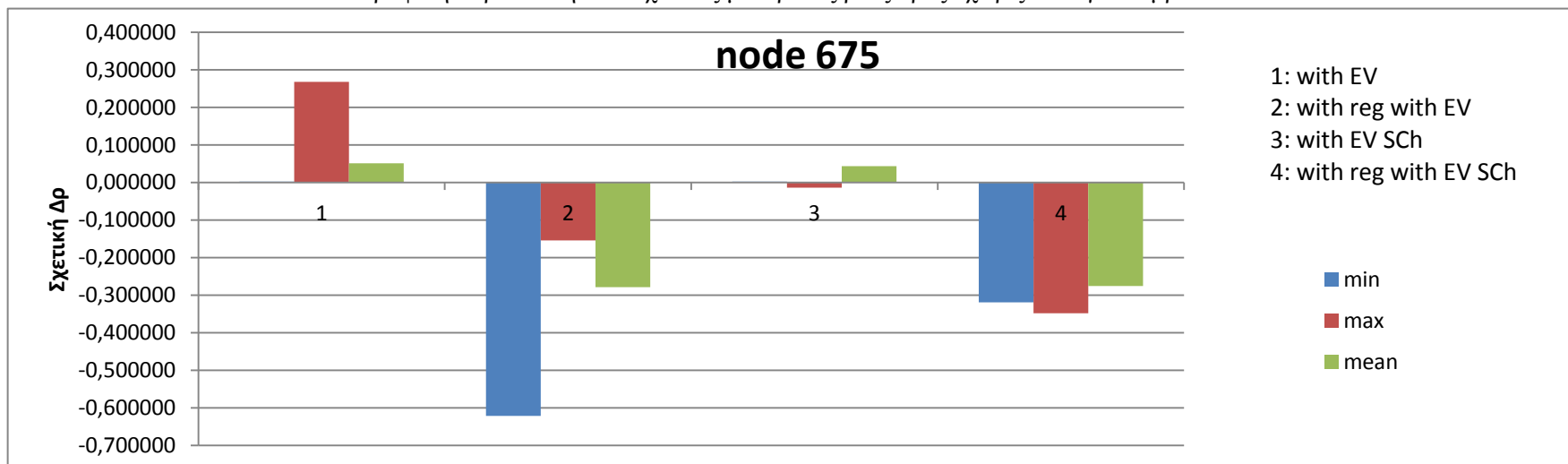
Γραφική παράσταση 6.4: Σύνολο δεικτών ϵ για τον κόμβο 675



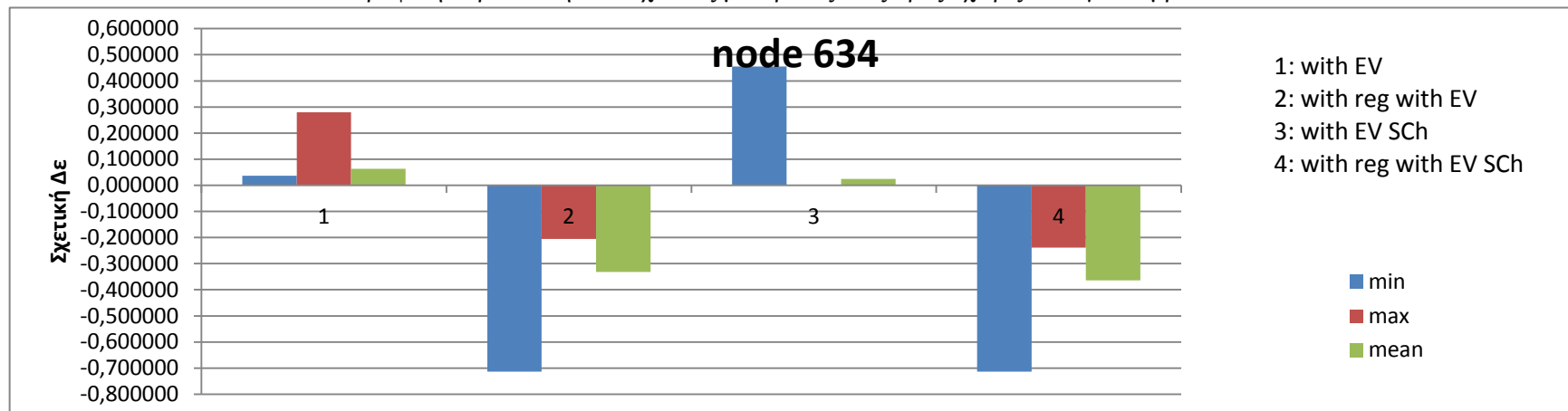
Γραφική παράσταση 6.5: Σχετικές μεταβολές ρ ως προς “χωρίς EV” για κόμβο 634



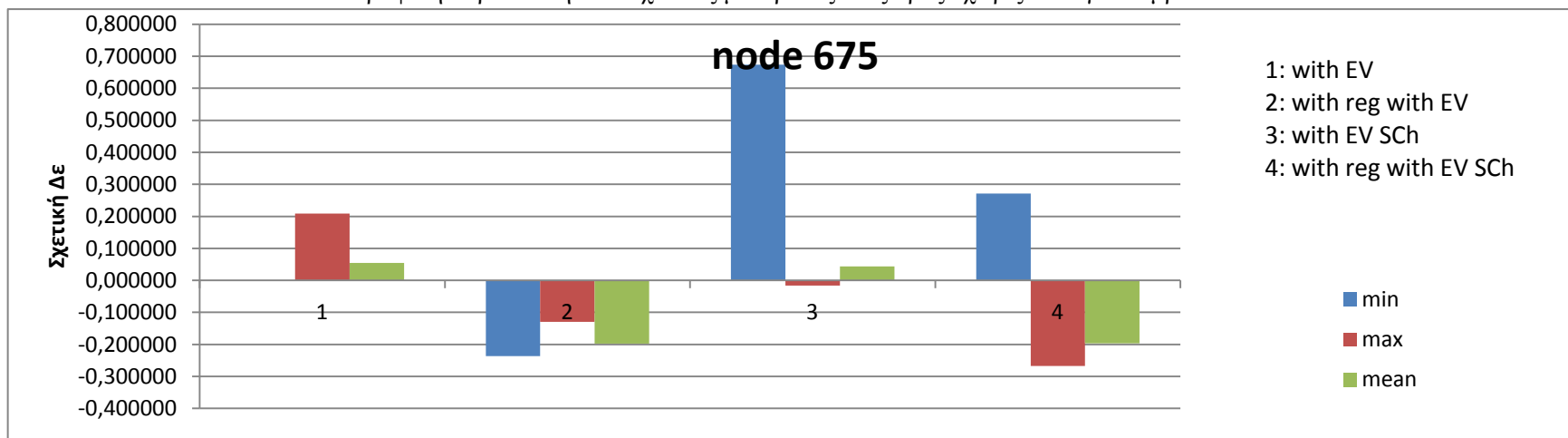
Γραφική παράσταση 6.6: Σχετικές μεταβολές ρ ως προς “χωρίς EV” για κόμβο 675



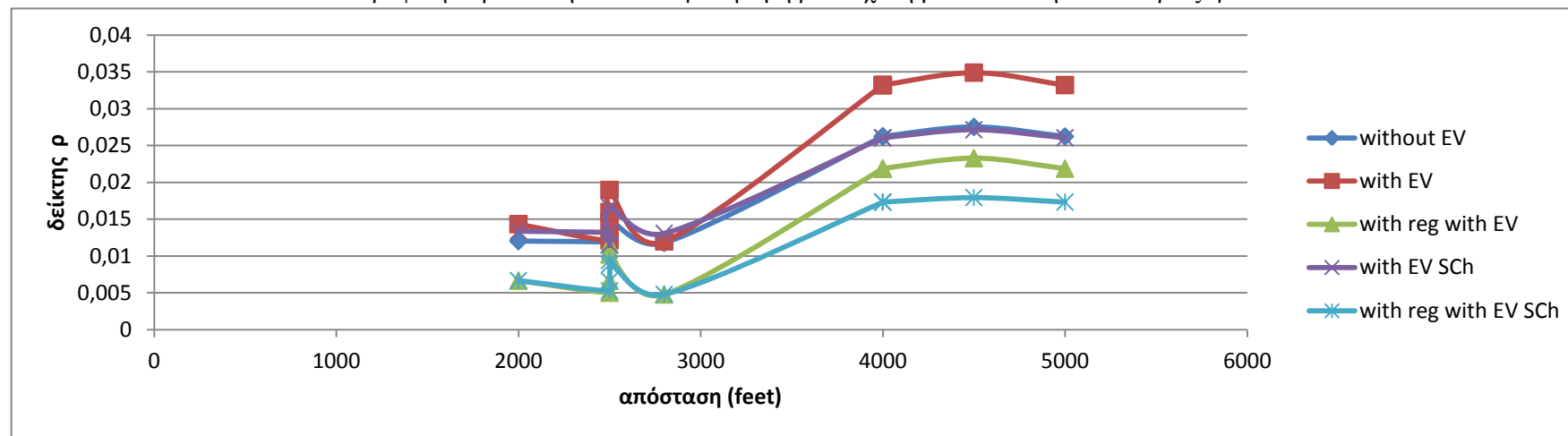
Γραφική παράσταση 6.7: Σχετικές μεταβολές ε ως προς “χωρίς EV” για κόμβο 634



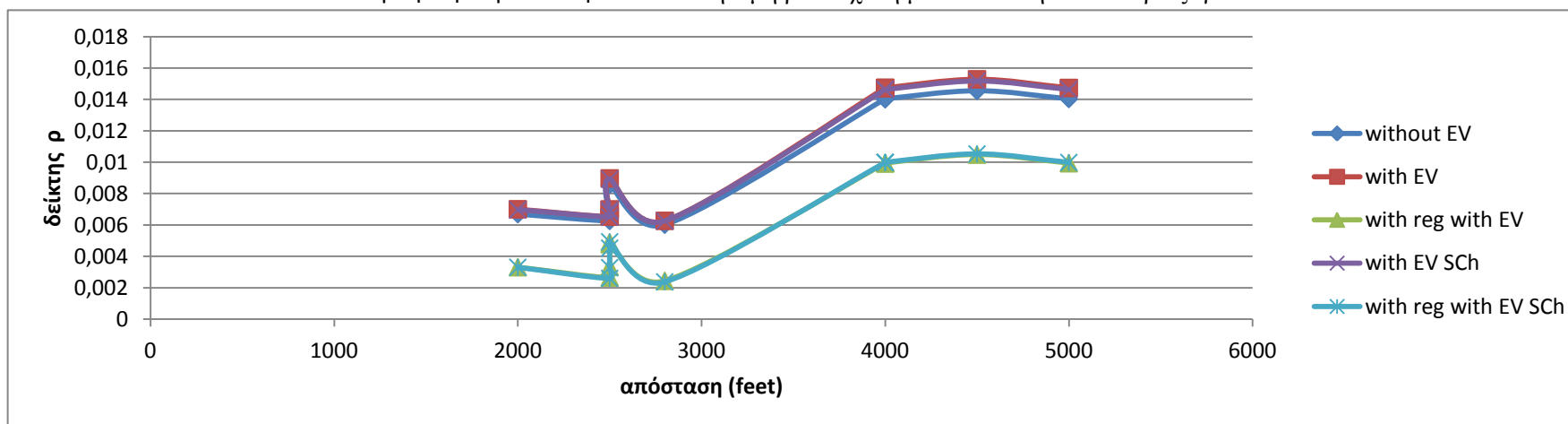
Γραφική παράσταση 6.8: Σχετικές μεταβολές ε ως προς “χωρίς EV” για κόμβο 675



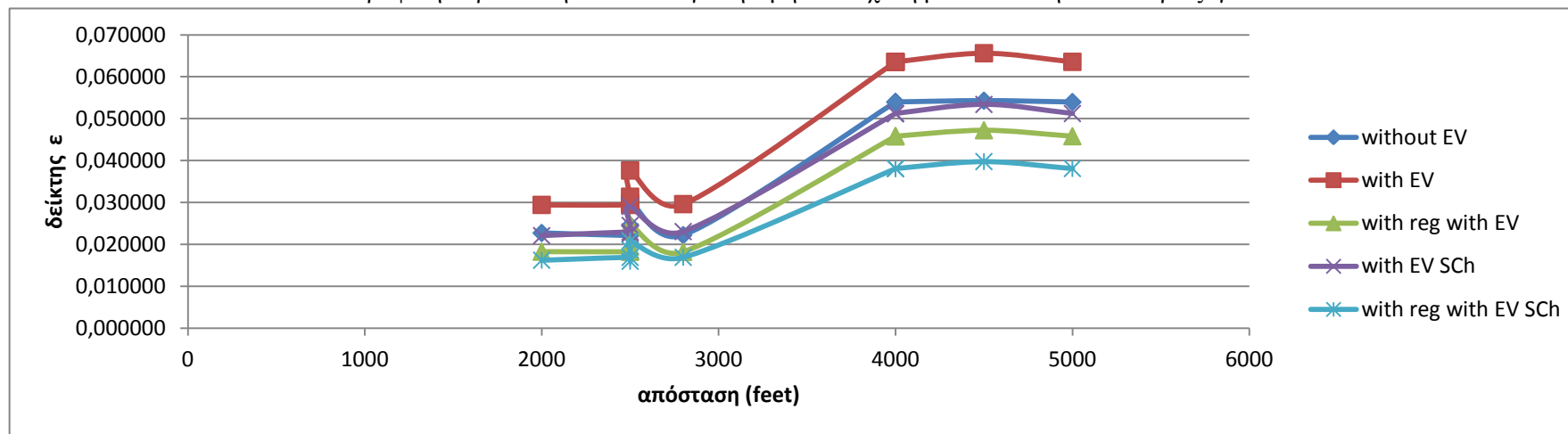
Γραφική παράσταση 6.9.1: Μέγιστη τιμή ρ σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό



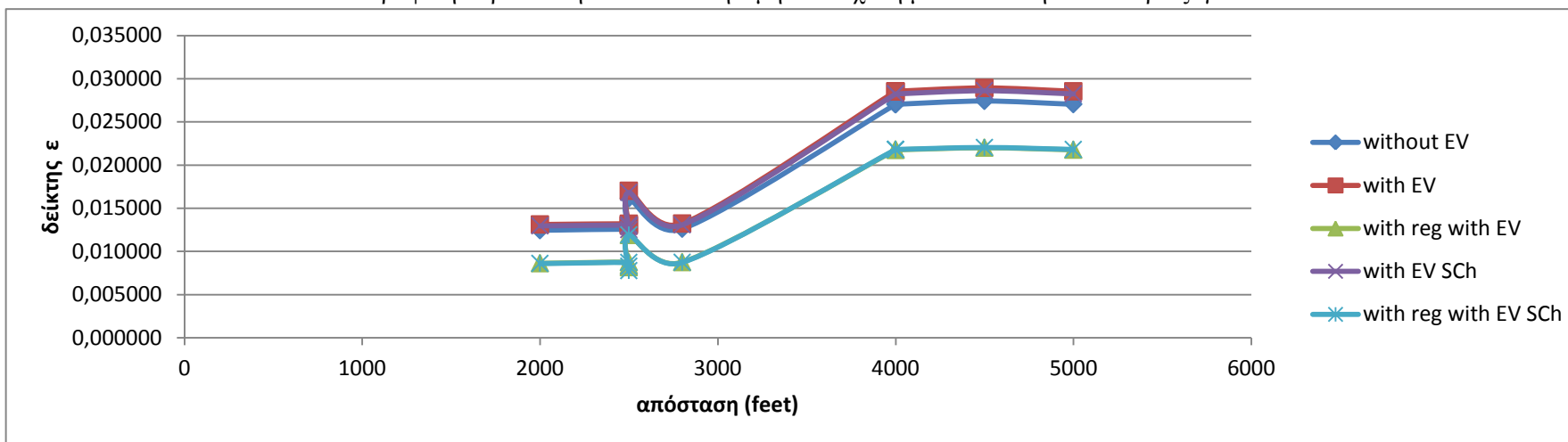
Γραφική παράσταση 6.9.2: Μέση τιμή ρ σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό



Γραφική παράσταση 6.10.1: Μέγιστη τιμή ε σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό



Γραφική παράσταση 6.10.2: Μέση τιμή ε σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό



6.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις γραφικές παραστάσεις 6.5 έως 6.8 συμπεραίνουμε ότι αναφέραμε και στις προηγούμενες παραγράφους:

1. Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων επηρεάζει σημαντικά τις ώρες αιχμής όπου εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές των δεικτών ρ και ε (αύξηση έως και περίπου 30%) ενώ αντίθετα οι ελάχιστες και οι μέσες τιμές επηρεάζονται ελάχιστα.
2. Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων προκαλεί περαιτέρω πτώσεις τάσεις στους ζυγούς. Αυτές οι πτώσεις τάσης κατά τις ώρες αιχμής μπορεί να γίνουν πολύ σημαντικές και να θέσουν τις τάσεις των ζυγών εκτός ορίων. Τότε θα πρέπει να εφαρμοσθούν διάφορα μέτρα αντιμετώπισης όπως για παράδειγμα ο ρυθμιστής τάσης.
3. Η χρήση του ρυθμιστή τάσης παρ' όλο που γίνεται για ανύψωση των τάσεων των ζυγών που βρίσκονται εκτός ορίων βελτιώνει σημαντικά τους δείκτες ασυμμετρίας προκαλώντας τους μείωση των μέσων τιμών έως και 30% σε σχέση με την περίπτωση απουσίας EV. Τα ποσοστά βελτίωσης των μεγίστων τιμών είναι και αυτά σημαντικά και φτάνουν το 20%.
4. Η χρήση της βελτιστοποίησης Smart Charging διατηρεί κατά κύριο λόγο σταθερές τις μέγιστες τιμές των δεικτών ασυμμετρίας, αυξάνει ελάχιστα τις μέσες τιμές και αυξάνει σημαντικά τις ελάχιστες τιμές. Το κύριο πρόβλημα με τη φόρτιση των EV εμφανίζεται στις ώρες αιχμής επομένως ο περιορισμός των δεικτών ασυμμετρίας που προκαλεί εκείνες τις ώρες την καθιστά μια αποδοτική λύση.
5. Ο συνδυασμός ρυθμιστή και Smart Charging προκαλεί περαιτέρω βελτίωση των μεγίστων τιμών (η μείωση φτάνει το 30% ενώ όπως είδαμε πριν η χρήση μόνο του ρυθμιστή μειώνει τις μέγιστες τιμές το πολύ κατά 20%), ενώ η μείωση των μέσων τιμών παραμένει ίδια με την αντίστοιχη της χρήσης μόνο του ρυθμιστή. Είναι δηλαδή μια πάρα πολύ αποδοτική λύση που συνδυάζει τα θετικά των δύο προηγούμενων.

Από τις γραφικές παραστάσεις 6.9 και 6.10 βλέπουμε πως σε όλες τις περιπτώσεις η απόσταση από τον άπειρο ζυγό είναι πολύ σημαντική όσον αφορά την ασυμμετρία των τάσεων. Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα μας είτε έχουμε EV είτε δεν έχουμε, είτε χρησιμοποιούμε τεχνικές βελτίωσης της τάσης, είτε όχι, οι δείκτες ασυμμετρίας χωρίζονται σε δύο ομάδες τιμών ανάλογα με το πόσο μακριά βρίσκονται από τον άπειρο ζυγό. Οι δύο αυτές ομάδες τιμών είναι για αποστάσεις 2000-3000 feet και 4000-5000 feet. Όσο απομακρυνόμαστε από τον άπειρο ζυγό, παρουσιάζονται όχι μόνο σημαντικότερες πτώσεις τάσης αλλά και σημαντικότερες ασυμμετρίες μεταξύ των τάσεων των ζυγών.

Για την επίδραση της φόρτισης EV στις απώλειες ισχύος έχουμε ήδη αναφερθεί προηγουμένως. Σε επόμενη παράγραφο θα την αναλύσουμε περισσότερο.

6.8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ EV

6.8.1 Εισαγωγή

Στις προηγούμενες παραγράφους είδαμε πως επηρεάζει η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων τις ασυμμετρίες των τάσεων και τις απώλειες ισχύος. Το πιο σημαντικό μας συμπέρασμα ήταν ότι στη προσπάθειά μας να μειώσουμε τις πτώσεις τάσης στο δίκτυο με τη

χρήση ρυθμιστή αντιμετωπίζαμε πολύ αποδοτικά τις ασυμμετρίες των τάσεων. Συγκεκριμένα η χρήση του ρυθμιστή είναι πιο αποδοτική ακόμα και από τη βελτιστοποίηση Smart Charging που αναπτύχθηκε ακριβώς γι' αυτό το σκοπό. Το ερώτημα που θα μας απασχολήσει σε αυτή τη παράγραφο είναι το εξής: Τι θα γινόταν αν αυξανόταν η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο; Πόσο περισσότερο θα επηρεαζόταν οι ασυμμετρίες των τάσεων και οι απώλειες ισχύος, και πόσο αποδοτικοί θα είναι οι τρόποι αντιμετώπισης. Στην αρχική περίπτωση η διείσδυση ήταν 5,8%. Στις επόμενες παραγράφους θα εξετάσουμε την επίδραση της διπλάσιας (11,6 %), τριπλάσιας (17,4 %) και τετραπλάσιας (23,2 %) διείσδυσης (διπλασιάζοντας, τριπλασιάζοντας και τετραπλασιάζοντας αντίστοιχα την αρχική καμπύλη ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων που φαίνεται στον Πίνακα 6.16) καθώς και τους τρεις τρόπους αντιμετώπισης κάθε φορά. Τα ηλεκτρικά οχήματα κατανέμονται και πάλι αναλογικά πρώτα ανά φάση και μετά ανά κόμβο. Αξίζει να αναφέρουμε ότι οι καμπύλες ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων που προκύπτουν κατά τη βελτιστοποίηση Smart Charging δεν είναι πολλαπλάσιες της βελτιστοποίησης στην απλή διείσδυση (Πίνακες 6.27 έως 6.29).

Στη συνέχεια, παραθέτουμε μόνο τις ελάχιστες, τις μέσες και τις μέγιστες τιμές για τους δείκτες ασυμμετρίας και τις απώλειες ισχύος. Οι συγκρίσεις τιμών θα γίνουν αργότερα. Για ευκολία στη δημιουργία πινάκων και γραφικών παραστάσεων την περίπτωση διπλάσιας διείσδυσης (11,6 %) θα τη συμβολίζουμε με 2xEV, την περίπτωση τριπλάσιας διείσδυσης (17,4 %) με 3xEV και την περίπτωση της τετραπλάσιας διείσδυσης (23,2 %) με 4xEV.

6.8.2 Αποτελέσματα για διπλάσια διείσδυση (11,6 %)

Πίνακας 6.40: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με 2xEV)

ρ με 2xEV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001582	0,018168	0,007368
645	0,001650	0,015700	0,006860
646	0,001648	0,014362	0,006571
633	0,001423	0,018413	0,007356
634	0,001335	0,020355	0,007390
1	0,002015	0,023867	0,009444
2	0,003391	0,041357	0,015532
671	0,003391	0,041357	0,015532
680	0,003391	0,041357	0,015532
692	0,003387	0,041354	0,015528
675	0,003420	0,043482	0,016120

Πίνακας 6.41: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ϵ (με 2xEV)

ϵ με 2xEV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001248	0,038273	0,013868
645	0,001464	0,038140	0,013905
646	0,001463	0,038412	0,013910
633	0,000868	0,038849	0,013846
634	0,001965	0,040802	0,013858
1	0,002089	0,048745	0,018002
2	0,004869	0,081708	0,030242
671	0,004869	0,081708	0,030242

680	0,004869	0,081708	0,030242
692	0,004873	0,081699	0,030240
675	0,004884	0,084053	0,030647

Πίνακας 6.42: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με 2xEV)

Απώλειες ισχύος με 2xEV			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	2,53	190,56	51,69
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	1458,93	187,46
Total demand (kW) (EV+Load)	470,12	4045,25	1802,16
Power losses/Total demand	0,005360	0,047107	0,021812

6.8.3 Αποτελέσματα με ρυθμιστή για διπλάσια διείσδυση EV

Πίνακας 6.43: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με ρυθμιστή με 2xEV)

ρ με ρυθμιστή με 2xEV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,000216	0,008257	0,003628
645	0,000187	0,007243	0,002972
646	0,000240	0,007564	0,002771
633	0,000200	0,008180	0,003645
634	0,000506	0,013938	0,005126
1	0,000542	0,011767	0,005249
2	0,001233	0,024868	0,010483
671	0,001233	0,024868	0,010483
680	0,001233	0,024868	0,010483
692	0,001235	0,024871	0,010486
675	0,001336	0,026603	0,011064

Πίνακας 6.44: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ε (με ρυθμιστή με 2xEV)

ε με ρυθμιστή με 2xEV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001363	0,021106	0,008975
645	0,001424	0,020725	0,009024
646	0,001433	0,020557	0,009001
633	0,001047	0,021294	0,008752
634	0,000525	0,022496	0,008665
1	0,002363	0,028988	0,012417
2	0,003966	0,054406	0,022804
671	0,003966	0,054406	0,022804
680	0,003966	0,054406	0,022804
692	0,003960	0,054417	0,022803
675	0,003762	0,055760	0,023045

Πίνακας 6.45: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με ρυθμιστή με 2xEV)

Απώλειες ισχύος με ρυθμιστή με 2xEV			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	2,43	154,69	44,67
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	1458,93	187,46
Total demand (kW) (EV+Load)	470,12	4045,25	1802,16
Power losses/Total demand	0,005149	0,038239	0,019214

6.8.4 Αποτελέσματα για διπλάσια διεύθυνση EV με βελτιστοποίηση Smart Charging

Πίνακας 6.46: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με 2xEV SCh)

ρ με 2xEV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,002260	0,014123	0,007313
645	0,002548	0,013988	0,006793
646	0,002537	0,013836	0,006516
633	0,002243	0,013942	0,007289
634	0,002216	0,011788	0,007234
1	0,002571	0,017535	0,009354
2	0,003578	0,027449	0,015320
671	0,003578	0,027449	0,015320
680	0,003578	0,027449	0,015320
692	0,003578	0,027447	0,015317
675	0,003420	0,027994	0,015899

Πίνακας 6.47: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ε (με 2xEV SCh)

ε με 2xEV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,003534	0,022311	0,013624
645	0,003819	0,023402	0,013655
646	0,003827	0,023497	0,013676
633	0,003297	0,022566	0,013525
634	0,002664	0,024510	0,013152
1	0,004732	0,029272	0,017672
2	0,008430	0,051980	0,029614
671	0,008430	0,051980	0,029615
680	0,008430	0,051980	0,029615
692	0,008430	0,051977	0,029612
675	0,008196	0,054386	0,029977

Πίνακας 6.48: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με 2xEV SCh)

Απώλειες ισχύος με 2xEV SCh			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	8,17	137,29	45,84
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	491,19	187,42

Total demand (kW) (EV+Load)	887,89	3362,91	1802,12
Power losses/Total demand	0,009197	0,040825	0,021466

6.8.5 Αποτελέσματα με ρυθμιστή για διπλάσια διείσδυση EV με βελτιστοποίηση Smart Charging

Πίνακας 6.49: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με ρυθμιστή με 2xEV SCh)

ρ με ρυθμιστή με 2xEV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,000814	0,007113	0,003752
645	0,000539	0,005812	0,003013
646	0,000408	0,005359	0,002787
633	0,000747	0,007058	0,003769
634	0,000506	0,008814	0,005085
1	0,000659	0,009976	0,005415
2	0,002351	0,018278	0,010650
671	0,002351	0,018278	0,010650
680	0,002351	0,018278	0,010650
692	0,002351	0,018280	0,010652
675	0,002322	0,018886	0,011236

Πίνακας 6.50: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ϵ (με ρυθμιστή με 2xEV SCh)

ϵ με ρυθμιστή με 2xEV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001363	0,014355	0,008725
645	0,001424	0,014980	0,008835
646	0,001433	0,015013	0,008837
633	0,001047	0,014037	0,008437
634	0,000525	0,018656	0,007964
1	0,002658	0,019449	0,012180
2	0,006357	0,038486	0,022532
671	0,006357	0,038486	0,022532
680	0,006357	0,038486	0,022532
692	0,006357	0,038488	0,022532
675	0,006224	0,040384	0,022762

Πίνακας 6.51: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με ρυθμιστή με 2xEV SCh)

Απώλειες ισχύος με ρυθμιστή με 2xEV SCh			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	7,75	114,28	40,25
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	491,19	187,42

Total demand (kW) (EV+Load)	887,89	3362,91	1802,12
Power losses/Total demand	0,008733	0,033983	0,019087

6.8.6 Αποτελέσματα για τριπλάσια διείσδυση (17,4 %)

Πίνακας 6.52: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με 3xEV)

ρ με 3xEV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001605	0,022685	0,007791
645	0,001675	0,020014	0,007250
646	0,001673	0,018543	0,006938
633	0,001447	0,022987	0,007783
634	0,001374	0,025552	0,007854
1	0,002043	0,029594	0,009988
2	0,003435	0,050802	0,016433
671	0,003435	0,050802	0,016433
680	0,003435	0,050802	0,016433
692	0,003432	0,050803	0,016429
675	0,003420	0,053419	0,017062

Πίνακας 6.53: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ε (με 3xEV)

ε με 3xEV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001232	0,048623	0,014749
645	0,001450	0,048441	0,014735
646	0,001446	0,048795	0,014725
633	0,000857	0,049361	0,014746
634	0,002033	0,051955	0,014852
1	0,002072	0,061834	0,019152
2	0,004868	0,103455	0,032219
671	0,004868	0,103455	0,032219
680	0,004868	0,103455	0,032219
692	0,004872	0,103451	0,032217
675	0,004879	0,106217	0,032647

Πίνακας 6.54: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με 3xEV)

Απώλειες ισχύος με 3xEV			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	2,59	267,59	59,22
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	2188,40	281,18
Total demand (kW) (EV+Load)	476,52	4774,72	1895,89
Power losses/Total demand	0,005399	0,056044	0,022721

6.8.7 Αποτελέσματα με ρυθμιστή για τριπλάσια διείσδυση EV

Πίνακας 6.55: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με ρυθμιστή με 3xEV)

ρ με ρυθμιστή με 3xEV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,000241	0,010308	0,003734
645	0,000191	0,008862	0,003030
646	0,000238	0,008942	0,002812
633	0,000217	0,010298	0,003762
634	0,000506	0,017310	0,005354
1	0,000543	0,014863	0,005444
2	0,001277	0,030539	0,010931
671	0,001277	0,030539	0,010931
680	0,001277	0,030539	0,010931
692	0,001279	0,030538	0,010933
675	0,001381	0,032619	0,011546

Πίνακας 6.56: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ϵ (με ρυθμιστή με 3xEV)

ϵ με ρυθμιστή με 3xEV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001363	0,027112	0,009442
645	0,001424	0,026498	0,009446
646	0,001433	0,026356	0,009399
633	0,001047	0,027453	0,009210
634	0,000525	0,028977	0,009119
1	0,002389	0,036895	0,013076
2	0,003997	0,067912	0,024020
671	0,003997	0,067912	0,024021
680	0,003997	0,067912	0,024021
692	0,003991	0,067916	0,024020
675	0,003786	0,069465	0,024260

Πίνακας 6.57: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με ρυθμιστή με 3xEV)

Απώλειες ισχύος με ρυθμιστή με 3xEV			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	2,49	209,68	50,34
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	2188,40	281,18
Total demand (kW) (EV+Load)	476,52	4774,72	1895,89
Power losses/Total demand	0,005188	0,043915	0,019841

6.8.8 Αποτελέσματα για τριπλάσια διείσδυση EV με βελτιστοποίηση Smart Charging

Πίνακας 6.58: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με 3xEV SCh)

ρ με 3xEV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,002260	0,014672	0,007624
645	0,002548	0,014472	0,007064
646	0,002612	0,014273	0,006767
633	0,002243	0,014539	0,007609
634	0,002547	0,012636	0,007589
1	0,002571	0,018252	0,009760
2	0,003578	0,028667	0,016000
671	0,003578	0,028667	0,016000
680	0,003578	0,028667	0,016000
692	0,003578	0,028665	0,015998
675	0,003420	0,029230	0,016616

Πίνακας 6.59: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ε (με 3xEV SCh)

ε με 3xEV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,003534	0,023079	0,014239
645	0,003819	0,024297	0,014232
646	0,003827	0,024401	0,014246
633	0,003297	0,022887	0,014159
634	0,002664	0,024510	0,013812
1	0,004732	0,030099	0,018470
2	0,008430	0,052414	0,030962
671	0,008430	0,052414	0,030962
680	0,008430	0,052414	0,030962
692	0,008430	0,052414	0,030959
675	0,008196	0,053791	0,031324

Πίνακας 6.60: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με 3xEV SCh)

Απώλειες ισχύος με 3xEV SCh			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	9,35	142,22	48,59
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	756,39	281,13
Total demand (kW) (EV+Load)	939,16	3441,13	1895,83
Power losses/Total demand	0,009956	0,041328	0,022135

6.8.9 Αποτελέσματα με ρυθμιστή για τριπλάσια διείσδυση EV με βελτιστοποίηση Smart Charging

Πίνακας 6.61: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με ρυθμιστή με 3xEV SCh)

ρ με ρυθμιστή με 3xEV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,000814	0,007524	0,003923
645	0,000539	0,006228	0,003159
646	0,000408	0,005760	0,002915
633	0,000747	0,007488	0,003936
634	0,000506	0,008814	0,005254
1	0,000659	0,010508	0,005700
2	0,002351	0,019174	0,011198
671	0,002351	0,019174	0,011198
680	0,002351	0,019174	0,011198
692	0,002351	0,019175	0,011200
675	0,002322	0,019785	0,011811

Πίνακας 6.62: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ε (με ρυθμιστή με 3xEV SCh)

ε με ρυθμιστή με 3xEV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001363	0,014700	0,009440
645	0,001424	0,015247	0,009492
646	0,001433	0,015277	0,009476
633	0,001047	0,014404	0,009156
634	0,000525	0,018656	0,008612
1	0,002658	0,020719	0,013057
2	0,006357	0,039502	0,023881
671	0,006357	0,039503	0,023881
680	0,006357	0,039503	0,023881
692	0,006357	0,039497	0,023881
675	0,006224	0,040041	0,024097

Πίνακας 6.63: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με ρυθμιστή με 3xEV SCh)

Απώλειες ισχύος με ρυθμιστή με 3xEV SCh			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	8,78	118,24	42,65
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	756,39	281,13
Total demand (kW) (EV+Load)	939,16	3441,13	1895,83
Power losses/Total demand	0,009351	0,034360	0,019671

6.8.10 Αποτελέσματα για τετραπλάσια διείσδυση (23,2 %)

Πίνακας 6.64: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με 4xEV)

ρ με 4xEV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001628	0,028007	0,008285
645	0,001700	0,025223	0,007714
646	0,001697	0,023596	0,007378
633	0,001471	0,028433	0,008278
634	0,001408	0,031805	0,008392
1	0,002071	0,036342	0,010619
2	0,003480	0,061963	0,017468
671	0,003480	0,061963	0,017468
680	0,003480	0,061963	0,017468
692	0,003476	0,061959	0,017465
675	0,003420	0,065129	0,018144

Πίνακας 6.65: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ε (με 4xEV)

ε με 4xEV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001216	0,061446	0,015797
645	0,001438	0,061244	0,015731
646	0,001430	0,061685	0,015708
633	0,000849	0,062381	0,015811
634	0,002102	0,065810	0,016017
1	0,002057	0,078079	0,020513
2	0,004868	0,130606	0,034550
671	0,004868	0,130606	0,034550
680	0,004868	0,130606	0,034550
692	0,004873	0,130595	0,034548
675	0,004874	0,133992	0,035010

Πίνακας 6.66: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με 4xEV)

Απώλειες ισχύος με 4xEV			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	2,65	368,62	68,54
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	2917,87	374,91
Total demand (kW) (EV+Load)	482,92	5504,19	1989,62
Power losses/Total demand	0,005440	0,066971	0,023767

6.8.11 Αποτελέσματα με ρυθμιστή για τετραπλάσια διείσδυση EV

Πίνακας 6.67: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με ρυθμιστή με 4xEV)

ρ με ρυθμιστή με 4xEV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,000266	0,011054	0,003838
645	0,000199	0,009496	0,003136
646	0,000238	0,009619	0,002920
633	0,000234	0,011054	0,003843
634	0,000506	0,019532	0,005366
1	0,000659	0,016386	0,005656
2	0,002351	0,034594	0,011408
671	0,002351	0,034594	0,011408
680	0,002351	0,034594	0,011408
692	0,002351	0,034592	0,011410
675	0,002322	0,037021	0,012049

Πίνακας 6.68: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ε (με ρυθμιστή με 4xEV)

ε με ρυθμιστή με 4xEV			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001335	0,033621	0,009990
645	0,001424	0,032578	0,009949
646	0,001433	0,032322	0,009878
633	0,000852	0,033928	0,009737
634	0,000525	0,035794	0,009683
1	0,002162	0,045346	0,013832
2	0,004847	0,082448	0,025383
671	0,004847	0,082449	0,025383
680	0,004847	0,082449	0,025383
692	0,004846	0,082458	0,025383
675	0,004850	0,084126	0,025622

Πίνακας 6.69: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με ρυθμιστή με 4xEV)

Απώλειες ισχύος με ρυθμιστή με 4xEV			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	2,54	276,57	56,96
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	2917,87	374,91
Total demand (kW) (EV+Load)	482,92	5504,19	1989,62
Power losses/Total demand	0,005212	0,050247	0,020509

6.8.12 Αποτελέσματα για τετραπλάσια διείσδυση EV με βελτιστοποίηση Smart Charging

Πίνακας 6.70: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με 4xEV SCh)

ρ με 4xEV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,002260	0,014798	0,007923
645	0,002548	0,014537	0,007319
646	0,002612	0,014300	0,007000
633	0,002243	0,014701	0,007911
634	0,002547	0,013340	0,007889
1	0,002571	0,018432	0,010152
2	0,003578	0,029020	0,016659
671	0,003578	0,029020	0,016659
680	0,003578	0,029020	0,016659
692	0,003578	0,029018	0,016657
675	0,003420	0,029682	0,017310

Πίνακας 6.71: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ε (με 4xEV SCh)

ε με 4xEV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,003534	0,023380	0,014809
645	0,003819	0,024609	0,014734
646	0,003827	0,024724	0,014731
633	0,003297	0,023327	0,014745
634	0,002664	0,024510	0,014455
1	0,004732	0,030585	0,019230
2	0,008430	0,053114	0,032288
671	0,008430	0,053114	0,032289
680	0,008430	0,053114	0,032289
692	0,008430	0,053114	0,032285
675	0,008196	0,053947	0,032653

Πίνακας 6.72: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με 4xEV SCh)

Απώλειες ισχύος με 4xEV SCh			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	9,35	145,24	51,48
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	1014,55	374,83
Total demand (kW) (EV+Load)	939,16	3494,41	1989,54
Power losses/Total demand	0,009956	0,041562	0,022813

6.8.13 Αποτελέσματα με ρυθμιστή για τετραπλάσια διείσδυση EV με βελτιστοποίηση Smart Charging

Πίνακας 6.73: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ρ (με ρυθμιστή με 4xEV SCh)

ρ με ρυθμιστή με 4xEV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,000814	0,007647	0,003830
645	0,000539	0,006321	0,003076
646	0,000408	0,005829	0,002835
633	0,000747	0,007623	0,003844
634	0,000506	0,008814	0,005180
1	0,000659	0,010664	0,005675
2	0,002351	0,019449	0,011387
671	0,002351	0,019449	0,011387
680	0,002351	0,019449	0,011387
692	0,002351	0,019451	0,011389
675	0,002322	0,020077	0,012027

Πίνακας 6.74: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές δείκτη ε (με ρυθμιστή με 4xEV SCh)

ε με ρυθμιστή με 4xEV SCh			
Ζυγός	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
632	0,001363	0,014638	0,010081
645	0,001424	0,014645	0,010060
646	0,001433	0,014610	0,010003
633	0,001047	0,014480	0,009795
634	0,000525	0,018656	0,009181
1	0,002658	0,020777	0,013859
2	0,006357	0,039730	0,025150
671	0,006357	0,039731	0,025150
680	0,006357	0,039731	0,025150
692	0,006357	0,039731	0,025149
675	0,006224	0,040282	0,025338

Πίνακας 6.75: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες απώλειες ισχύος (με ρυθμιστή με 4xEV SCh)

Απώλειες ισχύος με ρυθμιστή με 4xEV SCh			
	ελάχιστο	μέγιστο	μέσο
Power losses (kW)	8,78	120,70	45,17
Load demand (kW)	456,31	3180,42	1614,71
EV demand (kW)	0,00	1014,55	374,83
Total demand (kW) (EV+Load)	939,16	3494,41	1989,54
Power losses/Total demand	0,009351	0,034542	0,020256

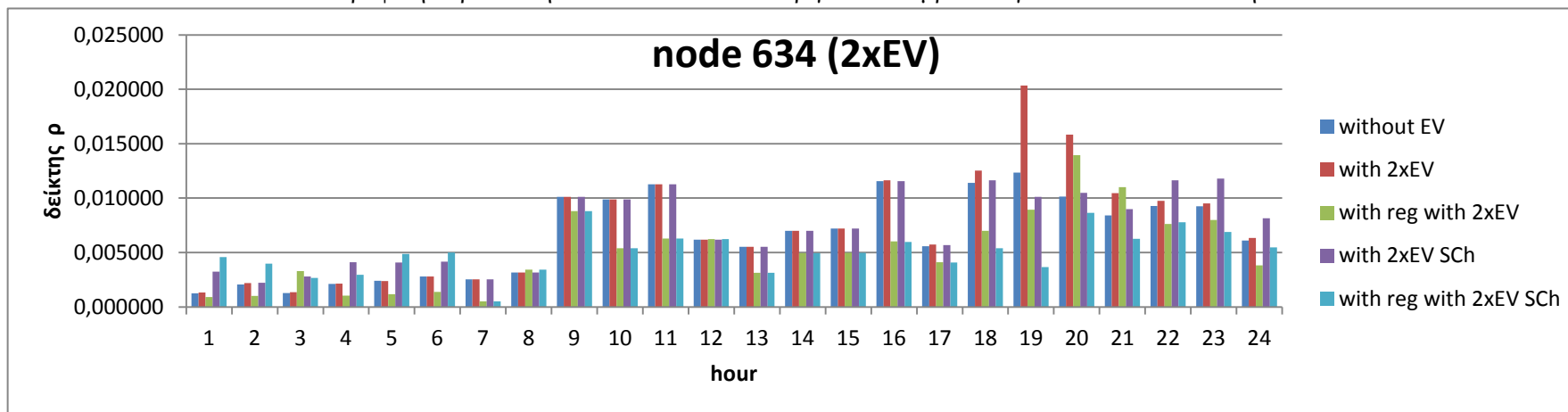
6.8.14 Γραφικές παραστάσεις για μεγαλύτερη διείσδυση EV(διπλάσια (11,6 %), τριπλάσια (17,4 %) και τετραπλάσια (23,2 %))

Στην παράγραφο αυτή θα παραθέσουμε ορισμένες γραφικές παραστάσεις για καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων μας. Συγκεκριμένα, θα παραθέσουμε το σύνολο των δεικτών ρ και ε για όλες τις ώρες για τους κόμβους 634 και 675 για διπλάσια, τριπλάσια και τετραπλάσια διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων.

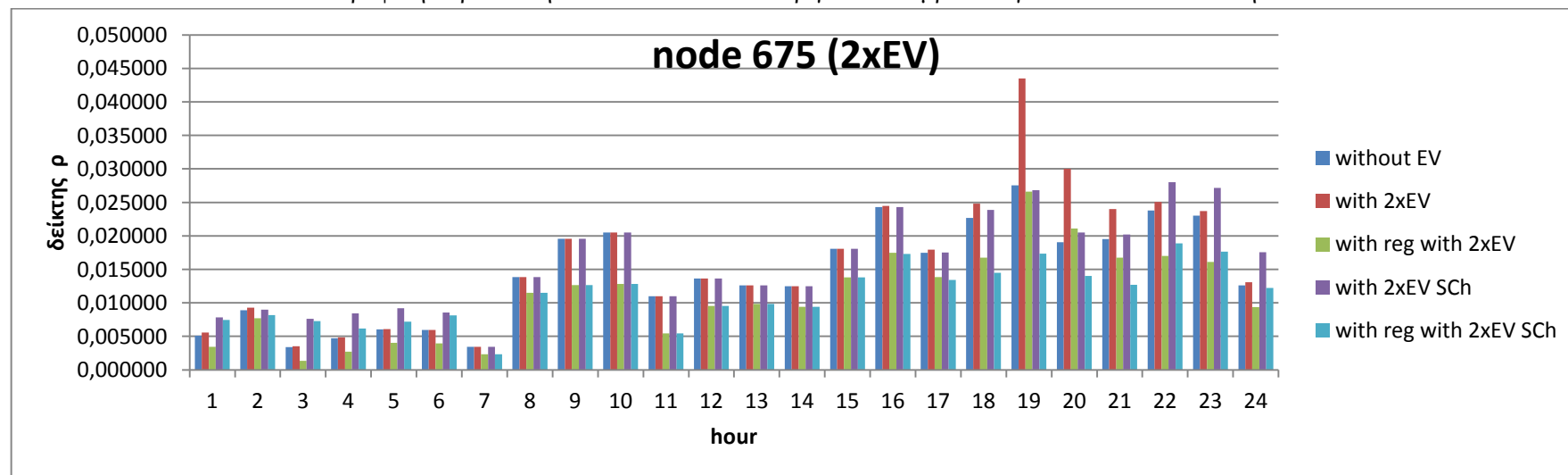
Έπειτα θα ακολουθήσουν οι γραφικές παραστάσεις των μεγίστων και μέσων δεικτών ρ και ε σε σχέση με την απόσταση από τον άπειρο ζυγό όπως κάναμε και προηγουμένως για την αρχική φόρτιση. Όπως θα δούμε παρακάτω, οι γραφικές αυτές παραστάσεις επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα της διείσδυσης 5,8 %. Δηλαδή και πάλι η απόσταση από τον άπειρο ζυγό επηρεάζει την ασυμμετρία των τάσεων, και παρατηρούνται όπως και προηγουμένως δύο ομάδες τιμών. Η πρώτη ομάδα για αποστάσεις 2000 – 3000 feet από τον άπειρο ζυγό, και η δεύτερη για αποστάσεις 4000 – 5000 feet από τον άπειρο ζυγό.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων και η αξιολόγηση τους θα γίνει σε επόμενη παράγραφο. Εδώ απλά θα παραθέσουμε τις γραφικές παραστάσεις που αναφέραμε.

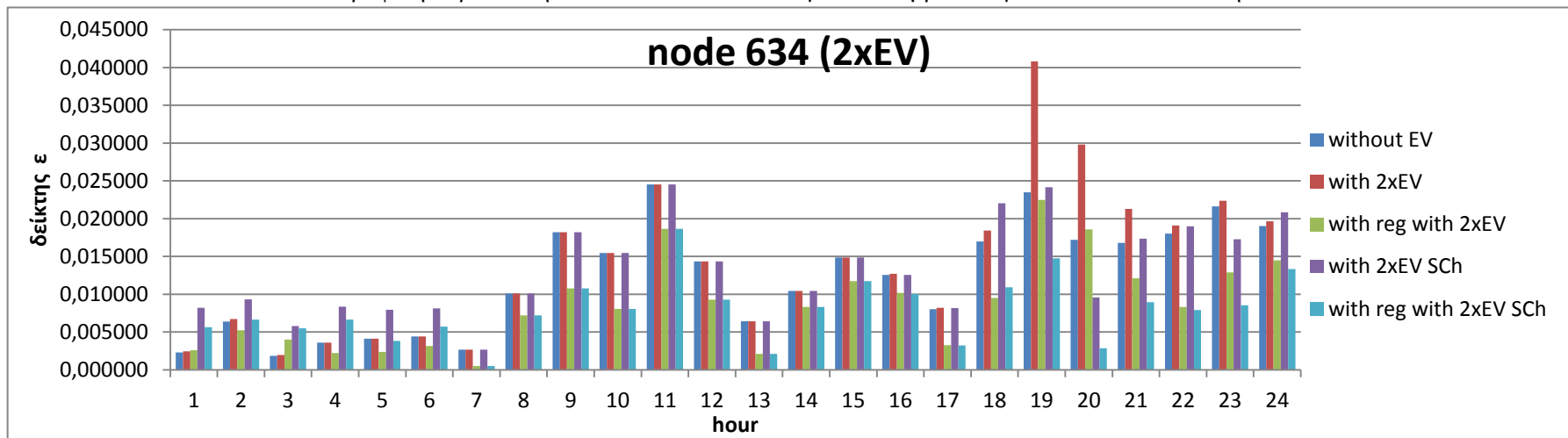
Γραφική παράσταση 6.11: Σύνολο δεικτών ρ για τον κόμβο 634 για διπλάσια διείσδυση



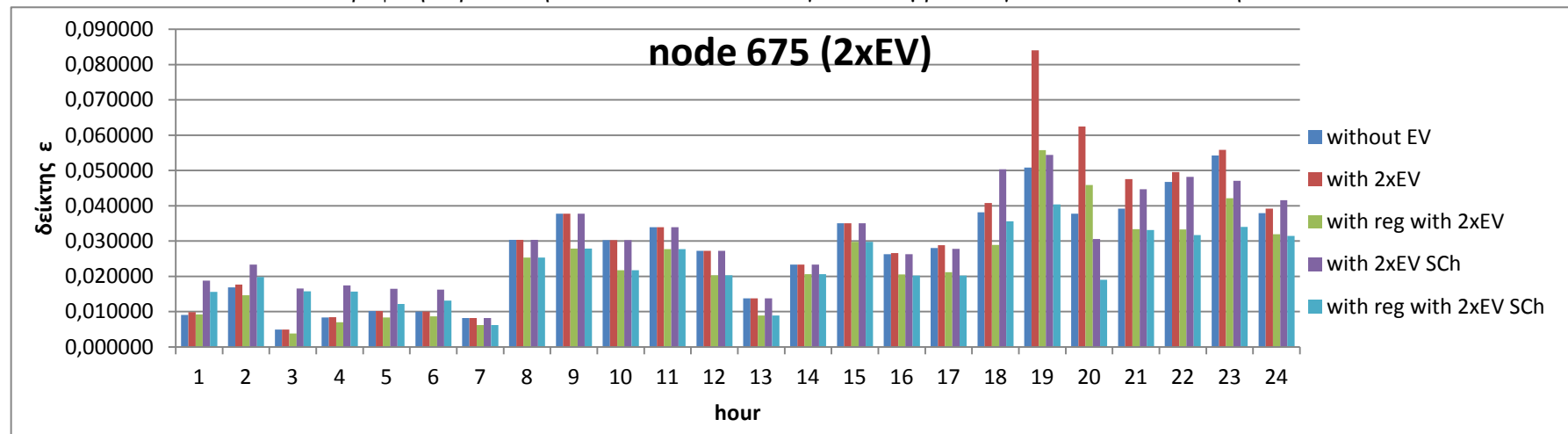
Γραφική παράσταση 6.12: Σύνολο δεικτών ρ για τον κόμβο 675 για διπλάσια διείσδυση



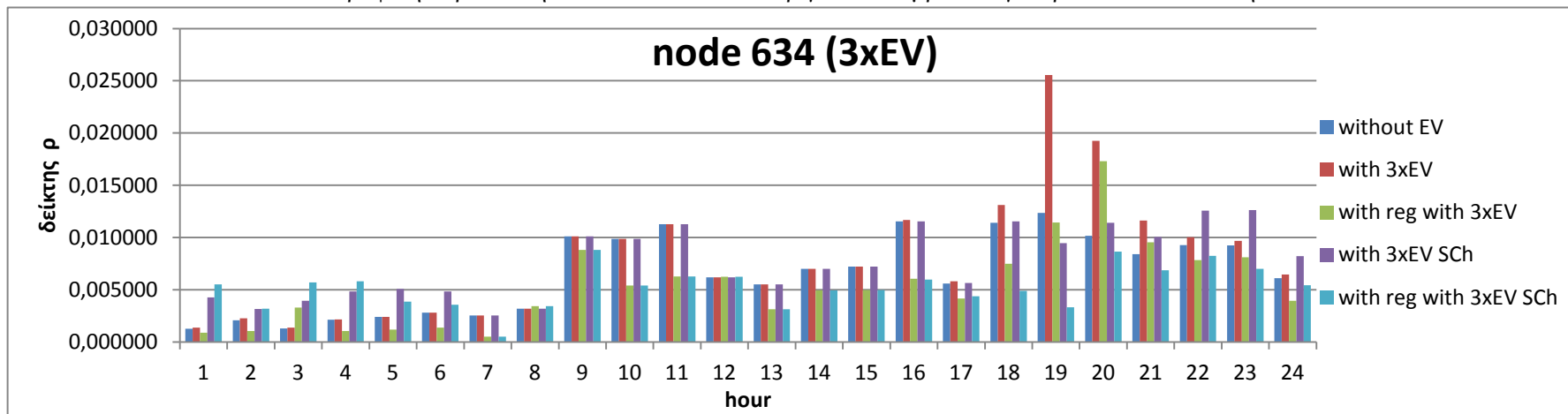
Γραφική παράσταση 6.13: Σύνολο δεικτών ε για τον κόμβο 634 για διπλάσια διείσδυση



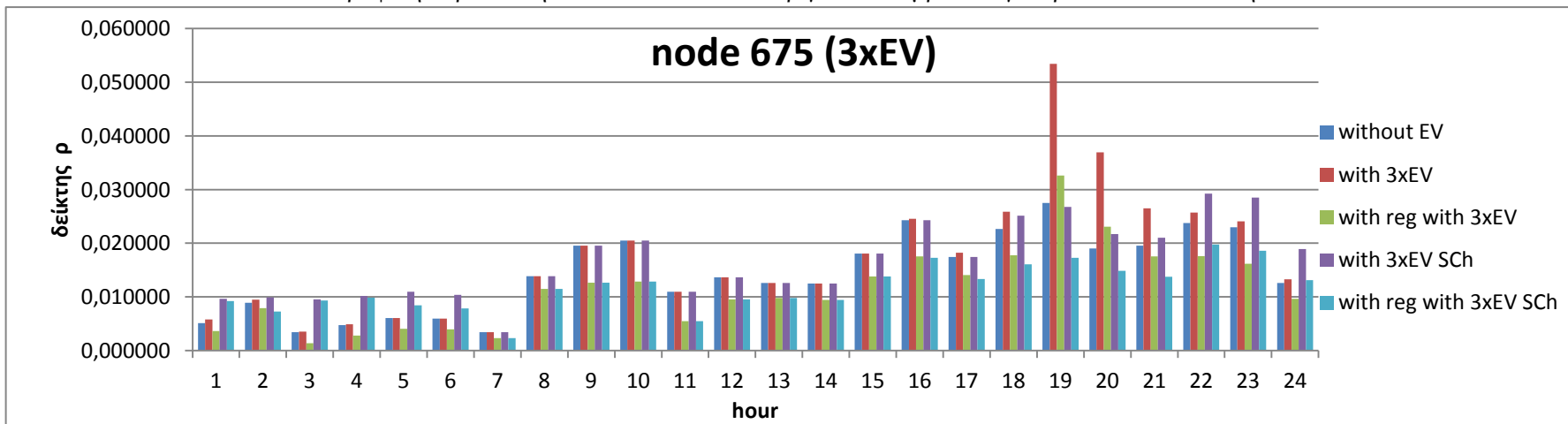
Γραφική παράσταση 6.14: Σύνολο δεικτών ε για τον κόμβο 675 για διπλάσια διείσδυση



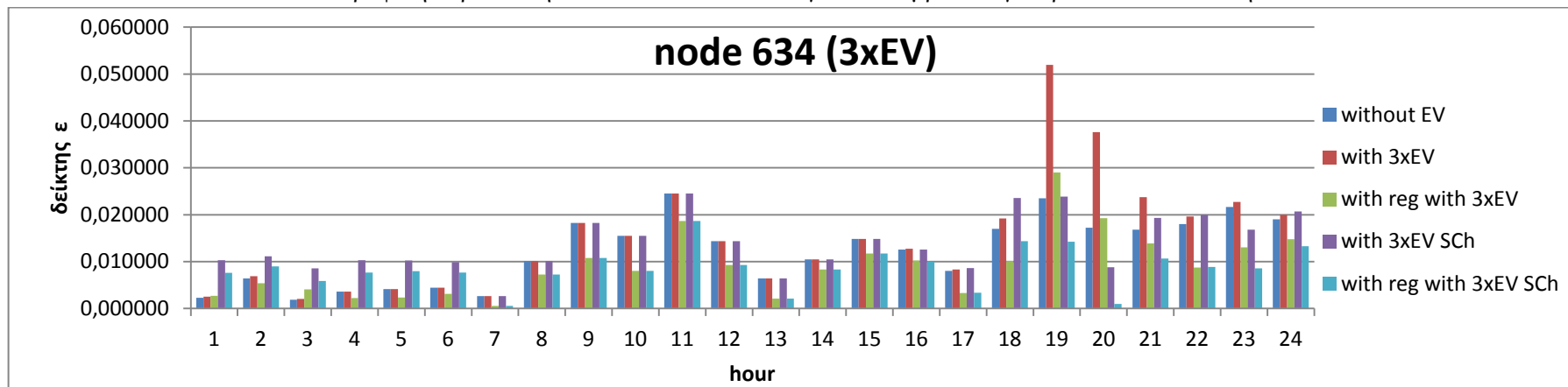
Γραφική παράσταση 6.15: Σύνολο δεικτών ρ για τον κόμβο 634 για τριπλάσια διείσδυση



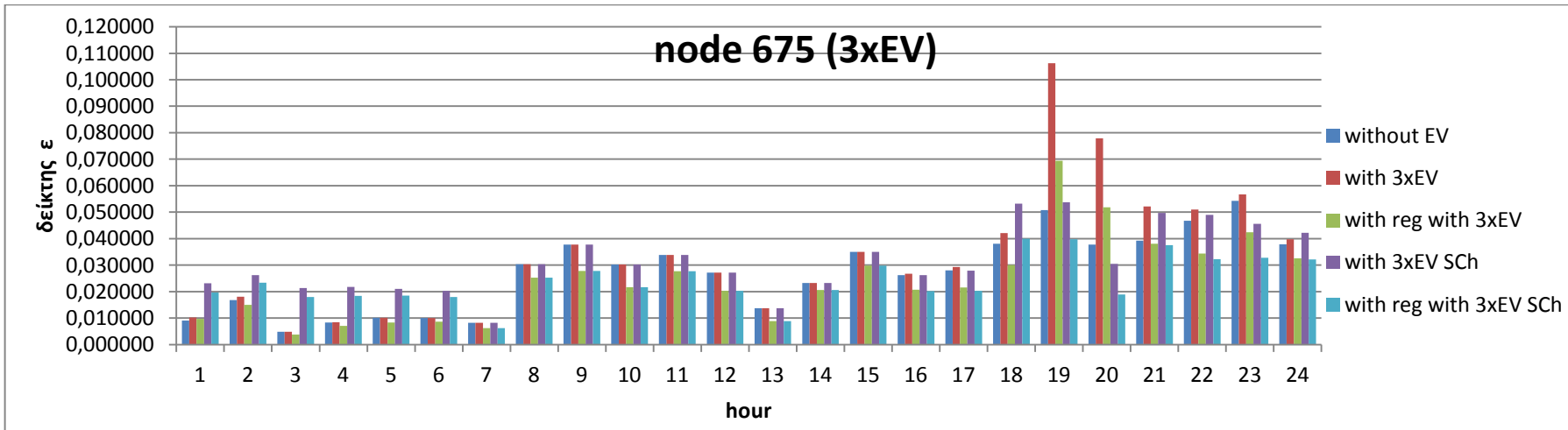
Γραφική παράσταση 6.16: Σύνολο δεικτών ρ για τον κόμβο 675 για τριπλάσια διείσδυση



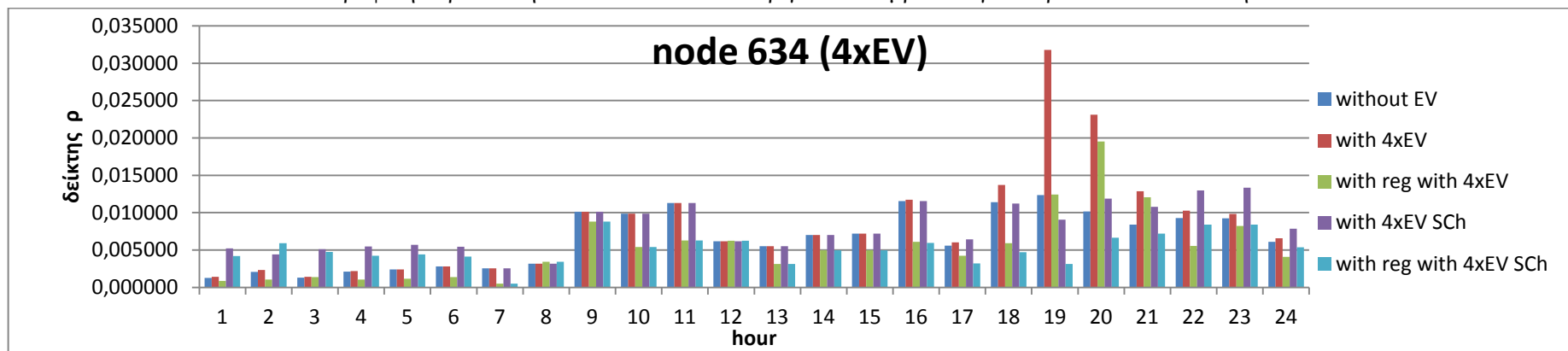
Γραφική παράσταση 6.17: Σύνολο δεικτών ε για τον κόμβο 634 για τριπλάσια διείσδυση



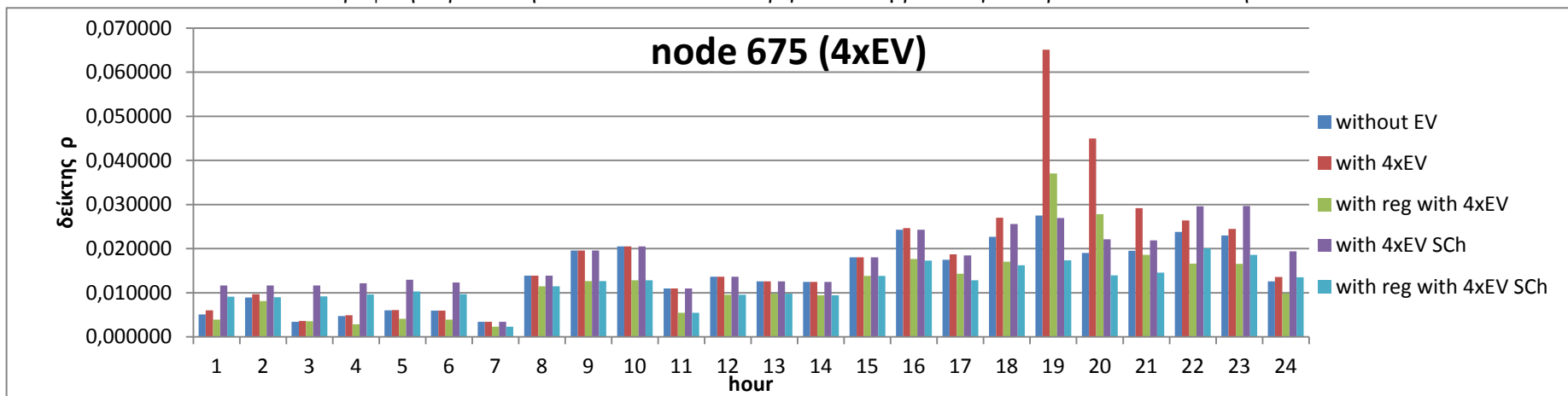
Γραφική παράσταση 6.18: Σύνολο δεικτών ε για τον κόμβο 675 για τριπλάσια διείσδυση



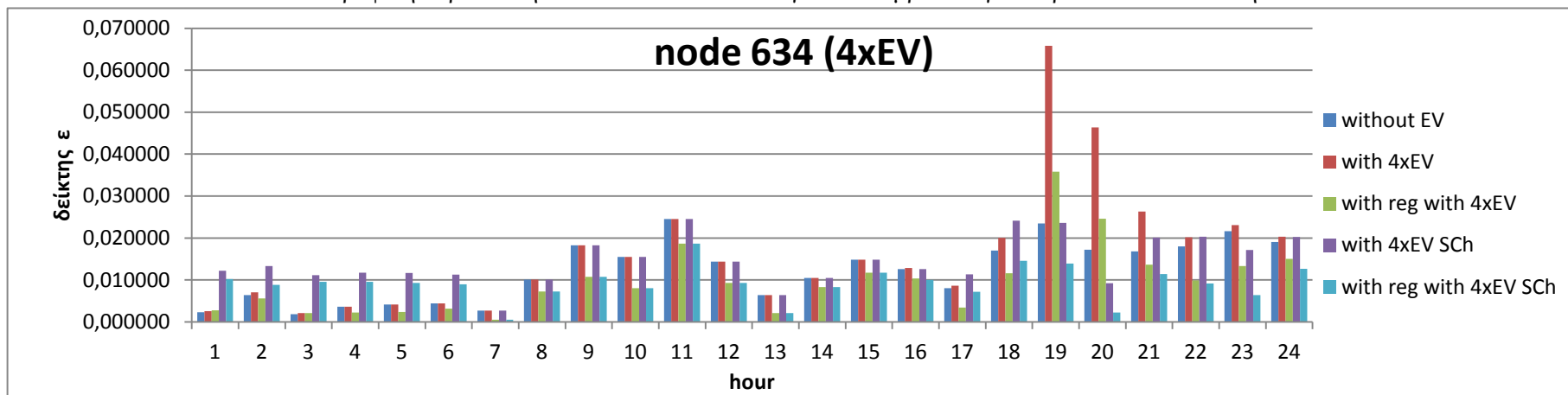
Γραφική παράσταση 6.19: Σύνολο δεικτών ρ για τον κόμβο 634 για τετραπλάσια διείσδυση



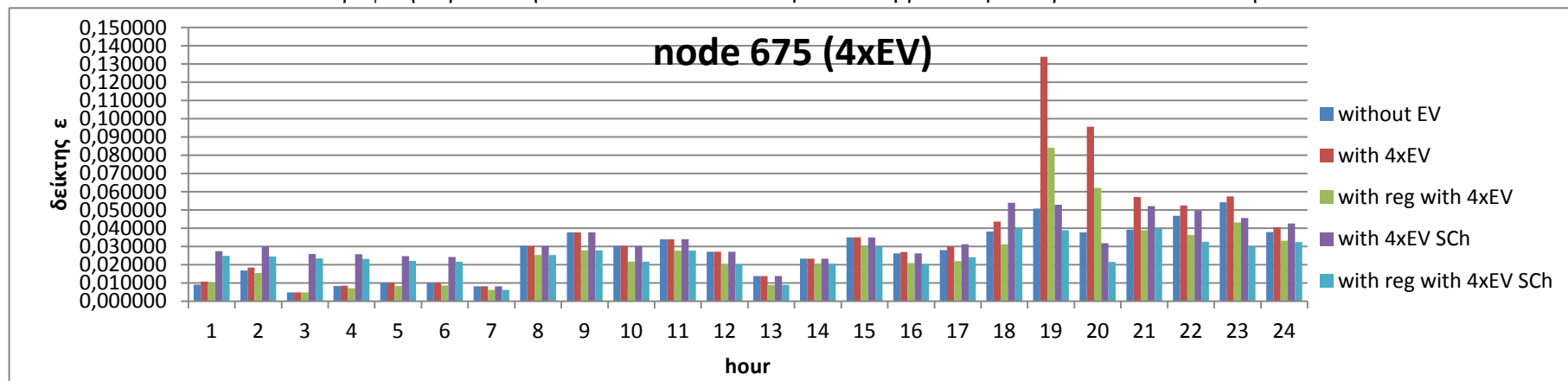
Γραφική παράσταση 6.20: Σύνολο δεικτών ρ για τον κόμβο 675 για τετραπλάσια διείσδυση



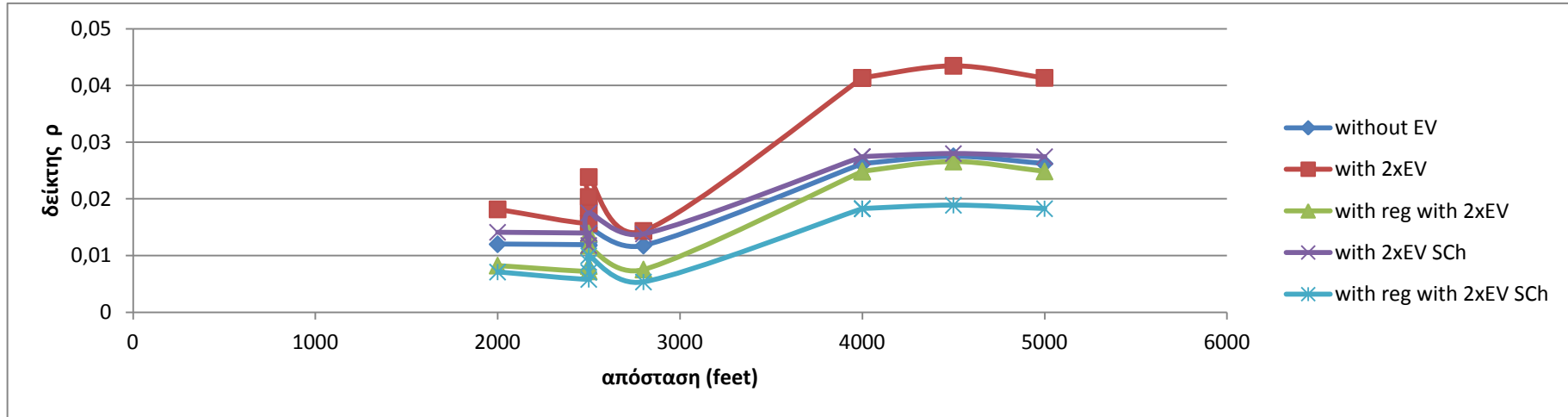
Γραφική παράσταση 6.21: Σύνολο δεικτών ε για τον κόμβο 634 για τετραπλάσια διείσδυση



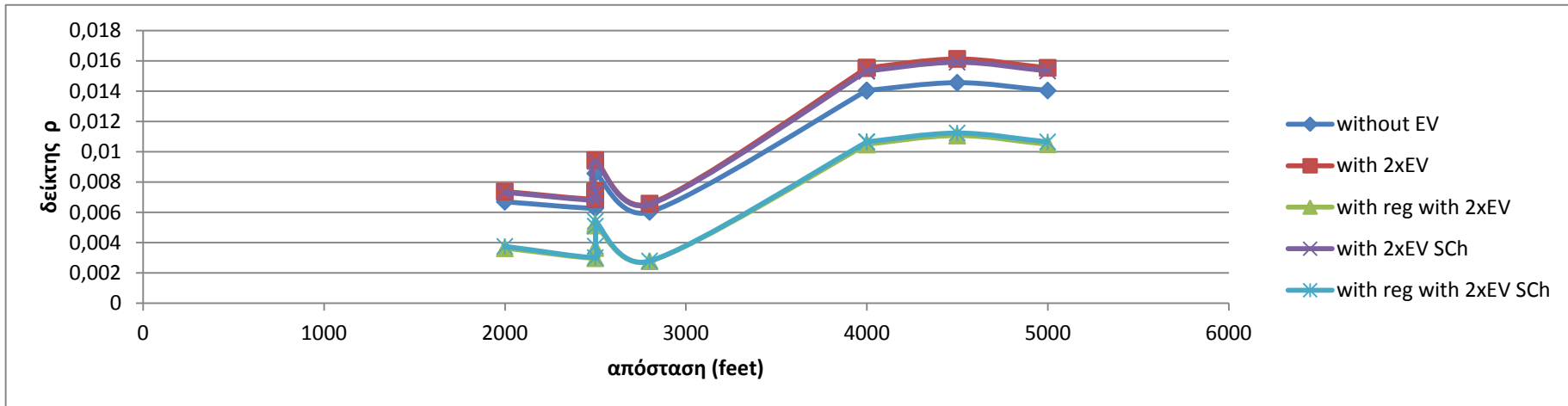
Γραφική παράσταση 6.22: Σύνολο δεικτών ε για τον κόμβο 675 για τετραπλάσια διείσδυση



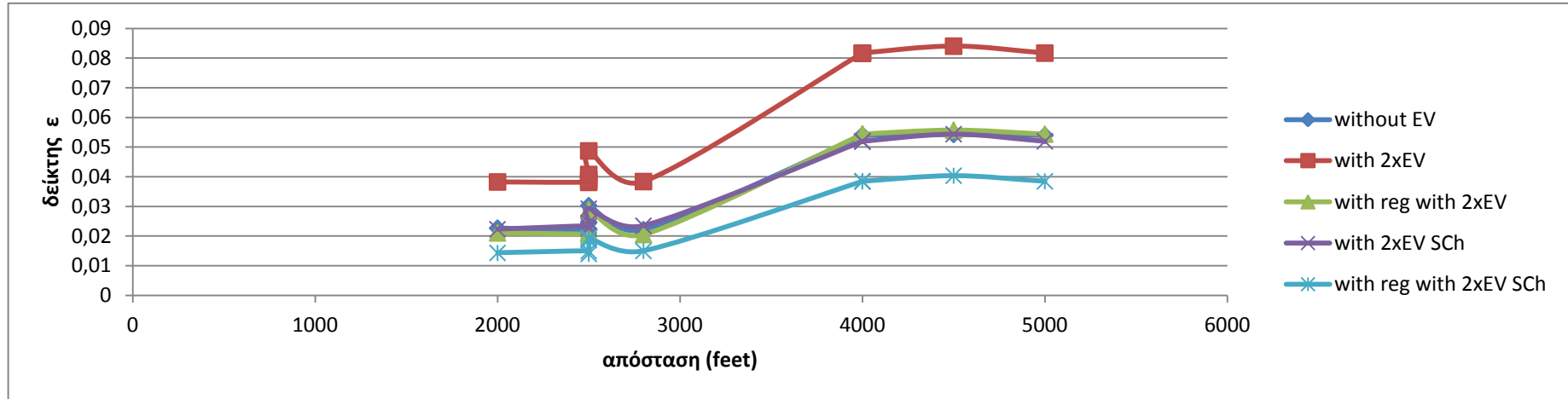
Γραφική παράσταση 6.23: Μέγιστη τιμή ρ σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό (2xEV)



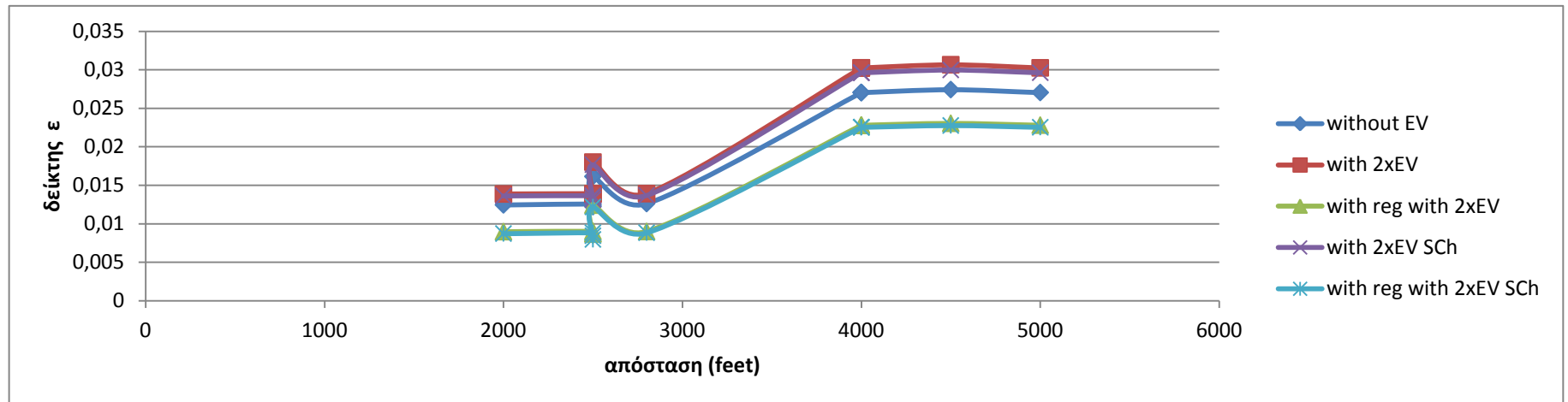
Γραφική παράσταση 6.24: Μέση τιμή ρ σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό (2xEV)



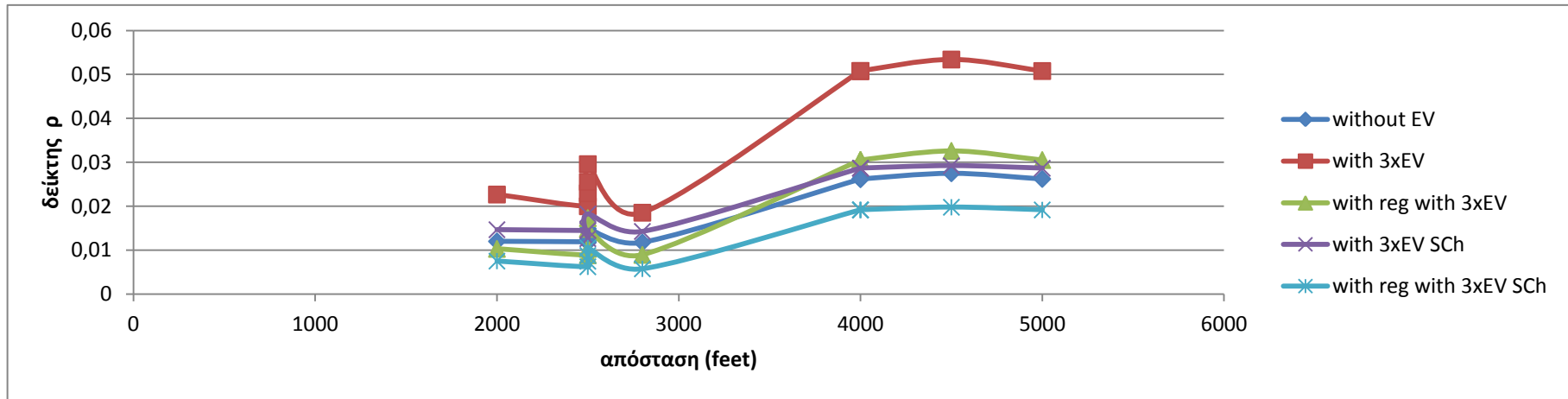
Γραφική παράσταση 6.25: Μέγιστη τιμή ε σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό (2xEV)



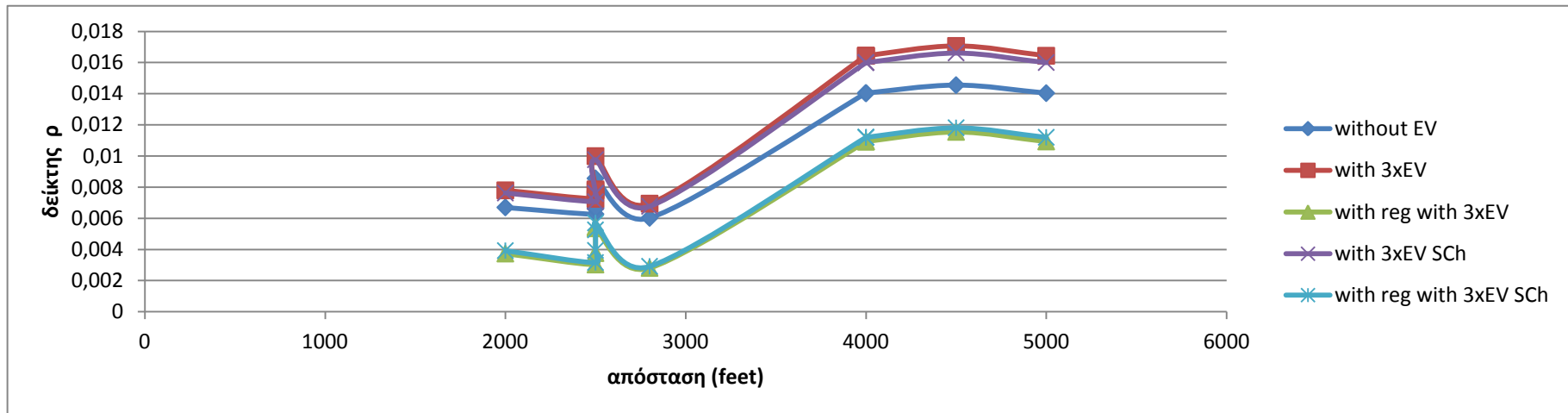
Γραφική παράσταση 6.26: Μέση τιμή ε σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό (2xEV)



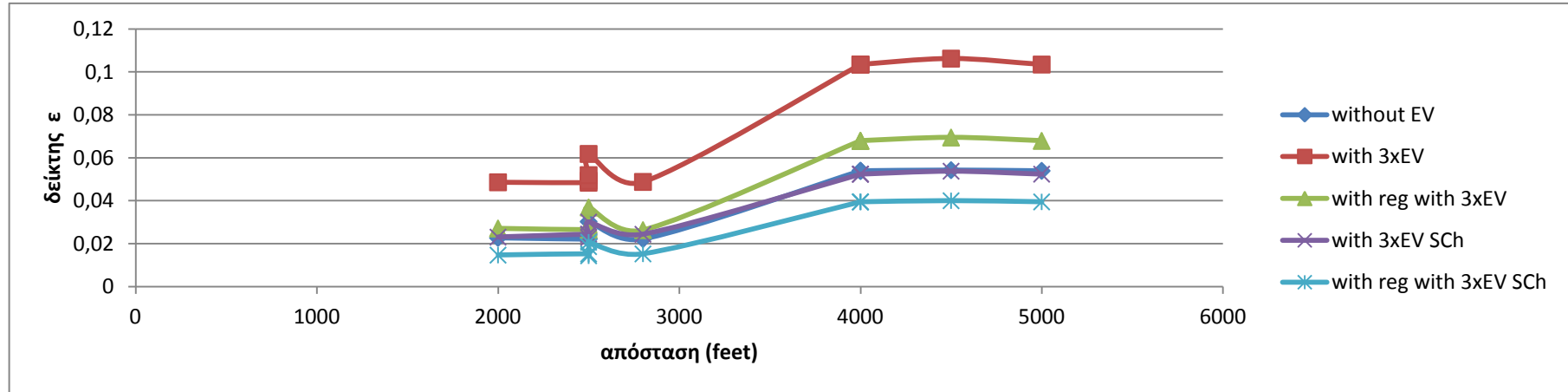
Γραφική παράσταση 6.27: Μέγιστη τιμή ρ σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό (3xEV)



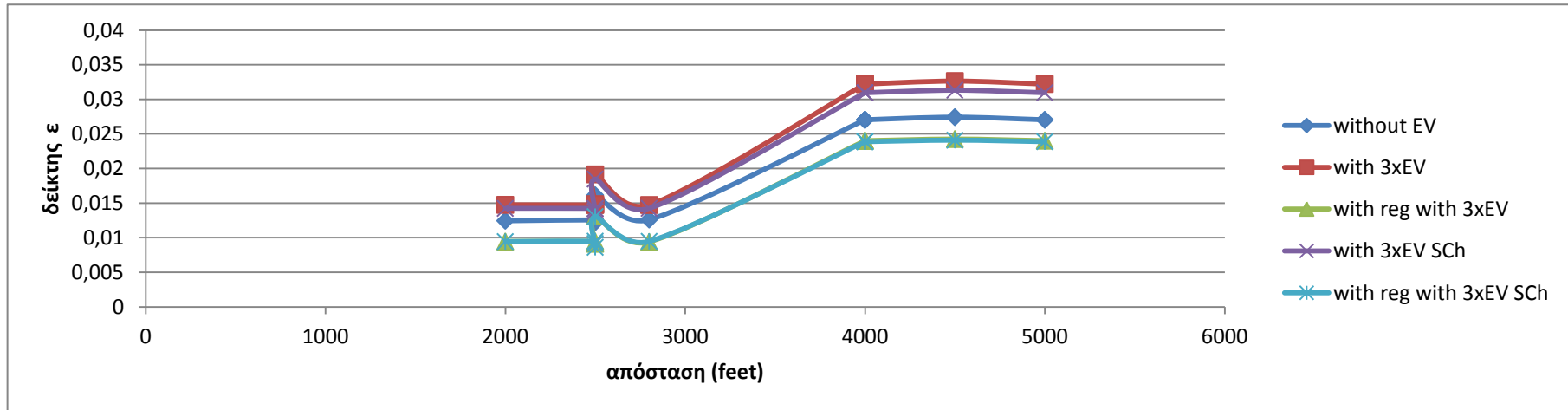
Γραφική παράσταση 6.28: Μέση τιμή ρ σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό (3xEV)



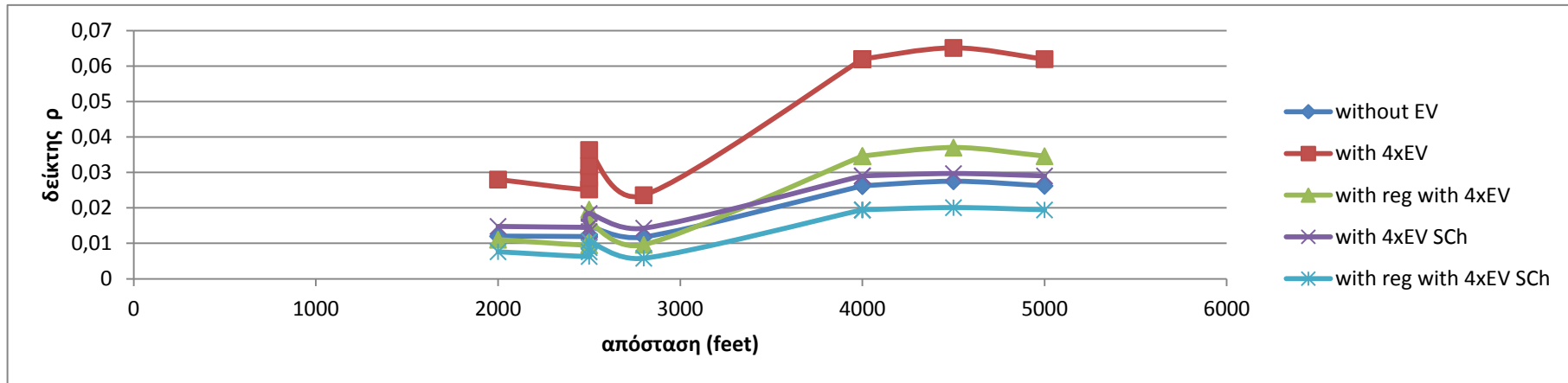
Γραφική παράσταση 6.29: Μέγιστη τιμή ϵ σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό (3xEV)



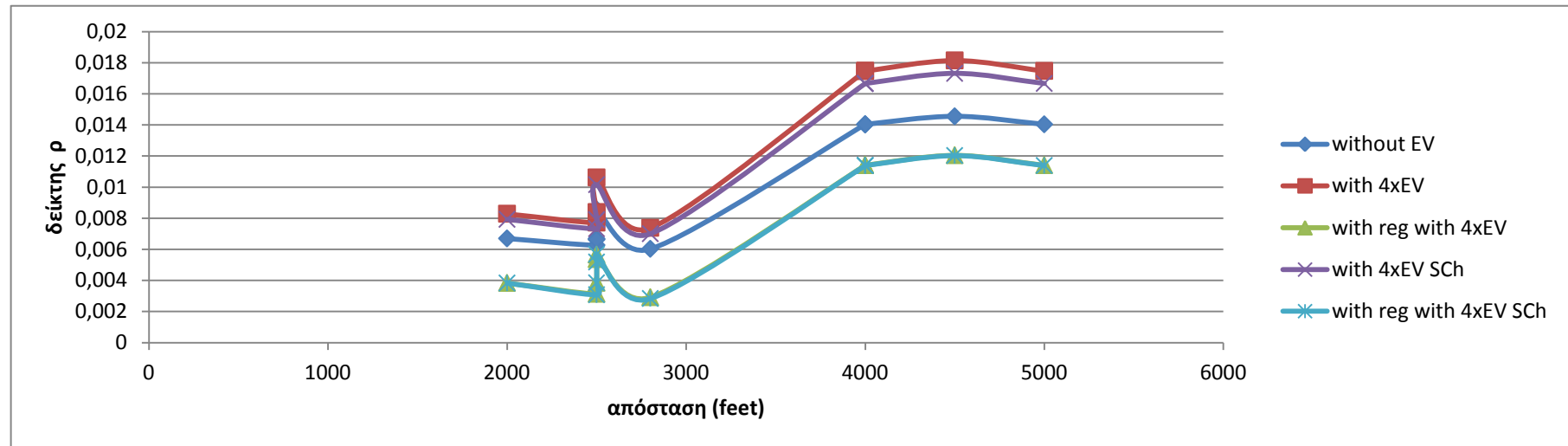
Γραφική παράσταση 6.30: Μέση τιμή ϵ σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό (3xEV)



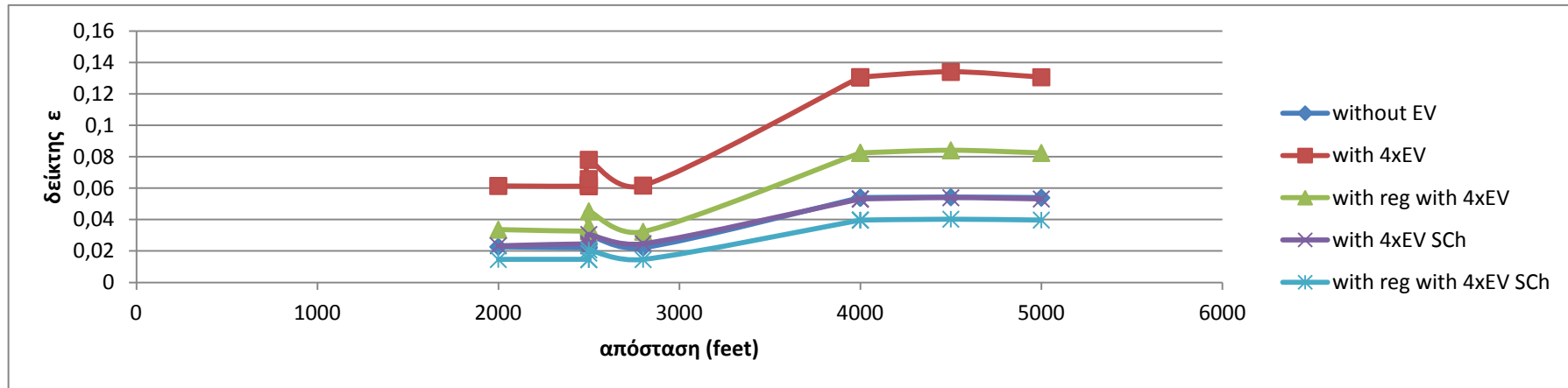
Γραφική παράσταση 6.31: Μέγιστη τιμή ρ σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό (4xEV)



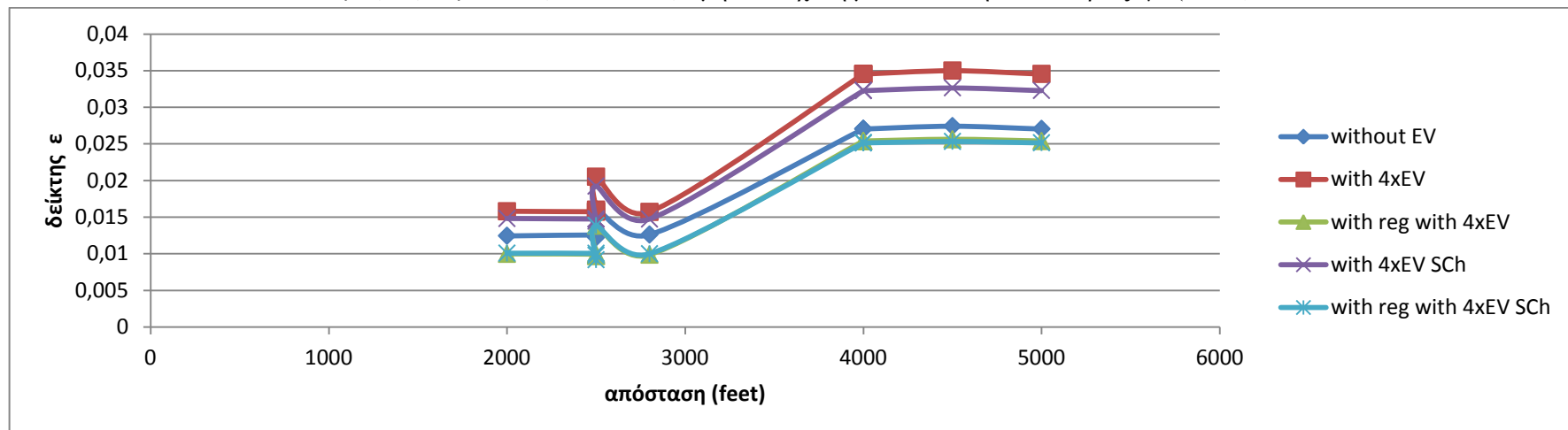
Γραφική παράσταση 6.32: Μέση τιμή ρ σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό (4xEV)



Γραφική παράσταση 6.33: Μέγιστη τιμή ε σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό (4xEV)



Γραφική παράσταση 6.34: Μέση τιμή ε σε σχέση με απόσταση από άπειρο ζυγό (4xEV)



6.9 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

6.9.1 Εισαγωγή

Στη παράγραφο αυτή χρησιμοποιώντας κατάλληλους πίνακες και γραφικές παραστάσεις θα συγκρίνουμε όλες τις περιπτώσεις μεταξύ τους. Όσον αφορά τους δείκτες ασυμμετρίας ρ και ε , θα συγκεντρώσουμε σε ένα πίνακα τις ποσοστιαίες μεταβολές των μεγίστων και μέσων τιμών όλων των περιπτώσεων στους κόμβους 634 και 675 σε σχέση με τη περίπτωση “χωρίς EV”. Οι μεταβολές αυτές θα αναπαρασταθούν και σε κατάλληλες γραφικές παραστάσεις για καλύτερη κατανόηση.

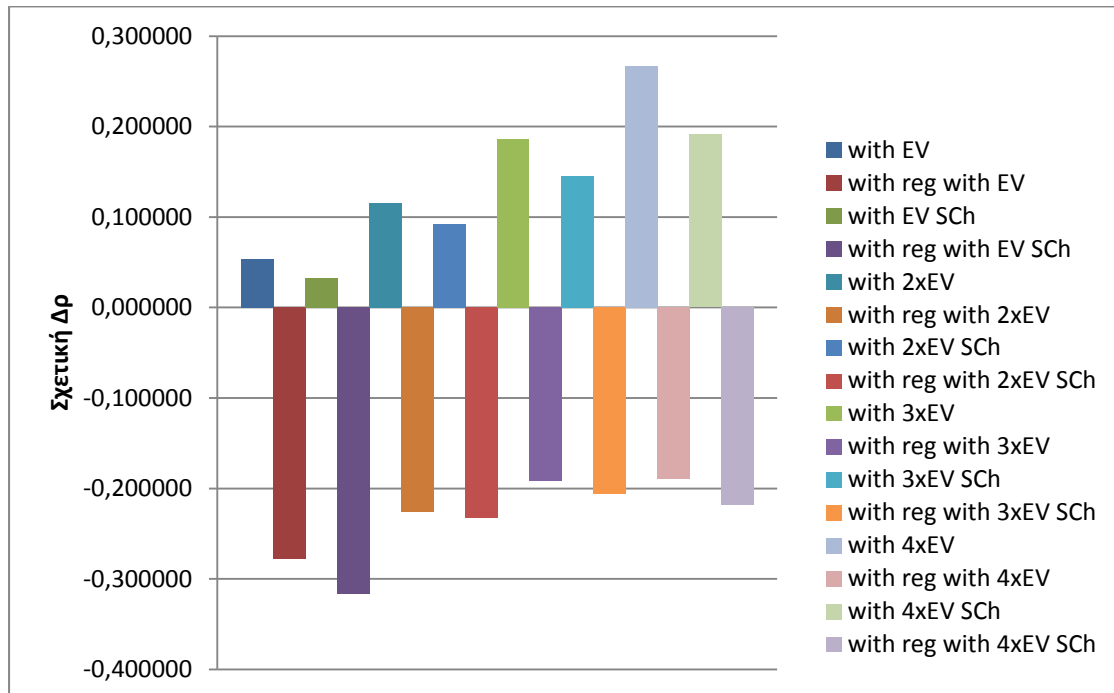
Όσον αφορά τις απώλειες ισχύος, θα παραθέσουμε και πάλι πίνακα με τις ποσοστιαίες μεταβολές των μεγίστων και των μέσων τιμών όλων των περιπτώσεων σε σχέση με την περίπτωση “χωρίς EV”. Και πάλι θα ακολουθήσουν κατάλληλες γραφικές για καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων.

6.9.2 Πίνακες και γραφικές παραστάσεις

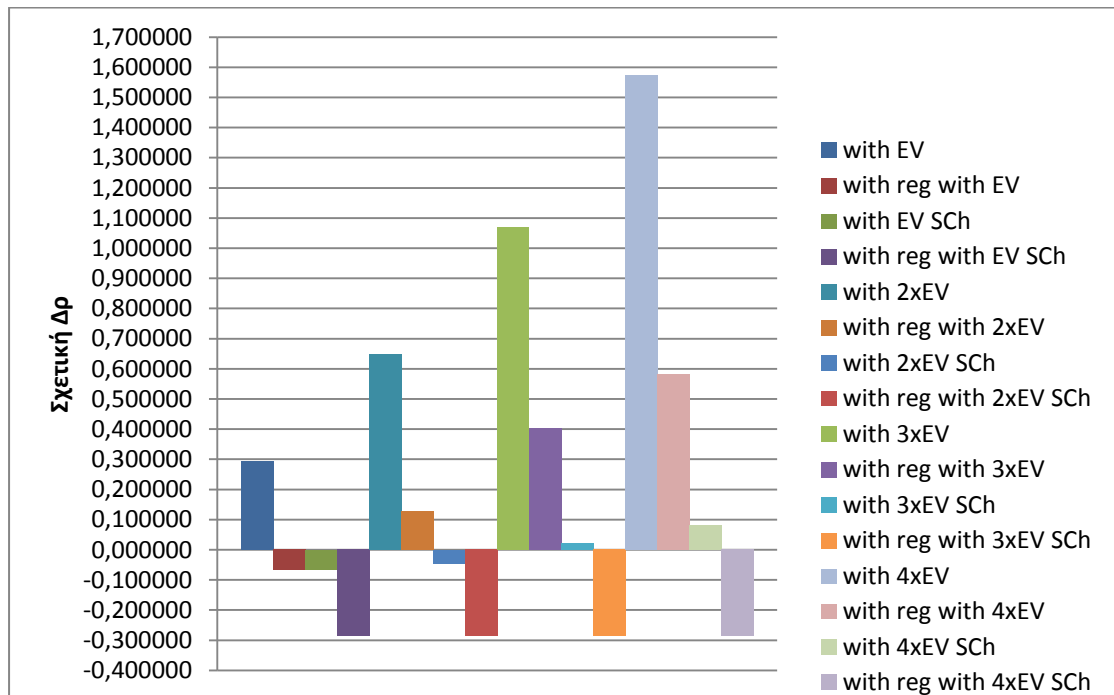
Πίνακας 6.76: Σχετικές μεταβολές ρ ως προς “χωρίς EV”

	node 634		node 675	
	Σχετικές μεταβολές μεγίστων δεικτών ρ (ως προς "χωρίς EV")	Σχετικές μεταβολές μέσων δεικτών ρ (ως προς "χωρίς EV")	Σχετικές μεταβολές μεγίστων δεικτών ρ (ως προς "χωρίς EV")	Σχετικές μεταβολές μέσων δεικτών ρ (ως προς "χωρίς EV")
with EV	+0,292291	+0,053847	+0,267740	+0,050791
with reg with EV	-0,066442	-0,277841	-0,154288	-0,279060
with EV SCh	-0,064807	+0,032831	-0,014263	+0,043216
with reg with EV SCh	-0,286687	-0,316346	-0,348337	-0,276052
with 2xEV	+0,647243	+0,115770	+0,579834	+0,108021
with reg with 2xEV	+0,127928	-0,226099	-0,033431	-0,239492
with 2xEV SCh	-0,046039	+0,092225	+0,017130	+0,092852
with reg with 2xEV SCh	-0,286687	-0,232299	-0,313805	-0,227676
with 3xEV	+1,067797	+0,185830	+0,940879	+0,172815
with reg with 3xEV	+0,400814	-0,191705	+0,185147	-0,206334
with 3xEV SCh	+0,022607	+0,145726	+0,062014	+0,142145
with reg with 3xEV SCh	-0,286687	-0,206670	-0,281132	-0,188158
with 4xEV	+1,573907	+0,267042	+1,366352	+0,247151
with reg with 4xEV	+0,580618	-0,189780	+0,345087	-0,171768
with 4xEV SCh	+0,079539	+0,191150	+0,078447	+0,189872
with reg with 4xEV SCh	-0,286687	-0,217923	-0,270541	-0,173322

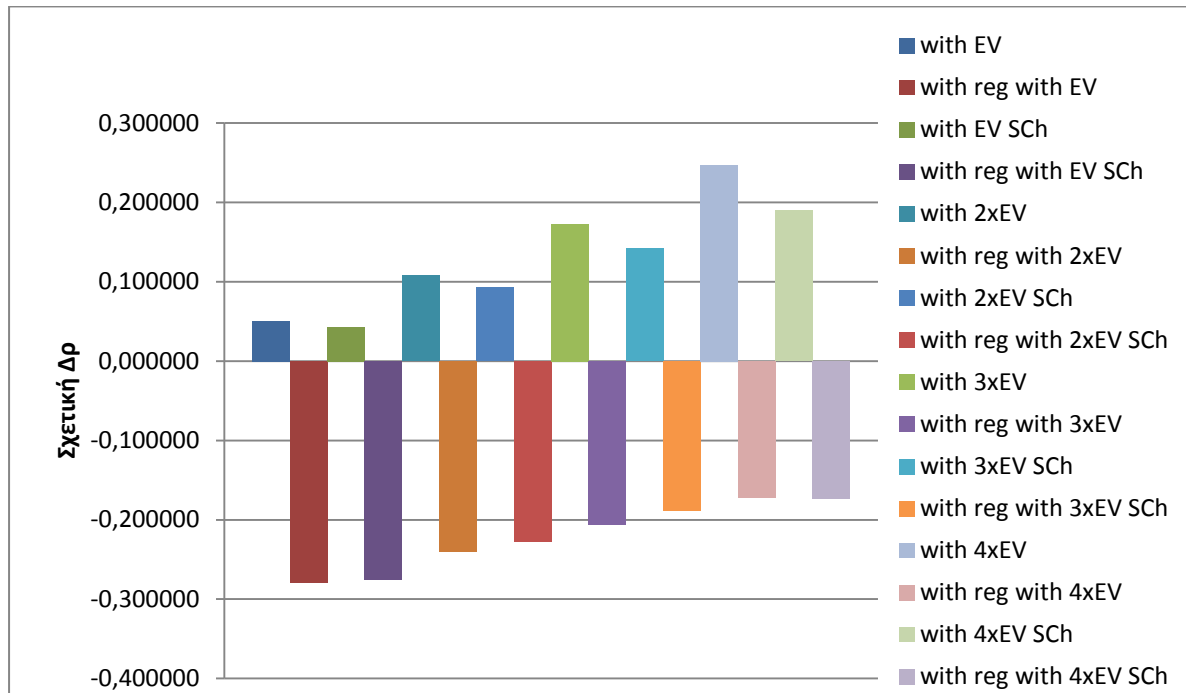
Γραφική παράσταση 6.35: Σχετική μεταβολή μέσων δεικτών ρ ως προς την περίπτωση "χωρίς EV" (node 634)



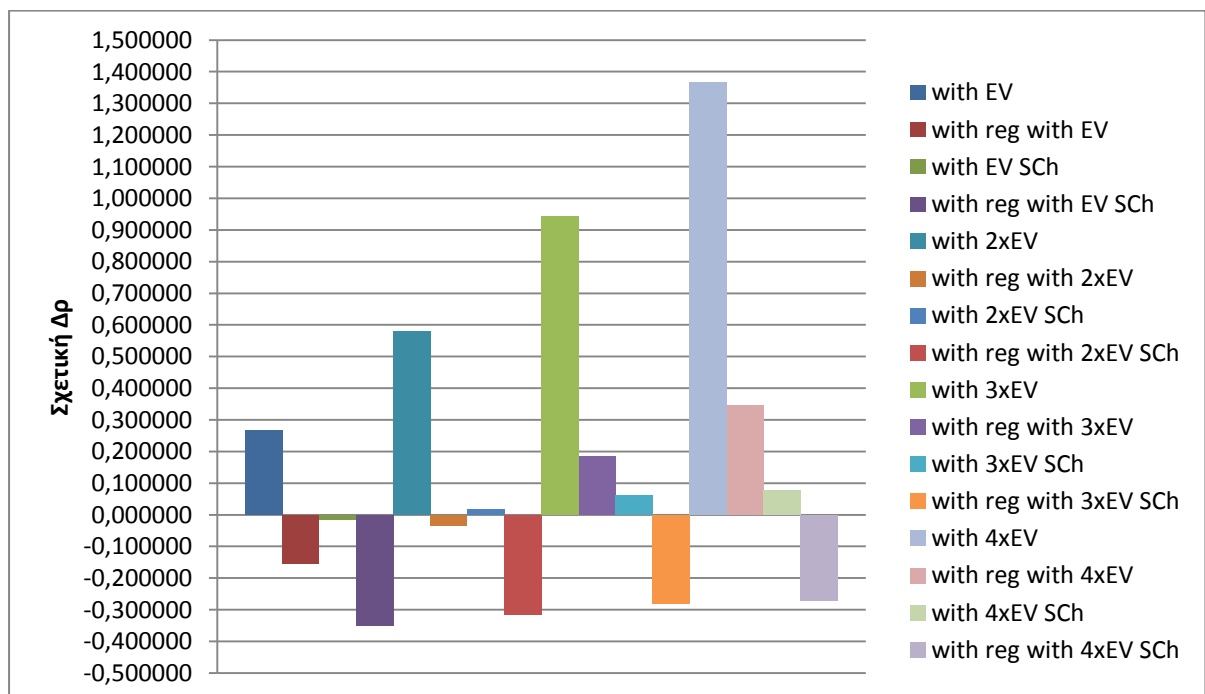
Γραφική παράσταση 6.36: Σχετική μεταβολή μεγίστων δεικτών ρ ως προς την περίπτωση "χωρίς EV" (node 634)



Γραφική παράσταση 6.37: Σχετική μεταβολή μέσων δεικτών ρ ως προς την περίπτωση "χωρίς EV" (node 675)



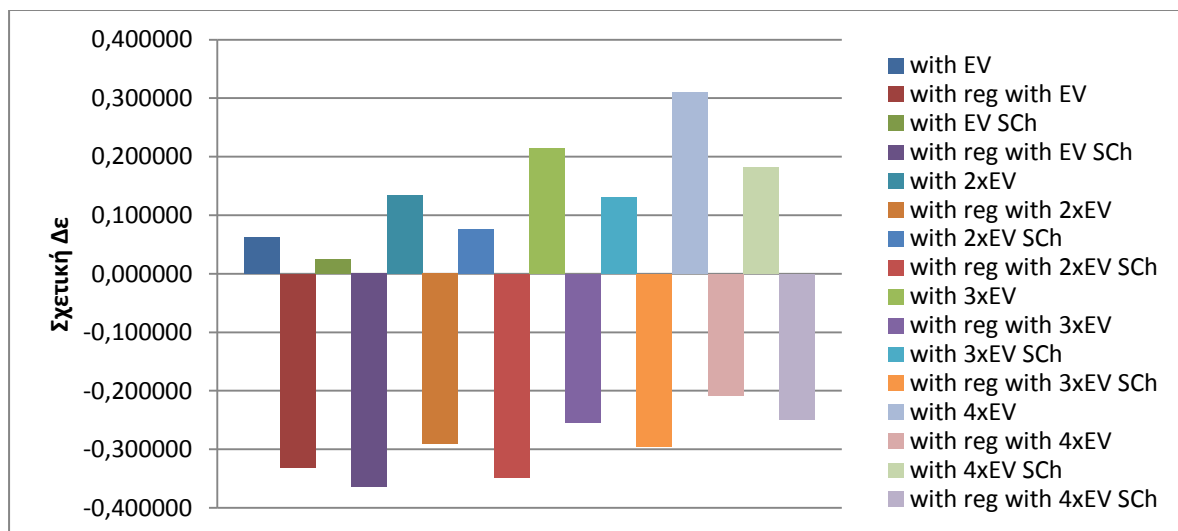
Γραφική παράσταση 6.38: Σχετική μεταβολή μεγίστων δεικτών ρ ως προς την περίπτωση "χωρίς EV" (node 675)



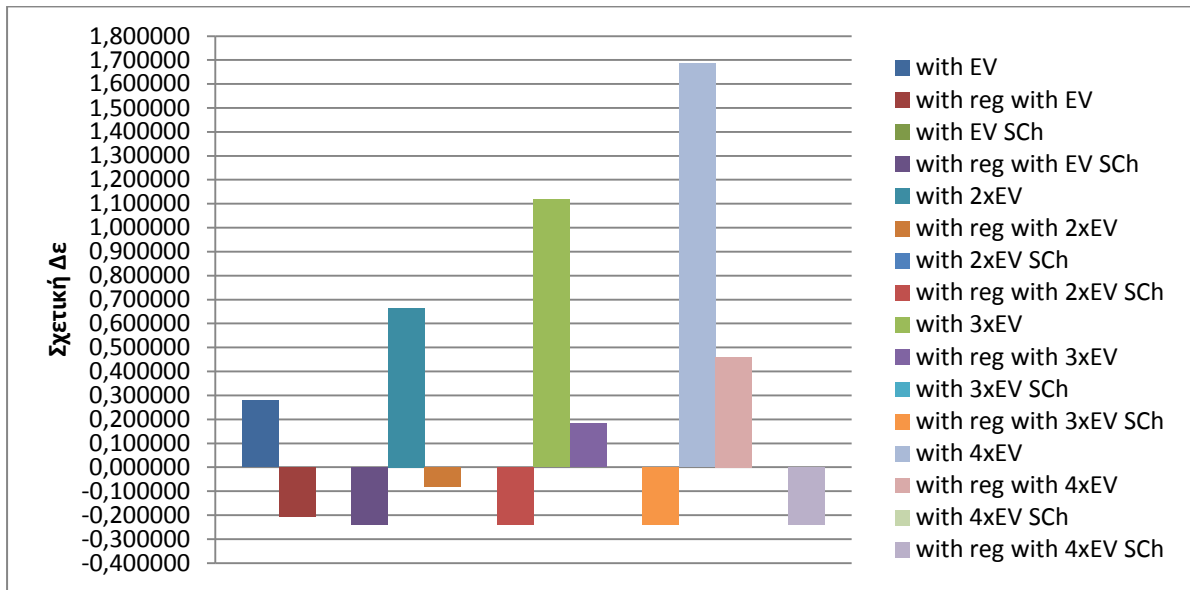
Πίνακας 6.77: Σχετικές μεταβολές ε ως προς “χωρίς EV”

	node 634		node 675	
	Σχετικές μεταβολές μεγίστων δεικτών ε (ως προς "χωρίς EV")	Σχετικές μεταβολές μέσων δεικτών ε (ως προς "χωρίς EV")	Σχετικές μεταβολές μεγίστων δεικτών ε (ως προς "χωρίς EV")	Σχετικές μεταβολές μέσων δεικτών ε (ως προς "χωρίς EV")
with EV	+0,279728	+0,062852	+0,208774	+0,054728
with reg with EV	-0,205207	-0,331624	-0,129879	-0,197340
with EV SCh	+0,000000	+0,024275	-0,016441	+0,043485
with reg with EV SCh	-0,238867	-0,364508	-0,267681	-0,196655
with 2xEV	+0,664666	+0,133599	+0,548404	+0,117525
with reg with 2xEV	-0,082185	-0,291134	+0,027204	-0,159672
with 2xEV SCh	+0,000000	+0,075889	+0,001889	+0,093076
with reg with 2xEV SCh	-0,238867	-0,348498	-0,256046	-0,170005
with 3xEV	+1,119687	+0,214944	+0,956710	+0,190435
with reg with 3xEV	+0,182211	-0,254000	+0,279664	-0,115390
with 3xEV SCh	+0,000000	+0,129870	-0,009073	+0,142202
with reg with 3xEV SCh	-0,238867	-0,295483	-0,262366	-0,121336
with 4xEV	+1,684976	+0,310229	+1,468379	+0,276629
with reg with 4xEV	+0,460338	-0,207919	+0,549756	-0,065705
with 4xEV SCh	+0,000000	+0,182476	-0,006193	+0,190669
with reg with 4xEV SCh	-0,238867	-0,248987	-0,257926	-0,076074

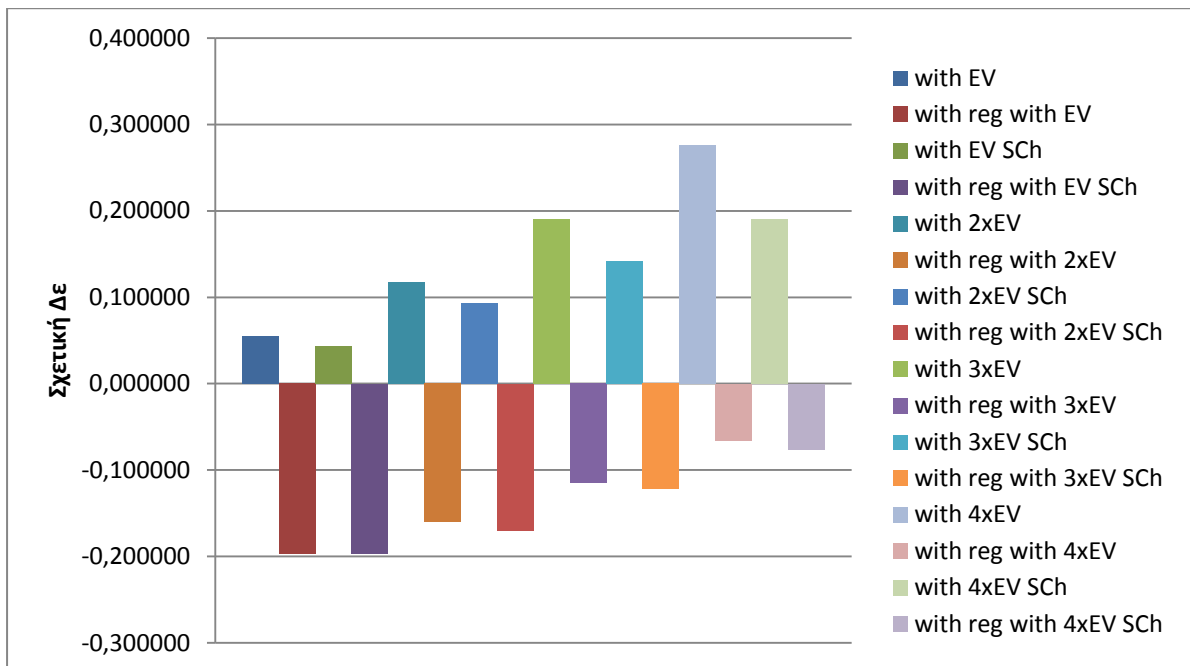
Γραφική παράσταση 6.39: Σχετική μεταβολή μέσων δεικτών ε ως προς την περίπτωση "χωρίς EV" (node 634)



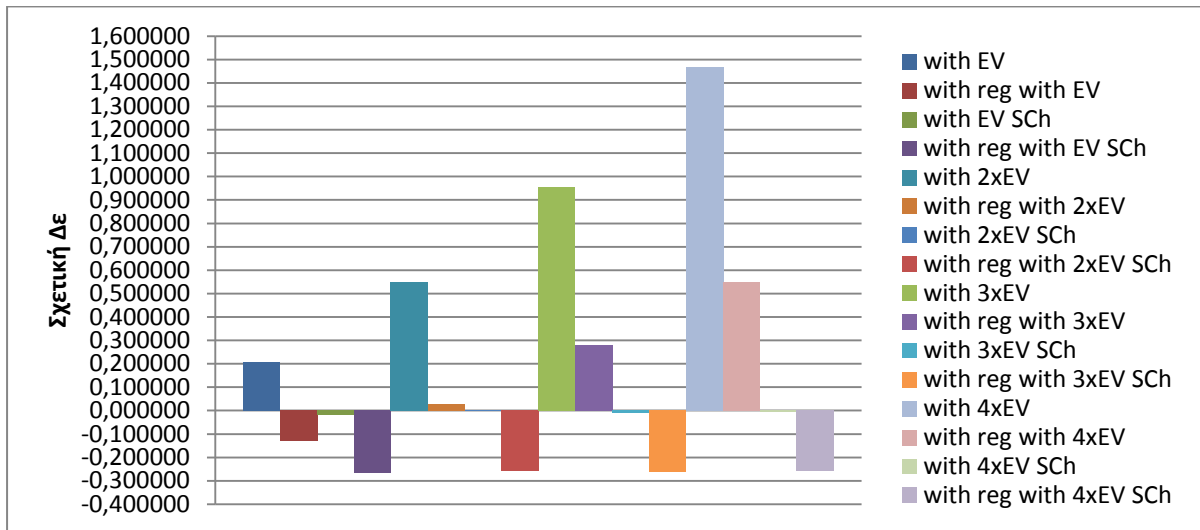
Γραφική παράσταση 6.40: Σχετική μεταβολή μεγίστων δεικτών ε ως προς την περίπτωση "χωρίς EV" (node 634)



Γραφική παράσταση 6.41: Σχετική μεταβολή μέσων δεικτών ε ως προς την περίπτωση "χωρίς EV" (node 675)



Γραφική παράσταση 6.42: Σχετική μεταβολή μεγίστων δεικτών ε ως προς την περίπτωση "χωρίς EV" (node 675)



Παρατηρώντας τους Πίνακες 6.76 και 6.77 καθώς και τις γραφικές παραστάσεις 6.35 έως 6.42 που τους απεικονίζουν μπορούμε να βγάλουμε τα εξής συμπεράσματα:

1. Η διπλάσια, τριπλάσια και τετραπλάσια διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων προκαλεί αυξήσεις των τιμών των δεικτών ασυμμετρίας όπως ήταν αναμενόμενο. Οι τιμές που επηρεάζονται όμως σημαντικά και αξίζουν την προσοχή μας είναι αυτές κατά τις ώρες αιχμής. Τις υπόλοιπες ώρες μπορεί ποσοστιαία η μεταβολή να αυξάνεται όμως οι δείκτες μας σε απόλυτες τιμές διατηρούνται χαμηλά
2. Στη διπλάσια διείσδυση η μέγιστη τιμή ρ αυξάνεται κατά περίπου 65% ενώ η αντίστοιχη μέγιστη τιμή ϵ αυξάνεται κατά περίπου 66%. Οι μέσες τιμές αυξάνονται κατά 12% και 13% αντίστοιχα.
3. Στη τριπλάσια διείσδυση η μέγιστη τιμή ρ αυξάνεται κατά περίπου 106% ενώ η αντίστοιχη μέγιστη τιμή ϵ αυξάνεται κατά περίπου 112%. Οι μέσες τιμές αυξάνονται κατά 19% και 21% αντίστοιχα.
4. Στη τετραπλάσια διείσδυση η μέγιστη τιμή ρ αυξάνεται κατά περίπου 157% ενώ η αντίστοιχη μέγιστη τιμή ϵ αυξάνεται κατά περίπου 168%. Οι μέσες τιμές αυξάνονται κατά 27% και 31% αντίστοιχα.
5. Οι αυξήσεις τις ώρες αιχμής είναι πολύ σημαντικές επομένως κρίνεται απαραίτητη η χρήση κάποιου τρόπου αντιμετώπισης.
6. Η χρήση του ρυθμιστή η οποία κρίνεται ούτως ή άλλως αναγκαία λόγω των σημαντικών πτώσεων τάσεως είναι μια πάρα πολύ αποδοτική λύση καθώς μειώνει αισθητά τις μέσες τιμές και των δύο δεικτών ανεξάρτητα από τη διείσδυση. Όσον αφορά τις μέγιστες τιμές όσο αυξάνεται η διείσδυση γίνεται λιγότερο αποδοτική λύση σε σχέση με τους άλλους δύο τρόπους αλλά και πάλι περιορίζει αισθητά την επίδραση των EV.
7. Η χρήση της βελτιστοποίησης Smart Charging είναι καλύτερη επιλογή για την αντιμετώπιση των ασυμμετριών τις ώρες αιχμής από τη χρήση ρυθμιστή τάσης. Όσο αυξάνεται η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων τόσο πιο χρήσιμη γίνεται. Ακόμη και στις μέσες τιμές που δεν άλλαξε κάτι είτε είχαμε βελτιστοποίηση είτε όχι σε σχέση με την περίπτωση "με EV", όσο αυξάνεται η διείσδυση προκαλεί όλο και

λιγότερο αύξηση σε σχέση με την παρουσία των ηλεκτρικών οχημάτων. Φυσικά σε σχέση με τη χρήση του ρυθμιστή είναι χειρότερη λύση για τις μέσες τιμές.

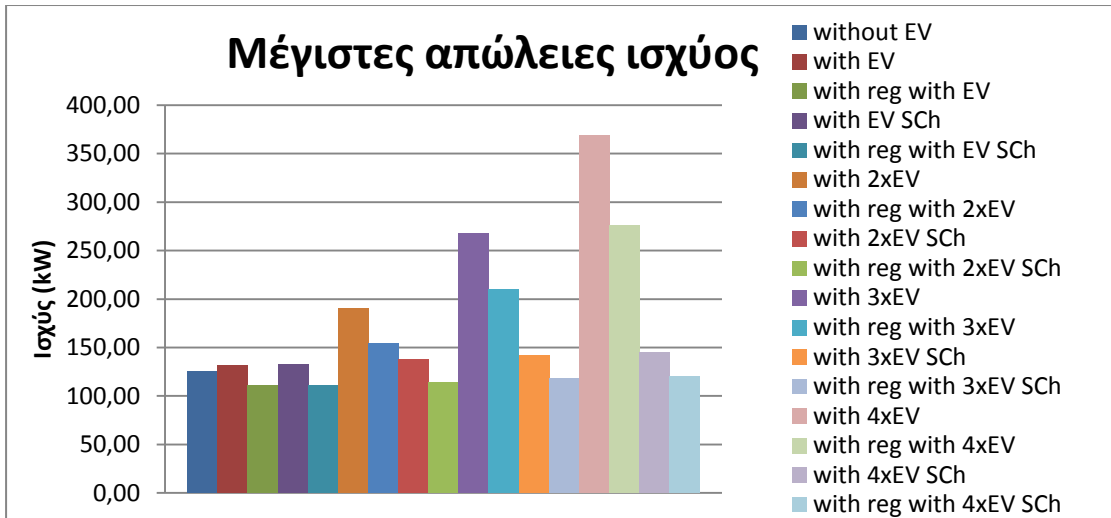
8. Τέλος ο συνδυαστικός τρόπος αποτελεί γενικά τη καλύτερη λύση συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των άλλων δύο.

Παρακάτω ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας και γραφικές παραστάσεις για τις απώλειες ισχύος:

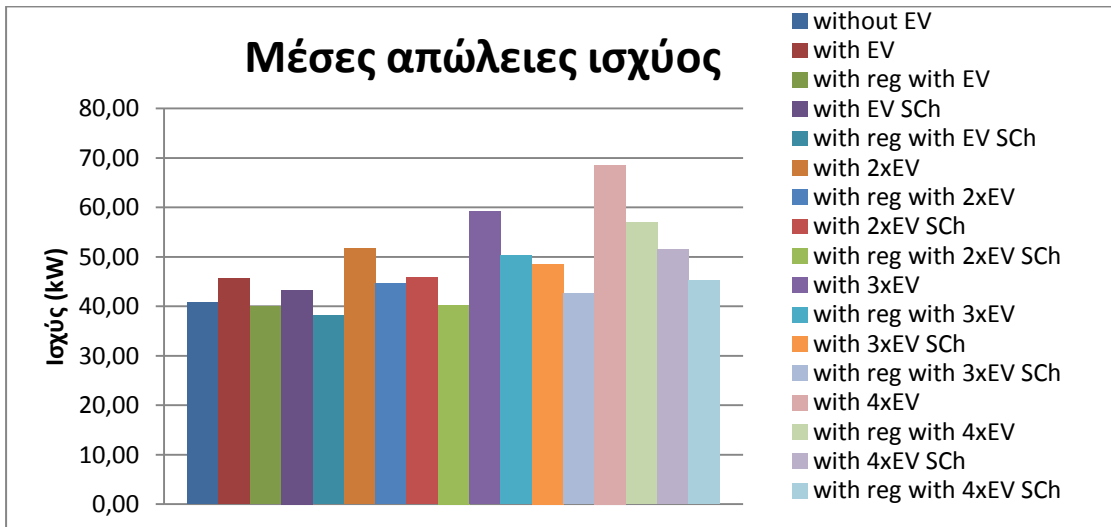
Πίνακας 6.78: Σχετικές μεταβολές απωλειών ισχύος ως προς “χωρίς EV”

	Σχετικές μεταβολές μεγίστων απωλειών ισχύος (ως προς "without EV")	Σχετικές μεταβολές μέσω απωλειών ισχύος (ως προς "without EV")
with EV	+0,051641	+0,118511
with reg with EV	-0,114794	-0,021916
with EV SCh	+0,060290	+0,062341
with reg with EV SCh	-0,116265	-0,066310
with 2xEV	+0,522325	+0,267426
with reg with 2xEV	+0,235721	+0,095318
with 2xEV SCh	+0,096756	+0,123837
with reg with 2xEV SCh	-0,087035	-0,013141
with 3xEV	+1,137705	+0,451966
with reg with 3xEV	+0,675053	+0,234344
with 3xEV SCh	+0,136105	+0,191292
with reg with 3xEV SCh	-0,055456	+0,045724
with 4xEV	+1,944777	+0,680458
with reg with 4xEV	+1,209397	+0,396494
with 4xEV SCh	+0,160236	+0,262312
with reg with 4xEV SCh	-0,035744	+0,107455

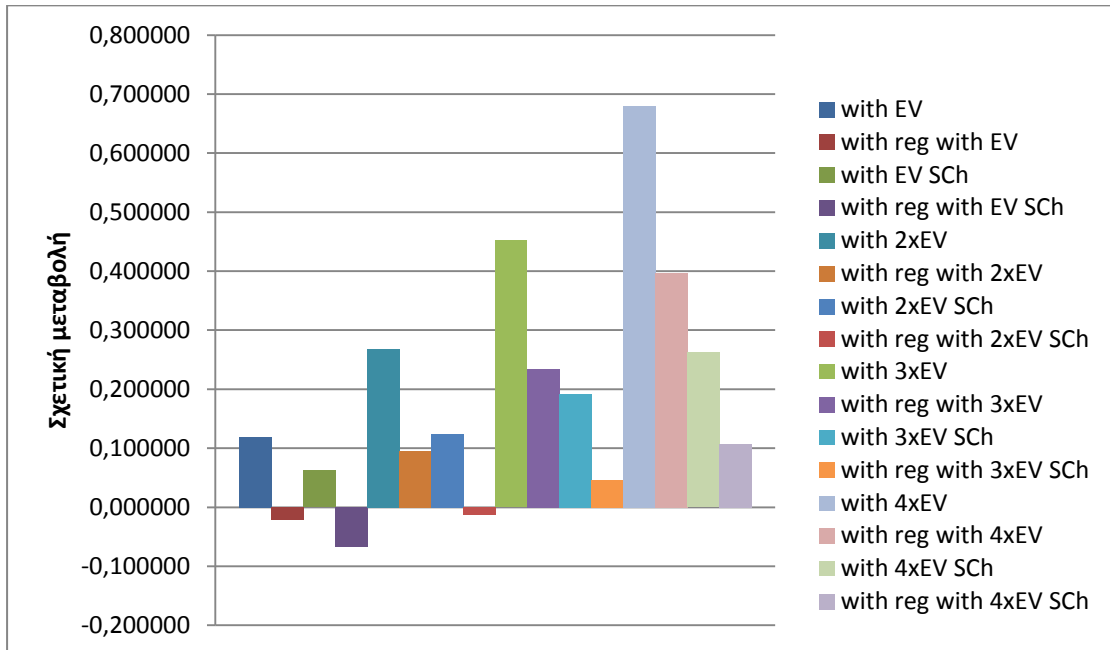
Γραφική παράσταση 6.43: Μέγιστες απώλειες ισχύος



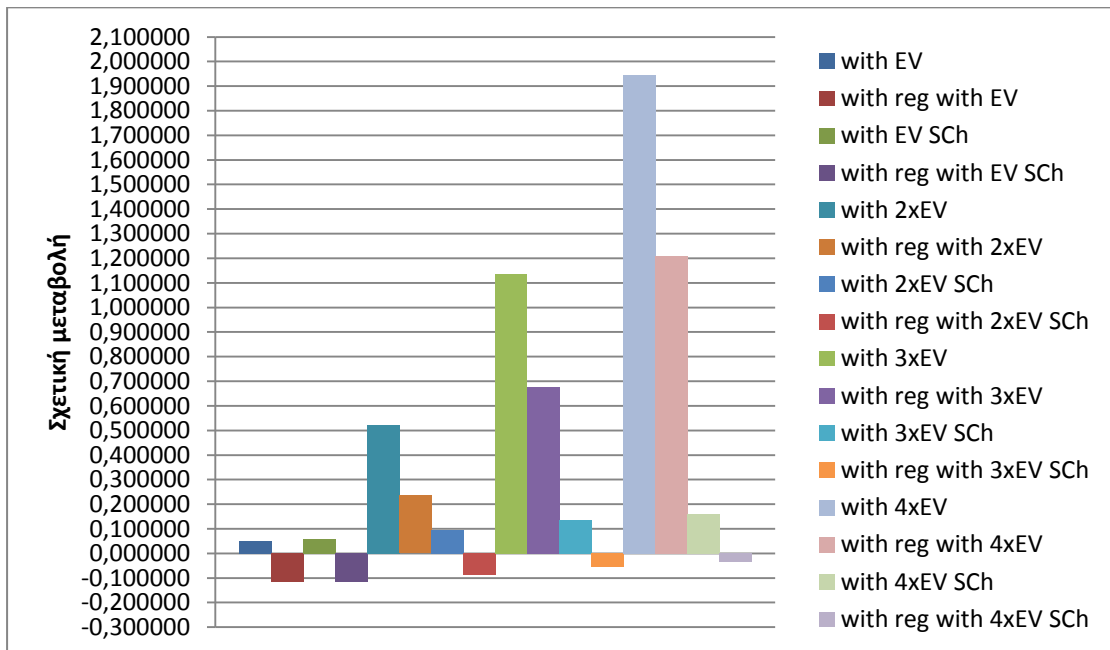
Γραφική παράσταση 6.44: Μέσες απώλειες ισχύος



Γραφική παράσταση 6.45: Σχετική μεταβολή μέσων απωλειών ισχύος ως προς "without EV"



Γραφική παράσταση 6.46: Σχετική μεταβολή μεγίστων απωλειών ισχύος ως προς "without EV"



Εξετάζοντας τους παραπάνω πίνακες και τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις επαληθεύονται τα προηγούμενα συμπεράσματα μας. Όσο αυξάνεται η διεύθυνση των ηλεκτρικών οχημάτων τόσο αυξάνονται οι μέσες και οι μέγιστες απώλειες ισχύος. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η αντιμετώπιση της επίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Η χρήση του ρυθμιστή είναι όπως έχουμε πει μια πάρα πολύ καλή λύση αλλά όπως φαίνεται και από τις απώλειες ισχύος, όσο αυξάνεται η διείσδυση των EV παύει να είναι η καλύτερη.

Η βελτιστοποίηση Smart Charging ενώ στην αρχική διείσδυση αποτελεί τη χειρότερη λύση, όσο αυξάνονται τα ηλεκτρικά οχήματα αποκτά μεγαλύτερη χρησιμότητα. Από τις παραπάνω καμπύλες παρατηρούμε ότι η λύση αυτή παρουσιάζει τις μικρότερες μεταβολές καθώς αυξάνεται η διείσδυση.

Η καλύτερη λύση και πάλι βλέπουμε ότι είναι ο συνδυαστικός τρόπος, που αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα των άλλων δύο.

Στη συνέχεια θα παραθέσουμε τέσσερις συγκεντρωτικούς πίνακες με τις τάσεις των κόμβων 634 και 675 την 3^η και τη 19^η ώρα:

Πίνακας 6.79: Τάσεις του κόμβου 634 την 3^η ώρα

Περίπτωση	Va pu	Ang Va (degrees)	Vb pu	Ang Vb (degrees)	Vc pu	Ang Vc (degrees)	ρ	ε
without EV	0,991899	-0,309	0,987658	-120,464	0,991580	119,621	0,001289	0,001832
with EV	0,991846	-0,313	0,987538	-120,479	0,991556	119,612	0,001318	0,001898
with reg with EV	1,017380	-0,305	1,006442	-120,469	1,017020	119,620	0,003271	0,003963
with EV SCh	0,989801	-0,875	0,989071	-120,397	0,987855	119,366	0,001894	0,002947
with reg with EV SCh	1,015127	-0,854	1,014589	-120,385	1,013072	119,381	0,001789	0,002954
with 2xEV	0,991793	-0,318	0,987418	-120,494	0,991532	119,603	0,001347	0,001965
with reg with 2xEV	1,017326	-0,310	1,006316	-120,483	1,016991	119,612	0,003287	0,004022
with 2xEV SCh	0,988058	-1,256	0,989609	-120,417	0,984211	119,101	0,002803	0,005785
with reg with 2xEV SCh	1,014000	-1,194	1,015510	-120,396	1,010235	119,145	0,002665	0,005506
with 3xEV	0,991739	-0,322	0,987298	-120,509	0,991508	119,594	0,001377	0,002033
with reg with 3xEV	1,017272	-0,314	1,006190	-120,498	1,016962	119,603	0,003304	0,004081
with 3xEV SCh	0,986118	-1,652	0,990312	-120,476	0,980543	118,796	0,003936	0,008527
with reg with 3xEV SCh	1,012033	-1,571	1,016237	-120,455	1,013371	118,872	0,005704	0,005882
with 4xEV	0,991686	-0,327	0,987178	-120,524	0,991484	119,585	0,001408	0,002102
with reg with 4xEV	1,017217	-0,318	1,012596	-120,509	1,016933	119,594	0,001392	0,002062
with 4xEV SCh	0,984794	-1,994	0,990475	-120,525	0,976623	118,423	0,005117	0,011140
with reg with 4xEV SCh	1,017503	-1,870	1,016296	-120,501	1,009602	118,516	0,004738	0,009517

Πίνακας 6.80: Τάσεις του κόμβου 675 την 3^η ώρα

Περίπτωση	Va pu	Ang Va (degrees)	Vb pu	Ang Vb (degrees)	Vc pu	Ang Vc (degrees)	ρ	ε
without EV	0,990327	-0,572	0,997384	-120,264	0,984309	119,422	0,003413	0,004897
with EV	0,990304	-0,578	0,997324	-120,272	0,984229	119,406	0,003458	0,004890
with reg with EV	1,015778	-0,565	1,016388	-120,267	1,009543	119,421	0,001290	0,003738
with EV SCh	0,991273	-1,092	0,998875	-120,084	0,978081	118,881	0,005318	0,010867
with reg with EV SCh	1,016595	-1,069	1,024557	-120,078	1,002927	118,905	0,005329	0,010847
with 2xEV	0,990281	-0,585	0,997264	-120,280	0,984148	119,390	0,003503	0,004884
with reg with 2xEV	1,015753	-0,572	1,016326	-120,274	1,009453	119,405	0,001336	0,003762
with 2xEV SCh	0,990874	-1,605	1,000132	-120,010	0,970865	118,335	0,007636	0,016572
with reg with 2xEV SCh	1,016747	-1,526	1,025767	-120,009	0,997206	118,417	0,007261	0,015761
with 3xEV	0,990257	-0,591	0,997203	-120,288	0,984068	119,374	0,003548	0,004879
with reg with 3xEV	1,015728	-0,578	1,016264	-120,282	1,009363	119,389	0,001381	0,003786
with 3xEV SCh	0,989564	-2,150	1,001707	-120,028	0,964921	117,868	0,009547	0,021334
with reg with 3xEV SCh	1,015336	-2,045	1,027368	-120,031	0,998179	118,004	0,009325	0,017964
with 4xEV	0,990234	-0,598	0,997143	-120,296	0,983988	119,358	0,003594	0,004874
with reg with 4xEV	1,015704	-0,585	1,022735	-120,287	1,009272	119,374	0,003567	0,004850
with 4xEV SCh	0,989285	-2,600	1,002277	-120,037	0,958969	117,309	0,011662	0,025881
with reg with 4xEV SCh	1,021851	-2,439	1,027757	-120,039	0,992443	117,471	0,009187	0,023567

Πίνακας 6.81: Τάσεις του κόμβου 634 την 19^η ώρα

Περίπτωση	Va pu	Ang Va (degrees)	Vb pu	Ang Vb (degrees)	Vc pu	Ang Vc (degrees)	ρ	ε
without EV	0,959705	-2,482	0,974921	-120,854	0,924064	117,329	0,012357	0,023495
with EV	0,956508	-3,410	0,974428	-121,108	0,910519	116,215	0,015969	0,031367
with reg with EV	1,025781	-2,947	1,028091	-121,044	1,000062	116,821	0,007476	0,019481
with EV SCh	0,954138	-2,920	0,976060	-121,084	0,923598	117,398	0,011334	0,024118
with reg with EV SCh	1,023884	-2,532	1,029675	-120,994	1,003784	117,769	0,004349	0,015344
with 2xEV	0,953309	-4,375	0,974465	-121,328	0,894389	115,040	0,020355	0,040802
with reg with 2xEV	1,029730	-3,703	1,027691	-121,302	1,003355	115,987	0,008940	0,022496
with 2xEV SCh	0,949283	-3,281	0,975554	-121,417	0,923393	117,444	0,010123	0,024140
with reg with 2xEV SCh	1,019392	-2,844	1,029167	-121,294	1,003628	117,808	0,003676	0,014743
with 3xEV	0,950407	-5,377	0,974964	-121,505	0,875745	113,761	0,025552	0,051955
with reg with 3xEV	1,034021	-4,461	1,034760	-121,512	0,997997	115,114	0,011432	0,028977
with 3xEV SCh	0,946491	-3,467	0,974610	-121,645	0,923420	117,433	0,009462	0,023845
with reg with 3xEV SCh	1,016799	-3,004	1,028264	-121,500	1,003687	117,799	0,003329	0,014222
with 4xEV	0,948043	-6,439	0,976297	-121,614	0,853017	112,365	0,031805	0,065810
with reg with 4xEV	1,038499	-5,216	1,034819	-121,724	0,991022	114,202	0,012417	0,035794
with 4xEV SCh	0,944694	-3,591	0,973689	-121,804	0,923342	117,398	0,009061	0,023598
with reg with 4xEV SCh	1,015126	-3,111	1,027388	-121,644	1,003649	117,770	0,003149	0,013871

Πίνακας 6.82: Τάσεις του κόμβου 675 την 19^η ώρα

Περίπτωση	Va pu	Ang Va (degrees)	Vb pu	Ang Vb (degrees)	Vc pu	Ang Vc (degrees)	ρ	ε
without EV	0,941033	-4,295	0,996088	-120,565	0,881826	116,131	0,027523	0,050832
with EV	0,940653	-5,637	0,997490	-120,556	0,860182	114,184	0,034892	0,065616
with reg with EV	1,010651	-4,858	1,049506	-120,581	0,954309	115,168	0,023276	0,047233
with EV SCh	0,936032	-4,781	0,998912	-120,782	0,880139	116,220	0,027130	0,053391
with reg with EV SCh	1,006934	-4,134	1,050967	-120,734	0,963857	116,783	0,017637	0,039753
with 2xEV	0,940642	-7,043	0,999905	-120,483	0,834453	112,073	0,043482	0,084053
with reg with 2xEV	1,017103	-5,938	1,050913	-120,621	0,950562	113,694	0,026603	0,055760
with 2xEV SCh	0,931237	-5,131	1,000316	-121,086	0,879554	116,276	0,026808	0,054386
with reg with 2xEV SCh	1,002489	-4,434	1,052245	-121,008	0,963369	116,831	0,017359	0,040384
with 3xEV	0,941592	-8,511	1,003228	-120,329	0,804833	109,696	0,053419	0,106217
with reg with 3xEV	1,024195	-7,026	1,059978	-120,605	0,937525	112,125	0,032619	0,069465
with 3xEV SCh	0,928948	-5,241	0,999833	-121,313	0,879543	116,227	0,026793	0,053791
with reg with 3xEV SCh	1,000355	-4,527	1,051768	-121,214	0,963417	116,791	0,017278	0,039747
with 4xEV	0,944019	-10,081	1,008204	-120,055	0,768703	106,974	0,065129	0,133992
with reg with 4xEV	1,031817	-8,117	1,062351	-120,564	0,921795	110,447	0,037021	0,084126
with 4xEV SCh	0,927817	-5,279	0,998914	-121,470	0,879444	116,135	0,026952	0,052971
with reg with 4xEV SCh	0,999292	-4,558	1,050889	-121,357	0,963380	116,713	0,017348	0,038960

Στους παραπάνω πίνακες 6.79 έως 6.82 βλέπουμε τις τάσεις και τους δείκτες ασυμμετρίας για ενδεικτικούς κόμβους και ενδεικτικές ώρες. Παρατηρούμε ότι τη 19^η ώρα (ώρα αιχμής) όσο αυξάνεται η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων τόσο περισσότερο επηρεάζονται όχι μόνο οι ασυμμετρίες των τάσεων αλλά και τα μέτρα τους. Ορισμένες φορές μάλιστα, είναι απαραίτητη η χρήση ρυθμιστή είτε χρησιμοποιήσουμε την βελτιστοποίηση Smart Charging είτε όχι (θεωρώντας ως αποδεκτές τιμές για τα μέτρα των τάσεων τιμές 0,90 – 1,10 ανά μονάδα).

Ακόμη παρατηρούμε από τα αποτελέσματα της 3^{ης} ώρας ότι η αύξηση των τιμών των δεικτών ασυμμετρίας που προκαλεί μόνη της η βελτιστοποίηση SCh είναι πρακτικά αμελητέα όσον αφορά τις πτώσεις τάσεων. Στη χειρότερη περίπτωση της τετραπλάσιας διείσδυσης η μικρότερη κατά μέτρο τάση που εμφανίζεται είναι 0,96 α.μ. Με λίγα λόγια, το κύριο αρνητικό στοιχείο της βελτιστοποίησης SCh που είναι η αύξηση των ασυμμετριών στις τάσεις κατά τις ώρες εκτός της αιχμής, είναι πρακτικά αμελητέο παρατηρώντας τις πτώσεις τάσης που προκαλεί.

Εξετάζοντας ακόμη περισσότερο τα αποτελέσματα της 3^{ης} ώρας βλέπουμε ότι όσο και να αυξάνεται η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων οι δείκτες ασυμμετρίας και οι πτώσεις τάσης παραμένουν πολύ χαμηλές. Δηλαδή με λίγα λόγια η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων ακόμα και στη ακραία περίπτωση τετραπλάσιων EV δεν επιδρά στις ώρες εκτός αιχμής.

Η φάση που επηρεάζεται περισσότερο όσον αφορά την πτώση τάσης είναι η C, δηλαδή η φάση με τα περισσότερα φορτία. Στην πιο ακραία περίπτωση της τετραπλάσιας διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων το μέτρο τάσης στο κόμβο 675 φτάνει τη τιμή 0,77 α.μ. Με τη βελτιστοποίηση SCh η τιμή αυτή γίνεται 0,88 α.μ., με τη χρήση ρυθμιστή 0,92 α.μ., ενώ με τη χρήση και ρυθμιστή και βελτιστοποίησης SCh 0,96 α.μ.

Τέλος, αξίζει να συμπληρώσουμε άλλη μια φορά πως κανονικά και στην αρχική μας περίπτωση “χωρίς EV” θα έπρεπε σε ορισμένες ώρες αιχμής να χρησιμοποιούσαμε ρυθμιστή τάσης, αλλά επιλέξαμε να μη το κάνουμε για να έχουμε μια περίπτωση αναφοράς.

Κεφάλαιο 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία μελετήσαμε την επίδραση των ασύμμετρης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στα ακτινικά δίκτυα διανομής. Αρχικά αναφερθήκαμε σε αυτά τα δίκτυα και εξετάσαμε αναλυτικά τα στοιχεία που τα αποτελούν παραθέτοντας τις εξισώσεις που ισχύουν για αυτά. Στη συνέχεια εξετάσαμε τον αλγόριθμο “Backward and Forward Sweep” ο οποίος αποτελεί μία μέθοδο ανάλυσης ροής ισχύος στα ακτινικά δίκτυα διανομής. Για τις ανάγκες της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό σε περιβάλλον Matlab “EMPLAN” που αναπτύχθηκε από τον Σπυρίδωνα Χ. Παπαδόπουλο κατά τη διπλωματική του εργασία με επιβλέποντα καθηγητή τον κ. Παύλο Σ. Γεωργιάκη. Το λογισμικό αυτό αποτέλεσε πολύ σημαντικό εργαλείο για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής επιτρέποντας μας να εκτελούμε με ευκολία ανάλυση ροής ισχύος όποτε ήταν αναγκαίο.

Η μελέτη της επίδρασης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων έγινε στο δίκτυο 13 ζυγών IEEE, με ορισμένες τροποποιήσεις, χρησιμοποιώντας 24ωρες καμπύλες ζήτησης ισχύος τόσο για τα φορτία όσο και για τα ηλεκτρικά οχήματα. Οι καμπύλες των φορτίων προέκυψαν κάνοντας χρήση δεδομένων από δίκτυα διανομής Χαμηλής Τάσης που συνδυάστηκαν κατάλληλα για να προκύψουν οι επιθυμητές μέγιστες ζητήσεις φορτίων. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν μέρος του project “Low Voltage Network Solutions” που πραγματοποιήθηκε το 2014 από το πανεπιστήμιο του Manchester.

Η συνολική ζήτηση ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων προέκυψε από κατάλληλο πρόγραμμα σε περιβάλλον Matlab. Το πρόγραμμα αυτό αντιστοίχισε στην συνολική καμπύλη ζήτησης ισχύος των φορτίων, την καμπύλη ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Στη συνέχεια αυτά τα ηλεκτρικά οχήματα μοιράστηκαν αναλογικά πρώτα σε κάθε φάση και μετά σε κάθε κόμβο του δικτύου. Η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν περίπου 5,8 % δηλαδή η συνολική ζήτηση ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν περίπου το $\frac{1}{17}$ της συνολικής ζήτησης ισχύος των αρχικών φορτίων.

Η μελέτη της επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο έγινε χρησιμοποιώντας τρία αποτελέσματα. Αυτά ήταν οι δύο δείκτες ασυμμετρίας των τάσεων ρ και ϵ που προέκυψαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών και οι απώλειες ισχύος. Καθώς το λογισμικό “EMPLAN” εκτελεί στιγμιαία ανάλυση ροής ισχύος, έπρεπε να εκτελείται με ξεχωριστά δεδομένα για κάθε ώρα.

Αφού εξάγαμε αποτελέσματα χωρίς και με την παρουσία ηλεκτρικών οχημάτων παρατηρήσαμε ότι η φόρτιση τους επηρεάζει σημαντικά τις ώρες αιχμής μόνο. Για το λόγο αυτό υπήρξε η ανάγκη αντιμετώπισης της επίδρασης αυτής. Η αντιμετώπιση αυτή έγινε με τρεις τρόπους, τη χρήση ρυθμιστή, τη βελτιστοποίηση Smart Charging, και την εφαρμογή ταυτόχρονα και των δύο τρόπων.

Η χρήση του ρυθμιστή έγινε με αρχικό σκοπό να αντιμετωπίσει τις πτώσεις τάσης που προκάλεσε η προσθήκη των ηλεκτρικών οχημάτων. Παρ' όλα αυτά, η χρήση του διόρθωσε σημαντικά τις ασυμμετρίες των τάσεων και αποτέλεσε ένα πολύ αποδοτικό τρόπο αντιμετώπισης.

Η βελτιστοποίηση Smart Charging στην ουσία μετατόπισε χρονικά τις καμπύλες ζήτησης ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων για κάθε κόμβο με σκοπό να κάνει πιο συμμετρικές τις απορροφήσεις ισχύος των ασύμμετρων φορτίων και να μειώσει με τον τρόπο αυτό τις ασυμμετρίες των τάσεων. Η χρήση του τρόπου αυτού μείωνε σημαντικά τους δείκτες ασυμμετρίας τις ώρες αιχμής αυξάνοντας τις αντίστοιχες τιμές των υπόλοιπων ωρών. Παρ' όλο που στις ώρες εκτός αιχμής ποσοστιαία οι μεταβολές στους δείκτες ασυμμετρίας ήταν σημαντικές, πρακτικά οι απόλυτες τιμές ήταν και πάλι πάρα πολύ χαμηλές καθιστώντας τον τρόπο αυτό πολύ αποδοτικό.

Η χρήση των δύο τρόπων ταυτόχρονα συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο και αποτελεί τη καλύτερη λύση.

Αφού ολοκληρώθηκε η μελέτη για διείσδυση 5,8 %, συνεχίσαμε εξετάζοντας τα αποτελέσματα διπλάσιας, τριπλάσιας και τετραπλάσιας διείσδυσης (11,6 %, 17,4 % και 23,2 % αντίστοιχα). Στις περιπτώσεις αυτές εξετάσαμε πέρα από την απλή παρουσία των ηλεκτρικών οχημάτων και τους τρεις τρόπους αντιμετώπισης.

Παρατηρήσαμε ότι όσο και να αυξήθηκε η διείσδυση, πρακτικά στις ώρες εκτός αιχμής δεν είχαμε κανένα πρόβλημα. Η επίδραση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν πολύ σημαντική και έπρεπε να αντιμετωπιστεί μόνο τις ώρες αιχμής. Η χρήση του ρυθμιστή ήταν και πάλι πολύ αποδοτική λύση απλά όσο αυξανόταν η διείσδυση μειωνόταν η αποδοτικότητα της. Η βελτιστοποίηση Smart Charging και πάλι αντιμετώπιζε σημαντικά τις ασυμμετρίες κατά τις ώρες αιχμής μειώνοντας τις μέγιστες και αυξάνοντας τις ελάχιστες τιμές των δεικτών ασυμμετρίας. Η χρήση της μάλιστα σε αντίθεση με τον ρυθμιστή γινόταν πιο αποδοτική με την αύξηση της διείσδυσης. Τέλος και πάλι η ταυτόχρονη εφαρμογή των δύο τρόπων συνδυάζει τα πλεονεκτήματα τους.

Όσον αφορά τις απώλειες ισχύος, ο πιο πρακτικός παράγοντας με τον οποίο αξιολογήσαμε όλες τις περιπτώσεις, είδαμε ότι η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων τις επηρέαζε αρκετά και η ανάγκη για κάποιο τρόπο αντιμετώπισης γινόταν επιτακτική όσο αυξανόταν η διείσδυση. Για άλλη μια φορά παρατηρήσαμε ότι η χρήση ρυθμιστή, αν και γενικά μια πολύ αποδοτική λύση, όσο αυξανόταν η διείσδυση γινόταν λιγότερο αποδοτική, σε αντίθεση με τη βελτιστοποίηση Smart Charging που γινόταν περισσότερο αποδοτική. Και πάλι η καλύτερη λύση σε σχέση με τις απώλειες ισχύος ήταν η ταυτόχρονη εφαρμογή των δύο τρόπων.

Το τελικό συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε στη διπλωματική αυτή είναι το εξής. Η ασύμμετρη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων επηρέασε σημαντικά το δίκτυο μας μόνο τις ώρες αιχμής όσο και να αυξήσαμε τη διείσδυση τους. Η χρήση

μόνο της βελτιστοποίησης Smart Charging δεν αρκεί γιατί αν και διορθώνει σημαντικά τις ασυμμετρίες των τάσεων και τις απώλειες ισχύος, κατά τις ώρες αιχμής τα μέτρα ορισμένων τάσεων παραμένουν εκτός των αποδεκτών ορίων. Η χρήση του ρυθμιστή τάσης από την άλλη, αντιμετωπίζει αποδοτικά τόσο τις πτώσεις τάσης όσο και τις ασυμμετρίες των τάσεων και τις απώλειες ισχύος. Μάλιστα οι ώρες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ασυμμετρίες τάσεων είναι οι ώρες κατά τις οποίες τα μέτρα τους είναι εκτός ορίων. Η χρήση του ρυθμιστή μόνο, γίνεται λιγότερο αποδοτική όσο αυξάνεται η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων, οπότε για τις περιπτώσεις διείσδυσης κοντά στο 17 % και πάνω (τριπλάσια και τετραπλάσια στη περίπτωση μας) θα ήταν καλύτερο να συνδυαστεί με τη βελτιστοποίηση Smart Charging, κυρίως για περαιτέρω μείωση των απωλειών ισχύος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Dale R. Patrick, Stephen W. Fardo, *Electrical Distribution Systems*, 2nd edition, Lilburn, GA: The Fairmont Press, Inc, 2009, pp. 1-3.
- [1.2] Β. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος Ι*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985, σελ. 1-3, σελ. 7-10, σελ. 126-130.
- [1.3] Σπυρίδων Χ. Παπαδόπουλος, *Ανάλυση Ροής Φορτίου σε Ασύμμετρα Ακτινικά Δίκτυα Διανομής*, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2011, σελ. 3.
- [2.1] Ν. Μισυρλής, *Δομές Δεδομένων με C*, Αθήνα, Εκδόσεις Συμμετρία, 2002, σελ. 213-219.
- [2.2] R.D Zimmerman, "Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 4, pp. 20146-2048, Nov. 1995.
- [2.3] Μ. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος Ι*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1994, σελ. 30-35
- [2.4] Σπυρίδων Χ. Παπαδόπουλος, *Ανάλυση Ροής Φορτίου σε Ασύμμετρα Ακτινικά Δίκτυα Διανομής*, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2011, σελ. 5-9
- [3.1] Σπυρίδων Χ. Παπαδόπουλος, *Ανάλυση Ροής Φορτίου σε Ασύμμετρα Ακτινικά Δίκτυα Διανομής*, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2011, σελ. 11-39
- [3.2] W. Kersting, *Distribution System Modeling Analysis*, New Mexico: CRC Press, 2002, pp 77-132, pp. 162-180, pp. 199-245, pp.251-261
- [3.3] Μ. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος Ι*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1994, σελ. 30-35
- [4.1] R. Zimmerman, *Comprehensive Distribution Power Flow: Modeling, Formulation, Solution Algorithms and Analysis*, Ph.d. Dissertation, Cornell University, Jan. 1995, pp. 57-83
- [4.2] Σπυρίδων Χ. Παπαδόπουλος, *Ανάλυση Ροής Φορτίου σε Ασύμμετρα Ακτινικά Δίκτυα Διανομής*, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2011, σελ. 41-50
- [4.3] W. Kersting, *Distribution System Modeling Analysis*, New Mexico: CRC Press, 2002, pp. 269-288

- [5.1] Κ. Τσατσάκης, *Μελέτη μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων*, μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2010.
- [5.2] Κωσταντίνος Δ. Παγώνης, *Επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στα μεγέθη ενός Μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής*, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2011 σελ. 121
- [5.3] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design (Power Electronics and Application Series)*.
- [5.4] <http://www.hybridcenter.org/> .
- [5.5] S. Bendind, M. Ferdowsi, S. Channon, K. Strunz, Project Merge, Deliverable 1.1 *Specification for an Enabling Smart Technology*, website: http://www.ev-merge.eu/images/stories/uploads/MERGE_WP1_D1.1.pdf .
- [5.6] Λάμπρος Σ. Λαμπρόπουλος, *Έλεγχος κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος για εξοικονόμηση ενέργειας-εφαρμογή στα ηλεκτροκίνητα οχήματα* , διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Δεκέμβριος 2010.
- [5.7] Χαράλαμπος Ε. Μαρμαράς, *Προγραμματισμός, κατανομή και διαχείριση φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων βάσει οικονομικών και δικτυακών κριτηρίων*, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2012.
- [5.8] <http://www.opengov.gr/minenv/?p=3512>
- [5.9] Βαρβάρα Κ. Ρίζου, *Επίδραση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στα μεγέθη ενός μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας*, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2012, σελ. 112-127.
- [5.10] <http://www.energia.gr> .
- [5.11] Αγγελική Λυδία Αντωνία Ι. Συρρή, *Μελέτη επίδρασης της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας*, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2012, σελ. 35-40
- [6.1] Asif Faiz, Christopher S. Weaver, Michael P. Walsh, *Air Pollution from Motor Vehicles*, Washington D.C.: The World Bank, 1996, pp. 227
- [6.2] Erotokritos Xydias, Charalampos Marmaras, Liana M. Cipcigan, Nick Jenkins, Steve Carroll, Myles Barker, *A data-driven approach for characterizing the charging demand of electric vehicles: A UK case study*, Cardiff University, School of Engineering, Cenex, Innovation Centre, Loughborough University, 2015

[6.3] PNNL: *Newsroom - Mileage from megawatts: Study finds enough electric capacity to "fill up" plug-in vehicles across much of the nation*". Pnl.gov. 2006-12-11. Retrieved 2010-12-26

[6.4] Σπυρίδων Χ. Παπαδόπουλος, *Ανάλυση Ροής Φορτίου σε Ασύμμετρα Ακτινικά Δίκτυα Διανομής*, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2011, σελ. 89-104

[6.5] "IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee - Distribution Test Feeders," [Online]. Διαθέσιμο: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>, προσπελάστηκε το Μάιο 2010.

[6.6] UK industrial project *Low Voltage Network Solutions* (www.enwl.co.uk/lvns), University of Manchester, 2014.

[6.7] John J Grainger, William D. Stevenson, Jr., *Power System Analysis*, Singapore: McGraw-Hill, Inc, 1994, pp 416-422

[6.8] Michael Pokorny, *Analysis of Unbalance due to Asymmetrical Loads*, Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 4, No 1, Winter-Spring 2005

