



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Εφαρμογή αλγορίθμων κυρτής βελτιστοποίησης στην
διαχείριση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Θεόδωρος Β Θεοδωρόπουλος

Αθήνα, Νοέμβρης 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Εφαρμογή αλγορίθμων κυρτής βελτιστοποίησης στην
διαχείριση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Θεόδωρος Β. Θεοδωρόπουλος

Συμβουλευτική Επιτροπή : Νικόλαος Ουζούνογλου

Δήμητρα Κακλαμάνη

Άγγελος Αμδίτης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 8η Νοέμβρη 2022.

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου
Ομοτ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δήμητρα Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Άγγελος Αμδίτης
Ερευνητής Α' Ε.Π.Ι.Σ.Ε.Υ.

.....
Παναγιώτης Τσανάκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δημήτρης Ασκούνης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Γιαννής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Τίγκελης
Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α

Αθήνα, Νοέμβρης 2022

.....

Θεόδωρος Β Θεοδωρόπουλος

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

Copyright © Θεόδωρος Β Θεοδωρόπουλος

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.

Συνοπτική Περίληψη/Abstract

Ο αυξανόμενος στόλος ηλεκτρικών οχημάτων (ΗΟ) αναμφίβολα θα αποτελέσει ένα επιπλέον φορτίο για τα συστήματα διανομής ενέργειας που θα απαιτήσουν λύσεις για τη διασφάλιση κανονικής λειτουργίας δικτύου και απρόσκοπτης φόρτισης ΗΟ. Η δίκαιη κατανομή ισχύος φόρτισης ΗΟ και η ευθυγράμμιση με τους περιορισμούς πτώσης τάσης μπορεί να αποτελέσει σημαντικό ζήτημα. Προς αυτή την κατεύθυνση, η εργασία μελετά ένα πλαίσιο διαχείρισης φόρτισης που λαμβάνει υπόψη τις ανάγκες οικιακής ενέργειας, τη ζήτηση φόρτισης ΗΟ και τους περιορισμούς πτώσης τάσης σε ακτινικά δίκτυα διανομής.

Η προσέγγισή μας χωρίζει το πρόβλημα φόρτισης σε δύο μέρη. Πρώτον, κατανέμεται ισχύς σε ζυγούς της γραμμής διανομής σύμφωνα με το σταθμισμένο αναλογικό κριτήριο δικαιοσύνης λαμβάνοντας υπ' όψη τη ζήτηση του στόλου των ΗΟ. Δεύτερον, ως αποτέλεσμα μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης ελαχίστων τετραγώνων με περιορισμούς, κάθε ΗΟ λαμβάνει μια ανώτατη τιμή ισχύος φόρτισης. Και τα δύο προβλήματα επιλύονται με αλγόριθμους κυρτής βελτιστοποίησης αναφοράς καθώς και από κατανεμημένους που εισήχθησαν για την επίλυση του προβλήματος για μεγάλους στόλους ΗΟ. Η ανάλυση αποδεικνύει ότι η λύση των κατανεμημένων αλγορίθμων είναι κοντά στην κεντρική λύση αναφοράς. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φόρτισης ΗΟ υποδεικνύουν μια πιο ισορροπημένη κατανομή ισχύος φόρτισης ΗΟ σε σχέση με προσεγγίσεις γραμμικής και τετραγωνικής στρατηγικής βελτιστοποίησης. Παράλληλα μελετάται και το πρόβλημα διαχείρισης σε περιβάλλον ασύρματης και δυναμικής (εν κινήσει) φόρτισης με σκοπό την εναρμόνιση της συνολικής ισχύος φόρτισης ενός πλήθους οχημάτων σε ένα επιθυμητό προφίλ.

λέξεις κλειδιά: κυρτή βελτιστοποίηση, κατανεμημένη βελτιστοποίηση, διαχείριση φόρτισης, ηλεκτρικά οχήματα, έλεγχος τάσης

The ever-increasing Electric Vehicle (EV) fleet will undoubtedly stress the power system that requires scalable solutions to ensure normal grid operation and seamless EV charging. Fairness of EV charging power allocation and alignment to voltage restrictions is also essential. Towards that end, this dissertation introduces an EV charging allocation framework that takes into account residential power needs, EV charging demand and distribution-line voltage constraints. Our approach breaks down the charging problem into two parts; firstly, it allocates power to distribution line buses according to the weighted proportional fairness criterion and takes into account their specific EV fleet demand. Secondly, as an outcome of a constrained least squares optimization process, each EV's charging power is assigned. Both problems are solved by centralized reference convex optimization algorithms as well as scalable distributed ones introduced to address the charging needs of large EV fleets and long in- frastructures. Rigorous analysis proves that the solution of distributed algorithms is close to centralized reference ones. Daily EV charging simulation results indicate a more balanced EV charging power allocation when comparing proportional fairness to linear and quadratic power allocation approaches. At the same time, the problem of management in a wireless and dynamic (on-the-go) charging environment is being studied in order to harmonize the total charging power of a number of vehicles to a desired profile.

keywords: convex optimization, distributed optimization, demand side management, electric vehicles, voltage control

στην Νένα και τα παιδιά μου.

Ευχαριστίες

Η διατριβή αυτή εκπονήθηκε στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων της ομάδας I-SENSE του εργαστηρίου Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διατριβής, Ομότιμο Καθηγητή ΕΜΠ Νικόλαο Ουζούνoglou για την μοναδική ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα σε ένα σταθερό ακαδημαϊκό περιβάλλον. Είχα την τύχη και την χαρά να βρεθώ σε μια συνεχώς αναπτυσσόμενη ομάδα μέσα στην οποία εξελίχθηκα, ευχαριστώ θερμά τον Διευθυντή Έρευνας του ΕΠΙΣΕΥ και της ομάδας I-SENSE Δρ Άγγελο Αμδίτη που με διορατικότητα δημιούργησε τις κατάλληλες συνθήκες μέσα από τις οποίες προέκυψε η διατριβή. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για τις πολύτιμες επισημάνσεις και συμβουλές που συνέβαλαν στην ποιοτική αναβάθμιση της εργασίας. Τα πρώτα μου ερευνητικά βήματα οφείλω στην εμπιστοσύνη και τις ευκαιρίες που μου έδωσε η Διοικητική Διευθύντρια της ομάδας I-SENSE Δρ Ευαγγελία Πορτούλη στα πρώτα στάδια της πορείας μου, την οποία και ευχαριστώ. Ευχαριστώ τον Δρ Παναγιώτη Λυτρίβη για την εμπιστοσύνη, την συνεχή υποστήριξη και το ευχάριστο κλίμα που δημιούργησε ως αρχηγός της ομάδας ITS του I-SENSE, της οποίας ήμουν μέλος. Ευχαριστώ επίσης τον Τεχνικό Διευθυντή της ομάδας I-SENSE Δρ Ιωάννη Καρασεϊτανίδη για την άψογη και ευχάριστη καθοδήγηση σε θέματα σχετικά με την διατριβή και τις ερευνητικές δραστηριότητες της ομάδας I-SENSE.

Είναι πολλοί οι συνεργάτες που με τον δικό τους τρόπο βοήθησαν στην δημιουργία αυτής της διατριβής. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Δρ Ευάγγελο Καρφόπουλο, η διατριβή του οποίου απετέλεσε μια από τις βασικές πηγές έμπνευσης για την διατριβή αυτή. Ευχαριστώ θερμά τον Δρ Παναγιώτη Πανταζόπουλο για τις εποικοδομητικές συζητήσεις και ερευνητικές κατευθύνσεις που με πολύ ευχάριστο τρόπο μου παρείχε σε διάφορα στάδια αυτής της διατριβής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για το ενδιαφέρον που έδειχναν πάντα για την πορεία της διατριβής μου, τις αδερφές μου, τους γονείς μου που καλλιέργησαν το ενδιαφέρον μου για την επιστήμη και την τεχνολογία και την Νένα για την αγάπη και το κουράγιο που μου έδωσε όλα αυτά τα χρόνια. Στα παιδιά μου οφείλω την διάθεσή μου να ολοκληρώσω την διατριβή, Γιώργο και Βασίλη σας ευχαριστώ!

Περιεχόμενα

Συνοπτική Περίληψη/Abstract	5
Κατάλογος Σχημάτων	15
Κατάλογος Πινάκων	19
Πίνακας Συμβόλων, Ακροθυμίων	21
1 Εισαγωγή	23
1.1 Κατηγορίες ηλεκτρικών αυτοκινήτων	25
1.2 Κατηγορίες μπαταριών ηλεκτρικών αυτοκινήτων	28
1.3 Σταθμοί φόρτισης	30
1.4 Φορείς ηλεκτροκίνησης	32
1.5 Επίδραση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας	34
1.6 Διαχείριση φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων	35
1.7 Διαχείριση φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων για υπηρεσίες δικτύου διανομής	36
1.8 Αρχιτεκτονική συστημάτων διαχείρισης φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων για υπηρεσίες δικτύου διανομής	40
1.9 Επικοινωνιακά πρωτόκολλα ηλεκτροκίνησης και διαχείριση φορτίου	41
1.10 Φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων με περιορισμένη πτώση τάσης δικτύου διανομής	44
2 Αρχιτεκτονική συστήματος διαχείρισης φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων υπό περιορισμένη πτώση τάσης	47
2.1 Αρχιτεκτονική συστήματος	47
2.2 Ενσωμάτωση συστήματος από φορείς ηλεκτροκίνησης	49
2.3 Ενσωμάτωση κατανεμημένου συστήματος από φορείς ηλεκτροκίνησης	53

3	Μεθοδολογία και εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης	59
3.1	Μεθοδολογία ανάλυσης ευαισθησιών τάσης	59
3.2	Αλγόριθμοι υποσυστήματος εκτίμησης ορίων φορτίου	64
3.2.1	Βελτιστοποίηση του διαμοιρασμού ισχύος με κριτήριο την αναλογική δικαιοσύνη	65
3.2.2	Κεντρική επίλυση καθορισμού ορίων φορτίου	68
3.2.3	Κατανεμημένη προσεγγιστική επίλυση καθορισμού ορίων φορτίου	70
3.3	Αλγόριθμοι ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	74
3.3.1	Κεντρική επίλυση προβλήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	76
3.3.2	Κατανεμημένη επίλυση προβλήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	77
4	Περιβάλλον εξομοίωσης, σενάριο φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και αποτελέσματα εξομοιώσεων	81
4.1	Περιβάλλον εξομοίωσης και η ανάλυση ροής φορτίου	81
4.2	Η μοντελοποίηση της γραμμής δικτύου διανομής Μ.Τ μεγάλου μήκους και του φορτίου της.	85
4.3	Αποτελέσματα εξομοιώσεων υποσυστήματος καθορισμού ορίων ισχύος με κεντρική και κατανεμημένη επίλυση	85
4.4	Αποτελέσματα εξομοιώσεων υποσυστήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με κεντρική και κατανεμημένη επίλυση	91
4.5	Αποτελέσματα εξομοιώσεων συστήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με κεντρική επίλυση ορίων φόρτισης	95
4.6	Αποτελέσματα εξομοιώσεων συστήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με κατανεμημένη επίλυση ορίων φόρτισης	105
4.7	Αποτελέσματα εξομοιώσεων ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με κατανεμημένη επίλυση ορίων φόρτισης βασιζόμενη σε μετρήσεις τάσης.	112
4.8	Σύγκριση στρατηγικής αναλογικής δικαιοσύνης με άλλες στρατηγικές επιμερισμού φόρτισης	116
5	Διαχείριση φορτίου δυναμικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	119
5.1	Εισαγωγή	119
5.2	Πρωτόκολλα επικοινωνίας και αρχιτεκτονική συστημάτων δυναμικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	120
5.3	Εξομοιώσεις συστήματος διαχείρισης φορτίου ασύρματης φόρτισης . . .	121

6	Συμπεράσματα και επεκτάσεις	127
6.1	Χαρακτηριστικά πολυπλοκότητας αλγορίθμων διαχείρισης φορτίου . . .	128
6.2	Χαρακτηριστικά μοντελοποίησης δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	131
6.3	Σχολιασμός προσέγγισης διαχείρισης φορτίου	131
6.4	Σχολιασμός διαχείρισης φορτίου δυναμικής φόρτισης	133
6.5	Επιπλέον επεκτάσεις διατριβής	133
6.6	Συνεισφορά διατριβής	134
	Βιβλιογραφία	137
	Παράρτημα Πίνακας ευαισθησιών γραμμής διανομής	145

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Ενδεικτική αρχιτεκτονική ηλεκτροκίνησης	33
1.2	Ενδεικτική αρχιτεκτονική μεθόδων βελτιστοποίησης	39
1.3	Διάγραμμα ροής καθορισμού ορίων φορτίου	42
2.1	Αρχιτεκτονική συστήματος	48
2.2	Διάγραμμα ροής συστήματος	49
2.3	Ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ υποσυστημάτων	50
2.4	Ενσωμάτωση υποσυστημάτων στον διαχειριστή δικτύου διανομής	50
2.5	Ενσωμάτωση υποσυστημάτων στον διαχειριστή υποδομής φόρτισης	51
2.6	Υλοποίηση συστήματος σε δίκτυο διανομής	51
2.7	Διάγραμμα ροής υποσυστήματος καθορισμού ορίων φόρτισης	52
2.8	Διάγραμμα ροής υποσυστήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	53
2.9	Κατανεμημένη αρχιτεκτονική υποσυστήματος εκτίμησης ορίων διαχείρισης φορτίου	54
2.10	Κατανεμημένη αρχιτεκτονική υποσυστήματος ελεγχόμενης φόρτισης οχημάτων	54
2.11	Υλοποίηση κατανεμημένου συστήματος σε δίκτυο διανομής	55
2.12	Επικοινωνία συντονιστή-πράκτορα κατανεμημένου συστήματος διαχειριστή δικτύου διανομής	56
2.13	Επικοινωνία συντονιστή-πράκτορα κατανεμημένου συστήματος διαχειριστή υποδομής φόρτισης	56
2.14	Διάγραμμα ροής κατανεμημένου υποσυστήματος καθορισμού ορίων φόρτισης	57
2.15	Διάγραμμα ροής κατανεμημένου υποσυστήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	57
3.1	Ανα φάση ισοδύναμο κύκλωμα δικτύου διανομής	61

4.1	Γραφικό περιβάλλον δημιουργίας δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας mosaik .	82
4.2	Γραφικό περιβάλλον εξομοίωσης δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας mosaik .	82
4.3	Γραμμή δικτύου διανομής Μ.Τ μεγάλου μήκους μέσα μέσα από το περιβάλλον mosaik	86
4.4	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση	87
4.5	Εκτίμηση πτώσης τάσης για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση στον πιο απομακρυσμένο ζυγό	87
4.6	Ίσχύς του πιο απομακρυσμένου ζυγού $n=59$ για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων της κατανεμημένης επίλυσης	88
4.7	Ίσχύς ζυγού $n=35$ για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων της κατανεμημένης επίλυσης	89
4.8	Ίσχύς ζυγού $n=1$ για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων της κατανεμημένης επίλυσης	89
4.9	Κατανομή ορίων ισχύος για όλους τους ζυγούς της γραμμής διανομής με την κεντρική και κατανεμημένη επίλυση	90
4.10	Λεπτομέρεια κατανομής ορίων ισχύος για όλους τους ζυγούς της γραμμής διανομής με την κεντρική και κατανεμημένη επίλυση	91
4.11	Ίσχύς φόρτισης για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση για επανάληψη $i=10$	92
4.12	Ίσχύς φόρτισης για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση για επανάληψη $i=100$	93
4.13	Ίσχύς φόρτισης για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση για επανάληψη $i=1000$	93
4.14	Ίσχύς φόρτισης για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση για επανάληψη $i=10000$	94
4.15	Αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ κεντρικής και κατανεμημένης επίλυσης	94
4.16	Τάση στον ζυγό 59 για ελεγχόμενη και ανεξέλεγκτη φόρτιση HO	95
4.17	Συνολικό ημερήσιο ανελαστικό φορτίο	96
4.18	Συνολικό ημερήσιο ανελαστικό φορτίο ζυγού 1	97
4.19	Συνολικό ημερήσιο ανελαστικό φορτίο ζυγού 2	97
4.20	Συνολικό ημερήσιο ανελαστικό φορτίο για τους ζυγούς 3-21	97
4.21	Συνολικό ημερήσιο ανελαστικό φορτίο ανα ζυγό για τους υπολοίπους 49 ζυγούς	98
4.22	Κατανομή άφιξης ηλεκτρικών οχημάτων	98

4.23	Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 1	99
4.24	Προσαρμογή συντελεστή ζήτησης για τον ζυγό 1	99
4.25	Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 3	100
4.26	Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 3	100
4.27	Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 59	101
4.28	Προσαρμογή συντελεστή ζήτησης για τον ζυγό 59	101
4.29	Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 1-λεπτομέρεια	102
4.30	Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 59-λεπτομέρεια	102
4.31	Προφίλ τάσης στον ζυγό 59	103
4.32	Χρονοσειρές συντελεστή ζήτησης	104
4.33	Χρονοσειρές ζήτησης-ορίου φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	104
4.34	Κατανομή ενέργειας φόρτισης στους ζυγούς του συστήματος	105
4.35	Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 1 με κατανεμημένη επίλυση	106
4.36	Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 03 με κατανεμημένη επίλυση	106
4.37	Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 59 με κατανεμημένη επίλυση	107
4.38	Χρονοσειρά τιμής αντικειμενικής συνάρτησης κεντρικής-κατανεμημένης λύσης	107
4.39	Χρονοσειρά εκτιμώμενης πτώσης τάσης στον ζυγό 59 για την κεντρική και κατανεμημένη επίλυση	108
4.40	Χρονοσειρά ορίων ισχύος ζυγού 1 για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση	108
4.41	Χρονοσειρά ορίων ισχύος ζυγού 3 για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση	109
4.42	Χρονοσειρά ορίων ισχύος ζυγού 59 για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση	109
4.43	Χρονοσειρά πτώσης τάσης ζυγού 59 για την κατανεμημένη επίλυση . . .	110
4.44	Χρονοσειρές συντελεστή ζήτησης	111
4.45	Χρονοσειρές ζήτησης-ορίου φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων για κατανε- μημένη επίλυση	111
4.46	Κατανομή ενέργειας φόρτισης στους ζυγούς του συστήματος για κατα- νεμημένη επίλυση	112
4.47	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση με μετρήσεις τάσης	113
4.48	Τάση στον ζυγό 59	113
4.49	Όριο ισχύος-ζήτηση στον ζυγό 59	114
4.50	Όριο ισχύος-ζήτηση στον ζυγό 3	114
4.51	Όριο ισχύος-ζήτηση στον ζυγό 1	115
4.52	Χρονοσειρά συντελεστή ζήτησης w_i	115
4.53	Avg Eallocated/Edemanded	117

4.54	Std Eallocated/Edemanded	118
4.55	πλήθος των ζυγών με Eallocated/Edemanded	118
5.1	Αρχιτεκτονική συστήματος επικοινωνιών διαχείρισης δυναμικής φόρτισης	120
5.2	Αποτελέσματα εξομοιώσεων διαχείρισης φορτίου για την περίπτωση πο- μπών ισχύος με διάκενο	123
5.3	Αποτελέσματα εξομοιώσεων διαχείρισης φορτίου για την περίπτωση πο- μπών ισχύος χωρίς διάκενο	123
5.4	Αποτελέσματα εξομοιώσεων διαχείρισης φορτίου με επιπρόσθετη καθυ- στέρηση στην μέτρηση του φορτίου	124
5.5	Αποτελέσματα εξομοιώσεων διαχείρισης δυναμικής φόρτισης (Σενάριο 1)	125
5.6	Αποτελέσματα εξομοιώσεων διαχείρισης δυναμικής φόρτισης (Σενάριο 2)	125
5.7	Αποτελέσματα εξομοιώσεων διαχείρισης δυναμικής φόρτισης (Σενάριο 3)	126

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Χρήση μπαταριών απο κατασκευαστές ηλεκτρικών αυτοκινήτων	29
1.2	Ενδεικτικά χαρακτηριστικά μπαταρίας και φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκι- νήτων	29
1.3	Χαρακτηριστικά ταχείας φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων.	30
1.4	Ταξινόμηση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων	31
4.1	Λόγος τιμών αντικειμενικής συνάρτησης για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων της κατανεμημένης μεθό- δου	88
4.2	Λόγος τιμών αντικειμενικής συνάρτησης για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων της κατανεμημένης μεθό- δου	90
4.3	Εξέλιξη αθροιστικού τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ κεντρικής και κα- τανεμημένης επίλυσης	92
4.4	Στατιστικά μεγέθη τάσης για το χρονικό διάστημα $t = 1100...1600$. . .	103
4.5	Στατιστικά μεγέθη κάλυψης ενεργειακών αναγκών ηλεκτρικών οχημάτων	105
4.6	Στατιστικά μεγέθη τάσης για το χρονικό διάστημα $t = 1100...1600$ κατα- νεμημένης επίλυσης	110
4.7	Στατιστικά μεγέθη κάλυψης ενεργειακών αναγκών ηλεκτρικών οχημάτων για κατανεμημένη επίλυση	111
4.8	Στατιστικά μεγέθη τάσης στον ζυγό 59 ($t > 1750$)	114
5.1	Παράμετροι εξομοιώσεων συστήματος διαχείρισης φορτίου	123
5.2	Αποτελέσματα εξομοιώσεων συστήματος διαχείρισης φορτίου	124
5.3	Παράμετροι εξομοιώσεων διαχείρισης φορτίου με τροφοδοσία απο ανε- μογεννήτρια	125
5.4	Αποτελέσματα εξομοιώσεων συστήματος διαχείρισης δυναμικής φόρτι- σης με ανεμογεννήτρια	126

6.1	Τηλεπικοινωνιακά μηνύματα προβλήματος 3.46 (με * οι μεταβλητές αρχικοποίησης)	129
6.2	Τηλεπικοινωνιακά μηνύματα προβλήματος 3.69 (με * μεταβλητές αρχικοποίησης)	130

Πίνακας Συμβόλων, Ακρονυμίων

Ακρωνύμια / Συντομογραφίες

ADMM	Alternating Direction Multiplier Method
BEV	Battery Electric Vehicle
CPO	Charging Point Operator
DSM	Demand Side Management
DSO	Distribution System Operator
EMSP	Electromobility Service Provider
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment
HEV	Fuel Cell Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
Li-ion	Lithium ion
NiMH	Nickel Metal Hydride
OCPP	Open Charge Point Protocol
OPF	Optimal Power Flow
OSCP	Open Smart Charging Protocol
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
REEV	Range Extended Electric Vehicle
V2G	Vehicle to Grid

V2H	Vehicle to Home
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΗΟ	Ηλεκτρικό όχημα
ΡΑΕ	Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μείζον πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα. Οι οδικές μεταφορές αντιπροσωπεύουν περίπου το ένα πέμπτο των εκπομπών αερίων που οδηγούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου της Ευρώπης και αποτελούν την κύρια αιτία μείωσης της ποιότητας του αέρα στις πόλεις [1]. Η ηλεκτροκίνηση αποτελεί μια από τις επιλογές που επιτρέπει την μετάβαση σε φιλικότερους προς το περιβάλλον τρόπους μεταφοράς καθώς σε συνδυασμό με το ενεργειακό σύστημα μπορεί να οδηγήσει σε συνολική μείωση της εκπομπής ρύπων [2]. Εκτός από τα ενδιαφέροντα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά τα ηλεκτροκίνητα οχήματα παρουσιάζουν αρκετά ελκυστικά μηχανικά χαρακτηριστικά όπως η αυξημένη ροπή και το μειωμένο κόστος συντήρησης [3]. Η αυξητική τάση του συνόλου ηλεκτρικών οχημάτων που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, αναμένεται να συνεχιστεί καθώς οι αυτοκινητοβιομηχανίες εμπλουτίζουν την γκάμα τους με ηλεκτρικά οχήματα και πολλά κράτη διαμορφώνουν ρυθμιστικά πλαίσια για την περαιτέρω ενίσχυση της ηλεκτροκίνησης. Αναπόφευκτα, θα προκληθεί ένα επιπλέον ηλεκτρικό φορτίο στο οποίο πρέπει να αντεπεξέλθουν τα ήδη επιβαρυνμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενσωμάτωση του επιπρόσθετου ηλεκτρικού φορτίου στα πλαίσια της εύρυθμης λειτουργίας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και η ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι ζητούμενα για την καθιέρωση και βιωσιμότητα της ηλεκτροκίνησης. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, στόχος της διατριβής είναι η πρόταση αλγόριθμων κυρτής βελτιστοποίησης για τον έλεγχο της διαδικασίας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με έμφαση στην λειτουργία της γραμμής διανομής εντός αποδεκτών ορίων πτώσης τάσης αλλά και στην εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Στην διατριβή παρουσιάζεται η ανάλυση της ευαισθησίας τάσης ακτινικών δικτύων διανομής ως προς το φορτίο, που επιτρέπει την εξαγωγή γραμμικών σχέσεων φορτίου-τάσης κατά την διεθνή βιβλιογραφία. Στην συνέχεια, προτείνεται διαδικασία για την εύ-

ρρηση ορίων φόρτισης ζυγών της γραμμής διανομής όπου συναθροίζεται φορτίο ηλεκτρικών οχημάτων, δηλαδή στο επίπεδο διαχείρισης φορτίου πολλών ηλεκτρικών οχημάτων. Η στρατηγική ελέγχου εξαγωγής ορίων φόρτισης για κάθε ζυγό της γραμμής διανομής βασίζεται στην εξυπηρέτηση ενός ελαχίστου εγγυημένου φορτίου αφενός και στην μεγιστοποίηση της εξυπηρέτησης της συνολικής ζήτησης αφετέρου κατά το κριτήριο της σταθμισμένης αναλογικής δικαιοσύνης. Προτείνεται επίσης διαδικασία για τον καθορισμό του ορίου φόρτισης κάθε ηλεκτρικού οχήματος ξεχωριστά από τον διαχειριστή φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων με βάση τον περιορισμό στην συνολική ισχύ του ζυγού και τις ενεργειακές ανάγκες του ηλεκτρικού οχήματος. Ο προσδιορισμός των ορίων φόρτισης βασίζεται στην ικανοποίηση κριτηρίων που παίρνουν την μορφή προβλήματος κυρτής βελτιστοποίησης που επιλύονται με κεντρικές και κατάλληλα διαμορφωμένες κατανεμμένες μεθόδους και για τις δυο διαδικασίες. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική εξομοιώνεται σε μια γραμμή διανομής μεγάλου μήκους με μικτό προφίλ ζήτησης που συμπεριλαμβάνει το φορτίο φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Η γραμμή διανομής έχει μήκος και συνολική ζήτηση της τάξεως μεγέθους γραμμών μεγάλου μήκους ελληνικών νησιών, ενώ η ζήτηση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων κατανέμεται με τυχαίο τρόπο κατά μήκος της γραμμής διανομής. Τέλος, μελετάται και διαδικασία καθορισμού ισχύος φόρτισης οχημάτων που φορτίζουν εν κινήσει (δυναμική φόρτιση) με δεδομένο τον περιορισμό στο συνολικό φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων.

Η συνεισφορά της διατριβής όσο αφορά την ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, έγκειται στην αντιμετώπιση του προβλήματος ιεραρχικά σε δύο επίπεδα; στο επίπεδο του διαχειριστή φόρτισης οχημάτων με βάση την στρατηγική "αναλογικής δικαιοσύνης" που διανέμει φορτίο σε όλους τους ζυγούς της γραμμής διανομής ανάλογα με την ζήτηση φόρτισης και την επίδραση του φορτίου κάθε ζυγού στην τάση της γραμμής διανομής. Επιπρόσθετα, καθορίζεται και η στρατηγική προσδιορισμού των συντελεστών ζήτησης του προβλήματος έτσι ώστε οι λύσεις που προκύπτουν να προσεγγίζουν το δυνατόν καλύτερα την ζήτηση των οχημάτων. Στο επίπεδο της ανάθεσης της μέγιστης ισχύος σε κάθε όχημα, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με βάση την ελαχιστοποίηση της ευκλείδειας απόστασης της ισχύος φόρτισης από μια μέση ισχύ φόρτισης που ικανοποιεί τα ενεργειακά χαρακτηριστικά του οχήματος. Σχετικά με την κατανεμμένη επίλυση του προβλήματος καθορισμού ορίου φόρτισης στο επίπεδο του διαχειριστή φόρτισης οχημάτων επεκτείνεται ο αλγόριθμος "rate control" και αποδεικνύεται η ολική ασυμπτωτική σύγκλισή του με την 2η μέθοδο του Lyapunov. Για την κατανεμμένη επίλυση του προβλήματος καθορισμού ορίου φόρτισης κάθε οχήματος ξεχωριστά χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) με επέκταση που ενσωματώνει κατάλληλα τον περιορισμό της μέγιστης ισχύος που μπορεί να αποδοθεί στο

σύνολο των ηλεκτρικών οχημάτων που ελέγχει. Παράλληλα για την περίπτωση της δυναμικής (εν-κινήσει) φόρτισης προτείνεται μεθοδολογία για τον προσδιορισμό βασικών παραμέτρων του αλγορίθμου (Additive Increase Multiplicative Decrease)

Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι διάφορες κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων, η σχετιζόμενη υποδομή φόρτισης και θα παρουσιαστεί τελικά το πλαίσιο της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με περιορισμένη πτώση τάσης που αποτελεί και το βασικό θέμα αυτής της διατριβής.

1.1 Κατηγορίες ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ταξινομούνται με βάση τις τεχνολογίες οι οποίες αναλύονται στην συνέχεια [4]:

- ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας
- ηλεκτρικά οχήματα αυξημένης αυτονομίας
- plug-in υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα
- υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα
- ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου

Ηλεκτρικά Οχήματα Μπαταρίας (BEV) :

Είναι τα ηλεκτρικά οχήματα που κινούνται αποκλειστικά με την ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται σε μπαταρία εγκατεστημένη εντός του οχήματος. Όταν αυτή αποφορτιστεί, μπορεί να επαναφορτιστεί με τη διασύνδεση του οχήματος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός κοινού οικιακού ρευματοδότη ή μέσω ειδικής μονάδας φόρτισης. Τα BEV έχουν τη μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση από όλα τα συστήματα πρόωσης των οχημάτων έχοντας τη δυνατότητα να μετατρέψουν πάνω από το 80% της αποθηκευμένης στην μπαταρία ενέργειας σε κινητική. Ελαχιστοποιούν επίσης τις απώλειες ενέργειας απενεργοποιώντας τη μηχανή όταν το όχημα δεν κινείται και φορτίζοντας την μπαταρία με το λεγόμενο «αναπαραγωγικό φρενάρισμα», το οποίο αξιοποιεί τη θερμότητα που παράγεται κατά το φρενάρισμα του οχήματος. Η αυτονομία οδήγησης είναι πιο περιορισμένη σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα και απαιτούν μεγάλους χρόνους φόρτισης. Η μη χρήση καυσίμων συνεπάγεται σαφώς μικρότερο λειτουργικό κόστος σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα και, καθώς βασίζονται αποκλειστικά στην ηλεκτρική ενέργεια, οι

άμεσες εκπομπές ρύπων είναι μηδενικές. Ενδεικτική ηλεκτρική αυτονομία: 80-400 χιλιόμετρα.

Ηλεκτρικά Οχήματα Αυξημένης Αυτονομίας (REEV) :

Είναι τα ηλεκτρικά οχήματα, τα οποία διαθέτουν μηχανή εσωτερικής καύσης και ηλεκτρικό κινητήρα. Ωστόσο, η κίνηση του οχήματος στηρίζεται αποκλειστικά στον ηλεκτρικό κινητήρα. Η μηχανή εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται μόνο για τη φόρτιση της μπαταρίας ή την παροχή ισχύος στον ηλεκτροκινητήρα, για αυτό μπορεί να είναι και μικρή μειώνοντας έτσι το βάρος του οχήματος. Η φόρτιση της μπαταρίας μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί με τη διασύνδεση του οχήματος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Εν αντιθέσει με τα BEV, τα REEV ανεφοδιάζονται και με το είδος καυσίμου με το οποίο λειτουργεί η μονάδα επέκτασης της αυτονομίας τους, ξεπερνώντας έτσι το πρόβλημα της περιορισμένης αυτονομίας των BEV. Η αυτονομία ενός οχήματος με βοηθητική μηχανή εσωτερικής καύσης αυξάνεται ενδεικτικά από 130- έως 300 χιλιόμετρα.

Plug-in Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (PHEV) :

Είναι τα ηλεκτρικά οχήματα που κινούνται χρησιμοποιώντας συνδυασμό ηλεκτροκινητήρα και μηχανή εσωτερικής καύσης, και τα οποία, εκτός από τον εφοδιασμό τους με το κατάλληλο καύσιμο για τη μηχανή εσωτερικής καύσης, έχουν τη δυνατότητα να φορτίζουν τη μπαταρία τους με διασύνδεση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν οι εξής τύποι υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων:

- παράλληλης σύνδεσης, όπου τόσο ο ηλεκτροκινητήρας, όσο και ο κινητήρας εσωτερικής καύσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση της κίνησης στο όχημα.
- εν σειρά σύνδεσης, όπου μόνο ο ηλεκτροκινητήρας δίνει την κίνηση στους τροχούς, ενώ η μηχανή εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της μπαταρίας ή την παροχή ισχύος στον ηλεκτροκινητήρα.
- μικτού τύπου, όπου συνδυάζονται οι παράλληλη και η εν σειρά σύνδεση με στόχο τη μέγιστη ευελιξία.

Η ηλεκτρική αυτονομία είναι μικρότερη από αυτή των BEV, αφού οι μπαταρίες τείνουν να έχουν μικρότερη χωρητικότητα, το οποίο συμβαίνει διότι το όχημα δεν βασίζεται αποκλειστικά στην ηλεκτρική ενέργεια. Οι μπαταρίες είναι σχεδιασμένες κυρίως για μικρές διαδρομές εντός πόλης και όχι για ταξίδια. Ωστόσο, χάρη στη μηχανή εσωτερικής καύσης, η συνολική αυτονομία οδήγησης αυξάνεται σε μεγάλο

βαθμό. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξαρτώνται από το εάν το όχημα κινείται με τη βοήθεια της μηχανής εσωτερικής καύσης ή μόνο με τον ηλεκτροκινητήρα. Ενδεικτική ηλεκτρική αυτονομία: 20-85 χιλιόμετρα.

Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (HEV) :

Είναι τα ηλεκτρικά οχήματα που είναι εμπορικά διαθέσιμα πάνω από 15 χρόνια και η μόνη διαφορά τους με τα PHEV έγκειται στο γεγονός ότι η μπαταρία δεν μπορεί να φορτιστεί με διασύνδεση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η υβριδικότητά τους απαντάται στην αύξηση της απόδοσης καυσίμου, μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων. Ενδεικτική ηλεκτρική αυτονομία: 0-10 χιλιόμετρα.

Ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (FCEV) :

Είναι τα ηλεκτρικά οχήματα που βασίζονται εξ' ολοκλήρου στην ηλεκτρική ενέργεια, η οποία όμως δεν είναι αποθηκευμένη σε μπαταρία αλλά σε κυψέλες καυσίμου που συνδυάζουν το υδρογόνο (που είναι αποθηκευμένο σε δεξαμενή εντός του οχήματος) με το οξυγόνο του αέρα. Το κύριο πλεονέκτημά τους έναντι των BEV είναι η μεγαλύτερη αυτονομία και η γρηγορότερη φόρτιση. Ωστόσο, η τεχνολογία τους είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και λίγα μοντέλα είναι εμπορικά διαθέσιμα. Ενδεικτική ηλεκτρική αυτονομία: 160-500 χιλιόμετρα.

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ταξινομούνται κατά τις ακόλουθες κλάσεις [5]

- L2e : Δίκυκλα οχήματα με μέγιστη ταχύτητα όχι μεγαλύτερη από 45 km/h και κινητήρα με ισχύ μικρότερη των 4kW.
- L3e : Δίκυκλα οχήματα με μέγιστη ταχύτητα μεγαλύτερη των 45 km/h.
- L6e : Οχήματα τεσσάρων τροχών με μέγιστο βάρος χωρίς φορτίο όχι μεγαλύτερο από 350kg (χωρίς να υπολογίζεται το βάρος της μπαταρίας), μέγιστη ταχύτητα όχι μεγαλύτερη από 45 km/h και κινητήρα με ισχύ μικρότερη των 4kW.
- L7e : Οχήματα τεσσάρων τροχών με μέγιστο βάρος χωρίς φορτίο, και χωρίς να υπολογίζεται το βάρος της μπαταρίας, όχι μεγαλύτερο από 350kg (550kg για οχήματα που προορίζονται να μεταφέρουν εμπορεύματα) και κινητήρα με ισχύ μικρότερη των 15kW.
- M1 : Επιβατικά οχήματα τεσσάρων τροχών με το πολύ 8 θέσεις συν τη θέση του οδηγού, τα οποία αναμένεται να είναι τα κυρίαρχα στην αγορά ηλεκτρικών οχημάτων,

όπως επιβεβαιώνεται από τις συνεχείς ανακοινώσεις των διαφόρων κατασκευαστών αυτοκινήτων περί κυκλοφορίας νέων μοντέλων ηλεκτρικών οχημάτων τύπου M1.

M2 : Μεγαλύτερα επιβατικά οχήματα τεσσάρων τροχών με βάρος όχι μεγαλύτερο από 5 τόνους, με το πολύ 8 θέσεις συν τη θέση του οδηγού.

M3 : Μεγαλύτερα επιβατικά οχήματα τεσσάρων τροχών με βάρος μεγαλύτερο από 5 τόνους, με το πολύ 8 θέσεις συν τη θέση του οδηγού.

N1 : Οχήματα για τη μεταφορά αγαθών με βάρος χωρίς φορτίο όχι μεγαλύτερο από 3.5 τόνους.

N2 : Οχήματα για τη μεταφορά αγαθών με βάρος χωρίς φορτίο που κυμαίνεται μεταξύ 3.5 και 12 τόνων.

Στα πλαίσια των προσομοιώσεων της διατριβής θεωρούμε ηλεκτρικά οχήματα γενικώς που έχουν τη δυνατότητα να φορτίζουν τη μπαταρία τους με διασύνδεση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2 Κατηγορίες μπαταριών ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Οι μπαταρίες των ηλεκτρικών αυτοκινήτων λειτουργούν κάτω από συνθήκες φόρτισης αρκετών kW, έχουν μεγάλη χωρητικότητα της τάξεως δεκάδων kWh ενώ ταυτόχρονα έχουν και περιορισμούς ως προς το μέγεθος και βάρος τους που προκύπτουν από τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Δυο κατηγορίες μπαταριών χρησιμοποιούνται ευρέως στην ηλεκτροκίνηση; οι μπαταρίες νικελίου υβριδίου μετάλλου NiMH και ιόντων λιθίου Li-ion.[4]. Οι μπαταρίες NiMH βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στα υβριδικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα ενώ οι μπαταρίες Li-ion χρησιμοποιούνται κυρίως στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μπαταρίας λόγω της ενεργειακής τους πυκνότητας. βλ πίνακα 1.1

Η μπαταρία αποτελεί τον συνδετικό κρίκο του ηλεκτρικού αυτοκινήτου με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στην μπαταρία, δίνει δυνατότητες ευέλικτης χρονικά φόρτισης μέσω της κατάλληλης υποδομής. Η ευελιξία αυτή αποτελεί βάση για την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών του αυτοκινήτου και την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της μαζικής και ταυτόχρονης φόρτισης στόλου αυτοκινήτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Στον πίνακα 1.2 φαίνεται η χωρητικότητα 10 ηλεκτρικών οχημάτων με την μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση κατά την βάση δεδομένων ηλεκτρικών αυτοκινήτων [6]

Πίνακας 1.1 Χρήση μπαταριών από κατασκευαστές ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Κατασκευαστής	Μοντέλο αυτοκινήτου	Τεχνολογία Μπαταρίας
GM	Chevy-Volt	Li-ion
Ford	Escape, Fusion, MKZ HEV	NiMH
Toyota	Prius, Lexus	NiMH
Honda	Civic, Insight	NiMH
Hyundai	Sonata	Lithium polymer
BMW	Mini E	Li-ion
TESLA	Model S	Li-ion
NISSAN	Leaf	Li-ion

Πίνακας 1.2 Ενδεικτικά χαρακτηριστικά μπαταρίας και φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Μοντέλο αυτοκινήτου	Χωρητικότητα μπαταρίας	Ενεργειακή απόδοση
Lightyear One	60 kWh	10.3 kWh/100km
Hyundai IONIQ Electric	30.5	14.4 kWh/100km
Hyundai IONIQ Gen 2 Electric	38.3 kWh	14.7 kWh/100km
Tesla Model 3 Standard Range	55 kWh	14.7 kWh/100km
Honda e Prototype - Urban EV	30 kWh	15.4 kWh/100km
Tesla Model 3 Long Range	80 kWh	15.6 kWh/100km
Sono Sion	35 kWh	15.6 kWh/100km
Hyundai Kona Electric 39 kWh	42 kWh	15.7 kWh/100km
Renault Zoe R90	44.1 kWh	15.8 kWh/100km

Πίνακας 1.3 Χαρακτηριστικά ταχείας φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Μοντέλο αυτοκινήτου	Μέγιστη ισχύς φόρτισης μπαταρίας
Audi e-tron GT	350 kW
Tesla Roadster	250 kW
Polestar 2	150 kW
Volvo XC40 Electric	150kW
Tesla Model 3 Long Range Dual Motor	145 kW DC

Η αύξηση της χωρητικότητας μπαταρίας αποτελεί ζητούμενο ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες κινητικότητας των οδηγών και ειδικά τα ταξίδια οπου απαιτείται η κάλυψη εκατοντάδων χιλιομέτρων. Επιπρόσθετα η ανάγκη για ελαχιστοποίηση του χρόνου φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων έχει οδηγήσει στην συνεχόμενη αύξηση της ισχύος φόρτισης. Στον πίνακα 1.3 φαίνονται πέντε ταχύτεροι ρυθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων κατά την προαναφερθείσα βάση δεδομένων. Οι παραπάνω τιμές είναι οι μέγιστες καθώς ο ρυθμός φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος εξαρτάται και από την τεχνολογία του σταθμού φόρτισης.

Στα πλαίσια των εξομοιώσεων που πραγματοποιούνται στην διατριβή, θεωρούμε μπαταρίες ικανές να φορτίσουν έως και 20kWh με μέγιστη ισχύ μέχρι και 100kW.

1.3 Σταθμοί φόρτισης

Οι δυο βασικές τεχνολογίες φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι οι εξής

- ενσύρματη φόρτιση
- ασύρματη φόρτιση

Η ενσύρματη φόρτιση αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο που προσφέρει αυξημένη απόδοση και ασφάλεια κατά την φόρτιση. Η ασύρματη φόρτιση προσφέρει ευκολότερη πρόσβαση στην υποδομή φόρτισης, ωστόσο απαιτούνται ιδιαίτερες τεχνικές προδιαγραφές έτσι ώστε η φόρτιση να επιτευχθεί με ασφάλεια και αυξημένη απόδοση. [7], [8], [9], [10].

Η ενσύρματη φόρτιση απαιτεί την αγωγή της σύνδεσης των ηλεκτρικών οχημάτων με τα κυκλώματα της υποδομής φόρτισης. Η υποδομή φόρτισης διαχωρίζεται με βάση το είδος εγκατάστασης ως εξής [11]

- Επίπεδο 1- Οικιακή υποδομή φόρτισης

Πίνακας 1.4 Ταξινόμηση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Χαρακτηρικό	Επίπεδο 1		Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
	Κατηγορία 1	Κατηγορία 2	Κατηγορία 3	Κατηγορία 4
Φάσεις	1 3	1 3	3	DC
Τάση	120/240 400	240 400	400	50-100Vdc
Ονομ. Ισχύς	3.3 kW 10 kW	7kW 24kW	43 kW	50-300kW kW
Ονομ ρεύμα	16A 16A	32A 32A	32A	100-125A
Χρόνος φόρτισης	6-8 2-3 h	3-5 h 1-2	20-30 min	<20min
Πρότυπο	Local	IEC 61851-1 IEC 60309	IEC 61851-1 IEC 61851-1	IEC 61851-1 IEC 62196-1

- Επίπεδο 2- Δημόσια υποδομή φόρτισης
- Επίπεδο 3- Δημόσια υποδομή φόρτισης πλησίον αυτοκινητοδρόμου.

Το επίπεδο 1 αναφέρεται στην υποδομή φόρτισης που μπορεί να εγκατασταθεί εντός οικιακού περιβάλλοντος. Το επίπεδο 2 συναντάται κυρίως σε δημόσιους χώρους στάθμευσης και συνήθως συνοδεύεται και απο πληροφοριακό σύστημα ταυτοποίησης και πληρωμής. Το τρίτο επίπεδο αναφέρεται κυρίως στην υποδομή ταχείας φόρτισης και είναι ανάλογο των σταθμών εξυπηρέτησης αυτοκινήτων (σ.ε.α) που βρίσκονται εγκατεστημένοι στις εθνικές οδούς. [12]. Τα επίπεδα αυτά διαχωρίζονται σε περαιτέρω κατηγορίες και τυποποιούνται σύμφωνα με τον πίνακα 1.4.

Η ενσωμάτωση της υποδομής φόρτισης με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το ευρωπαϊκό μοντέλο έξυπνων δικτύων [13], προϋποθέτει την ηλεκτρική και επικοινωνιακή σύνδεση με τις υπηρεσίες ενέργειας και το σύστημα διανομής. Η πολυεπίπεδη διασύνδεση επιτρέπει την υλοποίηση εφαρμογών στο πνεύμα της οδηγίας [14] που προτρέπει την δημιουργία σχετικών προτύπων που θα οδηγήσουν στην επίτευξη των παρακάτω στόχων.

- Ελάττωση εκπομπών θερμοκηπίου κατά 20%
- 20% αύξηση κατανάλωσης ανανεώσιμης ενέργειας
- 20% ελάττωση κατανάλωσης ενέργειας σχετικά με τις προβλέψεις από αύξηση της ενεργειακής απόδοσης.

Σε αυτή την διατριβή θεωρούμε σαν μέγιστη τιμή ισχύος φόρτισης τα 100kW πράγμα που σημαίνει ότι οι φορτιστές έχουν χαρακτηριστικά εφάμιλλα της Κατηγορίας 4.

Εκτός από την σύνδεση με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει ανάγκη διαχείρισης των υπηρεσιών φόρτισης σε ευρύτερη κλίμακα [15], έτσι ώστε να εξασφαλιστεί

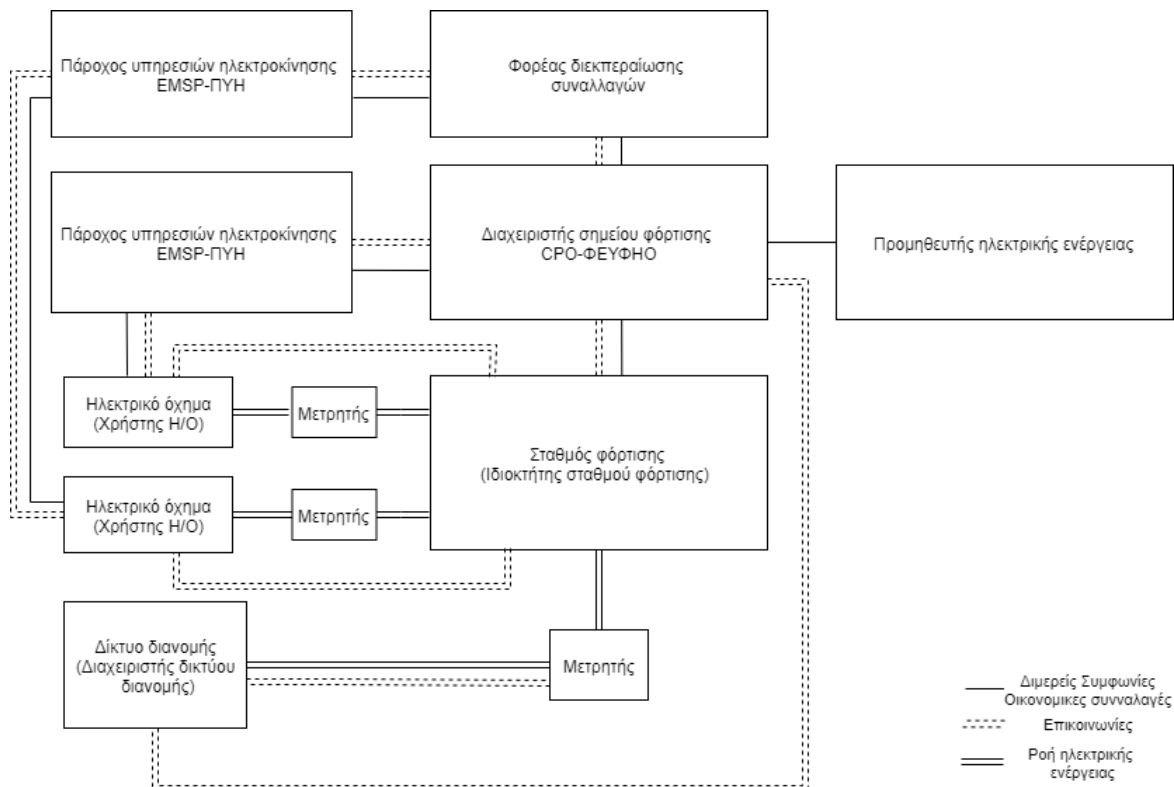
η κινητικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων, γεγονός που έχει οδηγήσει στην δημιουργία νέων φορέων που σχετίζονται με την ηλεκτροκίνηση και τις υπηρεσίες φόρτισης. Στη συνέχεια αναλύουμε τους βασικούς φορείς που έχουν προκύψει.

1.4 Φορείς ηλεκτροκίνησης

Οι βασικοί φορείς της ηλεκτροκίνησης σύμφωνα με την δημόσια διαβούλευση της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας για το πλαίσιο υποδομών επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα είναι οι εξής [16]

- Ο Ιδιοκτήτης σημείου επαναφόρτισης
- Διαχειριστής σημείου επαναφόρτισης: διαχειρίζεται το δημοσίως προσβάσιμο σημείο επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (HO) και παρέχει την υπηρεσία επαναφόρτισης του HO. (Charge Point Operator-CPO)
- Πάροχος υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης: παρέχει υπηρεσίες ηλεκτροκίνησης σε χρήστες HO, όπως η χρέωση χρήσης των υπηρεσιών μέσω συμβολαίου, η διάθεση πληροφοριών διαθεσιμότητας, ο γεωγραφικός εντοπισμός και η κράτηση θέσεων φόρτισης, η διαχείριση στόλου HO κ.ά. (Electromobility Service Provider-EMSP)
- Φορέας εκκαθάρισης ηλεκτροκίνησης: διευκολύνει τις συναλλαγές μεταξύ των διαχειριστών σημείων επαναφόρτισης και των παρόχων υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης, αποσκοπώντας στη διαλειτουργικότητα (interoperability) των υποδομών.
- Διαχειριστής Δικτύου Διανομής: διαχειρίζεται το δίκτυο διανομής, συνδέει σε αυτό τα δημοσίως προσβάσιμα σημεία επαναφόρτισης HO και μπορεί να διαχειρίζεται τους μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας αυτών. (Distribution System Operator-DSP)
- Προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας: ασκεί δραστηριότητα προμήθειας ηλεκτρικού ρεύματος για επαναφόρτιση HO, συνήθως στους διαχειριστές σημείων επαναφόρτισης, παρέχοντας την αναγκαία ηλεκτρική ενέργεια για την εξυπηρέτηση των συνδεόμενων HO. (Energy Retailer)
- Χρήστης ηλεκτρικού οχήματος: κατέχει/εκμεταλλεύεται/χρησιμοποιεί ηλεκτρικό όχημα και αγοράζει υπηρεσίες ηλεκτροκίνησης (επαναφόρτισης, χρέωσης κλπ.).
- Συναθροιστής: επιτελεί τις βασικές λειτουργίες που απαιτούνται για την υποστήριξη των υπηρεσιών προς το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και το δίκτυο διανομής. (Aggregator)

Στο σχήμα 1.1 φαίνεται ενδεικτικά η διασύνδεση των παραπάνω φορέων.



Σχήμα 1.1 Ενδεικτική αρχιτεκτονική συστήματος ηλεκτροκίνησης

Οι φορείς ηλεκτροκίνησης παίζουν κομβικό ρόλο στα συστήματα διαχείρισης φόρτισης καθώς αναλαμβάνουν την υλοποίηση σχημάτων διαχείρισης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που απαιτούν μεταξύ άλλων και την συνεργασία τους. Στα πλαίσια αυτής της διατριβής κεντρικό ρόλο έχει ο Διαχειριστής του Δικτύου διανομής καθώς είναι αυτός που διασφαλίζει την σωστή λειτουργία του δικτύου συνολικά. Επίσης σημαντική είναι και η λειτουργία του διαχειριστή σημείου φόρτισης που σε συνεργασία με την διαχειριστή του δικτύου μπορεί διαχειριστεί την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων που συνδέονται στην υποδομή του. Στα πλαίσια της διατριβής αναπτύσσονται και μοντελοποιούνται αλγόριθμοι διαχείρισης φόρτισης που αφορούν κυρίως αυτούς τους φορείς.

1.5 Επίδραση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Ο ρυθμός ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τις προβλέψεις της Ευρωπαϊκής Κοινότητας αναμένεται να αυξηθεί ιδιαίτερα παγκοσμίως. Η τάση αυτή φαίνεται από τις καταχωρήσεις επιβατηγών οχημάτων κατά την περίοδο 2011-2019 που καταγράφθηκαν από το ευρωπαϊκό παρατηρητήριο οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων. Ενδεικτικά, οι ταξινομήσεις ηλεκτρικών οχημάτων για το έτος 2014 ήταν 75,331 και παρουσίασαν αυξητική τάση έως το έτος 2018 όπου ταξινομήθηκαν 301.847 οχήματα. Το έτος 2019 ταξινομήθηκαν 459.387 οχήματα [17]. Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο εκτιμήσεις αναφέρουν ενσωμάτωση των βαρέων και ελαφριών οχημάτων μέχρι το 2030 της τάξεως του 7-33% , [18],[19], [20] καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα είναι 3-4 φορές πιο αποδοτικά σε σχέση με τα συμβατικά λαμβάνοντας υπόψη τον συνδυασμένο κύκλο ενέργειας από την παραγωγή έως την κατανάλωση. Μια 100% ενσωμάτωση των οχημάτων το 2035 αναμένεται να προσθέσει περίπου 24% κατανάλωση ενέργειας σε πανευρωπαϊκό επίπεδο ενώ εάν υλοποιηθούν μηχανισμοί διαχείρισης φορτίου θα αυξηθεί η αιχμή φορτίου περίπου 21%. Ένα τέτοιο σενάριο θα επιφορτίσει ιδιαίτερα το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ενώ θα απαιτήσει και ιδιαίτερες επενδύσεις στην παραγωγή ενέργειας [21], [22]. Αντίθετα μια αύξηση 7% στην Γερμανία θα οδηγήσει περίπου σε 1% αύξηση της συνολικής ζήτησης και της αιχμής φορτίου. Τα επίπεδα αυτά μπορούν να εξυπηρετηθούν από την υπάρχουσα υποδομή σε γενικές γραμμές[18].

Ανεξαρτήτως του μεγέθους της συνολικής ενσωμάτωσης της ηλεκτροκίνησης, η αυξημένη ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων σε τοπικό επίπεδο ενδέχεται να επηρεάσει αρκετά την καμπύλη ζήτησης. Ενδεικτικά, για ένα δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης 150 οικιών της Αμερικής, με 25% ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζεται έως και 30% αύξηση της ζήτησης κατά τις απογευματινές ώρες [18]. Στο [23], παρουσιάζονται οι επιπτώσεις της αυξημένης ενσωμάτωσης ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο διανομής ενός ακτινικού οικιακού δικτύου διανομής. Η ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων κατά 30% [24] που φορτίζουν με μέγιστη ισχύ 4kW και παρουσιάζουν ενεργειακές ανάγκες 11kWh συντελεί στα εξής:

- Ανάγκη αναβάθμισης μετασχηματιστή ισχύος 100KVA σε 125KVA λόγω υπέρβασης ονομαστικής ισχύος.
- Ανάγκη αναβάθμισης καλωδίου διανομής από 4X50mm² σε 4X95mm² λόγω υπέρβασης ορίου ονομαστικού ρεύματος γραμμής
- Πτώση τάσης γραμμής 2,4% (Εντός ρυθμιστικών ορίων EN50160)

- Αύξηση απωλειών ισχύος.

Στο [25] αναλύεται η επίδραση της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο διανομής μέσης τάσης 15kV. Η ενσωμάτωση ενός στόλου αυτοκινήτων 10% προκαλεί πτώση τάσης 5% στους ηλεκτρικά πιο απομακρυσμένους κόμβους του συστήματος, πτώση που υπερβαίνει το όριο της διακύμανσης του 5% υιοθετείται από τους συγγραφείς. Επιπρόσθετα προκαλεί αύξηση ρεύματος της τάξεως του 10% στους πιο φορτισμένους αγωγούς του συστήματος, συνολική αύξηση απωλειών 10% και αύξηση του μέγιστου φορτίου του δικτύου περίπου 10%, γεγονός που συντελεί στην ανάγκη αύξησης της παραγωγής [26] και της τιμής ενέργειας [27]. Αντίθετα, η υιοθέτηση ενός σχήματος διαχείρισης φορτίου επιτρέπει την ενσωμάτωση περίπου 52% του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων με όριο διακύμανσης τάσης το 5%. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω παραδείγματα, με δεδομένη την υπάρχουσα υλικοτεχνική υποδομή των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι αναγκαία η "έξυπνη" διαχείριση του φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων έτσι ώστε να αποφευχθεί η παραβίαση των ορίων που σχετίζονται με την εύρυθμη λειτουργία τους. Το ζήτημα αυτό και συγκεκριμένα η πτώση τάσης λόγω φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων θα μας απασχολήσει σε αυτή την διατριβή και θα αναλυθούν και παρουσιαστούν αλγόριθμοι που επιτρέπουν τον περιορισμό της πτώσης τάσης σε αποδεκτά επίπεδα. Στην συνέχεια θα αναλυθούν κάποια γενικά πλαίσια διαχείρισης φόρτιου ηλεκτρικών οχημάτων.

1.6 Διαχείριση φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων

Η λειτουργία, ο ρόλος αλλά και οι αλληλεπιδράσεις των παραπάνω φορέων σε εθνικό επίπεδο αποτελούν αντικείμενο δημόσιας διαβούλευσης της ΠΑΕ. Μεταξύ των θεμάτων προς διαβούλευση τεθήκαν και οι δυνατότητες ελέγχου και διαχείρισης φορτίου για προσφορά υπηρεσιών προς το δίκτυο και το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαχείριση φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί βασική ενότητα της διαβούλευσης αυτής και ορίζει τα παρακάτω θέματα:

- Βέλτιστη κατανομή ζήτησης ΗΟ στην καμπύλη φορτίου (π.χ. για περιορισμό αιχμής συστήματος, συσχέτιση με παραγωγή ΑΠΕ)
- Παροχή υπηρεσιών προς το σύστημα (π.χ. απόκριση συχνότητας) και συμμετοχή στην αγορά (π.χ. εξισορρόπησης)
- Αντιμετώπιση συμφόρησης/υπερφόρτισης δικτύου διανομής
- Λειτουργικότητα Vehicle To Grid (V2G) (κατανεμημένη αποθήκευση) και Vehicle To House (V2H) (οικιακή αποθήκευση)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διαβούλευσης [28] για την ανάπτυξη υποδομής ευελιξίας φορτίου, η διαχείριση φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων προϋποθέτει την δυνατότητα εποπτείας και ελέγχου του φορτίου ΗΟ, την εκπροσώπηση του φορτίου ΗΟ απο aggregators και την ύπαρξη συμβολαίων μεταξύ ΗΟ και EMSP's, που επιτρέπουν την ευέλικτη κατανομή της ενέργειας φόρτισης, την μείωση φόρτισης και μελλοντικά την απόδοση ισχύος προς το δίκτυο (V2G) ή την εγκατάσταση του καταναλωτή (V2H). Βασικό αρχιτεκτονικό στοιχείο της πρότασης της ΡΑΕ είναι ο aggregator ο οποίος επιτελεί τις βασικές λειτουργίες που απαιτούνται για την υποστήριξη των υπηρεσιών προς το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και το δίκτυο διανομής.

Ο ρόλος του aggregator διαφέρει ανάλογα με το είδος του σημείου φόρτισης και το είδος της παρεχόμενης λειτουργίας. Για τις λειτουργίες συστήματος και αγοράς ενέργειας και για ιδιωτικά σημεία φόρτισης, οι προμηθευτές ΗΕ κυρίως ή άλλα πρόσωπα μπορούν να επιτελέσουν τον ρόλο του aggregator. Για δημόσια σημεία απαιτείται συνέργεια μεταξύ του ρόλου του aggregator και των παροχών υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης αφού αυτοί διατηρούν συμβατική σχέση με τους χρήστες ΗΟ και επομένως μπορούν να διαχειριστούν την ζήτησή τους. Για την περίπτωση παροχής υπηρεσιών προς το δίκτυο διανομής βασικό ρόλο έχουν οι aggregators που παρέχουν αμειβόμενες υπηρεσίες και συζητείται και ο άμεσος έλεγχος απο τον ΔΕΔΔΗΕ για την περίπτωση έκτακτων καταστάσεων. Ωστόσο απαιτείται περαιτέρω ανάγκη τυποποίησης των επικοινωνιών και του σχήματος ελέγχου σε αυτή την περίπτωση.

Στα πλαίσια της διατριβής αναλύεται η διαχείριση φόρτισης ΗΟ με περιορισμένη πτώση τάσης ακτινικών δικτύων διανομής, που εμπίπτει στην διαχείριση φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων για υπηρεσίες δικτύου διανομής που αναλύεται στη συνέχεια.

1.7 Διαχείριση φορτιού ηλεκτρικών οχημάτων για υπηρεσίες δικτύου διανομής

Η διαχείριση φορτίου στο δίκτυο διανομής μπορεί να συνεισφέρει θετικά καθώς αποτελεί μέσο που μπορεί να αποτρέψει τις εκτεταμένες επενδύσεις που απαιτούνται για την ομαλή λειτουργία του δικτύου διανομής με αυξημένο φορτίο. Ο έλεγχος του φορτίου μπορεί να λειτουργήσει αποτρεπτικά ως προς την λειτουργία του δικτύου σε μη επιτρεπόμενα όρια μετασχηματιστών, θερμικά όρια γραμμών και επίπεδα τάσης [29]. Τα παραπάνω είναι αναπόφευκτα, δεδομένου ότι η αύξηση του φορτίου λόγω της εισωμάτωσης ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα επιφέρει περαιτέρω επιβάρυνση στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ειδικά εφόσον συμπέσει χρονικά με το υπάρχον φορτίο, ανεξέλεγκ-

κτη και ταχεία φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων [30], [31], [32], [33], [34]. Όπως προκύπτει και από το [5], υπάρχει μια μέγιστη ζήτηση φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων που μπορεί να εξυπηρετήσει το σύστημα διανομής μέσης τάσης ενός δικτύου διανομής, πάνω από την οποία παραβιάζονται είτε τα θερμικά όρια είτε τα επίπεδα τάσης της γραμμής διανομής.

Τα χαρακτηριστικά της τάσης που τροφοδοτεί δημόσια δίκτυα ηλεκτρισμού καθορίζονται σε Ευρωπαϊκό επίπεδο από το πρότυπο EN 50160 [35]. Τα φαινόμενα διαταραχής της τάσης διαχωρίζονται σε συνεχή και διακριτά [36]. Στα συνεχή φαινόμενα παρουσιάζουν περιορισμένες αποκλίσεις από την ονομαστική τιμή που προκαλούνται από την κατανομή του φορτίου, τις αλλαγές του φορτίου ή μη γραμμικά μοντέλα φορτίου. Στα διακριτά φαινόμενα εμφανίζονται απότομες αλλαγές που συνήθως οφείλονται σε απροσδιόριστα ή εξωγενή αίτια. Στα συνεχή φαινόμενα συμπεριλαμβάνονται

- Μεταβολές συχνότητας
- Αργές μεταβολές τάσης
- Ταχείες μεταβολές τάσης
- Αρμονικές τάσης

Στα διακριτά φαινόμενα συμπεριλαμβάνονται

- Πτώση τάσης
- Ύψωση τάσης
- Μεταβατικά φαινόμενα τάσης

Ο κώδικας διαχείρισης του ελληνικού συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, υιοθετεί το πρότυπο EN50160 ως προς τις ελάχιστες προδιαγραφές ποιότητας τάσης. Επιπρόσθετα επιβάλλει αυστηρότερα όρια για ένα σύνολο παραμέτρων ποιότητας τάσης [37].

Το φορτίο των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αναμένεται να μεταβάλλει την κατανομή του φορτίου και επομένως δύναται να προκαλέσει συνεχείς μεταβολές τάσης στο δίκτυο. Ο κώδικας ορίζει συγκεκριμένα για τις αργές μεταβολές του δικτύου Μέσης Τάσης ότι η ετήσια μέση τιμή της τάσης κάθε κόμβου του Δικτύου δεν πρέπει να αποκλίνει από την ονομαστική τιμή περισσότερο από 5% και η μέγιστη διακύμανση περί τη μέση τιμή σε ετήσια βάση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3% της ονομαστικής τάσης.

Στο [34], παρουσιάζεται διακύμανση τάσης μεγαλύτερη από το δεσμευτικό 5% [38] του συστήματος διανομής της M Βρετανίας για ένα δίκτυο μέσης τάσης 11kV με ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων της τάξεως 30%, όπου μια στις τρεις οικίες περίπου

υποστηρίζουν φόρτιση 400V στα 10A (οικιακή φόρτιση). Στο [39] παρουσιάζεται πτώση τάσης στα επίπεδα 0.9pu σε ένα δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης 400V μήκους 1 km με οικιακό φορτίο 134 οικιών με φόρτιση περίπου 50 ηλεκτρικών οχημάτων. Επομένως η δυνατότητα ενσωμάτωσης μεγάλου στόλου ηλεκτρικών αυτοκινήτων απαιτεί διαδικασίες ελεγχόμενης φόρτισης με πολλαπλά κριτήρια μεταξύ των οποίων είναι η υποστήριξη της πτώσης τάσης λόγω των διαδικασιών επαναφόρτισης. Ο κύριος σκοπός αυτών των συστημάτων είναι η διατήρηση της τάσης των κόμβων του δικτύου εντός των ορίων. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλα κριτήρια που συνδέονται στενά με τον έλεγχο τάσης του δικτύου διανομής [40] όπως

- Η βελτιστοποίηση σε σχέση με ένα προφίλ τάσης
- Συγχρονισμός των επιπέδων τάσης σε σχέση με μια τιμή αναφοράς
- Η ελαχιστοποίηση προσαρμογών αέργου ισχύος στους κόμβους του δικτύου διανομής
- Η ελαχιστοποίηση της συνολικής ανταλλαγής αέργου ισχύος
- Η μεγιστοποίηση της παραγωγής ενεργού ισχύος μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής
- Η ελαχιστοποίηση αποκοπής παραγωγής
- Η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος.

Τα παραπάνω προβλήματα στην γενική τους μορφή, αποτελούν χαλάρωση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου (OPF). Η γενική μορφή του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου είναι [41]

$$\min f(x) \quad (1.1)$$

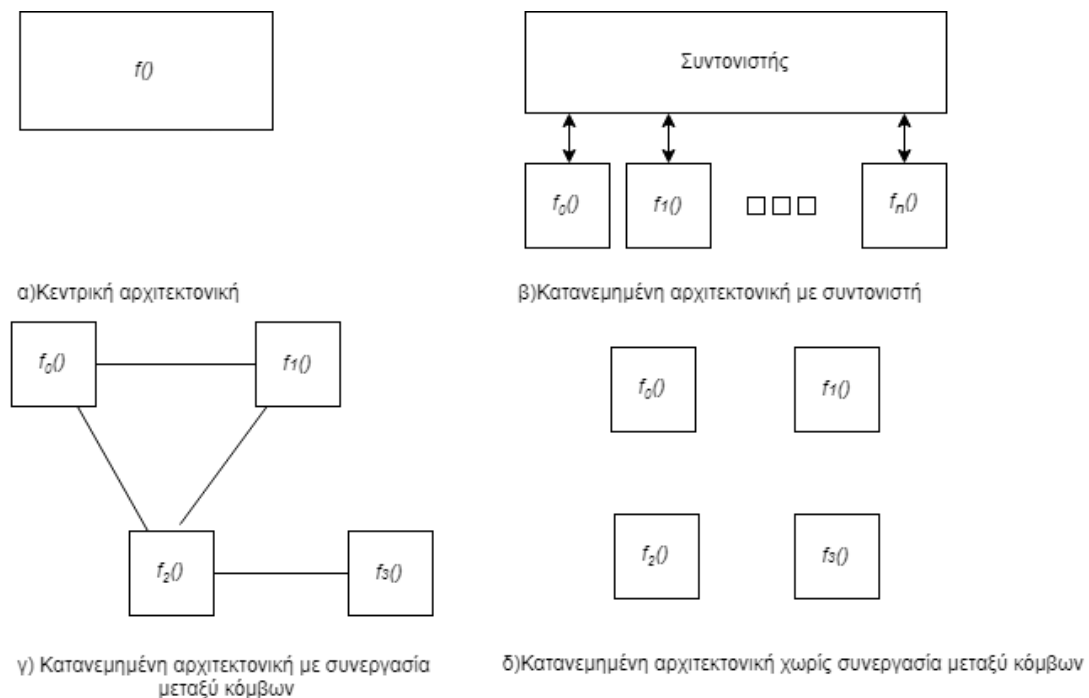
$$g(x) = 0 \quad (1.2)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (1.3)$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (1.4)$$

Η συνάρτηση $f(x)$ αποτελεί το μέγεθος προς βελτιστοποίηση. Η ισότητα 1.2, αποτελεί το ισοζύγιο ισχύος των ζυγών του συστήματος, η ανισότητα 1.3 συμβολίζει τα όρια των γραμμών και η 1.4 τους περιορισμούς τάσης και γεννητριών ισχύος. Η κυρτή

χαλάρωση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου επιτρέπει την λύση των παραπάνω προβλημάτων τόσο με κεντρικούς αλγόριθμους κυρτής βελτιστοποίησης αλλά και με κατακευκμένους αλγόριθμους. Στους κεντρικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης όλη η πληροφορία που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος συλλέγεται-αποστέλλεται σε μία υπολογιστική μονάδα προς επίλυση. Στους κατακευκμένους αλγόριθμους το πρόβλημα λύνεται από περισσότερες υπολογιστικές μονάδες που συνεργάζονται μεταξύ τους για την επίλυση του προβλήματος, είτε μέσω ενός κεντρικού συντονιστή η με επικοινωνία μεταξύ γειτονικών υπολογιστικών μονάδων. Τέλος υπάρχουν και κατηγορίες προβλημάτων, όπου η συνεργασία μεταξύ κόμβων είτε δεν είναι πιθανή η είναι πρακτικά δύσκολο να επιτευχθεί. [42]. Η αρχιτεκτονική επίλυσης φαίνεται στο σχήμα 1.2



Σχήμα 1.2 Ενδεικτική αρχιτεκτονική μεθόδων βελτιστοποίησης

Στα πλαίσια της διαχείρισης φορτίου ηλεκτροκίνησης (DSM), ζητούμενο είναι η ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων και της ζήτησης του δικτύου υπό περιορισμούς στην διακύμανση τάσης του δικτύου, στα θερμικά όρια των γραμμών διανομής, στα θερμικά όρια μετασχηματιστή κλπ. Στο [43], παρουσιάζεται ένα σχήμα ελέγχου φορτίου φόρτισης που μεγιστοποιεί την συνολική ισχύ που αποδίδεται στα οχήματα ή το συνολικό κόστος φόρτισης με βάση το κόστος ενέργειας υπό περιορισμούς στην διακύμανση τάσης, την ασυμμετρία φάσεων, τους περιορισμούς του μετασχηματιστή και της γραμμής διανομής. Στο [23], το πρόβλημα παρουσιάζεται σαν

πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού κυρτής βελτιστοποίησης όπου σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος του δικτύου υπο τον περιορισμό ότι τα ηλεκτρικά οχήματα πρέπει να φορτιστούν πλήρως και ότι η ισχύς φόρτισης τους δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική. Αν και η διακύμανση της τάσης δεν αποτελεί παράμετρο προς έλεγχο, φαίνεται πως η ελεγχόμενη φόρτιση μειώνει την διακύμανσή της κατά τις βραδυνές και πρώτες πρωινές ώρες. Στο [44], με βάση την κυρτή βελτιστοποίηση ελαχιστοποιείται το κόστος παραγωγής ισχύος που απαιτείται για την φόρτιση ανελαστικού και ελαστικού φορτίου οχημάτων υπό τους φυσικούς περιορισμούς του δικτύου. Στο [45], ελαχιστοποιείται η μέγιστη αιχμή ισχύος του δικτύου λόγω φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στο πρώτο στάδιο και έπειτα η διακύμανση του φορτίου ωστόσο δεν λαμβάνονται υπ' όψη οι περιορισμοί του δικτύου. Στο [46] μεγιστοποιείται η ισχύς που αποδίδεται στα ηλεκτρικά οχήματα υπο γραμμικούς περιορισμούς τάσης και θερμικών ορίων που υπολογίζονται από την ανάλυση ροής φορτίου που εκτελείται πριν από κάθε επανάλληψη του παραπάνω προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού. Η ανάλυση της σχέσης μεταξύ τάσης και φορτίου, έχει κεντρικό ρόλο στις εφαρμογές ελέγχου τάσης μέσω της διαχείρισης φορτίου. Η σχέση αυτή είναι μη γραμμική και μπορεί να εξαχθεί μέσω της ανάλυσης ευαισθησιών τάσης [47], [48], [49], [50]. Παράλληλα, στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται και κατανεμημένες μέθοδοι υπολογισμού των ευαισθησιών τάσης που βασίζονται στην δυνατότητα τοπικών μετρήσεων μέσω των έξυπνων συστημάτων μετρητών και στην ανταλλαγή πληροφορίας μετρήσεων μεταξύ κόμβων του συστήματος, [51], [52], [53]. Ο προσδιορισμός της σχέσης αυτής επιτρέπει τον έλεγχο της τάσης του δικτύου μέσα από την διαχείριση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων που πραγματοποιείται με την μεταβολή του ρυθμού φόρτισης. Στα πλαίσια της διατριβής η ιδέα αυτή είναι κεντρική και θα αναλυθεί διεξοδικά στο Κεφάλαιο 3 για ακτινικά δίκτυα διανομής.

1.8 Αρχιτεκτονική συστημάτων διαχείρισης φορτιού ηλεκτρικών οχημάτων για υπηρεσίες δικτύου διανομής

Η υλοποίηση της διαχείρισης του φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων απαιτεί τον συντονισμό όλων των φορέων της αγοράς [54]. Στο [55] ο διαχειριστής υποδομής φόρτισης διαπραγματεύεται την συνολική ισχύ φόρτισης της υποδομής, βασιζόμενος στην πρόβλεψη της ζήτησης, αρχικά με τον προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας ο οποίος προτείνει την βέλτιστη καμπύλη. Έπειτα διαμορφώνει την τελική καμπύλη φόρτισης ανάλογα με την

διαπραγμάτευση των ορίων φόρτισης που θέτει ο διαχειριστής του συστήματος διανομής. Στα πλαίσια αυτής της διατριβής εξετάζονται τα τεχνικά στοιχεία που αφορούν την διαπραγμάτευση των ορίων φόρτισης μεταξύ του διαχειριστή φόρτισης και του συστήματος διανομής, με κριτήριο την διασφάλιση των ορίων τάσης που αναλυθήκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Οι παρακάτω μηχανισμοί προτείνονται από τον ΔΕΔΔΗΕ για την υλοποίηση ενός τέτοιου σχήματος [54]

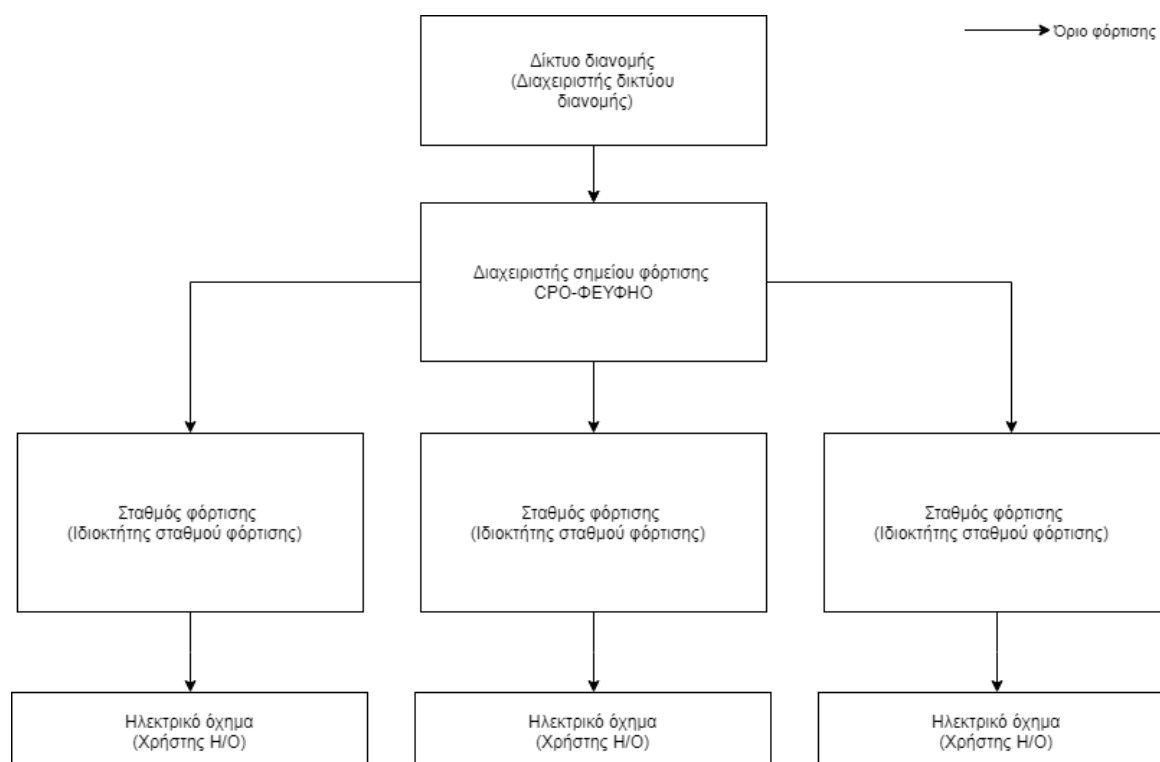
- Η υιοθέτηση δυναμικών ταριφών δικτύου βάσει της χωρητικότητας των υφιστάμενων υποδομών
- Η εφαρμογή δυναμικών συμβολαίων για τη μέγιστη επιτρεπτή ισχύ.
- Η παροχή υπηρεσιών ευελιξίας φορτίου μέσω των αγορών επικουρικών υπηρεσιών.

Η λογική του συστήματος ελέγχου που θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια στηρίζεται στην δυνατότητα εφαρμογής δυναμικών συμβολαίων για την μέγιστη επιτρεπτή ισχύ καθώς αυτή αποτελεί το αντικείμενο της διαπραγμάτευσης μεταξύ του συστήματος διανομής και των διαχειριστών υποδομής φόρτισης. Η μέγιστη ισχύς καθορίζεται από την λογική ελέγχου του διαχειριστή διανομής και προκύπτει από την ζήτηση που αναφέρουν οι διαχειριστές συστήματος υποδομής φόρτισης και από το μέτρο της τάσης του συστήματος διανομής. Το όριο αυτό γνωστοποιείται στους διαχειριστές σημείων φόρτισης και διαμορφώνεται αναλόγως για τα ΗΟ (Σχ 1.3. Για τις επικοινωνιακές ανάγκες ενός τέτοιου συστήματος, έχουν αναπτυχθεί αντίστοιχα επικοινωνιακά πρωτόκολλα ηλεκτροκίνησης τα οποία αναλύονται και στην συνέχεια.

1.9 Επικοινωνιακά πρωτόκολλα ηλεκτροκίνησης και διαχείριση φορτίου

Τα βασικά πρωτόκολλα που σχετίζονται με τις επικοινωνίες της υποδομής φόρτισης είναι τα εξής.

- Ηλεκτρικό όχημα<->Εξοπλισμός φόρτισης σταθμού φόρτισης - IEEE 15118
- Σταθμός φόρτισης<->Διαχειριστής σημείου φόρτισης - OCPP, IEC 63110
- Διαχειριστής σημείου φόρτισης<->Διαχείριση Συστήματος Διανομής Ενέργειας - OSCP, ISO 61850



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα ροής καθορισμού ορίων φορτίου

Το πρωτόκολλο IEEE 15118, χωρίζεται σε 9 μέρη [56]. Το δεύτερο μέρος αυτού, προσδιορίζει το μοντέλο επικοινωνίας, ορίζει τα μηνύματα επικοινωνίας, τις σχετικές παράμετροι αλλά και τον τρόπο που αυτά ανταλλάσσονται μεταξύ του αυτοκινήτου και της υποδομής φόρτισης. Τα μηνύματα υποστηρίζουν τις εξής λειτουργίες

- Προσδιορισμός κατηγορίας φόρτισης
- Ταυτοποίηση οχήματος και εξουσιοδότηση φόρτισης
- Προσδιορισμός τεχνικών παραμέτρων φόρτισης
- Επαναδιαπραγμάτευση τεχνικών παραμέτρων φόρτισης
- Αποστολή μετρήσεων φόρτισης της υποδομής στο όχημα
- Τερματισμός διαδικασίας φόρτισης.

Ο προσδιορισμός τεχνικών παραμέτρων φόρτισης συμπεριλαμβάνει την διαδικασία διαπραγμάτευσης του προγράμματος φόρτισης, που αποτελεί μια χρονοσειρά ισχύος. Αρχικά το όχημα αποστέλλει τις ενεργειακές ανάγκες και τον χρόνο αποχώρησης στην υποδομή φόρτισης. Έπειτα η υποδομή αποστέλλει το προφίλ μέγιστης φόρτισης του οχήματος. Το όχημα ενημερώνει την υποδομή για το πρόγραμμα φόρτισης που διαμορφώνεται κάτω από τα όρια μέγιστης φόρτισης. Κατά την διάρκεια της φόρτισης η υποδομή μπορεί να επανεκκινεί την διαδικασία διαπραγμάτευσης [57].

Η διαδικασία διαπραγμάτευσης του προφίλ φόρτισης υποστηρίζεται από το πρωτόκολλο OCPP [58]. Το πρωτόκολλο OCPP ορίζει μεταξύ άλλων την λειτουργία set charging profile που συνιστά τον ορισμό του μέγιστου ορίου ισχύος του εξοπλισμού φόρτισης (EVSE) από τον διαχειριστή υποδομής φόρτισης (CPO). Παρόμοια το πρωτόκολλο OSCP υποστηρίζει τον ορισμό της εκτιμώμενης διαθέσιμης ισχύος από τον διαχειριστή του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (DSO) και την προώθηση των ορίων στον διαχειριστή υποδομής φόρτισης [59]. Παρατηρούμε επομένως ότι τα επικοινωνιακά πρωτόκολλα υποδομής φόρτισης υποστηρίζουν την διαχείριση της διαδικασίας φόρτισης με τρόπο ιεραρχικό, καθώς επιτρέπουν την αποστολή των ορίων φόρτισης κατά τα επίπεδα ελέγχου που παρουσιάζονται στο σχήμα 1.3.

Στα πλαίσια της διατριβής δεν μελετώνται τα παραπάνω επικοινωνιακά πρωτόκολλα περαιτέρω. Ωστόσο, ακολουθούμε τον ιεραρχικό προσδιορισμό των ορίων φόρτισης όπως καθορίζεται πρώτα από τον διαχειριστή υποδομής φόρτισης και έπειτα από τον διαχειριστή υποδομής φόρτισης.

1.10 Φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων με περιορισμένη πτώση τάσης δικτύου διανομής

Το ζήτημα αυτό είναι ένα από τα κεντρικά ζητήματα αυτής της διατριβής. Η φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί μια διαδικασία που συμπίπτει με την γενική χρήση του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συγχρονισμός της ώρας αιχμής των 2 αυτών των κατηγοριών φορτίου, σε συνδυασμό με τα φυσικά χαρακτηριστικά του δικτύου διανομής, μπορεί να προκαλέσει υψηλές διακυμάνσεις στο ημερήσιο προφίλ τάσης του δικτύου διανομής. Ωστόσο, η ελαστικότητα του φορτίου ηλεκτρικών αυτοκινήτων αλλά και η ευχέρεια εγκατάστασης υποδομής ελέγχου του, δίνει την δυνατότητα περιορισμού των όποιων μεταβολών τάσης και την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών του ηλεκτρικού οχήματος.

Στα πλαίσια αυτής της διατριβής θεωρείται ότι το φορτίο των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι ελαστικό και ότι τα ηλεκτρικά οχήματα γνωστοποιούν στο σύστημα τις απαιτήσεις ενέργειας αλλά και τον χρόνο αναχώρησης από την υποδομή φόρτισης. Το υπόλοιπο φορτίο του συστήματος θεωρείται ανεξέλεγκτο αλλά γνωστό μέσω ιστορικών στατιστικών στοιχείων, μεθόδων εκτίμησης ζήτησης κλπ.

Η διαχείριση του φορτίου ακολουθεί την ιεραρχία ελέγχου που εμφανίζεται στο σχήμα 1.3. Αρχικά ο διαχειριστής του συστήματος διανομής υπολογίζει τα όρια φόρτισης και τα κατανέμει στους διαχειριστές υποδομής φόρτισης. Οι διαχειριστές υποδομής φόρτισης κατανέμουν περαιτέρω τα όρια φόρτισης στα σημεία φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων που εξυπηρετούν.

Ο διαχειριστής συστήματος διανομής, για να εξάγει τα όρια φόρτισης λαμβάνει υπόψη εκτιμήσεις τάσης του δικτύου διανομής και την ζήτηση φορτίου. Η διαφορά μεταξύ του συνολικού ορίου φορτίου και του εκτιμώμενου ανελαστικού φορτίου αποτελεί το άνω όριο φόρτισης που αποστέλλεται στους διαχειριστές υποδομής φόρτισης. Οι διαχειριστές φόρτισης πραγματοποιούν τον προγραμματισμό των διεργασιών φόρτισης και ενημερώνουν το σύστημα διανομής για τον ενεργειακό προγραμματισμό τους. Εάν ο ενεργειακός προγραμματισμός και τα όρια φόρτισης τους συμπίπτουν, αιτούνται αύξηση του ορίου φόρτισης μέσω της ένδειξης ζήτησης. Αντίθετα, εάν το όριο φόρτισης είναι υψηλότερο της ισχύος που χρειάζεται για την φόρτιση του στόλου αιτούνται μείωση του ορίου φόρτισης μέσω μείωσης της παραμέτρου ζήτησης. Η κύρια διαφορά σε σχέση με τις μεθόδους που παρουσιάζονται στην διεθνή βιβλιογραφία είναι ότι ο προσδιορισμός των ορίων φόρτισης ανά ζυγό του συστήματος διανομής σε κάθε έναν από τους οποίους συνδέεται η υποδομή φόρτισης γίνεται με κριτήριο την αρχή της αναλογικότητας

(Proportional Fairness Criterion) [60] της επίδρασης του φορτίου ως προς την πτώση τάσης που προκαλεί στο δίκτυο διανομής και την αντίστοιχη ζήτηση φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων. Η μέθοδος αυτή εγγυάται ένα ελάχιστο φορτίο ακόμα και στους κόμβους που επιδρούν αρκετά στην πτώση τάσης του συστήματος και ταυτόχρονα δίνει την δυνατότητα προσαρμογής των ορίων φόρτισης ανάλογα με την ζήτηση που εμφανίζει ο κάθε ζυγός του συστήματος. Στο επίπεδο της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων βασικό κριτήριο είναι η φόρτιση εντός των καθορισμένων ορίων για το πλήθος των οχημάτων που συνδέονται στον διαχειριστή υποδομής φορτίου με στόχο την ελαχιστοποίηση της διαφοράς της χρονοσειράς φόρτισης του κάθε οχήματος απο ένα μέσο προφίλ φόρτισης που εκπληρώνει τις ενεργειακές ανάγκες του κάθε οχήματος.

Τα παραπάνω προβλήματα εκφράζονται ως προβλήματα κυρτής βελτιστοποίησης και διερευνάται η επίλυση τους με κατανεμημένους αλγόριθμους. Για την περίπτωση του προσδιορισμού των ορίων της υποδομής φόρτισης επεκτείνεται κατάλληλα ο κατανεμημένος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στο [61] και αποδεικνύεται η ασυμπτωτική σύγκλιση ενός κατανεμημένου αλγορίθμου κατά Lyapunov [62]. Για την περίπτωση του προβλήματος της κατανομής της διαθέσιμης ισχύος φόρτισης στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα σχεδιάζεται κατανεμημένος αλγόριθμός με βάση την μεθοδολογία ADMM [63]. το πρόβλημα εκφράζεται κατά την μεθοδολογία διαμοιρασμού και αναλύεται η κατάλληλη παραμετροποίησή του.

Το παραπάνω σύστημα δοκιμάζεται σε μια γραμμή δικτύου διανομής μεγάλου μήκους, με χαρακτηριστικά που επιτρέπουν την μελέτη του προβλήματος πτώσης τάσης. Η γραμμή φορτίζεται με ένα ημερήσιο προφίλ ελαστικού και ανελαστικού φορτίου και αξιολογείται ως προς την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών των οχημάτων και τον περιορισμό της διακύμανσης της τάσης του δικτύου ιδίως κατά τις απογευματινές και πρώτες βράδυνες ώρες που παρατηρείται τυπικά η αιχμή φορτίου του δικτύου διανομής.

Η αρχιτεκτονική του παραπάνω συστήματος παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2. Οι αλγόριθμοι επίλυσης παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το πλαίσιο των προσομοιώσεων του συστήματος και τα σχετικά αποτελέσματα. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται ένα πλαίσιο διαχείρισης της διαδικασίας δυναμικής εν-κινήσει φόρτισης. Στο κεφάλαιο 6 αναλύονται τα συμπεράσματα και οι περαιτέρω επεκτάσεις της διατριβής.

Κεφάλαιο 2

Αρχιτεκτονική συστήματος διαχείρισης φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων υπό περιορισμένη πτώση τάσης

2.1 Αρχιτεκτονική συστήματος

Το σύστημα διαχείρισης φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων υπό περιορισμένη μεταβολή τάσης βλ σχ (2.1) αποτελείται από τα παρακάτω υποσυστήματα

- Υποσύστημα ανάλυσης ευαισθησιών τάσης
- Υποσύστημα εκτίμησης ορίων φορτίου
- Υποσύστημα ελεγχόμενης φόρτισης οχημάτων

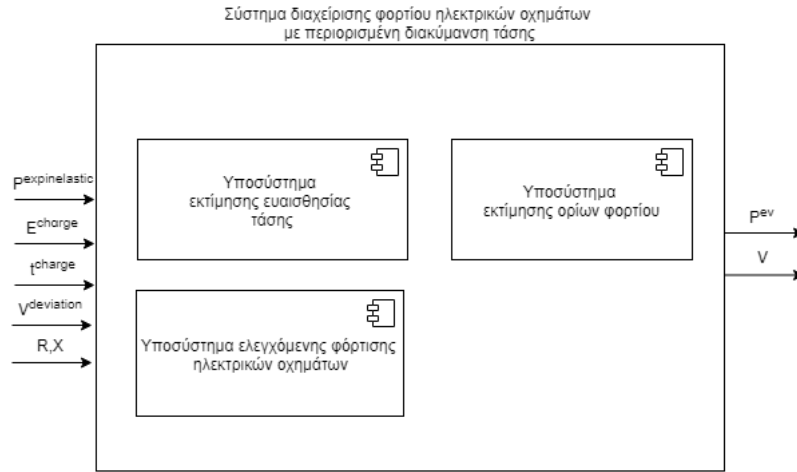
Το υποσύστημα ανάλυσης ευαισθησιών τάσης, έχει ως στόχο την εκτίμηση των ευαισθησιών τάσης V προς φορτίο ενεργού ισχύος P και άεργου ισχύος Q για το σύνολο των ζυγών i του δικτύου διανομής, δηλαδή των ποσοτήτων

$$\partial V_i / \partial P_j, \partial V_i / \partial Q_j \quad \forall i, j \in (0..N - 1) \quad (2.1)$$

Το υποσύστημα εκτίμησης ορίων φορτίου υπολογίζει τα ανώτατα όρια ελαστικού φορτίου για κάθε ζυγό του συστήματος διανομής, με δεδομένη την μέγιστη επιτρεπτή

πτώση τάσης του δικτύου διανομής που αποτελεί σχεδιαστική παράμετρο και καθορίζεται από την εκάστοτε εθνική νομοθεσία, την ζήτηση ισχύος κάθε ζυγού i και την πρόβλεψη του ανελαστικού φορτίου. Επιπρόσθετα θεωρείται σταθερός επαγωγικός συντελεστής ισχύος και γωνία φ .

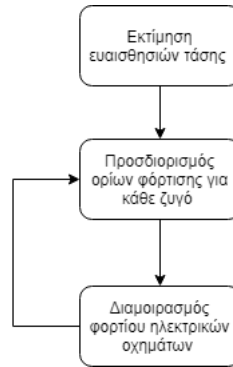
$$P_i^{max}, Q_i^{max} = P_i^{max} \tan \varphi \quad \forall i \in (0..N-1) : \partial|V|_i \leq V^{deviation} \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.1 Αρχιτεκτονική συστήματος

Δυο είδη φορτίου θεωρούνται στα πλαίσια της διατριβής; το ελαστικό φορτίο $P^{elastic}$, των ηλεκτρικών οχημάτων και το ανελαστικό φορτίο $P^{inelastic}$ του δικτύου διανομής. Το ελαστικό φορτίο αποτελεί ελεγχόμενο φορτίο το οποίο μπορεί να μετατεθεί στο μέλλον ενώ το ανελαστικό φορτίο $P^{inelastic}$, είναι μη ελεγχόμενο. Το ελαστικό φορτίο προκύπτει από τις ενεργειακές ανάγκες E^{charge} , την χρονική διάρκεια φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων t^{charge} και την στρατηγική του υποσυστήματος εκτίμησης ορίων φορτίου. Το υποσύστημα ελεγχόμενης φόρτισης οχημάτων σκοπεύει στον διαμοιρασμό της διαθέσιμης ισχύος $P^{elastic}$, $Q^{elastic} = P^{elastic} * \tan \varphi$ στα οχήματα που φορτίζουν για κάθε ζυγό του συστήματος διανομής με απώτερο στόχο την εξυπηρέτηση των ενεργειακών τους αναγκών. Τα παραπάνω υποσυστήματα διασυνδέονται μεταξύ τους κατά το διάγραμμα ροής που απεικονίζεται στο σχήμα 2.2

Η εκτίμηση των ευαισθησιών τάσης φορτίου του δικτύου διανομής, ακολουθεί την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο [51], και πραγματοποιείται μια φορά κατά την αρχικοποίηση του συστήματος. Απαιτεί γνώση των φυσικών ιδιοτήτων των γραμμών του δικτύου διανομής; της αντίστασης R , της επαγωγικής αντίδρασης X και της ονομαστικής τάσης V_n . Όπως θα φανεί στην συνέχεια, για την περίπτωση ακτινικών δικτύων διανομής, αρκεί η γνώση των στοιχείων $\partial V_i / \partial P_j$, $\partial V_i / \partial Q_j$ $i = j$ για τον υπολογισμό των διανυσμά-

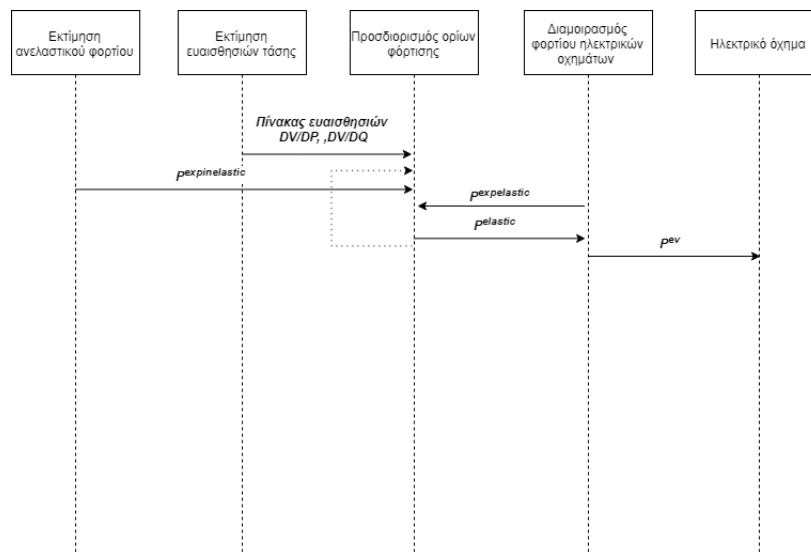


Σχήμα 2.2 Διάγραμμα ροής συστήματος

των $\partial V_i / \partial P_j$, $\partial V_i / \partial Q_j$ $\forall i, j \in (0..N - 1)$ γεγονός που διευκολύνει τους σχετιζόμενους υπολογισμούς στην περίπτωση κατανεμημένης επίλυσης. Το υποσύστημα εκτίμησης των ορίων φόρτισης απαιτεί την πρόβλεψη της ζήτησης του ανελαστικού φορτίου $\hat{P}^{inelastic}$, $\hat{Q}^{inelastic}$ η οποία στα πλαίσια αυτής της διατριβής θεωρείται δεδομένη. Επίσης απαιτεί την εκτίμηση της ζήτησης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων $\hat{P}^{elastic}$, $\hat{Q}^{elastic}$, του πίνακα ευαισθησιών του συστήματος διανομής αλλά και την μέγιστη επιτρεπτή διακύμανση τάσης για να παράγει τα μέγιστα επιτρεπτά όρια ελαστικού φορτίου για τους ζυγούς του δικτύου $P^{max} = P^{elastic}$. Στις εξομοιώσεις που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια υιοθετούμε μέγιστη διακύμανση της τάξεως του 3% της ονομαστικής που αποτελεί και δεσμευτική τιμή σχεδιασμού του ελληνικού δικτύου διανομής. Το υποσύστημα διαμοιρασμού της διαθέσιμης ισχύος στα ηλεκτρικά οχήματα απαιτεί γνώση της ενέργειας φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων E^{charge} , της μέγιστης ισχύος φόρτισης κάθε οχήματος P^{maxEV} καθώς και του χρόνου αποχώρησής ηλεκτρικού οχήματος από την υποδομή φόρτισης. Με βάση τα παραπάνω, προσδιορίζεται το χρονοδιάγραμμα φόρτισης κάθε ηλεκτρικού οχήματος P^{ev} , το οποίο θεωρούμε ότι μπορεί να επαναπροσδιοριστεί και επαναδιαπραγματευτεί κάθε χρονική στιγμή με το ηλεκτρικό όχημα κατά την φιλοσοφία που έχει υιοθετηθεί από το πρωτόκολλο IEEE 15118 [64]. Η ακολουθία μετάδοσης των μεταβλητών εισόδου εξόδου μεταξύ των υποσυστημάτων φαίνεται στο διάγραμμα 2.3.

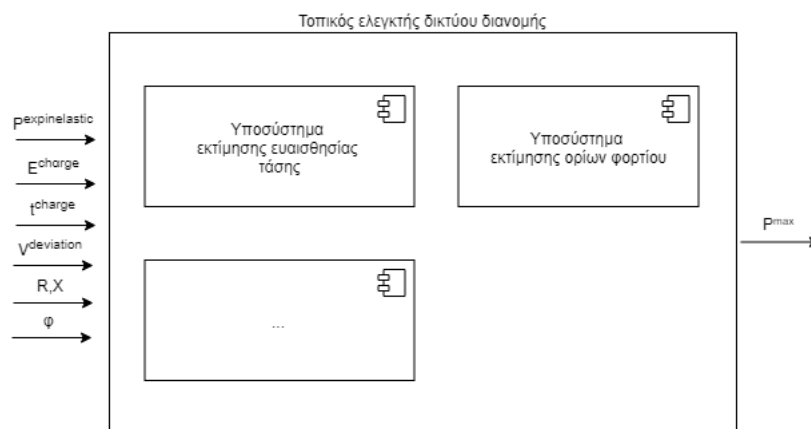
2.2 Ενσωμάτωση συστήματος από φορείς ηλεκτροκίνησης

Τα επιμέρους υποσυστήματα ενσωματώνουν λειτουργίες οι οποίες αποτελούν ευθύνη του διαχειριστή του δικτύου διανομής και του διαχειριστή της υποδομής φόρτισης. Η εκτίμηση της ευαισθησίας τάσης και η εξαγωγή των ορίων φόρτισης με κριτήριο την



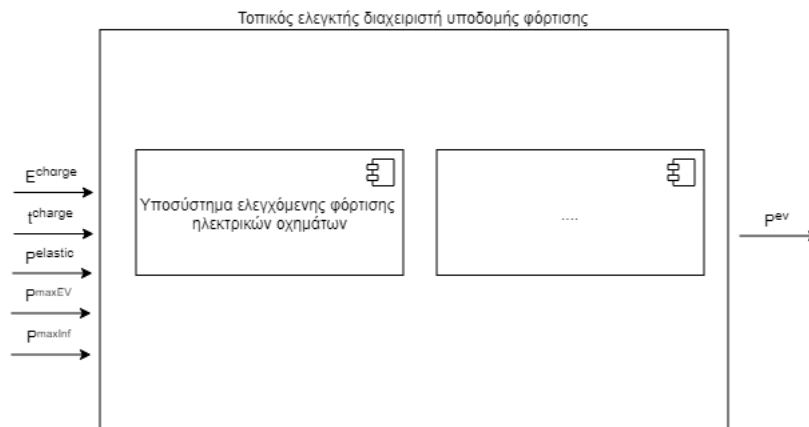
Σχήμα 2.3 Ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ υποσυστημάτων

περιορισμένη διακύμανσης τάσης αποτελεί στοιχείο της εύρυθμης λειτουργίας του δικτύου διανομής για την οποία είναι υπεύθυνος ο διαχειριστής. Η ελεγχόμενη φόρτιση των οχημάτων κάτω από τα πλαίσια που τίθενται από τον διαχειριστή του δικτύου είναι ευθύνη του διαχειριστή της υποδομής φόρτισης. Η συνολική λειτουργία του συστήματος με αυτό το πλαίσιο προϋποθέτει την σύναψη σχετικών συμφωνιών λειτουργίας μεταξύ του διαχειριστή δικτύου και υποδομής φόρτισης και ακολουθεί την φιλοσοφία του πλαισίου εφαρμογής "δυναμικών συμβολαίων για τη μέγιστη επιτρεπτή ισχύ" της δημόσιας διαβούλευσης για την ηλεκτροκίνηση [28]. Η εξαγωγή των ευαισθησιών τάσης και των ορίων φόρτισης μπορεί να πραγματοποιηθεί από μια τοπική μονάδα ελέγχου τάσης που αντιστοιχεί σε ένα δίκτυο διανομής που συνδέεται με το δίκτυο μεταφοράς, βλ σχήμα 2.4.

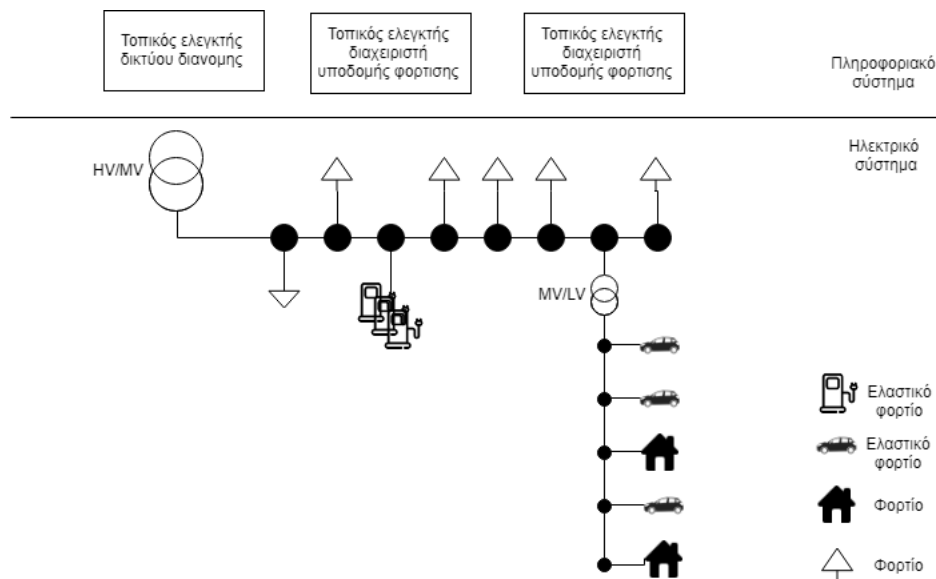


Σχήμα 2.4 Ενσωμάτωση υποσυστημάτων στον διαχειριστή δικτύου διανομής

Η ελεγχόμενη φόρτιση οχημάτων μπορεί να ενσωματωθεί από πολλαπλούς διαχειριστές υποδομής φόρτισης βλ σχήμα 2.5 που συνδέονται στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης και ελέγχουν ένα επιμέρους δίκτυο χαμηλής τάσης στο οποίο συνδέονται οχήματα που φορτίζουν κατά τις μεθόδους 1-3 ή από διαχειριστές υποδομής φόρτισης που διαχειρίζονται υποδομή ταχείας φόρτισης DC κατά την μέθοδο 4. (βλ 1.4 ,βλ σχήμα 2.6)



Σχήμα 2.5 Ενσωμάτωση υποσυστημάτων στον διαχειριστή υποδομής φόρτισης

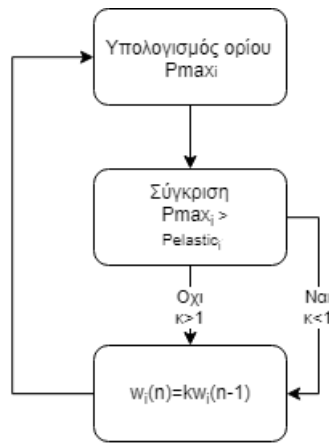


Σχήμα 2.6 Υλοποίηση συστήματος σε δίκτυο διανομής

Η διαδικασία προσδιορισμού των ορίων φόρτισης αποτελεί διαπραγμάτευση κατά την οποία ο τοπικός ελεγκτής επεξεργάζεται μια ποσότητα w_i ενδεικτική της ζήτησης κάθε ζυγού i του δικτύου διανομής, τους πίνακες ευαισθησίας $\partial V_i / \partial P_j$ και παράγει τα όρια του φορτίου P_i^{max} , Q_i^{max} που τίθενται σε ισχύ την επόμενη χρονο-θυρίδα λειτουργίας

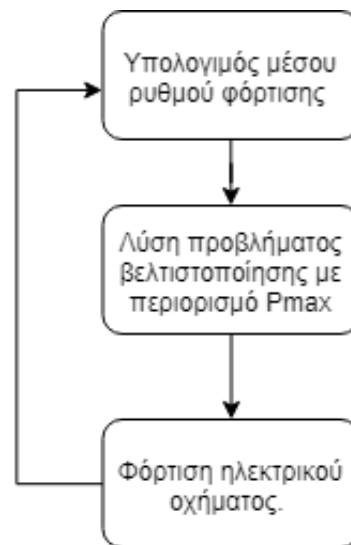
του πληροφοριακού συστήματος. Η διάρκεια της χρονοθυρίδας είναι ίση με το ελάχιστο της διάρκειας των προβλέψεων της ζήτησης του συστήματος. Η λογική της διαπραγμάτευσης έγκειται στην αύξηση του δείκτη ζήτησης w_i την χρονική στιγμή n , εφ'όσον το όριο ισχύος είναι μικρότερο του προβλεπόμενου φορτίου και στην μείωση της ένδειξης ζήτησης σε αντίθετη περίπτωση. Το ζητούμενο της διαδικασίας είναι η προσαρμογή των ορίων φόρτισης στην ζήτηση του φορτίου έτσι ώστε να ικανοποιηθεί το φορτίο σε όλους τους ζυγούς του συστήματος εφ'όσον δεν παραβιάζεται ο περιορισμός στην διακύμανση τάσης της σχ2.2

$$w_i(n) = kw_i(n-1) \forall i \in (0..N-1) : \begin{cases} k > 1 : P_i^{max}(n-1) < \hat{P}_i^{elastic}(n) \\ k < 1 : P_i^{max}(n-1) > \hat{P}_i^{elastic}(n) \end{cases} \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.7 Διάγραμμα ροής υποσυστήματος καθορισμού ορίων φόρτισης

Κατά την διαδικασία διαμοιρασμού του φορτίου στα ηλεκτρικά οχήματα, η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς διαμοιράζεται στον στόλο ηλεκτρικών οχημάτων που εξυπηρετεί ο διαχειριστής της υποδομής φόρτισης. Ο χρονοπρογραμματισμός του προφίλ φόρτισης κάθε οχήματος εξαρτάται από την συνολική διαθέσιμη ισχύ, τις ενεργειακές ανάγκες κάθε οχήματος και τον διαθέσιμο χρόνο για φόρτιση. Κάθε όχημα γνωστοποιεί τις ενεργειακές του ανάγκες στον τοπικό ελεγκτή του διαχειριστή της υποδομής φόρτισης. Για κάθε όχημα ορίζεται ένας μέσος ρυθμός φόρτισης που ικανοποιεί τις ενεργειακές ανάγκες του οχήματος. Σε κάθε χρονική στιγμή λύνεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης με στόχο την ικανοποίηση του μέσου ρυθμού φόρτισης για όλα τα ηλεκτρικά οχήματα με περιορισμό στην συνολική μέγιστη διαθέσιμη ισχύ της υποδομής φόρτισης και συνεπακόλουθα στη διακύμανση τάσης. Στη συνέχεια ανανεώνεται ο μέσος ρυθμός φόρτισης με βάση την ισχύ που αποδόθηκε από την υποδομή και το πρόβλημα λύνεται εκ νέου.

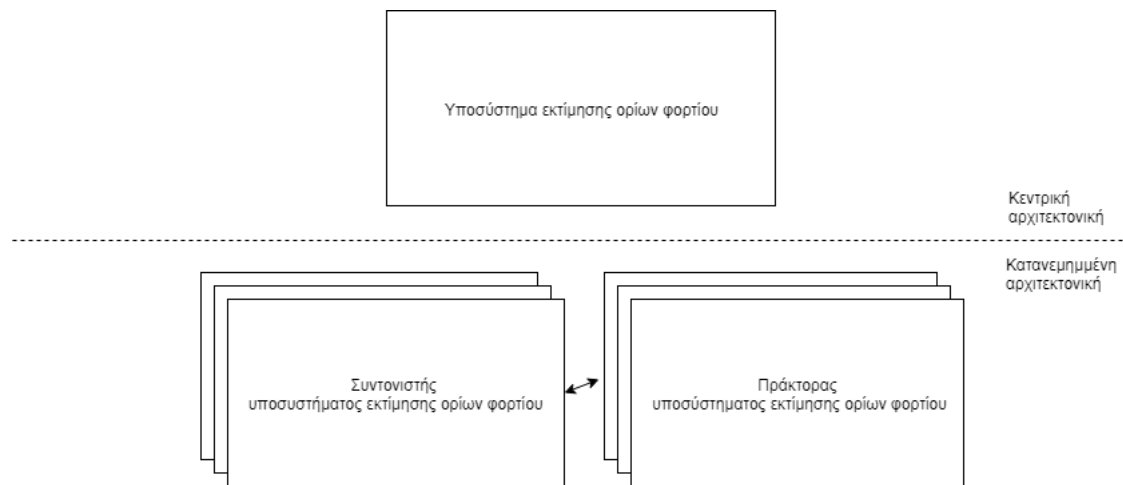
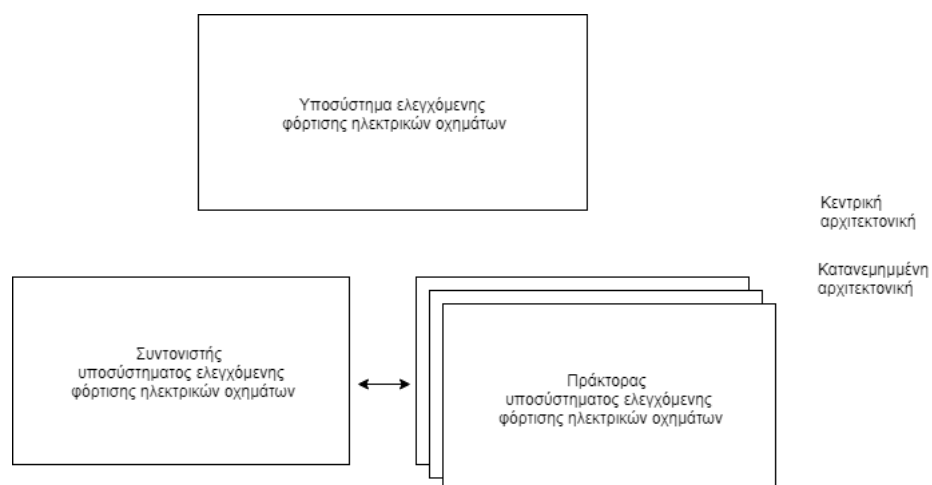


Σχήμα 2.8 Διάγραμμα ροής υποσυστήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

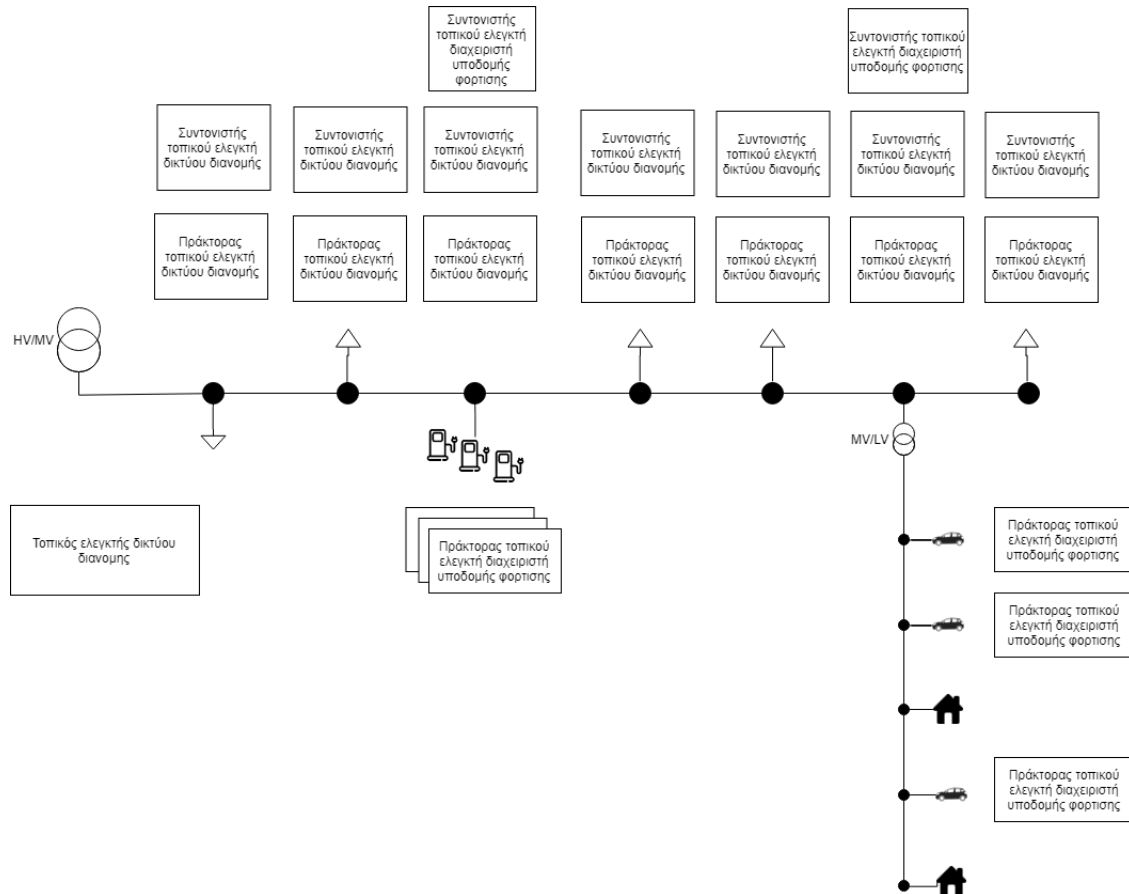
Ο παραπάνω μηχανισμός θα αναλυθεί περαιτέρω στο κεφάλαιο 3.

2.3 Ενσωμάτωση κατακεντρωμένου συστήματος από φορείς ηλεκτροκίνησης

Στην αρχιτεκτονική που παρουσιάστηκε στ σχήμα 2.6, υπάρχει ένας κεντρικός ελεγκτής που συλλέγει τα απαραίτητα δεδομένα, πραγματοποιεί την διαδικασία επίλυσης προβλήματος και μοιράζει τα αποτελέσματα στην υπόλοιπη ιεραρχία ελέγχου του. Μια εναλλακτική δυνατότητα είναι η κατακεντρωμένη επεξεργασία της πληροφορίας, όπου περισσότεροι από ένας ελεγκτές συνεργάζονται για την επεξεργασία και επίλυση του κάθε προβλήματος. Ο βασικός λόγος που μια τέτοια αρχιτεκτονική έχει νόημα, είναι ότι για μεγάλα μεγέθη προβλημάτων η κεντρική επίλυση παρουσιάζει αυξημένη πολυπλοκότητα για κάθε βήμα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, σε σχέση με αρχιτεκτονικές κατακεντρωμένης επίλυσης (βλ κεφ 6). Στα πλαίσια της διατριβής αυτής θα διερευνηθεί και η κατακεντρωμένη αρχιτεκτονική με συντονιστή του σχ 1.2 για τα υποσυστήματα εκτίμησης ορίων διαχείρισης φορτίου και εκτίμησης ορίων διαχείρισης φορτίου. Σε αυτή την περίπτωση, κάθε υποσύστημα αποτελείται από τον κεντρικό συντονιστή που επιβλέπει την διαδικασία επίλυσης μέσω σημάτων ελέγχου που αποστέλλει στους πράκτορες (agents) που επιλύουν το πρόβλημα σε τοπικό επίπεδο μέχρις ότου το σύστημα βρεθεί σε συνθήκες ισορροπίας βλ σχ (2.9), (2.10).

**Σχήμα 2.9** Κατανεμημένη αρχιτεκτονική υποσυστήματος εκτίμησης ορίων διαχείρισης φορτίου**Σχήμα 2.10** Κατανεμημένη αρχιτεκτονική υποσυστήματος ελεγχόμενης φόρτισης οχημάτων

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την κατακευμασμένη υλοποίηση θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο 3. Η αρχιτεκτονική του ρυστήματος φαίνεται στο σχήμα 2.11.

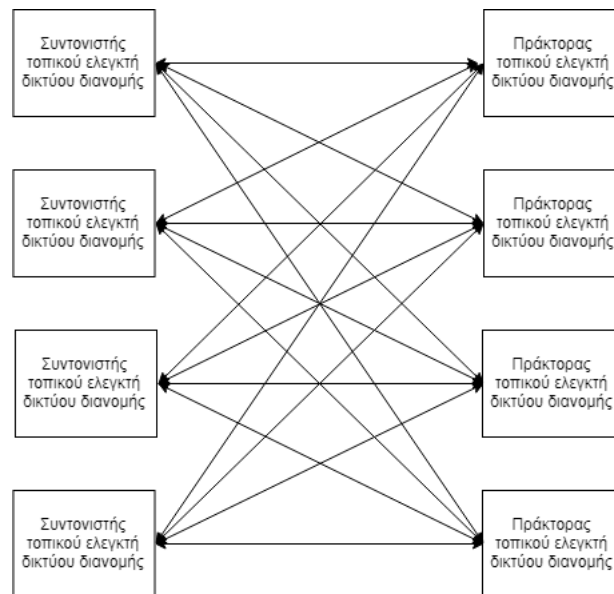


Σχήμα 2.11 Υλοποίηση κατακευμασμένου ρυστήματος σε δίκτυο διανομής

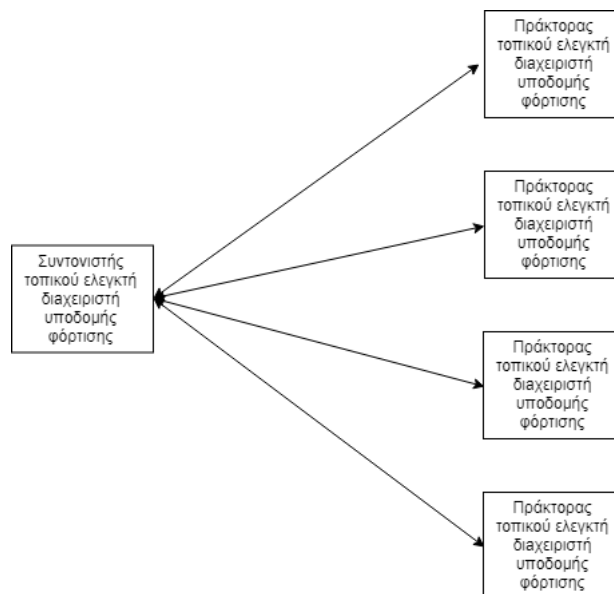
Για κάθε ζυγό του ρυστήματος διανομής υπάρχει ένας συντονιστής που ελέγχει την κατακευμασμένη διαδικασία καθορισμού των ορίων φόρτισης του δικτύου που εκτελείται από τους πράκτορες του ρυστήματος διανομής που λύνουν το τοπικό πρόβλημα καθορισμού των ορίων φόρτισης βασισμένοι στα σήματα ελέγχου των συντονιστών 2.12.

Παρόμοια, σε κάθε τοπικό ελεγκτή του διαχειριστή υποδομής φόρτισης υπάρχει ο συντονιστής που ελέγχει την διαδικασία διαμοιρασμού της διαθέσιμης ισχύος, που εκτελείται από τους πράκτορες του διαχειριστή υποδομής φόρτισης 2.13.

Η επικοινωνία μεταξύ συντονιστή και πράκτορα για την περίπτωση του ρυστήματος διαχείρισης διανομής ακολουθεί την τοπολογία του σχήματος 2.12. Τα σήματα ελέγχου του συντονιστή αποτελούν, συνάρτηση της εκτιμώμενης ή παρατηρούμενης πτώσης τάσης που προκαλείται από το φορτίο όλων των ζυγών του δικτύου διανομής και με αυτή την λογική αποστέλλονται σε όλους τους πράκτορες που ελέγχουν τα όρια κάθε ζυγού.

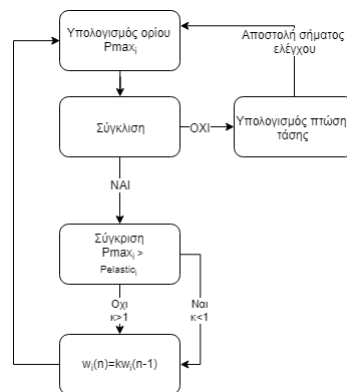


Σχήμα 2.12 Επικοινωνία συντονιστή-πράκτορα καταναμημένου συστήματος διαχειριστή δικτύου διανομής

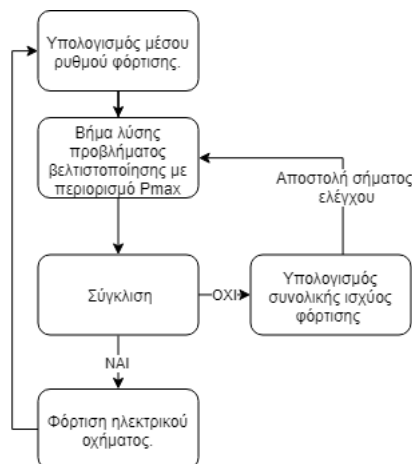


Σχήμα 2.13 Επικοινωνία συντονιστή-πράκτορα καταναμημένου συστήματος διαχειριστή υποδομής φόρτισης

Ο κάθε πράκτορας αντίστοιχα, ελέγχει τα άνω όρια του φορτίου του κάθε ζυγού του συστήματος διανομής που προκαλεί πτώση τάσης σε όλους τους ζυγούς του συστήματος, και με αυτό το σκεπτικό ο κάθε πράκτορας αποστέλλει την τιμή του ορίου φόρτισης σε όλους τους ζυγούς του συστήματος διανομής στην περίπτωση που οι ελεγκτές πραγματοποιούν εκτίμηση της πτώσης τάσης. Εφ' όσον οι ελεγκτές πραγματοποιούν μέτρηση της πτώσης τάσης η αποστολή των ορίων φόρτισης από κάθε πράκτορα δεν είναι απαραίτητη. Η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 2.14



Σχήμα 2.14 Διάγραμμα ροής κατανεμημένου υποσυστήματος καθορισμού ορίων φόρτισης



Σχήμα 2.15 Διάγραμμα ροής κατανεμημένου υποσυστήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Η επικοινωνία πράκτορα και ελεγκτή για την περίπτωση του υποσυστήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων πραγματοποιείται κατά το σχήμα 2.13. Ο πράκτορας φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων επιλέγει την ισχύ φόρτισης και την αποστέλλει

στον συντονιστή τοπικού ελεγκτή φόρτισης που συλλέγει το σύνολο της ισχύος, αξιολογεί το συνολικό άθροισμα ισχύος και αποστέλλει ξανά ένα σήμα ελέγχου στους πράκτορες φόρτισης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι την σύγκλιση της διαδικασίας στην βέλτιστη τιμή φόρτισης για όλα τα οχήματα κατά το κριτήριο σύγκλισης της μεθόδου (Alternating Direction Method of Multipliers) ADMM που συνίσταται στην μικρή τιμή του πρωτεύοντος και δυικού υπολοίπου (primal, dual residuals) [63]. Η λύση ικανοποιεί κατά το δυνατό τους ενεργειακούς περιορισμούς των ηλεκτρικών οχημάτων και τους περιορισμούς της μέγιστης ισχύος που μπορεί να απορροφηθεί από την υποδομή φόρτισης έτσι ώστε να περιορίζεται συνολικά η διακύμανση τάσης του δικτύου διανομής. Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας αυτής φαίνεται στο σχήμα 2.15.

Στις παραγράφους που προηγήθηκαν έγινε παρουσίαση των βασικών υποσυστημάτων διαχείρισης φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων και της διασύνδεσής τους. Επιπρόσθετα παρουσιάστηκε η κεντρική και κατανεμημένη αρχιτεκτονική επίλυσης προβλημάτων συνοπτικά. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα επιμέρους υποσυστήματα περαιτέρω, έτσι ώστε να φανούν τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος διαχείρισης φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων.

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογία και εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης

Το κεφάλαιο αυτό σκοπεύει στην μαθηματική ανάλυση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης της διαχείρισης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με στόχο την ανάδειξη των ιδιοτήτων τους. Αρχικά γίνεται εισαγωγή στην μεθοδολογία ανάλυσης ευαισθησιών τάσης κατά την διεθνή βιβλιογραφία, έπειτα παρουσιάζεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος διαμοιρασμού ισχύος με κριτήριο την αναλογική δικαιοσύνη και αποδεικνύεται ότι η προτεινόμενη επέκταση του κατανεμημένου αλγορίθμου που συγκλίνει ασυμπτωτικά κατά Lyapunov. Τέλος παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου κατανεμημένου αλγορίθμου ADDM για την ελεγχόμενη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων με τρόπο που αιτιολογεί το γεγονός ότι η υλοποίηση οδηγεί στην προσέγγιση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος.

3.1 Μεθοδολογία ανάλυσης ευαισθησιών τάσης

Η ανάλυση ευαισθησίας τάσης αποσκοπεί στην εξεύρεση της σχέσης άεργου και ενεργού ισχύος με την τάση του συστήματος. Στην γενική της μορφή, βασίζεται στην ανάλυση των Ιακωβιανών πινάκων των εξισώσεων ροής φορτίου και αποκαλύπτει την σχέση μεταξύ του μέτρου $|\Delta V|$ και της φάσης της τάσης $|\Delta \varphi|$ των ζυγών του συστήματος με την εγχεόμενη ενεργό και άεργη ισχύ κάθε ζυγού του συστήματος $|P|$, $|Q|$ δηλαδή

$$\begin{bmatrix} [|\Delta V|] \\ [\Delta \varphi] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P / \partial V & \partial P / \partial \varphi \\ \partial Q / \partial V & \partial Q / \partial \varphi \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Η μέθοδος αυτή είναι υπολογιστικά περίπλοκη καθώς απαιτεί συνεχόμενη επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου για κάθε κατάσταση του συστήματος. Στο [51], αναλύεται μια υπολογιστικά πιο απλή μέθοδος, που μπορεί να εφαρμοστεί όταν το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί κοντά στην ονομαστική τάση λειτουργίας. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, Η πτώση τάσης μεταξύ των ζυγών του δικτύου του σχήματος 3.1 είναι

$$V_{0k} = E_0 - E_k \quad (3.2)$$

Η τάση V_{0k} μπορεί να υπολογιστεί από το άθροισμα της διαφοράς δυναμικού από τον ζυγό k μέχρι τον ζυγό σύνδεσης του δικτύου μέσης τάσης 0. Για παράδειγμα για $k = 3$ έχουμε

$$V_{03} = V_{01} + V_{12} + V_{23} \quad (3.3)$$

και γενικά έχουμε

$$V_{0k} = \sum_{hk \in PT_k} V_{hk} \quad (3.4)$$

Όπου PT_k το σύνολο των ζυγών hk που συνδέουν τον ζυγό k με τον ζυγό αναφοράς 0. Η τάση V_{hk} υπολογίζεται με βάση τις παραμέτρους του δικτύου και της ροής ισχύος ως εξής:

$$V_{hk} = E_h - E_k \quad (3.5)$$

$$V_{hk} = R_{hk} I_{Sk} \cos \varphi_{Sk} + X_{hk} I_{Sk} \sin \varphi_{Sk} \quad (3.6)$$

$$V_{hk} = \frac{R_{hk} E_k I_{Sk} \cos \varphi_{Sk} + X_{hk} E_k I_{Sk} \sin \varphi_{Sk}}{E_k} \quad (3.7)$$

$$V_{hk} = \frac{R_{hk} P_{Sk} + X_{hk} Q_{Sk}}{E_k} \quad (3.8)$$

Όπου I_{Sk} , R_{hk} και X_{hk} είναι το ρεύμα, η αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση του κλάδου hk . Επιπρόσθετα, $\cos \varphi_{Sk}$, P_{Sk} και Q_{Sk} είναι ο συντελεστής ισχύος, η ενεργός και άεργος ισχύς ανα φάση στο τμήμα Sk του κλάδου hk . (βλ 3.1)

Εάν οι τάσεις των ζυγών E_k είναι κοντά στην ονομαστική τάση E_n τότε μπορούμε να κάνουμε την παρακάτω προσέγγιση [51].

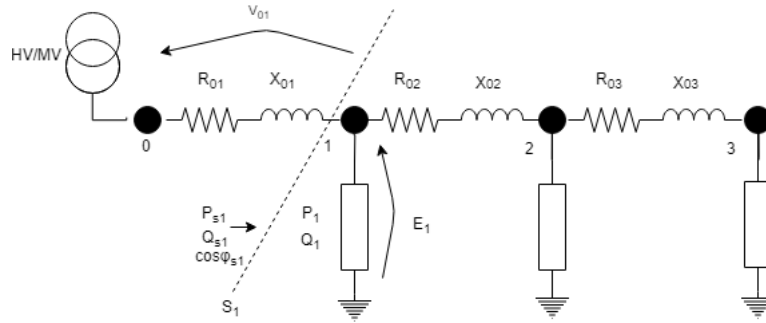
$$V_{hk} \cong \frac{R_{hk}P_{Sk} + X_{hk}Q_{Sk}}{E_n} \quad (3.9)$$

Η ενεργός και άεργος ισχύς P_{Sk} , Q_{Sk} μπορεί να υπολογιστεί ως εξής

$$P_{Sk} = \sum_{q \in DE_k} P_q + \sum_{rs \in DE_k} P_{Rrs} \quad (3.10)$$

$$Q_{Sk} = \sum_{q \in DE_k} Q_q + \sum_{rs \in DE_k} Q_{Xrs} \quad (3.11)$$

όπου P_q και Q_q είναι η ενεργός και άεργος ισχύς των φορτίων που συνδέονται κατάντη του ζυγού k , και P_{Rrs} και Q_{Xrs} είναι οι ενεργές και άεργες απώλειες των γραμμών κατάντη του ζυγού k . Όπου DE_k το σύνολο των γραμμών, ζυγών κατάντη του ζυγού k . Η υπόθεση αυτή ισχύει μόνο για ακτινικά δίκτυα διανομής.



Σχήμα 3.1 Ανα φάση ισοδύναμο κύκλωμα δικτύου διανομής

Οι απώλειες είναι αμελητέες σε σχέση με τα φορτία επομένως οι 3.10, 3.11 γίνονται

$$P_{Sk} \cong \sum_{q \in DE_k} P_q \quad (3.12)$$

$$Q_{Sk} \cong \sum_{q \in DE_k} Q_q \quad (3.13)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις φαίνεται ότι η διαφορά δυναμικού V_{0i} είναι συνάρτηση της συνολικής ενεργού και άεργου ισχύος του φορτίου $(P_1, P_2, \dots)$, $(Q_1, Q_2, \dots)$. η ίδια παρατήρηση ισχύει επομένως και για το επίπεδο της τάσης κάθε ζυγού του δικτύου:

$$E_k = E_0 - \sum_{hk \in PT_k} V_{hk} \quad (3.14)$$

$$E_k \cong E_0 - \sum_{hk \in PT} \frac{R_{hk} P_{Sk} + X_{hk} Q_{Sk}}{E_n} \quad (3.15)$$

απο τις σχέσεις 3.12, 3.13 έχουμε

$$E_k \cong E_0 - \sum_{hk \in PT} \frac{R_{hk}(\sum_{q \in DE_k} P_q) + X_{hk}(\sum_{q \in DE_k} Q_q)}{E_n} \quad (3.16)$$

Επομένως ισχύει ότι

$$E_k = f(P_1, P_2, \dots, Q_1, Q_2, \dots) \quad (3.17)$$

Απο την σχ 3.17 συμπεραίνουμε πως η μεταβολή της ενεργού-αέργου ισχύος σε μια ζυγό j του δικτύου $\Delta P_j = P_j^{max} - P_j^{initial}$, $\Delta Q_j = Q_j^{max} - Q_j^{initial}$ προκαλεί μεταβολή τάσης στον ζυγό k που ορίζεται ως εξής

$$\Delta E_k = E_k^{final} - E_k^{initial} \quad (3.18)$$

Γραμμικοποιώντας την 3.18 παίρνουμε

$$\Delta E_k = \sum_{j=1}^{N-1} \frac{\partial E_k}{\partial P_j} \Delta P_j + \sum_{j=1}^{N-1} \frac{\partial E_k}{\partial Q_j} \Delta Q_j \quad (3.19)$$

Επεκτείνοντας την 3.19 για όλους τους ζυγούς του συστήματος παίρνουμε

$$\begin{bmatrix} \Delta E_1 \\ \Delta E_2 \\ \dots \\ \Delta E_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial E_1 / \partial P_1 & \partial E_1 / \partial P_2 & \dots & \partial E_1 / \partial P_N \\ \partial E_2 / \partial P_1 & \partial E_2 / \partial P_2 & \dots & \partial E_2 / \partial P_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \partial E_N / \partial P_1 & \partial E_N / \partial P_2 & \dots & \partial E_N / \partial P_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \dots \\ \Delta P_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \partial E_1 / \partial Q_1 & \partial E_1 / \partial Q_2 & \dots & \partial E_1 / \partial Q_N \\ \partial E_2 / \partial Q_1 & \partial E_2 / \partial Q_2 & \dots & \partial E_2 / \partial Q_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \partial E_N / \partial Q_1 & \partial E_N / \partial Q_2 & \dots & \partial E_N / \partial Q_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \dots \\ \Delta Q_N \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Η αλλιώς σε πιο συμπυγμένη μορφή

$$[\Delta E] = [s_p][\Delta P] + [s_q][\Delta Q] \quad (3.21)$$

όπου $[s_p], [s_q]$ οι ευαισθησίες ενεργού και άεργου ισχύος, $[\Delta E]$ το διάνυσμα μεταβολής τάσης στους ζυγούς του δικτύου και $[\Delta P], [\Delta Q]$ τα διανύσματα μεταβολής ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα.

Παραγωγίζοντας την σχέση 3.16 ως προς P_j έχουμε

$$\frac{\partial E_k}{\partial P_j} \cong - \sum_{hk \in PT_k} \frac{R_{hk}(\sum_{q \in DE_k} \frac{\partial P_q}{\partial P_j}) + X_{hk}(\sum_{q \in DE_k} \frac{\partial Q_q}{\partial P_j})}{E_n} \quad (3.22)$$

όμως ο όρος $\frac{\partial Q_q}{\partial P_j}$ είναι μηδενικός ενώ :

$$\frac{\partial P_q}{\partial P_j} = \begin{cases} 0, q \neq j \\ 1, q = j \end{cases} \quad (3.23)$$

επομένως

$$\frac{\partial E_k}{\partial P_j} \cong - \sum_{hk \in PT_k \cap PT_j} \frac{R_{hk}}{E_n} \quad (3.24)$$

Ομοίως ισχύει

$$\frac{\partial E_i}{\partial Q_j} \cong - \sum_{hk \in PT_k \cap PT_j} \frac{X_{hk}}{E_n} \quad (3.25)$$

Επομένως το στοιχείο i, j του πίνακα ευαισθησίας $[s_p], [s_q]$ είναι ίσο με το άθροισμα των "κοινών" αντιστάσεων και επαγωγικών αντιδράσεων των ζυγών k, j . Για παράδειγμα απο το σχήμα 3.1 παίρνουμε

$$\frac{\partial E_3}{\partial P_2} \cong - \frac{R_{01} + R_{12}}{E_n} \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial E_3}{\partial Q_2} \cong - \frac{X_{01} + X_{12}}{E_n} \quad (3.27)$$

Το αρνητικό πρόσημο έχει ιδιαίτερη φυσική σημασία. Εάν για παράδειγμα σε κάποιο ζυγό j του δικτύου αποκοπεί πραγματική ισχύς, δηλαδή $\Delta P_j < 0$, τότε απο την 3.26 και την 3.20 προκύπτει αύξηση τάσης για οποιονδήποτε ζυγό k , $\Delta E_k > 0$. Αντίθετα η αύξηση του φορτίου P, Q σε οποιονδήποτε ζυγό του φορτίου μπορεί να προκαλέσει μείωση τάσης. Ανάλογα με το μέγεθος αυτής της αύξησης μπορεί να προκύψει μείωση τάσης σε βαθμό πέρα από το επιτρεπτό όριο. Επιπρόσθετα παρατηρούμε ότι για τον υπολογισμό των στοιχείων k, j του πίνακα s_p, s_q αρκεί ο υπολογισμός των στοιχείων της διαγωνίου του πίνακα s_p, s_q $k = j$ αφού ισχύει:

$$\frac{\partial E_k}{\partial P_j} = \begin{cases} \frac{\partial E_j}{\partial P_j}, k \geq j \\ \frac{\partial E_j}{\partial P_j}, k \leq j \end{cases} \quad (3.28)$$

Στα πλαίσια της διατριβής θεωρούμε πως η πτώση τάσης που επιτρέπεται για την γραμμή του δίκτυο διανομής υπό εξέταση είναι ίση με -3%p.u. της ονομαστικής τιμής E_n δηλαδή

$$[\Delta E] \geq -[0.03 E_n] \quad (3.29)$$

Το ελάχιστο επίπεδο τάσης είναι αντίστοιχα

$$E_k^{final} \geq E_k^{initial} - 0.03 E_n \quad (3.30)$$

Ο περιορισμός αυτός αποτελεί σχεδιαστική παράμετρο του υποσυστήματος εκτίμησης ορίου φορτίου, που περιορίζει το μέγιστο φορτίο του δικτύου διανομής. Αντικαθιστώντας την 3.29 στην 3.21 παίρνουμε

$$[s_p][\Delta P] + [s_q][\Delta Q] \geq -0.03 E_n \quad (3.31)$$

θέτοντας $\Delta P = P^{max} - P^{initial}$, $\Delta Q = Q^{max} - Q^{initial}$, $P^{initial} = 0, Q^{initial} = 0$ παίρνουμε

$$[s_p][P^{max}] + [s_q][Q^{max}] \leq [0.03 E_n] \quad (3.32)$$

Η ανίσωση 3.32 καθορίζει το σύνολο

$$\{P^{max}, Q^{max} \in R^N \mid [s_p][P^{max}] + [s_q][Q^{max}] \leq [0.03 E_n]\} \quad (3.33)$$

που είναι κυρτό, καθώς αποτελεί την τομή κυρτών ημιεπιπέδων [65]. Το κυρτό πολύτοπο της σχ 3.33 αποτελεί το σύνολο της αποδεκτής ενεργού και άεργου ισχύος του συστήματος εκτίμησης ορίων φόρτισης που θα αναλυθεί στην επόμενη παράγραφο.

3.2 Αλγόριθμοι υποσυστήματος εκτίμησης ορίων φορτίου

Η εξυπηρέτηση του ολοένα αυξανόμενου στόλου ηλεκτρικών οχημάτων απαιτεί την διαχείριση των ορίων φόρτισης των ζυγών του συστήματος διανομής ενέργειας. Στην

προηγούμενη παράγραφο φάνηκε η σχέση μεταξύ φορτίου και τάσης δικτύου για ακτινικά δίκτυα διανομής σε περιοχές λειτουργίας τάσης κοντά στην ονομαστική E_n . Επιπρόσθετα φάνηκε πως ο περιορισμός στην διακύμανση της τάσης καθορίζει ένα κυρτό πολύτοπο αποδεκτών επιπέδων ενεργού και άεργου ισχύος. Ο προσδιορισμός των διανυσμάτων ορίων φόρτισης $[P^{max}]$, $[Q^{max}]$ εξαρτάται από τα κριτήρια της ανάθεσης; ένα πιθανό κριτήριο είναι η μεγιστοποίηση της συνολικά αποδιδόμενης ισχύος στο δίκτυο διανομής ή η εξασφάλιση ενός ελαχίστου επιπέδου ισχύος $[P^{max}]$, $[Q^{max}]$ για όλους τους ζυγούς του συστήματος. Στην συνέχεια παραθέτουμε μερικά ενδεικτικά παραδείγματα που θα μας οδηγήσουν στην εύρεση ενός κατάλληλου κριτηρίου.

3.2.1 Βελτιστοποίηση του διαμοιρασμού ισχύος με κριτήριο την αναλογική δικαιοσύνη

Για την μεγιστοποίηση της συνολικής ισχύος έχουμε

$$\begin{aligned} \max_{P^{max}, Q^{max}} \quad & \sum_{i=0}^{N-1} P_i^{max} + \sum_{i=0}^{i=N-1} Q_i^{max} \\ \text{s.t.} \quad & (3.33) \\ & [P^{max}] \leq P_{max} \\ & [Q^{max}] \leq Q_{max} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Στήν 3.34 φαίνονται οι περιορισμοί τάσης ενώ επιπρόσθετα, κάθε ζυγός μπορεί να έχει τοπικούς περιορισμούς P_{maxi} , Q_{maxi} που μπορεί να σχετίζονται με παραμέτρους όπως, τα θερμικά όρια μετασχηματιστή Μ.Τ/Χ.Τ κλπ.

Η σχ 3.34 χωρίς τοπικούς περιορισμούς στους ζυγούς του συστήματος, για την περίπτωση του δικτύου του σχ 3.1 με μήκος κλάδου ίσο με 20kM, και χαρακτηριστικά αντίστασης και επαγωγικής αντίδρασης $R_{hk} = 0.253\Omega/kM$, $X_{hk} = 0.126\Omega/kM$ κατά τα χαρακτηριστικά του καλωδίου μέσης τάσης NA2XS2Y [66] για ονομαστική τάση $E_n = 20kV$ και για σταθερό συντελεστή ισχύος $\cos\varphi = 0.9$, $\tan\varphi = 0.48$ επαγωγικό λόγω της σχέσης 3.24, 3.25 γίνεται

$$\begin{aligned} \max_{P^{max}} \quad & \sum_{i=0}^{N-1} P_i^{max} + 0.48 \sum_{i=0}^{i=N-1} P_i^{max} \\ \text{s.t.} \quad & (3.33) \\ & [P^{max}] \geq 0 \\ & [Q^{max}] \geq 0 \end{aligned} \quad (3.35)$$

όπου

$$[s_p] = \begin{bmatrix} 2.53e-4 & 2.53e-4 & 2.53e-4 \\ 2.53e-4 & 5.06e-4 & 5.06e-4 \\ 2.53e-4 & 5.06e-4 & 7.59e-4 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

και

$$[s_q] = \begin{bmatrix} 1.26e-4 & 1.26e-4 & 1.26e-4 \\ 1.26e-4 & 2.52e-4 & 2.52e-4 \\ 1.26e-4 & 2.52e-4 & 3.78e-4 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Η λύση της παραπάνω μας δίνει

$$[P^{max}] = \begin{bmatrix} 1.91 MW \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Επομένως το κριτήριο μεγιστοποίησης της συνολικής ισχύος οδηγεί στην ανάθεση της ισχύος στον ηλεκτρικά εγγύτερο ζυγό στο σημείο διασύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο χωρίς να αναθέτει ισχύ στους υπόλοιπους ζυγούς. Ένα εναλλακτικό κριτήριο μεγιστοποίησης της συνολικής ισχύος είναι η ανάθεση ενός στόχου μεγάλης ισχύος P^{target} για όλους τους κόμβους του δικτύου. Το παραπάνω πρόβλημα μοντελοποιείται με την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος τετραγώνων ως εξής

$$\begin{aligned} \min_{P^{max}} \quad & \sum_{i=0}^{N-1} (P_i^{max} - P_0)^2 + \sum_{i=0}^{i=N-1} (0.48 P_i^{max} - P_0)^2 \\ \text{s.t.} \quad & (3.33) \\ & [P^{max}] \geq 0 \\ & [Q^{max}] \geq 0 \end{aligned} \quad (3.39)$$

Για $P_0 = 10^7$ προκύπτει η παρακάτω λύση

$$[P^{final}] = \begin{bmatrix} 1.91 MW \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Επομένως παρατηρούμε ότι σε συνθήκες όπου κάθε ζυγός απαιτεί έναν μεγάλο στόχο ισχύος P_0 η ανάθεση που προκύπτει από την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων ωφελεί

περισσότερο τον κόμβο που βρίσκεται ηλεκτρικά εγγύτερα στο σημείο σύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο.

Καθώς η ανάθεση φορτίου σε όλους τους ζυγούς του συστήματος είναι επιθυμητή απαιτείται η εύρεση αντικειμενικής συνάρτησης με αυτό το χαρακτηριστικό. Όπως θα φανεί από το παρακάτω παράδειγμα το άθροισμα λογαριθμικών συναρτήσεων έχει αυτή την ιδιότητα, που προκύπτει από την μορφή των λογαριθμικών συναρτήσεων· για αύξηση της ανεξάρτητης μεταβλητής σε περιοχή που έχει μικρή σχετικά τιμή επιτυγχάνεται μεγάλη αύξηση της τιμής της μιας λογαριθμικής συνάρτησης του αθροίσματος, ωστόσο ο ρυθμός μεταβολής της αύξησης αυτής μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της ανεξάρτητης μεταβλητής. Από ένα σημείο και πέρα είναι προτιμότερη η αύξηση της ανεξάρτητης μεταβλητής άλλης λογαριθμικής συνάρτησης καθώς συμβάλλει περισσότερο στην αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Έστω το πρόβλημα:

$$\begin{aligned} \max_{P^{max}} \quad & \sum_{i=0}^{N-1} \log(P_i^{max}) + \sum_{i=N-1} \log(0.48P_i^{max}) \\ \text{s.t.} \quad & (3.33) \end{aligned} \tag{3.41}$$

$$\begin{aligned} [P^{max}] &\geq 0 \\ [Q^{max}] &\geq 0 \end{aligned}$$

Η λύση που προκύπτει για αυτή την περίπτωση είναι

$$[P^{final}] = \begin{bmatrix} 553kW \\ 318kW \\ 212kW \end{bmatrix} \tag{3.42}$$

Παρατηρούμε ότι η ελαχιστοποίηση της λογαριθμικής συνάρτησης, οδηγεί στον διαμοιρασμό της ισχύος σε όλους τους κόμβους του δικτύου με τρόπο που αφενός καταλογίζει περισσότερη ισχύ στους ζυγούς που βρίσκονται εγγύτερα ηλεκτρικά στο σημείο διασύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο, αφετέρου εξασφαλίζει ένα ποσό ισχύος για του ζυγούς που βρίσκονται ηλεκτρικά μακρύτερα από το σημείο σύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο. Η παραπάνω ιδιότητα περιγράφεται στην διεθνή βιβλιογραφία ως αναλογική δικαιοσύνη "proportional fairness" [67] και για ένα διάνυσμα $\Pi_i, i \in N$ ορίζεται ως εξής

$$\sum_{i \in N} \frac{P_i^* - P_i}{P_i} \leq 0 \tag{3.43}$$

Όπου P_i^* αποτελεί κάποιο τυχόν διάνυσμα που ικανοποιεί του περιορισμούς του προβλήματος. 3.41 Αν και η παραπάνω ιδιότητα τείνει να διαμοιράσει την διαθέσιμη ισχύ ακόμα και στους ηλεκτρικά μακρύτερους ζυγούς, δεν έχει τον διαμοιρασμό ως απόλυτο σκοπό όπως για παράδειγμα η στρατηγική max-min fairness [67], [68] που τείνει να διαμοιράσει τους διαθέσιμους πόρους εις βάρος της συνολικής απόδοσης ισχύος.

Βασιζόμενοι στα παραπάνω, θα μελετήσουμε την λογαριθμική συνάρτηση για τον διαμοιρασμό ισχύος φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, στους ζυγούς του συστήματος διανομής με βάση τα παρακάτω

$$\begin{aligned} \max_{P^{max}} \quad & \sum_{i=0}^{N-1} w_i \log(P_i^{max}) \\ \text{s.t.} \quad & (3.33) \end{aligned} \tag{3.44}$$

$$\begin{aligned} [P^{max}] &\geq 0 \\ [Q^{max}] &\geq 0 \\ [Q^{max}] &= P^{max} \tan \varphi \end{aligned}$$

Μια βασική ιδιότητα της παραπάνω αντικειμενικής συνάρτησης είναι ότι η ποσότητα $\frac{P_i^{max}}{w_i}$ ικανοποιεί το κριτήριο της αναλογικής δικαιοσύνης με βάρη "weighted proportional fairness" [69], δηλαδή

$$\sum_{i \in N} w_i \frac{P_i^* - P_i}{P_i} \leq 0 \tag{3.45}$$

Όπου P_i^* αποτελεί κάποιο τυχόν διάνυσμα που ικανοποιεί του περιορισμούς του προβλήματος 3.44. Κατά την διαδικασία καθορισμού των ορίων φόρτισης που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2, βλ σχήμα 2.7 κάθε ζυγός προσαρμόζει την παράμετρο της ζήτησης w_i ανάλογα με την εκτίμηση για την ζήτηση του ελαστικού φορτίου, έτσι ώστε να διεκδικήσει ισχύ P_i που προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος 3.44. Στην επόμενη παράγραφο, θα παρουσιαστεί μια στρατηγική καθορισμού του συντελεστή ζήτησης w_i .

3.2.2 Κεντρική επίλυση καθορισμού ορίων φορτίου

Το πρόβλημα 3.44, μπορεί να λυθεί από μεθόδους κυρτής βελτιστοποίησης, καθώς η αντικειμενική συνάρτηση και το σύνολο επιτρεπτών λύσεων είναι κυρτά [70] και στην γενική του μορφή γράφεται ως εξής

$$\begin{aligned}
& \max \sum_{i \in R} w_i \log(x_i) \\
& Ax \leq C \\
& x \geq 0
\end{aligned} \tag{3.46}$$

όπου $i \in N$ το σύνολο των ζυγών του συστήματος διανομής, $x_i = P_i$ τα όρια ισχύος φόρτισης HO του συστήματος, w_i ο συντελεστής ζήτησης κάθε ζυγού. ο πίνακας ευαισθησιών $A, N \times N$ με στοιχεία

$$a_{ij} = s_{ij}p + \tan \phi s_{ij}q \quad i \in N, \quad j \in N \tag{3.47}$$

C το διάνυσμα της μέγιστης επιτρεπτής πτώσης τάσης με στοιχεία c

$$c_i = 0.03E_n - \sum_{j \in N} (a_{ji} \hat{P}_j^{inelastic}) \quad i \in N \tag{3.48}$$

όπου, $\hat{P}_j^{inelastic}$ το εκτιμώμενο ανελαστικό φορτίο. Η συνάρτηση Lagrange του παρακάτω προβλήματος είναι [71]

$$L(x, z; \mu) = \sum_{i \in N} w_i \log x_i + \mu^T (C - Ax - z) \tag{3.49}$$

όπου z το διάνυσμα των μεταβλητών slack και μ το διάνυσμα των πολλαπλασιαστών lagrange [70]. Τα χαρακτηριστικά της λύσης αναδεικνύονται από τις ικανές και αναγκαίες συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker [70] που διαμορφώνονται ως εξής

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{w_i}{x_i} - \sum_{j \in N} \mu_j a_{ji} = 0 \tag{3.50}$$

$$x_i = \frac{w_i}{\sum_{j \in N} \mu_j a_{ji}} \tag{3.51}$$

$$\mu \geq 0, \quad Ax \leq C, \quad \mu^T (C - Ax) = 0$$

Εάν υποθέσουμε ότι το όριο φόρτισης για έναν ζυγό i της γραμμής διανομής επηρεάζει λίγο τον παρονομαστή της σχ 3.51 και ότι οι υπόλοιποι ζυγοί του συστήματος δεν μεταβάλλουν το φορτίο από την χρονική στιγμή $n - 1$ στην χρονική στιγμή n , τότε μπορούμε να προσεγγίσουμε και τον συντελεστή ζήτησης $w_i(n)$ βασιζόμενοι σε προηγούμενα ζεύγη ζήτησης-ορίου φόρτισης $w_i(n-1)$, $P_i^{max}(n-1)$. Επομένως η στρατηγική ανανέωσης του συντελεστή ζήτησης της σχ 2.3 γίνεται

$$\begin{aligned}
\sum_{j \in N} \mu_j(n-1)a_{ji} &\approx \sum_{j \in N} \mu_j(n)a_{ji} \Leftrightarrow \\
\frac{w_i(n-1)}{P_i^{max}(n-1)} &\approx \frac{w_i(n)}{\hat{P}_i^{max}(n)} \Leftrightarrow \\
w_i(n) &\approx \frac{w_i(n-1)}{P_i^{max}(n-1)}(\hat{P}_i^{max}(n)) \Leftrightarrow \quad (3.52) \\
w_i(n) &\approx \frac{w_i(n-1)}{P_i^{max}(n-1)}(\hat{P}_i^{max}(n) + P_i^{max}(n-1) - P_i^{max}(n-1)) \Leftrightarrow \\
w_i(n) &\approx w_i(n-1) + \frac{w_i(n-1)}{P_i^{max}(n-1)}(\hat{P}_i^{elastic}(n) - P_i^{max}(n-1))
\end{aligned}$$

αφού

$$\hat{P}_i^{max}(n) = \hat{P}_i^{elastic}(n) \quad (3.53)$$

δηλαδή το επιθυμητό όριο φόρτισης για την χρονική στιγμή n είναι ίσο με την προβλεπόμενη ελαστική ζήτηση λόγω φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στον ζυγό i του συστήματος. Η ελαστική ζήτηση για την χρονική στιγμή n είναι ίση με τον άθροισμα του μέσου ρυθμού φόρτισης που απαιτείται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών E_k^{charge} των οχημάτων που φορτίζουν στον ζυγό i δηλαδή, $k \in N_i^{evs}$ και ορίζεται στην συνέχεια βλ (3.72)

$$\hat{P}_i^{elastic}(n) = \sum_{k \in N_i^{evs}} P_k^{avg} \quad (3.54)$$

Επιπρόσθετα θεωρούμε πως όλοι οι κόμβοι μπορούν να μεταβάλλουν την ζήτησή τους w_i εντός ενός διαστήματος επιτρεπτών τιμών $[\alpha, \beta]$. Επομένως σε συνθήκες χαμηλής ζήτησης, όλοι οι κόμβοι έχουν $w_i = \alpha$ και σε συνθήκες υψηλής ζήτησης έχουν $w_i = \beta$.

3.2.3 Κατανεμημένη προσεγγιστική επίλυση καθορισμού ορίων φορτίου

Η λύση του προβλήματος "με κατανεμημένο τρόπο με συντονιστή" του σχήματος 1.2, παρουσιάζει ενδιαφέρον επειδή επιτρέπει την επίλυση μικρότερων από απόψεως υπολογιστικής πολυπλοκότητας ανά επανάληψη προβλημάτων. Στην διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζεται η κατανεμημένη επίλυση του παραπάνω προβλήματος [61], όπου Α πίνακας με στοιχεία $a_{ij} = 0, a_{ij} = 1$.

Θα δείξουμε ότι η κατανεμημένη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος 3.46 μπορεί να επεκταθεί και για την περίπτωση που τα στοιχεία του πίνακα δεν λαμβάνουν μόνο μηδενικούς ή μοναδιαίους συντελεστές, δηλαδή $a_{ij} \in R^+$ γεγονός που επιτρέπει την κατανεμημένη προσεγγιστική επίλυση του προβλήματος 3.44.

Κατά το [61], η κατανεμημένη επίλυση του 3.46, για συντελεστές $a_{ij} = 0, 1$ προκύπτει από την διαδοχική επίλυση του παρακάτω συστήματος διαφορικών εξισώσεων

$$\begin{aligned} \frac{dx_i(t)}{dt} &= \kappa(w_i - x_i(t) \sum_{j \in I} \mu_j(t)) \\ \mu_j(t) &= p_j(\sum_{i: j \in I} x_i(t)) \\ p_j(y) &\geq 0, \quad y \geq 0 \end{aligned} \quad (3.55)$$

όπου η $p_j(y)$ είναι συνεχής και γνησίως αύξουσα συνάρτηση και $j \in I$ εάν $a_{ij} = 1$

Όπως αναλύεται στο [61] ισοδύναμη είναι η εκτέλεση των παρακάτω βημάτων διακριτού χρόνου από τον κατανεμημένο πράκτορα και τον συντονιστή του συστήματος αντίστοιχα

$$\begin{aligned} x_i[t+1] &= x_i[t] + \kappa(w_i - x_i[t] \sum_{j \in I} \mu_j[t]) \\ \mu_j[t] &= p_j(\sum_{i: j \in I} x_i[t]) \\ p_j(y) &\geq 0, \quad y \geq 0 \end{aligned} \quad (3.56)$$

Θα δείξουμε ότι με την κατάλληλη προσαρμογή των παραπάνω εξισώσεων μπορούμε να προσεγγίσουμε την επίλυση του προβλήματος για $a_{ij} \in R^+$. Έστω το σύστημα διαφορικών εξισώσεων 3.57

$$\begin{aligned} \frac{dx_i(t)}{dt} &= \kappa(w_i - x_i(t) \sum_{j \in I} \mu_j(t) a_{ji}) \\ \mu_j(t) &= p_j(\sum_{i \in I} x_i(t) a_{ji}) \\ p_j(y) &\geq 0 \\ y &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.57)$$

όπου η $p_j(y)$ είναι συνεχής και γνησίως αύξουσα συνάρτηση. Το σημείο $x(t) = x^*$ για το οποίο ισχύει $\frac{dx_i(t)}{dt} = 0$, ορίζεται ως το σημείο ισορροπίας της 3.57. Θα δείξουμε ότι το σημείο αυτό είναι ολικά ασυμπτωτικά ευσταθές δηλαδή ότι ισχύει [72]

$$\begin{aligned}
& \forall \varepsilon > 0, \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 \\
& \|x(0) - x^*\| < \delta \rightarrow \|x(t) - x^*\| < \varepsilon \quad \forall t \geq 0 \\
& \forall x(0) \in R^n, \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x^*
\end{aligned} \tag{3.58}$$

Επομένως η ολική ασυμπτωτική ευστάθεια εγγυάται την σύγκλιση στον σημείο ισορροπίας ανεξάρτητα από την αρχική κατάσταση του συστήματος $x(0)$. Η ασυμπτωτική ευστάθεια ενός δυναμικού συστήματος μπορεί να αποδειχθεί χρησιμοποιώντας την δεύτερη μέθοδο του Lyapunov [72], η οποία διατυπώνεται ως εξής.

Υποθέτουμε ότι το σημείο $x = 0$ είναι το μοναδικό σημείο ισορροπίας ενός δυναμικού συστήματος. Εάν υπάρχει μια συνεχής και παραγωγίσιμη συνάρτηση $U : R^n \rightarrow R$ τέτοια ώστε

$$\begin{aligned}
& U(0) = 0 \\
& U(x) > 0 \quad \forall x \neq 0 \\
& x \rightarrow \infty \rightarrow U(x) \rightarrow \infty \\
& \frac{\delta U(x)}{\delta t} < 0 \quad \forall x \neq 0
\end{aligned} \tag{3.59}$$

Ο παραπάνω ορισμός υιοθετεί το σημείο $x = 0$ σαν σημείο ισορροπίας. Οποιοδήποτε άλλο σημείο μπορεί να θεωρηθεί με απλή μετατόπιση του συστήματος συντεταγμένων [72].

Στην διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζεται η συνάρτηση Lyapunov της σχ 3.55 [61] ως εξής

$$U(x) = \sum_{i \in I} w_i \log x_i - \sum_{j \in I} \int_0^{\sum_{i \in I} x_i(t)} \mu_j(y) dy \tag{3.60}$$

Η συνάρτηση αυτή αποτελείται από την διαφορά της αντικειμενικής συνάρτησης από το συνολικό κόστος του συστήματος και εκφράζει το συνολικό όφελος από την χρήση του. Το όφελος αυτό μεγιστοποιείται από την τροχιά της διαφορικής εξίσωσης [61]. Στην συνέχεια θεωρούμε την τροποποιημένη εξ 3.60, ως εξής

$$U(x) = \sum_{i \in I} w_i \log x_i - \sum_{j \in I} \int_0^{\sum_{i \in I} x_i(t) a_{ji}} \mu_j(y) dy \tag{3.61}$$

Θα δείξουμε ότι η συνάρτηση 3.61 είναι συνάρτηση Lyapunov του συστήματος 3.57. Αρχικά έχουμε ότι η U είναι γνησίως μονότονη

$$\begin{aligned} \frac{dU(x(t))}{dt} &= \sum_{i \in I} \frac{\partial U}{\partial x_i} \frac{dx_i(t)}{dt} \\ &= \sum_{i \in I} \left(\frac{w_i}{x_i(t)} - \left(\sum_{j \in I} \int_0^{x_i(t) a_{ji}} \mu_j(y) dy \right)' \right) \kappa(w_i - x_i(t) \sum_{j \in I} \mu_j(t) a_{ji}) \end{aligned} \quad (3.62)$$

όμως λόγω της ιδιότητας

$$\left(\int_0^{g(x)} f(y) dy \right)' = f(g(x)) g'(x) \quad (3.63)$$

παίρνουμε

$$\begin{aligned} \frac{dU(x(t))}{dt} &= \sum_{i \in I} \left(\frac{w_i}{x_i(t)} - \sum_{j \in I} \mu_j \left(\sum_{i \in I} x_i(t) a_{ji} \right) \left(\sum_{i \in I} x_i(t) a_{ji} \right)' \right) \kappa(w_i - x_i(t) \sum_{j \in I} \mu_j(t) a_{ji}) \\ &= \sum_{i \in I} \left(\frac{w_i}{x_i(t)} - \frac{x_i(t)}{x_i(t)} \sum_{j \in I} \mu_j(t) a_{ji} \right) \kappa(w_i - x_i(t) \sum_{j \in I} \mu_j(t) a_{ji}) \\ &= \kappa \sum_{i \in I} \frac{1}{x_i(t)} (w_i - x_i(t) \sum_{j \in I} \mu_j(t) a_{ji})^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (3.64)$$

Επομένως η συνάρτηση $U(x(t))$ αυξάνεται συνεχώς, εκτός και αν $x(t) = x$, όπου x το μοναδικό σημείο που μεγιστοποιεί την $U(x)$ που μπορεί να βρεθεί θέτοντας τις σχετικές παραγώγους ίσες με το μηδέν δηλαδή

$$\frac{\partial U(x)}{\partial x_i} = \frac{w_i}{x_i} - \sum_{j \in I} \mu_j(t) a_{ji} = 0 \quad (3.65)$$

$$x_i = \frac{w_i}{\sum_{j \in I} \mu_j(t) a_{ji}} \quad (3.66)$$

Το x_i , είναι το ολικά ασυμπτωτικά ευσταθές σημείο x_i^* και η συνάρτηση U είναι συνάρτηση Lyapunov, αφού εάν θεωρήσουμε συνάρτηση $U' = -U$ και μετατόπιση των αξόνων $x_i^* - > 0, U'(x_i^*) - > 0$ ικανοποιούνται οι συνθήκες της σχ 3.59. Οι συναρτήσεις $\mu_j(y)$, μπορούν να επιλεγούν έτσι ώστε η μεγιστοποίηση της συνάρτησης U , να προσεγγίσει την μεγιστοποίηση της συνάρτησης 3.46 δεδομένων των περιορισμών. Αυτό μπορεί να συμβεί εάν το συνολικό κόστος της U προσεγγίζει το μηδέν, αφενός έτσι ώστε το όφελος να προσεγγίσει την απολαβή δηλαδή

$$\begin{aligned}
\max U(x) &= \max \left(\sum_{i \in I} w_i \log x_i - \sum_{j \in I} \int_0^{\sum_{i \in I} x_i(t) a_{ji}} \mu_j(y) dy \right) \\
\sum_{j \in I} \int_0^{\sum_{i \in I} x_i(t) a_{ji}} \mu_j(y) dy &\approx 0 \rightarrow \\
\max U(x) &\approx \max \sum_{i \in I} w_i \log x_i
\end{aligned} \tag{3.67}$$

Αφετέρου εάν η επιλογή της συνάρτησης κόστους p είναι τέτοια που να οδηγεί την ικανοποίηση των περιορισμών της (3.46). Τα χαρακτηριστικά της λύσης 3.51 μας οδηγούν στον καθορισμό της συνάρτησης p_j ως εξής.

$$\begin{aligned}
p_j &= 0 \quad \forall \quad j : \sum_{i \in I} x_i a_{ji} << C_j \\
p_j &> 0 \quad \forall \quad j : \sum_{i \in I} x_i a_{ji} - > C
\end{aligned} \tag{3.68}$$

Στο επόμενο κεφάλαιο θα αξιολογηθεί συνάρτηση κόστους που πληροί τις παραπάνω συνθήκες.

3.3 Αλγόριθμοι ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Η ελεγχόμενη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, γίνεται με δεδομένο τον περιορισμό μέγιστης ισχύος που θέτει το υποσύστημα εκτίμησης ορίων φορτίου, όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Στην περίπτωση αυτή, το άθροισμα της συνολικής ισχύος δεν πρέπει να υπερβαίνει το άνω όριο έτσι ώστε, σε συνεργασία με το υποσύστημα καθορισμού ορίων ισχύος, η συνολική ισχύς φόρτισης των οχημάτων να μην προκαλεί πτώση τάσης μεγαλύτερη από την επιτρεπτή.

Ταυτόχρονα, είναι επιθυμητή η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των οχημάτων κατά την στάθμευση τους στην υποδομή φόρτισης. Υποθέτουμε ότι οι ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων γνωστοποιούν τις ενεργειακές τους ανάγκες E_k^{charge} και τον συνολικό χρόνο στάθμευσης t_k στον διαχειριστή υποδομής φόρτισης ή στον τοπικό οικιακό ελεγκτή φόρτισης. Θεωρούμε ότι ο έλεγχος φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων N_k^{evs} , για κάθε ζυγό του δικτύου διανομής $i \in I$ πραγματοποιείται από την επίλυση του παρακάτω προβλήματος

$$\begin{aligned}
\min \|P^{EV} - P^{avg}\|^2 \\
\sum_{k \in N_i^{evs}} P_k^{EV} \leq P_i^{max} \\
P_k^{avg} \geq 0
\end{aligned} \tag{3.69}$$

όπου $\|\cdot\|$ η ευκλείδεια απόσταση

$$\begin{aligned}
x &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \\
\|x\| &= \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} |x_k|}
\end{aligned} \tag{3.70}$$

και όπου $P^{avg} \in \mathbb{R}^n$ ο μέσος ρυθμός φόρτισης κάθε οχήματος k που ορίζεται

$$P^{avg} = \begin{bmatrix} P_0^{avg} \\ P_1^{avg} \\ \dots \\ P_{N-1}^{avg} \end{bmatrix} \tag{3.71}$$

όπου για κάθε στοιχείο του διανύσματος ισχύει

$$P_k^{avg} = \min\left(\frac{E_k^{charge}}{t_k}, P_k^{maxEVInf}\right), \forall k \in N_{evs} \quad 0 \geq t < t_k \tag{3.72}$$

$E_k^{charge} \in \mathbb{R}$, η ζητούμενη ενέργεια φόρτισης του ηλεκτρικού οχήματος, $t_k \in \mathbb{R}$ ο συνολικός αριθμός χρονικών στιγμών για τις οποίες κάθε όχημα παραμένει συνδεδεμένο στην υποδομή φόρτισης και $P_i^{max} \in \mathbb{R}^1$, $i \in I$ ο περιορισμός ισχύος για κάθε ζυγό i που καθορίζονται συνολικά από την σχέση 3.46. Όπου $P_k^{maxEVInf} \in \mathbb{R}^n$ το μέγιστο όριο φόρτισης, που καθορίζεται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του σημείου διασύνδεσης του ηλεκτρικού οχήματος με την υποδομή και την μέγιστη ισχύ φόρτισης που υποστηρίζει ο κατασκευαστής του ηλεκτρικού οχήματος.

$$P_k^{maxEVInf} = \min(P_k^{maxEV}, P_k^{maxInfrastructure}) \tag{3.73}$$

Η λύση του 3.69, ελαχιστοποιεί την διαφορά ισχύος φόρτισης P_k^{EV} ενός οχήματος k από έναν μέσο ρυθμό φόρτισης P_k^{avg} , ικανοποιώντας έτσι τις ενεργειακές του ανάγκες

E_k^{charge} , χωρίς η συνολική ισχύς να υπερβαίνει τα όρια που καθορίζονται από την σχ 3.46 και τους τοπικούς περιορισμούς που προκύπτουν από τον εξοπλισμό φόρτισης του ηλεκτρικού οχήματος. Ο καθορισμός ενός μέσου ρυθμού φόρτισης, οδηγεί στην φόρτιση με έναν σχετικά μικρό ρυθμό φόρτισης για την περίπτωση ηλεκτρικών οχημάτων που παραμένουν σταθμευμένα για μεγάλο χρονικό διάστημα, δίνοντας έτσι περιθώριο φόρτισης στα υπόλοιπα οχήματα της υποδομής φόρτισης, ενώ αντίθετα στην περίπτωση που ο χρόνος διαμονής είναι μικρός οδηγεί σε υψηλούς ρυθμούς φόρτισης έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι ενεργειακές ανάγκες του ηλεκτρικού οχήματος.

3.3.1 Κεντρική επίλυση προβλήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος 3.69 είναι κυρτή και το σύνολο των εφικτών λύσεων είναι και αυτό κυρτό επομένως το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί κεντρικά [70] με μέθοδο κυρτής βελτιστοποίησης. Για την αντικειμενική συνάρτηση της σχέσης 3.69 έχουμε

$$\begin{aligned} \min_{P^{EV}} P^{EVT} P^{EV} - 2P^{EVT} P^{avg} \\ s.t \ G P^{EV} \leq h \end{aligned} \quad (3.74)$$

με διάνυσμα P^{EV} ,

$$P = \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \dots \\ P_{N-1} \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

και διάνυσμα P^{avg} ,

$$P^{avg} = \begin{bmatrix} P_0^{avg} \\ P_1^{avg} \\ \dots \\ P_{N-1}^{avg} \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

όπου οι πίνακες G , h συνοψίζουν τους περιορισμούς μέγιστης και ελάχιστης ισχύος κατά τα ακόλουθα

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

και ο πίνακας h είναι

$$h = \begin{bmatrix} P_i^{max} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

3.3.2 Κατανεμημένη επίλυση προβλήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Η λύση του προβλήματος με κατανεμημένο τρόπο ακολουθεί, παρομοίως με την προηγούμενη ενότητα, την αρχιτεκτονική του σχήματος 1.2β. Μια δημοφιλής μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί στην διεθνή βιβλιογραφία για την κατανεμημένη λύση προβλημάτων κυρτού προγραμματισμού είναι η μέθοδος ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) [63]. Στην γενική του μορφή, ο αλγόριθμος λύνει προβλήματα της μορφής

$$\begin{aligned} \min & f(x) + g(z) \\ \text{s.t.} & Ax + Bz = c \end{aligned} \quad (3.79)$$

όπου $x \in \mathbb{R}^n$, $z \in \mathbb{R}^m$, $A \in \mathbb{R}^{p \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{p \times m}$ και $c \in \mathbb{R}^p$ και f, g κυρτές συναρτήσεις. Έστω η επαυξημένη Lagrangian συνάρτηση [73]

$$L_\rho(x, z, y) = f(x) + g(z) + y^T (Ax + Bz - c) + \frac{\rho}{2} \|Ax + Bz - c\|^2 \quad (3.80)$$

Η μεθοδολογία ADMM συνίσταται στις παρακάτω επαναλήψεις

$$x^{n+1} = \operatorname{argmin}_x L_\rho(x, z^n, y^n) \quad (3.81)$$

$$z^{n+1} = \operatorname{argmin}_z L_\rho(x^{n+1}, z, y^n) \quad (3.82)$$

$$y^{n+1} = y^n + \rho(Ax^{n+1} + Bz^{n+1} - c) \quad (3.83)$$

όπου $\rho > 0$. Τα βήματα 3.81 και 3.82 βρίσκουν τις τιμές x, z που ελαχιστοποιούν τις lagrangian συναρτήσεις και έπειτα κατά το βήμα 3.83 πραγματοποιείται μια ανανέωση της μεταβλητής y της δυικής συνάρτησης κατα την μέθοδο gradient ascent

$$g(y) = \inf_{x,z} L_{\rho}(x, z, y) \quad (3.84)$$

$$y^{n+1} = y^n + \rho \nabla g(y) \quad (3.85)$$

Η παραπάνω διαδικασία 3.84,3.85 οδηγεί στην εύρεση του διανύσματος y που μεγιστοποιεί την δυική συνάρτηση και επομένως βρίσκει το καλύτερο δυνατό κάτω φράγμα της συνάρτησης f . Μετέπειτα ανάκτώνται τα βέλτιστα x, z από το σημείο αυτό από τις σχέσεις 3.81 και 3.82. Οι σχέσεις 3.81, 3.82, 3.83 θέτοντας $r = Ax + Bz - c$ και $u = \frac{1}{\rho}y$ δίνουν

$$x^{n+1} = \operatorname{argmin}_x (f(x) + \frac{r}{2} \|Ax + Bz^n - c + u^n\|^2) \quad (3.86)$$

$$z^{n+1} = \operatorname{argmin}_z (g(z) + \frac{r}{2} \|Ax^{n+1} + Bz - c + u^n\|^2) \quad (3.87)$$

$$u^{n+1} = u^n + Ax^{n+1} + Bz^{n+1} - c \quad (3.88)$$

Έστω οι συναρτήσεις

$$f(x) = \sum_{i=0}^{N-1} f_k(x_k) \quad (3.89)$$

$$g(z) = g(\sum_{i=0}^{N-1} z_k) \quad (3.90)$$

και το πρόβλημα

$$\begin{aligned} \min & f(x) + g(z) \\ & x_k - z_k = 0 \quad \forall k \in N \end{aligned} \quad (3.91)$$

με $x_k, z_k \in \mathbb{R}^n$. Προκύπτουν ισοδύναμα με τις σχέσεις 3.86,3.87, 3.88 οι εξής

$$x_k^{n+1} = \operatorname{argmin}_{x_k} (f_k(x_k) + \frac{\rho}{2} \|x_k - z_k^n + u_k^n\|^2) \quad (3.92)$$

$$z^{n+1} = \operatorname{argmin}_z (g(z) + \frac{\rho}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \|z_k - u_k^j - x_k^{n+1}\|^2) \quad (3.93)$$

$$u_k^{n+1} = u_k^j + x_k^{n+1} - z_k^{n+1} \quad (3.94)$$

όπου οι 3.92, 3.94 υλοποιούνται παράλληλα $\forall k \in N$. Η σχέση 3.93, ισοδύναμα

$$z^{n+1} = \underset{z}{\operatorname{argmin}} (g(N\bar{z}) + \frac{\rho}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \|z_k - u_k^n - x_k^{n+1}\|^2) \quad (3.95)$$

$$s.t. \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N z_i$$

Η επίλυση του παραπάνω προβλήματος ως προς z_k μας δίνει

$$z_k = u_k^n + x_k^{n+1} + \bar{z} - \bar{u}_k - \bar{x}_k^{n+1} \quad (3.96)$$

αντικαθιστώντας την 3.96 στην 3.93 παίρνουμε

$$\bar{z}^{n+1} = \underset{\bar{z}}{\operatorname{argmin}} g(N\bar{z}) + \frac{N\rho}{2} \|\bar{z} - u^n - \bar{x}^{n+1}\|^2 \quad (3.97)$$

και συνολικά

$$\begin{aligned} x_k^{n+1} &= \underset{x_k}{\operatorname{argmin}} (f_k(x_k) + \frac{\rho}{2} \|x_k - x_k^n + \bar{x}^n - \bar{z}^n + u^n\|^2) \\ \bar{z}^{n+1} &= \underset{\bar{z}}{\operatorname{argmin}} g(N\bar{z}) + \frac{N\rho}{2} \|\bar{z} - u^n - \bar{x}^{n+1}\|^2 \\ u^{n+1} &= u^n + \bar{x}^{n+1} - \bar{z}^{n+1} \end{aligned} \quad (3.98)$$

Στα πλαίσια αυτής της διατριβής υποθέτουμε ότι υπάρχει συνάρτηση g τέτοια ώστε να ισχύει

$$\begin{aligned} \bar{z}^{n+1} &= \underset{\bar{z}}{\operatorname{argmin}} g(N\bar{z}) + \frac{N\rho}{2} \|\bar{z} - u^n - \bar{x}^{n+1}\|^2 \\ &= \frac{z^{total}}{N} \end{aligned} \quad (3.99)$$

δηλαδή έχουμε πώς το άθροισμα των x_k είναι ίσο με $z^{total} \in R$

$$\sum_{k=0}^{N-1} x_k = \sum_{k=0}^{N-1} z_k = N\bar{z} = z^{total} \quad (3.100)$$

τότε αντικαθιστώντας την 3.99 στην 3.98 παίρνουμε

$$\begin{aligned}
x_k^{n+1} &= \operatorname{argmin}_{x_k} (f_k(x_k) + \frac{\rho}{2} \|x_k - x_k^n + \bar{x}^n - \bar{z}^j + u^n\|^2) \\
u^{n+1} &= u^n + \bar{x}^{n+1} - \frac{z^{total}}{N}
\end{aligned} \tag{3.101}$$

Επομένως παρατηρούμε ότι η λύση x σε αυτή την περίπτωση προκύπτει από τον παράλληλο υπολογισμό των ποσοτήτων x_k , την συλλογή των ποσοτήτων x_k και τον υπολογισμό της μέσης τιμής της $\bar{x}$ και την αποστολή ενός κοινού σήματος ελέγχουν u στους κόμβους του συστήματος. Επίσης το άθροισμα x_k θα είναι ίσο με μια προκαθορισμένη τιμή z^{total} .

Το πρόβλημα 3.74 μπορεί να λυθεί κατά την μέθοδο 3.101, θέτοντας

$$\begin{aligned}
x_k &= P_k \\
f_k(P_k) &= P_k^T P_k - 2P_k^T P_k^{avg} \\
z^{total} &= P_i^{max}
\end{aligned} \tag{3.102}$$

για κάθε σύστημα ελεγχόμενης διαχείρισης ελεγχόμενης διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων που συνδέεται στον ζυγό i και θεωρώντας μια βοηθητική μεταβλητή έτσι ώστε το άθροισμα x_k να μπορεί να προκύψει μικρότερο από την ποσότητα z^{total}

$$x_{kslack}^{n+1} = \operatorname{argmin}_{x_{kslack}} (\frac{\rho}{2} \|x_{kslack} - x_{kslack}^n + \bar{x}^n - \bar{z}^n + u^n\|^2) \tag{3.103}$$

Στο κεφάλαιο 4 θα παρουσιαστούν συνολικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής των αλγορίθμων σε μία γραμμή διανομής μέσης τάσης μεγάλου μήκους.

Κεφάλαιο 4

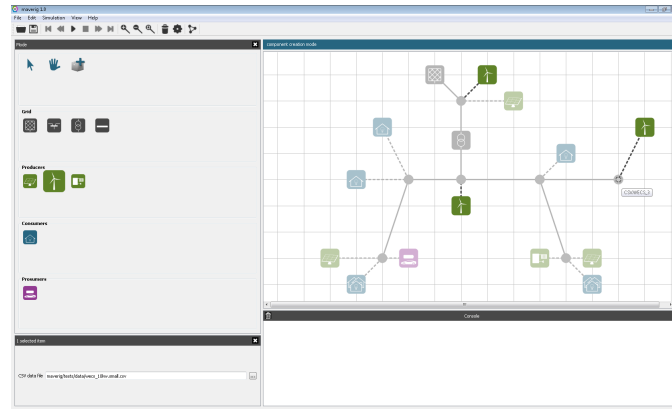
Περιβάλλον εξομοίωσης, σενάριο φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και αποτελέσματα εξομοιώσεων

Το κεφάλαιο αυτό σκοπεύει στην πραγματοποίηση εξομοιώσεων που δείχνουν την συμπεριφορά των προτεινόμενων αλγορίθμων και επαληθεύουν τα θεωρητικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3. Επιπρόσθετα γίνεται εξομοίωση ενός πειραματικού ολόημερου σεναρίου φόρτισης με σκοπό την αξιολόγηση του συστήματος συνολικά με τρόπο που επιτρέπει την σύγκριση των αποτελεσμάτων διαχείρισης φόρτισης μεταξύ της κεντρικής και κατακεντρωμένης λύσης αλλά και την σύγκριση του κριτηρίου αναλογικής δικαιοσύνης με άλλες προσεγγίσεις όπως την least squares και την γραμμική προσέγγιση.

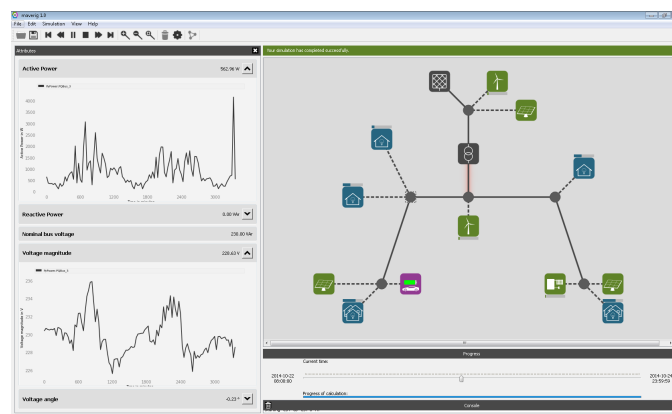
4.1 Περιβάλλον εξομοίωσης και η ανάλυση ροής φορτίου

Η εξομοίωση του συστήματος βασίστηκε στην ανάλυση ροής φορτίου του υπολογιστικού πακέτου `pypower` που αποτελεί την μεταφορά του πακέτου `matpower` σε γλώσσα `python` [74]. Το υπολογιστικό πακέτο `pypower` έχει ενσωματωθεί στον γραφικό προσομοιωτή `mosaik`, ο οποίος προσφέρει ένα γραφικό περιβάλλον δημιουργίας και εξομοίωσης δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας [75].

Οι κλάδοι του δικτύου διανομής του υπολογιστικού πακέτου `pypower` ακολουθούν το ισοδύναμο π κύκλωμα, με αντίσταση σειράς $z_s = r_s + jx_s$ και συνολική εγκάρσια χωρητικότητα b_c σε σειρά με έναν ιδανικό μετασχηματιστή ολίσθησης φάσης θ_{phase} με λήψη



Σχήμα 4.1 Γραφικό περιβάλλον δημιουργίας δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας mosaik



Σχήμα 4.2 Γραφικό περιβάλλον εξομοίωσης δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας mosaik

μετασχηματιστή τ . Τα ρεύματα εισόδου του κλάδου i_f, i_t εκφράζονται με την βοήθεια του 2×2 πίνακα αγωγιμοτήτων Y_{br} βάση των των τερματικών τάσεων v_f, v_t ως εξής

$$\begin{bmatrix} i_f \\ i_t \end{bmatrix} = Y_{br} \begin{bmatrix} v_f \\ v_t \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$Y_{br} = \begin{bmatrix} y_s + j\frac{b_c}{2}\frac{1}{\tau^2} & -y_s\frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} \\ -y_s\frac{1}{\tau e^{j\theta_{shift}}} & y_s + j\frac{b_c}{2} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Για κάθε κλάδο του δικτύου i θεωρούμε

$$Y_{br}^i = \begin{bmatrix} y_{ff}^i & y_{ft}^i \\ y_{tf}^i & y_{tt}^i \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

και συνολικά τα διανύσματα n_l $Y_{ff}, Y_{ft}, Y_{tf}, Y_{tt}$ κάθε στοιχείο i του οποίου ορίζεται κατά την σχ 4.3. Επίσης έστω οι πίνακες συνδεσιμότητας C_f, C_t . Τα στοιχεία (i, j) του πίνακα C_f και τα στοιχεία (i, k) είναι ίσα με την μονάδα για κάθε κλάδο i εάν τον συνδέουν με τον ζυγό j, k αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα στοιχεία των C_f, C_t είναι μηδενικά.

Για την περίπτωση δικτύου με n_b ζυγούς, θεωρείται ο $n_b \times n_b$ πίνακας αγωγιμοτήτων Y_{bus} που σχετίζει το ρεύμα εισόδου I_{bus} με την τάση των ζυγών ως εξής

$$I_{bus} = Y_{bus} V \quad (4.4)$$

Ομοίως για δίκτυο n_l κλάδων, οι πίνακες αγωγιμοτήτων Y_f, Y_t σχετίζουν την τάση των ζυγών με τα $n_l \times 1$ διανύσματα κλάδων I_f, I_t ακολούθως

$$I_f = Y_f V I_t = Y_t V \quad (4.5)$$

Ορίζοντας $[.]$ τον τελεστή που μετατρέπει ένα διάνυσμα $n \times 1$ στον αντίστοιχο διαγώνιο πίνακα $n \times n$ με τα στοιχεία του διανύσματος στην διαγώνιο τότε οι παραπάνω αγωγιμότητες μπορούν να εκφραστούν

$$\begin{aligned} Y_f &= [Y_{ff}]C_f + [Y_{ft}]C_t \\ Y_t &= [Y_{tf}]C_f + [Y_{tt}]C_t \\ Y_{bus} &= [Y_{tf}]C_f + [Y_{tt}]C_t \end{aligned} \quad (4.6)$$

Με βάση τις σχέσεις 4.4, 4.5 μπορεί να υπολογιστεί η εγγεόμενη ισχύς συναρτήσει της τάσης των ζυγών του δικτύου V :

$$\begin{aligned} S_{bus}(V) &= [V]I_{bus}^* = [V]Y_{bus}^* V^* \\ S_f(V) &= [C_f V]I_f^* = [C_f V]Y_f^* V^* \\ S_t(V) &= [C_t V]I_t^* = [C_t V]Y_t^* V^* \end{aligned} \quad (4.7)$$

Η ισότητα

$$g_s(V, S_g) = S_{bus}(V) + S_d - C_g S_g = 0 \quad (4.8)$$

μας δίνει το ισοζύγιο ισχύος στους ζυγούς του συστήματος, όπου S_d το φορτίο σταθερής ισχύος στους ζυγούς του συστήματος, C_g ο $n_b \times n_g$ πίνακας συνδεσιμότητας γεννητριών, με στοιχεία (i, j) ίσα με την μονάδα όταν η γεννήτρια j είναι συνδεδεμένη στον ζυγό i και S_g το $n_g \times 1$ διάνυσμα εγχύσεων ισχύος των γεννητριών του συστήματος.

Η ανάλυση ροής ισχύος συμπεριλαμβάνει την λύση της 4.8, ως προς το μέτρο και την γωνία της τάσης στους ζυγούς του συστήματος και ως προς την εγχεόμενη ισχύ από τις γεννήτριες του δικτύου για δεδομένο φορτίο. Διαχωρίζοντας το ισοζύγιο πραγματικής και αέργου ισχύος έχουμε ισοδύναμα.

$$\begin{aligned} g_p(\Theta, V_m, P_g) &= P_{bus}(\Theta, V_m) + P_d - C_g P_g = 0 \\ g_q(\Theta, V_m, Q_g) &= Q_{bus}(\Theta, V_m) + Q_d - C_g Q_g = 0 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Θεωρούμε 3 τύπους ζυγών; τον ζυγό αναφοράς για τον οποίο είναι γνωστή η γωνία της τάσης, τους ζυγούς pq για τους οποίους είναι γνώστο το φορτίο P_d, Q_d και άγνωστο το μέτρο και η γωνία της τάσης και τέλος τους ζυγούς pv για τους οποίους είναι γνωστό το μέτρο της τάσης και η έγχυση πραγματικής ισχύος, στους οποίους συνδέονται οι γεννήτριες του συστήματος.

Αρχικά επιλύεται το ισοζύγιο ισχύος έτσι ώστε να βρεθούν το μέτρο και η γωνία των τάσεων του δικτύου ως εξής

$$\begin{aligned} g(x) &= \begin{bmatrix} g_p^i(\Theta, V_m, P_g) \\ g_q^j(\Theta, V_m, Q_g) \end{bmatrix} = 0 \\ &\quad \forall i \in I_{PV} \cup I_{PQ} \\ &\quad \quad \forall j \in I_{PQ} \end{aligned} \quad (4.10)$$

όπου το διάνυσμα x αποτελεί το σύνολο των αγνώστων γωνιών και μέτρων τάσης

$$x = \begin{bmatrix} \theta_i \\ v_m^j \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Μετά την εύρεση του x , επιλύεται το υπόλοιπο σύστημα εξισώσεων ώστε να βρεθεί η συνολική εγγεόμενη πραγματική ισχύς στον ζυγό αναφοράς και η εγγεόμενη άεργος ισχύς από τις γεννήτριες στους ζυγούς pv και στον ζυγό αναφοράς.

Για τις ανάγκες των εξομοιώσεων του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε η επιλογή επίλυσης των σχ 4.10 που βασίζεται στην μέθοδο του Νεύτωνα [76] από το υπολογιστικό πακέτο `pypower-mosaik`.

4.2 Η μοντελοποίηση της γραμμής δικτύου διανομής M.T μεγάλου μήκους και του φορτίου της.

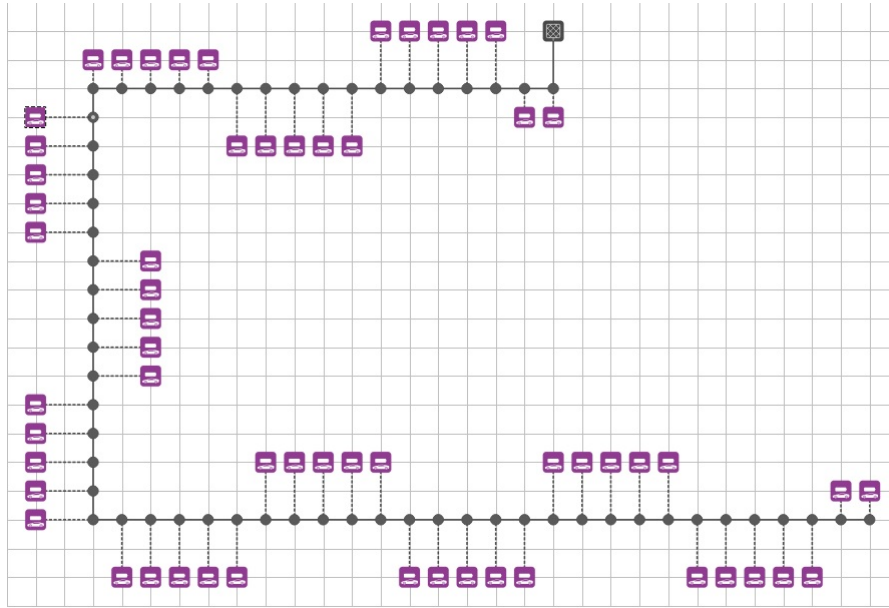
Για τις ανάγκες εξομοίωσης του συστήματος διαχείρισης φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων υπό περιορισμένη μεταβολή τάσης, μοντελοποιήθηκε μια γραμμή δικτύου διανομής μέσης τάσης 20kV συνολικού μήκους 58.1kM με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του καλωδίου μέσης τάσης NA2XS2Y [66] $R_{hk} = 0.253\Omega/kM$, $X_{hk} = 0.126\Omega/kM$ και μηδενική εγκάρσια χωρητικότητα. Το μήκος της γραμμής αλλά και ο αριθμός των ζυγών είναι της τάξεως μεγέθους μεγάλων σε μήκος γραμμών διανομής του Ελληνικού νησιωτικού συμπλέγματος (βλ Κρήτη Γ4-P1, μήκος 49900 [77], βλ Ικαρία, γραμμή1, 50kM, 57 ζυγοί [5])

Το δίκτυο διανομής αποτελείται από την γραμμή διανομής μεγάλου μήκους, έναν ζυγό αναφοράς που συμβολίζει την διασύνδεση της γραμμής με το υπόλοιπο σύστημα και την γραμμή στην οποία συνδέονται 59 ζυγοί φορτίου pq με απόσταση μεταξύ τους ίση με 1kM, με εξαίρεση τον εγγύτερο στον ζυγό αναφοράς ζυγό ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση 100m. (βλ σχ 4.3)

Οι πίνακες ευαισθησίας s_p , s_q της σχέσης 3.33, για την γραμμή διανομής διαμορφώνονται κατά τους πίνακες που παρουσιάζονται στο παράρτημα 1. ο αρνητικός συντελεστής δείχνει πως η αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος προκαλεί πτώση τάσης.

4.3 Αποτελέσματα εξομοιώσεων υποσυστήματος καθορισμού ορίων ισχύος με κεντρική και κατακεντρωμένη επίλυση

Έστω το πρόβλημα της σχέσης 3.44, με μεταβλητή ζήτησης $w_i = 5 \times 10^2 \forall i \in I$ ίση για όλους τους ζυγούς του συστήματος. Η ισότητα συνεπάγεται την ίδια ζήτηση για όλους τους ζυγούς του συστήματος και μπορεί να προκύψει όταν όλοι οι ζυγοί έχουν ελαττώσει



Σχήμα 4.3 Γραμμή δικτύου διανομής M.T μεγάλου μήκους μέσα από το περιβάλλον mosaik

τον συντελεστή ζήτησης στον ελάχιστο δυνατό α , η όταν τον έχουν αυξήσει στο μέγιστο δυνατό β . Για το φορτίο θεωρούμε σταθερό συντελεστή ισχύος $\cos\varphi = 0.95$ επαγωγικό. Για την κατανεμημένη επίλυση με βάση την σχέση 3.56, θεωρούμε την συνάρτηση

$$p_j(P^{max}) = \begin{cases} 0 \forall & j : \sum_{i \in I} P_i^{max} a_{ji} < c_j = 0.029 E_n \\ 10^2 \left(\frac{\sum_{i \in I} P_i^{max} a_{ji}}{0.029 E_n} - 1 \right) \forall & j : \sum_{i \in I} P_i^{max} a_{ji} \geq c_j = 0.029 E_n \end{cases} \quad (4.12)$$

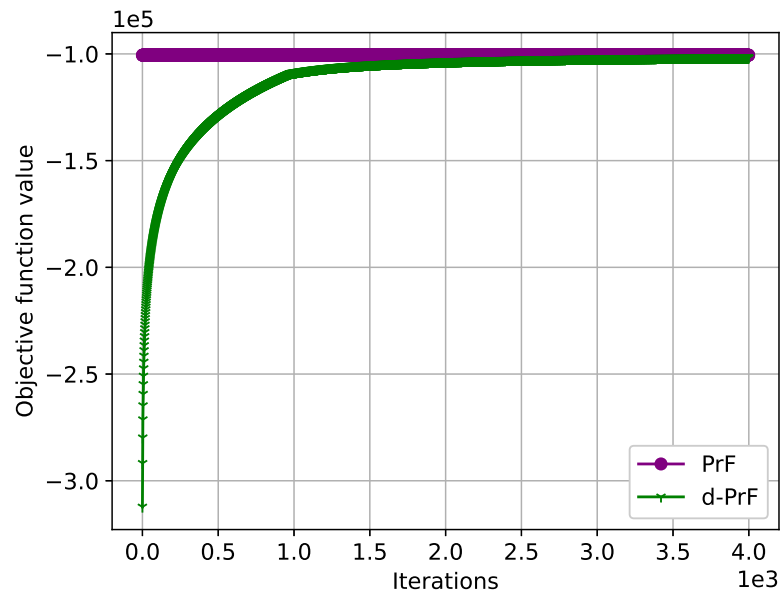
Ενώ για το βήμα k της σχ 3.56 επιλέγουμε

$$\kappa = \begin{cases} 4 & i = 1, 2, 3 \\ 0.04 & \forall i \in I - 1, 2, 3 \end{cases} \quad (4.13)$$

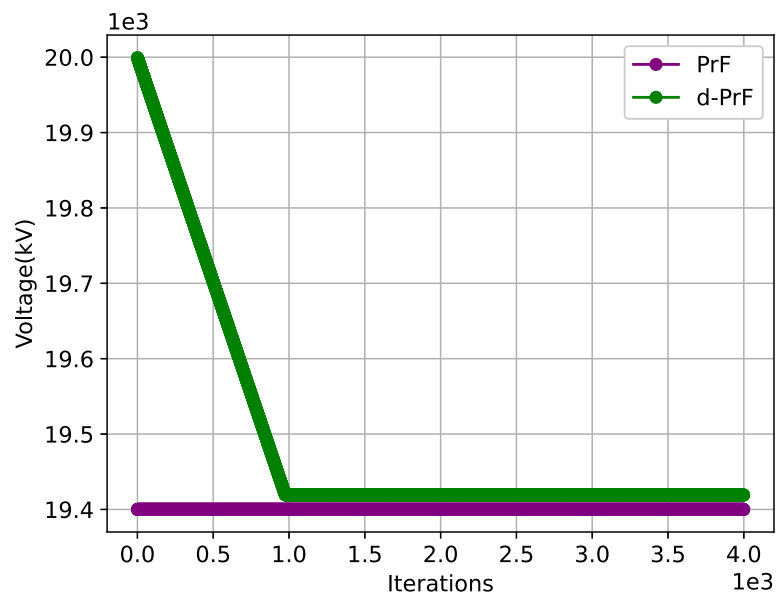
Στο σχήμα 4.4 φαίνεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για την κεντρική και κατανεμημένη επίλυση του συστήματος.

Στο σχήμα 4.5 φαίνεται η πτώση τάσης στον ηλεκτρικά πιο απομακρυσμένο ζυγό του συστήματος $i = 59$

Στον πίνακα 4.1 φαίνεται ο λόγος της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης και της πτώσης τάσης των κεντρικών και κατανεμημένων μεθόδων σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων της κατανεμημένης μεθόδου. Παρατηρούμε την σύγκλιση των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης και της πτώσης τάσης για την περίπτωση του κατανεμημέ-



Σχήμα 4.4 Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για κεντρική και καταναεμημένη επίλυση



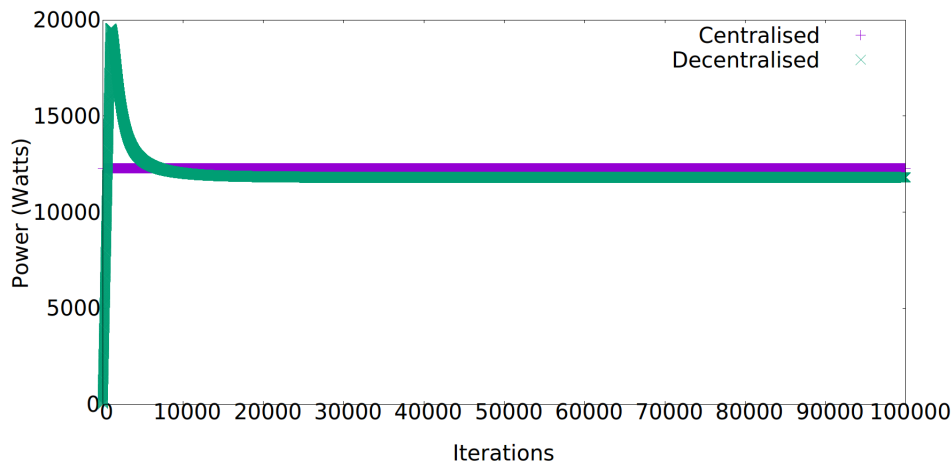
Σχήμα 4.5 Εκτίμηση πτώσης τάσης για κεντρική και καταναεμημένη επίλυση στον πιο απομακρυσμένο ζυγό

Πίνακας 4.1 Λόγος τιμών αντικειμενικής συνάρτησης για κεντρική και καταναμημένη επίλυση σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων της καταναμημένης μεθόδου

Αριθμός επαναλήψεων	$\nu=10$	$\nu=100$	$\nu=1000$	$\nu=10000$	$\nu=100000$
$\frac{Obj_{dist}}{Obj_{cent}}$	2.42	1.75	1.08	1.004	1.003
$\frac{V_{dist}^{expected}}{V_{cent}^{expected}}$	1.03	1.02	1.0009	1.0009	1.0009

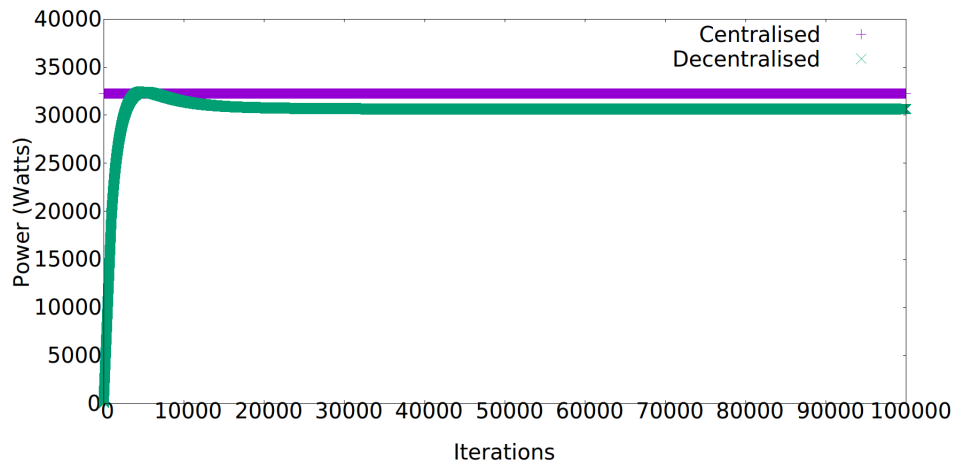
νου συστήματος "κοντά" στις αντίστοιχες τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων της αντίστοιχης λύσης που προκύπτει από την κεντρική επίλυση του συστήματος.

Η εξέλιξη των τιμών P^{max} για τον ηλεκτρικά πιο απομακρυσμένο ζυγό, έναν ενδιάμεσο ζυγό και τον ηλεκτρικά εγγύτερο ζυγό στο σημείο σύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο φαίνεται στο σχ 4.6, σχ 4.7 και σχ 4.8 αντίστοιχα.

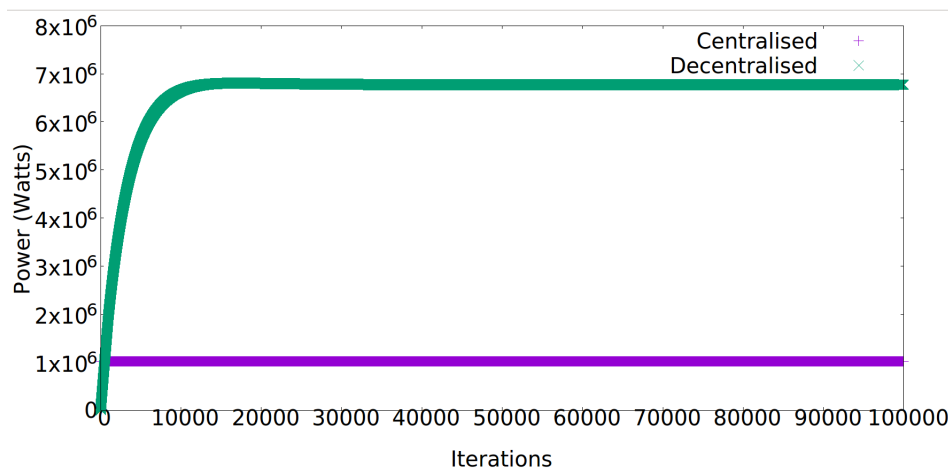


Σχήμα 4.6 Ίσχύς του πιο απομακρυσμένου ζυγού $\nu=59$ για κεντρική και καταναμημένη επίλυση σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων της καταναμημένης επίλυσης

Στον πίνακα 4.2 φαίνεται η εξέλιξη των τιμών P^{max} ως προς τον αριθμό των επαναλήψεων της καταναμημένης επίλυσης για $i = 1, 35, 71$. Παρατηρούμε ότι για τον ηλεκτρικά πιο απομακρυσμένο ζυγό από το σημείο διασύνδεσης σύνδεσης με το δίκτυο, ο λόγος $\frac{P_{dist}^{max}}{P_{cent}^{max}} \approx 1$ ενώ για τον ζυγό που βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο διασύνδεσης $\frac{P_{dist}^{max}}{P_{cent}^{max}} \gg 1$. Η απόκλιση από τις τιμές της κεντρικής επίλυσης οφείλεται στο γεγονός ότι η συνάρτηση κόστους της σχ 4.13 προσεγγίζει τα χαρακτηριστικά των συνηθικών KKT της σχέσης 3.50, με αποτέλεσμα την προσεγγίση των συντελεστών μ από την συνάρτηση κόστους p και την δημιουργία διαφοροποιήσεων στην τελική λύση που προκύπτει από την σχ 3.66. Συνολικά η κατανομή της ισχύος για όλους του κόμβους φαίνεται στα σχήματα 4.9, 4.10. Όπως φαίνεται για $i = 1, 2, 3$ η καταναμημένη επίλυση οδηγεί σε απόδοση μεγαλύτερων ορίων ισχύος ενώ για τους υπολοίπους ζυγούς αποδίδει ελαφρώς λιγότερη ισχύ σε σχέση



Σχήμα 4.7 Ισχύς ζυγού $\nu=35$ για κεντρική και καταναεμημένη επίλυση σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων της καταναεμημένης επίλυσης

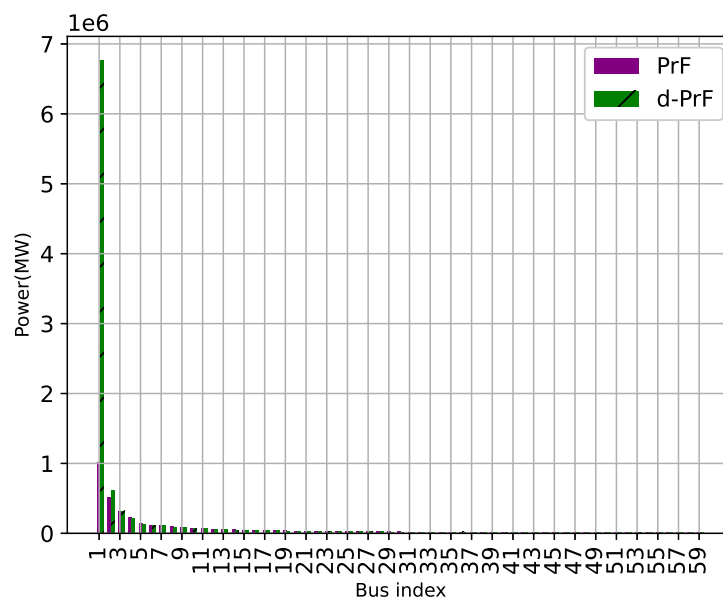


Σχήμα 4.8 Ισχύς ζυγού $\nu=1$ για κεντρική και καταναεμημένη επίλυση σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων της καταναεμημένης επίλυσης

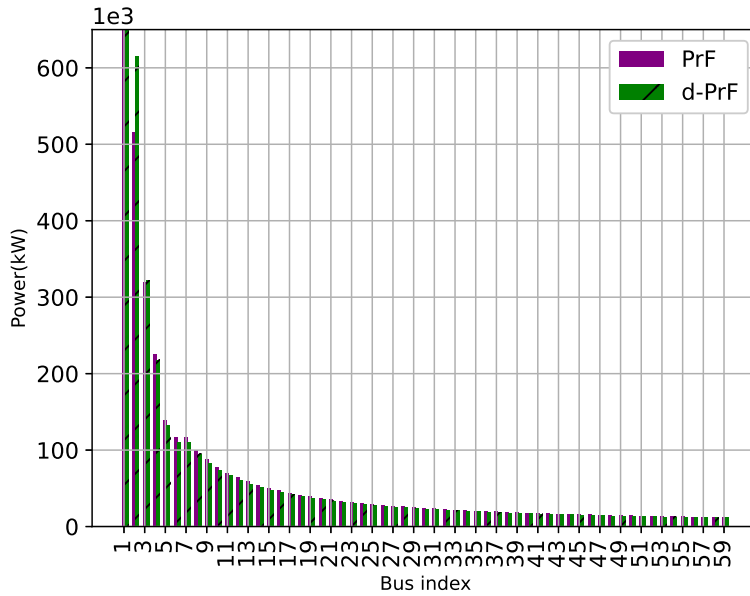
Πίνακας 4.2 Λόγος τιμών αντικειμενικής συνάρτησης για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων της κατανεμημένης μεθόδου

Αριθμός επαναλήψεων	$\nu=10$	$\nu=100$	$\nu=1000$	$\nu=10000$	$\nu=100000$
$\frac{P_{dist1}^{max}}{P_{cent1}^{max}}$	0.019	0.19	1.96	6.54	6.67
$\frac{P_{dist35}^{max}}{P_{cent35}^{max}}$	0.006	0.061	0.614	0.974	0.949
$\frac{P_{dist71}^{max}}{P_{cent71}^{max}}$	0.016	0.162	1.59	0.981	0.96

με την κεντρική επίλυση. Επομένως ανάλογα με την ζήτηση στους ζυγούς της γραμμής μπορεί να αποδώσει περισσότερη ή λιγότερη ισχύ συνολικά σε σχέση με την κεντρική επίλυση. Σε κάθε περίπτωση όπως φαίνεται από το σχήμα 4.5, δεν παραβιάζεται ο περιορισμός σχετικά με την εκτιμώμενη πτώση τάσης. Στα σχήματα 4.9, 4.10 φαίνεται η λύση για όλους τους ζυγούς του δικτύου και αριθμό επαναλήψεων $\nu=100000$.



Σχήμα 4.9 Κατανομή ορίων ισχύος για όλους τους ζυγούς της γραμμής διανομής με την κεντρική και κατανεμημένη επίλυση



Σχήμα 4.10 Λεπτομέρεια κατανομής ορίων ισχύος για όλους τους ζυγούς της γραμμής διανομής με την κεντρική και κατανεμημένη επίλυση

4.4 Αποτελέσματα εξομοιώσεων υποσυστήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με κεντρική και κατανεμημένη επίλυση

Έστω στόλος $n = 40$ οχημάτων, με επιθυμητή ενέργεια φόρτισης για κάθε όχημα $E_k^{charge} = 20kW, \forall k \in 0..39$. Υποθέτουμε επίσης ότι ο στόλος οχημάτων αποτελείται από ένα σύνολο οχημάτων που παραμένουν συνδεδεμένα προς φόρτιση για $t_k = 8$ χρονοθυρίδες, $\forall k + 1 \bmod 2 = 0, k = 0..39$ ενώ για τα υπόλοιπα οχήματα υποθέτουμε ότι παραμένουν συνδεδεμένα για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα διάρκειας $t_k = 1..8$. Υποθέτουμε επίσης πως η διάρκεια κάθε χρονοθυρίδας είναι ίση με $t = 15min$. Επιπρόσθετα υποθέτουμε όριο φόρτισης για τον στόλο ηλεκτρικών οχημάτων $P^{max} = 105kW$. Η επίλυση του προβλήματος 3.69 μας δίνει την κατανομή της ισχύος φόρτισης οχημάτων P_k .

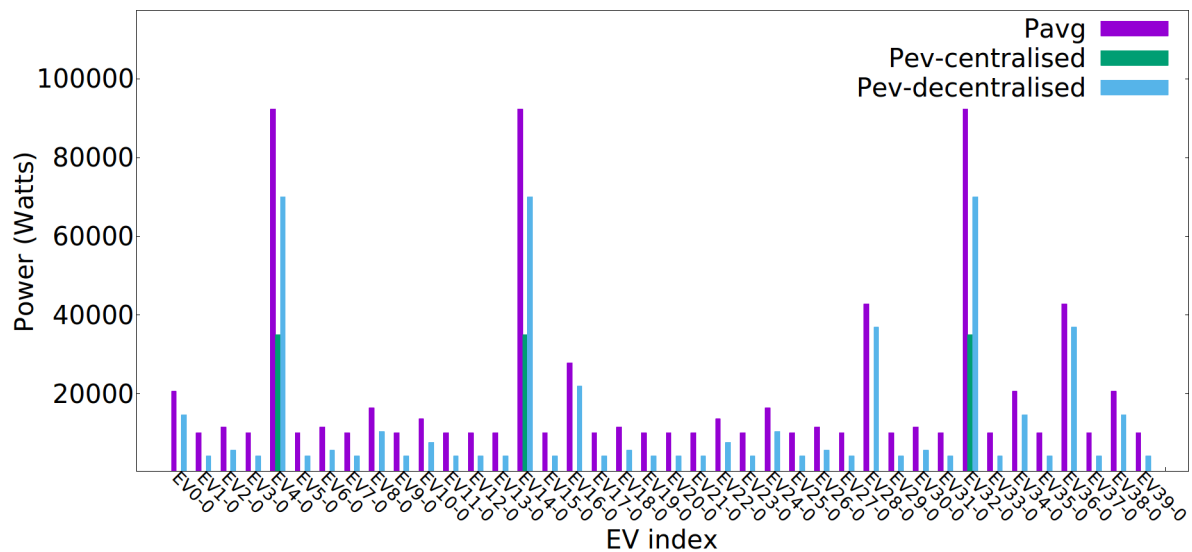
Τα αποτελέσματα της επίλυσης με βάση την κεντρική μέθοδο [78] και κατανεμημένη μέθοδο 3.101 σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων της κατανεμημένης μεθόδου $i = 10, 1000, 10000$ απεικονίζονται στη συνέχεια. Παρατηρούμε ότι για $n = 10$ η λύση που προκύπτει από την κατανεμημένη υλοποίηση διαφέρει αρκετά από την κεντρική επίλυση του προβλήματος. Ενώ φαίνεται η σύγκλιση της κατανεμημένης επίλυσης για

Πίνακας 4.3 Εξέλιξη αθροιστικού τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ κεντρικής και κατανεμημένης επίλυσης

$i = 10$	$i = 100$	$i = 1000$	$i = 10000$
84e+08	33e+08	31e+05	6.3e-07

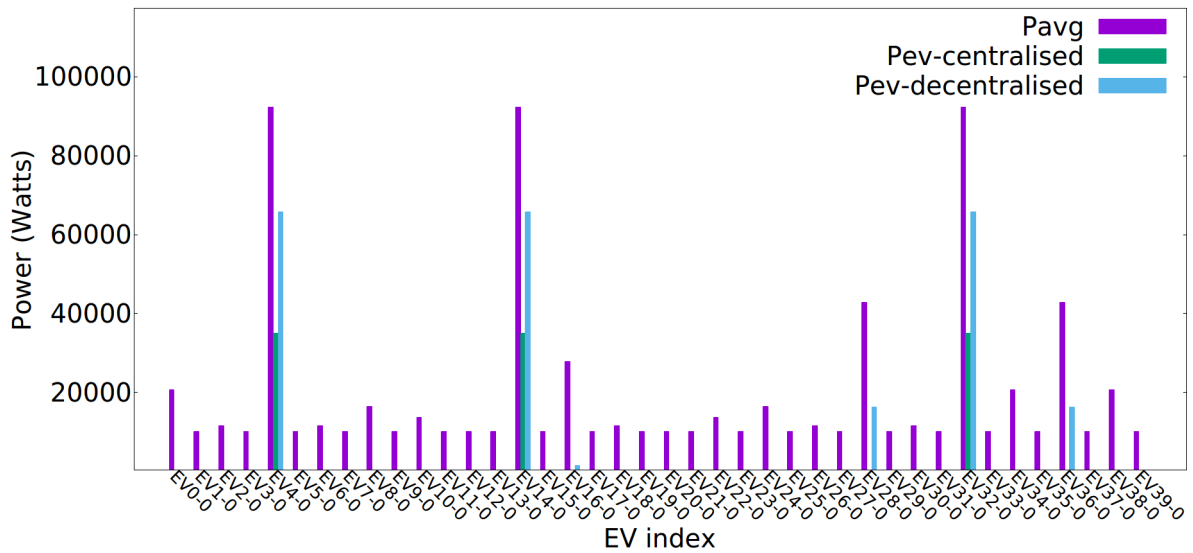
$n = 1000$ και $n = 10000$ επαναλήψεις. Η εξέλιξη του αθροιστικού τετραγωνικού σφάλματος για κάθε χρονοθυρίδα 4.14 φαίνεται στο σχήμα 4.15 και τον πίνακα 4.3. Παρατηρούμε την συνεχή ελαχιστοποίηση του σφάλματος αυτού σε σχέση με τις επαναλήψεις της κατανεμημένης μεθόδου. Για $n = 1000$ το συνολικό σφάλμα της κατανεμημένης μεθόδου αποτελεί ποσότητα της τάξεως μερικών Watt.

$$Error = \sum_{i=0}^{39} (P_{centralised_i} - P_{distributed_i})^2 \quad (4.14)$$

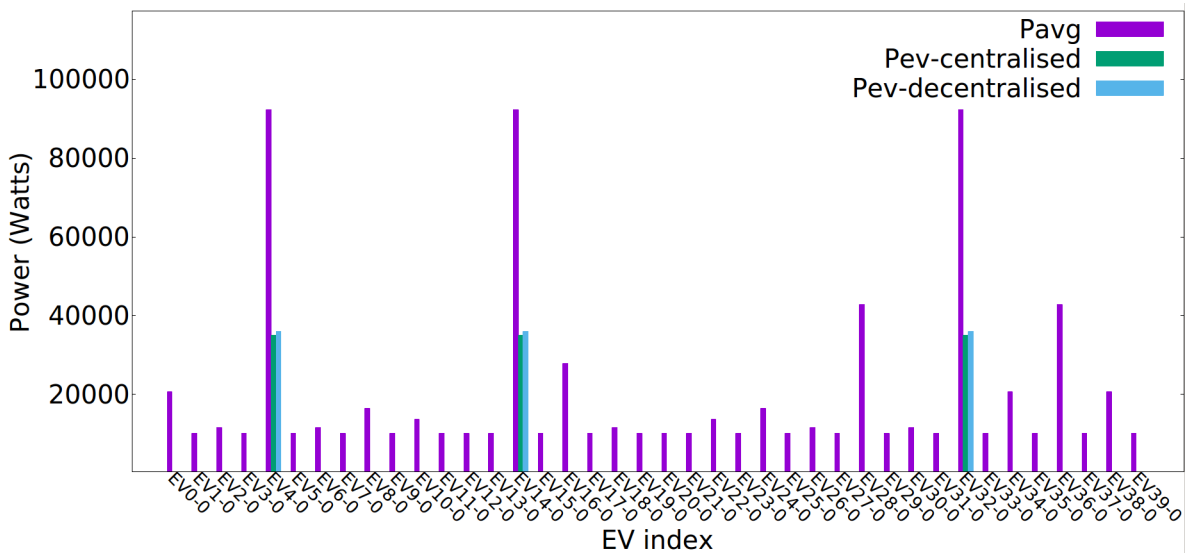


Σχήμα 4.11 Ισχύς φόρτισης για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση για επανάληψη $i=10$

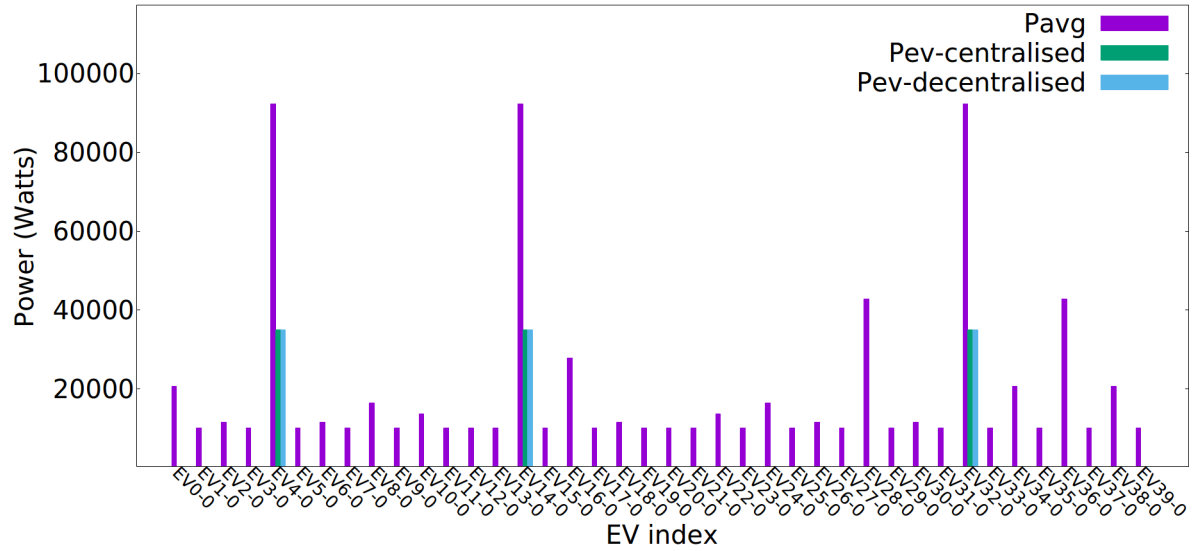
Παρατηρούμε πως για τα οχήματα που δεν μπορούν να διαθέσουν πολύ χρόνο για φόρτιση βλ (EV-32, EV04) στο σχ 4.14 η τιμή του μέσου ρυθμού φόρτισης που προκύπτει είναι αρκετά μεγάλη, γεγονός που οδηγεί και σε αυξημένους ρυθμούς φόρτισης. Αντίθετα στην περίπτωση ηλεκτρικών οχημάτων που είναι διαθέσιμα για περισσότερο χρόνο παρατηρείται η μετάθεση της φόρτισης σε σχετικά μελλοντικές χρονοθυρίδες. Επιπρόσθετα παρατηρούμε την αποκοπή ισχύος έτσι ώστε να ικανοποιηθεί ο περιορισμός της μέγιστης ισχύος.



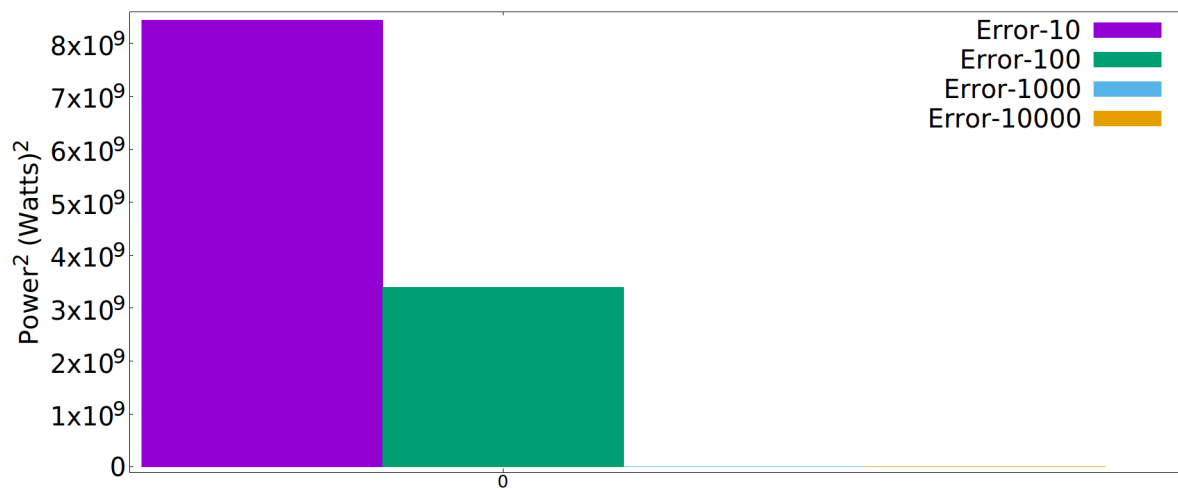
Σχήμα 4.12 Ισχύς φόρτισης για κεντρική και κατακεντρωμένη επίλυση για επανάληψη $i=100$



Σχήμα 4.13 Ισχύς φόρτισης για κεντρική και κατακεντρωμένη επίλυση για επανάληψη $i=1000$



Σχήμα 4.14 Ισχύς φόρτισης για κεντρική και κατακεντρωμένη επίλυση για επανάληψη $i=10000$



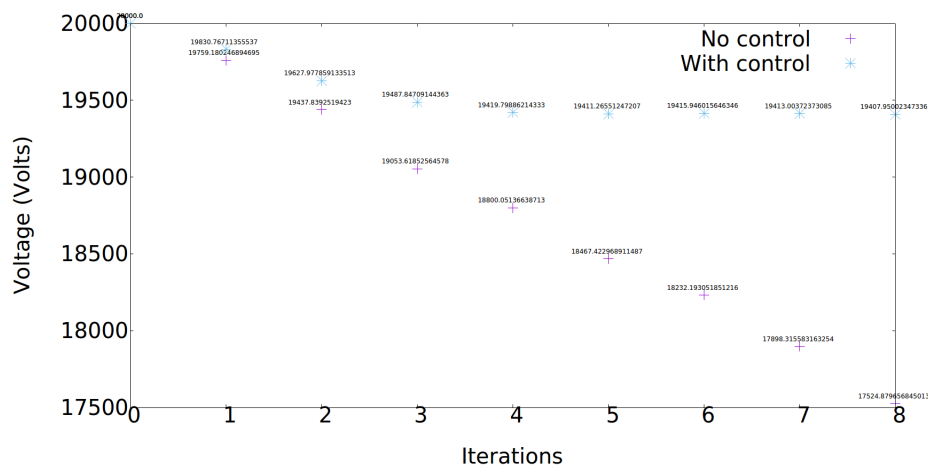
Σχήμα 4.15 Αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ κεντρικής και κατακεντρωμένης επίλυσης

4.5 Αποτελέσματα εξομοιώσεων συστήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με κεντρική επίλυση ορίων φόρτισης

Θεωρούμε το σύστημα του σχ 2.1, όπου η επίλυση του προβλήματος εκτίμησης ορίων φόρτισης πραγματοποιείται κατά την κεντρική αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται στο 2.9 με βάση την σχ 3.46 ενώ το υποσύστημα ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων υλοποιείται κατά την κατανεμημένη επίλυση του σχ 2.10 που βασίζεται στην 3.101.

Θεωρούμε την γραμμή διανομής του σχήματος 4.3 και υποθέτουμε ότι για κάθε χρονοθυρίδα συνδέεται ένα όχημα σε κάθε ζυγό του συστήματος, και φορτίζει με μια μέση ισχύ ικανή να το φορτίσει 20kWh για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα 15min-8h. Παρατηρούμε την τάση στο ηλεκτρικά πιο απομακρυσμένο σημείο της γραμμής για την περίπτωση που το φορτίο ελέγχεται και για μη ελεγχόμενη φόρτιση για $n = 9$ χρονοθυρίδες. Παρατηρούμε την πτώση τάσης κάτω από το όριο 0.03 pu για την περίπτωση της ανεξέλεγκτης φόρτισης και την συγκράτηση της τάσης στα επίπεδα του 0.03 pu για την περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης οχημάτων. Το σενάριο φόρτισης περιλαμβάνει μόνο ελαστικό φορτίο το οποίο ελέγχεται κατά την μέθοδο 2.10.

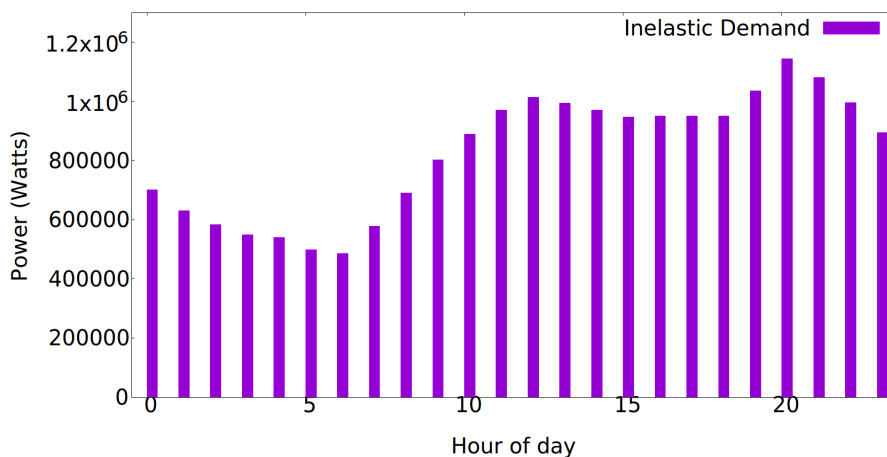
Στην συνέχεια εξετάζουμε ένα σενάριο που περιλαμβάνει ελαστική και ανελαστική ισχύ και εξετάζουμε τον μηχανισμό διαπραγμάτευσης ισχύος που βασίζεται στην σχ 3.52



Σχήμα 4.16 Τάση στον ζυγό 59 για ελεγχόμενη και ανεξέλεγκτη φόρτιση ΗΟ

Υποθέτουμε μεταβλητό ανελαστικό φορτίο με μέγιστη συνολική ισχύ 1.14MW βλ σχ 4.17. Το μεταβλητό ανελαστικό φορτίο θεωρούμε ότι κατανέμεται κατά το ήμισυ στους 10 ηλεκτρικά εγγύτερους στο σημείο διασύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο ζυγούς

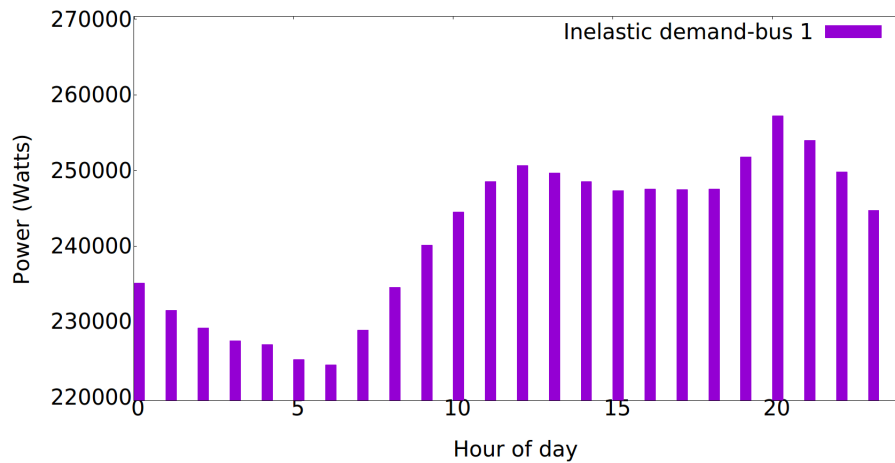
$i = 1 \dots 21$ 4.20 και το υπόλοιπο κατανέμεται στους υπόλοιπους 49 ζυγούς του δικτύου διανομής 4.21. Επιπρόσθετα αυξάνουμε το ανελαστικό φορτίο κατά 250kW για τον ζυγό 1 και 200kW για τον ζυγό 2. Επιλέγουμε για όλους τους ζυγούς του συστήματος εύρος λειτουργίας συντελεστών $w_r \in [10, 1000]$, το οποίο μεταβάλλεται απο κάθε ζυγό ανάλογα με την ζήτησή του σύμφωνα με την εξ 3.52. Επίσης θεωρούμε ελαστικό και ελεγχόμενο φορτίο ηλεκτρικών οχημάτων με ενέργεια φόρτισης 20kWh και διάρκεια φόρτισης που κυμαίνεται απο 15min-8h, με κατανομή άφιξης προς φόρτιση που φαίνεται στο σχήμα 4.22, όπου ο οριζόντιος άξονας υποδηλώνει τα λεπτά της ημέρας ενώ ο κάθετος άξονας τον αθροιστικό αριθμό οχημάτων που συνδέονται για να φορτίσουν; αυξημένη φόρτιση εμφανίζεται τις απογευματινές-βραδυνές ώρες όταν οι ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων επιστρέφουν στις κατοικίες τους, πράγμα που οδηγεί στην αύξηση του συνολικού αριθμού αφίξεων στην υποδομή φόρτισης του σχήματος 4.22.



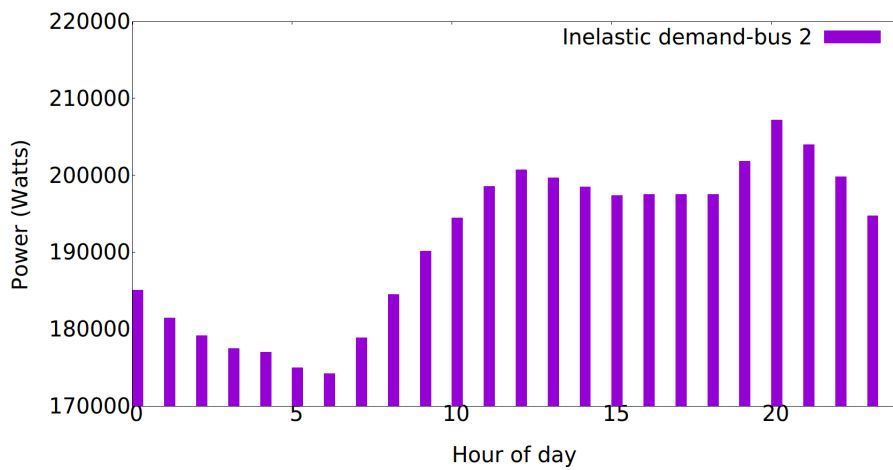
Σχήμα 4.17 Συνολικό ημερήσιο ανελαστικό φορτίο

Παρατηρούμε τα προφίλ ορίων φόρτιου και φορτίου των ζυγών 1, 3, 59 βλ (4.23, 4.25, 4.27-πράσινη γραμμή και μπλέ γραμμές αντίστοιχα). Αρχικά το όριο φόρτισης για όλους τους ζυγούς είναι πολύ μεγαλύτερο από την ζήτησή τους, επομένως ο συντελεστής ζήτηση w_i ελαχιστοποιείται και παραμένει στην ελάχιστη τιμή του. Καθώς το φορτίο αυξάνεται συνεχώς και ειδικά κατά τις απογευματινές ώρες, παρατηρούμε ότι οι ζυγοί μεταβάλλουν αναλόγως τους συντελεστές ζήτησής τους έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις ανάγκες φόρτισης τους βλ (4.24, 4.26, 4.28). Παρατηρούμε ότι στον ηλεκτρικά πιο μακρινό ζυγό από το σημείο σύνδεσης με το δίκτυο πραγματοποιείται αποκοπή φορτίου.

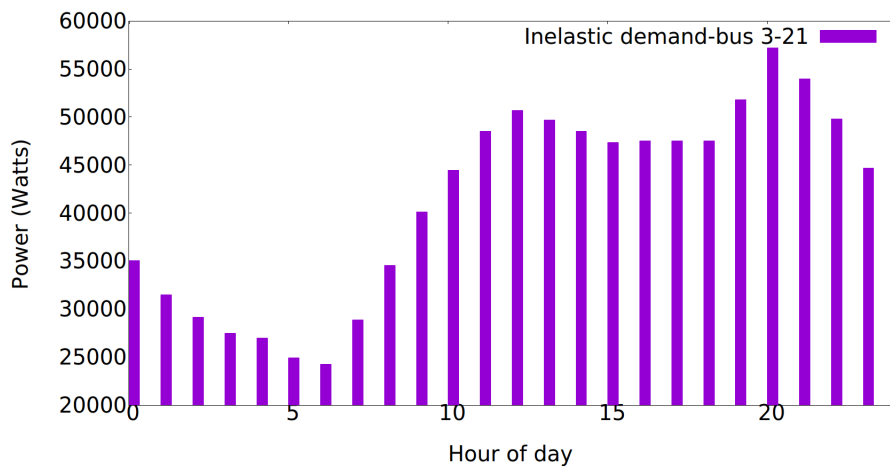
Παράλληλα παρατηρούμε στο σχ 4.31 πως το επίπεδο τάσης πέφτει μέχρι την οριακή τιμή του συστήματος, 0.03pu και παραμένει "κοντά σε αυτή" παρά την συνεχόμενη αύξηση του φορτίου που προκύπτει από την άφιξη ηλεκτρικών οχημάτων. Γενικά αναμένεται μια απόκλιση της τάσης απο την οριακή τιμή λόγω των παρακάτω σφαλμάτων



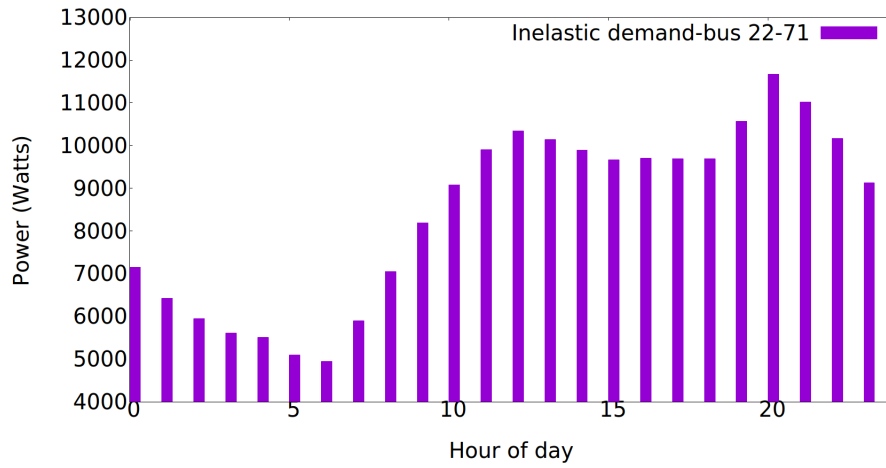
Σχήμα 4.18 Συνολικό ημερήσιο ανελαστικό φορτίο ζυγού 1



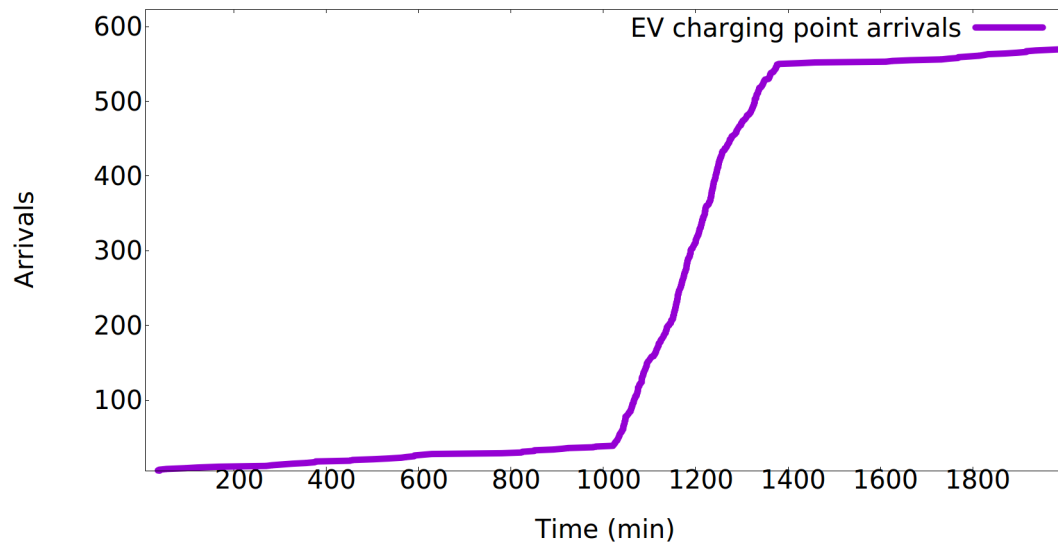
Σχήμα 4.19 Συνολικό ημερήσιο ανελαστικό φορτίο ζυγού 2



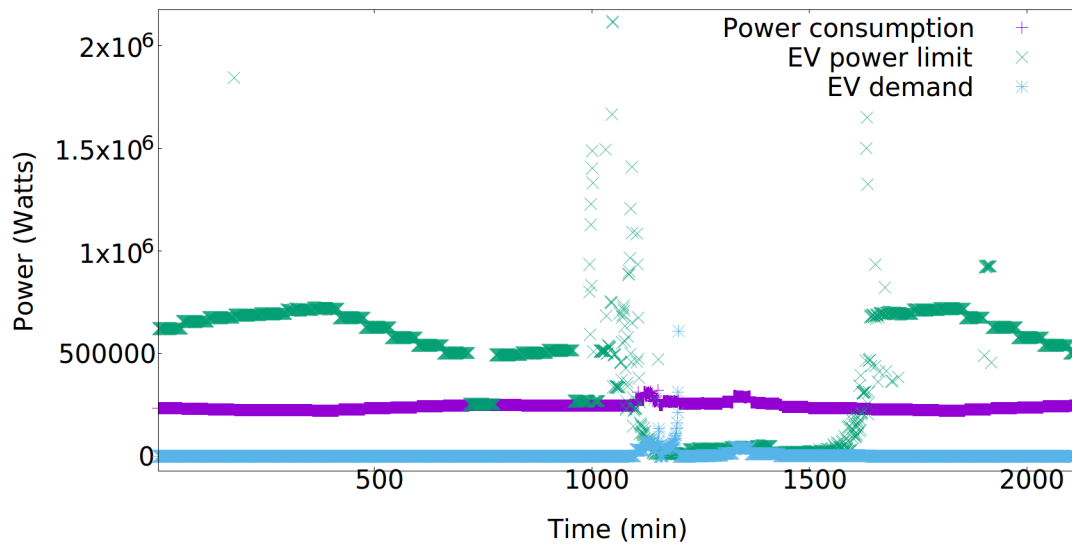
Σχήμα 4.20 Συνολικό ημερήσιο ανελαστικό φορτίο ανα ζυγό για τους ζυγούς 3-21



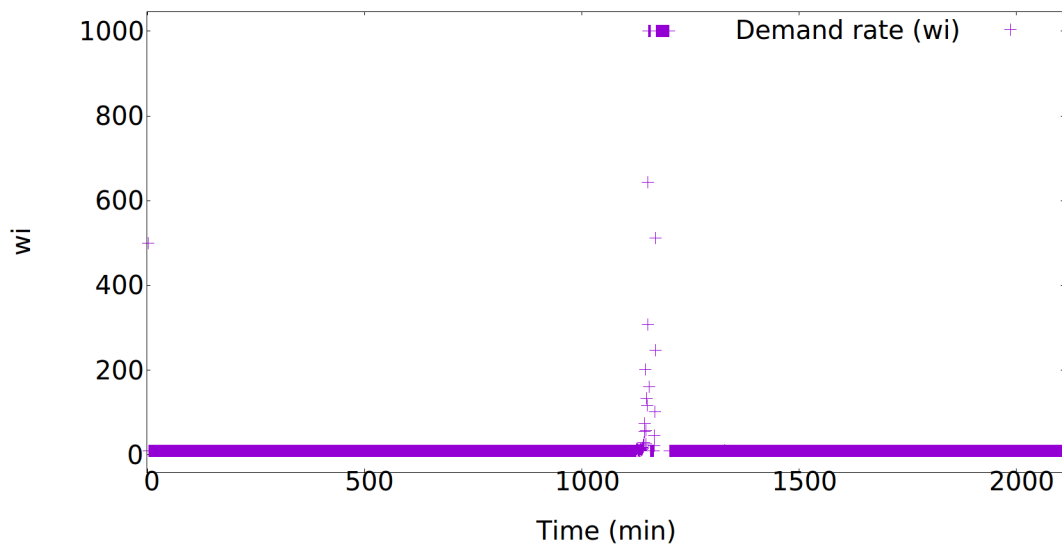
Σχήμα 4.21 Συνολικό ημερήσιο ανελαστικό φορτίο ανα ζυγό για τους υπολοίπους 49 ζυγούς



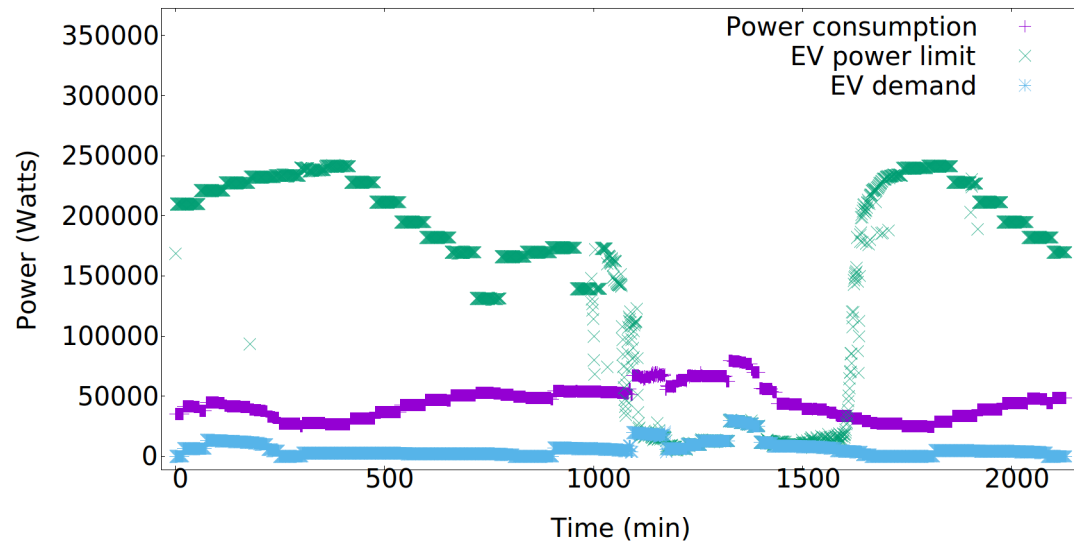
Σχήμα 4.22 Κατανομή άφιξης ηλεκτρικών οχημάτων



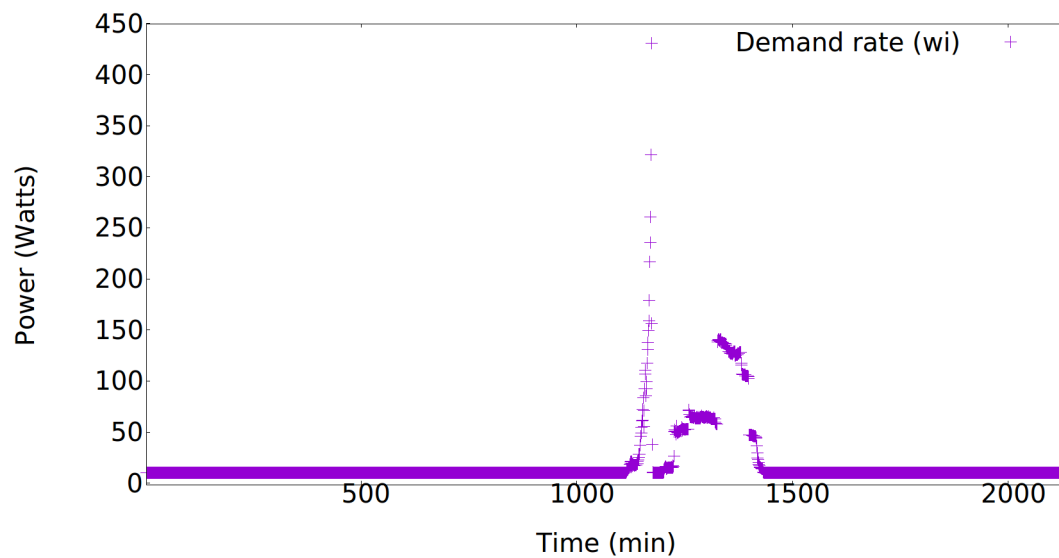
Σχήμα 4.23 Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 1



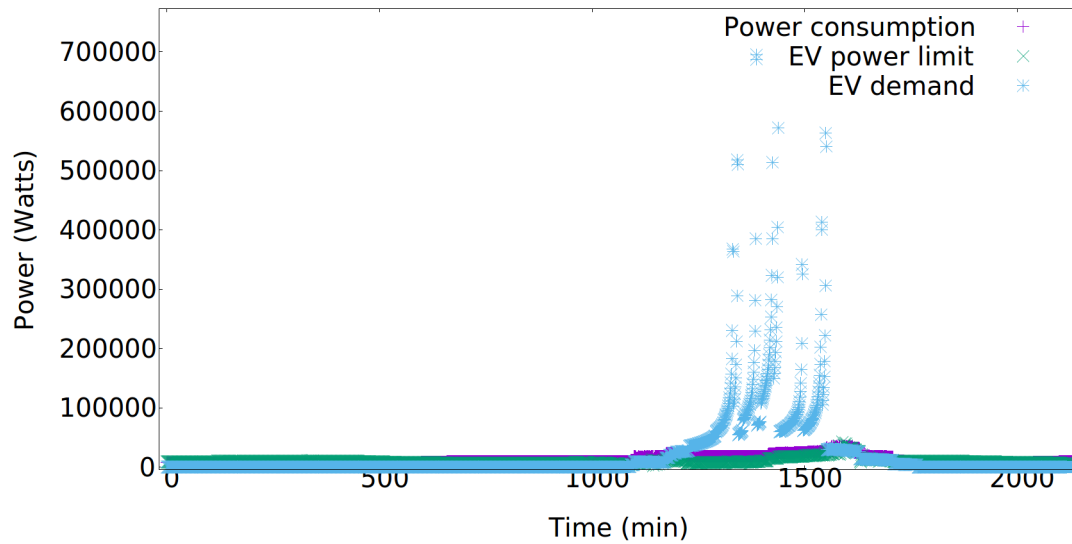
Σχήμα 4.24 Προσαρμογή συντελεστή ζήτησης για τον ζυγό 1



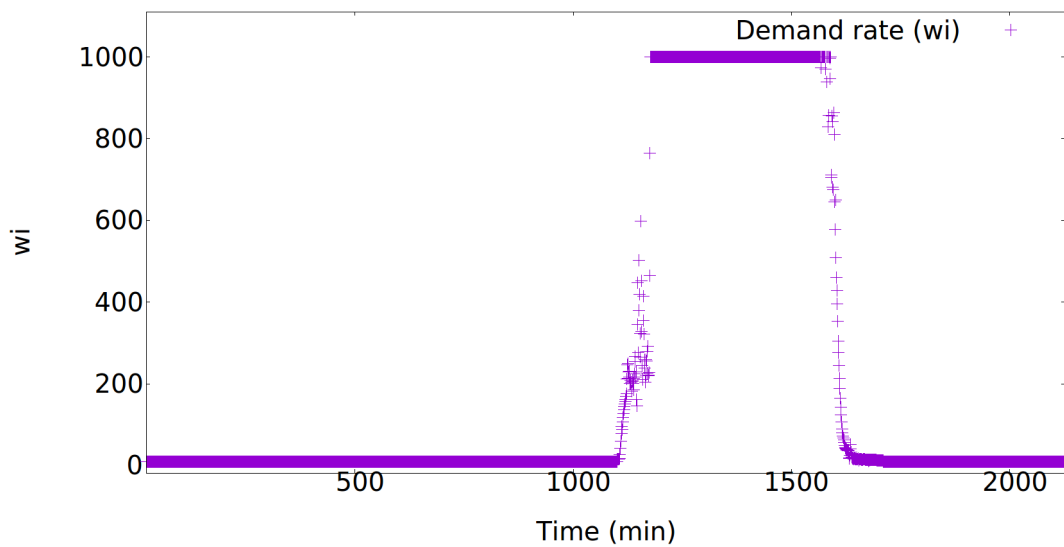
Σχήμα 4.25 Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 3



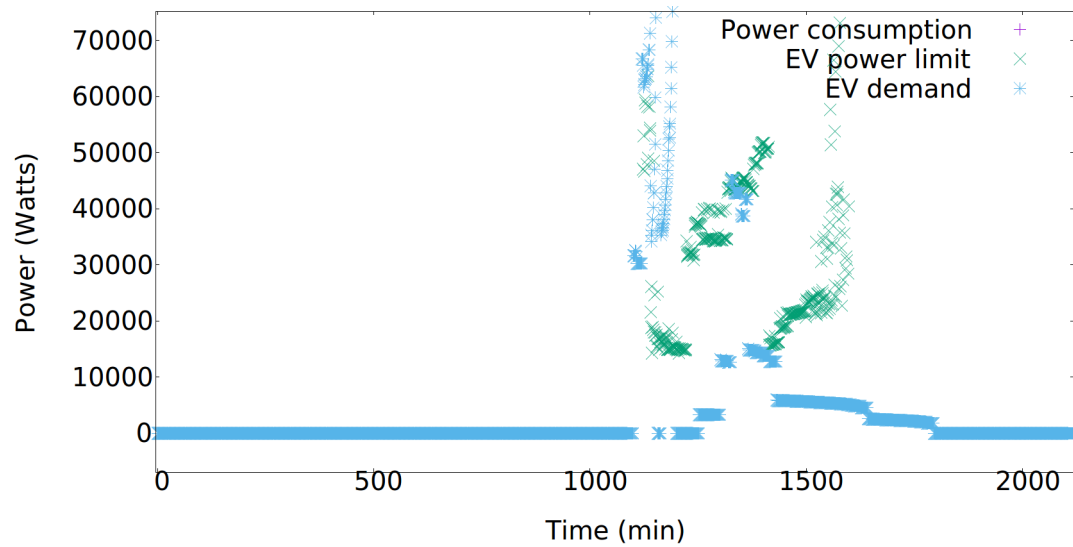
Σχήμα 4.26 Προσαρμογή συντελεστή ζήτησης για τον ζυγό 3



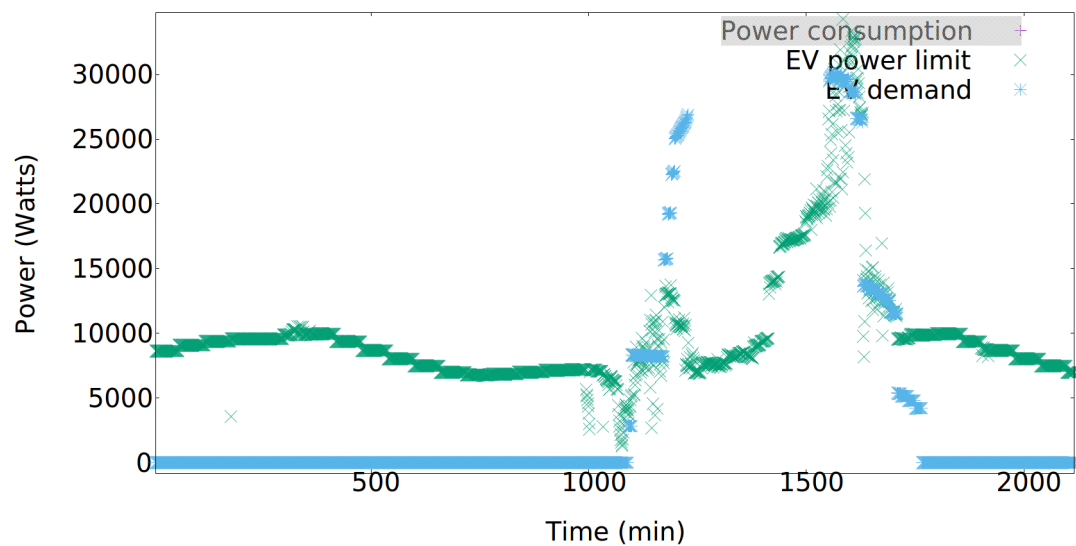
Σχήμα 4.27 Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 59



Σχήμα 4.28 Προσαρμογή συντελεστή ζήτησης για τον ζυγό 59



Σχήμα 4.29 Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 1-λεπτομέρεια

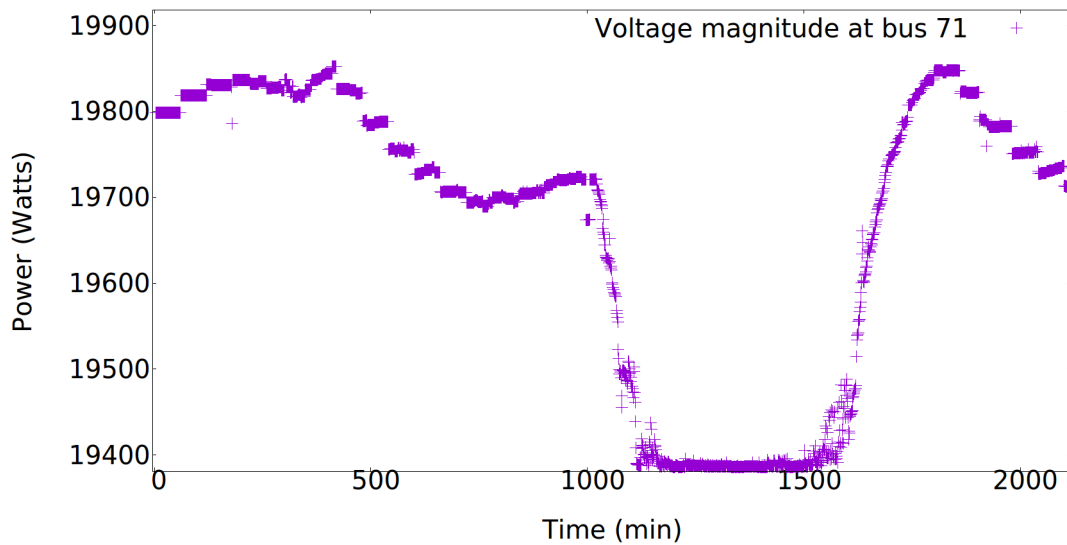


Σχήμα 4.30 Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 59-λεπτομέρεια

Πίνακας 4.4 Στατιστικά μεγέθη τάσης για το χρονικό διάστημα $t = 1100...1600$

V_{avg}	V_{std}	V_{min}	V_{max}
19395.6	20.3	19385.6	19425.9

- Σφάλμα εκτίμησης ευαισθησίας τάσης.
- Σφάλμα εκτίμησης συντελεστή ζήτησης.

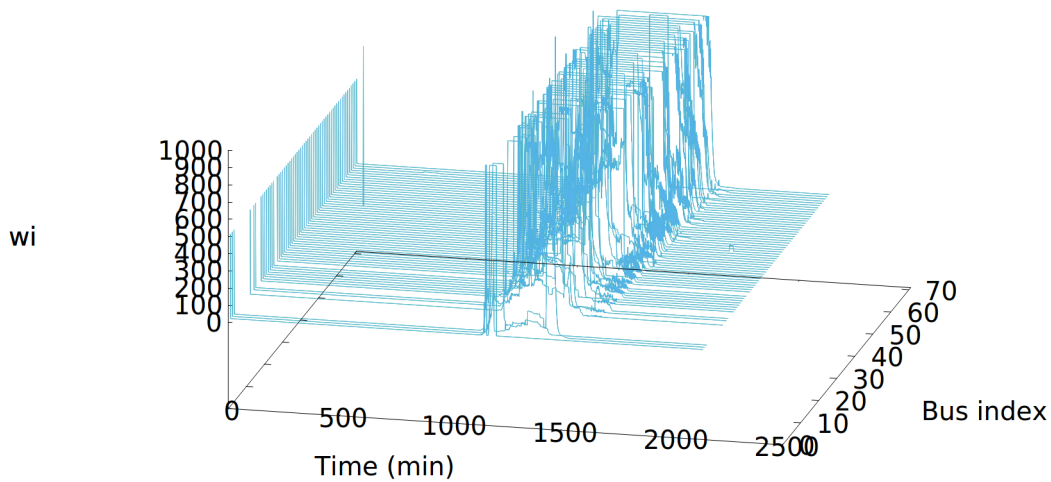


Σχήμα 4.31 Προφίλ τάσης στον ζυγό 59

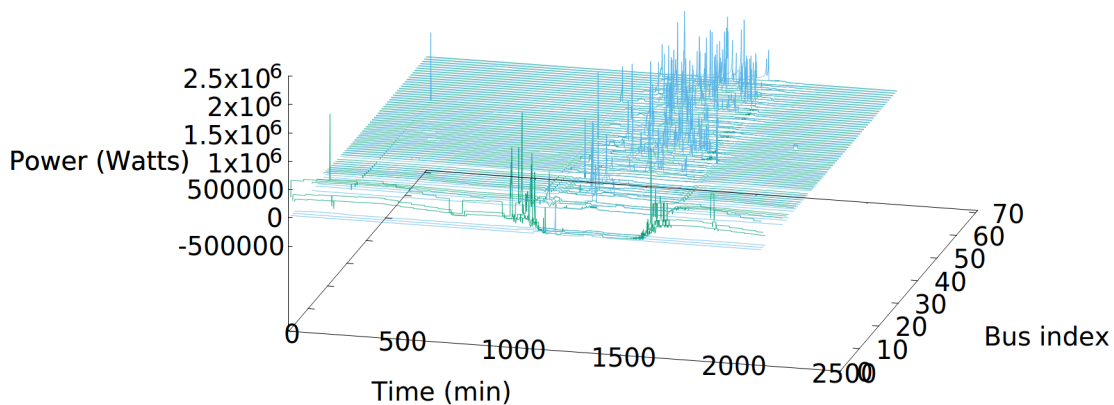
Η μέση τιμή, τυπική απόκλιση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή για το χρονικό διάστημα $t = 1100...1600$ φαίνεται στον πίνακα 4.4

Συνοψίζοντας παρατηρούμε την χρονοσειρά του συντελεστή ζήτησης για όλους τους ζυγούς της γραμμής στο σχ. 4.32. Παρατηρούμε πως οι ηλεκτρικά πιο απομακρυσμένοι ζυγοί διατηρούν τον συντελεστή ζήτησης σε υψηλές τιμές αντίθετα από τους ηλεκτρικά εγγύτερους ζυγούς διατηρούν τον συντελεστή ζήτησης σε μικρές τιμές. Επομένως οι ηλεκτρικά πιο απομακρυσμένοι ζυγοί "εξαντλούν" τα περιθώρια που έχουν για να ικανοποιήσουν την ζήτησή τους. Στο σχήμα 4.33, παρατηρούμε για αυτούς τους ζυγούς αιχμές ζήτησης που στην πλειοψηφία τους είναι αποτέλεσμα της "αδυναμίας" του συστήματος να καλύψει πλήρως την ζήτηση με αποτέλεσμα αυτή να συσσωρεύεται και να τις δημιουργεί. Αντίθετα στο 4.32, οι ηλεκτρικά εγγύτεροι ζυγοί χαμηλώνουν τον συντελεστή ζήτησης όσο πιο πολύ γίνεται έτσι ώστε να προσφέρουν περιθώριο φόρτισης στους υπόλοιπους ζυγούς του συστήματος ικανοποιώντας ταυτόχρονα και την ζήτησή τους όπως φαίνεται στο σχήμα 4.33 όπου παρατηρούμε την προσαρμογή του ορίου φόρτισης στην ζήτηση.

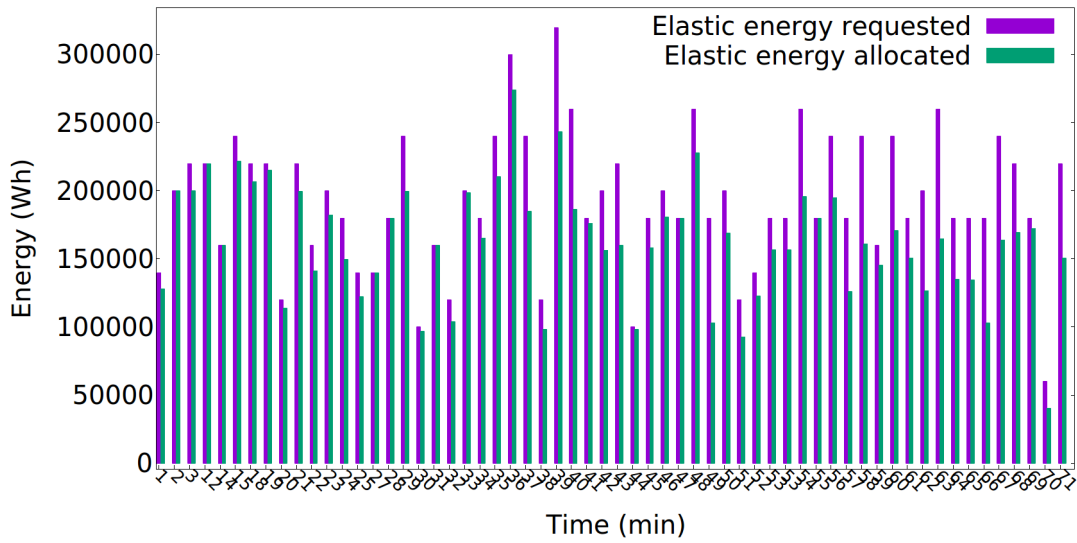
Η κατανομή της ελαστικής ενέργειας φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα $t = 0..2160$ για κάθε ζυγό του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 4.34. Ορίζουμε για κάθε ζυγό τον συντελεστή $u_i = E_i^{allocated}/E_i^{requested}$ που είναι ενδεικτικός του ποσοστού κάλυψης των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων που φορτίζονται στο δίκτυο. Τα βασικά στατιστικά μεγέθη φαίνονται στον πίνακα 4.5. Όπως φαίνεται, η αποκοπή φορτίου συμβαίνει πιο έντονα στους ηλεκτρικά πιο απομακρυσμένους κόμβους του συστήματος γεγονός που είναι αναμενόμενο από την λύση του προβλήματος 3.46. Είναι ορατό πώς για την περίπτωση των κόμβων που βρίσκονται ηλεκτρικά κοντά στο σημείο σύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο είναι εφικτή η σχεδόν πλήρης ενεργειακή κάλυψη των αναγκών για το σενάριο υπό εξέταση. Αντίθετα για τους πιο απομακρυσμένους ζυγούς φαίνεται η αποκοπή ενέργειας.



Σχήμα 4.32 Χρονοσειρές συντελεστή ζήτησης



Σχήμα 4.33 Χρονοσειρές ζήτησης-οριου φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων



Σχήμα 4.34 Κατανομή ενέργειας φόρτισης στους ζυγούς του συστήματος

Πίνακας 4.5 Στατιστικά μεγέθη κάλυψης ενεργειακών αναγκών ηλεκτρικών οχημάτων

u_{avg}	u_{std}	u_{min}	u_{max}
0.83	0.13	0.57	1.00

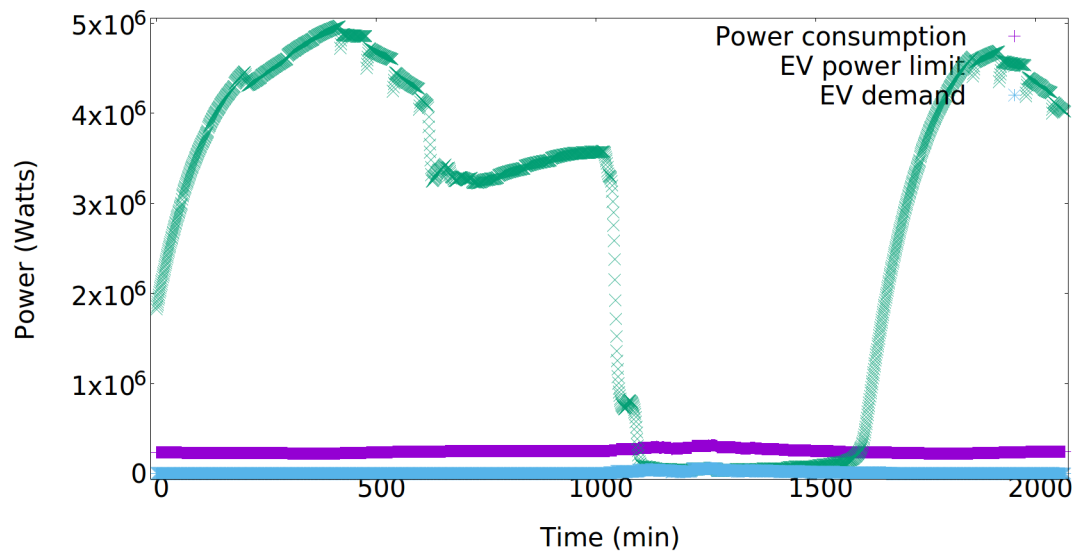
4.6 Αποτελέσματα εξομοιώσεων συστήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με κατανεμημένη επίλυση ορίων φόρτισης

Θεωρούμε το σύστημα του σχ 2.1, όπου η επίλυση του προβλήματος εκτίμησης ορίων φόρτισης πραγματοποιείται κατά την κατανεμημένη αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται στο 2.9 με βάση την σχ 3.46 ενώ το υποσύστημα ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων υλοποιείται κατά την κεντρική επίλυση του σχ 2.10 που βασίζεται στην 3.101. Επιπρόσθετα θεωρούμε την παρακάτω συνάρτηση p_j

$$p_j = 0 \quad \forall \quad j : \sum_{i \in I} x_i a_{ji} \leq 0.029$$

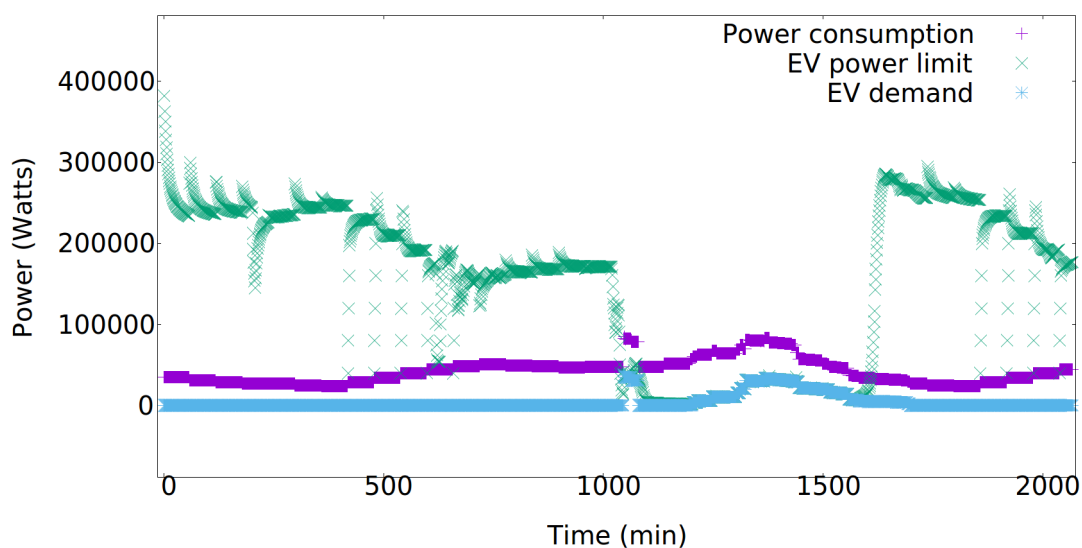
$$p_j > 10^2 \left(\frac{\sum_{i \in I} x_i a_{ji}}{0.029 E_n - \sum_{i \in I} p_i^{inelastic} a_{ji}} - 1 \right) \quad \forall \quad j : \sum_{i \in I} x_i a_{ji} \geq 0.029 \quad (4.15)$$

Παρατηρούμε την προσαρμογή των ορίων ισχύος για τον ζυγό 1 του δικτύου στο σχήμα 4.35 κατά τις απογευματινές ώρες που υπάρχει μεγάλη ζήτηση.



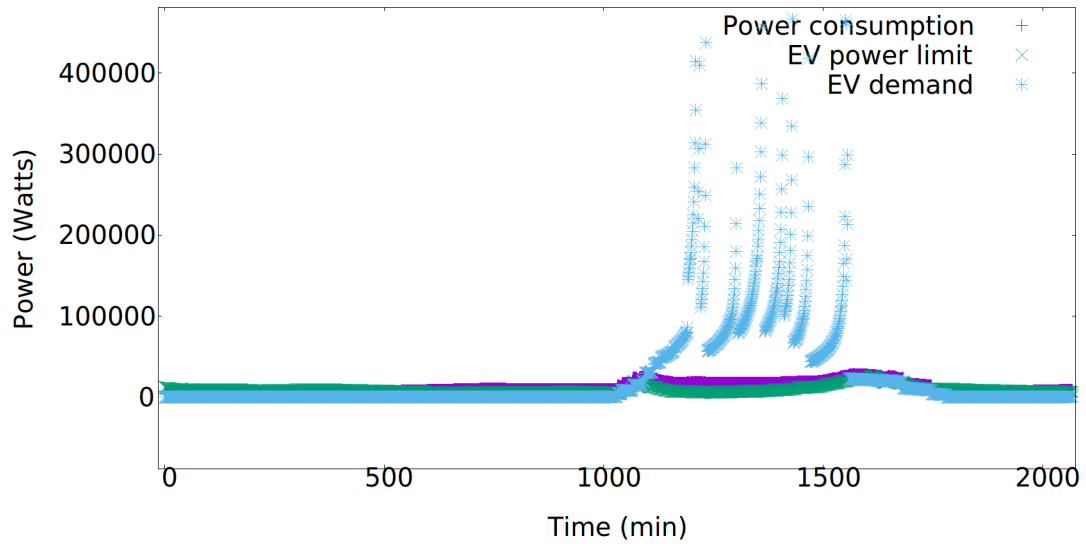
Σχήμα 4.35 Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 1 με κατανεμημένη επίλυση

Ομοίως παρατηρούμε την προσαρμογή των ορίων ισχύος για τους ζυγούς 3 και 59 κατά τις απογευματινές ώρες, όταν υπάρχει μεγάλη ζήτηση. βλ(4.36, 4.37)

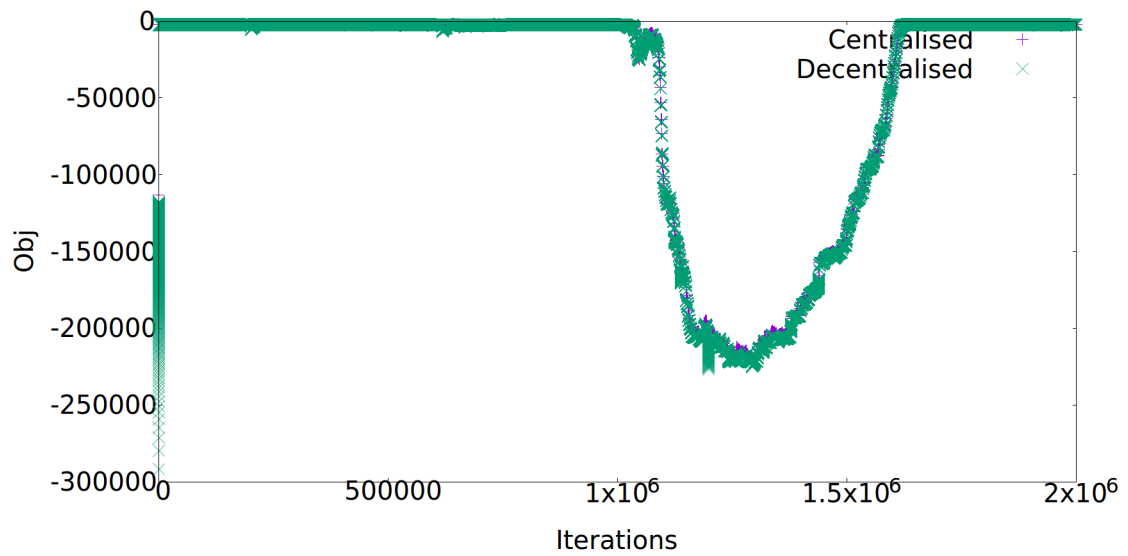


Σχήμα 4.36 Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 03 με κατανεμημένη επίλυση

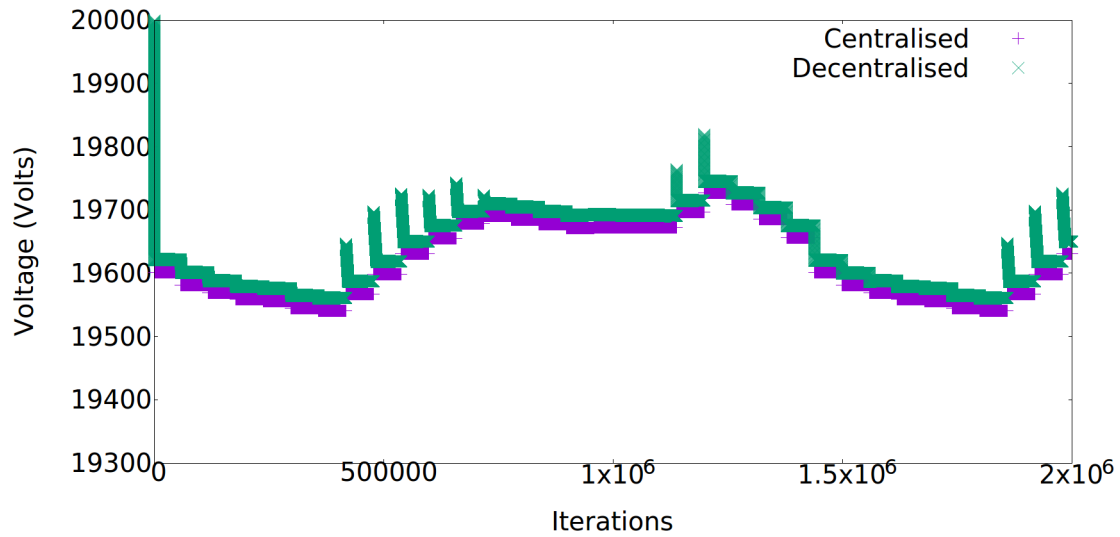
Επιπρόσθετα παρατηρούμε την ασυμπτωτική σύγκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης της κατανεμημένης λύσης "κοντά" στην κεντρική 4.38, την σύγκλιση της τιμής της επιτρεπόμενης πτώσης τάσηςλόγω φόρτισης οχημάτων, κοντά στην τιμή της κεντρικής επίλυσης 4.39 αλλά και την ασυμπτωτική σύγκλιση των ορίων ισχύος για τους ζυγούς 1,3,59. (4.40, 4.41,4.42)



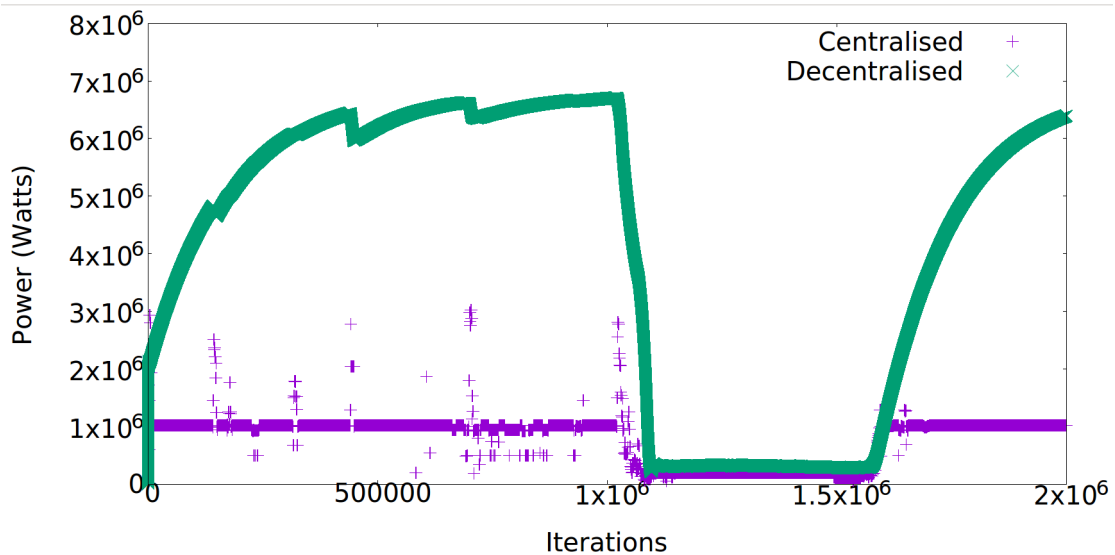
Σχήμα 4.37 Ακολουθία φόρτισης για τον ζυγό 59 με καταναμεμένη επίλυση



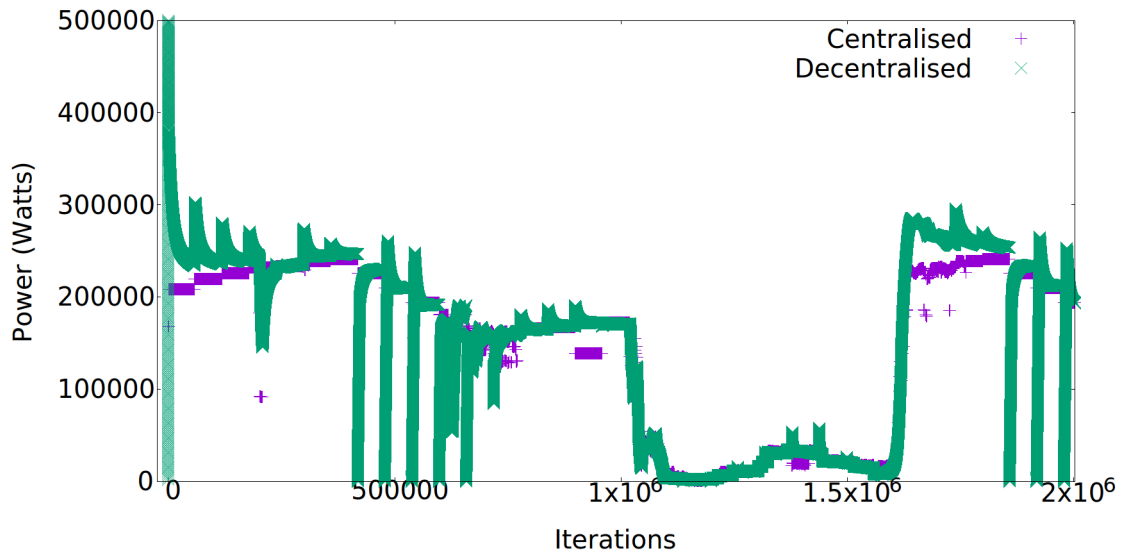
Σχήμα 4.38 Χρονοσειρά τιμής αντικειμενικής συνάρτησης κεντρικής-καταναμεμένης λύσης



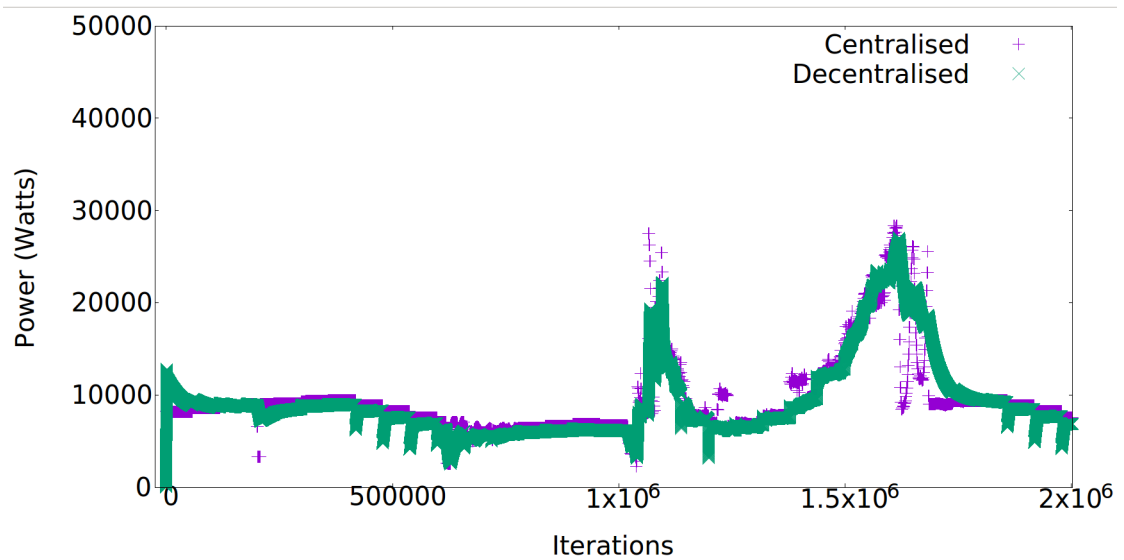
Σχήμα 4.39 Χρονοσειρά εκτιμώμενης πτώσης τάσης στον ζυγό 59 για την κεντρική και κατανεμημένη επίλυση λόγω φόρτισης EV



Σχήμα 4.40 Χρονοσειρά ορίων ισχύος ζυγού 1 για κεντρική και κατανεμημένη επίλυση



Σχήμα 4.41 Χρονοσειρά ορίων ισχύος ζυγού 3 για κεντρική και καταναεμημένη επίλυση

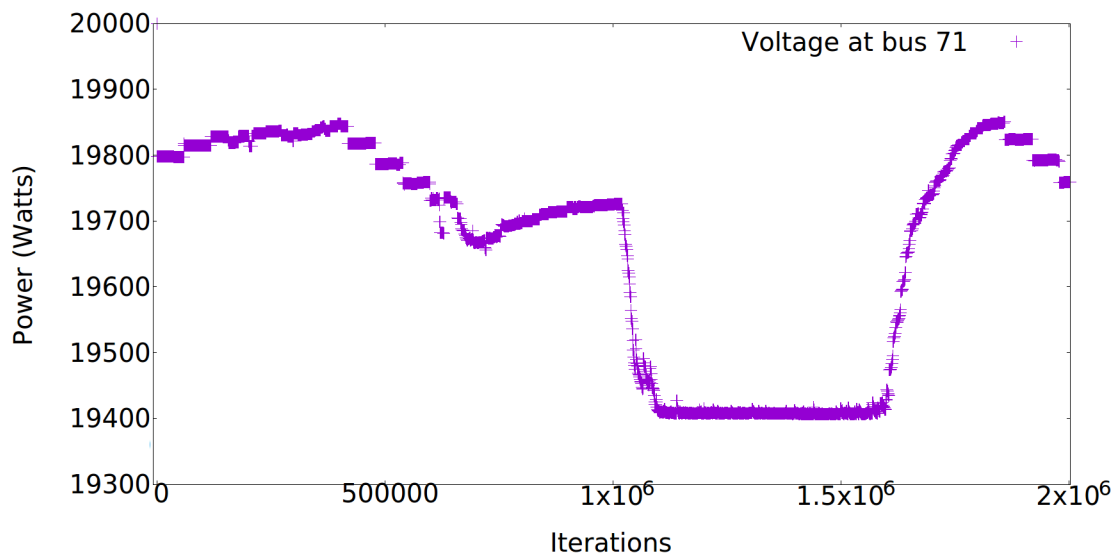


Σχήμα 4.42 Χρονοσειρά ορίων ισχύος ζυγού 59 για κεντρική και καταναεμημένη επίλυση

Πίνακας 4.6 Στατιστικά μεγέθη τάσης για το χρονικό διάστημα $t = 1100...1600$ κατανεμημένης επίλυσης

V_{avg}	V_{std}	V_{min}	V_{max}
19408.8	3.0	19406.4	19429.0

Στο σχ 4.43 φαίνεται η πτώση τάσης στον ηλεκτρικά πιο απομακρυσμένο ζυγό 59. Παρατηρούμε πως η πτώση τάσης είναι κοντά στο όριο 0.03 χωρίς να το υπερβαίνει.

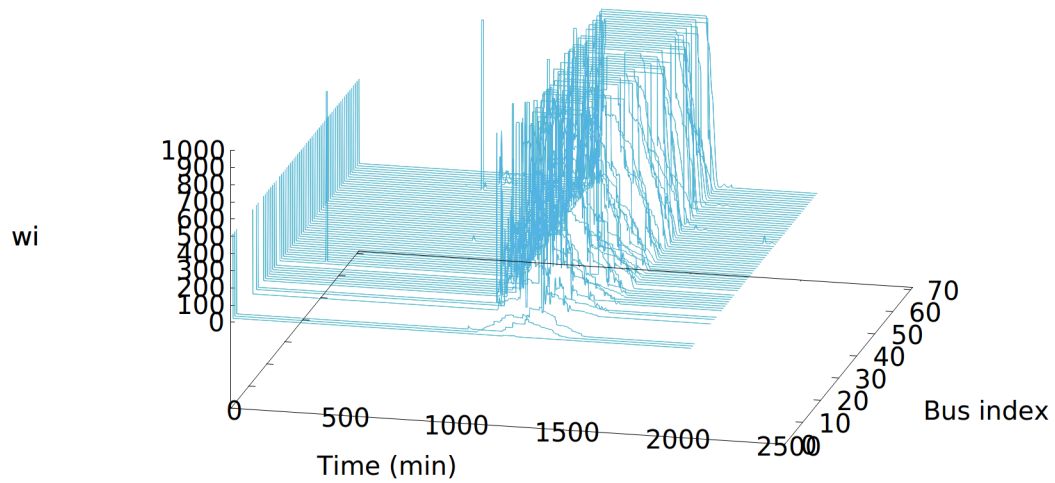


Σχήμα 4.43 Χρονοσειρά πτώσης τάσης ζυγού 71 για την κατανεμημένη επίλυση

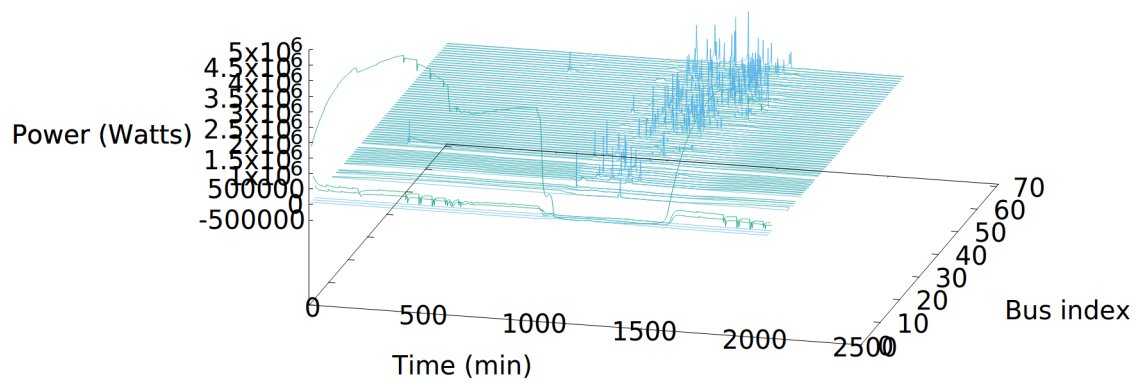
Η μέση τιμή, τυπική απόκλιση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή για το χρονικό διάστημα $t = 1100...1600$ φαίνεται στον πίνακα 4.6

Συνοψίζοντας παρατηρούμε τις χρονοσειρές του συντελεστή ζήτησης και της κατανομής του ορίου φόρτισης και ζήτησης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στα σχήματα 4.44, 4.45, όπου παρατηρείται όμοια συμπεριφορά του συστήματος με την περίπτωση κεντρικής επίλυσης. Η κατανομή της ελαστικής ενέργειας φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα $t = 0..2160$ για κάθε ζυγό του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 4.46.

Τα βασικά στατιστικά μεγέθη του συντελεστή $u_i = E_i^{allocated} / E_i^{requested}$ φαίνονται στον πίνακα 4.7



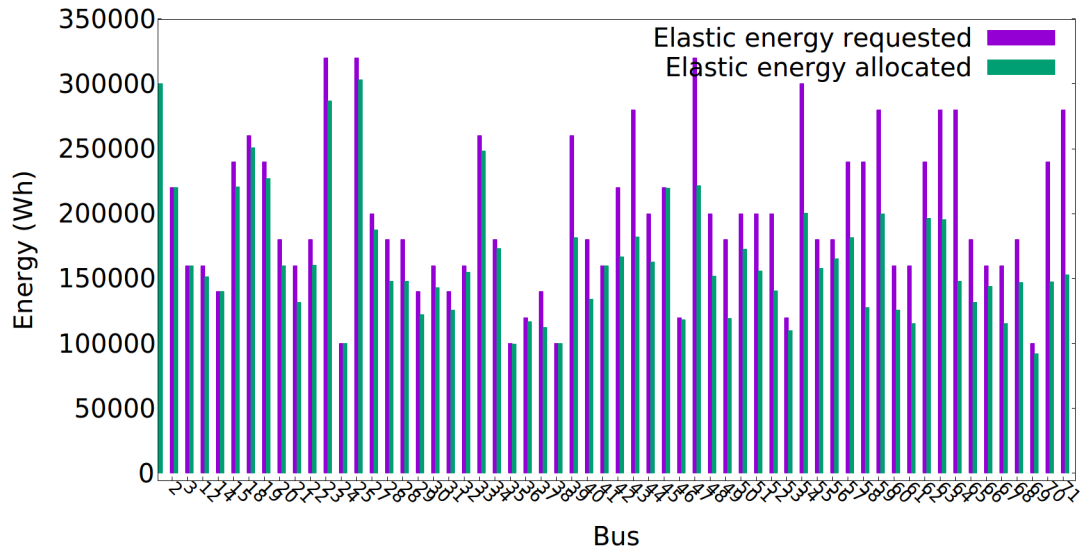
Σχήμα 4.44 Χρονοσειρές συντελεστή ζήτησης



Σχήμα 4.45 Χρονοσειρές ζήτησης-ορίου φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων για καταναεμημένη επίλυση

Πίνακας 4.7 Στατιστικά μεγέθη κάλυψης ενεργειακών αναγκών ηλεκτρικών οχημάτων για καταναεμημένη επίλυση

u_{avg}	u_{std}	u_{min}	u_{max}
0.82	0.13	0.52	1.00



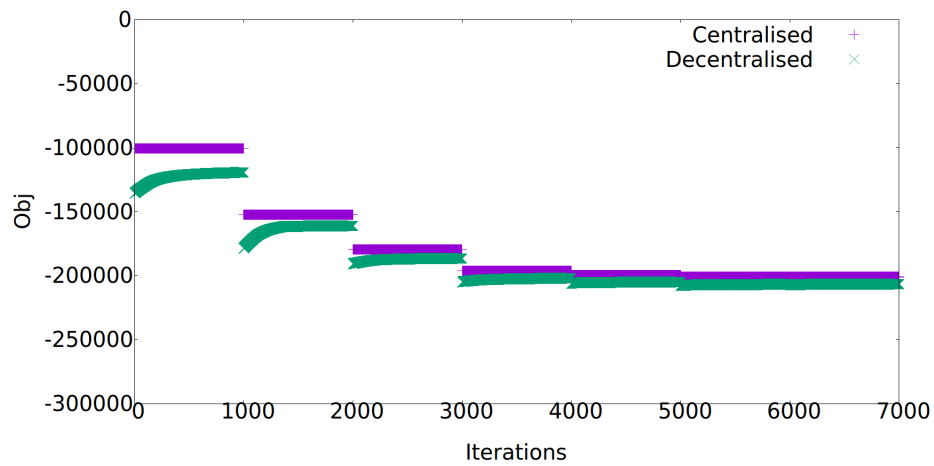
Σχήμα 4.46 Κατανομή ενέργειας φόρτισης στους ζυγούς του συστήματος για κατανεμημένη επίλυση

4.7 Αποτελέσματα εξομοιώσεων ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με κατανεμημένη επίλυση ορίων φόρτισης βασιζόμενη σε μετρήσεις τάσης.

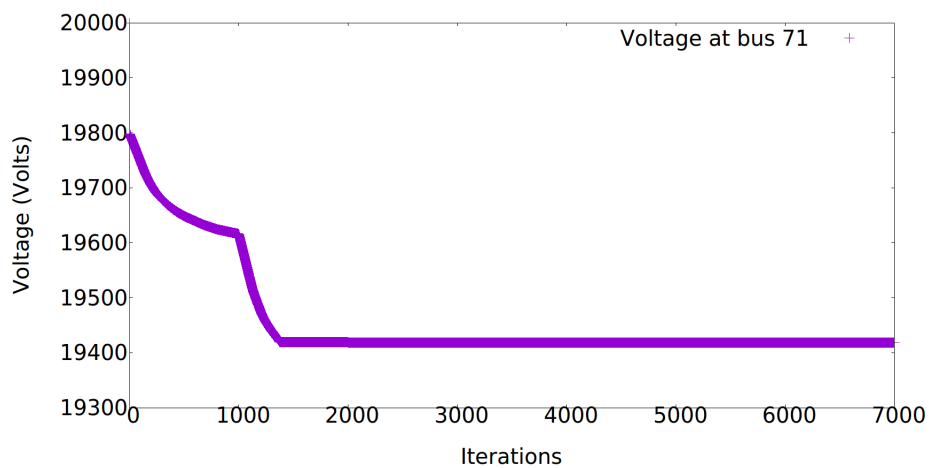
Στη συνέχεια θεωρούμε το σύστημα του σχ 2.1, όπου η επίλυση του προβλήματος εκτίμησης ορίων φόρτισης πραγματοποιείται κατά την κατανεμημένη αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται στο 2.9 με βάση την σχ 3.46 ενώ το υποσύστημα ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων υλοποιείται κατά την κεντρική επίλυση του σχ 2.10 που βασίζεται στην 3.101. Σε αυτή την περίπτωση θα υποθέσουμε ότι το φορτίο αποτελεί και τό όριο ισχύος το οποίο θα ανανεώνεται κάθε χρονική στιγμή με βάση την σχ 3.46. Υποθέτουμε πως κάθε λεπτό εξομοίωσης αποτελείται από 1000 επαναλήψεις. Σε αυτή την περίπτωση, αντί να υπολογίσουμε την εκτίμηση της πτώσης τάσης $\sum_{i \in I} x_i a_{ji}, \forall i \in I$ της σχ 4.15, πραγματοποιούμε μια μέτρηση τάσης σε κάθε ζυγό i η οποία τροφοδοτεί την συνάρτηση p_j της σχ 4.15. Επιπρόσθετα θεωρούμε πως κάθε λεπτό προσομοίωσης συνδέεται ένα όχημα και πως το ανελαστικό φορτίο ακολουθεί την κατανομή των σχημάτων 4.20, 4.21, 4.19, 4.19, 4.17 και πως ο συντελεστής ζήτησης ανανεώνεται με βάση την εξίσωση 3.52.

Στο σχήμα 4.47 φαίνεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για την κεντρική και κατανεμημένη επίλυση του συστήματος, όπου παρατηρούμε την ασυμπτωτική σύγκλιση.

Στη συνέχεια παρατηρούμε την πτώση τάσης στον ηλεκτρικά πιο απομακρυσμένο ζυγό του δικτύου διανομής 4.48



Σχήμα 4.47 Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για κεντρική και καταναεμημένη επίλυση με μετρήσεις τάσης



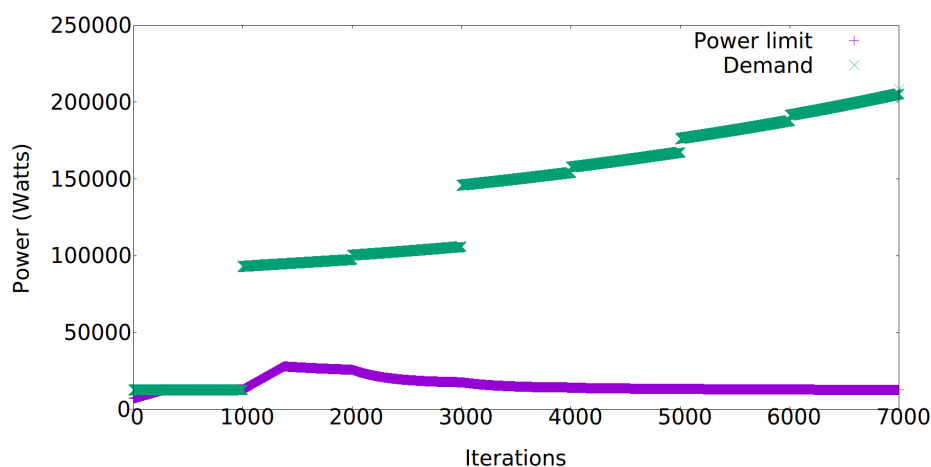
Σχήμα 4.48 Τάση στον ζυγό 59

Πίνακας 4.8 Στατιστικά μεγέθη τάσης στον ζυγό 59 ($t > 1750$)

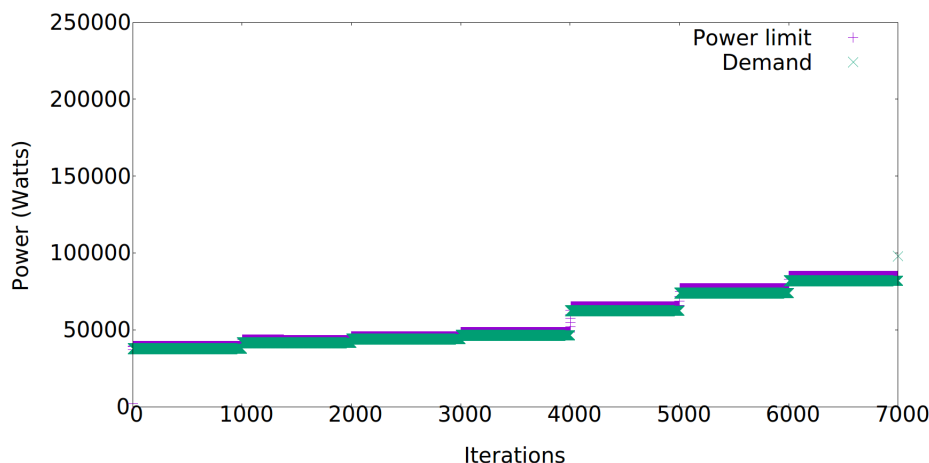
V_{avg}	V_{std}	V_{min}	V_{max}
19419.15	0.04	19419.05	19419.95

Παρατηρούμε πως η πτώση τάσης σταθεροποιείται σε μια σταθερή τιμή κοντά στο όριο 0.03pu (19.4kW). Στον πίνακα 4.8 φαίνονται τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά μεγέθη της τάσης.

Στην συνέχεια παρατηρούμε την ακολουθία του ορίου φόρτισης-ζήτησης για τους ζυγό 59,3,1, βλ σχ 4.49, 4.50, 4.51 όπως προκύπτει από την σχ 3.46.

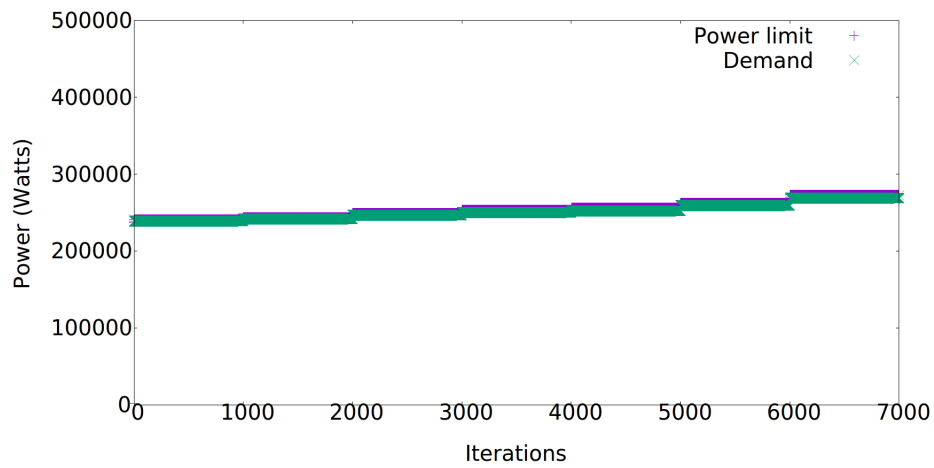


Σχήμα 4.49 Όριο ισχύος-ζήτηση στον ζυγό 59

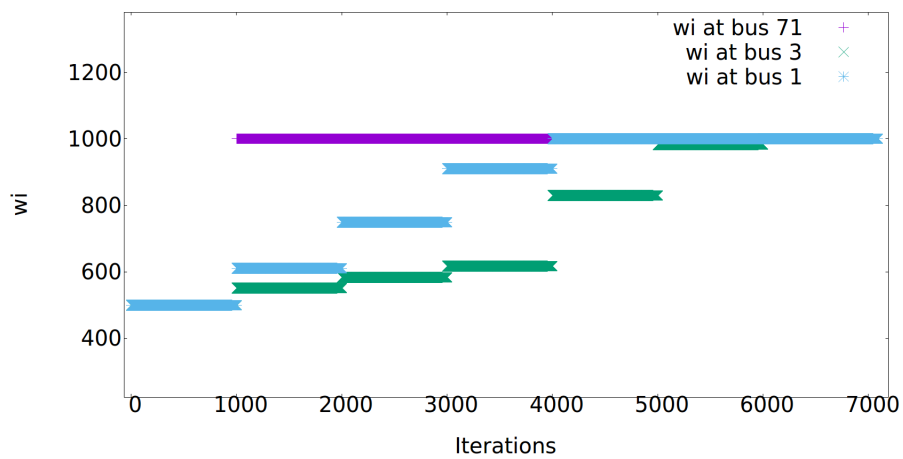


Σχήμα 4.50 Όριο ισχύος-ζήτηση στον ζυγό 3

Παρατηρούμε την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των ζυγών που βρίσκονται ηλεκτρικά εγγύτερα(1,3) ενώ παρατηρούμε την αποκοπή και την κάλυψη ενός ελα-



Σχήμα 4.51 Όριο ισχύος-ζήτηση στον ζυγό 1



Σχήμα 4.52 Χρονοσειρά συντελεστή ζήτησης w_i

χίστου φορτίου για τον κόμβο 59. Η προσαρμογή του συντελεστή ζήτησης w_i των ζυγών $\tau_{1,3,59}$ του δικτύου φαίνεται στο σχήμα 4.52. Παρατηρούμε πως ο ηλεκτρικά μακρύτερα κόμβος πραγματοποιεί αύξηση του συντελεστή ζήτησης νωρίτερα από τους ηλεκτρικά εγγύτερα κόμβους που μπορούν να ικανοποιήσουν την ζήτησή τους με σχετικά μικρότερη αύξηση.

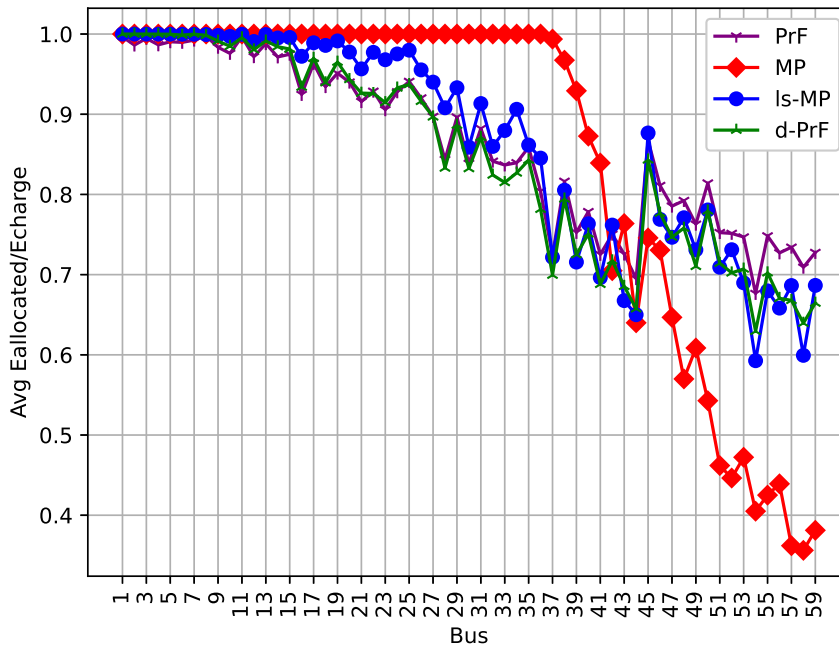
Η χρήση των απευθείας μετρήσεων τάσης απλοποιεί τους υπολογισμούς που χρειάζονται για τον υπολογισμό της συνάρτησης p_j αφού πλέον δεν απαιτείται ο υπολογισμός του αθροίσματος γινομένων $\sum_{i \in I} x_i a_{ji}, \forall i \in I$. Απλοποιεί και τις απαιτήσεις επικοινωνίας μεταξύ των ζυγών καθώς δεν απαιτείται η γνώση του ορίου φόρτισης $x_i, \in I$, από ένα ζυγό $j \in I$ για να υπολογιστεί η ποσότητα 4.15. Επομένως αρκεί μόνο η αποστολή (broadcast) του σήματος p_j σε όλους τους ζυγούς του δικτύου διανομής για την προσεγγιστική επίλυση του προβλήματος προσδιορισμού φορτίου. Επειδή σε αυτή την περίπτωση η διεργασία διαπραγμάτευσης των ορίων ισχύος γίνεται ταυτόχρονα με την κατανάλωση φόρτιου και όχι παράλληλα όπως συζητήθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, είναι αναμενόμενο τα όρια ισχύος να παραμένουν αρκετά μικρότερα της θεωρητικής τους τιμής για κάποιο χρονικό διάστημα, πράγμα που περιορίζει και την απόδοση ισχύος σε σχέση με τις μεθόδους που μελετήθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

4.8 Σύγκριση στρατηγικής αναλογικής δικαιοσύνης με άλλες στρατηγικές επιμερισμού φόρτισης

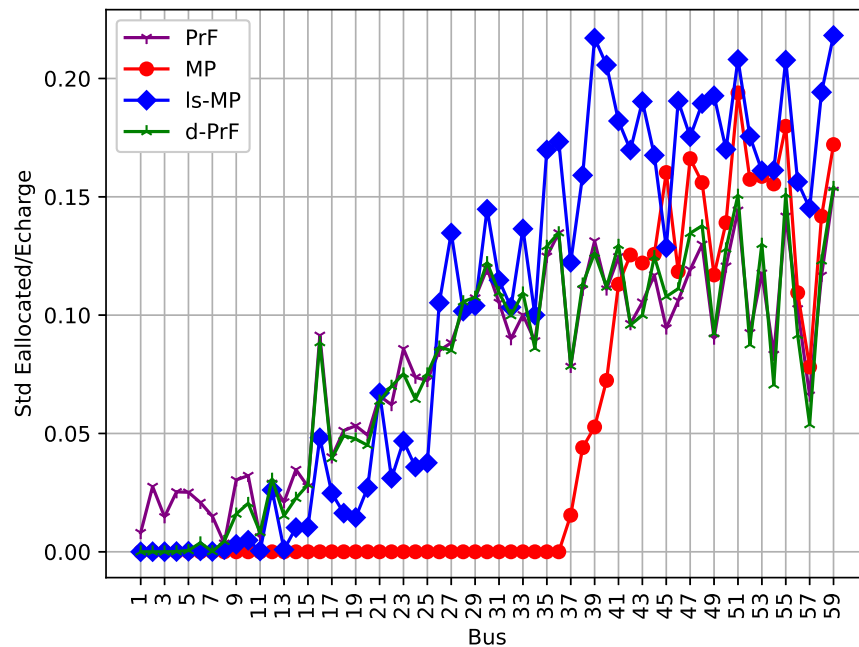
Στη συνέχεια διερευνούμε την ικανότητα της πρότασής μας (PrF, d-PrF) να εκχωρεί ισχύ ακόμη και σε ευαίσθητους σε τάση ζυγούς προς το τέλος της γραμμής του συστήματος διανομής και την συγκρίνουμε με δύο άλλες προσεγγίσεις. Θεωρούμε την μέγιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος (MP) όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (5) του [79]) και την κατανομή ισχύος ελαχίστων τετραγώνων (ls-MP) που εκφράζεται στην εξίσωση 4.16. Επαναλαμβάνουμε δέκα φορές την προσομοίωση που παρουσιάζεται στις Ενότητες 4.5, 4.6. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα σχήματα 4.53, 4.54, 4.55 αποκαλύπτουν ότι ο Ο λόγος ενέργειας για τα PrF και d-PrF είναι πιο κοντά στο ένα από το MP και το ls-MP κατά μήκος του απομακρυσμένου μισού της γραμμής και η απόκλιση τόσο του MP όσο και του ls-MP σχεδόν διπλασιάζεται σε σύγκριση με τα PrF και d-PrF. Επιπλέον, το Σχήμα 4.55 δείχνει την κατανομή του λόγου προσφοράς/ζήτησης κάτω του 0,5 να εμφανίζεται σε συχνότητα 13 για MP και ls-MP αντίστοιχα, ενώ η αντίστοιχη συχνότητα για τα PrF και d-PrF είναι 0,1 ακολουθούν έτσι ένα πιο μεροληπτικό και μη «κοινωνικά δίκαιο» μοτίβο σε σύγκριση με το PrF, αφού η περικοπή αυξάνεται στο τέλος της γραμμής δια-

νομής. Αυτή η ιδιότητα οφείλεται στην αναλογική αύξηση τής ευαισθησίας τάσης κάθε ζυγού με την απόστασή του από τον υπο- σταθμός διανομής, η οποία είναι επηρεάζει την κατανομή του φορτίου λιγότερο στην περίπτωση PrF, d-PrF.

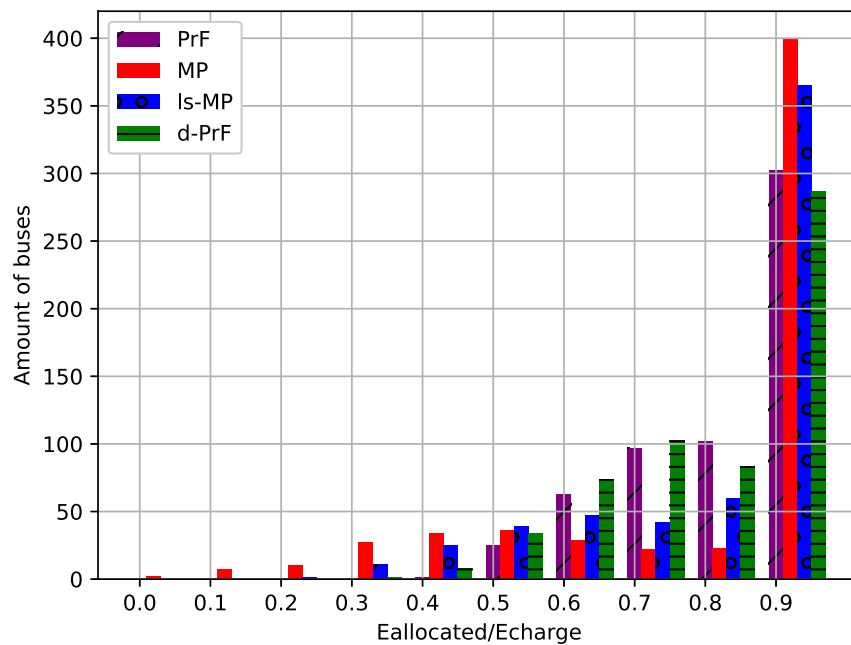
$$\min_P \|1 - P^{final}/P_{elastic}\|^2_{s.t} (3.44), (3.31) \quad (4.16)$$



Σχήμα 4.53 Avg Eallocated/Edemanded



Σχήμα 4.54 Std Eallocated/Edemanded



Σχήμα 4.55 πλήθος των ζυγών με Eallocated/Edemanded

Κεφάλαιο 5

Διαχείριση φορτίου δυναμικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Η δυναμική (εν-κινήσει) ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων (ΗΟ) στοχεύει στην αύξηση της εμβέλειας ΗΟ, στη μείωση του μεγέθους της μπαταρίας και των σχετικών δαπανών. Επιπλέον, ελαχιστοποιεί την ανάγκη για επαναφόρτιση, αυξάνοντας έτσι την άνεση ενός ταξιδιού. Ενώ το πλαίσιο για την διαχείριση φορτίου στη στατική φόρτιση είναι αρκετά καθορισμένο, πρέπει να επανεκτιμηθεί με έμφαση στις λειτουργικές απαιτήσεις για δυναμική φόρτιση ΗΟ. Στην συνέχεια αναλύονται οι απαιτήσεις της διαχείρισης δυναμικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων ενός περιβάλλοντος δυναμικής φόρτισης προκειμένου να αναδειχτούν σημαντικές παράμετροι για τον σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων.

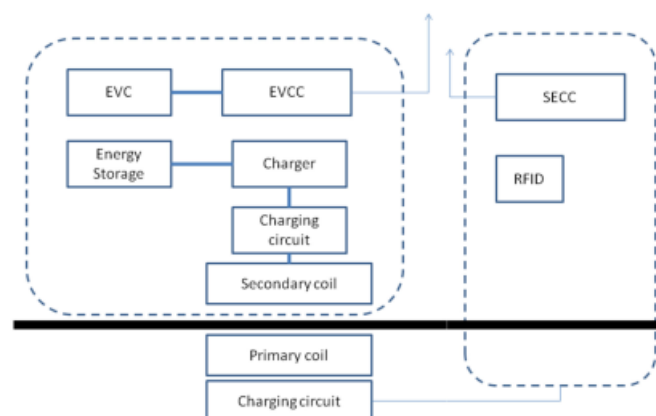
5.1 Εισαγωγή

Η υποδομή ασύρματης και δυναμικής φόρτισης αποτελείται από μια σειρά πηνίων φόρτισης που είναι ενσωματωμένα στο οδόστρωμα. Σε αντίθεση με την μεγάλη σε διάρκεια και συνεχή στατική φόρτιση, η δυναμική φόρτιση περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό περιόδων μικρο-φόρτισης που τυπικά διαρκούν μόνο μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου (ανάλογα με την ταχύτητα του οχήματος) [80]. Επιπλέον, πρέπει η υπηρεσία φόρτισης να παρέχεται αμέσως μόλις το όχημα βρεθεί πάνω απο την υποδομή φόρτισης. Το γεγονός αυτό διαφέρει από την περίπτωση της στατικής φόρτισης όπου υπάρχει περιθώριο χρόνου για την εξεύρεση ενός βέλτιστου προφίλ πριν αρχίσουν οι διαδικασίες φόρτισης [57]. Επιπλέον, στην δυναμική ασύρματη φόρτιση υπάρχει ασάφεια όσον αφορά την ώρα αναχώρησης του οχήματος. Οι αυτοκινητόδρομοι είναι δυναμικά περιβάλλοντα όπου τα

οχήματα μπορούν να επιλέξουν να αφήσουν μια συγκεκριμένη λωρίδα φόρτισης σε μη προκαθορισμένες χρονικές στιγμές, λόγω κυκλοφορίας ή άλλων συμβάντων. Αντίθετα, ο χρόνος αναχώρησης του οχήματος θεωρείται ότι είναι γνωστός από τον εξοπλισμό διαχείρισης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EVSE). Δεδομένου ότι ο χρόνος αναχώρησης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι βασική παράμετρος για τις περισσότερες διαδικασίες διαχείρισης φόρτισης [81], είναι αμφίβολο εάν τέτοιες προσεγγίσεις θα μπορούσαν να εφαρμοστούν ως έχουν για δυναμική φόρτιση.

5.2 Πρωτόκολλα επικοινωνίας και αρχιτεκτονική συστημάτων δυναμικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Η διαχείριση φόρτισης αποτελείται από πολλαπλές λειτουργίες με ετερογενείς στόχους που υποστηρίζονται από πρωτόκολλα επικοινωνιών (TΠΕ) που έχουν ωριμάσει λόγω της εφαρμογής τους στην περίπτωση στατικής φόρτισης. Το πρωτόκολλο ISO/IEC 15118 καθορίζει το πληροφοριακό σύστημα οχήματος και υποδομής τόσο για την ενσύρματη όσο και για την ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων [81]. Το πρότυπο προσδιορίζει 2 βασικά υποσυστήματα: τον ελεγκτή επικοινωνιών ηλεκτρικού οχήματος (EVSE) και των ελεγκτή επικοινωνιών υποδομής φόρτισης (SECC). Ο ελεγκτής επικοινωνιών έχει διεπαφή προς τα κυκλώματα φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος, συνήθως μέσω του επικοινωνιακού πρωτοκόλλου πραγματικού χρόνου CAN [82] και μέσω αυτού μπορεί να μεταβάλλει την ισχύ φόρτισης του οχήματος.



Σχήμα 5.1 Αρχιτεκτονική συστήματος επικοινωνιών διαχείρισης δυναμικής φόρτισης

Η ανάγκη για μικρή καθυστέρηση στις επικοινωνίες κατά την διάρκεια της διαπραγμάτευσης του προφίλ φόρτισης καθιστά λύσεις της μορφής 3.56 ελκυστικές καθώς δίνουν την δυνατότητα για άμεση φόρτιση σε κάθε όχημα που βρίσκεται στην υποδομή και σταδιακή σύγκλιση σε μια βέλτιστη τιμή ισχύος φόρτισης, όπως φάνηκε και μέσα από τα παραδείγματα του κεφαλαίο 4.

Για την περίπτωση της δυναμικής φόρτισης θεωρούμε τη μοντέλο της προσθετικής αύξησης και πολλαπλασιαστικής μείωσης (AIMD) [83] όπου κάθε όχημα αυξάνει την ισχύ φόρτισής του γραμμικά συνεχώς και την μειώνει πολλαπλασιαστικά όταν λάβει σήμα που υποδηλώνει ότι η συνολική ισχύς φόρτισης της υποδομής έχει υπερβεί ένα προκαθορισμένο όριο P_{max} .

$$\begin{aligned} p_i[t+1] &= p_i[t] + a\delta t \\ p_i[t+1] &= \beta p_i[t], \\ \sum_{i=0}^{N-1} p_i[t] &\geq P_{max} \end{aligned} \tag{5.1}$$

Η παράμετρος a καθορίζει τον ρυθμό αύξησης της ισχύος (kW/s), δt η διάρκεια της γραμμικής αύξησης και $\beta \in (0, 1)$. Ο ρυθμός αύξησης a μπορεί να καθοριστεί από περιορισμούς σχετιζόμενους με την διάρκεια ζωής της μπαταρίας [46]. Η παράμετρος β , συμβάλλει στην μείωση της ισχύος φόρτισης έτσι ώστε $\sum_{i=0}^{N-1} p_i[t] \leq P_{max}$. Υψηλές τιμές τιμές του β είναι επιθυμητές καθώς οδηγούν σε μικρότερη διαφορά μεταξύ $\sum_{i=0}^{N-1} p_i[t]$, P_{max} . Ωστόσο, υπάρχει ένα ανώτατο όριο για την τιμή β πάνω από το οποίο, η σχ 5.1 οδηγεί σε συνεχόμενη αύξηση της ισχύος φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτό συμβαίνει όταν η καθυστέρηση δt μεταξύ της μέτρησης του συνολικού φορτίου και της μετάδοσης του σήματος πολλαπλασιαστικής μείωσης προκαλεί αύξηση της ισχύος φόρτισης που είναι μεγαλύτερη από την μείωση της συνολικής ισχύος. Επομένως το άνω όριο για την παράμετρο β μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [84], [85]

$$\begin{aligned} a\delta t N &< (1 - \beta)(P_{max} + a\delta t N) \\ \beta &< 1 - \frac{a\delta t N}{P_{max} + a\delta t N} \end{aligned} \tag{5.2}$$

5.3 Εξομοιώσεις συστήματος διαχείρισης φορτίου ασύρματης φόρτισης

Οι εξομοιώσεις της διαχείρισης φορτίου ασύρματης φόρτισης πραγματοποιήθηκαν στο υπολογιστικό πακέτο VEINS [86]. Το υπολογιστικό πακέτο VEINS ενσωματώνει α-

κριβή μοντέλα των πρωτοκόλλων ασύρματων επικοινωνιών 802.11p (WAVE) και (LTE) με την ενσωμάτωση του υπολογιστικού πακέτου simuLTE [87]. Στο υπο εξέταση σύστημα, θεωρούμε μια λεωφόρο μήκους 1km που είναι εξοπλισμένη με έναν πομποδέκτη 802.11p που βρίσκεται στην μέση της. Δυο διαφορετικά σενάρια έχουν υλοποιηθεί; αρχικά έχουμε θεωρήσει μια σταθερή τιμή για την μέγιστη ισχύ που μπορεί να αποδοθεί στα ηλεκτρικά οχήματα και έπειτα θεωρούμε μεταβλητή ισχύ που προέρχεται από μια ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 1500kW. Η μονάδα ελέγχου του συστήματος διαχείρισης φορτίου πραγματοποιεί τις εξής ενέργειες; μετράει την συνολική ισχύ φόρτισης των οχημάτων και μεταδίδει ένα σήμα ελέγχου στα οχήματα που βρίσκονται στην λεωφόρο όταν η συνολική ισχύς ξεπερνά το όριο της λεωφόρου μέσω του πομποδέκτη 802.11p. Τα οχήματα αυξάνουν γραμμικά την ισχύ φόρτισης όταν δεν λαμβάνουν το σήμα ελέγχου και μειώνουν πολλαπλασιαστικά τον ρυθμό φόρτισης κατά την σταθερά β , κατά την λήψη του σήματος ελέγχου. Τα οχήματα διατηρούν την μεταξύ τους απόσταση κατά τον κανόνα των 2 δευτερολέπτων [88] και κινούνται με ταχύτητα 50km/h.

Θεωρούμε τον λόγο u μεταξύ της μέγιστης ισχύος και της ισχύος φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων που φορτίζουν εν-κινήσει ως εξής

$$u = \frac{P_{charge}}{P_{max}} \quad (5.3)$$

Για την πρώτη κατηγορία εξομοιώσεων θεωρούμε ένα σενάριο, όπου το σύστημα δυναμικής φόρτισης αποτελείται από πολλαπλούς πομπούς ισχύος που βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους. Στο δεύτερο σενάριο θεωρούμε ότι δεν υπάρχει κενό μεταξύ των πομπών ισχύος του συστήματος δυναμικής φόρτισης, και τελικά στο τρίτο σενάριο, υποθέτουμε αυξημένη καθυστέρηση στο μέτρηση της ισχύος του συστήματος. Οι παράμετροι φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 5.1

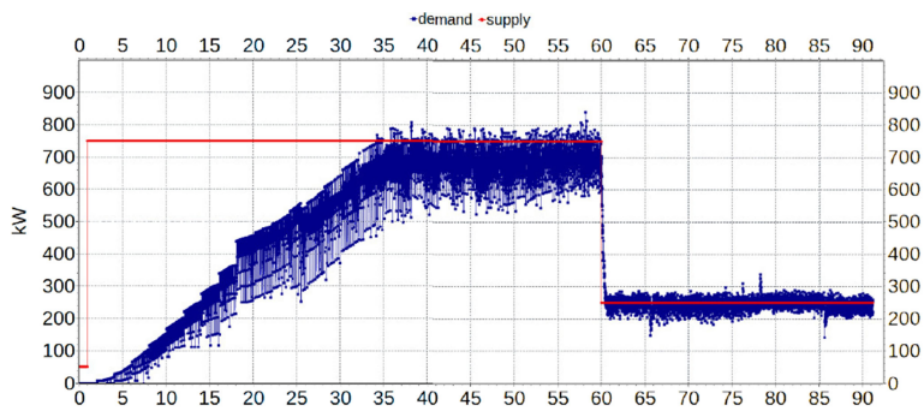
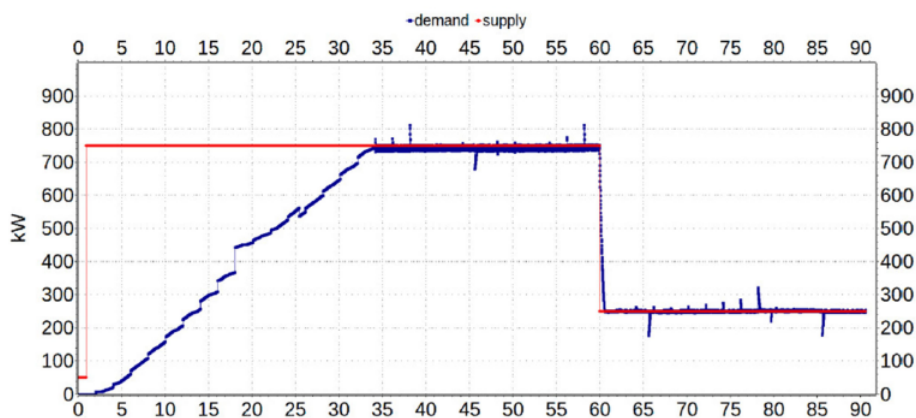
Τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων φαίνονται στα σχήματα 5.2, 5.3, 5.4. Τα στατιστικά στοιχεία του λόγου u για τις περιπτώσεις 5.2, 5.3, 5.4 φαίνεται στον πίνακα 5.3

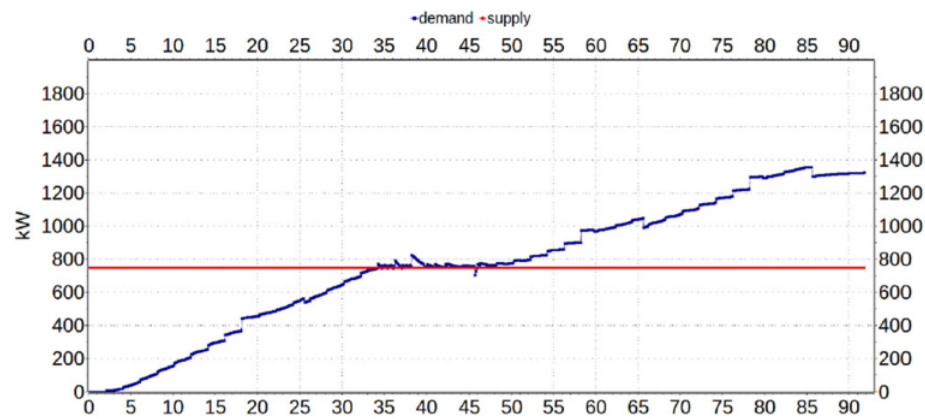
Στο σχήμα 5.2, παρατηρούμε μεγάλες διακυμάνσεις στην ισχύ λόγω της αρχιτεκτονικής του συστήματος ασύρματης φόρτισης με διάκενο μεταξύ των πομπών. Παρατηρούμε ότι η ισχύς των οχημάτων "ακολουθεί" την κυματομορφή του περιορισμού μέγιστης ισχύος P_{max} . Στο σχήμα 5.3 φαίνεται η μείωση των διακυμάνσεων στην ισχύ λόγω της μείωσης του διακένου μεταξύ των πομπών ισχύος. Τέλος παρατηρούμε στο σχήμα 5.4, την παραβίαση του περιορισμού ισχύος λόγω της αύξησης του χρόνου δειγματοληψίας της μέτρησης ισχύος που προκαλεί παραβίαση της σχέσης 5.2.

Η διαχείριση φορτίου μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [89]. Κύριο χαρακτηριστικό της διαχείρισης φορτίου είναι η ευελιξία στην κα-

Πίνακας 5.1 Παράμετροι εξομοιώσεων συστήματος διαχείρισης φορτίου

Παράμετρος	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Μήκος λεωφόρου	1kM	1kM	1kM
Μήκος πομπού ισχύος	1.4m	1.4m	1.4m
Απόσταση μεταξύ πομπών	0.2m	0m	0m
Ονομ ισχύς	50kW	50kW	50kW
Μεγ ισχύς	750kW	750kW	750kW
Ρυθμός άφιξης οχημάτων	2s	2s	2s
Ταχύτητα οχημάτων	50kM/h	50kM/h	50kM/h
Ρυθμός δειγματοληψίας	0.01s	0.01s	0.1s
Παράμετρος α	10kW/s	10kW/s	10kW/s
Παράμετρος β	0.97	0.97	0.97
Μέγιστος αριθμός οχημάτων	35	35	35
Χρόνος μετάδοσης σήματος	3ms	3ms	3ms
ελέγχου 802.11p			

**Σχήμα 5.2** Αποτελέσματα εξομοιώσεων διαχείρισης φορτίου για την περίπτωση πομπών ισχύος με διάκενο**Σχήμα 5.3** Αποτελέσματα εξομοιώσεων διαχείρισης φορτίου για την περίπτωση πομπών ισχύος χωρίς διάκενο



Σχήμα 5.4 Αποτελέσματα εξομοιώσεων διαχείρισης φορτίου με επιπρόσθετη καθυστέρηση στην μέτρηση του φορτίου

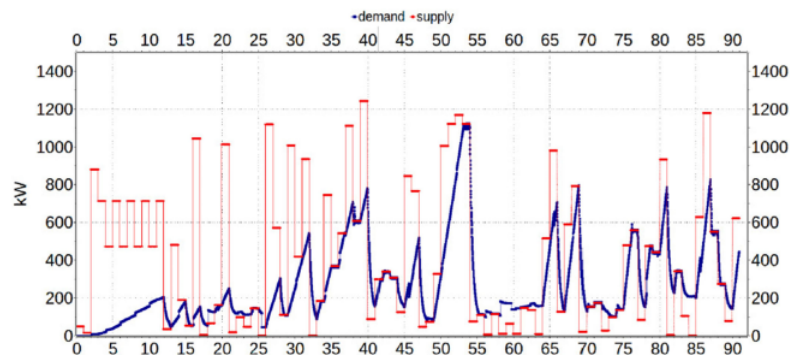
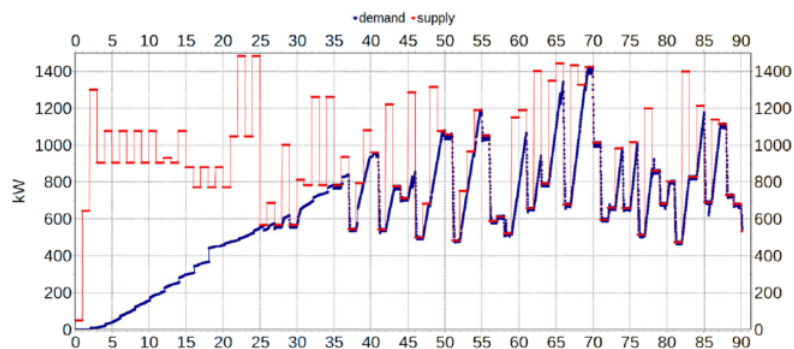
Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα εξομοιώσεων συστήματος διαχείρισης φορτίου

Παράμετρος	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Μέση τιμή u ($t > 40s$)	0.95	1.00	1.18
Μέγιστη τιμή u ($t > 40s$)	2.79	2.97	2.56
Ελάχιστη τιμή u ($t > 40s$)	0.57	0.70	0.84
Τυπική απόκλιση u ($t > 40s$)	0.12	0.03	0.14

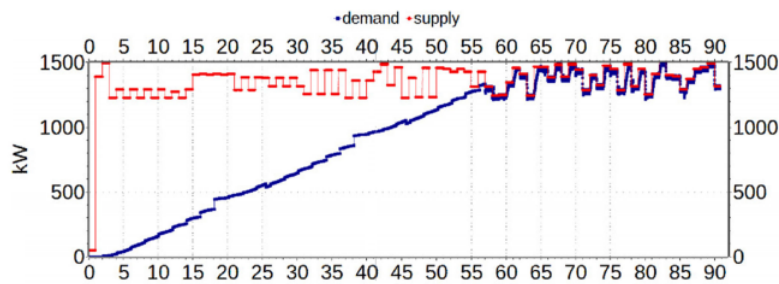
Πίνακας 5.3 Παράμετροι εξομοιώσεων διαχείρισης φορτίου με τροφοδοσία απο ανεμογεννήτρια

Παράμετρος	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Μέση ταχύτητα αέρα u	15m/s	15m/s	15m/s
Ελάχιστη ταχύτητα αέρα	1m/s	10m/s	14m/s
Ονομαστική ισχύς	1500kW	1500kW	1500kW
Επιφάνεια ανεμογεννήτριας	715m ²	715m ²	715m ²
$1/2\rho C_p$	0.625	0.625	0.625
Περίοδος ανανέωσης ταχύτητας	1s	1s	1s

τανάλωση ισχύος. Στη συνέχεια θεωρούμε ότι η λεωφόρος ασύρματης φόρτισης τροφοδοτείται από μια ανεμογεννήτρια με χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον πίνακα

**Σχήμα 5.5** Αποτελέσματα εξομοιώσεων διαχείρισης δυναμικής φόρτισης (Σενάριο 1)**Σχήμα 5.6** Αποτελέσματα εξομοιώσεων διαχείρισης δυναμικής φόρτισης (Σενάριο 2)

Παρατηρούμε στον πίνακα 5.4, ότι για μικρότερη διακύμανση ταχύτητας αέρα (Σενάριο 3,) βλ σχ. 5.7 η κατανάλωση ισχύος του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων (35 οχήματα /km) μπορεί να απορροφήσει την ισχύ που του παρέχεται απο την ανεμογεννήτρια. Για μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα, απαιτείται μεγαλύτερος ρυθμός στην αύξηση ισχύος, δηλαδή



Σχήμα 5.7 Αποτελέσματα εξομοιώσεων διαχείρισης δυναμικής φόρτισης (Σενάριο 3)

Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα εξομοιώσεων συστήματος διαχείρισης δυναμικής φόρτισης με ανεμογεννήτρια

Παράμετρος	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Μέση τιμή u ($t > 60s$)	11.978	0.90	0.98
Μέγιστη τιμή u ($t > 60s$)	1107	1.98	1.14
Ελάχιστη τιμή u ($t > 60s$)	0.04	0.33	0.84
Τυπική απόκλιση u ($t > 60s$)	61	0.20	0.02

μεγαλύτερη τιμή της μεταβλητής α και λόγω της σχ 5.2, μικρότερη τιμή της παραμέτρου β . Παρατηρώντας την απόκριση του συστήματος για μεγαλύτερη διακύμανση αέρα στα σχ 5.6, 5.5 παρατηρούμε πως η ισχύς φόρτισης αποκρίνεται στις μεταβολές της μέγιστης επιτρεπτής ισχύος. Ωστόσο, και στις δυο περιπτώσεις παρουσιάζεται μια καθυστέρηση τόσο στην αύξηση όσο και στην μείωση της ισχύος που οδηγεί σε μεγάλες διακυμάνσεις του λόγου u βλ σενάριο 1,2 στον πίνακα 5.4. Ειδικότερα για την περίπτωση του σεναρίου 1, όπου η ελάχιστη ταχύτητα ισούται με 1m/s, παρατηρούμε ότι η ισχύς μπορεί να παραμείνει σε υψηλά επίπεδα στην περίπτωση μεάλης πτώσης ταχύτητας γεγονός που οδηγεί και σε μεγάλη μέση τιμή της ποσότητας u .

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και επεκτάσεις

Η κατανομή της ισχύος φόρτισης στα ΗΟ θα αποτελέσει βασική υπηρεσία της μελλοντικής υποδομής φόρτισης. Η δικαιοσύνη στην ανάθεση του φορτίου (μεταξύ των ΗΟ) και η δυνατότητα σχεδιασμού αλγορίθμων που λειτουργούν για μεγάλο πλήθος ΗΟ αποτελούν δύο σημαντικές προκλήσεις για σενάρια φόρτισης που απαιτούν αποκοπή ενέργειας. Στα πλαίσια αυτής της διατριβής εστιάσαμε σε μια ακτινική γραμμή διανομής με περιορισμό στην πτώσης τάσης που επιτρέπεται σε αυτή. Διαχωρίσαμε την ανάθεση ισχύος ΗΟ σε δύο επιμέρους προβλήματα; αρχικά, λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή ισχύος στο επίπεδο του διαχειριστή του δικτύου διανομής λαμβάνοντας υπόψη τις ενεργειακές ανάγκες οικιών καθώς και ηλεκτρικών οχημάτων ενώ στη συνέχεια εξετάσαμε την διανομή της διαθέσιμης ισχύος στα συμμετέχοντα ΗΟ. Το πρώτο πρόβλημα, λύθηκε με βάση την στρατηγική αναλογικής δικαιοσύνης, έγινε διεξοδική ανάλυση για τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να προσδιοριστεί ο συντελεστής ζήτησης για αυτή την περίπτωση και αναλύθηκαν θεωρητικά και πειραματικά οι αλγόριθμοι επίλυσης. Ειδικά για την κατανεμημένη επίλυση προτάθηκε μετατροπή του υπάρχοντος αλγορίθμου και αποδείχθηκε η ολικά ασυμπτωτική σύγκλιση του, σε σταθερό σημείο κοντά στο βέλτιστο σημείο επίλυσης. Το δεύτερο πρόβλημα της κατανομής ισχύος ΗΟ επιλύεται με βάση την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Το πρόβλημα διατυπώθηκε με τέτοια μορφή, έτσι ώστε να είναι επιλύσιμο και με την κατανεμημένη μεθοδολογία ADMM. Οι προσομοιώσεις έδειξαν την ικανότητα του συστήματος να κατανεμει την ζήτηση ΗΟ με πιο δίκαιο τρόπο σε σχέση με προσεγγίσεις ελαχίστων τετραγώνων ή με βάση προσεγγίσεις γραμμικού προγραμματισμού, υπό περιορισμένη πτώση τάσης. Επίπροσθετα για την περίπτωση της δυναμικής (εν κινήσει φόρτισης), μελετήθηκε η μεθοδολογία AIMD (Additive Increase Multiplicative Decrease) και προτάθηκε μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των βασικών παραμέτρων του αλγορίθμου. Η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων, έδειξαν ότι υπάρχει

μεγάλο πλήθος αλγορίθμων κυρτής βελτιστοποίησης που μπορούν να δώσουν λύσεις σε προβλήματα διαχείρισης φόρτισης ΗΟ ανάλογα με τις απαιτήσεις που υπάρχουν.

Στην συνέχεια θα σχολιαστεί η προσέγγιση του προβλήματος και θα παρουσιαστούν παράμετροι που δεν εξετάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Σε αυτό το πλαίσιο, στις επόμενες παραγράφους, θα γίνει σχολιασμός των χαρακτηριστικών υπολογιστικής πολυπλοκότητας που καθορίζουν την επιλογή μεταξύ κατανεμημένης και κεντρικής υλοποίησης. Τέλος θα παρουσιαστούν πιθανές επεκτάσεις και η συνεισφορά της διατριβής.

6.1 Χαρακτηριστικά πολυπλοκότητας αλγορίθμων διαχείρισης φορτίου

Οι αλγόριθμοι κυρτής βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 μπορούν να χαρακτηριστούν από τα ακόλουθα υπολογιστικά χαρακτηριστικά ως προς τις επιδόσεις τους

- Υπολογιστική πολυπλοκότητα του βήματος της βελτιστοποίησης
- Αριθμός βημάτων αλγορίθμου βελτιστοποίησης
- Απαιτούμενα τηλεπικοινωνιακά μηνύματα

Η υπολογιστική πολυπλοκότητα χαρακτηρίζει τον αριθμό των πράξεων που απαιτούνται από κάθε αλγόριθμο για να διεκπεραιωθεί κάθε επανάληψη του αλγορίθμου ενώ ο αριθμός βημάτων αναφέρεται στον αριθμό των επαναλήψεων που απαιτούνται για να προσεγγίσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα με την ζητούμενη ακρίβεια.

Για την περίπτωση του προβλήματος καθορισμού των ορίων φόρτισης της σχέσης 3.46, απαιτήθηκαν 208 βήματα για την επίλυση του προβλήματος με ακρίβεια αντικειμενικής συνάρτησης 10^{-5} με την μέθοδο IPM ενώ με την κατανεμημένη απαιτήθηκαν περίπου 30000 βήματα για την επίτευξη ακρίβειας 10^{-1} στην αντικειμενική συνάρτηση. Οι αλγόριθμοι IPM γενικά απαιτούν αριθμό βημάτων της τάξεως $O(m \log(C/\epsilon))$, [70],[90] όπου ϵ η ακρίβεια της αντικειμενικής συνάρτησης και m ο αριθμός των περιορισμών του προβλήματος και έχουν υπολογιστική πολυπλοκότητα βήματος της τάξεως του n^3 , που προκύπτει από την επίλυση του βήματος βελτιστοποίησης με την μέθοδο του Νεύτωνα που συμπεριλαμβάνει την παραγοντοποίηση Cholesky. Επομένως όσο η διάσταση του προβλήματος μεγαλώνει τόσο πιο πολύ μεγαλώνει και ο απαιτούμενος χρόνος για την ολοκλήρωση μίας επανάληψης του [91]. Αντίθετα η υπολογιστική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου της σχ 3.56 είναι γραμμικής τάξεως N γεγονός που σημαίνει ότι η αύξηση

Πίνακας 6.1 Τηλεπικοινωνιακά μηνύματα προβλήματος 3.46 (με * οι μεταβλητές αρχικοποίησης)

Κεντρική	Κατανεμημένη	Κατενεμημένη με μετρήσεις τάσης	Μεταβλητή
$N - 1$	—	—	w_i
N	$N(N - 1)$	—	x_i
1^*	N^*	N^*	dV
—	$N(N - 1)$	$N(N - 1)$	p_j
N^2^*	$N(N - 1)^*$	$N(N - 1)^*$	s_{ij}

της διάστασης του προβλήματος δεν μεγαλώνει σε απαγορευτικό βαθμό την πολυπλοκότητα του βήματος βελτιστοποίησης. Για μεγάλες τιμές του N , πρακτικά η κεντρική μέθοδος δεν προλαβαίνει να ολοκληρώσει την πρώτη επανάληψη σε αντίθεση με την κατανεμημένη μέθοδο που στον ίδιο χρόνο θα έχει ολοκληρώσει πολλαπλές επαναλήψεις.

Η κεντρική επίλυση ακολουθεί την κεντρική αρχιτεκτονική του σχ 1.2 και απαιτεί την μετάδοση της ζήτησης w_i και του πίνακα ευαισθησιών A στον κόμβο που πραγματοποιεί την επίλυση και η μετάδοση των λύσεων x_i στους ζυγούς του συστήματος. Για την περίπτωση της κατανεμημένης επίλυσης 3.56 κατά την αντίστοιχη αρχιτεκτονική του σχήματος 1.2 απαιτείται σε κάθε βήμα της επίλυσης η μετάδοση των λύσεων x_i, p_i για κάθε ζυγό i στους υπόλοιπους ζυγούς του συστήματος. Ωστόσο για την περίπτωση της κατανεμημένης επίλυσης με μετρήσεις απαιτείται μόνο η μετάδοση του p_i . Επομένως παρατηρούμε ότι δεν απαιτείται αναγκαστικά η μετάδοση της ισχύος ενός ζυγού σε ένα σύστημα διαχείρισης φορτίου. Επιπρόσθετα όπως φαίνεται από την επισκόπηση της συνάρτησης κόστους, η p_i παίρνει μη μηδενική τιμή μόνο όταν κάποιος ζυγός του δικτύου βρίσκεται στα όρια του του περιορισμού τάσης. Για την αποφυγή επιπρόσθετου τηλεπικοινωνιακού φόρτου γίνεται η μηδενική τιμή p_i να κωδικοποιηθεί ως μη λήψη του αντίστοιχου τηλεπικοινωνιακού μηνύματος. Με αυτό τον τρόπο δεν απαιτείται η αποστολή της συνάρτησης κόστους p_i , όταν αυτή παίρνει μη μηδενικές τιμές.

Για την περίπτωση της επίλυσης του προβλήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων της σχ 3.69, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος IPM στην περίπτωση της κεντρικής επίλυσης και η μέθοδος ADMM για την περίπτωση της κατανεμημένης επίλυσης, η οποία απαιτεί αριθμό βημάτων της τάξης του $O(C/\epsilon)$. Η κατανεμημένη επίλυση οδηγεί στην παράλληλη λύση πολλαπλών προβλημάτων μικρότερης διάστασης N . Κάθε κόμβος ουσιαστικά υπολογίζει τον δικό του ρυθμό φόρτισης, πράγμα που ισοδυναμεί με την εύρεση του ελαχίστου μιας δευτεροβάθμιας εξίσωσης. Επομένως με αυτό τον τρόπο αντιμετωπίζεται η επίδραση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας που προκύπτει από την επίλυση του βήματος βελτιστοποίησης με την μέθοδο του Νεύτωνα. Για την περίπτωση της ε-

Πίνακας 6.2 Τηλεπικοινωνιακά μηνύματα προβλήματος 3.69 (με * μεταβλητές αρχικοποίησης)

Κεντρική	ADMM	Μεταβλητή
N	N	x_i
N	—	P_i^{avg}
1	—	P^{max}
—	N	x^{avg}
—	N	u
—	N	z^{avg}

πίλωσης με τον αλγόριθμο ADMM υπάρχει η ανάγκη μετάδοσης πληροφορίας σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου· κάθε όχημα υπολογίζει τον ρυθμού φόρτισής του και τον αποστέλλει στον κεντρικό ελεγκτή ο οποίος υπολογίζει την μέση τιμή και το σήμα ελέγχου τα οποία αποστέλλει στον στόλο των οχημάτων που εξυπηρετεί.

Παρατηρούμε στους πίνακες 6.1,6.1 ότι η αποκεντρωμένη επίλυση των 2 προβλημάτων δημιουργεί επιπρόσθετη τηλεπικοινωνιακή κίνηση για κάθε επανάληψη, επομένως η μείωση της καθυστέρησης των τηλεπικοινωνιακών μηνυμάτων παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανομημένη επίλυσή τους αφού αποτελεί σημαντικό κομμάτι του χρόνου που απαιτείται για την σύγκλιση των κατανομημένων αλγορίθμων στην βέλτιστη λύση του εκάστοτε προβλήματος. Συνοψίζοντας, φαίνεται πως για την τάξη μεγέθους δικτύων διανομής και για τον στόλο ηλεκτρικών οχημάτων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4, η κεντρική αρχιτεκτονική επίλυσης του προβλήματος καθορισμού ορίων φόρτισης είναι πιο ακριβής και γρήγορη. Ωστόσο η κεντρική αρχιτεκτονική επίλυσης που βασίζεται στην επίλυση εσωτερικού σημείου έχει μεγάλη πολυπλοκότητα ανά υπολογιστικό βήμα γεγονός που την καθιστά αργή για προβλήματα μεγάλου μεγέθους, της τάξης των $10^5 - 10^7$ [92]. Ένα βασικό ερώτημα που γεννιάται είναι το κατά πόσο το πρόβλημα της διαχείρισης φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να αποκτήσει τέτοια διάσταση. Στην περίπτωση που το κάθε ηλεκτρικό όχημα μεμονωμένα διαπραγματεύεται το όριο φόρτισης του με το δίκτυο διανομής κατά την διάρκεια π.χ της οικιακής φόρτισης, μια τέτοια τάξη μεγέθους φαντάζει εφικτή. Σε μια τέτοια περίπτωση, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η κατανομημένη επίλυση καθορισμού ορίων φόρτισης θα μπορούσε να αποτελεί λύση, ανάλογα με την απαιτούμενη ακρίβεια του προβλήματος. Για την περίπτωση του προβλήματος ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, ισχύει το ίδιο σκεπτικό· μια κατανομημένη επίλυση απαιτεί εφαρμογή σε πολύ μεγάλο στόλο ηλεκτρικών οχημάτων.

6.2 Χαρακτηριστικά μοντελοποίησης δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Τα δίκτυα διανομής στα οποία βρίσκεται εφαρμογή η διατριβή είναι ακτινικά. Στα δίκτυα αυτά, οι κλάδοι του δικτύου δεν σχηματίζουν βρόχους αλλά διαδίδονται ακτινικά από την κεντρική τροφοδοσία προς τα υπόλοιπα σημεία του δικτύου. Το υπό μελέτη δίκτυο απετέλεσε την απλούστερη μορφή ακτινικού δικτύου δηλαδή μια γραμμή διανομής μέσης τάσης κατά μήκος της οποίας βρίσκονται οι ζυγοί (κόμβοι) του συστήματος στο οποίο συνδέονται τα φορτία του συστήματος χωρίς να παρεμβάλλονται ενδιάμεσα στοιχεία όπως π.χ μετασχηματιστές, γραμμές χαμηλής τάσης κλπ. Ωστόσο, η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί και σε πιο σύνθετες μορφές δικτύων. Το φορτίο του συστήματος θεωρείται σταθερής ισχύος, δηλαδή μεταβολή της τάσης θα επιφέρει μεταβολή στην τιμή του ρεύματος έτσι ώστε να απορροφηθεί η ίδια τιμή ισχύος. Επιπρόσθετα το φορτίο θεωρείται συμμετρικό. Μια στρατηγική για την αντιμετώπιση της ασυμμετρίας στην φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων είναι η ελαχιστοποίηση της τετραγωνικού σφάλματος της ισχύος ανά φάση από ένα μέσο ρυθμό φόρτισης για κάθε κόμβο βλ[93]. Άλλη μια παραδοχή που έγινε σχετίζεται με τον υψηλό επαγωγικό συντελεστή ισχύος $\cos\varphi = 0.95$. Η υψηλή αυτή τιμή βασίζεται στο γεγονός ότι ο διαχειριστής του συστήματος διανομής επιδιώκει την λειτουργία σε υψηλούς επαγωγικούς συντελεστές έτσι ώστε να μειωθούν οι ενεργειακές απώλειες. Επιπρόσθετα στις προσομοιώσεις δεν συμπεριλήφθηκαν διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής, ωστόσο μπορούν να συμπεριληφθούν στο υπό εξέταση σύστημα χωρίς βλάβη της γενικότητας.

6.3 Σχολιασμός προσέγγισης διαχείρισης φορτίου

Στα πλαίσια της διατριβής παρουσιάστηκε ένα πλαίσιο για την διαχείριση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Μια βασική υπόθεση αρχικά ήταν αυτή του διαχωρισμού του φορτίου σε νελαστικό φορτίο φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων και σε ανελαστικό φορτίο που καλύπτει τις υπόλοιπες ενεργειακές ανάγκες του συστήματος και στη συνέχεια δόθηκε έμφαση στον σχεδιασμό ενός συστήματος που αρχικά δίνει προτεραιότητα στις ανελαστικές ανάγκες φόρτισης και έπειτα την δυνατότητα κάλυψης των αναγκών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Η δυνατότητα κάλυψης των ανελαστικών αναγκών πραγματοποιήθηκε με βάση την αφαίρεση της επίπτωσης του φορτίου στην τάση του δικτύου και διάθεση της υπολειπόμενης τάσης για την φόρτιση των οχημάτων. Μία δυνατότητα που δεν διερευνήθηκε είναι ο προσδιορισμός του εύρους λειτουργίας των συντελεστών ζήτησης με περισσότερη ακρίβεια για κάθε ζυγό έτσι ώστε να καλύπτουν την ελάχιστη

και μέγιστη συνολική ζήτηση που εμφανίζεται τοπικά σε κάθε ζυγό του συστήματος. Επιπρόσθετα είδαμε ότι σε ορισμένες περιπτώσεις και όταν η ζήτηση εμφανίζει μεγάλες μεταβολές, ο προσδιορισμός του συντελεστή ζήτησης οδήγησε σε μικρότερη αποδιδόμενη ισχύ από την προβλεπόμενη ελαστική ζήτηση. Μια προσέγγιση του προβλήματος που θα μπορούσε να εξεταστεί είναι η εισαγωγή περισσότερων γύρων διαπραγμάτευσης ισχύος, έτσι ώστε να δοθεί η δυνατότητα σε κάθε ζυγό να προσαρμόσει περαιτέρω τον συντελεστή ζήτησής του. Επίσης κατά τον σχεδιασμό του συστήματος υποθέσαμε την ιδανική περίπτωση όπου η μελλοντική ανελαστική ισχύς είναι γνωστή χωρίς κάποιο σφάλμα, πράγμα το οποίο μελλοντικά θα πρέπει να ληφθεί υπόψη. Επιπρόσθετα θα μπορούσαν να διερευνηθούν περαιτέρω και άλλοι μηχανισμοί προσδιορισμού του συντελεστή ζήτησης w_i με βάση στατιστικά στοιχεία του παρελθόντος.

Ο προσδιορισμός των προβλεπόμενων αναγκών ισχύος για φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων έγινε με βάση την παραδοχή ότι τα οχήματα φορτίζουν με μία μέση ισχύ φόρτισης που ικανοποιεί τις ενεργειακές τους ανάγκες. Αυτή η παραδοχή απετέλεσε και την αρχή σχεδιασμού του συστήματος διαμοιρασμού ισχύος στα ηλεκτρικά οχήματα, έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης κάλυψη των αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων όταν υπάρχει επάρκεια ισχύος. Μια εναλλακτική στρατηγική θα μπορούσε να συμπεριλαμβάνει τον καθορισμό των μελλοντικών αναγκών ισχύος φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με βάση την μεγιστοποίηση της κάλυψης των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων για τον χρονικό ορίζοντα που προκύπτει από τον στόλο των οχημάτων που βρίσκεται συνδεδεμένος με την υποδομή φόρτισης. Έπειτα η διαπραγμάτευση γίνεται με βάση τον συντελεστή ζήτησης που προκύπτει από την παραπάνω λογική και ύστερα ο επανυπολογισμός της ισχύος φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων της υποδομής φόρτισης με βάση το όριο φόρτισης που αποδόθηκε από το σύστημα. Επιπρόσθετα δεν συμπεριλήφθηκαν περιορισμοί που σχετίζονται με την ζωή της μπαταρίας [94].

Μια βασική παραδοχή που πραγματοποιήθηκε αρχικά έτσι ώστε να εξαχθεί η γραμμική σχέση τάσης φορτίου ήταν η λειτουργία του συστήματος "κοντά" στην ονομαστική του τιμή και επίσης η απαλοιφή της επίπτωσης των απωλειών ισχύος στην τάση του συστήματος διανομής. Όπως φάνηκε από τις τιμές του μέτρου τάσης που μετρήθηκαν από την ανάλυση ροής φορτίου, οι παραπάνω παραδοχές προκάλεσαν όντως ένα μικρό και μάλλον αποδεκτό σφάλμα στην τάση της γραμμής διανομής. Η μελέτη του σφάλματος αυτού σε περιοχές λειτουργίας "πιο μακριά" από την ονομαστική τάση λειτουργίας του συστήματος και εντός των ορίων που ορίζονται από το νόμο αποτελεί θέμα που θα μπορούσε να εξεταστεί περαιτέρω. Άλλη μια πιθανή επέκταση είναι η ενσωμάτωση των περιορισμών που σχετίζονται με τα θερμικά όρια των γραμμών του ακτινικού δικτύου διανομής στους περιορισμούς του προβλήματος καθορισμού ορίων φόρτισης, έτσι ώστε

να καλυφθεί και αυτή η ανάγκη που είναι πολύ σημαντική στα φορτισμένα δίκτυα διανομής αστικών περιοχών.

Στα πλαίσια αυτής της διατριβής διερευνήθηκε η απόδοση ορίων ισχύος σε κάθε ζυγό του συστήματος με βάση το κριτήριο "proportionate fairness" το οποίο συμπεριλαμβάνει τόσο την μεγιστοποίηση της συνολικής αποδιδόμενης ισχύος όσο και την απόδοση ισχύος σε όλους τους ζυγούς του συστήματος. Αρκετές εναλλακτικές στρατηγικές έχουν διερευνηθεί στην διεθνή βιβλιογραφία resource allocation [95]. Σημαντική στρατηγική είναι η max min fairness που "προσπαθεί" να μεγιστοποιήσει την ελάχιστη αποδιδόμενη ισχύ για κάθε κόμβο του συστήματος και τροποποιήσεις της όπως η weighted max min fairness [96]. Η εφαρμογή αυτής της στρατηγικής αναμένεται να μειώσει περαιτέρω το χάσμα μεταξύ της ισχύος που αποδίδεται σε ζυγούς που βρίσκονται ηλεκτρικά μακρύτερα και της ισχύος που αποδίδεται σε ζυγούς που βρίσκονται ηλεκτρικά εγγύτερα στο σημείο διασύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο.

6.4 Σχολιασμός διαχείρισης φορτίου δυναμικής φόρτισης

Ο αλγόριθμος δυναμικής διαχείρισης φορτίου που παρουσιάστηκε ανήκει στην ευρύτερη οικογένεια Additive Increase Multiplicative Decrease (AIMD) και επιτυγχάνει τον διαμοιρασμό της ισχύος φόρτισης στα ηλεκτρικά οχήματα που κινούνται στον δρόμο. Όπως φάνηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα, η επίδοση του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το δίκτυο επικοινωνίας υποδομής φόρτισης-ηλεκτρικών οχημάτων. Η ανάπτυξη και διαχείριση των δικτύων αυτών, έτσι ώστε να τηρούν τις προδιαγραφές ενός συστήματος πραγματικού χρόνου είναι σημαντική, όπως και η διερεύνηση χρονικών αποκλίσεων στην ποιότητα του αποτελέσματος. Επιπρόσθετα αντικείμενο προς διερεύνηση αποτελεί η στρατηγική διανομής ισχύος, έτσι ώστε να ικανοποιείται πιο στοχευμένα η ζήτηση ισχύος κάθε ηλεκτρικού οχήματος.

6.5 Επιπλέον επεκτάσεις διατριβής

Στην παρούσα διατριβή εξετάστηκε η διαχείριση φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων ως προς τους αλγόριθμους που βρίσκουν εφαρμογή και ως προς την στρατηγική διαχείρισης του φορτίου. Μια ευρύτερη κατηγορία αλγορίθμων βελτιστοποίησης που δεν διερευνήθηκε είναι αυτή της κατανεμημένης επίλυσης προβλημάτων κυρτής βελτιστοποίησης βασισμένη στην συνεργασία μεταξύ γειτονικών κόμβων βλ σχ 1.2, [97]. Επιπρόσθετα, οι

αλγόριθμοι διερευνήθηκαν με την βασική υπόθεση ότι είναι σύγχρονοι, κάθε βήμα εκτελείται ταυτόχρονα για όλους τους κόμβους του συστήματος. Επομένως, είναι σημαντική η διερεύνηση τεχνικών που επιτυγχάνουν συγχρονισμό αλλά και η διερεύνηση των χρονικών αποκλίσεων στο τελικό αποτέλεσμα.

Η στρατηγική διαχείρισης φορτίου αντιμετωπίστηκε, έχοντας δεδομένες τις ανάγκες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, η άφιξη ενός ηλεκτρικού οχήματος στην υποδομή φόρτισης μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο προς διαπραγμάτευση μεταξύ του οδηγού και της υποδομής φόρτισης. Η υποδομή φόρτισης μπορεί να δώσει κίνητρα έτσι ώστε να αποτρέψει η όχι τον οδηγό από την προσέλευση σε έναν σταθμό φόρτισης ανάλογα με την εκτιμώμενη επάρκεια ισχύος. Για παράδειγμα, εάν ο συντελεστής ζήτησης w_i είναι χαμηλός, η υποδομή φόρτισης μπορεί να επιδιώξει να προσελκύσει περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα γνωρίζοντας ότι έχει την δυνατότητα να αυξήσει το τοπικό όριο φόρτισης. Η διαπραγμάτευση αυτή, απαιτεί ασύρματη συνδεσιμότητα μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και υποδομής φόρτισης σε τοπικό επίπεδο αλλά και το αντίστοιχο επικοινωνιακό πρωτόκολλο. Επίσης απαιτεί την διαμόρφωση στρατηγικής προσέλκυσης ηλεκτρικών οχημάτων στην υποδομή φόρτισης και γνώση των παραμέτρων που καθιστούν την φόρτιση ελκυστική στους οδηγούς ηλεκτρικών οχημάτων.

Το πλαίσιο της διαχείρισης φορτίου που διερευνήθηκε έχει τοπικά χαρακτηριστικά καθώς λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς τάσης του δικτύου διανομής. Γενικά η διαχείριση φορτίου επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, που ενδέχεται να είναι και αντικρουόμενοι, όπως το ενεργειακό ισοζύγιο, την μεταφορά ενέργειας κλπ. Οι παράγοντες αυτοί πρέπει να συνυπολογιστούν στην διαμόρφωση της πολιτικής διαχείρισης φορτίου έτσι ώστε τελικά να ικανοποιηθούν συνολικά όλα τα ζητήματα που σχετίζονται με την μαζική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων.

6.6 Συνεισφορά διατριβής

Στα πλαίσια της διατριβής μελετήθηκε η διαχείριση φορτίου ηλεκτρικών οχημάτων υπό περιορισμούς στην πτώση τάσης του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Έγινε σχεδιασμός ενός συστήματος διαχείρισης φορτίου και προτάθηκαν δυο εναλλακτικές τεχνικές επίλυσης των προβλημάτων υπό εξέταση, έτσι ώστε να καλυφθούν οι τεχνικές απαιτήσεις που σχετίζονται με την αυξανόμενη πολυπλοκότητα των επιμέρους προβλημάτων βελτιστοποίησης που προκύπτει από την ενσωμάτωση μεγάλου πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων. Το σύστημα προσομοιώθηκε σε μια γραμμή διανομής μεγάλου μήκους και παρουσιάστηκαν τα αριθμητικά αποτελέσματα που επαλήθευσαν τις βασικές υποθέσεις της διατριβής σχετικά με τη πτώση τάσης, την κατανομή της αποκοπής φορτίου που προ-

κύπτει από τις σχεδιαστικές παραμέτρους του συστήματος βελτιστοποίησης και τέλος την προσέγγιση των λύσεων που προκύπτουν από κεντρική επίλυση με καταναμεμένους αλγορίθμους. Τέλος σχολιάστηκε η προσέγγιση και προτάθηκαν πιθανές επεκτάσεις της διατριβής.

Η βασική συνεισφορά της διατριβής έγκειται στον σχεδιασμό του συστήματος με βάση την λογική της "αναλογικής δικαιοσύνης" και την μελέτη καταναμεμένων μεθόδων βελτιστοποίησης που μπορούν να προσεγγίσουν την λύση του προβλήματος για μεγάλο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, μέσα από την ανάλυση του ζητήματος, φάνηκε η μεγάλη σημασία γενικότερων παραμέτρων όπως η ακριβής πρόγνωση της ζήτησης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε τοπικό επίπεδο, η μέτρηση φυσικών παραμέτρων του συστήματος με ψηφιακά μέσα όπως οι έξυπνοι μετρητές και τέλος η διασύνδεση των συστημάτων ελέγχου με τεχνολογίες μικρής καθυστέρησης (low latency). Συμπεραίνουμε επομένως την μέγιστη σημασία της "4ης βιομηχανικής επανάστασης" για την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης και την εξέλιξη των μεταφορών με γνώμονα το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Βιβλιογραφία

- [1] European Commission. Delivering on low-emission mobility; a european union that protects the planet, empowers its consumers and defends its industry and workers. *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS*, 1(4):385–403, 1996.
- [2] European Commission. Eu renewable energy targets in 2020: Revised analysis of scenarios for transport fuels. *JRC SCIENCE AND POLICY REPORTS*, 1(4):63–65, 2014.
- [3] Robert Graham et al. Comparing the benefits and impacts of hybrid electric vehicle options. *Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA, Report*, 1000349, 2001.
- [4] *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks. Power Electronics and Power Systems*, chapter Electric Vehicle Battery Technologies. Springer, 2013.
- [5] Ε Καρφόπουλος. *Συμβολή Στη Διαχείριση Των Ηλεκτρικών Οχημάτων Για Την Αποδοτικότερη Ενσωμάτωση Τους Στα Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. PhD thesis, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, ●.
- [6] Most efficient electric vehicle, April 2019.
- [7] D. Naberezhnykh, N. Reed, F. Ognissanto, T. Theodoropoulos, and H. Bludszuweit. Operational requirements for dynamic wireless power transfer systems for electric vehicles. In *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*.
- [8] Theodoros Theodoropoulos, Angelos Amditis, Jesús Sallán, Hans Bludszuweit, Boris Berseneff, Paolo Guglielmi, and Francesco Deflorio. Impact of dynamic ev wireless charging on the grid. In *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, pages 1–7. IEEE, 2014.
- [9] Oussama Smiai, Francesco Bellotti, Riccardo Berta, Alessandro De Gloria, Andrew Winder, Theodoros Theodoropoulos, Yannis Damousis, Ramon S. Schwartz, Nadim El Sayed, Stéphane Laporte, and Marc Revilloud. Developing ict solutions for dynamic charging of electric vehicles. In Alessandro De Gloria, editor, *Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society*, pages 51–58, Cham, 2018. Springer International Publishing.

- [10] Angelos Amditis, Theodoros Theodoropoulos, Yannis Damousis, Jesus Sallan, and Hans Bludszuweit. Fabric's approach towards the estimation of energy storage system requirements for grid impact reduction. In *2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*, pages 1–5. IEEE, 2015.
- [11] Saeid Haghbin, Kashif Khan, Sonja Lundmark, Mats Alaküla, Ola Carlson, Mats Leksell, and Oskar Wallmark. Integrated chargers for ev's and phev's: examples and new solutions. In *The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [12] Siang Fui Tie and Chee Wei Tan. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20:82–102, 2013.
- [13] Cen-CENELEC-ETSI. Smart grid set of standard. *Smart Grid Set of Standards*, 2017.
- [14] EUROPEAN COMMISSION. Standardization mandate to european standardisation organisations (esos) to support european smart grid deployment. *Smart Grid Mandate*, 2011.
- [15] A Amditis, T Theodoropoulos, G Brusaglino, R Rizzo, LP Di Noia, G Rodella, and A Oceano. Energy management optimization within the electric mobility system. In *2017 6th IEEE International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, pages 110–116.
- [16] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας. Δημόσια Διαβούλευση της ΠΑΕ για το ρυθμιστικό πλαίσιο εγκατάστασης και λειτουργίας υποδομών επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα. 2018.
- [17] European Automobile Manufacturers Association. Alternative fuel vehicle registrations. Technical report, European Automobile Manufacturers Association, ●.
- [18] Engel Hauke, Hensley Russell, Knupfer Stefan, and Sahdev Shivika. The potential impact of electric vehicles on global energy systems. Technical report, McKinsey and Company, ●.
- [19] ●. Impact assessment accompanying the document proposal for a directive of the european parliament and of the council amending directive 2012/27/eu on energy efficiency. Technical report, European Commission, 2019.
- [20] Eurelectric. Decarbonisation pathways. Technical report, Eurelectric, 2019.
- [21] EURELECTRIC. Smart charging: Steering the charge, driving the change. Technical report, EURELECTRIC, 2015.
- [22] EURELECTRIC. Smart charging – key to unlocking electro-mobility's potential. Technical report, EURELECTRIC, 2017.
- [23] Kristien Clement-Nyns, Edwin Haesen, and Johan Driesen. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. *IEEE Transactions on power systems*, 25(1):371–380, 2010.

- [24] Steven Logghe, Bart Van Herbruggen, and Bruno Van Zeebroeck. Emissions of road traffic in belgium tmleuven. *Tremove*, 2006.
- [25] João A Peças Lopes, Filipe Joel Soares, and Pedro M Rocha Almeida. Integration of electric vehicles in the electric power system. *Proceedings of the IEEE*, 99(1):168–183, 2011.
- [26] João Peças Lopes, Pedro Miguel Rocha Almeida, Antero Miguel Silva, and Filipe Joel Soares. Smart charging strategies for electric vehicles: Enhancing grid performance and maximizing the use of variable renewable energy resources. 2009.
- [27] Electrification Coalition. Electrification roadmap: Revolutionizing transportation and achieving energy security. *November. Electrification Coalition*, 2009.
- [28] Όλγα Σχινά Σταύρος Παπαθανασίου. Προτάσεις για τη λειτουργία της αγοράς ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα. 2019.
- [29] Goran Strbac. Demand side management: Benefits and challenges. *Energy policy*, 36(12):4419–4426, 2008.
- [30] J Tayloe, A Maitra, M Alexander, D Brooks, and M Duvall. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations. In *General Meeting 2009 IEEE Power Engineering Society*, pages 1–6, 2009.
- [31] K Schneider, C Gerkenmeyer, M Kintner-Meyer, and Robert Fletcher. Impact assessment of plug-in hybrid vehicles on pacific northwest distribution systems. In *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pages 1–6. IEEE, 2008.
- [32] Clint Gerkenmeyer, Michael CW Kintner-Meyer, and John G DeStee. Technical challenges of plug-in hybrid electric vehicles and impacts to the us power system: Distribution system analysis. Technical report, Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States), 2010.
- [33] Shengnan Shao, Manisa Pipattanasomporn, and Saifur Rahman. Challenges of phev penetration to the residential distribution network. In *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pages 1–8. IEEE, 2009.
- [34] GA Putrus, Pasist Suwanapingkarl, David Johnston, EC Bentley, and Mahinsasa Narayana. Impact of electric vehicles on power distribution networks. In *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pages 827–831. IEEE, 2009.
- [35] CENELEC. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. Technical report, European Committee for Electrotechnical Standardization-CENELEC, ●.
- [36] Carlo Masetti. Revision of european standard en 50160 on power quality: Reasons and solutions. In *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power-ICHQP 2010*, pages 1–7. IEEE, 2010.

- [37] ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΠΟΥΛΑΞΗΣ. Κώδικας διαχείρισης του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΔΔΗΕ). *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας*, 2017.
- [38] AO REGULATIONS. The electricity safety, quality and continuity regulations 2002. *Crown Copyr.*, 2002.
- [39] Peter Richardson, Damian Flynn, and Andrew Keane. Impact assessment of varying penetrations of electric vehicles on low voltage distribution systems. In *IEEE PES General Meeting*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [40] Kyriaki E Antoniadou-Plytaria, Iasonas N Kouveliotis-Lysikatos, Pavlos S Georgilakis, and Nikos D Hatziaargyriou. Distributed and decentralized voltage control of smart distribution networks: models, methods, and future research. *IEEE Transactions on smart grid*, 8(6):2999–3008, 2017.
- [41] Ray D Zimmerman and Carlos E Murillo-Sanchez. Matpower 4.1 user’s manual. *Power Systems Engineering Research Center, Cornell University, Ithaca, NY*, 2011.
- [42] Bo Yang and Mikael Johansson. Distributed optimization and games: A tutorial overview. In *Networked Control Systems*, pages 109–148. Springer, 2010.
- [43] Julian de Hoog, Tansu Alpcan, Marcus Brazil, Doreen Anne Thomas, and Iven Mareels. Optimal charging of electric vehicles taking distribution network constraints into account. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(1):365–375, 2015.
- [44] Somayeh Sojoudi and Steven H Low. Optimal charging of plug-in hybrid electric vehicles in smart grids. In *2011 IEEE power and energy society general meeting*, pages 1–6. IEEE, 2011.
- [45] Zhuowei Luo, Zechun Hu, Yonghua Song, Zhiwei Xu, and Haiyan Lu. Optimal coordination of plug-in electric vehicles in power grids with cost-benefit analysis—part i: Enabling techniques. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(4):3546–3555, 2013.
- [46] Peter Richardson, Damian Flynn, and Andrew Keane. Optimal charging of electric vehicles in low-voltage distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(1):268–279, 2012.
- [47] Thierry Van Cutsem and Costas Vournas. *Voltage stability of electric power systems*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [48] Fabio Saccomanno. *Electric power systems: analysis and control*. Wiley-Interscience, 2003.
- [49] Prabha Kundur, Neal J Balu, and Mark G Lauby. *Power system stability and control*, volume 7. McGraw-hill New York, 1994.
- [50] Roberto Marconato. *Electric power systems*. CEI, 2002.

- [51] Morris Brenna, Ettore De Berardinis, Luca Delli Carpini, Federica Foiadelli, Pietro Paulon, Paola Petroni, Gianluca Sapienza, Giorgio Scrosati, and Dario Zaninelli. Automatic distributed voltage control algorithm in smart grids applications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(2):877–885, 2013.
- [52] Vahidreza Nasirian, Seyedali Moayedi, Ali Davoudi, and Frank L Lewis. Distributed cooperative control of dc microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(4):2288–2303, 2015.
- [53] Ali Bidram, Ali Davoudi, Frank L Lewis, and Shuzhi Sam Ge. Distributed adaptive voltage control of inverter-based microgrids. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(4):862–872, 2014.
- [54] ΔΕΔΗΕ. Προτάσεις ΔΕΔΗΕ για το ρυθμιστικό πλαίσιο εγκατάστασης και λειτουργίας υποδομών επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα. In *Δημόσια Διαβούλευση της ΡΑΕ σχετικά με ρυθμιστικό πλαίσιο εγκατάστασης και λειτουργίας υποδομών επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα*.
- [55] Olle Sundstrom and Carl Binding. Flexible charging optimization for electric vehicles considering distribution grid constraints. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1):26–37, 2012.
- [56] Marc Mültin. Iso 15118 as the enabler of vehicle-to-grid applications. In *2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [57] Theodoros Theodoropoulos, Yannis Damousis, and Angelos Amditis. A load balancing control algorithm for ev static and dynamic wireless charging. In *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5. IEEE, 2015.
- [58] Jens Schmutzler, Claus Andersen, and Christian Wietfeld. Evaluation of ocpp and iec 61850 for smart charging electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 6(4):863–874, 2013.
- [59] C Montes Portela, Paul Klapwijk, L Verheijen, Hans De Boer, Han Slootweg, and Marko Van Eekelen. Oscp-an open protocol for smart charging of electric vehicles. In *Proc. 23rd Int. Conf. Electr. Distrib.(CIRED)*, pages 1–5, 2015.
- [60] L NARAYANAN K Daniel and K Narayanan. Congestion control 2: Utility, fairness, and optimization in resource allocation. *Mathematical Modelling for Computer Networks-Part I*, 2013.
- [61] Frank P Kelly, Aman K Maulloo, and David KH Tan. Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of the Operational Research society*, 49(3):237–252, 1998.
- [62] Aleksandr Mikhailovich Lyapunov. The general problem of the stability of motion. *International journal of control*, 55(3):531–534, 1992.
- [63] Stephen Boyd, Neal Parikh, Eric Chu, Borja Peleato, Jonathan Eckstein, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. *Foundations and Trends® in Machine learning*, 3(1):1–122, 2011.

- [64] SM Suhail Hussain, Taha Selim Ustun, Paul Nsonga, and Ikbali Ali. Ieee 1609 wave and iec 61850 standard communication based integrated ev charging management in smart grids. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(8):7690–7697, 2018.
- [65] Yurii Nesterov. Introductory lectures on convex programming volume i: Basic course. *Lecture notes*, pages 78–79, 1998.
- [66] •. Na2xs2y 1 x 120 rm/16 12/20 kv cable specificatioion. Technical report, Nexans, •.
- [67] Frank Kelly. Charging and rate control for elastic traffic. *European transactions on Telecommunications*, 8(1):33–37, 1997.
- [68] Ellen L. Hahne. Round-robin scheduling for max-min fairness in data networks. *IEEE Journal on Selected Areas in communications*, 9(7):1024–1039, 1991.
- [69] Utility, fairness and optimization in resource allocation. online, March 2014. [online] https://www.cs.helsinki.fi/u/ldaniel/mm_cn/lec1.2_cc_resource_allocation.pdf.
- [70] Stephen Boyd and Lieven Vandenberghe. *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.
- [71] Peter Whittle. *Optimization under constraints: theory and applications of nonlinear programming*. John Wiley & Sons, 1971.
- [72] Amir Ali Ahmadi. *Non-monotonic Lyapunov functions for stability of nonlinear and switched systems: theory and computation*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [73] Dimitri P Bertsekas and Athena Scientific. *Convex optimization algorithms*. Athena Scientific Belmont, 2015.
- [74] Ray Daniel Zimmerman, Carlos Edmundo Murillo-Sánchez, and Robert John Thomas. Matpower: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. *IEEE Transactions on power systems*, 26(1):12–19, 2010.
- [75] Steffen Schütte, Stefan Scherfke, and Martin Tröschel. Mosaik: A framework for modular simulation of active components in smart grids. In *2011 IEEE First International Workshop on Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS)*, pages 55–60. IEEE, 2011.
- [76] William F Tinney and Clifford E Hart. Power flow solution by newton’s method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems*, (11):1449–1460, 1967.
- [77] Β Ζήσης. *Σφάλματα στο δίκτυο μέσης τάσης νήσου Κρήτης*. PhD thesis, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, ΠΑΝ.ΠΑΤΡΝ, •.
- [78] M Andersen, Joachim Dahl, and Lieven Vandenberghe. Cvxopt: A python package for convex optimization. *abel. ee. ucla. edu/cvxopt*, 2013.
- [79] Nataly Bañol Arias et al. Distribution system services provided by electric vehicles: recent status, challenges, and future prospects. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 20:4277–4296, 2019.

- [80] Hongyang Li, György Dán, and Klara Nahrstedt. Fadec: Fast authentication for dynamic electric vehicle charging. In *2013 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*, pages 369–370. IEEE, 2013.
- [81] Jens Schmutzler, Christian Wietfeld, and Claus Amtrup Andersen. Distributed energy resource management for electric vehicles using iec 61850 and iso/iec 15118. In *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pages 1457–1462. IEEE, 2012.
- [82] Ken Tindell, H Hanssmon, and Andy J Wellings. Analysing real-time communications: Controller area network (can). In *RTSS*, pages 259–263. Citeseer, 1994.
- [83] Dah-Ming Chiu and Raj Jain. Analysis of the increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks. *Computer Networks and ISDN systems*, 17(1):1–14, 1989.
- [84] Theodoros V Theodoropoulos, Ioannis G Damousis, and Angelos J Amditis. Demand-side management ict for dynamic wireless ev charging. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(10):6623–6630, 2016.
- [85] Theodoros V Theodoropoulos, Ioannis G Damousis, Evangelia Portouli, Angelos J Amditis, Nadim El Sayed, and Stephane Laporte. Analysis of aimd-based dsm for ev wireless charging on the move. In *2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, pages 1–8. IEEE, 2016.
- [86] Christoph Sommer, Reinhard German, and Falko Dressler. Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 10(1):3–15, 1 2011.
- [87] Antonio Viridis, Giovanni Stea, and Giovanni Nardini. Simulating lte/lte-advanced networks with simulte. In *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, pages 83–105. Springer, 2015.
- [88] Herschel W Leibowitz, D Alfred Owens, and Richard A Tyrrell. The assured clear distance ahead rule: implications for nighttime traffic safety and the law. *Accident Analysis & Prevention*, 30(1):93–99, 1998.
- [89] Andrew Mills. Strategies for mitigating the reduction in economic value of variable generation with increasing penetration levels. 2014.
- [90] Sébastien Bubeck et al. Convex optimization: Algorithms and complexity. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 8(3-4):231–357, 2015.
- [91] Anatoli Juditsky, Arkadi Nemirovski, et al. First order methods for nonsmooth convex large-scale optimization, i: general purpose methods. *Optimization for Machine Learning*, pages 121–148, 2011.
- [92] Yu Nesterov. Subgradient methods for huge-scale optimization problems. *Mathematical Programming*, 146(1-2):275–297, 2014.
- [93] Λαζαρίδης Ιωάννης. Αναλυση της επιδρασης της ασυμμετρης φορτισης των ηλεκτρικων οχηματων στα ακτινικα δικτυα διανομης. 2016.

- [94] Alessandro Di Giorgio, Francesco Liberati, and Silvia Canale. Electric vehicles charging control in a smart grid: A model predictive control approach. *Control Engineering Practice*, 22:147–162, 2014.
- [95] Jean-Yves Le Boudec. Rate adaptation, congestion control and fairness: A tutorial. *Web page*, November, 2005.
- [96] Peter Marbach. Priority service and max-min fairness. In *Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 1, pages 266–275. IEEE, 2002.
- [97] Δ Κούκουλα. Αποκεντρωμένος έλεγχος διαχείρισης διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων στα δίκτυα διανομής για παροχή επικοινωνιακών υπηρεσιών. PhD thesis, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, ●.

Πίνακας ευαισθησιών γραμμής διανομής

	I		2		3		12		14		15		18		19		20		21		22		23		24		25		27		28		29		30		37	
dv/dP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001		
2	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001		
3	0	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002		
12	0	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	
14	0	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	
15	0	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	
18	0	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	
19	0	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	
20	0	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	
21	0	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	
22	0	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	
23	0	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
24	0	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
25	0	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	
27	0	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	
28	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
29	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
30	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
31	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
32	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
33	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
34	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
36	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
37	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
38	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
39	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
40	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
41	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
42	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
43	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
44	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	
45	0	-0.011	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.								

dV/dP	1	2	3	12	14	15	18	19	20	21	22	23	24	25	27	28	29	30	31
63	0	-0.011	-0.008	-0.002	-0.003	-0.004	-0.013	-0.004	-0.005	-0.013	-0.006	-0.016	-0.029	-0.008	-0.027	-0.01	-0.01	-0.027	-0.011
64	0	-0.011	-0.008	-0.002	-0.003	-0.004	-0.013	-0.004	-0.005	-0.013	-0.006	-0.016	-0.029	-0.008	-0.027	-0.01	-0.01	-0.027	-0.011
65	0	-0.011	-0.008	-0.002	-0.003	-0.004	-0.013	-0.004	-0.005	-0.013	-0.006	-0.016	-0.029	-0.008	-0.027	-0.01	-0.01	-0.027	-0.011
66	0	-0.011	-0.008	-0.002	-0.003	-0.004	-0.013	-0.004	-0.005	-0.013	-0.006	-0.016	-0.029	-0.008	-0.027	-0.01	-0.01	-0.027	-0.011
67	0	-0.011	-0.008	-0.002	-0.003	-0.004	-0.013	-0.004	-0.005	-0.013	-0.006	-0.016	-0.029	-0.008	-0.027	-0.01	-0.01	-0.027	-0.011
68	0	-0.011	-0.008	-0.002	-0.003	-0.004	-0.013	-0.004	-0.005	-0.013	-0.006	-0.016	-0.029	-0.008	-0.027	-0.01	-0.01	-0.027	-0.011
69	0	-0.011	-0.008	-0.002	-0.003	-0.004	-0.013	-0.004	-0.005	-0.013	-0.006	-0.016	-0.029	-0.008	-0.027	-0.01	-0.01	-0.027	-0.011
70	0	-0.011	-0.008	-0.002	-0.003	-0.004	-0.013	-0.004	-0.005	-0.013	-0.006	-0.016	-0.029	-0.008	-0.027	-0.01	-0.01	-0.027	-0.011
71	0	-0.011	-0.008	-0.002	-0.003	-0.004	-0.013	-0.004	-0.005	-0.013	-0.006	-0.016	-0.029	-0.008	-0.027	-0.01	-0.01	-0.027	-0.011

[illegible]

dV/dP	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
63	-0.017	-0.004	-0.022	-0.006	-0.015	-0.023	-0.03	-0.02	-0.019	-0.032	-0.009	-0.007	-0.02	-0.022	-0.021	-0.001	-0.018	-0.018	-0.023
64	-0.017	-0.004	-0.022	-0.006	-0.015	-0.023	-0.03	-0.02	-0.019	-0.032	-0.009	-0.007	-0.02	-0.022	-0.021	-0.001	-0.018	-0.018	-0.023
65	-0.017	-0.004	-0.022	-0.006	-0.015	-0.023	-0.03	-0.02	-0.019	-0.032	-0.009	-0.007	-0.02	-0.022	-0.021	-0.001	-0.018	-0.018	-0.023
66	-0.017	-0.004	-0.022	-0.006	-0.015	-0.023	-0.03	-0.02	-0.019	-0.032	-0.009	-0.007	-0.02	-0.022	-0.021	-0.001	-0.018	-0.018	-0.023
67	-0.017	-0.004	-0.022	-0.006	-0.015	-0.023	-0.03	-0.02	-0.019	-0.032	-0.009	-0.007	-0.02	-0.022	-0.021	-0.001	-0.018	-0.018	-0.023
68	-0.017	-0.004	-0.022	-0.006	-0.015	-0.023	-0.03	-0.02	-0.019	-0.032	-0.009	-0.007	-0.02	-0.022	-0.021	-0.001	-0.018	-0.018	-0.023
69	-0.017	-0.004	-0.022	-0.006	-0.015	-0.023	-0.03	-0.02	-0.019	-0.032	-0.009	-0.007	-0.02	-0.022	-0.021	-0.001	-0.018	-0.018	-0.023
70	-0.017	-0.004	-0.022	-0.006	-0.015	-0.023	-0.03	-0.02	-0.019	-0.032	-0.009	-0.007	-0.02	-0.022	-0.021	-0.001	-0.018	-0.018	-0.023
71	-0.017	-0.004	-0.022	-0.006	-0.015	-0.023	-0.03	-0.02	-0.019	-0.032	-0.009	-0.007	-0.02	-0.022	-0.021	-0.001	-0.018	-0.018	-0.023

[illegible]

dV/dP	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
63	-0.024	-0.025	-0.025	-0.029	-0.014	-0.032	-0.028	-0.026	-0.032	-0.03	-0.001	-0.031	-0.032	-0.012	-0.032	-0.032	-0.015	-0.032	-0.032	-0.017	-0.032
64	-0.024	-0.025	-0.025	-0.029	-0.014	-0.032	-0.028	-0.026	-0.032	-0.03	-0.001	-0.031	-0.032	-0.012	-0.032	-0.032	-0.015	-0.032	-0.032	-0.017	-0.032
65	-0.024	-0.025	-0.025	-0.029	-0.014	-0.033	-0.028	-0.026	-0.033	-0.03	-0.001	-0.031	-0.033	-0.012	-0.033	-0.032	-0.015	-0.033	-0.033	-0.017	-0.033
66	-0.024	-0.025	-0.025	-0.029	-0.014	-0.034	-0.028	-0.026	-0.034	-0.03	-0.001	-0.031	-0.034	-0.012	-0.033	-0.032	-0.015	-0.034	-0.034	-0.017	-0.034
67	-0.024	-0.025	-0.025	-0.029	-0.014	-0.034	-0.028	-0.026	-0.034	-0.03	-0.001	-0.031	-0.034	-0.012	-0.033	-0.032	-0.015	-0.034	-0.034	-0.017	-0.034
68	-0.024	-0.025	-0.025	-0.029	-0.014	-0.034	-0.028	-0.026	-0.034	-0.03	-0.001	-0.031	-0.035	-0.012	-0.033	-0.032	-0.015	-0.035	-0.035	-0.017	-0.035
69	-0.024	-0.025	-0.025	-0.029	-0.014	-0.034	-0.028	-0.026	-0.034	-0.03	-0.001	-0.031	-0.035	-0.012	-0.033	-0.032	-0.015	-0.035	-0.035	-0.017	-0.035
70	-0.024	-0.025	-0.025	-0.029	-0.014	-0.034	-0.028	-0.026	-0.034	-0.03	-0.001	-0.031	-0.036	-0.012	-0.033	-0.032	-0.015	-0.035	-0.035	-0.017	-0.036
71	-0.024	-0.025	-0.025	-0.029	-0.014	-0.034	-0.028	-0.026	-0.034	-0.03	-0.001	-0.031	-0.036	-0.012	-0.033	-0.032	-0.015	-0.035	-0.035	-0.017	-0.037

[illegible]

dV/dQ	1	2	3	12	14	15	18	19	20	21	22	23	24	25	27	28	29	30	31
63	0	-0.005	-0.004	-0.001	-0.002	-0.002	-0.006	-0.002	-0.003	-0.007	-0.003	-0.008	-0.014	-0.004	-0.014	-0.005	-0.005	-0.013	-0.006
64	0	-0.005	-0.004	-0.001	-0.002	-0.002	-0.006	-0.002	-0.003	-0.007	-0.003	-0.008	-0.014	-0.004	-0.014	-0.005	-0.005	-0.013	-0.006
65	0	-0.005	-0.004	-0.001	-0.002	-0.002	-0.006	-0.002	-0.003	-0.007	-0.003	-0.008	-0.014	-0.004	-0.014	-0.005	-0.005	-0.013	-0.006
66	0	-0.005	-0.004	-0.001	-0.002	-0.002	-0.006	-0.002	-0.003	-0.007	-0.003	-0.008	-0.014	-0.004	-0.014	-0.005	-0.005	-0.013	-0.006
67	0	-0.005	-0.004	-0.001	-0.002	-0.002	-0.006	-0.002	-0.003	-0.007	-0.003	-0.008	-0.014	-0.004	-0.014	-0.005	-0.005	-0.013	-0.006
68	0	-0.005	-0.004	-0.001	-0.002	-0.002	-0.006	-0.002	-0.003	-0.007	-0.003	-0.008	-0.014	-0.004	-0.014	-0.005	-0.005	-0.013	-0.006
69	0	-0.005	-0.004	-0.001	-0.002	-0.002	-0.006	-0.002	-0.003	-0.007	-0.003	-0.008	-0.014	-0.004	-0.014	-0.005	-0.005	-0.013	-0.006
70	0	-0.005	-0.004	-0.001	-0.002	-0.002	-0.006	-0.002	-0.003	-0.007	-0.003	-0.008	-0.014	-0.004	-0.014	-0.005	-0.005	-0.013	-0.006
71	0	-0.005	-0.004	-0.001	-0.002	-0.002	-0.006	-0.002	-0.003	-0.007	-0.003	-0.008	-0.014	-0.004	-0.014	-0.005	-0.005	-0.013	-0.006

[illegible]

dV/dQ	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
63	-0.008	-0.002	-0.011	-0.003	-0.007	-0.011	-0.015	-0.01	-0.009	-0.016	-0.004	-0.003	-0.01	-0.011	-0.01	0	-0.009	-0.009	-0.012
64	-0.008	-0.002	-0.011	-0.003	-0.007	-0.011	-0.015	-0.01	-0.009	-0.016	-0.004	-0.003	-0.01	-0.011	-0.01	0	-0.009	-0.009	-0.012
65	-0.008	-0.002	-0.011	-0.003	-0.007	-0.011	-0.015	-0.01	-0.009	-0.016	-0.004	-0.003	-0.01	-0.011	-0.01	0	-0.009	-0.009	-0.012
66	-0.008	-0.002	-0.011	-0.003	-0.007	-0.011	-0.015	-0.01	-0.009	-0.016	-0.004	-0.003	-0.01	-0.011	-0.01	0	-0.009	-0.009	-0.012
67	-0.008	-0.002	-0.011	-0.003	-0.007	-0.011	-0.015	-0.01	-0.009	-0.016	-0.004	-0.003	-0.01	-0.011	-0.01	0	-0.009	-0.009	-0.012
68	-0.008	-0.002	-0.011	-0.003	-0.007	-0.011	-0.015	-0.01	-0.009	-0.016	-0.004	-0.003	-0.01	-0.011	-0.01	0	-0.009	-0.009	-0.012
69	-0.008	-0.002	-0.011	-0.003	-0.007	-0.011	-0.015	-0.01	-0.009	-0.016	-0.004	-0.003	-0.01	-0.011	-0.01	0	-0.009	-0.009	-0.012
70	-0.008	-0.002	-0.011	-0.003	-0.007	-0.011	-0.015	-0.01	-0.009	-0.016	-0.004	-0.003	-0.01	-0.011	-0.01	0	-0.009	-0.009	-0.012
71	-0.008	-0.002	-0.011	-0.003	-0.007	-0.011	-0.015	-0.01	-0.009	-0.016	-0.004	-0.003	-0.01	-0.011	-0.01	0	-0.009	-0.009	-0.012

[illegible]

dV/dQ	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
63	-0.012	-0.012	-0.013	-0.015	-0.007	-0.016	-0.014	-0.013	-0.016	-0.015	-0.001	-0.015	-0.016	-0.006	-0.016	-0.016	-0.008	-0.016	-0.016	-0.009	-0.016
64	-0.012	-0.012	-0.013	-0.015	-0.007	-0.016	-0.014	-0.013	-0.016	-0.015	-0.001	-0.015	-0.016	-0.006	-0.016	-0.016	-0.008	-0.016	-0.016	-0.009	-0.016
65	-0.012	-0.012	-0.013	-0.015	-0.007	-0.016	-0.014	-0.013	-0.016	-0.015	-0.001	-0.015	-0.016	-0.006	-0.016	-0.016	-0.008	-0.016	-0.016	-0.009	-0.016
66	-0.012	-0.012	-0.013	-0.015	-0.007	-0.017	-0.014	-0.013	-0.017	-0.015	-0.001	-0.015	-0.017	-0.006	-0.016	-0.016	-0.008	-0.017	-0.017	-0.009	-0.017
67	-0.012	-0.012	-0.013	-0.015	-0.007	-0.017	-0.014	-0.013	-0.017	-0.015	-0.001	-0.015	-0.017	-0.006	-0.016	-0.016	-0.008	-0.017	-0.017	-0.009	-0.017
68	-0.012	-0.012	-0.013	-0.015	-0.007	-0.017	-0.014	-0.013	-0.017	-0.015	-0.001	-0.015	-0.017	-0.006	-0.016	-0.016	-0.008	-0.017	-0.017	-0.009	-0.017
69	-0.012	-0.012	-0.013	-0.015	-0.007	-0.017	-0.014	-0.013	-0.017	-0.015	-0.001	-0.015	-0.018	-0.006	-0.016	-0.016	-0.008	-0.017	-0.018	-0.009	-0.018
70	-0.012	-0.012	-0.013	-0.015	-0.007	-0.017	-0.014	-0.013	-0.017	-0.015	-0.001	-0.015	-0.018	-0.006	-0.016	-0.016	-0.008	-0.017	-0.018	-0.009	-0.018
71	-0.012	-0.012	-0.013	-0.015	-0.007	-0.017	-0.014	-0.013	-0.017	-0.015	-0.001	-0.015	-0.018	-0.006	-0.016	-0.016	-0.008	-0.017	-0.018	-0.009	-0.018

Κατάλογος Δημοσιεύσεων

Άρθρα σε Επιστημονικά Περιοδικά

1. Theodoropoulos T., Pantazopoulos P., Karfopoulos E., Lytrivis P., Karaseitanidis I, Amditis A (2022). **Proportionally fair and scalable EV charging under distribution line voltage constraints** *Elsevier Electric Power Systems Journal*
2. Theodoropoulos T., Damousis I., Amditis A. (2016). **Demand-side management ICT for dynamic wireless EV charging** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Pages 6623–6630

Άρθρα σε Επιστημονικά Βιβλία

1. Masuch N., Eryilmaz E., Küster T., Pletat U., Fähndrich J., Theodoropoulos T., Koukovini M., Hadjidimitriou S., Dellas N. **Decentralized Service Platform for Interoperable Electro-Mobility Services Throughout Europe** *Springer: Towards User-Centric Transport in Europe* 2

Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Συνεδρίων

1. D. Naberezhnykh, N. Reed, F. Ognissanto, T. Theodoropoulos, and H. Bludszuweit. (2014). **Operational requirements for dynamic wireless power transfer systems for electric vehicles**. In *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*. IEEE, 2014
2. Theodoros Theodoropoulos, Angelos Amditis, Jesús Sallán, Hans Bludszuweit, Boris Berseneff, Paolo Guglielmi, and Francesco Deflorio (2014). **Impact of dynamic ev wireless charging on the grid** In *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, pages 1–7. IEEE, 2014
3. Amditis, Angelos and Theodoropoulos, Theodoros and Damousis, Yannis and Sallan, Jesus and Bludszuweit, Hans (2015). **FABRIC’s approach towards the estimation of energy storage system requirements for grid impact reduction** *2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*
4. Oussama Smiai, Francesco Bellotti, Riccardo Berta, Alessandro De Gloria, Andrew Winder, Theodoros Theodoropoulos, Yannis Damousis, Ramon S. Schwartz, Nadim

- El Sayed, Stéphane Laporte, and Marc Revilloud. (2018). **Developing ICT solutions for dynamic charging of electric vehicles.** *Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society*, pages 51–58, Cham, 2018. Springer International Publishing.
5. Amditis, A and Theodoropoulos, T and Brusaglino, G and Rizzo, R and Di Noia, LP and Rodella, G and Oceano, A (2017). **Energy management optimization within the Electric Mobility system** 2017 6th IEEE International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), pages 110–116.
 6. Theodoros Theodoropoulos, Yannis Damousis, and Angelos Amditis (2015). **A load balancing control algorithm for ev static and dynamic wireless charging** In 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pages 1–5. IEEE, 2015
 7. Theodoropoulos T, Damousis I, Portouli E, Amditis A, El Sayed N., Laporte S (2016). **Analysis of AIMD-based DSM for EV wireless charging on the move** IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles, International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). 2016.